



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Βελτίωση αλληλεπίδρασης χρηστών-συστημάτων Εικονικής
Πραγματικότητας: ακουστικό σύστημα εντοπισμού και
εύχρηστες συσκευές αλληλεπίδρασης**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννης Α. Καρασεϊτανίδης

Αθήνα, Αύγουστος 2006



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Βελτίωση αλληλεπίδρασης χρηστών-συστημάτων Εικονικής
Πραγματικότητας: ακουστικό σύστημα εντοπισμού και
εύχρηστες συσκευές αλληλεπίδρασης**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννης Α. Καρασεϊτανίδης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου

Δήμητρα Ι. Κακλαμάνη

Άγγελος Ι. Αμδίτης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Οκτωβρίου 2006.

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δήμητρα-Θεοδώρα Κακλαμάνη
Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Στέφανος Κόλλιας
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ανδρέας-Γεώργιος Σταφυλοπάτης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Παναγιώτης Φράγκος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κωνσταντίνα Νικήτα
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Μιχαήλ-Γεράσιμος Στρίντζης
Καθ. ΑΠΘ

Αθήνα, Αύγουστος 2006

.....
Ιωάννης, Α. Καρασεϊτανίδης

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιωάννης, Α. Καρασεϊτανίδης, 2006.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία της Εικονικής Πραγματικότητας έχει αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Ως αποτέλεσμα, έχουν ενταθεί οι ερευνητικές προσπάθειες για την τεχνολογική βελτίωση των επιμέρους τμημάτων των συστημάτων της. Ο βαθμός επιτυχίας των συστημάτων αυτών κρίνεται κυρίως από την αίσθηση της παρουσίας του χρήστη στον Εικονικό Κόσμο, που βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με τη δυνατότητα εύκολης πλοήγησης και αποδοτικής αλληλεπίδρασης με τα εικονικά ή μη αντικείμενα του Κόσμου. Καθοριστικός παράγοντας για τα παραπάνω είναι το εκάστοτε σύστημα εντοπισμού θέσης ή (και) κατεύθυνσης του χρήστη και η συσκευή αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιείται.

Ο στόχος της διατριβής κινείται προς δύο κατευθύνσεις: α) την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που παρέχουν τα ακουστικά κύματα και οι διάφοροι μέθοδοι εντοπισμού και μετρήσεων απόστασης στόχου για την υλοποίηση ενός συστήματος εντοπισμού με ιδιαίτερα αυξημένες επιδόσεις ως προς την εκτίμηση θέσης και β) τη δημιουργία, τον έλεγχο και την πιστοποίηση κατευθυντήριων γραμμών που επιτρέπουν το σχεδιασμό και υλοποίηση συσκευών αλληλεπίδρασης με ενισχυμένα χαρακτηριστικά χρηστικότητας και εργονομίας.

Για την υλοποίηση του πιο πάνω στόχου εξετάζονται διάφορες τεχνικές εντοπισμού (κεντροειδής, πρώτης άφιξης), σε συνδιασμό με διαφορετικές μεθόδους επιλογής κατωφλίων εντοπισμού (σταθερό κατώφλι, μέθοδος σταθερού αριθμού εσφαλμένων συναγερμών). Έτσι, η διατριβή καταλήγει στην πρόταση μιας μεθόδου επεξεργασίας μετρήσεων που λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά διάδοσης των ακουστικών κυμάτων, προσφέρει υψηλότερη ακρίβεια στον εντοπισμό θέσης και μεγάλη, σχετικά με τη διεθνή βιβλιογραφία, περιοχή εμβέλειας. Αφετέρου, προτείνεται μια ανθρωποκεντρική μέθοδος σχεδιασμού συσκευών αλληλεπίδρασης. Οι δύο προτεινόμενες λύσεις (ως προς το σύστημα εντοπισμού και τις συσκευές αλληλεπίδρασης) εφαρμόζονται πρακτικά και οδηγούν στη δημιουργία δύο αντίστοιχων πρωτοτύπων. Ο έλεγχος αυτών, αποδεικνύει την ορθότητα τόσο της θεωρητικής ανάλυσης της διατριβής για το σύστημα εντοπισμού όσο και των προτεινόμενων κατευθυντήριων γραμμών για την υλοποίηση συσκευών αλληλεπίδρασης. Οι βασικές καινοτομίες που εισάγει η διατριβή συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Εφαρμογή κατάλληλου συνδυασμού του αλγορίθμου του κεντροειδούς εντοπισμού με τη μέθοδο του σταθερού ρυθμού εσφαλμένων συναγερμών για την ακριβή διόρθωση των μετρήσεων απόστασης με ακουστικούς αισθητήρες
- Εφαρμογή μεθόδων τριμεροποίησης που παρέχουν υψηλή ακρίβεια εντοπισμού θέσης χάρη στις ιδιαίτερα ακριβείς μετρήσεις θέσης
- Εφαρμογή αλγορίθμων επεξεργασίας που επιτρέπουν, σε πραγματικό χρόνο, ένα υψηλό ρυθμό ανανέωσης συντεταγμένων θέσης του στόχου και μικρή καθυστέρηση.
- Διατύπωση και επαλήθευση μέσω εφαρμογής, κατευθυντήριων γραμμών για το σχεδιασμό και υλοποίηση συσκευών αλληλεπίδρασης.

ABSTRACT

Virtual Reality technology has rapidly evolved through the last years. As a consequence, research efforts for the technological advance of different VR systems' subcomponents have been intense. The success of VR systems mainly depends on the achieved feeling of Presence to their users. This feeling lies on many different parameters but is mainly enhanced by providing the user with advanced navigation features in the Virtual World and by facilitating his interaction with the objects in it. The deployment of both an accurate tracking system which tracks the position and/or the orientation of the user and a usable interaction device are crucial factors in this direction.

The thesis scope is two-fold: a) to take full advantage of the acoustic waves' capabilities by applying different tracking methods and distance measurement techniques for the design of an advanced acoustic tracking system and b) the creation, validation and verification of generic guidelines to facilitate the design of input devices with advanced ergonomics and usability characteristics.

To achieve the aforementioned, the thesis examines different tracking methods (centroid, lead-edge tracking) in combination with different cutoff selection procedures (constant cutoff, constant false alarm rate method). The author proposes finally a signal processing method which incorporates the acoustic wave propagation characteristics in an efficient way, being able to provide both a high accuracy on the estimation of the target position and an admissible large operational area, according to international literature on the field. The thesis also comes up with a user-centred approach for the design of prototype input devices for VR. The two proposed solutions (concerning the acoustic tracking system and the input devices) go beyond theoretical analysis into practical realization, leading to two new prototypes, an acoustic tracking system and an input device. A series of individual tests come to validate both the thesis' theoretical analysis for the tracking system design and the proposed guidelines for input devices' design. The basic innovations the thesis introduces are summarized as follows:

- Development and implementation of a centroid tracking algorithm in combination with a Constant False Alarm Rate technique, which allows the accurate correction of simultaneous range measurements from different acoustic transducers
- Efficient trilateration algorithm implementation, which provides high accuracy on the estimation of target position due to the precise range measurements
- Implementations of realtime data processing algorithms which allow high target coordinate update rate and a small lag.
- Development and verification of concrete guidelines for the design and development of new VR input devices.

Ευχαριστίες

Η διατριβή αποτελεί μεν, αποτέλεσμα της προσωπικής εργασίας του συγγραφέα, αλλά η εκπόνησή της δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη βοήθεια πολλών ανθρώπων τους οποίους θα προσπαθήσω να ονοματίσω με την ελπίδα να μην παραλείψω κανένα. Αυτό είναι το μοναδικό σημείο της διατριβής που θα κάνω χρήση του πρώτου ενικού προσώπου γιατί οι ευχαριστίες είναι αληθινές και προσωπικές.

Η διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών του ΕΜΠ. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθ. Ν. Ουζούνoglou, και την Αν. Καθ. Δ. Κακλαμάνη, για την ευκαιρία που μου έδωσαν, την καθοδήγηση που μου παρείχαν και την υπομονή που επέδειξαν. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Δρ. Α. Αμδίτη, επικεφαλής της ερευνητικής ομάδας I-SENSE στα πλαίσια των ερευνητικών προσπαθειών της οποίας εκπονήθηκε η διατριβή, για την αποφασιστική συμβολή του στην περάτωση της διατριβής και για τη στήριξή του σε όλο αυτό το διάστημα. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον φίλο μου Δρ. Άρη Πολυχρονόπουλο για τη βοήθεια του σε τεχνικό αλλά και ηθικό επίπεδο σε πάρα πολλά σημεία της διατριβής. Ευχαριστώ θερμά τον φίλο μου Δρ. Νίκο Παρασκευόπουλο για τις πολυάριθμες φορές που με βοήθησε στη σχεδίαση των ηλεκτρονικών μερών του συστήματος εντοπισμού, ακόμα και στο τελικό στάδιο της διατριβής του. Ευχαριστώ τον Ηλ. Μηχανικό και φίλο Κώστα Λούπο για τη βοήθεια του με τον ψηφιακό επεξεργαστή σήματος. Ευχαριστώ ιδιαίτερα το Θανάση Γιδά για τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, που χωρίς αυτόν θα ήταν αδύνατα αλλά και για την υπομονή του όταν τον εκδιώχνα από το χώρο εργασίας του για να κάνω τις μετρήσεις. Ευχαριστώ τον Γιάννη Κασσιωτάκη για τη βοήθειά του στα πειράματα κινούμενου στόχου. Ευχαριστώ τους Ηλ. Μηχανικούς Γιάννη Γκέκα και Γιώργο Γιλέκα για τη βοήθεια τους στην περάτωση της διατριβής. Ευχαριστώ τον Αναστάση Τζούμπα για τη βοήθεια του στην υλοποίηση των πειραμάτων της συσκευής αλληλεπίδρασης. Ευχαριστώ τους Hilko Hoffmann (Fraunhofer-IAO), Oliver Stefani (University of Basel), Harshada Patel, Sarah Sharples και Mirabelle D'Cruz (University of Nottingham) για τη συνεργασία μας στην υλοποίηση και τον πειραματικό έλεγχο της πρωτότυπης συσκευής.

Ευχαριστώ τους στενούς μου φίλους Ηλ. Μηχανικούς Νίκο Σιέντο και Χρήστο Κουλουμέντα για τη στήριξη που μου παρείχαν αυτά τα τελευταία δύσκολα χρόνια και τη βοήθειά τους σε οτιδήποτε χρειάστηκα. Ευχαριστώ θερμά τη Νίκη Γεωργίου για τη βοήθειά της στη μορφοποίηση του τελικού κειμένου αλλά κυρίως για τη στήριξή της σε όλο το διάστημα εκπόνησης της διατριβής. Ευχαριστώ και όλα τα μέλη του ΕΜΟΙ για τη συνεργασία μας στο διάστημα εκπόνησης της διατριβής (2001-2006).

Τέλος, αλλά πάνω απ'όλα ευχαριστώ τους γονείς μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρείχαν αυτά τα χρόνια και την πίστη τους σε μένα. Η διατριβή αφιερώνεται στον εκλιπόντα πατέρα μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ	13
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	15
I. ΘΕΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	23
1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	23
1.1.1 Γενικά στοιχεία-Ορισμοί	23
1.1.2 Συνηθισμένα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας	25
1.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ	30
1.2.1 Χαρακτηριστικές παράμετροι	31
1.2.2 Τεχνολογίες συστημάτων εντοπισμού	34
1.2.3 Συγκριτική επισκόπηση – υβριδικά συστήματα	53
1.3 ΦΥΣΙΚΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΕ ΕΙΚΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ	58
1.3.1 Συσκευές και μενού αλληλεπίδρασης	58
1.3.2 Ανάγκες για νέες μεθόδους υλοποίησης μεταφορών αλληλεπίδρασης	61
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.1	64
II. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΜΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ	69
2.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	69
2.2 ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ	71
2.2.1 Ταχύτητα διάδοσης ακουστικών κυμάτων	73
2.2.2 Εξασθένηση των ακουστικών κυμάτων στον αέρα	77
2.2.3 Κοντινό πεδίο ακουστικών πομπών	80
2.2.4 Ανάκλαση-Διάθλαση-Περίθλαση	81
2.2.5 Ακουστικοί πομποδέκτες - Μεγάφωνα και Μικρόφωνα	83
2.3 ΤΡΙΜΕΡΟΠΟΙΗΣΗ	94
2.3.1 Τοπολογίες «μέσα-έξω» και «έξω-μέσα»	96
2.3.2 Τοπολογία 1-3	96
2.3.3 Μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων για τοπολογία 1-3	99
2.3.4 Αλγεβρική επίλυση για τοπολογία 1-3	101
2.3.5 Τοπολογία 3-3	105
2.3.6 Τοπολογία 1-n	107
2.3.7 Μέθοδος από κοινού μέγιστης πιθανοφάνειας σε σύστημα 1-n	109
2.4 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ	112
2.5 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΞΩΓΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	115
2.6 ΕΚΤΙΜΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ KALMAN	116
2.6.1 Πρόβλημα Δυναμικής Εκτίμησης	116
2.6.2 Μη γραμμικό φίλτρο Kalman	118
2.6.3 Unscented φίλτρο Kalman	119
2.6.4 Φίλτρα πολλαπλών μοντέλων Kalman	121
2.6.5 Φίλτρο Αλληλεπιδρώντων Πολλαπλών Μοντέλων (IMM)	123
2.6.6 Συζήτηση	127
2.7 ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΣΗΣ	128
2.7.1 Μοντέλο Σταθερής Ταχύτητας (Constant Velocity – CV)	132
2.7.2 Μοντέλο Σταθερής Επιτάχυνσης (Constant Acceleration – CA)	133
2.7.3 Μοντέλο Σταθερής Γωνιακής Ταχύτητας – 3Δ (3D Constant Turn Rate – CTR)	134
2.7.4 Μοντέλο Επιτάχυνσης Singer	138
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2.1 – ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΗΧΟΥ	142
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2.2– ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ESCOBAL ΓΙΑ ΤΗ ΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΤΡΙΜΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ	145

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2.3 – ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ.....	147
III. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ	149
3.1 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	149
3.1.1 Απαιτήσεις.....	149
3.1.2 Προδιαγραφές Επίδοσης Συστήματος.....	155
3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	156
3.2.1 Το εκπεμπόμενο σήμα.....	156
3.2.2 Πομποδέκτες.....	159
3.2.3 Πομπός.....	160
3.2.4 Δέκτης.....	175
3.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	182
3.3.1 DSP TMS320.....	183
3.3.2 DAC PCI6110.....	184
3.3.3 Εύρεση απόστασης πομπού-δέκτη.....	186
3.3.4 Επιλογή κατωφλίου.....	195
3.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	200
3.4.1 Περιοχή λειτουργίας.....	201
3.4.2 Προβλήματα παρεμβολών.....	205
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3.1 – ΔΥΝΑΤΕΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΕΣ ΤΟΥ 74LS90.....	209
IV. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ, ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	211
4.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΠΟΜΠΟΥ-ΔΕΚΤΗ.....	211
4.1.1 Σκοπός του πειράματος.....	211
4.1.2 Διαδικασία πειράματος.....	212
4.1.3 Πρώτη φάση μετρήσεων.....	213
4.1.4 Δεύτερη φάση μετρήσεων.....	221
4.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΤΡΙΜΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	234
4.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	234
4.2.2 Συζήτηση.....	240
4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΘΕΣΗΣ.....	242
4.3.1 Μετρήσεις με ακίνητο στόχο.....	242
4.3.2 Μετρήσεις με κινούμενο στόχο.....	257
4.4 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ-ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	262
V. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ.....	267
5.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	268
5.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΡΧΙΚΩΝ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ ΑΠΟ ΕΜΠΕΙΡΟΥΣ ΧΡΗΣΤΕΣ.....	271
5.3 ΠΡΩΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ.....	275
5.3.1 Εξεταζόμενα Εικονικά Περιβάλλοντα.....	275
5.3.2 Καθορισμός πειραματικής διαδικασίας.....	277
5.3.3 Αποτελέσματα.....	279
5.4 ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΕΙΡΑΜΑ.....	281
5.4.1 Σχεδιασμός και Υλοποίηση της «Σφήκας».....	282
5.4.2 Σκοπός και λεπτομέρειες του Πειράματος.....	284
5.4.3 Διαδικασία.....	285
5.4.4 Αποτελέσματα.....	286
5.5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	289
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5.1 – ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΝΑ ΖΕΥΓΗ.....	293
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	295
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	298
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	302
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	303
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ.....	319

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

Παραθέτουμε ένα πίνακα με τις βασικές συντομογραφίες που χρησιμοποιεί η διατριβή στην αγγλική γλώσσα (εκτός μίας) και τις επεξηγήσεις αυτών στα αγγλικά και ελληνικά. Επιπλέον αναφέρουμε τους βασικούς αγγλικούς όρους των οποίων την ελληνική μετάφραση χρησιμοποιούμε συχνά στη διατριβή.

Συντομογραφία	Αντιστοίχιση	Επεξήγηση
AR	Augmented Reality	Επαυξημένη Πραγματικότητα
CAD	Computer Aided Design	Σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή
CFAR	Constant False Alarm Rate	Σταθερός ρυθμός εσφαλμένων συναγερμών
CRT	Cathod Ray Tube	Οθόνες καθοδικού σωλήνα
CW	Continuous Wave	Συνεχές κύμα
DAC	Data Acquisition Card	Ψηφιακή κάρτα δειγματοληψίας
DOF	Degrees of Freedom	Βαθμοί ελευθερίας
DSP	Digital Signal Processor	Ψηφιακός επεξεργαστής σήματος
EKF	Extended Kalman Filter	Μη γραμμικό φίλτρο Kalman
EMOI		Εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών
FOV	Field Of View	Πεδίο όρασης
GPS	Global Positioning System	Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού
HMD	Head Mounted Display	Συσκευή απεικόνισης προσαρμοσμένη στο κεφάλι
IMM	Interacting Multiple Model	Αλληλεπιδρούμενο πολλαπλό μοντέλο
ISR	Interrupt Service Routine	Συνάρτηση εξυπηρέτησης διακοπής
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems	Μικροηλεκτρονικά μηχανικά συστήματα
MIPS	Million Instructions Per Second	Εκατομμύρια εντολές ανά δευτερόλεπτο
ML	Maximum Likelihood	Μέθοδος μεγίστης πιθανοφάνειας
PC	Phase Coherent	Σύστημα που στηρίζεται στη μέτρηση διαφοράς φάσης
PCI	Peripheral Component Interconnect	Διεπαφή περιφερειακών συσκευών με υπολογιστή
SMT	Surface Mount	Ηλεκτρονικά στοιχεία επιφάνειας
SPL	Sound Pressure Level	Μέγιστο επίπεδο πίεσης για ακουστικούς πομποδέκτες
SWL	Sound poWer Level	Μέγιστο επίπεδο ισχύος για ακουστικούς πομποδέκτες
TBCA	Theme Based Content Analysis	Θεματική ανάλυση περιεχομένου
TDOA	Time Difference Of Arrival	Χρονική διαφορά άφιξης σήματος σε δύο σημεία
TOF	Time Of Flight	Χρόνος διαδρομής σήματος
tracking	tracking	Ο εντοπισμός της θέσης ή/και κατεύθυνσης ενός στόχου
VE	Virtual Environment	Εικονικό περιβάλλον
VR	Virtual Reality	Εικονική πραγματικότητα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στις σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές είναι διαρκώς αυξανόμενη απαίτηση η αντικατάσταση των φυσικών πρωτοτύπων στη διαδικασία σχεδιασμού, υλοποίησης, ελέγχου και βελτιστοποίησης με άλλα εικονικά, για λόγους μείωσης του συνολικού κόστους, της απαιτούμενης εργασίας αλλά και για αύξηση της ασφάλειας των εμπλεκόμενων στις διαδικασίες αυτές. Η τεχνολογία της Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality-VR) αποτελεί μία λύση, μια και παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα ρεαλιστικής τρισδιάστατης απεικόνισης αντικειμένων. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια και η σχετική μείωση του κόστους που απαιτείται για την εφαρμογή της, έχουν διευρύνει τους ορίζοντες των εφαρμογών της. Έτσι, πλέον, χρησιμοποιείται ευρέως σε διαφορετικούς βιομηχανικούς τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, ο τομέας των κατασκευών, η βιομηχανία πηγών ενέργειας αλλά και σε διάφορους άλλους τομείς, όπως η ψυχαγωγία και η εκπαίδευση (π.χ. εικονικά μουσεία).

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας υπήρξε αρκετά αργή στο ξεκίνημά της, εξαιτίας κυρίως της εξάρτησής της από την εξέλιξη της επιστήμης των υπολογιστών. Την τελευταία δεκαετία παρατηρείται πλέον μια ραγδαία ανάπτυξη της, με ταυτόχρονη αύξηση των δυνατοτήτων που αυτή παρέχει. Εντούτοις, οι αυξανόμενες τεχνολογικές δυνατότητες δεν συνάδουν απαραίτητα με τη μεγαλύτερη χρησιμότητα των παρεχόμενων λύσεων. Και η χρησιμότητα σε τομείς, όπου απαιτείται η αλληλεπίδραση του ανθρώπου με συνθήκες και περιβάλλοντα που δημιουργούνται με τη βοήθεια υπολογιστή ή υπολογιστών αποτελεί το βασικό κριτήριο για την επιτυχία αυτών.

Ο άνθρωπος (χρήστης) εμβυθίζεται σε ένα Εικονικό Περιβάλλον (Virtual Environment-VE) που δημιουργείται με τη βοήθεια ενός συστήματος Εικονικής Πραγματικότητας. Στο περιβάλλον αυτό έχει συνήθως τη δυνατότητα της πλοήγησης και της αλληλεπίδρασης με εικονικά ή μη αντικείμενα. Οποιαδήποτε δυσκολία σε μία από τις δύο αυτές διαδικασίες οδηγεί σε μια σειρά συμπτωμάτων (ναυτία, απογοήτευση, πλήξη, εννευρισμό, απώλεια προσανατολισμού) που διαφέρουν μεταξύ των χρηστών αλλά εμφανίζονται σχεδόν πάντα σε κάποιο βαθμό και για κάποιο διαφορετικό χρόνο παραμονής στο Εικονικό Περιβάλλον. Τα συμπτώματα αυτά έχουν ως αντίκτυπο τη μείωση της αίσθησης Παρουσίας (Presence) του χρήστη στο Εικονικό Περιβάλλον και την περιορισμένη αξιοποίηση των δυνατοτήτων που αυτό παρέχει. Οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες των τελευταίων χρόνων στον επιστημονικό τομέα της Εικονικής Πραγματικότητας έχουν εστιάσει στη βελτίωση της γραφικής αναπαράστασης των προβαλλόμενων εικόνων, και σε διαφορετικές τοπολογίες συστημάτων που επιτρέπουν καλύτερο συγχρονισμό μεταξύ χρήστη και περιβάλλοντος, αγνοώντας άλλες εξίσου σημαντικές παραμέτρους.

Τα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας παρουσιάζουν ιδιαίτερη ποικιλία τοπολογιών και περιφερειακών εισόδου και εξόδου, δίνοντας έτσι διαφορετικές δυνατότητες στο χρήστη τόσο για την πλοήγηση, όσο και για την αλληλεπίδραση με αυτά. Για την πλειονότητα των συστημάτων δύο

είναι τα προαπαιτούμενα για την υλοποίηση των δύο αυτών διεργασιών: ο εντοπισμός της θέσης (και ίσως της κατεύθυνσης) του χρήστη και η χρήση μιας κάποιας συσκευής αλληλεπίδρασης από αυτόν.

Ο εντοπισμός της θέσης και κατεύθυνσης του χρήστη αφορά κυρίως δύο σημεία του σώματος αυτού ή αντικειμένων προσαρτημένων με αυτόν: το κεφάλι του (και κατ' επέκταση τα μάτια του) και την οποιαδήποτε συσκευής αλληλεπίδρασης που κρατά συνήθως ανά χειράς. Στην πρώτη περίπτωση ο εντοπισμός θέσης είναι απαραίτητος για τη σωστή προβολή των εικόνων που συνθέτουν το Εικονικό Περιβάλλον, προσδίδοντας σε αυτές τα σωστά χαρακτηριστικά προοπτικής. Ο εντοπισμός κατεύθυνσης δίνει τη δυνατότητα στα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας (που υποστηρίζουν μια τέτοια διεργασία) να προσαρμόζουν τις προβαλλόμενες εικόνες στο, ανά περίπτωση, πεδίο όρασης του χρήστη. Στη δεύτερη περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη πως η συσκευή αλληλεπίδρασης είναι το βασικό μέσο για την πλοήγηση και την αλληλεπίδραση, ο εντοπισμός της θέσης και της κατεύθυνσης (ανά περίπτωση) της συγκεκριμένης συσκευής, είναι απαραίτητος για την υλοποίηση διεργασιών σε ένα Εικονικό Περιβάλλον.

Η διαδικασία του εντοπισμού (σε όσα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας υποστηρίζεται) μπορεί να γίνει με χρήση διαφόρων αισθητήρων. Στόχος είναι η, σε πραγματικό χρόνο και ακριβής, εκτίμηση της θέσης (και κατεύθυνσης) του στόχου. Οι βασικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι μηχανικοί, αδρανειακοί, αισθητήρες ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, οπτικοί, μικροκυματικοί και ακουστικοί. Η χρήση κάποιων αισθητήρων συνεπάγεται διαφορετική αρχή λειτουργίας του συστήματος εντοπισμού και διαφορετικά χαρακτηριστικά απόδοσης. Επιπρόσθετα, κάθε τεχνολογία διαθέτει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στην πάροδο του χρόνου δύο είναι οι βασικές τεχνολογίες που ξεχώρισαν και στηρίζονται στη χρήση μαγνητικών και οπτικών αισθητήρων αντίστοιχα. Αρχικά, μεγαλύτερη διάδοση εμφάνιζαν οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου, οι οποίοι πλέον έχουν φτάσει στα όρια των αποδόσεών τους. Η ερευνητική προσπάθεια τα τελευταία χρόνια επικεντρώνεται στη βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας των συστημάτων εντοπισμού οπτικών αισθητήρων και σε εύρεση διαφορετικών τοπολογιών και πιο αποδοτικών μεθόδων εντοπισμού με αυτούς. Εντούτοις, η μεγάλη πλέον ποικιλία των συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας και το μεγάλο κόστος των οπτικών συστημάτων εντοπισμού σε αυτά, επιβάλλει την περαιτέρω αξιοποίηση άλλων τεχνολογιών. Μια τέτοια αποτελούν και τα συστήματα εντοπισμού ακουστικών αισθητήρων.

Τα συστήματα εντοπισμού ακουστικών αισθητήρων στηρίζουν την αρχή λειτουργίας τους στον αλγόριθμο της τριμεροποίησης (trilateration). Αυτός αφορά στην εύρεση της θέσης ενός σημείου του στόχου, μετρώντας τις αποστάσεις αυτού από τρία σταθερά, με γνωστές συντεταγμένες, σημεία του περιβάλλοντος χώρου. Η λύση του συστήματος των τριών μη γραμμικών εξισώσεων δίνει τις συντεταγμένες του στόχου. Η χρήση τριών σημείων στο στόχο και η μέτρηση των εννέα κατ' αντιστοιχία αποστάσεων από τα τρία σταθερά σημεία, επιτρέπει τον προσδιορισμό των θέσεων και των τριών κινούμενων σημείων. Έχοντας, επιπλέον, γνωστή τη μεταξύ των σχετική θέση, είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε και την κατεύθυνση του στόχου. Προφανώς και υπάρχουν διαφορετικές

τοπολογίες διατάξεων αισθητήρων τόσο ως προς τον αριθμό αυτών όσο και ως προς τη θέση τους (πομποί ή δέκτες στα σταθερά σημεία).

Υπάρχουν διάφοροι παράμετροι που μπορούν να καθορίσουν τη λειτουργία και την απόδοση ενός συστήματος εντοπισμού με ακουστικά κύματα. Η ταχύτητα των ακουστικών κυμάτων στον αέρα δεν είναι σταθερή αλλά επηρεάζεται από περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, σχετική υγρασία) αλλά και από τη συχνότητα αυτών. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά υποφέρουν από τη σχετικά χαμηλή ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων (σε σχέση με κύματα υψηλότερων συχνοτήτων), που συνήθως οδηγεί σε μικρό ρυθμό ανανέωσης δεδομένων ως προς τις συντεταγμένες του στόχου. Ακόμα, τα συστήματα απαιτούν την ύπαρξη απευθείας οπτικής διαδρομής μεταξύ των πομπών και των δεκτών. Οποιοδήποτε εμπόδιο αποκόψει την οπτική αυτή συνιστώσα οδηγεί το σύστημα σε αστοχία. Επιπρόσθετα προβλήματα είναι η συνεισφορά του ακουστικού θορύβου, ο οποίος αλλοιώνει αρκετά τις μετρήσεις, η ανάγκη ενσύρματης επικοινωνίας μεταξύ των πομποδεκτών του συστήματος, καθώς και το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης του ακουστικού κύματος.

Τα προβλήματα αυτά οδήγησαν την τεχνολογία ακουστικού εντοπισμού σε απαξίωση σε σχέση με άλλες παρεμφερείς τεχνολογίες. Ο βασικός λόγος είναι η ευπάθεια των συστημάτων αυτών, ο χαμηλός ρυθμός ανανέωσης δεδομένων και η μικρή σχετικά εμβέλεια των συστημάτων.

Μία συσκευή εντοπισμού με μη βέλτιστα χαρακτηριστικά απόδοσης μπορεί να οδηγήσει το σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας σε μια σειρά ανεπιθύμητων ενεργειών όπως το τρεμόπαιγμα της εικόνας (jitter), η καθυστέρηση συγχρονισμού μεταξύ των κινήσεων του χρήστη και της προβαλλόμενης εικόνας (lag), η χωρική παραμόρφωση (spatial distortion) της προβαλλόμενης εικόνας, κ.ά. Αυτά τα φαινόμενα προκαλούν με τη σειρά τους τα προαναφερθέντα ανεπιθύμητα συμπτώματα στο χρήστη.

Η ορθή και αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος εντοπισμού, ανεξάρτητα της τεχνολογίας που αυτό χρησιμοποιεί, δεν οδηγεί από μόνη της σε μία εύρωστη λειτουργία ενός συστήματος Εικονικής Πραγματικότητας. Σημαντικό ρόλο σε αυτό, εκτός άλλων, παίζει και η συσκευή αλληλεπίδρασης που χειρίζεται ο χρήστης. Μια τέτοια συσκευή διαθέτει ενσωματωμένο ένα μέρος του συστήματος εντοπισμού. Τα χαρακτηριστικά τέτοιων συσκευών ποικίλουν ως προς το σχήμα, τη φιλοσοφία υλοποίησης, τις παρεχόμενες δυνατότητες, τον τρόπο λαβής τους, τη στήριξή τους, τον τρόπο χειρισμού τους και άλλα δευτερεύοντα χαρακτηριστικά. Αν στα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας παρατηρείται μια μεγάλη ποικιλία, η αντίστοιχη ποικιλία στις πιθανές συσκευές αλληλεπίδρασης είναι πολύ μεγαλύτερη.

Οι περισσότερες συσκευές αλληλεπίδρασης δημιουργούνται με βάση την εμπειρία των σχεδιαστών τους από τη χρήση παρόμοιων συσκευών στο παρελθόν και τις προτιμήσεις τους. Αποτέλεσμα είναι αφενός η πολύ μεγάλη διαφοροποίησή τους που οδηγεί τους χρήστες σε δυσκολίες ως προς την εξοικείωσή τους με αυτές, αφετέρου η έλλειψη καταγεγραμμένης γνώσης σε σχέση με κατευθυντήριες γραμμές ως προς το σχεδιασμό και την υλοποίηση τέτοιων συσκευών. Ως άμεσο αποτέλεσμα, το ερευνητικό πεδίο σχεδιασμού και υλοποίησης τέτοιων συσκευών είναι από τα πιο

δημοφιλή τα τελευταία χρόνια με αμφίβολα, εντούτοις, ως τώρα αποτελέσματα. Οι περισσότερες συσκευές αλληλεπίδρασης είτε είναι υπερβολικά προσαρμοσμένες σε συγκεκριμένα συστήματα και εφαρμογές, είτε πολύ δύσκολες ως προς την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας τους, με αποτέλεσμα την έλλειψη χρησιμότητας του Εικονικού Περιβάλλοντος από τον χρήστη.

Η βελτίωση της αλληλεπίδρασης του χρήστη με ένα Εικονικό Περιβάλλον είναι πολυσύνθετο πρόβλημα. Σε αυτό συνεισφέρουν όλες οι παράμετροι ενός συστήματος Εικονικής Πραγματικότητας. Αποφασιστικότερη όλων κρίνεται, όμως, η συμβολή του συστήματος εντοπισμού, όταν ένα τέτοιο χρησιμοποιείται, και αυτή της συσκευής αλληλεπίδρασης. Οποιαδήποτε τεχνολογική ή εργονομική αντίστοιχα βελτίωση σε αυτούς τους δύο τομείς είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα σύγχρονα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας

Αντικείμενο της διατριβής

Η διατριβή αυτή πραγματεύεται τη βελτίωση της αλληλεπίδρασης του χρήστη ενός Εικονικού Περιβάλλοντος με αυτό. Αυτό γίνεται με ενασχόληση με δύο διακριτά, μεταξύ τους, θέματα: αρχικά αναλύοντας, σχεδιάζοντας και υλοποιώντας ένα σύστημα εντοπισμού με χρήση ακουστικών αισθητήρων και στη συνέχεια υλοποιώντας μια ανθρωποκεντρική μέθοδο σχεδιασμού νέων συσκευών αλληλεπίδρασης, και εφαρμόζοντας αυτή στην υλοποίηση μιας πρωτότυπης τέτοιας συσκευής.

Ως προς το πρώτο σκέλος (που αποτελεί και το μεγαλύτερο μέρος της διατριβής), επιλέγεται η τεχνολογία των ακουστικών αισθητήρων ως βασική τεχνολογία εντοπισμού. Ο λόγος είναι πως, σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες, δεν έχει αξιοποιηθεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό, ενώ μια σειρά προβλημάτων που τη χαρακτηρίζουν επιδέχονται λύσης. Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή χαρακτηρίζεται από αισθητά μειωμένο κόστος, παρέχοντας μια πολύ καλή εναλλακτική λύση για εφαρμογές Εικονικής Πραγματικότητας.

Στα πλαίσια της διατριβής εξετάστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία ενός συστήματος ακουστικού εντοπισμού. Προτείνονται λύσεις, οι οποίες βοηθούν τέτοια συστήματα να αντισταθμίζουν την αστάθεια που προκαλούν στη λειτουργία τους οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Εξετάζονται διαφορετικές τοπολογίες και αναλύονται διεξοδικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθενός. Αναλύονται σε θεωρητικό επίπεδο οι διαφορετικοί (με και χωρίς μνήμη) αλγόριθμοι τριμεροποίησης για την εύρεση της θέσης του στόχου.

Βάσει της μελέτης που γίνεται στην αρχή της διατριβής, υλοποιείται ένα σύστημα εντοπισμού ακουστικών κυμάτων με σκοπό αφενός την εύρωστη λειτουργία, αφετέρου τη βέλτιστη ηλεκτρονική σχεδίαση. Στόχος, αρχικά, είναι η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εντοπισμού που θα ελαχιστοποιήσει την εκτίμηση των επιμέρους αποστάσεων πομπού-δεκτών. Υλοποιούνται δύο βασικοί αλγόριθμοι εντοπισμού: η μέθοδος πρώτης άφιξης (lead-edge tracking) και η μέθοδος του κεντροειδούς εντοπισμού (centroid tracking). Σε κάθε μία από αυτές γίνεται παραμετρική ανάλυση ως προς την τιμή του περιθωρίου κατωφλίου. Επιπρόσθετα, εφαρμόζεται μια τεχνική σταθερού ρυθμού εσφαλμένων συναγερωμών (Constant False Alarm Rate-CFAR), κατά την οποία το κατώφλι επαναπροσδιορίζεται σε κάθε εκπεμπόμενο παλμό. Μέσα από μια σειρά μετρήσεων επιβεβαιώνεται

πως η χρήση της μεθόδου CFAR σε συνδυασμό με τη μέθοδο του κεντροειδούς εντοπισμού, οδηγεί αφενός σε πολύ μεγάλη ακρίβεια ως προς τον εντοπισμό των αποστάσεων μεταξύ πομπού και δεικτών, αφετέρου σε σημαντική αύξηση της περιοχής εμβέλειας σε σύγκριση με τα αναφερόμενα στη διεθνή βιβλιογραφία για αντίστοιχα συστήματα. Η ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια στις μετρούμενες αποστάσεις οδηγεί αντίστοιχα σε πολύ καλά αποτελέσματα του ακολουθούμενου αλγόριθμου τριμεροποίησης (ενώ εξετάζεται ταυτόχρονα έστω και περιορισμένα η πιθανή εφαρμογή φίλτρων Kalman για τη βελτίωση της εκτίμησης). Το τελικό σύστημα, μέσα από μια σειρά βελτιώσεων, εφαρμόζεται σε πειράματα με κινητό και ακίνητο στόχο και δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ακρίβεια. Επιπρόσθετα η επιλεγόμενη τοπολογία και η διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων επιτρέπουν έναν αρκετά υψηλό ρυθμό ανανέωσης δεδομένων και μικρή ταυτόχρονα καθυστέρηση. Τέλος, η διατριβή προτείνει λύσεις για επεκτάσεις του συστήματος που μπορούν να φέρουν λύση σε μια σειρά ακόμη προβλημάτων των ακουστικών συστημάτων εντοπισμού με χρήση του παρόντος συστήματος.

Ως προς το δεύτερο σκέλος η διατριβή προτείνει μία ανθρωποκεντρική μέθοδο σχεδιασμού και υλοποίησης συσκευών αλληλεπίδρασης. Η μέθοδος απαρτίζεται από διάφορα στάδια, μεταξύ των οποίων, ο έλεγχος των πρωτοτύπων από έμπειρους χρήστες, η συγκριτική μελέτη της χρηστικότητας συσκευής σε συνδυασμό με διάφορα μενού αλληλεπίδρασης και Εικονικά Περιβάλλοντα και ο τελικός έλεγχος της χρηστικότητάς της από άπειρους χρήστες. Η διαδικασία εφαρμόστηκε για την υλοποίηση μιας νέας συσκευής αλληλεπίδρασης (με το όνομα «Σφήκα»). Στα πλαίσια της υλοποίησης της συσκευής αυτής στάθηκε δυνατή, η καταγραφή κατευθυντήριων γραμμών για μελλοντικά σχεδιαζόμενες συσκευές αλληλεπίδρασης, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό για ένα τόσο πολυποίκιλο χώρο. Η τελική συσκευή, που υλοποιήθηκε ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία και αυτές τις κατευθυντήριες γραμμές, ελέγχθηκε σε αντιπαραβολή με μία πολύ διαδεδομένη συσκευή και επικράτησε με ευκολία ως προς τη χρηστικότητα και τα εργονομικά χαρακτηριστικά της. Η συσκευή αυτή αποτελεί, πλέον, την πρώτη από μία νέα σειρά συσκευών αλληλεπίδρασης.

Συνοψίζοντας τις καινοτομίες που εισάγει η συγκεκριμένη διατριβή θα μπορούσε να σταθεί κανείς στα ακόλουθα:

1. Στην εφαρμογή της μεθόδου σταθερού ρυθμού εσφαλμένων συναγερμών σε συνδυασμό με τη μέθοδο του κεντροειδούς εντοπισμού που οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια ως προς τον υπολογισμό των αποστάσεων του πομπού από τους τρεις δέκτες.
2. Στα χαρακτηριστικά απόδοσης του συστήματος που επιτυγχάνει πολύ υψηλή ακρίβεια ως προς τον εντοπισμό της θέσης του στόχου, σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή εμβέλειας με ικανοποιητικό ρυθμό ανανέωσης δεδομένων και μικρή καθυστέρηση.
3. Στην διατύπωση μιας μεθοδολογίας σχεδιασμού και υλοποίησης συσκευών αλληλεπίδρασης. Αυτή έδωσε τη δυνατότητα να προκύψουν κατευθυντήριες γραμμές

για το σχεδιασμό τέτοιων συσκευών, οι οποίες επαληθεύτηκαν από την υψηλή αποδοχή της πρωτότυπης συσκευής που υλοποιήθηκε βάσει αυτών.

Δομή της διατριβής

Η διατριβή είναι δομημένη σε πέντε αλληλοσυμπληρούμενα κεφάλαια. Το **πρώτο κεφάλαιο** παρουσιάζει τους βασικούς όρους της τεχνολογίας Εικονικής Πραγματικότητας. Αυτό είναι απαραίτητο για την εξοικείωση του αναγνώστη με τις βασικές ορολογίες της τεχνολογίας που χρησιμοποιούνται σε όλη τη διατριβή. Παρουσιάζονται εν συντομία τα βασικά τμήματα των συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας, δίνοντας έμφαση σε αυτά που θέτουν απαιτήσεις ή καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των συστημάτων εντοπισμού. Αναλύονται οι διάφορες τεχνολογίες εντοπισμού που χρησιμοποιούνται στα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθενιάς, ενώ γίνεται και μία συγκριτική επισκόπηση τους. Τέλος, δίνονται πληροφορίες για τη χρήση, χρηστικότητα και αναγκαιότητα των συσκευών αλληλεπίδρασης και παρέχονται πληροφορίες για τις σύγχρονες εξελίξεις στο χώρο αυτό. Μέσα από το κεφάλαιο γίνεται προφανής η ανάγκη για τη δημιουργία κατευθυντήριων γραμμών ως προς την υλοποίηση των συσκευών αυτών.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας ενός συστήματος ακουστικού εντοπισμού. Εξηγούνται και αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά της διάδοσης του ήχου που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη σχεδίαση του συστήματος. Επίσης, αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μικροφώνων και μεγαφώνων, μια και αυτά αποτελούν τους πομποδέκτες του συστήματος. Έμφαση δίνεται στους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς που θα χρησιμοποιηθούν. Στη συνέχεια αναλύονται οι διαφορετικές πιθανές τοπολογίες του συστήματος και εξετάζονται οι πιθανοί μαθηματικοί αλγόριθμοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λύση του προβλήματος της τριμεροποίησης. Τέλος, αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των εκτιμητών Kalman, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λύση του ίδιου προβλήματος ή για τη βελτίωση της εκτίμησης των στατικών αλγορίθμων. Αυτή η ανάλυση πλαισιώνεται από την περιγραφή κάποιων βασικών μοντέλων κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν στα φίλτρα που υλοποιήθηκαν στη διατριβή.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι προδιαγραφές του υπό υλοποίηση συστήματος. Ταυτόχρονα, εξετάζονται πιθανές απαιτήσεις που μπορούν να θέσουν τα διαφορετικά συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας στο σύστημα εντοπισμού. Αναλύεται η λογική σχεδίασης του συστήματος και η επιλογή των διαφορετικών παραμέτρων αυτού. Καθορίζεται η μορφή του εκπεμπόμενου σήματος και αναφέρονται οι θεωρητικά αναμενόμενες επιδόσεις λειτουργίας. Αναλύονται θεωρητικά η μέθοδος του εντοπισμού πρώτης άφιξης και του κεντροειδούς εντοπισμού. Περιγράφεται η εφαρμογή της μεθόδου σταθερού ρυθμού εσφαλμένων συναγεργμών και η εφαρμογή σθερής τιμής κατωφλίου και συγκρίνονται οι δύο μέθοδοι. Τέλος, περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης των ηλεκτρονικών τμημάτων του πομπού και του δέκτη του συστήματος.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν. Οι μετρήσεις (και προσομοιώσεις) χωρίστηκαν σε τρεις κυρίως φάσεις. Στην πρώτη φάση έγιναν μετρήσεις σε ακίνητο στόχο και στις τρεις επιλεγόμενες συχνότητες με στόχο να ελεγχθούν συγκριτικά οι διάφοροι μέθοδοι μέτρησης απόστασης και οι διαφορετικές μέθοδοι καθορισμού του κατωφλίου ανίχνευσης. Σε δεύτερο στάδιο έγιναν προσομοιώσεις εκτίμησης θέσης κινήσεων με διαφορετικές μεθόδους τριμεροποίησης. Επίσης, δοκιμάστηκαν μια σειρά από εκτιμητές Kalman για την βελτίωση της εκτίμησης του συστήματος. Στο τελευταίο μέρος των πειραμάτων έγιναν δοκιμές σε ακίνητο και κινητό στόχο. Για την επεξεργασία των μετρήσεων ακολουθήθηκαν τα συμπεράσματα των προηγούμενων πειραμάτων, δηλαδή κεντροειδής εντοπισμός με μεταβλητή τιμή κατωφλίου και εφαρμογή στατικού αλγεβρικού αλγορίθμου τριμεροποίησης. Τα αποτελέσματα απέδειξαν την ικανότητα του συστήματος να εκτιμά με ικανοποιητικότερη ακρίβεια τη θέση του στόχου για διάφορα είδη κινήσεων.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** αναλύονται τα προβλήματα που ανακύπτουν από κακώς σχεδιασμένες ή μη χρηστικές συσκευές αλληλεπίδρασης. Αναλύεται η προτεινόμενη μέθοδος για τη σχεδίαση τέτοιων συσκευών και εφαρμόζεται για την παραγωγή μιας νέας πρωτότυπης συσκευής. Κατά τη διαδικασία υλοποίησης, μέσα από μία διαδοχική σειρά πειραμάτων, εξάγονται κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό των συσκευών αλληλεπίδρασης. Αυτές ενσωματώνονται στη διαδικασία σχεδιασμού της πρωτότυπης συσκευής. Η επαλήθευση της ορθότητάς τους και της ορθής εφαρμογή τους έρχεται με την εκτέλεση ενός συγκριτικού πειράματος της πρωτότυπης με μία διαδεδομένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη συσκευή. Τέλος η διατριβή καταλήγει με την παράθεση των βασικών συμπερασμάτων και θεμάτων για μελλοντική εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

I. ΘΕΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το κεφάλαιο αυτό χρησιμεύει ως μία εισαγωγή στα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας, και αποσκοπεί στην εξοικείωση του αναγνώστη με θέματα που αφορούν στην αλληλεπίδραση του χρήστη με αυτά, στη σημασία αυτής, και στους παράγοντες που την επηρεάζουν. Στόχος δεν είναι η σε βάθος ανάλυση της λειτουργίας τέτοιων συστημάτων, αλλά η επεξήγηση κάποιων βασικών αρχών λειτουργίας. Έμφαση θα δοθεί στις απαιτήσεις τέτοιων συστημάτων για διατάξεις εντοπισμού (tracking) καθώς και στις παραμέτρους που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων. Επιπλέον, θα αναλυθούν θέματα που σχετίζονται με τη χρήση και χρησιμότητα συσκευών αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιούνται συχνά σε διάφορα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας.

1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

1.1.1 Γενικά στοιχεία-Ορισμοί

Ξεινώντας θα πρέπει να δοθούν ορισμένοι γενικοί ορισμοί για ορολογίες που συχνά συναντιούνται σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας:

- Ο «*Εικονικός Κόσμος*» (Virtual World) περιγράφει τους «κόσμους» που υπάρχουν με τη βοήθεια των υπολογιστών ή των δικτύων υπολογιστών μόνο. Οι εικονικοί κόσμοι μπορούν να είναι απολύτως φανταστικοί ή αναπαραστάσεις των πραγματικών κόσμων. Οι εικονικοί κόσμοι δεν είναι απαραίτητως τρισδιάστατοι και ρεαλιστικοί (σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και τόποι διασύνδεσης στο διαδίκτυο αναφέρονται ως εικονικοί κόσμοι). Στα πλαίσια του κειμένου αυτού θεωρούμε ότι ένας Εικονικός Κόσμος αποτελείται από:
 - τρισδιάστατα αντικείμενα
 - πηγές φωτός
 - πλέγματα
 - τρισδιάστατα μενού αλληλεπίδρασης με τον χρήστη
- Ο όρος «*Εικονική Πραγματικότητα*» (Virtual Reality -VR) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την τεχνολογία γενικά που σχετίζεται με τη δημιουργία των Εικονικών Κόσμων. Εμπεριέχει το απαραίτητο υλισμικό (hardware), το βασικό λογισμικό (software) και τις εφαρμογές, τα

οποία όλα μαζί είναι απαραίτητα για να παρέχουν μια πρόσβαση χρηστών σε έναν Εικονικό Κόσμο.

- Ένα «*Σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας*» περιλαμβάνει όλο το απαραίτητο υλισμικό και λογισμικό για τη παρουσίαση των Εικονικών Κόσμων. Αποτελείται κατά κύριο λόγο από:
 - ένα σύστημα προβολής (π.χ. υπολογιστής και γυαλιά, τοίχος με προβολείς με τους απαραίτητους συγχρονιστές και τα γυαλιά, συσκευές απεικόνισης στο κεφάλι-Head Mounted display-HMD)
 - ένα σύστημα ανίχνευσης (tracking) με 3 ή 6 βαθμούς ελευθερίας (6-DOF)
 - ένα ή περισσότερους υπολογιστές για τη δημιουργία της τρισδιάστατης αναπαράστασης (rendering) συμπεριλαμβανομένου των υπολογιστών γραφικών και της υποδομής δικτύου
 - συσκευές αλληλεπίδρασης όπως τρισδιάστατα ποντίκια, απτικές (haptic) συσκευές, κ.λπ.
 - ένα σύστημα επεξεργασίας πραγματικού χρόνου (runtime) που συνδυάζει και συγχρονίζει τα ανωτέρω υποσυστήματα και τα καθιστά προσιτά για τις εφαρμογές.
- Μία «*Εφαρμογή Εικονικής Πραγματικότητας*» είναι μία εφαρμογή που τρέχει στον υπολογιστή επεξεργασίας. Παρέχει τη λειτουργικότητα και τα χαρακτηριστικά αλληλεπίδρασης με τον χρήστη που είναι απαραίτητα για να εκτελέσει τις επιθυμητές λειτουργίες στον Εικονικό Κόσμο.
- Ένα «*Εικονικό Περιβάλλον*» (Virtual Environment -VE) καθορίζεται από ένα Σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας και τουλάχιστον από έναν Εικονικό Κόσμο. Ένα Εικονικό Περιβάλλον παρέχει στους χρήστες συνήθως την αίσθηση της εμβύθισης στον Εικονικό κόσμο (immersion) και τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με αυτόν.

Στόχος ενός συστήματος Εικονικής Πραγματικότητας είναι η εμβύθιση του χρήστη σε ένα περιβάλλον, εν μέρει ή ολοκληρωτικά, εικονικό. Σκοπός μπορεί να είναι η μελέτη και ενασχόληση με αφηρημένες έννοιες που δεν μπορούν να συλληφθούν με απλή δισδιάστατη απεικόνιση, ο σχεδιασμός και ο έλεγχος προϊόντων σε πρώιμα στάδια υλοποίησης, η εκπαίδευση χρηστών σε συγκεκριμένες διεργασίες ([AMD103]) καθώς και λόγοι ψυχαγωγίας και διασκέδασης. Η τεχνολογία γνωρίζει ιδιαίτερη ακμή τα τελευταία χρόνια μια και όχι μόνο εξελίσσεται τεχνολογικά με πολύ μεγάλα βήματα αλλά και διευρύνει το πεδίο των εφαρμογών της ([BURD03]). Ιστορικά, το πρώτο σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας ήταν το Sensorama από τον Morton Heilig, το 1962.



Εικόνα 1: Το Sensorama

Τα αρχικά συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας χρησιμοποιήθηκαν ως προσομοιωτές πτήσης για την εκπαίδευση πιλότων. Γενικά, η τεχνολογία εξελίχθηκε ως τις αρχές της δεκαετίας του '80 μέσα από στρατιωτικές εφαρμογές. Καθώς η τεχνολογία αναπτύχθηκε και το κόστος της άρχισε να γίνεται ανεκτό, άρχισε να χρησιμοποιείται και για μη στρατιωτικές εφαρμογές (πρώτα από την αεροβιομηχανία, ενώ αυτή τη στιγμή γνωρίζει ιδιαίτερη εξάπλωση στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας και του χώρου των κατασκευών). Το συγκριτικό πλεονέκτημα που κάνει την τεχνολογία δημοφιλή είναι οι υψηλές δυνατότητες ρεαλιστικής οπτικοποίησης τρισδιάστατων αντικειμένων με ταυτόχρονη αίσθηση εμπύθισης του χρήστη σε αυτά. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν τη σταδιακή αντικατάσταση των πραγματικών πρωτοτύπων με εικονικά πρωτότυπα που παρέχουν αφενός μικρότερο κόστος και αφετέρου δυνατότητες συγκρίσιμες με τα φυσικά μοντέλα. Μια αρχιετά αναλυτική μελέτη για τα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας μπορεί κάποιος να αναζητήσει στο [BURD03].

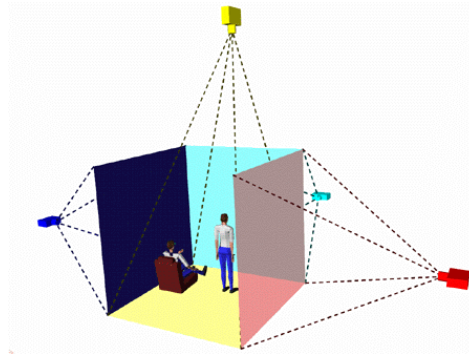
1.1.2 Συνηθισμένα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας

Η αίσθηση τρισδιάστατης απεικόνισης στο χρήστη προκύπτει από την υπέρθεση δύο όμοιων προβαλλόμενων εικόνων, που είναι χωρικά μετατοπισμένες μεταξύ τους. Οι δύο εικόνες υπερτίθενται σε διαφορετικά σημεία του οπτικού νεύρου με αποτέλεσμα να δημιουργείται η αίσθηση της τρίτης διάστασης. Οι δύο εικόνες είτε προβάλλονται ταυτόχρονα με χρήση δύο προβολικών μηχανημάτων (παθητική προβολή) είτε εναλλάσσονται χρονικά μεταξύ τους με συχνότητα τέτοια που να μη μπορεί να αντιληφθεί την εναλλαγή το ανθρώπινο μάτι (60Hz-ενεργητική προβολή). Στην πρώτη περίπτωση ο χρήστης φοράει πολωμένα γυαλιά με κάθετες πολώσεις μεταξύ των φακών ενώ αντίστοιχη πόλωση έχουν οι προβαλλόμενες εικόνες, με αποτέλεσμα το κάθε μάτι να βλέπει τη μία μόνο εικόνα. Στη δεύτερη περίπτωση ο χρήστης φοράει γυαλιά με φακούς που ανοιγοκλείνουν διαδοχικά με συχνότητα όμοια με αυτή της εναλλαγής των προβαλλόμενων εικόνων, όντας συγχρονισμένα με το κεντρικό σύστημα. Το αποτέλεσμα είναι πρακτικά το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις.

Τυπικά παραδείγματα συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας αποτελούν το επιτραπέζιο σύστημα (desktop system), η συσκευή απεικόνισης στο κεφάλι (Head Mounted Display – HMD) και τα διάφορα προβολικά συστήματα, όπως το CAVE™.



Εικόνα 2: Συσκευή HMD



Εικόνα 3: CAVE™ Σύστημα

Τυπικά επιτραπέζια συστήματα χρησιμοποιούν οθόνες καθοδικής λυχνίας (CRT) για την προβολή των εικόνων. Ο χρήστης μέσω της οθόνης έχει ένα παράθυρο στον Εικονικό κόσμο. Η αλληλεπίδραση και η πλοήγηση του χρήστη υλοποιείται μέσα από εξειδικευμένες συσκευές εισόδου του υπολογιστή (π.χ. Spacemouse, multi-axis joysticks). Εναλλακτικά, ο Εικονικός Κόσμος μπορεί να σχεδιασθεί με τρόπο που δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με χρήση εικονιδίων, τα οποία είναι προσβάσιμα στο χρήστη με τυπικές συσκευές εισόδου. Ειδικά πακέτα λογισμικού επιτρέπουν τη δημιουργία Εικονικών Περιβαλλόντων σε επιτραπέζιους υπολογιστές (π.χ. Superscape, World-Up).

Μία τυπική συσκευή απεικόνισης κεφαλιού αποτελείται από μία ομάδα από οθόνες είτε καθοδικής λυχνίας, είτε υγρών κρυστάλλων (LCD/CRT) και είναι προσαρμοσμένη στο κεφάλι του χρήστη. Η συσκευή εισάγει τον χρήστη στον Εικονικό Κόσμο συνήθως οπτικά και ακουστικά. Η αλληλεπίδραση και η πλοήγηση στο Εικονικό Περιβάλλον γίνεται με εξειδικευμένες συσκευές εισόδου όπως τρισδιάστατα ποντίκια, γάντια κτλ.. Οι συσκευές αλληλεπίδρασης καθώς και η θέση και κατεύθυνση της συσκευής απεικόνισης ανιχνεύονται σε πραγματικό χρόνο και τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται για την ανανέωση της εικόνας και της οπτικής διαίσθησης του χρήστη στον Εικονικό Κόσμο.

Στα τυπικά προβολικά συστήματα οι εικόνες που συνθέτουν το Εικονικό Περιβάλλον προβάλλονται σε μία ή περισσότερες οθόνες κάνοντας χρήση προβολικών μηχανημάτων. Μία και η χρήση (μιας μεγάλης συνήθως) οθόνης επιτρέπει την παρατήρηση του Εικονικού Κόσμου από περισσότερους των ένα χρηστών υπάρχει η δυνατότητα αλληλεπίδρασης είτε από ένα, είτε από περισσότερους χρήστες χρησιμοποιώντας είτε τυπικές, είτε εξειδικευμένες συσκευές αλληλεπίδρασης.

Δεν υπάρχει κάποιο τυποποιημένο σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας, μια και παρατηρείται εξαιρετικά μεγάλη ποικιλία σε αυτά. Εντούτοις, τα κύρια χαρακτηριστικά τους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρία βασικά τμήματα, το τμήμα περιφερειακών εισόδου, το

κεντρικό σύστημα και το τμήμα εξόδου, το οποίο αναλύεται σε τρία κανάλια (οπτικό, ακουστικό και απτικό), και είναι αυτό που μας ενδιαφέρει περισσότερο. Τα βασικότερα περιφερειακά εισόδου είναι:

- Το υποσύστημα φόρτωσης δεδομένων: αυτό αντλεί από κατάλληλο πρόγραμμα τα μοντέλα που θα δημιουργήσουν τον Εικονικό Κόσμο και τις πληροφορίες που τα χαρακτηρίζουν ως προς τις ιδιότητες τους, τη σχετική τους θέση, τη μορφή τους, τις δυνατότητες που παρέχουν για επεξεργασία, κτλ.
- Το σύστημα εντοπισμού: αυτό απαιτείται σε συστήματα στα οποία είτε η προβαλλόμενη εικόνα αλλάζει ανάλογα με την κατεύθυνση των ματιών του χρήστη (μέσω εντοπισμού θέσης και κατεύθυνσης του χρήστη), είτε ο χρήστης μπορεί να αλληλεπιδράσει με το περιβάλλον με την κίνηση και το χειρισμό κατάλληλης συσκευής.
- Οι συσκευές αλληλεπίδρασης για τον χειρισμό και την αλληλεπίδραση του χρήστη με τον εικονικό Κόσμο
- Το σύστημα αναγνώρισης ομιλίας, όταν το σύστημα δέχεται την αλληλεπίδραση με το χρήστη μέσω φωνητικών εντολών
- Το απτικό σύστημα, που επιτρέπει την ανάδραση αφής στο χρήστη για την αλληλεπίδραση του με τον Εικονικό Κόσμο

Το κεντρικό σύστημα είναι υπεύθυνο για το συγχρονισμό όλων των περιφερειακών συστημάτων και των συστημάτων εξόδου, για τη δημιουργία των προβαλλόμενων εικόνων, την μετατροπή της κατάστασης του συστήματος ανάλογα με τις κινήσεις του χρήστη, κτλ. Αποτελείται τόσο από λογισμικό όσο και από υλισμικό τμήμα, για τα οποία υπάρχει μεγάλη ποικιλία επιλογών.

Ακολούθως αναλύονται τα συστήματα εξόδου, με μεγαλύτερη έμφαση στο οπτικό κανάλι το οποίο και θέτει τις βασικές απαιτήσεις στα συστήματα εντοπισμού και στις συσκευές αλληλεπίδρασης, που αποτελούν και το βασικό ερευνητικό αντικείμενο της διατριβής.

Οπτικό κανάλι

Μία βασική κατηγοριοποίηση των περιφερειακών που ανήκουν στο οπτικό κανάλι στηρίζεται στο κατά πόσο η οθόνη είναι τοποθετημένη σε σταθερή θέση ή μετακινείται ακολουθώντας με κάποιον τρόπο το χρήστη. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι λεγόμενες οθόνες σταθερής επιφάνειας (Fixed-Surface Displays-FSDs). Τέτοιες οθόνες χρησιμοποιούνται σε διάφορα διαδεδομένα συστήματα όπως οι δυναμικοί τοίχοι (PowerWalls) και τα CAVEs™. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι συσκευές απεικόνισης κεφαλιού (HMDs).

Μια τυπική συσκευή απεικόνισης στο κεφάλι (HMD) αποτελείται από ένα κράνος με δύο μικρές οθόνες (CRT ή LCD) και ένα προσαρμοζόμενο σύστημα φακών. Τα HMD είναι τα πρώτα συστήματα προβολής που αναπτύχθηκαν ειδικά για την Εικονική Πραγματικότητα. Έχουν την ικανότητα να δημιουργούν την εντύπωση της στερεοσκοπικής όρασης παρουσιάζοντας ξεχωριστές εικόνες σε κάθε μάτι.

Σε κάποια FSDs η εικόνα του Εικονικού Κόσμου ελέγχεται και καθορίζεται από τη θέση και κατεύθυνση του κεφαλιού του χρήστη, ενώ στα υπόλοιπα η προβολή είναι προιαθορισμένη και δεν εξαρτάται από την κίνηση του χρήστη. Στη συνέχεια (βλ. Κεφάλαιο 3) θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας στα πρώτα, μια και αυτά σχετίζονται άμεσα με τα συστήματα εντοπισμού (η οθόνη παραμένει ακίνητη και μέσω του εντοπισμού της θέσης του κεφαλιού και των ματιών κατ' επέκταση του χρήστη καθορίζεται η προβολή).

Μία δεύτερη κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει με βάση το αν τα περιφερειακά οπτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται επιτρέπουν ή αποκλείουν τα πραγματικά αντικείμενα στο προβαλλόμενο Εικονικό Περιβάλλον. Στην κατηγορία των FSDs, αν τα χέρια των χρηστών είναι εμφανή στους ίδιους και δεν εξαφανίζονται στο Εικονικό Περιβάλλον αυτά αναφέρονται ως FSD απευθείας όρασης (direct-view). Χρησιμοποιώντας ένα καθρέφτη υπό γωνία μεταξύ του κεφαλιού και των χεριών του χρήστη είναι δυνατό αυτά να αποκρυφθούν, ενώ ταυτόχρονα τα εικονικά αντικείμενα προβάλλονται πίσω από τον καθρέφτη. FSD αυτής της κατηγορίας αναφέρονται ως ανακλώμενης όψης (reflected view). Τα HMDs με τη σειρά τους διακρίνονται σε αδιαφανή (opaque) τα οποία αποκλείουν τα εξωτερικά αντικείμενα και στα οπτικά διαφανή (see-through), τα οποία παρουσιάζουν στο χρήστη και αντικείμενα του πραγματικού κόσμου. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθούν και τα ημιδιαφανή HMDs τα οποία έχουν εν μέρει τη δυνατότητα να αποκρύβουν τα πραγματικά αντικείμενα γνωστών διαστάσεων, τοποθετώντας εικονικά αντικείμενα μπροστά τους.

Στην παρούσα διατριβή θα εξεταστούν οι επιδράσεις που μπορεί να έχουν τα περιφερειακά του οπτικού καναλιού στα συστήματα εντοπισμού. Τέτοια είναι τα HMDs και τα FSDs που η προβολή ρυθμίζεται από τη θέση του χρήστη.

Ακουστικό κανάλι

Ο ήχος μπορεί, εν δυνάμει, να παίζει ουσιαστικό ρόλο στο περιβάλλον της Εικονικής Πραγματικότητας. Η φυσικότητα και η ποιότητα του ήχου που χρησιμοποιείται, είναι πολύ σημαντικές για την αύξηση της αίσθησης παρουσίας του χρήστη μέσα στον Εικονικό Κόσμο. Η φυσικότητα του ήχου μπορεί να επιτευχθεί τόσο από το χρησιμοποιούμενο φάσμα όσο και από την ποιότητα της αρχικής πηγής του ήχου.

Γενικά ο ήχος χρησιμοποιείται για να προσδώσει αφενός στο χρήστη την αίσθηση του Εικονικού Περιβάλλοντος και αφετέρου για την αλληλεπίδραση του χρήστη με αυτό. Για την πρώτη λειτουργία διάφορες μεγαφωνικές εγκαταστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενώ για τη δεύτερη ένας αριθμός από μικρόφωνα και κάποιο λογισμικό αναγνώρισης ομιλίας είναι απαραίτητα. Μια και το ακουστικό κανάλι δεν είναι ιδιαίτερα απαιτητικό ως προς το σύστημα εντοπισμού, και όποτε χρησιμοποιείται συνήθως αντικαθιστά τις συσκευές αλληλεπίδρασης, δεν θα σταθούμε περαιτέρω σε αυτό.

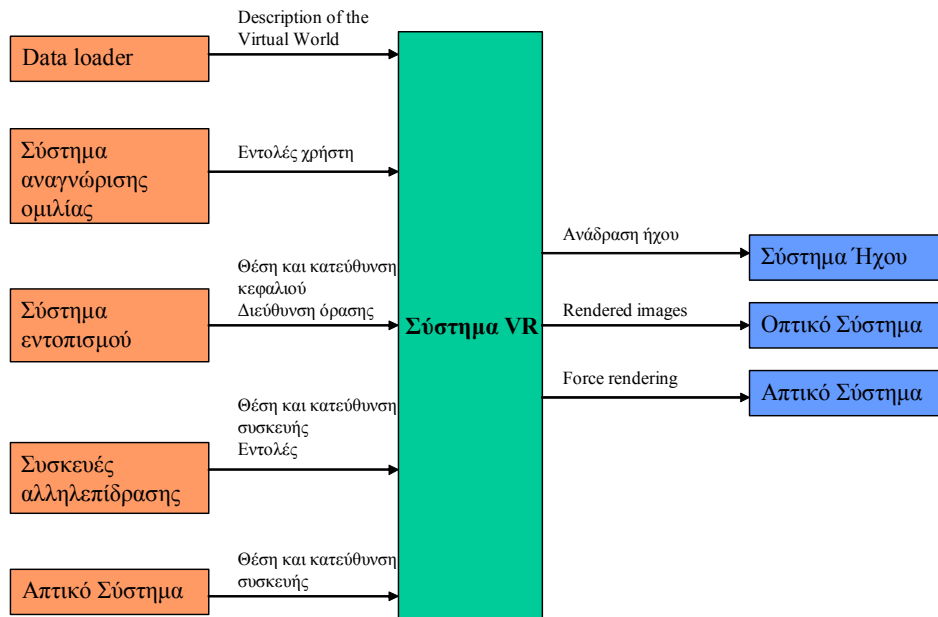
Απτικό κανάλι

Πολλές φορές χρησιμοποιούνται ανιχνευτές κίνησης που διεγείρονται από την αίσθηση της αφής για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το Εικονικό Περιβάλλον. Η αντίληψη αφής είναι η ενεργητική συλλογή πληροφοριών για αντικείμενα έξω από το σώμα, μέσω της αίσθησης της αφής. Οι αισθητήρες μπορεί να προσαρμοστούν στις άκρες των δακτύλων των χρηστών, στους καρπούς, στο χέρι ή μερικές φορές στο πόδι ή σε άλλο μέρος του σώματος. Οι συσκευές αυτές μπορεί να έχουν διάφορες μορφές όπως στυλό, γάντι κτλ.

Οι πιο πρόσφατες απτικές συσκευές εστιάζουν στην αφή και στη δύναμη της ανάδρασης. Ο όρος ανάδραση αφής (tactile feedback) αναφέρεται στην αίσθηση της αφής ή της πίεσης που ασκείται στο δέρμα. Οι δυνάμεις που ασκούνται στους μύες, τους τένοντες και στις αρθρώσεις ονομάζονται δυνάμεις ανάδρασης (force feedback). Σκοπός των συσκευών που χρησιμοποιούν ανάδραση είναι να προκαλέσουν στο χρήστη την αίσθηση της θερμοκρασίας, της τραχύτητας, της ρευστότητας, της ομαλότητας και άλλων παρόμοιων. Υπάρχουν δύο μέθοδοι για τη δημιουργία ανάδρασης αφής: η πίεση του αέρα και τεχνικές δόνησης. Στην πρώτη μέθοδο, η πίεση του αέρα αναπροσαρμόζεται από αντιστάσεις ευαίσθητες στις δυνάμεις. Η μέθοδος δόνησεων προκαλεί δονήσεις στο τέλος του κάθε δακτύλου, δημιουργώντας διέγερση στο δέρμα. Πλεονέκτημα της χρήσης ανάδρασης είναι η δυνατότητα προσομοίωσης βάρους καθώς και πυκνότητας των αντικειμένων του Εικονικού Περιβάλλοντος.

Οι βασικές κατηγοριοποιήσεις των απτικών συσκευών σχετίζονται με τον τρόπο που ο χρήστης βλέπει και αισθάνεται την απτική συσκευή αλληλεπίδρασης και το είδος της ανάδρασης που αυτές προσφέρουν. Αν και το απτικό κανάλι είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε Εικονικά Περιβάλλοντα, δεν θα σταθούμε ιδιαίτερα σε αυτό, παρά μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, μια και δεν επαφίεται του στόχου της διατριβής. Μία γραφική αναπαράσταση ενός γενικού συστήματος Εικονικής Πραγματικότητας φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.

Συσκευές που ανήκουν σε οποιαδήποτε από τις τρεις κατηγορίες συστημάτων εξόδου παρέχουν στο χρήστη όλες ή μερικές από τις ακόλουθες βασικές λειτουργίες: έλεγχο εικόνας, πλοήγηση, χειρισμό αντικειμένων και δυναμική κίνηση ομοιωμάτων (avatar animation). Ακόμα και με αυτήν την κατηγοριοποίηση υπάρχουν πολύ συνδυασμοί συσκευών οι οποίοι θέτουν διαφορετικές απαιτήσεις επίδοσης για τα συστήματα εντοπισμού. Πιο σημαντική κατηγορία περιφερειακών για την ανάλυση που θα ακολουθήσει αποτελεί το οπτικό κανάλι, μια και συσκευές που ανήκουν σε αυτό είναι πιο συνήθεις. Αρκετά σημαντικό, για τις απαιτήσεις που αυτό θέτει, είναι και το απτικό κανάλι. Από τα δύο, ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στο πρώτο μια και σε αυτή την κατηγορία ανήκει το σύστημα του ΕΜΟΙ. Τέλος, το ακουστικό κανάλι μπορεί να θέσει συγκεκριμένες απαιτήσεις και να καθορίσει το χρησιμοποιούμενο σύστημα εντοπισμού μόνο όταν δεν συνοδεύεται από κανένα περιφερειακό σύστημα άλλου καναλιού, περίπτωση αρκετά σπάνια στα σύγχρονα συστήματα.



Εικόνα 4: Σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας

Τα περιφερειακά συστήματα μπορούν να θέσουν μια σειρά απαιτήσεων στα συστήματα εντοπισμού σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας. Αυτά με τη σειρά τους είναι συνήθως άρρηκτα συνδεδεμένα με τις συσκευές αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιούνται ως διεπαφή μεταξύ του χρήστη και του Εικονικού Κόσμου. Βελτιώσεις είτε στο σύστημα εντοπισμού, είτε στις συσκευές αλληλεπίδρασης θα έχουν άμεση θετική επίπτωση στο βαθμό της επιτυχίας και της ευκολίας στην αλληλεπίδραση του χρήστη με τον Εικονικό Κόσμο. Το τελευταίο αποτελεί και το αντικείμενο με το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον στον επιστημονικό χώρο της Εικονικής Πραγματικότητας και αποτελεί τον ουσιαστικό στόχο της διατριβής.

1.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ

Τεχνολογίες εντοπισμού χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως στρατιωτικές (εντοπισμός υποβρυχίων, τηλεκατευθυνόμενοι πύραυλοι, εντοπισμός αεροπλάνων, κ.ά.), εφαρμογές επιτήρησης (ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας, επίγεια ραντάρ οδικών δικτύων, συστήματα επιτήρησης εσωτερικών χώρων και συναγερμού), καθώς και πιο περίεργες εφαρμογές όπως εντοπισμός κινητών τηλεφώνων και συγκεκριμένων οχημάτων, παρακολούθηση πληθυσμών ζώων για επιστημονικούς σκοπούς κ.ά. Όπως είναι ευδιάκριτο από την μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, οι απαιτήσεις και προδιαγραφές αντίστοιχα των συστημάτων εντοπισμού διαφοροποιούνται αρκετά

μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, οι τεχνολογίες στις οποίες βασίζονται τα συστήματα αυτά μπορεί να στηρίζονται μεν στις ίδιες αρχές λειτουργίας αλλά διαφοροποιούνται αρκετά ως προς τα μετρούμενα μεγέθη, την ακρίβεια και διακριτικότητα μέτρησης, κτλ. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση των συστημάτων εντοπισμού που χρησιμοποιούνται σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας σε σχέση με τα λοιπά συστήματα εντοπισμού είναι πως αυτά εντοπίζουν με μεγάλη ακρίβεια τις κινήσεις στόχων όπως το ανθρώπινο κεφάλι, ανθρώπινα άκρα ή αρθρώσεις ή αντικείμενα που ο χρήστης κρατάει με το χέρι του για να αλληλεπιδρά με το τρισδιάστατο Εικονικό περιβάλλον. Προς τούτο τα συστήματα εντοπισμού σε VR συστήματα συνιστούν από μόνα τους ξεχωριστή κατηγορία [FOXLO2]. Οι βασικές λειτουργίες τις οποίες εξυπηρετούν (και που υπαγορεύουν την ταχύτητα απόκρισης τους) είναι ο έλεγχος του οπτικού πεδίου του χρήστη, η μετακίνησή του χρήστη στον Εικονικό Κόσμο, η επιλογή και ο χειρισμός αντικειμένων και η χρήση και κίνηση ανθρωπόμορφων τρισδιάστατων μοντέλων (avatars). Πρόκειται για ένα επιστημονικό τομέα εφαρμογών με μεγάλη δραστηριότητα τόσο στον εμπορικό¹ όσο και στο ερευνητικό χώρο.

1.2.1 Χαρακτηριστικές παράμετροι

Ένα σύστημα εντοπισμού Εικονικής Πραγματικότητας πρέπει να μπορεί να υπολογίζει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια και διακριτικότητα σε πραγματικό χρόνο τη θέση ή/και κατεύθυνση του στόχου (κεφάλι, χέρι, συσκευή). Δύο είναι οι βασικές εφαρμογές των συστημάτων αυτών. Αφενός ο χειρισμός της εικόνας που προβάλλεται στο Εικονικό Περιβάλλον (όπου αυτό είναι δυνατό). Αυτό επιτυγχάνεται με τον εντοπισμό της θέσης και κατεύθυνσης του κεφαλιού του χρήστη και την αναπροσαρμογή του προβαλλόμενου Εικονικού Κόσμου στο πεδίο όρασης του χρήστη (Field of View-FOV). Αφετέρου η πλοήγηση και ο χειρισμός των εικονικών αντικειμένων και γενικά η διαδικασία αλληλεπίδρασης του χρήστη με το Εικονικό Περιβάλλον. Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται εντοπισμός της θέσης ή/και κατεύθυνσης μίας συσκευής που κρατάει ο χρήστης συνήθως στο χέρι του (ή αλλιώς του ίδιου του χεριού του). Ένα σύστημα εντοπισμού αυτοχαρακτηρίζεται και διαφοροποιείται βάσει των ακόλουθων παραμέτρων:

- Μετρούμενα μεγέθη: είναι η βασική διαφοροποίηση μεταξύ των συστημάτων εντοπισμού που υπαγορεύει διαφορετική λειτουργία.
- Ακρίβεια (accuracy) : η μέγιστη απόκλιση της εκτιμώμενης θέσης ή κατεύθυνσης σε σχέση με τις πραγματικές τιμές αυτών.
- Διακριτικότητα (resolution): η ελάχιστη αλλαγή μεταξύ δύο πολύ κοντινών καταστάσεων (θέσης ή περιστροφής) του στόχου που το σύστημα μπορεί να εντοπίσει.
- Βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom – DOF): οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος καθορίζουν τις μετρούμενες παραμέτρους. Οι βαθμοί ελευθερίας ποικίλουν από τρεις

¹ Στο 1^ο παράρτημα αυτού του κεφαλαίου δίνεται μία λίστα με τα πιο γνωστά εμπορικά συστήματα εντοπισμού για VR συστήματα, οι προδιαγραφές αυτών και οι δικτυακοί τόποι όπου μπορούν να αναζητηθούν περαιτέρω πληροφορίες.

- (εντοπισμός θέσης – x, y, z) ως έξι (εντοπισμός θέσης και κατεύθυνσης – $x, y, z, \text{pitch}, \text{yaw}, \text{roll}$).
- Καθυστερήση εντοπισμού (lag): ο χρόνος που μεσολαβεί από μία μεταβολή της κατάστασης του στόχου μέχρι αυτή να γίνει αυτή αντιληπτή από το σύστημα.
 - Ρυθμός ανανέωσης (update rate): ο ρυθμός με τον οποίο το σύστημα ανανεώνει τις μετρήσεις. Πρέπει να τονιστεί πως αυτός ο χρόνος δεν είναι απαραίτητα ο χρόνος ανανέωσης συντεταγμένων του στόχου, μια και μπορεί να παρεμβάλλονται τεχνικές μείωσης θορύβου. Επιπλέον κατά το [MEYE92] εκτός από το ρυθμό ανανέωσης δεδομένων σημαντικές παράμετροι είναι και ο ρυθμός δειγματοληψίας (sample rate) και ο ρυθμός δεδομένων (data rate). Ο πρώτος αποτελεί το ρυθμό με τον οποίο οι αισθητήρες ελέγχονται για δεδομένα, ενώ ο δεύτερος είναι ο αριθμός των υπολογισμών κατάστασης (θέσης ή κατεύθυνσης) του στόχου ανά δευτερόλεπτο, ο οποίος καθορίζεται από την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία.
 - Εμβέλεια (range): η περιοχή στην οποία γίνονται αντιληπτές οι κινήσεις του στόχου με τις προδιαγραφές ακρίβειας και διακριτικότητας του συστήματος.

Το σύστημα εντοπισμού είναι αναπόσπαστο κομμάτι των VR συστημάτων. Τα τελευταία, κρίνονται ως πιο επιτυχημένα ανάλογα με το βαθμό στον οποίο οι χρήστες νιώθουν μέρος του Εικονικού Κόσμου. Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα της Εικονικής αναπαράστασης είναι: α) η αίσθηση παρουσίας στο Εικονικό Περιβάλλον (Presence), β) η αίσθηση πως τα Εικονικά αντικείμενα δεν μετακινούνται με την κίνηση του κεφαλιού (Perceptual Stability), γ) τα πιθανά αισθήματα αδιαθεσίας που μπορεί να εμφανιστούν στο χρήστη (Simulator Sickness), δ) η αίσθηση αποδοτικότητας λειτουργιών που επιτελούνται στο Εικονικό Περιβάλλον (Task Performance) και ε) οι μικρομετατοπίσεις κάτω από την ακρίβεια εντοπισμού ([FOXLO2], [BIOC02]).

Υπάρχουν αρκετές μελέτες στις οποίες αποδεικνύεται η επίδραση των συστημάτων εντοπισμού στις παραπάνω παραμέτρους ([COBB95], [FRAN88], [HETT92], [KOLA95], [LIU91], [RICH96], [MANI04], [ASTU05]). Περιληπτικά, μπορεί να αναφερθεί πως τα συστήματα εντοπισμού είναι από τους βασικούς λόγους που μπορούν να οδηγήσουν σε ναυτία ή διαταραχές προσανατολισμού του χρήστη σε ένα Εικονικό Κόσμο. Επιπρόσθετα, είναι αξιοσημείωτο πως προβλήματα μπορούν να δημιουργήσουν τα συστήματα εντοπισμού που είτε λειτουργούν με πολύ χαμηλές, είτε με πολύ υψηλές τεχνικές προδιαγραφές (π.χ. όταν το σύστημα έχει πολύ μεγάλη διακριτική ικανότητα είναι ικανό να δημιουργήσει τρεμόπαιγμα του προβαλλόμενου κόσμου ενώ ο χρήστης παραμένει ακίνητος, πρακτικά εξαιτίας των μικροκινήσεων που αυτός κάνει).

Τα συστήματα εντοπισμού παρουσιάζουν μια σειρά συστημικών σφαλμάτων που μπορούν να επιδράσουν και να καθορίσουν τις προαναφερθείσες παραμέτρους. Μεταξύ αυτών ξεχωρίζουμε τους 6 σημαντικότερους [FOXLO2], οι οποίοι διαχωρίζονται ανάλογα με το αν το αντικείμενο-στόχος είναι στατικό ή κινείται. Όταν το αντικείμενο είναι στατικό, τα βασικότερα προβλήματα που σχετίζονται με τον εντοπισμό του είναι τα ακόλουθα:

- Χωρική παραμόρφωση (spatial distortion): πρόκειται για επαναλαμβανόμενα λάθη στις εξόδους των συστημάτων εντοπισμού σε διαφορετικές θέσεις στο χώρο εργασίας του συστήματος. Αυτά περιλαμβάνουν λάθη στις κλίμακες των αισθητήρων, λάθος ευθυγράμμιση και λάθη στη βαθμονόμηση αυτών.
- Τρεμόπαιγμα (jitter): τρεμόπαιγμα της εικόνας όταν ο στόχος είναι ακίνητος εξαιτίας παρουσίας εξωτερικού θορύβου.
- Σταθερότητα (stability ή creep): Εξαιρετικά μικρές μεταβολές στην έξοδο του συστήματος εντοπισμού, που, χωρίς να θεωρούνται κίνηση, μπορεί να επηρεάσουν τη μέση τελική απόκρισή του. Αυτές μπορεί να προκληθούν από μεταβολή της θερμοκρασίας ή από άλλες τυχαίες διαδικασίες που επηρεάζουν τους αισθητήρες ή από λάθη επαναληψιμότητας καθώς το σύστημα εντοπισμού μετακινείται και επαναφέρεται, στη συνέχεια, στην αρχική του θέση. Αν και το τελικό αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με το αποτέλεσμα του τρεμοπαίγματος, εδώ οφείλεται στις χαμηλές συχνότητες του φάσματος θορύβου. Γενικά, θα μπορούσαμε για να διακρίνουμε εύκολα τα δύο φαινόμενα, να θεωρήσουμε κάθε μεταβολή στην έξοδο του συστήματος μικρότερη από $1^\circ/s$ σε κατεύθυνση και από 1mm/s σε μετατόπιση ως πρόβλημα σταθερότητας ενώ οποιαδήποτε άλλη περίπτωση θα θεωρείται ως τρεμόπαιγμα.

Αν το σώμα-στόχος κινείται κρίσιμες παράμετροι είναι οι:

- Καθυστέρηση (latency): η καθυστέρηση αντιπροσωπεύει το χρόνο που μεσολαβεί από μία κίνηση του στόχου μέχρι την εμφάνιση της εικόνας που ανταποκρίνεται στη θέση αυτή του στόχου. Η καθυστέρηση δεν οφείλεται αποκλειστικά στο σύστημα εντοπισμού (η καθυστέρηση αυτή αναφέρθηκε ως καθυστέρηση εντοπισμού πιο πάνω – lag) αλλά και σε άλλα υποσυστήματα. Οι καθυστερήσεις δεν είναι προσθετικές, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον υπολογισμό της καθυστέρησης που οφείλεται αποκλειστικά στο σύστημα εντοπισμού [ELLI04], [BRY90].
- Τρεμόπαιγμα καθυστέρησης (latency jitter): μεταβολές στην εμφανιζόμενη καθυστέρηση από κύκλο σε κύκλο λειτουργίας του συστήματος εντοπισμού.
- Δυναμικά λάθη (dynamic error): αναφέρονται σε οποιαδήποτε λάθη που δεν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες όπως π.χ. λάθη στους αλγορίθμους πρόβλεψης ή πηγές θορύβου των αισθητήρων που ενεργοποιούνται με την κίνηση.

Επιπλέον οι [MEYE92] προσθέτουν τρεις ακόμα παραμέτρους (δύο ποιοτικές και μία ποσοτική) που θεωρούν σημαντικές στο χαρακτηρισμό των VR συστημάτων εντοπισμού. Αυτές είναι: α) η εύρωστη λειτουργία του συστήματος (robustness) που αποτελεί μέτρο της αντοχής του συστήματος σε σφάλματα που οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες και στο θόρυβο του περιβάλλοντος, β) η καταχωρητικότητα του συστήματος (registration) που αποτελεί την αντιστοιχία μεταξύ της πραγματικής και της μετρούμενης κατάστασης του στόχου (και η οποία δεν καθορίζεται μόνο με την ακρίβεια και τη διακριτικότητα του συστήματος εξαιτίας π.χ. των αθροιστικών λαθών) και γ) η κοινωνικότητα (sociability) του συστήματος, όπου οι [MEYE92] εμπεριέχουν την εμβέλεια του συστήματος (που αναφέρθηκε πιο πάνω) και τον αριθμό των στόχων που το σύστημα μπορεί να

εντοπίσει ταυτόχρονα (ή σχεδόν ταυτόχρονα αλλά πάντως σε σχεδόν πραγματικό χρόνο). Τέλος, σε κάθε σύστημα εντοπισμού σημαντικές παράπλευρες παράμετροι είναι το βάρος και το μέγεθος των αισθητήρων του συστήματος (και ιδίως αυτών που μεταφέρονται από τον χρήστη), καθώς και το κατά πόσο η επικοινωνία του πομπού και του δέκτη του συστήματος γίνεται ενσύρματα ή ασύρματα.

1.2.2 Τεχνολογίες συστημάτων εντοπισμού

Ένα πλήθος διαφορετικών τεχνικών εντοπισμού θέσης εφαρμόζονται σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας κάνοντας χρήση διαφορετικών τεχνολογιών. Κάθε σύστημα εντοπισμού θέσης χαρακτηρίζεται από διαφορετική αρχή λειτουργίας, διαφορετικά μετρούμενα μεγέθη και επομένως διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις των συστημάτων εντοπισμού που ακολουθούν μια σειρά κριτηρίων. Έτσι υπάρχουν ταξινομήσεις που βασίζονται στις απαιτήσεις του εκάστοτε συστήματος Εικονικής Πραγματικότητας [FOX02], στις βασικές αρχές λειτουργίας των συστημάτων εντοπισμού [CHAV84], [ROLL01], [ROLL00], στην τεχνολογία που χρησιμοποιείται [MEYE92], στη σειρά χρονολογικής εμφάνισης και την έκταση στην οποία χρησιμοποιούνται τα συστήματα [FUCH96], [BURD93], στις τεχνολογικές τάσεις της εποχής [DURL94] ή, τέλος, αφορούν κυρίως συστήματα εντοπισμού με αποκλειστική χρήση σε συστήματα επαυξημένης πραγματικότητας (augmented reality) όπως οι [BHAT93], [FERR91] και [RODG91], μια και τα τελευταία παρουσιάζουν κάποιες ιδιαιτερότητες. Η ταξινόμηση των συστημάτων εντοπισμού θέσης που θα ακολουθηθεί βασίζεται στη φυσική αρχή λειτουργίας του κάθε συστήματος. Παράλληλα δίνονται και μερικά στοιχεία που αφορούν στις απαιτήσεις των διαφορετικών συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας από το σύστημα εντοπισμού που θα εφαρμοσθεί σε αυτά. Οι τεχνολογίες εντοπισμού που χρησιμοποιούνται ευρέως και παρουσιάζονται ακολούθως, είναι:

- Μηχανικοί αισθητήρες
- Βαρομετρικοί και αδρανειακοί αισθητήρες
- Αισθητήρες Ηλεκτρικού Πεδίου
- Αισθητήρες Μαγνητικού Πεδίου
- Μικροκυματικοί, χιλιοστομετρικοί και αισθητήρες ραδιοκυμάτων
- Οπτικοί αισθητήρες
- Ακουστικοί αισθητήρες

Υπάρχουν δύο βασικοί διαχωρισμοί στα συστήματα εντοπισμού που πρέπει να αναφερθούν πριν μιλήσουμε για τις επιμέρους τεχνολογίες. Τα συστήματα χωρίζονται αρχικά σε ενεργά και παθητικά. Ενεργά είναι τα συστήματα τα οποία στηρίζουν τη λειτουργία τους στη λήψη κάποιου σήματος που παράγεται τεχνικά, ενώ τα παθητικά βασίζονται στη λήψη σημάτων που παράγονται φυσικά από το στόχο χωρίς καμία τεχνητή παρεμβολή. Ένας επιπλέον διαχωρισμός αφορά τη θέση των αισθητήρων του συστήματος εντοπισμού. Αν αυτοί βρίσκονται στο στόχο και «αιτούν» προς

τον περιβάλλοντα χώρο, τα συστήματα ονομάζονται «μέσα-έξω» (inside-out). Σε αντίθετη περίπτωση τα συστήματα ονομάζονται «έξω-μέσα» (outside-in).

Εντοπισμός θέσης με μηχανικούς αισθητήρες

Ο όρος μηχανικοί αισθητήρες, αφορά στη φυσική σύνδεση του στόχου με χρήση μηχανικών μερών με το σύστημα εντοπισμού ή ένα σημείο αναφοράς. Αυτοί μπορεί να είναι σχοινιά, μηχανικοί σύνδεσμοι ή κάθε άλλου είδους σύνδεσμοι. Ο εντοπισμός θέσης με μηχανικούς αισθητήρες βασίζεται στην κινηματική θεωρία που εφαρμόζεται κυρίως στη ρομποτική.



Εικόνα 5: Σύστημα VR με μηχανικούς αισθητήρες εντοπισμού

Θεωρώντας πως ο στόχος είναι μια σημειακή μάζα m , για τον προσδιορισμό της τροχιάς της, αρκεί να προσδιοριστούν σε κάθε χρονική στιγμή οι τρεις (3) καρτεσιανές συντεταγμένες αυτής, $x(t)$, $y(t)$ και $z(t)$, που συνθέτουν το διάνυσμα θέσης της μάζας $\mathbf{r}(t)$, καθώς και το διάνυσμα ταχύτητας αυτής $\mathbf{v}(t) = \mathbf{r}'(t) = (x'(t), y'(t), z'(t))$, συνθέτοντας, έτσι, ένα πρόβλημα έξι (6) βαθμών ελευθερίας. Φυσικά ο στόχος δεν είναι σημειακός αλλά μάλλον ένα στερεό σώμα. Ο εντοπισμός και η καταγραφή κίνησης ενός στερεού σώματος είναι ένα πρόβλημα 6 βαθμών ελευθερίας, που όταν λυθεί δίνει τη θέση και κατεύθυνση όλων των σημείων του σώματος. Προφανώς, στην περίπτωση ενός στερεού σώματος η επίλυση του προβλήματος είναι πιο δύσκολη. Ιδιαίτερα μια και ο υπό εντοπισμό στόχος είναι ένα σύνολο στερεών σωμάτων συνδεόμενων μεταξύ των, το οποίο εισάγει μια σειρά περιορισμών στην επίλυση των κινηματικών εξισώσεων (βλ. ρομποτική). Η εύρεση της κινηματικής κατάστασης με μηχανικούς αισθητήρες γίνεται με τρεις κυρίως τρόπους:

- Ευθεία κινηματική επίλυση με σταθερό σημείο αναφοράς
- Ευθεία κινηματική επίλυση με κινούμενο σημείο αναφοράς και
- Αντίστροφη κινηματική επίλυση

Η πρώτη μέθοδος [SUTH68] χρησιμοποιεί κάποιο σταθερό σημείο αναφοράς το οποίο διασυνδέεται διαρκώς μηχανικά με το στόχο. Οι διαδοχικές θέσεις του στόχου μπορούν να εκτιμηθούν με χρήση διάφορων οργάνων (γωνιόμετρα, ποτενσιόμετρα, οπτικοί κωδικοποιητές, κτλ.), προσαρμοσμένων σε αυτό. Ακολουθεί ανάγωγή σε σταθερό σημείο αναφοράς (με κατάλληλες

αλλαγές συστήματος συντεταγμένων) με αποτέλεσμα να έχουμε εκτίμηση της κίνησης του στόχου σε ένα γενικό σύστημα συντεταγμένων.

Δύο είναι οι χαρακτηριστικές τοπολογίες που βασίζονται στη μέθοδο αυτή. Πρώτη (και πιο παλιά) η διασύνδεση του στόχου με ένα σημείο αναφοράς με ένα μηχανικό χέρι δύο κλειδώσεων (mechanical linkages). Το χέρι συνδέεται μηχανικά μέσω μιας κλειδώσης δύο (2) βαθμών ελευθερίας με τη βάση αναφοράς και μέσω μιας δεύτερης κλειδώσης τριών (3) βαθμών ελευθερίας με το στόχο. Το μηχανικό χέρι μπορεί να αποτελείται επίσης και μόνο από ένα τμήμα έξι (6) βαθμών ελευθερίας. Οι αρθρώσεις και οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι ιδιαίτερα ακριβείς αλλά η ακρίβεια των μετρήσεων μειώνεται με την απόσταση του στόχου. Επιπλέον η λειτουργία του συστήματος σε εσωτερικούς χώρους δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη λόγω των περιορισμών που μπορεί να υπάρχουν στη κίνηση. Η δεύτερη τοπολογία κάνει χρήση νημάτων (pull strings, cable extension transducers). Το σταθερό σημείο αναφοράς συνδέεται με το στόχο με ένα ως τρία τέτοια νήματα. Τα νήματα ελέγχονται μηχανικά και οι συντεταγμένες του στόχου δίνονται είτε από τριμεροποίηση (trilateration) των τριών μετρούμενων μηκών των νημάτων είτε με κατάλληλο σερβομηχανισμό που χρησιμοποιεί ένα μόνο τέτοιο νήμα.

Η δεύτερη μέθοδος [MOLE99] χρησιμοποιεί την φιλοσοφία που αναφέρθηκε πιο πάνω, έχοντας όμως κινούμενο σημείο αναφοράς, ένα σημείο στον ίδιο το στόχο. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτείται προσδιορισμός της θέσης ολόκληρου του ανθρώπινου σώματος (π.χ. για δημιουργία avatars). Για να βρεθεί η θέση και η κατεύθυνση κάθε σημείου του σώματος, αυτό χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα τα οποία συνδέονται με αρθρώσεις μεταξύ τους. Στις αρθρώσεις τοποθετούνται αισθητήρες, όπως γωνιόμετρα, για να μετρήσουν τις γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ των επιμέρους τμημάτων. Για να έχουν ακρίβεια οι μετρήσεις θα πρέπει τα γωνιόμετρα να είναι πολύ σταθερά τοποθετημένα (αν και πάλι οι σχετικές κινήσεις της σάρκας σε σχέση με τα οστά δημιουργεί αποκλίσεις), γεγονός που προκαλεί δυσφορία στο χρήστη. Υπάρχει η δυνατότητα αντί να τοποθετηθούν μεμονωμένα γωνιόμετρα να τοποθετηθεί ένας εξωσκελετός αποτελούμενος από αισθητήρες που εφαρμόζουν στις αρθρώσεις.



Εικόνα 6: Εξωσκελετός

Σε αυτή τη μέθοδο θα πρέπει το κινούμενο σημείο αναφοράς να εντοπίζεται διαρκώς από ένα άλλο σύστημα εντοπισμού. Το σημείο αυτό επιλέγεται, συνήθως, στη λειάνη του σώματος. Το γεγονός ότι απαιτείται και η χρήση μιας άλλης τεχνικής εντοπισμού (με τα όποια μειονεκτήματα αυτή έχει) καθιστά την εφαρμογή αυτή αρκετά πιο σύνθετη. Βέβαια, παραμένει χρήσιμη για τον προσδιορισμό της πλήρους θέσης και στάσης του ανθρώπινου σώματος. Εναλλακτικά, σαν σημείο αναφοράς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το πέλμα του ενός ποδιού. Κάθε φορά που το πόδι είναι σε επαφή με το πάτωμα (και υποθέτοντας ότι είναι τελείως επίπεδο) μπορεί, με απευθείας επίλυση των κινηματικών εξισώσεων, με χρήση των μετρούμενων γωνιών των αρθρώσεων να προσδιοριστεί η θέση κάθε τμήματος του σώματος. Για να εντοπιστεί η θέση του ποδιού ως σημείου αναφοράς χρησιμοποιούνται αισθητήρες πίεσης στο πέλμα του ποδιού.

Γίνεται σαφές ότι οποιαδήποτε λάθη στον εντοπισμό του σημείου αναφοράς μεταδίδονται αυξανόμενα στον υπολογισμό της θέσης των τμημάτων. Μάλιστα καθώς απομακρυνόμαστε από το σημείο αναφοράς τα λάθη αυτά αυξάνονται προσθετικά. Γίνεται σαφές ότι η τεχνική παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες στην εφαρμογή της.

Η τρίτη μέθοδος [BADL93] εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που απαιτείται, όπως και πριν, προσδιορισμός της θέσης όλου του ανθρώπινου σώματος. Η τεχνική αυτή – που χρησιμοποιείται ευρέως στην ρομποτική – βασίζεται σε μετρήσεις για τον προσδιορισμό της θέσης κάποιων ακραίων τμημάτων (χέρια, κεφάλι) και σε μετέπειτα υπολογισμό των κινήσεων όλων των επιμέρους τμημάτων του σώματος με εξισώσεις αντίστροφης κινηματικής. Φυσικά, υπάρχουν αρκετοί πιθανοί συνδυασμοί θέσεων των επιμέρους τμημάτων και αρθρώσεων. Χρησιμοποιώντας αλγόριθμους αντίστροφης κινηματικής πρέπει να προσδιοριστεί ο πιθανότερος τέτοιος συνδυασμός και άρα και η πιθανότερη στάση του ανθρώπινου σώματος. Για να γίνει ευκολότερη η επίλυση χρησιμοποιούνται συχνά αισθητήρες και σε ενδιάμεσα σημεία του σώματος. Ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση όμως, η τεχνική παραμένει αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα στην εφαρμογή της.

Εντοπισμός θέσης με βαρομετρικούς και αδρανειακούς αισθητήρες

Οι τεχνικές αυτής της κατηγορίας κάνουν χρήση των δυνάμεων βαρύτητας για τον εντοπισμό της θέσης του στόχου. Προς τούτο, χρησιμοποιούν μια σειρά διαφορετικών αισθητήρων οι οποίοι ταυτόχρονα υπαγορεύουν και διαφορετικές μεθόδους λειτουργίας του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται τρία είδη αισθητήρων σε αυτήν την κατηγορία συστημάτων:

- Επιταχυνσιόμετρα
- Γυροσκόπια
- Αδρανειακά συστήματα

Τα κλασικά επιταχυνσιόμετρα ανοιχτού βρόχου αποτελούνται από μία μάζα, η οποία είναι συνδεδεμένη με ελατήρια γνωστής σταθεράς k . Η απόκλιση της μάζας από τη θέση ισορροπίας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μη βαρυτικής επιτάχυνσης της μάζας, με αποτέλεσμα να εξάγεται με απλή και διπλή ολοκλήρωση το διάνυσμα ταχύτητας και θέσης αντίστοιχα του στόχου

που φέρει το επιταχυνσιόμετρο. Σύγχρονα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρικά ελεγχόμενο, κλειστού κύκλου, σερβομηχανισμό. Το ποσό του ρεύματος που χρησιμοποιεί ο σερβομηχανισμός, οδηγώντας το σερβοενισχυτή για να επαναφέρει τη μάζα του επιταχυνσιόμετρου στη θέση ισορροπίας είναι ενδεικτικό της μη βαρυτικής δύναμης που ασκείται στη μάζα. Σύγχρονα επιταχυνσιόμετρα πετυχαίνουν ακρίβεια της τάξης μερικών δεκάδων μg (όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας). Μια τέτοια ακρίβεια δίνει τη δυνατότητα μέτρησης κλίσης της τάξης των 0,0006 μοιρών. Τα επιταχυνσιόμετρα αυτά λέγονται MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems). Η συνηθέστερη τοπολογία μιας τέτοιας διάταξης είναι η χρήση μετρητών κλίσης (αποτελούμενων από μια σειρά επιταχυνσιόμετρων), εφαρμοζόμενων στο στόχο για τον υπολογισμό των pitch και roll, και η χρήση πυξίδας για τον υπολογισμό του yaw. Το πρόβλημα υπολογισμού του yaw ανάγεται στο γεγονός πως οποιαδήποτε οριζόντια επιτάχυνση (και κατά συνέπεια δύναμη) του στόχου θα προστεθεί στην κάθετη δύναμη που αντισταθμίζει τη βαρύτητα. Αποτέλεσμα είναι, κάθε οριζόντια επιτάχυνση να προστίθεται διανυσματικά με τη κάθετη αυτή συνιστώσα και η συνισταμένη να είναι κεκλιμένη ως προς το οριζόντιο επίπεδο, δημιουργώντας σφάλματα της τάξης των 5 μοιρών. Ανακρίβειες τέτοιου είδους δεν μπορούν να αποφευχθούν αλλά μπορούν να μειωθούν αισθητά.

Τα γυροσκοπία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της γωνιακής απόκλισης από έναν σταθερό άξονα περιστροφής. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στη διατήρηση της γωνιακής θέσης (angular momentum) ενός τροχού που περιστρέφεται γύρω από ένα άξονα. Η βασική εξίσωση που περιγράφει την αρχή λειτουργίας του γυροσκοπίου είναι

$$\tau = \frac{dL}{dt} = \frac{d(I\omega)}{dt} = I\alpha, \text{ όπου } \tau \text{ και } L \text{ είναι}$$

αντίστοιχα η ροπή και η στροφορμή, I η αδράνεια, ω η γωνιακή ταχύτητα και α η γωνιακή επιτάχυνση. Μία ροπή τ που ασκείται κάθετα στον άξονα περιστροφής και άρα κάθετα στο διάνυσμα στροφορμής L , οδηγεί σε μια κίνηση κάθετη ως προς τα τ και L , η οποία στη φυσική ονομάζεται προήγηση (precession) και έχει γωνιακή ταχύτητα Ω_p που δίνεται από τη σχέση $\tau = \Omega_p \times L$.

Περισσότερα για τη λειτουργία των γυροσκοπίων μπορεί κάποιος να βρει στο [KLE1898].

Συνδυασμοί γυροσκοπίων τοποθετημένοι πάνω σε ένα κινούμενο στόχο μπορούν να δώσουν μετρήσεις που περιγράφουν την κατεύθυνση του στόχου. Μεταξύ των διαφορετικών ειδών γυροσκοπίων συνηθισμένα είναι τα Coriolis Vibratory Gyroscopes (CVGs), [LYNC98].

Εμπεριέχουν μία μάζα, η οποία ταλαντώνει στη διεύθυνση ενός άξονα κίνησης με την εφαρμογή μίας δόνησης σε μία σχετικά υψηλή συχνότητα (κάποιες δεκάδες kHz). Μπορούν να μετρούν δευτερεύουσες δονήσεις που προκαλούνται από τη δύναμη Coriolis και οι οποίες τείνουν να προκαλέσουν δόνηση της μάζας σε κατεύθυνση κάθετη στον άξονα κίνησης. Με συνδυασμό τέτοιων γυροσκοπίων σε άξονες κάθετους μεταξύ τους και με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων είναι δυνατό να βρεθεί η κατεύθυνση του στόχου. Πιο σύγχρονα γυροσκοπία διεξάγουν μετρήσεις απευθείας του γωνιακού ρυθμού περιστροφής περί ενός σταθερού άξονα. Συνδυασμοί τέτοιων γυροσκοπίων σε τοπολογίες όπως η προαναφερθείσα σε συνδυασμό με κατάλληλους υπολογιστικούς αλγορίθμους δίνουν τον προσανατολισμό του στόχου σε σχέση με μία αρχική θέση αυτού.

Η χρήση γυροσκοπίων παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα στην εφαρμογή της. Μια και δεν κάνουν χρήση ακτινοβολίας ή μηχανικών υπερμεγεθών εξαρτημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλη εμβέλεια καθώς δεν απαιτούν συνθήκες απευθείας οπτικής συνιστώσας (line of sight). Επιπλέον είναι αναισθητα σε εξωτερικές παρεμβολές και στο θόρυβο περιβάλλοντος. Τα γυροσκόπια έχουν πολύ καλή συμπεριφορά ως προς το τρεμόπαιγμα, μια και μπορούν να μετρήσουν το γωνιακό ρυθμό απόκλισης με θόρυβο της τάξης του $0,001^\circ/s$. Το προκαλούμενο τρεμόπαιγμα της εικόνας είναι μη αντιληπτό από το χρήστη του Εικονικού Περιβάλλοντος. Ένα ακόμα αισθητό πλεονέκτημα είναι η ταχύτητα με την οποία ανταποκρίνονται τα γυροσκόπια. Οι μετρήσεις των γυροσκοπίων μπορούν να δειγματοληπτούνται όσο συχνά αυτό είναι απαραίτητο μια και δεν χρειάζεται κάποια ιδιαίτερη επεξεργασία για να προκύψουν. Η πολύ καλή συμπεριφορά των γυροσκοπίων ως προς τις παραμέτρους αυτές τα καθιστούν ως τους κύριους αισθητήρες σε εφαρμογές που απαιτούν εντοπισμό θέσης και κατεύθυνσης μιας συσκευής απεικόνισης στο κεφάλι (HMD), μια και η καθυστέρηση και το τρεμόπαιγμα της εικόνας θεωρούνται οι πιο κρίσιμες παράμετροι σε αυτές τις εφαρμογές.

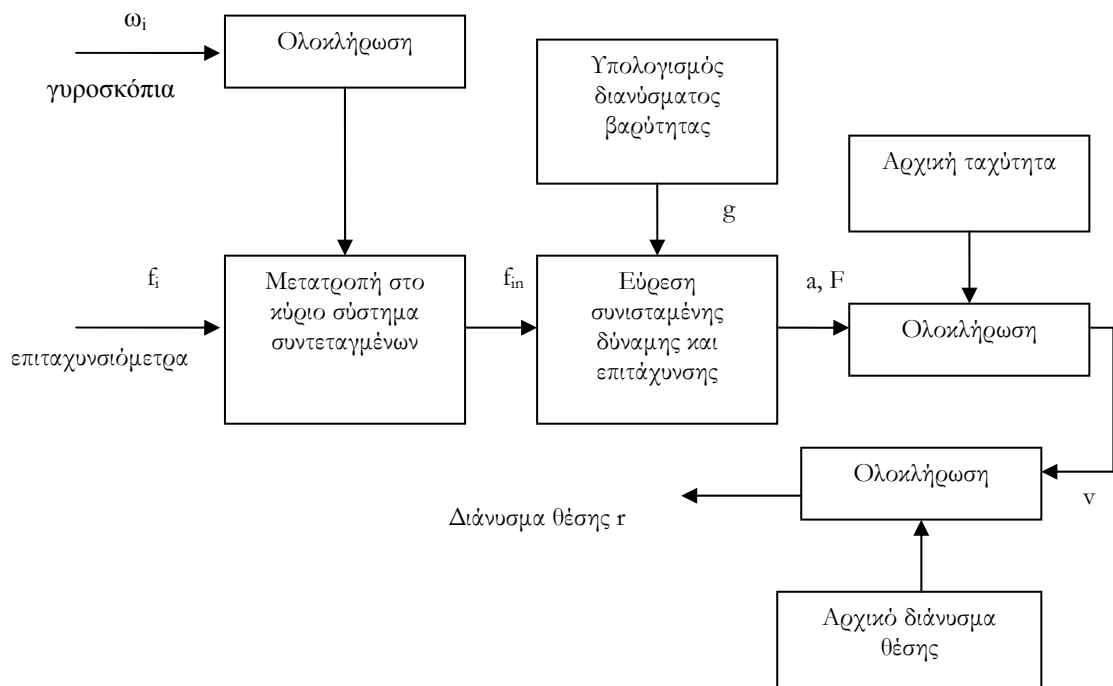
Το βασικό πρόβλημα που παρουσιάζεται στα γυροσκόπια είναι η σταδιακή τους ολίσθηση. Οι κύριοι λόγοι που συνιστούν σε αυτό το φαινόμενο είναι: α) η αρχική απόκλιση του γυροσκοπίου που οδηγεί σε ένα σταδιακά αυξανόμενο γωνιακό λάθος $\varphi(t) = \delta\omega \cdot t$, β) ο λευκός θόρυβος $n(t)$ που οδηγεί σε γωνιακά σφάλματα που ακολουθούν κατανομή Brownian Motion με μηδενικό μέσο όρο αλλά με ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα που αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο, γ) λάθη βαθμονόμησης που προκαλούν προσθετική απόκλιση στις μετρήσεις και δ) η αστάθεια της αρχικής απόκλισης. Αν και η αρχική απόκλιση μπορεί να μετρηθεί και να εξαλειφθεί από τις μετρήσεις, μία απόκλιση δευτερεύουσας τάξης παραμένει. Η σταθερότητα της αρχικής απόκλισης (bias) μοντελοποιείται ως μία διεργασία Gauss-Markov και είναι η πιο σημαντική παράμετρος, μια και όλες οι άλλες ατέλειες μπορούν με διάφορες τεχνικές να υπολογιστούν και να εξαλειφθούν.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι το φαινόμενο της ολίσθησης αποτρέπει τη συνεχή χρονικά χρησιμοποίηση γυροσκοπίων σε εφαρμογές εντοπισμού θέσης και κατεύθυνσης. Η διαδικασία εντοπισμού πρέπει να κάνει παύσεις και να εικινεί από την αρχή σε τακτά χρονικά διαστήματα για να διορθώνονται οι τυχόν δημιουργούμενες αποκλίσεις. Ο χρόνος λειτουργίας χωρίς επανεκκίνηση για τα εμπορικά γυροσκόπια και για τις συγκεκριμένες απαιτήσεις ακρίβειας ενός περιβάλλοντος Εικονικής Πραγματικότητας είναι της τάξης του λεπτού. Γυροσκόπια μεγαλύτερης ακρίβειας (με χρήση σε πυραυλικά συστήματα κατεύθυνσης) έχουν αντίστοιχο χρόνο λειτουργίας 20 λεπτών αλλά το κόστος τους είναι 100 φορές μεγαλύτερο. Αναμένεται πάντως στα επόμενα χρόνια πως η ψαλίδα, τόσο στην απόδοση, όσο και στην τιμή να κλείσει σημαντικά.

Μία λύση για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αποτελεί η διόρθωση της ολίσθησης με χρήση άλλων αισθητήρων σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τέτοιοι αισθητήρες είναι συνήθως βαρυμετρικοί (για να διατηρηθούν τα πλεονεκτήματα σε ότι έχει σχέση με την εμβέλεια λειτουργίας και τη μη ανάγκη απευθείας συνιστώσας) και χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν την απόκλιση στο pitch και στο roll σε τακτά χρονικά διαστήματα ενώ μία μαγνητική πυξίδα διορθώνει την απόκλιση στο yaw.

Μία τέτοια λύση ανήκει στην κατηγορία των υβριδικών συστημάτων που θα αναλυθεί σε άλλη παράγραφο. Προσαρμοσμένα φίλτρα Kalman χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν τις τυχόν αποκλίσεις δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στις μετρήσεις από τη δεύτερη κατηγορία αισθητήρων. Τέλος, μία επέκταση του παραπάνω συστήματος για να αποφευχθούν τα προβλήματα που επιφέρει η χρήση μαγνητικής πυξίδας είναι η χρήση μηχανικής γυροπυξίδας (magnetic gyrocompass), η οποία χρησιμοποιεί τον περιστροφικό άξονα της γης για να ευθυγραμμίσει τον άξονα περιστροφής του γυροσκοπίου.

Αδρανειακά λέγονται τα συστήματα που κάνουν χρήση τόσο γυροσκοπίων όσο και επιταχυνσιόμετρων. Συστήματα που χρησιμοποιούν γυροσκόπια εντοπίζουν την κατεύθυνση και όχι τη θέση του στόχου. Σε εφαρμογές που απαιτείται προσδιορισμός της θέσης και κατεύθυνσης του στόχου (εντοπισμός με έξι (6) βαθμούς ελευθερίας με μετρήσεις συντεταγμένων θέσης και ταχύτητας) χρησιμοποιούνται συνδυασμοί γυροσκοπίων (για υπολογισμό των κλίσεων) με επιταχυνσιόμετρα (για υπολογισμό μετατοπίσεων). Η αρχή λειτουργίας τέτοιων συστημάτων έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε αδρανειακά συστήματα πλοήγησης (Inertial Navigation Systems) πλοίων. Μια τέτοια όμως εφαρμογή, έχει εντελώς διαφορετικές απαιτήσεις σε ακρίβεια και επίδοση σε σχέση με τη χρησιμοποίησή της σε ένα σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας. Υβριδικά συστήματα αυτής της κατηγορίας, χρησιμοποιούν τρία γυροσκόπια με άξονες κάθετους μεταξύ τους για να μετρούν τους γωνιακούς ρυθμούς περιστροφής ως προς τους άξονες αυτούς και τρία επιταχυνσιόμετρα για μετρήσεις μετατόπισης στους ίδιους άξονες. Έτσι το σύστημα έχει πλήρη περιγραφή της κατεύθυνσης και της θέσης του στόχου σε σχέση με μία σταθερή θέση αναφοράς. Λεπτομερέστερα, τα επιταχυνσιόμετρα μετρούν τη συνισταμένη μη βαρυτική δύναμη f που ασκείται στη μάζα τους. Το διάνυσμα της δύναμης μεταφέρεται με κατάλληλους μετασχηματισμούς στο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων, χρησιμοποιώντας την πληροφορία κατεύθυνσης από τα γυροσκόπια. Προσθέτοντας στην f τη δύναμη βαρύτητας υπολογίζεται η συνολική συνισταμένη δύναμη και επομένως και το διάνυσμα της συνισταμένης επιτάχυνσης. Με διπλή ολοκλήρωση βρίσκεται η μετατόπιση του σώματος ως προς το σημείο αναφοράς. Η λειτουργία του συστήματος φαίνεται και στο ακόλουθο μπλοκ διάγραμμα.



Εικόνα 7: Λογικό διάγραμμα αδρανειακού συστήματος εντοπισμού

Οι πιθανές αποκλίσεις του συστήματος οφείλονται σε διάφορες αιτίες αλλά επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία του. Πιθανή αρχική απόκλιση στα επιταχυνσιόμετρα θα προκαλέσει συνεχώς αυξανόμενα λάθη στον υπολογισμό της μετατόπισης λόγω της διπλής ολοκλήρωσης που πραγματοποιείται. Επιπλέον αρχικές αποκλίσεις στα γυροσκοπία είναι ακόμα πιο σημαντικές μια και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συνολικής επιτάχυνσης (μία απόκλιση $\delta\theta$ θα οδηγήσει σε λάθος στον υπολογισμό της οριζόντιας επιτάχυνσης κατά $g\sin(\delta\theta)$). Οι παραπάνω λόγοι κάνουν αδύνατη τη λειτουργία του συστήματος για χρόνο μεγαλύτερο του λεπτού σε εφαρμογές που απαιτείται ακρίβεια εκατοστών, με χρήση απλών αισθητήρων και χωρίς εξωτερική διόρθωση των μετρήσεων. Βέβαια το παραπάνω σύστημα θα μπορούσε να λειτουργήσει βοηθητικά σε υβριδικά συστήματα συμπληρώνοντας άλλα συστήματα εντοπισμού και παρέχοντας μετρήσεις υψηλής ακρίβειας και αξιοπιστίας σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Εντοπισμός θέσης με αισθητήρες Ηλεκτρικού Πεδίου

Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος εντοπισμού θέσης με αισθητήρες ηλεκτρικού πεδίου εφαρμόζεται σε ζωντανούς οργανισμούς. Οι καρχαρίες και ορισμένα γατόψαρα χρησιμοποιούν ασθενή ηλεκτρικά πεδία για τον καθορισμό του σχήματος αντικειμένων και της απόστασης αυτών. Εντούτοις η ανίχνευση στατικών ηλεκτρικών πεδίων δεν ενδείκνυται για χρήση σε συστήματα εντοπισμού θέσης και κίνησης μια και είναι ευάλωτη σε αρκετούς παράγοντες (π.χ. στατική φόρτιση και άλλων αντικειμένων πλην του στόχου, διαρροή ηλεκτρικού φορτίου από το στόχο κτλ.). Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται με χρήση ηλεκτρικών δημιουργουμένων πεδίων χαμηλών συχνοτήτων. Με χρήση τέτοιων πεδίων, ένα σύστημα μπορεί να υπολογίσει την απόσταση μεταξύ

δύο αγώγιμων ηλεκτροδίων μετρώντας τη χωρητικότητα του μεταξύ τους διαστήματος κι ενώ τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά του χώρου είναι απολύτως γνωστά.

Γενικά υπάρχουν δύο τεχνικές για τη μέτρηση απόστασης (και κατ' επέκταση θέσης) με χρήση αισθητήρων ηλεκτρικού πεδίου. Η πρώτη περιλαμβάνει την εγκατάσταση ενός ακτινοβολούντος ηλεκτροδίου και ενός ηλεκτροδίου στη γη. Γνωρίζοντας τη χωρητική συμπεριφορά του χώρου μεταξύ των ηλεκτροδίων η παρεμβολή οποιουδήποτε αγώγιμου αντικείμενου (στόχος) μεταξύ τους μεταβάλλει (μειώνει) τη χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Από την μεταβολή αυτή δύναται να εξαχθεί η απόσταση του στόχου. Στη δεύτερη τεχνική ο ίδιος ο στόχος (συσκευή σε ανθρώπινο χέρι) φέρει το ακτινοβολών ηλεκτρόδιο με αποτέλεσμα, λόγω της σύζευξης του ακτινοβολητή με το ανθρώπινο σώμα, να δρα αυτό σαν ένας συνολικός ακτινοβολητής. Επομένως πλησιάζοντας (ή απομακρυνόμενο) το δεύτερο γειωμένο ηλεκτρόδιο αυξάνει (ή μειώνει) τη μετρούμενη χωρητικότητα και καθιστά δυνατή την εύρεση της θέσης του.

Ένα τέτοιο σύστημα χαρακτηρίζεται από χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή διακριτικότητα [ZIMM95]. Επιπλέον πλεονεκτήματα αποτελούν η εύκολη κατασκευή και το πιθανά χαμηλό βάρος, καθώς και το ότι δεν απαιτείται απευθείας επαφή με το ανθρώπινο σώμα (μη αγώγιμο αντικείμενο). Εν τούτοις η δυσκολία αναλυτικής μοντελοποίησης του κοντινού πεδίου των ηλεκτροδίων καθιστά προβληματική τη λειτουργία του συστήματος όταν τα δύο ηλεκτρόδια πλησιάσουν αρκετά. Επιπλέον, το γεγονός (στη δεύτερη τεχνική) ότι ολόκληρο το σώμα λειτουργεί ως ακτινοβολητής μετατρέπει τις μετρήσεις σε μετρήσεις προσδιορισμού της θέσης του σώματος και όχι ενός προσεγγιστικά σημειακού στόχου που βρίσκεται πάνω σε αυτό. Επιπρόσθετα, μια και οι μετρήσεις βασίζονται στο ποσοστό των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου (στην πρώτη τεχνική) που διακόπτονται από οποιοδήποτε αντικείμενο εισέρχεται μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι φανερό πως οι μετρήσεις είναι ευαίσθητες στις ανθρώπινες χειρονομίες και στη στάση του ανθρώπινου σώματος. Το παραπάνω οδηγεί σε μειωμένη ακρίβεια και εμποδίζει την ευρεία χρήση τέτοιων αισθητήρων σε εφαρμογές που, όπως αυτή, απαιτούν υψηλή ακρίβεια.

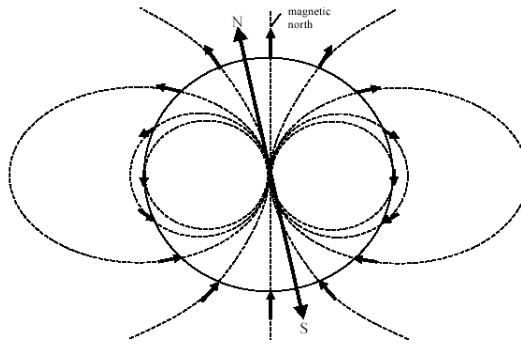
Εντοπισμός θέσης με αισθητήρες Μαγνητικού Πεδίου

Σε αντίθεση με τους αισθητήρες ηλεκτρικού πεδίου, οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου δεν επηρεάζονται από την παρουσία μη μεταλλικών αντικειμένων (μη αγώγιμων) όπως το ανθρώπινο σώμα. Επιπλέον δεν θέτουν απαιτήσεις για απευθείας συνιστώσα (όπως π.χ. ο εντοπισμός με οπτικά ή ακουστικά συστήματα). Θα διακρίνουμε τα συστήματα αυτά σε δύο βασικές ομάδες: τα συστήματα γεωμαγνητικών αισθητήρων και τα συστήματα ενεργών πηγών. Τα πρώτα βασίζουν τη λειτουργία τους στη χρήση του γήινου μαγνητικού πεδίου, ενώ τα δεύτερα δημιουργούν μαγνητικά πεδία για τον εντοπισμό του στόχου.

Τα συστήματα που κάνουν χρήση γεωμαγνητικών αισθητήρων είναι μεταξύ των πρώτων που χρησιμοποιήθηκαν μια και η αρχή λειτουργίας τους ήταν ευρέως γνωστή. Ο εντοπισμός του στόχου

και της κίνησης αυτού γίνεται με χρήση του γεωμαγνητικού πεδίου. Ηλεκτρονικές πυξίδες τοποθετημένες σε HMDs έδιναν ενδείξεις για τη θέση και κατεύθυνση του στόχου.

Ενδογενές πρόβλημα όλων των αντίστοιχων εφαρμογών αποτελεί η απόκλιση των μαγνητικών από τους γεωγραφικούς πόλους. Το παραπάνω συνιστά πρόβλημα μια και στα συστήματα εντοπισμού γίνεται αναγωγή σε γεωγραφικούς άξονες. Ο μαγνητικός όμως βόρειος πόλος απέχει π.χ. 700 μίλια από τον γεωγραφικό βόρειο πόλο ενώ μετακινείται και κατά 15 περίπου μίλια δυτικά κάθε χρόνο. Η μετατόπιση αυτή γίνεται αισθητή μέσα από τον υπολογισμό της μαγνητικής απόκλισης που μπορεί να φτάσει και τις $\pm 60^\circ$ σε ορισμένες περιπτώσεις. Για τη λύση των προβλημάτων αυτών οι προηγμένες πυξίδες χρησιμοποιούν και πληροφορίες γεωγραφικού μήκους και πλάτους για τις ενδείξεις τους. Οι πληροφορίες για τη θέση του στόχου αντλούνται από το οριζόντιο μαγνητικό πεδίο. Εντούτοις οι σύγχρονες ηλεκτρικές πυξίδες χρησιμοποιούν το συνολικό διάνυσμα του γήινου μαγνητικού πεδίου και αντλούν πληροφορίες για τα pitch και roll από γυροσκοπικούς ή βαρομετρικούς αισθητήρες για να εξάγουν πληροφορίες για την οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα του πεδίου.



Εικόνα 8: Απόκλιση γεωγραφικών από μαγνητικούς πόλους

Οι πυξίδες χρησιμοποιούν τη σχέση $\tan^{-1}\left(\frac{B_x}{B_y}\right)$, όπου B_x και B_y οι οριζόντιες συνιστώσες

του μαγνητικού πεδίου στους άξονες x και y , για να εξάγουν την κατεύθυνση του βόρειου γεωγραφικού πόλου. Δεδομένου της μαγνητικής απόκλισης I , ένα σφάλμα ε υπολογισμού της κλίσης οδηγεί σε σφάλμα μέτρησης που δίνεται από τη σχέση $\delta = \tan^{-1}(\sin(\varepsilon)\tan(I))$. Το γεγονός αυτό εμποδίζει την εφαρμογή αντίστοιχων συστημάτων σε περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλη μαγνητική απόκλιση (αριετά βόρειες και νότιες περιοχές). Ένας δεύτερος λόγος που εμποδίζει την εφαρμογή συστημάτων εντοπισμού θέσης που βασίζονται σε γεωμαγνητικούς αισθητήρες, είναι η σημαντική απόκλιση των μετρούμενων τιμών κατά τη διάρκεια της κίνησης (ιδίως σε εξωτερικούς χώρους) και η σημαντική επίδραση των μεγάλων μεταλλικών αντικειμένων στη λειτουργία του συστήματος. Γενικά τέτοια συστήματα δεν χρησιμοποιούνται σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας πλην ελάχιστων εξαιρέσεων.

Τα συστήματα εντοπισμού που κάνουν χρήση ενεργών μαγνητικών πηγών είναι μάλλον τα πιο διαδεδομένα στα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το αν η πηγή του μαγνητικού πεδίου είναι εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος. Τα συστήματα αυτά είναι προφανώς ανεπηρέαστα από τα προαναφερθέντα προβλήματα μέτρησης με βάση το γήινο μαγνητικό πεδίο.

Τα συστήματα ενεργών πηγών εναλλασσόμενου ρεύματος ([RAAB79], [RAAB77], [KUIP75], [KUIP76]) χρησιμοποιούν για εκπομπή και λήψη ένα σύστημα τριών ορθογώνιων πηνίων με κοινό πυρήνα. Τα πηνία διεγείρονται διαδοχικά με ελεγχόμενο τρόπο από ημιτονοειδή ρεύματα συχνότητας, συνήθως, 7-14kHz. Ο αισθητήρας λήψης αποτελείται από επίσης τρία πηνία και μετράει τις εννέα επαγόμενες τάσεις από το δημιουργημένο μαγνητικό πεδίο.

Στα συστήματα ενεργών πηγών συνεχούς ρεύματος ([BLOO89], [DOHE90]) ο πομπός (ίδιος με πριν) διεγείρεται με συνεχή ρεύματα και ο δέκτης – χρησιμοποιώντας απλή μαγνητρώνη, αισθητήρες μέτρησης του φαινόμενου Hall, αισθητήρες μέτρησης μαγνητικής ροής, γενικά επαγωγικά μαγνητικά υλικά κτλ. – διεξάγει μετρήσεις του δημιουργημένου μαγνητικού πεδίου. Τονίζεται πως ο δέκτης περιμένει για ένα διάστημα μετά τη δημιουργία του πεδίου, για να μην επηρεαστεί από τυχόν επαγόμενα ρεύματα Eddy σε γειτονικές μεταλλικές επιφάνειες, ή, σε άλλη περίπτωση, οι παρεμβολές αυτές αφαιρούνται εκ των υστέρων με χρήση λογισμικού που έχει λάβει γνώση του εποπτευόμενου χώρου.

Αν και θα ήταν αναμενόμενο πως η διαχωριστικότητα και ακρίβεια των μετρήσεων για τον υπολογισμό της θέσης (απόστασης) του στόχου, θα ήταν ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου και άρα αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη, αυτό δεν ισχύει. Τα παραπάνω μεγέθη είναι ανάλογα της βαθμωτής μεταβολής (gradient) του πλάτους της έντασης με την απόσταση. Δηλαδή ισχύει $\Delta r = \frac{dr}{db} \Delta b \propto r^4 \Delta b$, όπου b η ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Άρα, ένα παρεμβάλλον μικρής έντασης πεδίο μπορεί να δημιουργήσει σφάλματα μέτρησης ανάλογα με την τέταρτη δύναμη της απόστασης. Το ίδιο αποδεικνύεται πως ισχύει και για τις μετρήσεις προσδιορισμού κατεύθυνσης του στόχου. Το παραπάνω αποτελεί σημαντική τροχοπέδη για τη χρησιμοποίηση μαγνητικών αισθητήρων σε εφαρμογές που απαιτείται εντοπισμός θέσης σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις.

Επιπλέον πρόβλημα για την ακρίβεια των συστημάτων αυτών αποτελεί η επαγωγή ρευμάτων Eddy σε μεταλλικές επιφάνειες που επηρεάζουν το μετρούμενο πεδίο (για εναλλασσόμενες πηγές) και τα σήματα χαμηλών συνοτήτων (για τους δέκτες συνεχών σημάτων). Τα τελευταία μπορεί να οδηγήσουν και σε λάθη ακρίβειας της τάξης των 30mm σε μετρούμενες αποστάσεις των 6m.

Τα συστήματα αισθητήρων μαγνητικού πεδίου είναι ευαίσθητα στην παρουσία μεταλλικών αντικειμένων στην περιοχή μέτρησης [NIXO98]. Θεωρώντας ένα μεταλλικό αντικείμενο στην περιοχή κάλυψης του συστήματος που απέχει αποστάσεις d_1 και d_2 από τον πομπό και το δέκτη αντίστοιχα, αυτό θα λειτουργήσει λόγω των επαγόμενων ρευμάτων Eddy σαν ακτινοβολούσα

μαγνητική πηγή με ένταση ανάλογη προς το λόγο $1/d_1^3$. Επομένως στο δέκτη θα δημιουργηθεί ένα παρεμβάλλον πεδίο έντασης ανάλογης με $\frac{1}{d_1^3 d_2^3}$ και το εισαγόμενο σφάλμα μέτρησης θα είναι

$$\Delta r \propto \frac{d^4}{d_1^3 d_2^3} \text{ όπου } d \text{ η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Η παραπάνω σχέση αν και}$$

προσεγγιστική έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά και καταδεικνύει πως σωστότερη λειτουργία του συστήματος επιτυγχάνεται τοποθετώντας κοντά το πομπό και το δέκτη και απομακρύνοντας, κατά το δυνατό περισσότερο, τις μεταλλικές επιφάνειες.

Η καθυστέρηση του συστήματος γενικά προσδιορίζεται μάλλον από την ταχύτητα του συστήματος Εικονικής Πραγματικότητας, παρά από τα χαρακτηριστικά του συστήματος εντοπισμού, μια και αυτό έχει αρκετά μεγάλο ρυθμό ανανέωσης μετρήσεων και μικρή συστημική καθυστέρηση [ADEL96]. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι το σύστημα δεν απαιτεί απευθείας συνιστώσα μεταξύ πομπού και δέκτη, το έχει αναγάγει σε ένα από τα πιο δημοφιλή συστήματα. Τεχνικές προτείνονται για την καλύτερη λειτουργία συστήματος που αποφέρουν καλύτερα αποτελέσματα σε θέματα εμβέλειας, διαχωριστικότητας μετρήσεων και καθυστέρησης. Η διαδικασία αναζήτησης του καλύτερου συνδυασμού λειτουργίας αύξησε σημαντικά το κόστος αυτών των συστημάτων, που, αν και ευρέως διαδεδομένα, κρίνονται ακόμα πολύ ακριβά.

Εντοπισμός θέσης με ραδιοκύματα, μικροκύματα και χιλιοστομετρικά κύματα

Η χρησιμοποίηση ραδιοκυμάτων, μικροκυμάτων ή χιλιοστομετρικών κυμάτων (γενικά ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων) σε συστήματα εντοπισμού θέσης διαφοροποιείται αρκετά από τις περιπτώσεις χρήσης αισθητήρων ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου. Η πιο βασική διαφορά είναι πως στις συγκεκριμένες εφαρμογές χρησιμοποιείται η ενέργεια του ακτινοβολούμενου πεδίου που φθίνει ανάλογα του $1/r^2$, επιτρέποντας μεγαλύτερη εμβέλεια λειτουργίας του συστήματος. Επιπλέον, σε αντίθεση με τα ακουστικά κύματα, τα εξεταζόμενα δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες απώλειες στον αέρα, ενώ δεν επηρεάζονται από τα ρεύματα αέρα και τη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να ενδείκνυνται για χρήση και σε εξωτερικούς χώρους. Προς το παρόν δεν χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα εντοπισμού ανθρώπινων στόχων σε VR συστήματα αλλά κυρίως σε συστήματα εντοπισμού κινητών ([CONG02], [RAPP96], [WANG00]), σε βοηθήματα προσγείωσης και κατεύθυνσης αεροπλάνων (π.χ. ILS και VOR) ή σε διεθνή συστήματα εντοπισμού και πλοήγησης όπως τα GPS ([GETT93]), LORAN, GALILEO, κτλ.

Ραδιοκύματα σχετικά χαμηλών συχνοτήτων δεν δύναται να χρησιμοποιηθούν λόγω των μεγάλων κεραιών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Το βάθος διείσδυσης των κυμάτων στο νερό μικραίνει καθώς αυξάνει η συχνότητα, με αποτέλεσμα το ανθρώπινο σώμα, αποτελούμενο σε μεγάλο ποσοστό από νερό, να διακόπτει τη διάδοση των υψηλών συχνοτήτων, αν και αυτές θα ήταν επιθυμητές για τη διεξαγωγή μετρήσεων υψηλότερης ακρίβειας. Μη αγώγιμα υλικά είναι διαφανή για ακτινοβολία από πολύ μικρές συχνότητες ως την χιλιοστομετρική μπάντα δίνοντας στη χρήση των

συστημάτων αυτών σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα οπτικά ή ακουστικά συστήματα (μη αναγκαιότητα απευθείας συνιστώσας).

Η συνηθέστερη τεχνική που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόστασης σε αυτά τα συστήματα είναι η μέτρηση του χρόνου διαδρομής (time-of-flight, TOF). Ένα σήμα εκπέμπεται περιοδικά από τον πομπό (στόχο) και λαμβάνεται από το δέκτη, ο οποίος όντας συγχρονισμένος με τον πομπό υπολογίζει το χρόνο διαδρομής του σήματος και κατ' επέκταση την απόσταση του στόχου (το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι προκαθορισμένο). Η ακρίβεια και κυρίως η διαχωριστικότητα του συστήματος αυξάνει με τη συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος. Αυξάνοντας τη συχνότητα του συστήματος πρέπει οι δέκτες να διαθέτουν ρολόγια και μετρητές εξαιρετικά μεγάλης ακρίβειας που μπορούν να υλοποιηθούν με ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα Γαλλίου-Αρσενικού, τα οποία είναι ιδιαίτερα ακριβά και έχουν υψηλή κατανάλωση.

Μία λύση είναι η χρήση μεθόδων συμβολομετρίας, όπου δείγμα του εκπεμπόμενου σήματος συγκρίνεται με το λαμβανόμενο σήμα και ο χρόνος διαδρομής του εξάγεται από τη διαφορά φάσης των δύο σημάτων. Δεδομένου των υψηλών συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται (και άρα του μικρού χρόνου διαδρομής) πρέπει ο δέκτης αρχικά να γνωρίζει τη θέση του στόχου ώστε να μπορεί να προσθέσει στην υπολογιζόμενη διαφορά φάσης τον κατάλληλο αριθμό μηκών κύματος ($2k\pi$, $k = 1, 2, 3, \dots$), ώστε να αποδώσει την αληθινή απόσταση. Γίνεται αντιληπτό πως αν ο στόχος κινείται πολύ γρήγορα η παραπάνω τεχνική δύναται να αποτύχει. Σε πολλές περιπτώσεις για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν γεννήτριες αναλογικού σήματος ράμπας. Το κύκλωμα χρονισμού και η γεννήτρια σταματούν κατά τη λήψη του σήματος και η τιμή της τάσης στον πυκνωτή της γεννήτριας ράμπας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του χρόνου διαδρομής με παρεμβολή (interpolation) στην τιμή του ψηφιακού μετρητή του κυκλώματος χρονισμού. Μία τρίτη λύση θα ήταν η εξαγωγή του χρόνου διαδρομής του σήματος από το μέσο όρο μιας σειράς μετρήσεων. Η λύση αυτή θα απαιτούσε ηλεκτρονικά κυκλώματα επεξεργασίας που θα λειτουργούσαν σε μικρότερη συχνότητα αλλά αναιρεί τα πλεονεκτήματα της χρήσης υψηλής συχνότητας που επιτρέπει υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας.

Μία τεχνική που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί είναι η τεχνική ευρέως φάσματος (spread spectrum) με χρήση κυκλωμάτων DLL κατά το παράδειγμα των δεκτών GPS ([PSIA01], [MANA04]). Πιο συγκεκριμένα μια ψευδοτυχαία ακολουθία θορύβου (pseudo-random noise code – PRN) πολυπλέκεται με το εκπεμπόμενο σήμα. Ο δέκτης χρησιμοποιεί ένα αντίγραφο της ψευδοτυχαίας ακολουθίας ολισθημένο κατά τ , το οποίο πολλαπλασιάζει με το ληφθέν σήμα. Από τη συσχέτιση των δύο εξάγεται το συμπέρασμα για το χρόνο διαδρομής του σήματος (π.χ. αν η συσχέτιση των δύο σημάτων είναι 1 τότε ο χρόνος διαδρομής είναι τ). Και στη συγκεκριμένη τεχνική το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης δρα ανασταλτικά. Σήματα που φτάνουν στο δέκτη με καθυστέρηση μεγαλύτερη από το μήκος του chip της ψευδοτυχαίας ακολουθίας απορρίπτονται εύκολα. Για να είναι εφαρμόσιμη η τεχνική σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας, όπου η διαφορά μήκους διαδρομής μεταξύ της απευθείας και των άλλων συνιστωσών μπορεί να είναι της

τάξης των εκατοστών απαιτείται η χρήση αρκετά υψηλών συχνοτήτων και chip πολύ μικρού μήκους που καθιστούν δύσκολη τη σχετική εφαρμογή.

Η χρήση χιλιοστομετρικών κυμάτων θα μπορούσε να προσφέρει ένα μεγαλύτερο εύρος ζώνης, ικανό να δώσει μετρήσεις μεγαλύτερης ακρίβειας και διαχωριστικότητας. Με πρόωμη ανίχνευση του πρώτου αφιχθέντος κύματος, θα μπορούσε να επιτευχθεί μεγάλη απόρριψη της παρεμβολής από πολυδιαδρομική διάδοση. Το υψηλό κόστος των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και η μη παραχώρηση της μπάνας άνω των 60GHz (πλην ελάχιστων εξαιρέσεων) για εμπορικές εφαρμογές έχουν εμποδίσει τη διάδοση τέτοιων συστημάτων.

Στο μέλλον συστήματα αναμένεται να κάνουν χρήση σημάτων ευρέως φάσματος (ultra-Wideband). Τέτοια σήματα είναι μη ημιτονοειδή ηλεκτρομαγνητικά σήματα και ονομάζονται συνήθως σήματα βασικής ζώνης (baseband) ή σήματα άνευ φέροντος (carrierless). Τα περισσότερα UWB σήματα χρησιμοποιούν ακολουθίες μικρών παλμών που εκπέμπονται τυχαία χρονικά (βάσει μιας γνωστής ψευδοτυχαίας ακολουθίας θορύβου PRN) με αποτέλεσμα το τελικό σήμα να μοιάζει με απλό λευκό θόρυβο και να είναι αναισθητό σε κάθε είδους παρεμβολή από άλλα συστήματα ([MCEW93], [TAYL95]). Το εύρος ζώνης τέτοιων σημάτων εκτείνεται από DC ως αρκετά GHz με αποτέλεσμα, η παρεμβολή μεταξύ δύο πομπών να είναι εξαιρετικά σπάνια δεδομένου του πολύ μικρού μήκους των ακολουθιών και της διαφορετικής PRN που χρησιμοποιείται. Τα χαρακτηριστικά των UWB σημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόρριψη σημάτων που οφείλονται στην πολυδιαδρομική διάδοση. Π.χ. με χρήση μίας ακολουθίας διάρκειας 200ps, σήματα ανάκλασης που θα διανύσουν διαδρομές μεγαλύτερες κατά 6cm από την απευθείας συνιστώσα θα απορριφθούν. Προς τούτο, αναμένεται συστήματα εντοπισμού θέσης σε περιβάλλοντα Εικονικής πραγματικότητας να κάνουν χρήση σημάτων UWB στο μέλλον.

Εντοπισμός θέσης με οπτικούς αισθητήρες

Τα συστήματα εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιούν οπτικούς αισθητήρες λειτουργούν σε περιοχές συχνοτήτων στο ορατό και υπέρυθρο τμήμα του φάσματος [RIBO01a]. Ο πιο σημαντικός λόγος είναι το υψηλό κόστος κατασκευής αισθητήρων σε υψηλότερες συχνότητες και οι πιθανές επιπλοκές υγείας που μπορεί να προκληθούν από την επαφή του ανθρώπου με την ακτινοβολία σε τέτοιες συχνότητες. Έτσι, υπεριώδης ακτινοβολία ή ακτίνες X ή και Γ δεν χρησιμοποιούνται σε εν λόγω συστήματα. Συνήθετα οι τεχνικές που χρησιμοποιούν τα συστήματα οπτικών αισθητήρων κατηγοριοποιούνται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την αρχή λειτουργίας: σε συστήματα ανίχνευσης δέσμης, σε συστήματα μέτρησης χρόνου διαδρομής και σε συστήματα δομημένου φωτός [FOX02].

Στα συστήματα ανίχνευσης δέσμης η αρχή λειτουργίας βασίζεται στον εντοπισμό δέσμης ή δεσμών φωτός (συνήθως υπέρυθρης ακτινοβολίας) από έναν ή περισσότερους αισθητήρες. Από την ή τις γωνίες άφιξης εξάγονται οι συντεταγμένες του στόχου με χρήση αλγορίθμων τριγωνοποίησης (triangulation).

Σε συστήματα «έξω-μέσα», ένας αριθμός από κάμερες είναι τοποθετημένες στον περιβάλλοντα χώρο και μετρούν τις γωνίες κατεύθυνσης με τις δέσμες φωτός που ξεινούν από το στόχο. Το μεγαλύτερο πρόβλημα σε αυτού του είδους τις διατάξεις είναι η επιλογή μεταξύ υψηλής διαχωριστικότητας και μεγαλύτερου χώρου λειτουργίας. Χρησιμοποιώντας αισθητήρες με μεγάλο άνοιγμα γωνίας λήψης (FOV), η διαχωριστικότητα που επιτυγχάνεται είναι μικρή αλλά ο χώρος τομής των γωνιών λήψης των αισθητήρων και κατ' επέκταση ο χώρος λειτουργίας του συστήματος αρκετά μεγάλος. Αντιθέτως επιλέγοντας μικρό FOV μπορούμε να πάρουμε πολύ ακριβείς μετρήσεις σε μικρό όμως χώρο εργασίας.

Χρησιμοποιώντας διάταξη «μέσα-έξω» μπορούμε εύκολα να πετύχουμε μεγάλη διαχωριστικότητα στις μετρήσεις κατεύθυνσης που διεξάγονται από οπτικό αισθητήρα πάνω στο στόχο με χρήση δεσμών φωτός από προκαθορισμένα σημεία στο ταβάνι και στους περιβάλλοντες τοίχους [WANG90]. Για τη μέτρηση απόστασης η διαχωριστικότητα δεν είναι τόσο καλή και μπορεί να βελτιωθεί με χρήση πολλαπλών αισθητήρων.

Οι οπτικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε παθητικούς (imaging) και ενεργούς (non-imaging). Οι πρώτοι (π.χ. CMOS κάμερες) μπορούν να εντοπίσουν πολλαπλούς στόχους, χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας εικόνας και είναι σχετικά ανεπηρέαστοι στον θόρυβο του περιβάλλοντος. Χρησιμοποιούν συνήθως ανακλαστικές επιφάνειες στο στόχο. Οι δεύτεροι (π.χ. lateral effect photo diodes – LEPDs) εστιάζουν και εντοπίζουν τις πηγές φωτός (που βρίσκονται προφανώς στο στόχο) στη γωνία λήψης τους. Λειτουργούν συνήθως σε υπέρυθρα μήκη κύματος και χρησιμοποιούν φίλτρα για να κόβουν τις συχνότητες του ορατού φωτός. Το πλεονέκτημά τους είναι πως δεν κάνουν χρήση εξεζητημένων τεχνικών επεξεργασίας εικόνας.

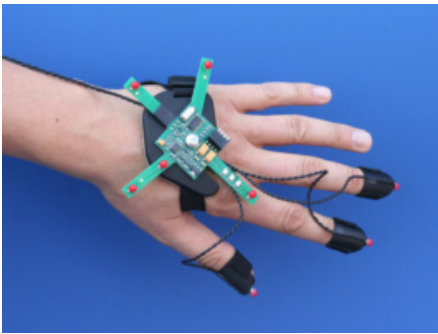
Η πιο σύγχρονη τεχνική που βασίζεται σε οπτικούς αισθητήρες είναι η τεχνική όρασης (vision-based tracking technique). Ο αισθητήρας έχει γύρω του μία σειρά από LEDs καλυμμένα με ανακλαστικό υλικό σε σχήμα που δημιουργεί ένα μεγάλο αριθμό ανακλαστικών επιφανειών, οι οποίες αντανακλούν ένα μεγάλο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας της δέσμης στην κάμερα και εμφανίζονται πολύ φωτεινότερες από άλλα αντικείμενα του χώρου. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται καλύτερα σε διατάξεις «μέσα-έξω». Μπορεί να εφαρμοστεί και σε διατάξεις «έξω-μέσα» σε συνδυασμό με άλλους αισθητήρες για μεγαλύτερη ακρίβεια. Η τεχνική αυτή αναμένεται να επικρατήσει τα επόμενα χρόνια, όπως φαίνεται και από τον αριθμό των σχετικών δημοσιεύσεων ([KOLL97], [NEUM96], [HOFF96], [MELL95], [JIAN04], [LEE02], [BRAD98]), μια και παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των κλασικών οπτικών τεχνικών, όπως μεγαλύτερη εμβέλεια λειτουργίας, δυνατότητα πολλαπλών χρηστών, δυνατότητα χρήσης αισθητήρων με μεγάλο άνοιγμα γωνίας λήψης, λειτουργία σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, κ.ά.

Τα οπτικά συστήματα μέτρησης χρόνου διαδρομής, είτε με χρήση απευθείας συνιστώσας είτε με μεθόδους συμβολομετρίας, εξάγουν την απόσταση του στόχου. Συνηθέστερα σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιείται ένα lidar (laser radar). Λόγω της στενότητας της δέσμης, το βασικό πρόβλημα της τεχνικής είναι πως η δέσμη πρέπει διαρκώς να φωτίζει και να ακολουθεί το στόχο. Για

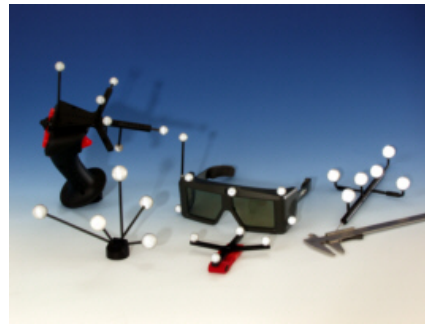
εντοπισμό θέσης κινούμενου στόχου πρέπει να χρησιμοποιηθεί παράλληλα ένας σερβομηχανισμός ο οποίος θα περιστρέφει τη δέσμη του lidar. Από το χρόνο διαδρομής εξάγεται η απόσταση του στόχου ενώ από τις γωνίες αξιμούθιου και ανύψωσης του σερβομηχανισμού οι λοιπές συντεταγμένες [DUCH98]. Το συγκεκριμένο σύστημα δεν εφαρμόζεται ευρέως εξαιτίας του υψηλού κόστους και του χρόνου που χρειάζεται το σύστημα να επανέλθει σε λειτουργία αν η δέσμη χάσει προσωρινά για κάποιο λόγο το στόχο.

Η τεχνική χρήσης δομημένου φωτός κάνει χρήση χωρικά δομημένων μορφών φωτός (γραμμές, πλέγματα) που προβάλλονται στο στόχο. Από την ανασύνθεση της τρισδιάστατης γεωμετρίας των προβαλλόμενων δομών ανασυντίθεται η εικόνα του στόχου και βρίσκεται η απόστασή του. Μία τέτοια χαρακτηριστική διάταξη αποτελείται από δύο σαρωτές δέσμης, τοποθετημένους σε δύο γωνίες του χώρου λειτουργίας του συστήματος οι οποίοι διεξάγουν διαδοχικά δύο οριζόντιες μη επικαλυπτόμενες σαρώσεις και μία κατακόρυφη. Οι δύο πρώτες δίνουν τις συντεταγμένες του στόχου στο οριζόντιο πεδίο, μετά από μία διαδικασία τριγωνοποίησης, και η τελευταία το ύψος του. Σύγχρονοι σαρωτές laser μπορούν να πετύχουν διαχωριστικότητα της τάξης των 0,1mrad. Η εξαγωγή των συντεταγμένων μπορεί να γίνει στον ίδιο το στόχο που επιτρέπει τον ταυτόχρονο προσδιορισμό πολλών στόχων χωρίς παρεμβολή μεταξύ τους.

Μια άλλη διάταξη χρησιμοποιεί προβολείς που προβάλλουν συγκεκριμένες τρισδιάστατες παραστάσεις πάνω στο χώρο εποπτείας. Μία κάμερα ανασυνθέτει τη γεωμετρία του στόχου από τις ατέλειες της προβαλλόμενης παράστασης. Μία άλλη λύση, είναι η χρήση πολωμένου φωτός. Χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή φωτεινής δέσμης στην οροφή του χώρου με πολωτικό περιστρεφόμενο φίλτρο, θα μπορούσε να προσδιοριστεί η εκτροπή του στόχου. Σε συνδυασμό και με άλλους αισθητήρες μπορεί να προσδιοριστεί η θέση του στόχου.



Εικόνα 9: Ενεργοί οπτικοί αισθητήρες



Εικόνα 10: Οπτικοί αισθητήρες βασισμένοι σε τεχνικές όρασης

Εντοπισμός θέσης με ακουστικούς αισθητήρες

Μία ακόμα τεχνική που χρησιμοποιείται σε συστήματα εντοπισμού θέσης σε περιβάλλοντα Εικονικής Πραγματικότητας είναι η χρήση ακουστικών κυμάτων. Μάλιστα, η τεχνική αυτή είναι αυτή που θα προτιμηθεί και θα αναλυθεί για το προτεινόμενο σύστημα διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια. Στόχος αυτής της παραγράφου είναι να εξηγήσει σύντομα τα βασικά χαρακτηριστικά της

συγκεκριμένης τεχνικής και να αναλύσει τους λόγους που προτιμάται σε σχέση με τις προαναφερθείσες τεχνικές.

Δύο είναι οι βασικές αρχές λειτουργίας των συστημάτων αυτών: η μέτρηση του χρόνου διαδρομής ενός ακουστικού κύματος από έναν πομπό σε ένα δέκτη [SUTH68], [PAUS91] και η σύγκριση της φάσης του λαμβανόμενου σήματος με δείγμα του εκπεμπόμενου (phase-coherent συστήματα). Ο στόχος μπορεί να έχει προσαρμοσμένο τον πομπό, είτε το δέκτη. Συνηθέστερα, χρησιμοποιούνται διατάξεις τριών δεικτών σε σταθερά σημεία του περιβάλλοντος χώρου τα οποία λαμβάνουν το ακουστικό σήμα από τον πομπό-στόχο και με τριμεροποίηση (επίλυση συστήματος τριών μη γραμμικών εξισώσεων απόστασης του στόχου ως προς τον κάθε δέκτη, ως προς τις συντεταγμένες του στόχου) βρίσκονται οι συντεταγμένες αυτού. Ο πομπός εκπέμπει ένα στενό υπερηχητικό παλμό ο οποίος λαμβάνεται από τον (τους) δέκτη(ες). Ο δέκτης, όντας σε συγχρονισμό με τον πομπό, μετρά το χρόνο της διαδρομής και γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων βρίσκει την απόσταση του πομπού από τον ίδιο. Ο δέκτης κλειδώνει στο πρώτο σήμα λήψης μετά από την εκπομπή του παλμού, προϋποθέτοντας ότι αυτό εκπροσωπεί την απευθείας συνιστώσα. Έτσι απορρίπτει τα δευτερεύοντα κύματα που προέρχονται από τυχόν ανακλάσεις του πρωτεύοντος κύματος (φαινόμενο πολυδιαδρομικής διάδοσης). Το παραπάνω διευκολύνεται επιπρόσθετα από το γεγονός ότι μια και ο ήχος ταξιδεύει με σχετικά μικρή ταχύτητα οι συνιστώσες από ανάκλαση φτάνουν αρκετά αργότερα από την απευθείας συνιστώσα.

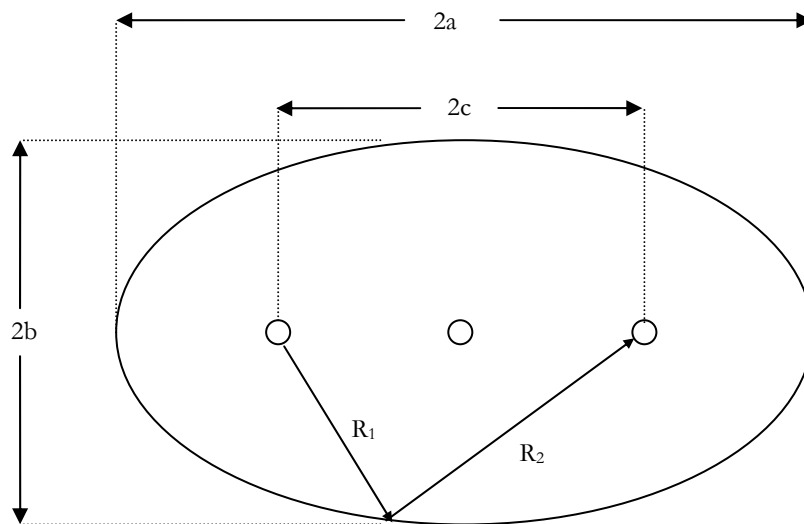
Αντί για στενό παλμό, ο πομπός μπορεί να εκπέμπει συνεχές σήμα και ο δέκτης να μετράει το χρόνο διαδρομής από τη διαφορά φάσης μεταξύ του ληφθέντος σήματος και ενός δείγματος του εκπεμπόμενου σήματος. Δύο είναι τα βασικά προβλήματα σε συστήματα που χρησιμοποιούν συνεχή κύματα. Αφενός πρέπει να υπάρχει γνώση της αρχικής απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη και αφετέρου πρέπει να μετρούνται οι πλήρεις κύκλοι που διαγράφει το δείγμα του εκπεμπόμενου κύματος έως ότου το ληφθέν σήμα φτάσει στο δέκτη, ώστε να υπολογιστεί η ακριβής διαφορά φάσης μεταξύ των δύο. Αφετέρου, το κύμα, όντας συνεχές, λαμβάνεται διαρκώς από το δέκτη με αποτέλεσμα να μην υπάρχει δυνατότητα διάκρισης μεταξύ του απευθείας σήματος και των λοιπών δειγμάτων αυτού. Το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης (σε κλειστούς κυρίως χώρους) καθιστά απαγορευτική τη χρήση συνεχών ακουστικών κυμάτων σε συστήματα εντοπισμού Εικονικής Πραγματικότητας.

Επανερχόμενοι στα συστήματα που χρησιμοποιούν στενούς ακουστικούς παλμούς, και με δεδομένο το ότι κάνουν χρήση λήψης σήματος από τρεις διαφορετικούς δέκτες, βλέπουμε πως ο πομπός θα πρέπει να είναι αρκετά ομοιοκατευθυντικός ώστε το εκπεμπόμενο σήμα να λαμβάνεται από όλους τους δέκτες ανεξαρτήτως της θέσης και της κατεύθυνσης του πομπού. Το εύρος δέσμης από ένα ακουστικό πομπό (κυκλικό πιστόνι) είναι αντιστρόφως ανάλογο με το λόγο D/λ , όπου D η διάμετρος του πιστονιού και λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας [BARA54]. Διαλέγοντας μία τυπική τιμή συχνότητας (π.χ. 40kHz) και σχετικά μικρής διάστασης μικρόφωνα και μεγάφωνα (π.χ. $D = 5,4\text{mm}$) προκύπτουν περίπου ημισφαιρικά μεγάφωνα ($\pm 60^\circ$ 3db). Η μικρή αυτή διάσταση κάνει

τον πομπό ιδιαίτερα βολικό από άποψη μεγέθους και βάρους αλλά μειώνει την αποδοτικότητα (efficiency) αυτού, η οποία είναι ανάλογη με την ενεργό επιφάνεια του και όντας μικρή έχει ως αποτέλεσμα ένα ακουστικό σήμα μικρού σχετικά πλάτους, περιορίζοντας έτσι την εμβέλεια λειτουργίας του συστήματος. Προκειμένου να λειτουργεί το σύστημα με ικανοποιητική εμβέλεια συνήθως χρησιμοποιείται ένας συντονισμένος πομπός σε μία χαμηλή συχνότητα, το σήμα του οποίου στη συνέχεια αυξάνεται γραμμικά κατά πλάτος για 10 περίπου κύκλους (γεννήτρια ράμπας). Δηλαδή ο παλμός είναι διαμορφωμένος κατά πλάτος (γραμμική αύξηση του πλάτους για τους 10 πρώτους κύκλους και γραμμική μείωση για τους υπόλοιπους 10). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει στο δέκτη με μέγιστο πλάτος, με μία επιπλέον καθυστέρηση της τάξης των 10 κύκλων (ή 90mm για μία συχνότητα περίπου στα 40kHz). Οποιοδήποτε σήμα φτάσει στο δέκτη με καθυστέρηση μεγαλύτερη των 90mm εύκολα απορρίπτεται από τον δέκτη, μια και ο δέκτης θα έχει ήδη καταγράψει το μέγιστο πλάτος (peak) του πρωτεύοντος σήματος.

Γενικεύοντας, θεωρούμε t_d το χρόνο από την έναρξη λήψης του σήματος στο δέκτη ως τη λήψη του μέγιστου πλάτους αυτού (ή οποιαδήποτε άλλου χαρακτηριστικού σημείου της κυματομορφής που πρέπει να διαγνωστεί στο δέκτη). Ο χρόνος αυτός εισάγει μία ολισθήση $R_d = c \cdot t_d$ στο σημείο λήψης, όπου c η ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Θεωρώντας ένα ανακλών αντικείμενο στο χώρο εποπτείας με αποστάσεις R_1 , R_2 από τον πομπό και το δέκτη αντίστοιχα, τότε, το ανακλώμενο κύμα δεν θα προκαλέσει παρεμβολή στο δέκτη αν ισχύει $R_1 + R_2 \geq R_o + R_d$, όπου R_o η απόσταση πομπού-δέκτη. Θεωρώντας δηλαδή μία έλλειψη με εστίες τον πομπό και το δέκτη ($2c = R_o$) και με $2a = R_o + R_d$, είναι προφανές πως ανακλώμενα σήματα από σώματα εκτός του ελλειψοειδούς (1^η ζώνη Fresnel) απορρίπτονται. Για αυτήν την έλλειψη ισχύει:

$$2b = 2\sqrt{a^2 - c^2} = \sqrt{(R_o + R_d)^2 - R_o^2} = \sqrt{2R_o R_d + R_d^2} \quad \text{Σχέση I-1}$$



Εικόνα 11: 1^η ζώνη Fresnel

Χρησιμοποιώντας τους πιο πάνω υπολογισμούς και υποθέτοντας μία τυπική απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη 2 μέτρα και $R_d = 90\text{mm}$, βρίσκουμε $2b \cong 0,6\text{m}$. Δηλαδή, η έλλειψη είναι αρκετά

μεγάλη με αποτέλεσμα η πιθανότητα να δημιουργηθούν ανακλώμενα κύματα (από αντικείμενα εντός της έλλειψης) που θα παρεμβάλουν στο απευθείας σήμα να είναι αρκετά υψηλή. Για να επιλυθεί το πρόβλημα οι σύγχρονες τεχνικές προσπαθούν να μετατοπίσουν το σημείο ανίχνευσης του σήματος, κάνοντας δυνατή την αναγνώρισή του στον 2ο ή 3ο κύκλο (αντί του 10ου) μειώνοντας έτσι το R_d . Άμεσο αποτέλεσμα είναι η μείωση του όγκου του ελλειψοειδούς (1η ζώνη Fresnel) μέσα στο οποίο οποιαδήποτε ανάκλαση παρεμβάλλει στο πρωτεύον σήμα.

Ένα επιπλέον πρόβλημα σε τέτοια συστήματα είναι η αυξημένη ευαισθησία των ακουστικών κυμάτων σε θόρυβο που προκαλείται από μεταλλικές κυρίως πηγές. Ο θόρυβος είναι πιο έντονος σε χαμηλές συχνότητες κάνοντας τη λειτουργία σε υψηλότερες συχνότητες ιδιαίτερα επιθυμητή. Αυτό, δυστυχώς, έχει επιπτώσεις, σύμφωνα με την πιο πάνω ανάλυση, στο εύρος δέσμης του πομπού, κάνοντάς το πιο στενό. Επιπρόσθετα, σε συχνότητες άνω των 80kHz οι απώλειες από τη διάδοση των ακουστικών κυμάτων στον αέρα είναι ιδιαίτερα μεγάλες με αποτέλεσμα να μειώνεται αισθητά η εμβέλεια του συστήματος (και λόγω της επίδρασης της υγρασίας σε υψηλότερες συχνότητες).

Μια και η αύξηση της εκπεμπόμενης συχνότητας πάνω από τα 50kHz περιορίζει αισθητά την εμβέλεια του συστήματος, μία λύση για την αντιμετώπιση του θορύβου και την αύξηση της διαχωριστικότητας των μετρήσεων είναι η εφαρμογή κλειδώματος φάσης (phase locking). Κάνοντας μία αρχική εκτίμηση του χρόνου διαδρομής (TOF), η ακριβής τιμή του βρίσκεται από την καταμέτρηση του αριθμού των μηδενισμών του ληφθέντος σήματος. Μια και η κυματομορφή έχει αρκετά μεγάλη κλίση κοντά στο μηδενισμό, αυτός είναι εύκολα ανιχνεύσιμος με αποτέλεσμα η μέτρηση αυτών να είναι αρκετά ανεπηρέαστη από το θόρυβο. Το πρόβλημα της τεχνικής αυτής είναι ότι δύσκολα καθορίζεται με ακρίβεια το σημείο μέτρησης του ληφθέντος σήματος (μέγιστο πλάτος ή άλλο χαρακτηριστικό σημείο της κυματομορφής) με αποτέλεσμα η τελική μέτρηση να διαφοροποιείται κατά διακριτά διαστήματα ($2k\pi$, $k = 0,1,2,\dots$) από την πραγματική τιμή συχνά. Η λύση να χρησιμοποιηθεί μία ιδιαίτερη κυματομορφή εκπομπής, η οποία να ανιχνεύεται στο δέκτη εύκολα με ένα προσαρμοσμένο φίλτρο δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμη μια και α) η κυματομορφή θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα σύντομη (άρα όχι ιδιαίτερα πρωτότυπη) για να κρατηθεί μικρό το R_d και β) οι πιεζοηλεκτρικοί πομποί λόγω του μικρού εύρους ζώνης δεν μπορούν να εκπέμψουν ιδιαίτερες, μη ημιτονοειδείς κυματομορφές, μεγάλου εύρους ζώνης.

Τα ακουστικά κύματα επιπρόσθετα είναι ευαίσθητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Κύματα αέρα μπορούν να επηρεάσουν τα ακουστικά κύματα αλλά για εφαρμογές σε κλειστούς χώρους (όπως η προτεινόμενη) ο παράγοντας αυτός δεν είναι καθοριστικός. Αντίθετα η επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος T στην ταχύτητα διάδοσης c_s των ακουστικών κυμάτων, που δίνεται από την προσεγγιστική εμπειρική σχέση $c_s \cong 346,4 \text{ m/s} + 0,5813 \text{ m/s}(T - 25)^{1/2}$ (BARA54), όπου T η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου, είναι καθοριστικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη στη σχεδίαση. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με ένα αισθητήρα θερμοκρασίας

¹ Η προσεγγιστική αυτή σχέση ισχύει για μια περιοχή θερμοκρασιών περίπου +/-10 βαθμούς Κελσίου περί τους 25°C

τοποθετημένο κοντά στους δέκτες ο οποίος θα υπολογίζει διαρκώς ή περιοδικά την ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Τέλος, μία λύση που φαίνεται και πιο αξιόπιστη – ιδίως για μη ομοιόμορφες κατανομές θερμοκρασίας στο χώρο – είναι η χρήση ενός ζεύγους πομπού και δέκτη σε σταθερή γνωστή εκ των προτέρων απόσταση, για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του ήχου σε πραγματικό χρόνο.

Μία τελευταία παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η δημιουργία ηχούς. Δηλαδή το σύστημα θα πρέπει να περιμένει μεταξύ της εκπομπής διαδοχικών παλμών να σιγάσουν οι απόηχοι του προηγούμενου σήματος πριν επανεικπέμψει. Προς τούτο επιβάλλεται η μελέτη της ακουστικής του χώρου στον οποίο θα εγκατασταθεί το σύστημα.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα ενός συστήματος εντοπισμού με ακουστικά κύματα είναι ο βέλτιστος συνδυασμός ακρίβειας και κόστους. Ενώ το κόστος των ακουστικών πομπών και δεκτών είναι αρκετά χαμηλότερο από μαγνητικούς, οπτικούς και άλλους αισθητήρες, η ακρίβεια και η απόκριση ενός ακουστικού συστήματος είναι αρκετά ικανοποιητική, ιδίως για εφαρμογές εσωτερικού χώρου. Σε συστήματα που πραγματοποιούν απευθείας μετρήσεις TOF ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στην αντιμετώπιση του ακουστικού θορύβου. Σε Phase-Coherent συστήματα πρέπει να προσεχθούν τυχόν αθροιστικά λάθη στον υπολογισμό της θέσης και κατεύθυνσης του στόχου. Και οι δύο υποκατηγορίες συστημάτων προσφέρουν μέτριους ρυθμούς ανανέωσης δεδομένων.

1.2.3 Συγκριτική επισκόπηση – υβριδικά συστήματα

Από τη μεγάλη ποικιλία των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα εντοπισμού γίνεται προφανές πως η επιλογή του συστήματος εντοπισμού για το εκάστοτε VR σύστημα είναι αρκετά περίπλοκη. Ιδιαίτερα μια και οι εξελίξεις στις τεχνολογίες που χρησιμοποιεί η Εικονική Πραγματικότητα (κάρτες γραφικών, συστοιχίες υπολογιστών, προβολικά) γνωρίζουν αλματώδη πρόοδο τα τελευταία χρόνια, η επιλογή γίνεται ακόμα πιο δύσκολη. Στις αρχές της δεκαετίας του 90 οι τάσεις της βιομηχανίας συστημάτων εντοπισμού ήταν να προσαρμόζει τα παραγόμενα συστήματα εντοπισμού στα VR συστήματα που βγαίνουν στην αγορά (με προγράμματα που επέτρεπαν να δημιουργηθούν οι κατάλληλοι οδηγοί για οποιαδήποτε περιφερειακά, όπως το σύστημα εντοπισμού π.χ. η πλατφόρμα ανάπτυξης λογισμικού SDK trackd [TRAC05], που επιτρέπει να δημιουργηθούν πρωτόκολλα αλληλεπίδρασης εφαρμογών – APIs για διάφορα συστήματα εντοπισμού). Πλέον και εξαιτίας της ανάγκης μείωσης του συνολικού κόστους των VR συστημάτων, ο οποιοσδήποτε ενδιαφέρεται να αγοράσει κάποιο σύστημα εντοπισμού πρέπει να λάβει υπόψη του δύο σημαντικές παραμέτρους. Πρώτον, τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών εντοπισμού και των παραμέτρων που αυτές υπαγορεύουν τα οποία θα αναλυθούν συγκριτικά σε αυτήν την παράγραφο και δεύτερον, την εφαρμογή στην οποία θα εγκατασταθεί και θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα εντοπισμού. Δεδομένου του ότι δεν υπάρχει το τέλειο σύστημα εντοπισμού ([KARA05]), η σωστή επιλογή ενός τέτοιου είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ένα πλαίσιο κατηγοριοποίησης των VR συστημάτων (στα πλαίσια του

αντίστοιχου που προτείνεται στο [FOXLO2]) που παρέχει μια βοήθεια στην επιλογή των συστημάτων εντοπισμού, θα προταθεί σε μία ακόλουθη παράγραφο.

Στην παρουσίαση των τεχνολογιών που έγινε στις προηγούμενες παραγράφους δοθήκαν τα επιμέρους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών. Έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορες συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών εντοπισμού ([FOXLO2], [ROLL01], [ROLL00], [MEYE92], [KARA05]). Εδώ προτιμάται να γίνει μία σύγκριση των τεχνολογιών ([KARA05]) παρά των συστημάτων που κυκλοφορούν ήδη στην αγορά ([MEYE92]). Η σύγκριση των τεχνολογιών δίνεται στον ακόλουθο πίνακα βάσει των παραμέτρων που τέθηκαν στην παράγραφο 1.2.1.

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μηχανικοί αισθητήρες	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή ακρίβεια και διακριτικότητα Χαμηλό κόστος Ανίσθητοι σε εξωτερικούς παράγοντες 	<ul style="list-style-type: none"> Βαρύς και μη άνετος εξοπλισμός στο χρήστη Μικρός χώρος εμβέλειας
Αδρανειακοί αισθητήρες	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή ακρίβεια και διακριτικότητα για μικρά χρονικά διαστήματα Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> Απόκλιση και αθροιστικά λάθη σε στόχους με μικρή ταχύτητα Ανάγκη για συχνή επαναβαθμονόμηση Προσθετικά λάθη Ενσύρματη επικοινωνία με το στόχο
Αισθητήρες Ηλεκτρικού πεδίου	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλή καθυστέρηση Υψηλή διακριτικότητα 	<ul style="list-style-type: none"> Δυσκολία υπολογισμού κατάστασης στόχου στο κοντινό πεδίο του ηλεκτροδίου Μικρή ακρίβεια Δυσκολία στον υπολογισμό της κατάστασης σημειακού στόχου Επηρεασμός από τη στατική φόρτιση αντικειμένων στην περιοχή εμβέλειας
Αισθητήρες Μαγνητικού πεδίου	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή ακρίβεια για μικρούς χώρους εμβέλειας Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> Η ακρίβεια μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την r^4. Ισχυρές παρεμβολές από φερρομαγνητικά υλικά Υψηλός θόρυβος που προκαλεί τρεμόπαιγμα στα 50/60Hz, π.χ. από γραμμές μεταφοράς ρεύματος Ενσύρματη επικοινωνία με το στόχο Καθυστέρηση που οφείλεται σε φιλτράρισμα για να αφαιρεθεί ο θόρυβος

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μικροκυματικοί, χιλιοστομετρικοί αισθητήρες	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγάλη σχετικά εμβέλεια λειτουργίας • Ανεπηρέαστοι από εξωτερικές συνθήκες • Δεν χρειάζεται απευθείας οπτική συνιστώσα 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξαιρετικά υψηλό κόστος • Απαιτήση για υψηλής ακρίβειας κυκλωμάτων χρονοισμού
Οπτικοί αισθητήρες	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή ακρίβεια και διακριτικότητα σε σχετικά μέτριο χώρο εμβέλειας • Μικρό βάρος • Ασύρματη επικοινωνία με το στόχο • Καλή απόκριση ως προς το τρεμόπαιγμα και τα προσθετικά λάθη • Η χρήση πολλών καμερών ή στόχων αυξάνει την ακρίβεια, τη διακριτικότητα, την εμβέλεια και τον αριθμό των χρηστών σε βάρος της πολυπλοκότητας και του κόστους 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαιτείται απευθείας οπτική συνιστώσα για 2 κάμερες • Αρκετά ως πολύ υψηλό κόστος • Μερικά συστήματα επηρεάζονται από πηγές φωτός στον περιβάλλοντα χώρο
Ακουστικοί αισθητήρες	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος • Αρκετά ικανοποιητικός ρυθμός ανανέωσης δεδομένων σε μικρές/μεσαίες αποστάσεις 	<ul style="list-style-type: none"> • Ανάγκη για απευθείας οπτική συνιστώσα εκτός αν χρησιμοποιηθούν πλεονάζοντες πομποί ή δέκτες • Παρεμβολή από ακουστικό θόρυβο • Χαμηλός ρυθμός δεδομένων • Συνήθως ενσύρματη επικοινωνία με το στόχο

Πίνακας 1: Σύγκριση τεχνολογιών συστημάτων εντοπισμού

Όπως φαίνεται από τον πιο πάνω πίνακα όλες οι τεχνολογίες έχουν δυνατά και αδύνατα σημεία. Δεν μπορεί κανείς άκριτα να θεωρήσει μη χρήσιμη την οποιαδήποτε τεχνολογία. Κατά τον γράφοντα, οι τεχνολογίες με τις μικρότερες πιθανότητες να κυριαρχήσουν στον χώρο των συστημάτων εντοπισμού είναι οι μηχανικοί, αδρανειακοί, μικροκυματικοί και χιλιοστομετρικοί αισθητήρες καθώς και οι αισθητήρες ηλεκτρικού πεδίου. Οι πρώτοι επιβάλλουν περιορισμό στην κίνηση του χρήστη και δεν έχουν θέση σε ανεπτυγμένα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας όπου πρωταρχική σημασία έχει η ελευθερία κίνησης και η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με τον Εικονικό Κόσμο. Οι αδρανειακοί αισθητήρες (από μόνοι τους) δεν δύναται να χρησιμοποιηθούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα, γεγονός που καθιστά απαγορευτική τη χρήση τους μια και τα σύγχρονα συστήματα VR τείνουν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές διαδικασίες σχεδίασης και ανάπτυξης σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς, το οποίο υπαγορεύει την ανάγκη για διαρκή ενασχόληση των χρηστών με αυτά ([STEF05a]). Οι μικροκυματικοί και χιλιοστομετρικοί

αισθητήρες μπορεί να παρέχουν υψηλές δυνατότητες από τεχνικής άποψης αλλά, λαμβάνοντας υπόψη πως η απόσταση πομπού-ανθρώπινου στόχου είναι μικρή, υπάρχουν πιθανές επιπλοκές υγείας. Επιπλέον, μια και για τα παραπάνω δεν υπάρχουν παρά ενδείξεις, ιδίως για χαμηλές επιπεδόμενες τιμές ισχύος, το κόστος τέτοιων συστημάτων καθιστά δύσκολη την εφαρμογή τους σε VR συστήματα, όπου το υψηλό κόστος αποτελεί μάλλον τη σημαντικότερη τροχοπέδη και προσπαθεί να αντιμετωπιστεί από τη διεθνή ερευνητική κοινότητα με φθηνότερες λύσεις. Τέλος, οι αισθητήρες ηλεκτρικού πεδίου έχουν ενδογενείς δυσκολίες οι οποίες προφανώς δεν επιτρέπουν την ευρεία χρησιμοποίησή τους (π.χ. μικρή ακρίβεια, προβλήματα κοντινού πεδίου, στατικές φορτίσεις). Από τις τρεις εναπομείναντες τεχνολογίες (μαγνητικοί, οπτικοί και ακουστικοί αισθητήρες) οι μαγνητικοί ήταν αυτοί που είχαν κυριαρχήσει στην παγκόσμια αγορά, ενώ τελευταία οι οπτικοί αισθητήρες κερδίζουν έδαφος. Πρόβλεψη του γράφοντα είναι πως τα συστήματα εντοπισμού με καθαρά μαγνητικούς αισθητήρες θα υποχωρήσουν μια και η τεχνολογία (η οποία είναι από τις πρώτες που χρησιμοποιήθηκε) έχει φτάσει στα όρια της, και οποιαδήποτε περαιτέρω τεχνική βελτίωση δύσκολα θα επέλθει χωρίς σημαντική αύξηση του κόστους. Οπότε, απομένουν ουσιαστικά δύο τεχνολογίες οι οποίες προσφέρουν ευκαιρία για περαιτέρω βελτιώσεις, οι οπτικοί και οι ακουστικοί αισθητήρες. Κι ενώ οι οπτικοί αισθητήρες αποτελούν αντικείμενο έντονης ερευνητικής προσπάθειας τα τελευταία χρόνια με αρκετά καλά αποτελέσματα ([KARA04a], [MOHR04], [RIBO01b], [STEF05b], [VORO05], [RUSD04]), η μόνη παράμετρος που δεν βελτιώνεται αισθητά είναι το κόστος αυτών των συστημάτων. Για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα για την ανάγκη απευθείας οπτικής συνιστώσας χρησιμοποιούνται επιπλέον κάμερες, λύση η οποία αυξάνει σημαντικά το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Για αυτούς τους λόγους η συγκεκριμένη διατριβή εμβαθύνει στο θέμα των ακουστικών αισθητήρων. Οι ακουστικοί αισθητήρες έχουν κάποιες εγγενείς αδυναμίες, όπως η επίδραση των εξωτερικών συνθηκών, η ευπάθεια σε ακουστικό θόρυβο, το μικρό εύρος ζώνης και η ανάγκη για απευθείας οπτική επαφή, αλλά, όπως θα φανεί ακολούθως, μπορούν με κατάλληλες τροποποιήσεις ή προσθήκες να αποτελέσουν ένα ικανοποιητικό σύστημα εντοπισμού για αρκετά περιβάλλοντα Εικονικής Πραγματικότητας. Έμφαση δίνεται στο κόστος της προτεινόμενης λύσης μια και, όπως αναφέρεται στο [KARA05], αυτός φαίνεται να είναι ο σημαντικότερος λόγος επιλογής ενός συστήματος εντοπισμού από ένα άλλο, δεδομένου πως και τα δύο ικανοποιούν κάποιες προδιαγραφές λειτουργίας.

Πρέπει να τονιστεί, πως οι ατέλειες των συστημάτων εντοπισμού που βασίζονται στη χρήση μίας και μόνης τεχνολογίας οδήγησε εταιρείες και ερευνητές να στραφούν προς λύσεις που συνδυάζουν δύο ή περισσότερες τεχνολογίες, δημιουργώντας τα υβριδικά συστήματα εντοπισμού (hybrid systems). Η λογική πίσω από τα υβριδικά συστήματα αναλύεται στο [HALL04], αν και αφορά στα συστήματα επαυξημένης πραγματικότητας, αλλά και στο [FOX02]. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο συνδυασμό τεχνολογιών όπου, οι αδυναμίες της μίας τεχνολογίας υπερπηδούνται με τη βοήθεια κάποιων άλλων.



Εικόνα 12: Υβριδικό (ακουστικό+αδρανειακό) σύστημα εντοπισμού IS-900



Εικόνα 13: Υβριδικό (ακουστικό+οπτικό) σύστημα εντοπισμού IS-1200

Τα υβριδικά συστήματα, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς αισθητήρες, προχωρούν σε σύντηξη δεδομένων (information fusion) με στόχο το βέλτιστο προσδιορισμό της κατάστασης του στόχου (θέσης και κατεύθυνσης). Στο [POLY04] δίνεται ο ακόλουθος ορισμός της σύντηξης δεδομένων: «*Σύντηξη δεδομένων (Information fusion) ορίζεται ως η θεωρία, οι τεχνικές και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για να εκμεταλλευτούν τη συνέργεια πληροφοριών που συλλέγονται από διαφορετικές πηγές (αισθητήρες, βάσεις δεδομένων, ανθρώπινος παράγοντας και δραστηριότητες κλπ.), έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα ή/και απόφαση ή ενέργεια να είναι καλύτερη από αυτό που θα επιτυγχανόταν με τη χρήση μίας μόνο πηγής πληροφοριών. Ο όρος «καλύτερος» αναφέρεται ως προς την ακρίβεια, τη σθεναρότητα τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά*». Ο πιο πάνω όρος αφορά στη σύντηξη δεδομένων από διαφορετικά (σχεδόν αυτοτελή) υποσυστήματα. Σε πολλά υβριδικά συστήματα χρησιμοποιούνται διαφορετικοί αισθητήρες, οι οποίοι δειγματοληπτούνται ταυτόχρονα ή σχεδόν ταυτόχρονα, και τα δεδομένα των οποίων συντήσσονται σε κάποια κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Σε αυτή την περίπτωση η σύντηξη δεδομένων λέγεται sensor fusion.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα υβριδικά συστήματα βασίζονται σε αλληλοσυμπληρούμενες τεχνολογίες. Υβριδικά κατ' ουσία είναι τα συστήματα αδρανειακών αισθητήρων, μια και χρησιμοποιούν επιταχυνσιόμετρα και γυροσκοπία. Επειδή όμως οι αισθητήρες αυτοί συνδυαστήκαν εξ αρχής θεωρούνται πως ανήκουν στην ίδια κατηγορία αισθητήρων, τους αδρανειακούς. Στο [ROLL01] αναφέρονται μερικές χαρακτηριστικές περιπτώσεις υβριδικών συστημάτων. Στο [STAT96] αναφέρεται ένα υβριδικό σύστημα το οποίο στηρίζει τη λειτουργία του σε κάμερες και μαγνητικούς αισθητήρες, όπου ο μαγνητικός αισθητήρας χρησιμοποιείται για να απαλείψει τυχόν διφορούμενα αποτελέσματα και να αντιμετωπίσει το πρόβλημα απώλειας απευθείας οπτικής συνιστώσας. Οι οπτικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να βαθμονομήσουν τους μαγνητικούς. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται να έχει την εύρωστη λειτουργία ενός μαγνητικού συστήματος και την ακρίβεια και διακριτική ικανότητα ενός οπτικού συστήματος. Στο [AZUM95b] προτείνεται ένα υβριδικό σύστημα που χρησιμοποιεί οπτικούς και αδρανειακούς αισθητήρες. Οι αδρανειακοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να παρέχουν μετρήσεις θέσης και ταχύτητας που χρησιμοποιούνται από κατάλληλα Kalman¹ φίλτρα για την βελτίωση των εκτιμήσεων του οπτικού

¹ Τα φίλτρα Kalman θα αναφερθούν και θα αναλυθούν διεξοδικά σε ακόλουθο κεφάλαιο

συστήματος. Αντίστοιχο σύστημα προτείνεται από τους [HOGU04] και [YOU01]. Οι [PIEK03] και [JIAN04] προτείνουν ένα σύστημα που χρησιμοποιεί οπτικούς αισθητήρες και ένα δέκτη GPS. Είναι χαρακτηριστικό πως τα περισσότερα υβριδικά συστήματα κάνουν χρήση οπτικών αισθητήρων (π.χ. [WANG98]). Πλέον κυκλοφορούν και εμπορικά υβριδικά συστήματα όπως το IS-900 ([FOX98]) και το IS-1200. Το πρώτο στηρίζεται σε μία ομάδα αδρανειακών αισθητήρων των οποίων η αναμενόμενη απόκλιση διορθώνεται περιοδικά από ακουστικούς αισθητήρες, ενώ το δεύτερο βασίζεται στη βελτίωση των αποτελεσμάτων του οπτικού συστήματος με χρήση μετρήσεων από αδρανειακούς αισθητήρες.

Τα υβριδικά συστήματα αναμφισβήτητα αποτελούν τα πλέον αξιόπιστα συστήματα εντοπισμού για συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας. Έχουν καλή ακρίβεια και υψηλή διακριτικότητα, δεν υποφέρουν από περιβαλλοντικές επιδράσεις και δεν χρειάζονται απευθείας οπτική συνιστώσα. Έχουν όμως και μερικά μειονεκτήματα με πρώτο και κύριο το πολύ υψηλό κόστος τους. Επιπλέον συνήθως απαιτούν καλωδίωση του χρήστη-στόχου με το σύστημα εντοπισμού ενώ τα φίλτρα Kalman που χρησιμοποιούνται για τη σύζευξη δεδομένων είναι ευαίσθητα ως προς τη σταθερότητά τους¹.

1.3 ΦΥΣΙΚΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΕ ΕΙΚΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ

1.3.1 Συσκευές και μενού αλληλεπίδρασης

Το σύστημα εντοπισμού έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση, τη χρησιμότητα των Εικονικών Κόσμων και στο αίσθημα της παρουσίας που οι χρήστες αισθάνονται σε αυτά αλλά δεν είναι ο μοναδικός καθοριστικός παράγοντας ([BARF95b]). Ιδιαίτερη σημασία ως προς την χρήση των συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας, παίζουν οι δυνατότητες που έχει ο χρήστης να αλληλεπιδρά με αυτά. Υπάρχουν πολλοί δυνατοί τρόποι αλληλεπίδρασης του χρήστη με το Εικονικό Περιβάλλον. Ως αλληλεπίδραση ορίζουμε τη διαδικασία με την οποία ο χρήστης επιτελεί μια ενέργεια στον Εικονικό Κόσμο που έχει ως αποτέλεσμα κάποια αλλαγή σε κάποιες από τις παραμέτρους του, και η οποία γίνεται αντιληπτή με κάποια αίσθηση του χρήστη (αλλαγή στην προβαλλόμενη εικόνα, ακουστικό μήνυμα ή σήμα, ανάδραση αφής, κτλ.).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αλληλεπίδρασης του χρήστη με έναν Εικονικό Κόσμο όπως τρισδιάστατα ποντίκια ή άλλες παρόμοιες συσκευές αλληλεπίδρασης τριών ή έξι βαθμών ελευθερίας, γάντια που εφαρμόζουν στο χέρι του χρήστη και επιτρέπουν την αλληλεπίδραση με φυσικό τρόπο, συστήματα που υποστηρίζουν φωνητικές εντολές από τον χρήστη, κτλ. Το τελευταίο διάστημα οι περισσότεροι ερευνητές επικεντρώνουν τις προσπάθειές του στη δημιουργία πολυμορφικών (multimodal) τρόπων αλληλεπίδρασης που διεγείρουν περισσότερες της μίας, αισθήσεις του χρήστη ([BROL05]), επιτρέποντας π.χ. την ταυτόχρονη χρήση μιας συσκευής σε συνδυασμό με φωνητικά

¹ Βλέπε 1.2.1

μηνύματα ή ένα σύστημα αναγνώρισης χειρονομιών μέσω ενός γαντιού. Έχουν υπάρξει αρκετές μελέτες ως προς την κατηγοριοποίηση, ταξινόμηση και αξιολόγηση των μεθόδων αλληλεπίδρασης σε Εικονικά Περιβάλλοντα εμβύθισης (immersive) όπως οι [BARF98], [RUDD98], [BALA93], [FIGU93], [MINE94], [CHEV96], [BOWM01a]. Η ύπαρξη κατανοητών, εύκολων και χρηστικών μεθόδων αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον θεωρείται ως ένας καθοριστικός παράγοντας για το αίσθημα παρουσίας του χρήστη μέσα σε αυτό ([KARA04b], [BURD96]).

Όσες μελέτες έχουν γίνει μέχρι τώρα σχετικά με συσκευές αλληλεπίδρασης είχαν ως αποκλειστικό σκοπό τη δημιουργία νέων συσκευών, χωρίς να ενδιαφέρονται για την δημιουργία τεχνογνωσίας και κατευθυντήριων γραμμών που θα οδηγούσαν στην κατασκευή τέτοιων συσκευών στο μέλλον [JACO93]. Κατευθυντήριες γραμμές αυτής της μορφής, ίσως, υπάρχουν στο χώρο της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-υπολογιστή (Human Computer Interaction-HCI), π.χ. [MACK95], αλλά οι σημαντικές διαφορές μεταξύ δισδιάστατων και τρισδιάστατων προβολών κάνει τη μεταφορά τους στο χώρο της Εικονικής Πραγματικότητας πολύ δύσκολη υπόθεση. Κάποιες λίγες προσπάθειες για τη δημιουργία τεχνογνωσίας που θα μετατρέπει τις ανάγκες σε αλληλεπίδραση σε κατευθυντήριες γραμμές ως προς την υλοποίηση μεθόδων αλληλεπίδρασης έχουν γίνει αποσπασματικά (π.χ. για συστήματα αναγνώρισης φωνής [JONE89], για συστήματα αναγνώρισης χειρονομιών [BAUD93]).

Οι περισσότεροι τρόποι αλληλεπίδρασης με ένα Εικονικό Περιβάλλον έχουν αρκετές απαιτήσεις ως προς την απομνημόνευση από τον χρήστη μιας σειράς εντολών όπως αυτές και αν εκφράζονται (χειρονομίες, κινήσεις, πάτημα πλήκτρων, λεκτικές εντολές). Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος συνήθως χρησιμοποιούμε ένα μενού επιλογών που προβάλλεται και αυτό εικονικά και παρέχει ιεράρχηση στις λειτουργίες που ο χρήστης μπορεί να επιτελέσει. Ο βαθμός στον οποίο το μενού ενσωματώνεται στον Εικονικό Κόσμο ή όχι ([BAYO03]) εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Σε εφαρμογές όπου απαιτείται η δημιουργία έντονου αισθήματος παρουσίας του χρήστη, το μενού αλληλεπίδρασης δεν πρέπει να αποπροσανατολίζει το χρήστη από την κύρια λειτουργία. Τα μενού αλληλεπίδρασης διαφοροποιούνται ως προς τις εικαστικές τους παραμέτρους, τον αριθμό επιλογών, τον αριθμό των υποεπιπέδων, τη χρήση γλωσσικών οδηγιών, το βαθμό των υποστηριζόμενων λειτουργιών, τη θέση τους και τον προσανατολισμό τους στον Εικονικό Κόσμο. Έτσι μπορεί να προβάλλονται πάντα στο πεδίο όρασης του χρήστη, όντας συζευγμένα με το σύστημα εντοπισμού του κεφαλιού ([DARK94]) ή να είναι συζευγμένα με τη συσκευή αλληλεπίδρασης και να ενεργοποιούνται (ή όχι) από αυτή. Υπάρχουν μονοδιάστατα, δισδιάστατα και τρισδιάστατα μενού αλληλεπίδρασης ([BOWM01b]) που δίνουν στο χρήστη ένα, τρεις και έξι βαθμούς ελευθερίας αντίστοιχα. Οποιαδήποτε κίνηση που δεν προβλέπεται από τους διαθέσιμους βαθμούς ελευθερίας αγνοείται.

Μία σειρά πρόσφατων μελετών απέδειξε πως, αν και είναι σημαντική, η προσεκτική σχεδίαση των μενού αλληλεπίδρασης από πλευράς χρηστικότητας, είναι εξίσου σημαντική η χρησιμοποίηση αποτελεσματικών συσκευών αλληλεπίδρασης που συμπληρώνουν τα μενού ([PATE06a]). Στο [KIM00] αναγνωρίστηκαν 5 βασικοί τύποι παρουσίας ενός μενού αλληλεπίδρασης και δεκατρείς

τρόποι επιλογής αυτών. Παρατηρήθηκε πως η χρήση χειρονομιών για την εύρεση και επιλογή των λειτουργιών των μενού ήταν καλύτερη και πιο φυσική με τη χρήση τρισδιάστατου ποντικιού. Στο [BOWM98] εφαρμόστηκαν μια σειρά μενού αλληλεπίδρασης με συνδυασμένη χρήση είτε ενός χειριστήριου (joystick) είτε ενός λέιζερ μολυβιού. Η χρήση συσκευών αλληλεπίδρασης παρατηρήθηκε πως αυξάνει αισθητά την άνεση των χρηστών σε θέματα αλληλεπίδρασης. Στο ([BOWM01b]) οι χρήστες χρησιμοποιούσαν ένα Fakespace Pinch Glove™ με προβολή του μενού αλληλεπίδρασης μέσω ενός HMD στα δάχτυλα και στην παλάμη τους. Βρέθηκε πως οι χρήστες αισθάνονται πιο άνετα στη διαδικασία επιλογής λειτουργιών μέσω του μενού με διάφορες χειρονομίες απ' ότι με χρήση κατάλληλου λέιζερ μολυβιού. Σε αντίθεση, στο [DARK94] οι χρήστες προτιμούν την επιλογή και χρήση του μενού μέσω φωνητικών εντολών, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν τα χέρια τους για άλλες λειτουργίες στον Εικονικό Κόσμο. Επομένως η επιλογή συσκευής αλληλεπίδρασης είναι αλληλένδετη με την εφαρμογή ενός μενού αλληλεπίδρασης και από κοινού οι δύο διαμορφώνουν το βαθμό ευκολίας της χρήσης του Εικονικού Περιβάλλοντος (και κατ' επένταση την αποδοτικότητά του).

Μία πληθώρα συσκευών αλληλεπίδρασης ([ZHAI98]) έχουν δημιουργηθεί για χρήση σε διάφορα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας (όπως απλά χειριστήρια-joysticks, γάντια, τρισδιάστατα ποντίκια, ειδικές ράβδοι-wands κτλ.).



Εικόνα 14: Συσκευή αλληλεπίδρασης Spacetraveller



Εικόνα 15: Τρισδιάστατο ποντίκι



Εικόνα 16: Συσκευή αλληλεπίδρασης «γάντι»



Εικόνα 17: Συσκευή αλληλεπίδρασης wanda



Εικόνα 18: Συσκευή αλληλεπίδρασης SpaceBall



Εικόνα 19: Κλασικό χειριστήριο

Οποιαδήποτε συσκευή αλληλεπίδρασης χρησιμοποιηθεί πρέπει να ικανοποιεί τις ανάγκες του χρήστη ως προς την αντίληψη του χώρου και του Εικονικού Κόσμου ([KALA99]), λαμβάνοντας υπόψη τις ενέργειες για τις οποίες θα χρησιμοποιηθεί και τη σχέση που ο χρήστης αναμένει ανάμεσα στις ενέργειες που θα επιτελέσει και τη συσκευή. Η συσκευή πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με φυσικό τρόπο και να επιτρέπει κινήσεις που είναι συνακόλουθες με το νοητικό μοντέλο κίνησης, σε Εικονικά Περιβάλλοντα, που διαθέτει ο χρήστης.

Υπάρχει περίπτωση απλά Εικονικά Περιβάλλοντα να μην έχουν ανάγκη τρισδιάστατων συσκευών αλληλεπίδρασης. Συγκεκριμένες διεργασίες επιτρέπουν τη χρήση δισδιάστατων ή ακόμα και μονοδιάστατων συσκευών (π.χ. αλλαγή χρωματισμού αντικειμένου). Εντούτοις, η προβολή ενός δισδιάστατου μενού σε τρισδιάστατο περιβάλλον επιφέρει σημαντικές δυσκολίες. Συσκευές με λιγότερους βαθμούς ελευθερίας γενικά αυξάνουν την ακριβεία με την οποία εντοπίζονται και κατ' επέκταση με την οποία επιτελούνται συγκεκριμένες λειτουργίες αλλά επιβάλλουν περιορισμούς ως προς την κίνηση και το πλήθος των διεργασιών που δύνανται να εκτελέσουν.

Τέλος, μέχρι τώρα δεν έχει ερευνηθεί η χρήση μιας συσκευής σε διαφορετικά Εικονικά Περιβάλλοντα με διαφορετικά μενού αλληλεπίδρασης. Κατ' επέκταση δεν υπάρχουν κατευθυντήριες γραμμές για την επιλογή της κατάλληλης συσκευής για συγκεκριμένο σύστημα ή εφαρμογή. Το μόνο βήμα που έχει γίνει προς αυτήν την κατεύθυνση είναι κάποιες ταξινομήσεις που κατηγοριοποιούν τις συσκευές αλληλεπίδρασης σε σχέση με τις φυσικές τους ιδιότητες ([BUXT86]), τη δομή τους ([CARD91]), τα φυσικά χαρακτηριστικά τους σε σχέση με τις ανάγκες των λειτουργιών για τις οποίες προορίζονται ([JACO94]) και τους παράγοντες που επηρεάζουν τη χρησιμότητά τους ([GABB97a]). Αυτές οι μελέτες μπορούν να φανούν χρήσιμες ως προς την επιλογή συσκευών αλληλεπίδρασης για συγκεκριμένες λειτουργίες καθώς και στην κατανόηση της λειτουργικότητας και των χαρακτηριστικών των συσκευών.

1.3.2 Ανάγκες για νέες μεθόδους υλοποίησης μεταφορών αλληλεπίδρασης

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα κατά τη σχεδίαση και κατασκευή νέων τεχνικών αλληλεπίδρασης είναι η έλλειψη κατευθυντήριων γραμμών, όπως αναφέρθηκε. Προσεγγίσεις επί του

θέματος της τρισδιάστατης σχεδίασης ([GABB97b], [KAUR98], [EAST01], [WILS02]) μεταφράζονται δύσκολα σε συμπαγείς οδηγίες που οι κατασκευαστές μπορούν πραγματικά να χρησιμοποιήσουν.

Σε ένα τυπικό περιβάλλον γραφείου οι περισσότεροι εργαζόμενοι χρησιμοποιούν ένα απλό πληκτρολόγιο και έναν υπολογιστή με συμβατικό υλισμικό και λογισμικό. Σε αντίθεση με αυτό το περιβάλλον δεν υπάρχει κανένα αντίστοιχο Εικονικής Πραγματικότητας που μπορεί να χαρακτηριστεί ως τυπικό. Κάθε σύστημα που χρησιμοποιεί προβολή εικόνας κάνοντας χρήση της τεχνολογίας CAVE™ μπορεί να διαθέτει μια σειρά από εντελώς διαφορετικές συσκευές αλληλεπίδρασης. Την τελευταία δεκαετία μια σειρά από πρωτοποριακές συσκευές αλληλεπίδρασης έχουν προταθεί και η επιλογή κάποιας γίνεται κυρίως με βάση το κόστος και τη διαθεσιμότητα και όχι με τη χρησιμότητα και την άνεση που μπορούν να προσφέρουν.

Επιπρόσθετα, δεν υπάρχει κανένας τυπικός κανόνας που να ικανοποιείται από τις διαφορετικές μεταφορές (metaphors¹) αλληλεπίδρασης που μπορεί να χρησιμοποιεί ένα σύστημα VR. Οι σχεδιαστές δημιουργούν καινούριες συσκευές αλληλεπίδρασης ή καινούριες δομές μενού βάσει συνήθως της προσωπικής τους εμπειρίας και της εκτίμησής τους ως προς τη χρησιμότητα, ή, ακόμα χειρότερα, ως προς το σχεδιασμό. Έτσι αμελούν την πραγματική και αντικειμενική χρησιμότητα των συσκευών ή μενού αλληλεπίδρασης όπως αυτές θα εκτιμηθούν από απλούς χρήστες με μέση ή μικρή εμπειρία σε Εικονικά Περιβάλλοντα. Όπως και στην επιστήμη των υπολογιστών, έτσι και στον τομέα της Εικονικής Πραγματικότητας, η έμφαση δίνεται στον υπερκερασμό τεχνικών δυσκολιών και στην ανάδειξη νέων δυνατοτήτων της τεχνολογίας παρά σε σχεδίαση με βάση τις ανάγκες του τελικού χρήστη. Επιπρόσθετα, νέες συσκευές αλληλεπίδρασης σχεδιάζονται συνήθως για να εφαρμοστούν σε νέες εφαρμογές και νέα τρισδιάστατα μοντέλα, κάνοντας δύσκολη τη δημιουργία τεχνογνωσίας και την χρήση πρότερης πείρας. Επιπλέον, δεν υπάρχει καμιά συνέχεια και συνέπεια ως προς διαδοχικές υλοποιήσεις, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η ικανότητα των χρηστών να αναπτύξουν μια κοινή επισκόπηση των μεθόδων και πρακτικών αλληλεπίδρασης. Τώρα που η τεχνολογία της Εικονικής Πραγματικότητας τείνει να διευρύνει αρκετά τον αριθμό των βιομηχανικών της εφαρμογών, η ανάγκη για τη δημιουργία διαισθητικών συσκευών και μενού αλληλεπίδρασης είναι μεγαλύτερη από ποτέ [KARA06].

Νέες συσκευές αλληλεπίδρασης μπορούν να σχεδιαστούν μέσα από μια διαδικασία κατανόησης των προβλημάτων χρησιμότητας που σχετίζονται με τις έως τώρα χρησιμοποιούμενες συσκευές. Αυτό ακριβώς είναι και το ερευνητικό κενό που καλύπτει η διατριβή ως προς τις συσκευές αλληλεπίδρασης. Χρησιμοποιώντας μία πολύ διαδεδομένη συσκευή αλληλεπίδρασης, έγιναν εκτενείς έλεγχοι ως προς τη χρησιμότητα της με χρήστες έμπειρους και μη σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας. Τα αποτελέσματα των αρχικών πειραμάτων οδήγησαν στη δημιουργία κατευθυντήριων γραμμών για το σχεδιασμό συσκευών αλληλεπίδρασης. Αυτές χρησιμοποιήθηκαν

¹ Ως μεταφορά αλληλεπίδρασης εννοούμε το συνδυασμό συσκευής και μενού αλληλεπίδρασης

στην κατασκευή ενός πρωτότυπου μοντέλου το οποίο και ελέγχθηκε κατ' αντιπαραβολή με την ευρέως διαδεδομένη υπάρχουσα συσκευή. Τα αποτελέσματα απέδειξαν την αξία της μεθόδου.

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό δόθηκαν οι βασικές αρχές της τεχνολογίας της Εικονικής Πραγματικότητας, σε συνδυασμό με αναφορά στα πιο διαδεδομένα συστήματα και στα επιμέρους υπομνήματα αυτών. Η συγκεκριμένη τεχνολογία βρίσκεται σε ιδιαίτερη ακμή τόσο από τεχνολογικής άποψης όσο και ως προς το πεδίο εφαρμογών. Δόθηκαν οι βασικοί όροι και επεξηγούνται έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν σε όλη την έκταση της διατριβής.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας είναι η βελτίωση της αλληλεπίδρασης του χρήστη με αυτά. Η αύξηση της αίσθησης παρουσίας του στον Εικονικό κόσμο είναι αποφασιστικός παράγοντας για την ευρεία χρήση των συστημάτων και την αντικειμενική εκμετάλλευση των τεχνολογικών δυνατοτήτων τους. Η αίσθηση παρουσίας του χρήστη επηρεάζεται από μεγάλο αριθμό παραγόντων που εμφανίζουν αλληλεξαρτήσεις. Δύο από τους πιο σημαντικούς είναι το σύστημα εντοπισμού και οι συσκευές αλληλεπίδρασης. Για το λόγο αυτό η διατριβή επικεντρώνει σε αυτά τα δύο αντικείμενα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες που εφαρμόζονται στα συστήματα εντοπισμού, αναλύονται οι αρχές λειτουργίας, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους ενώ γίνεται μια συγκριτική επισκόπησή τους. Έτσι, επιλέγεται μία συγκεκριμένη τεχνολογία που θα αποτελέσει τη βάση για το σύστημα που θα αναπτυχθεί και εντοπίζονται τα σημεία της τεχνολογίας που επιδέχονται περαιτέρω βελτίωσης και στα οποία θα εστιάσει η διατριβή.

Τέλος, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας αλληλεπίδρασης σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας. Η μεγάλη ποικιλία των τρόπων αλληλεπίδρασης καθιστά αναγκαία την οποιαδήποτε τυποποίηση στο σχεδιασμό συσκευών και μενού αλληλεπίδρασης. Συσκευές οι οποίες θα προκύψουν μέσα από ανθρωποκεντρικές μεθόδους σχεδιασμού, αναμένεται να αυξήσουν τη χρηστικότητα των Εικονικών Κόσμων. Μία τέτοια συσκευή υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής και παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.

Παράρτημα 1.1

Προϊόν	DOF	Ρυθμός ανανέωσης	Καθυστέρηση εντοπισμού	Διακριτικότητα	Περιοχή λειτουργίας
Μηχανικά					
BOOM3C, FakeSpace, Inc.	6	>70Hz	200ms	0,1 °	6 πόδια διάμετρος, 2.5 πόδια ύψος
PUSH, FakeSpace, Inc.	6	>70 Hz	200 ms	0.1°	2 πόδια διάμετρος
ADL-1, Shooting Star Technology	6	240 Hz	0.35-1. 8 ms	0.25 ίντσες 0.15° - 0.3°	35 ίντσες διάμετρος, 18 ίντσες ύψος
WrightTrac, Vidtronics, Inc.	6	300 Hz	3.3 ms	0.1° ανά άξονα	1/4 σφαιράς, 40 ίντσες διάμετρος
Μαγνητικά					
Fastrak, Polhemus	6	120 Hz / αριθμός δεκτών	4 -8.5 ms	0.0002 ίντσες 0.025°	10 - 30 πόδια
Isotrak II, Polhemus	6	60 Hz / αριθμός δεκτών	23-45 ms	0.0015 ίντσες, 0.1°	5πόδια
InsideTrak, Polhemus	6	60 Hz / αριθμός δεκτών	12 ms	0.0003 ίντσες 03°	5 πόδια
Ultratrak, Polhemus	6	30 – 60 Hz	12 ms	0.05 ίντσες στα 5 πόδια 0.25 πόδια στα 15 πόδια 0.1° RMS	2 - 15 πόδια
Ultratrak 120, Polhemus	6	60 - 120 Hz	12 ms	0.15 ίντσες στα 5 πόδια 0.25 πόδια στα 15 πόδια 0.1° RMS	2 - 15 πόδια
Liberty, Polhemus	6	240 Hz	3.5 ms	0.00015 ίντσες / 12 ίντσες απόσταση 0.0012°	36 ίντσες

Προϊόν	DOF	Ρυθμός ανανέωσης	Καθυστέρηση εντοπισμού	Διακριτικότητα	Περιοχή λειτουργίας
Patriot, Polhemus	6	60 Hz	17 ms	0.0015 ίντσες/ίντσες της πηγής για απόσταση αισθητήρων 0.1°	5 πόδια
Flock of Birds, Ascension	6	144 Hz	7.5-47 ms	0.5mm στα 30.5cm, 0.1° στα 30.5cm	3-8 πόδια
3D Navigator, Ascension	6	120 Hz	Άγνωστο	0.08 cm στα 1.52 m, 0.2° στα 3.05 m	± 3.05 m προς κάθε κατεύθυνση με ένα πομπό
SpacePad, Ascension	6	120 Hz / αριθμό πομπών	< 8 ms	Άγνωστο	16 x 16 πόδια
microBIRD, Ascension	6	90 Hz	Άγνωστο	0.05 mm στα 30.5cm, 0.1° στα 30.5cm	20-71 cm X ± 30 cm Y, Z
miniBIRD 800, Ascension	6	120 Hz	Άγνωστο	0.5mm, 0.1° στα 30.5 cm	±76.2cm προς κάθε κατεύθυνση
MotionStar, Ascension	6	144 Hz	Άγνωστο	0.25cm στα 3.05m, 0.2° στα 3.05m	±3.05m προς κάθε κατεύθυνση με ένα πομπό
Nest of Birds, Ascension	6	105 Hz	Άγνωστο	0.05 mm στα 30.5cm, 0.1° στα 30.5cm	± 91.44cm m προς κάθε κατεύθυνση
pciBIRD, Ascension	6	105 Hz	Άγνωστο	0.05 mm στα 30.5cm, 0.1° στα 30.5cm	±76.2cm προς κάθε κατεύθυνση
pcBIRD, Ascension	6	144 Hz	10 ms	0.05 mm στα 30.5cm, 0.1° στα 30.5cm	±1.22m προς κάθε κατεύθυνση
Οπτικά					
SELSPOT II, Selcom AB	6	10000 Hz	Άγνωστο	0.025% millirad	Ως 200 m
OPTOTRAK 3020, Northern Digital, Inc.	6	600 Hz	Άγνωστο	0.01 mm στα 2.25 m	Άγνωστο
MacReflex, Qualisys, Inc.	6	50-200 Hz	Not given	Άγνωστο	0.5 - 30 m (ίντσες), 0.5 - 9 m (out)

Προϊόν	DOF	Ρυθμός ανανέωσης	Καθυστέρηση εντοπισμού	Διακριτικότητα	Περιοχή λειτουργίας
DynaSight, Origin Instruments Corporation	3	64 Hz	16-31 ms	0.1 mm cross range, 0.4 mm down range	0.1-1.5m and 1-6m για στόχο 7mm
RK-447 Multiple Target Tracking System, ISCAN, Inc.	6	60 Hz	16 ms	Άγνωστο	Άγνωστο
Laser BIRD 2, Ascension	6	240 Hz	7.2-11.3 ms	0.1. mm στα 1m, 0.05° στα 1m	0.15-1.83 m
ReActor 2, Ascension	6	900 Hz	Άγνωστο	Άγνωστο	3.0 x 4.2 x 2.4 m
PPT, WorldViz	3	60 Hz	<20 ms	< 1 mm	10 x 10 x 10 m
ARTtrack1, A.R.T.	6	60 Hz	Not given	Άγνωστο	10 m
Polaris, Northern Digital, Inc.	6	60 Hz	Άγνωστο	Άγνωστο	Άγνωστο
HiBall-3000, 3rdTech, Inc.	6	2000 Hz	<1 ms	0.2mm RMS 0.01° RMS	40' x 40' x 10'
Ακουστικά					
Head/Hand XYZ Tracker, Fifth Dimension Technologies	3	20 Hz	Άγνωστο	Άγνωστο	Ως 3 m
GP12-3D (Freepoint 3D), Science Accessories Corp.	3	150 Hz/number of emitters	Άγνωστο	0.002 ίντσες 3.25x3.25x3.25 πόδια	Ως 16x8x8 πόδια
3D Mouse and Head Tracker, Logitech	6	50 Hz	72 ms	1/250 ίντσες, 1/10°	5 πόδια στην ευθεία, 100° κώνος
Αδρανειακά					
MotionPak Systron-Donner	6	60 Hz	Άγνωστο	0.004°/s	Άγνωστο
GyroPoint Gyration, Inc.	3	Άγνωστο	Άγνωστο	0.2°	75 πόδια
3D BIRD Ascension	3	160 Hz	15 ms στα 360°/s	0.1° στα 30.5 cm	±180° αζιμ-γ. στροφής, ±90° γ. ανύψωσης
InertiaCube 2, InterSense	3	180 Hz	2 ms	0.01°	360°

Προϊόν	DOF	Ρυθμός ανανέωσης	Καθυστέρηση εντοπισμού	Διακριτικότητα	Περιοχή λειτουργίας
InertiaCube 3, InterSense	3	180 Hz	2 ms	0.03°	360°
IS-300 Pro, InterSense	3	500 Hz	Άγνωστο	0.02°	360°

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά εμπορικών συστημάτων εντοπισμού

Προϊόν	URL
Μηχανικά	
BOOM3C, FakeSpace, Inc.	www.fakespace.com
PUSH, FakeSpace, Inc.	www.fakespace.com
ADL-1, Shooting Star Technology	www.star-techno.com
Μαγνητικά	
Fastrak, Polhemus	www.polhemus.com
Isotrak II, Polhemus	www.polhemus.com
InsideTrak, Polhemus	www.polhemus.com
Ultratrak, Polhemus	www.polhemus.com
Ultratrak 120, Polhemus	www.polhemus.com
Liberty, Polhemus	www.polhemus.com
Patriot, Polhemus	www.polhemus.com
Flock of Birds, Ascension	www.ascension-tech.com
3D Navigator, Ascension	www.ascension-tech.com
SpacePad, Ascension	www.ascension-tech.com
microBIRD, Ascension	www.ascension-tech.com
miniBIRD 800, Ascension	www.ascension-tech.com
MotionStar, Ascension	www.ascension-tech.com
Nest of Birds, Ascension	www.ascension-tech.com
pciBIRD, Ascension	www.ascension-tech.com
pcBIRD, Ascension	www.ascension-tech.com
Οπτικά	
SELSPOT II, Selcom AB	www.lmint.com
OPTOTRAK 3020, Northern Digital, Inc.	www.northern-digital.com
MacReflex, Qualisys, Inc.	www.qualisys.com
DynaSight, Origin Instruments Corporation	www.orin.com
RK-447 Multiple Target Tracking System, ISCAN, Inc.	www.iscaninc.com
Laser BIRD 2, Ascension	www.ascension-tech.com
ReActor 2, Ascension	www.ascension-tech.com
PPT, WorldViz	
ARTtrack1, A.R.T.	www.ar-tracking.de
ARTtrack2, A.R.T.	www.ar-tracking.de
ARTtrack2/C, A.R.T.	www.ar-tracking.de
Polaris, Northern Digital, Inc.	www.northern-digital.com
HiBall-3000, 3rdTech, Inc.	www.3rdtech.com
Ακουστικά	
Head/Hand XYZ Tracker, Fifth Dimension Technologies	www.5dt.com
GP12-3D (Freepoint 3D), Science Accessories Corp.	
3D Mouse and Head Tracker, Logitech	www.logitech.com
Inertial	

Προϊόν	URL
MotionPak Systron-Donner	www.systron.com
GyroPoint Gyration, Inc.	www.gyration.com
3D BIRD Ascension	www.ascension-tech.com
InertiaCube 2, InterSense	www.intersense.com
InertiaCube 3, InterSense	www.intersense.com
IS-300 Pro, InterSense	www.intersense.com
MTi, Xsens	www.xsens.com
Υβριδικά, αδρανειακά + ακουστικά	
IS-900, InterSense	www.intersense.com
Υβριδικά, αδρανειακά + οπτικά «μέσα-έξω»	
IS-1200, Intersense	www.intersense.com

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

II. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΜΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο της διατριβής. Αρχικά, αναλύεται η αρχή λειτουργίας του συστήματος ακουστικού εντοπισμού που υλοποιήθηκε. Ακολούθως, αναλύονται μια σειρά από κρίσιμες παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη σχεδίαση. Ο ήχος παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ως προς τη διάδοσή του, ενώ τα κύματά του είναι ευαίσθητα σε μια σειρά εξωγενών παραγόντων (θερμοκρασία, υγρασία, κτλ.). Η επίδραση αυτών των παραγόντων αναλύεται διεξοδικά και τρόποι υπολογισμού της επίδρασής τους παρουσιάζονται.

Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς, τους βασικούς πομποδέκτες των συστημάτων ακουστικού εντοπισμού. Η μελέτη των προδιαγραφών που τους συνοδεύουν είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για το σχεδιασμό και την απόδοση του συστήματος.

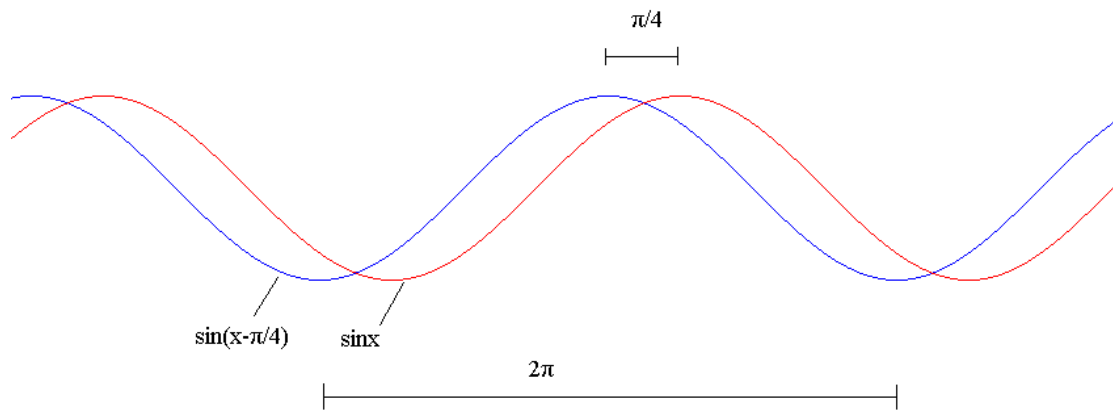
Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι διαφορετικές πιθανές τοπολογίες του συστήματος. Αυτές διαφοροποιούνται ως προς τη διάταξη και τον αριθμό των πομπών και των δεκτών. Κάθε τοπολογία έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, που αναφέρονται στο παρόν κεφάλαιο.

Τέλος, το κεφάλαιο κλείνει με μία ανάλυση των διαφορετικών μεθόδων τριμεροποίησης. Αυτοί διακρίνονται σε δυναμικούς και στατικούς ανάλογα με το αν λαμβάνουν υπόψη τις προηγούμενες εκτιμήσεις θέσης για την νέα εκτίμηση. Αναλύεται το μαθηματικό υπόβαθρο για τις διάφορες μεθοδολογίες και η αναμενόμενη επίδοση τους.

2.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο μία από τις λύσεις για τον εντοπισμό θέσης σε περιβάλλοντα Εικονικής Πραγματικότητας αποτελούν τα υπερηχητικά κύματα. Δύο είναι οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται: τα συστήματα συντονισμού φάσης (Phase Coherent – PC) και η μέτρηση του χρόνου διαδρομής (Time-Of-Flight – TOF). Στην πρώτη μέθοδο μετράμε την διαφορά φάσης των ακουστικών κυμάτων στον πομπό και στον δέκτη, εξάγοντας τελικά συμπεράσματα για την μεταξύ τους απόσταση. Όλα τα ακουστικά σήματα μπορούν να παρασταθούν

ως αθροίσματα ημιτόνων της μορφής $A\sin(\omega t - \varphi)$, όπου φ η μετρούμενη διαφορά φάσης (για $\theta=2\pi$ έχουμε πλήρη περίοδο) και A το πλάτος του κύματος. Μέσω της διαφοράς φάσης φ μεταξύ ενός εκπεμπόμενου σήματος και της λήψης αυτού, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση για κύματα με γνωστή συχνότητα. Μια αναπαράσταση του σήματος στον πομπό και στο δέκτη (υποθέτοντας διαφορά φάσης $\pi/4$) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 20: Δείγμα θεωρητικού σήματος στον ακουστικό πομπό και δέκτη

Η συχνότητα του ακουστικού σήματος f εξαρτάται από την ταχύτητα διάδοσης του ήχου c_s και το μήκος κύματός του λ σύμφωνα με τη σχέση $c_s = \lambda f$. Στην μετρούμενη διαφορά φάσης ϕ αντιστοιχεί ένα τμήμα του μήκους κύματος δ που ισούται με

$$\delta = \lambda \cdot \frac{\phi}{2\pi} \quad \text{ή} \quad \delta = \frac{c_s}{f} \cdot \frac{\phi}{2\pi}$$

Έτσι, για το παράδειγμα του σχήματος μετρώνας διαφορά φάσης $\pi/4$ μεταξύ εκπομπής και λήψης για ένα σήμα 40kHz (τιμή συνηθισμένη για συστήματα υπερήχων), εύκολα υπολογίζουμε από την παραπάνω σχέση (για $c_s=340\text{m/s}$) ότι $\delta = 1,06\text{mm}$.

Ένα βασικό ελάττωμα της μεθόδου όμως είναι η αβεβαιότητα για το ποια ακριβώς είναι η διαφορά φάσης λόγω της περιοδικότητας των ημιτονικών σημάτων. Πρέπει να υπενθυμιστεί, πως σε αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται συνεχή ακουστικά κύματα (continuous wave – CW). Η μετρούμενη φάση φ , σε κάθε περίπτωση, μπορεί να είναι οποιαδήποτε από την οικογένεια των γωνιών $\varphi + 2n\pi$, $n=0,1,2,3,\dots$ Έτσι, στο παραπάνω παράδειγμα, αφού το κύμα συχνότητας 40 kHz έχει μήκος κύματος 8,5mm, έχοντας μετρήσει $\varphi = \pi/4$, η πραγματική απόσταση μπορεί να είναι είτε 1,06mm ή 9,56mm ή τέλος πάντων $(1,06+8,5n)\text{mm}$.

Για την αντιμετώπιση της παραπάνω δυσκολίας προτείνονται διάφοροι τρόποι, όπως χρήση είτε κάποιας διαμόρφωσης στο σήμα (πράγμα δύσκολο, λόγω του μικρού εύρους ζώνης που είναι διαθέσιμο), η οποία καθιστά σαφή τα σημεία έναρξης και άφιξης ή η χρήση κάποιου προβλεπτικού

αλγόριθμοι. Ένας τέτοιος αλγόριθμος λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες θέσεις του στόχου (και υποθέτοντας πως ο στόχος αρχικά θα εκκινήσει από γνωστή θέση) καθώς και τα διανύσματα ταχύτητας και επιτάχυνσης του στόχου επιλέγει, από τις πιθανές τιμές της διαφοράς φάσης, την πιο πιθανή. Μία άλλη λύση είναι η μέτρηση των μηδενισμών τόσο του εκπεμπόμενου όσο και του λαμβανόμενου σήματος (zero-cross count). Η τεχνική αυτή, που λειτουργεί καλά υπό την απουσία θορύβου, οδηγεί σε ακριβή αποτελέσματα αν και, αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος. Ένα τελευταίο πρόβλημα, το οποίο δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα, είναι το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Δεδομένου του ότι το σήμα είναι συνεχές δείγματα του εκπεμπόμενου σήματος θα φτάσουν ετεροχρονισμένα στον δέκτη. Αν αυτά τα σήματα είναι αρκετά ισχυρά σε ισχύ τότε θα αλλοιώσουν τις μετρήσεις. Επιπλέον, το φαινόμενο αυτό κάνει απαγορευτική τη χρήση οποιασδήποτε άλλης τεχνικής εντοπισμού κατωφλίου, πέραν της ανίχνευση πρώτης άφιξης (lead-edge tracking). Έτσι μια σειρά άλλων τεχνικών που πολλές φορές καταλήγουν σε καλύτερα αποτελέσματα, όπως θα αναφερθεί σε επόμενες παραγράφους, δεν μπορούν (τουλάχιστον με σημαντική επιτυχία) να εφαρμοστούν.

Στην δεύτερη τεχνική, ένα σήμα εκπέμπεται από τον πομπό (είτε σε σταθερό σημείο στον χώρο είτε προσαρμοσμένο στο στόχο, ανάλογα με το αν το σύστημα είναι «μέσα-έξω» ή «έξω-μέσα»), ενεργοποιώντας ένα χρονόμετρο ακριβείας, το οποίο μετράει το χρόνο που κάνει το σήμα να φτάσει στους δέκτες. Γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης του ήχου (έστω και προσεγγιστικά) μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση μεταξύ του εκάστοτε ζευγαριού πομπού και δέκτη. Χρησιμοποιώντας αυτές τις μετρήσεις (τουλάχιστον τρεις) και τις γνωστές συντεταγμένες θέσης των τριών δεκτών μπορούμε με τη χρήση της μεθόδου τριμεροποίησης (trilateration) να υπολογιστούν οι συντεταγμένες του στόχου. Φυσικά υπάρχουν διάφορες τοπολογίες (που υπαγορεύουν και διαφορετικές μεθόδους) υπολογισμού συντεταγμένων, οι οποίες θα αναλυθούν σε ακόλουθη παράγραφο. Λόγω των εγγενών προβλημάτων που υπάρχουν στα συστήματα εντοπισμού φάσης, όπως προαναφέρθηκε, στη διατριβή επιλέγεται η τεχνική μέτρησης χρόνου διαδρομής. Πριν αναφερθούμε αναλυτικά στις πιθανές τοπολογίες και στις εξισώσεις λειτουργίας του συστήματος, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε, επιγραμματικά έστω, σε κάποια στοιχεία ακουστικής.

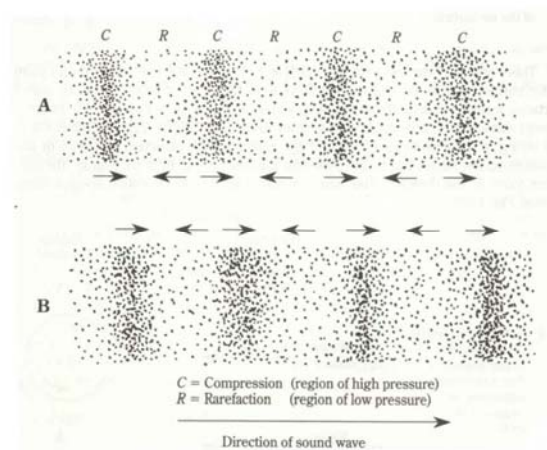
2.2 ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Ο ήχος από ψυχοφυσική άποψη ορίζεται ως το οποιοδήποτε ερέθισμα του ανθρώπινου μηχανισμού ακοής που έχει σαν αποτέλεσμα την αίσθηση της αντίληψής του [SKUD71]. Από φυσική άποψη όμως – που μας ενδιαφέρει πιο πολύ – ο ήχος ορίζεται ως κυματική κίνηση στον αέρα ή άλλα ελαστικά μέσα ([EVER94], [BLAC00]). Οποιαδήποτε δόνηση ενός στερεού, αέριου ή υγρού μέσου στο φάσμα συχνοτήτων που γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο αυτί (περίπου 16Hz-16kHz) χαρακτηρίζεται ως ήχος. Δονήσεις μικρότερες από τα 16Hz ονομάζονται υποηχητικές (infrasound) ενώ, δονήσεις μεγαλύτερες από τα 16kHz ονομάζονται υπερηχητικές (ultra- ή supersonic). Βέβαια, πρέπει να τονιστεί πως για την ανάλυση σε αυτή τη διατριβή, αν και το προτεινόμενο σύστημα

λειτουργεί σε συχνότητες υπερηχητικών κυμάτων, καταχρηστικά πολλές φορές τα εκπεμπόμενα κύματα αναφέρονται απλά ως ακουστικά.

Η διάδοση του ήχου χρειάζεται ένα μέσο το οποίο διεγείρεται δυναμικά με αποτέλεσμα, να δημιουργούνται μεταβολές πίεσης, έντασης, θερμοκρασίας και ταχύτητας των μορίων του μέσου. Τα μόρια του μέσου μπορούν να εκτελούν τρία διαφορετικά είδη κινήσεων [EVER94] με τα κατάλληλα ερεθίσματα: κίνηση σε κυκλικές τροχιές (από το σημείο ερεθισμού προς τα έξω), εγκάρσιες κινήσεις (σε διεύθυνση κάθετη προς την διεύθυνση κίνησης του κύματος) και διαμήκεις κινήσεις (κινήσεις στη διεύθυνση κίνησης του κύματος). Ο ήχος διαδίδεται (σε αέρια μέσα) με διαμήκεις κινήσεις των σωματιδίων του μέσου. Οι διαμήκεις αυτές κινήσεις των σωματιδίων αλλάζουν τοπικά την πίεση και πυκνότητα του μέσου. Έτσι π.χ. στον αέρα οι αλλαγές αυτές της πίεσης γίνονται αντιληπτές από τον άνθρωπο ως ηχητικό ερέθισμα (σε συχνότητες μέσα στο ακουστικό φάσμα).

Το ηχητικό κύμα δημιουργείται από μια ηχητική πηγή π.χ. μεγάφωνο, άνθρωπος, κ.ο.κ. Το ηχητικό ερέθισμα προκαλεί τα μόρια του μέσου να εκτελέσουν διαμήκεις κινήσεις περί την θέση ισορροπίας τους. Αυτά, συγκρουόμενα με άλλα μόρια μεταδίδουν ένα τμήμα της ενέργειας τους και θέτουν και εκείνα σε κίνηση. Ως αποτέλεσμα της κίνησης αυτής των μορίων δημιουργούνται στο μέσο περιοχές αραιώσης και πύκνωσης (βλ. ακόλουθο σχήμα). Οι μεταβολές αυτές της πίεσης είναι μεν πολύ μικρές σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση, αλλά γίνονται αντιληπτές ως ήχος από το ανθρώπινο αυτί (το ανθρώπινο αυτί μπορεί να καταλάβει διαφορές της τάξης των 20 μPascal).



Εικόνα 21: Μεταβολές της πίεσης κατά τη διάδοση ακουστικών κυμάτων

Η βασική εξίσωση που περιγράφει το ηχητικό κύμα είναι $\nabla^2 \rho + \text{curl curl} \rho = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$,

όπου u είναι η ταχύτητα των μορίων του μέσου διάδοσης (που δεν είναι η ταχύτητα διάδοσης του

ήχου)¹. Η ταχύτητα των σωματιδίων έχει άμεση σχέση με την πυκνότητα του μέσου και την πίεση σε διάφορα σημεία του μέσου. Οι εξαρτήσεις αυτές δίνονται από τις εξισώσεις κατάστασης, Euler και συνέχειας του μέσου που είναι αντίστοιχα:

$$p = c^2 \rho + \text{σταθ}$$

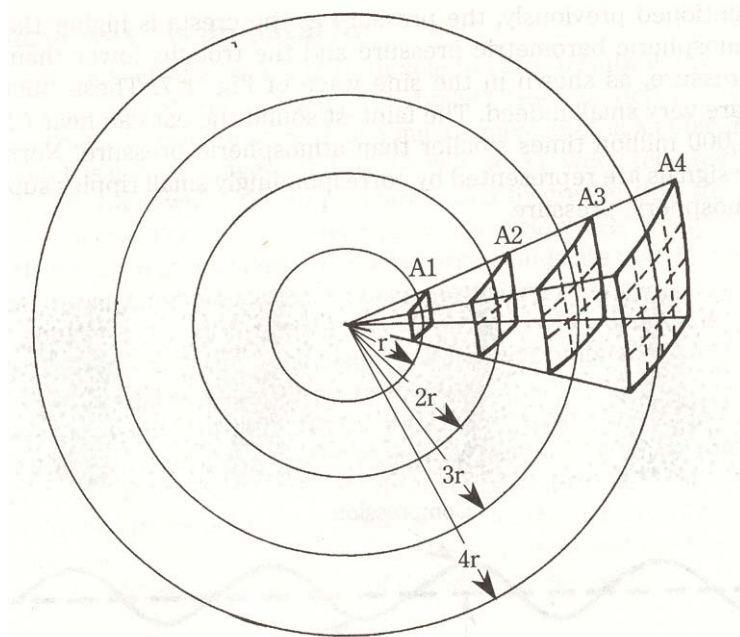
$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t}$$

όπου p η πίεση, ρ_0 η πυκνότητα του μέσου σε ένα σημείο αυτού και u_x η ταχύτητα των σωματιδίων του μέσου προς την κατεύθυνση x^2 .

2.2.1 Ταχύτητα διάδοσης ακουστικών κυμάτων

Στον ελεύθερο χώρο ο ήχος διαδίδεται από μια σημειακή πηγή ομογενώς προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ένταση του ήχου στον ελεύθερο χώρο είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης από την σημειακή πηγή.



Εικόνα 22: Διάδοση σφαιρικών ακουστικών κυμάτων

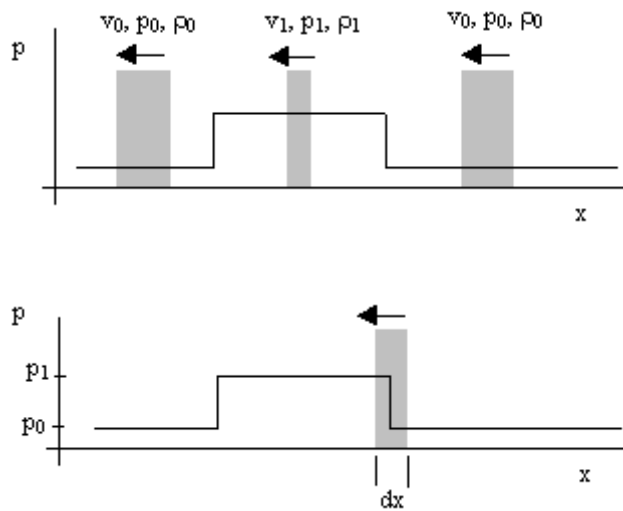
Ο χώρος όμως μέσα στο οποίο διαδίδεται ο ήχος φυσικά δεν είναι ελεύθερος. Πριν ασχοληθούμε με κάποια φαινόμενα που σχετίζονται με τη διάδοση του ήχου (περίθλαση, ανάκλαση, διάθλαση), θα αναφερθούμε στην ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Ο πρώτος που ασχολήθηκε

¹ Βλ. Παράρτημα 1

² Οι εξισώσεις που περιγράφουν το ηχητικό κύμα δίνονται στο Παράρτημα 1

επισταμένα με την θεωρητική εύρεση της ταχύτητας του ήχου ήταν ο Νεύτωνας [NEWT1687]. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ακουστικών κυμάτων, και έχοντας υπόψη τον τρόπο δημιουργίας και διάδοσης αυτών, θεώρησε έναν απλό τετραγωνικό παλμό, υψηλότερης πίεσης, ο οποίος μετακινείται προς τα δεξιά (θετικά του άξονα x) με ταχύτητα v_0 σε ένα ελαστικό μέσο. Για λόγους απλότητας, ας θεωρήσουμε πως το σύστημα συντεταγμένων συνταξιδεύει με τον παλμό. Έτσι, μπορούμε να θεωρήσουμε τον παλμό ακίνητο ενώ το μέσο στο οποίο διαδίδεται ο παλμός κινείται πλέον προς τα αριστερά (αρνητικά του άξονα x).

Θεωρώντας τρία κομμάτια του υλικού μέσου ίσης μάζας, εκ των οποίων το ένα πλησιάζει τον παλμό, το δεύτερο είναι μέσα σε αυτόν και το τρίτο απομακρύνεται από αυτόν, λαμβάνοντας υπόψη πως η πυκνότητα του μέσου είναι υψηλότερη στον παλμό, η ταχύτητα του ελαστικού μέσου είναι μικρότερη μέσα παρά εξωτερικά αυτού.



Εικόνα 23: Υπολογισμός ταχύτητας διάδοσης του ήχου

Επομένως το μέσο επιβραδύνει εισερχόμενο στον παλμό και επιταχύνει εξερχόμενο αυτού. Επικεντρώνοντας σε μία στοιχειώδη επιφάνεια του υλικού μέσου που εισέρχεται στον παλμό (όπως φαίνεται στο δεύτερο σχήμα της προηγούμενης εικόνας, όπου v_0, p_0, ρ_0 είναι η ταχύτητα, η πίεση και η πυκνότητα του μέσου έξω από τον παλμό ενώ v_1, p_1, ρ_1 τα αντίστοιχα μεγέθη εσωτερικά αυτού), βλέπουμε πως η αριστερή πλευρά της επιφάνειας βρίσκεται σε πίεση p_1 , ενώ η δεξιά σε p_0 . Αποτέλεσμα είναι να ασκηθεί στην επιφάνεια δύναμη $p_1 - p_0$ ανά μονάδα επιφάνειας προς τα δεξιά, τείνοντας να την επιβραδύνει. Η δύναμη αυτή ασκείται στην επιφάνεια για το χρονικό διάστημα dt , που απαιτείται ώστε αυτή να εισέλθει στον παλμό. Προφανώς $dt = dx/v_0$, ενώ εφαρμόζοντας το 2^ο νόμο του Νεύτωνα, έχουμε:

$$F = m\gamma \Leftrightarrow p_1 - p_0 = (\rho_0 dx) \frac{v_0 - v_1}{dt} \Leftrightarrow p_1 - p_0 = \rho_0 v_0 (v_0 - v_1)$$

Προφανώς για τη συνέχεια της ροής του μέσου έχουμε $\rho_0 v_0 = \rho_1 v_1$, οπότε παίρνουμε:

$$v_0(\rho_1 - \rho_0) = \rho_1(v_0 - v_1). \text{ Από τις δύο τελευταίες εξισώσεις έχουμε } v_0^2 = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left(\frac{p_1 - p_0}{\rho_1 - \rho_0} \right).$$

και η πίεση κατά μήκος ενός ελαστικού μέσου κατά τη διάδοση ενός ακουστικού κύματος παρουσιάζει πολύ μικρές διαφορές πλάτους ισχύει προσεγγιστικά $\rho_1/\rho_0 \approx 1$, οπότε

$$v_0^2 = \left(\frac{p_1 - p_0}{\rho_1 - \rho_0} \right) = \frac{dp}{d\rho}. \text{ Το ιξώδες ενός ελαστικού μέσου } K \text{ ορίζεται ως } K = \rho \frac{dp}{d\rho}. \text{ Έτσι,}$$

καταλήγουμε στην ακόλουθη σχέση για ακουστικά κύματα που διαδίδονται σε ελαστικά μέσα:

$$v_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho}}.$$

Ο Νεύτων, ακολουθώντας το νόμο του Boyle που υπαγορεύει πως η πυκνότητα ενός αερίου σε σταθερή θερμοκρασία είναι ανάλογη της πίεσης και δίνεται από τη σχέση $p = \rho RT$, όπου R η σταθερά του αερίου, συμπέρανε πως $v_0 = \sqrt{RT}$. Προσεγγίζοντας εμπειρικά, εκείνη την εποχή, την ποσότητα RT για τον αέρα κατέληξε πως η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι $v_0 = 979 \text{ft/sec} \approx 298,4 \text{m/sec}$ (γνωρίζοντας βέβαια την πραγματική τιμή του RT για τυπική θερμοκρασία στο επίπεδο της θάλασσας για τον αέρα έχουμε $v_0 = 943 \text{ft/sec} \approx 287,4 \text{m/sec}$).

Βέβαια, ο Νεύτων έκανε το λάθος να θεωρήσει πως κατά τη διάρκεια μιας ακουστικής διαταραχής η πίεση του μέσου είναι ανάλογη της πυκνότητας αυτού. Και αυτό διότι η θερμοκρασία δεν διατηρείται σταθερή (π.χ. σε περιοχές του μέσου όπου η πίεση και η πυκνότητα αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται ελαφρώς). Πιο συγκεκριμένα, ο θερμοδυναμικός νόμος για τα ιδανικά αέρια είναι $pv = RT$, όπου v ο ειδικός όγκος του αερίου. Η ειδική εσωτερική ενέργεια u ενός ιδανικού αερίου είναι συνάρτηση αποκλειστικά της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο του αερίου $c_V = (\partial u / \partial T)_V$ να ισούται με την ολική παράγωγο du/dT . Επίσης η ειδική ενθαλπία $h = u + pv$ ενός ιδανικού αερίου είναι αποκλειστικά συνάρτηση της θερμοκρασίας, οπότε η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση $c_P = (\partial h / \partial T)_P$ ισούται με την ολική παράγωγο dh/dT . Από τον θερμοδυναμικό νόμο παίρνουμε $h = u + RT \Leftrightarrow dh = du + RdT \Leftrightarrow c_P - c_V = R$.

Αν τώρα θεωρήσουμε μία αύξηση dv του ειδικού όγκου μιας συγκεκριμένης μάζας ενός ιδανικού αερίου (αδιαβατική αλλαγή), που γίνεται με τρόπο ώστε το αέριο να παραμένει σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια του αερίου θα είναι

$$du = -p dv. \text{ Χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες σχέσεις, έχουμε } \frac{1}{T} dT = - \left(\frac{R}{c_V} \right) \frac{1}{v} dv. \text{ Θεωρώντας}$$

το λόγο $\gamma = \frac{c_P}{c_V}$ και ολοκληρώνοντας στο διάστημα από T_0, v_0 ως T_1, v_1 παίρνουμε

$$\ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) = (1-\gamma)\ln\left(\frac{v_1}{v_0}\right) \Leftrightarrow \frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{v_1}{v_0}\right)^{(1-\gamma)} \Leftrightarrow \frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{v_0}{v_1}\right)^\gamma.$$

Μια και ο ειδικός όγκος είναι το αντίστροφο της πυκνότητας ρ , ο λόγος p/ρ^γ είναι σταθερός κατά τη διάρκεια μιας αδιαβατικής διαδικασίας. Θεωρώντας πως $p = k\rho^\gamma$, έχουμε:

$$\left(\frac{dp}{d\rho}\right)_{\text{αδιαβατική}} = \gamma k\rho^{\gamma-1} = \gamma(k\rho^\gamma)\rho^{-1} = \gamma \frac{p}{\rho} = \gamma RT$$

$$\text{Επανερχόμενοι στη σχέση του Νεύτωνα έχουμε } v_0^2 = \frac{dp}{d\rho} \Leftrightarrow v_0 = \sqrt{\gamma RT}. \text{ Για τον αέρα}$$

έχουμε $\gamma \approx 1,4$ και $R = 287,05 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, οπότε και η ταχύτητα του ήχου στον αέρα υπολογίζεται ως $v_0 = 1115,7 \text{ ft/sec} = 340,1 \text{ m/sec}$.

Για τα ιδανικά αέρια η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται αποκλειστικά από την θερμοκρασία και όχι από την πίεση ή την πυκνότητα του αερίου. Χρησιμοποιώντας συνήθεις συνθήκες ατμόσφαιρας προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές ταχύτητας των ακουστικών κυμάτων:

θ (°C)	c (m s ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)	$Z' = \rho c$ (N s m ⁻³)
-10	325,4	1,341	436,5
-5	328,5	1,316	432,4
0	331,5	1,293	428,3
+5	334,5	1,269	424,5
+10	337,5	1,247	420,7
+15	340,5	1,225	417,0
+20	343,4	1,204	413,5
+25	346,3	1,184	410,0
+30	349,2	1,164	406,6

Πίνακας 3: Επίδραση θερμοκρασίας στην ταχύτητα διάδοσης του ήχου

Ο Baranek [BARA54], πρώτα, έφτασε σε μία προσεγγιστική σχέση που εκφράζει την εξάρτηση της ταχύτητας του ήχου από τη θερμοκρασία. Η σχέση αυτή είναι $c_s \cong 346,4 \text{ m/s} + 0,5813 \text{ m/s}(T - 25)$, όπου T η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου. Αυτή είναι και η σχέση που θα χρησιμοποιήσουμε στη διατριβή για να υπολογίσουμε την ταχύτητα των ακουστικών κυμάτων στον αέρα.

Βέβαια, όπως είναι προφανές, η ταχύτητα του ήχου δεν εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία. Παράγοντας που επηρεάζει την ταχύτητα είναι και η υγρασία του περιβάλλοντος. Καθώς η τελευταία αυξάνεται, αυξάνεται η πυκνότητα του αέρα. Σε εσωτερικούς χώρους οι μεταβολές της υγρασίας είναι σχετικά χαμηλές, ιδίως σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, με αποτέλεσμα η επίδραση της υγρασίας να μπορεί να αγνοηθεί. Οι μεταβολές της ταχύτητας των ακουστικών κυμάτων σε διαφορετικές συνθήκες υγρασίας και για διαφορετικές θερμοκρασίες φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα [KAYE95].

¹ Η ακουστική αντίσταση του μέσου

Θερμοκρασία °C	Σχετική υγρασία %								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	331.5	331.5	331.5	331.6	331.6	331.6	331.7	331.7	331.7
5	334.5	334.6	334.6	334.7	334.7	334.7	334.8	334.8	334.9
10	337.5	337.6	337.7	337.7	337.8	337.9	337.9	338.0	338.0
15	340.5	340.6	340.7	340.8	340.9	341.0	341.1	341.2	341.2
20	343.5	343.6	343.7	343.9	344.0	344.1	344.2	344.4	344.5
25	346.4	346.6	346.8	347.0	347.1	347.3	347.5	347.6	347.8
30	349.4	349.6	349.9	350.1	350.3	350.5	350.8	351.0	351.2

Πίνακας 4: Μεταβολή της ταχύτητας του ήχου ως συνάρτηση της σχετικής υγρασίας

Επιπλέον, πιθανά ρεύματα αέρα θα καταστήσουν το μέσο μετάδοσης μη ομογενές με αποτέλεσμα η πιο πάνω ανάλυση να μην ισχύει. Πάλι σε ελεγχόμενους σχετικά χώρους, δυνατά ρεύματα αέρα δεν παρουσιάζονται, άρα και αυτός ο παράγοντας μπορεί να αγνοηθεί.

Πρέπει να τονιστεί πως για ηχητικές συχνότητες ο αέρας δεν αποτελεί μέσο διασποράς. Για τις υπερηχητικές συχνότητες (>28kHz) ο αέρας αρχίζει να δρα ως μέσο διασποράς εξαιτίας κυρίως της περιεκτικότητας του σε CO₂ με αποτέλεσμα να καθίσταται απαγορευτική η χρήση ακουστικών σημάτων σε συχνότητες μεγαλύτερες των 50-60kHz για εφαρμογές εντοπισμού και σίγουρα όχι πάνω από τα 80kHz.

2.2.2 Εξασθένηση των ακουστικών κυμάτων στον αέρα

Όπως έχει αναφερθεί, στα ιδανικά αέρια η ένταση του ακουστικού κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή που δημιουργεί το ηχητικό κύμα. Ο αέρας, όντας μη ιδανικό αέριο, δεν υπακούει σε αυτή τη σχέση. Εξαιτίας απωλειών από τη δονητική χαλάρωση (vibrational relaxation) των μορίων του οξυγόνου, η εξασθένηση των ακουστικών κυμάτων παρουσιάζει σημαντική εξάρτηση από τη θερμοκρασία, την υγρασία και τη συχνότητα του ακουστικού κύματος.

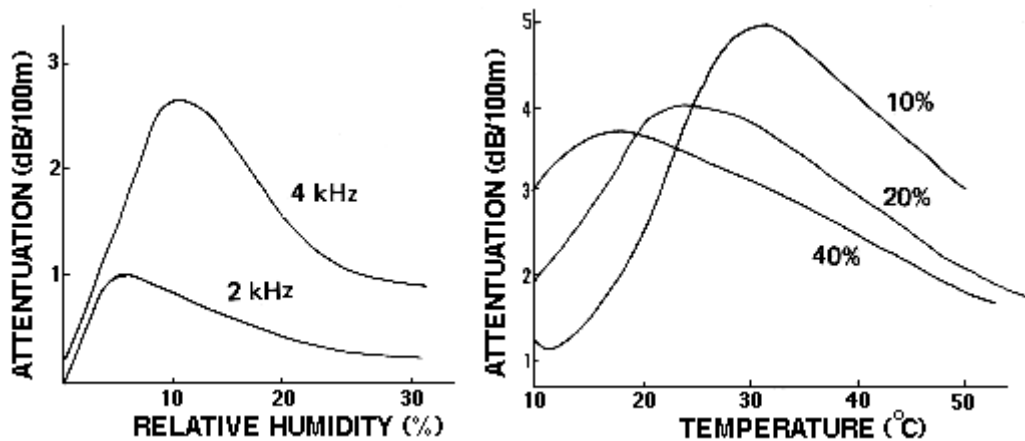
Η κλασική μέθοδος για το θεωρητικό υπολογισμό της εξασθένησης των ακουστικών κυμάτων στον αέρα στηρίζεται στη θεωρία των Rayleigh και Stokes. Η μέθοδος ξεκινά από την κλασική εξίσωση του ακουστικού κύματος και προσθέτει όρους που σχετίζονται με το ιξώδες και τη θερμική αγωγιμότητα. Η προσέγγιση βασίζεται σε μία θερμοδυναμική θεώρηση του φαινομένου, που λαμβάνει υπόψη της, τις αλλαγές μεταξύ μεταφορικής και περιστροφικής ενέργειας των μορίων του αέρα.

Μία προσέγγιση που κερδίζει διαρκώς έδαφος είναι αυτή που υπολογίζει θεωρητικά την εξασθένηση των ακουστικών κυμάτων, στηριζόμενη σε στατιστικά στοιχεία της ταχύτητας των

μορίων του αέρα. Η προσέγγιση αυτή [LUDW06] καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής εξασθένησης για ακουστικά κύματα συχνότητας μικρότερης των 10kHz είναι $\alpha=3,4 \cdot 10^{-13} \omega^2$ (m^{-1}), όπου $\omega=2\pi f$. Συμπληρωματικά για συχνότητες μεγαλύτερες των 10kHz ([CROC98]) ο αντίστοιχος συντελεστής εξασθένησης δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση $\alpha=4,66 \cdot 10^{-13} \omega^2$ (m^{-1}).

Προφανώς, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επιδρούν στην εξασθένηση του ακουστικού κύματος στον αέρα. Έχουν ερευνηθεί αρκετά οι επιδράσεις αυτές και έχουν δημιουργηθεί εμπειρικές καμπύλες [HARR66]. Το ακουστικό κύμα εμφανίζει απορρόφηση στον αέρα. Η απορρόφηση αυτή εξαρτάται από την υγρασία και την σκόνη που υπάρχει στον αέρα, αλλά και από την συχνότητα του κύματος. Στις μικρότερες συχνότητες, λόγω του μεγαλύτερου μήκους κύματος, παρατηρείται μικρότερη απορρόφηση. Για παράδειγμα, για τα 20kHz, η απορρόφηση είναι της τάξης των 0,02dB ανά 30 cm.

Γενικά λοιπόν, πρέπει να έχουμε στο μυαλό μας ότι οι χαμηλότερες συχνότητες ευνοούν την μετάδοση σε μεγαλύτερη ακτίνα, αν λάβουμε υπόψη μας την απορρόφηση από τον αέρα.



Εικόνα 24: Μεταβολή της εξασθένησης των ακουστικών κυμάτων με τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία

Το 1993 ο παγκόσμιος οργανισμός πιστοποίησης εξέδωσε το ISO 9613-1 ([ISO93]), που τυποποιεί μια διαδικασία για τον υπολογισμό της εξασθένησης των ακουστικών κυμάτων στον αέρα, σε εξωτερικούς χώρους, σε συνάρτηση με τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία αυτή, χαρακτηριστικές τιμές της εξασθένησης φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Συχνότητα (kHz)	Σχετική υγρασία %								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	14	6.5	5	4.7	4.7	4.8	5	5.1	5.3
1.25	21	9.4	6.7	5.9	5.7	5.7	5.9	6.1	6.3
1.6	32	14	9.8	8.1	7.5	7.2	7.2	7.4	7.5
2	45	22	14	11	9.9	9.3	9	9	9.1

Συχνότητα (kHz)	Σχετική υγρασία %								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
2.5	63	32	21	16	14	12	12	11	11
3.15	85	49	32	24	20	17	16	15	15
4	110	75	49	36	30	26	23	21	20
5	130	110	74	55	44	38	33	31	28
6.3	160	160	110	84	68	57	50	45	42
8	180	220	170	130	110	89	78	69	63
10	190	280	240	190	160	130	120	100	95
12.5	210	360	340	280	240	200	180	160	140
16	230	430	470	420	360	320	280	250	230
20	260	510	600	580	520	470	420	380	350
25	300	580	740	770	730	680	620	570	520
31.5	360	670	890	990	1000	960	900	840	790
40	460	780	1100	1200	1300	1300	1300	1200	1200
50	600	940	1300	1500	1700	1700	1700	1700	1700
63	840	1200	1500	1800	2100	2200	2300	2300	2300
80	1200	1600	2000	2300	2600	2800	3000	3100	3100
100	1800	2200	2500	2900	3300	3600	3800	4000	4100

Πίνακας 5: Μεταβολές της εξασθένησης ακουστικού κύματος σε συνάρτηση με την υγρασία για $\theta=20^{\circ}\text{C}$ και $p=101,25\text{kPascal}$ σε db/km

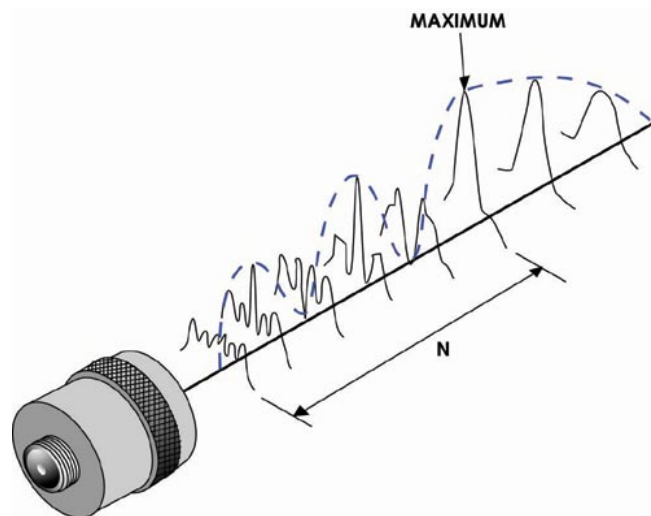
Πρέπει να τονιστεί πως, εκτός από τον αέρα, απορρόφηση των ακουστικών κυμάτων παρατηρείται και κατά την πρόσπτωση των ακουστικών κυμάτων σε οποιοδήποτε υλικό βρίσκεται στη διεύθυνση διάδοσής τους. Η απορρόφηση των ακουστικών κυμάτων χαρακτηρίζεται από το συντελεστή απορρόφησης, που φανερώνει το ποσοστό της ισχύος του ακουστικού κύματος που απορροφάται από το υλικό στο οποίο προσπίπτει το κύμα. Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται από το είδος του υλικού, το πάχος αυτού, τη συχνότητα του ακουστικού κύματος και τη γωνία πρόσπτωσης του κύματος στο υλικό.

Υπάρχουν διάφοροι πίνακες, ακόμα και σε παλαιότερη βιβλιογραφία ([YOUN59], [EVER94], [BARA54], [FILI99]), που ποσοτικοποιούν το συντελεστή απορρόφησης των ακουστικών κυμάτων για διάφορα υλικά και συχνότητες. Η απορρόφηση γενικά για τα περισσότερα υλικά αυξάνει με τη συχνότητα. Για τα συστήματα εντοπισμού – και για να έχουν αυτά μία ικανοποιητική εμβέλεια – πρέπει να εξασφαλίζεται απευθείας οπτική συνιστώσα μεταξύ του πομπού

και του δέκτη ακουστικών κυμάτων. Μια και στο χώρο δράσης των συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας – για το οποίο προορίζεται το σύστημα εντοπισμού – μόνο άνθρωποι-χρήστες του Εικονικού Κόσμου προβλέπονται να υπάρχουν στην περιοχή εμβέλειας του συστήματος, ουσιαστικά αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η απορρόφηση των ακουστικών κυμάτων από τον άνθρωπο. Αυτή έχει μελετηθεί από διάφορους ερευνητές (π.χ. [KING68]) κυρίως για λόγους ακουστικότητας δωματίων ήχου. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν πως η παρεμβολή του ανθρώπου στη διαδρομή του ακουστικού κύματος ουσιαστικά απορροφά (επιπλέον διασπείρει και ανακλά) όλο το ακουστικό κύμα. Επομένως σε όλα τα συστήματα εντοπισμού υπερηχητικών κυμάτων πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για απώλεια επικοινωνίας πομπού και δέκτη λόγω ανθρώπινης παρεμβολής στην απευθείας οπτική συνιστώσα.

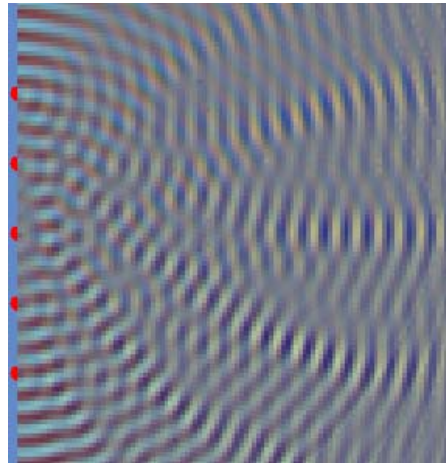
2.2.3 Κοντινό πεδίο ακουστικών πομπών

Η πιο πάνω ανάλυση ευσταθεί για το μακρινό πεδίο (far field – ζώνη Fraunhofer) των ακουστικών πομποδεκτών. Πολύ κοντά στους ακουστικούς μετατροπείς (transducers) το ακουστικό κύμα είναι ανομοιογενές και παρουσιάζει ανωμαλίες στη διάδοσή του. Η εγγύς αυτή περιοχή αναφέρεται ως το κοντινό πεδίο (near field, γνωστό – 1^η ζώνη Fresnel) του πομπού. Το ακουστικό κύμα δημιουργείται όπως θα δούμε σε ακόλουθη παράγραφο από τις εναλλαγές της πίεσης λόγω της ταλάντωσης του διαφράγματος ενός ακουστικού μετατροπέα. Στο κοντινό πεδίο το σήμα δεν είναι ομογενές, καθώς ανά πάσα στιγμή κάθε σημείο του διαφράγματος μπορεί να ωθεί μόρια αέρα δημιουργώντας θετική πίεση ή να δημιουργεί κενό έλκοντας μόρια αέρα και μειώνοντας την δημιουργημένη πίεση. Κοντά λοιπόν στον πομπό το κύμα αποτελείται από το άθροισμα όλων αυτών των μικρών ημιτονικών κυμάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25: Συμπεριφορά του ακουστικού κύματος στο κοντινό πεδίο.

Σε κάποιο σημείο του χώρου, όπως βλέπουμε στην Εικόνα 26, τα στοιχειώδη κύματα ενώνονται και δημιουργούν ένα σχεδόν ομογενές ημιτονικό κύμα, το οποίο συνεχίζει να μεταδίδεται στον χώρο. Το σημείο στο οποίο συμβαίνει αυτό είναι το όριο του κοντινού πεδίου και βρίσκεται σε απόσταση N από τον πομπό, η οποία αναφέρεται και σαν το ‘natural focus’ του ηχείου. Πάνω στο όριο, το κύμα λαμβάνει το μέγιστο πλάτος και αρχίζει να συμπεριφέρεται ομαλά. Η απόσταση N ορίζεται κατά προσέγγιση από την σχέση $N = \frac{D^2 f}{4c_s}$, όπου D η διάμετρος του διαφράγματος (ή η ενεργή διάμετρος του κώνου, αν μιλάμε για μετατροπείς ανοικτού τύπου¹), f η συχνότητα λειτουργίας και c_s η ταχύτητα του ήχου.



Εικόνα 26: Κάτοψη ακουστικών κυμάτων

Λόγω της «περίεργης» συμπεριφοράς του κύματος στο κοντινό πεδίο, είναι σαφές ότι αφενός δεν είναι δυνατόν να λάβουμε υπόψη μας μετρήσεις που γίνονται εντός της απόστασης N , και αφετέρου, δεν μπορούμε να έχουμε δύο πομπούς, έστω και σε διαφορετικές αποστάσεις οι οποίοι να βρίσκονται ο ένας στο κοντινό πεδίο του άλλου καθώς η αλληλεπίδραση των κυμάτων είναι τελείως απρόβλεπτη.

2.2.4 Ανάκλαση-Διάθλαση-Περίθλαση

Όπως όλα τα κύματα που διαδίδονται στο χώρο, έτσι και τα ακουστικά παρουσιάζουν κατά τη διάδοσή τους φαινόμενα ανάκλασης, διάθλασης και περίθλασης. Πιο σημαντικά για την περίπτωση του συστήματος εντοπισμού αποτελούν προφανώς τα φαινόμενα ανάκλασης. Εντούτοις θα αναφερθούμε επιγραμματικά και στα δύο άλλα φαινόμενα.

Τα ακουστικά κύματα ανακλώνται από λείες και μη επιφάνειες σε γωνία ίση με τη γωνία πρόσπτωσης. Αποτέλεσμα είναι στον δέκτη να φτάσουν είδωλα της εκπεμπόμενης κυματομορφής

¹ Βλέπε επόμενη παράγραφο

καθυστερημένα χρονικά σε σχέση με την κύρια κυματομορφή. Ως αποτέλεσμα εμφανίζονται φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath) που, είτε αλλοιώνουν την περιβάλλουσα του σήματος που λαμβάνεται στο δέκτη (αν συμπέσουν έστω και για μικρό χρονικό διάστημα), ή δημιουργούν είδωλα μικρότερου πλάτους που είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε εσφαλμένες μετρήσεις.

Δεδομένου των μεγάλων συντελεστών απορρόφησης που εμφανίζουν τα υπερηχητικά κύματα σε αρκετά υλικά αλλά κυρίως της μικρής ταχύτητας διάδοσης των ακουστικών κυμάτων (σε σχέση π.χ. με την ταχύτητα του φωτός) πρόβλημα αποτελεί ουσιαστικά η πρώτη ανάκλαση, δηλαδή το πρώτο ανακλώμενο κύμα που φτάνει στο δέκτη.

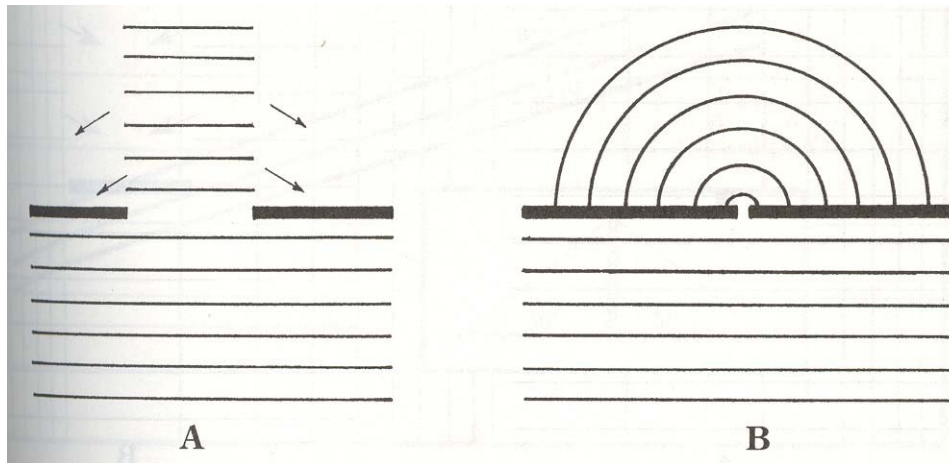
Υπάρχουν λύσεις που μπορούν αν όχι να εξαλείψουν, τουλάχιστον να μετριάσουν την επίδραση του φαινομένου της ανάκλασης και να περιορίσουν το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα φαινόμενα σημαντικών ανακλάσεων περιορίζονται αισθητά αν φροντίσουμε για την απουσία οποιωνδήποτε πιθανών σκεδαστών εντός της 1^{ης} ζώνης Fresnel. Επιπρόσθετα καλό είναι να μελετηθεί το προφίλ πολυδιαδρομικής διάδοσης του χώρου λειτουργίας του συστήματος ώστε οι πιθανές ανακλάσεις να μπορούν να εξαλειφθούν με χρήση κατάλληλου λογισμικού κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Η μελέτη αυτή μπορεί να οδηγήσει στον κατάλληλο καθορισμό των κατωφλίων ανίχνευσης σήματος στον δέκτη. Βέβαια προφανώς υπάρχει κάποιο trade-off μεταξύ της εμβέλειας του συστήματος και του αποκλεισμού των ανακλάσεων. Θέτοντας το κατώφλι ανίχνευσης αρκετά ψηλά θα αποφύγουμε την επίδραση των ανακλάσεων, αλλά θα περιορίσουμε την εμβέλεια του συστήματος και αντίστροφα όταν το κατώφλι τεθεί σε χαμηλή τιμή.

Πρέπει να τονιστεί πως η αποφυγή της επίδρασης των ανακλάσεων μπορεί πιο εύκολα να αποφευχθεί όταν για τον εντοπισμό του σήματος στον δέκτη χρησιμοποιείται αλγόριθμος ανίχνευσης πρώτης ακμής (lead-edge tracking). Σε αυτήν την περίπτωση η μέτρηση λαμβάνεται όταν το σήμα στο δέκτη περάσει μία συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου. Υπάρχει όμως η περίπτωση για τη λήψη της μέτρησης να χρησιμοποιείται άλλη τεχνική που λαμβάνει υπόψη της το χωρικό προφίλ της περιβάλλουσας (π.χ. centroid tracking), με αποτέλεσμα ακόμα και μικρής στάθμης ανακλάσεις να μπορούν να επιδράσουν στις μετρήσεις. Πιο αναλυτικά το πρόβλημα θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο όταν αναλυθούν οι προδιαγραφές του συστήματος που τελικά υλοποιήθηκε.

Διάθλαση αποτελεί το φαινόμενο της αλλαγής της διεύθυνσης διάδοσης των ακουστικών κυμάτων καθώς αυτά κινούνται από ένα μέσο διάδοσης σε άλλο με διαφορετική πυκνότητα. Το πρόβλημα της διάθλασης είναι επουσιώδες για συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας όπου το μόνο μέσο διάδοσης είναι ο αέρας.

Τα ακουστικά κύματα κινούνται μετωπικά σε ευθύγραμμη διεύθυνση. Αν το ακουστικό κύμα συναντήσει στην πορεία του εμπόδιο τότε περιθλάται – αλλάζει κατεύθυνση. Για να είναι ικανά τα εμπόδια να περιθλάσουν τον ήχο πρέπει το μέγεθός τους να είναι μεγάλο σε σχέση με το μήκος κύματος του ακουστικού κύματος. Η περιθλάση μπορεί να μεταβάλλει τη διεύθυνση ή τον τρόπο διάδοσης των κυμάτων.

Μια και, όπως έχει αναφερθεί, τα συστήματα εντοπισμού με τα οποία ασχολείται η διατριβή αυτή προορίζονται για εφαρμογή σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας, όπου δεν προβλέπεται τίποτε να παρεμβαίνει μεταξύ πομπού και δέκτη, πλην πιθανώς του χρήστη, το φαινόμενο της περίθλασης δεν μπορεί να προκαλέσει προβλήματα μεγαλύτερα από αυτά που προκαλεί η απουσία της απευθείας οπτικής συνιστώσας. Η μοναδική περίπτωση όπου θεωρητικά η συμβολή της περίθλασης του ακουστικού κύματος είναι σημαντική είναι όταν το ανθρώπινο χέρι εισέρχεται με ανοικτά τα δάχτυλα στην γραμμική απευθείας οπτικής συνιστώσας του συστήματος. Σε αυτήν την περίπτωση και ανάλογα με τη συχνότητα του κύματος και το μέγεθος του ανοίγματος το κύμα μπορεί είτε να περάσει ανάμεσα στα δάχτυλα με κάποια μικρή διαταραχή (αν το άνοιγμα είναι μεγάλο σε σχέση με το μήκος κύματος) ή να δημιουργηθεί ένα ημισφαιρικό πεδίο ήχου μέσα στη ζώνη σιάς (αν το άνοιγμα είναι μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος). Σε κάθε περίπτωση σε σημαντική απόσταση από το χέρι το ακουστικό κύμα θα έχει την εικόνα που φαίνεται ακολούθως. Βέβαια το φαινόμενο της περίθλασης έχει επουσιώδη αποτελέσματα, αν και εφόσον, η απευθείας οπτική συνιστώσα μεταξύ πομπού και δέκτη παραμένει ανεμπόδιστη.



Εικόνα 27: Φαινόμενο περίθλασης στη διάδοση των ακουστικών σημάτων

2.2.5 Ακουστικοί πομποδέκτες - Μεγάφωνα και Μικρόφωνα

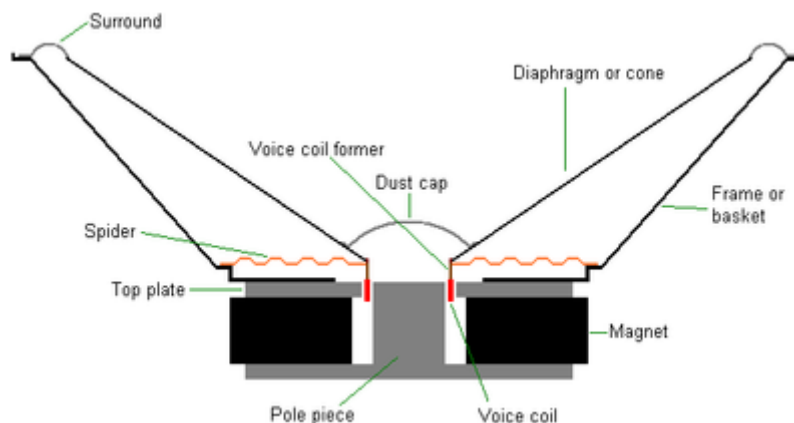
Τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα εντοπισμού με ακουστικά κύματα είναι τα μικρόφωνα και τα μεγάφωνα. Συνοπτικά αναφέρονται ως ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς (transducers). Οι ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς μετατρέπουν τη μία μορφή ενέργειας σε μία άλλη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα μικρόφωνα, που χρησιμοποιούνται ως δέκτες στα συστήματα εντοπισμού, μετατρέπουν τα ακουστικά κύματα σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα μεγάφωνα επιτελούν το ακριβώς ανάποδο, μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια σε ακουστικά κύματα που εκπέμπονται.

Στόχος της συγκεκριμένης παραγράφου δεν είναι να εντυφήσει στη λειτουργία των μικροφώνων και των μεγάλων. Απλά, θα αναφερθούν οι αρχές λειτουργίας, οι πιο χαρακτηριστικοί τύποι μικροφώνων και μεγάλων καθώς και οι βασικές παράμετροι που τα χαρακτηρίζουν και επομένως, παίζουν ρόλο στην επιλογή των πομποδεκτών στο σύστημα που θα εξεταστεί.

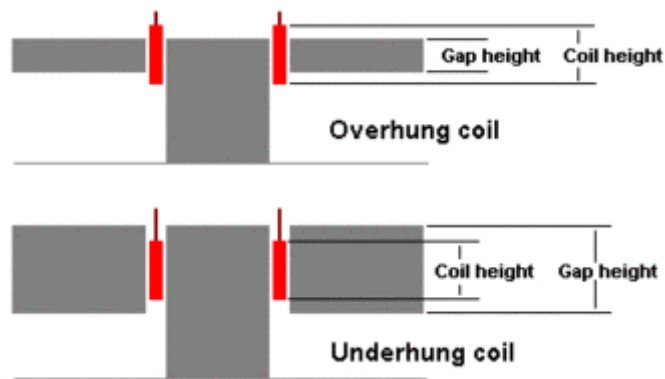
Μεγάφωνα

Ιστορικά θεωρείται πως ο Tesla κατασκεύασε το πρώτο μεγάφωνο, αν και η πρώτη πατέντα ανήκει στον Graham Bell το 1876. Οι αμέσως επόμενοι, που παρουσίασαν εξελιγμένες εκδόσεις του μικροφώνου, ήταν οι Siemens και Lodge το 1878 και 1898 αντίστοιχα. Τα πρώτα αυτά μεγάφωνα χρησιμοποιούσαν ηλεκτρομαγνήτες. Ήταν μόλις στη δεκαετία του '50 που εμφανίστηκαν εμπορικά τα πρώτα μεγάφωνα ακουστικής ανάρτησης (acoustic suspension loudspeakers) από τους Kloss και Villchur. Τέλος από τη δεκαετία του '70 έκαναν την εμφάνιση τους τα πιο εξελιγμένα μεγάφωνα που έκαναν χρήση βελτιωμένων μόνιμων μαγνητικών υλικών και βελτιωμένης διαχείρισης της θερμότητας.

Η κλασική μορφή ενός μεγάφωνου φαίνεται στην Εικόνα 28. Τα βασικά συστατικά του στοιχεία είναι ένας ημιάκαμπτος ινώδης κώνος (διάφραγμα – από χαρτί, πολυπροπυλένιο, kevlar συνήθως) και μία σπείρα (voice coil) αγώγιμου υλικού (συνήθως χαλκός) στην κορυφή του κώνου. Ένα μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από κάποιο μόνιμο μαγνητικό υλικό του οποίου ένας πόλος βρίσκεται εντός του κώνου και ο δεύτερος εκτός αυτού. Καθώς το μαγνητικό υλικό διεγείρεται από κάποιο ηλεκτρικό σήμα, το μόνιμο μαγνητικό υλικό αλληλεπιδρά με το χάλκινο σπείρωμα, με αποτέλεσμα, το διάφραγμα να δονείται με συχνότητα ίδια με αυτή του ερεθίσματος, δημιουργώντας έτσι, ακουστικό σήμα αντίστοιχης συχνότητας. Πρέπει να τονιστεί πως τα μεγάφωνα διαθέτουν κατάλληλα συστήματα αναστολής (suspension systems) για να επανέρχονται σε ουδέτερη κατάσταση μετά το ερέθισμα. Υπάρχουν δύο βασικές τοπολογίες μεγάλων ανάλογα με το μέγεθος του χαλκού σε σχέση με το κενό όπου μετακινείται το διάφραγμα. Αν το πρώτο είναι μεγαλύτερο, τότε έχουμε διάταξη overhung (που είναι και η πιο συνηθισμένη) ενώ αλλιώς διάταξη underhung (Εικόνα 29). Τα μεγάφωνα διάταξης overhung έχουν καλύτερη αποδοτικότητα και απόδοση ισχύος, ενώ τα αντίστοιχα διάταξης underhung παρουσιάζουν μεγαλύτερη γραμμικότητα.



Εικόνα 28: Εσωτερική δομή μεγάλων



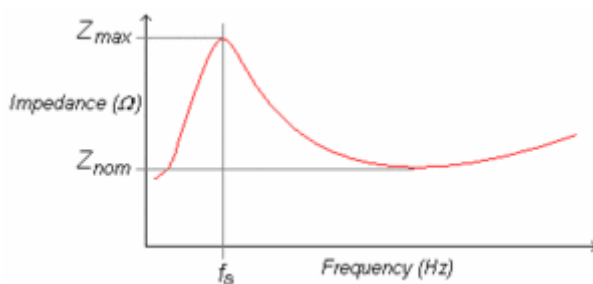
Εικόνα 29: Συνήθεις διατάξεις μεγάφωνων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μεγάφωνων, όπως woofers, subwoofers, mid-ranges, tweeters, full-ranges. Ο βασικός διαχωρισμός είναι ανάλογα με την μπάνα των εκπεμπόμενων συχνοτήτων. Οι εκπεμπόμενες συχνότητες ανά κατηγορία μεγάφωνων φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Τύπος μεγάφωνου	Συχνότητες (kHz)
Woofers	0,05-1/3
Subwoofers	0,001-0,12
Mid-ranges	0,2-4/5
Tweeters	1-20/35
Full-ranges	0,05-20

Πίνακας 6: Εκπεμπόμενες συχνότητες ανά κατηγορία μεγάφωνων

Το βασικό χαρακτηριστικό ενός μεγάφωνου είναι η καμπύλη της ηλεκτρικής του αντίστασης σε σχέση με τη συχνότητα. Η αντίσταση στην συχνοτική περιοχή λειτουργίας του μεγάφωνου (f_s) γίνεται μέγιστη (Z_{max}). Στην περιοχή αυτή των συχνοτήτων η ηλεκτρική αντίσταση είναι καθαρά ωμική. Σε χαμηλότερες συχνότητες το μεγάφωνο λειτουργεί επαγωγικά, ενώ σε υψηλότερες χωρητικά. Καθώς μειώνεται η ηλεκτρική αντίσταση σε κάποιο σημείο γίνεται ξανά ωμική (Z_{nom}) και στη συνέχεια αυξάνεται κατά μέτρο και λειτουργεί πάλι επαγωγικά. Μία τυπική καμπύλη χαρακτηριστικής αντίστασης μεγάφωνου ως προς τη συχνότητα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 30: Τυπική καμπύλη χαρακτηριστικής αντίστασης μεγάφωνου ως προς τη συχνότητα

Μικρόφωνα

Το μικρόφωνο είναι ένας ηλεκτρομηχανικός μετατροπέας (transducer), ο οποίος γενικά μετατρέπει τον ήχο σε ηλεκτρικό σήμα. Τα μικρόφωνα χρησιμοποιούνται σε χιλιάδες εφαρμογές όπως το τηλέφωνο, τα ακουστικά βαρηκοΐας, η τηλεόραση και το ραδιόφωνο, και, στην περίπτωση μας, σε εφαρμογές ανίχνευσης στόχου.

Το πρώτο μικρόφωνο εφευρέθηκε από τον Emile Berliner το 1877 αλλά η πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκε ουσιαστικά η εφεύρεση ήταν από το πρώτο τηλέφωνο του Alexander Graham Bell. Σημαντική συμβολή στις πρώιμες ανακαλύψεις στο χώρο των μικροφώνων έπαιξε η δουλειά που έγινε στα Bell Labs.

Σε όλα τα μικρόφωνα, τα ακουστικά κύματα, προκαλώντας ταλαντώσεις στον αέρα, γίνονται αντιληπτά ως μεταβολή της πίεσης και μετατρέπονται σε μηχανικές ταλαντώσεις με χρήση κατάλληλου λεπτού ελαστικού διαφράγματος. Με διάφορες μεθόδους η ταλάντωση αυτού του μέσου μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα ανάλογο σε πλάτος και συχνότητα με το αρχικό κύμα. Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται αυτή η μετατροπή είναι και αυτός που διαχωρίζει τα μικρόφωνα μεταξύ τους. Οι βασικές κατηγορίες μικροφώνων είναι οι ακόλουθες:

- Χωρητικά μικρόφωνα (condenser mics): Το διάφραγμα δρα σαν την πλάκα ενός πυκνωτή. Οι ταλαντώσεις προκαλούν διαφορές στην απόσταση μεταξύ των δύο πλακών και άρα στην τάση που διατηρείται ανάμεσά τους. Τα μικρόφωνα αυτά [WONG95] είναι ακριβά και απαιτούν τροφοδοσία αλλά δίνουν ηχητικό σήμα υψηλής ποιότητας και χρησιμοποιούνται σε εργαστήρια και σε ηχογραφήσεις μουσικής.
- Μικρόφωνα φύλλου ηλεκτρίτη (electret foil): Ο ηλεκτρίτης είναι ένα μόνιμα πολωμένο διηλεκτρικό υλικό, το οποίο ταλαντευόμενο δίνει διαφορετικές τιμές τάσης στα άκρα του. Είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μικρόφωνα σήμερα. Δεν απαιτούν τροφοδοσία και μπορούν να είναι ιδιαίτερα μικρά σε μέγεθος.
- Δυναμικά μικρόφωνα: Η ακριβώς ανάποδη λειτουργία από τα δυναμικά μεγάφωνα που περιγράφηκαν πιο πάνω. Ένα μικρό κινητό πηνίο τοποθετημένο μέσα στο πεδίο ενός μόνιμου μαγνήτη είναι ενωμένο με το διάφραγμα ώστε, όταν ταλαντώνεται αυτό, να κινείται μαζί του το πηνίο. Έτσι, λόγω επαγωγής, δημιουργείται μεταβαλλόμενο ρεύμα στο πηνίο. Τα μικρόφωνα αυτού του τύπου είναι σχετικά χαμηλού κόστους, αλλά έχουν μη καλή απόκριση σε χαμηλές συχνότητες.
- Μικρόφωνα ταινίας: Μια μεταλλική λεπτή ταινία στο εσωτερικό ενός μαγνητικού πεδίου μετακινείται ανάλογα με τα ακουστικά κύματα που φτάνουν στο μικρόφωνο ([OKUY03]). Έτσι, μεταβάλλουν το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το μαγνήτη. Τα μικρόφωνα ταινίας είναι σχετικά υψηλής ποιότητας αλλά δεν παρουσιάζουν πολύ καλή απόκριση χαμηλών συχνοτήτων.
- Μικρόφωνα άνθρακα: Πρόκειται για δύο λεπτές μεταλλικές πλάκες (από τις οποίες η μια παίζει τον ρόλο του διαφράγματος), οι οποίες περιέχουν ψήγματα άνθρακα. Ανάμεσα στις πλάκες εφαρμόζεται τάση, οπότε και άγεται ρεύμα μέσω του άνθρακα. Καθώς ταλαντώνεται το

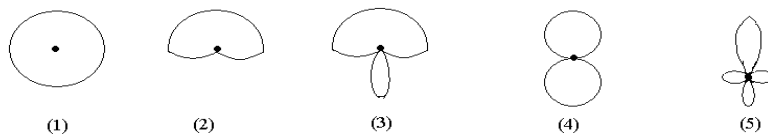
διάφραγμα, η μεταβαλλόμενη πίεση πάνω στον άνθρακα, αλλάζει την επιφάνεια επαφής μεταξύ των ψηγμάτων του, και άρα την ηλεκτρική αντίσταση όλης της μάζας. Έτσι, τελικά και η τάση στα άκρα του μικροφώνου μεταβάλλεται με την ηχητική πίεση. Τα μικρόφωνα άνθρακα, αν και είναι αρχικά αξιόπιστες συσκευές, έχουν φτωχή απόκριση σε χαμηλές συχνότητες και μικρό εύρος συχνοτικής λειτουργίας. Πρόκειται για μικρόφωνα που χρησιμοποιούνταν κυρίως στο παρελθόν, ιδιαίτερος σε παλιά τηλέφωνα.

- Πιεζοηλεκτρικά μικρόφωνα: Βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο εμφανίζεται σε συγκεκριμένα υλικά. Μια και είναι το είδος που θα χρησιμοποιήσουμε, θα το αναλύσουμε πιο διεξοδικά παρακάτω.
- Μικρόφωνα λέιζερ: Τα μικρόφωνα laser χρησιμοποιούν μία δέσμη laser η οποία ανακλάται πάνω σε μία επιφάνεια η οποία, με τη σειρά της, δονείται από την πρόσπτωση του ακουστικού κύματος. Μετρώντας με την ακτίνα λέιζερ τις μικροδιαφορές στην απόσταση προκύπτει ηλεκτρικό σήμα ανάλογο με την ένταση των ακουστικών κυμάτων.
- Μικρόφωνα κλίσης της πίεσης (gradient pressure microphones): Τα μικρόφωνα αυτά διαθέτουν ένα διάφραγμα στο οποίο προσπίπτουν ακουστικά κύματα και από τις δύο πλευρές. Τα μικρόφωνα αντιδρούν στη διαφορά πίεσης του αέρα μεταξύ των δύο πλευρών τους.

Υπάρχουν και άλλες κατηγοριοποιήσεις μικροφώνων που δεν στηρίζονται σε διαφορετικές αρχές λειτουργίας αλλά διαφοροποιούνται λόγω της εφαρμογής τους. Έτσι υπάρχουν ασύρματα μικρόφωνα, μικρόφωνα επαφής, μικρόφωνα λαιμού, παραβολικά μικρόφωνα, κτλ. Περισσότερες πληροφορίες για τους τύπους μικροφώνων μπορούν να βρεθούν στο [WHIT85].

Σημαντικό χαρακτηριστικό των μικροφώνων αποτελεί η σύνθετη αντίσταση αυτών. Τα μικρόφωνα καλής ποιότητας έχουν σύνθετη αντίσταση μικρότερη των 600Ω. Η σύνθετη αντίσταση των μικροφώνων μπορεί να φτάνει ως τα 10kΩ. Υψηλή σύνθετη αντίσταση προκαλεί απώλεια σημάτων υψηλών συχνοτήτων και μεγαλύτερη ευαισθησία σε ραδιοσυχνότητες.

Βασικό χαρακτηριστικό των μικροφώνων είναι και η κατευθυντικότητα τους (directionality), δηλαδή το χωρικό διάγραμμα που φανερώνει την ευαισθησία των μικροφώνων σε διαφορετικές γωνίες με βάση τον κεντρικό άξονα αυτών. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τα χαρακτηριστικότερα πολικά διαγράμματα κατευθυντικότητας μικροφώνων.



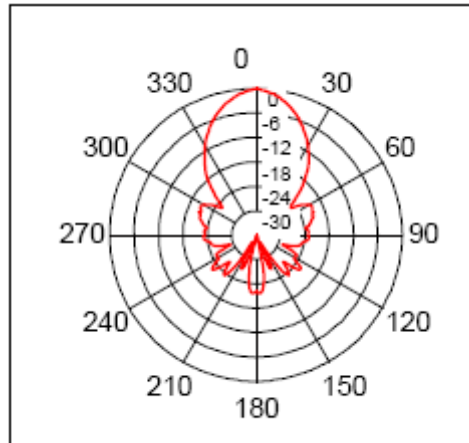
Εικόνα 31: Διαγράμματα κατευθυντικότητας μικροφώνων: ισοκατευθυντικό, καρδιοειδές, υπερκαρδιοειδές, δικατευθυντικό, ‘πιστόλι’

Στα παραπάνω διαγράμματα, η κουκίδα παριστάνει το μικρόφωνο και δείχνει την ευαισθησία που παρουσιάζει αυτό για κάθε κατεύθυνση (0-360°). Η ευαισθησία για όλα τα μικρόφωνα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή μπροστά, δηλαδή όταν το κύμα χτυπά κάθετα πάνω στο διάφραγμα. Προφανώς, όταν το κύμα προσκρούει υπό κάποια γωνία, μόνο η συνιστώσα στο επίπεδο που είναι κάθετο στην επιφάνεια του διαφράγματος προκαλεί ταλάντωση.

Το ισοκατευθυντικό (omnidirectional) παρουσιάζει ίση ευαισθησία για κάθε κατεύθυνση πρόσπτωσης του ήχου. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν εντελώς ομοιοκατευθυντικά μικρόφωνα μια και όλα παρουσιάζουν μια εξομάλυνση στο πολικό τους διάγραμμα για κύματα που προσπίπτουν στο πίσω μέρος αυτών. Επιπρόσθετα, το πολικό διάγραμμα εξαρτάται από τη συχνότητα των ακουστικών κυμάτων. Τα μικρόφωνα είναι πιο ομοιοκατευθυντικά έχοντας μικρότερη διάμετρο διαφράγματος και για μήκη κύματος σχετικά μεγάλα. Τα συνηθέστερα είδη μικροφώνων είναι τα καρδιοειδή (cardioid), τα οποία ονομάζονται έτσι λόγω του σχήματος του διαγράμματός τους. Έχουν μεγάλη ευαισθησία μπροστά και για ένα σημαντικό εύρος γωνιών. Η γωνία αυτή ορίζει το πεδίο όρασης του μικροφώνου (field of view) και από αυτήν εξαρτάται σε πολλές περιπτώσεις η επιλογή του μικροφώνου. Τα υπερκαρδιοειδή μικρόφωνα (hypercardioid) μοιάζουν με τα καρδιοειδή αλλά έχουν επιπρόσθετα ένα μικρό οπίσθιο λοβό. Καρδιοειδή και υπερκαρδιοειδή είναι τα μικρόφωνα που χρησιμοποιούνται συνήθως σε φωνητικές εφαρμογές. Τα δικατευθυντικά (bidirectional), έχουν ίσους, συμμετρικά τιθέμενους λοβούς (συνηθέστερα τα μικρόφωνα ταινίας είναι τέτοια). Τέλος, τα μικρόφωνα τύπου 'πιστολιού' (shotgun), είναι ευαίσθητα μόνο μετωπικά και με πολύ μικρό πεδίο όρασης, με μικρούς λοβούς πλάγια και πίσω. Αυτά χρησιμοποιούνται όταν θέλουμε ήχο μόνο από μια συγκεκριμένη πηγή απορρίπτοντας πηγές θορύβου που τυχόν υπάρχουν στο περιβάλλον.

Τα παραπάνω σχεδιαγράμματα είναι περισσότερο ποιοτικά, καθώς δεν μπορούμε να δούμε με ακρίβεια πόσο ευαίσθητο σε κάθε κύμα είναι το μικρόφωνο. Για μεγαλύτερη ακρίβεια τέτοια σχεδιαγράμματα εμφανίζονται και βαθμονομημένα (ιανονικοποιημένα ως προς την μέγιστη τιμή). Σε ένα τέτοιο διάγραμμα, βλέπουμε για κάθε γωνία το πόσο ευαίσθητο είναι το μικρόφωνο για κάθε γωνία (0dB για 0°, δηλαδή για ήχο που κατευθύνεται μετωπικά στο διάφραγμα).

Λόγω των διαφορών στην κατασκευή, κάθε μικρόφωνο παρουσιάζει διαφορετική απόκριση στη λήψη των ακουστικών κυμάτων, τόσο ως προς την απόκριση φάσης, όσο και ως προς την απόκριση συχνότητας. Επιπλέον, τα μικρόφωνα παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά στην πίεση του αέρα που ασκείται στο διάφραγμα. Έχει γίνει τυποποίηση ως προς τις παραμέτρους κατασκευής των μικροφώνων [IEC05] αλλά ακόμα δεν έχει εφαρμοστεί ευρέως.

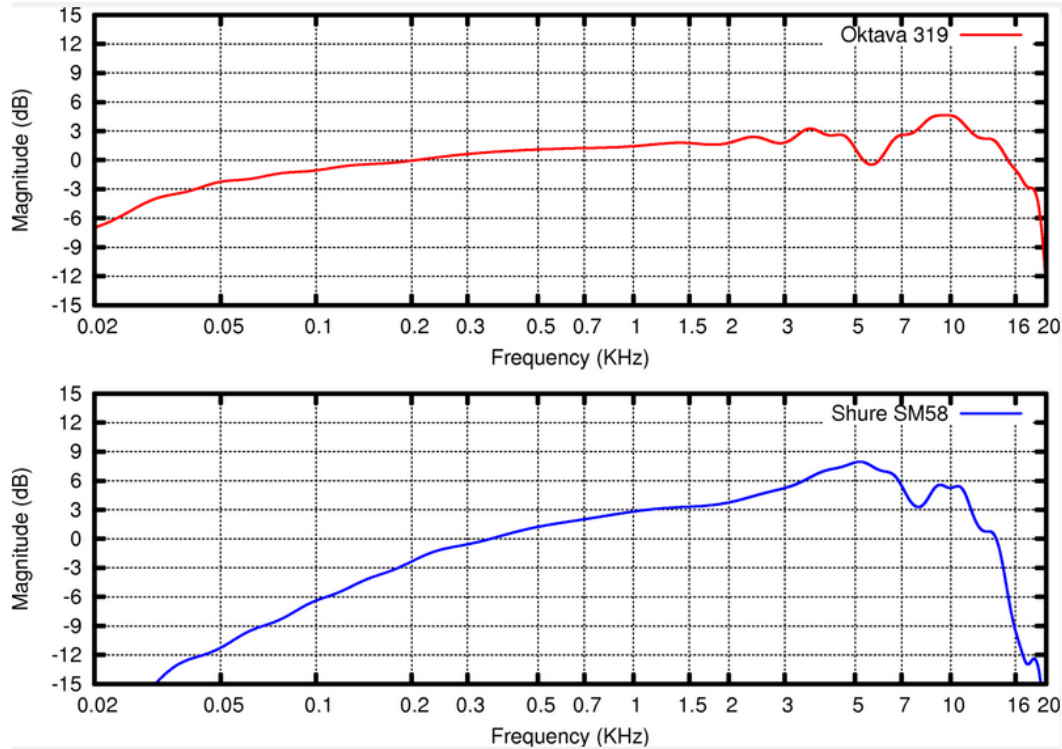


Εικόνα 32: Βαθμονομημένο διάγραμμα κατευθυντικότητας μικροφώνου

Παρακάτω εξετάζονται οι βασικότερες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τα μικρόφωνα και οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή τους.

Το **διάγραμμα απόκρισης συχνότητας** (frequency response diagram) παριστάνει την ευαισθησία του μικροφώνου σε dB ως προς τη συχνότητα του λαμβανόμενου ακουστικού κύματος. Αυτά τα διαγράμματα συνήθως αφορούν πεδίο συχνοτήτων 0-20kHz (δηλαδή του ακουστικού πεδίου μια και τα περισσότερα μικρόφωνα λειτουργούν σε αυτήν την περιοχή), και αφορούν ακουστικά κύματα που προσπίπτουν μετωπικά στο διάφραγμα του μικροφώνου (γωνία 0°). Συχνά αντί για το διάγραμμα, στα φύλλα προδιαγραφών (data-sheets) των μικροφώνων αναφέρεται απλά ότι η απόκριση συχνότητας στην περιοχή 20Hz-20kHz είναι ± 3 dB. Αυτό σημαίνει ότι, για αυτές τις συχνότητες, οι μεταβολές στην ευαισθησία δεν είναι μεγαλύτερες των 3dB. Από αυτήν την πληροφορία δεν μπορούμε όμως να ξέρουμε απόλυτα πόσο ομαλές είναι οι μεταπτώσεις της απόκρισης ή σε πιο σημείο του φάσματος είναι λιγότερο ή περισσότερο έντονες. Στο ακόλουθο σχήμα βλέπουμε το διάγραμμα απόκρισης ακτινοβολίας για δύο διαφορετικά εμπορικά μοντέλα μικροφώνων (Octava 319 και Shure SM58). Παρατηρούμε ότι το για το πρώτο ισχύει η προδιαγραφή ± 3 dB ενώ στο δεύτερο η ευαισθησία πέφτει κάτω από τα -6dB μετά τα 15kHz περίπου.

Το **ισοδύναμο επίπεδο θορύβου** (self-noise) είναι το επίπεδο ισχύος σήματος που προκαλεί ηλεκτρικό σήμα εξόδου ίσης τάσης με τον εσωτερικό θόρυβο του μικροφώνου. Αυτό αντιπροσωπεύει το χαμηλότερο σημείο (κατώφλι λειτουργίας) της δυναμικής ακτίνας λειτουργίας (βλ. παρακάτω) του μικροφώνου, και είναι ιδιαίτερα σημαντικό αν πρέπει να καταγραφούν ακουστικά σήματα χαμηλής έντασης. Συνήθως μετρείται σε dBA, που όπως θα δούμε παρακάτω είναι μια λογαριθμική κλίμακα κανονικοποιημένη ως προς την ανθρώπινη ακοή. Προφανώς, όσο χαμηλότερη η τιμή του ισοδύναμου επιπέδου θορύβου, τόσο χαμηλότερης έντασης ήχους θα μπορεί να «πιάσει» το μικρόφωνο.



Εικόνα 33: Διάγραμμα απόκρισης συχνότητας για δυο διαφορετικά εμπορικά μικρόφωνα

Το μέγιστο επίπεδο ηχητικής πίεσης (maximum sound pressure level – SPL) είναι η μέγιστη τιμή της πίεσης που μπορεί να εφαρμοσθεί στο μικρόφωνο δίχως να έχουμε παραμόρφωση στην έξοδο (total harmonic distortion – THD). Το SPL μετριέται λογαριθμικά με βάση μια τιμή αναφοράς πίεσης ($p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pascal) και ισούται με $L_p = 20 \log_{10}(p/p_{ref})$. Παραμόρφωση μπορούμε να έχουμε αν το πλάτος των ανώτερων αρμονικών γίνει τέτοιο που παραμορφώνει τον ήχο. Γενικά σαν αποδεκτές τιμές θεωρούμε αυτές για τις οποίες η συνολική αρμονική παραμόρφωση (total harmonic distortion – THD) παραμένει χαμηλότερη από 1%. Η THD ορίζεται σαν το άθροισμα των τετραγώνων (ή καλύτερα, των RMS τάσεων) των λοιπών αρμονικών προς την θεμελιώδη αρμονική. Στις προδιαγραφές δίνεται μια τιμή SPL για την οποία το THD είναι χαμηλότερο του 1%. Όσο χαμηλότερη η τιμή, τόσο ισχυρότεροι ήχοι μπορούν να περάσουν από το μικρόφωνο χωρίς παραμόρφωση.

Κατ' αντιστοιχία με το SPL ορίζεται το επίπεδο ηχητικής ισχύος - SWL (sound power level) για το οποίο ισχύει THD < 1%. Για το SWL ισχύει $SWL = L_w = 10 \log_{10}(w/w_{ref})$, όπου $w_{ref} = 10^{-12}$ watts.

Για τα SPL και SWL ισχύει η σχέση $SPL = SWL - 20 \log_{10}(R) - 8 - D_I$ (λοιπές απώλειες) όπου όλα τα μεγέθη εκφράζονται σε dB. Το D_I λέγεται δείκτης κατευθυντικότητας και εξαρτάται από την κατευθυντικότητα του πομπού. Αν π.χ. ο πομπός είναι ομοιοκατευθυντικός, ο δείκτης είναι μηδενικός για όλες τις κατευθύνσεις, ειδικά η τιμή του μεγαλώνει για τις περιοχές προς τις οποίες το πολικό διάγραμμα του πομπού παίρνει μικρότερες τιμές..

Το **επίπεδο clipping** αποτελεί το μέγιστο επίπεδο πίεσης που μπορεί να δεχτεί το διάφραγμα ώστε να ταλαντώνει μεταξύ των μέγιστων δυνατών του θέσεων. Το επίπεδο clipping είναι συνήθως αραιετά μεγαλύτερο από το SPL του μικροφώνου και αν ξεπεραστεί τότε το μικρόφωνο θα παράγει αραιετά έντονους, ενοχλητικούς ήχους.

Η **δυναμική ακτίνα** του μικροφώνου (dynamic range), που αναφέραμε παραπάνω, είναι η διαφορά μεταξύ του ισοδύναμου επιπέδου θορύβου και του μέγιστου SPL. Η τιμή της δίνεται σε dB.

Η **ευαισθησία**, τέλος, του μικροφώνου, αποτελεί ένα μέτρο της ακρίβειας με την οποία τα ακουστικά κύματα μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα. Ένα μικρόφωνο με μεγάλη ευαισθησία, δημιουργεί σήμα μεγαλύτερου πλάτους στην έξοδο και άρα θα χρειαστεί μικρότερη ή καθόλου ενίσχυση σε σχέση με ένα μικρόφωνο χαμηλότερης ευαισθησίας. Αντίθετα η μεγάλη ευαισθησία του μικροφώνου μπορεί να λειτουργεί ανασταλτικά σε σχέση με το επίπεδο clipping. Υπάρχουν δυο πρότυπα με τα οποία εκφράζεται η ευαισθησία. Με το ευρωπαϊκό πρότυπο, μετριέται με mV/pascal σε συχνότητα 1kHz, ενώ με το αμερικανικό εκφράζεται λογαριθμικά με στάθμη αναφοράς 1V/Pa.

Θα αναφερθούμε ξανά στα χαρακτηριστικά των ακουστικών πομποδεκτών σε ακόλουθη παράγραφο όπου θα εξεταστούν οι πομποδέκτες που επελέγησαν για το σύστημα που αναπτύχθηκε. Ολοκληρώνοντας τη θεωρητική αναφορά στα ακουστικά κύματα, τη διάδοση αυτών και τους πομποδέκτες που χρησιμοποιούνται θα κάνουμε μία ιδιαίτερη αναφορά στους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς ενέργειας, μια και τέτοιοι είναι αυτοί που θα χρησιμοποιηθούν στο προτεινόμενο σύστημα.

Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Σαν πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ονομάζουμε την ιδιότητα συγκεκριμένων κρυστάλλων να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν ασκείται πάνω τους μηχανική πίεση. Το φαινόμενο ισχύει και αντίστροφα, δηλαδή όταν ασκούμε τάση πάνω στον κρύσταλλο, παρατηρούμε μικρές παραμορφώσεις (της τάξης των νανόμετρων) στο σχήμα του κρυστάλλου. Πιεζοηλεκτρικοί λέγονται οι κρύσταλλοι που εμφανίζουν το φαινόμενο αυτό. Υπάρχουν συνολικά 21 κρύσταλλοι που χαρακτηρίζονται πιεζοηλεκτρικοί. Σε έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, τα θετικά και αρνητικά ηλεκτρικά φορτία είναι διαχωρισμένα, αλλά συμμετρικά τιθέμενα στο χώρο, με τρόπο ώστε ο κρύσταλλος να είναι ηλεκτρικά ουδέτερος. Όταν ασκείται εξωτερική μηχανική πίεση στον κρύσταλλο, η συμμετρία των φορτίων διαταράσσεται, με αποτέλεσμα την εμφάνιση τάσης στα άκρα του. Έχει υπολογιστεί ότι κατάλληλη δύναμη 2000N πάνω σε έναν κρύσταλλο χαλαζία (quartz), μπορεί να προκαλέσει τάση μέχρι και 12500V. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά εμφανίζουν και την αντίστροφη ιδιότητα (converse piezoelectricity). Δηλαδή, όταν ασκηθεί ηλεκτρική τάση στα άκρα του κρυστάλλου, το ηλεκτρικό πεδίο διαταράσσει την συμμετρία των φορτίων του, οπότε τα θετικά και αρνητικά φορτία τείνουν να απομακρυνθούν, επιφέροντας μηχανικές μικροαλλάγες στη δομή και στο σχήμα του κρυστάλλου. Η ιδιότητα αυτή ορισμένων κρυστάλλων ήταν γνωστή από τον 18^ο αιώνα και πρώτος την διατύπωσε ο David Brewster το 1824. Η πειραματική απόδειξη ήρθε το

1880 από τους αδερφούς Pierre και Jacques Curie, που πειραματίστηκαν με κρυστάλλους χαλαζία, τοπαζίου, τουρμαλίνης, ζάχαρης και άλατος του Rochelle (sodium potassium tartrate tetrahydrate). Περισσότερες πληροφορίες για το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και τη φυσική επεξήγησή του μπορεί να αναζητηθεί στη βιβλιογραφία (π.χ. [MASO64], [PART88])

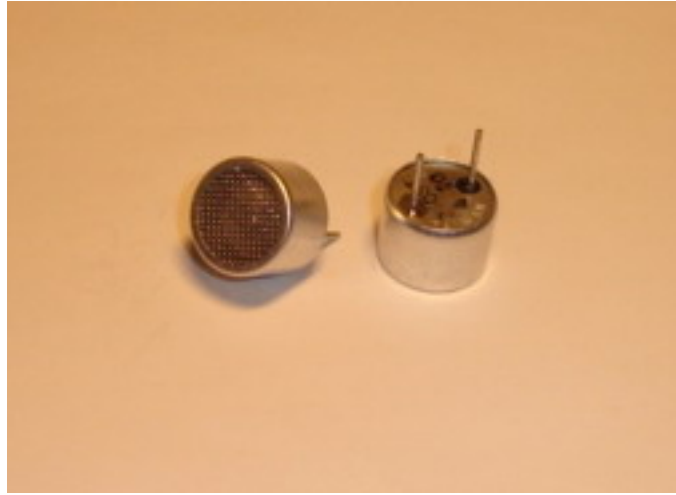
Οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες των κρυστάλλων έχουν βρει πληθώρα εφαρμογών στην βιομηχανία και χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε καταναλωτικά και μη αγαθά. Μεταξύ άλλων, κύριες εφαρμογές των πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων, είναι οι διάφοροι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες (μικρόφωνα, ηχεία), γεννήτριες συχνοτήτων υψηλής ακρίβειας (ψηφιακά ρολόγια), κτλ.

Πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς

Μία εφαρμογή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου είναι στη δημιουργία μετατροπέων (transducers) ακουστικών κυμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ένας πιεζοηλεκτρικός κρυστάλλος στον οποίο εφαρμόζεται μηχανική τάση, λόγω παρουσίας κάποιου ακουστικού κύματος, θα εμφανίσει ηλεκτρική τάση στα άκρα του. Αντιστρόφως, αν εφαρμοστεί κάποια τάση στα άκρα του κρυστάλλου, αυτό θα προκαλέσει μικρομεταβολές στον όγκο του, που μπορούν υπό προϋποθέσεις να δημιουργήσουν ακουστικά κύματα, πλάτους και συχνότητας ανάλογη με την εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση.

Οι κρυστάλλοι στους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς είναι συνήθως στερεωμένοι σε ένα μεταλλικό κώνο ή ένα μεταλλικό διάφραγμα λεπτού ελάσματος. Οι μεταβολές του μεγέθους του υλικού θα προκαλούν μικρές ταλαντώσεις στην επιφάνεια του μεταλλικού λεπτού φύλλου, οι οποίες κατ' επέκταση μεταφέρουν την ταλάντωση στον αέρα και δημιουργούν ακουστικά κύματα στον περιβάλλοντα χώρο. Κατ' αντιστοιχία στην ανάποδη λειτουργία, καθώς τα ακουστικά κύματα προσπίπτουν στο μεταλλικό διάφραγμα των μετατροπέων, αυτό κινείται ασκώντας πίεση στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου. Οι μεταβολές της πίεσης ασκούν μηχανικές τάσεις στην επιφάνεια του κρυστάλλου με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του, ανάλογης σε πλάτος και συχνότητα με τα ακουστικά κύματα.

Η συνηθέστερη κατασκευή των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων, περιλαμβάνει ένα κομμάτι από κεραμικό πιεζοηλεκτρικό υλικό το οποίο είναι πακτωμένο σε έναν μεταλλικό δίσκο. Αυτό το υλικό είναι συνήθως κάποια συνθετική ένωση π.χ. τιτανίου-βαρίου, τιτανίου-ζιρκονίου-μόλυβδου κτλ. Ανάλογα με την σύνθεση και, κυρίως, με το σχήμα του διαφράγματος επιτυγχάνεται η επιθυμητή λειτουργία για κάθε περίπτωση και η επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας. Έτσι λοιπόν, κάθε τέτοιος πομπός ή δέκτης έχει μια ονομαστική συχνότητα λειτουργίας στην οποία λειτουργεί με ακρίβεια είτε στο ακουστικό πεδίο, είτε στο πεδίο των υπερήχων.



Εικόνα 34: Κεραμικοί πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς (πομπός και δέκτης)

Οι υπερηχητικοί μετατροπείς αυτού του είδους χωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Οι μετατροπείς **ανοικτού** τύπου (open type) έχουν το πιεζοηλεκτρικό υλικό ενωμένο με έναν μεταλλικό κώνο πίσω από μια προστατευτική επιφάνεια. Αυτοί είναι οι πλέον συνηθισμένοι και παρέχουν υψηλή ευαισθησία, σχετικά μεγάλο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας, αντοχή σε υγρασία και θερμοκρασία και μικρό μέγεθος. Υπάρχουν και οι υπερηχητικοί μετατροπείς **κλειστού** τύπου (enclosed type). Σε αυτούς, το μεταλλικό διάφραγμα είναι στην εξωτερική επιφάνεια του μικροφώνου/ηχείου, ενώ κολλημένο πίσω του είναι το πιεζοηλεκτρικό υλικό. Το εσωτερικό είναι τελείως σφραγισμένο με ρητίνη, καθιστώντας δυνατή την χρήση σε συνθήκες με πολλή σκόνη, ακόμη και υποβρυχίως. Με ειδικό σχεδιασμό του κώνου ώστε να μπορεί να δονείται σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, κατασκευάζονται οι transducers **ευρέως πεδίου** (wide bandwidth type). Αυτοί μας δίνουν την ευχέρεια για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν τη χρήση παραπάνω από μιας συχνοτήτων. Ακόμη, υπάρχουν και οι μετατροπείς **μετάβασης παλμού** (pulse transit type) και **ενσωματωμένου ταλαντωτή** (built-in oscillator type) που χρησιμεύουν σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές.

Η τεχνολογία αυτή ήταν στην ακμή της περίπου στα τέλη της δεκαετίας του '80. Σήμερα οι μετατροπείς αυτού του είδους δεν χρησιμοποιούνται σε τόσο μεγάλο βαθμό όσο στο παρελθόν και γι' αυτό έχουν αρχίσει να γίνονται σχετικά δυσέρετοι. Παλαιότερα, χρησιμοποιούνταν ευρέως σε τηλεχειριστήρια και συναγερούς αυτοκινήτων, αλλά έδωσαν την θέση τους στην τεχνολογία των υπερύθρων ή των ραδιοκυμάτων. Ακόμη πάντως, χρησιμοποιούνται κυρίως σαν ηχεία σε φτηνά συστήματα παραγωγής ήχου (υπολογιστές και φορητά ραδιόφωνα), είτε σαν μικρά ηχεία για υψηλές συχνότητες σε στερεοφωνικά συγκροτήματα (tweeters), είτε ως αισθητήρες σε εφαρμογές ελέγχου στάθμης υγρών ή ακόμα σαν στοιχεία συστημάτων μετρήσεων.

Σημαντική παράμετρος για την επιλογή του κατάλληλου πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα αποτελεί το εύρος ζώνης όρασής του. Πρόκειται για το εύρος της γωνίας ως προς το κεντρικό άξονα του μετατροπέα ως προς τον οποίο η ευαισθησία του (αν μιλάμε για δέκτη) είναι στην μέγιστή της τιμή (με μια απόκλιση $\pm 3\text{db}$ περίπου) ή εκπεμπόμενη ισχύς (αν μιλάμε για πομπό) είναι στη

μέγιστή της τιμή. Πρόκειται ουσιαστικά για το διάγραμμα κατευθυντικότητας των μετατροπέων όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Για τον κύριο λοβό κατευθυντικότητας ενός πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα υπερηχητικών κυμάτων ισχύει η σχέση: $\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cong \frac{\lambda}{D} = \frac{c_s}{Df}$ ([BARA54]), όπου α η γωνία ημίσειας ισχύος (γωνία 3db), D η διάμετρος του εύκαμπτου διαφράγματος, c_s η ταχύτητα του ήχου (344 m/sec στον αέρα στους 20° C) και f η συχνότητα λειτουργίας του πομπού ή του δέκτη. Η σχέση αυτή ισχύει αν $\lambda < D$. Αν το $\lambda \geq D$, τότε το διάγραμμα ακτινοβολίας τείνει να γίνει σφαιρικό. Έτσι καταλαβαίνουμε ότι για να πετύχουμε υψηλή κατευθυντικότητα και στενό άνοιγμα (field-of-view), πρέπει να επιλέξουμε έναν μετατροπέα του οποίου το διάφραγμα θα είναι μεγάλο σε σχέση με το λ . Οι πιο πάνω υπολογισμοί ισχύουν στην περίπτωση που έχουμε έναν αισθητήρα κλειστού τύπου. Στους αισθητήρες ανοικτού τύπου, που δεν έχουμε ένα κυκλικό διάφραγμα αλλά κώνο, ο λοβός εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής του κώνου, δηλαδή από το άνοιγμα και την διάμετρο της βάσης του. Οι παραπάνω υπολογισμοί δεν είναι εύκολοι, οπότε και πρέπει κάποιος να βασίζεται στα φύλλα προδιαγραφών που παρέχει ο κατασκευαστής.

Κλείνοντας αναφέρονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων σε σχέση με τα συμβατικά ηχεία ή μικρόφωνα:

- Είναι φθηνοί και γι' αυτό προτιμώνται συχνά σαν ηχεία σε συστήματα όπου δεν απαιτείται μεγάλη ποιότητα στον ήχο, όπως τα ηχεία των υπολογιστών, τα φορητά ραδιόφωνα, ακόμα και σαν beepers για ηλεκτρονικά ρολόγια χειρός.
- Δεν περιέχουν πηνία οπότε δεν υπάρχει ηλεκτρική επαγωγή που πρέπει να υπερνικηθεί με την εισαγωγή ρεύματος μεγαλύτερης έντασης. Έτσι, είναι εύκολο να δεχτούν μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ, αφού, ούτως ή άλλως, οι εφαρμογές για τις οποίες χρησιμοποιούνται είναι σχετικά χαμηλής ισχύος.
- Είναι μικροί στο μέγεθος αλλά αρκετά ισχυροί σαν πομποί ή δέκτες.
- Είναι ανθεκτικοί σε υπερφορτώσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να καταστρέψουν μετατροπείς άλλου είδους, όπως τα πηνία ενός συμβατικού ηχείου.
- Εμφανίζουν χωρητική συμπεριφορά, οπότε δεν είναι αναγκαία η χρήση ενός εξωτερικού κυκλώματος cross-over. Για να λειτουργήσουν, π.χ. σαν tweeters, αρκεί να τοποθετηθούν παράλληλα με ένα συνηθισμένο ηχείο. Βέβαια, η χωρητική αυτή συμπεριφορά τους προκαλεί προβλήματα, που θα φανούν ακολούθως.

2.3 ΤΡΙΜΕΡΟΠΟΙΗΣΗ

Έχοντας μελετήσει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη διάδοση του ήχου στον αέρα, μπορούμε πλέον να περάσουμε στην περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος εντοπισμού με χρήση υπερηχητικών κυμάτων.

Υπάρχουν διάφορες τοπολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση θέσης (ή και κατεύθυνσης) ενός στόχου σε τρισδιάστατο χώρο. Όλες βασίζονται στην εύρεση των συντεταγμένων θέσης ενός στόχου από ταυτόχρονες μετρήσεις (συνήθως απόστασης). Οι μετρήσεις αυτές βασίζονται στη μέτρηση του χρόνου άφιξης ενός παλμού υπερηχητικών κυμάτων από διαφορετικούς δέκτες. Η επίλυση του γενικού προβλήματος είναι καθαρά γεωμετρική και στηρίζεται στην επίλυση N εξισώσεων απόστασης (όπου N ο αριθμός των ταυτόχρονων μετρήσεων άρα και των δεικτών) ως προς τρεις αγνώστους, τις συντεταγμένες (x,y,z) του στόχου. Προφανώς, ο ελάχιστος αριθμός σταθμών είναι τρεις (3) (trilateration method), άρα και η απλούστερη τοπολογία περιλαμβάνει ένα πομπό (στο στόχο) και τρεις δέκτες σε προκαθορισμένες θέσεις στο χώρο (τοπολογία 1-3).

Ιδανικά η μέτρηση (απόσταση r_i του στόχου από τον δέκτη i) από κάθε δέκτη καθορίζει τη θέση του στόχου στην επιφάνεια μιας σφαίρας με κέντρο το δέκτη ή σε τμήμα αυτής (αν υπάρχουν χωρικοί περιορισμοί του στόχου). Σε ιδανικές συνθήκες οι τρεις μετρήσεις θα παράγουν γεωμετρικούς τόπους πιθανών θέσεων του στόχου που θα συμπίπτουν σημειακά στην πραγματική θέση αυτού. Στην πραγματικότητα, μια και οι μετρήσεις εμπεριέχουν κάποιο θόρυβο και γίνονται με πεπερασμένη ακρίβεια, η τομή των γεωμετρικών τόπων δεν είναι σημειακή αλλά, ένας γεωμετρικός τόπος. Η επιλογή της εκτίμησης της τελικής θέσης του στόχου μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους (μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων, μέγιστης πιθανοφάνειας, κτλ.) που θα αναλυθούν πιο κάτω.

Προκειμένου η τελική εκτίμηση να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι του ενός δέκτες, με αποτέλεσμα η εύρεση της τελικής θέσης να γίνεται μέσα από τη λύση ενός πλεονασματικού (redundant) συστήματος N εξισώσεων με τρεις αγνώστους ($N > 3$). Αν μάλιστα οι δέκτες αυτοί τοποθετηθούν σε σημαντικές αποστάσεις μεταξύ τους (και με δεδομένο ότι η κοινή περιοχή όρασής τους είναι αρκετά σημαντική) μπορεί να αντιμετωπιστεί η απώλεια απευθείας οπτικής επαφής μεταξύ ενός ζεύγους πομπού και δέκτη. Κάθε στιγμή απαιτείται η δυνατότητα λήψης τριών, τουλάχιστον, μετρήσεων. Μία εναλλακτική λύση είναι η χρησιμοποίηση επιπλέον πομπών (3 πομποί και 3 δέκτες η ελάχιστη απαίτηση). Οι τρεις πομποί συνήθως είναι συνεπίπεδοι και η σημειακή θέση του στόχου είναι σε σταθερό σημείο ως προς αυτούς. Μια τέτοια τοπολογία επιτρέπει την εύρεση εκτός της θέσης και της κατεύθυνσης του στόχου, υπολογίζοντας τη θέση των τριών πομπών, λαμβάνοντας υπόψη πως αυτοί είναι συνεπίπεδοι και βρίσκοντας το διάνυσμα που είναι κάθετο στο κοινό τους επίπεδο με εκκίνηση ένα γνωστό σημείο στο σύστημα αυτών.

Πρέπει να τονιστεί, πως η μετρούμενη μεταβλητή είναι ο χρόνος άφιξης του κύματος στον εκάστοτε δέκτη. Για να υπολογιστεί η απόσταση του στόχου από τον πομπό υποτίθεται πως τόσο ο χρόνος εκπομπής του παλμού από τον πομπό όσο και η ταχύτητα του ήχου είναι γνωστά σε κάθε δέκτη. Αυτό καθιστά το σύστημα ευάλωτο στην επίδραση ορισμένων εξωγενών παραμέτρων, όπως ο ακριβής χρόνος εκπομπής του σήματος από τον πομπό, η υγρασία και η θερμοκρασία του

περιβάλλοντος (που επηρεάζουν την ταχύτητα διάδοσης του ήχου), η ακρίβεια της γνώσης των συντεταγμένων θέσης των δεικτών κτλ. Διάφορες τεχνικές θα αναφερθούν πιο κάτω, για να ληφθούν υπόψη οι πιο πάνω παράγοντες. Κάθε σύστημα χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των πομπών και των αριθμών των δεικτών του συστήματος. Έτσι κάθε τοπολογία χαρακτηρίζεται ως X-Y, όπου X ο αριθμός των πομπών και Y ο αριθμός των δεικτών.

Αρχικά, θα αναλυθεί το απλούστερο των συστημάτων, 1-3, και θα μελετηθεί η επίδραση του θορύβου των μετρήσεων σε αυτό. Τεχνικές για την εκτίμηση της θέσης θα αναλυθούν. Επεκτάσεις του συστήματος σε άλλες τοπολογίες θα αναφερθούν ακολούθως. Τέλος, θα αναλυθούν τεχνικές που θα λαμβάνουν υπόψη την επίδραση εξωγενών παραγόντων στο σύστημα ή βελτιωτικές πιθανές επεκτάσεις.

2.3.1 Τοπολογίες «μέσα-έξω» και «έξω-μέσα»

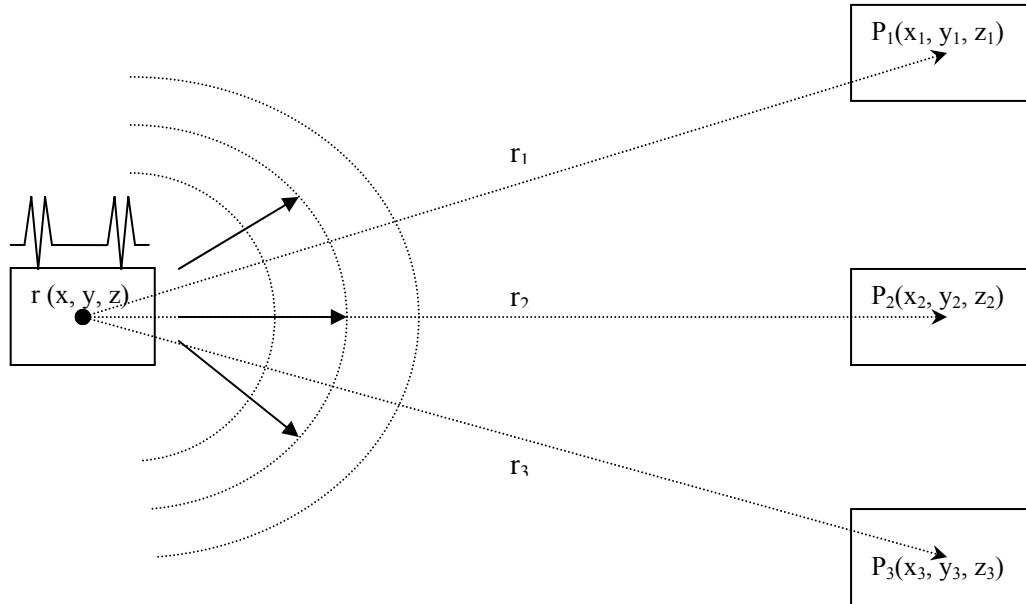
Πρέπει να τονιστεί, πως τα συστήματα μπορεί να είναι είτε «μέσα-έξω», αν οι δέκτες του συστήματος είναι προσαρμοσμένοι στον στόχο και κοιτούν προς τον περιβάλλοντα χώρο είτε «έξω-μέσα», αν συμβαίνει το ανάποδο. Η ανάλυση της αρχής λειτουργίας και των δύο τοπολογιών είναι, προσεγγιστικά, η ίδια. Η διαφοροποίηση έγκειται στην χρονική διαφορά μεταξύ της εκπομπής του συστήματος και της χρονικής στιγμής εκτίμησης θέσης του στόχου. Στην περίπτωση της διάταξης «έξω-μέσα» ο πομπός του συστήματος είναι προσαρμοσμένος στο στόχο. Επομένως, στο χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στο χρόνο διαδρομής, ο στόχος έχει μετακινηθεί, ενώ η εκτίμηση της θέσης του αφορά στη χρονική στιγμή εκπομπής. Σε μία απόσταση δύο μέτρων, υποθέτοντας οριζόντια μετατόπιση του στόχου (στον άξονα πομπός-δέκτης), θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και ρυθμό ανανέωσης δεδομένων 50Hz το σφάλμα στον υπολογισμό της απόστασης είναι περίπου 5,8mm. Για το σιοπό αυτό, στην παρούσα διατριβή, το σύστημα που υλοποιείται είναι διάταξης «μέσα-έξω» (στην παράγραφο 3.1.1 φαίνεται πως ο σημαντικότερος παράγοντας επίδοσης του συστήματος για συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας τεχνολογίας FSD, όπως αυτό στο οποίο απευθύνεται το σύστημα εντοπισμού, είναι η καθυστέρηση). Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ανάγκη ενσωμάτωσης του στόχου (ανθρώπου). Προτείνεται μελλοντικά για τις διατάξεις «έξω-μέσα» η εφαρμογή μιας υπέρυθρης οπτικής ζεύξης με χρήση φωτοδιόδων που θα αναλάβει το συγχρονισμό μεταξύ του πομπού και των δεικτών. Το σφάλμα που εισάγεται σε αυτήν την περίπτωση αντιστοιχεί στο χρόνο διαδρομής του υπέρυθρου σήματος από τον, προσαρμοσμένο στο στόχο, πομπό στο σταθερό δέκτη. Έτσι, δεν είναι απαραίτητη η καλωδίωση του στόχου ενώ, με χρήση κατάλληλων μοντέλων κίνησης και μη γραμμικών φίλτρων Kalman μπορούμε να ανάγουμε τη μέτρηση στη σωστή θέση του στόχου.

2.3.2 Τοπολογία 1-3

Η τοπολογία 1-3 φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου $P(x, y, z)$ είναι το διάνυσμα θέσης του στόχου, $P_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, 3$, το διάνυσμα θέσης των τριών δεικτών ως προς το ίδιο

σύστημα συντεταγμένων και $P_i(x, y, z)$, $i = 1,2,3$, το διάνυσμα απόστασης του στόχου από τους τρεις (3) δέκτες σε κάθε διαδοχικό κύκλο ταυτόχρονων μετρήσεων. Προφανώς ισχύουν οι σχέσεις:

$$|P_i| = \left((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, i = 1,2,3$$

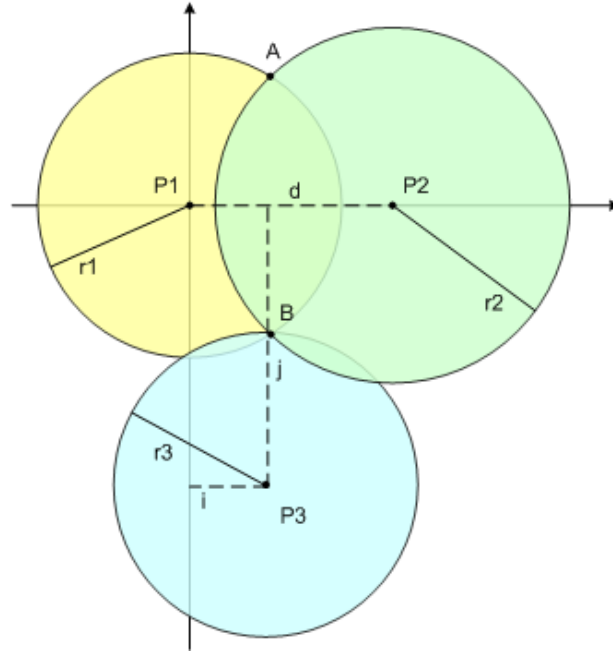


Εικόνα 35: Τοπολογία 1-3

Επιλύοντας το πιο πάνω σύστημα των τριών μη γραμμικών εξισώσεων ως προς x_i , y_i , z_i , βρίσκουμε τις συντεταγμένες της θέσης του στόχου. Η πρώτη εμφάνιση της χρήσης της τριμεροποίησης έγινε για τον υπολογισμό της θέσης και τροχιάς δορυφόρων [ESCO65]¹ και οδήγησε στην αρχή λειτουργίας του GPS (Global Positioning System). Σε αυτό η θέση ενός επίγειου στόχου υπολογίζεται από την απόσταση του από τρεις δορυφόρους με αλγεβρική επίλυση του προβλήματος ([BANC85], [STRA97], [JORG84]).

Για να απλοποιήσουμε την επίλυση ας εξετάσουμε την περίπτωση που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Οι τρεις δέκτες βρίσκονται στα σημεία P_1, P_2, P_3 . Ο χρόνος διαδρομής από τον πομπό στους δέκτες είναι αντίστοιχα t_1, t_2, t_3 . Θεωρώντας γνωστή την ταχύτητα του ήχου c_s , η απόσταση των τριών δεκτών από τον πομπό είναι $r_i = c_s t_i$, $i=1,2,3$. Για κάθε δέκτη i η μέτρηση τοποθετεί τον πομπό σε μία σφαίρα ακτίνας r_i , με κέντρο το P_i . Για την απλοποίηση της επίλυσης κάνουμε μερικές θεωρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε πως τα σημεία P_i βρίσκονται στο επίπεδο $z=0$, πως τα P_1, P_2 , βρίσκονται στον άξονα x , ενώ η αρχή των αξόνων συμπίπτει με το σημείο P_1 .

¹ Επειδή η ανάλυση του Escobal είναι η πρώτη που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία αναλύεται στο παράρτημα 2



Εικόνα 36: Τριμεροποίηση με τρεις δέκτες

Σε αυτήν την περίπτωση οι πιο πάνω σχέσεις γίνονται:

$$\begin{cases} r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \\ r_2^2 = (x-d)^2 + y^2 + z^2 \\ r_3^2 = (x-i)^2 + (y-j)^2 + z^2 \end{cases}$$

Αφαιρώντας κατά μέλη τις δύο πρώτες και λύνοντας ως προς x , παίρνουμε:
 $x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d}$. Αντικαθιστώντας τώρα το x στην πρώτη εξίσωση προκύπτει:

$$y^2 + z^2 = r_1^2 - \frac{(r_1^2 - r_2^2 + d^2)^2}{4d^2}$$

Αντικαθιστώντας την ποσότητα $y^2 + z^2$ στην τρίτη από τις

αρχικές εξισώσεις παίρνουμε για το y : $y = \frac{r_1^2 + r_3^2 + (x-i)^2}{2j} + \frac{j}{2} - \frac{(r_1^2 - r_2^2 + d^2)^2}{8d^2 j}$. Έχοντας

τις τιμές των x , y , βρίσκουμε το z από τη σχέση $z = \pm \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2}$. Είναι προφανές πως έχουμε δύο πιθανές τριάδες συντεταγμένων για το στόχο, τις:

$$(x, y, \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2}), (x, y, -\sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2})$$

Η λύση είναι μονοσήμαντη αν και μόνο αν ο στόχος ανήκει στο επίπεδο $z=0$, δηλαδή στο επίπεδο των τριών κέντρων των σφαιρών (δηλαδή των δεκτών). Σε κάθε άλλη περίπτωση έχουμε δύο λύσεις, συμμετρικές ως προς το επίπεδο xy . Η σωστή λύση, συνήθως, μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας τις φυσικές δεσμεύσεις (constraints) του χώρου. Αν π.χ. οι τρεις δέκτες βρίσκονται στο ταβάνι και ο άξονας z έχει τα θετικά του προς τα πάνω είναι προφανές πως ο στόχος θα έχει αρνητικό z .

Έχοντας λύσει το απλό αυτό πρόβλημα, μπορούμε με τις κατάλληλες μετατροπές συστημάτων συντεταγμένων να γενικεύσουμε τη ευρεθείσα λύση σε οποιοδήποτε άλλο σύστημα συντεταγμένων θέλουμε [FANG86].

Επειδή όπως έχει αναφερθεί οι μετρήσεις εμπεριέχουν θόρυβο, η απλή επίλυση του συστήματος δεν δίνει λύση. Γεωμετρικά αυτό ερμηνεύεται ως μη εύρεση τομής των τριών σφαιρών. Σε αυτήν την περίπτωση η ποσότητα $r_1^2 - x^2 - y^2$ θα είναι αρνητική με αποτέλεσμα το σύστημα να μην έχει πραγματική λύση. Γι' αυτό χρησιμοποιούνται επαναληπτικές μέθοδοι ή αλγεβρικοί αλγόριθμοι για την επίλυση του συστήματος. Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν κάποιες από τις προτεινόμενες λύσεις.

2.3.3 Μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων για τοπολογία 1-3

Η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων έχει αναλυθεί αρκετά στη βιβλιογραφία ([KOKO91], [FLET87]) και έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία σε εφαρμογές εντοπισμού θέσης στόχων ([BARS01], [BLAC99], [MANO96]). Η εφαρμογή της μεθόδου είναι κάπως πιο περίπλοκη σε προβλήματα μη γραμμικά, όπως αυτό που εξετάζουμε.

Ας θεωρήσουμε, στην τοπολογία 1-3 το διάνυσμα μετρήσεων $z = [z(1) \ z(2) \ z(3)]^T = [R_1 \ R_2 \ R_3]^T = [c_s t_1 \ c_s t_2 \ c_s t_3]^T$, όπου c_s η ταχύτητα διάδοσης του ήχου, R_i η απόσταση του δέκτη i από τον πομπό και t_i η μέτρηση χρόνου διαδρομής από τον δέκτη i στον πομπό. Επίσης θεωρούμε τα διανύσματα θέσης του στόχου και των τριών δεκτών:

$r = [x \ y \ z]^T$, $r_p(i) = [x_p(i) \ y_p(i) \ z_p(i)]^T$, $i = 1,2,3$. Προφανώς ισχύει:

$z(i) = \sqrt{(x - x(i))^2 + (y - y(i))^2 + (z - z(i))^2} = h(r, r_p(i)) + u(i)$, $i=1,2,3$, όπου $u(i)$ είναι ο θόρυβος της μέτρησης $z(i)$ που θεωρείται λευκός Gaussian θόρυβος, μηδενικής μέσης τιμής με διακύμανση σ^2 . Επομένως έχουμε:

$$z = \begin{bmatrix} z(1) \\ z(2) \\ z(3) \end{bmatrix} = \mathbf{h}(r, x_p) + w = \begin{bmatrix} h(r, r_p(1)) \\ h(r, r_p(2)) \\ h(r, r_p(3)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u(1) \\ u(2) \\ u(3) \end{bmatrix} \quad \text{Σχέση II-1}$$

Η μέθοδος προϋποθέτει την ύπαρξη μιας αρχικής εκτίμησης, η οποία θα βελτιωθεί μέσα από μια επαναληπτική σειρά διορθώσεων. Μία τέτοια αρχική εκτίμηση μπορεί εύκολα να δοθεί από την εύρεση ενός κοινού σημείου των δύο από τις τρεις σφαίρες που σχηματίζονται με κέντρο τους τρεις δέκτες και ακτίνες τις R_i .

$$\text{Αναπτύσσοντας τη Σχέση II-1 } z = \begin{bmatrix} z(1) \\ z(2) \\ z(3) \end{bmatrix} = \mathbf{h}(r, x_p) + w = \begin{bmatrix} h(r, r_p(1)) \\ h(r, r_p(2)) \\ h(r, r_p(3)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u(1) \\ u(2) \\ u(3) \end{bmatrix}$$

Σχέση II-1 κατά Taylor και κρατώντας τους όρους πρώτης τάξης μόνο παίρνουμε:

$$z = \mathbf{h}(r, r_p) + w \approx \mathbf{h}(\hat{r}_j, r_p) + J_j(r - \hat{r}_j) + w \Leftrightarrow z - \mathbf{h}(r, r_p) = J_j(r - \hat{r}_j) + w \quad \text{Σχέση II-2}$$

όπου \hat{r}_j η j-στη εκτίμηση των συντεταγμένων θέσης και J_j ο Ιακωβιανός πίνακας που δίνεται από τη σχέση:

$$J_j = \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p)}{\partial r} \Big|_{r=\hat{r}_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(1))}{\partial x} & \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(1))}{\partial y} & \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(1))}{\partial z} \\ \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(2))}{\partial x} & \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(2))}{\partial y} & \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(2))}{\partial z} \\ \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(3))}{\partial x} & \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(3))}{\partial y} & \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(3))}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \text{Σχέση II-3}$$

Προφανώς ισχύει

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(i))}{\partial x} &= \frac{x - x(i)}{\sqrt{(x - x(i))^2 + (y - y(i))^2 + (z - z(i))^2}} \\ \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(i))}{\partial y} &= \frac{y - y(i)}{\sqrt{(x - x(i))^2 + (y - y(i))^2 + (z - z(i))^2}} \\ \frac{\partial \mathbf{h}(r, r_p(i))}{\partial z} &= \frac{z - z(i)}{\sqrt{(x - x(i))^2 + (y - y(i))^2 + (z - z(i))^2}} \end{aligned} \quad \text{Σχέση II-4}$$

Η

Σχέση

II-

$$2 z = \mathbf{h}(r, r_p) + w \approx \mathbf{h}(\hat{r}_j, r_p) + J_j(r - \hat{r}_j) + w \Leftrightarrow z - \mathbf{h}(r, r_p) = J_j(r - \hat{r}_j) + w \quad \text{Σχέση II-2}$$

αποτελεί ένα γραμμικό πρόβλημα ελάχιστων τετραγώνων ως προς $(r - \hat{r}_j)$ με παρατηρήσεις $z - \mathbf{h}(\hat{r}_j, r_p)$, η οποία έχει ως λύση¹:

$$\hat{r}_{j+1} - \hat{r}_j = (J_j' R^{-1} J_j)^{-1} J_j' R^{-1} [z - \mathbf{h}(\hat{r}_j, r_p)] \Leftrightarrow \hat{r}_{j+1} = \hat{r}_j + (J_j' R^{-1} J_j)^{-1} J_j' R^{-1} [z - \mathbf{h}(\hat{r}_j, r_p)] \quad \text{Σχέση II-5}$$

με R τον πίνακα συνδιακύμανσης μετρήσεων.

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της τελικής εκτίμησης προκύπτει:

$$\hat{r}_{j+1} - r = (J' R^{-1} J)^{-1} J' R^{-1} [z - \mathbf{h}(r, r_p)] = (J' R^{-1} J)^{-1} J' R^{-1} w \Leftrightarrow$$

$$E[(\hat{r}_{j+1} - r)(\hat{r}_{j+1} - r)'] = (J' R^{-1} J)^{-1} \quad \text{Σχέση II-6}$$

που αποτελεί και τον πίνακα συνδιακύμανσης των σφαλμάτων στον υπολογισμό των συντεταγμένων θέσης. Στην περίπτωση που τα σφάλματα των μετρήσεων $z(i)$ είναι ασυσχέτιστα με ίδια τυπική απόκλιση σ^2 (δηλαδή αν $R = \sigma^2 I = \text{diag}(\sigma^2, \sigma^2, \sigma^2)$ όπου I ο μοναδιαίος πίνακας) τότε η Σχέση II-5

¹ Βλ. Παράρτημα 3 για το γραμμικό πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων

$$\hat{r}_{j+1} - \hat{r}_j = (J'_j R^{-1} J_j)^{-1} J'_j R^{-1} [z - \mathbf{h}(\hat{r}_j, r_p)] \Leftrightarrow \hat{r}_{j+1} = \hat{r}_j + (J'_j R^{-1} J_j)^{-1} J'_j R^{-1} [z - \mathbf{h}(\hat{r}_j, r_p)]$$

Σχέση II-5 και η Σχέση II-6 $E[(\hat{r}_{j+1} - r)(\hat{r}_{j+1} - r)] = (J' R^{-1} J)^{-1}$ Σχέση II-6 γίνονται αντίστοιχα:

$$\hat{r}_{j+1} = \hat{r}_j + (J'_j J_j)^{-1} J'_j [z - \mathbf{h}(\hat{r}_j, r_p)] \text{ και}$$

$$E[(\hat{r}_{j+1} - r)(\hat{r}_{j+1} - r)] = (J' J)^{-1} \sigma^2.$$

Η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων έχει εφαρμοσθεί διεξοδικά σε εφαρμογές όπως η προκειμένη. Ιδιαίτερος, συναντάται αρκετά συχνά σε συστήματα που αφορούν στον εντοπισμό θέσης του στόχου με μετρήσεις γωνίας άφιξης ενός σήματος από διάφορους δέκτες (triangulation). Στο [STRE02] αναλύεται διεξοδικά η εφαρμογή της μεθόδου στο πιο πάνω πρόβλημα, επιχειρώντας τη γραμμικοποίηση αυτού σε πρώτο στάδιο. Στο [HU01] δίνεται ένας αλγόριθμος για την αποδοτική εύρεση του μη γραμμικού εκτιμητή ελάχιστων τετραγώνων τόσο για το πρόβλημα της τριμεροποίησης, όσο και για αυτό της τριγωνοποίησης. Βέβαια, στο συγκεκριμένο άρθρο, χρησιμοποιείται μία εκτεταμένη μορφή του προβλήματος της τριμεροποίησης που προϋποθέτει μετρήσεις και γωνιών εκτός από απλά αποστάσεων. Επιπλέον, ο χρόνος υπολογισμού του βέλτιστου εκτιμητή αναφέρεται σε κάποια (λίγα) δευτερόλεπτα, καθιστώντας την εφαρμογή του αλγόριθμου δύσκολη για συστήματα πραγματικού χρόνου. Τέλος, στο [LECA99], δίνεται μια συγκριτική αναφορά σε διαφορετικούς αλγορίθμους που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και εξετάζεται η επιτυχία και η ταχύτητα της σύγκλισής τους. Και σε αυτό το άρθρο όμως η ανάλυση αφορά το πρόβλημα της τριγωνοποίησης. Γενικά, πολύ λίγες εφαρμογές αλγορίθμων εύρεσης εκτιμητή ελάχιστων τετραγώνων στο μη γραμμικό πρόβλημα της τριμεροποίησης συναντώνται στη βιβλιογραφία.

Μεταξύ των πλεονεκτημάτων της μεθόδου θα μπορούσαν να αναφερθούν η χρήση πολλαπλών μετρήσεων από διάφορους σταθμούς με κατάλληλα βάρη ανάλογα με την a priori ακρίβεια της εκάστοτε μέτρησης, η σύγκλιση της μεθόδου χωρίς ιδιαίτερη εξάρτηση από τη θέση της αρχικής πρόβλεψης, η ευκολία ελέγχου της σύγκλισης και η ευκολία στην εύρεση των στατιστικών χαρακτηριστικών της τελικής λύσης. Από την άλλη, μειονεκτήματα αποτελούν η ανάγκη για μία αρχική υποθετική λύση και το γεγονός πως, αν και, η σύγκλιση είναι αρκετά πιθανή, δεν είναι εξασφαλισμένη.

2.3.4 Αλγεβρική επίλυση για τοπολογία 1-3

Η λύση της τριμεροποίησης πολλές φορές εφαρμόζεται για τον υπολογισμό του ύψους των αεροσκαφών για στρατιωτικούς σκοπούς, κάνοντας χρήση τριών γειτονικών σταθμών βάσης και μετρώντας με κατάλληλα ραντάρ την απόσταση του στόχου από τους σταθμούς βάσης. Αν και το πρόβλημα αποτελεί πρόβλημα τριμεροποίησης, η έμφαση δίνεται στον προσδιορισμό του ύψους και

οι αλγόριθμοι προσαρμόζονται κατάλληλα. Διάφοροι αλγόριθμοι έχουν προταθεί για τον υπολογισμό του εκτιμητή ελάχιστων τετραγώνων ([FANG86], [REKK90]) σε τέτοια προβλήματα. Από την εφαρμογή αυτών των αλγορίθμων προέκυψαν προβλήματα για τον υπολογισμό του ύψους των αεροσκαφών σε πραγματικό χρόνο. Ο λόγος μπορεί να είναι π.χ. η χρήση συγκεκριμένου συστήματος συντεταγμένων ([FANG86]), που καθιστά αναγκαίες τις χρονοβόρες μετατροπές όχι μόνο για το διάλυμα του τελικού εκτιμητή αλλά και για το πίνακα συνδιακύμανσης αυτού και τη μέση τιμή του σφάλματος, η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων (σε συνδυασμό με τη μεγάλη ταχύτητα των αεροπλάνων) και της κατά συνέπεια αργής σχετικά εκτέλεσής τους ([REKK90]). Έτσι, έχουν προταθεί εναλλακτικά υπολογιστικά επαρκείς, αλγεβρικοί αλγόριθμοι. Έναν τέτοιο ([MANO96]) επιλέγουμε εδώ και προσαρμόζουμε για το συγκεκριμένο πρόβλημα εντοπισμού στόχου σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας. Η βασική διαφορά είναι ο πιο εύκολα εποπτευόμενος χώρος, η μικρότερη περιοχή εμβέλειας και η πολύ μικρότερη πιθανή ταχύτητα του στόχου. Επίσης, σημαντική διαφορά αποτελεί η ποικιλία στην μοντελοποίηση των κινήσεων του στόχου σε τέτοια περιβάλλοντα μια και είναι αρκετά πιο δύσκολη η πρόβλεψη κίνησης ανθρώπινου στόχου, (περισσότερο αναφερόμαστε σε χέρι παρά σε κεφάλι) σε σχέση με ένα αεροπλάνο.

Η αλγεβρική επίλυση σε σχέση με την προηγούμενη λύση δεν χρειάζεται αρχική πρόβλεψη, αλλά μετατρέπει την αρχική ομάδα εξισώσεων σε ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων με άγνωστους τις συντεταγμένες του στόχου. Ξεινώνοντας από τις αρχικές σχέσεις, έχουμε:

$$r_i^2 = S_i^2 - 2x_i x - 2y_i y - 2z_i z + x^2 + y^2 + z^2, i = 1, 2, 3, \text{ Σχέση II-7}$$

όπου $S_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$. Με αφαίρεση των r_i^2 και r_1^2 , $i = 2, 3$ έχουμε:

$$r_i^2 - r_1^2 = S_i^2 - S_1^2 - 2x_{i1}x - 2y_{i1}y - 2z_{i1}z, i = 2, 3, \text{ Σχέση II-8}$$

όπου $x_{i1} = x_i - x_1$, $y_{i1} = y_i - y_1$, $z_{i1} = z_i - z_1$ με αποτέλεσμα να παίρνουμε την εξίσωση:

$$Wr_h = \beta - dz, \text{ Σχέση II-9}$$

όπου $\beta = \begin{bmatrix} \beta_2^2 \\ \beta_3^2 \end{bmatrix}$, $r_h = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$, $d = \begin{bmatrix} z_{21} \\ z_{31} \end{bmatrix}$, $W = \begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} \\ x_{31} & y_{31} \end{bmatrix}$, Σχέση II-10 και

$$\beta_i^2 = \frac{r_1^2 - r_i^2 - S_1^2 - S_i^2}{2}. \text{ Αν οι τρεις δέκτες δεν είναι συνευθειακοί αλλά σε σχηματισμό τριγώνου}$$

τότε ο πίνακας W αντιστρέφεται και η Σχέση II-9 γίνεται:

$$r_h = W^{-1}(\beta - dz), \text{ Σχέση II-11,}$$

οπότε και η Σχέση II-7 για $i = 1$ γίνεται:

$$r_1^2 = S_1^2 - 2r_{h1}^T r_h - 2z_1 z + r_h^T r_h + z^2, \text{ Σχέση II-12}$$

όπου $r_{h1} = [x_1 \quad y_1]^T$

Αντικαθιστώντας τη Σχέση II-11 στη Σχέση II-12 προκύπτει η δευτεροβάθμια εξίσωση:

$$az^2 + bz + c = 0, \text{ Σχέση II-13}$$

$$\begin{aligned} \text{όπου } a &= 1 + d^T W^{-T} W^{-1} d, \\ b &= 2r_{h1}^T W^{-1} d - 2z_1 - 2d^T W^{-T} W^{-1} \beta, \\ c &= S_1^2 - R_1^2 + \beta^T W^{-T} W^{-1} \beta - 2r_{h1}^T W^{-1} \beta \end{aligned}$$

Έτσι το ύψος z του στόχου είναι απλά

$$z = \left(-b \pm (b^2 - 4ac)^{\frac{1}{2}} \right) / 2a, \text{ Σχέση II-14}$$

Αντικαθιστώντας τη Σχέση II-4 στην $r_h = W^{-1}(\beta - dz)$ παίρνουμε την τελική λύση για τις συντεταγμένες του στόχου $r_a(x,y,z)$ από την εξίσωση:

$$r_a = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^{-1} \beta \\ \text{---} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -W^{-1} d \\ \text{---} \\ 1 \end{bmatrix} \left(-b \pm (b^2 - 4ac)^{\frac{1}{2}} \right) / 2a, \text{ Σχέση II-15}$$

Ανάλογα με τη γεωμετρία του προβλήματος το σωστό πρόσημο επιλέγεται για το ύψος z από τις δύο συμμετρικές λύσεις ως προς το επίπεδο των σταθμών. Στη λύση που μόλις αναλύθηκε οι πίνακες W , d , r_{h1} εξαρτώνται από τις συντεταγμένες των τριών δεκτών και υπολογίζονται μία φορά, ενώ ο πίνακας β εξαρτάται επιπλέον και από τις μετρούμενες τιμές. Αυτό το γεγονός αποτελεί και το βασικότερο λόγο για τον οποίο ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιτρέπει ταχύτερη επίλυση του προβλήματος της τριμεροποίησης.

Μία απλούστευση της πιο πάνω λύσης γίνεται θεωρώντας:

$$\beta = \frac{1}{2}(\rho - \delta), \text{ Σχέση II-16}$$

με $\rho = [\rho_2^2 \quad \rho_3^2]^T$ και $\delta = [\delta_2^2 \quad \delta_3^2]^T$, όπου $\rho_i^2 = r_1^2 - r_i^2, i = 2,3$ και $\delta_i^2 = S_1^2 - S_i^2, i = 2,3$.

$$\text{Με αντικατάσταση στη Σχέση II-15 } r_a = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^{-1} \beta \\ \text{---} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -W^{-1} d \\ \text{---} \\ 1 \end{bmatrix} \left(-b \pm (b^2 - 4ac)^{\frac{1}{2}} \right) / 2a,$$

Σχέση II-15 και μια σειρά πράξεων προκύπτει:

$$z = \lambda^T u \pm (\xi^T v)^{\frac{1}{2}}, \text{ Σχέση II-17}$$

$$\begin{aligned} \text{όπου } u &= [1 \quad r_1^2 \quad r_2^2 \quad r_3^2]^T \\ v &= [1 \quad r_1^2 \quad r_2^2 \quad r_3^2 \quad r_1^4 \quad r_2^4 \quad r_3^4 \quad r_1^2 r_2^2 \quad r_1^2 r_3^2 \quad r_2^2 r_3^2]^T \\ \lambda^T &= [\lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3] \\ \xi^T &= [\xi_0 \quad \xi_1 \quad \dots \quad \xi_9] \end{aligned}$$

Τα στοιχεία των πινάκων λ και ξ καθορίζονται αποκλειστικά από τις συντεταγμένες των δεκτών. Θεωρώντας τους πίνακες $G \equiv W^{-T} W^{-1}$ και $e^T - (1/2)\delta^T W^{-T} W^{-1} + r_{h1}^T W^{-1}$ τα στοιχεία των πινάκων λ και ξ , δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= -(2r_{h1}^T W^{-1} d - 2z_1 + d^T W^{-T} W^{-1} \delta) / 2\alpha \\ \lambda_1 &= (z_{21}(g_{11} + g_{12}) + z_{31}(g_{22} + g_{12})) / 2\alpha \\ \lambda_2 &= -(z_{21}g_{11} + z_{31}g_{12}) / 2\alpha \\ \lambda_3 &= -(z_{31}g_{22} + z_{21}g_{12}) / 2\alpha \\ \xi_0 &= \lambda_0^2 - (\delta^T W^{-T} W^{-1} \delta / 4 + r_{h1}^T W^{-1} \delta + S_1^2) / \alpha \\ \xi_1 &= 2\lambda_0 \lambda_1 + (1 + e_1 + e_2) / \alpha \\ \xi_2 &= 2\lambda_0 \lambda_2 - e_1 / \alpha \\ \xi_3 &= 2\lambda_0 \lambda_3 - e_2 / \alpha \\ \xi_4 &= \lambda_1^2 - (g_{11} + 2g_{12} + g_{22}) / 4\alpha \\ \xi_5 &= \lambda_2^2 - g_{11} / 4\alpha \\ \xi_6 &= \lambda_3^2 - g_{22} / 4\alpha \\ \xi_7 &= 2\lambda_1 \lambda_2 + (g_{11} + g_{12}) / 2\alpha \\ \xi_8 &= 2\lambda_1 \lambda_3 + (g_{22} + g_{12}) / 2\alpha \\ \xi_9 &= 2\lambda_2 \lambda_3 - g_{12} / 2\alpha\end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας την Σχέση II-7 στην II-15 και χρησιμοποιώντας την II-16 προκύπτει η ακόλουθη κλειστή λύση για τις συντεταγμένες θέσης του στόχου:

$$r_\alpha = f(r) = \Lambda u + \mu (\xi^T v)^{\frac{1}{2}}, \text{ Σχέση II-18}$$

Στη Σχέση II-18 οι πίνακες u , v και ξ είναι γνωστοί ενώ θεωρώντας $\Lambda = [\lambda_1^T \quad \lambda_2^T \quad \lambda_3^T]^T$

και $W^{-1} = [w_1^T \quad w_2^T]^T$ έχουμε τελικά για τους πίνακες λ και μ :

$$\lambda_1 = \begin{bmatrix} -w_1^T d \lambda - \frac{w_1^T \delta}{2} \\ -w_1^T d \lambda + \frac{y_{31} - y_{21}}{2 \det(W)} \\ -w_1^T d \lambda - \frac{y_{31}}{2 \det(W)} \\ -w_1^T d \lambda + \frac{y_{21}}{2 \det(W)} \end{bmatrix}, \lambda_2 = \begin{bmatrix} -w_2^T d \lambda - \frac{w_2^T \delta}{2} \\ -w_2^T d \lambda + \frac{x_{21} - x_{31}}{2 \det(W)} \\ -w_2^T d \lambda - \frac{x_{31}}{2 \det(W)} \\ -w_2^T d \lambda + \frac{x_{21}}{2 \det(W)} \end{bmatrix}, \lambda_3 = \lambda$$

$$\mu = [\pm(-w_1^T d) \quad \pm(-w_2^T d) \quad \pm 1]^T$$

Από τους παραπάνω πίνακες, σε κάθε ομάδα μετρήσεων, υπολογίζονται μόνο οι u και v . Επομένως, με κάποιους απλούς μαθηματικούς υπολογισμούς μπορεί να υπολογιστούν οι συντεταγμένες θέσης του στόχου. Επιπλέον, οι παραπάνω εξισώσεις δεν θεωρούν προκαθορισμένο σύστημα συντεταγμένων ώστε να απαιτούν περίπλοκους μετασχηματισμούς με αλλαγή του τελευταίου.

Για να δούμε την επίδραση του θορύβου μετρήσεων στο τελικό αποτέλεσμα ας θεωρήσουμε ως δr_i το τυχαίο σφάλμα μέτρησης της απόστασης r_i μεταξύ του σταθμού i και του στόχου και r_0 την πραγματική απόσταση, αντίστοιχα. Ορίζουμε τους πίνακες σφαλμάτων και πραγματικών αποστάσεων $\delta r = [\delta r_1 \delta r_2 \delta r_3]$ και $r_0 = [r_{10} r_{20} r_{30}]$ αντίστοιχα, οπότε έχουμε:

$$r = r_0 + \delta r, \text{ Σχέση II-19}$$

Θεωρώντας τον πίνακα συνδιακύμανσης του τυχαίου διανύσματος σφαλμάτων (δr) ως S και υποθέτοντας πως $E\{\delta r\} = 0$ έχουμε ένα σφάλμα εκτίμησης $\delta r_a = r_a - r_{a0}$, όπου $r_{a0} = f(r_0)$ η πραγματική θέση του στόχου και $\delta r_a = [\delta x \delta y \delta z]^T$. Μια και η συνάρτηση f είναι μη γραμμική έχουμε $E\{\delta r_a\} \neq 0$, δηλαδή η τελική λύση θα φέρει κάποιο όρο σφάλματος ([GAVI92], [MANO93]). Για να υπολογίσουμε τον όρο αυτό επεκτείνουμε την εξίσωσή της λύσης μας για κάθε συντεταγμένη κατά Taylor γύρω από το r_0 . Για τη συντεταγμένη x , έτσι, έχουμε:

$$x = f_1(r) = f_1(r_0) + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial f_1}{\partial R_i} dr_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 f_1}{\partial r_i \partial r_j} dr_i dr_j + \varepsilon_1, \text{ Σχέση II-20}$$

με τις τοπικές παραγώγους να υπολογίζονται στο r_0 και ως ε_1 να συμβολίζονται τα προϊόντα ανώτερων τάξεων τα οποία μπορούν και να αγνοηθούν. Αντικαθιστώντας τη Σχέση II-20 στην σχέση του σφάλματος εκτίμησης, ο όρος σφάλματος για τη συντεταγμένη x είναι:

$$b_x = E\{\delta x\} = E\{x\} - x_0 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 f_1}{\partial r_i \partial r_j} s_{ij} = \frac{1}{2} \text{tr}(D_1 S), \text{ Σχέση II-21}$$

όπου s_{ij} είναι στοιχείο του πίνακα συνδιακύμανσης S και $\text{tr}()$ είναι ο τελεστής του ίχνους του πίνακα (trace). Ο πίνακας D_1 των μερικών παραγώγων υπολογίζεται ως εξής:

$$D_1 = \frac{\partial^2 f_1}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 (\lambda_1^T u)}{\partial r^2} + \mu_1 \frac{\partial^2 (\xi^T v)^{1/2}}{\partial r^2} = 2L_1 + \mu_1 \frac{1}{4(\xi^T v)^{1/2}} (2\xi^T v \psi - g g^T)$$

$$L_1 = \text{diag}(\lambda_{11} \quad \lambda_{12} \quad \lambda_{13})$$

$$g = \frac{\partial (\xi^T v)}{\partial r}$$

$$\psi = \frac{\partial^2 (\xi^T v)}{\partial r^2}$$

Σχέση II-22

Για τη συντεταγμένη y όμοια προκύπτει $b_y = (1/2)\text{tr}(D_2 S)$, όπου ο πίνακας D_2 προκύπτει αντικαθιστώντας τα L_1 και μ_1 με $L_2 = \text{diag}(\lambda_{11} \quad \lambda_{22} \quad \lambda_{33})$ και μ_2 αντίστοιχα. Όμοια εργαζόμαστε και για τη συντεταγμένη z . Ο πίνακας συνδιακύμανσης P του σφάλματος εκτίμησης θέσης δr_a υπολογίζεται ως εξής:

$$P = E\{[\delta r_a - E\{\delta r_a\}][\delta r_a - E\{\delta r_a\}]^T\} = E\{\delta r_a \delta r_a^T\} - E\{\delta r_a\} E\{\delta r_a^T\} = F S F^T - E\{\delta r_a\} E\{\delta r_a^T\}$$

$$F = \frac{\partial f}{\partial r} = \frac{\partial (\Lambda u)}{\partial r} + \mu \frac{\partial (\xi^T v)}{\partial r} = 2L r_d + \frac{1}{2(\xi^T v)^{1/2}} \mu g^T \text{ Σχέση II-23}$$

όπου ο πίνακας L είναι ένας 3×3 πίνακας που ορίζεται από τις τρεις τελευταίες στήλες του Λ και $R_d = \text{diag}(r_1 \ r_2 \ r_3)$. Τα διαγώνια στοιχεία του P προσδιορίζουν τις διακυμάνσεις σ_x^2 , σ_y^2 και σ_z^2 των σφαλμάτων πρόβλεψης και τα μη διαγώνια στοιχεία παριστούν την συνδιακύμανση αυτών.

2.3.5 Τοπολογία 3-3

Αν εκτός της εύρεσης των συντεταγμένων θέσης (x, y, z) του στόχου, είναι επιθυμητός και ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης αυτού (γωνίες pitch, yaw, roll) μπορεί, όπως αναφέρθηκε, να χρησιμοποιηθεί διάταξη τριών πομπών – αντί ενός – με τρεις δέκτες. Θεωρώντας τρεις πομπούς T_j με συντεταγμένες (X_j, Y_j, Z_j) σε κάποια γεωμετρική διάταξη περί του στόχου και τρεις δέκτες R_i με συντεταγμένες (x_i, y_i, z_i) , καθώς και L_{ij} την μετρούμενη απόσταση μεταξύ του πομπού j και του δέκτη i , βρίσκουμε από το σύστημα των ακόλουθων εννέα εξισώσεων:

$$(X_j - x_i)^2 + (Y_j - y_i)^2 + (Z_j - z_i)^2 = L_{ij}^2, i, j = 1, 2, 3$$

τις συντεταγμένες των πομπών T_j (υποτίθεται διάταξη «μέσα-έξω»). Το πιο πάνω σύστημα ουσιαστικά συνθέτει τρία ξεχωριστά προβλήματα τριμεροποίησης που αφορούν τους τρεις δέκτες και έναν εκάστοτε πομπό. Επομένως, οι λύσεις του έκαστου από τα τρία υποσυστήματα δίνονται με τους τρόπους που αναφέρονται στην 2.3.2.

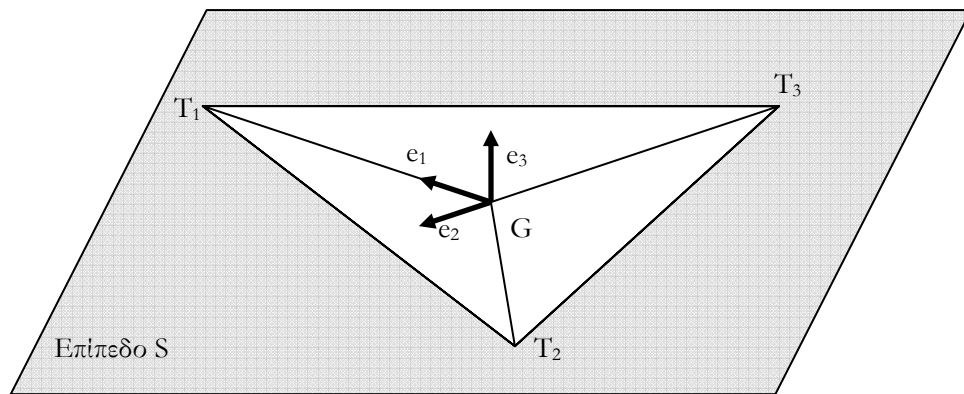
Στην τοπολογία αυτή οι τρεις πομποί είναι προσαρμοσμένοι στον στόχο με κατάλληλο τρόπο και εκπέμπουν είτε σε διαφορετικές συχνότητες, επιτρέποντας τον πλήρη διαχωρισμό των σημάτων στους δέκτες, είτε με κάποια χρονική διαφορά (καθιστώντας βέβαια τις μετρήσεις όχι ακριβώς ταυτόχρονες). Ο στόχος πάλι θεωρείται σημειακός και προσδιορίζεται ως κάποιο σημείο της διάταξης των πομπών. Συνηθέστερα είναι είτε ένας από τους τρεις πομπούς, είτε το κέντρο βάρους (ή συμμετρίας) της διάταξης των πομπών. Έχοντας προσδιορίσει τις θέσεις των πομπών T_j και με βάση γνωστές γεωμετρικές σχέσεις προσδιορίζεται η ακριβής θέση του στόχου G .

Για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης του στόχου ορίζουμε το σύστημα των ορθογώνιων μοναδιαίων διανυσμάτων e_1, e_2, e_3 , όπως στο ακόλουθο σχήμα. Θεωρούμε S το επίπεδο των τριών πομπών και τα διανύσματα e_1, e_2 στο επίπεδο S . Για κάθε ομάδα μετρήσεων έχοντας υπολογίσει τις συντεταγμένες των σημείων T_i και G , υπολογίζουμε τα διανύσματα $\vec{p}_i = \overrightarrow{GT_i}$, $i = 1, 2, 3$ και

$\vec{q} = \vec{p}_1 - \frac{|\vec{p}_1|}{|\vec{p}_1| |\vec{p}_2|} \vec{p}_2$, οπότε και τα μοναδιαία διανύσματα αντίστοιχα προκύπτουν

$\vec{e}_1 = \frac{\vec{p}_1}{|\vec{p}_1|}, \vec{e}_2 = \frac{\vec{q}}{|\vec{q}|}, \vec{e}_3 = \vec{e}_1 \times \vec{e}_2$. Τα διανύσματα αυτά περιγράφουν πλήρως την κατεύθυνση του

στόχου G .



Εικόνα 37: Εύρεση κατεύθυνσης στόχου

Οι τρεις πομποί είναι συνήθως για λόγους απλότητας σε σχηματισμό ισόπλευρου τριγώνου, χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο. Στην γενική περίπτωση που βρίσκονται πάνω σε κύκλο ακτίνας r , και θεωρώντας ως L την απόσταση του σημείου G από ένα δέκτη και α τη μέγιστη επιτρεπτή γωνία απόκλισης από το στόχο του δέκτη (συνήθως $\alpha = (1/2)\theta_{3db}$ της κατευθυντικότητας του δέκτη), προφανώς πρέπει να ισχύει $r < L \tan \alpha$ ώστε ο (κατευθυντικός) δέκτης να λαμβάνει τα σήματα και των τριών πομπών. Από την άλλη, μεγάλες τιμές του r θα επέτρεπαν μετρήσεις κατεύθυνσης (κυρίως) μεγαλύτερης ακρίβειας. Επομένως, η επιλογή του r αποτελεί ένα trade off μεταξύ των δύο αυτών παραμέτρων. Ενδεικτικές τιμές για συχνότητες έως 85kHz είναι $r \approx 25\text{mm}$ ([AYOA91]).

2.3.6 Τοπολογία 1-n

Αυξάνοντας τον αριθμό των δεκτών, αυξάνεται η πολυπλοκότητα και το κόστος του συστήματος, με ταυτόχρονο, όμως, κέρδος στην ακρίβεια της τελικής λύσης. Έχοντας συνολικά n δέκτες ($n > 3$), το σύστημα αποτελείται από n μη γραμμικές εξισώσεις με τρεις αγνώστους. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε, με αγνώστους τα x, y, z τις n ακόλουθες εξισώσεις:

$$|r_i| = \left((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, i = 1, K, n$$

Το πλεονάζον σύστημα που δημιουργείται επιτρέπει την εύρεση μιας λύσης με μεγαλύτερη ακρίβεια για τη θέση και κατεύθυνση του στόχου. Στην παράγραφο αυτή, αρχικά, θα ποσοτικοποιηθεί η βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων με προσθήκη επιπλέον δεκτών και στη συνέχεια, θα αναλυθεί η διαδικασία εύρεσης λύσης από ένα τέτοιο σύστημα με τη μέθοδο της από κοινού μέγιστης πιθανοφάνειας (joint maximum likelihood)¹.

Ακρίβεια συνάρτηση του αριθμού των δεκτών n

¹ Ουσιαστικά η συνάρτηση της από κοινού μέγιστης πιθανοφάνειας αποτελεί γενικευμένη περίπτωση της εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων

Αν L_k είναι η μετρούμενη απόσταση μεταξύ του πομπού $T(X, Y, Z)$ και του δέκτη R_k τότε η εκτιμώμενη θέση του πομπού είναι αυτή που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση (βάσει της εκτίμησης ελάχιστων τετραγώνων):

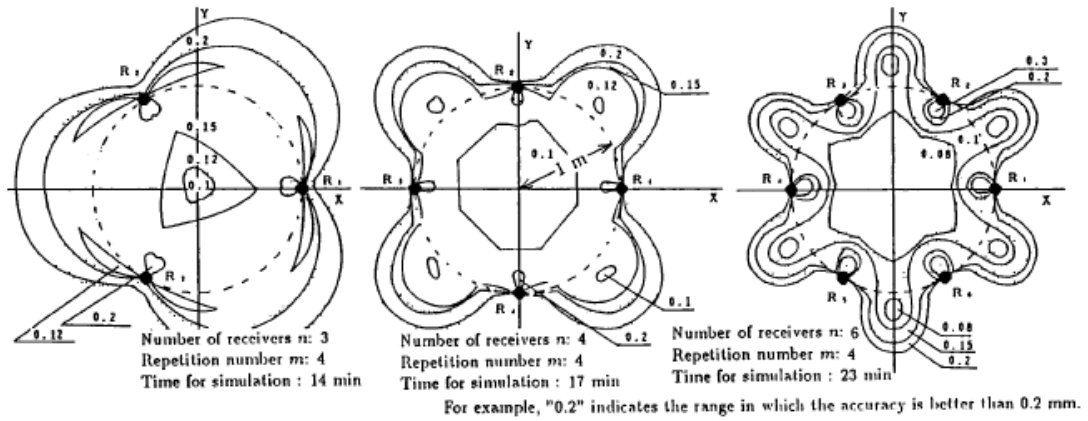
$$f(T) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k^2} \left(\overline{TR_k} - L_k \right)^2, \text{ Σχέση II-24}$$

Όπως αναφέρεται στο [AYOA91] ακολουθώντας τη μέθοδο Gauss-Newton και επιλέγοντας μία αρχική θέση $T_1(X_1, Y_1, Z_1)$ χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι αναδρομικοί τύποι έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση:

$$T_{i+1} = T_i - \frac{\nabla f(T_i)}{H}, \text{ όπου } H = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k^2} \text{ Σχέση II-25}$$

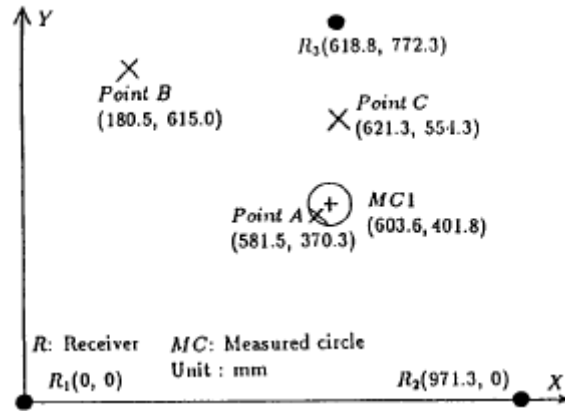
Η βελτίωση που επιτυγχάνεται με τη χρήση πλεοναζόντων δεικτών επιβεβαιώνεται τόσο μέσα από πειράματα όσο και από προσομοιώσεις.

Στα πλαίσια προσομοίωσης τοποθετήθηκαν δέκτες στην περιφέρεια κύκλου σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους με κέντρο του κύκλου το σημειακό στόχο. Η προσομοίωση έγινε για το διδιάστατο πρόβλημα, οπότε δύο (2) δέκτες ήταν η ελάχιστη απαίτηση. Έστω $T_0(X_0, Y_0)$ η πραγματική θέση του πομπού και L_{k0} η πραγματική απόστασή του από το δέκτη k . Δεχόμαστε ότι τα σφάλματα μετρήσεων για κάθε δέκτη ακολουθούν κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή. Επιπλέον, θεωρούμε πως το σφάλμα για κάθε δέκτη είναι ανάλογο της μετρούμενης απόστασης κατά ένα παράγοντα 10^{-4} ([AYOA91]). Υπό αυτές τις συνθήκες έχουμε για τη μετρούμενη απόσταση από το σταθμό k : $L_k = L_{k0}(1+\xi)$, $k = 1, \dots, n$ με το ξ να ακολουθεί κανονική κατανομή $N(0, 10^{-4})$. Πραγματοποιούμε προσομοίωση Monte Carlo στην οποία δημιουργούμε τυχαίες τιμές του ξ ακολουθώντας κατανομή $N(0, 10^{-4})$. Από τη σχέση $L_k = L_{k0}(1+\xi)$ υπολογίζονται οι αποστάσεις L_{ki} , και εφαρμόζεται αναδρομικά η Σχέση II-25 για τον υπολογισμό των συντεταγμένων $T(X, Y)$. Η προσομοίωση έγινε για 100 επαναλήψεις, όπου μετρήθηκε το μέσο σφάλμα $\left| \overline{T_0 T} \right|$. Υπάρχει σαφής βελτίωση της ακρίβειας με την αύξηση των δεικτών, με ταυτόχρονη σημαντική αύξηση του χρόνου που απαιτείται για να επιτευχθεί σύγκλιση. Στα ίδια αποτελέσματα καταλήγει και το [AYOA91], όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα, σε σαφώς μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο. Συμπερασματικά, για το διδιάστατο πρόβλημα, τρεις (3) ή τέσσερις (4) δέκτες είναι η βέλτιστη λύση. Αντίστοιχα, για το τριδιάστατο πρόβλημα που μας απασχολεί, τέσσερις (4) δέκτες επιτρέπουν μια σαφή βελτίωση της ακρίβειας του συστήματος. Πάντως, μια και σε ένα σύστημα πραγματικού χρόνου ο χρόνος ανανέωσης δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντικός, κρίνεται πιο σωστό να χρησιμοποιηθούν τρεις (3) και μόνο δέκτες για γρηγορότερη απόκριση, έστω και με κάποιο κόστος στην τελική ακρίβεια.



Εικόνα 38: Αποτελέσματα προσομοίωσης με αυξανόμενους δέκτες

Στο ίδιο συμπέρασμα ως προς την αύξηση της ακρίβειας με την αύξηση των δεκτών καταλήγει και το ([AYOΛ91]), ακολουθώντας μια πειραματική διαδικασία. Ενδεικτικά, για το δισδιάστατο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας τρεις δέκτες και διεξάγοντας μετρήσεις για θέσεις του στόχου στα σημεία Α, Β και C (βλέπε Εικόνα 39) και χρησιμοποιώντας τη Σχέση Π-25 έχουμε αποκλίσεις που φαίνονται στον Πίνακας 7, οι οποίες είναι σε συμφωνία με αυτές της προσομοίωσης. Επομένως, η βελτίωση της ακρίβειας είναι εμφανής με τη χρήση επιπλέον δεκτών σε κόστος, πάντα, της πολυπλοκότητας, του απαιτούμενου χρόνου επεξεργασίας και του κόστους.



Εικόνα 39: Τοπολογία πειράματος δισδιάστατου προβλήματος

	Σημείο Α	Σημείο Β	Σημείο Γ
Με χρήση των R1, R2	0,15 mm	0,16 mm	0,17 mm
Με χρήση των R1, R2, R3	0,12 mm	0,15 mm	0,12 mm
Αρ. Επαναλήψεων: 2			
Με χρήση των R1, R2, R3	0,12 mm	0,15 mm	0,12 mm

Αρ. Επαναλήψεων: 6			
--------------------	--	--	--

Πίνακας 7: αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση αυξανόμενων δεικτών

2.3.7 Μέθοδος από κοινού μέγιστης πιθανοφάνειας σε σύστημα 1-n

Ο καθορισμός του επιθυμητού εκτιμητή θέσης αποτελεί πρόβλημα εκτίμησης στατιστικών παραμέτρων. Ένας τέτοιος πιθανός εκτιμητής είναι και ο εκτιμητής μέγιστης πιθανοφάνειας. Η βασικότερη ιδιότητα του είναι πως αν υπάρχει σε ένα πρόβλημα ένας από κοινού βέλτιστος εκτιμητής αυτός θα είναι εκτιμητής μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood – ML). Σε κάθε περίπτωση ο εκτιμητής ML συγκλίνει ασυμπτωτικά με αυξανόμενο αριθμό δεικτών n ([GROK59]).

Θεωρούμε n δέκτες οι οποίοι πραγματοποιούν μετρήσεις της απόστασης του στόχου ξ_j , $j=1, \dots, n$ από αυτούς, με θόρυβο μηδενικής μέσης τιμής και διακύμανσης σ_j^2 . Θεωρούμε, επιπλέον τις μετρήσεις διαφορετικών σταθμών ασυσχέτιστες μεταξύ τους και τις διακυμάνσεις σ_j^2 ανεξάρτητες της θέσης του στόχου. Οι παραπάνω υποθέσεις είναι κοντά στην πραγματικότητα αν δεχτούμε πως $\sigma_j \ll \xi_j$ και ότι η απόκλιση σ_j είναι αργά μεταβαλλόμενη συνάρτηση του ξ_j .

Ο λογάριθμος της συνάρτησης πιθανοφάνειας των από κοινού μετρήσεων ξ_j , $j=1, \dots, n$ είναι:

$$\Lambda = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{\left[\xi_j - |t r_j| \right]^2}{\sigma_j^2} - \sum_{j=1}^n \ln \sigma_j - \frac{n}{2} \ln 2\pi, \text{ Σχέση II-26}$$

όπου t είναι το διάνυσμα από το σταθμό j στην πραγματική θέση του στόχου.

Αν b_j είναι το διάνυσμα από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων προς το σταθμό j και t το αντίστοιχο από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων προς το στόχο τότε:

$$t r_j = b_j + \xi_j, j = 1, \dots, n, \text{ Σχέση II-27.}$$

Χωρίς απώλεια της γενικότητας και για λόγους ευκολίας θεωρούμε $\sigma_j = 1$. Η μεγιστοποίηση της συνάρτησης πιθανοφάνειας της Σχέσης II-26 ανάγεται στην ελαχιστοποίηση του όρου

$$\Gamma = \sum_{j=1}^n \left[\xi_j - |t r_j| \right]^2. \text{ Ο βέλτιστος εκτιμητής } \hat{r} \text{ που ελαχιστοποιεί τον όρο } \Gamma \text{ δίνεται από την}$$

ακόλουθη σχέση:

$$\hat{r} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[b_j + \xi_j \frac{\hat{r} - b_j}{|\hat{r} - b_j|} \right] = 0, \text{ Σχέση II-28}$$

που καταλήγει στην ακόλουθη αναδρομική σχέση για την εύρεση του διανύσματος εκτίμησης:

$$r^{n+1} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[b_j + \xi_j \frac{r^n - b_j}{|r^n - b_j|} \right], \text{ Σχέση II-29}$$

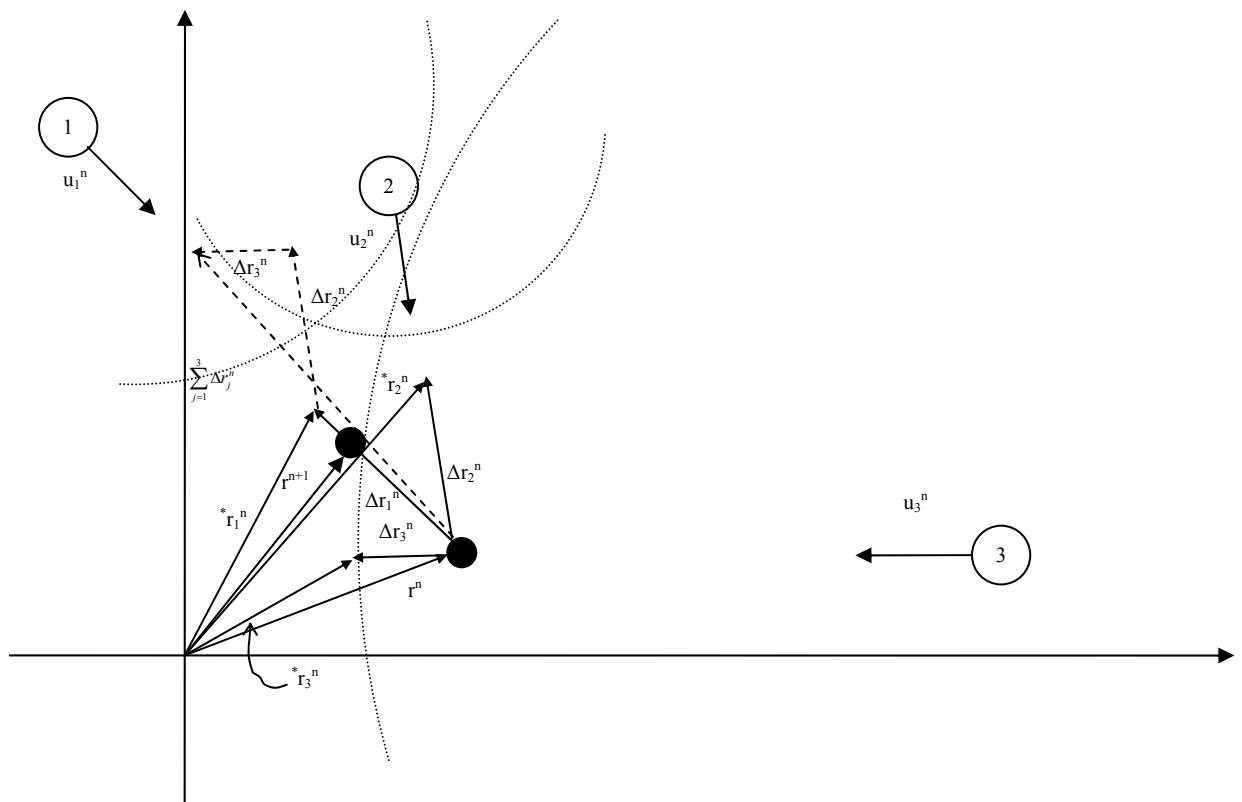
όπου r^n είναι η n-οστή εκτίμηση του διανύσματος θέσης του στόχου. Είναι εύκολο να διαπιστώσει

κανείς πως $\frac{r^n - b_j}{|r^n - b_j|} = \frac{r_j^n}{|r_j^n|} = u_j^n$, όπου u_j^n το μοναδιαίο διάνυσμα στη διεύθυνση από το σταθμό j

στη n-οστή εκτίμηση θέσης του στόχου. Το γινόμενο $\xi_j u_j^n$ παριστάνει το n-οστό διάνυσμα εκτίμησης της θέσης του στόχου από το σταθμό j και η Σχέση II-29 γράφεται τελικά:

$$r^{n+1} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [b_j + \xi_j u_j^n] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n {}^*r_j^n, \text{ Σχέση II-30}$$

όπου το διάνυσμα ${}^*r_j^n$ είναι το διάνυσμα της n-οστής εκτίμησης θέσης από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Σχηματικά τα παραπάνω φαίνονται ακολούθως:



Εικόνα 40: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου από κοινού μέγιστης πιθανοφάνειας

Το διάνυσμα ${}^*r_j^n$ μπορεί να βρεθεί ενώνοντας την αρχή του συστήματος συντεταγμένων με την τομή του κύκλου (j, ξ_j) και την επέκταση του διανύσματος r_j^n ή u_j^n . Η Σχέση II-30 φανερώνει πως η n+1 εκτίμηση της θέσης του στόχου είναι ο μέσος όρος των ${}^*r_j^n$. Γράφοντας $\Delta r_j^n = [\xi_j - |r_j^n|] u_j^n = \xi_j u_j^n - r_j^n$, όπου Δr_j^n είναι το n-οστό σφάλμα εκτίμησης της θέσης του στόχου με βάση το σταθμό j, έχουμε από την Σχέση II-30:

$$r^{n+1} - r^n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta r_j^n, \text{ Σχέση II-31}$$

Επομένως η $n+1$ εκτίμηση της θέσης του στόχου βρίσκεται, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 40, ως το διανυσματικό άθροισμα των Δr_j^n με αρχή τη n -οστή εκτίμηση και με απόσταση από την

$$\text{αρχή} \left| \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta r_j^n \right|.$$

Η μέθοδος συγκλίνει αν ένα υποσύνολο των u_i σχηματίζει μία βάση του χώρου, δηλαδή αν κάθε διάνυσμα του χώρου αυτού μπορεί να εκφραστεί ως γραμμικός συνδυασμός των συγκεκριμένων διανυσμάτων u_i .

Μπορεί να αποδειχτεί ([GROK59]) πως ο εκτιμητής μέγιστης πιθανοφάνειας δίνεται σε σχέση με την πραγματική θέση του στόχου από τη σχέση $\hat{r} = r + U^{-1}f$, όπου

$$f = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\xi_j - |\hat{r}_j|) \cdot u_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varepsilon_j \cdot u_j \quad \text{και} \quad U = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_j u_j^T. \text{ Η σύγκλιση είναι εκθετική}$$

και καθορίζεται από τις χαρακτηριστικές ρίζες του πίνακα $A=I-U$ (όπου I ο μοναδιαίος). Μπορεί να δείχτεί πως, αν λ είναι μια χαρακτηριστική ρίζα του A , τότε $0 < \lambda < 1$ όταν τα διανύσματα u_i διανέμονται στο χώρο. Αυτό σημαίνει πως οι χαρακτηριστικές λύσεις του γραμμικού ισοδύναμου της Σχέσης II-30 τείνουν ασυμπτωτικά στη λύση άσχετα με την αρχική εκτίμηση.

Ο πίνακας συνδιακύμανσης του εκτιμητή μέγιστης πιθανοφάνειας είναι:

$$C = E\{U^{-1} f f^T U^{-1}\}, \text{ Σχέση II-32}$$

Μια και ο U είναι ανεξάρτητος των σφαλμάτων μέτρησης ε_i και δεδομένου της γραμμικότητας του τελεστή E αλλά και του πίνακα U , έχουμε:

$$C = U^{-1} E(f f^T) U^{-1} = U^{-1} \left(\frac{1}{n} U \right) U^{-1} = (nU)^{-1}, \text{ Σχέση II-33}$$

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του συστήματος είναι $E\{\hat{r}^T - r^T\} = E\{\varepsilon^2\} = \text{tr}[(nU)^{-1}]$.

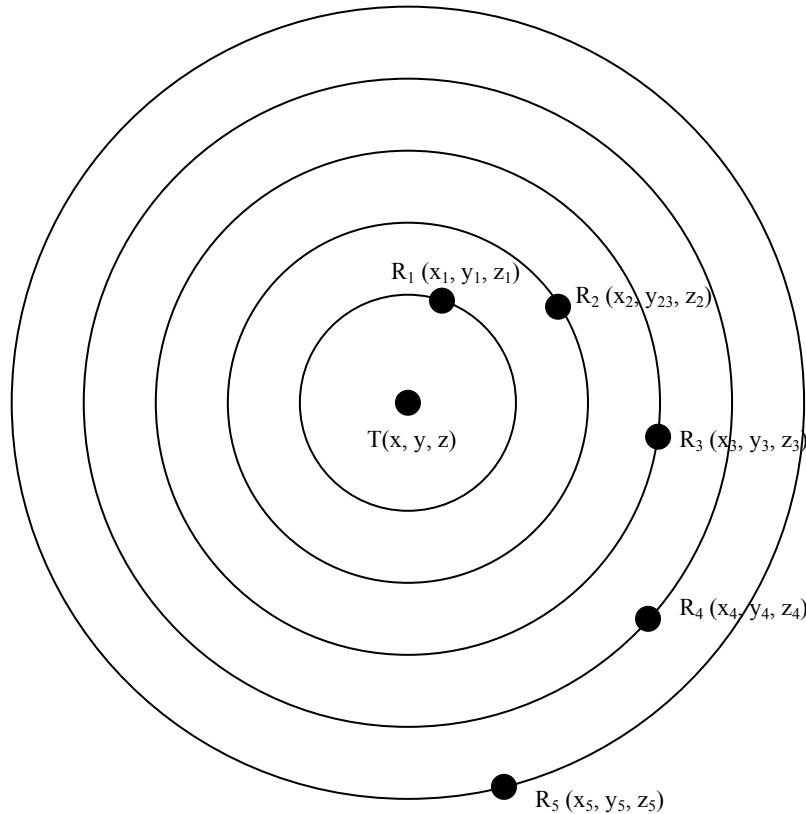
Όπως φαίνεται, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι ανεξάρτητο της αρχής του συστήματος συντεταγμένων και κατ' επέκταση του συστήματος συντεταγμένων που θα επιλεγθεί.

2.4 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Έως τώρα έχουμε αναφερθεί στο πρόβλημα της τριμεροποίησης και διάφορες πιθανές μεθόδους για την επίλυσή του. Η μέθοδος της τριμεροποίησης αφορά στη μέτρηση του χρόνου διαδρομής (TOF) ενός ακουστικού κύματος μεταξύ του πομπού και n δεικτών. Εναλλακτικά, μπορούν να μετρηθούν αντί των χρόνων που χρειάζεται ο παλμός κατά τη διάδοση του από τον πομπό στον εκάστοτε δέκτη, οι χρονικές διαφορές λήψης του σήματος από διαδοχικούς δέκτες

(Time Difference of Arrival – TDOA). Το συγκεκριμένο πρόβλημα ονομάζεται πολυμεροποίηση (multilateration - [ΜΑΗΑ01])

Έστω ένα σύστημα με πομπό στη θέση $T(x, y, z)$ και πέντε (5) δέκτες R_i με συντεταγμένες (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, \dots, 5$, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (υποθέτουμε πάλι διάταξη «μέσα-έξω»), όπου υποτίθεται σφαιρική διάδοση του ακουστικού κύματος.



Εικόνα 41: Αρχή λειτουργίας συστήματος TDOA

Θεωρώντας πως ο πομπός εκπέμπει τον παλμό τη χρονική στιγμή $t = 0$ και πως ο δέκτης R_i λαμβάνει τον παλμό τη χρονική στιγμή t_i , σχηματίζονται οι ακόλουθες διαφορές χρόνων διαδρομής (TOF):

$$\begin{aligned}
 \Delta t_{12} &= t_2 - t_1 \\
 \Delta t_{13} &= t_3 - t_1 \\
 \Delta t_{14} &= t_4 - t_1 \\
 \Delta t_{15} &= t_5 - t_1
 \end{aligned}
 \qquad \text{Σχέση II-34}$$

Θεωρώντας ως d την απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη που λαμβάνει πρώτος χρονικά το σήμα και c_s την ταχύτητα διάδοσης του σήματος, έχουμε τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 &= d^2 \\
(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 &= (d + c_s \Delta t_{12})^2 \\
(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 &= (d + c_s \Delta t_{13})^2, \text{ Σχέση II-35} \\
(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2 &= (d + c_s \Delta t_{14})^2 \\
(x_5 - x)^2 + (y_5 - y)^2 + (z_5 - z)^2 &= (d + c_s \Delta t_{15})^2
\end{aligned}$$

Αναπτύσσοντας τα τετράγωνα στην πρώτη εκ των σχέσεων της II-35 και αντικαθιστώντας στις υπόλοιπες, παίρνουμε το ακόλουθο γραμμικό σύστημα με αγνώστους τις συντεταγμένες (x, y, z) και την απόσταση d .

$$\begin{bmatrix} 2x_1 - 2x_2 & 2y_1 - 2y_2 & 2z_1 - 2z_2 & -2c_s \Delta t_{12} \\ 2x_1 - 2x_3 & 2y_1 - 2y_3 & 2z_1 - 2z_3 & -2c_s \Delta t_{13} \\ 2x_1 - 2x_4 & 2y_1 - 2y_4 & 2z_1 - 2z_4 & -2c_s \Delta t_{14} \\ 2x_1 - 2x_5 & 2y_1 - 2y_5 & 2z_1 - 2z_5 & -2c_s \Delta t_{15} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_s \Delta t_{12})^2 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \\ (c_s \Delta t_{13})^2 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \\ (c_s \Delta t_{14})^2 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_4^2 - y_4^2 - z_4^2 \\ (c_s \Delta t_{15})^2 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_5^2 - y_5^2 - z_5^2 \end{bmatrix}$$

Σχέση II-36

Έχοντας ως βάση το προηγούμενο σύστημα, οποιαδήποτε από τις προαναφερόμενες μεθόδους ([YANG02]) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της τελικής λύσης.

Αν τώρα η ταχύτητα διάδοσης του ήχου δεν θεωρηθεί σταθερή αλλά εκτιμάται σε κάθε ομάδα μετρήσεων, τότε θα χρειαστεί ένας επιπλέον δείκτης (συνολικά έξι (6)) και το πιο πάνω σύστημα (με άγνωστο και το c_s πλέον) διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} 2x_1 - 2x_2 & 2y_1 - 2y_2 & 2z_1 - 2z_2 & -2\Delta t_{12} & -2\Delta t_{12}^2 \\ 2x_1 - 2x_3 & 2y_1 - 2y_3 & 2z_1 - 2z_3 & -2\Delta t_{13} & -2\Delta t_{13}^2 \\ 2x_1 - 2x_4 & 2y_1 - 2y_4 & 2z_1 - 2z_4 & -2\Delta t_{14} & -2\Delta t_{14}^2 \\ 2x_1 - 2x_5 & 2y_1 - 2y_5 & 2z_1 - 2z_5 & -2\Delta t_{15} & -2\Delta t_{15}^2 \\ 2x_1 - 2x_6 & 2y_1 - 2y_6 & 2z_1 - 2z_6 & -2\Delta t_{16} & -2\Delta t_{16}^2 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ c_s d \\ c_s^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_4^2 - y_4^2 - z_4^2 \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_5^2 - y_5^2 - z_5^2 \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_6^2 - y_6^2 - z_6^2 \end{bmatrix}$$

Σχέση II-37

Ένα πλεονέκτημα που παρέχει το σύστημα είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησης επιπλέον διαφορών χρόνων (π.χ. Δt_{23} , Δt_{24}), οι οποίες καθιστούν το τελικό προς επίλυση σύστημα πλεονασματικό και επιτρέπουν αφενός καλύτερη εκτίμηση, αφετέρου τη δυνατότητα μείωσης των δεικτών. Ο ελάχιστος αριθμός δεικτών που απαιτείται είναι τέσσερις (4), ώστε να μπορούν να προσδιοριστούν οι άγνωστοι x, y, z, d με βάση τις τέσσερις (4) σχέσεις με τα μετρούμενα t_{12}, t_{13}, t_{14} , και ένα εκ των t_{23}, t_{24}, t_{34} .

Συγκρίνοντας τις τεχνικές της τριμεροποίησης (trilateration) και της πολυμεροποίησης (multilateration) μπορούμε να πούμε πως τόσο η μία όσο και η άλλη λύση έχουν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Στην περίπτωση της τριμεροποίησης πρέπει να υπάρχει τέλειος συγχρονισμός μεταξύ του πομπού και των δεικτών για τη σημείωση της χρονικής στιγμής εκπομπής

(δεδομένου πως οι μετρήσεις γίνονται στους σταθερούς δέκτες). Οι μετρούμενοι χρόνοι διαδρομής (TOF) εμπεριέχουν καθυστερήσεις, επονομαζόμενες ως καθυστερήσεις του συστήματος, που οφείλονται στο ηλεκτρονικό κύκλωμα εκπομπής, στην επεξεργασία του λαμβανόμενου σήματος στους δέκτες και στην ακουστοηλεκτρομηχανική λήψη από τους μετατροπείς (transducers). Επιπρόσθετα ο υπολογισμός ή μέτρηση αυτής της καθυστέρησης αποτελεί ένα επιπλέον πρόβλημα. Η καθυστέρηση που υπάρχει, ασχέτως της ακριβείας του συστήματος, οδηγεί σε λάθη στην εκτίμηση των χρόνου διαδρομής, που, ενδεχομένως, μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά λάθη στην εκτίμηση των συντεταγμένων θέσης του στόχου. Με την πολυμεροποίηση αφενός δεν χρειάζεται να υπάρχει ακριβής γνώση της χρονικής στιγμής εκπομπής του παλμού, αφετέρου μια και η καθυστέρηση του συστήματος είναι κοινή για όλους τους δέκτες, αυτή αντισταθμίζεται χρησιμοποιώντας τις διαφορές των χρόνων, και δεν υπεισέρχεται στις μετρήσεις. Το μειονέκτημα είναι πως πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός των δεκτών μια και χρειάζονται δύο (2) δέκτες για να δώσουν μία μετρούμενη διαφορά χρόνου Δt . Στη λύση της πολυμεροποίησης προφανώς υπάρχει αύξηση στο κόστος και την πολυπλοκότητα. Επιπρόσθετα υπάρχει ανάγκη καλωδίωσης όλων των πομπών και των δεκτών καθιστώντας πολλές φορές άβολη την εφαρμογή του συστήματος. Τέλος, υπάρχει η ανάγκη παρουσίας κυλωμάτων μέτρησης χρόνου υψηλής ακριβείας σε όλους του δέκτες. Στην παρούσα διατριβή προτιμάται για τους πιο πάνω λόγους η λύση της τριμεροποίησης (trilateration).

2.5 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΞΩΓΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Οι βασικοί εξωγενείς παράγοντες που επηρεάζουν την ακριβεία με την οποία λειτουργεί το περιγραφόμενο σύστημα είναι οι μεταβολές της θερμοκρασίας, η υγρασία και τα ρεύματα του αέρα. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν την ταχύτητα διάδοσης του ήχου με αποτέλεσμα, αν αυτή θεωρείται δεδομένη καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, να υπεισέρχονται λάθη που μεγαλώνουν ανάλογα με την απόσταση του στόχου από τους δέκτες του συστήματος.

Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η βαθμονόμηση του συστήματος ανά τακτά χρονικά διαστήματα (δεδομένου του ότι απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ήχου δεν αναμένονται). Πιο συγκεκριμένα ένας πομπός σε μία σταθερή θέση εκπέμπει σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ένα παλμό ο οποίος λαμβάνεται από έναν δέκτη σε σταθερή γνωστή απόσταση από τον πομπό. Από τη μέτρηση του χρόνου άφιξης του παλμού και δεδομένου της γνωστής απόστασης μεταξύ πομπού-δέκτη, υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης του ήχου, η οποία χρησιμοποιείται από το σύστημα και τους λοιπούς δέκτες μέχρι τον επόμενο υπολογισμό της. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνεται είτε ταυτόχρονα με τη λειτουργία του συστήματος χρησιμοποιώντας ειδικά διαμορφωμένο παλμό μικρής ισχύος, του οποίου η ακολουθία αποδιαμόρφωσης βρίσκεται μόνο στον αντίστοιχο δέκτη, είτε σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα στα οποία οι λοιποί δέκτες σταματούν να λαμβάνουν έως ότου πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση.

Μία δεύτερη λύση είναι να χρησιμοποιηθούν το λιγότερο τέσσερις (4) δέκτες (x_i, y_i, z_i) για τη λειτουργία του συστήματος και πλέον οι ζητούμενες παράμετροι να είναι οι συντεταγμένες του στόχου (x, y, z) και η ταχύτητα του ήχου c_s . Οι παράμετροι εκτιμώνται με χρήση των μεθόδων που αναλύθηκαν πριν και των εξισώσεων της ακόλουθης σχέσης.

$$c_s t_i = \left((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, i = 1, 2, 3, 4, \text{ Σχέση II-38}$$

Η λύση αυτή, αν και παρέχει τη δυνατότητα για πιο ακριβείς μετρήσεις, μια και η ταχύτητα διάδοσης του ήχου υπολογίζεται σε κάθε ομάδα μετρήσεων και δεν θεωρείται a priori γνωστή, προσθέτει μια επιπλέον καθυστέρηση στο σύστημα. Αυτό συμβαίνει επειδή ο βαθμός των αγνώστων για το αντίστοιχο σύστημα αυξάνεται από τρεις (3) σε τέσσερις (4).

2.6 ΕΚΤΙΜΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ KALMAN

Έως τώρα, για την εκτίμηση της θέσης και της κατεύθυνσης του στόχου, έχουν αναλυθεί αλγόριθμοι οι οποίοι εκτιμούν το διάνυσμα κατάστασης (συντεταγμένες θέσης και κατεύθυνσης) σε μία χρονική στιγμή t με μετρήσεις που γίνονται τη χρονική στιγμή αυτή. Δηλαδή, οι αλγόριθμοι αυτοί πρακτικά θεωρούν τους στόχους ως μη κινούμενους τη χρονική στιγμή της μέτρησης ή πως, εντελώς ταυτόχρονες μετρήσεις τη χρονική στιγμή t , μπορούν να ληφθούν και να χρησιμοποιηθούν για την πλήρη περιγραφή της κατάστασης του στόχου. Βέβαια στο Παράρτημα 3 αυτού του κεφαλαίου αναφέρεται μια επαναληπτική μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων η οποία λαμβάνει υπόψη της τις προηγούμενες μετρήσεις για τον προσδιορισμό της επόμενης εκτίμησης. Εντούτοις, αυτή η προσέγγιση δεν αποτελεί την βέλτιστη εκτίμηση για το πρόβλημα.

Στο [KALM60] προτάθηκε ένας εκτιμητής κατάστασης που συνδυάζει μία επαναληπτική μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων με ένα χωροχρονικό δυναμικό μοντέλο και οδηγεί σε ένα πρακτικό αλγόριθμο για την εκτίμηση της κατάστασης ενός δυναμικού συστήματος, συνδυάζοντας προηγούμενες και νέες μετρήσεις και a priori μοντέλα κίνησης. Ο εκτιμητής αυτός ονομάζεται, εν συντομία, φίλτρο Kalman, προς τιμή του εμπνευστή του. Αν υποθεθεί πως το εποπτευόμενο σύστημα είναι γραμμικό και πως ο θόρυβος μετρήσεων και ο συστημικός θόρυβος είναι λευκοί και Γκαουσιανοί, το φίλτρο Kalman αποτελεί αποδεδειγμένα τον βέλτιστο γραμμικό εκτιμητή. Το ίδιο ισχύει και χωρίς την υπόθεση της ύπαρξης Γκαουσιανού θορύβου. Αλλά ακόμα και σε μη γραμμικά δυναμικά συστήματα (όπως αυτό το οποίο επεξεργαζόμαστε στην παρούσα διατριβή), χρησιμοποιείται μια παραλλαγή αυτού που προκύπτει με μία κατάλληλη μέθοδο γραμμικοποίησης, και λέγεται Extended Kalman φίλτρο (EKF). Αναλυτικές μαθηματικές αναλύσεις για τα φίλτρα Kalman μπορούν να αναζητηθούν στα [GELB74], [BARS93], [BROW92]. Σκοπός αυτής της ενότητας είναι να επεξηγηθεί περιληπτικά ([POLY04]) το φίλτρο Kalman και να αναφερθούν οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με αυτό. Η εφαρμογή αυτού στο πρόβλημα μας θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

2.6.1 Πρόβλημα Δυναμικής Εκτίμησης

Ας θεωρήσουμε ένα αντικείμενο-στόχο του οποίου η δυναμική κατάσταση τη χρονική στιγμή $(k+1)$ μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια στοχαστική διαδικασία διακριτού χρόνου της μορφής:

$$x(k+1) = Fx(k) + G(k)u(k) + w(k), \text{ Σχέση II-39}$$

όπου $x(k)$ (διάστασης $n \times 1$) είναι το διάνυσμα κατάστασης του αντικειμένου τη χρονική στιγμή k , F είναι η μήτρα μετάβασης (transition matrix) που θεωρείται ότι είναι γνωστή, $w(k)$ είναι ο μηδενικής μέσης τιμής λευκός Γκαουσιανός θόρυβος της διαδικασίας με γνωστή μήτρα συνδιακύμανσης Q και $u(k)$ είναι η ντετερμινιστική είσοδος του συστήματος.

Το διάνυσμα μέτρησης z (διάστασης $m \times 1$) αποτελείται από τις επιμέρους m μετρήσεις, οι οποίες προκύπτουν από κάποιο γραμμικό (ή μη γραμμικό ανά περίπτωση) συνδυασμό των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος. Επιπρόσθετα, θεωρούμε πως οι μετρήσεις εμπεριέχουν μηδενικής μέσης τιμής λευκό Γκαουσιανό θόρυβο $v(k)$ με μήτρα συνδιακύμανσης R . Ισχύει δηλαδή:

$$z(k) = H(k)x(k) + v(k), \text{ Σχέση II-40}$$

όπου H είναι η μήτρα μέτρησης (διάστασης $m \times n$).

Δεδομένης της δυναμικής κατάστασης του αντικειμένου τη χρονική στιγμή k και του μοντέλου κίνησης, οι εξισώσεις για το φίλτρο Kalman είναι:

$$K(k) = P(k|k-1) \cdot H^T \cdot [H \cdot P(k|k-1) \cdot H^T + R]^{-1}$$

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k) \cdot [y(k) - H \cdot \hat{x}(k|k-1)]$$

$$P(k|k) = [I - K(k) \cdot H] \cdot P(k|k-1)$$

$$\hat{x}(k+1|k) = F \cdot \hat{x}(k|k) + G(k)u(k)$$

$$P(k+1|k) = F \cdot P(k|k) \cdot F^T + Q$$

όπου $K(k)$ ο πίνακας κέρδους του φίλτρου Kalman, P ο πίνακας συνδιακύμανσης του λευκού Γκαουσιανού θορύβου σφάλματος εκτίμησης ενώ, για τη δεσμευμένη εκτίμηση $\hat{x}(j|k)$ εννοείται:

$$\hat{x}(j|k) \equiv E[x(j)|Z^k], \text{ με } Z^k \equiv \{z(i), i \leq k\}$$

Η ενημέρωση του πίνακα συνδιακύμανσης βασίζεται στην υπόθεση ότι το κέρδος του φίλτρου Kalman έχει υπολογιστεί πριν, από την πρώτη εκ των προηγούμενων σχέσεων. Εάν, εξαιτίας υπολογιστικού λάθους ο υπολογισμός του κέρδους δεν είναι ακριβής ή το κέρδος επιλέγεται με διαφορετικό τρόπο, η σταθεροποιημένη μορφή της εξίσωσης ενημέρωσης του πίνακα συνδιακύμανσης που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί είναι:

$$P(k|k) = [I - K(k) \cdot H] \cdot P(k|k-1) \cdot [I - K(k) \cdot H]^T + K(k) \cdot R \cdot K(k)^T, \text{ Σχέση II-41}$$

Η χρήση της παραπάνω σχέσης θα προσδώσει μεγαλύτερη ευστάθεια στο φίλτρο Kalman. Ο πίνακας συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης ορίζεται ως εξής:

$$P(k) = E\{[x(k) - \hat{x}(k)] \cdot [x(k) - \hat{x}(k)]^T\}$$

Το διάνυσμα του σφάλματος πρόβλεψης μέτρησης είναι:

$$\tilde{z}(k|k-1) = z(k) - \hat{z}(k+1|k) = z(k) - H(k) \cdot \hat{x}(k|k-1) = H(k)\tilde{x}(k|k-1) + v(k),$$

Ο πίνακας συνδιακύμανσης S του σφάλματος πρόβλεψης μέτρησης είναι:

$$S(k) = H(k) \cdot P(k|k-1) \cdot H(k)^T + R(k).$$

Επίσης, συχνά χρησιμοποιείται μια έκδοση του φίλτρου Kalman στην οποία οι φίλτραρισμένες ποσότητες παρακάμπτονται και χρησιμοποιείται πρόβλεψη ενός μόνο βήματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα βολικό για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Οι εξισώσεις για αυτό το φίλτρο Kalman, σε αυτήν την περίπτωση, είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} K_p(k) &= F \cdot P(k|k-1) \cdot H^T \cdot [H \cdot P(k|k-1) \cdot H^T + R]^{-1} \\ \hat{x}(k+1|k) &= F \cdot \hat{x}(k|k-1) + K_p(k) \cdot [z(k) - H \cdot \hat{x}(k|k-1)] \\ P(k+1|k) &= [F - K(k) \cdot H] \cdot P(k|k-1) \cdot F^T + Q \end{aligned}$$

2.6.2 Μη γραμμικό φίλτρο Kalman

Το μη γραμμικό φίλτρο Kalman (Extended Kalman Filter-EKF) αποτελεί μια επέκταση του γραμμικού φίλτρου Kalman που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Το μη γραμμικό φίλτρο Kalman εφαρμόζεται όταν η δυναμική κατάσταση του αντικειμένου είναι μη γραμμική ή όταν υπάρχει μη γραμμική διαδικασία μέτρησης. Σε ένα τέτοιο πρόβλημα η Σχέση II-39 και η II-40 γράφονται, αντίστοιχα, ως εξής:

$$x(k+1) = f[k, x(k)] + g[k, u(k)] + w(k), \text{ Σχέση II-42}$$

$$z(k) = h[k, x(k)] + v(k), \text{ Σχέση II-43}$$

όπου f, g, h μη γραμμικές σχέσεις.

Η εξίσωση ενημέρωσης για το μη γραμμικό φίλτρο Kalman είναι της ίδιας μορφής με την εξίσωση του γραμμικού φίλτρου Kalman:

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k) \cdot \{z(k) - h[\hat{x}(k|k-1)]\}, \text{ Σχέση II-44}$$

όπου $h[\hat{x}(k|k-1)]$ είναι γενικά μια μη γραμμική συνάρτηση μέτρησης, η οποία αντιστοιχεί στην ποσότητα $H \cdot \hat{x}(k|k-1)$ που έχουμε στη περίπτωση γραμμικής μέτρησης. Ο υπολογισμός του κέρδους είναι επίσης όμοιος με αυτόν του γραμμικού φίλτρου Kalman :

$$K(k) = P(k|k-1) \cdot H_x^T(k) \cdot [H_x(k) \cdot P(k|k-1) \cdot H_x^T(k) + R(k)]^{-1}, \text{ Σχέση II-45}$$

όπου H είναι ο γραμμικός πίνακας μέτρησης που ορίζεται ως εξής:

$$H_x(k) = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(k|k-1)}. \text{ Σχέση II-46}$$

Ο γραμμικός πίνακας μέτρησης έχει διαστάσεις $m \times n$ όπου n είναι η διάσταση του εκτιμώμενου διανύσματος κατάστασης και m είναι η διάσταση του διανύσματος μέτρησης. Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι ο υπολογισμός του κέρδους και ο υπολογισμός της εκτίμησης του διανύσματος κατάστασης $\hat{x}(k)$ εξαρτώνται από την προηγούμενη εκτίμηση $\hat{x}(k|k-1)$. Έτσι, μπορεί να υπάρχει μια τάση για το μη γραμμικό φίλτρο Kalman να αποκλίνει εάν οι αρχικές εκτιμήσεις δεν είναι ακριβείς. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση που μετράμε πολλές ποσότητες, η σειρά με την οποία επεξεργαζόμαστε τις μετρήσεις μπορεί να είναι σημαντική. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το γραμμικό φίλτρο, όπου όλες οι μετρήσεις μπορεί να επεξεργάζονται ταυτόχρονα ή με οποιαδήποτε σειρά χωρίς καμία επίδραση στην ακρίβεια των υπολογισμών. Μία προσέγγιση για τη σωστή επιλογή της σειράς επεξεργασίας είναι η δημιουργία προτεραιότητας με βάση την ακρίβεια της κάθε μέτρησης.

Μία πιο συνηθισμένη προσέγγιση είναι το επαναληπτικό μη γραμμικό φίλτρο Kalman (Iterated EKF – IEKF). Χρησιμοποιώντας το IEKF οι σχέσεις II-44, II-45 και II-46 λύνονται επαναληπτικά κάνοντας χρήση της πιο πρόσφατης εκτίμησης του διανύσματος κατάστασης στον πίνακα μετρήσεων H_x . Θεωρώντας N_I επαναλήψεις, έχουμε για την $(n+1)$ επανάληψη ($n = 0, 1, \dots, N_I-1$):

$$\hat{x}(k|k)_{n+1} = \hat{x}(k|k-1) + K(k)_n RES(k)_n$$

όπου $RES(k)_n = z(k) - h[\hat{x}(k|k)_n] - H_x(k)_n [\hat{x}(k|k-1) - \hat{x}(k|k)_n]$ και $\hat{x}(k|k)_0 = \hat{x}(k|k-1)$.

Ο πίνακας μετρήσεων $H_x(k)_n$ επαναπροσδιορίζεται σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιώντας τη Σχέση II-46 και την εκτίμηση $\hat{x}(k|k)_n$, ενώ το κέρδος υπολογίζεται από την σχέση:

$$K(k)_n = P(k|k-1)H_x^T(k)_n [H_x(k)_n P(k|k-1)H_x^T(k)_n + R]^{-1}$$

Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση με κάποια συνθήκη (π.χ. μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, μικρή μεταβολή στην εκτίμηση).

Για το IEKF ο πίνακας συνδιακύμανσης υπολογίζεται εξαρχής και όχι επαναληπτικά [KERR91]. Τόσο για το επαναληπτικό, όσο και για το απλό μη γραμμικό φίλτρο Kalman, ο πίνακας συνδιακύμανσης δίνεται από τη σχέση:

$$P(k|k) = [I - K(k)H_x(k)]P(k|k-1)$$

Για το IEKF στην προηγούμενη σχέση χρησιμοποιούνται οι τιμές του $K(k)$ και $H_x(k)$ της τελευταίας επανάληψης.

2.6.3 Unscented φίλτρο Kalman

Μια άλλη έκδοση του φίλτρου Kalman αποτελεί και το Unscented Kalman φίλτρο (UKF - [JULI96], [WAN01], [JULI96]). Στηρίζεται στην υπόθεση πως είναι ευκολότερο να εκτιμηθεί επιτυχώς μια Γκαουσιανή κατανομή από το να εκτιμηθεί μια αυθαίρετη μη γραμμική συνάρτηση.

Θα αναλυθεί πρώτα ο Unscented μετασχηματισμός και στη συνέχεια ως εφαρμογή θα αναφερθεί το UKF. Ας θεωρήσουμε μία τυχαία μεταβλητή x , διάστασης n , με μέσο όρο \bar{x} και συνδιακύμανση P_{xx} . Η μεταβλητή x συνδέεται με τη μεταβλητή y μέσω μιας μη γραμμικής συνάρτησης f . Η τυχαία μεταβλητή προσεγγίζεται από $2n+1$ σημεία σταθμισμένα με βάρη W :

$$X_0 = x \quad W_0 = k/(n+k)$$

$$X_i = x + \left(\sqrt{(n+k)P_{xx}}\right)_i \quad W_i = 1/2(n+k)$$

$$X_{i+n} = x - \left(\sqrt{(n+k)P_{xx}}\right)_i \quad W_{i+n} = 1/2(n+k)$$

όπου $k \in \mathfrak{R}$, και $\left(\sqrt{(n+k)P_{xx}}\right)_i$ είναι η i -οστή γραμμή ή στήλη του πίνακα τετραγωνικών ριζών του $(n+k)P_{xx}$ και W_i είναι το βάρος του i -οστού σημείου.

Ο μετασχηματισμός ακολουθεί τρία βήματα:

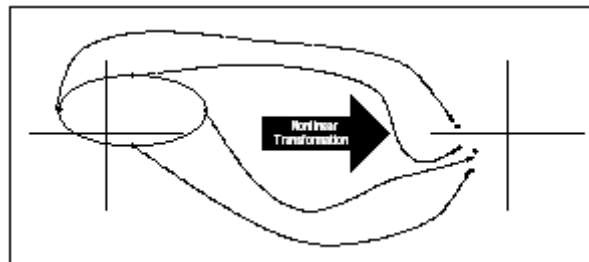
- Για κάθε X_i υπολογίζεται το αντίστοιχο Y_i από τη σχέση $Y_i=f(X_i)$
- Υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος όρος των σημείων Y_i του μετασχηματισμού από τη

$$\text{σχέση } \bar{y} = \sum_{i=0}^{2n} W_i Y_i$$

- Υπολογίζεται η συνδιακύμανση P_{yy} των σημείων του μετασχηματισμού από τη σχέση

$$P_{yy} = \sum_{i=0}^{2n} W_i \{Y_i - \bar{y}\} \{Y_i - \bar{y}\}^T$$

Σχηματικά ο μετασχηματισμός φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Το βασικό πλεονέκτημα του μετασχηματισμού είναι πως οι υπολογιζόμενες τιμές μέσου όρου και συνδιακύμανσης της μεταβλητής y εμπεριέχουν και τους όρους δεύτερης τάξης. Επομένως, σε σύγκριση με το EKF ο υπολογιζόμενος μέσος όρος έχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, δίνοντας έμφαση στην κατανομή του x , υπάρχει η δυνατότητα για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια μια και υψηλότερες τάξης πληροφορία που αποκόπτεται στο EKF από τη γραμμικοποίηση της f , μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο UKF.



Εικόνα 42: Unscented Μετασχηματισμός

Χρησιμοποιώντας τον πιο πάνω μετασχηματισμό δημιουργείται το Unscented Kalman φίλτρο. Πιο συγκεκριμένα, ως θεωρήσουμε διάνυσμα κατάστασης που εκτός της μεταβλητής x περιέχει και το θόρυβο διαδικασίας w . Δηλαδή, θεωρούμε διάνυσμα κατάστασης διάστασης $n^a = n + q$:

$$x^a(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ w(k) \end{bmatrix}$$

Η Σχέση Π-42 γίνεται:

$$x(k+1) = f[x^a(k), u(k), k]$$

ενώ τα $2n^a$ σημεία που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν τα μετασχηματισμένα σημεία βρίσκονται από τη σχέση:

$$\hat{x}^a(k|k) = \begin{pmatrix} \hat{x}(k|k) \\ 0_{q \times 1} \end{pmatrix} \text{ και } P^a(k|k) = \begin{bmatrix} P(k|k) & P_{xw}(k|k) \\ P_{xw}(k|k) & Q(k) \end{bmatrix}$$

όπου P και Q οι συνδιακυμάνσεις του διανύσματος κατάστασης και του θορύβου διαδικασίας αντίστοιχα, ενώ P_{xw} οι συσχετίσεις μεταξύ αυτών. Ο επαναληπτικός αλγόριθμος του Unscented Kalman φίλτρου ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. βρίσκονται τα σημεία του μετασχηματισμού από τη σχέση

$$X_i(k+1|k) = f[X_i^a(k|k), u(k), k]$$

2. υπολογίζεται ο εκτιμώμενος μέσος όρος από τη σχέση: $\hat{x}(k+1|k) = \sum_{i=1}^{2n^a} W_i X_i^a(k+1|k)$

3. υπολογίζεται η εκτιμώμενη συνδιακύμανση από τη σχέση:

$$P(k+1|k) = \sum_{i=1}^{2n^a} W_i \{X_i(k+1|k) - \hat{x}(k+1|k)\} \{X_i(k+1|k) - \hat{x}(k+1|k)\}^T$$

4. υπολογίζονται τα σημεία παρατήρησης που αντιστοιχούν στα σημεία του μετασχηματισμού χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$Z_i(k+1|k) = h[X_i(k+1|k), u(k), k]$$

5. τα εκτιμώμενα σημεία παρατήρησης υπολογίζονται ως εξής:

$$\hat{z}(k+1|k) = \sum_{i=1}^{2n^a} W_i Z_i(k+1|k)$$

6. η συνδιακύμανση¹ του θορύβου διαδικασίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{ww}(k+1|k) = R(k+1) + \sum_{i=1}^{2n^a} W_i \{Z_i(k|k-1) - \hat{z}(k+1|k)\} \{Z_i(k|k-1) - \hat{z}(k+1|k)\}^T$$

7. ο πίνακας συσχέτισης υπολογίζεται ως εξής:

¹ Ο θόρυβος διαδικασίας θεωρείται ανεξάρτητος προσθετικός θόρυβος

$$P_{xz}(k+1|k) = \sum_{i=1}^{2n^a} W_i \{X_i(k|k-1) - \hat{x}(k+1|k)\} \{Z_i(k|k-1) - \hat{z}(k+1|k)\}^T$$

Το Unscented φίλτρο κερδίζει έδαφος σε εφαρμογές εντοπισμού στόχου το τελευταίο διάστημα. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της ευκολότερης εφαρμογής του (δεν χρειάζεται ο υπολογισμός των Ιακωβιανών πινάκων) και της μεγαλύτερης ακρίβειας που προσφέρει.

2.6.4 Φίλτρα πολλαπλών μοντέλων Kalman

Πέραν της χρήσης ενός απλού μοντέλου, είναι αρκετά διαδεδομένη η χρησιμοποίηση πολλαπλών μοντέλων Kalman. Τα φίλτρα πολλαπλών μοντέλων υποθέτουν ότι το σύστημα βρίσκεται σε μια κατάσταση (mode) και εκφράζεται από ένα συγκεκριμένο μοντέλο από τα διαθέσιμα μοντέλα του φίλτρου (ή καλύτερα τράπεζας φίλτρων - filter bank). Η κατηγορία αυτή αναφέρεται σε φίλτρα πολλαπλών μοντέλων και περιλαμβάνει είτε στατικές δομές (static algorithm) είτε δυναμικές και μακροβιανές, οι οποίες και επιτρέπουν τη μετάβαση του συστήματος από μία κατάσταση σε μία άλλη. Τα συστήματα αυτά είναι υβριδικά, αφού, ενώ η μετάβαση καταστάσεων είναι διακριτή διαδικασία, ο θόρυβος είναι συνεχής τυχαία διαδικασία. Τέτοια προσαρμοστικά φίλτρα είναι το GPB (Generalized Pseudo Bayesian), GPB2, IMM (interacting multiple model) και το VS-IMM (Variable structure IMM) ([BARS00]). Τα φίλτρα αυτά δεν είναι βέλτιστα (sub-optimal), αφού η υιοθέτηση βέλτιστου συστήματος προϋποθέτει τη διατήρηση και επεξεργασία όλου του ιστορικού μεταβάσεων σε κάθε σάρωση (π.χ. εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο Viterbi), πράγμα αδύνατο για συστήματα πραγματικού χρόνου. Το δημοφιλέστερο μοντέλο είναι σίγουρα το IMM [BLOM86], το οποίο και διαρκώς τροποποιείται ανάλογα με την εφαρμογή π.χ. [JOHN01]. Στη συνέχεια διατυπώνεται μαθηματικά το πρόβλημα.

Έστω r διαθέσιμα μοντέλα. Κάθε φίλτρο ακολουθεί εξισώσεις της μορφής:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= F_k^i x_k + G_k^i w_k^i \\ z_k &= H_k^i x_k + v_k^i \end{aligned}$$

όπου w και v είναι θόρυβος διαδικασίας και μέτρησης αντίστοιχα, z η μέτρηση, x το διάνυσμα κατάστασης, F ο πίνακας μετάβασης και H ο πίνακας μετρήσεων. Με i δηλώνονται οι ποσότητες σχετικές με το μοντέλο i . Το δυναμικό σύστημα, ως ημι-μακροβιανό, είναι μη γραμμικό. Αν εισαχθούν μη γραμμικότητες και στα μοντέλα κίνησης, τότε γραμμικοποιείται. Στην αρχική του έκδοση το IMM [BLOM86], οι ποσότητες F κλπ. εξαρτώνται από δύο προηγούμενες καταστάσεις, πράγμα που, ενώ είναι πιο ακριβές, δεν υιοθετήθηκε στην συνέχεια (σύμφωνα με τη δημοφιλή έκδοση [BLOM88]). Τα άλματα του συστήματος έχουν τις ακόλουθες πιθανότητες μετάβασης:

$$P\{m_{k+1}^j | m_k^i\} = P\{s_{k+1} = m_j | s_k = m_i\} = \pi_{ij}$$

όπου $m(k,i)$ είναι η κατάσταση που το μοντέλο $m(i)$ είναι το σωστό για τη χρονική στιγμή k . Σε ένα σύστημα πολλαπλών μοντέλων, σημαντικά σημεία σχεδίασης είναι τα ακόλουθα:

- α) Μέγεθος τράπεζας φίλτρων (δύο (2) ή τρία (3) φίλτρα προτείνονται στη βιβλιογραφία, αλλά εξαρτώνται από την εφαρμογή και την υπολογιστική ισχύ του συστήματος)
- β) Επιλογή φίλτρων ή χρήση ίδιων φίλτρων με διαφορετικό θόρυβο διαδικασίας
- γ) Επανεικίνηση φίλτρων για τις περιπτώσεις αλληλεπιδρώντων φίλτρων (όχι για το στατικό)
- δ) Μέθοδος σύντηξης για την ολική εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης. Τρεις μέθοδοι προτείνονται («ελαφριά» απόφαση, «σκληρή» απόφαση και τυχαία απόφαση), στις οποίες το συνολικό διάνυσμα κατάστασης επιλέγεται με πιθανοτικά βάρη – δεσμευμένες πιθανότητες (όπως στην εξίσωση παρακάτω), με βάση το πιο πιθανό ή τυχαία.

$$\hat{x}_{k|k} = E[x_k | z^k] = \sum_i \hat{x}_{k|k}^{(i)} P\{m_k^{(i)} | z^k\}$$

2.6.5 Φίλτρο Αλληλεπιδρώντων Πολλαπλών Μοντέλων (IMM)

Το φίλτρο Αλληλεπιδρώντων Πολλαπλών Μοντέλων (Interactive Multiple Models – IMM) χειρίζεται περιπτώσεις κατά τις οποίες η κίνηση του στόχου δεν μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από ένα μοντέλο κίνησης και απαιτείται συνδυασμός μοντέλων. Τέτοια είναι η περίπτωση ελισσόμενων στόχων ([AMDI02], [POLY02]). Η μέθοδος IMM συνδυάζει τις εκτιμήσεις κατάστασης και τους πίνακες συνδιακύμανσης από τα διάφορα μοντέλα, σύμφωνα με ένα μακροβιανό μοντέλο για την μετάβαση ανάμεσα στις καταστάσεις ελιγμού των κινούμενων στόχων.

Έστω r ο συνολικός αριθμός των χρησιμοποιούμενων μοντέλων (συνήθως $r=3$). Η λειτουργία του φίλτρου χωρίζεται σε δύο στάδια: αρχικά, λαμβάνει χώρα η *αλληλεπίδραση/συγχώνευση* (*interaction/mixing*), κατά την οποία συνδυάζονται οι καταστάσεις και οι πίνακες συνδιακύμανσης P από τα διάφορα μοντέλα, και στην συνέχεια, γίνεται η *πρόβλεψη* (*prediction*) των επόμενων καταστάσεων και πινάκων P με χρήση r παράλληλων φίλτρων.

Σημειώνεται ότι στην ανάλυση που ακολουθεί, χρησιμοποιείται ο συμβολισμός $a(k)$, προκειμένου να δηλωθεί η τιμή του μεγέθους a στην k -οστή σάρωση. Για τα διανύσματα κατάστασης και τους πίνακες συνδιακύμανσης ο συμβολισμός είναι της μορφής $x(k|k-1)$ για τις a priori εκτιμήσεις και $x(k|k)$ για τις a posteriori.

Έστω ότι σε κάθε σάρωση η πιθανότητα μετάβασης της κίνησης του στόχου από το μοντέλο i στο μοντέλο j είναι P_{ij} . Οι πιθανότητες αυτές είναι γνωστές εκ των προτέρων και εκφράζονται από έναν πίνακα μετάβασης πιθανοτήτων P_T , ο οποίος είναι αμετάβλητος. Τα στοιχεία κάθε γραμμής του P_T έχουν άθροισμα 1 ($\sum_{j=1}^r P_{ij} = 1$). Η επιλογή των πιθανοτήτων αυτών γίνεται με διάφορες μεθόδους, οι οποίες περιγράφονται στην συνέχεια.

Μετά την λήψη των δεδομένων στην $k-1$ σάρωση, η κίνηση του στόχου περιγράφεται από το μοντέλο κίνησης i με πιθανότητα $\mu_i(k-1)$. Επομένως ορίζονται συνολικά r πιθανότητες $\mu_i(k-1)$, $i=1,2,\dots,r$. Οι πιθανότητες αυτές ανανεώνονται σε κάθε σάρωση, σύμφωνα με τον τρόπο, που περιγράφεται παρακάτω.

Από τον κανόνα των υπό συνθήκη πιθανοτήτων του Bayes, προκύπτει η υπό συνθήκη πιθανότητα $\mu_{ij}(k-1)$, η οποία αναπαριστά την πιθανότητα η κίνηση να περιγραφόταν από το μοντέλο i στην προηγούμενη σάρωση, δεδομένου ότι περιγράφεται από το μοντέλο j στην $k-1$ σάρωση. Η υπό συνθήκη αυτή πιθανότητα δίνεται από την σχέση:

$$\mu_{ij}(k-1) = \frac{P_{ij}\mu_i(k-1)}{C_j(k-1)}$$

όπου $C_j(k-1)$ η πιθανότητα να περιγράφεται από το μοντέλο j μετά την αλληλεπίδραση. Η πιθανότητα αυτή ορίζεται ως εξής:

$$C_j(k-1) = \sum_{i=1}^r P_{ij}\mu_i(k-1)$$

Αφού υπολογισθούν αυτές οι ποσότητες, ακολουθεί η διαδικασία της *συγχώνευσης (mixing)*, κατά την οποία παράγονται νέες εκτιμήσεις κατάστασης και πίνακες συνδιακύμανσης για κάθε μοντέλο, σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις και για $j=1,2,\dots,r$:

$$\hat{x}_j^0(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^r \mu_{ij}(k-1)\hat{x}_i(k-1|k-1), \text{ Σχέση II-47}$$

$$P_j^0(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^r \mu_{ij}(k-1) \left[P_i(k-1|k-1) + DP_{ij}(k-1) \right], \text{ Σχέση II-48}$$

όπου DP_{ij} είναι μια αύξηση στον πίνακα συνδιακύμανσης, η οποία οφείλεται στην διαφορά της εκτίμησης κατάστασης μεταξύ των μοντέλων i , j και δίνεται από την σχέση:

$$DP_{ij}(k-1|k-1) = Dx_{ij}(k-1)Dx_{ij}^T(k-1)$$

$$Dx_{ij}(k-1) = \hat{x}_i(k-1|k-1) - \hat{x}_j^0(k-1|k-1)$$

Οι εκτιμήσεις κατάστασης x_i είναι αυτές που έχουν προκύψει από τα φίλτρα Kalman της προηγούμενης σάρωσης.

Στην συνέχεια εφαρμόζονται r ξεχωριστά φίλτρα Kalman, τα οποία παράγουν εκτιμήσεις κατάστασης \hat{x}_j , $j=1,2,\dots,r$ για κάθε μοντέλο ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας ως *a priori* εκτιμήσεις, τις τιμές που προκύπτουν από τις σχέσεις II-47 και II-48.

Συνδυάζοντας τις εκτιμήσεις, που δίνουν τα φίλτρα για κάθε μοντέλο, προκύπτει η συνολική εκτίμηση του IMM φίλτρου, η οποία είναι:

$$\hat{x}(k|k-1) = \sum_{j=1}^r C_j(k-1) \hat{x}_j(k|k-1)$$

$$P(k|k-1) = \sum_{j=1}^r C_j(k-1) P_j(k|k-1)$$

Στην συνέχεια ακολουθεί η ανανέωση των πιθανοτήτων μ_i για το επόμενο βήμα. Ορίζεται η στατιστική απόσταση ως εξής:

$$d^2 = \tilde{y}^T S^{-1} \tilde{y}$$

όπου \tilde{y} είναι το διάνυσμα της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής και της αναμενόμενης παρατήρησης και S ο αντίστοιχος πίνακας συνδιακύμανσης. Είναι δηλαδή:

$$\tilde{y}(k) = y(k) - H\hat{x}(k|k-1)$$

$$S(k) = HP(k|k-1)H^T + R$$

Σε κάθε μοντέλο αντιστοιχούν διαφορετικός πίνακας $S_i(k)$ και απόσταση $d_i^2(k)$ για την σάρωση k. Αν ο αριθμός των μετρούμενων μεγεθών είναι M, με γκαουσιανή στατιστική, τότε η συνάρτηση πιθανοφάνειας για το μοντέλο I είναι:

$$\Lambda_i(k) = \frac{\exp[-d_i^2(k)/2]}{\sqrt{(2\pi)^M |S_i(k)|}}$$

Χρησιμοποιώντας τον κανόνα του Bayes, οι πιθανότητες μ_i για την επόμενη σάρωση είναι:

$$\mu_i(k) = \frac{\Lambda_i(k) C_i(k-1)}{cc}$$

όπου η κανονικοποιητική σταθερά cc είναι:

$$cc = \sum_{j=1}^r \Lambda_j(k) C_j(k-1)$$

Η ανάλυση που προηγήθηκε αφορά μοντέλα με ίδια διανύσματα κατάστασης. Στην περίπτωση κατά την οποία τα μοντέλα έχουν διαφορετικά διανύσματα κατάστασης, απαιτείται η μετατροπή όλων των καταστάσεων σε κάποιο κοινό σύνολο πριν την συγχώνευση και η εκ νέου μετατροπή στις αρχικές καταστάσεις πριν το φιλτράρισμα. Η μετατροπή αυτή μπορεί να περιλαμβάνει προσθήκη καταστάσεων ή μετασχηματισμό κάποιων καταστάσεων σε άλλο σύστημα συντεταγμένων. Εκτός από τα διανύσματα κατάστασης, μετασχηματίζονται και οι πίνακες συνδιακύμανσης P. Για τον σκοπό αυτό σχηματίζεται ένας πίνακας μετατροπής, έστω A_{12} , ο οποίος μετασχηματίζει τον P από το σύνολο καταστάσεων ένα (1) στο δύο (2) και ο μετασχηματισμένος P

$$\text{θα είναι } P_{12} = A_{12} P_1 A_{12}^T. \text{ Ο πίνακας μετατροπής } A \text{ προκύπτει με βάση την σχέση } A_{12} = \left. \frac{\partial x_{12}}{\partial x_1} \right|_{\hat{x}_{12}},$$

όπου x_{12} το νέο διάνυσμα κατάστασης και x_1 το αντίστοιχο αρχικό. Μετά την συγχώνευση και πριν

το φιλτράρισμα ακολουθεί αντίστροφη μετατροπή των διανυσμάτων κατάστασης και των πινάκων συνδιακύμανσης P . Για τους πίνακες P θα είναι ανάλογα $P_{21} = A_{21}P_{21}A_{21}^T$, όπου ο A_{21} μετασχηματίζει τον νέο P στον αρχικό.

Το IMM φίλτρο, το οποίο σχεδιάστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας συνδυάζει μοντέλα με ίδια διανύσματα κατάστασης, οπότε δεν απαιτείται κανένας μετασχηματισμός.

Επιλογή των Μακροβιανών Πιθανοτήτων Μετάβασης

Ο ρυθμός μεταβολής των πιθανοτήτων μ περιγράφεται από την εξίσωση :

$$\frac{d\mu}{dt} = A\mu$$

όπου A είναι ένας πίνακας ροής πιθανοτήτων. Δεδομένου του διανύσματος αρχικής πιθανότητας $\mu(t_0)$, η πιο πάνω σχέση έχει λύση για το διάνυσμα πιθανοτήτων $\mu(t_0 + \Delta t)$ για το χρονικό διάστημα T , η οποία είναι:

$$\mu(t_0 + \Delta t) = e^{(A T)} \mu(t_0) = P_T^T(T) \mu(t_0)$$

Επομένως, ο ανάστροφος πίνακας μετάβασης των μακροβιανών πιθανοτήτων είναι :

$$P_T^T(T) = e^{A T}, \quad \text{Σχέση II-49}$$

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να επιλυθεί η Σχέση II-49. Χρησιμοποιώντας έναν μέσο χρόνο παραμονής τ_i , $i=1,2,\dots,r$ για κάθε μοντέλο, τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα A δίνονται από την σχέση:

$$A_{ii} = -\frac{1}{\tau_i}$$

Τα θετικά μη διαγώνια στοιχεία του A επιλέγονται έτσι ώστε το άθροισμα των στηλών να είναι ίσο με μηδέν. Ο περιορισμός αυτός διασφαλίζει ότι η πιθανότητα διατηρείται.

Για παράδειγμα, έστω ένα σύστημα τριών μοντέλων. Τα αποτελέσματα για ένα διάστημα σάρωσης $T = 4\text{sec}$, δείχνουν ότι ένας κατάλληλος μακροβιανός πίνακας μετάβασης είναι ο:

$$P_T^T(4\text{sec}) = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.20 & 0.10 \\ 0.05 & 0.60 & 0.10 \\ 0.10 & 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}, \quad \text{Σχέση II-50}$$

Οι αντίστοιχοι μέσοι χρόνοι παραμονής και ο πίνακας ροής πιθανότητας A βρίσκονται ότι είναι:

$$\tau_1 = 23\text{sec}, \tau_2 = 7\text{sec}, \tau_3 = 16\text{sec},$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.044 & 0.067 & 0.026 \\ 0.015 & -0.136 & 0.036 \\ 0.029 & 0.069 & -0.062 \end{bmatrix}$$

Καθώς το T τείνει στο άπειρο στη Σχέση Π-49 οι στήλες του πίνακα e^{AT} προσεγγίζουν το διάνυσμα πιθανοτήτων, στο οποίο θα συνέκλινε το σύστημα μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα, χωρίς ανανέωση των ιχνών. Για το προηγούμενο παράδειγμα, με τις δοθείσες τιμές για τα στοιχεία του πίνακα A έχουμε:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} e^{AT} = \begin{bmatrix} 0.46 & 0.46 & 0.46 \\ 0.15 & 0.15 & 0.15 \\ 0.39 & 0.39 & 0.39 \end{bmatrix}, \text{ Σχέση Π-51}$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι η κίνηση του στόχου θα περιγράφεται το 46% του χρόνου από το μοντέλο 1, κτλ. Επομένως, παρέχει στον σχεδιαστή του συστήματος έναν δεσμό μεταξύ της επιλογής των παραμέτρων του φίλτρου και των εκ των προτέρων γνωστών χαρακτηριστικών του στόχου.

Μια πιο βολική εναλλακτική λύση της Π-49, για γενική τιμή του T , είναι να καθοριστούν πρώτα τα διαγώνια στοιχεία του A από τους μέσους χρόνους παραμονής:

$$P_{ii}(T) = \max(l_i, 1 - T / \tau_i)$$

όπου l_i είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη πιθανότητα, ώστε η κίνηση του στόχου να περιγράφεται από το μοντέλο i . Σημειώνεται ότι το l_i θα μπορούσε να επιλεγεί από την σχέση μόνιμης κατάστασης, όπως η Π-51. Τότε τα εναπομείναντα μη διαγώνια στοιχεία $P_{ij}(T)$, επιλέγονται σύμφωνα με τις εκ των προτέρων γνωστές πιθανότητες μετάβασης και με τον περιορισμό ότι το άθροισμα των πιθανοτήτων μετάβασης ισούται με την μονάδα. Εφαρμόζοντας αυτή την προσέγγιση στο προηγούμενο παράδειγμα, με την ακριβή λύση για $T = 4\text{sec}$ να δίνεται από την Σχέση Π-50, τότε οι προσεγγιστικές λύσεις για $T = 2\text{sec}$ και $T = 4\text{sec}$ θα είναι :

$$P_T^T(2\text{sec}) = \begin{bmatrix} 0.91 & 0.145 & 0.03 \\ 0.03 & 0.71 & 0.03 \\ 0.06 & 0.145 & 0.94 \end{bmatrix}$$

$$P_T^T(4\text{sec}) = \begin{bmatrix} 0.82 & 0.285 & 0.125 \\ 0.06 & 0.43 & 0.125 \\ 0.12 & 0.285 & 0.75 \end{bmatrix}$$

Συγκρίνοντας τη Σχέση Π-50 με την τελευταία σχέση, είναι φανερό ότι η ιδανική και η προσεγγιστική λύση είναι δυνατόν να διαφέρουν κάπως. Παρόλα αυτά, η εμπειρία έχει δείξει ότι η απόδοση του IMM είναι σθεναρή ως προς την επιλογή των πινάκων πιθανοτήτων μετάβασης.

2.6.6 Συζήτηση

Οι μέθοδοι πρόβλεψης στα συστήματα εντοπισμού με χρήση στα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας βρίσκουν μεγάλη απήχηση τα τελευταία χρόνια ([VAN05]). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μελέτες που συγκρίνουν αλγόριθμους πρόβλεψης για διάφορες εφαρμογές. Πιο συχνές είναι οι μελέτες που αφορούν εντοπισμό οχημάτων (συστήματα αποφυγής συγκρούσεων) ή

αεροπλάνων. Μελέτες που να αναφέρονται σε εκτιμητές πρόβλεψης σε συστήματα εντοπισμού Εικονικής Πραγματικότητας δεν συναντιούνται συχνά. Δίνουμε έμφαση στα αποτελέσματα που αφορούν συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας μια και αυτά παρουσιάζουν συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες.

Στο [AZUM94] χρησιμοποιείται ένα EKF και συγκρίνονται δύο μοντέλα κίνησης με χρήση ή μη αδρανειακών αισθητήρων. Στο [WU00] χρησιμοποιώντας τις ίδιες ομάδες μετρήσεων συγκρίθηκαν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι πρόβλεψης (EKF, εκτιμητής θεωρίας grey, και εκτιμητής extrapolator). Μία σύγκριση μεταξύ ενός EKF και ενός UKF για την εκτίμηση της κατεύθυνσης του στόχου γίνεται στο [LAVI03b]. Μία πολυμορφική προσέγγιση εξετάζεται στο [CHAI99], όπου διάφορα συστημικά μοντέλα χρησιμοποιούνται και κάθε φορά γίνεται ένας συνδυασμός αυτών που οδηγεί στη βέλτιστη εκτίμηση. Στο [EMUR98] αλγόριθμοι πρόβλεψης εφαρμόζονται για την αντιμετώπιση της καθυστέρησης σε μαγνητικό σύστημα εντοπισμού, στο οποίο προστίθεται γυροσκόπιο.

Σε πολλές εργασίες που αφορούν εφαρμογές πρόβλεψης για διαφορετικές εφαρμογές (π.χ. [LAVI03b]) γίνεται σύγκριση μεταξύ του EKF και του UKF, καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως για εφαρμογές πραγματικού χρόνου το δεύτερο παρουσιάζει πλεονεκτήματα. Εντούτοις, στο [VAN05], όπου γίνεται μία σύγκριση μεταξύ του EKF, του UKF και ενός particle¹ φίλτρου, δεν βρίσκονται σημαντικές διαφορές ως προς την απόδοσή τους, ενώ σε συγκεκριμένες περιπτώσεις η απόδοση του EKF κρίνεται καλύτερη. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός πως τα σήματα που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό στόχων σε περιβάλλοντα Εικονικής Πραγματικότητας (και κατ'επέκταση η κίνηση των ανθρώπινων στόχων καθώς αυτοί εκτελούν διαδικασίες χειρισμού ή πλοήγησης σε Εικονικούς Κόσμους) δέχονται με επιτυχία τη γραμμικοποίηση και η posterior πυκνότητα πιθανότητας $(p(x_k | z_{1:k}))^2$ μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί Γκαουσιανή κατανομή.

Εκτιμώντας τα παραπάνω, στη διατριβή αναπτύχθηκε ένα IMM φίλτρο που χρησιμοποιεί τρία διαφορετικά φίλτρα (CV, CA και CTR). Το φίλτρο αυτό δέχεται ως είσοδο την εκτίμηση θέσης από στατικούς αλγόριθμους και πραγματοποιεί βελτιστοποιημένη εκτίμηση της θέσης του στόχου. Προφανώς για τη συγκεκριμένη εφαρμογή θα ήταν φυσιολογική η εφαρμογή μη γραμμικών φίλτρων Kalman (EKF) που μοντελοποιούν τη μη γραμμική διαδικασία των μετρήσεων. Εντούτοις, στην παρούσα διατριβή δεν εφαρμόζονται, μια και η χρήση των προτεινόμενων μεθόδων επεξεργασίας οδηγεί σε πολύ ακριβή αποτελέσματα από τους αισθητήρες του συστήματος. Η εφαρμογή των EKF ίσως να βελτιώνει την ακρίβεια αλλά κάτι τέτοιο δεν κρίνεται σκόπιμο αν λάβει κανείς υπόψη του και την πολυπλοκότητά τους.

¹ Τα particle φίλτρα προσεγγίζουν την a posteriori πυκνότητα πιθανότητας $(p(x_k | z_{1:k}))$ με ένα πεπερασμένο αριθμό δειγμάτων αντί να μεταδίδουν μόνο τη μέση τιμή και τη συνδιακύμανση όπως τα φίλτρα Kalman [DOUC01]

² Θεωρώντας πως η δυναμική κατάσταση του στόχου περιγράφεται ως μακροβιανή διαδικασία

2.7 ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΣΗΣ

Το φίλτρο Kalman μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να πραγματοποιήσει εκτίμηση θέσης ενός κινούμενου στόχου, προβλέποντας την κίνηση και διορθώνοντας την πρόβλεψη αυτή με βάση τις μετρήσεις. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η πρόβλεψη της κίνησης απαιτείται η ανάπτυξη και χρήση από το φίλτρο κάποιων μοντέλων κίνησης, τα οποία θα μοντελοποιούν την κίνηση του στόχου, μέσω της δυναμικής του κατάστασης. Τα μοντέλα αυτά καθορίζουν τους πίνακες F και Q , οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις πρόβλεψης (Σχέση II-40) του φίλτρου Kalman. Όσο καλύτερη είναι η μοντελοποίηση, τόσο ακριβέστερη είναι η εκτίμηση. Στις περιπτώσεις, κατά τις οποίες η κίνηση του στόχου είναι πολύπλοκη και δεν μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από ένα μοντέλο κίνησης, απαιτείται η χρήση συνδυασμού μοντέλων, τα οποία χειρίζεται το φίλτρο IMM που αναλύθηκε πιο πάνω.

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου είναι εξαιρετικά σημαντική για την ικανοποιητική απόδοση του φίλτρου. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές στις οποίες υπάρχει α priori πληροφορία σχετικά με το μοντέλο κίνησης του στόχου (π.χ. αυτοκίνητο). Στην περίπτωση των συστημάτων που εξετάζονται σε αυτή τη διατριβή ο στόχος είναι άνθρωπος, του οποίου η κίνηση (ιδιαίτερα αν μιλάμε για ένα συγκεκριμένο σημείο αυτού, όπως το χέρι) είναι αρκετά δύσκολη. Μαθηματικά μοντέλα για την κίνηση αντικειμένων έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες τρεις (3) δεκαετίες, αλλά βρίσκονται διεσπαρμένα στη βιβλιογραφία και δεν υπάρχει ολοκληρωμένη μελέτη μοντέλων κίνησης. Για κινήσεις ανθρώπινου κεφαλιού σε Εικονικά Περιβάλλοντα έχουν γίνει κατά καιρούς διάφορες προσεγγίσεις ([SAAD99], [JUNG00], [AZUM95a]), ενώ υπάρχουν μερικές μελέτες που συγκεντρώνουν και καταγράφουν διάφορες ανθρώπινες κινήσεις και τις μοντελοποιούν στη συνέχεια για περαιτέρω επεξεργασία [LAVI03]. Σε διαφορετικές εφαρμογές, όπως ο εντοπισμός αυτοκινήτων σε συστήματα αποφυγής συγκρούσεων γίνονται τα τελευταία χρόνια ερευνητικές προσπάθειες συγκέντρωσης, κατηγοριοποίησης και συστηματοποίησης των μοντέλων κίνησης [RONG03], [BLAN99].

Πιο κάτω παρέχεται μία σύνοψη των δυναμικών μοντέλων κίνησης σημειακών αντικειμένων ακολουθώντας την ταξινόμηση που προτείνεται στο [POLY04]. Πρέπει να τονιστεί πως η έμφαση δίνεται στην δυναμικά χρονικά εξελισσόμενη συμπεριφορά ενός αντικειμένου και όχι στην αντίστοιχη χωρική, χωρίς βλάβη της γενικότητας.

Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα είναι τα μοντέλα χώρου κατάστασης (state space models), τα οποία και υπακούν την παρακάτω εξίσωση (παραπλήσιες των σχέσεων II-42 και II-43) στο διακριτό χρόνο:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= f_k(x_k, u_k) + w_k \quad \text{Σχέση II-52} \\z_k &= h_k(x_k) + v_k\end{aligned}$$

όπου x_{k+1} και x_k είναι τα διανύσματα κατάστασης στη σύρση $k+1$ και k αντίστοιχα, u_k , w_k και v_k είναι αντίστοιχα η ακολουθία εισόδων του συστήματος, η ακολουθία θορύβου διαδικασίας (process noise) και η ακολουθία θορύβου παρατήρησης (measurement noise). Η συνάρτηση f και η

συνάρτηση h είναι χρονικά εξαρτώμενες συναρτήσεις - διανύσματα και περιγράφουν τη μετάβαση από τη σάρωση k στη σάρωση $k+1$. Η παραπάνω εξίσωση, μαθηματικά, προκύπτει από τη διακριτοποίηση (με δειγματοληψία) της συνεχούς συνάρτησης.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) + w(t), x_0(t) = t_0$$

$$z(t) = h(x(t), t) + v(t)$$

Κατά τη διακριτοποίηση ([BLAC99]) η είσοδος είναι βηματικά σταθερή με $u_k = u(t), t_k < t < t_{k+1}$. Επίσης, ισχύει:

$$w_k \neq u(t_k), f_k(x_k, u_k) \neq f(x(t_k), u(t_k), t_k)$$

Στην πραγματικότητα, είναι πιο σωστή η μικτή περιγραφή του δυναμικού συστήματος, λόγω του γεγονότος ότι, ενώ το αντικείμενο κινείται σε συνεχή χρόνο, οι παρατηρήσεις είναι διακριτές. Λόγω, όμως, της ευκολίας και της συστηματοποίησης των διακριτών μοντέλων έναντι των συνεχών, επιλέγουμε τα πρώτα.

Ακολουθώντας την ταξινόμηση που προτείνεται στο [POLY04] τα μαθηματικά μοντέλα που αφορούν στην κίνηση ενός στόχου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Ελιγμού αντικειμένων: η κίνηση ενός αντικειμένου μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε κίνηση σταθερής ταχύτητας ή ομοιόμορφη κίνηση σε ένα αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων και σε κίνηση με ελιγμούς.
- Μοντελοποίησης εισόδου: τα μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε κατηγορίες ανάλογα με τη μοντελοποίηση του διανύσματος εισόδου. Έτσι, η είσοδος δύναται να μοντελοποιηθεί ως διαδικασία:
 - Λευκού θορύβου που αντιστοιχεί σε μοντέλα σταθερής ταχύτητας, σταθερής επιτάχυνσης και πολυωνυμικά μοντέλα
 - Μαρκοβιανή διαδικασία με χρονική αυτοσυσχέτιση που αντιστοιχεί στην οικογένεια μοντέλων Singer και σε
 - Ημι-μαρκοβιανές διαδικασίες (jump Markov)
- Χώρου κατάστασης: διαχωρισμοί προκύπτουν επίσης από τη διάσταση του διανύσματος κατάστασης και του χώρου (τρι-, δι-, μονοδιάστατα), την ποσότητα που μοντελοποιείται ως θόρυβος (επιτάχυνση, παράγωγος επιτάχυνσης κλπ.) ή ακόμα και το αρχικό μοντέλο (διακριτό, συνεχές ή διακριτοποιημένο συνεχές).

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα πιο διαδεδομένα μοντέλα της βιβλιογραφίας, όπως δίνονται και στο [POLY04]:

Μοντέλο	Συνθήκη
Σταθερής ταχύτητας	$a(t) = w(t)$

Μοντέλο	Συνθήκη
Σταθερής επιτάχυνσης	$\mathcal{A}(t) = w(t)$ $a_{k+1} - a_k = w_k$
Πολυωνομικά n-τάξης	$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & \dots & a_n \\ b_0 & b_1 & \dots & b_n \\ c_0 & c_1 & \dots & c_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ \dots \\ t^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} wx(t) \\ wy(t) \\ wz(t) \end{bmatrix}, \text{ wi WGN}$
Jerk	$\mathcal{A}(t) = w(t)$
Σταθερής γωνιακής ταχύτητας	$\mathcal{A}(t) = w(t)$ $\omega_{k+1} - \omega_k = w_k$
Μαρκοβιανά Μοντέλα	Συνθήκη
Singer επιτάχυνσης	Πρώτης τάξης: $\mathcal{A}(t) = -\beta a(t) + w(t), Ra(\tau) = \sigma^2 e^{-\beta\tau}$ Δεύτερης τάξης: $Ra(\tau) = \sigma^2 e^{-\beta\tau} \cos(\omega\tau)$
Singer Jerk	$\mathcal{A}(t) = -\beta \mathcal{A}(t) + w(t)$
Προσαρμοστικό	$\mathcal{A}(t) = -\beta[a(t) + \bar{a}(t)] + w(t), \text{ με } \bar{a}(t) \text{ υπολογιζόμενο σε κάθε σάρωση, αλλά σταθερό κατά τη διάρκειά της και αντίστοιχα για jerk:}$ $\mathcal{A}(t) = -\beta \mathcal{A}(t) + w(t) + \bar{\mathcal{A}}(t)$
Μαρκοβιανό 1 ^{ης} τάξης για CTR	$\mathcal{A}(t) = -\beta \omega(t) + w(t)$
Ημι-Μαρκοβιανά Μοντέλα	Συνθήκη
Ημι-Μαρκοβιανή διαδικασία για την επιτάχυνση	Υπόθεση: Διακριτά επίπεδα επιτάχυνσης \bar{a}_i , η επιτάχυνση μεταβαίνει σε μία από τις στάθμες με μαρκοβιανό πίνακα μεταβάσεων, η διάρκεια ελιγμού (sojourn time) έχει εκθετική κατανομή.
Μοντέλο ανανέωσης	Υπόθεση: Διακριτά επίπεδα γωνιακής ταχύτητας $\bar{\omega}_i$, η γωνιακή ταχύτητα μεταβαίνει σε μία από τις στάθμες με μαρκοβιανό πίνακα μεταβάσεων, η διάρκεια ελιγμού (sojourn time) έχει κατανομή Γ.

Πίνακας 8: Σύνοψη κυριότερων μοντέλων κίνησης

Έστω ότι η δυναμική κατάσταση του στόχου περιγράφεται από την σχέση:

$$x_k = F_A x_{k-1} + G_A w_{k-1}, \text{ Σχέση II-53}$$

όπου F_A είναι ο πίνακας μετάβασης για το μοντέλο κίνησης A (=CV, CA, CTR ή Singer), ο οποίος πραγματοποιεί την μετάβαση της κατάστασης ανάμεσα σε δύο διαδοχικές σαρώσεις, οι οποίες απέχουν, χρονικά, διάστημα T. Τα στοιχεία του πίνακα F προκύπτουν σύμφωνα με την σχέση:

$$F_A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\hat{x}}, \text{ Σχέση II-54}$$

όπου η συνάρτηση f δίνεται από τη Σχέση II-52.

Το διάνυσμα w περιέχει, μια και αναφερόμαστε στο τρισδιάστατο πρόβλημα εντοπισμού, τρεις κανονικές τυχαίες μεταβλητές, οι οποίες περιγράφουν τον θόρυβο διαδικασίας στους άξονες x,y,z που θεωρούμε πως έχει μηδενική μέση τιμή και συνδιακυμάνσεις $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ αντίστοιχα.

Ο πίνακας G είναι ο πίνακας που συνδέει τον θόρυβο αυτό με την κατάσταση του συστήματος. Ο θόρυβος διαδικασίας έχει πίνακα συνδιακύμανσης :

$$Q = E\{G_A \text{var}(w_k) G_A^T\}, \text{ Σχέση II-55}$$

ο οποίος αναπαριστά την αβεβαιότητα στην επίτευση κατάστασης εξαιτίας της τυχαίας δυναμικής κατάστασης του στόχου και της μη τέλει μοντελοποίησης της. Ο πίνακας αυτός επιλέγεται με βάση κάποια πειραματικά αποτελέσματα, όπως η εξομοίωση Monte Carlo και αποτελεί χαρακτηριστικό του μοντέλου κίνησης.

2.7.1 Μοντέλο Σταθερής Ταχύτητας (Constant Velocity – CV)

Θεωρούμε ότι ο στόχος κινείται με σταθερή ταχύτητα και στους τρεις άξονες. Το διάνυσμα κατάστασης εμπεριέχει τις 3 συνιστώσες (στους άξονες x, y, z) της θέσης και της ταχύτητας του στόχου, δηλαδή: $x_k = [x \quad y \quad z \quad \dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}]^T = [x \quad v_x \quad y \quad v_y \quad z \quad v_z]^T$, όπου v (v_x, v_y, v_z) το διάνυσμα ταχύτητας αυτού. Αντίστοιχα θεωρούμε πως $w_k = [w_x \quad w_y \quad w_z]^T$. Η επιτάχυνση του στόχου θεωρείται μηδενική ή καλύτερα μοντελοποιείται ως λευκός θόρυβος που αντιστοιχεί στην απόκλιση της πραγματικής κίνησης με τη μοντελοποίηση που τίθεται.

Ο πίνακας μετάβασης F και ο πίνακας G, δεδομένου ότι η επιτάχυνση είναι μηδενική και η ταχύτητα παραμένει αμετάβλητη, θα είναι, σύμφωνα με τη Σχέση II-54 και τις εξισώσεις της μηχανικής:

$$F_{CV} = \text{diag}[F_1, F_1, F_1], \text{ όπου } F_1 = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$G_{CV} = \text{diag}[G_1, G_1, G_1], \text{ όπου } G_1 = \begin{bmatrix} T^2 \\ \sqrt{2} \\ T \end{bmatrix},$$

Οι τιμές w_k αντιστοιχούν σε ακολουθία λευκού θορύβου μηδενικής μέσης τιμής, με συνιστώσες τις θορυβώδεις «επιταχύνσεις» στους τρεις άξονες κίνησης αντίστοιχα. Σύμφωνα με τη Σχέση Π-55, ο πίνακας συνδιακύμανσης θορύβου διαδικασίας Q θα είναι :

$$Q_{CV} = E\{G_{CV} \cdot \text{var}(w_k) \cdot G_{CV}^T\} = \begin{bmatrix} T^4/4 & T^3/2 \\ T^3/2 & T^2 \end{bmatrix} \cdot \text{var}(w_k)$$

Πολλές φορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί διάνυσμα κατάστασης το οποίο περιέχει και τις συνιστώσες της επιτάχυνσης με αποτέλεσμα οι πιο πάνω σχέσεις να αλλάζουν. Έχει αποδειχθεί, βέβαια, πως η συγκεκριμένη λύση μειώνει την απόδοση του εκτιμητή.

2.7.2 Μοντέλο Σταθερής Επιτάχυνσης (Constant Acceleration – CA)

Το μοντέλο σταθερής επιτάχυνσης ανήκει στην κατηγορία των μοντέλων ελιγμών. Τον ελιγμό του στόχου προκαλεί η είσοδος u (Σχέση Π-52). Αυτή είναι ντετερμινιστική από τη φύση της και άγνωστη στον ιχνηλάτη. Η είσοδος αγνοείται από το ομοιόμορφο μοντέλο. Ο προσδιορισμός της εισόδου γίνεται με βάση ντετερμινιστικές θεωρίες εκτίμησης παραμέτρων, οι οποίες, όμως, υποθέτουν ότι η είσοδος είναι σταθερή για μεγάλα χρονικά παράθυρα, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμησή τους. Η υπόθεση, βέβαια, αυτή απέχει από την πραγματικότητα. Συνηθέστερα, η είσοδος μοντελοποιείται ως τυχαία διαδικασία: είτε ως λευκός θόρυβος είτε ως μακροβιανή/ημι-μακροβιανή διαδικασία.

Δύο είναι τα βασικά απλά μοντέλα ελιγμών ([BARS01, POLY04]). Το πρώτο είναι το μοντέλο λευκού θορύβου επιτάχυνσης, το οποίο μοντελοποιεί την επιτάχυνση ως ασυσχέτιστη τυχαία μεταβλητή λευκού θορύβου. Το μοντέλο αυτό ταυτίζεται με το αντίστοιχο σταθερής ταχύτητας. Οι όποιες διαφορές αναφέρονται στον ορισμό και στα επίπεδα θορύβου διαδικασίας που επιλέγονται. Το μοντέλο αυτό και τροποποιήσεις του (π.χ. μεταβλητά επίπεδα θορύβου ανάλογα με τις παρατηρήσεις και τις εκτιμήσεις), συχνά προτιμάται λόγω της ευκολίας υλοποίησής του για όχι πολύ ελισσόμενα, κινούμενα αντικείμενα. Το δεύτερο απλούστερο μοντέλο ελιγμών ονομάζεται μοντέλο επιτάχυνσης Wiener ή απλούστερα μοντέλο σταθερής επιτάχυνσης (constant acceleration – CA). Το μοντέλο υποθέτει ότι η επιτάχυνση είναι διαδικασία Wiener ή γενικότερα ασυσχέτιστη τυχαία μεταβλητή και συναντιέται με δύο διαφορετικές εκδοχές: η πρώτη αναφέρεται στο μοντέλο λευκού θορύβου jerk¹ και υποθέτει $\dot{a}(t) \approx 0$, ενώ η δεύτερη ονομάζεται μοντέλο επιτάχυνσης ακολουθίας Wiener. Για το τελευταίο, θεωρώντας ότι ο στόχος κινείται με σταθερή επιτάχυνση και στους τρεις άξονες και έχοντας διάνυσμα κατάστασης:

$$x_k = [x \quad \dot{x} \quad \ddot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad \ddot{y} \quad z \quad \dot{z} \quad \ddot{z}]^T = [x \quad v_x \quad a_x \quad y \quad v_y \quad a_y \quad z \quad v_z \quad a_z]^T, \text{ όπου}$$

$a = (a_x, a_y, a_z)$ το διάνυσμα επιτάχυνσης του στόχου, ο πίνακας μετάβασης F και ο πίνακας G θα είναι:

¹ Jerk είναι η παράγωγος της επιτάχυνσης

$$F_{CA} = \text{diag}[F_1, F_1, F_1], \text{ όπου } F_1 = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$G_{CV} = \text{diag}[G_1, G_1, G_1], \text{ όπου } G_1 = \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Ο πίνακας συνδιακύμανσης του θορύβου διαδικασίας είναι:

$$Q = E\{G_{cv} \text{ var}(w_k) G_{cv}^T\} = \begin{bmatrix} T^4/4 & T^3/2 & T^2/2 \\ T^3/2 & T^2 & T \\ T^2/2 & T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^2 \end{bmatrix}$$

2.7.3 Μοντέλο Σταθερής Γωνιακής Ταχύτητας – 3Δ (3D Constant Turn Rate – CTR)

Τα προηγούμενα μοντέλα βασίζονται κυρίως σε τυχαίες διαδικασίες και όχι στην κινηματική του αντικειμένου. Έτσι, είναι ικανά να περιγράψουν χρονικές συσχετίσεις, ενώ τα μοντέλα στροφής και επίπεδης κίνησης περιγράφουν πιο αξιόπιστα τροχιές κινούμενων αντικειμένων στο χώρο. Το πιο διαδεδομένο μοντέλο είναι το μοντέλο στροφής με σταθερή ταχύτητα (constant turn rate-CTR).

Σε αυτό το μοντέλο η κίνηση του στόχου γίνεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από ένα σταθερό σημείο, με διάνυσμα θέσης \mathbf{p}_0 . Η γραμμική ταχύτητα του στόχου \mathbf{v} θα δίνεται από την σχέση :

$$\mathbf{v} = \omega(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0), \text{ Σχέση II-56}$$

όπου ω το διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας και \mathbf{p} το διάνυσμα θέσης του κινούμενου στόχου. Η επιτάχυνση \mathbf{a} και η γωνιακή ταχύτητα δίνονται από τις σχέσεις::

$$\mathbf{a} = \omega \times \mathbf{v} \text{ και } \omega = \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{a}}{|\mathbf{v}|^2}, \text{ Σχέση II-57}$$

Για στόχο κινούμενο με σταθερή ταχύτητα, κάθετη στο διάνυσμα επιτάχυνσης η προηγούμενη σχέση απλοποιείται και γίνεται:

$$\omega = \frac{|\mathbf{a}|}{|\mathbf{v}|} \text{ Σχέση II-58}$$

Γράφοντας τη Σχέση II-57 $\mathbf{a} = \omega \times \mathbf{v}$ ως μακροβιανή διαδικασία, προκύπτει :

$$\dot{\mathbf{a}}(t) = -\omega^2(t) \cdot \mathbf{v}(t) + \dot{\omega}(t),$$

όπου \dot{W} ο ρυθμός μεταβολής του διανύσματος της επιτάχυνσης και W το διάνυσμα του λευκού θορύβου μηδενικής μέσης τιμής, ο οποίος εισέρχεται στο σύστημα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, και όπως περιγράφεται στο [RONG03], το μοντέλο κίνησης που αναπτύχθηκε για την παρούσα εργασία, με διάνυσμα κατάστασης:

$$x_k = [x \quad \dot{x} \quad \ddot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad \ddot{y} \quad z \quad \dot{z} \quad \ddot{z}]^T$$

έχει πίνακα μετάβασης F_{CTR} :

$$F_{CTR} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin(\omega t)}{\omega} & \frac{[1 - \cos(\omega t)]}{\omega^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & \frac{\sin(\omega t)}{\omega} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{\sin(\omega t)}{\omega} & \frac{[1 - \cos(\omega t)]}{\omega^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\omega t) & \frac{\sin(\omega t)}{\omega} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{\sin(\omega t)}{\omega} & \frac{[1 - \cos(\omega t)]}{\omega^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\omega t) & \frac{\sin(\omega t)}{\omega} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}$$

και πίνακα G_{CTR} :

$$G_{CTR} = \begin{bmatrix} \frac{\omega T - \sin(\omega T)}{\omega^3} & 0 & 0 \\ \frac{1 - \cos(\omega T)}{\omega^2} & 0 & 0 \\ \frac{\sin(\omega T)}{\omega} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega T - \sin(\omega T)}{\omega^3} & 0 \\ 0 & \frac{1 - \cos(\omega T)}{\omega^2} & 0 \\ 0 & \frac{\sin(\omega T)}{\omega} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\omega T - \sin(\omega T)}{\omega^3} \\ 0 & 0 & \frac{1 - \cos(\omega T)}{\omega^2} \\ 0 & 0 & \frac{\sin(\omega T)}{\omega} \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας συνδιακύμανσης Q θα είναι $Q = G_{CTR} E\{ww^T\} G_{CTR}^T$, όπου

$$p = E\{ww^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \text{ ο πίνακας που περιέχει τις διακυμάνσεις του θορύβου } w \text{ για}$$

τους τρεις άξονες. Σε όλους τους παραπάνω πίνακες, το ω δίνεται από τη σχέση II-58.

Το μοντέλο κίνησης σταθερής γωνιακής ταχύτητας μπορεί να περιγραφεί και από άλλα διανύσματα κατάστασης. Μια περίπτωση είναι η χρήση του διανύσματος

$$x = [x \quad u_x \quad y \quad u_y \quad \omega]^T, \text{ το οποίο περιγράφει την στροφή στο επίπεδο } x-y \text{ με μεταβλητή το } \omega.$$

Στην περίπτωση αυτή ([POLY04]), για τη γωνιακή ταχύτητα θα έχουμε: $\omega_{k+1} = \omega_k$, ενώ οι εξισώσεις κατάστασης είναι της μορφής:

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k) + G_{CTR} w_k$$

όπου

$$G_{CTR} = \begin{bmatrix} T^2/2 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^2/2 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T, w_k = [w_x \quad w_y \quad w_\omega]^T$$

Οι τιμές w_k αντιστοιχούν σε ακολουθία λευκού θορύβου μηδενικής μέσης τιμής, όπου w_x & w_y είναι οι θορυβώδεις «επιταχύνσεις» στους δύο άξονες κίνησης, αντίστοιχα, και w_ω ο θόρυβος που αντιστοιχεί στη γωνιακή ταχύτητα. Η εξίσωση κατάστασης δεν είναι γραμμική ως προς τον πίνακα μετάβασης. Γι' αυτό τον λόγο ο πίνακας μετάβασης βρίσκεται με γραμμικοποίηση από την παρακάτω σχέση:

$$F_{CTR} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\hat{x}}$$

όπου \hat{x} είναι ο χώρος γραμμικοποίησης του πίνακα μετάβασης που αναφέρεται στην εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης κατά την προηγούμενη σάρωση του συστήματος. Ο πίνακας μετάβασης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$F_{CTR} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\omega T)/\omega & 0 & -(1 - \cos(\omega T))/\omega & f_{15} \\ 0 & \cos(\omega T) & 0 & -\sin(\omega T) & f_{25} \\ 0 & (1 - \cos(\omega T))/\omega & 1 & \sin(\omega T)/\omega & f_{35} \\ 0 & \sin(\omega T) & 0 & \cos(\omega T) & f_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{x=\hat{x}}$$

$$f_{15} = \frac{\partial x}{\partial \omega} = T \cdot (U_x \cdot ds_w - U_y \cdot dc_w) \quad f_{25} = \frac{\partial U_x}{\partial \omega} = -T \cdot (U_x \cdot \sin(\omega T) + U_y \cdot \cos(\omega T))$$

$$f_{35} = \frac{\partial y}{\partial \omega} = T \cdot (U_x \cdot dc_w + U_y \cdot ds_w) \quad f_{45} = \frac{\partial U_y}{\partial \omega} = T \cdot (U_x \cdot \cos(\omega T) - U_y \cdot \sin(\omega T))$$

$$dsw = \frac{\cos(\omega T)}{\omega} - \frac{\sin(\omega T)}{\omega^2 T} \quad dcw = \frac{\sin(\omega T)}{\omega} - \frac{1}{\omega^2 T} + \frac{\cos(\omega T)}{\omega^2 T}$$

Ο πίνακας διακύμανσης για τον θόρυβο διαδικασίας προκύπτει από την:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{T^4}{4} \text{var}(w_x) & \frac{T^3}{2} \text{var}(w_x) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{T^3}{2} \text{var}(w_x) & T^2 \text{var}(w_x) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T^4}{4} \text{var}(w_y) & \frac{T^3}{2} \text{var}(w_y) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T^3}{2} \text{var}(w_y) & T^2 \text{var}(w_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{var}(w_\omega) \end{bmatrix}$$

Στο μοντέλο αυτό η κίνηση στον άξονα z ανιχνεύεται με χρήση ενός δευτέρου (decoupled) φίλτρου.

Άλλη περίπτωση είναι η χρήση του διανύσματος κατάστασης $x = [x \ y \ h \ \omega \ U]^T$, το οποίο περιλαμβάνει τις μεταβλητές θέσης, τη γωνία στροφής h, τη γωνιακή ταχύτητα ω και το μέτρο της ταχύτητας U. Το μοντέλο αυτό αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως nearly CTR (NCTR). Για το μέτρο και τη γωνία του διανύσματος της ταχύτητας και τη γωνιακή ταχύτητα θα έχουμε:

$$\phi_{k+1} = \phi_k + \omega_k \cdot T$$

$$\omega_{k+1} = \omega_k$$

$$U_{k+1} = U_k$$

Ο πίνακας μετάβασης F_{NCTR} θα έχει την παρακάτω μορφή:

$$F_{NCTR} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & f_{13} & f_{14} & f_{15} \\ 0 & 1 & f_{23} & f_{24} & f_{25} \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

όπου:

$$f_{13} = \frac{\partial x}{\partial h} = -T \cdot (u_x \cdot cw + u_y \cdot sw), \quad f_{14} = \frac{\partial x}{\partial \omega} = T \cdot (u_x \cdot dsw - u_y \cdot dcw),$$

$$f_{15} = \frac{\partial x}{\partial s} = T \cdot (sw \cdot \cos(\phi) - cw \cdot \sin(\phi)), \quad f_{23} = \frac{\partial y}{\partial h} = T \cdot (\hat{U}_x \cdot sw - \hat{U}_y \cdot cw)$$

$$f_{24} = \frac{\partial y}{\partial \omega} = T \cdot (u_x \cdot dcw + u_y \cdot dsw), \quad f_{25} = \frac{\partial y}{\partial s} = T \cdot (sw \cdot \sin(\phi) + cw \cdot \cos(\phi))$$

$$dsw = \frac{\cos(\omega T)}{\omega} - \frac{\sin(\omega T)}{\omega^2 T}, \quad dcw = \frac{\sin(\omega T)}{\omega} - \frac{1}{\omega^2 T} + \frac{\cos(\omega T)}{\omega^2 T}$$

ενώ:

$$G_{NCTR} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & T & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T \end{bmatrix}^T, \quad w_k = [w_a \quad w_\omega]^T$$

Ο πίνακας διακύμανσης για τον θόρυβο διαδικασίας προκύπτει από την:

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^2 \text{var}(\omega) & T \text{var}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & T \text{var}(\omega) & \text{var}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T^2 \text{var}(a) \end{bmatrix}$$

2.7.4 Μοντέλο Επιτάχυνσης Singer

Το μοντέλο αυτό δεν έχει υλοποιηθεί στη διατριβή αυτή, αλλά παρουσιάζεται εδώ για λόγους πληρότητας, εξαιτίας της σπουδαιότητάς του στα μοντέλα κίνησης.

Το διάνυσμα κατάστασης στην περίπτωση αυτή είναι το εξής:

$$x_k = [x \quad \dot{x} \quad \ddot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad \ddot{y} \quad z \quad \dot{z} \quad \ddot{z}]^T$$

Η επιτάχυνση θεωρείται ως μια μαρκοβιανή διαδικασία πρώτης τάξης της μορφής:

$$a(k+1) = \rho_m a(k) + \sqrt{1 - \rho_m^2} \sigma_m r(k)$$

όπου $\rho_m = e^{-\beta T}$, με $\beta = 1/\tau_m$.

Η τ_m είναι σταθερά χρόνου και η σ_m η τυπική απόκλιση. Η $r(k)$ είναι κανονική τυχαία μεταβλητή, μηδενικής μέσης τιμής και T είναι το διάστημα δειγματοληψίας.

Ο πίνακας μετάβασης F_{Singer} θα είναι:

$$F_{Singer} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{\beta^2}(-1 + \beta T + \rho_m) \\ 0 & 1 & \frac{1}{\beta}(1 - \rho_m) \\ 0 & 0 & \rho_m \end{bmatrix}$$

Επειδή το διάστημα T είναι συνήθως μικρότερο από την σταθερά τ_m , μια δεύτερης τάξης προσέγγιση χρησιμοποιείται συχνά:

$$F_{Singer} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T\left(1 - \frac{T}{2\tau_m}\right) \\ 0 & 0 & \rho_m \end{bmatrix}$$

Η ακριβής λύση του πίνακα συνδιακύμανσης Q είναι:

$$Q = \frac{2\sigma_m^2}{\tau_m} \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix}$$

$$\text{όπου } q_{11} = \frac{1}{2\beta^5} \left[1 - e^{-2\beta T} + 2\beta T + \frac{2\beta^3 T^3}{3} - 2\beta^2 T^2 - 4\beta T e^{-\beta T} \right]$$

$$q_{12} = \frac{1}{2\beta^4} \left[e^{-\beta T} + 1 - 2e^{-\beta T} + 2\beta T e^{-\beta T} - 2\beta T + \beta^2 T^2 \right]$$

$$q_{13} = \frac{1}{2\beta^3} \left[1 - e^{-2\beta T} - 2\beta T e^{-\beta T} \right]$$

$$q_{22} = \frac{1}{2\beta^3} \left[4e^{-\beta T} - 3 - e^{-2\beta T} + 2\beta T \right]$$

$$q_{23} = \frac{1}{2\beta^2} \left[e^{-2\beta T} + 1 - 2e^{-\beta T} \right]$$

$$q_{33} = \frac{1}{2\beta} \left[1 - e^{-2\beta T} \right]$$

Στην περίπτωση κατά την οποία το T είναι μικρό ($T \ll \tau_m$), ο πίνακας Q γίνεται:

$$\lim_{\beta T \rightarrow 0} Q = \frac{2\sigma_m^2}{\tau_m} \begin{bmatrix} \frac{T^5}{20} & \frac{T^4}{8} & \frac{T^3}{6} \\ \frac{T^4}{8} & \frac{T^3}{3} & \frac{T^2}{2} \\ \frac{T^3}{6} & \frac{T^2}{2} & T \end{bmatrix}$$

και με παρόμοιο τρόπο, ο πίνακας μετάβασης F_{Singer} θα είναι:

$$\lim_{\beta T \rightarrow 0} F_{Singer} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 1 & 1 & T \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Αντίστοιχα, αν η σταθερά χρόνου είναι μικρή ($\tau_m \ll T$), είναι αδύνατο να γίνει μια ακριβής εκτίμηση της επιτάχυνσης και επομένως, το φίλτρο χρησιμοποιεί μόνο την θέση και την ταχύτητα ως καταστάσεις. Στην περίπτωση αυτή, ο πίνακας μετάβασης και ο πίνακας συνδιακύμανσης γίνονται:

$$F_{Singer} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, Q = 2\sigma_m^2 \tau_m \begin{bmatrix} \frac{T^3}{2} & \frac{T^2}{2} \\ \frac{3}{T^2} & T \end{bmatrix}$$

Η εμπειρία έχει δείξει ότι η χρήση της επιτάχυνσης στο διάνυσμα κατάστασης έχει αξία, όταν είναι διαθέσιμη η μέτρηση ταχύτητας. Μέτρηση θέσης συνεπάγεται ακριβή εκτίμηση επιτάχυνσης μόνο στην περίπτωση κατά την οποία $\tau_m \geq 10T$, ενώ ακριβείς εκτιμήσεις θέσης και ταχύτητας μπορούν να γίνουν και χωρίς την εκτίμηση επιτάχυνσης. Επομένως, στην περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει μέτρηση ταχύτητας, το διάνυσμα κατάστασης θα περιέχει μόνο θέση και ταχύτητα..

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο της διατριβής. Εξετάστηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας για το σύστημα εντοπισμού με χρήση ακουστικών αισθητήρων. Αναλύθηκαν οι διαφορετικές πιθανές τοπολογίες του συστήματος με ταυτόχρονη επεξήγηση των παραμέτρων που τις χαρακτηρίζουν. Δόθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά της διάδοσης των ακουστικών κυμάτων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του συστήματος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς, μια και αυτοί θα αποτελέσουν τους πομποδέκτες του συστήματος. Ταυτόχρονα αναλύονται οι διαφορετικοί αλγόριθμοι τριμεροποίησης. Αυτοί διακρίνονται σε αλγόριθμους χωρίς μνήμη, που στηρίζονται στην εκτίμηση των συντεταγμένων του στόχου με ταυτόχρονες μετρήσεις και σε αυτούς με μνήμη (δυναμικοί) που λαμβάνουν υπόψη τις προηγούμενες εκτιμήσεις για τη βελτίωση της κάθε νέας εκτίμησης. Έτσι αναλύονται ένας αλγόριθμος ελάχιστων τετραγώνων, μία αλγεβρική μέθοδος επίλυσης του προβλήματος της τριμεροποίησης και μία μέθοδος από κοινού μέγιστης πιθανοφάνειας. Επίσης, αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των φίλτρων Kalman που αποτελούν αποδεδειγμένα τους βέλτιστους γραμμικούς εκτιμητές. Ταυτόχρονα, δίνονται διάφορες επεκτάσεις των φίλτρων Kalman που αφορούν στην αντιμετώπιση μη γραμμικών φαινομένων ή διαδικασιών (Extended Kalman Filter). Αναλύονται μια σειρά μοντέλων κίνησης και η αρχιτεκτονική του φίλτρου των πολλαπλών αλληλεπιδρώντων μοντέλων.

Από την ανάλυση που έγινε προκύπτει πως το σύστημα ακουστικού εντοπισμού θα πρέπει να ενσωματώνει την πληροφορία της θερμοκρασίας μια και αυτή είναι η βασική εξωγενής παράμετρος που αλλοιώνει σημαντικά τις μετρήσεις (η υγρασία και η επίδραση της συχνότητας στη μεταβολή της εξασθένησης ισχύος των ακουστικών κυμάτων έχει σαφέστατα μικρότερη επίδραση). Επιπρόσθετα, η ανάλυση της βελτίωσης που επιφέρει η χρήση πλεονασματικών διατάξεων απέδειξε πως αυτή είναι μικρή σε σχέση με το υπολογιστικό κόστος. Από τις διαφορετικές τοπολογίες που εξετάστηκαν προτείνεται η τοπολογία «μέσα-έξω», που επιτρέπει την ανάλυση των μετρήσεων απόστασης σε

πραγματικό χρόνο, χωρίς να εισάγει την καθυστέρηση του χρόνου διαδρομής. Για το πρόβλημα της ενσύρματης επικοινωνίας προτείνεται η χρήση τοπολογίας «έξω-μέσα» με ταυτόχρονη παρουσία υπέρυθρης ζεύξης για το συγχρονισμό των πομπών και δεικτών του συστήματος, και τη χρήση κατάλληλων μοντέλων κίνησης.

Από την ανάλυση των αλγορίθμων τριμεροποίησης προκύπτει πως οι καταλληλότεροι αλγόριθμοι προς εφαρμογή είναι τα μη γραμμικά φίλτρα Kalman, που μπορούν να εκτιμήσουν σε πραγματικό χρόνο τη δυναμική κατάσταση του στόχου μέσα από τις μη γραμμικές μετρήσεις. Εντούτοις, οι στατικοί αλγόριθμοι μπορούν να πετύχουν ικανοποιητική εκτίμηση της θέσης του στόχου αν η ακρίβεια των μετρήσεων απόστασης είναι μεγάλη και μάλιστα αρκετά αποδοτικά από άποψη χρόνου επεξεργασίας. Αυτό θα προσπαθήσει να υλοποιήσει η διατριβή.

Η θεωρητική ανάλυση που έγινε σε αυτό κεφάλαιο αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη του συστήματος ακουστικού εντοπισμού που αναλύεται στο ακόλουθο κεφάλαιο. Οι διαφορετικές παράμετροι που αναλύθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται σε πρακτικό επίπεδο κατά την υλοποίηση του συστήματος.

Παράρτημα 2.1 – Εξισώσεις διάδοσης ήχου

Μεταξύ πίεσης p και πυκνότητας ρ που χαρακτηρίζουν ένα μέσο, ισχύει η εξίσωση αδιαβατικής κατάστασης $p = f(\rho)$. Αναπτύσσοντας την πιο πάνω σχέση κατά Taylor, δεδομένου ότι

οι αλλαγές είναι σχετικά μικρές, έχουμε: $dp = p - p_0 = \frac{\theta f}{\theta \rho} d\rho + \dots = c^2 d\rho + \dots$, όπου $\theta f/\theta \rho$ είναι η

παράγωγος για $\rho = \rho_0$ και $p = p_0$, αγνοώντας τις παραγώγους ανώτερης τάξης και θεωρώντας $c^2 = \theta f/\theta \rho$. Θεωρώντας $c^2 = \text{σταθερό}$ και ολοκληρώνοντας, καταλήγουμε στην γραμμική εξίσωση

κατάστασης $p = c^2 \rho + \text{σταθ}$. Παραγωγίζοντας ως προς το χρόνο παίρνουμε: $\frac{\theta p}{\theta t} = c^2 \frac{\theta \rho}{\theta t}$.

Θεωρώντας τώρα μια πολύ μικρή πλάκα, εμβαδού σ και πλάτους dx , η οποία μετακινείται συμπαγώς, ούτως ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί έστω και με κάποιες παραδοχές ο νόμος του

Νεύτωνα, έχουμε: $\sigma [p(x) - p(x + dx)] = -\sigma \frac{\theta p}{\theta x} dx$. Η προκύπτουσα δύναμη θεωρείται θετική αν

κατευθύνεται προς τα θετικά του x . Αν η πίεση αυξάνει καθώς αυξάνεται το x , τότε το $\theta p/\theta x$ είναι

θετικό και η προκύπτουσα δύναμη $-(\theta p/\theta x)dx$ κατευθύνεται προς τα αρνητικά του άξονα x .

Σύμφωνα με το νόμο του Νεύτωνα έχουμε:

$$\sigma \left(-\frac{\theta p}{\theta x} \right) dx = \sigma \rho dx \frac{du_x}{dt} = \sigma \rho dx \left(\frac{\theta u_x}{\theta t} + \frac{\theta u_x}{\theta x} \frac{dx}{dt} \right) = \sigma \rho dx \left(\frac{\theta u_x}{\theta t} + u_x \frac{\theta u_x}{\theta x} \right)$$

Μια και η ταχύτητα των σωματιδίων u_x είναι πολύ μικρή έχουμε:

$$-\frac{\theta p}{\theta x} = \rho \frac{\theta u_x}{\theta t} = (\rho_0 + \delta\rho) \frac{\theta u_x}{\theta t} = \rho_0 \frac{\theta u_x}{\theta t}, \text{ όπου } \rho_0 \text{ η μέση τιμή πυκνότητας, αγνοώντας τον όρο}$$

δεύτερης τάξης $d\rho(\theta u_x/\theta t)$. Γενικεύοντας, τώρα, στις τρεις διαστάσεις έχουμε:

$$\frac{d}{dt} u_1 = \frac{d}{dt} u_1(x_1, x_2, x_3, t) = \frac{\theta u_1}{\theta t} + \frac{\theta u_1}{\theta x_1} \frac{\theta x_1}{\theta t} + \frac{\theta u_1}{\theta x_2} \frac{\theta x_2}{\theta t} + \frac{\theta u_1}{\theta x_3} \frac{\theta x_3}{\theta t} = \frac{\theta u_1}{\theta t} + u_1 \frac{\theta u_1}{\theta x_1} + u_2 \frac{\theta u_1}{\theta x_2} + u_3 \frac{\theta u_1}{\theta x_3}$$

όπου u_i ($i = 1, 2, 3$) η ταχύτητα προς την x_i κατεύθυνση. Δύο αντίστοιχες εξισώσεις προκύπτουν για τα

$$u_2, u_3. \text{ Εν συντομία οι εξισώσεις γράφονται } \frac{d}{dt} u_i = \frac{\theta u_i}{\theta t} + u_j \frac{\theta u_i}{\theta x_j} \text{ ή } -\frac{\theta p}{\theta x_i} = \rho \frac{\theta u_i}{\theta t} + \rho u_j \frac{\theta u_i}{\theta x_j}.$$

Η πιο πάνω αποτελεί την εξίσωση Euler για ρευστά. Ο πρώτος όρος στο δεξιό μέρος της εξίσωσης

αποτελεί την τοπική επιτάχυνση σε ένα σημείο με συντεταγμένες x_1, x_2, x_3 , ενώ ο δεύτερος την

επιτάχυνση εκ μεταφοράς (π.χ. σε περίπτωση που το ρευστό κινείται σε περιοχές με διαφορετική

ταχύτητα). Αγνοώντας τον δεύτερο όρο (σε περιπτώσεις μικρής κίνησης ρευστών) έχουμε:

$$-\frac{\theta p}{\theta x_i} = \rho_0 \frac{\theta u_i}{\theta t} \text{ ή } -\text{grad} p = \rho_0 \frac{\theta u_i}{\theta t} \text{ που αποτελεί την γραμμικοποιημένη εξίσωση Euler για}$$

ρευστά.

Θεωρώντας μία πλάκα όμοια με πριν, σταθερή στο χώρο, και ένα ρευστό να τη διαρρέει, το ποσό της ύλης που εισέρχεται στην πλάκα σε χρόνο dt είναι $\sigma\rho(x)u_x(x)dt$, ενώ το ποσό της ύλης που εξέρχεται της πλάκας είναι $\sigma\rho(x+dx)u_x(x+dx)dt$. Το πλεόνασμα της ύλης στην πλάκα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma\rho(x)u_x(x)dt - \sigma\rho(x+dx)u_x(x+dx)dt = -dx\sigma\frac{\theta(\rho u_x)}{\theta x}dt = -\rho_0\sigma\frac{\theta u_x}{\theta x}dt + \dots (\text{όροι υψηλότερης τάξης}).$$

Επιπλέον, η αύξηση της ύλης δίνεται σε σχέση με την πυκνότητα του μέσου από τη σχέση $d\rho\sigma dx = \frac{\theta\rho}{\theta t}dt\sigma dx$. Από αυτές τις δύο σχέσεις παίρνουμε $\frac{\theta u_x}{\theta x} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\theta\rho}{\theta t} = -\frac{1}{\rho_0 c^2}\frac{\theta p}{\theta t}$.

Γενικεύοντας για την τρισδιάστατη περίπτωση έχουμε αντίστοιχα τη σχέση:

$$\rho(x_1)u_1(x_1)dt dx_2 dx_3 - \rho(x_1+dx_1)u_1(x_1+dx_1)dt dx_2 dx_3 = -\frac{\theta(\rho u_1)}{\theta(x_1)}dt dx_1 dx_2 dx_3, \quad \text{με}$$

αντίστοιχες εξισώσεις για τις άλλες διευθύνσεις. Έτσι προκύπτει:

$$-\left(\frac{\theta(\rho u_1)}{\theta(x_1)} + \frac{\theta(\rho u_2)}{\theta(x_2)} + \frac{\theta(\rho u_3)}{\theta(x_3)}\right)dt dx_1 dx_2 dx_3 = \frac{\theta\rho}{\theta t}dt dx_1 dx_2 dx_3 \quad \text{ή}$$

$$-\frac{\theta(\rho u_j)}{\theta} = \frac{\theta\rho}{\theta t} = \frac{1}{c^2}\frac{\theta p}{\theta t}. \quad \text{Για μικρές μετατοπίσεις ισχύει } \rho = \rho_0 + \rho_1, \quad u = u_0 + u_1, \quad \text{όπου ο πρώτος όρος είναι σταθερός και ο δεύτερος είναι όρος δεύτερης τάξης. Επομένως,}$$

$$\rho u = \rho_0 u_0 + \rho_0 u_1 + \rho_1 u_0 + \rho_1 u_1.$$

Αν το ρευστό δεν παρουσιάζει συνεχή ροή τότε $u_0 = 0$. Αγνοώντας τον όρο της δεύτερης τάξης $\rho_1 u_1$, η τελική εξίσωση συνέχειας είναι: $\frac{\theta u_j}{\theta x_j} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\theta\rho}{\theta t} = -\frac{1}{\rho_0 c^2}\frac{\theta p}{\theta t}$ ή αλλιώς

$$\text{div} \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0 c^2}\frac{\theta p}{\theta t}.$$

Έχουμε πλέον καταλήξει στις τρεις βασικές σχέσεις της διάδοσης του ήχου, δηλαδή στις:

$$p = c^2 \rho + \text{σταθ}$$

$$\frac{\theta u_x}{\theta t} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\theta p}{\theta dx}$$

$$\frac{\theta u_x}{\theta x} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\theta\rho}{\theta t} = -\frac{1}{\rho_0 c^2}\frac{\theta p}{\theta t}$$

που αποτελούν αντιστοίχως τη γραμμικοποιημένη εξίσωση κατάστασης, τη γραμμικοποιημένη εξίσωση Euler και τη γραμμικοποιημένη εξίσωση συνέχειας για διάδοση του ήχου σε ρευστά

σώματα. Διαφορίζοντας την εξίσωση Euler ως προς x και την εξίσωση συνέχειας ως προς t ,

$$\text{προκύπτει η μονοδιάστατη εξίσωση κύματος } \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}.$$

Για την τρισδιάστατη περίπτωση λαμβάνοντας υπόψη πως η εξίσωση κατάστασης παραμένει η ίδια, η εξίσωση Euler γράφεται: $-\frac{1}{\rho_0} \text{grad} p = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$, ενώ η εξίσωση συνέχειας είναι

$$\text{div} \vec{u} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t}. \text{ Αφαιρώντας κατά μέλη τις δύο τελευταίες εξισώσεις παίρνουμε}$$

$$\text{div grad} p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \Leftrightarrow \nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \text{ όπου } \text{div grad} = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} = \frac{\partial^2}{\partial x_j^2}.$$

Αυτή είναι και η βασική κυματική εξίσωση του ήχου που εκφράζει το γεγονός πως το ποσό της ύλης που ρέει σε έναν στοιχειώδη όγκο δημιουργεί μια αλλαγή στην πυκνότητα του.

Τέλος χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Euler και συνέχειας προκύπτει η ακόλουθη σχέση για την ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού:

$$\nabla^2 \vec{u} + \text{curl curl} \vec{u} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \text{ } ^1$$

¹ $\nabla \times (\nabla \times \vec{u}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) - \nabla^2 \vec{u}$ δηλαδή $\text{grad div} = \text{div grad} + \text{curl curl}$

Παράρτημα 2.2– Μέθοδος του Escobal για τη λύση του προβλήματος της τριμεροποίησης

Ο Escobal πρώτος, το 1965, έδωσε μια πιο πρακτική λύση στο πρόβλημα της τριμεροποίησης. Το πρόβλημα ήταν η εύρεση της θέσης και της τροχιάς δορυφόρων από μετρήσεις απόστασης αυτών από τρεις (3) επίγειους σταθμούς. Η απόσταση του κάθε επίγειου σταθμού από το δορυφόρο θεωρείται πως δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_i = \rho_0 + \dot{K}_i, i = 1, 2, 3 \Leftrightarrow \rho_i^2 = r_0^2 + 2\dot{F}_0 \cdot \dot{K}_i + R_i^2$$
, όπου r_0 είναι μια κοινή απόσταση και για τους τρεις σταθμούς για τη δεδομένη χρονική στιγμή t_0 . Απαλείφοντας το r_0 από τα επιμέρους ζεύγη των πιο πάνω εξισώσεων, παίρνουμε:

$$\begin{cases} \rho_3^2 - \rho_1^2 - (R_3^2 - R_1^2) = 2\dot{F}_0 (\dot{K}_3 - \dot{K}_1) \\ \rho_2^2 - \rho_1^2 - (R_2^2 - R_1^2) = 2\dot{F}_0 (\dot{K}_2 - \dot{K}_1) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} (X_3 - X_1)x_0 + (Y_3 - Y_1)y_0 + (Z_3 - Z_1)z_0 = \zeta_{31} \\ (X_2 - X_1)x_0 + (Y_2 - Y_1)y_0 + (Z_2 - Z_1)z_0 = \zeta_{21} \end{cases}$$

όπου X_i, Y_i, Z_i , οι συντεταγμένες του επίγειου σταθμού i ($i=1,2,3$) και x_0, y_0, z_0 οι συντεταγμένες του

δορυφόρου και
$$\begin{cases} \zeta_{31} \equiv \frac{1}{2} [\rho_3^2 - \rho_1^2 - (R_3^2 - R_1^2)] \\ \zeta_{21} \equiv \frac{1}{2} [\rho_2^2 - \rho_1^2 - (R_2^2 - R_1^2)] \end{cases}$$

Πολλαπλασιάζοντας την πρώτη από τις δύο εξισώσεις με $(Y_2 - Y_1)$ και τη δεύτερη με $-(Y_3 - Y_1)$ και προσθέτοντας κατά μέλη, παίρνουμε:

$$z_0 = Ax_0 + B$$
, όπου

$$A \equiv \frac{(X_2 - X_1)(Y_3 - Y_1) - (X_3 - X_1)(Y_2 - Y_1)}{(Z_3 - Z_1)(Y_2 - Y_1) - (Z_2 - Z_1)(Y_3 - Y_1)}, B \equiv \frac{\zeta_{31}(Y_2 - Y_1) - \zeta_{21}(Y_3 - Y_1)}{(Z_3 - Z_1)(Y_2 - Y_1) - (Z_2 - Z_1)(Y_3 - Y_1)}$$

και $y_0 = Cx_0 + D$, όπου

$$C \equiv \frac{(X_2 - X_1)(Z_3 - Z_1) - (X_3 - X_1)(Z_2 - Z_1)}{(Y_3 - Y_1)(Z_2 - Z_1) - (Y_2 - Y_1)(Z_3 - Z_1)}, D \equiv \frac{\zeta_{31}(Z_2 - Z_1) - \zeta_{21}(Z_3 - Z_1)}{(Y_3 - Y_1)(Z_2 - Z_1) - (Y_2 - Y_1)(Z_3 - Z_1)}$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις για τα x_0 και y_0 στην αρχική εξίσωση (λαμβάνοντας υπόψη πως γενικά ισχύει $\rho_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$), παίρνουμε για το x_0 μία δευτεροβάθμια εξίσωση της μορφής:

$$\varepsilon_1 x_0^2 + \varepsilon_2 x_0 + \varepsilon_3 = 0$$
, όπου:

$$\varepsilon_1 \equiv A^2 + C^2 + 1$$

$$\varepsilon_2 \equiv 2(AB + CD + X_1 + CY_1 + AZ_1)$$

$$\varepsilon_3 \equiv B^2 + D^2 + 2DY_1 + 2BZ_1 + R_1^2 - \rho_1^2$$

Λύνοντας την πιο πάνω δευτεροβάθμια εξίσωση, βρίσκουμε δύο λύσεις για το x_0 .

Υπολογίζουμε τη γωνία ανύψωσης, h , του δορυφόρου από τη σχέση $\cosh = \frac{\dot{K}_1 \cdot \rho_1}{R_1 \rho_1}$, και

απορρίπτουμε τη λύση για την οποία $h \geq \pi/2$. Έχοντας βρει το x_0 και αντικαθιστώντας το στις πιο πάνω σχέσεις, βρίσκουμε τα y_0 και z_0 .

Ο αλγόριθμος του Escobar στην εφαρμογή του είναι εξαιρετικά πολύπλοκος, εξού και οι πολλές βελτιώσεις που έχουν προκύψει από τότε από διάφορους ερευνητές.

Παράρτημα 2.3 – Γραμμική μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων

Στο γραμμικό πρόβλημα ελάχιστων τετραγώνων, επιθυμούμε την εκτίμηση του διανύσματος x , διάστασης k , από τις n γραμμικές μετρήσεις z . Τα z και x συνδέονται με τη σχέση:

$z(i) = H(i)x + w(i)$, $i=1, \dots, k$, όπου $w(i)$ ο θόρυβος της i -στης μέτρησης. Η εκτίμηση ελάχιστων τετραγώνων είναι αυτή που ελαχιστοποιεί το τετραγωνικό σφάλμα:

$$J(k) = \sum_{i=1}^k [z(i) - H(i)x]^2 (R^k)^{-1} [z(i) - H(i)x] \Leftrightarrow J(k) = [z^k - H^k x]^2 (R^k)^{-1} [z^k - H^k x],$$

όπου R^1 ο πίνακας συνδιακύμανσης των μετρήσεων

Προφανώς η εκτίμηση ελάχιστων τετραγώνων προκύπτει όταν:

$\nabla_x J(k) = -2H^{k'} (R^k)^{-1} [z^k - H^k x] = 0$, που μας δίνει για την εκτίμηση του k -στου όρου του διανύσματος x :

$$\hat{x}(k) = [H^{k'} (R^k)^{-1} H^k]^{-1} H^{k'} (R^k)^{-1} z^k, \text{ Σχέση II-59}$$

Το σφάλμα εκτίμησης είναι $\tilde{x}(k) = x - \hat{x}(k) = -[H^{k'} (R^k)^{-1} H^k]^{-1} H^{k'} (R^k)^{-1} w^k$, Σχέση II-60

και ο πίνακας συνδιακύμανσης του εκτιμητή ελάχιστων τετραγώνων είναι:

$$P(k) = E\{[\hat{x}(k) - E[\hat{x}(k)]]\{[\hat{x}(k) - E[\hat{x}(k)]]^T\}^T\} = E\{[\hat{x}(k) - x][\hat{x}(k) - x]^T\} = E\{\tilde{x}(k)\tilde{x}(k)^T\}$$

$$P(k) = [H^{k'} (R^k)^{-1} H^k]^{-1} H^{k'} (R^k)^{-1} R^k (R^k)^{-1} H^k [H^{k'} (R^k)^{-1} H^k]^{-1}$$

$$P(k) = [H^{k'} (R^k)^{-1} H^k]^{-1} \text{ Σχέση II-61}^2$$

Αντί για την πιο πάνω λύση μπορεί να ακολουθηθεί μια επαναληπτική μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων για τον υπολογισμό της βέλτιστης εκτίμησης. Αυτό επιτρέπει συνεχή επεξεργασία δεδομένων καθώς η νέα εκτίμηση έχει μνήμη της προηγούμενης εκτίμησης. Σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιώντας το δείκτη k ως δείκτη της χρονικής αλληλουχίας των μεγεθών και ορίζοντας:

¹ $R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \Lambda & \rho_{1k} \\ M & O & M \\ \rho_{k1} & \Lambda & \sigma_k^2 \end{bmatrix}$, όπου σ_i^2 η τυπική απόκλιση της μέτρησης i και $\rho_{ij} = E\{e_i e_j\}$ η συνδιακύμανση των

μετρήσεων i και j (e_i το σφάλμα της μέτρησης i). Αν οι μετρήσεις είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους τότε ο πίνακας συνδιακύμανσης γίνεται:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \Lambda & 0 \\ M & O & M \\ 0 & \Lambda & \sigma_k^2 \end{bmatrix} = \text{diag}[\sigma_i^2]$$

² Ισχύει $E[w^k w^{k'}] = R^k$

$$z^{k+1} = \begin{bmatrix} z^k \\ z(k+1) \end{bmatrix}, H^{k+1} = \begin{bmatrix} H^k \\ H(k+1) \end{bmatrix}, w^{k+1} = \begin{bmatrix} w^k \\ w(k+1) \end{bmatrix}, R^{k+1} = \begin{bmatrix} R^k \\ R(k+1) \end{bmatrix}, \text{ έχουμε για}$$

τη Σχέση II-61:

$$P(k+1)^{-1} = H^{k+1'} (R^{k+1})^{-1} H^{k+1} \Leftrightarrow$$

$$P(k+1)^{-1} = \begin{bmatrix} H^{k'} & H^{k+1'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^k & 0 \\ 0 & R(k+1) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H^k \\ H(k+1) \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

$$P(k+1)^{-1} = H^{k'} (R^k)^{-1} H^k + H(k+1)' R(k+1)^{-1} H(k+1) \Leftrightarrow$$

$$P(k+1)^{-1} = P(k)^{-1} + H(k+1)' R(k+1)^{-1} H(k+1) \Leftrightarrow$$

$$P(k+1) = \left[P(k)^{-1} + H(k+1)' R(k+1)^{-1} H(k+1) \right]^{-1} \Leftrightarrow$$

$$P(k+1) = P(k) - P(k)H(k+1)' \left[H(k+1)P(k)H(k+1)' + R(k+1) \right]^{-1} H(k+1)P(k)$$

Σχέση II-62.

Ορίζοντας τους πίνακες:

$$S(k+1) \equiv H(k+1)P(k)H(k+1)' + R(k+1), \text{ Σχέση II-63}$$

$$W(k+1) \equiv P(k)H(k+1)' S(k+1)^{-1}, \text{ Σχέση II-64}$$

έχουμε:

$$P(k+1) = [I - W(k+1)H(k+1)]P(k) \Leftrightarrow P(k+1) = P(k) - W(k+1)S(k+1)W(k+1)'$$

Σχέση II-65.

Χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες σχέσεις έχουμε για τη Σχέση II-59:

$$\hat{x}(k+1) = P(k+1)H^{k+1'} (R^{k+1})^{-1} z^{k+1} \Leftrightarrow$$

$$\hat{x}(k+1) = P(k+1) \begin{bmatrix} H^{k'} & H(k+1)' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^k & 0 \\ 0 & R(k+1) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z^k \\ z(k+1) \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\hat{x}(k+1) = P(k+1)H^{k'} (R^k)^{-1} z^k + P(k+1)H(k+1)' R(k+1)^{-1} z(k+1) \Leftrightarrow$$

$$\hat{x}(k+1) = [I - W(k+1)H(k+1)]P(k)H^{k'} (R^k)^{-1} z^k + W(k+1)z(k+1) \Leftrightarrow$$

$$\hat{x}(k+1) = [I - W(k+1)H(k+1)]\hat{x}(k) + W(k+1)z(k+1), \text{ Σχέση II-66.}$$

Οπότε, η επαναληπτική σχέση για τον εκτιμητή ελάχιστων τετραγώνων προκύπτει ως εξής:

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + W(k+1)[z(k+1) - H(k+1)\hat{x}(k)], \text{ Σχέση II-67.}$$

Δηλαδή η (k+1) εκτίμηση ισούται με την εκτίμηση k συν έναν διορθωτικό όρο. Ο διορθωτικός αυτό όρος αποτελείται από ένα κέρδος W(k+1) το οποίο πολλαπλασιάζεται με τη διαφορά της μέτρησης z(k+1) και της εκτίμησης της μέτρησης από τις προηγούμενες k μετρήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΙΙΙ. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό, λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρητική ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου, σχεδιάζεται και υλοποιείται το σύστημα εντοπισμού. Ξεκινώντας από τη παράθεση των προδιαγραφών του συστήματος, προχωράμε στη σχεδίαση. Αυτή περιλαμβάνει, αρχικά, το σχεδιασμό του κατάλληλου εκπεμπόμενου σήματος, του οποίου η λήψη και επεξεργασία θα δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα ακρίβειας σε πραγματικό χρόνο. Οι διαφορετικές παράμετροι του εκπεμπόμενου σήματος και η επίδρασή τους στην επίδοση του συστήματος αναλύονται. Ακολούθως, επιλέγονται οι πομποδέκτες του συστήματος βάσει των προσδοκώμενων χαρακτηριστικών λήψης και εκπομπής, των χαρακτηριστικών των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων (όπως αναλύθηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο) και των χαρακτηριστικών συχνοτικής απόκρισης αυτών. Προχωράμε, στη συνέχεια, στην υλοποίηση ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος πομπού και δέκτη που επιτρέπει την εύκολη, αποδοτική και σταθερή λειτουργία του συστήματος.

Το τελευταίο κομμάτι του κεφαλαίου αφορά στην επεξεργασία του συστήματος, τόσο σε επίπεδο υλισμικού όσο και, κυρίως, λογισμικού. Αναλύονται δύο μέθοδοι εντοπισμού (πρώτης αξίσεως και κεντροειδής) ενώ περιγράφεται η επίδραση της επιλογής κατωφλίου στην απόδοση του συστήματος και στην περιοχή εμβέλειας αυτού. Εξετάζεται η χρήση της μεθόδου Σταθερού Ρυθμού Εσφαλμένων Συναγερμών για το καθορισμό ενός δυναμικά προσαρμοζόμενου κατωφλίου. Τέλος, το πρωτότυπο σύστημα υλοποιείται και τίθεται σε μια σειρά λειτουργικών δοκιμών για να φανούν τυχόν προβλήματα στη λειτουργία του. Αυτό οδηγεί σε βελτιώσεις επί της αρχικής σχεδίασης.

3.1 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

3.1.1 Απαιτήσεις

Οι προδιαγραφές λειτουργίας του συστήματος τίθενται, εν μέρει, από τα προβλήματα που αυτό καλείται να αντιμετωπίσει καθώς και από το σύστημα στο οποίο αυτό θα εφαρμοστεί. Αφού εξηγηθούν οι τεχνολογικές παράμετροι λειτουργίας του συστήματος, είναι σημαντικό να μελετηθεί το σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας για το οποίο προορίζεται το σύστημα εντοπισμού ώστε οι τελικές προδιαγραφές του να προκύψουν ως συγκερασμός των τεχνολογικών δεδομένων από τη μια και των απαιτήσεων του συστήματος από την άλλη. Τα βασικά προβλήματα που το συγκεκριμένο σύστημα προτίθεται να αντιμετωπίσει είναι:

- Περιορισμένη ακρίβεια και διακριτικότητα

- Περιορισμένη εμβέλεια
- Μεταβλητή ταχύτητα διάδοσης του ήχου
- Μικρός ρυθμός ανανέωσης των δεδομένων
- Υψηλότατο κόστος

Η ακρίβεια και η διακριτικότητα του συστήματος περιορίζεται αρχικά από την μέγιστη διάσταση των πομποδεκτών του συστήματος. Όσο αυτή είναι μεγαλύτερη, τόσο ο στόχος δεν μπορεί να προσεγγιστεί ως σημειακός. Επομένως ο εντοπισμός του στόχου ανάγεται στον εντοπισμό ενός σημείου αυτού, το οποίο δεν μπορεί, πάντα, να προσδιοριστεί επακριβώς. Δηλαδή, η ακρίβεια και η διακριτικότητα του συστήματος δεν μπορεί να είναι πολύ μικρότερες από την μέγιστη διάσταση D του ακουστικού πομπού. Επομένως, η επιλογή όσο το δυνατόν μικρότερης διάστασης πομποδεκτών είναι ιδιαίτερα σημαντική για το σύστημα. Η επιλογή τέτοιων είναι ευνοϊκή και για ένα ακόμα λόγο, όπως αναφέρθηκε στο 1^ο κεφάλαιο. Το εύρος δέσμης από ένα ακουστικό πομπό (κυκλικό πιστόνι) είναι αντιστρόφως ανάλογο με το λόγο D/λ , όπου D η διάμετρος του πιστονιού και λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας [BARA54]. Έτσι, μικρής διάστασης πομπός συνεπάγεται μεγαλύτερου ανοίγματος γωνίας διάγραμμα εκπομπής. Επιπρόσθετα, μικρής διάστασης πομπός και δέκτες, σημαίνει μικρό μέγεθος και βάρος, το οποίο είναι σημαντικός παράγοντας για τη χρησιμότητα του συστήματος (δεδομένου του γεγονότος πως οι δέκτες είναι προσαρμοσμένοι στον στόχο). Δυστυχώς μικρής διάστασης πομποί σημαίνει μειωμένη αποδοτικότητα (efficiency) αυτών. Η τελευταία είναι ανάλογη με την ενεργό επιφάνεια του πομπού, και όντας μικρή έχει ως αποτέλεσμα ένα ακουστικό σήμα μικρού σχετικά πλάτους, περιορίζοντας έτσι την εμβέλεια λειτουργίας του συστήματος.

Η εμβέλεια ενός συστήματος είναι άμεσα εξαρτώμενη από το σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας στο οποίο αυτό θα εφαρμοστεί. Όπως φαίνεται από τον πίνακα του παραρτήματος 1.1 οι εμβέλειες των περισσότερων συστημάτων δεν ξεπερνούν τα 1,5-1,7 μέτρα. Υπάρχουν μερικά συστήματα των οποίων η εμβέλεια είναι μεγαλύτερη με μείωση όμως της ακρίβειας και της διακριτικής τους ικανότητας. Πρόκληση δεν αποτελεί απλά η αύξηση της περιοχής εμβέλειας αλλά η ικανοποιητική και σταθερή απόδοση του συστήματος σε ολόκληρη αυτήν την περιοχή. Σε αυτό το σημείο πρέπει να διακρίνουμε τα συνηθισμένα συστήματα εντοπισμού από τα συστήματα εντοπισμού μεγάλης εμβέλειας (wide-area trackers). Τα τελευταία αναφέρονται σε σημαντικά μεγάλες περιοχές εμβέλειας (της τάξης των 10x10x10 μέτρων ή μεγαλύτερες – [RUBI05], [WELC99]). Μια σχετική προέκταση του προτεινόμενου συστήματος για τέτοιες περιοχές εμβέλειας δίνεται στο 4^ο κεφάλαιο.

Τα προβλήματα που επιφέρει η μεταβλητότητα της ταχύτητας διάδοσης του ήχου έχουν ήδη αναφερθεί. Ο πιο σημαντικός λόγος της μεταβλητότητας αυτής (δεδομένου του ελεγχόμενου περιβάλλοντος λειτουργίας) είναι η πιθανή μεταβολή της θερμοκρασίας. Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στον αέρα μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση:

$$c_s \cong 346,4 \text{ m/s} + 0,5813 \text{ m/s}(T - 25),$$

όπου T η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε βαθμούς

Κελσίου. Ισχύει δηλαδή $dc_s/dT=0,5813$, επομένως αύξηση της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό Κελσίου προκαλεί αύξηση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου κατά $0,5813\text{m/s}$. Θεωρώντας εμβέλεια της τάξης των 2m υπάρχει χρονική διαφορά στην άφιξη των δύο σημάτων της τάξης του $1\mu\text{s}$. Αν αυτή η διαφορά της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δεν γίνει αντιληπτή οδηγεί σε μια διαφορά της εκτίμησης της απόστασης κατά περίπου $0,343\text{mm}$ (για θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C). Επομένως οι μεταβολές της θερμοκρασίας δεν έχουν δραματικές επιπτώσεις στην ακρίβεια του συστήματος και αρκεί η γνώση της (όχι σε επίπεδο δεκαδικής ακρίβειας), για τη σωστή βαθμονόμηση του συστήματος.

Ο ρυθμός ανανέωσης δεδομένων είναι σημαντικότερος σε ένα σύστημα εντοπισμού για δύο βασικούς λόγους. Χαμηλός ρυθμός ανανέωσης σημαίνει πως πιθανές κινήσεις του στόχου θα γίνονται αργά αντιληπτές από το σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας. Επιπλέον, ακόμα και αν ο στόχος είναι ακίνητος, μικρός ρυθμός ανανέωσης σημαίνει αντίστοιχα μικρό ρυθμό ανανέωσης της προβαλλόμενης εικόνας. Το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να καταλάβει διαφορές στην εικόνα με ρυθμό ανανέωσης μεγαλύτερο των 15Hz ([BARF95a]). Εντούτοις, εμφανίζεται μια αίσθηση δυσφορίας που προκαλεί αισθήματα ναυτίας, αν ο ρυθμός ανανέωσης είναι τόσο χαμηλός. Το να επιτευχθεί ρυθμός ανανέωσης υψηλότερος από τα 15Hz δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολο. Όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός ανανέωσης, τόσο αυξάνεται η μέγιστη ταχύτητα του στόχου που μπορεί να παρακολουθήσει το σύστημα. Θεωρώντας π.χ. στόχο ο οποίος κινείται με ταχύτητα 1m/s^1 και ρυθμό ανανέωσης 20Hz (επομένως ανανέωση της κατάστασης στο σύστημα ανά 50ms), ο στόχος δύναται να μετακινηθεί κατά 5cm μεταξύ των δύο ανανεώσεων του συστήματος. Επομένως ένας μεγαλύτερος ρυθμός ανανέωσης απαιτείται από το σύστημα ($>60\text{Hz}$).

Το κόστος των συστημάτων εντοπισμού έχει φτάσει σε αρκετά μεγάλα ύψη. Αυτό, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος και άλλων τμημάτων των VR συστημάτων, αποτελεί και τον βασικό λόγο που αποτρέπει την ευρεία εφαρμογή τους σε πολλές εκπαιδευτικές εφαρμογές καθώς και τη χρήση τους από μικρομεσαίες επιχειρήσεις. Μια τυπική τιμή για συστήματα εντοπισμού που χρησιμοποιούν οπτικούς αισθητήρες (μια και αυτοί πλέον γνωρίζουν τη μεγαλύτερη απήχηση) κινείται στην περιοχή άνω των 15.000€ .

Πιο πάνω τέθηκαν τα βασικά τεχνολογικά θέματα που το προτεινόμενο σύστημα εντοπισμού καλείται να αντιμετωπίσει. Αυτά πρέπει να συνδυαστούν με τις απαιτήσεις του συστήματος για το οποίο προορίζεται το σύστημα εντοπισμού. Το προτεινόμενο σύστημα εντοπισμού προορίζεται για χρήση και εγκατάσταση στο σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας του EMOI. Αυτό χαρακτηρίζεται από έντονη παρουσία του οπτικού καναλιού ενώ, το ακουστικό και το απτικό κανάλι δεν διαθέτει κανένα περιφερειακό σύστημα. Όπως έχει τονιστεί και στο [KARA05] η επιλογή των συστημάτων εντοπισμού στο μέλλον δεν πρέπει να γίνεται αποκλειστικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών. Αντιθέτως θα πρέπει να επιλέγεται ένα σύστημα εντοπισμού το οποίο

¹ Θεωρώντας ανθρώπινο στόχο που εκτελεί μία διαδικασία σε έναν εικονικό Κόσμο αυτή είναι μια θεωρητική μέγιστη προβλεπόμενη ταχύτητα

ανταποκρίνεται βέλτιστα ως προς τα χαρακτηριστικά του συστήματος VR στο οποίο θα εγκατασταθεί και στις απαιτήσεις των δραστηριοτήτων που θα επιτελεστούν στον Εικονικό Κόσμο.

Εκτός των τεχνικών κριτηρίων λειτουργίας (κεφάλαιο 1) θα ήταν χρήσιμο να θέσουμε κάποιες παραμέτρους βάσει των οποίων θα κριθεί η αποτελεσματικότητα των συστημάτων εντοπισμού και οι οποίες έχουν βάση τον ανθρώπινο παράγοντα καθορίζοντας το βαθμό στον οποίο οι χρήστες νοιώθουν μέρος του Εικονικού Κόσμου. Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα της Εικονικής αναπαράστασης είναι: α) η αίσθηση παρουσίας στο Εικονικό περιβάλλον (Presence), β) η αίσθηση πως τα Εικονικά αντικείμενα δεν μετακινούνται με την κίνηση του κεφαλιού (Perceptual Stability), γ) τα πιθανά αισθήματα αδιαθεσίας που μπορεί να εμφανιστούν στο χρήστη (Simulator Sickness), δ) η αίσθηση αποδοτικότητας λειτουργιών που επιτελούνται στο εικονικό περιβάλλον (Task Performance) και ε) τυχόν μικρομετατοπίσεις κάτω από την ακρίβεια εντοπισμού.

Στην παράγραφο 1.1 αναφέρθηκαν οι βασικές κατηγοριοποιήσεις των συστημάτων VR ως προς το οπτικό κανάλι. Κάθε μία από τις κατηγορίες αυτές θέτει διαφορετικές απαιτήσεις για τα συστήματα εντοπισμού κάνοντας επιπλέον διάκριση για το αν αυτά προορίζονται να κάνουν εντοπισμό του κεφαλιού του χρήστη ή του χεριού του. Η πρώτη εφαρμογή έχει ως σκοπό την προσαρμογή της προβαλλόμενης αναπαράστασης στο οπτικό πεδίο του χρήστη, ενώ η δεύτερη την αλληλεπίδραση με τον Εικονικό Κόσμο. Ακολούθως αναλύονται οι απαιτήσεις για τα συστήματα εντοπισμού ανά βασική κατηγορία περιφερειακών του οπτικού καναλιού.

Αδιαφανή HMD

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν πέρα από τα κλασικά HMD και άλλες συσκευές που κάνουν χρήση συστημάτων φακών και οθόνων προσαρμοσμένων στο κεφάλι του χρήστη, όπως ειδικά κιάλια, επίπεδες οθόνες στηριζόμενες στα χέρια των χρηστών κτλ. Εδώ επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας σε HMD που παρέχουν διακριτικότητα και πεδίο όρασης (Field of view-FOV) ίδια με τα φυσικά ανθρώπινα χαρακτηριστικά ώστε να γίνουν αντιληπτά απευθείας τα αποτελέσματα του εντοπισμού χωρίς να παρεισφύρουν άλλοι παράγοντες που έχουν σχέση με το HMD.

Για συστήματα που αφορούν εντοπισμό κινήσεων κεφαλιού οι βασικές παράμετροι που εξετάζονται είναι η καθυστέρηση και ο ρυθμός προβολής (frame rate). Αυτός, συνήθως, καθορίζεται από τον δημιουργό εικόνων (image generator) αλλά συνεισφέρει στη συνολική καθυστέρηση. Στο [SO95] εξετάστηκε η επίδραση της καθυστέρησης ακολουθώντας, με χρήση HMD, σε εικονικό περιβάλλον έναν κινούμενο στόχο με RMS γωνιακή ταχύτητα 2, 3,5 και 5°/s και επιβάλλοντας, πλέον της βασικής καθυστέρησης των 40ms, καθυστερήσεις διάρκειας 40, 80, 120 και 160ms. Παρατηρήθηκε πως το μέσο γωνιακό λάθος αυξανόταν πάνω από 30% για τους γρήγορα κινούμενους στόχους. Βρέθηκε πως καθυστερήσεις μεγαλύτερες των 80ms είναι σημαντικές για την εκτέλεση των λειτουργιών μέσα στο Εικονικό Περιβάλλον. Μικρότερες καθυστερήσεις ήταν δύσκολο να μοντελοποιηθούν λόγω της βασικής καθυστέρησης των 40ms. Στο [ELLI99] έγινε το ίδιο πείραμα σε σύστημα με βασική καθυστέρηση 27ms και με επιπρόσθετες καθυστερήσεις

πολλαπλάσιες των 16,7ms. Αυξάνοντας τη βασική καθυστέρηση στα 27, 97, 196ms παρατηρήθηκε πως οι χρήστες ήταν σε θέση να διαχωρίσουν τις επιπλέον καθυστερήσεις των 16,7 ms γεγονός από το οποίο συμπεραίνουμε πως οποιαδήποτε καθυστέρηση είναι αντιληπτή από το χρήστη χωρίς να σημαίνει πως υπάρχει άμεση επίδραση στη συμπεριφορά και απόδοση αυτού. Ένας μεγάλος αριθμός πειραμάτων έχει δείξει πως ο ρυθμός προβολής και η καθυστέρηση έχουν σημαντική επίδραση (με την καθυστέρηση να έχει τη μεγαλύτερη) στην επίδοση κατά την περάτωση λειτουργιών σε ένα Εικονικό Περιβάλλον και στην αίσθηση πως τα εικονικά αντικείμενα δεν μετακινούνται με την κίνηση του κεφαλιού.

Κάποια πειράματα προσπάθησαν να αξιολογήσουν την επίδραση της χωρικής παραμόρφωσης στις επιδόσεις του χρήστη. Βρέθηκε πως η παράμετρος δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στην επίδοση των χρηστών, ούτε προκαλεί αισθήματα αδιαθεσίας, αλλά επιδρά στο αίσθημα σταθερότητας των χρηστών και στο RMS σφάλμα του συστήματος εντοπισμού.

Είναι εύκολο να υποθέσει κανείς πως το τρεμόπαιγμα μπορεί να δημιουργήσει αισθήματα αδιαθεσίας και να μειώσει την αίσθηση παρουσίας στο Εικονικό Περιβάλλον. Από διάφορα πειράματα βρέθηκε χονδρικά πως τρεμόπαιγμα $0,05^\circ$ r.m.s. στην κατεύθυνση και 1mm r.m.s. στη θέση για HMDs με φακούς μεγεθυντικού παράγοντα ένα (1) δεν γίνεται αντιληπτό από το χρήστη, ενώ είναι ιδιαίτερα αισθητό αν χρησιμοποιούνται κιάλια μεγέθυνσης κατά επτά (7) [FOX92]. Τέλος, για εικονικά αντικείμενα που είναι σε μεγάλη απόσταση το τρεμόπαιγμα στην κατεύθυνση είναι καθοριστικό, ενώ για κοντινά αντικείμενα το τρεμόπαιγμα στην απόσταση είναι το πλέον σημαντικό.

Με μια σειρά πειραμάτων έχει εξεταστεί η επίδραση του τρεμοπαίγματος καθυστέρησης στις επιδόσεις των χρηστών. Βρέθηκε πως χρησιμοποιώντας υψηλούς ρυθμούς πλαισίων και υπερθέτοντας μεταβολές στο χρόνο ενός πλαισίου που μεταβάλλονταν συνημιτονοειδώς με πλάτος της τάξης των 10-20ms με μέσο χρόνο πλαισίου - offset 50ms (20fps), δεν υπάρχει καμία επίδραση στον χρήστη. Αν ο ρυθμός πλαισίων μειωθεί (10fps) και το πλάτος της υπερτιθέμενης μεταβολής αυξηθεί στα 60ms υπάρχει σημαντική επίδραση στις επιδόσεις του χρήστη, που οφείλεται στην μεταβολή της εικόνας και της διάστασης των εικονικών αντικειμένων κατά τις κινήσεις του κεφαλιού. Γενικά, καθώς ο χρήστης γυρίζει το κεφάλι του σε ένα Εικονικό Περιβάλλον με σταθερή υποτιθέμενη ταχύτητα ο κόσμος φαίνεται σε αυτόν μετατοπισμένος από τη θέση του κατά μία γωνία που είναι ίση με το γινόμενο της ταχύτητας περιστροφής και του τρεμοπαίγματος καθυστέρησης. Γι' αυτό κρίνεται σημαντικό το τελευταίο να διατηρηθεί μικρότερο του 1ms.

Για την κατηγορία αυτή των HMDs δύο τύποι αλληλεπίδρασης που κάνουν χρήση εντοπισμού στο χέρι των χρηστών είναι συνήθεις. Δεδομένου του ότι οι χρήστες δεν έχουν ορατή επαφή με τη συσκευή αλληλεπίδρασης, μια και τα HMDs είναι αδιαφανή, το Εικονικό Περιβάλλον τους επιτρέπει να αλληλεπιδρούν μαζί του, βλέποντας σε αυτό την επέκταση της συσκευής αλληλεπίδρασης (και του χεριού τους) ή προσαρμόζοντας το περιβάλλον στη θέση της συσκευής αλληλεπίδρασης. Στην πρώτη περίπτωση η απόλυτη ακρίβεια στο σύστημα εντοπισμού δεν είναι

ιδιαίτερα αναγκαία. Ο χρήστης μετά από ένα μικρό διάστημα προσαρμογής συνηθίζει τις ανακρίβειες του συστήματος και προσαρμόζει ανάλογα τις κινήσεις του. Η καθυστέρηση του συστήματος μπορεί να επιδράσει αρνητικά σε αυτή τη διαδικασία προσαρμογής μια και αλλοιώνει την αίσθηση του χρήστη για την ακρίβεια του συστήματος. Στη δεύτερη περίπτωση η ακρίβεια είναι σαφέστατα πιο αναγκαία, μια και αλλιώς, αισθήματα αδιαθεσίας και μειωμένη απόδοση του χρήστη θα παρατηρηθούν.

Διαφανή HMDs

Η κατηγορία αυτή είναι η πλέον συνηθισμένη σε εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (augmented reality). Στις εφαρμογές αυτές εικονικά αντικείμενα υπερτίθενται των πραγματικών αντικειμένων και χρησιμοποιούνται για την επιτέλεση διαφόρων εργασιών πάνω στα πραγματικά αντικείμενα με πληροφορίες που παρέχονται στο Εικονικό Περιβάλλον. Προφανώς σε αυτήν την περίπτωση οι απαιτήσεις για το σύστημα εντοπισμού είναι ιδιαίτερα αυξημένες, μια και η υπέρθεση των δύο κόσμων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα προκαθορισμένα πλάνα. Σε αντίθεση με τα αδιαφανή HMDs, όπου το τρεμόπαιγμα, η καθυστέρηση και το τρεμόπαιγμα της καθυστέρησης έπαιζαν το βασικό ρόλο, στα διαφανή HMDs πιο καθοριστικοί παράγοντες αποτελούν η χωρική παραμόρφωση, η σταθερότητα (steer) και η καθυστέρηση, που πάλι οδηγούν σε μη σωστές ευθυγραμμίσεις των δύο αναπαραστάσεων. Το τρεμόπαιγμα και το τρεμόπαιγμα στην καθυστέρηση εξακολουθούν να παραμένουν ανεπιθύμητοι παράγοντες μια και προκαλούν το τρεμόπαιγμα των προβαλλόμενων σκηνών του Εικονικού Κόσμου και, πιθανόν, οδηγούν στην αδιαθεσία του χρήστη. Εντούτοις δεν έχουν καθολική επίδραση στην αντίληψη του χρήστη που έχει πρόσβαση και στον πραγματικό κόσμο. Τα πειράματα που έχουν γίνει δείχνουν πως οι σχεδιαστές αντίστοιχων εφαρμογών πρέπει να δίνουν πρώτα έμφαση στη μείωση των καθυστερήσεων, στην ελάττωση του φαινομένου της χωρικής παραμόρφωσης και στη συνέχεια, στη βελτίωση της ακρίβειας του χρησιμοποιούμενου συστήματος εντοπισμού.

Σε εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας συνήθως ο χρήστης χρησιμοποιεί πραγματικά εργαλεία και αλληλεπιδρά με πραγματικά αντικείμενα. Επομένως το σύστημα εντοπισμού δεν χρειάζεται συνήθως να εντοπίζει τη θέση του χεριού ή του εργαλείου του χρήστη. Αντιθέτως, ίσως να χρειάζεται το σύστημα να εντοπίζει το πότε ένα συγκεκριμένο έργο έχει υλοποιηθεί (π.χ. εντοπίζοντας τη θέση του χρησιμοποιούμενου εργαλείου). Αυτό καθιστά τις απαιτήσεις για το χρησιμοποιούμενο σύστημα εντοπισμού, εφάμιλλες αυτού που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της θέσης και της κατεύθυνσης του κεφαλιού του χρήστη, το οποίο ανεβάζει πολύ το συνολικό κόστος. Εναλλακτικά ορισμένες εφαρμογές χρησιμοποιούν κάποιο είδος αλληλεπίδρασης με το χρήστη για να επιβεβαιώσουν, μέσω της ανταπόκρισης του τελευταίου, την επιτέλεση των προγραμματισμένων εργασιών. Εξού και οι απαιτήσεις σε προδιαγραφές του συστήματος εντοπισμού είναι ιδιαίτερα μειωμένες.

Fixed surface displays (FSDs)

Θεωρητικά οι απαιτήσεις του συστήματος εντοπισμού για το κεφάλι των χρηστών σε σύστημα FSD είναι λιγότερο απαιτητικές απ' ό τι σε ένα HMD. Αυτό προκύπτει εύκολα, αν σκεφτεί κανείς πως σε ένα HMD μια οποιαδήποτε στροφή του κεφαλιού θα σημάνει επαναπροσδιορισμό της προβαλλόμενης τρισδιάστατης αναπαράστασης, γεγονός που κάνει την ακρίβεια στον υπολογισμό της κατεύθυνσης ιδιαίτερα σημαντική. Αντιθέτως σε ένα σύστημα FSD, η προβαλλόμενη αναπαράσταση αλλάζει ανάλογα με τη θέση του κεφαλιού του χρήστη και όχι με την κατεύθυνση αυτού. Οι αλλαγές των αναπαραστάσεων είναι σχετικά μικρές για μικρές μετακινήσεις οπότε δεν απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια παρά μόνο αν προβλέπονται πολύ μεγάλες ταχύτητες κίνησης. Η απαιτούμενη ευαισθησία στο σύστημα εντοπισμού είναι μικρότερη για αντικείμενα προβαλλόμενα σε κοντινές αποστάσεις και μεγαλύτερη για απομακρυσμένα αντικείμενα σε σχέση με ένα HMD.

Μια και τα FSDs συνήθως κάνουν χρήση στερεοσκοπίας για τη δημιουργία της τρισδιάστατης αίσθησης στο χρήστη, το σύστημα εντοπισμού θα πρέπει να εντοπίσει τη θέση των δύο ματιών για την προσαρμογή των δύο προβαλλόμενων εικόνων που απευθύνονται σε αυτά. Χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα στο κεφάλι του χρήστη για τον υπολογισμό της θέσης και κατεύθυνσης αυτού και με διάφορους μετασχηματισμούς υπολογίζεται η θέση των δύο ματιών. Οποιαδήποτε λάθη είτε στο σύστημα εντοπισμού, είτε στους χρησιμοποιούμενους μετασχηματισμούς έχουν επίδραση στην στερεοσκοπική αντίληψη του χρήστη και στην αίσθηση βάθους του Εικονικού Περιβάλλοντος (αν και αυτή είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί).

Σε συστήματα FSDs οι απαιτήσεις στην αλληλεπίδραση του χρήστη με το Εικονικό Κόσμο και κατ' επέκταση οι απαιτήσεις για ένα σύστημα εντοπισμού χεριού είναι ιδιαίτερα αυξημένες και, τουλάχιστον, αντίστοιχες αυτών για τα συστήματα αδιαφανών HMDs. Σε FSDs ανακλώμενης όψης (reflected view) όπου η συσκευή αλληλεπίδρασης δεν είναι ορατή από τον χρήστη ισχύουν τα ίδια με την περίπτωση των αδιαφανών HMDs. Σε FSDs ευθείας όψης (direct view) χρησιμοποιείται μία εικονική αναπαράσταση της συσκευής αλληλεπίδρασης η οποία είτε υπερτίθεται της πραγματικής στην ίδια θέση, είτε τοποθετείται εικονικά σε μία απόσταση από αυτή. Στην πρώτη περίπτωση οι απαιτήσεις για το σύστημα είναι ιδιαίτερα αυξημένες και εφάμιλλες των εκλεπτυσμένων εφαρμογών επαυξημένης πραγματικότητας. Στη δεύτερη περίπτωση οι απαιτήσεις για το σύστημα είναι υψηλές κυρίως ως προς την καθυστέρηση, την ακρίβεια και το τρεμόπαιγμα. Ιδιαίτερος αν η πραγματική συσκευή αλληλεπίδρασης είναι ορατή, τότε η καθυστέρηση αποτελεί τον καθοριστικότερο παράγοντα.

3.1.2 Προδιαγραφές Επίδοσης Συστήματος

Έχοντας εκθέσει τόσο τις τεχνολογικές απαιτήσεις για το σύστημα εντοπισμού, όσο και αυτές που προκύπτουν από το σύστημα VR, εξάγουμε τις ακόλουθες προδιαγραφές για το σύστημα που υλοποιείται:

- Ακρίβεια του συστήματος μικρότερη του 1cm
- Χώρος εμπέλειας: προσεγγιστικά κύβος διάστασης 2x2x2m

- Δυνατότητα εντοπισμού (με κατάλληλες μετατροπές) τόσο του χεριού όσο και του κεφαλιού του χρήστη (όχι ταυτόχρονα)
- Καθυστερήση μικρότερη των 50ms
- 3 βαθμοί ελευθερίας (με δυνατότητα αύξησης σε 6)
- Ρυθμός ανανέωσης δεδομένων >60Hz
- Μικρό βάρος, αυξημένη χρηστικότητα

Τρεις είναι οι βασικές επιλογές που πρέπει να γίνουν πριν την υλοποίηση του συστήματος:

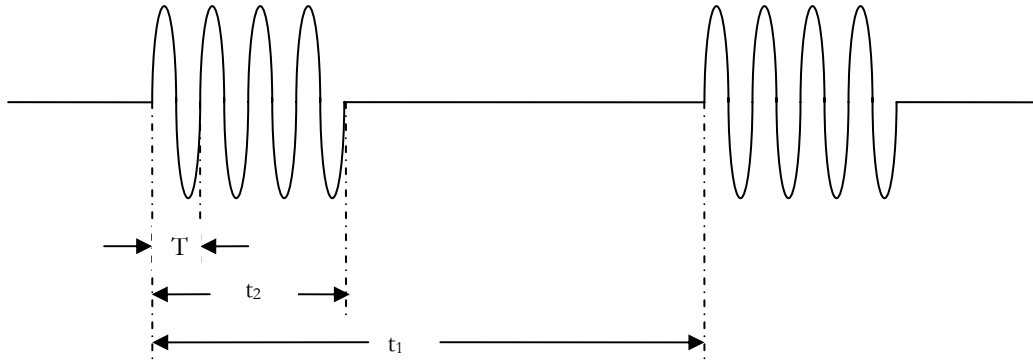
- Η τοπολογία (αριθμός πομπών και δεκτών) που θα υλοποιηθεί: το είδος της τοπολογίας καθορίζει τον αριθμό των πομπών και δεκτών του συστήματος, τις επιλεγόμενες συχνότητες και τα επιμέρους υποτμήματα των συστημάτων των πομποδεκτών. Για το σύστημα που προτείνεται στη διατριβή επιλέγεται η τοπολογία 1-3 που επιτρέπει τον εντοπισμό της θέσης του στόχου (τρεις βαθμοί ελευθερίας). Στα πλαίσια της διατριβής θα ληφθεί υπόψη η πιθανή επέκταση του συστήματος σε τοπολογία 3-3, έξι (6) βαθμών ελευθερίας, ώστε να δύναται να εντοπίσει και την κατεύθυνση του στόχου. Πρέπει να τονιστεί πως σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στο 2^ο κεφάλαιο η προσθήκη επιπλέον δεκτών (πλεονασματική διάταξη) δεν αναμένεται να αυξήσει ικανοποιητικά την ακρίβεια του συστήματος (τουλάχιστον όχι χωρίς ανεπιθύμητες συνέπειες στη συνολική καθυστέρηση).
- Η επιλογή διάταξης «μέσα-έξω» ή «έξω-μέσα»: Επιλέγεται η διάταξη «μέσα-έξω», μια και αυτή παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια για τον εντοπισμό του στόχου και τη συνολική καθυστέρηση. Στη διάταξη «έξω-μέσα» κατά τη διάρκεια του χρόνου διαδρομής του εκπεμπόμενου συστήματος ο δέκτης θα έχει κινηθεί, με αποτέλεσμα η επεξεργασία των δεδομένων να εκφράζει πρότερη θέση του στόχου. Βέβαια η επιλεγόμενη διάταξη καθιστά (τουλάχιστον αρχικά) αναγκαία την καλωδίωση του στόχου.
- Επιλογή της μορφής του εκπεμπόμενου σήματος (phase-coherent ή παλμικό): Για το σύστημα επιλέγεται η εκπομπή ενός παλμικού σήματος. Ο λόγος είναι η αποφυγή καλωδίωσης μεταξύ πομπού και δέκτη ώστε να λαμβάνεται το δείγμα του εκπεμπόμενου παλμού. Επιπλέον δεν απαιτείται η χρήση κυκλωμάτων παρακολούθησης φάσης που, γενικά, έχουν σημαντικό κόστος. Τέλος, με την επιλεγόμενη μορφή μειώνεται η επίδραση του φαινομένου της πολυδιαδρομικής διάδοσης μια και, με σωστή επιλογή των παραμέτρων του εκπεμπόμενου σήματος, υπάρχει η δυνατότητα σίγασης του δέκτη για ένα χρονικό διάστημα ικανό ώστε να ελαχιστοποιείται η παρεμβολή των ανακλάσεων.

3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

3.2.1 Το εκπεμπόμενο σήμα

Πρώτο βήμα στη σχεδίαση του συστήματος αποτελεί ο προσδιορισμός της μορφής του εκπεμπόμενου παλμού. Επιλέγοντας παλμικά εκπεμπόμενο σήμα, η μορφή του είναι όπως φαίνεται

στην ακόλουθη εικόνα. Πρόκειται για ένα ημιτονικό σήμα που εκπέμπεται για έναν αριθμό περιόδων, ακολουθούμενο από μια περίοδο σιγής, για να επαναληφθεί στη συνέχεια η εκπομπή του.



Εικόνα 43: Μορφή του εκπεμπόμενου παλμού

Στην εικόνα T είναι η περίοδος του εκπεμπόμενου ημιτόνου, t_1 ο χρόνος μεταξύ δύο συνεχόμενων εκπομπών και $t_1 - t_2$ το διάστημα σιγής μεταξύ δύο διαδοχικών εκπομπών. Επιλέγουμε την εκπομπή ενός μικρού αριθμού περιόδων του σήματος αντί μίας μόνο περιόδου. Ο λόγος είναι διπλός: α) η δυνατότητα εφαρμογής μιας μεθόδου ανίχνευσης κατωφλίου που χρησιμοποιεί την περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος και απαιτεί έναν ελάχιστο αριθμό περιόδων (centroid tracking) και β) η αρχική σκέψη να διεξάγονται μετρήσεις συχνότητας για να εξαχθούν πληροφορίες για τη συχνότητα Doppler και κατ' επέκταση για την ταχύτητα του στόχου. Αυτό τελικά αποδείχτηκε πως ούτε δίνει μετρήσεις ιδιαίτερης ακρίβειας, ούτε είναι ιδιαίτερα αποδοτικό για μετρήσεις πραγματικού χρόνου. Γενικά, η ταχύτητα Doppler δίνεται από τη σχέση

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2v_r f}{c_s}, \text{ όπου } v_r \text{ η ταχύτητα του στόχου, } f \text{ η εκπεμπόμενη συχνότητα και } c_s \text{ η}$$

ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Θεωρώντας μια τυπική συχνότητα 30kHz και ταχύτητα του ήχου $c_s = 343,5 \text{ m/s}$ (για θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C) και δεδομένου πως η μέγιστη προβλεπόμενη ταχύτητα του στόχου είναι 1 m/s , η μέγιστη συχνότητα Doppler που αναμένεται είναι περίπου 175Hz.

Η επιλογή των χρόνων t_1 και t_2 καθορίζεται από την εμβέλεια του συστήματος και τις παραμέτρους της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Ο χρόνος μεταξύ δύο εκπεμπόμενων παλμοσειρών πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το χρόνο διαδρομής που χρειάζεται το σήμα για να διανύσει την μέγιστη απόσταση, ώστε να μπορεί να αντιστοιχηθεί το ληφθέν σήμα με το αντίστοιχο εκπεμπόμενο. Θεωρώντας 2 μέτρα τη μέγιστη απόσταση και ταχύτητα του ήχου $c_s = 343,5 \text{ m/s}$ (για θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C) έχουμε $t_{\text{tof}} \approx 5,8 \text{ msec}$. Θεωρώντας μέγιστη εμβέλεια 3 μέτρα έχουμε $t_{\text{tof}} \approx 8,7 \text{ msec}$. Πρέπει να ισχύει $t_1 > t_{\text{tof}}$. Για το σύστημα μας επιλέγουμε $t_1 = 10 \text{ msec}$, δηλαδή η μέγιστη εμβέλεια θεωρητική εμβέλεια του συστήματος είναι $R_{\text{θεωρ}} = 343,5 \cdot 10^{-2} = 3,43$ μέτρα. Πρέπει να τονίσουμε ότι η μέγιστη θεωρητική απόσταση είναι κατά τι μικρότερη δεδομένου πως ο χρόνος

που αντιστοιχεί στην μέγιστη απόσταση διαδρομής δεν είναι t_1 , αλλά $t_1 - t_2$. Επειδή, όμως, $t_1 \gg t_2$ ο παραπάνω υπολογισμός είναι προσεγγιστικά σωστός. Η επιλογή του χρόνου t_1 είναι σημαντική και για το μέγιστο πλάτος της εκπεμπόμενης κυματομορφής. Το τελευταίο πρέπει αφενός να είναι αρκετά μεγάλο ώστε το σήμα να μην εξασθενεί υπερβολικά φτάνοντας στο δέκτη, αφετέρου όχι ιδιαίτερα υψηλό ώστε να αποφεύγονται ισχυρές ανακλάσεις. Επιλέγοντας $t_1 = 10 \text{msec}$ αποκλείουμε, σε σημαντικό βαθμό, την άφιξη δύο διαδοχικών παλμοσειρών στο ίδιο χρονικό παράθυρο αναμονής. Στην χειρότερη περίπτωση που ο στόχος κινείται προς τον πομπό με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα (1m/sec) θα έχουν διανυθεί σε 10msec , 10mm . Δηλαδή το εκπεμπόμενο σήμα θα έχει ένα χρόνο διαδρομής μικρότερο κατά $29 \mu\text{sec}$ περίπου. Ο χρόνος αυτός είναι εξαιρετικά μικρός κάνοντας αδύνατη τη λήψη δύο διαδοχικών παλμοσειρών στο ίδιο χρονικό διάστημα σιγής. Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί πως η επιλογή αυτής της τιμής του χρόνου t_1 καθιστά εφικτό έναν ρυθμό ανανέωσης δεδομένων (update rate) μεγαλύτερο των 60Hz . Ο ρυθμός ανανέωσης θα είναι $1/(t_1 + t_{\text{process}})$, όπου t_{process} ο χρόνος επεξεργασίας των μετρήσεων στο δέκτη. Για να έχουμε $(\text{update rate}) > 60 \text{Hz}$, πρέπει $t_{\text{process}} < 26,7 \text{msec}$.

Ο χρόνος t_2 είναι ο συνολικός χρόνος διάρκειας της παλμοσειράς¹. Αυτός καθορίζεται από τον συνολικό αριθμό περιόδων N του ημιτονικού σήματος που θα εκπεμφθεί και προφανώς από τη συχνότητα f αυτού. Γενικά ο αριθμός των περιόδων που θα εκπεμφθεί περιορίζεται από δύο παράγοντες. Αφενός πρέπει να είναι σημαντικός ώστε να δημιουργηθεί μία περιβάλλουσα σημαντικής επιφάνειας για την εφαρμογή της μεθόδου κεντροειδούς εντοπισμού (centroid tracking). Αφετέρου, ο αριθμός των περιόδων πρέπει να είναι αρκετά μικρός ώστε η λήψη του σήματος να μην αρχίζει χρονικά στο δέκτη προ του τέλους εκπομπής αυτού από τον πομπό. Αυτό είναι απαραίτητο ιδίως σε περίπτωση που υπάρχει καλωδίωση μεταξύ πομπού και δέκτη για να επιτευχθεί μεγαλύτερη απομόνωση μεταξύ των. Θεωρώντας ως ελάχιστη περιοχή λειτουργίας τα 10cm , πρέπει $t_2 < 10 \text{cm} / 343,5 \text{m/s} \approx 0,3 \text{msec}$. Τελικά επιλέγουμε $t_2 \approx 0,2 \text{msec}^2$ ώστε να εκπεμφθούν τουλάχιστον πέντε (5) περίοδοι του εκπεμπόμενου σήματος. Ο αριθμός N είναι προφανώς συνάρτηση της χρησιμοποιούμενης συχνότητας όπου π.χ. στην περίπτωση της τοπολογίας 3-3 χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές συχνότητες, όπως θα αναλυθεί ακολούθως.

Η επιλογή της περιόδου T του ημιτόνου της παλμοσειράς είναι αρκετά σύνθετη διαδικασία. Αποφασιστικοί παράγοντες είναι η εξασθένιση του κύματος στον αέρα, η επιθυμητή ακρίβεια και διακριτικότητα, ο ρυθμός δειγματοληψίας καθώς και το συνολικό κόστος και τα διαθέσιμα εμπορικά προϊόντα. Για την περίπτωση του συστήματος που αναπτύσσουμε προνοούμε για πιθανή επέκταση του σε τοπολογία 3-3. Σε αυτήν την περίπτωση δεν επιλέγεται η χρονική αλληλουχία των εκπεμπόμενων παλμοσειρών αλλά, η χρήση τριών διαφορετικών συχνοτήτων. Αυτές θα πρέπει να απέχουν μεταξύ τους αρκετά, εξασφαλίζοντας τη μη παρεμβολή της μίας συχνότητας στην άλλη (βάσει και των χαρακτηριστικών αποκρισεων των πομποδεκτών που θα χρησιμοποιηθούν). Η

¹ Ως παλμοσειρά αναφέρεται καταχρηστικά η σειρά εκπεμπόμενων ημιτόνων

² Ο χρόνος t_2 δεν καθορίζεται επακριβώς μια και θα καθοριστει με τη βοήθεια πολυστροφικού τρίμερ όπως θα φανεί παρακάτω

συχνότητα του εκπεμπόμενου ημιτόνου δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 50kHz, λόγω σημαντικής αύξησης της εξασθένησης. Επιπλέον, δεν πρέπει να είναι χαμηλή ώστε να περιέχει σημαντικές συστατώσεις στο ηχητικό φάσμα, καθιστώντας ενοχλητική τη χρήση του συστήματος. Στο [MART01] αναφέρεται πως σε περιβάλλον γραφείου (σε τέτοιο αναμένεται να εφαρμοστεί το σύστημα) το μεγαλύτερο ποσοστό του ακουστικού θορύβου είναι κάτω από τα 15kHz. Ο ελάχιστος ρυθμός δειγματοληψίας του σήματος στο δέκτη θα πρέπει να είναι τουλάχιστον $2 \cdot f$ και θεωρώντας 3 δέκτες, ο συνολικός αριθμός δειγματοληψίας του συστήματος θα είναι $3 \cdot 2 \cdot f$ (πρακτικά πρέπει να είναι υψηλότερος). Ο ρυθμός δειγματοληψίας καλό είναι να περιοριστεί, κατά το δυνατόν, μειώνοντας το κόστος των συστημάτων δειγματοληψίας που θα χρησιμοποιηθούν. Με δεδομένο το ρυθμό δειγματοληψίας, υψηλότερη συχνότητα σημαίνει μεγαλύτερη ακρίβεια και διακριτικότητα. Βάσει της ανάλυσης αυτής επιλέγεται όπως οι πομποδέκτες του συστήματος να λειτουργούν στην περιοχή (20-40)kHz.

Συνοψίζοντας, επιλέγονται οι ακόλουθες σχεδιαστικές παράμετροι:

- Χρόνος μεταξύ δύο συνεχόμενων παλμοσειρών $t_1=10\text{msec}$
- Χρονική διάρκεια παλμοσειρών: $t_1=0,2\text{msec}$
- Συχνότητα ημιτόνου παλμοσειράς: $f = \frac{1}{T} \in [20 - 40]\text{kHz}$

3.2.2 Πομποδέκτες

Για το σύστημα εντοπισμού, επιλέχθηκε, για λόγους που εξηγήθηκαν στο 2^ο κεφάλαιο, να χρησιμοποιηθούν πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς. Αν και το σύστημα που θα υλοποιηθεί ακολουθεί διάταξη 1-3, προνοούμε για σύστημα 3-3. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει, είτε να χρησιμοποιηθούν πομποί και δέκτες στην ίδια συχνότητα και οι πομποί να εκπέμπουν διαδοχικά ο ένας μετά τον άλλο, είτε να χρησιμοποιηθούν τρεις (3) διαφορετικές συχνότητες με ταυτόχρονη εκπομπή. Στην πρώτη περίπτωση δεδομένου του ότι οι εκπομπές δεν θα είναι ταυτόχρονες εισάγεται ένα (έστω και μικρό) σφάλμα στην προσδιορισθείσα κατάσταση του στόχου ενώ, ο ρυθμός ανανέωσης της κατεύθυνσης του στόχου είναι περίπου ίσος με το $1/3$ του αντίστοιχου της θέσης. Στη δεύτερη περίπτωση (που είναι και αυτή που επιλέγουμε) υπάρχει το μειονέκτημα πως πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τρεις επιμέρους τοπολογίες 1-3, έχοντας ουσιαστικά εννέα (9) δέκτες, που ανά τρεις είναι προσαρμοσμένοι σε μία συχνότητα. Επιπλέον, οι δέκτες που αναφέρονται σε διαφορετική συχνότητα πρέπει να έχουν διάγραμμα απόκρισης συχνότητας που παρέχει ικανοποιητική εξασθένιση στις άλλες δύο συχνότητες λειτουργίας.

Ένα επιπλέον κριτήριο για την επιλογή των πομποδεκτών αποτελεί η κατευθυντικότητα αυτών. Γενικά, στους περισσότερους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς, το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι κωνικό. Η περιοχή εμβέλειας του συστήματος είναι η τομή των τριών κωνικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας των τριών δεκτών. Σε αυτήν την περιοχή μπορεί να εντοπιστεί ο στόχος από το σύστημα (με την προϋπόθεση πως ο πομπός θα «φωτίζει» τους δέκτες δεδομένου της μη ομοιοκατευθυντικότητάς του). Η περιοχή εμβέλειας αφενός καθορίζεται από την κατευθυντικότητα

των τριών δεικτών και από τη σχετική μεταξύ τους απόσταση. Για την τελευταία θα ακολουθήσει περαιτέρω ανάλυση.

Υστερα από έρευνα αγοράς και των σύγχρονων εξελίξεων σε αυτό τον τομέα ([YAMA06]) επιλέχθηκαν, τελικά, ζεύγη πομποδεκτών σε συχνότητες 25, 32,8 και 40kHz της εταιρείας PRO-WAVE ([PROWAVE06]). Πρόκειται για τους πομποδέκτες 250ST180 (πομπός), 250SR180 (δέκτης) για τα 25kHz, 328ST180 (πομπός), 328SR180 (δέκτης) για τα 33kHz, 400ST180 (πομπός), 400SR180 (δέκτης) για τα 40kHz. Πέραν των τεχνικών χαρακτηριστικών που αναφέρονταν στα φύλλα προδιαγραφών από κάθε παρτίδα πομποδεκτών που παραλήφθηκε, έγιναν δοκιμές σε πέντε (5) ζευγάρια πομποδεκτών για κάθε συχνότητα.

	250ST180	250SR180	328ST180	328SR180	400ST180	400SR180
Εκπεμπόμενο SPL (db)	117,9	-	124,6	-	123,5	-
Ευαισθησία (db)	-	-57,6	-	-58	-	-57,4
Αμφίπλευρη γωνία -6db	74,96	74,96	45,29	45,29	50,6	50,6
Απομόνωση με γειτονικά εκπεμπόμενες συχνότητες (db)	-	>40	-	>40	-	>40
Μέγιστη διάσταση (mm)	15	15	15	15	13,10	13,10

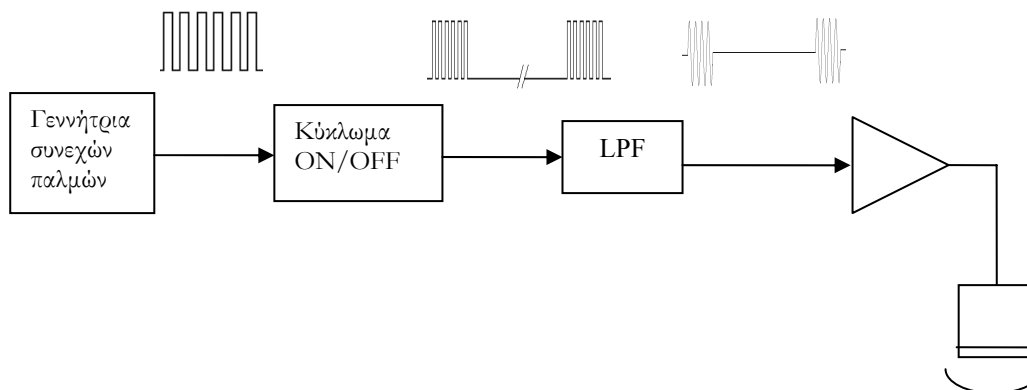
Πίνακας 9: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά πομποδεκτών

Όπως φαίνεται όσο μεγαλώνει η συχνότητα μικραίνει το άνοιγμα της γωνίας (το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο με το λόγο D/λ , όπου D το άνοιγμα πιστονιού του πομποδέκτη). Το άνοιγμα στα 40kHz είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των 32,8kHz λόγω της μικρότερης διάστασης των πομποδεκτών.

3.2.3 Πομπός

Έχοντας προσδιορίσει τη μορφή του παλμού, πρέπει το κύκλωμα που θα σχεδιαστεί να δημιουργεί τρία ημιτονικά σήματα στις προαναφερθείσες συχνότητες. Γενικά, είναι πιο απλό να δημιουργήσουμε ένα παλμικό σήμα από ένα αντίστοιχο ημιτονοειδές. Αυτό δεδομένου πως, κατά πάσα περίπτωση, θα είναι συνεχές, πρέπει να μετατραπεί σε παλμικό και να αποκτήσει τη μορφή της περιγραφείσας κυματομορφής. Στη συνέχεια κάθε κυματομορφή πρέπει να διέλθει από κατωδιαβατό φίλτρο, με συχνότητα επίτρεψης την ελάχιστη επιθυμητή συχνότητα. Οι τετραγωνικοί παλμοί με

ανάλυση κατά Fourier, αποτελούνται από έναν άπειρο αριθμό ημιτόνων σε συχνότητες ίση με την συχνότητα του παλμικού σήματος και των αρμονικών αυτής. Έτσι περνώντας από το φίλτρο διέρχεται μόνο η πρώτη αρμονική και το σήμα μετατρέπεται σε ημιτονικό. Βάσει των παραπάνω, ένα αρχικό διάγραμμα του πομπού είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 44: Πρώιμο διάγραμμα πομπού

Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται ξεχωριστά κάθε επιμέρους τμήμα του πομπού.

Πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος

Για τη γεννήτρια συνεχών τετραγωνικών παλμών επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο εξαιτίας της σχετικής αυτονομίας του και της μεγάλης ακριβείας που παρέχει. Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος (crystal oscillator) είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που χρησιμοποιεί τις μηχανικές ιδιότητες, και συγκεκριμένα την ιδιότητα του συντονισμού ενός φυσικού κρυστάλλου ή ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού, για να δημιουργήσει ένα ηλεκτρικό σήμα με μεγάλη ακρίβεια στην συχνότητα. Χρησιμοποιείται για μέτρηση χρόνου (π.χ. σε ηλεκτρονικά ρολόγια), για παροχή σταθερού σήματος χρονισμού στα ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα, και για σταθεροποίηση των συχνοτήτων σε ραδιοπομπούς.



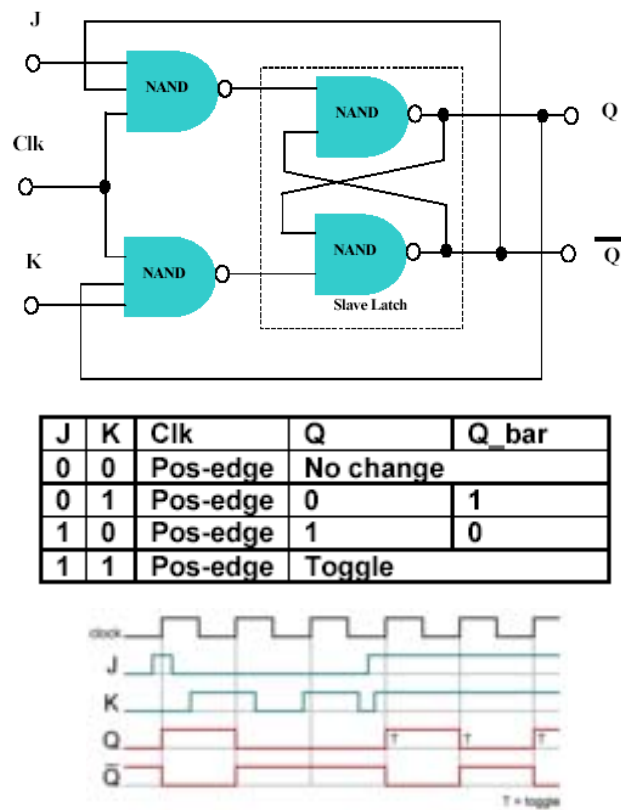
Εικόνα 45: Κρυσταλλικός ταλαντωτής 4MHz.

Ως κρύσταλλο εννοούμε ένα στερεό του οποίου η δομή μικροσκοπικά (σε ατομικό επίπεδο δηλαδή), χαρακτηρίζεται από μια επαναλαμβανόμενη μορφή τοποθέτησης των σωματιδίων που το αποτελούν, στις τρεις (3) διαστάσεις. Οποιοδήποτε υλικό που επιδεικνύει σχετική ελαστικότητα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κρύσταλλος – αφού κάθε υλικό έχει μια φυσική συχνότητα συντονισμού – έχοντας όμως μικρότερη ακρίβεια από έναν κρύσταλλο (όπως συμβαίνει με τα κεραμικά υλικά). Η συχνότητα συντονισμού εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα, την ελαστικότητα και την ταχύτητα του ήχου μέσα στο υλικό. Ο κρύσταλλος που συνήθως προτιμάται είναι ο χαλαζίας (quartz), που έχει και το πλεονέκτημα ότι το μέγεθος του δεν αλλάζει σχεδόν καθόλου με την θερμοκρασία, οπότε κρατά σταθερή την συχνότητα ταλάντωσής του σε διαφορετικές συνθήκες. Γενικά, οι κρύσταλλοι χρονοσμού που κατασκευάζονται μπορεί να έχουν συχνότητες από μερικές δεκάδες kHz μέχρι μερικές δεκάδες MHz.

Πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι μπορούν να παραχθούν για οποιαδήποτε συχνότητα στο προαναφερθέν φάσμα. Για συγκεκριμένες, ευρέως χρησιμοποιούμενες συχνότητες υπάρχουν γραμμές παραγωγής κρυστάλλων. Για οποιοδήποτε άλλες συχνότητες χρειάζεται ειδική παραγγελία με αποτέλεσμα το κόστος του κρυστάλλου να ανεβαίνει σημαντικά. Έτσι για το σύστημά μας αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε συνηθισμένο κρύσταλλο υψηλότερης συχνότητας και να προχωρήσουμε στη διαίρεση συχνότητας μέσα από κατάλληλο κύκλωμα. Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε έναν κρύσταλλο συχνότητας 4MHz της εταιρίας Taitien, ο οποίος για να λειτουργήσει χρειάζεται, απλά, μια τροφοδοσία 5V σε ένα από τα 4 pins που διαθέτει. Εμείς όμως, όπως προείπαμε, απαιτούμε τις συχνότητες 25kHz, 32,8kHz και 40kHz. Για να τις επιτύχουμε θα χρησιμοποιήσουμε διαίρεση συχνότητας.

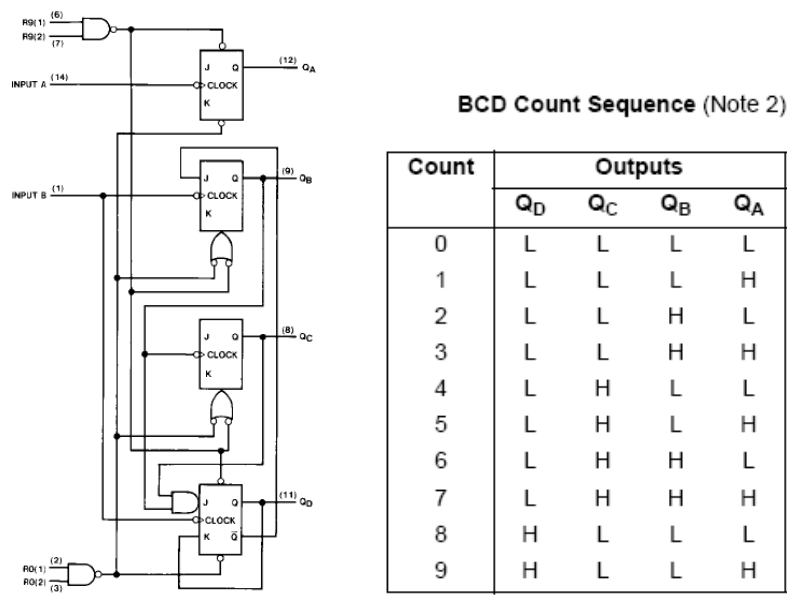
Διαίρετης συχνότητας

Το κύκλωμα διαίρεσης συχνότητας έχει είσοδο την τετραγωνική παλμοσειρά των 4MHz και ως έξοδο τις τρεις τετραγωνικές παλμοσειρές των 25kHz, 32,8kHz και 40kHz. Για να το επιτύχουμε αυτό, χρησιμοποιούμε μια σειρά από μετρητές (counters). Ένας μετρητής, περιέχει μια σειρά από λογικά κυκλώματα καταχωρητών (κυρίως flip-flops). Ο πιο απλός μετρητής αποτελείται από μόνον ένα flip-flop τύπου D, το οποίο ανατροφοδοτείται από την ανεστραμμένη του έξοδο. Οι πιο συνηθισμένοι μετρητές είναι οι δυαδικοί οι οποίοι αποτελούνται από μια σειρά k D flip-flops και υλοποιούν διαιρέσεις κατά παράγοντα $2, \dots, 2^{k-1}$. Για το κύκλωμά μας χρησιμοποιούμε έναν δεκαδικό μετρητή. Αυτός δημιουργείται τοποθετώντας χρησιμοποιώντας JK flip-flops, και μπορεί να υλοποιησει διαιρέσεις κατά παράγοντα $i=2,3,\dots,10$.



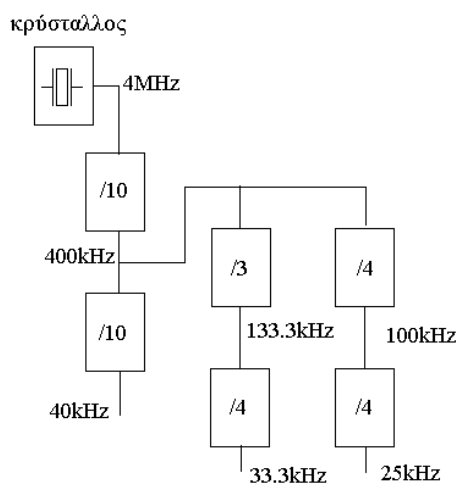
Εικόνα 46: JK-flip flop : Σχηματικό διάγραμμα, πίνακας αληθείας, διάγραμμα χρονισμού

Το ολοκληρωμένο που χρησιμοποιούμε είναι το 74LS90 της National Semiconductors, το οποίο αποτελείται από 4 flip-flops τύπου JK και μια σειρά από λογικές πύλες.



Εικόνα 47: Λογικό διάγραμμα και πίνακας αλήθειας του 74LS90

Οι δυνατότητες διαίρεσης συχνότητας που έχουμε είναι κατά παράγοντα 2,3,...10. Για να παράγουμε τις επιθυμητές συχνότητες χρειαζόμαστε λόγους διαίρεσης $4\text{MHz}/40\text{kHz}=100$, $4\text{MHz}/32,8\text{kHz}\approx 121,95$ και $4\text{MHz}/25\text{kHz}=160$. Επομένως για τα 40kHz και τα 25kHz οι παράγοντες διαίρεσης είναι $100=10\cdot 10$ και $160=10\cdot 4\cdot 4$. Για τα 32,8kHz αναγκαστικά χρησιμοποιούμε τον παράγοντα διαίρεσης $120=10\cdot 3\cdot 4$. Έτσι, ουσιαστικά η συχνότητα που προκύπτει είναι $4\text{MHz}/120\approx 33,3\text{kHz}$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όπως βλέπουμε από τις αποκρίσεις των πομποδεκτών, μία απώλεια περίπου 1dB σε ευαισθησία (για τους δέκτες) ή για το SPL (για πομπούς).



Εικόνα 48: Λογικό διάγραμμα διαιρέσεων συχνότητας

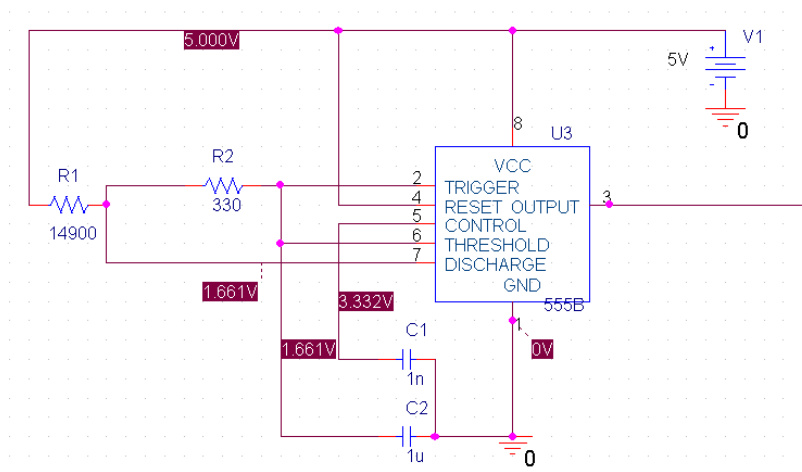
Πρέπει να τονιστεί πως βάσει των κυκλωμάτων χρονισμού όταν η τελευταία διαίρεση είναι με παράγοντα που δεν αποτελεί δύναμη του 2 (π.χ. 10 για τα 40kHz) προκύπτει κύκλος εργασίας (duty cycle) 20% και όχι 50%. Αυτό δεν μας απασχολεί ιδιαίτερα μια και κατά τη διέλευση από το κατωδιαβατό φίλτρο, παίρνουμε τα κατάλληλα χρονισμένα ημίτονα, οπότε δεν επηρεάζεται η τελική μορφή της εξόδου του πομπού. Τέλος, πρέπει να τονιστεί πως ο χρόνος που απαιτείται για τη διόδο του σήματος μέσα από το διαιρέτη και τη διαίρεση συχνότητας αυτού, είναι της τάξης των 25nsec. Επομένως, είναι σχετικά ακριβές να θεωρήσουμε ταυτόχρονες εξόδους από τις τρεις βαθμίδες διαίρεσης.

Κύκλωμα ON/OFF

Έως τώρα έχουμε δημιουργήσει τα τρία ημιτονικά σήματα στις επιθυμητές συχνότητες αλλά, αυτά είναι συνεχή. Μένει να τα μετατρέψουμε σε παλμικά με τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής που έχουν αναλυθεί προηγουμένως. Προς τούτο, τα σήματα αθροίζονται λογικά με κατάλληλο τετραγωνικό παλμό, που θα παραχθεί από ένα ολοκληρωμένο 555, το πιο διαδεδομένο

ολοκληρωμένο κύκλωμα χρονισμού. Είναι ένας πολύ φθηνός και εύχρηστος τρόπος να δημιουργήσει κανείς κυματομορφές και παλμούς διαφόρων συχνοτήτων και μορφών, ανάλογα με την συνδεσμολογία που ακολουθείται.

Για την εφαρμογή μας, μέσω του 555 θα παράγουμε τετραγωνικό παλμό με περίοδο περίπου 10ms (και άρα συχνότητα γύρω στο 1kHz). Χρησιμοποιούμε το ολοκληρωμένο 555 σε ασταθή λειτουργία όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:.



Εικόνα 49: Συνδεσμολογία της παλμογεννήτριας 555

Για την παλμογεννήτρια έχουμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Χρόνος φόρτισης (output high): $t_H = 0,693(R_1 + R_2)C$
- Χρόνος εκφόρτισης (output low): $t_L = 0,693R_2C$
- Περίοδος: $T = t_H + t_L = 0,693(R_1 + 2R_2)C$.

Παρατηρώντας τις παραπάνω σχέσεις, παρατηρούμε ότι ο κύκλος εργασίας = $t_H / (t_H + t_L) > 50\%$. Όπως έχουμε περιγράψει, θέλουμε κυματομορφή με ανάποδα χαρακτηριστικά δηλαδή σήμα με κύκλο εργασίας = $t_2 / t_1 = 2\%$. Για να το παράγουμε δημιουργούμε ένα σήμα με duty cycle 98%, με χρήση του 555, το οποίο θα διέλθει μέσα από έναν αντιστροφέα (inverter), που θα μετατρέψει το σήμα στο ζητούμενο.

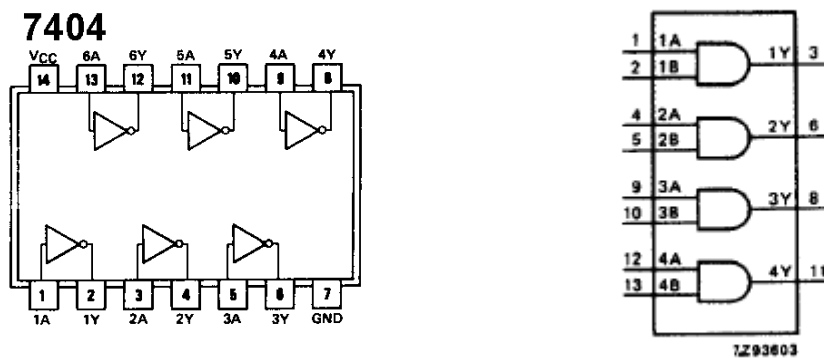
Έτσι λοιπόν, επιλέγουμε τις τιμές $R_1 = 14,8k\Omega$, $R_2 = 330\Omega$, $C = 1\mu F$, οι οποίες δίνουν:

- $t_H = 10,5msec$
- $t_L = 0,23msec$
- $T = 10,73msec$
- $Duty-cycle_{555} = 97,8\%$.

Εδώ να σημειώσουμε, ότι επιλέξαμε εμπορικές τιμές αντιστάσεων που δίνουν προδιαγραφές σήματος πιο κοντά στις προβλεπόμενες. Τέλος, να τονιστεί πως δεν υφίσταται λόγος να δημιουργήσουμε τρία διαφορετικά σήματα on-off με τρία διαφορετικά 555 γιατί, όπως είδαμε, το εκπεμπόμενο σήμα μέσω της μίας ζεύξης δεν θα επηρεάσει τις υπόλοιπες δύο.

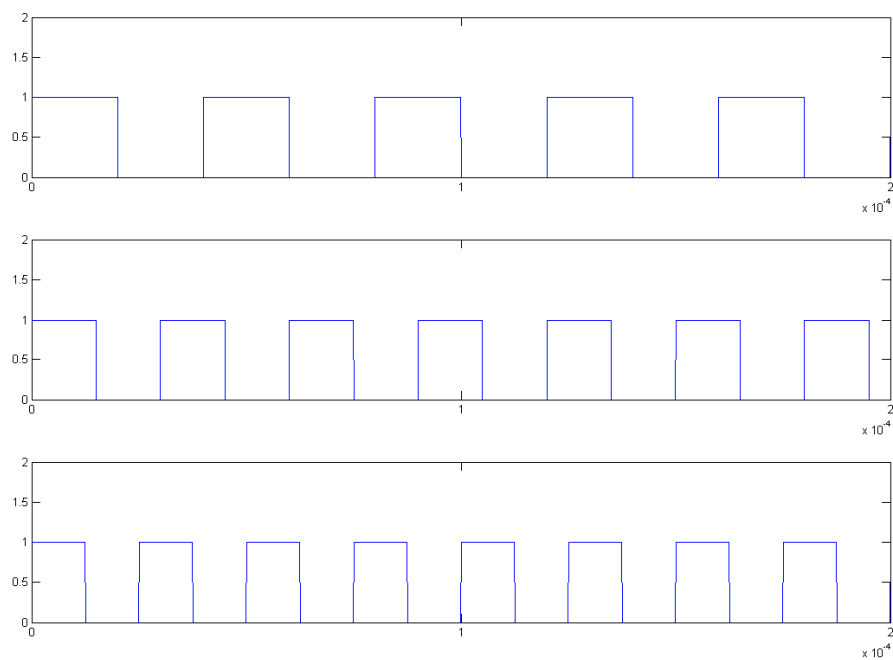
Για την αντιστροφή του παλμού που προκύπτει από το 555 χρησιμοποιούμε τον αντιστροφέα 74HC04, ένα απλό ολοκληρωμένο που εμπεριέχει 6 αντιστροφείς. Έτσι προκύπτει σήμα που αντί να είναι on για το 97,8% του χρόνου, είναι on για το 2,2% του χρόνου.

Το σήμα εξόδου του 74HC04 αθροίζεται λογικά με τα τρία σήματα που προκύπτουν από το κύκλωμα διαίρεσης συχνότητας. Για την άθροιση χρησιμοποιείται το, επίσης πολύ σύνηθες, ολοκληρωμένο κύκλωμα 74HC08. Το εν λόγω κύκλωμα περιέχει 4 αθροιστές. Ως γνωστόν, η πύλη άθροισης (AND) δίνει υψηλή έξοδο, αν και μόνο αν, όλες οι εισοδοί της είναι και αυτές υψηλές.

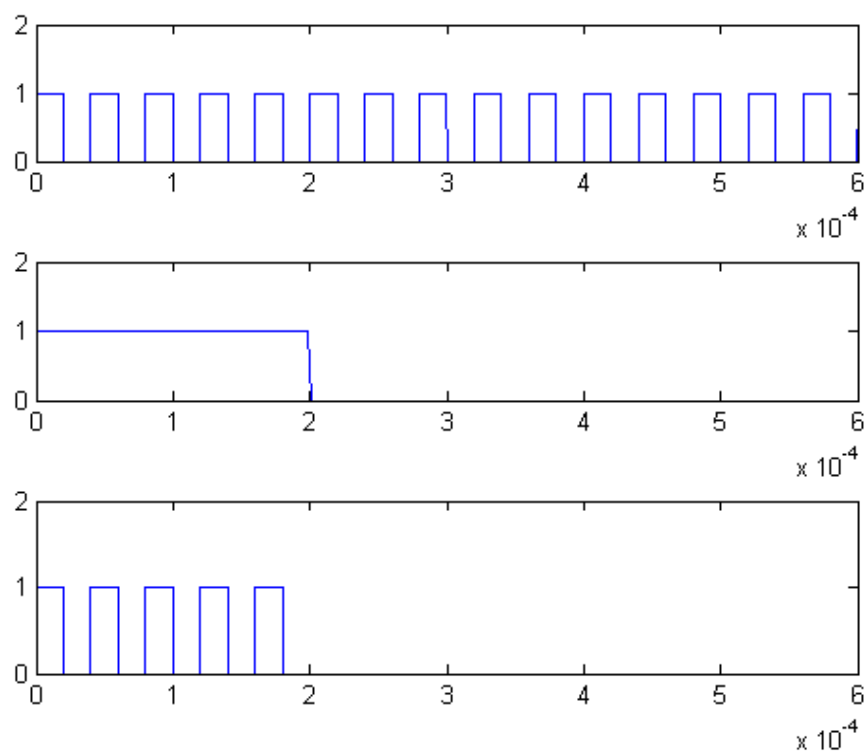


Εικόνα 50: Ολοκληρωμένα 7404 και 7408

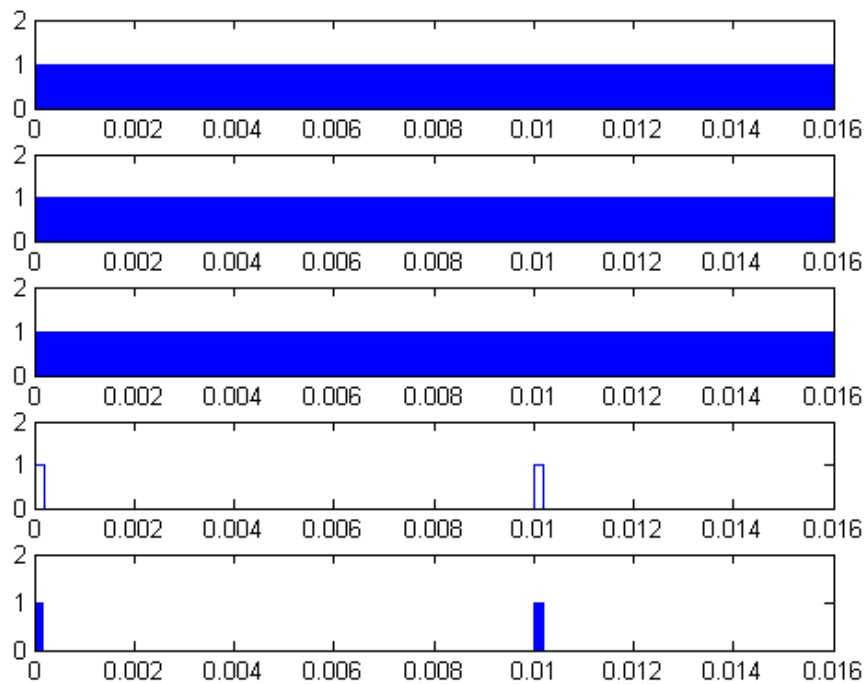
Χρησιμοποιώντας το κύκλωμα ON/OFF που περιγράφηκε, παίρνουμε κυματομορφές όπως οι επιθυμητές με τη διαφορά της ύπαρξης τετραγωνικών παλμών αντί των επιθυμητών ημιτονικών κυματομορφών. Πρέπει να τονιστεί, πως το ολοκληρωμένο 7408 διαθέτει τέσσερις πύλες AND. Οι τρεις από τις τέσσερις χρησιμοποιούνται για τις δημιουργούμενες κυματομορφές. Η τέταρτη πύλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη. Στο αναπτυχθέν σύστημα ο συγχρονισμός πομπού και δέκτη γίνεται ενσύρματα. Μελλοντικά προτείνεται η χρήση ενός ζεύγους φωτοдиодων για το συγχρονισμό αυτών. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετώντας ως είσοδο στην τελευταία πύλη AND το σήμα τροφοδοσίας της διόδου και το σήμα εξόδου του αντιστροφέα (δηλαδή το αναστραμμένο σήμα χρονισμού του 555), μπορούμε να θέτουμε τη φωτοδιόδο εκπομπής σε κατάσταση λειτουργίας τη χρονική στιγμή εκπομπής του σήματος. Δεδομένου πως το φως ταξιδεύει με ταχύτητα πολλαπλάσια της ταχύτητας διάδοσης του ήχου, μπορούμε, προσεγγιστικά, να θεωρήσουμε ως σωστή τη λαμβανόμενη τιμή για τη χρονική στιγμή εκπομπής του σήματος. Το μέγιστο χρονικό λάθος που εισέρχεται στην μέγιστη εμβέλεια του συστήματος (2m) είναι $dt \approx 6,67 \text{ nsec}$, που αντιστοιχεί σε ένα σφάλμα υπολογισμού απόστασης περίπου $2,23 \mu\text{m}$, δηλαδή πρακτικά αμελητέο. Στις ακόλουθες εικόνες παρατηρούμε τις τρεις σχηματιζόμενες παλμοσειρές, την παλμοσειρά από το ολοκληρωμένο 555 και το αποτέλεσμα μετά τη λογική άθροιση των σημάτων.



Εικόνα 51: Σχηματιζόμενες παλμοσειρές



Εικόνα 52: Παλμοσειρά, σήμα χρονισμού και λογική άθροιση σε μικροσκοπική κλίμακα



Εικόνα 53: Παλμοσειρές, σήμα χρονισμού και λογική άθροιση σε μακροσκοπική κλίμακα

Πρέπει να τονιστεί, πως οι παλμοί, καθώς εισέρχονται στην ελάχιστη πύλη AND, δεν είναι συγχρονισμένοι μεταξύ τους. Δηλαδή, σε αντίθεση με ό τι φαίνεται στα πιο πάνω σχήματα, συνηθέστερα, η λογική άθροιση μπορεί να δώσει στην έξοδό της μία σειρά παλμών εκ των οποίων ο πρώτος ή ο τελευταίος έχουν διάρκεια μικρότερη από την περίοδο των λοιπών. Αυτό θα εισάγει μια πολύ μικρή παραμόρφωση στο σήμα, η οποία θα αντιμετωπιστεί με το φίλτράρισμα του σήματος περί της πρώτης αρμονικής αυτού.

Φιλτράρισμα

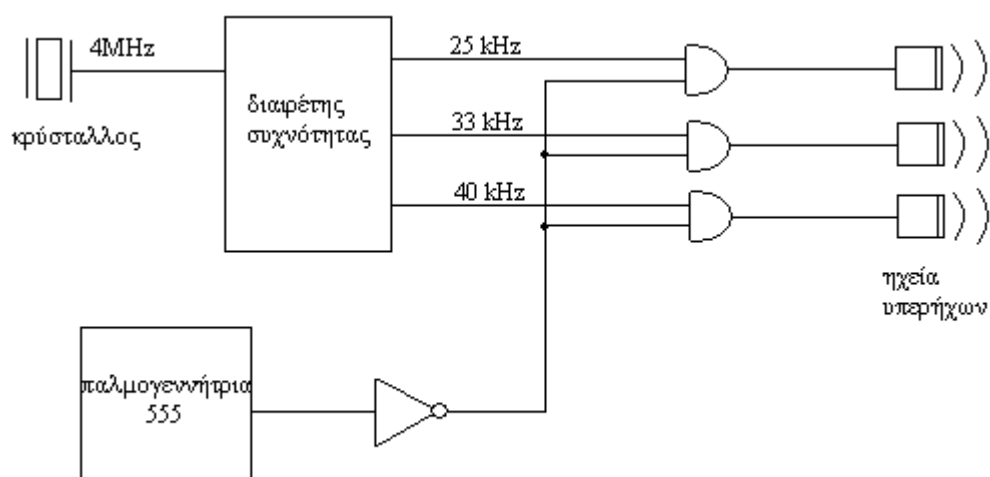
Η κυματομορφή τετραγωνικών παλμών που έχει δημιουργηθεί χρειάζεται να περάσει από ένα κατωδιαβατό φίλτρο προκειμένου να διέλθει η πρώτη από τον αριθμό των αρμονικών που συγκροτούν τον τετραγωνικό παλμό. Ο πολύ έντονος συντονισμός των πομποδεκτών περί τις κεντρικές τους συχνότητες, ουσιαστικά, τα οδηγεί να λειτουργούν ως αυτόνομα φίλτρα. Όπως παρατηρούμε και από τα χαρακτηριστικά διαγράμματα ευαισθησίας και SPL των δεκτών και των πομπών αντίστοιχα, οι πομποδέκτες πετυχαίνουν απόρριψη της 2^{ης} αρμονικής κατά παράγοντα μεγαλύτερο των 40db. Λόγω της πολύ καλής συμπεριφοράς του «φίλτρου» αυτού, δεν υπάρχει ανάγκη τοποθέτησης κανονικού φίλτρου τόσο στον πομπό, όσο και στον δέκτη. Στα αρχικά σχέδια του συστήματος, είχε προβλεφθεί και η χρήση ενός ενεργού ζωνοπερατού φίλτρου (συγκεκριμένα Chebyshev 2ης τάξης), αλλά τελικά αποδείχθηκε ότι δεν θα αποκομίζαμε κανένα όφελος από την χρήση του.

Ενίσχυση

Οι συνολικές απώλειες της αλυσίδας του πομπού ως αυτό το σημείο, και πριν οδηγηθούν στους πομποδέκτες είναι της τάξης του 1-1,5db. Η συνολική κατανάλωση ρεύματος στην αλυσίδα του πομπού είναι 63mA, όπως διαπιστώθηκε τόσο από προσομοίωση του κυκλώματος, όσο και πειραματικά. Ο πιεζοηλεκτρικός κρυσταλλός παρέχει τετραγωνική κυματομορφή πλάτους 5V. Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς έχουν, όπως φαίνεται από τα φύλλα προδιαγραφών τους, μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ 0,2Watt. Προς τούτο, περαιτέρω ενίσχυση του σήματος στον πομπό δεν ήταν δυνατή μια και θα ξεπερνούσε το όριο μέγιστης ισχύος εισόδου για τους πομπούς.

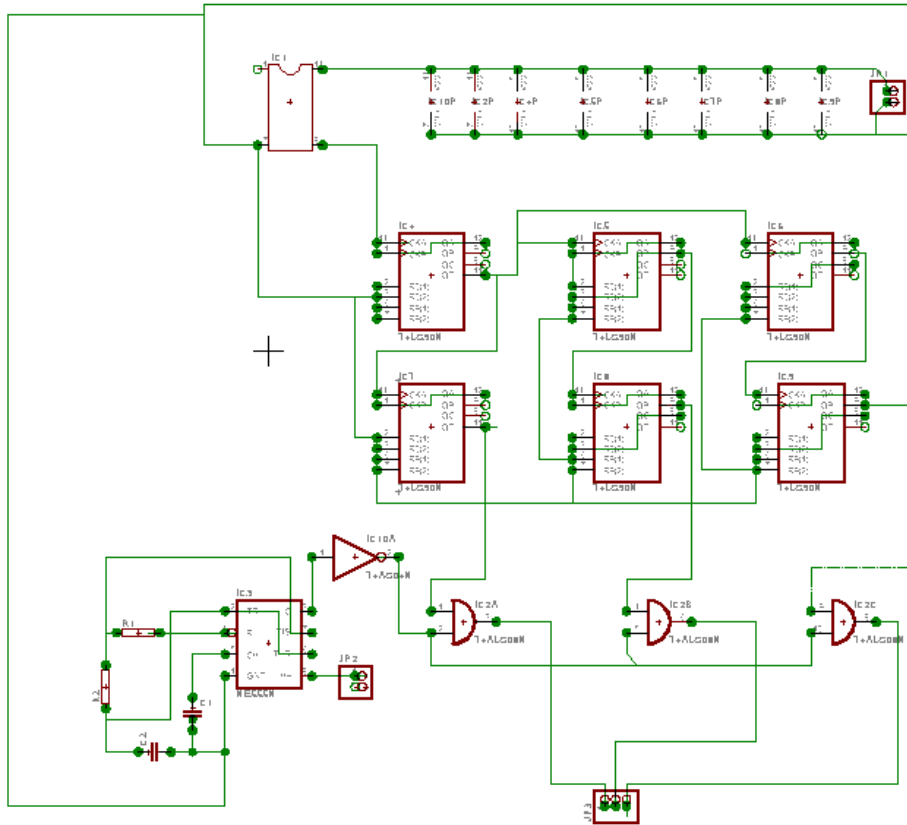
Υλοποίηση πομπού

Βάσει των τροποποιήσεων που έγιναν κατά τη διάρκεια σχεδίασης της αλυσίδας του πομπού, το τελικό μπλοκ διάγραμμα, έτσι όπως και υλοποιήθηκε είναι το ακόλουθο:



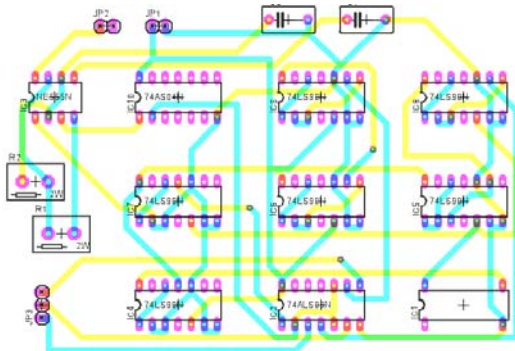
Εικόνα 54: Τελικό μπλοκ διάγραμμα πομπού

Παρακάτω βλέπουμε το σχηματικό του κυκλώματος, όπως σχεδιάστηκε με χρήση του προγράμματος EAGLE Layout Editor. Το κύκλωμά περιέχει συνολικά εννέα (9) ολοκληρωμένα κυκλώματα (έξι 7490, ένα 555, ένα 7408 και ένα 7404), τον πιεζοηλεκτρικό κρυσταλλό, δύο αντιστάσεις και δύο πυκνωτές. Η τροφοδοσία του είναι 5V και η συνολική του κατανάλωση σε ρεύμα 63mA.



Εικόνα 55: Το πλήρες σχηματικό του πομπού

Το τελικό διάγραμμα του πομπού και η πλακέτα αυτού φαίνεται στις δύο ακόλουθες εικόνες. Η πλακέτα τυπώθηκε στο μηχάνημα κοπής και τύπωσης που διαθέτει το ΕΜΟΙ.



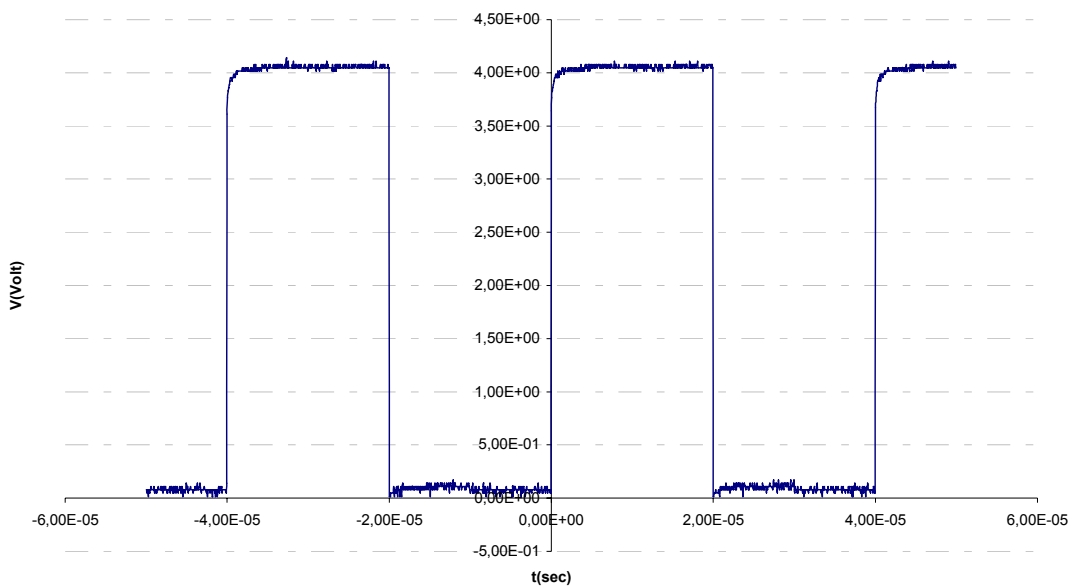
Εικόνα 56: PCB σχέδιο του πομπού



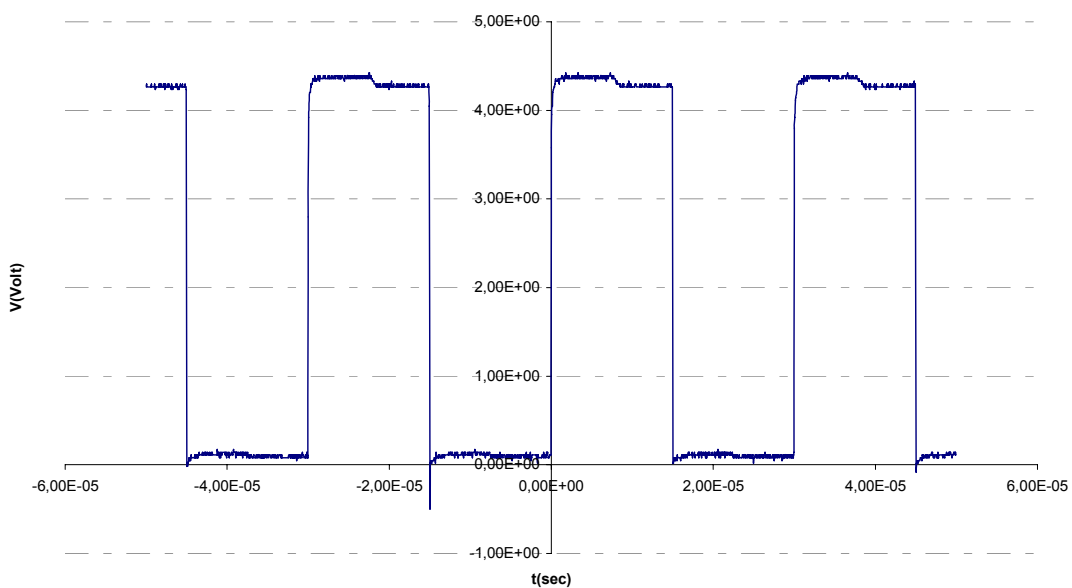
Εικόνα 57: Πλακέτα πομπού

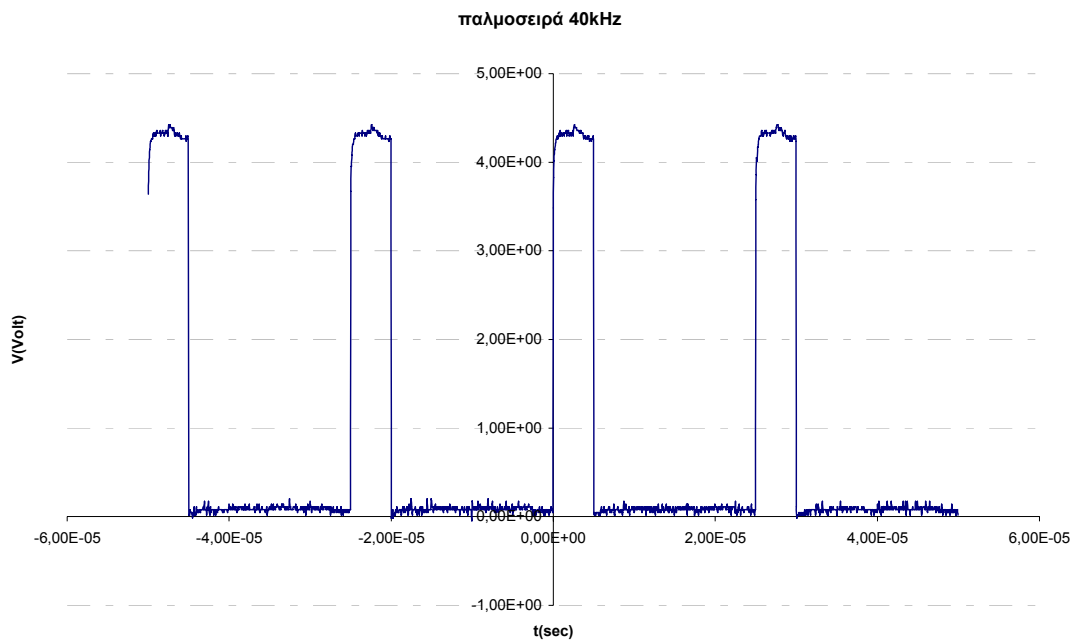
Ο πομπός αφού κατασκευάστηκε, τέθηκε σε λειτουργία και ελέγχθηκε για να πιστοποιηθεί η σωστή λειτουργία του. Στις γραφικές που ακολουθούν φαίνονται κατά σειρά οι κυματομορφές που προκύπτουν από το κύκλωμα διαίρεσης συχνότητας, οι παλμοί χρονισμού από το κύκλωμα του 555 αφού περάσουν από τον αντιστροφέα και οι δημιουργούμενες κυματομορφές μετά τη λογική άθροιση του ανεστραμμένου σήματος χρονισμού και των εκάστοτε παλμοσειρών 25, 33 και 40kHz αντίστοιχα, όπως μετρήθηκαν πειραματικά με χρήση παλμογράφου.

παλμοσειρά 25kHz

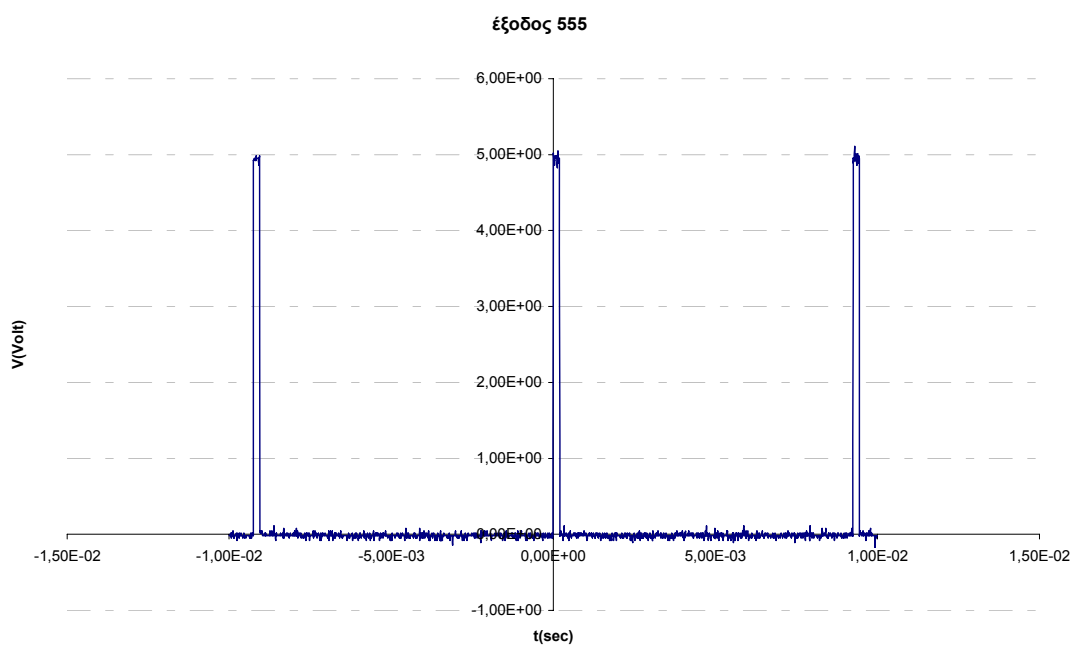


παλμοσειρά 33kHz



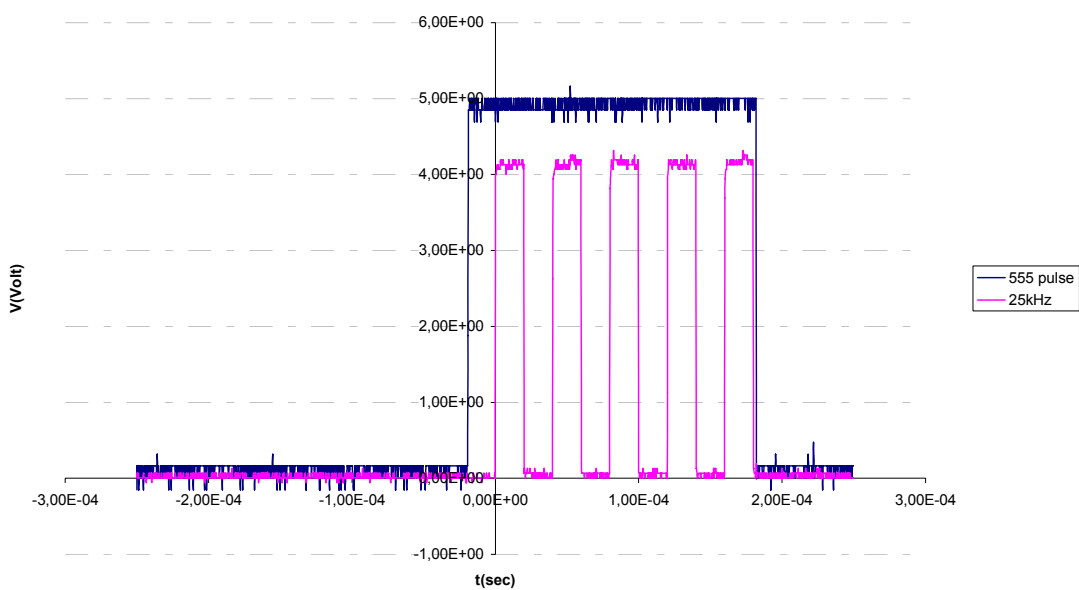


Εικόνα 58: Παλμοί 25, 33 και 40kHz από το κύκλωμα διαίρεσης συχνότητας

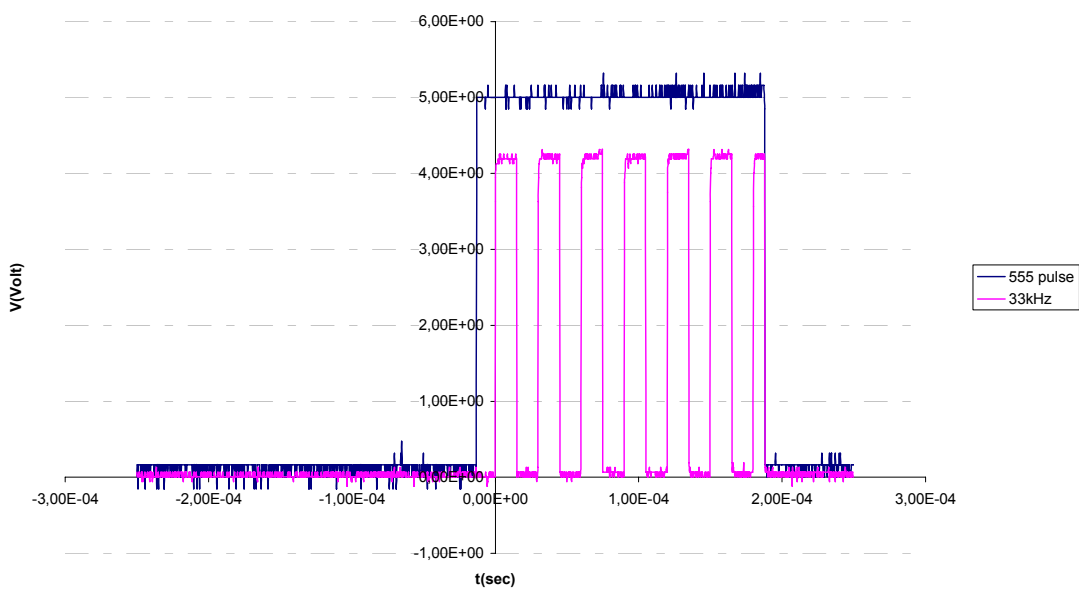


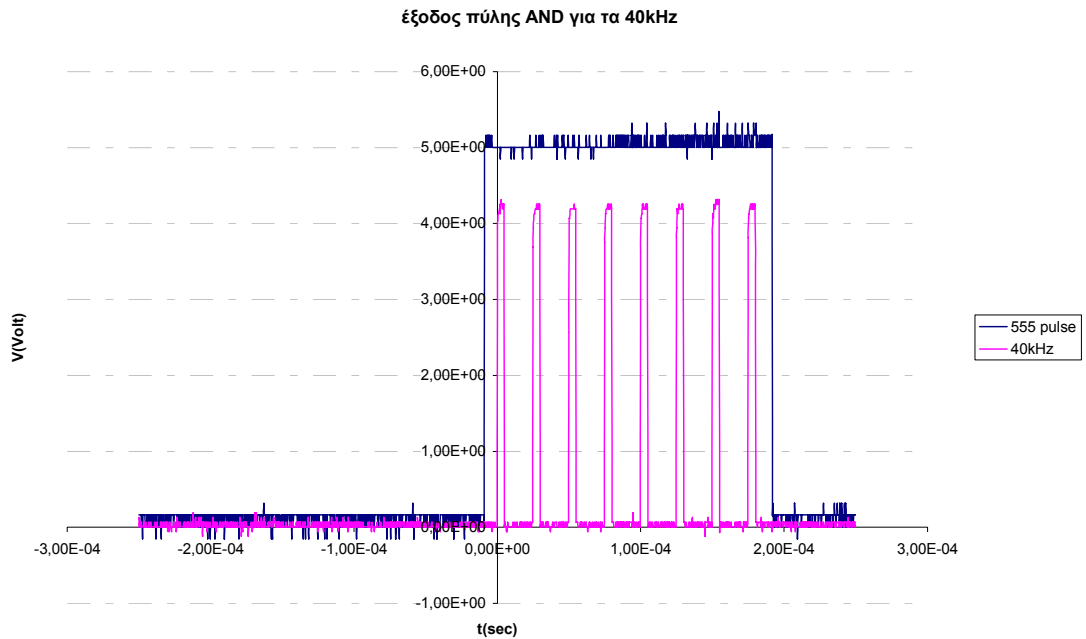
Εικόνα 59: Ανεστραμμένο σήμα χρονισμού

έξοδος πύλης AND για τα 25kHz



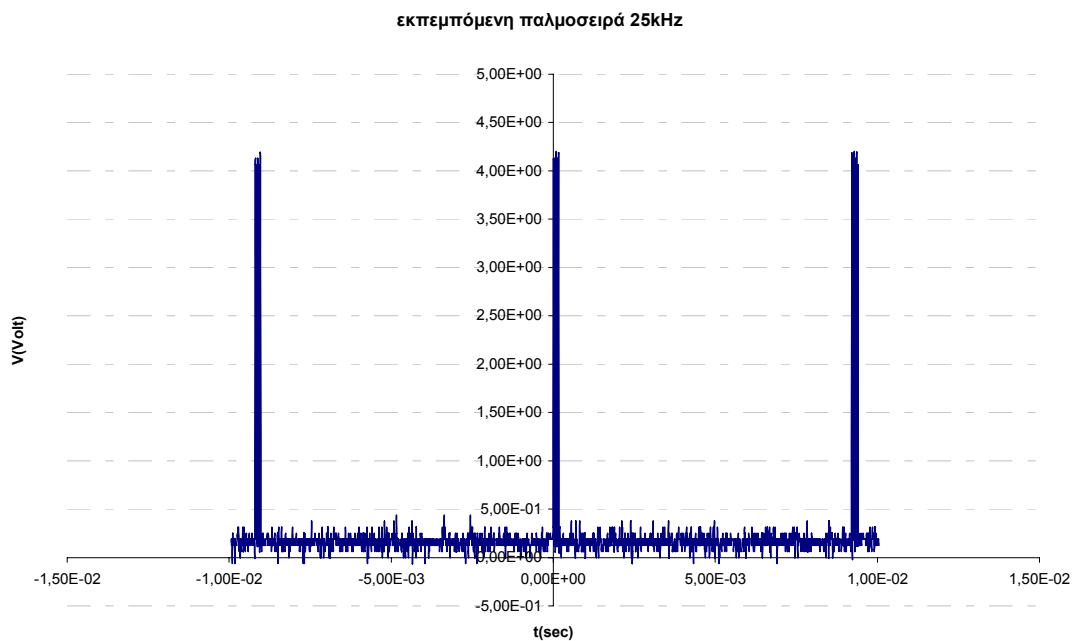
έξοδος πύλης AND για τα 33kHz

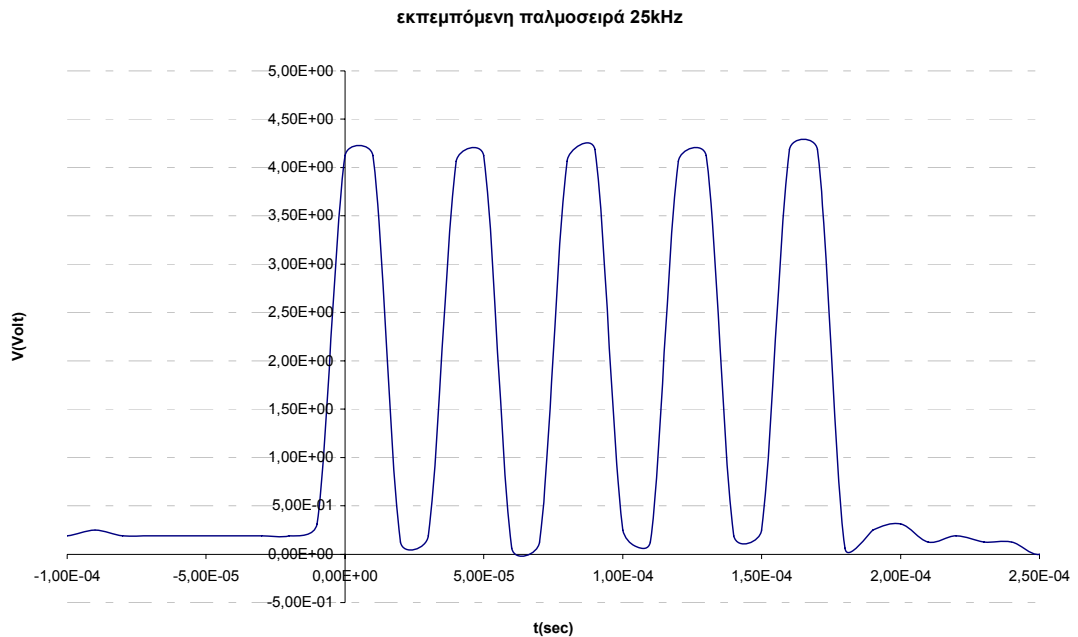




Εικόνα 60: Λογική άθροιση του σήματος χρονισμού με τις παλμοσειρές των 25, 33 και 40 kHz

Η μετατροπή του σήματος από τους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς σε ημιτονικούς παλμούς, μπορεί να διαπιστωθεί μετά τη λήψη του σήματος. Τοποθετώντας ένα δέκτη σε μικρή σχετικά απόσταση (ώστε να μην έχουμε απώλειες ή παραμόρφωση του σήματος) παίρνουμε την κυματομορφή εισόδου στο δέκτη, που αποτελεί και το τελικά εκπεμπόμενο σήμα. Στις δύο ακόλουθες γραφικές βλέπουμε (ενδεικτικά για τα 25 kHz) αντίστοιχα τρεις διαδοχικές παλμοσειρές και μία εξ' αυτών σε μεγέθυνση.





Εικόνα 61: Εκπεμπόμενο σήμα (τρεις παλμοσειρές και μία παλμοσειρά σε μεγέθυνση)

3.2.4 Δέκτης

Το εκπεμπόμενο σήμα θα διαδοθεί σύμφωνα με το διάγραμμα ακτινοβολίας του πομπού και θα εξασθενήσει σημαντικά κατά τη διαδρομή του. Το σήμα θα ληφθεί από τους τρεις (ή ενιά σε περίπτωση τοπολογίας 3-3) δέκτες, στη συνέχεια θα ενισχυθεί από έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου, θα φιλτραριστεί κατάλληλα και, τέλος θα δειγματοληπτηθεί και θα οδηγηθεί στο σύστημα επεξεργασίας μετρήσεων. Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των επιμέρους τμημάτων της αλυσίδας του δέκτη, είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα χαρακτηριστικά του λαμβανόμενου σήματος.

Ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι η εξασθένηση των σημάτων καθώς αυτά ταξιδεύουν από τον πομπό στους δέκτες. Όπως αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο, μεταξύ του επιπέδου ηχητικής πίεσης (SPL), σε μια απόσταση R , και της ισχύος του ακουστικού κύματος στην πηγή του ήχου ισχύει προσεγγιστικά η σχέση: $SPL = SWL - 20 \log_{10}(R) - 8 - D_1$ (λοιπές απώλειες), όπου D_1 ο παράγοντας κατευθυντικότητας και R η απόσταση. Η σχέση αυτή μπορεί να γραφτεί πιο σωστά ως εξής:

$$SPL(R) = SPL(R_0) - 20 \log \left(\frac{R}{R_0} \right) - a(f)R,$$

όπου $SPL(R_0)$ το επίπεδο ηχητικής πίεσης σε μία απόσταση αναφοράς όπως δίνεται από τα φύλλα προδιαγραφών του ενισχυτή, $a(f)$ ο συντελεστής εξασθένησης του σήματος (που εξαρτάται από τη συχνότητα f και τη σχετική υγρασία) και R η απόσταση. Από την πιο πάνω σχέση έχουμε αγνοήσει σε πρώτο στάδιο τις απώλειες λόγω της κατευθυντικότητας του δέκτη σε μη μετωπικές γωνίες

πρόσπτωσης του σήματος. Στα φύλλα προδιαγραφών η απόσταση R_0 στην οποία μετρείται η στάθμη αναφοράς για το SPL (επονομαζόμενη και ως transmitting SPL) είναι τα 30cm (ώστε να είναι στο μακρινό πεδίο του πομπού).

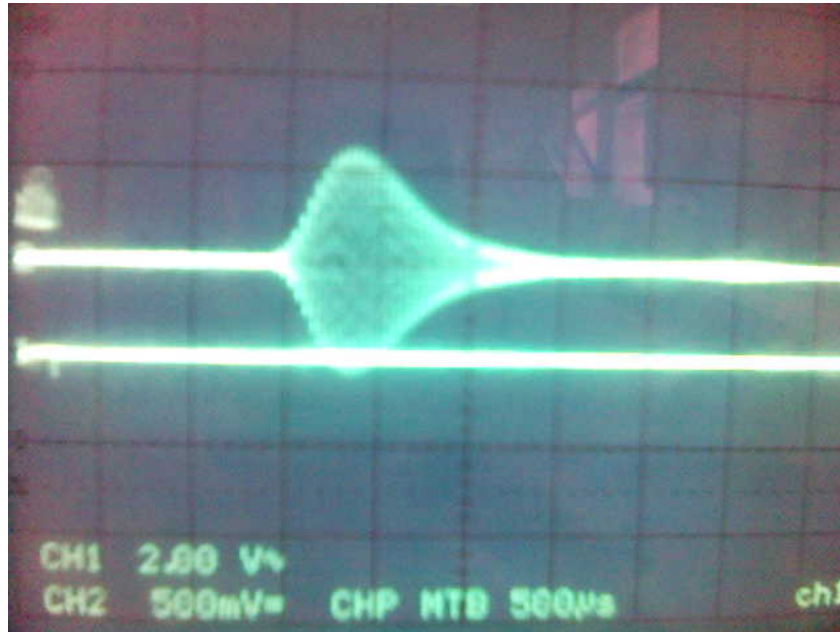
Συχνότητα (kHz)	Transmitting SPL ($\theta=0^\circ$)	α (db/km) ¹	Απώλειες (db)
25	117,9	680	100,0618
33,333	124,6	960	106,2018
40	123,5	1300	104,4218

Πίνακας 10: Τεχνικά χαρακτηριστικά πομποδεκτών

Αν τώρα, λάβουμε υπόψη μας τις επιπλέον απώλειες που προκύπτουν σε διάφορες γωνίες λόγω του διαγράμματος κατευθυντικότητας των πομποδεκτών, οι πιο πάνω αριθμοί αυξάνονται σημαντικά (π.χ. σε οριζόντια απόσταση 2m και κατακόρυφη 1m, δηλαδή γωνία 28° περίπου, προκύπτουν επιπλέον απώλειες 18db για τη συχνότητα των 40kHz). Επομένως, θα θεωρήσουμε, για την περιοχή εμβέλειας του συστήματος, ως μέγιστη απώλεια του σήματος, προσεγγιστικά, τα 125db. Η τιμή αυτή επιτρέπει την ανίχνευση του σήματος από τον δέκτη βάσει των σταθμών ευαισθησίας που έχουν αναφερθεί. Βέβαια, θα χρειαστεί η ενίσχυση του σήματος για την αύξηση της ακρίβειας και της διακριτικότητας του συστήματος.

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό του ληφθέντος σήματος, που έχει ιδιαίτερη σημασία, είναι η διασπορά της περιβάλλουσάς του. Αυτή οφείλεται στα χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης, στη χωρητική συμπεριφορά των πομποδεκτών και φυσικά στο φαινόμενο πολυδιαδρομικής διάδοσης. Ο χρόνος ανόδου και καθόδου της περιβάλλουσας φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα, που λήφθηκε μετά τον δέκτη. Οι μεταβολές στην απόσταση έχουν, επιπλέον, άμεση επίδραση στη μέγιστη τιμή του ληφθέντος σήματος και κατ' επέκταση στο πως ο χρόνος ανόδου και καθόδου γίνεται αντιληπτός. Για μικρές αποστάσεις (μεγάλες τιμές ισχύος του ληφθέντος σήματος) οι χρόνοι αυτοί (θεωρώντας σταθερή τιμή κατωφλίου και όχι εξαρτώμενη από την μέγιστη λαμβανόμενη τιμή ισχύος του σήματος) είναι της τάξης των εκατοντάδων msec. Για μεγαλύτερες αποστάσεις (μικρές τιμές ισχύος ληφθέντος σήματος) οι χρόνοι αυτοί εκπίπτουν σε τιμές αρκετών δεκάδων msec.

¹ Υποθέτουμε σχετικό ποσοστό υγρασίας 60% που αποτελεί κοινό ποσοστό υγρασίας



Εικόνα 62: Μορφή ληφθέντος σήματος στον παλμογράφο

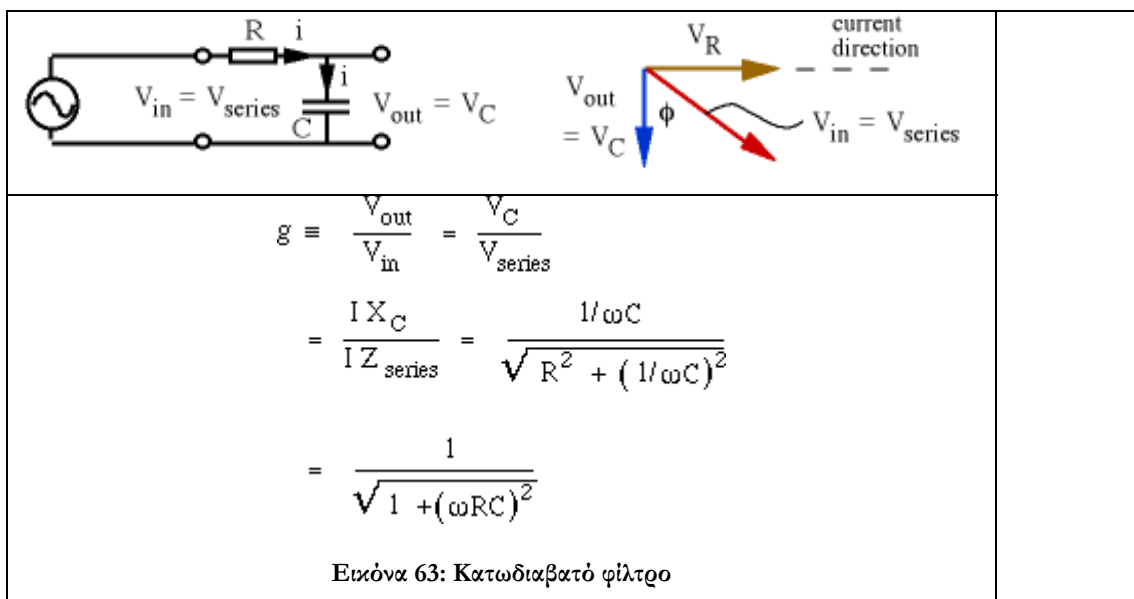
Πρέπει να σημειωθεί πως, εκτός του απευθείας ληφθέντος σήματος, στον δέκτη φτάνουν και ανακλάσεις του. Αυτές εμφανίζονται προσθετικά και αν συμπέσουν χρονικά με το ληφθέν σήμα, δεν μπορούμε να τις διαχωρίσουμε εύκολα. Θεωρώντας ως σημαντικές τις ανακλάσεις από αντικείμενα εντός της πρώτης ζώνης Fresnel, αυτές εξαρτώνται σε πλάτος από το ανακλών σώμα, σε χρονικό σημείο εμφάνισης από την απόσταση πομπού-δέκτη και σε βαθμό επίδρασης στην απευθείας συνιστώσα από το χρονικό διάστημα μεταξύ της λήψης του σήματος και της ανίχνευσης του κατωφλίου. Το χρονικό αυτό διάστημα εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο ορίζεται το κατώφλι και θα εξεταστεί διεξοδικά σε ακόλουθη παράγραφο. Πρέπει να τονιστεί πως, εξαιτίας των μεγάλων συντελεστών απορρόφησης των διαφόρων υλικών στις υπερηχητικές συχνότητες, μόνο η πρώτη ανάκλαση έχει ιδιαίτερη σημασία. Και στη περίπτωση που εξετάζουμε, αυτή έχει σημασία μόνο αν ο ανακλαστήρας είναι στην πρώτη ζώνη Fresnel για μικρές τιμές της απόστασης πομπού και δέκτη. Για μεγαλύτερες αποστάσεις οι ανακλάσεις (λόγω των μεγάλων συντελεστών απορρόφησης και της μεγάλης εξασθένησης του κύματος στον αέρα με αυξανόμενη απόσταση) πρακτικά δεν επιδρούν ιδιαίτερα στο ληφθέν σήμα.

Η αλυσίδα του δέκτη στην αρχική μορφή σχεδίασης αποτελείται από ένα κατωδιαβατό φίλτρο για την απόρριψη σημάτων πλην του επιθυμητού και από έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου. Το σήμα, στη συνέχεια, θα οδηγηθεί στο υποσύστημα επεξεργασίας δεδομένων¹. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα επιμέρους μέρη της αλυσίδας του δέκτη.

Το φίλτρο

¹ Στο υποσύστημα περιλαμβάνεται το σύστημα δειγματοληψίας και ο A/D converter

Δεδομένου του διαγράμματος ευαισθησίας του δέκτη, μπορούμε να πούμε πως ο ίδιος συμπεριφέρεται ως ένα φίλτρο πολύ καλών χαρακτηριστικών. Ο δέκτης σε κάθε μια από τις τρεις πιθανές συχνότητες έχει εύρος ζώνης $\pm 1\text{kHz}$. Με το εύρος αυτό και έχοντας υπόψη την ισχύ σημάτων των πιθανών πηγών θορύβου, συμπεραίνουμε πως σήματα θορύβου σε συχνότητες έξω από αυτή τη ζώνη διέλευσης και από πηγές όχι πολύ κοντινές στους δέκτες, θα φιλτράρονται αισθητά. Εντούτοις, αποφασίσαμε την προσθήκη ενός απλού φίλτρου μετά τον δέκτη. Καθώς δεν χρειάζεται σημαντικό φιλτράρισμα στην περίπτωσή μας, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε, αντί για ένα πιο αποτελεσματικό, πλην συνθετότερο, ενεργό φίλτρο τύπου Chebyshev ή Butterworth, ένα απλό παθητικό κατωδιαβατό φίλτρο RC. Το κέρδος του φίλτρου σε μία συχνότητα $\omega=2\pi f$ δίνεται από την ακόλουθη σχέση ως συνάρτηση των στοιχείων R και C:



Ένα κατωδιαβατό φίλτρο έχει συχνότητα 3db που δίνεται από τη σχέση $f_{3\text{db}} = 1/RC$. Επιλέξαμε μια σταθερή τιμή πυκνωτή για τα 3 φίλτρα $C = 1\text{nF}$. Επιλέγοντας ως συχνότητες 3db τις τρεις κεντρικές μας συχνότητες και διαλέγοντας τιμές αντιστάσεως του εμπορίου, προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές για τις τρεις αντιστάσεις του κάθε φίλτρου:

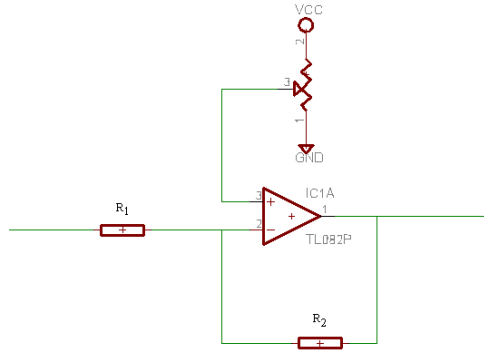
- $R_{25\text{kHz}}=6,3\text{k}\Omega$,
- $R_{33\text{kHz}}=4,8\text{k}\Omega$,
- $R_{40\text{kHz}}=4,0\text{k}\Omega$,

Το τίμημα του φίλτρου είναι μια μείωση του πλάτους του σήματος και στην κεντρική συχνότητα. Αυτό θα προσπαθήσουμε να το αντισταθίσουμε, αυξάνοντας ακόμη περισσότερο το κέρδος στην έξοδο του ενισχυτή.

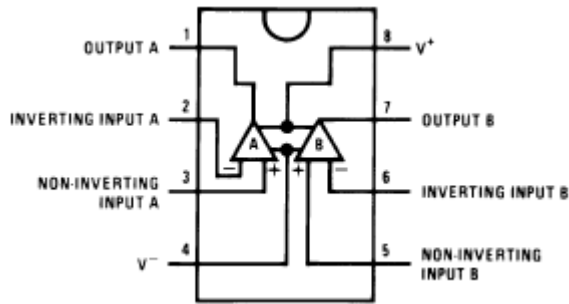
Ο ενισχυτής

Μετά το RC φίλτρο είναι αναγκαία η επιλογή ενός ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier – LNA), ο οποίος ταυτόχρονα μπορεί να προσθέσει μια σταθερή τιμή τάσης (DC offset) στο σήμα εξόδου (για λόγους που θα φανούν όταν αναλυθεί το σύστημα επεξεργασίας μετρήσεων).

Το σχηματικό για τη διάταξη ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 64: Σχηματικό του ενισχυτή



Εικόνα 65: Σχηματικό του TL082

Βασικό κομμάτι του κυκλώματος είναι ο τελεστικός ενισχυτής (operational amplifier – OpAmp). Για την παρούσα κατασκευή χρησιμοποιήθηκε το ιδιαίτερα δημοφιλές TL082, το οποίο είναι ένας τελεστικός ενισχυτής χαμηλού θορύβου που μπορεί να λειτουργήσει σε μεγάλο πεδίο συχνοτήτων. Κάθε ολοκληρωμένο TL082, έχει οκτώ ακροδέκτες και περιέχει δύο τελεστικούς ενισχυτές. Απαιτεί τροφοδοσία +15 και -15 Volt DC.

Για τον ενισχυτή χρησιμοποιούμε την αναστρέφουσα συνδεσμολογία. Σε αντίθεση με την μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία, η είσοδος μπαίνει μέσω μιας αντίστασης R_1 , στην αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή (-). Ταυτόχρονα συνδέεται μέσω μιας αντίστασης R_2 με την έξοδο του ενισχυτή. Η αντίσταση αυτή είναι η ανάδραση του ενισχυτή. Ο λόγος ενίσχυσης πλάτους μεταξύ εισόδου και εξόδου του κυκλώματος δίδεται από την σχέση

$$\alpha = - (R_2/R_1)$$

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι στην έξοδο, το σήμα προκύπτει ανεστραμμένο, πράγμα που δεν μας απασχολεί καθώς, όπως είδαμε, το σήμα στην είσοδο είναι γενικά ημιτονικό μεταβλητού πλάτους.

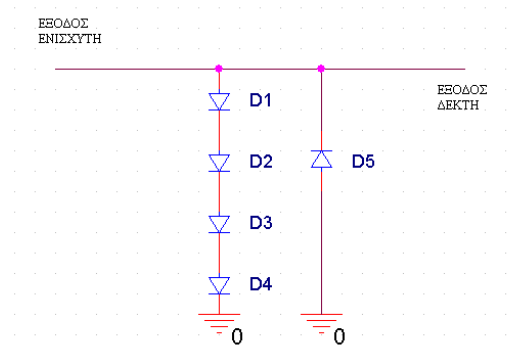
Γενικά σε τέτοιους ενισχυτές η μη αναστρέφουσα είσοδος (+), είναι γειωμένη. Στην περίπτωση μας όμως, όπου ζητάμε την προσθήκη μιας σταθερής τάσης στο σήμα, μπορούμε αντί για γείωση να εισάγουμε την δεδομένη τάση. Χρειαζόμαστε, όπως θα φανεί παρακάτω, μία τιμή offset τάσης 1,65V, οπότε χρησιμοποιούμε διαιρέτη τάσης, εξάγοντας από τα 15V της τροφοδοσίας τα 1,65V. Επειδή για τον διαιρέτη τάσης είναι δύσκολο να βρεθούν αντιστάσεις με σταθερό λόγο (λόγω των ανοχών των τιμών των αντιστάσεων), θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μεταβλητή αντίσταση. Κάνοντας χρήση ενός απλού ποτενσιόμετρου, με συνολική τάση στα άκρα του +15V, μπορούμε να εξάγουμε με μία κάποια προσέγγιση τα 1,65V.

Για το κύκλωμά μας, επιλέξαμε για τις αντιστάσεις R_1 και R_2 τιμές 120Ω και $350k\Omega$, δίνοντας έναν συντελεστή ενίσχυσης θεωρητικά κοντά στο 2000. Βέβαια, λόγω της πολύ μεγάλης τιμής του λόγου, αλλά και της διαφορετικής αντίστασης εισόδου που φαίνεται στην είσοδο του ενισχυτή λόγω του φίλτρου στο προηγούμενο στάδιο, η πραγματική ενίσχυση θα είναι αρκετά μικρότερη, αλλά γενικά όσο μεγάλη χρειαζόμαστε. Για το (πολύστροφο) ποτενσιόμετρο, επιλέξαμε τιμή $10k\Omega$.

Ο ψαλιδιστής τάσης

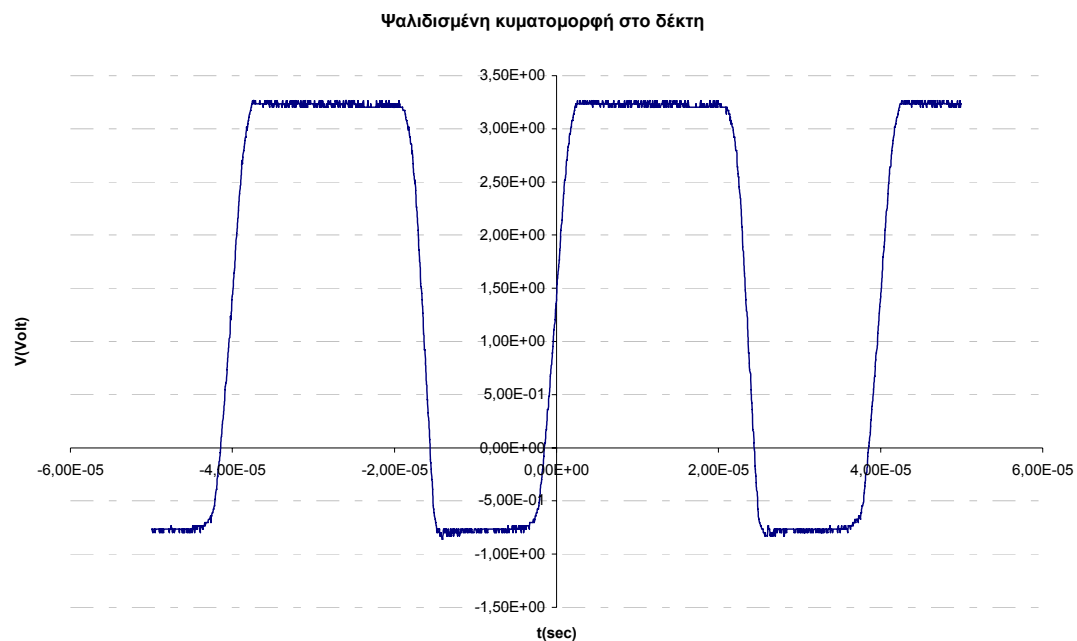
Μία από τις πιθανές λύσεις για το σύστημα επεξεργασίας δεδομένων, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, είναι να χρησιμοποιηθεί ένας ψηφιακός επεξεργαστής σήματος (Digital Signal Processor – DSP). Στην διάθεσή μας για την παρούσα κατασκευή έχουμε έναν DSP της σειράς TMS320 της εταιρίας Texas Instruments. Ο συγκεκριμένος DSP δέχεται αναλογικό σήμα εισόδου το οποίο πρέπει να βρίσκεται προσεγγιστικά μεταξύ των ορίων: $-0,8\text{Volt} \leq V_{in} \leq 3,3\text{Volt}$. Γι' αυτόν τον λόγο χρειάζεται ένα κύκλωμα προστασίας που θα ψαλιδίζει σήματα μεγαλύτερα από $3,3\text{V}$ και αρκετά μικρότερα από 0V .

Για τον σκοπό αυτό, ακολουθούμε την απλούστερη λύση, χρησιμοποιώντας απλές διόδους, για να υλοποιήσουμε ένα κύκλωμα ψαλιδισμού τάσης. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε (5) διόδοι 1N4148, με τιμή τάσης αποκοπής κοντά στα $0,75\text{V}$, εκ των οποίων τέσσερις (4) ήταν στην σειρά ορθά πολωμένες (για να έχουμε αποκοπή $4 \cdot 0,75 = 3\text{V}$) και μια ανάστροφα πολωμένη (για να αποκόπτει στα $-0,75\text{V}$).



Εικόνα 66: Κύκλωμα ψαλιδισμού

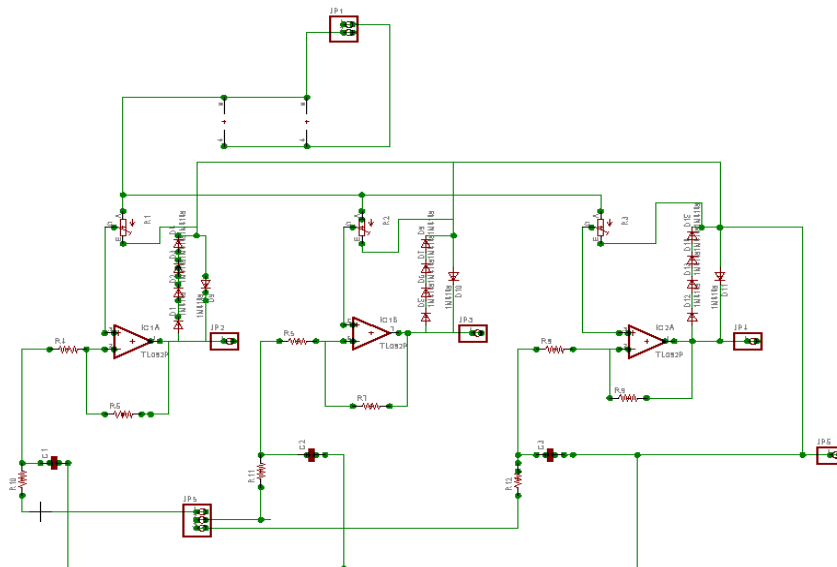
Πειραματικά επιβεβαιώθηκε η σωστή λειτουργία του κυκλώματος ψαλιδισμού τοποθετώντας ένα ζεύγος πομποδεκτών σε κοντινή απόσταση, έτσι ώστε η λαμβανόμενη τάση να ξεπερνάει τις τιμές ψαλιδισμού. Ακολουθώς φαίνεται η έξοδος του κυκλώματος ψαλιδισμού.



Εικόνα 67: Ψαλιδισμός της λαμβανόμενης κυματομορφής

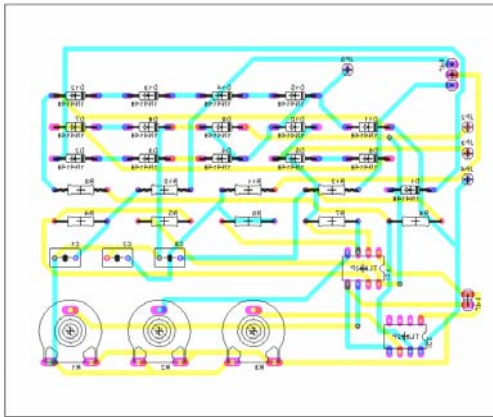
Υλοποίηση δέκτη

Ως αλυσίδα του δέκτη θεωρούμε το αναλογικό τμήμα αυτού. Ο δέκτης απαιτεί τροφοδοσίες +15V και -15V και γείωση, ενώ έχει τρεις εισόδους και τρεις εξόδους (μια για κάθε συχνότητα ζεύξης). Χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα Eagle της Cadsoft, προκύπτει το παρακάτω σχηματικό για την αλυσίδα του δέκτη.



Εικόνα 68: Σχηματικό του δέκτη

Το τελικό μπλοκ διάγραμμα της αναλογικής αλυσίδας του δέκτη και του κυκλώματος που τυπώθηκε στο EMOI φαίνεται ακολούθως:



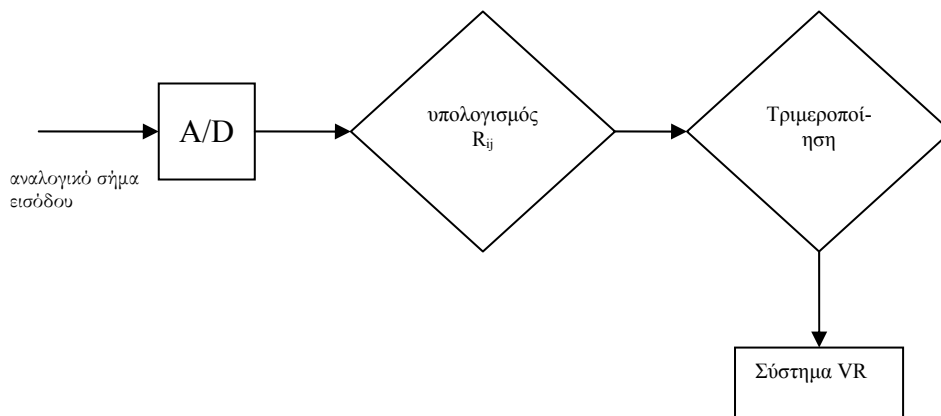
Εικόνα 69: PCB σχέδιο του δέκτη



Εικόνα 70: Πλακέτα του δέκτη

3.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το σύστημα επεξεργασίας δεδομένων είναι αυτό που ακολουθεί την RF αλυσίδα του δέκτη. Δέχεται ως είσοδο το αναλογικό σήμα, έτσι όπως προκύπτει μετά τη λήψη, το φιλτράρισμα και την ενίσχυση, μετατρέπει το σήμα από αναλογικό σε ψηφιακό, δειγματοληπτώντας το, επεξεργάζεται τις μετρήσεις, εξάγει τις συντεταγμένες του στόχου και προωθεί αυτές στο σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας. Ένα χονδροειδές μπλοκ διάγραμμα του συστήματος επεξεργασίας δεδομένων φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 71: Πρόχειρο διάγραμμα συστήματος επεξεργασίας δεδομένων

Για το σύστημα επεξεργασίας δεδομένων δύο λύσεις εξετάστηκαν: αρχικά η χρήση DSP της σειράς TMS320 της εταιρίας Texas Instruments και στη συνέχεια η χρήση της κάρτας λήψης δεδομένων (Data Acquisition card) PCI6110 της National Instruments. Οι δύο λύσεις διαφοροποιούνται ως προς το κόστος, την απόδοση καθώς και ως προς τη δομή τους (δηλαδή τη ροή των διαδικασιών και το κατά πόσο τμήματα της επεξεργασίας γίνονται σε αυτά ή σε κάποιον υπολογιστή ο οποίος λαμβάνει τα δεδομένα). Στις επόμενες παραγράφους εξετάζονται οι δύο

προτεινόμενες λύσεις. Στη διάρκεια της διατριβής προτιμήθηκε αρχικά η λύση του DSP, μια και αυτός ήταν στη διάθεση του EMOI και είχε ήδη χρησιμοποιηθεί στο [PARA06]. Οι ρουτίνες επεξεργασίες δεδομένων υλοποιήθηκαν σε C για το συγκεκριμένο DSP. Στις αρχικές μετρήσεις, που έγιναν με ακίνητο στόχο, δεν υπήρχε ανάγκη χρησιμοποίησης του DSP, αλλά μόνο ενός απλού παλμογράφου. Οι τελικές μετρήσεις κινούμενου στόχου έγιναν με τις κάρτες λήψης δεδομένων. Πιο κάτω θα αναφερθούν τα στοιχεία των δύο συστημάτων που είναι απαραίτητα για την κατανόηση των παραμέτρων που σχετίζονται με τη συνολική απόδοση του συστήματος. Για περισσότερες τεχνικές λεπτομέρειες ο χρήστης παραπέμπεται στα [TEXA04a], [TEXA04b], [TEXA03], [NI05].

3.3.1 DSP TMS320

Ο ψηφιακός επεξεργαστής σήματος είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα μικροεπεξεργαστή που έχει επιπλέον διαθέσιμες ειδικές εντολές που μπορούν να εκτελέσουν λειτουργίες σε ρυθμό μεγαλύτερο από αυτό των απλών μικροεπεξεργαστών. Στη διατριβή έγινε χρήση των επεξεργαστών της οικογένειας TMS320 της Texas Instruments, που υπήρχαν ήδη στο EMOI, και συγκεκριμένα των TMS320LF2407A και TMS320LF281x. Διαθέτουν, και οι δύο, μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό 10 και 12bit αντίστοιχα με πολύπλεξη 16 καναλιών εισόδου. Ο δεύτερος μάλιστα διαθέτει υποσύστημα σειριακής επικοινωνίας με buffer 16 λέξεων και αυτοματοποιημένη λειτουργία. Οι επιδόσεις σε ταχύτητα είναι 40MIPS με συχνότητα λειτουργίας 40MHz για συχνότητα εξωτερικού κρυστάλλου 10MHz και 150MIPS με εξωτερικό κρυστάλλο 30MHz αντίστοιχα. Και οι δύο έχουν μνήμη Flash, 32 Κλέξεων 16bit και 64 Κλέξεων 16bit αντίστοιχα. Όπως φαίνεται, ο δεύτερος DSP είναι ιδιαίτερα υψηλότερων δυνατοτήτων, μια και η εσωτερική του αρχιτεκτονική και οι 32-bit καταχωρητές που περιέχει, επιτρέπουν την εκτέλεση πράξεων γρηγορότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Και οι δύο έχουν θεωρητικά μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 5Msamples/sec.

Οι DSP διαθέτουν διεπαφή για επικοινωνία με σειριακή θύρα υπολογιστή. Ο προγραμματισμός τους γίνεται με χρήση του προγράμματος ανάπτυξης Code Composer που περιέχει C compiler για τους επεξεργαστές και δυνατότητα αποσφαλμάτωσης (debugging). Επιπλέον υπάρχει και κατάλληλος προσομοιωτής που επιτρέπει τον έλεγχο του επεξεργαστή, την υλοποίηση αποσφαλμάτωσης του προγράμματος και τη σταδιακή υλοποίησή του στην πλακέτα του επεξεργαστή. Περισσότερες πληροφορίες για τους επεξεργαστές μπορούν να αναζητηθούν στα [TEXA04a], [TEXA04b], [TEXA03].

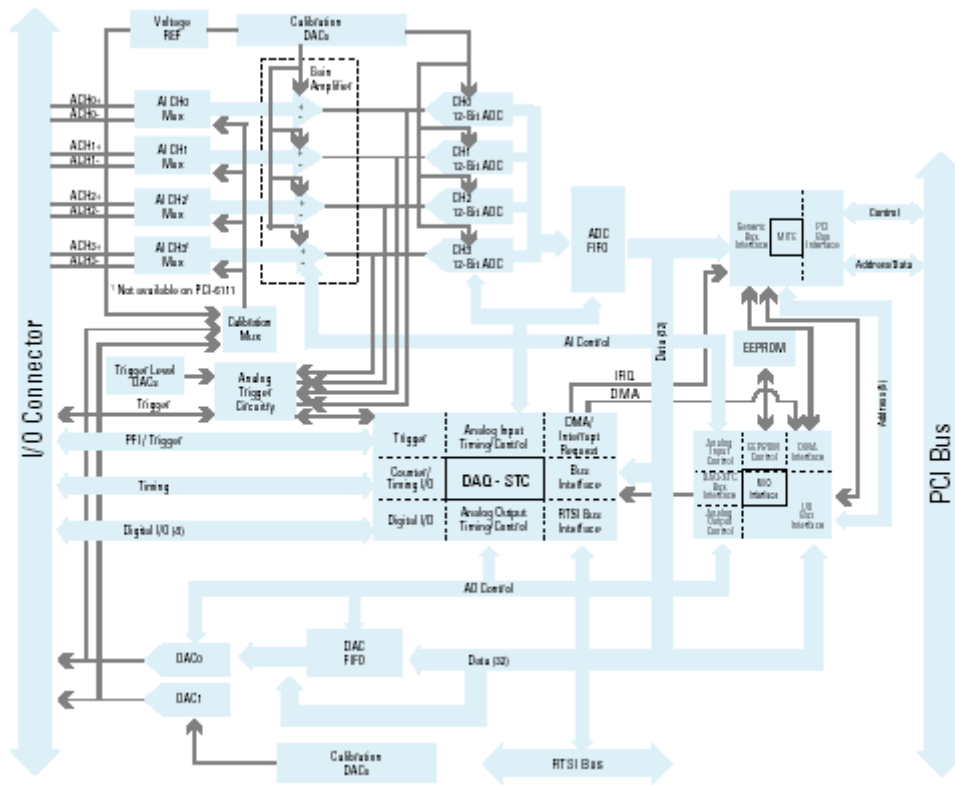
Πολλές από τις ρουτίνες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν αναπτυχθεί στο [PARA06]. Η χρήση του DSP παρέχει δύο επιλογές: την επεξεργασία του σήματος σε αυτόν και τη μεταφορά των συντεταγμένων θέσης στον κεντρικό υπολογιστή του συστήματος VR ή, την απλή δειγματοληψία και μεταφορά των τιμών στον κεντρικό υπολογιστή για επεξεργασία αυτών εκεί. Προφανώς, η λογική χρήση DSP είναι χρήσιμη μόνο αν ακολουθηθεί η πρώτη λύση. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να εξεταστεί η δυνατότητα ικανοποιητικής δειγματοληψίας από τον DSP, η επεξεργασία των μετρήσεων

σε πραγματικό χρόνο και ο ικανοποιητικός ρυθμός μεταφοράς των αποτελεσμάτων στη σειριακή θύρα του υπολογιστή. Ο μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας είναι 5Msamples/sec. Θεωρώντας πως υπάρχει ανάγκη δειγματοληψίας για τους τρεις δέκτες και τον πομπό, ο μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας ανά κανάλι είναι 1,25Msamples/sec. Δειγματοληπώντας στο μέγιστο δυνατό ρυθμό η διακριτικότητα που προκύπτει είναι $(1/1,25\text{Msamples/sec}) \cdot c_s = 0,275\text{mm}$ για τη μέτρηση της απόστασης. Προφανώς δεν υπάρχει ανάγκη δειγματοληψίας σε τόσο υψηλό ρυθμό. Επιπλέον, για τη μέθοδο του κεντροειδούς εντοπισμού, λόγω της παρεμβολής στην περιβάλλουσα, η διακριτικότητα έχει ακόμα μικρότερη τιμή. Είναι χαρακτηριστικό πως για τις μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια της διατριβής η δειγματοληψία ήταν της τάξης των 200ksamples/sec, όπου παρατηρήθηκε πως το σύστημα είχε πολύ καλή ακρίβεια. Ως προς το χρόνο επεξεργασίας οι αλγόριθμοι φέρονται να τρέχουν σε πραγματικό χρόνο. Είναι αλήθεια πως δεν δοκιμάστηκαν σε πραγματική περίοδο δοκιμών αλλά απλά υλοποιήθηκαν σε μεγάλο βαθμό και ελέγχθηκαν σε επίπεδο προσομοίωσης. Όπως φαίνεται και στο [PARA06], η χρήση της, ενσωματωμένης στο DSP, συνάρτησης εξυπηρέτησης διακοπής (Interrupt Service Routine), καθιστά σχεδόν βέβαιη τη εκτέλεση των αλγορίθμων σε πραγματικό χρόνο. Στη χειρότερη των περιπτώσεων προτείνεται η χρήση ενός πιο δυνατού, σε υπολογιστική δύναμη, επεξεργαστή. Τέλος, για το ρυθμό μεταφοράς δεδομένων στη σειριακή θύρα του υπολογιστή, με την προϋπόθεση πως η επεξεργασία γίνεται στον DSP και στον υπολογιστή μεταφέρονται οι συντεταγμένες θέσης του στόχου, ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης είναι απλά τρία (3) δείγματα ανά 10ms (ένα ανά κανάλι εισόδου). Το δείγμα (sample) εξόδου του DSP είναι μήκους 16bit (2x8bit ενώ ανά 8bit πληροφορίας εισάγονται δύο ακόμα bits για την αρχή και το τέλος). Ο ζητούμενος, δηλαδή, ρυθμός μεταφοράς δεδομένων, είναι πολύ χαμηλότερος από τη μέγιστη προσφερόμενη τιμή μεταφοράς μέσω της σειριακής θύρας του υπολογιστή (115kbaud).

3.3.2 DAC PCI6110

Η κάρτα δειγματοληψίας δεδομένων PCI6110 ανήκει στην οικογένεια PCI καρτών της σειράς S της National Instruments. Διαθέτει 4 αναλογικά κανάλια εισόδου, με 12-bit A/D μετατροπέα ανά κανάλι, ενώ έχει μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας συνολικά για τα τέσσερα (4) κανάλια 5Msamples/sec. Έχει ενσωματωμένη τη δυνατότητα αναλογικού ή ψηφιακού σκανδαλισμού (trigger), καθώς και μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα από τα αναλογικά κανάλια εισόδου ως εξωτερικό σκανδαλιστή. Το μπλοκ διάγραμμα της κάρτας, όπως δίνεται από τον κατασκευαστή, φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.

Η κάρτα μπορεί να μεταφέρει τα καταγεγραμμένα δεδομένα με τρόπο και ρυθμό ο οποίος μπορεί να προγραμματιστεί από τον συνδεδεμένο υπολογιστή. Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας του υπολογιστή μπορεί να διαβάσει δεδομένα από την κάρτα λήψης με κατάλληλο σήμα εντολής. Ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων είναι 10Mbytes/sec. Ο πραγματικός ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ουσιαστικά είναι μικρότερος και εξαρτάται κατά πολύ από τις δυνατότητες του υπολογιστή, τη μνήμη αυτού και το είδος του λογισμικού που θα χρησιμοποιηθεί. Στις περισσότερες των περιπτώσεων ο ρυθμός μπορεί να είναι τουλάχιστον 6Mbytes/sec.



Εικόνα 72: Λογικό διάγραμμα της DAC PCI6110

Τα αναλογικά σήματα εισόδου συνδέονται σε διαφορετικά κανάλια με BNC connectors σε ένα BNC-2110 connector block, το οποίο έχει χαρακτηριστικά απόρριψης θορύβου λόγω μιας σειράς φίλτρων απόρριψης ιδιαίτερα χαμηλών συχνοτήτων που περιέχει. Το BNC-2110 συνδέεται μέσω ενός SH68-68-EP Noise Rejecting Shielded cable στην κάρτα λήψης δεδομένων και στη συνέχεια αφού αυτά μετατραπούν σε ψηφιακά, μεταφέρονται με χρήση κατάλληλου PCI μετατροπέα, σε φορητό υπολογιστή. Η επεξεργασία του σήματος μπορεί να γίνει είτε με χρήση LabView™, ενός διαδομένου προγράμματος γραφικού προγραμματισμού της NI, είτε με το πρόγραμμα LabWindows/CVI που επιτρέπει την εύκολη χρησιμοποίηση ρουτινών σε C, είτε τέλος με χρήση του Measurement Studio το οποίο χρησιμοποιεί ρουτίνες αναπτυγμένες σε Visual Basic, C++ και .NET. Για τις μετρήσεις μας η λήψη των δεδομένων έγινε σε LabView™, και η επεξεργασία αυτών με χρήση προγραμμάτων σε Matlab™.

Η ελάχιστη διακριτικότητα του συστήματος εξαρτάται από το ρυθμό δειγματοληψίας του A/D μετατροπέα. Θεωρώντας ως μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας τα 5Msamples/sec και για τα τέσσερα (4) κανάλια (πομπός και τρεις δέκτες για τοπολογία 1-3), και θεωρώντας πως αυτός ισοκατανέμεται σε καθένα από αυτά έχουμε για κάθε κανάλι Acquisition Rate=AR=1,25Msamples/sec, δηλαδή ικανοποιείται το κριτήριο του Nyquist για κάθε μία από τις πιθανές συχνότητες των 25, 33 και 40kHz, ενώ έχουμε 50, 38 και 31 αντίστοιχα σημεία ανά περίοδο

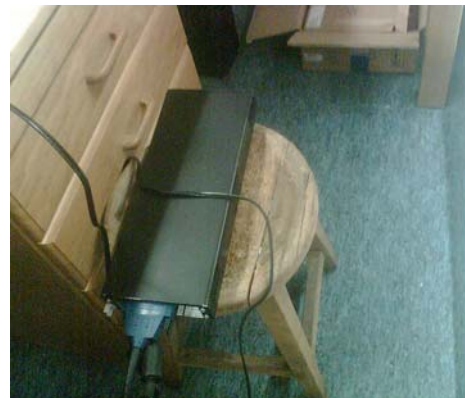
ημιτόνου για κάθε συχνότητα αντίστοιχα. Βέβαια δεν είναι απαραίτητο να επιλέξουμε τόσο υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας, μια και αυτός θα δημιουργήσει υψηλό όγκο δεδομένων για τις μεθόδους επεξεργασίας του σήματος. Η ελάχιστη διακριτικότητα στη μέτρηση του χρόνου, για την οποία το σήμα στο δέκτη περνάει το κατώφλι είναι ουσιαστικά η περίοδος δειγματοληψίας. Η μετατόπιση του στόχου που αντιστοιχεί σε αυτήν την ελάχιστη διακριτικότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\delta d = T_{\text{sampling}} \cdot c_s = \frac{1}{AR} c_s$$

όπου T_{sampling} ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών περιόδων δειγματοληψίας. Για το μέγιστο δυνατό ρυθμό δειγματοληψίας $\delta d = 0,2\text{mm}$. Ο τελικός ρυθμός δειγματοληψίας θα καθοριστεί πειραματικά μέσα από τις μετρήσεις που θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο που ακολουθεί. Θεωρώντας, εντούτοις, ένα ρυθμό δειγματοληψίας ανά κανάλι 200kHz στο παράθυρο δειγματοληψίας (που δεν υπερβαίνει τα 9,7ms και συνήθως είναι πολύ μικρότερο από αυτό), έχουμε ανά περίοδο δειγματοληψίας: $200 \cdot 10^3 \cdot 9,7 \cdot 10^{-3} = 1940\text{samples}$. Επομένως, ο απαιτούμενος ρυθμός μεταφοράς στον υπολογιστή είναι $1940 \cdot 12 = 1,94\text{kbaud}$ ανά κανάλι, που μπορεί εύκολα να επιτευχθεί από τον PCI μετατροπέα.



Εικόνα 73: BNC-2110 connector block



Εικόνα 74: DAC PCI6110

Όπως αναφέρθηκε, η κάρτα λήψης διαθέτει 12-bit A/D μετατροπέα. Μια και το σήμα πριν πάει στο κύκλωμα επεξεργασίας έχει ψαλιδιστεί μπορούμε να περιορίσουμε το εύρος των πιθανών τάσεων κατά τη δειγματοληψία. Θεωρώντας εύρος τάσεων από -1 ως +4 Volt (το κύκλωμα ψαλιδισμού λειτουργεί για την ακρίβεια από -0,75 ως +3,5 Volt περίπου) και λαμβάνοντας τις $2^{12} = 4096$ στάθμες κβαντισμού, βλέπουμε πως η μικρότερη αλλαγή στην τάση του ληφθέντος σήματος που μπορεί να μετρηθεί είναι περίπου 1,22mVolt.

3.3.3 Εύρεση απόστασης πομπού-δέκτη

Η εύρεση απόστασης του πομπού και του εκάστοτε δέκτη αποτελεί το πρώτο βήμα της επεξεργασίας δεδομένων. Οι εκτιμώμενες αποστάσεις θα χρησιμοποιηθούν από τους αλγορίθμους τριμεροποίησης για την εξαγωγή των τελικών εκτιμώμενων συντεταγμένων θέσης στόχου.

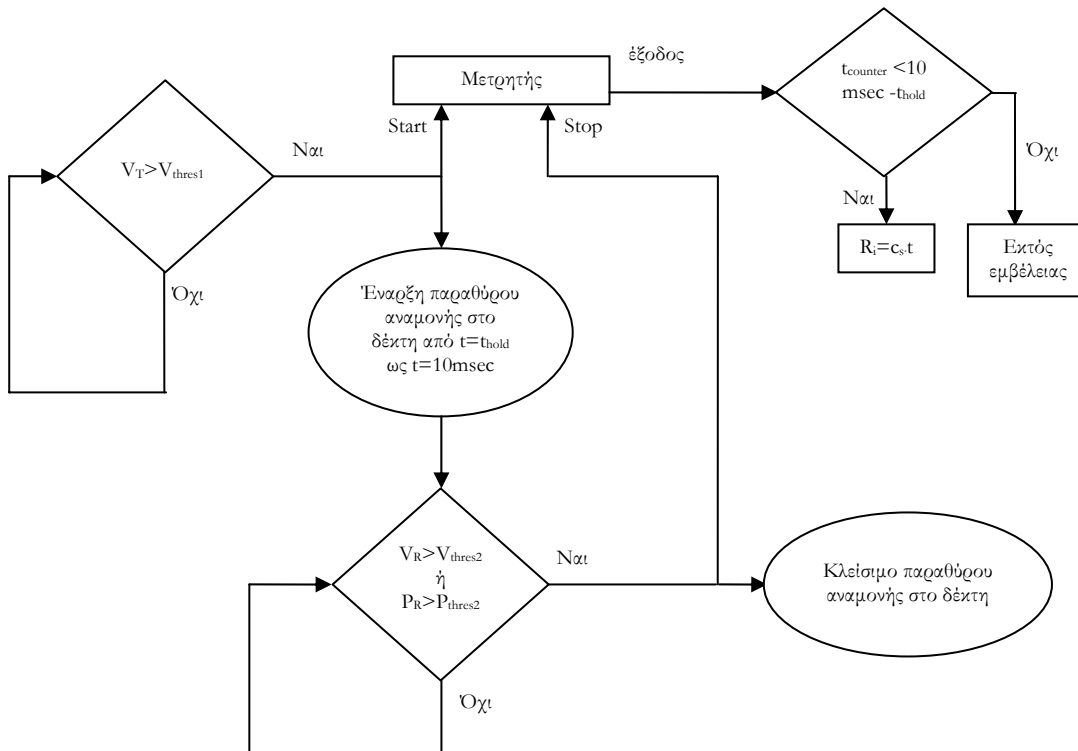
Η εύρεση της απόστασης πομπού-δέκτη έγινε με δύο τεχνικές: α) ανίχνευση της πρώτης άφιξης (lead-edge tracking) και β) μέθοδος του κεντροειδούς εντοπισμού (centroid tracking).

Μέθοδος ανίχνευσης πρώτης άφιξης (lead-edge tracking)

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ανίχνευση της χρονικής στιγμής κατά την οποία το λαμβανόμενο σήμα θα ξεπεράσει μία προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου. Τότε, το σύστημα δέχεται αυτή τη χρονική στιγμή ως τη χρονική στιγμή λήψης του σήματος και την προωθεί για περαιτέρω επεξεργασία. Ταυτόχρονα «κλείνει» για το προβλεπόμενο χρονικό διάστημα μέχρι να ειδοποιηθεί από τον πομπό για την εκπομπή της επόμενης παλμοσειράς.

Προφανώς, η ακρίβεια με την οποία θα προσδιοριστεί η απόσταση R εξαρτάται από την επιλογή του κατωφλίου. Θεωρώντας σταθερή τιμή κατωφλίου και λαμβάνοντας υπόψη πως η ισχύς του σήματος μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης, είναι προφανές πως η εκτίμηση της απόστασης θα έχει αντίστοιχη μεταβαλλόμενη ακρίβεια (αν αντί για την ισχύ του κύματος επεξεργαζόμαστε το σήμα τάσης τότε η ακρίβεια αντίστοιχα αναμένεται να είναι γραμμική συνάρτηση του αντιστρόφου της απόστασης).

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά ευάλωτη σε ισχυρά και σύντομα σήματα θορύβου. Ένα τέτοιο σήμα που δύναται να περάσει το κατώφλι, αν συμπέσει με το χρονικό παράθυρο αναμονής του συστήματος επεξεργασίας δεδομένων, θα θεωρηθεί ως το λαμβανόμενο χρήσιμο σήμα. Μια και η μέθοδος αυτή ελέγχει μόνο το χρονικό σημείο άφιξης του σήματος και όχι τη διάρκεια αυτού, ένα τέτοιο σήμα θα οδηγούσε σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Το λογικό διάγραμμα της μεθόδου αυτής φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 75: Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου lead-edge tracking

Πρέπει να τονιστεί πως το χρονικό παράθυρο αναμονής παραμένει ανοιχτό για το διάστημα $[t_{\text{hold}}, 10\text{msec}]$ έχοντας ως χρονικό σημείο αναφοράς το $t=0$ (στιγμή που ικανοποιείται η συνθήκη $V_T > V_{\text{thres1}}$ στον πομπό, οπότε και εκκινεί ο μετρητής). Το t_{hold} είναι ένα μικρό χρονικό διάστημα στο οποίο αφενός δεν αναμένεται να ληφθεί το σήμα στο δέκτη, αφετέρου υπάρχει πιθανότητα να ληφθεί κάποια ανάκλαση από προηγούμενα εκπεμπόμενο σήμα.

Το κατώφλι για τον πομπό V_{thres1} ρυθμίζεται στα 0,5Volt ακριβώς πριν το σήμα να εκπεμφθεί από τον πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα. Το κατώφλι είναι αφενός μεγάλο για να μην ενεργοποιηθεί από πιθανό σήμα θορύβου, αφετέρου σχετικά χαμηλό για να μην εισαχθεί επιπλέον καθυστέρηση από το χρόνο ανόδου της κυματομορφής στον πομπό (πρέπει να σημειωθεί πως το κατώφλι εφαρμόζεται σε σημείο όπου το εκπεμπόμενο σήμα δεν έχει μετατραπεί ακόμα σε ημιτονικό, κάνοντας πρακτικά την καθυστέρηση αυτή αμελητέα). Στον δέκτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως θα τονιστεί ακολούθως, κατώφλι είτε για την τιμή ισχύος είτε για την τιμή τάσης του λαμβανόμενου σήματος (V_{thres2} και P_{thres2} αντίστοιχα). Τέλος, το διάστημα t_{hold} το καθορίζουμε ίσο με $t_2 + 0,1\text{msec} = 0,2 + 0,1 = 0,3\text{msec}$ όπου t_2 , ο χρόνος διάρκειας της παλμοσειράς. Θέτοντας αυτό το χρονικό διάστημα καθυστέρησης, ουσιαστικά δεν μπορούν να εντοπιστούν σήματα από στόχο που (σε θερμοκρασία 20°C) απέχει απόσταση μικρότερη των 10,85cm. Ο συγκεκριμένος συμβιβασμός είναι ανεκτός μια και η τοποθέτηση των δεκτών, όπως θα δούμε ακολούθως, για να πετύχουμε μια ικανοποιητική περιοχή εμβέλειας με αλληλοκαλυπτόμενα διαγράμματα ευαισθησίας των τριών δεκτών, δεν μπορεί να καλύπτει με ακρίβεια αυτή την απόσταση.

Μέθοδος Κεντροειδούς Εντοπισμού (Centroid tracking)

Η προηγούμενη μέθοδος, ασχέτως του τρόπου επιλογής του κατωφλίου, θα δώσει μια ακρίβεια η οποία μειώνεται γραμμικά με το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης (αν το κατώφλι τεθεί για την ισχύ του ληφθέντος σήματος). Ένας εναλλακτικός τρόπος εύρεσης της απόστασης είναι η μέθοδος του κεντροειδούς εντοπισμού, όπου επιλέγεται ένα άλλο σημείο της λαμβανόμενης κυματομορφής ως ενδεικτικό της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται αρκετά σε οπτικά συστήματα εντοπισμού και κυρίως σε ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (synthetic aperture radar-SAR, π.χ. [ΓΤΟΗ97]) αλλά και σε άλλες εφαρμογές ([ΜΟΥ98]).

Η μέθοδος κεντροειδούς εντοπισμού αρχικά δειγματοληπτεί το λαμβανόμενο σήμα εντός του χρονικού παραθύρου αναμονής. Στη συνέχεια, σχηματίζει την περιβάλλουσα του σήματος λαμβάνοντας τα τοπικά μέγιστα ανά διάστημα $[t_i, t_{i+1}]$ του σήματος. Το χρονικό διάστημα $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ δεν πρέπει να είναι μικρότερο από την περίοδο T της λαμβανόμενης σειράς ημιτόνων, ώστε σε κάθε υποδιάστημα η τιμή του λαμβανόμενου μέγιστου να ισούται με την μέγιστη τιμή του ημιτόνου (κατά τη διάρκεια λήψης της παλμοσειράς). Πειραματικά βρέθηκε πως το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας για την εύρεση του μέγιστου μπορεί να είναι και πολλαπλάσιο της περιόδου T κατά ένα παράγοντα 2 ή 3 χωρίς απώλεια δεδομένων. Μεγαλύτερη περίοδος δειγματοληψίας σημαίνει

γρηγορότερος χρόνος επεξεργασίας γενικά, αλλά και μείωση στην ακρίβεια του ληφθέντος σήματος. Έχοντας την περιβάλλουσα του σήματος, βρίσκουμε τα χρονικά σημεία στα οποία η περιβάλλουσα ξεπερνάει το κατώφλι (έστω t_s) και πέφτει από αυτό (έστω t_e). Το εμβαδό του τμήματος της γραφικής παράστασης $y=f(t)$ της περιβάλλουσας ως προς το χρόνο t που ορίζεται από τα όρια $t=t_s$, $t=t_e$, $y = f(t) \Big|_{t=t_s}^{t=t_e}$ και $y=y_{ref}$ όπου y_{ref} η στάθμη αναφοράς του λαμβανόμενου σήματος (θυμίζουμε πως η στάθμη αναφοράς του λαμβανόμενου σήματος δεν είναι τα 0Volt αλλά τα 1,65Volt) χωρίζεται σε δύο τμήματα, την πύλη +, με αφετηρία τη χρονική στιγμή $t=t_s$ και κατεύθυνση προς τα θετικά του άξονα t , και την πύλη -, με αφετηρία τη χρονική στιγμή $t=t_e$ και κατεύθυνση τα αρνητικά του άξονα t . Ως χρονικό σημείο χαρακτηριστικό της άφιξης του λαμβανόμενου σήματος, θεωρούμε το σημείο στο οποίο τα εμβαδά των δύο πυλών είναι ίσα. Προς τούτο βρίσκεται αρχικά το εμβαδό E του συνολικού τμήματος που ορίζεται πιο πάνω. Στη συνέχεια, αναδρομικά, υπολογίζεται με προσθήκη στοιχειωδών παραλληλογράμμων με διαστάσεις dt (που θα οριστεί ακολούθως) και $y=f(t_i)$ (δηλαδή με την αρχική ακμή του κάθε παραλληλογράμμου) το εμβαδό της πύλης + (E_+) ως το σημείο t_a για το οποίο ισχύει $E_+ \approx E/2$. Αυτό αποτελεί και το σημείο που θεωρούμε ως το ενδεικτικό για τη λήψη του σήματος.

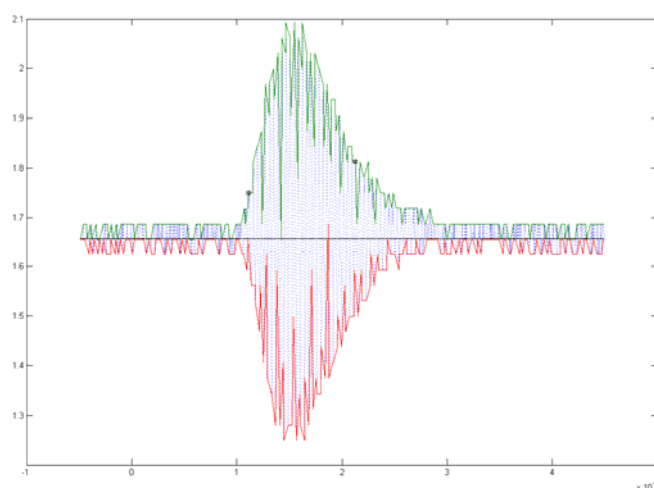
Καθώς δειγματοληπτούμε το σήμα ώστε να βρούμε το σημείο μέγιστου στα επιμέρους διαστήματα $[t_i, t_{i+1}]$ με $t_{i+1}=t_i+kT$, με $k=1$ ή 2 ή 3 και T την περίοδο των ημιτόνων, ο αριθμός πλέον των σημείων της περιβάλλουσας γίνεται αρκετά μικρός. Έτσι π.χ. θεωρώντας το σήμα των 25kHz, περιόδου $T=40\mu\text{sec}$ και το διάστημα t_{hold} (όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο) ίσο με $0,3\text{msec}$ έχουμε χρονικό διάστημα ανοίγματος παραθύρου λήψης για μία παλμοσειρά $t_{\text{window}}=10-0,3=9,7\text{msec}$. Επομένως, ο αριθμός των δειγμάτων του σήματος που χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό της περιβάλλουσας είναι $N=t_{\text{window}}/T \approx 242$ σημεία (θεωρώντας $k=1$). Δηλαδή δύο σημεία απέχουν χρονικά μεταξύ τους διάστημα $dt=t_{\text{window}}/(N-1) \approx T \approx 40\mu\text{sec}$. Επομένως, το χρονικό αυτό διάστημα είναι το ελάχιστο δυνατό για το διάστημα διακριτικότητας του συστήματος και αντιστοιχεί σε απόσταση $\Delta d=dt \cdot c_s \approx 1,374\text{cm}$. Αν μάλιστα μεγαλώσουμε το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας μέγιστου, έχουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται ακολούθως:

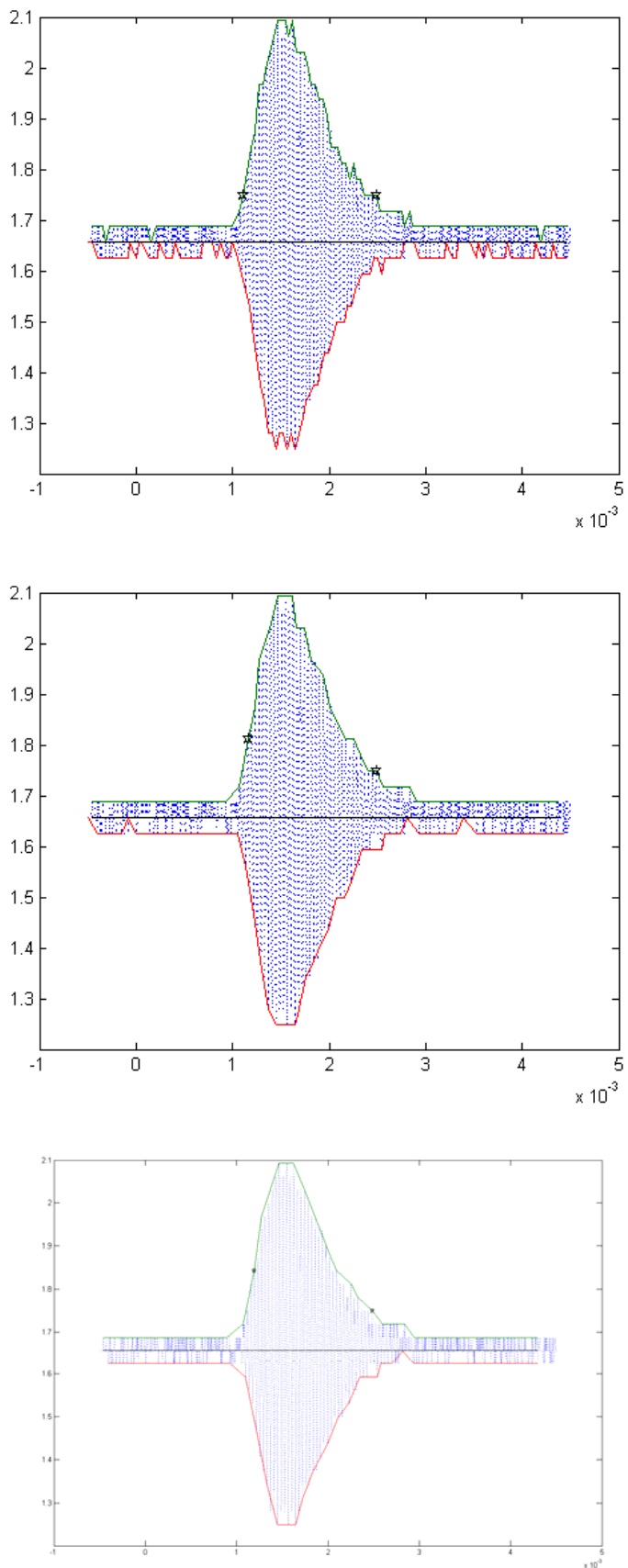
f(kHz)	k	N	ελάχιστη διακριτικότητα Δd (cm)
25	1	242	1,374
	2	121	2,748
	3	80	4,122
	4	60	5,496
33,333	1	323	1,031
	2	161	2,061
	3	107	3,092

f(kHz)	k	N	ελάχιστη διακριτικότητα Δd (cm)
	4	80	4,122
40	1	388	0,859
	2	194	1,718
	3	129	2,576
	4	97	3,435

Πίνακας 11: Διακριτικότητα σε συνάρτηση των διαστημάτων εύρεσης μέγιστου

Όπως παρατηρούμε, μεγαλώνοντας το μέγεθος των επιμέρους χρονικών διαστημάτων, αυξάνεται η ελάχιστη διακριτικότητα του συστήματος. Ταυτόχρονα, βέβαια, εξοικονομείται χρόνος επεξεργασίας μια και χρειάζεται μικρότερος χρόνος για την επεξεργασία μεγαλύτερων χρονικά διαστημάτων. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας $k > 1$, όπως είδαμε στην πράξη, το σύστημα αποφεύγει λάθη που παρατηρούνται για μεγάλες αποστάσεις του στόχου, όπου και η τιμή της περιβάλλουσας είναι πολύ κοντά στην τιμή κατωφλίου. Επιλέγοντας τιμή $k=1$ (ή μικρότερη) υπάρχει περίπτωση αν η τιμή της περιβάλλουσας δεν ξεπερνάει κατά πολύ την τιμή του κατωφλίου, να δημιουργούνται τοπικά ελάχιστα μικρότερα της τιμής κατωφλίου. Στις ακόλουθες γραφικές φαίνεται η λαμβανόμενη κυματομορφή, η δημιουργία της περιβάλλουσάς της και η εύρεση των t_s και t_e για $k=0,5, 1, 2$ και 3 αντίστοιχα.





Εικόνα 76: Λαμβανόμενη κυματομορφή στο δέκτη, δημιουργία περιβάλλουσας και εύρεση των t_e και t_s για $k=0,5, 1, 2$ και 3 αντίστοιχα

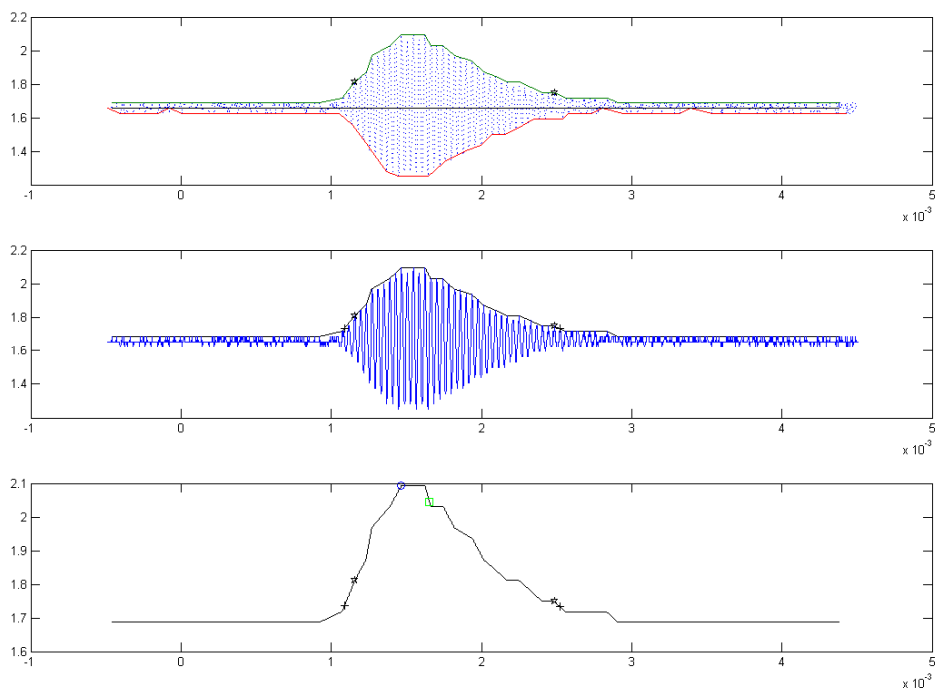
Αν και όλοι αυτοί οι λόγοι οδηγούν στην επιλογή αυξημένου k , παρατηρούμε πως η ελάχιστη διακριτικότητα του συστήματος αυξάνεται σημαντικά για $k > 4$. Μία λύση που ακολουθήθηκε είναι η παρεμβολή τιμών στη συνάρτηση $y=f(t)$ σε ένα διάστημα $[t_s-T, t_e]$. Στο διάστημα αυτό σίγουρα εμπειρεύονται οι τιμές κατά τις οποίες η περιβάλλουσα ανέρχεται και κατέρχεται της τιμής κατωφλίου με μεγαλύτερη ακρίβεια. Χρησιμοποιήθηκε ένας απλός αλγόριθμος γραμμικής παρεμβολής για εξοικονόμηση χρόνου επεξεργασίας, μια και για τόσο μικρά διαστήματα τα επιμέρους τμήματα της περιβάλλουσας είναι γραμμικά με μεγάλη προσέγγιση. Ο αριθμός των σημείων παρεμβολής καθορίζει και τη μέγιστη διακριτικότητα του συστήματος. Αν θεωρήσουμε M τον αριθμό των σημείων παρεμβολής για ένα διάστημα $[t, t+kT]$, τότε η διακριτικότητα του συστήματος αυξάνεται κατά ένα παράγοντα $M-1$. Αντίστοιχα αυξάνεται ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται οι τιμές διακριτικότητας και επιπλέον χρόνου επεξεργασίας που προκύπτουν για διάφορες τιμές του M για $k=2$.

f(kHz)	M	N	Επιπλέον χρόνος επεξεργασίας (μsec)	Ελάχιστη διακριτικότητα Δd (cm)
25	5	121	12	0,458
	10	121	14	0,249818
	50	121	24	0,053882
33	5	161	13	0,343503
	10	161	14	0,187366
	50	161	25	0,040412
40	5	194	11	0,28625
	10	194	11	0,156136
	50	194	22	0,033676

Πίνακας 12: Εξάρτηση του χρόνου επεξεργασίας και της ελάχιστης διακριτικότητας με τον αριθμό σημείων παρεμβολής της περιβάλλουσας

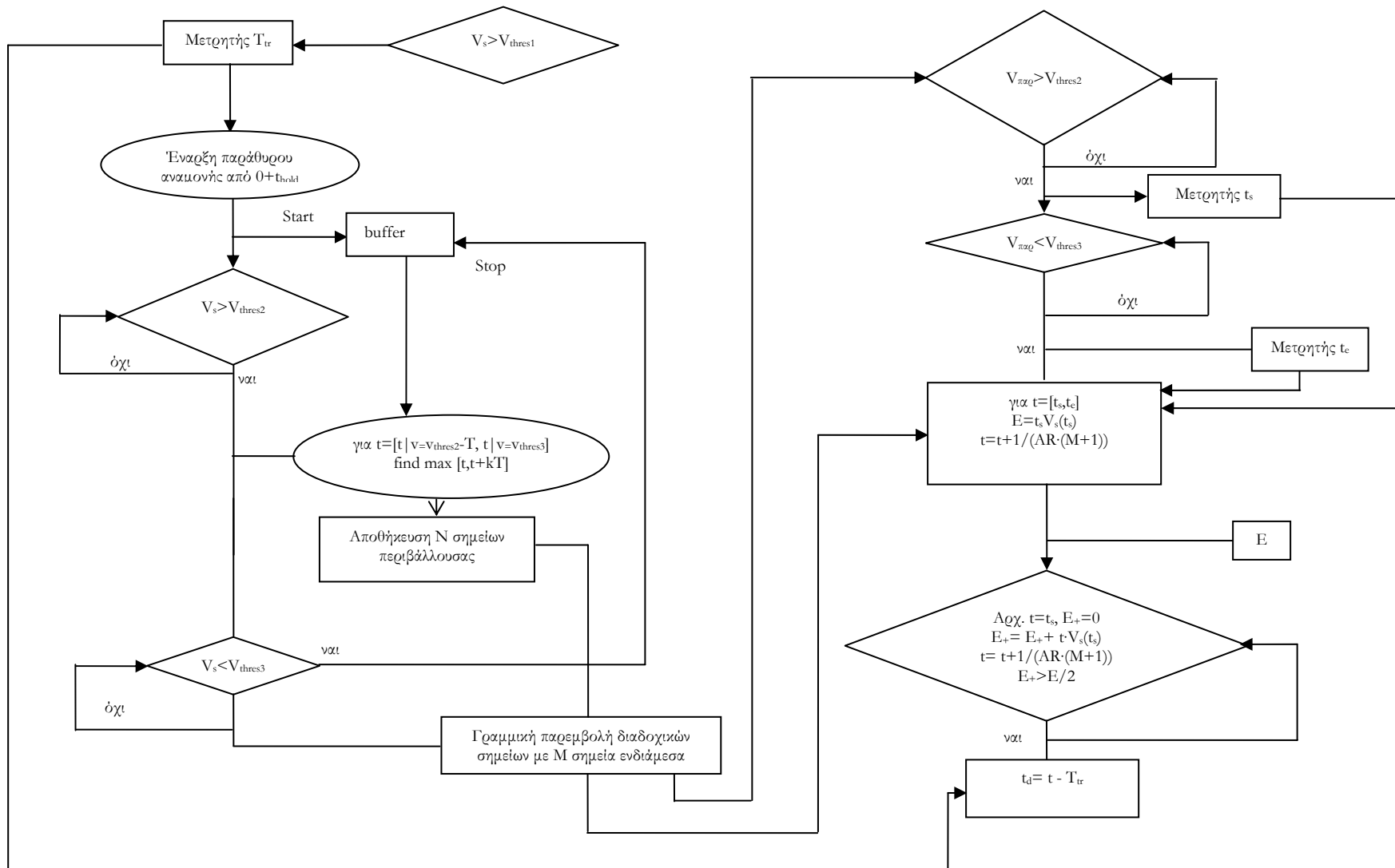
Τελικά, και σύμφωνα με τις τιμές που προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, επιλέξαμε τις τιμές $k=2$ και $M=10$. Στην εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε τα αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων που προκύπτουν με αυτές τις τιμές των k και M . Στην πρώτη από τις τρεις γραφικές φαίνεται η λαμβανόμενη κυματομορφή και η προκύπτουσα περιβάλλουσα με $k=2$. Στη δεύτερη κυματομορφή έχουμε παρεμβάλει τη γραφική με $M=10$ σημεία μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων αυτής. Τέλος, στην τρίτη κυματομορφή φαίνονται τα αποτελέσματα, όπου με αστεράκι σημειώνονται οι χρονικές στιγμές t_s και t_e πριν τη διαδικασία παρεμβολής και με σταυρό μετά από αυτή. Με τετράγωνο φαίνεται το σημείο για το οποίο ισχύει $E_+=E_-$, ενώ με κύκλο φαίνεται το ολικό μέγιστο της περιβάλλουσας. Το τελευταίο υπολογίζεται για δύο λόγους: α) το σημείο t_e

πρέπει να ακολουθεί χρονικά το μέγιστο της περιβάλλουσας και όχι να προηγείται (δεδομένου του ότι η απευθείας συνιστώσα είναι η πιο ισχυρή) και β) γιατί η μέγιστη τιμή του σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίζει το σηματοθορυβικό λόγο του σήματος και, στη συνέχεια, να ρυθμίζει αντίστοιχα το κατώφλι ανίχνευσης του δέκτη όπως θα φανεί παρακάτω.



Εικόνα 77: Αποτελέσματα κεντροειδούς εντοπισμού για $k=2$ και $M=10$

Το συνολικό λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου κεντροειδούς ανίχνευσης φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 78: Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου κεντροειδούς εντοπισμού

Συγκριτικά με τη μέθοδο ανίχνευσης ακμής, η μέθοδος του κεντροειδούς είναι σχετικά πιο αργή, αν και πάλι εφαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο. Το βασικό της πλεονέκτημα είναι πως η ακρίβεια στον υπολογισμό της απόστασης είναι ανεξάρτητη αυτής. Και αυτό οφείλεται στο ότι το προφίλ της περιβάλλουσας δεν μεταβάλλεται (για ελεγχόμενα περιβάλλοντα) με την απόσταση παρά μόνο το πλάτος αυτής. Σε αυτό συνεισφέρει ο μεγάλος συντελεστής απορρόφησης των ακουστικών κυμάτων, που καθιστά τις επιδράσεις των ανακλάσεων σε μεγάλες αποστάσεις πομπού-δέκτη πολύ μικρές. Προτού εφαρμοστεί η μέθοδος τόσο αυτή, όσο και η προαναφερθείσα, πρέπει να προηγηθεί ένα σύντομο διάστημα βαθμονόμησης του συστήματος. Αυτό το διάστημα αφορά στην επιλογή του κατωφλίου σε σχέση με το επίπεδο θορύβου και στο σχηματισμό της μορφής της περιβάλλουσας για τη διόρθωση των μετρήσεων που θα ακολουθήσει. Τέλος, πρέπει να τονιστεί πως η μέθοδος του κεντροειδούς εντοπισμού είναι περισσότερο ευαίσθητη στο φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Σε μακρινές αποστάσεις, όπου η στάθμη της περιβάλλουσας δεν ξεπερνάει κατά πολύ την τιμή του κατωφλίου, αν φτάσει στο δέκτη μία σχετικά ισχυρή ανάκλαση η οποία επίσης ξεπερνάει το κατώφλι σε χρονικό διάστημα που συμπίπτει εν μέρει με το απευθείας τμήμα τότε, υπάρχει περίπτωση το σημείο t_e να αντιστοιχεί στο σημείο όπου η περιβάλλουσα της ανάκλασης του σήματος πέφτει κάτω από την τιμή του κατωφλίου. Βέβαια, δεδομένου των μη ισχυρών ανακλάσεων αυτό, πρακτικά, συμβαίνει μόνο αν τεθεί πολύ μικρή τιμή κατωφλίου και σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 2,4 μέτρων, όπως φάνηκε πειραματικά.

Πρέπει να τονιστεί πως μια πιθανή μέθοδος επεξεργασίας αποτελεί η ανίχνευση μέγιστου του λαμβανόμενου σήματος. Η μέθοδος αυτή δεν επηρεάζεται από την πολυδιαδρομική διάδοση (μια και η απευθείας συνιστώσα είναι πάντα πιο ισχυρή). Επιπλέον, η ακρίβεια των μετρήσεων είναι ανεπηρέαστη από την απόσταση. Τα περισσότερα συστήματα ακουστικού εντοπισμού ακολουθούν αυτή τη μέθοδο. Το πρόβλημα έγκειται στην ανάγκη δειγματοληψίας και επεξεργασίας σε όλο το διάστημα μεταξύ δύο εκπεμπόμενων παλμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη καθυστέρηση και είναι ο λόγος για τον οποίο στη διατριβή εστιάζουμε σε άλλες μεθόδους εντοπισμού.

3.3.4 Επιλογή κατωφλίου

Η επιλογή κατωφλίου και στις δύο προαναφερόμενες μεθόδους μπορεί να γίνεται με τον ίδιο τρόπο. Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκαν δύο μέθοδοι επιλογής κατωφλίου: α) σταθερή τιμή κατωφλίου και β) μεταβλητή τιμή κατωφλίου. Και στις δύο περιπτώσεις αρχικά υπολογίζεται η dc μέση τιμή του σήματος στο δέκτη στο χρονικό διάστημα προ της λαμβανόμενης σειράς ημιτόνων. Για την ακρίβεια, η dc μέση τιμή της στάθμης του σήματος υπολογίζεται στο χρονικό διάστημα $[t_2, t_2+t_{\text{hold}}]$. Η dc μέση τιμή του σήματος ορίζεται από την offset τιμή του ενισχυτή του εκπεμπόμενου σήματος, η οποία με τη σειρά της καθορίζεται από ένα ποτενσιόμετρο. Προσεγγιστικά αυτή είναι, όπως έχει αναφερθεί, στα 1,65Volt. Εντούτοις, για μεγαλύτερη ακρίβεια κρίνεται σκόπιμο να επαναπροσδιορίζεται στο δέκτη. Στο σήμα προστίθεται Γκαουσιανός θόρυβος μηδενικής μέσης

τιμής. Η δειγματοληψία για τον υπολογισμό της dc μέσης τιμής γίνεται για χρονικό διάστημα 0,1msec ανά εκπεμπόμενη παλμοσειρά (ανά 10msec). Ο λόγος που το χρονικό διάστημα υπολογισμού της dc μέσης τιμής του σήματος δεν εκκινεί από τη στιγμή εκπομπής της παλμοσειράς, είναι η πιθανή διαρροή τμήματος του εκπεμπόμενου σήματος στο δέκτη κατά την εκπομπή του. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν ο συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη γίνεται ενσύρματα και όχι με χρήση φωτοδιόδων όπως περιγράφηκε πιο πριν.

Επιλέγοντας μια σταθερή τιμή κατωφλίου αγνοούνται τυχόν αυξομειώσεις του επιπέδου θορύβου που μπορεί να παρατηρηθούν. Οπότε, η τιμή κατωφλίου αφενός θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να μπορεί να υπερκεράσει τυχόν υψηλές τιμές θορύβου, αφετέρου αρκετά χαμηλή ώστε το σύστημα να διαθέτει ικανοποιητική εμβέλεια. Για τον προσδιορισμό του επιπέδου του κατωφλίου που θα χρησιμοποιηθεί, το σύστημα διεξάγει αρχικά και προ να τεθεί σε λειτουργία, μετρήσεις του επιπέδου του θορύβου. Στη συνέχεια ρυθμίζει το επίπεδο του κατωφλίου σε τιμή ίση με πέντε φορές τη RMS τιμή του θορύβου για την περίοδο δειγματοληψίας. Η περίοδος δειγματοληψίας για όλες τις σειρές των μετρήσεων τέθηκε ίση με 10sec. Δηλαδή έχουμε:

$$V_{level_thres} = 5 \cdot V_{RMS}^{noise} \Leftrightarrow \frac{V_{level_thres}}{V_{RMS}^{noise}} = 5 \text{ και σε db } 20 \cdot \log\left(\frac{V_{level_thres}}{V_{RMS}^{noise}}\right) = 20 \log(5) \approx 14db$$

Η τιμή της στάθμης κατωφλίου προκύπτει αν προσθέσουμε το επίπεδο του κατωφλίου στην στάθμη αναφοράς (που είναι προσεγγιστικά 1,65Volt). Δηλαδή $V_{thres} = V_{ref} + V_{level_thres}$.

Η πιθανότητα (false alarm propability P_{fa}) πως ένα σήμα θορύβου V_{noise} στην είσοδο του δέκτη θα ξεπεράσει την τιμή κατωφλίου V_{thres} , δίνεται από τη σχέση [SKOL81]:

$$P_{fa} = Probability(V_{thres} < V_{noise} < \infty) = \int_{V_{thres}}^{\infty} \frac{V_{noise}}{\psi_0} \exp\left(-\frac{V_{noise}^2}{2 \cdot \psi_0}\right) dR = \exp\left(-\frac{V_{thres}^2}{2 \cdot \psi_0}\right)$$

όπου ψ_0 η διακύμανση της τάσης του Γκαουσιανού θορύβου. Ο μέσος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών υπερβάσεων της στάθμης κατωφλίου από το σήμα θορύβου ονομάζεται false-alarm time

και δίνεται από τη σχέση $T_{fa} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T_k$, όπου T_k το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο

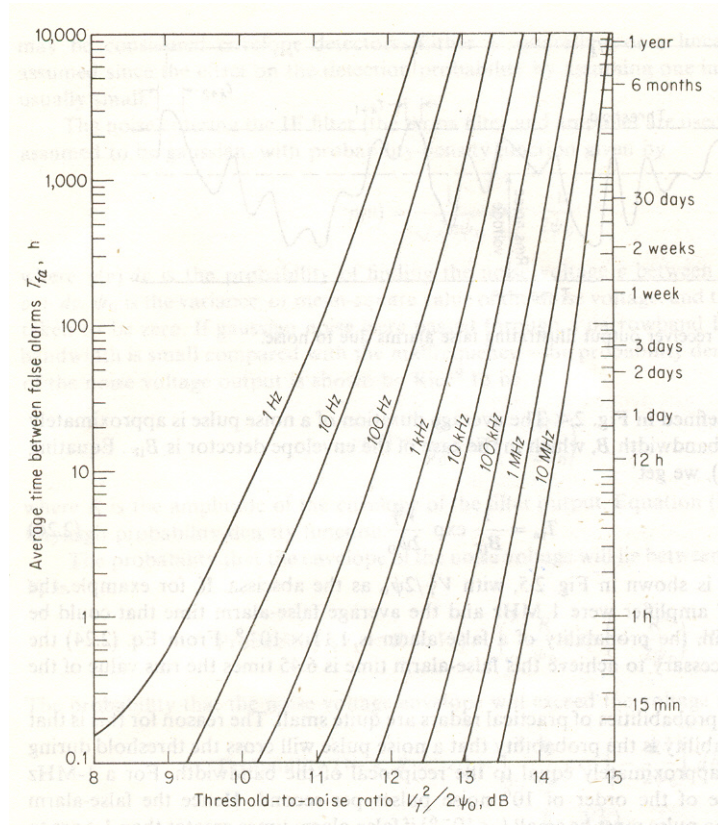
διαδοχικών περασμάτων του σήματος θορύβου πάνω από τη στάθμη κατωφλίου και ενώ το σήμα θορύβου αυξάνει. Η πιθανότητα εσφαλμένων συναγερωμών μπορεί να οριστεί και ως ο λόγος της διάρκειας του χρόνου που το σήμα θορύβου είναι υπεράνω της στάθμης κατωφλίου προς το συνολικό χρόνο που θα μπορούσε να είναι πάνω από αυτή, οπότε και δίνεται και από τη σχέση:

$$P_{fa} = \frac{\sum_{k=1}^N t_k}{\sum_{k=1}^N T_k} = \frac{\langle t_k \rangle_{av}}{\langle T_k \rangle_{av}} = \frac{1}{T_{fa} B}, \text{ όπου το } t_k \text{ είναι το } k\text{-στο χρονικό διάστημα παραμονής του}$$

σήματος θορύβου πάνω από την τιμή κατωφλίου και B το εύρος ζώνης του δέκτη.

Έτσι λοιπόν έχουμε $T_{fa} = \frac{1}{B} \exp \frac{V^2}{2 \cdot \psi_0}$. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η γραφική

παράσταση της συνάρτησης που εκφράζεται με αυτή τη σχέση και δίνει το χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών σφαλμάτων για διαφορετικές τιμές του εύρους ζώνης και του λόγου του τετραγώνου της τάσης επιπέδου κατωφλίου προς τη μέση τετραγωνική τιμή θορύβου.



Εικόνα 79: Εξάρτηση του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών εσφαλμένων συναγεργμών με το εύρος ζώνης και το σηματοθορυβικό λόγο

Η πιο πάνω ανάλυση έγινε όταν στην είσοδο του δέκτη λαμβάνεται απλά σήμα θορύβου. Αν τώρα θεωρήσουμε πως λαμβάνεται και το χρήσιμο ημιτονικό σήμα τότε μετά τη λήψη του σήματος θα έχουμε την ακόλουθη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$p_S(V_{noise}) = \frac{V_{noise}}{\psi_0} \exp \left(-\frac{V_{noise}^2 + V^2}{2 \cdot \psi_0} \right) I_0 \left(\frac{V_{noise} V}{\psi_0} \right)$$

όπου V το χρήσιμο σήμα και I_0 η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης και ορίσματος Z . Θεωρώντας μεγάλες τιμές του Z , η συνάρτηση Bessel επεκτείνεται και γίνεται:

$$I_0(Z) \approx \frac{e^Z}{\sqrt{2\pi Z}} \left(1 + \frac{1}{8Z} + \dots \right)$$

Η πιθανότητα ανίχνευσης του σήματος είναι η ίδια με την πιθανότητα το σήμα V να ξεπεράσει το προκαθορισμένο κατώφλι V_{thres} . Δηλαδή, έχουμε για την πιθανότητα ανίχνευσης (detection probability):

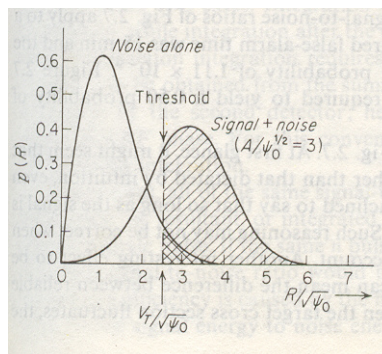
$$P_d = \int_{V_{thres}}^{\infty} p_S(V) dR = \int_{V_{thres}}^{\infty} \frac{V_{noise}}{\psi_0} \exp\left(-\frac{V_{noise}^2 + V^2}{2 \cdot \psi_0}\right) I_0\left(\frac{V_{noise} V}{\psi_0}\right) dR$$

Η σχέση αυτή μπορεί είτε να λυθεί με αριθμητικές τεχνικές, είτε να προσεγγιστεί κάνοντας κάποιες παραδοχές. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας $V_{noise} \cdot V / \psi_0 \gg 1$, $V \gg |V_{noise} - V|$ και αγνοώντας όρους μικρότερους ή ίσους του V^{-3} έχουμε:

$$P_d = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{V_{thres} - V}{\sqrt{2\psi_0}} \right) + \frac{\exp\left[-(V_{thres} - V)^2 / 2\psi_0\right]}{2\sqrt{2\pi}(V/\sqrt{\psi_0})} \cdot \left[1 - \frac{V_{thres} - V}{4V} + \frac{1 + (V_{thres} - V)^2 / \psi_0}{8V^2 / \psi_0} + \dots \right]$$

όπου η συνάρτηση σφάλματος erf είναι $\operatorname{erf}z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du$.

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για παρουσία μόνο θορύβου και για παρουσία χρήσιμου σήματος με προσθετικό θόρυβο για $V/\psi_0^{1/2}=3$ και για τιμή κατωφλίου τέτοια ώστε να ισχύει $V_{thres}/\psi_0^{1/2}=2,5$, αντίστοιχα.



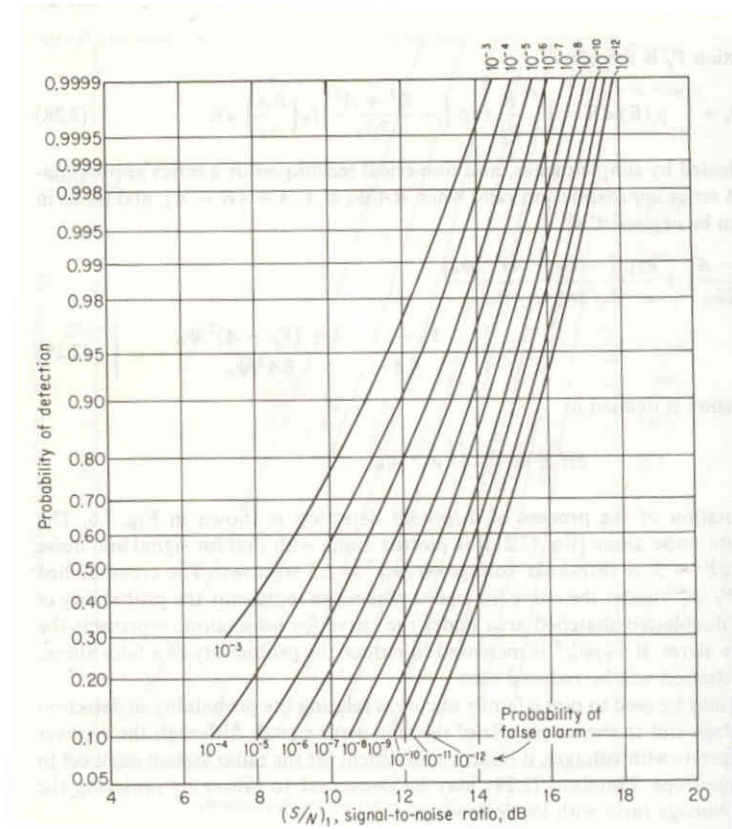
Εικόνα 80: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ανίχνευσης σε σχέση με το κατώφλι στο δέκτη

Στην γραφική αυτή παράσταση είναι προφανές πως αύξηση της τιμής του κατωφλίου θα μειώσει τον αριθμό των σφαλμάτων, αλλά θα μειώσει, ταυτόχρονα, και την πιθανότητα ανίχνευσης του χρήσιμου σήματος.

Αν τώρα στην πιο πάνω σχέση κάνουμε τις ακόλουθες αντικαταστάσεις:

$$\frac{V_{thres}^2}{2\psi_0} = \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right) \text{ και } \frac{V}{\sqrt{\psi_0}} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{RMS}}{V_{RMS}^{noise}} = \left(2 \frac{S}{N}\right)^{1/2}, \text{ Σχέση III-1}$$

μπορούμε να συνδέσουμε τη πιθανότητα ανίχνευσης με την πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού (false alarm) και το σηματοθρομβικό λόγο ισχύος του σήματος. Στην ακόλουθη γραφική φαίνονται διάφορες χαρακτηριστικές καμπύλες που συνδέουν τα πιο πάνω μεγέθη.



Εικόνα 81: Συνάρτηση της πιθανότητας ανίχνευσης με την πιθανότητα εσφαλμένων συναγερωμών για διάφορες τιμές σηματοθορυβικού λόγου

Παρατηρούμε πως για ένα σηματοθορυβικό λόγο των 14dB και πιθανότητα εσφαλμένων συναγερωμών 10^{-5} έχουμε πιθανότητα ανίχνευσης 99%.

Εναλλακτικά, αντί για σταθερή τιμή κατωφλίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ρυθμιζόμενη τιμή προσαρμοσμένη κατάλληλα στα εκάστοτε μετρούμενα επίπεδα θορύβου. Μια τέτοια τεχνική αναφέρεται συνήθως ως τεχνική σταθερού ρυθμού εσφαλμένων συναγερωμών (Constant False Alarm Rate technique-CFAR) και χρησιμοποιείται, σε διάφορες παραλλαγές της, σε εφαρμογές ραντάρ ([SKOL81], [ELIA90], [WREN99], [RIMB05]). Υπάρχουν διάφορες τεχνικές CFAR που χρησιμοποιούνται. Στο σύστημά μας επιλέξαμε να δειγματοληπτούμε το λαμβανόμενο σήμα στο διάστημα $[t_2, t_{\text{hold}}]$, όπως αυτά ορίστηκαν στις παραγράφους 3.2.1 και 3.3.3 αντίστοιχα. Το χρονικό αυτό διάστημα προσφέρει (ανάλογα και με το ρυθμό δειγματοληψίας) σημαντικό αριθμό δειγμάτων για να χαρακτηρίσει το επίπεδο του θορύβου για το διάστημα του παραθύρου λήψης του δέκτη που το ακολουθεί. Στη συνέχεια, το επίπεδο του κατωφλίου ρυθμίζεται ώστε να είναι ίσο με k φορές της RMS τιμής του θορύβου. Η τιμή του k αποτελεί παράμετρο που εξετάζεται στις μετρήσεις.

Γενικά η μέθοδος CFAR προσφέρει σταθερό ρυθμό εσφαλμένων συναγερωμών. Βέβαια, η μέθοδος έχει και κάποια μειονεκτήματα. Το βασικό μειονέκτημα είναι πως διατηρώντας το ρυθμό εσφαλμένων συναγερωμών σταθερό, μειώνεται (έστω και λίγο) η πιθανότητα ανίχνευσης. Αυτό στην

παρούσα διατρίβη αντιμετωπίζεται ρυθμίζοντας κατάλληλα τον παράγοντα k , ανάλογα με το επίπεδο θορύβου κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης, στην αρχή της λειτουργίας του συστήματος. Βέβαια, σε περιπτώσεις όπου θα υπάρξει μια ισχυρή και σύντομη πηγή θορύβου που θα συμπέσει με το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας του θορύβου, αυτή θα οδηγήσει το κατώφλι σε πολύ υψηλή τιμή και θα οδηγήσει το σύστημα σε μη εντοπισμό.

Ο βέλτιστος συνδυασμός τόσο των μεθόδων επιλογής κατωφλίου, όσο και των μεθόδων επιλογής του χρόνου άφιξης του σήματος στο δέκτη, βρίσκεται μέσα από πειραματικές μετρήσεις και αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Μετά την κατασκευή του συστήματος ακολούθησαν μια σειρά από λειτουργικές μετρήσεις για να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία του πομπού και του δέκτη, να φανούν τυχόν προβλήματα και να γίνουν τροποποιήσεις, όπου είναι απαραίτητο. Οι μετρήσεις βοήθησαν να προσεγγιστεί με σχετική, βέβαια, ακρίβεια η περιοχή λειτουργίας του συστήματος, να διερευνηθούν τυχόν προβλήματα παρεμβολών (π.χ. από φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης) και επίδρασης του θορύβου και να ελεγχθεί η χρησιμότητα του συστήματος.

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των επιμέρους αποτελεσμάτων αυτών των προμετρήσεων, πρέπει να τονιστεί πως ταυτόχρονα ελέγχθηκε η σωστή λειτουργία των επιμέρους τμημάτων της αλυσίδας του πομπού και του δέκτη. Αυτή επαληθεύτηκε, όπως φάνηκε και στις προηγούμενες ενότητες (Εικόνα 58, Εικόνα 59, Εικόνα 60, Εικόνα 61, Εικόνα 67). Για την πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκαν δύο ξύλινοι δοκοί στους οποίους βιδώνονταν σταθερά ο πομπός και το σύστημα των τριών δεκτών. Όλες οι μετρήσεις έγιναν με χρήση του παλμογράφου Agilent 54621A.



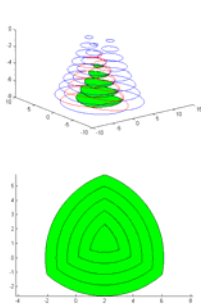
Εικόνα 82: Διάταξη προμετρήσεων

3.4.1 Περιοχή λειτουργίας

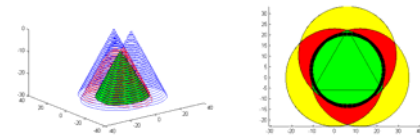
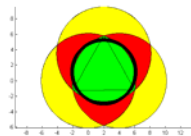
Η περιοχή λειτουργίας του συστήματος καθορίζεται από δύο παράγοντες: α) τη σχετική θέση των πιεζοηλεκτρικών δεκτών μεταξύ τους και β) την ισχύ του ληφθέντος σήματος και κατ' επέκταση το σηματοθορυβικό λόγο του σήματος για διάφορες αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη.

Η σχετική θέση των δεκτών έχει ιδιαίτερη σημασία ως προς την περιοχή εμβέλειας, μια και αυτή είναι η τομή των περιοχών κάλυψης των επιμέρους διαγραμμάτων κατευθυντικότητας. Όπως είδαμε στην παρουσίαση των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων, αυτοί έχουν κωνικό διάγραμμα ακτινοβολίας με αμφίπλευρη γωνία 6-dB που δίνεται από τον Πίνακα 9. Έχοντας τρεις δέκτες, η βέλτιστη τοποθέτησή τους για μεγαλύτερη αλληλοκάλυψη είναι η τοποθέτησή τους σε κορυφές τριγώνου, αντί σε ευθεία γραμμή. Αν μάλιστα το τρίγωνο είναι ισόπλευρο, πλευράς d , τότε η αλληλοκάλυψη είναι η μέγιστη δυνατή (σε σχέση με τοποθέτησή τους στην ευθεία με ίδια απόσταση d μεταξύ τους, δεδομένου των ίδιων χαρακτηριστικών κατευθυντικότητάς τους).

Η περιοχή επικάλυψης των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των τριών δεκτών είναι προσεγγιστικά κύκλος, ενώ η κάθετη τομή αυτής σε απόσταση R , όπου $R \gg d$ μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί κύκλος, ακτίνας α_{range} . Αρχικά, πραγματοποιήσαμε προσομοίωση για διάφορες αποστάσεις των δεκτών μεταξύ τους με παράμετρο την πλευρά d του ισόπλευρου τριγώνου και με δεδομένο την αμφίπλευρη γωνία 6-dB από τα φύλλα προδιαγραφών τους. Ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός της ελάχιστης εμβέλειας του συστήματος καθώς και της ακτίνας α_{range} σε διάφορες αποστάσεις από τον δέκτη. Η προσομοίωση έγινε σε πρόγραμμα Matlab™ και τα αποτελέσματα αυτής φαίνονται (γραφικά και αριθμητικά) στις εικόνες και στον πίνακα που ακολουθούν.



Εικόνα 83: Περιοχή εμβέλειας για $d=4\text{cm}$ και $R=8\text{cm}$



Εικόνα 84: Περιοχή εμβέλειας για $d=12\text{cm}$ και $R=30\text{cm}$

d (cm)	R (cm)	$\alpha_{\text{range_25kHz}}$ (cm)	$R_{\text{min_25}}$ (cm)	$\alpha_{\text{range_33kHz}}$ (cm)	$R_{\text{min_33}}$ (cm)	$\alpha_{\text{range_40kHz}}$ (cm)	$R_{\text{min_40}}$ (cm)
4	10	5,67	4	2,09	6	2,67	5
	50	36,42		18,92		21,7	
	100	74,76		39,79		45,35	
	200	151,44		81,52		92,62	
	250	189,78		102,38		116,26	

d (cm)	R(cm)	$\alpha_{\text{range_25kHz}}$ (cm)	$R_{\text{min_25}}$ (cm)	$\alpha_{\text{range_33kHz}}$ (cm)	$R_{\text{min_33}}$ (cm)	$\alpha_{\text{range_40kHz}}$ (cm)	$R_{\text{min_40}}$ (cm)
	300	228,12		123,24		139,89	
8	10	3,48	7	0	12	0,15	10
	50	34,45		16,91		19,7	
	100	72,82		37,84		43,39	
	200	149,51		79,59		90,69	
	250	187,86		100,45		114,33	
	300	226,2		121,31		137,97	
12	10	0,95	10	0	17	0	15
	50	32,45		14,84		17,65	
	100	70,87		35,85		41,41	
	200	147,59		77,64		88,74	
	250	185,93		98,51		112,39	
	300	224,27		119,38		136,04	
16	10	0	13	0	23	0	20
	50	30,42		12,69		15,54	
	100	68,9		33,82		39,41	
	200	145,65		75,67		86,79	
	250	184		96,55		110,44	
	300	222,35		117,43		134,1	

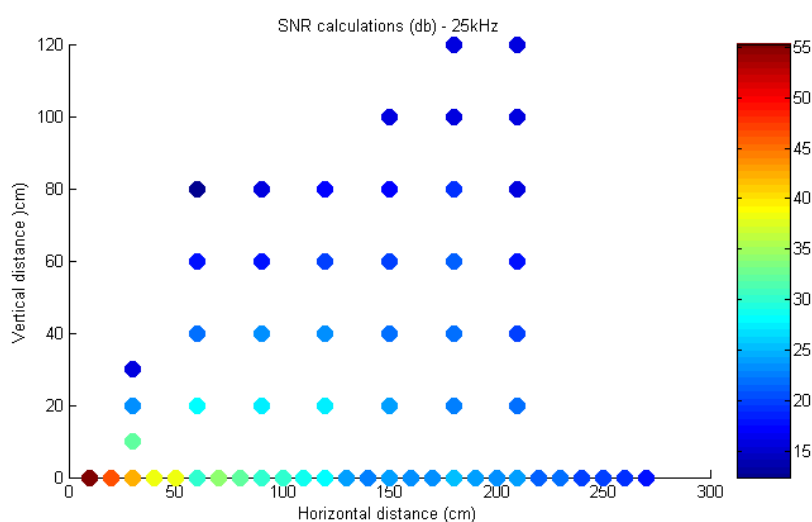
Πίνακας 13: Εμβέλεια συστήματος σε σχέση με την απόσταση των δεκτών

Όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ των δεκτών τόσο αυξάνει η ελάχιστη απόσταση λειτουργίας του συστήματος καθώς και κατά πολύ λίγο η μέγιστη εμβέλεια αυτού. Επίσης, είναι εμφανές πως, χάρη στο μεγαλύτερο εύρος, ο πομποδέκτης των 25kHz υπερτερεί των υπολοίπων. Εντούτοις, η επιλογή μιας μικρής, σχετικά, απόστασης μεταξύ των δεκτών, επιφέρει και κάποιες άσχημες συνέπειες. Για μεγάλες αποστάσεις του πομπού από το σύστημα των δεκτών και μικρό d έχουμε $R_1 \approx R_2 \approx R_3$, όπου R_i , $i=1,2,3$ η απόσταση του πομπού από τον δέκτη i (π.χ. για απόσταση δύο μέτρων από το επίπεδο των τριών δεκτών η διαφορά στις αποστάσεις είναι της τάξης των 2cm). Αυτό δύναται να οδηγήσει σε αστάθεια το σύστημα μια και η ακρίβεια στις μετρήσεις της εκάστοτε απόστασης θα είναι γύρω στο 1cm. Επομένως, επιλέξαμε για το σύστημά μας την τοπολογία ισοπλεύρου τριγώνου δεκτών με πλευρά τριγώνου $d=12\text{cm}$.

Μια και η εύρεση της απόστασης (στον κεντροειδή εντοπισμό) δεν γίνεται, σχετίζοντας αυτή με την τάση ή την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος, η εμβέλεια του συστήματος μπορεί να έχει μεγαλύτερο άνοιγμα γωνίας από την τομή των χαρακτηριστικών διαγραμμάτων των δεκτών κάνοντας χρήση μόνο της αμφίπλευρης γωνία 6db αυτών. Δύναται, δηλαδή, το σήμα, αν και θα έχει δεχτεί μεγαλύτερες απώλειες λόγω του μη ομοιοκατευθυντικού διαγράμματος ακτινοβολίας, να ξεπερνάει

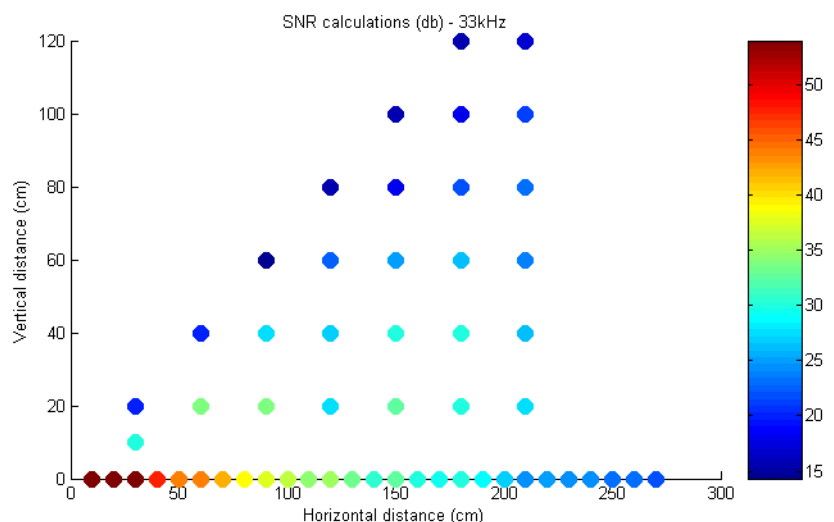
το κατώφλι. Η περιοχή εμβέλειας καθορίζεται από το σηματοθορυβικό λόγο του σήματος σε διάφορα σημεία του χώρου. Οι μέθοδοι επιλογής κατωφλίου που αναφέρθηκαν σε πιο πάνω ενότητα, θέτουν διαφορετικές απαιτήσεις ως προς το σηματοθορυβικό λόγο του σήματος. Σε αυτήν την πρώτη φάση διεξήγαμε απλές μετρήσεις θορύβου για να εξάγουμε τη διακύμανση αυτού. Στη συνέχεια, και χρησιμοποιώντας τις ξύλινες δοκούς που προαναφέρθηκαν, διεξήγαμε μια σειρά από μετρήσεις για τον προσδιορισμό του μέγιστου πλάτους του σήματος στο δέκτη. Ακολούθως χρησιμοποιώντας τη Σχέση III-1, υπολογίσαμε τον προσεγγιστικό σηματοθορυβικό λόγο στον δέκτη για διάφορες θέσεις αυτού. Οι μετρήσεις του θορύβου για τα κανάλια των διαφορετικών συχνοτήτων ελήφθησαν για χρονικό διάστημα 10sec και έδωσαν διακυμάνσεις $1,16 \cdot 10^{-5}$, $9,99 \cdot 10^{-6}$ και $5,72 \cdot 10^{-6}$ για τα 25, 33 και 40kHz αντίστοιχα.

Οι μετρήσεις έγιναν με βήμα δέκα εκατοστών οριζόντια και είκοσι εκατοστών κατακόρυφα, δίνοντας τιμές που φαίνονται στα ακόλουθα γραφήματα. Και για τις τρεις συχνότητες σε όλα τα σημεία ο σηματοθορυβικός λόγος ξεπερνάει τα 14db¹.

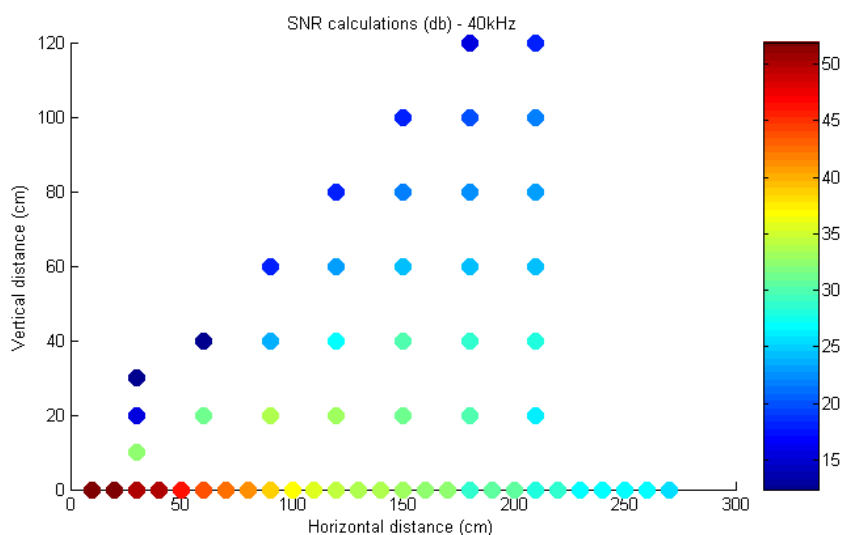


Εικόνα 85: Μετρήσεις σηματοθορυβικού λόγου για το σύστημα στα 25kHz

¹ Θυμίζουμε πως, όπως περιγράφηκε στις διαφορετικές μεθόδους καθορισμού του κατωφλίου, στάθμη σηματοθορυβικού λόγου 14db δίνει πολύ ικανοποιητικές τιμές για την πιθανότητα ανίχνευσης και το ρυθμό εσφαλμένων συναγερωμών



Εικόνα 86: Μετρήσεις σηματοθορυβικού λόγου για το σύστημα στα 33kHz



Εικόνα 87: Μετρήσεις σηματοθορυβικού λόγου για το σύστημα στα 40kHz

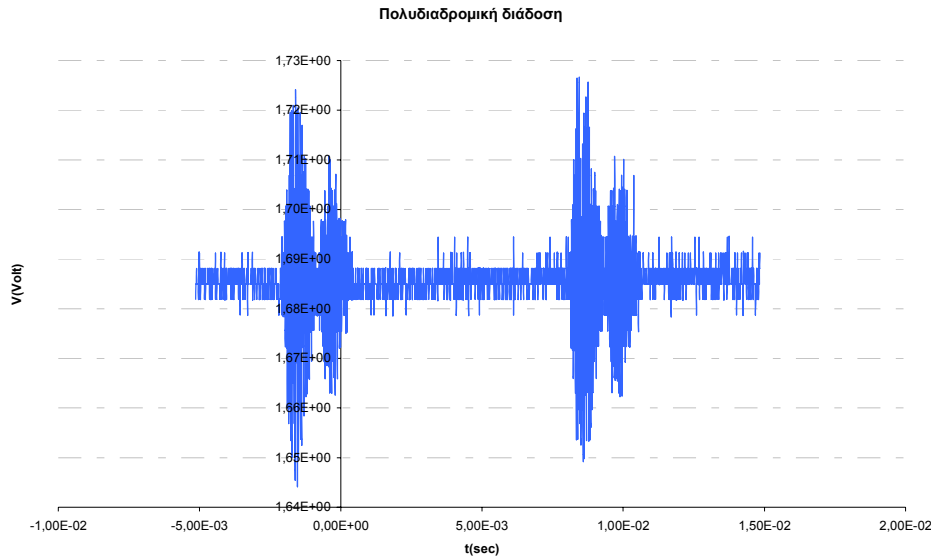
Αν και οι μετρήσεις που έγιναν δεν είναι ιδιαίτερης ακρίβειας, δεδομένου του ότι η μέτρηση του θορύβου ήταν σε διαφορετική χρονική στιγμή από τη μέτρηση του σήματος – ενώ και το ληφθέν σήμα περιέχει θόρυβο – εντούτοις, μας δίνουν μία αίσθηση της εμβέλειας του συστήματος. Παρατηρούμε πως με την ενίσχυση του σήματος αυξάνεται η εμβέλεια του συστήματος περαιτέρω της περιοχής που καθορίζεται από την τομή των γωνιών 6-dB των δεκτών και ικανοποιείται προσεγγιστικά η προδιαγραφή που είχε τεθεί ως προς την εμβέλεια του συστήματος. Αν και ο χώρος εμβέλειας δεν μπορεί να είναι κυβικός (δεδομένου της κωνικής μορφής του χαρακτηριστικού διαγράμματος των δεκτών), οι διαστάσεις του προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις προδιαγραφές. Στις αναλυτικές μετρήσεις που παρουσιάζονται στο ακόλουθο κεφάλαιο φαίνεται και η ακριβής περιοχή εμβέλειας του συστήματος.

3.4.2 Προβλήματα παρεμβολών

Το σύστημα μας εξετάστηκε αρχικά για προβλήματα παρεμβολών από ανακλάσεις της απευθείας συνιστώσας. Η επίδραση του φαινομένου της πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι ένα πολυδιάστατο πρόβλημα. Η επίδρασή της εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, η θέση των επιφανειών ανάκλασης, το υλικό αυτών, κ.ά. Κατά τις μετρήσεις προσομοιώθηκαν οι συνθήκες ενός πραγματικού Εικονικού Περιβάλλοντος στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Σε ένα τέτοιο, ανακλάσεις συνήθως παρατηρούνται από πρόπτωση του σήματος σε άνθρωπο, μια και ο χώρος δράσης ενός συστήματος είναι συνήθως άδειος από αντικείμενα. Μια και οι μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο του ΕΜΟΙ, όπου υπάρχει πληθώρα πιθανών ανακλαστικών επιφανειών, έγινε προσπάθεια τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης να απέχει τουλάχιστον 50cm από μια οποιαδήποτε τέτοια επιφάνεια. Σε αυτήν την περίπτωση ισχυρές ανακλάσεις παρατηρήθηκαν σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη, όπου η διαδρομή της ανακλώμενης συνιστώσας είναι συγκρίσιμη με την απευθείας διαδρομή. Ως ισχυρότερη ανακλαστική επιφάνεια αναγνωρίστηκε το πάτωμα που ήταν αρκετά λείο. Μια λύση είναι η χρήση στο πάτωμα ενός ισχυρά απορροφητικού υλικού (π.χ. μοκέτα). Πρέπει να τονιστεί πως στην περίπτωση που το σύστημα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της θέσης του κεφαλιού του χρήστη τότε η πιθανότερη διάταξη προβλέπει την τοποθέτηση των δεκτών στο ταβάνι και του πομπού στο επάνω μέρος του κεφαλιού του χρήστη κοιτώντας προς τα πάνω. Σε αυτήν την περίπτωση το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης έχει ελάχιστη επίδραση. Στην περίπτωση εντοπισμού του χεριού του χρήστη το σύστημα τοποθετείται με διεύθυνση παράλληλη ως προς το πάτωμα και είναι πιο ευαίσθητο στην πολυδιαδρομική διάδοση, οπότε και πρέπει να ληφθεί η σχετική μέριμνα.

Η επίδραση των ανακλάσεων (μια και αυτές φτάνουν πάντα μετά την απευθείας συνιστώσα στο δέκτη) μπορεί να έχει επιπτώσεις στην μέτρηση της απόστασης μόνο αν: α) ένα μέρος της συμπέσει χρονικά με το απευθείας σήμα στο δέκτη ή β) φτάσει στον δέκτη στο επόμενο χρονικό παράθυρο αναμονής προ του αντίστοιχου απευθείας σήματος.

Στην πρώτη περίπτωση πρόβλημα δημιουργείται κυρίως κατά τη χρήση κεντροειδούς εντοπισμού (ιδίως για χαμηλή τιμή κατωφλίου). Προς τούτο, μία λύση θα ήταν η μελέτη της ακουστικής του δωματίου. Μια και όμως η πιθανότερη ανακλαστική επιφάνεια είναι κάποιος χρήστης του συστήματος, αυτή η λύση δεν είναι απλά επίπονη αλλά και δεν οδηγεί σε σωστά αποτελέσματα. Η μόνη αντικειμενικά εφικτή λύση είναι η απομάκρυνση πιθανών ανακλαστικών επιφανειών από την πρώτη ζώνη Fresnel. Πιο συγκεκριμένα θεωρώντας R_0 την απόσταση πομπού-δέκτη, R_1 και R_2 την απόσταση μιας ανακλώμενης επιφάνειας από τον πομπό και το δέκτη αντίστοιχα (βλ. Εικόνα 11) και R_{thres2} το μήκος διαδρομής που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα από την άφιξη του σήματος στο δέκτη ως το σημείο που η περιβάλλουσα θα κατέλθει του κατωφλίου V_{thres2} , έχουμε για την πρώτη ζώνη Fresnel: $R_0 + R_{\text{thres2}} < R_1 + R_2$. Γενικά παρατηρήθηκε πως για απόσταση ως 2m μεταξύ πομπού και δέκτη δεν παρατηρούνται ανακλάσεις, αν δεν υπάρχουν εμπόδια, για έλλειψη με $b=0,35m$ (βλ. Εικόνα 11).



Εικόνα 88: Φαινόμενο πολυδιαδρομικής διάδοσης για $f=25\text{kHz}$ και $R=270\text{cm}$

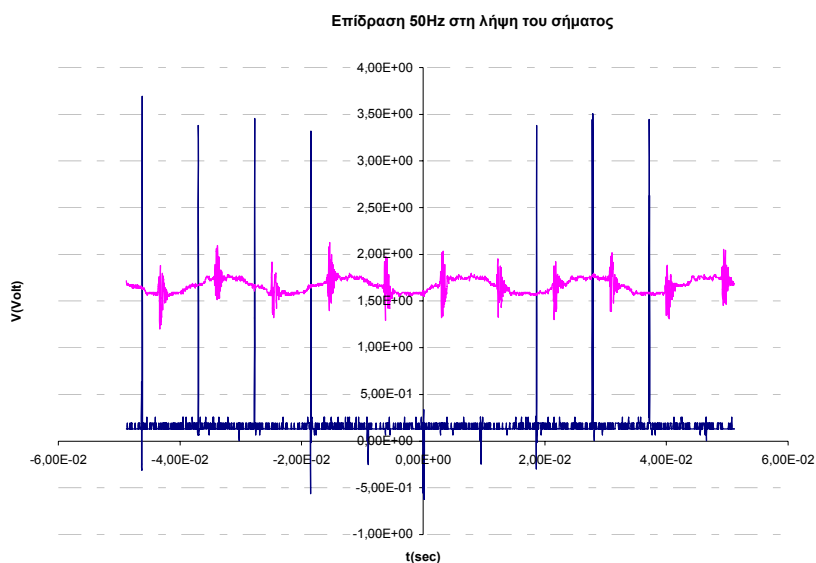
Στην δεύτερη περίπτωση, δύο είναι τα προβλήματα που μπορούν να παρατηρηθούν: 1) η ανάκλαση να ξεπεράσει το κατώφλι και 2) η ανάκλαση να συμπέσει στο χρόνο δειγματοληψίας θορύβου για τον καθορισμό του κατωφλίου και να εμφανίσει ιδιαίτερα ψηλό θόρυβο σε περίπτωση μη σταθερού κατωφλίου. Η λύση που ακολουθήθηκε από το σύστημα είναι η ακόλουθη ανά περίπτωση:

1. σε αυτήν την περίπτωση η μέτρηση της απόστασης θα οδηγήσει σε αποτέλεσμα πολύ μικρότερης τιμής από την προηγούμενη σάρωση. Αν η απόσταση αυτή δεν μπορεί να καλυφθεί από τον κινούμενο στόχο με τη μέγιστη αποδεκτή ταχύτητα του συστήματος (1m/sec), τότε απορρίπτεται και κρατάμε τα αποτελέσματα της προηγούμενης μέτρησης. Η λύση αυτή φάνηκε να λειτουργεί πολύ καλά με μηδαμινά αποτελέσματα στο ρυθμό ανανέωσης δεδομένων.
2. αν η μέτρηση του θορύβου, μεταξύ δύο διαδοχικών σαρώσεων, παρουσιάσει μεταβολή άνω του 30% τότε κρατάμε την προηγούμενη τιμή της μέτρησης του θορύβου.

Ένα δεύτερο πρόβλημα που παρατηρήθηκε κατά τις προμετρήσεις είναι η επίδραση της μη ικανοποιητικής γείωσης στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Αυτό οφείλεται σε διαρροές των οργάνων και καλωδιώσεων των πλακετών. Το πρόβλημα φαίνεται στην ακόλουθη γραφική και έχει άμεση επίδραση στον υπολογισμό της στάθμης αναφοράς στον δέκτη.

Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε πως υπήρχε μια σχετικά μικρή, αλλά υπαρκτή διαρροή της μίας συχνότητας στην άλλη, στον δέκτη. Οι διαρροές αυτές είναι μεν μικρές αλλά λόγω του μεγάλου λόγου ενίσχυσης εμφανίζονται ως ισχυρά παρεμβάλλοντα σήματα.

Τέλος, παρατηρήθηκε μια μικρή διαρροή από τον πομπό στο δέκτη. Το σήμα θορύβου στον δέκτη κατά τη διάρκεια εκπομπής αυξανόταν κατά περίπου 3db.



Εικόνα 89: Αποτέλεσμα ανεπαρκούς γείωσης

Ως λύση στα παραπάνω προβλήματα επανασχεδιάστηκε ο δέκτης, δημιουργώντας τρία απομακρυσμένα μεταξύ τους κυκλώματα, ένα για κάθε δέκτη. Επιπρόσθετα για τις καλωδιώσεις χρησιμοποιήθηκαν λεπτά ομοαξονικά καλώδια (mini-RG59) με χαρακτηριστική αντίσταση 75Ω. Τέλος, για να βελτιωθεί η χρησιμότητα του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν SMT (surface-mount) στοιχεία για μείωση χώρου και συνολικού βάρους. Ο τελικός δέκτης αποτελείται από τρεις πλακέτες, όπως αυτή της εικόνας που ακολουθεί.



Εικόνα 90: Νέο κύκλωμα δέκτη

Μετά τις αλλαγές η δεύτερη έκδοση του συστήματος δεν παρουσίαζε κανένα από τα παραπάνω προβλήματα.

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό τέθηκαν οι προδιαγραφές λειτουργίας, σχεδιάστηκε, υλοποιήθηκε και ελέγχθηκε ως προς τη λειτουργικότητα του το ακουστικό σύστημα εντοπισμού. Επιλέξαμε την ανάπτυξη ενός συστήματος τοπολογίας 1-3, «μέσα-έξω», δηλαδή με ένα σταθερό ακίνητο πομπό και τρεις δέκτες

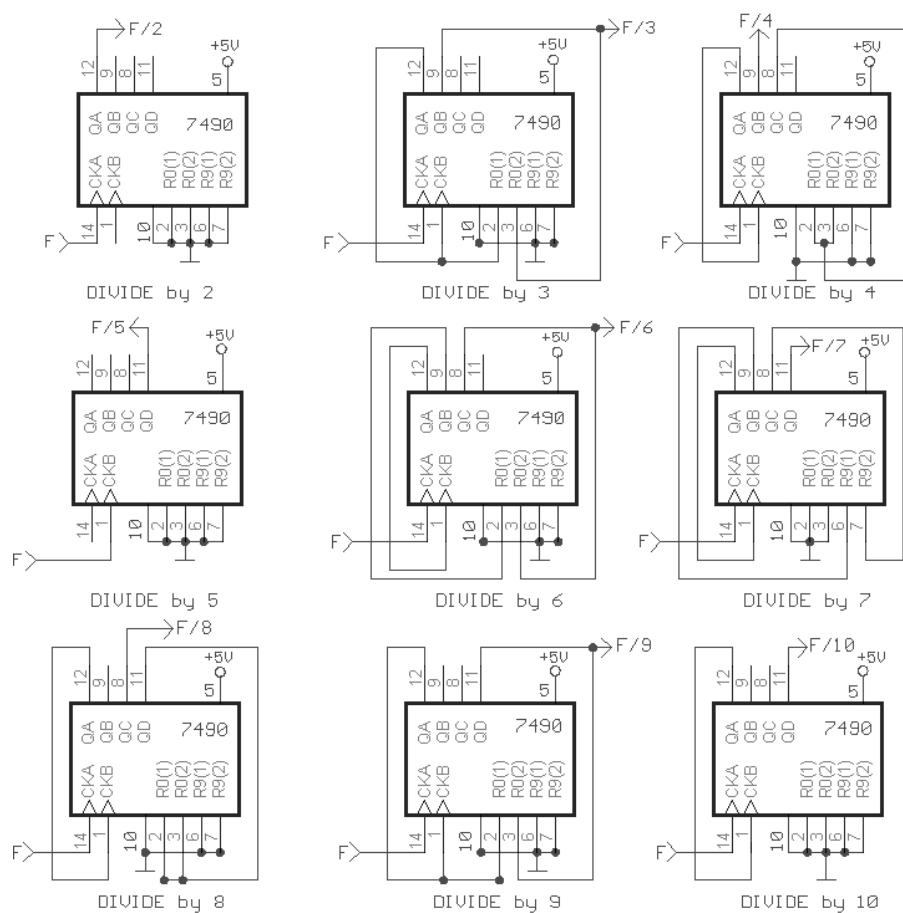
προσαρμοζόμενους στο στόχο. Το σύστημα σχεδιάστηκε με τρόπο ώστε να επιτρέπει την εύκολη επέκτασή του σε τοπολογία 3-3, δηλαδή τη μετατροπή του σε σύστημα έξι (6) βαθμών ελευθερίας. Χαρακτηριστικό της κατασκευής αποτελεί η χρήση κοινού ταλαντωτή για την παραγωγή των τριών συχνοτήτων εκπομπής, επιτρέποντας έτσι τον εύκολο συγχρονισμό τους. Η δημιουργία των εκπεμπόμενων κυματομορφών υλοποιείται με τη χρήση κατάλληλων κυκλωμάτων χρονισμού, ρυθμιζόμενων κατάλληλα ώστε να προσδίδουν τα προδιαγραφόμενα χαρακτηριστικά. Επίσης αξιοποιείται το μικρό εύρος ζώνης των πομποδεκτών για τη χρήση τους ως φίλτρα (και κατ'επέκταση τη χρήση εύκολα υλοποιήσιμων τετραγωνικών παλμών στο αρχικό τμήμα της αλυσίδας του πομπού).

Η επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους, τα αποτελέσματα των οποίων θα αναλυθούν πειραματικά στο ακόλουθο κεφάλαιο. Η μέθοδος της ανίχνευσης πρώτης άφιξης είναι σαφέστατα πιο εύκολα υλοποιήσιμη, αλλά αναμένεται να δώσει αποτελέσματα ακριβείας που φθίνει με την αύξηση της απόστασης. Για τη μέθοδο του κεντροειδούς εντοπισμού προτείνεται η κατάλληλη επιλογή των σημείων δειγματοληψίας και ακολούθως γραμμικής παρεμβολής στην περιβάλλουσα του ληφθέντος σήματος. Αυτή η λύση που επιτρέπει υψηλή ακρίβεια και γρήγορη απόκριση. Οι δύο αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν, αναλύθηκαν σε θεωρητικό επίπεδο. Επιπρόσθετα, αναφέρθηκαν η τεχνική εύρεσης μέγιστου και εξηγείται το βασικό μειονέκτημά της σε σχέση με τις εξεταζόμενες μεθόδους.

Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύθηκε η σημασία επιλογής στάθμης κατωφλίου. Ο συγγραφέας προτείνει την εφαρμογή της μεθόδου Σταθερού Ρυθμού Εσφαλμένων Συναγερμών, δειγματοληπώντας τη μέση τετραγωνική τιμή του θορύβου στο κανάλι της λήψης για ένα συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο μετά την εκπομπή του παλμού. Έτσι το κατώφλι μπορεί να τεθεί αρκετά χαμηλότερα ανά σάρωση του σήματος, επιτρέποντας τη λειτουργία σε διαφορετικές συνθήκες θορύβου και σε μεγαλύτερη εμβέλεια. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος πιθανόν να οδηγήσει σε μείωση της πιθανότητας ανίχνευσης στην περιοχή λειτουργίας, κάτι το οποίο θα εξεταστεί πειραματικά στο επόμενο κεφάλαιο. Αναλύθηκε η επίδραση της πολυδιαδρομικής διάδοσης σε θεωρητικό επίπεδο για διάφορες μεθόδους εντοπισμού ή τρόπους επιλογής κατωφλίων και προτάθηκαν τρόποι για την αντιμετώπισή της. Αυτοί θα χρησιμοποιηθούν στις μετρήσεις του επόμενου κεφαλαίου.

Τέλος, μέσα από μια σειρά λειτουργικών δοκιμών διαπιστώθηκαν μια σειρά προβλημάτων σχεδιασμού και δόθηκαν λύσεις μέσα από τον επανασχεδιασμό του δέκτη του συστήματος. Οι τρεις δέκτες απομακρύνθηκαν για την καλύτερη απομόνωσή τους, ενώ χρησιμοποιήθηκαν ομοαξονικά καλώδια για την προστασία των κυκλωμάτων από εξωτερικές πηγές θορύβου.

Παράρτημα 3.1 – Δυνατές συνδεσμολογίες του 74LS90



Εικόνα 91: Συνδεσμολογίες του 74LS90 ως διαιρέτη συχνότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

IV. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ, ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκαν οι διαφορετικοί αλγόριθμοι τριμεροποίησης που θα χρησιμοποιηθούν στο σύστημά μας. Επιπλέον, αναλύθηκε η διαδικασία υλοποίησης του συστήματος και αναφέρθηκαν οι προδιαγραφές του και τα αναμενόμενα αποτελέσματα της λειτουργίας του. Τέλος, αναφέρθηκαν οι διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων με σκοπό την εξαγωγή της απόστασης μεταξύ του πομπού και του εκάστοτε δέκτη.

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται τα πειράματα που έγιναν για τον έλεγχο λειτουργίας του συστήματος και αναλύονται τα αποτελέσματα. Τα πειράματα που έγιναν χωρίζονται σε διαδοχικές φάσεις. Η πρώτη σειρά πειραμάτων αφορά στον χαρακτηρισμό της ακρίβειας μετρήσεων μεταξύ του πομπού και του εκάστοτε δέκτη. Οι μετρήσεις έγιναν με το στόχο ακίνητο μελετώντας, εκτός των άλλων, και την εμβέλεια του συστήματος. Με επεξεργασία των μετρήσεων έγινε σύγκριση μεταξύ των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού απόστασης και των διαφόρων τρόπων επιλογής κατωφλίου.

Στη συνέχεια υλοποιήθηκαν σε υπολογιστικό περιβάλλον οι διάφοροι αλγόριθμοι τριμεροποίησης και ελέγχθηκαν με τεχνητά δεδομένα ως προς την ακρίβεια, την ταχύτητα απόκρισης και τη σύγκλιση. Μέσα από τη διαδικασία αυτή βελτιώθηκαν οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από τα προηγούμενα πειράματα, προχωρήσαμε σε μία ακόμα σειρά μετρήσεων με χρήση κινούμενου και ακίνητου στόχου, εφαρμόζοντας τις τελικά προτεινόμενες μεθόδους εντοπισμού και τριμεροποίησης. Μέσα από αυτή τη σειρά των μετρήσεων προέκυψαν συμπεράσματα ως προς τη βέλτιστη χρήση των αλγορίθμων και των μεθόδων εντοπισμού. Το σύστημα ελέγχθηκε ως προς την απόκριση του σε διάφορα είδη κινήσεων.

4.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΠΟΜΠΟΥ-ΔΕΚΤΗ

4.1.1 Σκοπός του πειράματος

Σε αυτή τη σειρά των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ο βελτιωμένος πομποδέκτης που προέκυψε μετά από τις προμετρήσεις που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όπως αναφέρθηκε, η ακρίβεια του συστήματος αναμένεται να μεταβάλλεται καθώς απομακρύνεται ο πομπός από το δέκτη. Πιο συγκεκριμένα η μεταβολή της ακρίβειας εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη μέθοδο εντοπισμού. Όπως αναλύθηκε, στο δεύτερο κεφάλαιο, με χρήση της μεθόδου

της πρώτης άφιξης η ακρίβεια αναμένεται να μειώνεται περίπου αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης (αν το κατώφλι τεθεί για την ισχύ του ληφθέντος σήματος). Με χρήση της μεθόδου κεντροειδούς εντοπισμού δεν αναμένεται η ακρίβεια (για διαφορετικές αποστάσεις) να επηρεάζεται από την εξασθένηση του κύματος, αλλά από το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Αυτή η μεταβολή δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί εύκολα, μια και εξαρτάται από την θέση των πιθανών ανακλαστήρων. Οι μετρήσεις αυτές θα βοηθήσουν στη διόρθωση της τελικής εκτίμησης, δηλαδή στην εύρεση κατάλληλων χαρακτηριστικών εξισώσεων που θα χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση των σφαλμάτων εκτίμησης του συστήματος. Μέρους αυτών των μετρήσεων θα πρέπει να επαναλαμβάνονται πριν την έναρξη λειτουργίας του συστήματος (σε ασφαλώς μικρότερη κλίμακα) για τη βαθμονόμηση του συστήματος, μια και κάθε περιβάλλον θα επιδρά διαφορετικά στις χαρακτηριστικές εξισώσεις. Επομένως, σκοπός των πειραμάτων είναι:

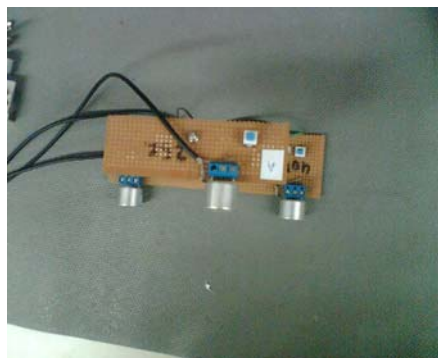
- Ο καθορισμός των χαρακτηριστικών εξισώσεων διόρθωσης εκτιμώμενων αποστάσεων.
- Ο συγκριτικός έλεγχος των μεθόδων κεντροειδούς εντοπισμού και ανίχνευσης εντοπισμού πρώτης άφιξης.
- Η δοκιμή σταθερής και μεταβαλλόμενης τιμής κατωφλίου με διάφορους τρόπους προσδιορισμού.
- Η καταγραφή της περιοχής εμβέλειας του συστήματος.

4.1.2 Διαδικασία πειράματος

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δύο ξύλινες δοκοί μήκους περίπου τριών μέτρων η καθεμιά. Η μία χρησιμοποιήθηκε για τις οριζόντιες μετατοπίσεις του συστήματος των δεικτών (στην γωνία 0° του χαρακτηριστικού διαγράμματος του πομπού) και σ' αυτήν σχηματίστηκαν υποδοχές στις οποίες στερεωνόταν το σύστημα των δεικτών με κοχλίες. Οι υποδοχές σχηματίστηκαν με βήμα 10cm και στην πρώτη υποδοχή στερεώθηκε ο πομπός. Η δεύτερη δοκός κόπηκε στα δύο και κάθε μέρος της προσαρμολόζοταν με κοχλίες σε υποδοχές στην κατακόρυφη πλευρά της πρώτης δοκού σχηματίζοντας σχήμα σταυρού και κάνοντας τις δύο δοκούς σχεδόν συνεπίπεδες (προφανώς λόγω των ατελειών στην κοπή του ξύλου και της μη πλήρους ευθειγράμμισής τους οι δοκοί δεν ήταν εντελώς συνεπίπεδοι). Η δεύτερη δοκός χρησιμοποιήθηκε για κατακόρυφες μετατοπίσεις του συστήματος των δεικτών με υποδοχές όμοιες της πρώτης.

Το σύστημα των δεικτών προσαρμόστηκε σε μία σταθερή βάση, σχηματίζοντας ισόπλευρο τρίγωνο μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων πλευράς 12cm. Το τρίγωνο αυτό είχε ως αποτέλεσμα η σχετική απόσταση μεταξύ πομπού και εκάστοτε δέκτη να μη βρίσκεται με ακρίβεια από τη βαθμονόμηση των δοκών μια και κάθε δέκτης απείχε κάποια εκατοστά από την υποδοχή. Δύο είναι οι τρόποι καταγραφής της πραγματικής απόστασης: ο υπολογισμός της από τριγωνομετρικές σχέσεις και η μέτρηση της πριν από κάθε περίοδο μετρήσεων. Προτιμήθηκε η δεύτερη μέθοδος αν και σε αποστάσεις μεγαλύτερες του 1,5 μέτρων πιθανώς εισάγονται σφάλματα καθώς ο κάθε δέκτης δεν είναι σημειακός και η κάθε μέτρηση εμπεριέχει ένα σφάλμα που οφείλεται

στις διαστάσεις του δέκτη. Όπου κρίνεται αναγκαίο, γίνεται αντιπαραβολή με τις αποστάσεις που προκύπτουν από τριγωνομετρικό υπολογισμό.



Εικόνα 92: Πρόσοψη συστήματος δεκτών

Εικόνα 93: Κάτοψη Συστήματος δεκτών

Για το πείραμα ο πομπός παρέμενε σε σταθερό σημείο και το σύστημα δεκτών σταθεροποιούνταν σε διάφορες υποδοχές των δοκών. Δηλαδή, ουσιαστικά προσομοιώσαμε μια διάσταση «μέσα-έξω». Οι μετρήσεις καταγράφηκαν με χρήση του παλμογράφου Agilent 54621A. Οι μετρήσεις σε κάθε θέση έγιναν με τους πομποδέκτες και των τριών συχνοτήτων με σκοπό τον χαρακτηρισμό όλων των διαθέσιμων πομποδεκτών. Για την τοπολογία 1-3 μία θα είναι η χρησιμοποιούμενη συχνότητα, αλλά για πιθανή επέκταση του συστήματος και οι τρεις συχνότητες θα είναι απαραίτητες. Τέλος, σε κάθε μέτρηση υπήρχε καταγραφή της θερμοκρασίας του δωματίου για τον ακριβή υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του ήχου. Η μέτρηση της θερμοκρασίας έγινε με χρήση ψηφιακού θερμόμετρου με ακρίβεια $0,1^{\circ}\text{C}$.

Η σειρά αυτή των μετρήσεων έγινε σε δύο διακριτές φάσεις. Ο λόγος ήταν οι σταδιακές μικροβελτιώσεις στον ενισχυτή (χαμηλού θορύβου) της αλυσίδας του κάθε δέκτη και σε κάποιες αστοχίες υλικών που σημειώθηκαν. Μια και οι μετρήσεις είναι σημαντικές για τη βαθμονόμηση του συστήματος, αποφασίστηκε (όσο επίπονο και αν ήταν αυτό σε διάρκεια χρόνου) να γίνονται κάθε φορά από μηδενικής βάσης. Οι μετρήσεις που έγιναν σε κάθε φάση είναι:

- 1η φάση: μετρήσεις οριζόντιας μετατόπισης και για τις τρεις συχνότητες
- 2η φάση: μετρήσεις οριζόντιας και κατακόρυφης μετατόπισης και για τις τρεις συχνότητες

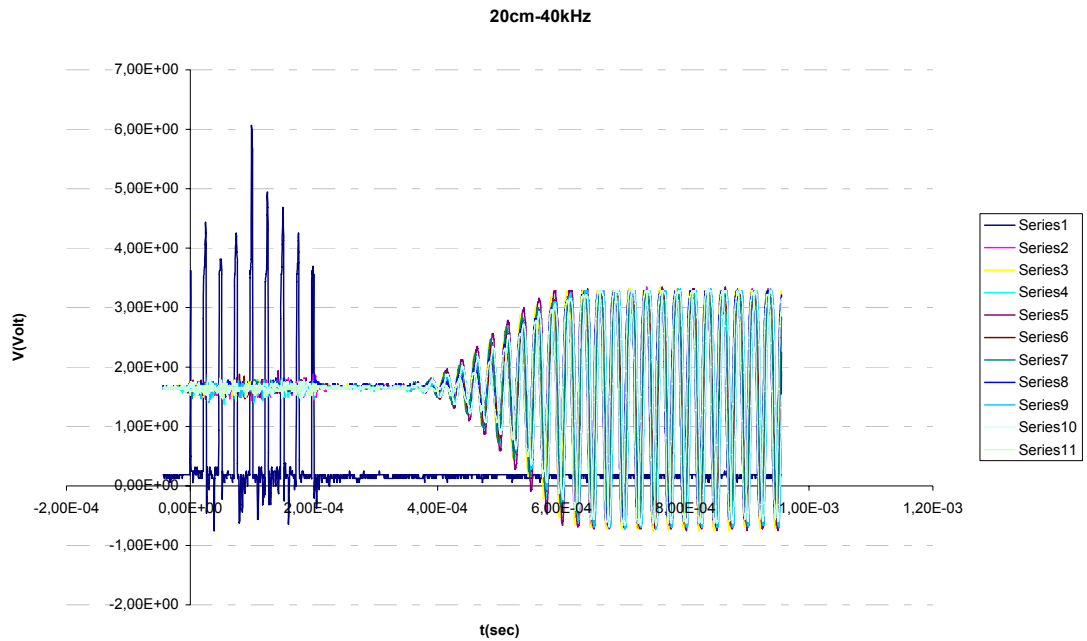
Πιο κάτω αναλύονται οι μετρήσεις και για τις δύο φάσεις και τα αποτελέσματα με τις διαφορετικές μεθόδους εντοπισμού.

4.1.3 Πρώτη φάση μετρήσεων

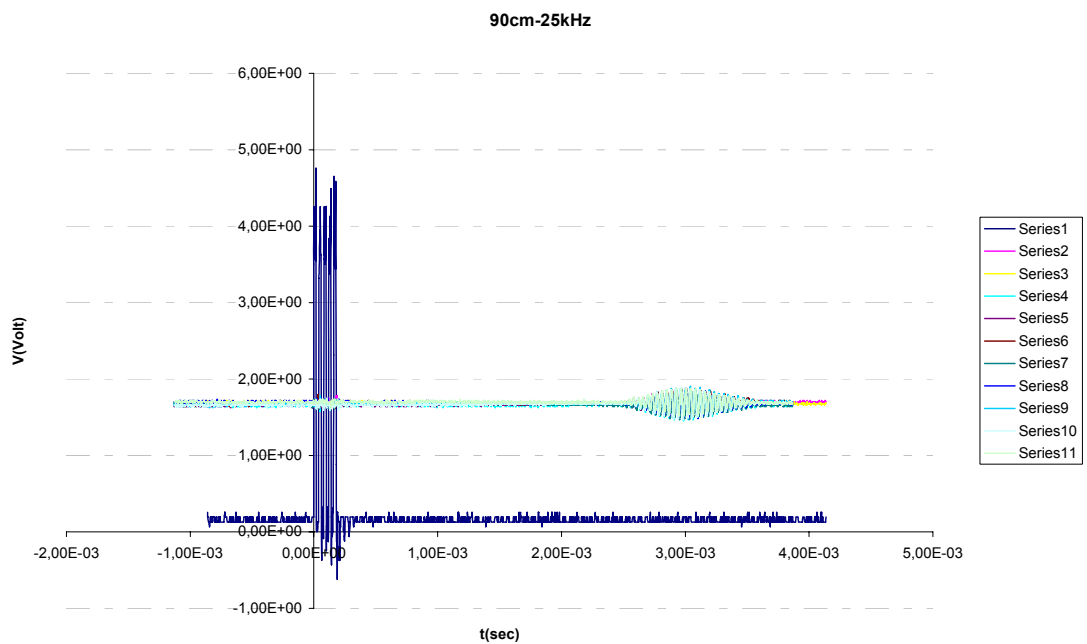
Η πρώτη φάση περιλάμβανε μετρήσεις οριζόντιας μόνο μετατόπισης. Ο λόγος ήταν πως ήταν η πρώτη φορά που το σύστημα θα θέτονταν σε λειτουργία. Έτσι, θέλαμε να αναλύσουμε πρώτα τις μετρήσεις ώστε να δούμε την εύρωστη λειτουργία του συστήματος. Ταυτόχρονα θέλαμε πριν προχωρήσουμε σε μία παραπέρα ανάλυση, να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία των αλγορίθμων εντοπισμού.

Για κάθε θέση μετρήσεων λαμβάνονταν δέκα (10) επαναλαμβανόμενες μετρήσεις για να εξάγουμε τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων με μεγαλύτερη ασφάλεια. Η δειγματοληψία ήταν για τις περισσότερες μετρήσεις 2000 σημεία ανά 10ms, δηλαδή 200kHz. Οι μετρήσεις ελήφθησαν για αποστάσεις μεταξύ των υποδοχών $D=n \cdot D_{step}$, όπου $D_{step}=10\text{cm}$ και $n=1,2,\dots,27$.

Δειγματοληπτικές γραφικές παρατηρήσεις των μετρήσεων που πήραμε στον παλμογράφο φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα:



Εικόνα 94: Αηφθέν σήμα για $d=30\text{cm}$, $f=25\text{kHz}$



Εικόνα 95: Αηφθέν σήμα για $d=90\text{cm}$, $f=25\text{kHz}$

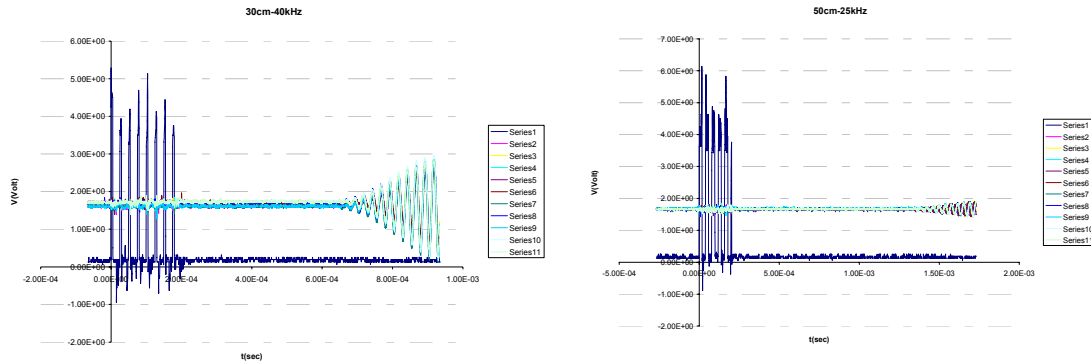
Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τόσο η μέθοδος του εντοπισμού πρώτης άφιξης, όσο και του κεντροειδούς εντοπισμού. Για την κάθε μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές κατωφλίου. Στην περίπτωση εφαρμογής σταθερού κατωφλίου διεξήγαμε αρχικά μετρήσεις θορύβου προ των μετρήσεων απόστασης και θέταμε το κατώφλι σε τιμή που να υπερτερούσε αρχειά του επιπέδου θορύβου. Και στις δύο μεθόδους εντοπισμού εφαρμόστηκε αρχικά κατώφλι τάσης του σήματος. Στη μέθοδο κεντροειδούς εντοπισμού εφαρμόστηκαν και κατώφλια ισχύος, τετραγωνίζοντας τις δειγματοληπτούμενες τιμές προ του σχηματισμού της περιβάλλουσας. Η χρήση κατωφλίων ισχύος δοκιμάστηκε στον κεντροειδή εντοπισμό για τον ακριβέστερο σχηματισμό της περιβάλλουσας ισχύος, αποφεύγοντας λάθη που θα προέκυπταν από τοπικά ελάχιστα. Οι τιμές κατωφλίου τάσης που δοκιμάστηκαν για τη μέθοδο εντοπισμού πρώτης άφιξης είναι:

- Σταθερό επίπεδο κατωφλίου: 150mV, δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 150mV$
- Μεταβλητό επίπεδο κατωφλίου:
 - $5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 14db
 - $2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$, δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 8db

Αντίστοιχα οι τιμές κατωφλίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέθοδο του κεντροειδούς εντοπισμού είναι:

- Σταθερό επίπεδο κατωφλίου:
 - 150mV, δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 150mV$
 - 22,5mW για την ισχύ του σήματος δηλαδή $P_{thres2} = P_{thres3} = P_{ref} + 22,5mW$
- Μεταβλητό επίπεδο κατωφλίου:
 - Για τιμές τάσης εισόδου:
 - $2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$, δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{thres3} = V_{ref} + 2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 8db
 - $5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{thres3} = V_{ref} + 5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 14db
 - Για τιμές ισχύος εισόδου:
 - $5 \cdot P_{noise}^{RMS}$, δηλαδή τάση κατωφλίου $P_{thres2} = P_{thres3} = P_{ref} + 5 \cdot P_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 7db
 - $25 \cdot P_{noise}^{RMS}$ δηλαδή τάση κατωφλίου $P_{thres2} = P_{thres3} = P_{ref} + 25 \cdot P_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 14db

Πρέπει να τονιστεί πως σε αυτήν την πρώτη σειρά μετρήσεων έγιναν κάποια λάθη σε λίγες από τις μετρήσεις. Προς απόκτηση μεγαλύτερης ανάλυσης σε μερικές από τις μετρήσεις μικρώναμε το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας διατηρώντας την ίδια συχνότητα δειγματοληψίας. Αποτέλεσμα ήταν σε μερικές μετρήσεις είτε να μην περιληφθεί η χρονική στιγμή ανόδου του κατωφλίου, είτε η χρονική στιγμή καθόδου (για την περίπτωση κεντροειδούς εντοπισμού). Οι μετρήσεις αυτές εντοπίστηκαν εκ των υστέρων και απορρίφθηκαν από την επεξεργασία.

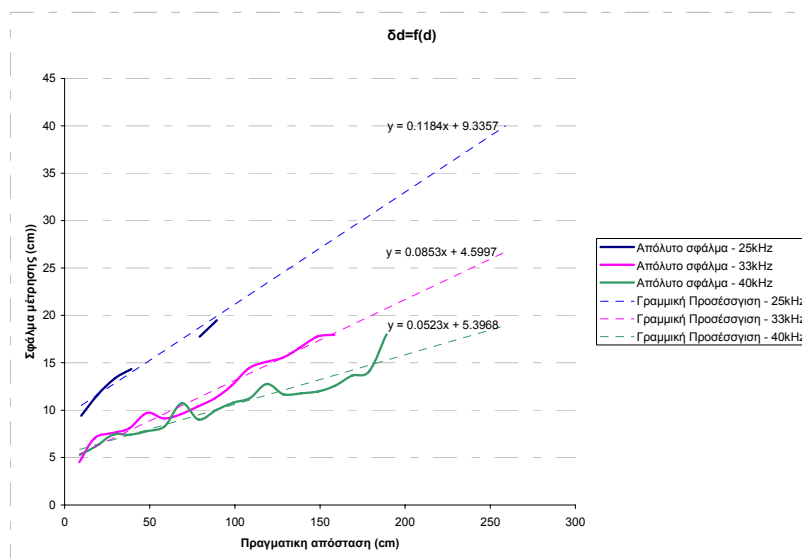


Εικόνα 96: Παραδείγματα εσφαλμένων μετρήσεων

Για κάθε απόσταση υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μετρούμενων (με τις διαφορετικές μεθόδους εντοπισμού) χρόνων διαδρομής των δέκα (10) μετρήσεων που ελήφθησαν και υπολογίστηκε η εκάστοτε μετρούμενη απόσταση. Στη συνέχεια αυτή συγκρίθηκε με την πραγματική απόσταση, έτσι όπως αυτή μετρήθηκε σε κάθε σειρά μετρήσεων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις ακόλουθες γραφικές.

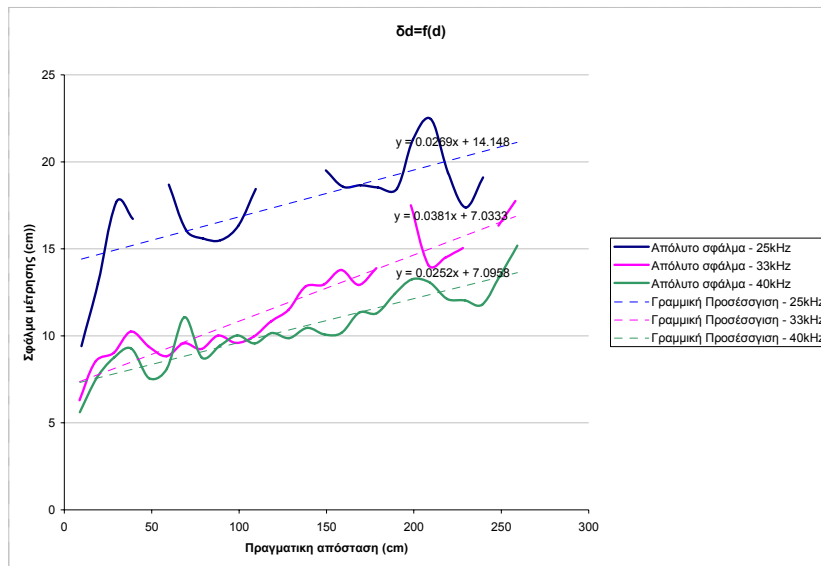
Μέθοδος ανίχνευσης πρώτης άφιξης

- Τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 150mV$



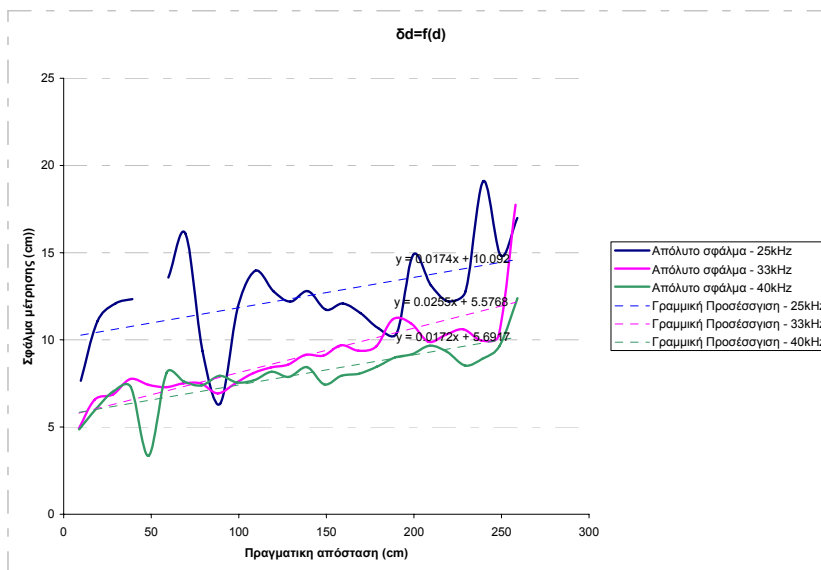
Εικόνα 97: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 1^{ης} μεθόδου με σταθερή τιμή κατωφλίου (1^η φάση)

- Τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 5 \cdot V_{noise}^{RMS}$



Εικόνα 98: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 1ης μεθόδου με μεταβλητή τιμή (α) κατωφλίου (1η φάση)

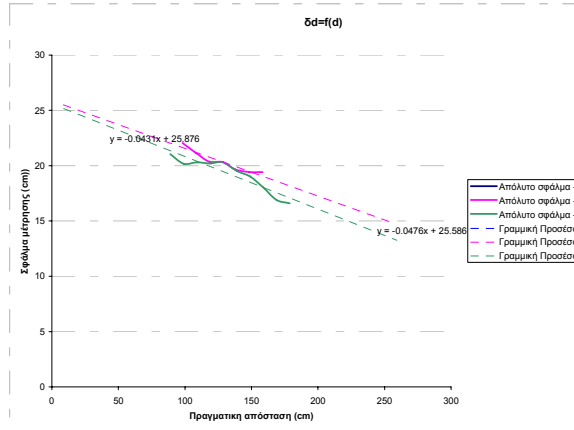
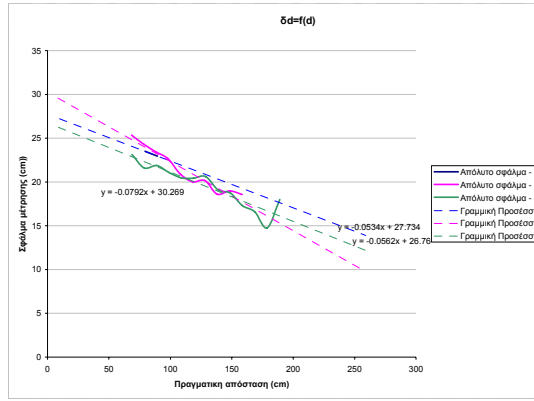
- Τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$



Εικόνα 99: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 1ης μεθόδου με μεταβλητή τιμή (β) κατωφλίου (1η φάση)

Μέθοδος κεντροειδούς εντοπισμού

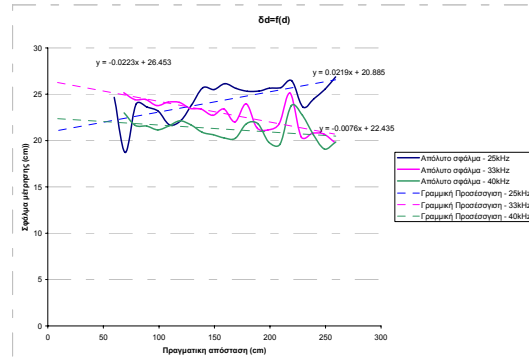
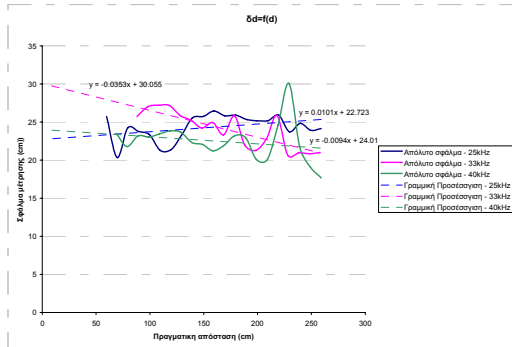
- Τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 150mV$ και $P_{thres2} = P_{thres3} = P_{ref} + 22,5mW$



Εικόνα 100: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 2ης μεθόδου με σταθερή τιμή κατωφλίου (1η φάση)

Εικόνα 101: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 2ης μεθόδου με σταθερή τιμή κατωφλίου ισχύος (1η φάση)

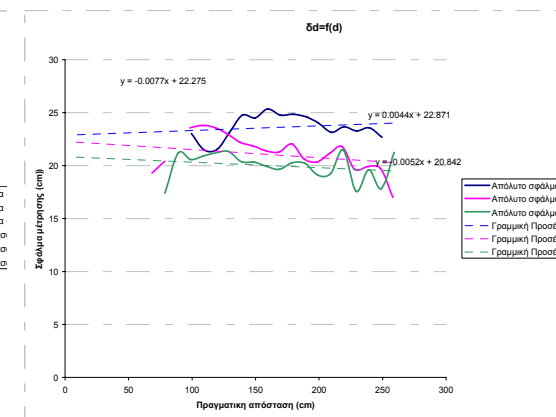
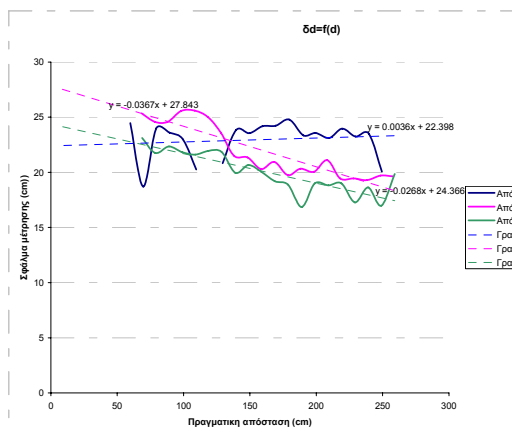
- Τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ και $P_{thres2} = P_{thres3} = P_{ref} + 5 \cdot P_{noise}^{RMS}$



Εικόνα 102: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 2ης μεθόδου με μεταβλητή τιμή (α) κατωφλίου (1η φάση)

Εικόνα 103: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 2ης μεθόδου με μεταβλητή τιμή (α) κατωφλίου ισχύος (1η φάση)

- Τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ και $P_{thres2} = P_{thres3} = P_{ref} + 25 \cdot P_{noise}^{RMS}$

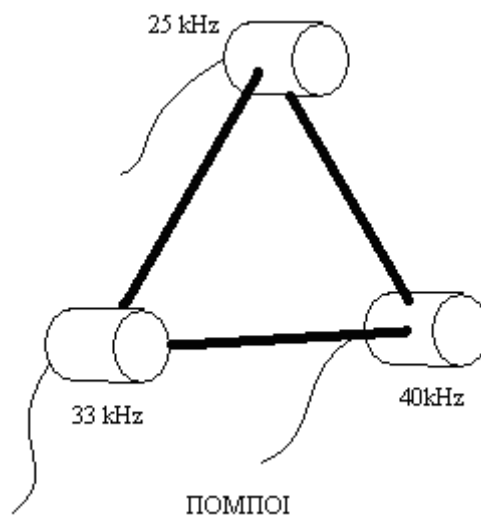


Εικόνα 104: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 2ης μεθόδου με μεταβλητή τιμή (β) κατωφλίου (1η φάση)

Εικόνα 105: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 2ης μεθόδου με μεταβλητή τιμή (β) κατωφλίου ισχύος (1η φάση)

Συμπεράσματα

Αν και τα αποτελέσματα εμπεριέχουν προβλήματα ως προς την ανάγνωσή τους λόγω των λαθών στην καταγραφή του σήματος, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, εντούτοις προσφέρονται για μία πρώτη καταγραφή συμπερασμάτων. Σε όλες τις γραφικές με τις συνεχόμενες γραμμές καταγράφεται η μεταβολή του μέσου σφάλματος εκτίμησης για την απόσταση πομπού και εκάστοτε δέκτη. Πρέπει να τονιστεί πως οι μετρήσεις γίνονταν ταυτόχρονα, το οποίο σημαίνει πως στην βάση του συστήματος των τριών δεκτών υπάρχουν οι δέκτες και των τριών συχνοτήτων. Η τοποθέτησή τους είναι όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



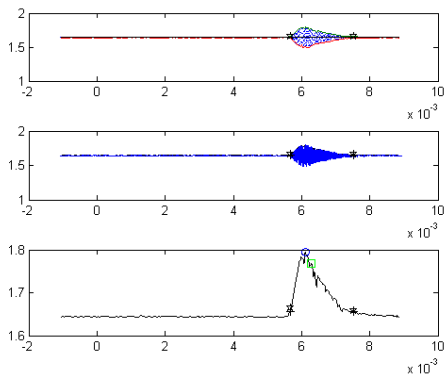
Εικόνα 106: Διάταξη συστήματος πομπών

Πρέπει να σημειωθεί πως η τοποθέτηση του δέκτη στο υψηλότερο εκ των τριών σημείων ($z \approx 10\text{cm}$) έγινε σε συνδυασμό με τοποθέτηση του στόχου σε ένα ύψος σχετικά μικρό ($z = 3\text{cm}$) και, με τους άλλους δύο δέκτες να είναι στο ίδιο επίπεδο ($z = 0$). Έτσι, ο δέκτης των 25kHz βλέπει το στόχο υπό γωνία ανύψωσης σχετικά σημαντική σε σχέση με τους άλλους δέκτες. Αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό για τις μικρές αποστάσεις μια και για πιο μακρινές η γωνία ανύψωσης με την οποία οι δέκτες βλέπουν το στόχο είναι παραπλήσιες. Αυτός είναι ο βασικός λόγος για τον οποίο οι γραφικές που αφορούν τα 25kHz για την μέθοδο της πρώτης άφιξης διαφοροποιούνται αισθητά από αυτές των άλλων δύο συχνοτήτων. Δηλαδή οι χαρακτηριστικές του μέσου σφάλματος εκτίμησης είναι χαρακτηριστικές της συχνότητας αλλά και της θέσης του κάθε δέκτη ως προς το σύστημα των δεκτών. Αυτό αφορά κυρίως την μέθοδο εντοπισμού πρώτης άφιξης.

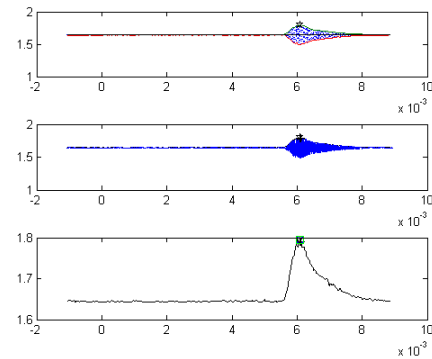
Πρώτο βασικό συμπέρασμα είναι η πρακτικά ίδια μέγιστη περιοχή λειτουργίας και των τριών δεκτών. Μία μικρή διαφοροποίηση παρατηρείται απλά στα 25kHz. Ο λόγος έχει να κάνει με τις χρησιμοποιούμενες αντιστάσεις στον ενισχυτή του δέκτη, οι οποίες ήταν ακριβείας 2%. Με μέτρηση βρέθηκε πως ο λόγος ενίσχυσης που προέκυπε για την αλυσίδα των 25kHz ήταν περίπου 5% μικρότερος από τους αντίστοιχους των άλλων συχνοτήτων. Με μεγαλύτερης ακριβείας αντιστάσεις η εμβέλεια και για τις τρεις συχνότητες αναμένεται πρακτικά ίδια.

Συγκρίνοντας τη μέθοδο πρώτης άφιξης με αυτή του κεντροειδούς εντοπισμού βλέπουμε τα αναμενόμενα. Δηλαδή στην πρώτη, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η ακρίβεια της εκτίμησης της απόστασης μεταβάλλεται γραμμικά με το αντίστροφο της απόστασης (τονίζουμε πως μιλάμε για κατώφλι τάσης και όχι ισχύος). Αντιθέτως, στη δεύτερη δεν ισχύει κάτι τέτοιο. Η μορφή της περιβάλλουσας παραμένει ως προς το σχήμα της σχετικά σταθερή και η μεταβολή του μέγιστου πλάτους του σήματος με την απόσταση δεν έχει ιδιαίτερη σημασία μια και η επιλογή της στιγμής άφιξης εξαρτάται απλά από το εμβαδό της περιβάλλουσας μεταξύ των τιμών κατωφλίου. Αυτό μεταβάλλεται (σχετικά) αναλογικά ως προς την απόσταση (ιδίως για όχι πολύ κοντινές αποστάσεις). Αποτέλεσμα είναι η χρονική στιγμή t για την οποία ισχύει $E_+ = E_-$ είναι χαρακτηριστική της απόστασης και άρα η ακρίβεια της εκτίμησης να είναι εν μέρει ανεξάρτητη της απόστασης.

Βέβαια, το τελευταίο συμπέρασμα δεν ισχύει, εντελώς, για σταθερή τιμή κατωφλίου στην περίπτωση κεντροειδούς εντοπισμού. Αντιθέτως παρατηρείται μία γραμμική μείωση του μέσου λάθους (αύξηση της ακρίβειας) με την αύξηση της απόστασης (ιδίως για μεγάλες τιμές αυτής). Επιλέγοντας μία σταθερή τιμή κατωφλίου, καθώς ο στόχος απομακρύνεται, το εμβαδό της περιβάλλουσας που μένει πλέον της τιμής του κατωφλίου περιλαμβάνει όλο και μικρότερη επίδραση από τις ανακλάσεις. Σε περίπτωση μεταβλητού κατωφλίου η επίδραση της περιβάλλουσας παραμένει ισόποση σχετικά, και για μεγαλύτερες τιμές της απόστασης, οπότε και το μέσο σφάλμα εντοπισμού παραμένει σταθερό (αν και μεγαλύτερο). Η οπτικοποίηση αυτού του φαινομένου φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες όπου η αριστερή είναι αποτέλεσμα μεταβλητού κατωφλίου και η δεξιά σταθερού.



Εικόνα 107: Επίδραση πολυδιαδρομικής διάδοσης σε σύστημα μεταβλητού κατωφλίου



Εικόνα 108: Επίδραση πολυδιαδρομικής διάδοσης σε σύστημα σταθερού κατωφλίου

Το ουσιαστικό αποτέλεσμα είναι η σημαντική αύξηση της εμβέλειας του συστήματος με χρήση μεταβλητού κατωφλίου. Η χρήση της τεχνικής CFAR επιτρέπει ουσιαστικά τον εντοπισμό στόχων σε μεγαλύτερη απόσταση. Αυτό, όπως είδαμε, έχει θεωρητικά κάποια επίπτωση στην πιθανότητα εντοπισμού. Επιλέγοντας την τιμή του k (βλ. Κεφ. 2 – $V_{thres2} = V_{ref} + k \cdot V_{noise}^{RMS}$) ίση με 2,5 πετυχαίνουμε σημαντικά υψηλά ποσοστά πιθανότητας εντοπισμού.

Όλες οι πιο πάνω γραφικές προσεγγίζονται από μία γραμμική συνάρτηση της μορφής $y=ax+b$, όπου y η τιμή του μέσου σφάλματος και x η οριζόντια μετατόπιση. Στη μέθοδο του εντοπισμού πρώτης άφιξης η κλίση a είναι χαρακτηριστική της εξασθένησης του σήματος σε σχέση με την απόσταση. Όπως αναλύθηκε στο 2^ο κεφάλαιο, η εξασθένηση καθορίζεται τόσο από τη συχνότητα, όσο και από τη σχετική υγρασία και άλλους παράγοντες. Επομένως είναι καλύτερο να υπολογίζεται πειραματικά (αν και, όπως παρατηρήθηκε στις μετρήσεις, οι πειραματικές τιμές είναι πολύ κοντά στις θεωρητικές τιμές του κεφαλαίου 2). Για τη μέθοδο του κεντροειδούς εντοπισμού η κλίση a αποτελεί ένα μέτρο για το λόγο του εμβαδού της περιβάλλουσας που βρίσκεται πάνω από το κατώφλι ως προς την απόσταση. Στην περίπτωση σταθερού κατωφλίου ο λόγος αυτός μικραίνει (για την ίδια περιοχή λειτουργίας), ελαχιστοποιώντας το ποσοστό της επίδρασης της πολυδιαδρομικής διάδοσης, ενώ με μεταβλητό κατώφλι παραμένει σχετικά σταθερός. Το b για όλες τις περιπτώσεις αποτελεί μέτρο του χρονικού διαστήματος R_d (βλ. Κεφ. 1) μεταξύ της άφιξης του σήματος στο κατώφλι και της στιγμής εντοπισμού του. Ο χρόνος αυτός είναι ιδιαίτερα σημαντικός ως προς τον υπολογισμό της 1^{ης} ζώνης Fresnel. Προφανώς (και όπως φαίνεται από την Εικόνα 11) μεγαλύτερο R_d σημαίνει πως είναι μεγαλύτερη η πρώτη ζώνη Fresnel και επομένως το σύστημα θα υποφέρει από μεγαλύτερες επιδράσεις των ανακλάσεων. Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα, οι τιμές του b για τον κεντροειδή εντοπισμό είναι της τάξης των 22-28cm¹, ενώ για τον εντοπισμό πρώτης άφιξης η αντίστοιχη περιοχή τιμών είναι 5-10 περίπου.

Τέλος η διαφορά μεταξύ της χρησιμοποίησης κατωφλίου τάσης ή ισχύος στη μέθοδο κεντροειδούς εντοπισμού έχει να κάνει με μία περαιτέρω σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων όταν χρησιμοποιείται κατώφλι ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί πιθανά τοπικά ελάχιστα που μπορούν να παρατηρηθούν και να οδηγήσουν σε εσφαλμένο εντοπισμό αποφεύγονται με την τετραγώνιση του σήματος.

Δεν στεκόμαστε παραπάνω στην ανάλυση των γραμμικών προσεγγίσεων μια και λόγω των ελλιών μετρήσεων, η πρώτη φάση πειραμάτων έχει ποιοτική και όχι ποσοτική αξία (εξού και οι γραφικές δίνονται σε μικρά σχήματα μια και σκοπός είναι ο αναγνώστης να αποκτήσει εποπτική επισκόπηση του φαινομένου).

4.1.4 Δεύτερη φάση μετρήσεων

Στην δεύτερη σειρά των πειραμάτων έγιναν μετρήσεις τόσο οριζόντιας όσο και κατακόρυφης απόστασης. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο μέθοδοι εντοπισμού με διάφορες τιμές κατωφλίου. Οι τιμές κατωφλίου που δοκιμάστηκαν για τη μέθοδο εντοπισμού πρώτης άφιξης, τόσο για οριζόντιες όσο και για κατακόρυφες μετατοπίσεις, είναι (τονίζουμε πως ο

¹ Για τη μέθοδο του κεντροειδούς το R_d δίνεται πιο σωστά από την απόσταση που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα t_e-t_s , όπου t_e, t_s οι χρονικές στιγμές που η περιβάλλουσα κατέρχεται και ανέρχεται, αντίστοιχα, του κατωφλίου

καθορισμός της σταθερής απόστασης κατωφλίου ορίζεται με μετρήσεις προ της αρχής των μετρήσεων):

- Σταθερό επίπεδο κατωφλίου:
 - 100mV, δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 100mV$
 - 150mV, δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 150mV$
- Μεταβλητό επίπεδο κατωφλίου:
 - $5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 14db
 - $2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$, δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 8db

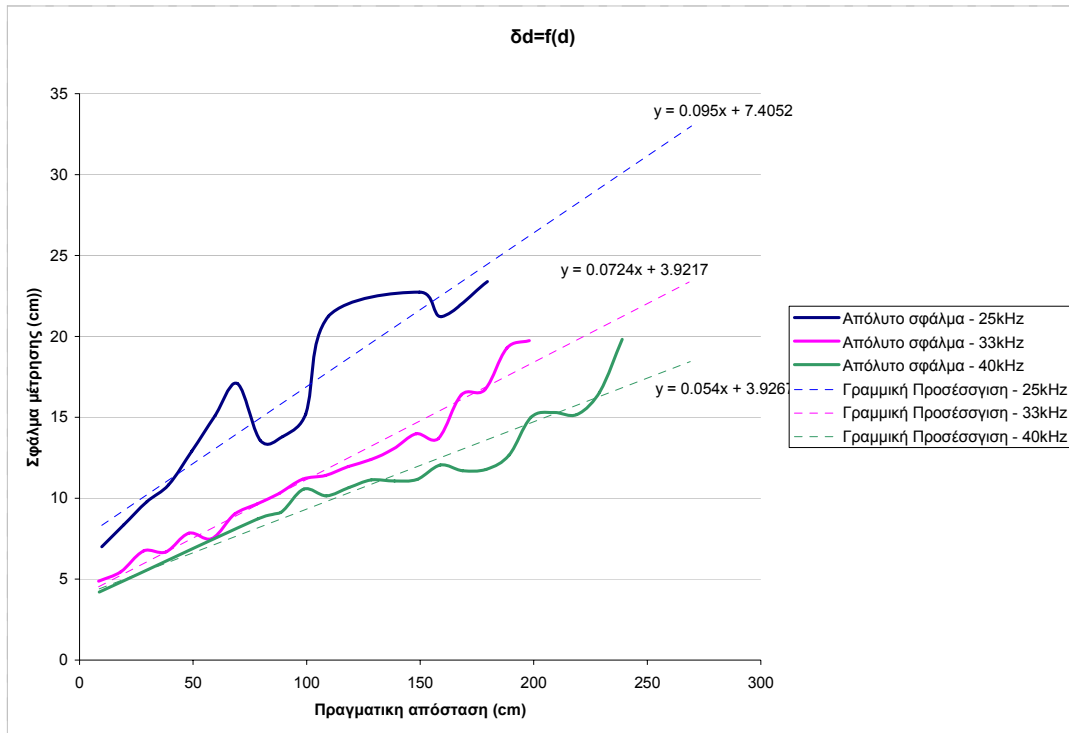
Αντίστοιχα οι τιμές κατωφλίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέθοδο του κεντροειδούς εντοπισμού είναι:

- Σταθερό επίπεδο κατωφλίου:
 - 100mV, δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 100mV$
 - 150mV, δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 150mV$
 - 10mW για την ισχύ του σήματος δηλαδή $P_{thres2} = P_{thres3} = P_{ref} + 10mW$
 - 22,5mW για την ισχύ του σήματος δηλαδή $P_{thres2} = P_{thres3} = P_{ref} + 22,5mW$
- Μεταβλητό επίπεδο κατωφλίου:
 - Για τιμές τάσης εισόδου:
 - $2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$, δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{thres3} = V_{ref} + 2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 8db
 - $5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ δηλαδή τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{thres3} = V_{ref} + 5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 14db
 - Για τιμές ισχύος εισόδου:
 - $5 \cdot P_{noise}^{RMS}$, δηλαδή τάση κατωφλίου $P_{thres2} = P_{thres3} = P_{ref} + 5 \cdot P_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 7db
 - $25 \cdot P_{noise}^{RMS}$ δηλαδή τάση κατωφλίου $P_{thres2} = P_{thres3} = P_{ref} + 25 \cdot P_{noise}^{RMS}$ και περιθώριο ισχύος θορύβου περίπου 14db

Μέθοδος ανίχνευσης πρώτης άφιξης

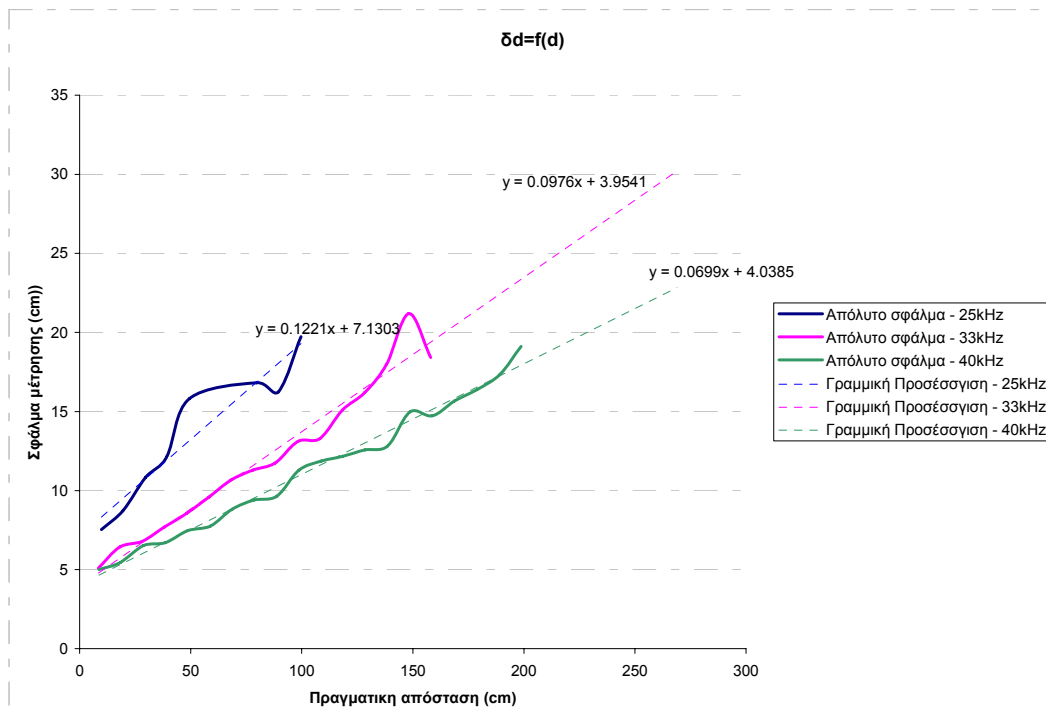
Οι χαρακτηριστικές καμπύλες της μεταβολής του μέσου σφάλματος υπολογισμού απόστασης ως προς αυτή, για διάφορες τιμές κατωφλίου, δίνονται ακολούθως.

- Τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 100mV$



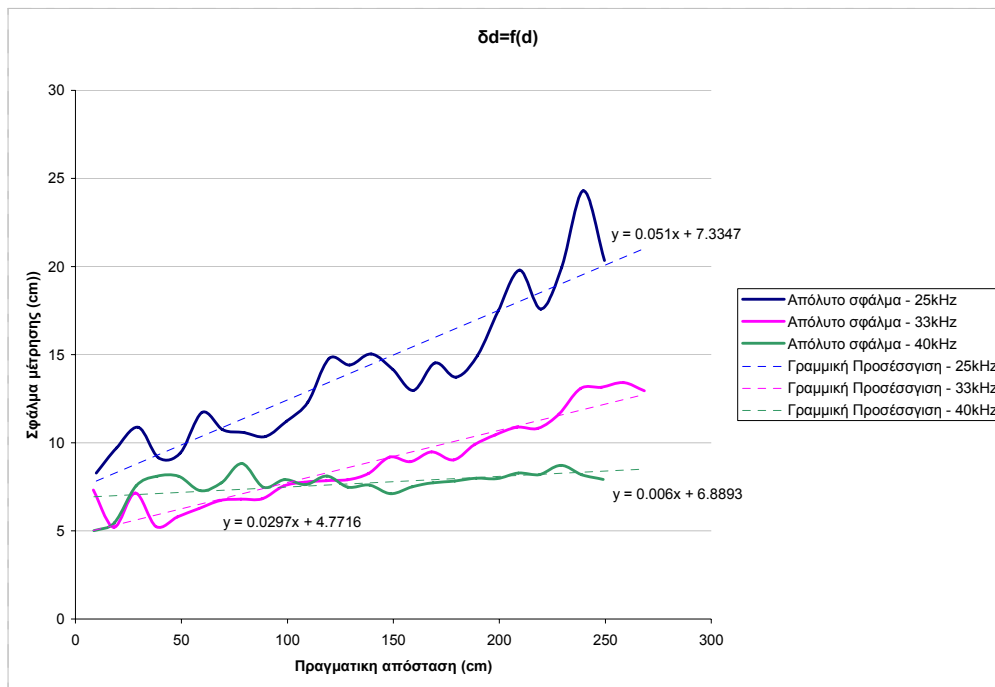
Εικόνα 109: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 1^{ης} μεθόδου με σταθερή τιμή (α) κατωφλίου (2^η φάση)

- Τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 150mV$



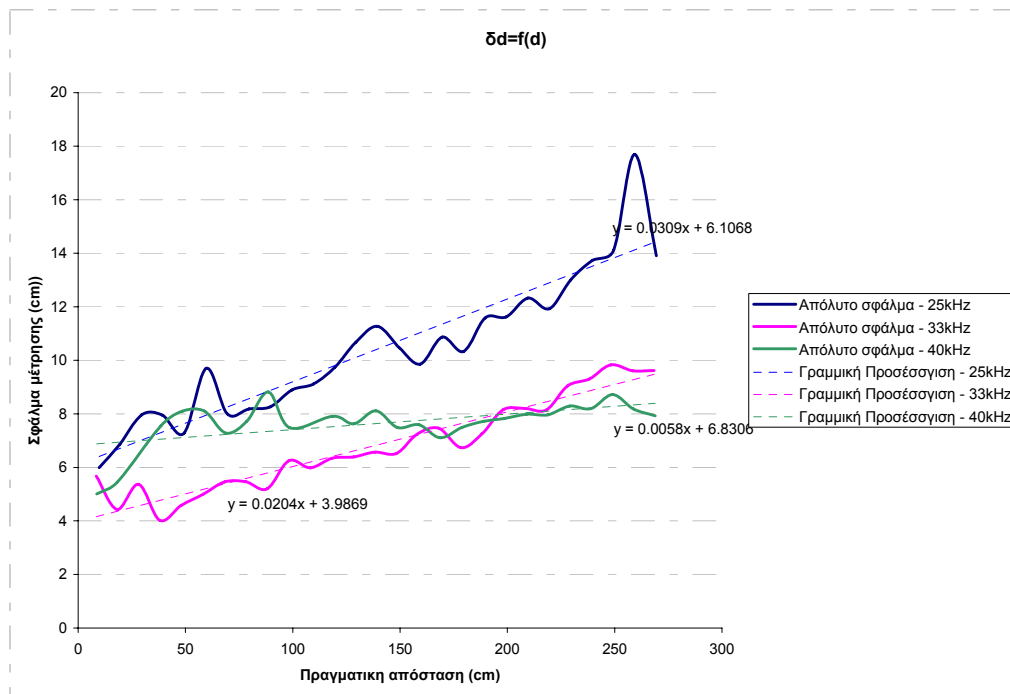
Εικόνα 110: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 1^{ης} μεθόδου με σταθερή τιμή (β) κατωφλίου (2^η φάση)

- Τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 5 \cdot V_{noise}^{RMS}$



Εικόνα 111: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 1^{ης} μεθόδου με μεταβλητή τιμή (α) κατωφλίου (2^η φάση)

- Τάση κατωφλίου $V_{thres2} = V_{ref} + 2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$



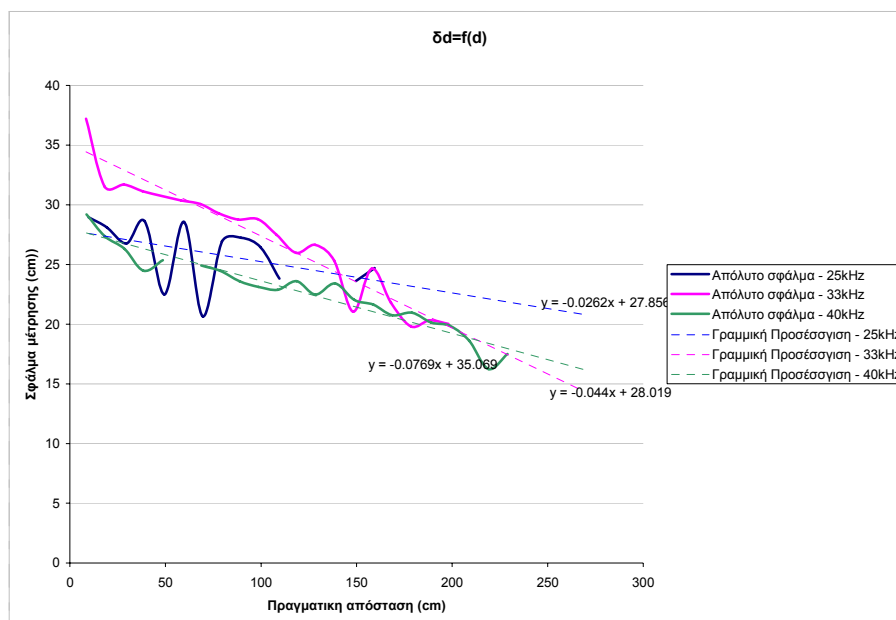
Εικόνα 112: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 1^{ης} μεθόδου με μεταβλητή τιμή (β) κατωφλίου (2^η φάση)

Από τα αποτελέσματα των οριζόντιων μετατοπίσεων, και πριν εισέλθουμε στην παράθεση των αποτελεσμάτων για τις κατακόρυφες μετατοπίσεις, φαίνονται τα όσα διαπιστώσαμε στην πρώτη σειρά μετρήσεων. Η ακρίβεια μειώνεται, κατά κύριο λόγο, γραμμικά σε όλες τις περιπτώσεις. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο CFAR αυξάνεται η εμβέλεια του συστήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί η μέθοδος CFAR μπορεί να θέσει μια βέλτιστη τιμή κατωφλίου ανάλογα με το μετρούμενο θόρυβο ανά δείγμα, χωρίς αυτό να έχει καμία ορατή επίπτωση στην πιθανότητα εντοπισμού όπως φαίνεται. Όσο μικρότερο είναι το κατώφλι, τόσο μικρότεροι είναι οι όροι a και b της γραμμικής προσέγγισης. Αν και οι γραμμικές σχέσεις είναι αρκετά παραπλήσιες αυτών της πρώτης φάσης δεν μπορούν να χαρακτηρίσουν γενικά το σύστημα, μια και έχουν άμεση συνάρτηση με το χώρο δράσης του συστήματος και τις πηγές θορύβου και ανακλάσεων. Σε κάθε περίπτωση πρέπει πριν τη χρήση του συστήματος να γίνονται κάποιες προμετρήσεις για τον προσδιορισμό των γραμμικών αυτών σχέσεων διόρθωσης. Μια τέτοια μεθοδολογία θα αναφερθεί αφού αναφέρουμε τα αποτελέσματα και των κατακόρυφων μετρήσεων.

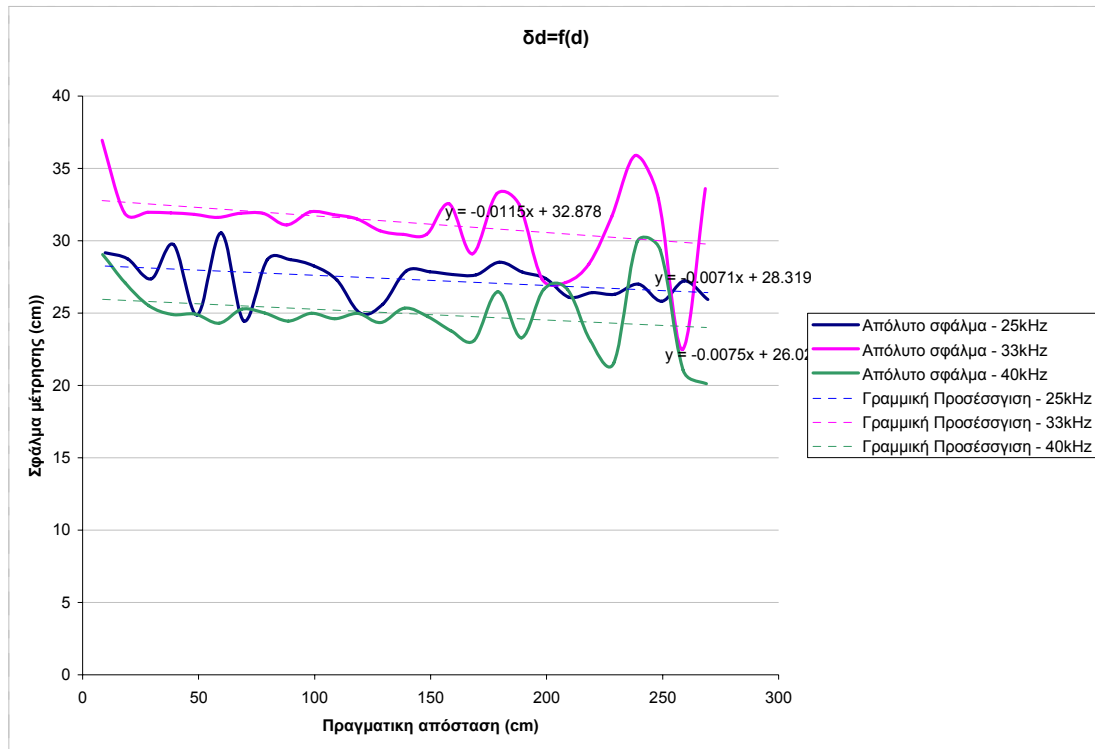
Μέθοδος κεντροειδούς εντοπισμού

Και σε αυτή τη φάση επιβεβαιώνονται τα ποιοτικά αποτελέσματα της πρώτης φάσης. Δηλαδή, έχοντας σταθερό κατώφλι η ακρίβεια του συστήματος βελτιώνεται με την απόσταση και με την τιμή του τιθέμενου σταθερού κατωφλίου. Σε περίπτωση μεταβλητού κατωφλίου η ακρίβεια του συστήματος παραμένει σταθερή πρακτικά, ανεξαρτήτως απόστασης ιδίως για μικρότερες τιμές του αριθμού k ($V_{thres} = V_{ref} + kV_{noise}^{RMS}$).

Ενδεικτικά παραθέτουμε μερικές από τις γραφικές των αποτελεσμάτων για οικονομία χώρου.



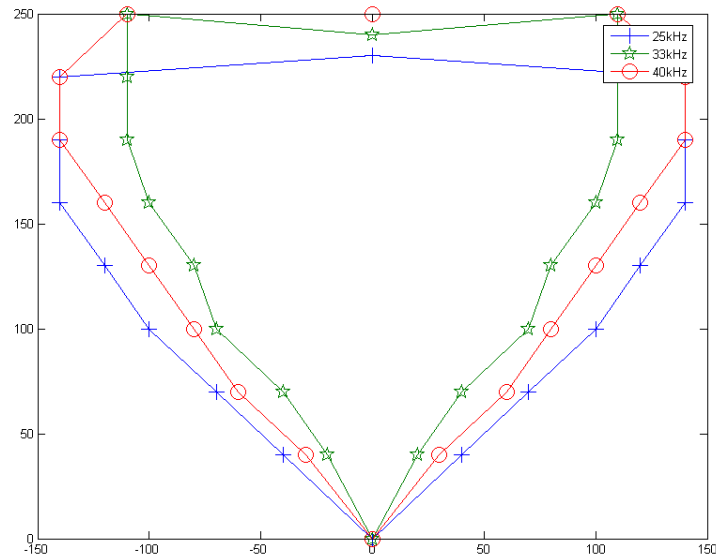
Εικόνα 113: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 2^{ης} μεθόδου με σταθερή τιμή (α) κατωφλίου (2^η φάση)



Εικόνα 114: Μέσο σφάλμα εκτίμησης 2^{ης} μεθόδου με μεταβλητή τιμή (α) κατωφλίου (1η φάση)

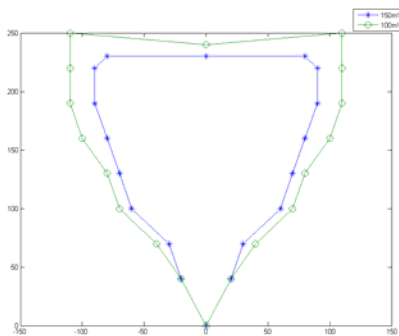
Έχοντας υλοποιήσει τις μετρήσεις και για κατακόρυφες μετατοπίσεις μπορούμε να βρούμε την πειραματικά προσδιοριζόμενη εμβέλεια του συστήματος για διαφορετικές μεθόδους εντοπισμού και διαφορετικές τιμές προσδιορισμού κατωφλίου. Δεν θα παραθέσουμε όλα τα μετρητικά αποτελέσματα, αλλά θα προχωρήσουμε σε μερικές συγκρίσεις ως προς τις διάφορες τιμές κατωφλίων και τις διάφορες μεθόδους εντοπισμού. Πρέπει να τονιστεί πως η απεικόνιση της εμβέλειας του συστήματος είναι προσεγγιστική. Πρώτον, γιατί η εμβέλεια του καθορίζεται από την τομή των τριών δεκτών και όχι από την περιοχή όρασης του καθενός. Δεύτερον, η μετρούμενη εμβέλεια εκτίθεται με βάση το πλαίσιο αναφοράς των πομπών και των δεκτών. Δηλαδή οι εικονιζόμενες αποστάσεις δεν είναι οι πραγματικές αποστάσεις εμβέλειας του πομπού από το δέκτη, αλλά του συστήματος πομπού ως προς το σύστημα του δέκτη. Αν θεωρήσουμε ως x τον άξονα που εφάπτεται στην έξοδο του δέκτη και y τον άξονα της δοκού, τότε μία απόσταση στον y άξονα αντιστοιχεί σε πραγματική απόσταση περίπου 10cm μικρότερη, ενώ μια φαινόμενη απόσταση στις γραφικές στον άξονα x είναι κατά τι μικρότερη της πραγματικής (≈ 3 cm) και εξαρτάται και από τη θέση του δέκτη στο τριγωνικό σύστημα λήψης. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο ο δέκτης των 33kHz φέρεται να έχει μικρότερη εμβέλεια λειτουργίας από τον αντίστοιχο των 44kHz, ενώ έχουν σχεδόν ίδια αμφίπλευρη γωνία 6-dB, σύμφωνα με τα φύλλα προδιαγραφών τους. Η εμβέλεια του συστήματος καθορίζεται κατά πολύ από το χαρακτηριστικό διάγραμμα του δέκτη και την απόσταση των δεκτών. Για το δεύτερο έχει προηγηθεί ανάλυση σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για τους δέκτες διαφορετικών συχνοτήτων και για ένα παράδειγμα εντοπισμού πρώτης άφιξης και κατώφλι σταθερής τιμής 100mV

πάνω από τη στάθμη θορύβου, προκύπτει το αποτέλεσμα που φαίνεται στην ακόλουθη γραφική. Φαίνεται αφενός το μεγαλύτερο άνοιγμα γωνίας του δέκτη των 25kHz και επιπλέον η μεγαλύτερη περιοχή εμβέλειας (πέραν της γωνίας 6db που επιτυγχάνεται λόγω του υψηλού κέρδους ενίσχυσης στο δέκτη).

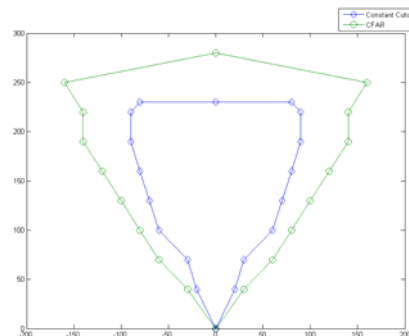


Εικόνα 115: Μεταβολή εμβέλειας του συστήματος για διαφορετικές συχνότητες (ενδεικτική επιλογή: εντοπισμός πρώτης άφιξης, σταθερό κατώφλι)

Η εμβέλεια του συστήματος είναι η ίδια ανεξάρτητα της μεθόδου εντοπισμού για την ίδια τιμή κατωφλίου. Από τις δύο γραφικές που ακολουθούν φαίνεται αφενός η βελτίωση της εμβέλειας του συστήματος αφενός με τη μείωση τις τιμές του κατωφλίου, αφετέρου με την εφαρμογή της μεθόδου CFAR. Από το δεύτερο διάγραμμα βλέπουμε πως η εμβέλεια του συστήματος εκτείνεται σε έναν κωνικό χώρο με άνοιγμα γωνίας περίπου 61° για τα 33kHz. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντική βελτίωση μια και από τα φύλλα προδιαγραφών η αμφίπλευρη γωνία του διαγράμματος ακτινοβολίας για το συγκεκριμένο πομπό είναι μόλις 45°

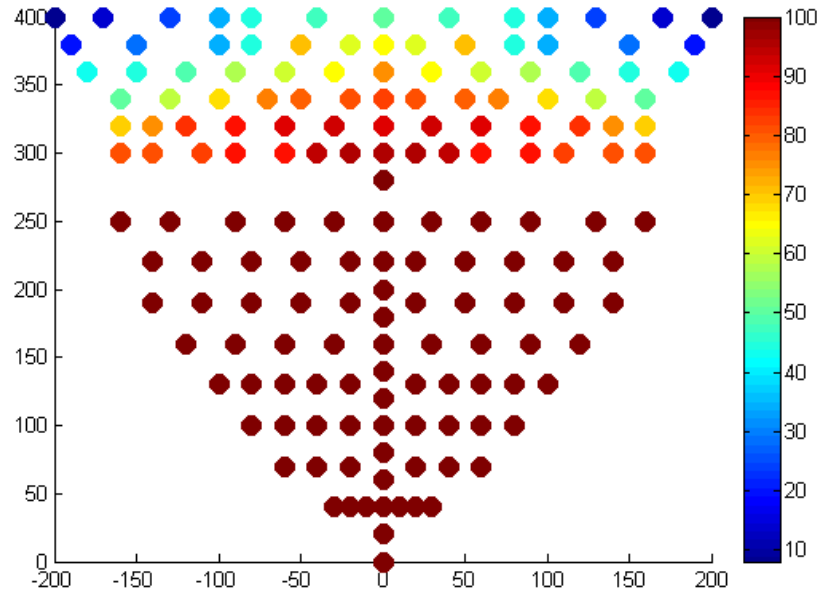


Εικόνα 116: Μεταβολή εμβέλειας συστήματος ανάλογα με την τιμή του σταθερού κατωφλίου (33kHz, εντοπισμός πρώτης άφιξης)



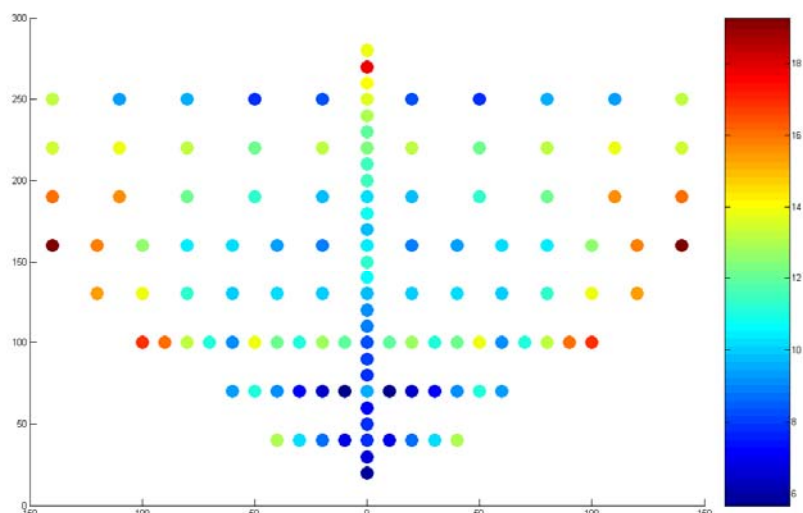
Εικόνα 117: Μεταβολή εμβέλειας συστήματος με χρήση CFAR (33kHz, εντοπισμός πρώτης άφιξης)

Σε αυτό το σημείο ας θυμηθούμε πως, κατά την ανάλυση της μεθόδου CFAR στο 3^ο κεφάλαιο, σημειώθηκε πως, η εφαρμογή της μεθόδου έχει αρνητικές επιπτώσεις ως προς την πιθανότητα ανίχνευσης. Στην Εικόνα 117 η περιοχή εμβέλειας που φαίνεται είναι αυτή για την οποία παρατηρήθηκε 100% ποσοστό εντοπισμού (στις επαναληπτικές μετρήσεις που έγιναν). Επιπλέον, με χρήση επιπλέον δοκών έγιναν μετρήσεις (προσεγγιστικές) σε μεγαλύτερες αποστάσεις με σκοπό όχι να μελετήσουμε την απόδοση της μεθόδου CFAR ως προς την ακρίβεια αλλά να δούμε την πιθανότητα εντοπισμού. Προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στο ακόλουθο γράφημα.



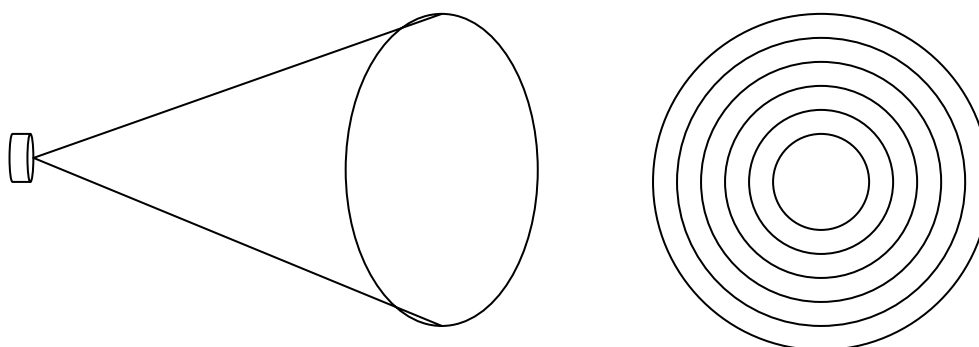
Εικόνα 118: Πειραματικά αποτελέσματα πιθανότητας εντοπισμού (n=100μετρήσεις ανά θέση-25kHz)

Η οποιαδήποτε εκ των υστέρων διόρθωση των μετρήσεων πρέπει να γίνει με χαρακτηριστικές καμπύλες για τον τρισδιάστατο χώρο. Για να εξαχθούν οι καμπύλες αυτές θα πρέπει να γίνει συμπληρωματική ανάλυση των μετρήσεων τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφης μετατόπισης. Τα αποτελέσματα που αναμένουμε για την μέθοδο εντοπισμού πρώτης άφιξης είναι μία επιπλέον μείωση της ακρίβειας κατά τις πλευρικές μετατοπίσεις λόγω του διαγράμματος ακτινοβολίας (οι πομποδέκτες δεν είναι ομοικατευθυντικοί). Το πρόβλημα λύνεται με δύο τρόπους: την αλλαγή των πομποδεκτών σε ομοιοκατευθυντικούς, ή την επιπλέον διόρθωση της χαρακτηριστικής καμπύλης διόρθωσης με βάση το χαρακτηριστικό διάγραμμα ακτινοβολίας. Για να μελετήσουμε αυτό το πρόβλημα παραθέτουμε την γραφική παράσταση των μετρούμενων μέσων λαθών για όλο τον χώρο των μετρήσεων (περίπτωση εντοπισμού πρώτης άφιξης και προσαρμοζόμενο κατώφλι $V_{thres2} = V_{thres3} = V_{ref} + 2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$).



Εικόνα 119: Μεταβολή του μέσου σφάλματος εκτίμησης για τη μέθοδο εντοπισμού της πρώτης άφιξης στο δισδιάστατο χώρο ($f=25\text{kHz}$)

Όπως είδαμε στην ανάλυση των αποτελεσμάτων για την οριζόντια μετατόπιση του στόχου, η γραμμική προσέγγιση της μεταβολής του σφάλματος εκτίμησης είναι της μορφής $y \approx 0,0058x + 6,8306$. Η σχέση αυτή προσεγγιστικά ισχύει για τον μετωπικό άξονα του δέκτη. Καθώς μεταβάλλεται η κατακόρυφη μετατόπιση του στόχου η κλίση της πιο πάνω γραφικής θα αυξάνεται, λόγω της επιπλέον μείωσης της ισχύος του ληφθέντος σήματος που επιφέρει η μεταβλητότητα του διαγράμματος ακτινοβολίας του πομπού. Για να ληφθεί υπόψη η μεταβολή αυτή, πρέπει να χωρίσουμε των κώνο της περιοχής εμβέλειας σε επιμέρους τμήματα όπως φαίνεται ακολούθως.



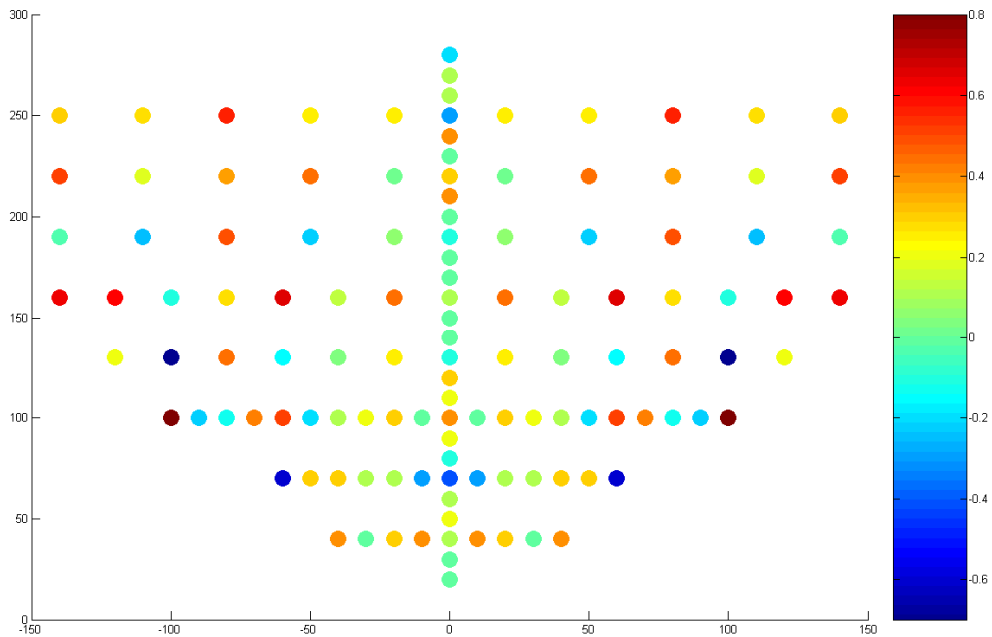
Εικόνα 120: Διαμερισμός περιοχής εμβέλειας σε επιμέρους τμήματα διόρθωσης (πλάγια όψη και κάτοψη)

Σε κάθε επιμέρους περιοχή εφαρμόζεται μία παραλλαγή της καμπύλης διόρθωσης που λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος ακτινοβολίας. Ο αριθμός των επιμέρους περιοχών είναι καθοριστικός παράγοντας. Αυξάνοντας τον αριθμό των περιοχών προφανώς βελτιώνεται η ακρίβεια του συστήματος, αλλά αυξάνεται η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου. Επιπλέον, δεδομένου του ότι δεν υπάρχουν μετρήσεις της ταχύτητας ή της κατεύθυνσης του στόχου,

το σύστημα δεν μπορεί να προβλέψει με κάποια πιθανότητα τη μελλοντική θέση του στόχου και να εφαρμόσει την κατάλληλη διόρθωση. Αυτό που προτείνεται από το συγγραφέα είναι ο υπολογισμός της κατεύθυνσης του στόχου με χρήση των συντεταγμένων θέσης ανά δέκα (10) σαρώσεις ($10 \cdot 10\text{ms} = 100\text{ms}$) και ο υπολογισμός της καμπύλης διόρθωσης για την επόμενη σάρωση.

Αυτό το μοντέλο προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις που φαίνονται στην Εικόνα 119 για κινήσεις με ομαλή ταχύτητα, στις οποίες ο στόχος περνάει από κάποια από τα σημεία για τα οποία υπάρχει μέτρηση διαθέσιμη. Ο χώρος εμβέλειας (με άνοιγμα γωνίας στους άξονες x και z περίπου 61°) χωρίστηκε σε έξι (6) υποπεριοχές, των οποίων το άνοιγμα ημίσειας γωνίας, όπως φαίνεται στην προηγούμενη εικόνα, είναι $10 \cdot k \leq \omega \leq 10 + 10 \cdot k$, $k=0,1,2,3,4,5$.

Για τις καμπύλες διόρθωσης, μετακινούμενοι από την εσωτερική περιοχή προς την εξωτερική πολλαπλασιάζουμε τον συντελεστή a της καμπύλης διόρθωσης με ένα παράγοντα 1,5. Υλοποιώντας μια σειρά από τέτοιες ευθύγραμμες κινήσεις για διαφορετικές τιμές του y πήραμε τα ακόλουθα αποτελέσματα για τον αλγόριθμο.

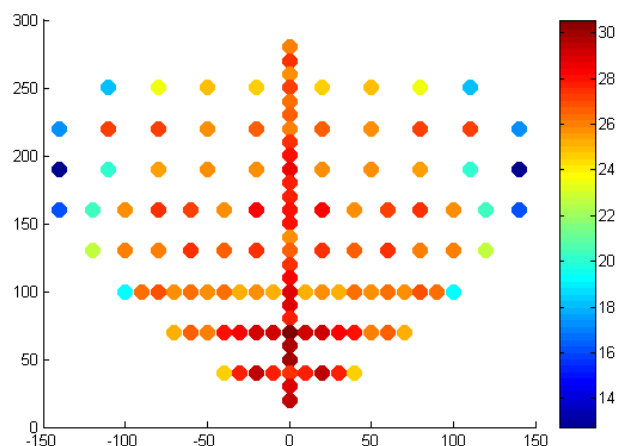


Εικόνα 121: Διόρθωση σφάλματος με διαφορετικές καμπύλες διόρθωσης ανά τμήμα της περιοχής εμβέλειας ($f=25\text{kHz}$)

Αν και τα αποτελέσματα είναι πολύ καλά (το μέσο σφάλμα μεταβάλλεται μεταξύ $-0,6$ και $0,8\text{cm}$), η διαδικασία απαιτεί αρκετές μετρήσεις για τη βαθμονόμηση του συστήματος. Περαιτέρω αύξηση των επιμέρους περιοχών κάνει το σύστημα αρκετά πιο αργό, ενώ απότομες κινήσεις του στόχου πιθανόν θα οδηγήσουν το σύστημα σε σφάλματα.

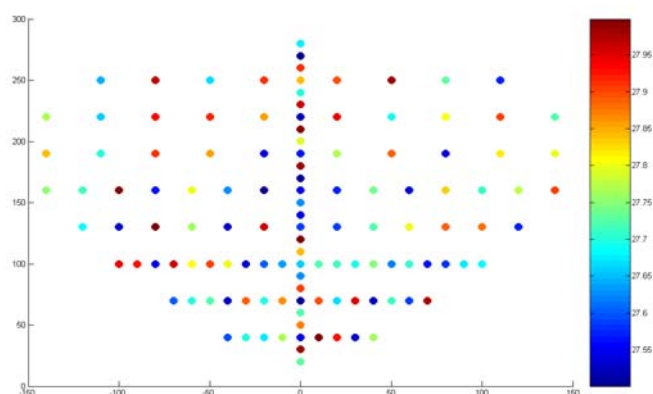
Αντίθετα, η καμπύλη διόρθωσης για τη μέθοδο του κεντροειδούς εντοπισμού αναμένουμε να είναι πρακτικά σταθερή, μια και οι μετρήσεις δεν εξαρτώνται από το πλάτος του σήματος αλλά από

τη μορφή της περιβάλλουσάς του. Κάνοντας την ίδια ανάλυση μετρήσεων όπως και στην προηγούμενη περίπτωση βρίσκουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στο ακόλουθο γράφημα για το μέσο σφάλμα εκτίμησης με αυτή τη μέθοδο.



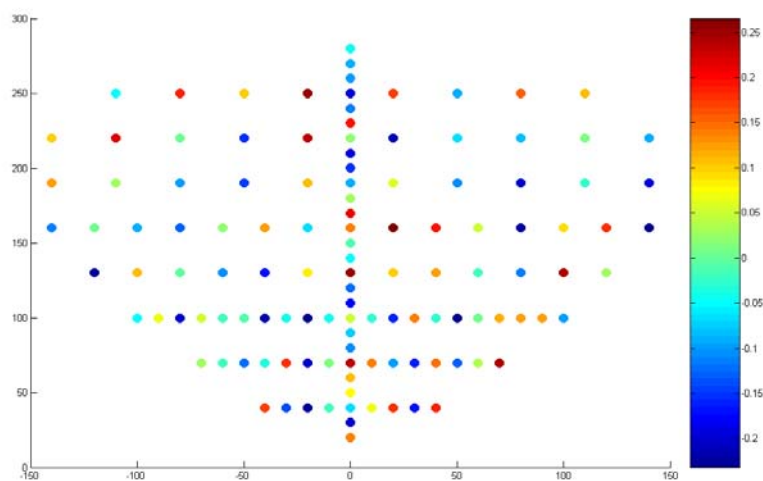
Εικόνα 122: Μεταβολή μέσου σφάλματος (κεντροειδής εντοπισμός και μεταβλητό κατώφλι- $f=25\text{kHz}$)

Όπως παρατηρούμε υπάρχει μία μεταβολή στην μέση τιμή του σφάλματος αλλά αυτή οφείλεται κυρίως στον συγγραφέα, ο οποίος εκτελώντας τα πειράματα λειτουργούσε ως παρεμβολέας αλλάζοντας το προφίλ πολυδιαδρομικής διάδοσης και αλλοιώνοντας τις μετρήσεις, κυρίως για μεγάλες τιμές τεταγμένης και τετμημένης ταυτόχρονα. Για αυτές τις τελευταίες μετρήσεις ο συγγραφέας βρισκόταν στη θέση (40,200) βάσει του συστήματος συντεταγμένων της πιο πάνω γραφικής, με αποτέλεσμα να απέχει από την απευθείας συνιστώσα λιγότερο από 20cm. Για το λόγο αυτό επαναλάβαμε το πείραμα, φροντίζοντας να είμαστε μακριά από το σύστημα. Το αποτέλεσμα που προέκυψε φαίνεται ακολούθως.



Εικόνα 123: Μεταβολή μέσου σφάλματος επαναληπτικών μετρήσεων (κεντροειδής εντοπισμός και μεταβλητό κατώφλι- $f=25\text{kHz}$)

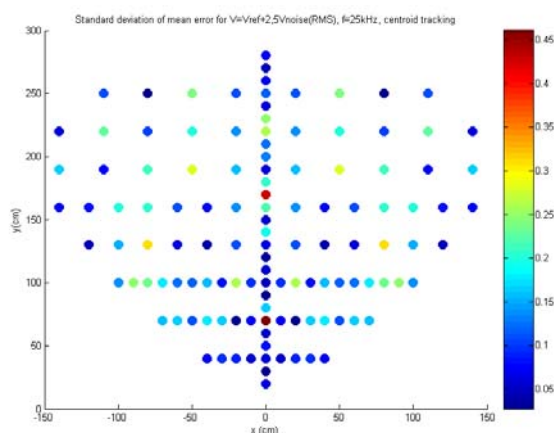
Το μέσο σφάλμα δηλαδή παραμένει πρακτικά σταθερό μια και πλέον βρίσκεται στην περιοχή 27,5-30cm περίπου. Προφανώς για περιοχή λειτουργίας μεγαλύτερη από αυτή το σύστημα θα παρουσιάζει σφάλμα το οποίο μειώνεται με την απόσταση (βλ. περίπτωση σταθερού κατώφλιου), με αποτέλεσμα να απαιτείται κάποια επιπλέον διόρθωση. Το πείραμα αυτό θα επαληθευτεί σε ακόλουθη σειρά μετρήσεων ακίνητου στόχου. Επομένως, στην περίπτωση αυτή, αλλά απαιτούνται κάποιες προμετρήσεις σε κάποιες θέσεις στο χώρο για να καθοριστεί η τιμή της πόλωσης (bias) της εκτίμησης θέσης και στη συνέχεια να αφαιρείται αυτή σε κάθε εκτίμηση. Με αυτόν τον τρόπο και για την πιο πάνω σειρά μετρήσεων, παίρνουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στο ακόλουθο γράφημα. Η μέση τιμή των απόλυτων μέσων σφαλμάτων έχει σχεδόν μηδενική τιμή (παίρνει τιμές από 0,2 ως 0,25cm) και τυπική απόκλιση 0,137cm, δηλαδή έχουμε ικανοποιητικότερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της απόστασης.



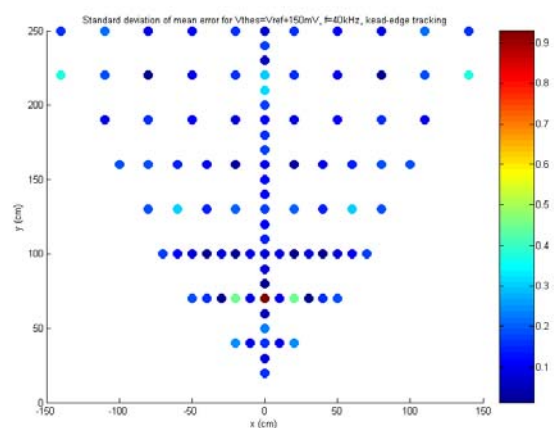
Εικόνα 124: Μεταβολή μέσου σφάλματος επαναληπτικών μετρήσεων (κεντροειδής εντοπισμός και μεταβλητό κατώφλι μετά τη διόρθωση- $f=25\text{kHz}$)

Πριν ολοκληρώσουμε την ενότητα αυτή πρέπει να τονίσουμε πως οποιαδήποτε διόρθωση των αποτελεσμάτων έχει νόημα μόνο όταν οι μετρήσεις για μία συγκεκριμένη θέση έχουν μικρή τυπική απόκλιση. Η μέχρι τώρα ανάλυση βασίστηκε στους μέσους όρους των μετρήσεων (και των σφαλμάτων) ανά θέση. Η τυπική απόκλιση των μετρήσεων ανά θέση έχει σχέση αφενός με τη σταθερότητα του προφίλ πολυδιαδρομικής διάδοσης, και αφετέρου με τη σταθερότητα και ορθή λειτουργία του αλγορίθμου. Παρακάτω παραθέτουμε τις μετρούμενες τυπικές αποκλίσεις για τον αριθμό (5) των μετρήσεων και για τις δύο μεθόδους εντοπισμού. Και στις δύο περιπτώσεις βλέπουμε πως ο αλγόριθμος είναι εξαιρετικά αποδοτικός ως προς τη σταθερότητά του (δεδομένου και του ελεγχόμενου περιβάλλοντος λειτουργίας). Συγκεκριμένα παραθέτουμε ένα γράφημα τυπικής απόκλισης του μέσου σφάλματος εκτίμησης για διάφορες θέσεις χρησιμοποιώντας μέθοδο

κεντροειδούς εντοπισμού με κατώφλι $V_{thres2} = V_{thres3} = V_{ref} + 2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$ και μέθοδο εντοπισμού πρώτης άφιξης με σταθερό κατώφλι $V_{thres2} = V_{ref} + 150mV$.



Εικόνα 125: Μεταβολή τυπικής απόκλισης σφάλματος μετρήσεων (κεντροειδής εντοπισμός και μεταβλητό κατώφλι-f=25kHz)



Εικόνα 126: Μεταβολή τυπικής απόκλισης σφάλματος μετρήσεων (εντοπισμός πρώτης άφιξης και σταθερό κατώφλι-f=40kHz)

Πλέον έχουμε ολοκληρώσει την ανάλυση των μετρήσεων πρώτης φάσης. Οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως η μέθοδος κεντροειδούς εντοπισμού σε συνδυασμό με χρήση μεταβλητού προσαρμοζόμενου κατωφλίου οδηγεί σε συγκριτικά καλύτερα και πιο εύκολα προς χρήση αποτελέσματα. Προσβλέπουμε με αυτήν την μέθοδο σε ένα σύστημα εντοπισμού με εμβέλεια μια περιοχή μεγαλύτερη από τη δοθείσα στις προδιαγραφές, με μέσο σφάλμα εκτίμησης απόστασης σχεδόν μηδενικό (της τάξης των 2 χιλιοστών) και τυπική απόκλιση σφάλματος της τάξης των δεκάδων χιλιοστών.

4.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΤΡΙΜΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Για το σύστημα εντοπισμού υλοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι τριμεροποίησης που παρουσιάστηκαν στο 2^ο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα υλοποιήσαμε έναν στατικό εκτιμητή ελάχιστων τετραγώνων, έναν αλγεβρικό εκτιμητή χρησιμοποιώντας την αλγεβρική επίλυση του προβλήματος όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2, και δυναμικούς εκτιμητές με χρήση φίλτρων Kalman. Οι δυναμικοί εκτιμητές περιλάμβαναν ένα φίλτρο σταθερής ταχύτητας (CV), ένα φίλτρο σταθερής επιτάχυνσης (CA), ένα φίλτρο σταθερής γωνιακής ταχύτητας (CTR) και ένα φίλτρο αλληλεπιδρώντων πολλαπλών μοντέλων (IMM) με ένα CV και δύο διαφορετικά CA μοντέλα. Οι δυναμικοί εκτιμητές έπαιρναν ως είσοδο θορυβώδεις μετρήσεις συντεταγμένων και όχι απόστασης.

Κάθε εκτιμητής δοκιμάστηκε με μια σειρά σεναρίων κίνησης. Τα σενάρια αυτά ήταν:

1. Ευθύγραμμη κίνηση με σταθερές τιμές επιτάχυνσης και στους τρεις άξονες
2. Ευθύγραμμη κίνηση με μεταβαλλόμενες τιμές επιτάχυνσης και στους τρεις άξονες
3. Αρχικά, ευθύγραμμη κίνηση με σταθερές τιμές επιτάχυνσης και ακολούθως, απότομη μεταβολή σε ευθύγραμμη κίνηση άλλης διεύθυνσης με διαφορετικές από πριν αλλά σταθερές τιμές επιτάχυνσης σε όλους τους άξονες
4. Κυκλική κίνηση σταθερής γωνιακής ταχύτητας στο επίπεδο x-y
5. Αρχικά, κυκλική κίνηση σταθερής γωνιακής ταχύτητας στο επίπεδο x-y και ακολούθως, απότομη μεταβολή σε ευθύγραμμη κίνηση με σταθερές τιμές επιτάχυνσης σε όλους τους άξονες
6. Κυκλική κίνηση σταθερής γωνιακής ταχύτητας στο επίπεδο z-y
7. Αρχικά, κυκλική κίνηση σταθερής γωνιακής ταχύτητας στο επίπεδο x-y και ακολούθως, απότομη μεταβολή σε κυκλική κίνηση σταθερής γωνιακής ταχύτητας στο επίπεδο z-y.

Όλα τα μοντέλα κίνησης δημιουργήθηκαν με σχέσεις κινηματικής ενώ, στις θεωρητικές τιμές των συντεταγμένων θέσης του στόχου προστέθηκε Γκαουσιανός θόρυβος, μηδενικής μέσης τιμής, για να δώσει τις μετρούμενες τιμές της προσομοίωσης, προσομοιώνοντας έτσι ένα σφάλμα μέτρησης της τάξης του 0,5cm. Για κάθε εκτιμητή και σενάριο κίνησης γίνεται μία εξομοίωση MonteCarlo και βρίσκεται το απλό και το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα της εκτίμησης (RMS και NRMS αντίστοιχα).

4.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

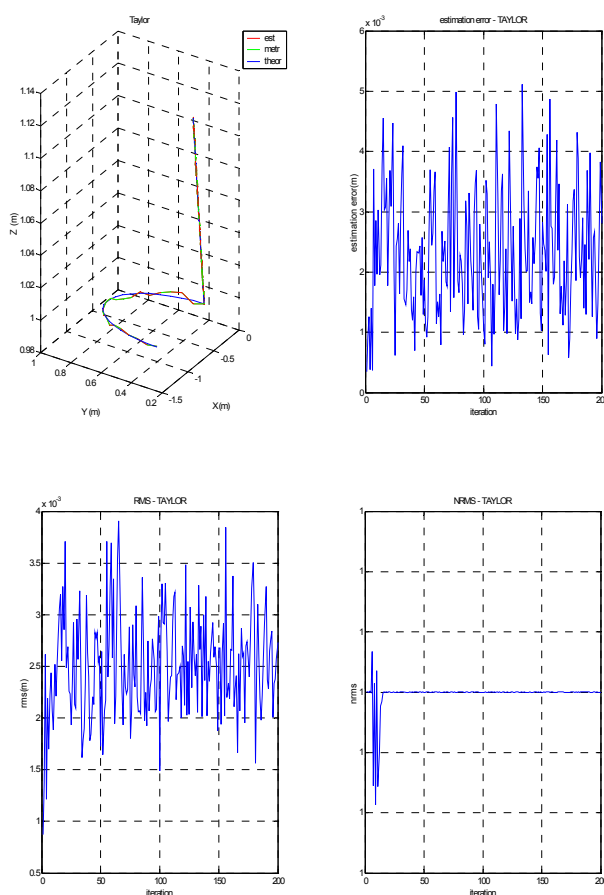
Εκτιμητής χωρίς μνήμη

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τόσο ο στατικός εκτιμητής ελάχιστων τετραγώνων, όσο και ο αλγεβρικός εκτιμητής που υλοποιήσαμε. Στην περίπτωση αυτών των εκτιμητών για τον καθορισμό των σεναρίων κίνησης, αρχικά προέκυψαν οι θεωρητικές τιμές του στόχου. Με τριγωνομετρικές σχέσεις καθορίστηκαν οι αποστάσεις του στόχου από τον εκάστοτε δέκτη. Στις μετρήσεις αυτές των αποστάσεων προστέθηκε Γκαουσιανός θόρυβος, μηδενικής μέσης τιμής και διακύμανσης ίσης με την αναμενόμενη διακύμανση της μέτρησης, όπως προέκυψε από την προηγούμενη σειρά πειραμάτων.

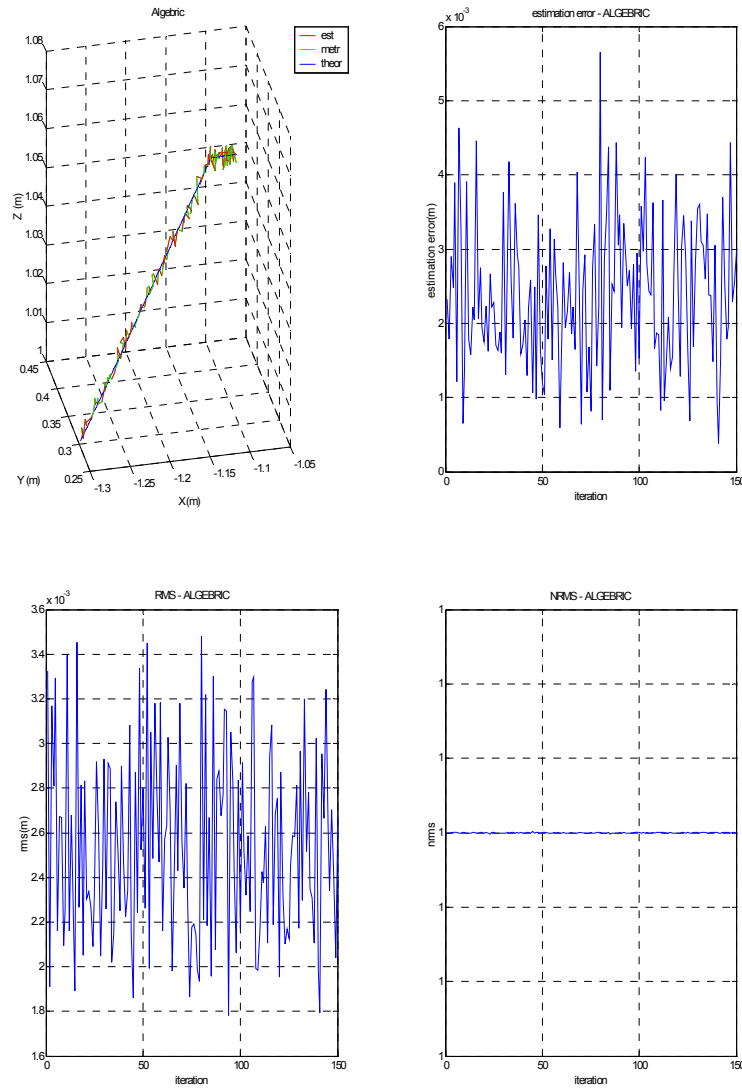
Οι εφαρμογές των αλγορίθμων στο πρόβλημα της τριμεροποίησης οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Ο αλγόριθμος ελάχιστων τετραγώνων συγκλίνει ανεξάρτητα του αρχικού σημείου της εκτίμησης, πλην ελάχιστων εξαιρέσεων (π.χ. επιλογή αρχικού σημείου αρκετά έξω από το χώρο δράσης του συστήματος). Αν μάλιστα το αρχικό σημείο επιλεγεί ως το σημείο της προηγούμενης μέτρησης τότε η σύγκλιση είναι σχεδόν βέβαιη.
- Οι αλγόριθμοι δίνουν μέσο εκτιμώμενο σφάλμα που είναι πρακτικά ίσο με το σφάλμα της κάθε μέτρησης απόστασης. Κάτι τέτοιο αναμενόταν μια και οι δύο είναι αλγόριθμοι χωρίς μνήμη.
- Οι αλγόριθμοι παρουσιάζουν την ίδια επίδοση σε όλες τις κινήσεις και είναι αδιάφοροι στις, τυχόν, απότομες μεταβολές αυτών. Αυτό είναι επίσης αναμενόμενο μια και δεν βασίζονται σε κάποιο μοντέλο κίνησης αλλά χρησιμοποιούν απλά τις διαθέσιμες μετρήσεις.
- Παρουσιάζουν και οι δύο πολύ καλή συμπεριφορά ως προς τον υπολογιστικό χρόνο, με τον αλγόριθμο αλγεβρικής επίλυσης να είναι πιο γρήγορος

Ενδεικτικά παρατίθενται μερικά από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων:



Εικόνα 127: Αποτελέσματα προσομοίωσης εκτιμητή ελάχιστων τετραγώνων για το σενάριο 5



Εικόνα 128: Αποτελέσματα προσομοίωσης αλγεβρικού εκτιμητή για το σενάριο 3

Στις πιο πάνω τετράδες γραφικών βλέπουμε για τον αντίστοιχο αλγόριθμο και σενάριο κίνησης: α) την πραγματική, μετρούμενη και εκτιμώμενη πορεία του στόχου, β) το εκτιμώμενο σφάλμα, γ) το μέσο τετραγωνικό σφάλμα εκτίμησης και δ) το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα εκτίμησης. Από τις γραφικές εύκολα επαληθεύονται τα πιο πάνω αναφερόμενα αποτελέσματα.

Φίλτρα Kalman

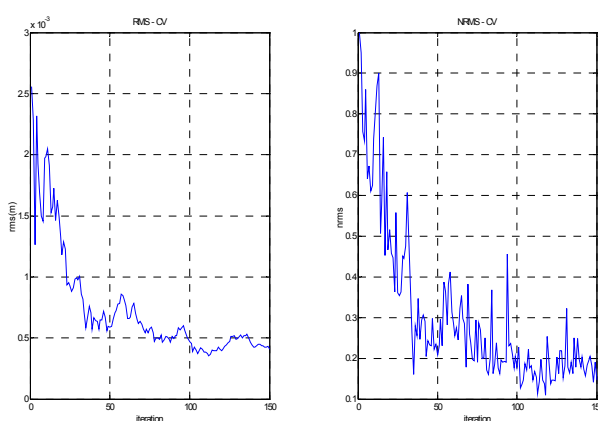
1. Φίλτρο Σταθερής Ταχύτητας (CV)

Οι προσομοιώσεις με το φίλτρο CV, όπως και με καθένα από τα φίλτρα ενός μοντέλου κίνησης, έγιναν παραμετρικά με σκοπό να προσδιοριστεί ένας βέλτιστος πίνακας Q της συνδιακύμανσης του θορύβου της διαδικασίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν προφανώς πως δεν υπάρχει

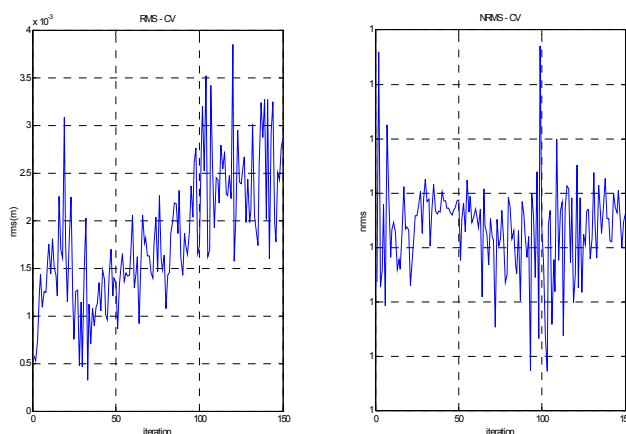
βέλτιστη τιμή του πίνακα για όλα τα σενάρια κίνησης. Γενικά τα συμπεράσματα των προσομοιώσεων συνοψίζονται ως εξής:

- Το φίλτρο είναι ένας πολύ καλός εκτιμητής για ευθύγραμμες ομαλά επιταχυνόμενες κινήσεις. Για τέτοιου είδους κινήσεις απαιτείται μικρή τιμή της συνδιακύμανσης του θορύβου της διαδικασίας ($Q=10^{-20}I$) για τον(τους) άξονα(-ες) όπου εμφανίζεται η επιτάχυνση. Στην περίπτωση μη σταθερής επιτάχυνσης ένας μεγαλύτερος πίνακας Q απαιτείται ($Q=0,1I$).
- Το φίλτρο δυσκολεύεται να παρακολουθήσει απότομες μεταβολές στην κίνηση του στόχου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το σφάλμα εκτίμησης προσεγγίζει το σφάλμα μέτρησης ή το ξεπερνά.
- Το φίλτρο αδυνατεί να ακολουθήσει κυκλικές τροχιές στον τρισδιάστατο χώρο. Εντούτοις, δύναται να παρακολουθήσει κυκλικές κινήσεις σε ένα επίπεδο κίνησης, αυξάνοντας κατά πολύ τις τιμές του πίνακα συνδιακύμανσης θορύβου διαδικασίας που αντιστοιχούν σε αυτούς τους άξονες (τάξης 10^7) και κρατώντας μικρές τις τιμές για τον τρίτο άξονα. Αν αυξήσουμε όλες τις τιμές του πίνακα Q ουσιαστικά οδηγούμαστε σε εκτιμώμενο σφάλμα ίσο με το μετρούμενο.

Ενδεικτικά παρατίθενται μερικά από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων:



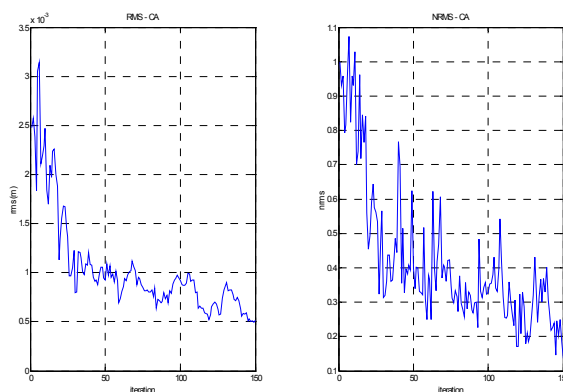
Εικόνα 129: Αποτελέσματα προσομοίωσης CV για το σενάριο 1



Εικόνα 130: Αποτελέσματα προσομοίωσης CV για το σενάριο 7

2. Φίλτρο Σταθερής Επιτάχυνσης (CA)

Το φίλτρο Σταθερής Επιτάχυνσης έχει συμπεριφορά όμοια με αυτή του φίλτρου σταθερής ταχύτητας με βασική διαφορά το καλύτερο φιλτράρισμα ευθύγραμμων κινήσεων μεταβαλλόμενης επιτάχυνσης. Γενικά αποτελεί το βέλτιστο φίλτρο για οποιαδήποτε ευθύγραμμη κίνηση (όχι για συνδυασμό τους). Αποτυγχάνει και αυτό να φιλτράρει απότομες μεταβολές και τρισδιάστατες κυκλικές κινήσεις. Οι βέλτιστες τιμές του πίνακα Q είναι ανάλογες αυτών του CV.

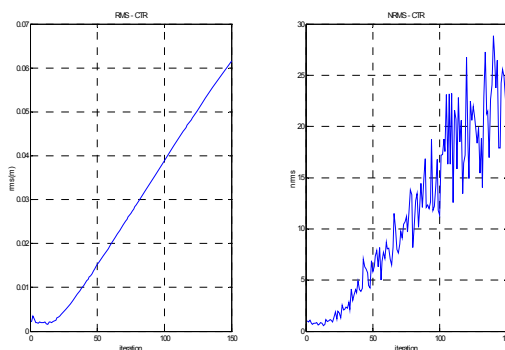


Εικόνα 131: Αποτελέσματα προσομοίωσης CA για το σενάριο 2

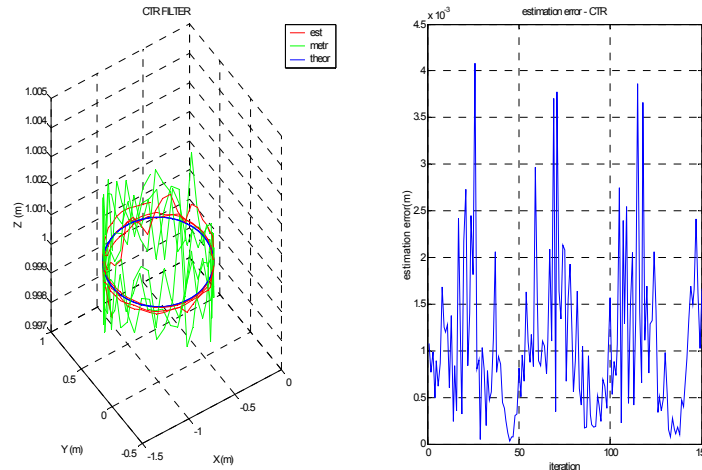
3. Φίλτρο Σταθερής Γωνιακής Ταχύτητας (CTR)

Τα βασικά συμπεράσματα για το φίλτρο Σταθερής Γωνιακής Ταχύτητας συνοψίζονται ως εξής:

- Το φίλτρο αποτυγχάνει να φιλτράρει ευθύγραμμες κινήσεις με σταθερές επιταχύνσεις. Η εκτίμησή του αποκλίνει σημαντικά και το σφάλμα εκτίμησης είναι αρκετά μεγαλύτερο από το σφάλμα μέτρησης.
- Το φίλτρο επιτυγχάνει να φιλτράρει τις ευθύγραμμες κινήσεις μεταβαλλόμενης επιτάχυνσης καλύτερα από το CV αλλά χειρότερα από το CA.
- Το φίλτρο επιτυγχάνει να φιλτράρει τις κυκλικές κινήσεις σε δύο άξονες σχετικά καλύτερα από τα δύο προηγούμενα. Αποτυγχάνει στις κυκλικές κινήσεις στον τρισδιάστατο χώρο.
- Το φίλτρο δεν μπορεί να ακολουθήσει απότομες μεταβολές στην κίνηση του στόχου.



Εικόνα 132: Αποτελέσματα προσομοίωσης CTR για το σενάριο 1



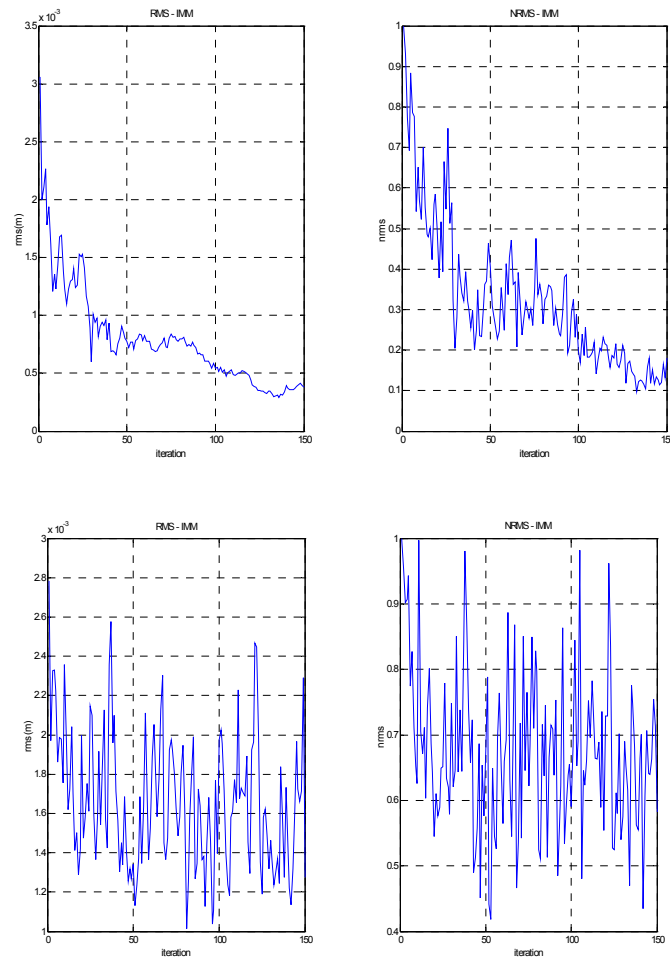
Εικόνα 133: Αποτελέσματα προσομοίωσης CTR για το σενάριο 4

4. Φίλτρο IMM

Όπως παρατηρήσαμε από την ανάλυση των φίλτρων με ένα μοντέλο κίνησης, δεν υπάρχει κάποιο από αυτά τα φίλτρα που παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα εντοπισμού για όλα τα σενάρια κίνησης. Καλύτερη απόκριση για τα περισσότερα είδη κίνησης έχει το φίλτρο σταθερής επιτάχυνσης. Εντούτοις, και αυτό παρουσιάζει εγγενή προβλήματα σε ορισμένα είδη κίνησης. Προς τούτο αναπτύχθηκε ένα φίλτρο αλληλεπιδρώντων μοντέλων που εμπεριέχει δύο μοντέλα CA και ένα μοντέλο CV. Αρχικά, δοκιμάστηκε η επίδοση του φίλτρου για διαφορετικές τιμές συνδιακίνησης του θορύβου διαδικασίας των επιμέρους φίλτρων για κάθε σενάριο. Με τις βέλτιστες τιμές αυτών, το φίλτρο παρουσίαζε εξαιρετικά καλά αποτελέσματα για τα περισσότερα είδη κινήσεων (πλην του σεναρίου 7). Ζητούμενο όμως ήταν ο προσδιορισμός σταθερών τιμών των πινάκων Q για τις οποίες το IMM να πετυχαίνει τη βέλτιστη εκτίμηση σε όλο το συνδυασμό των κινήσεων. Οι τιμές αυτές έτσι όπως βρέθηκαν μετά από προσομοίωση είναι:

$$Q_{CV} = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-4} \end{bmatrix}, Q_{CA1} = Q_{CA2} = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-1} \end{bmatrix}$$

Με αυτές τις τιμές το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα για τα πρώτα έξι σενάρια είχε μέση τιμή μεταξύ του 0,2 και 0,8. Δηλαδή σε όλες τις περιπτώσεις επιτυγχάνεται μία βελτίωση της εκτίμησης. Στην περίπτωση του σεναρίου επτά (7), το φίλτρο αποτυγχάνει στην βελτίωση της εκτίμησης του σήματος, μια και κανένα από τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται δεν μπορεί να προσεγγίσει την πραγματοποιούμενη κίνηση. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται ακολούθως:



Εικόνα 134: Αποτελέσματα προσομοίωσης IMM για το σενάριο 1 και 3

4.2.2 Συζήτηση

Στις πιο πάνω παραγράφους αναλύθηκαν συγκριτικά οι διάφοροι αλγόριθμοι (με και χωρίς μνήμη) εντοπισμού θέσης στόχου. Πρέπει να τονιστεί πως αλγόριθμοι δεν είναι ανταγωνιστικοί μεταξύ των αλλά μάλλον αλληλοσυμπληρούμενοι. Οι αλγόριθμοι χωρίς μνήμη ουσιαστικά επιλύουν το πρόβλημα της τριμεροποίησης βάσει των μετρήσεων απόστασης από τους τρεις δέκτες. Επομένως, οι αλγόριθμοι αυτοί θα έχουν ένα σφάλμα εκτίμησης, όπως προκύπτει από τη θεωρητική ανάλυση που έγινε στο 2^ο κεφάλαιο και μετρήθηκε πειραματικά στις μετρήσεις του πειράματος που θα περιγραφεί στη συνέχεια. Οι δυναμικοί αλγόριθμοι από την άλλη χρησιμοποιούν τα αποτελέσματα θέσης του στόχου από την προηγούμενη σειρά αποτελεσμάτων και τα ενσωματωμένα μοντέλα κίνησης. Σαν είσοδος απαιτούνται οι μετρήσεις συντεταγμένων θέσης του στόχου. Οπότε, ουσιαστικά, πρέπει να προηγηθεί κάποιος αλγόριθμος χωρίς μνήμη, ο οποίος με βάση τις θορυβώδεις μετρήσεις θα δώσει τις συντεταγμένες θέσης του στόχου με ενσωματωμένο το θόρυβο της διαδικασίας τους. Αυτές οι τιμές (με το θόρυβο της διαδικασίας στατικής εκτίμησης) ουσιαστικά χρησιμοποιούνται ως είσοδος στα φίλτρα Kalman για τη βελτίωση της εκτίμησης.

Όπως είδαμε, στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων οι αλγόριθμοι χωρίς μνήμη, δεν επηρεάζονται από το είδος της κίνησης που επιτελεί ο στόχος. Από την άλλη τα φίλτρα Kalman (και κυρίως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή) παρουσιάζουν βελτιωμένη συμπεριφορά ως προς την εκτίμηση του στόχου σε περίπτωση συγκεκριμένων κινήσεων. Οι κινήσεις που ο χρήστης επιτελεί σε ένα Εικονικό Περιβάλλον είναι άμεσα συνδεδεμένες με τη διεργασία που επιτελεί σε αυτό. Επιπρόσθετα, οι κινήσεις του στόχου διαφοροποιούνται αργιανά και είναι αργιανά πιο προβλέψιμες για το κεφάλι του χρήστη σε σχέση με το χέρι αυτού. Όταν το είδος των κινήσεων του στόχου είναι, σε μεγάλο ποσοστό, συγκεκριμένες και γνωστές από πριν (π.χ. σε περιβάλλοντα επισκευών και επιδιορθώσεων με προδιαγεγραμμένες κινήσεις), μπορούν να χρησιμοποιηθούν φίλτρα Kalman με κατάλληλα μοντέλα κίνησης για τον καλύτερο εντοπισμό του στόχου. Σε αυτήν την περίπτωση, και για κίνηση με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, το IMM φίλτρο έχει την καλύτερη απόδοση. Βέβαια, ίσως θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί φίλτρο διαφορετικό σε σχέση με αυτό που περιγράφηκε στην παρούσα διατριβή, το οποίο θα μπορεί να αποκριθεί καλύτερα σε διάφορα είδη κινήσεων ή ακόμα, προσαρμοστικά φίλτρα με κατάλληλη προσαρμογή των παραγόντων βαρύτητας των εκτιμήσεων από μια τράπεζα μοντέλων [BLOM88]. Όσο πιο πολύπλοκο είναι το IMM φίλτρο που θα χρησιμοποιηθεί, τόσο μεγαλύτερο είναι και το αντίστοιχο υπολογιστικό φορτίο. Ακόμη, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μη γραμμικό μοντέλο Kalman (EKF), παραλείποντας έτσι την ανάγκη για χρήση οποιουδήποτε στατικού αλγορίθμου. Πρέπει να σημειωθεί πως EKF φίλτρο δοκιμάστηκε στα πλαίσια προσομοιώσεων και τελικά απορριφτηκε. Ο λόγος είναι πως το EKF δεν κατάφερε να προσεγγίσει ικανοποιητικώς καλύτερη εκτίμηση από τους προαναφερθέντες τρόπους. Έτσι απορριφτηκε λόγω της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας που το χαρακτηρίζει (ανάγκη υπολογισμού Ιακωβιανής μήτρας σε κάθε σάρωση, όπως αυτή περιγράφηκε στο 2^ο κεφάλαιο). Εντούτοις, ο συγγραφέας είναι σίγουρος πως η εφαρμογή κατάλληλων μη γραμμικών φίλτρων σε συνδυασμό με την μέθοδο βηματικού εντοπισμού με μη πλήρεις μετρήσεις που αναφέρεται στο [WELC97] θα αποφέρουν, ίσως, βελτίωση. Το παρόν αποτελεί τροφή για εργασία για το μέλλον. Στα πλαίσια της διατριβής δεν δόθηκε γενικά βάρος σε ανάπτυξη διαφορετικών φίλτρων Kalman για τη βελτίωση της εκτίμησης. Οι λόγοι είναι οι ακόλουθοι:

- Τα συστήματα εντοπισμού με ακουστικούς αισθητήρες υποφέρουν από μικρό ρυθμό ανανέωσης δεδομένων. Οποιοδήποτε πολύπλοκο φίλτρο επιφέρει μεγαλύτερες καθυστερήσεις στο σύστημα, μειώνοντας το ρυθμό αυτό.
- Το βάρος στη διατριβή είναι στον περιορισμό του σφάλματος μέτρησης απόστασης και κατ' επέκταση του σφάλματος εκτίμησης που προκύπτει από τους αλγόριθμους τριμεροποίησης. Για αυτό το λόγο, το βάρος δίνεται στον έλεγχο διαφόρων ειδών κατωφλίου και διαφορετικών μεθόδων εντοπισμού των εκάστοτε δεκτών. Η εκ των υστέρων βελτίωση της εκτίμησης από φίλτρα Kalman είναι ευπρόσδεκτη, αλλά όχι πάντα απαραίτητη. Όπως τονίζεται και στο [KARA05] οι απαιτήσεις επίδοσης ενός συστήματος εντοπισμού ποικίλουν ανάλογα με την

εφαρμογή. Στην περίπτωση αυτή, όπου οι διαστάσεις του πομπού είναι της τάξης του 1cm, δεν έχει ιδιαίτερο νόημα να μιλήσουμε για ακρίβεια π.χ. της τάξης των δέκατων του χιλιοστού.

4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΘΕΣΗΣ

Στις προηγούμενες σειρές μετρήσεων και προσομοιώσεων, εξετάσαμε διαδοχικά την επίδοση του συστήματος στον υπολογισμό των επιμέρους αποστάσεων καθώς και την επίδοση των διαφορετικών τρόπων εκτίμησης της θέσης του στόχου χρησιμοποιώντας τις τρεις μετρήσεις απόστασης. Ιδίως από την πρώτη σειρά μετρήσεων, έχουμε αποκομίσει ουσιώδη συμπεράσματα για την επίδραση του τρόπου εντοπισμού και του επιλεγόμενου κατωφλίου και, άρα, είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε σε μετρήσεις του ολοκληρωμένου συστήματος με πραγματικό στόχο. Η σειρά αυτή των πειραμάτων περιλαμβάνει μετρήσεις θέσης κινητού και ακίνητου στόχου.

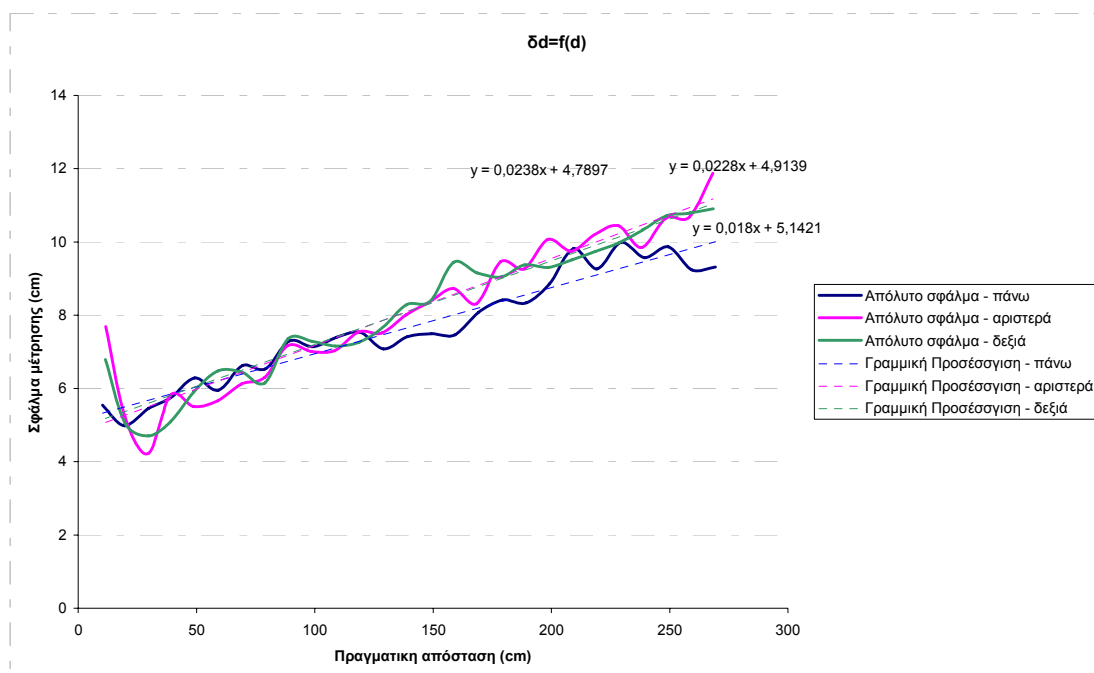
4.3.1 Μετρήσεις με ακίνητο στόχο

Οι μετρήσεις ακίνητου στόχου έγιναν με τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη σειρά πειραμάτων. Δηλαδή χρησιμοποιήθηκαν οι δύο δοκοί πάνω στους οποίους στερεώνονταν με κοχλίες ο πομπός και ο δέκτης. Η διαφορά είναι πως χρησιμοποιήθηκαν αυτή τη φορά πομπός και δέκτης των ίδιων συχνοτήτων, ώστε να έχουμε ταυτόχρονη λήψη του σήματος από τους τρεις δέκτες για τον υπολογισμό των τριών αποστάσεων. Επιλέξαμε για τα πειράματα να χρησιμοποιήσουμε τη συχνότητα των 33kHz, χωρίς κάποιο ιδιαίτερο λόγο, μια και οι τρεις συχνότητες λειτουργούν ικανοποιητικά (ίσως απλά στα 33kHz για τα οποία ο κατασκευαστής δίνει τη μικρότερη γωνία 6db να επιδειξουμε μια σαφή βελτίωση της αναμενόμενης περιοχής λειτουργίας). Σε κάθε θέση επί της βαθμονομημένης κλίμακας πήραμε τέσσερις (4) τριάδες μετρήσεων.

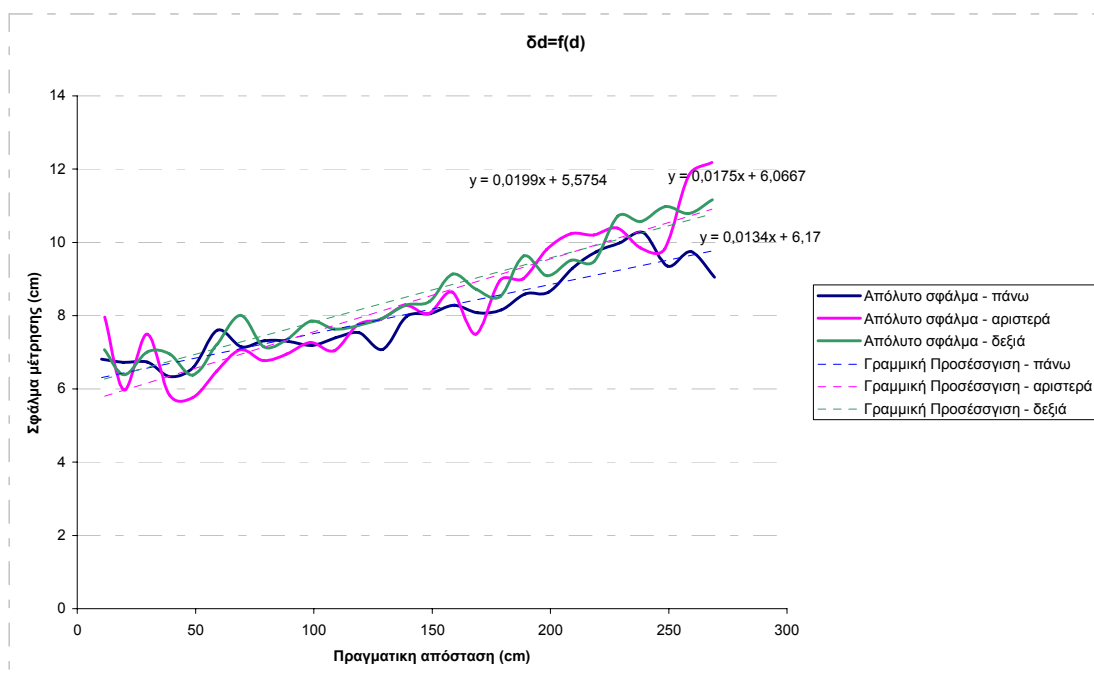
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αναλύθηκαν με όλους τους τρόπους εντοπισμού και διαφορετικές τιμές σταθερού ή μεταβλητού κατωφλίου. Σε γενικές γραμμές επιβεβαιώθηκαν τα αποτελέσματα από την πρώτη σειρά μετρήσεων. Για λόγους οικονομίας χώρου δεν θα παραθέσουμε όλες τις γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων. Εστιάζουμε στην προτεινόμενη λύση της εφαρμογής κεντροειδούς εντοπισμού με μεταβλητό κατώφλι, όπως αυτή προέκυψε από την πρώτη σειρά των μετρήσεων. Παραθέτουμε απλά, αρχικά, κάποιες λίγες γραφικές που επιβεβαιώνουν τα προαναφερθέντα συμπεράσματα.

Οι τιμές κατωφλίου που δοκιμάστηκαν (κατ' αντιστοιχία όσων αναφέρθηκαν στην πρώτη σειρά πειραμάτων) ήταν περιθώριο σταθερού κατωφλίου 30 και 40mVolt, ενώ για τη μέθοδο CFAR χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές κατωφλίου $k=2,5$ και 5. Πρέπει να παρατηρηθεί πως σε αυτή τη σειρά μετρήσεων το περιθώριο κατωφλίου τέθηκε αρκετά χαμηλά, μια και αυτές έγιναν ως επί το πλείστον βράδυ σε χώρο χωρίς παρουσία άλλων ατόμων. Στην προηγούμενη σειρά μετρήσεων οι μετρήσεις έγιναν μέρα με ταυτόχρονη λειτουργία ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος δεν αποτελούν ούτε η μία ούτε η άλλη περίπτωση. Πιο κοντά σε συνθήκες ενός περιβάλλοντος Εικονικής Πραγματικότητας πλησιάζουν οι δεύτερες.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο του εντοπισμού πρώτης άφιξης παίρνουμε αποτελέσματα στα οποία το σφάλμα εκτίμησης είναι γραμμικώς ανάλογο με το αντίστροφο της απόστασης (με κατώφλι τάσης).



Εικόνα 135: Μέσο σφάλμα εκτίμησης σε συνάρτηση με την απόσταση (3η σειρά πειραμάτων-μέθοδος εντοπισμού πρώτης άφιξης-περιθώριο κατώφλιου 40mV)

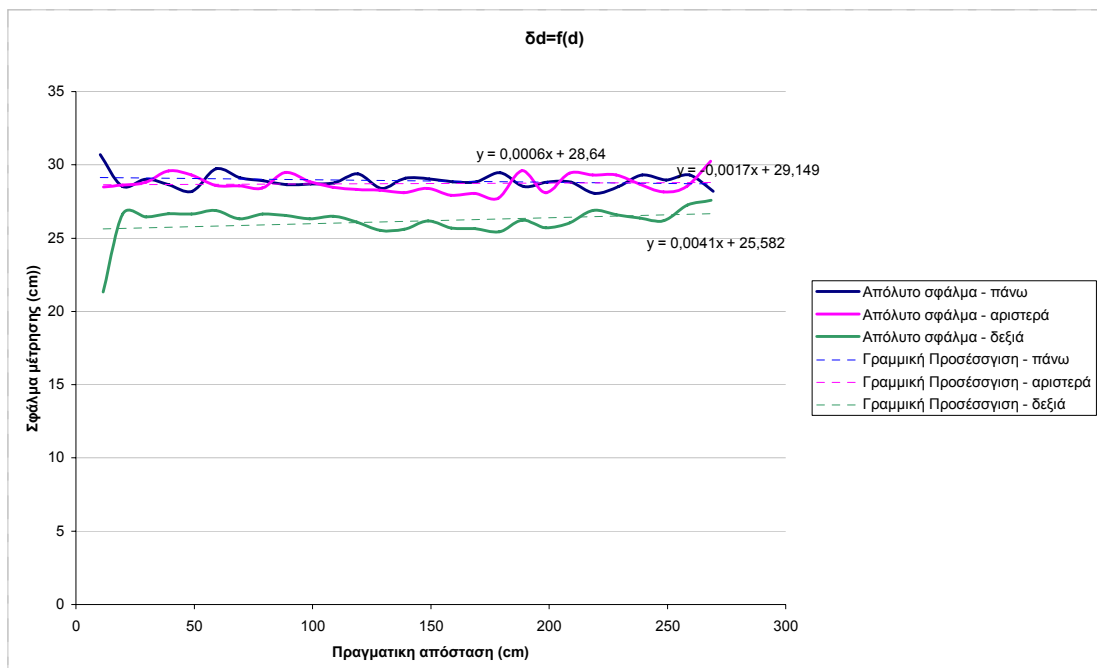


Εικόνα 136: Μέσο σφάλμα εκτίμησης σε συνάρτηση με την απόσταση (3η σειρά πειραμάτων-μέθοδος εντοπισμού πρώτης άφιξης-μεταβλητό κατώφλι με k=5)

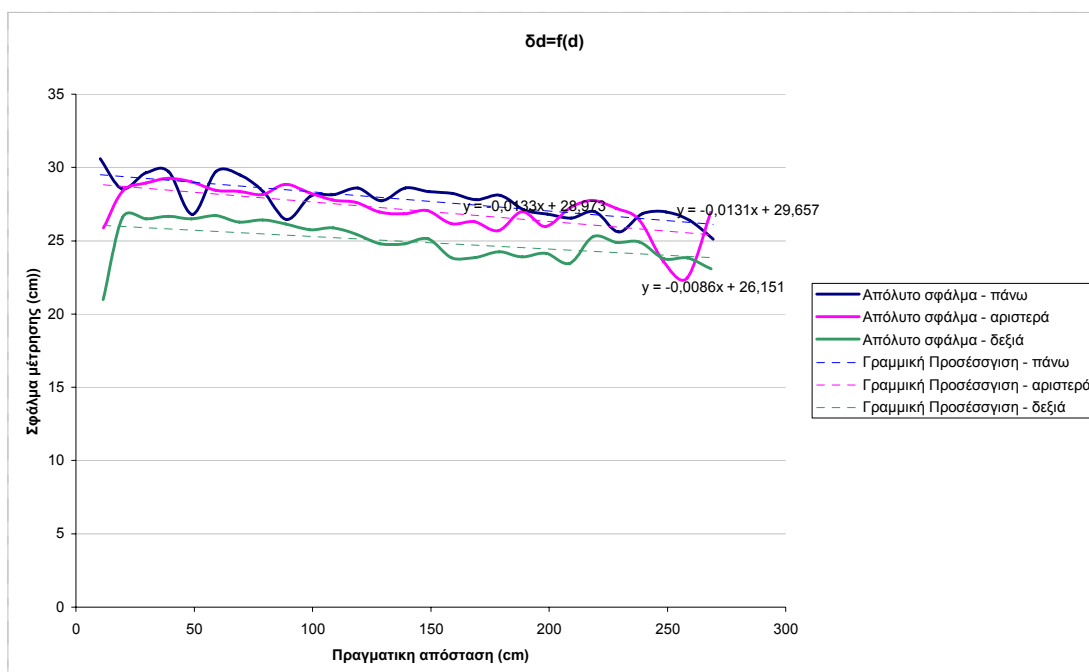
Βλέπουμε πως η εξάρτηση του μέσου σφάλματος είναι κατά πολύ μεγάλη προσέγγιση γραμμική, ενώ οι τρεις καμπύλες, πλέον, πρακτικά συμπίπτουν. Ο λόγος είναι πως πλέον χρησιμοποιούνται ίδιες συχνότητες. Έτσι, οι διαφορές στις μεταβολές των σφαλμάτων οφείλονται στη σχετική θέση των δεικτών. Ο χαρακτηρισμός των διαφορετικών καμπύλων στις γραφικές προκύπτει από την θέση τους, κοιτώντας τους από τον πομπό. Είναι προφανές ότι βασική διαφοροποίηση υπάρχει από τον δέκτη που βρίσκεται στο πάνω μέρος λόγω της γωνίας ανύψωσης. Επιπλέον οι μετρήσεις στις αρχικές αποστάσεις των 10cm έχουν οδηγήσει σε μεγάλο σφάλμα λόγω της ισχύος των ανακλάσεων του προηγούμενου σήματος. Αυτές λόγω της μικρής απόστασης του στόχου εμφανίζονται αρκετά ισχυρές με αποτέλεσμα να συμπίπτουν με το χρονικό παράθυρο δειγματοληψίας της στάθμης αναφοράς και να οδηγούν σε υψηλές τιμές κατωφλίου. Γενικότερα, είναι καλό το σύστημα σε κάθε περίπτωση να λειτουργεί σε απόσταση μεγαλύτερη των 20cm με αυτές τις τιμές του λόγου ενίσχυσης.

Πρέπει να παρατηρηθεί πως στις συνθήκες χαμηλού θορύβου που έγινε το πείραμα, όλες οι μέθοδοι έδειξαν περίπου την ίδια εμβέλεια. Προφανώς η περιοχή εμβέλειας θα διαφοροποιούνταν ανά μέθοδο σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Για τις μετρήσεις, περιοριζόμασταν από το μήκος των βαθμονομημένων δοκών (280cm).

Εφαρμόζοντας τώρα τη μέθοδο του κεντροειδούς εντοπισμού με $k=2,5$ παίρνουμε τα αποτελέσματα της ακόλουθης γραφικής. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια μεγάλη σταθερότητα στην εκτίμηση του μέσου σφάλματος ανεξαρτήτως της απόστασης. Πρέπει να σημειωθεί πως αντίστοιχα μεγάλη σταθερότητα πετύχαμε και με τις μικρές τιμές για το περιθώριο σταθερού κατωφλίου. Σε αυτήν την περίπτωση το μέσο σφάλμα μικραίνει γραμμικά με την απόσταση με σχετικά μικρή κλίση.

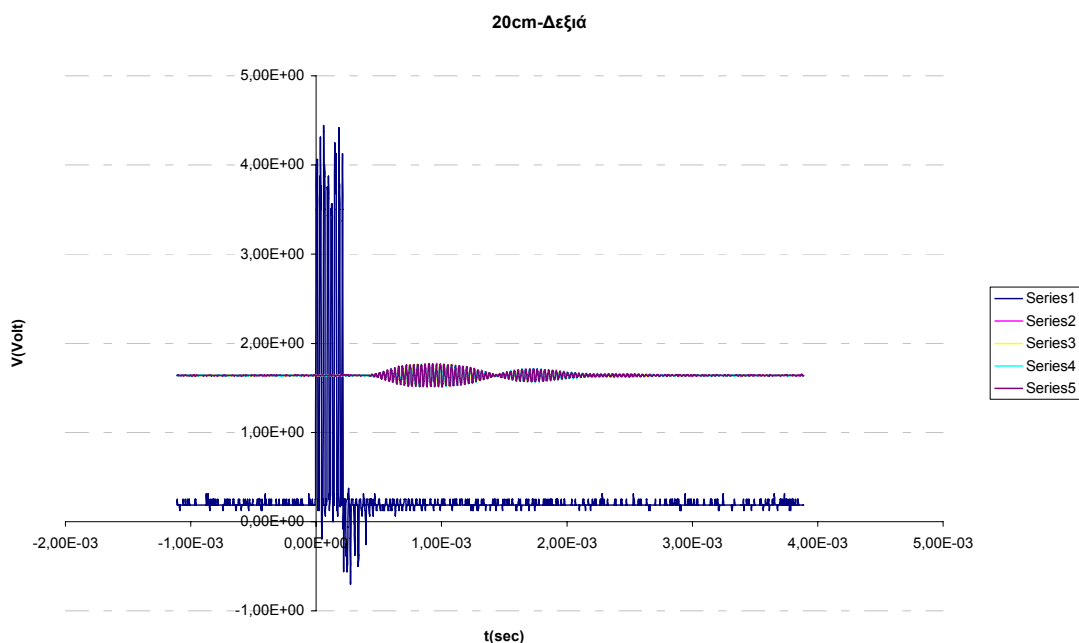


Εικόνα 137: Μέσο σφάλμα εκτίμησης σε συνάρτηση με την απόσταση (3η σειρά πειραμάτων-μέθοδος κεντροειδούς εντοπισμού-μεταβλητό κατώφλι με $k=2,5$)



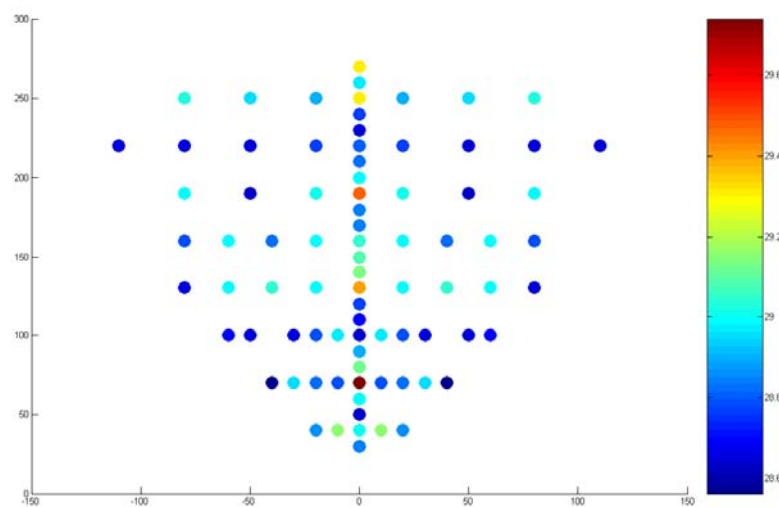
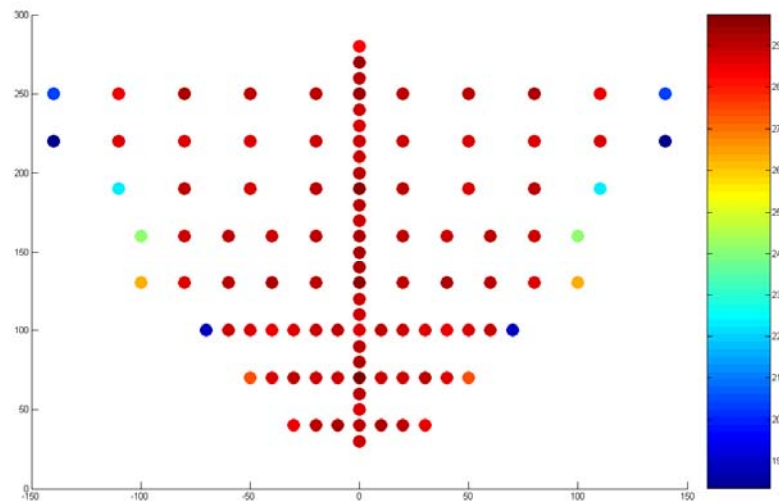
Εικόνα 138: Μέσο σφάλμα εκτίμησης σε συνάρτηση με την απόσταση (3η σειρά πειραμάτων-μέθοδος κεντροειδούς εντοπισμού-περιθώριο καταφλίου $V=40mV$)

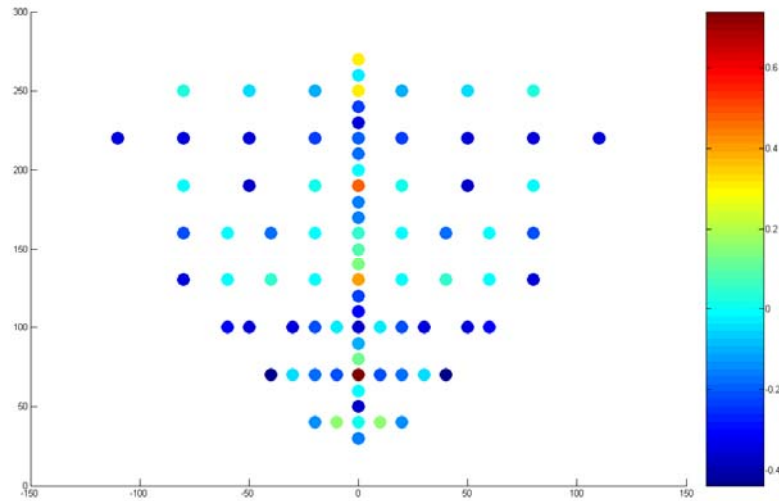
Η ανωμαλία που εμφανίζεται στην κοντινή απόσταση των 10cm οφείλεται σε ανάκλαση (πιθανότατα από τη δοκό), η οποία ενισχυμένη οδηγεί σε λάθος εντοπισμό. Πάλι δηλαδή φαίνεται πως το σύστημα καλύτερα να χρησιμοποιείται για αποστάσεις μεγαλύτερες των 20cm. Ο λόγος της αστοχίας αυτής φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα του ληφθέντος σήματος για αυτήν την απόσταση.



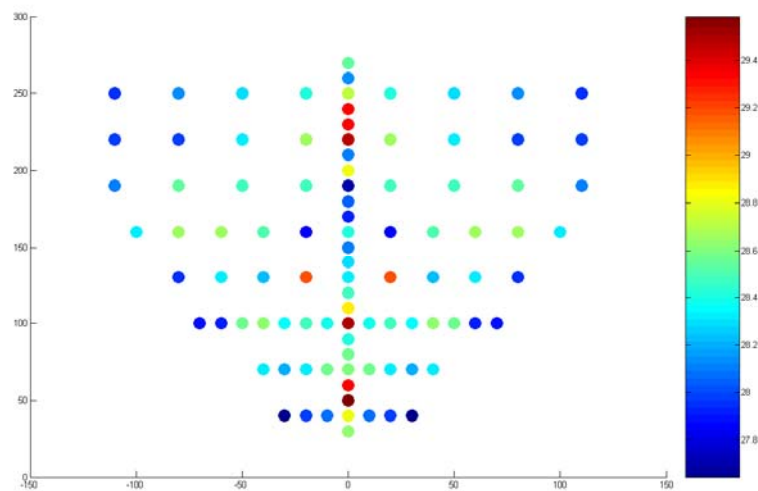
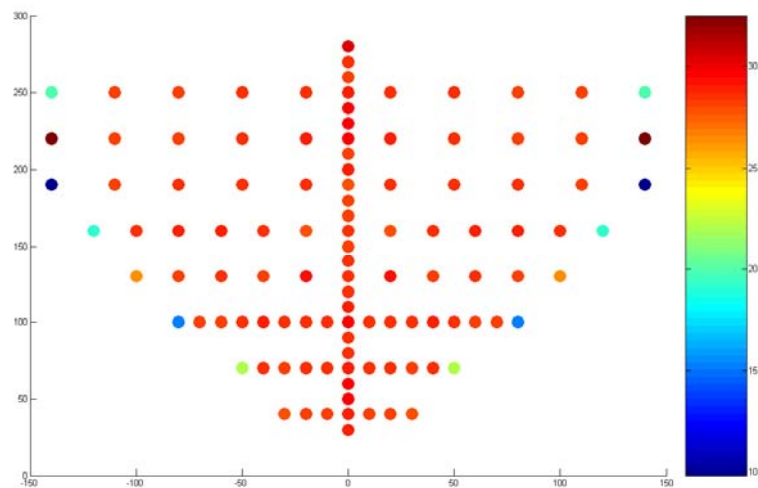
Εικόνα 139: Προβλήματα ανακλάσεων σε πολύ κοντινές αποστάσεις

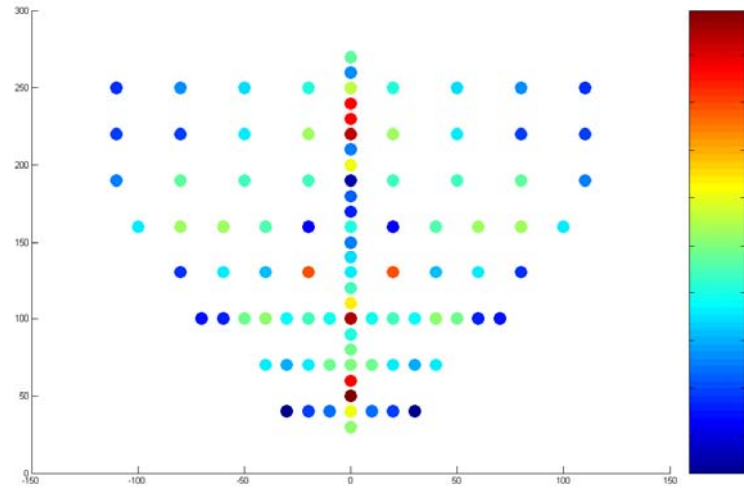
Εξετάζουμε τώρα τη μεταβολή του μέσου σφάλματος ανά θέση μετρήσεων και για τις τρεις θέσεις του δέκτη. Γενικά υπάρχει μία διαφοροποίηση στις απομακρυσμένες περιοχές με μεγάλη γωνία ως προς τον άξονα y . Αυτό προφανώς ισχύει λόγω των μεγάλων απωλειών σε μεγάλες γωνίες εξαιτίας των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Για αυτό το λόγο ουσιαστικά περικόπτουμε την θεωρούμενη περιοχή εμβέλειας για κάθε δέκτη αποκλείοντας τις περιοχές αυτές. Στη συνέχεια ανανεώνουμε τις τρεις εξισώσεις γραμμικής προσέγγισης για τον άξονα $x=0$ αποκλείοντας τα σημεία $(0,280)$ από την περιοχή λειτουργίας. Έτσι προκύπτουν σταθεροί όροι διόρθωσης, 29, 28,6 και 25,982cm για τον πάνω, αριστερό και δεξιό δέκτη αντίστοιχα. Τονίζουμε πως αφαιρέσαμε από τις γραμμικές προσεγγίσεις και το σημείο $(0,20)$. Στις ακόλουθες γραφικές παρουσιάζονται τα μέσα σφάλματα για όλη την περιοχή μετρήσεων, τα μέσα σφάλματα για την επαναπροσδιορισθείσα περιοχή λειτουργίας και τα διορθωμένα μέσα σφάλματα για κάθε θέση αντίστοιχα.



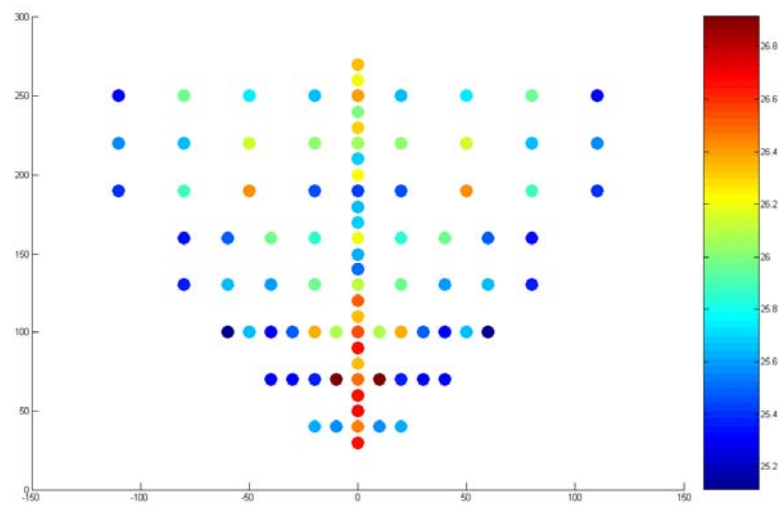
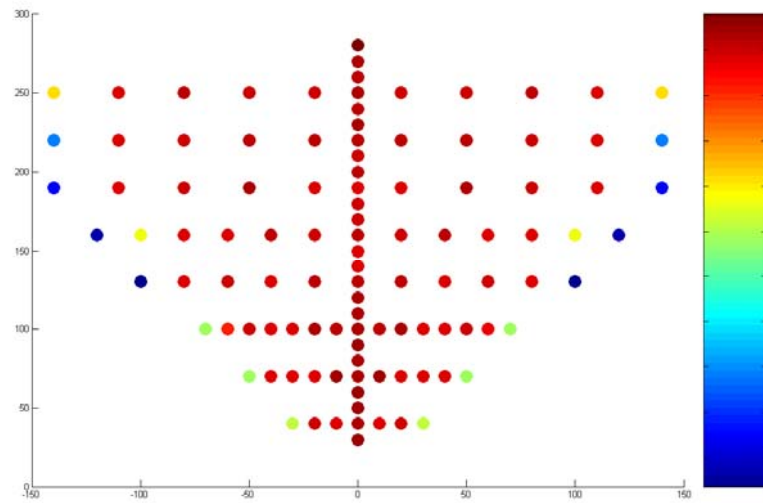


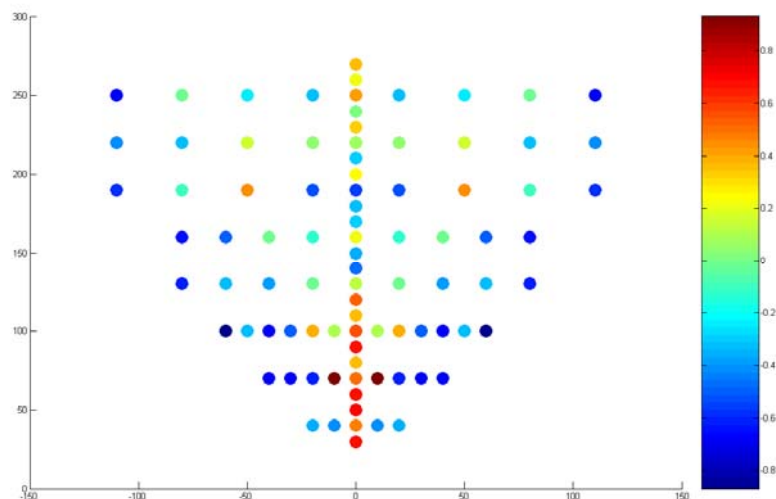
Εικόνα 140: Μεταβολή μέσου σφάλματος εκτίμησης α) περιοχή μετρήσεων β) περιοχή εμβέλειας γ) διόρθωση (3^η σειρά-κεντροειδής-CFAR, $k=2,5$, πάνω δέκτης)





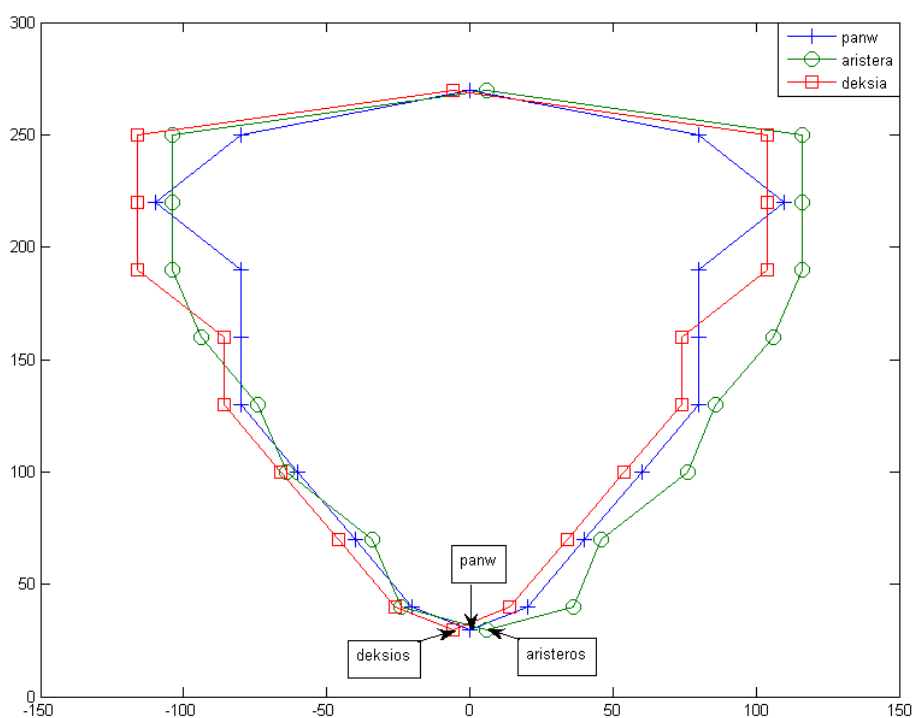
Εικόνα 141: Μεταβολή μέσου σφάλματος εκτίμησης α) περιοχή μετρήσεων β) περιοχή εμβέλειας γ) διόρθωση (3^η σειρά-κεντροειδής-CFAR, $k=2,5$, αριστερός δέκτης)





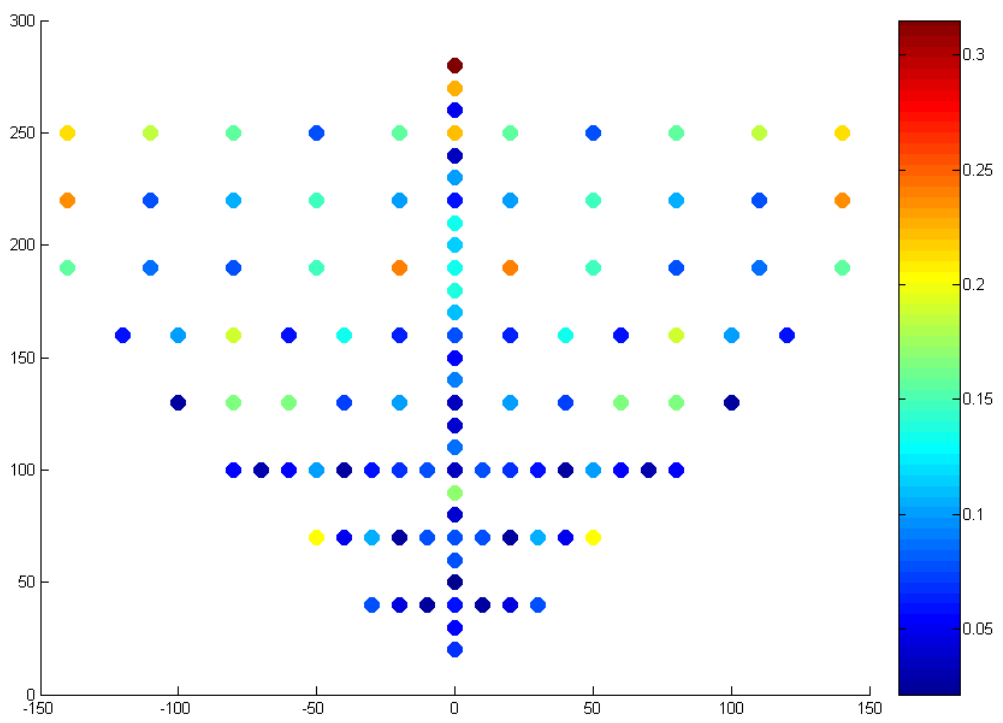
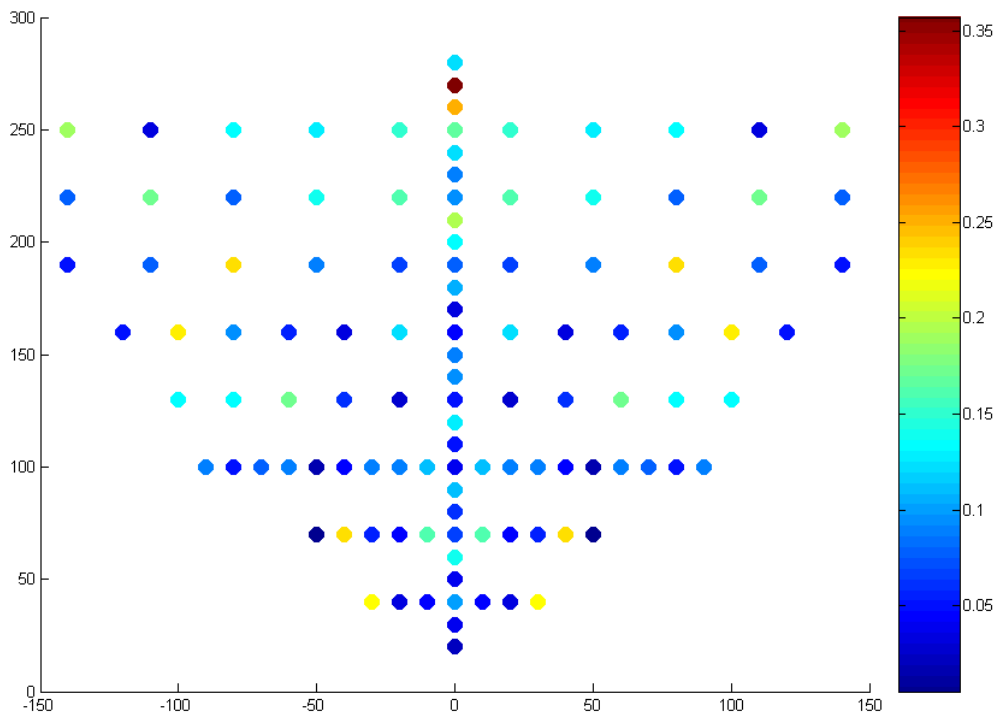
Εικόνα 142: Μεταβολή μέσου σφάλματος εκτίμησης α) περιοχή μετρήσεων β) περιοχή εμβέλειας γ) διόρθωση (3^η σειρά-κεντροειδής-CFAR, $k=2,5$, δεξιός δέκτης)

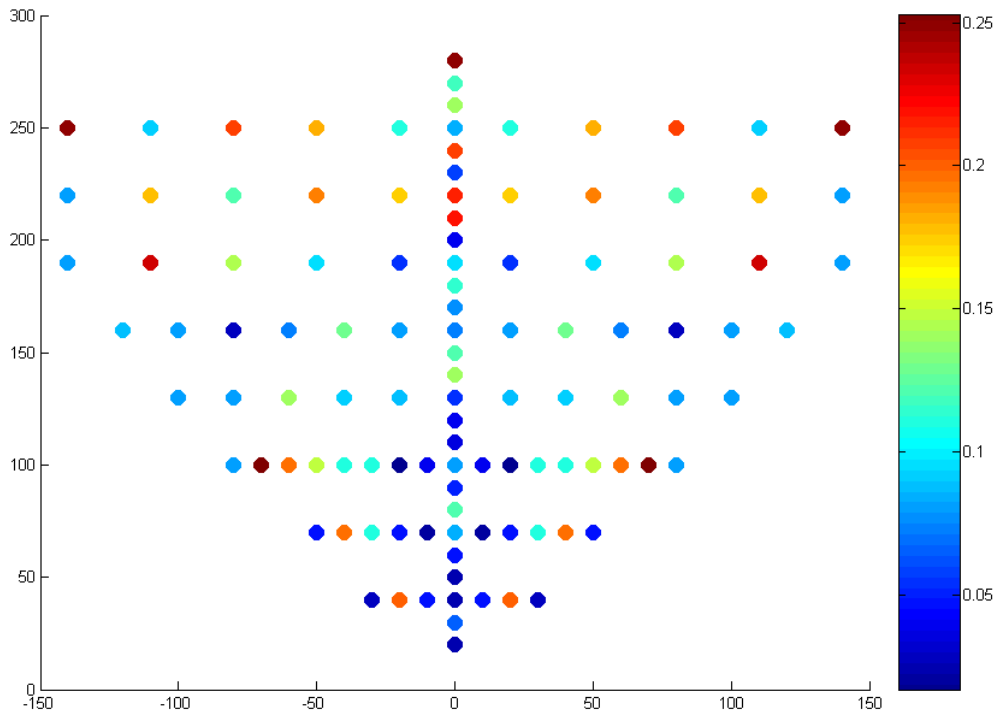
Η εμβέλεια του συνολικού συστήματος είναι η τομή των περιοχών λειτουργίας των επιμέρους πομπών. Αυτές φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα, όπου είναι προφανές πως η περιοχή εμβέλειας φαίνεται μεγαλύτερη για τον αριστερό δέκτη. Ο λόγος είναι σχετικά απλός. Οι μετρήσεις τόσο σε αυτή, όσο και στην πρώτη φάση, έγιναν στο πρώτο τεταρτημόριο των γραφικών παραστάσεων που παρατίθενται και οι τιμές που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν για τα συμμετρικά σημεία ως προς τον άξονα y . Η βαθμονόμηση σε όλες τις γραφικές γίνεται με αποστάσεις πλαισίων πομπού και δεκτών. Έτσι η εμβέλεια που προκύπτει για τον δεξιό δέκτη είναι μικρότερη, μια και οι μετρήσεις ουσιαστικά ήταν σε αποστάσεις μεγαλύτερες απ' ό,τι για τον αριστερό (θυμίζουμε πως ο χαρακτηρισμός της θέσης του δέκτη προκύπτει από τη θέση του καθώς κοιτάμε το σύστημα των δεκτών από τον πομπό – δηλαδή με ανάποδη λογική από αυτή που φαίνεται στο γράφημα εμβέλειας). Η συνολική περιοχή εμβέλειας προκύπτει από τον πομπό που βρίσκεται στην πάνω θέση ουσιαστικά, μια και αυτός είναι στον άξονα $z=0$ όπως και το σημείο αναφοράς μετρήσεων στο σύστημα των δεκτών.



Εικόνα 143: Εμβέλεια επιμέρους δεικτών

Για να επικυρώσουμε τη σωστή λειτουργία διόρθωσης εξετάζουμε τη σταθερότητα των μετρήσεων για τους τρεις δείκτες. Πιο κάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των τυπικών αποκλίσεων των μετρήσεων για διαφορετικές θέσεις και για τους διαφορετικούς δείκτες. Σημειώνεται πως οι τυπικές αποκλίσεις δίνονται για όλη την περιοχή μετρήσεων και όχι για την τελικά επιλεγόμενη περιοχή εμβέλειας. Παρατηρούμε πως οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων σφαλμάτων αυξάνουν λίγο στην περιοχή που ούτως ή άλλως έχει αποκλειστεί από την περιοχή εμβέλειας. Επιπλέον βλέπουμε πως για το δεξιό δείκτη λόγω της ιδιαιτερότητας της θέσης του, όπως περιγράφηκε πιο πάνω, παρατηρείται μία σχετικά ανώμαλη κατανομή των τιμών των τυπικών αποκλίσεων.





Εικόνα 144: Τυπική απόκλιση σφάλματος εκτίμησης α πάνω β αριστερό γ δεξιό δέκτη (3^η σειρά-κεντροειδής-CFAR, $k=2,5$)

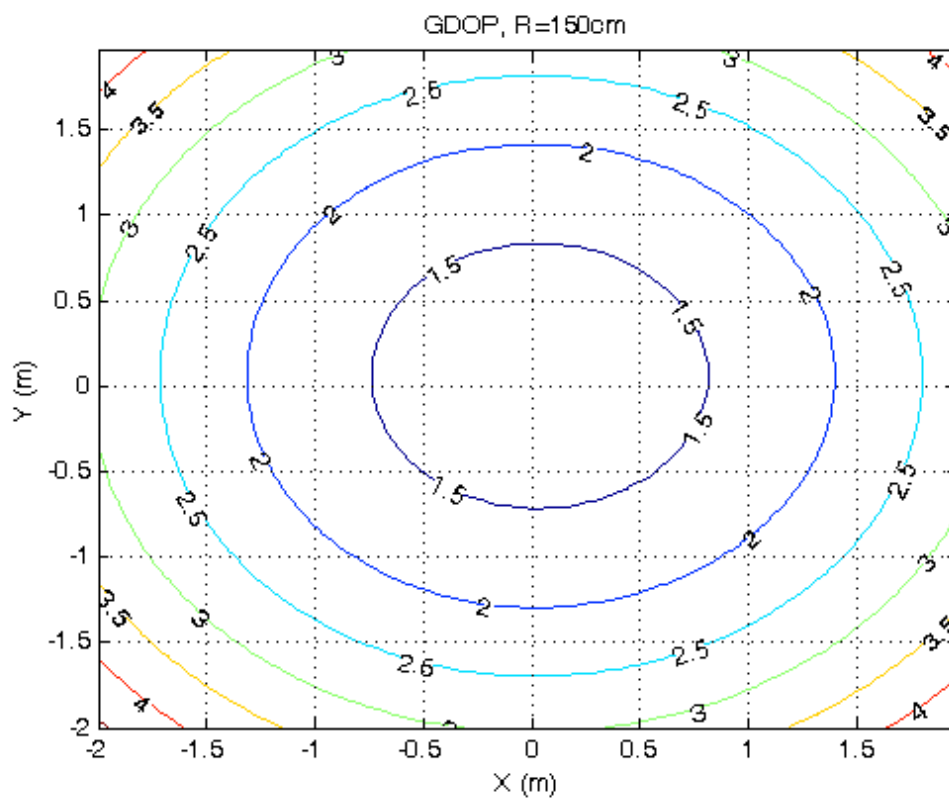
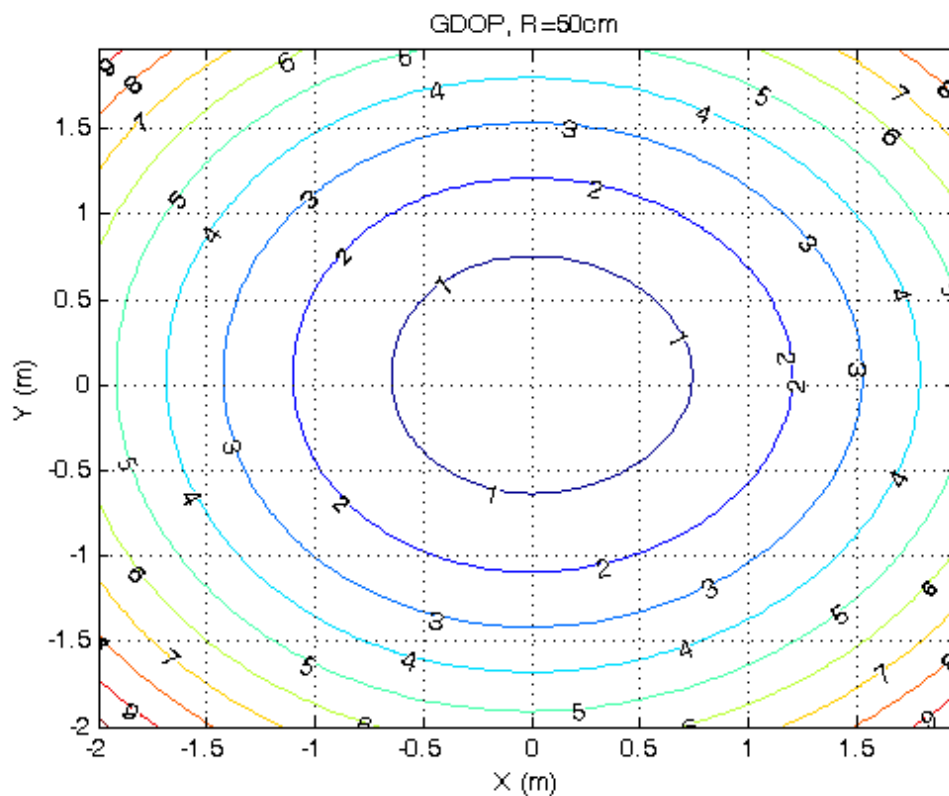
Για την εύρεση των συντεταγμένων του στόχου εφαρμόζεται η μέθοδος της αλγεβρικής επίλυσης. Ο λόγος είναι πως από τις προσομοιώσεις φάνηκε να έχει καλύτερη απόκριση. Δεν υπάρχει ανάγκη επιπλέον εφαρμογής φίλτρων Kalman μια και ο στόχος είναι ακίνητος.

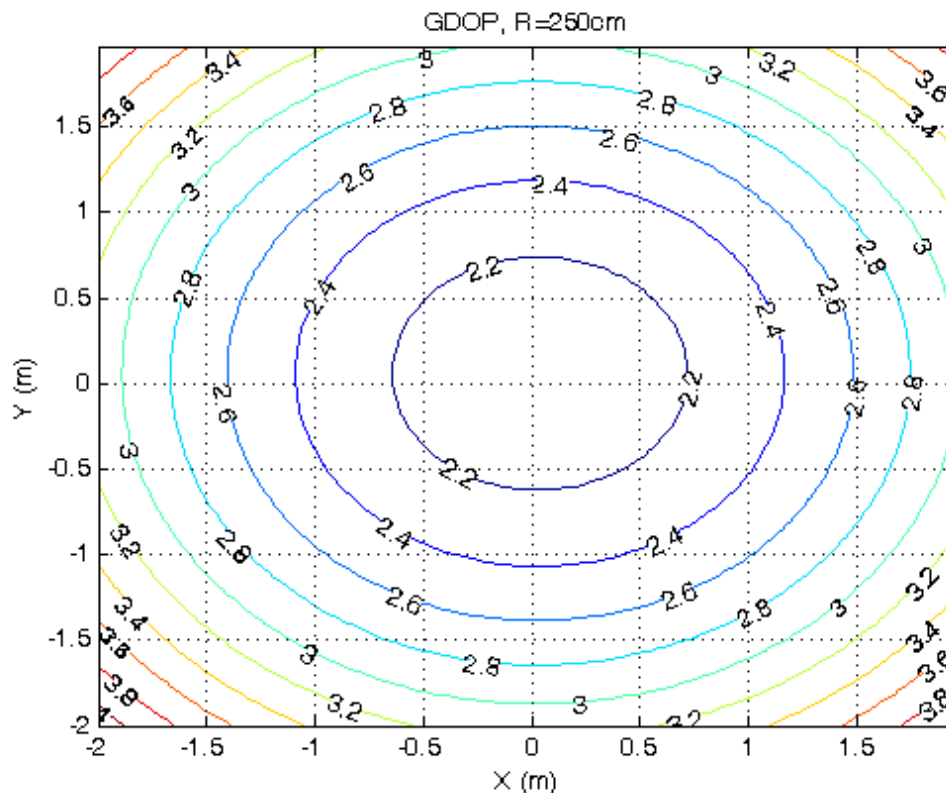
Μέτρο της επιτυχούς απόδοσης της τελικής εκτίμησης θέσης που επιτυγχάνει το σύστημα είναι το μέγεθος που αποκαλείται GDOP (Geometric Dilution Of Precision). Το GDOP ορίζεται από τη σχέση:

$$GDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}}{\sigma} = \frac{\text{ίχνος}(P)}{\sigma},$$

όπου σ θεωρείται η τυπική απόκλιση στην μέτρηση των αποστάσεων από τους τρεις δέκτες, σ_x , σ_y , σ_z οι τυπικές αποκλίσεις της εκτίμησης θέσης του αλγορίθμου τριμεροποίησης για τους άξονες x , y και z αντίστοιχα και P ο πίνακας συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης θέσης του αλγορίθμου. Εφαρμόζοντας τις σχέσεις της παραγράφου 2.3.4, υλοποιήθηκε πρόγραμμα σε MatlabTM για τον υπολογισμό του GDOP σε διάφορες αποστάσεις από το σύστημα των δεικτών. Προφανώς, η ακρίβεια της μεθόδου τριμεροποίησης εξαρτάται από την τυπική απόκλιση των μετρήσεων απόστασης, από τη σχετική θέση του στόχου και από την απόσταση των δεικτών μεταξύ των. Έχοντας επιλέξει τριγωνική διάταξη δεικτών με πλευρά τριγώνου $a=12\text{cm}$ και έχοντας θέσει, σύμφωνα με τα πιο πάνω πειραματικά αποτελέσματα, μέση τυπική απόκλιση μετρήσεων απόστασης

για κάθε δέκτη περίπου 1mm, παίρνουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα προσομοίωσης για απόσταση στόχου από το σύστημα των δεκτών $R=50, 150$ και 250cm αντίστοιχα.





Εικόνα 145: Μεταβολή GDOP για $R=50, 150$ και 250cm (αλγεβρική επίλυση)

Όπως βλέπουμε προφανώς η ακρίβεια της εκτίμησης μειώνεται σχετικά καθώς αυξάνεται η απόσταση πομπού-δεκτών ή καθώς μεγαλώνει η γωνία μεταξύ της ευθείας πομπού-στόχου και του κεντρικού άξονα λήψης των δεκτών. Η ιδιαίτερη επιτυχία του συστήματος στη σημαντική μείωση του σφάλματος εκτίμησης οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στη μεγάλη μείωση του σφάλματος εκτίμησης απόστασης, και κατ' επέκταση της σωστής μεθόδου διόρθωσης μετρήσεων.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων θέσης του στόχου θεωρούμε σύστημα συντεταγμένων με αρχή το σημείο αναφοράς του συστήματος των δεκτών. Θεωρώντας ως x-y το επίπεδο των μετρήσεων, καθορίζουμε τις συντεταγμένες των τριών δεκτών. Έχοντας υλοποιήσει τον αλγόριθμο σε Matlab™ για την αλγεβρική επίλυση του προβλήματος της τριμεροποίησης, εισάγουμε για την κάθε θέση τις μέσες τιμές της μετρούμενης απόστασης μετά τη διόρθωσή τους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, πρέπει να τονιστεί πως, ήταν πολύ ευαίσθητα ως προς τις τιμές των συντεταγμένων των δεκτών. Μια και οι τελευταίοι δεν είναι σημειακοί χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές ώστε να προσδιοριστούν οι θέσεις τους με ακρίβεια χιλιοστού. Οι τελικές τιμές των πραγματικών και εκτιμώμενων συντεταγμένων θέσης, καθώς και οι τιμές των μέσων σφαλμάτων και των τυπικών αποκλίσεων εκτίμησης για την περιοχή λειτουργίας φαίνονται στους δύο πίνακες που ακολουθούν.

Πραγματικές συντεταγμένες x-y-z (cm)			Εκτιμώμενες Συντεταγμένες x-y-z (cm)			Πραγματικές συντεταγμένες x-y-z (cm)			Εκτιμώμενες Συντεταγμένες x-y-z (cm)		
0	6,2	24,3	-0,03	6,02	24,00	13	6,2	64,3	13,72	6,24	64,26
0	6,2	34,3	-0,04	6,01	34,44	23	6,2	64,3	23,86	6,06	64,07
0	6,2	44,3	0,02	6,28	44,16	33	6,2	64,3	33,61	6,39	64,29
0	6,2	54,3	0,01	6,25	54,27	43	6,2	64,3	43,87	6,31	64,29
0	6,2	64,3	-0,04	6,34	64,54	13	6,2	94,3	13,70	6,35	94,19
0	6,2	74,3	-0,04	6,15	74,43	23	6,2	94,3	23,82	6,18	94,03
0	6,2	84,3	-0,07	6,12	84,27	33	6,2	94,3	33,59	6,09	94,09
0	6,2	94,3	-0,06	6,05	94,19	43	6,2	94,3	43,75	6,08	94,24
0	6,2	104,3	-0,06	6,10	104,19	53	6,2	94,3	53,13	6,00	94,11
0	6,2	114,3	-0,22	6,21	114,21	63	6,2	94,3	63,18	6,39	94,13
0	6,2	124,3	-0,28	6,36	124,39	23	6,2	124,3	23,56	6,11	124,20
0	6,2	134,3	-0,17	6,05	134,23	43	6,2	124,3	43,60	6,28	124,10
0	6,2	144,3	-0,25	6,29	144,29	63	6,2	124,3	63,05	6,33	124,14
0	6,2	154,3	-0,35	6,12	154,35	83	6,2	124,3	83,94	6,25	124,11
0	6,2	164,3	-0,36	6,19	164,21	23	6,2	154,3	23,41	6,06	154,22
0	6,2	174,3	-0,34	6,20	174,24	43	6,2	154,3	43,94	6,26	154,26
0	6,2	184,3	-0,39	6,36	184,51	63	6,2	154,3	63,30	6,01	154,28
0	6,2	194,3	-0,32	6,23	194,28	83	6,2	154,3	83,39	6,09	154,23
0	6,2	204,3	-0,40	6,16	204,33	23	6,2	184,3	23,76	6,12	184,25
0	6,2	214,3	-0,02	6,04	214,09	53	6,2	184,3	53,16	6,25	184,24
0	6,2	224,3	-0,18	6,05	224,07	83	6,2	184,3	83,61	6,13	184,07
0	6,2	234,3	-0,04	6,31	234,37	23	6,2	214,3	23,12	6,16	214,16
0	6,2	244,3	-0,33	6,05	244,48	53	6,2	214,3	53,19	6,02	214,23
0	6,2	254,3	-0,72	6,33	254,44	83	6,2	214,3	83,74	6,01	214,21
0	6,2	264,3	-0,62	6,10	264,56	113	6,2	214,3	113,36	6,38	214,11
13	6,2	34,3	13,22	6,32	34,27	23	6,2	244,3	23,04	6,09	244,13
23	6,2	34,3	23,50	6,16	34,17	53	6,2	244,3	53,50	6,06	244,20

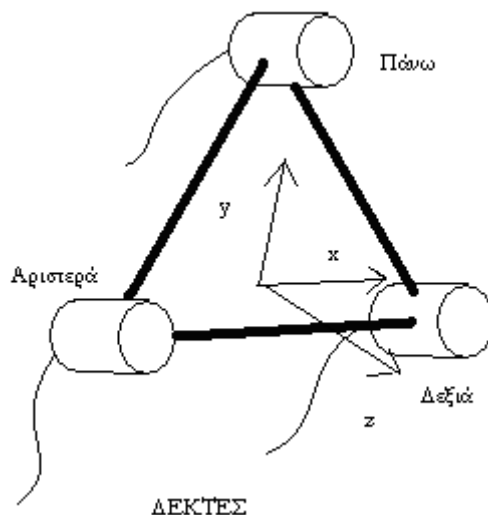
Πίνακας 14: Αποτελέσματα μετρήσεων για τις συντεταγμένες του στόχου

$E\{\delta x\}$ (cm)	$E\{\delta y\}$ (cm)	$E\{\delta z\}$ (cm)
-0,18	0,02	0,07
σ_x (cm)	σ_y (cm)	σ_z (cm)
0,432631	0,120625	0,131753

Πίνακας 15: Τελικά αποτελέσματα μέσω σφάλματος εκτίμησης

Πρέπει να κάνουμε δύο παρατηρήσεις: α) η υψηλότερη ακρίβεια του συστήματος οφείλεται σε δύο κατά βάση παράγοντες και πιο συγκεκριμένα, στην πολύ καλή ακρίβεια στον υπολογισμό των

αποστάσεων αλλά και στην ιδιαίτερα προσεκτική καταγραφή των σταθερών συντεταγμένων των δεκτών σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων. Απόκλιση των τελευταίων κατά τρία χιλιοστά αυξάνει το μέσο σφάλμα εκτίμησης για τους άξονες x και y κατά έναν παράγοντα του δύο περίπου. Δεύτερον είναι αξιοσημείωτο να παρατηρήσουμε τη μεγαλύτερη διακύμανση του σφάλματος στον άξονα x . Θυμίζουμε πως για τις μετατοπίσεις σε αυτόν τον άξονα χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη δοκός που συνδεόταν με την πρώτη. Η σύνδεση σε κάποια από τα σημεία παρουσίαζε μία ανεπιθύητη κλίση, αποτέλεσμα της οποίας είναι η αύξηση του σφάλματος σε αυτόν τον άξονα.



Εικόνα 146: Σύστημα συντεταγμένων τελικών μετρήσεων

Έχοντας ολοκληρώσει και αυτή τη μέτρηση μπορούμε να δώσουμε τις τελικές προδιαγραφές του συστήματος.

	Αρχική απαίτηση	Τελική προδιαγραφή
Ακρίβεια του συστήματος	<1cm	<0,3cm
Χώρος εμβέλειας:	Προσεγγιστικά κύβος διάστασης 2x2x2m	Κώνος με ύψος (d) και γωνία βάσης για $f=25\text{kHz}$, $15 < d < 295$, 65° $f=33\text{kHz}$, $15 < d < 265$, 59° $f=40\text{kHz}$, $15 < d < 275$, 98°
Δυνατότητα εντοπισμού	χεριού, κεφαλιού (όχι ταυτόχρονα)	Καλύτερη εφαρμογή για εντοπισμό κεφαλιού
Καθυστέρηση	< 50ms	<9,7ms ¹

¹ Οι μετρήσεις ανανεώνονται ανά 10ms και τα δεδομένα επεξεργάζονται σε πραγματικό χρόνο. Για μικρές αποστάσεις η καθυστέρηση είναι σαφώς μικρότερη. Η καθυστέρηση αυξάνει σημαντικά σε περίπτωση απώλειας οπτικής συνιστώσας.

	Αρχική απαίτηση	Τελική προδιαγραφή
βαθμοί ελευθερίας	3 ή 6	3 (με δυνατότητα αύξησης σε 6)
Ρυθμός ανανέωσης δεδομένων	>60Hz	Ως και 100Hz
Άλλη	Μικρό βάρος, αυξημένη χρησιμότητα	Βάρος χωρίς κάλυμμα <100gr

Πίνακας 16: Τελικές προδιαγραφές συστήματος

Οι προδιαγραφές του τελικού συστήματος μπορούν να θεωρηθούν πέραν του δέοντος ικανοποιητικές, όπως μπορεί να φανεί σε σύγκριση με τον πίνακα αποδόσεων των περισσότερων ερευνητικών ή εμπορικών συστημάτων.

4.3.2 Μετρήσεις με κινούμενο στόχο

Έως τώρα έχουμε αποδείξει την αποδοτικότητα του συστήματος εντοπισμού και την ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια που επιτυγχάνει στον εντοπισμό της θέσης του στόχου. Η τελευταία σειρά πειραμάτων εξετάζει την παρακολούθηση, από το σύστημα, κινούμενων στόχων. Πιο συγκεκριμένα, ο πομπός του συστήματος προσαρμόστηκε σε κινούμενα αντικείμενα (διάταξη πλέον «έξω-μέσα»), στην περιοχή εμβέλειας του συστήματος, και εκτελώντας μια σειρά από κινήσεις εξετάστηκε η επιτυχής παρακολούθησή της πορείας του από το σύστημα. Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι, σκοπός του πειράματος είναι η εξακρίβωση της δυνατότητας του συστήματος να παρακολουθήσει την πορεία του στόχου και η εφαρμογή του φίλτρου IMM σε αντιπαράθεση με την απλή αλγεβρική μέθοδο επίλυσης που εξετάστηκε ως εδώ. Προς τούτο, σε αυτήν τη σειρά μετρήσεων δεν εκτελούμε εξαντλητικές μετρήσεις απόστασης στόχου (προς τούτο αλλάζει και η συνδεσμολογία σε «έξω-μέσα»). Αντιθέτως, θέτουμε το στόχο σε μια σειρά κινήσεων και παρακολουθούμε την επίδοση του συστήματος ως προς αυτές.

Ο μετρητικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν εξαιρετικά απλοϊκός. Υλοποιήθηκαν δύο ειδών κινήσεις: κυκλικές και ευθύγραμμες. Για την πραγματοποίηση αυτών, αρχικά το σύστημα του πομπού στερεώθηκε σε σχοινί προσαρτημένο στο ταβάνι, προσομοιώνοντας την κίνηση εκκρεμούς. Εντούτοις, μια και το βάρος και η διάταξη του πομπού είναι τέτοια που οδηγεί σε τυχαίες παλινδρομικές κινήσεις, τελικά εκτελέσαμε τις κινήσεις υποβοηθώντας αυτές χειρονακτικά και προσομοιώνοντας την κίνηση ενός εκκρεμούς. Ακολούθως, προσαρμόστηκε το σύστημα του πομπού σε τηλεχειριζόμενο ηλεκτρονικό αυτοκίνητο (ένα απλό παιδικό παιχνίδι) το οποίο εκτέλεσε μια σειρά κινήσεων. Το αυτοκίνητο διαθέτε δυνατότητα προγραμματισμένων κινήσεων, αλλά δεν ήμασταν σε θέση να επιτελέσουμε απολύτως ελεγχόμενες κινήσεις λόγω των ιδιόρρυθμων χαρακτηριστικών της πειραματικής διάταξης.

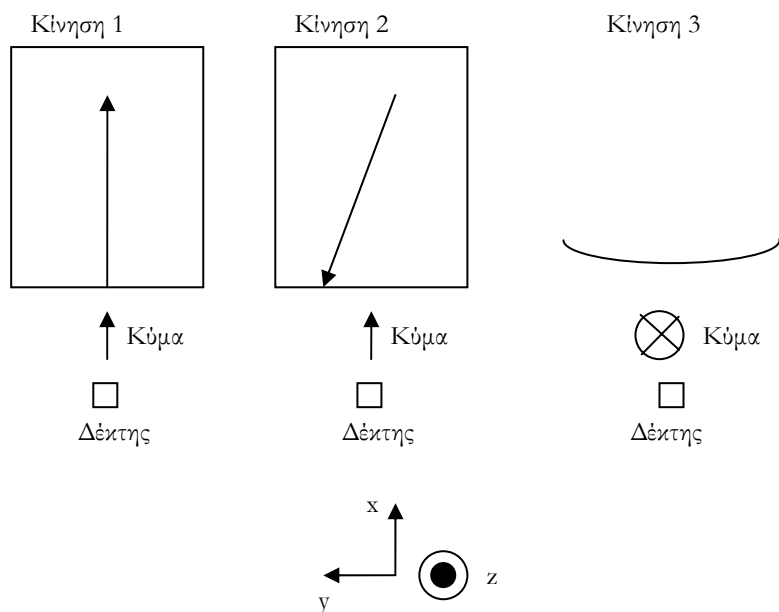


Εικόνα 147: Φωτογραφίες διατάξεων μετρήσεως κινούμενου στόχου

Οι διαφορετικές κινήσεις που έγιναν αναλύθηκαν με τη μέθοδο του κεντροειδούς εντοπισμού με μεταβλητό κατώφλι ($V_{thres2} = V_{thres3} = V_{ref} + 2,5 \cdot V_{noise}^{RMS}$). Για την τριμεροποίηση χρησιμοποιήθηκε η αλγεβρική μέθοδος, ενώ σε μερικές από τις κινήσεις εφαρμόστηκε και το IMM φίλτρο με είσοδο τα αποτελέσματα της αλγεβρικής μεθόδου, και με τις παραμέτρους των φίλτρων που προέκυψαν από τη φάση των προσομοιώσεων.

Εξετάζουμε τρεις από τις κινήσεις που έγιναν μια και αυτές έδωσαν τα πιο χαρακτηριστικά αποτελέσματα. Οι κινήσεις αυτές είναι:

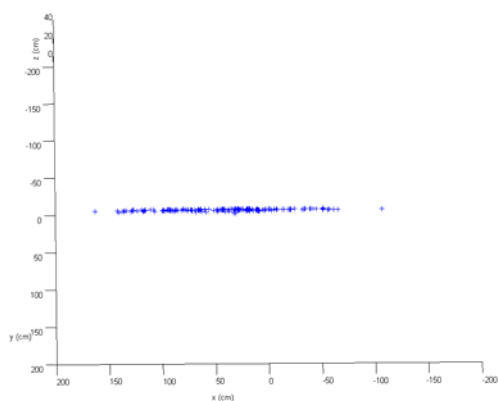
1. οριζόντια ευθύγραμμη κίνηση σε επίπεδο κάθετο στο επίπεδο του συστήματος των δεκτών και σε διεύθυνση παράλληλη ως προς τον άξονα συμμετρίας του συστήματος
2. οριζόντια ευθύγραμμη κίνηση σε επίπεδο κάθετο στο επίπεδο του συστήματος των δεκτών και σε διεύθυνση υπό γωνία με τον άξονα συμμετρίας του συστήματος
3. τμήμα προσεγγιστικά κυκλικής κίνησης σε επίπεδο προσεγγιστικά παράλληλο στο επίπεδο των δεκτών.



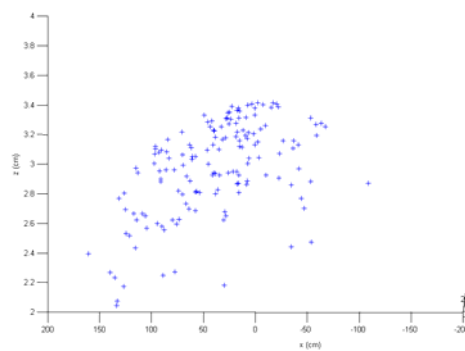
Εικόνα 148: κινήσεις του στόχου κατά το πείραμα

Οι οριζόντιες κινήσεις πραγματοποιήθηκαν με το αυτοκίνητο ενώ η κυκλική με το προσεγγιστικό εκκρεμές. Οι κινήσεις του αυτοκινήτου ήταν αρχικά ομαλά επιταχυνόμενες και στη συνέχεια ομαλά επιβραδυνόμενες. Η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα του αυτοκινήτου ήταν περίπου 3m/s.

Για την πρώτη εκ των τριών κινήσεων (κίνηση στο επίπεδο xy με διεύθυνση προς τα θετικά του x) τα αποτελέσματα φαίνονται στις ακόλουθες γραφικές.



Εικόνα 149: Εκτίμηση θέσης-επίπεδο xy-1η κίνηση1

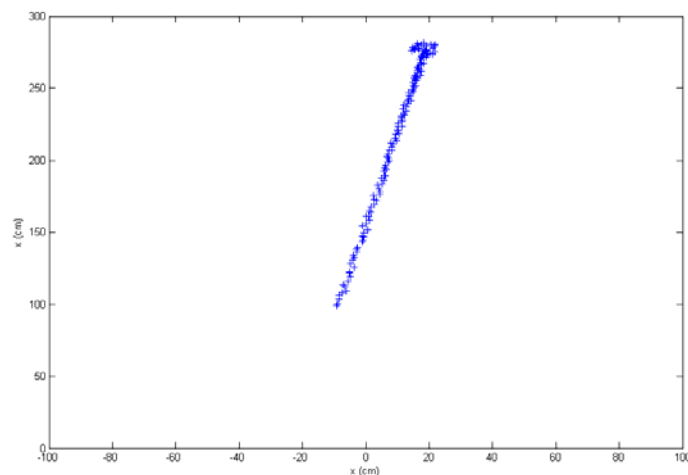


Εικόνα 150: Εκτίμηση θέσης-επίπεδο xz-1η κίνηση

¹ Έγινε αναγωγή του συστήματος συντεταγμένων μόνο για τη γραφική αυτή ως προς το κέντρο της περιοχής εκτέλεσης της κίνησης

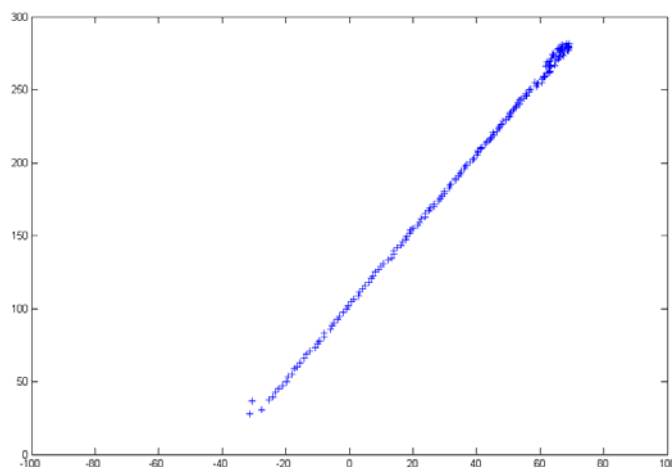
Όπως φαίνεται το σύστημα εκτίμησε ικανοποιητικότερα την πορεία του στόχου. Δεν έχει νόημα να εξετάσουμε την απόκλιση των μετρήσεων από μια ιδανική ευθεία μια και η κίνηση δεν είναι απολύτως ελεγχόμενη και κατ' επέκταση ούτε ιδανική ευθεία. Παρατηρούμε πως υπάρχει μια μικρή μεταβολή στις εκτιμήσεις για τη συντεταγμένη z του στόχου, η οποία ιδανικά θα παρέμενε σταθερή μια και η κίνηση γίνεται στο xy επίπεδο. Ο λόγος είναι μια μικρή αστάθεια που υπάρχει στη στερέωση του συστήματος στο αυτοκίνητο η οποία προκαλεί μικροκινήσεις σε αυτόν τον άξονα. Εφαρμόζοντας το IMM φίλτρο παίρνουμε την ίδια γενικά εκτίμηση για την κίνηση στο xy επίπεδο, ενώ βελτιώνεται μερικώς η εκτίμηση για τη συντεταγμένη z .

Για τη δεύτερη κίνηση ο στόχος τοποθετήθηκε αρχικά στα όρια της εμβέλειας του συστήματος και στη συνέχεια εκτέλεσε ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση με διεύθυνση που σχημάτιζε μικρή γωνία ως προς τον κάθετο άξονα του συστήματος των δεκτών (άξονας x στην Εικόνα 148). Η καταγραφή των μετρήσεων ξεκίνησε από τη θέση ακινησίας του στόχου. Η προβολή των συντεταγμένων στο επίπεδο κίνησης φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 151: Εκτίμηση θέσης-επίπεδο xy -2^η κίνηση

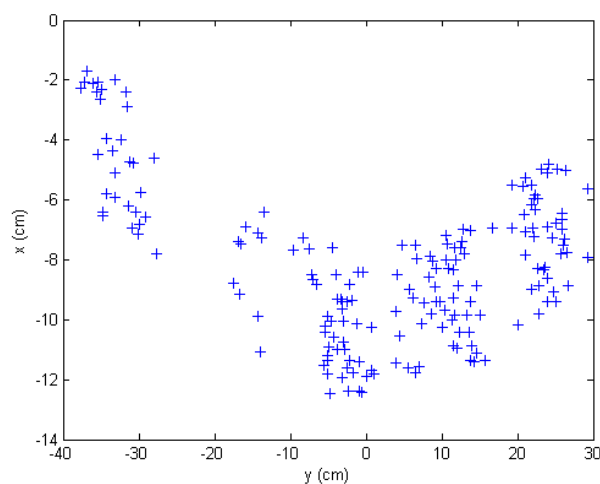
Όπως βλέπουμε, το σύστημα παρακολουθεί και καταγράφει με αρκετά μεγάλη ακρίβεια την πορεία του στόχου. Παρατηρούμε πως στη θέση ακινησίας υπάρχει μια σχετική απόκλιση στον εντοπισμό των ακριβών συντεταγμένων. Αυτό αναμένεται, μια και το σύστημα είναι πρακτικά εκτός της εμβέλειάς του. Για να διαπιστώσουμε την ακρίβεια αυτής της παρατήρησης διεξάγουμε μία παρόμοια κίνηση με λίγο μεγαλύτερη κλίση ώστε ο στόχος να εισέλθει και να εξέλθει της περιοχής εμβέλειας. Οι εκτιμώμενες θέσεις στο επίπεδο xy φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Τόσο στην αρχή, όσο και στο τέλος της κίνησης (είσοδος και έξοδος από την περιοχή εμβέλειας) παρατηρούνται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις ενώ προς το τέλος της μέτρησης το σύστημα δεν είναι σε θέση να εντοπίζει το στόχο.



Εικόνα 152: Εκτιμώμενη θέση-επίπεδο xy-κίνηση 2β

Οι εκτιμήσεις της θέσης ως προς τη συντεταγμένη z του στόχου έδωσαν παραπλήσια αποτελέσματα με την προηγούμενη περίπτωση, το ίδιο και η χρήση του IMM φίλτρου.

Η τρίτη διαδοχική κίνηση του πειράματος ήταν ένα τμήμα κυκλικής κίνησης σε τόξο περίπου 50° , ακτίνας περίπου 1m. Η κίνηση αρχικά σχεδιάστηκε να εκτελεστεί προσαρμόζοντας κατάλληλα το στόχο ώστε να λειτουργήσει ως εκκενρές. Αυτό δεν ήταν δυνατό λόγω της αστάθειας της κατασκευής του στόχου και της άνισα κατανεμημένης μάζας του. Έτσι η κίνηση υποβοηθήθηκε από το συγγραφέα ώστε να προσομοιώνει κατά το δυνατό την κίνηση του εκκενρούς. Προφανώς η κίνηση δεν ήταν ακριβώς τμήμα κυκλικής τροχιάς, ούτε έγινε σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης των ακουστικών κυμάτων αλλά στον τρισδιάστατο χώρο. Στο ακόλουθο σχήμα βλέπουμε τις προβολές των συντεταγμένων των εκτιμώμενων θέσεων του στόχου σε ένα επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης των ακουστικών κυμάτων και σε απόσταση προσεγγιστικά ίση με την κάθετη απόσταση μεταξύ πομπού και επιπέδου δεικτών.

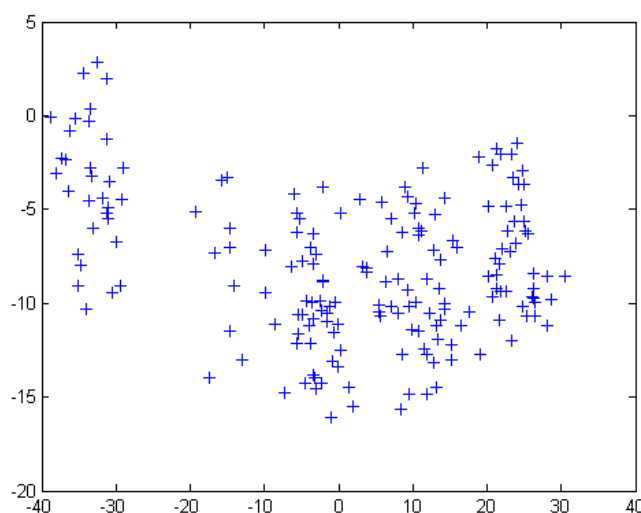


Εικόνα 153: Εκτιμώμενη θέση-επίπεδο xy-3^η κίνηση

Όπως βλέπουμε, υπάρχει μια σαφέστατα χειρότερη εκτίμηση της πορείας του στόχου. Εντούτοις, η προσέγγιση παραμένει καλή. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις οφείλονται σε διάφορους παράγοντες, από τους οποίους οι κυριότεροι είναι:

1. η μη σταθερή δύναμη που μετακινούσε το στόχο
2. το μη σταθερό επίπεδο κίνησης, που δεν μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε με ακρίβεια τις πραγματικές θέσεις του στόχου
3. τυχόν στροφές του στόχου κατά τη διάρκεια της κίνησης, ιδίως στις οριακές θέσεις, που είχαν ως αποτέλεσμα ο στόχος να έχει προσανατολισμό γωνίας αρκετών μοιρών σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας των δεκτών

Εφαρμόζοντας στα ίδια αποτελέσματα μετρήσεων το φίλτρο IMM πήραμε σαφέστατα χειρότερα αποτελέσματα. Ο λόγος είναι προφανώς η αποτυχία του φίλτρου στη εκτίμηση της θέσης του στόχου όταν αυτός εκτελεί τρισδιάστατη κυκλική κίνηση, όπως είδαμε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε πιο πάνω παράγραφο.



Εικόνα 154: Εκτίμηση θέσης με χρήση του IMM-επίπεδο xy -3^η κίνηση

Προφανώς, για να εκτιμηθεί καλύτερα η απόδοση του συστήματος απαιτούνται και πολλά ακόμα πειράματα με κινούμενο στόχο με πιο οργανωμένες συνθήκες. Τα πειράματα που αναλύθηκαν εδώ δείχνουν την πολύ καλή ικανότητα εκτίμησης του συστήματος για την πορεία του στόχου. Οι μεταβολές του μέσου σφάλματος εκτίμησης και οι διακυμάνσεις αυτού σε σχέση με την κίνηση του στόχου και την πορεία του είναι ένα κομμάτι που χρήζει αρκετής επιπλέον ανάλυσης.

4.4 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ-ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η σειρά των πειραμάτων που έγινε κατέδειξαν τις κατάλληλες παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος. Προτείνεται, τελικά, η λειτουργία ενός συστήματος με τρεις βαθμούς ελευθερίας σε τοπολογία «μέσα-έξω», με χρήση τριών δεκτών που σχηματίζουν ισόπλευρο τρίγωνο πλευράς,

προσεγγιστικά, 12cm. Η εκτίμηση των αποστάσεων πομπού και δέκτη γίνεται με χρήση της μεθόδου του κεντροειδούς εντοπισμού. Για τον προσδιορισμό του κατωφλίου εφαρμόζεται η μέθοδος σταθερού ρυθμού εσφαλμένων συναγεργμών (CFAR), με δειγματοληψία του επιπέδου θορύβου ανά εκπεμπόμενο παλμό. Οι προδιαγραφές αυτές επιτρέπουν την αύξηση της περιοχής λειτουργίας του συστήματος σε σχέση με την εφαρμογή σταθερής τιμής κατωφλίου. Για τον αλγόριθμο τριμεροποίησης προτείνεται η εφαρμογή της αλγεβρικής μεθόδου επίλυσης που αναλύθηκε στη διατριβή.

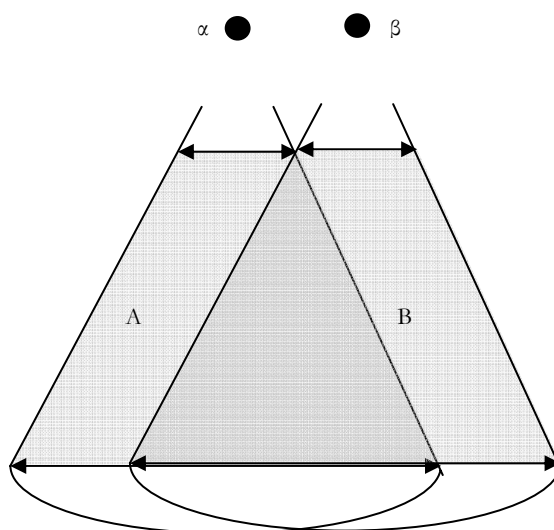
Το σύστημα λειτουργεί με ικανοποιητικότητα ακρίβεια εκτίμησης θέσης στην περιοχή εμβέλειας του αλλά αντιμετωπίζει και μια σειρά προβλημάτων που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Τα προβλήματα αυτά αναλύονται ακολούθως σε συνδυασμό με πιθανές προεκτάσεις του συστήματος:

– Αύξηση περιοχής εμβέλειας

Η περιοχή εμβέλειας του συστήματος καθορίζεται κυρίως από την ισχύ του εκπεμπόμενου σήματος. Για να αυξήσουμε την ισχύ εκπομπής θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε πομπό με μεγάλο άνοιγμα διαφράγματος. Αυτό όμως θα προκαλέσει ελάττωση της γωνίας 6-db του πομπού με αποτέλεσμα το μικρότερο εύρος γωνίας της περιοχής εμβέλειας και, άρα, τη μικρότερη δυνατότητα κινήσεων του χρήστη. Επομένως, η εμβέλεια του συστήματος με χρήση μιας απλής τριάδας δεκτών δεν δύναται να αυξηθεί ιδιαίτερα.

Μία λύση αποτελεί η ταυτόχρονη χρήση διαφορετικών δεκτών στο χώρο, ώστε ο συνολικός χώρος εμβέλειας του συστήματος να αποτελεί ένα κυψελωτό σύστημα, κατ' ακολουθία των κυψελωτών συστημάτων της κινητής τηλεφωνίας [SOWI93].

Θεωρούμε μία διάταξη όπου διάφοροι πομποί είναι διατεταγμένοι στο ίδιο επίπεδο σε σταθερά σημεία ενώ οι δέκτες σε τριγωνική διάταξη, προσαρμοσμένοι στο στόχο. Ονομάζοντας κυψέλες Α και Β τις (γωνιές) περιοχές εμβέλειας των διαδοχικών πομπών (α) και (β) αντίστοιχα, η εικόνα των κυψελών Α-Β θα είναι αυτή του ακόλουθου σχήματος .



Εικόνα 155: Κυψελωτή δομή συστήματος

Θεωρώντας πολλούς πομπούς σε αποστάσεις d μεταξύ τους δημιουργείται κυψελωτό σύστημα, για το οποίο η μεγαλύτερη κάλυψη επιτυγχάνεται αν $d = \sqrt{3}r/2$, όπου r η μέγιστη ακτίνα κάλυψης της μίας κυψέλης. Οι γειτονικές κυψέλες μπορούν να διαθέτουν πομπούς στις ίδιες ή διαφορετικές συχνότητες εκπομπής. Στη δεύτερη περίπτωση προφανώς απαιτούνται δέκτες διαφορετικών συχνοτήτων στο στόχο. Στην πρώτη, αντίθετα, περίπτωση πομποί που ανήκουν σε διαφορετική κυψέλη δεν μπορούν να εκπέμπουν ταυτόχρονα λόγω παρεμβολής μεταξύ τους. Μια μονάδα ελέγχου αναλαμβάνει, γνωρίζοντας κάθε φορά τη θέση του στόχου – άρα και την κυψέλη στην οποία ανήκει – να διεγείρει τον κατάλληλο πομπό και να κάνει τους λοιπούς πομπούς να σιγήσουν.

Το σύστημα πρέπει να γνωρίζει τους πίνακες μετατροπής συστήματος συντεταγμένων κατά την αλλαγή κυψέλης. Ένας τρόπος είναι να μετρηθούν με ακρίβεια οι θέσεις όλων των πομπών ως προς τον πομπό μιας κυψέλης αναφοράς, μέθοδος που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά συστηματικά σφάλματα. Ένας δεύτερος τρόπος είναι το να τοποθετηθεί ο στόχος στην περιοχή επικάλυψης δύο γειτονικών κυψελών. Υπολογίζοντας το διάνυσμα κατάστασης του στόχου (x, y, z) ως προς τις κυψέλες A και B , έστω D_A, D_B αντίστοιχα, βρίσκουμε τον πίνακα μετασχηματισμού συντεταγμένων από την B στην A , τον T_{AB} , από τη σχέση $D_A = T_{AB}D_B \Leftrightarrow T_{AB} = D_AD_B^{-1}$. Έτσι το διάνυσμα κατάστασης στην κυψέλη B μπορεί να ανάγεται στο αντίστοιχο της A . Όμοια, προκύπτει $T_{AG} = T_{AB}T_{BG} = D_AD_B^{-1}D_G^{-1}$.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη χρονική στιγμή που θα αποφασιστεί η διαπομπή του στόχου σε γειτονική κυψέλη. Γνωρίζοντας τη θέση, ταχύτητα και ίσως επιτάχυνση του στόχου, ένα είδος πρόβλεψης (διάνυσμα εκτίμησης) για τη μελλοντική του θέση απαιτείται ώστε να αποφασιστεί η διαπομπή. Σε κάθε περίπτωση η χρήση μιας χρονικής υστέρησης επιβάλλεται για να αποφευχθούν φαινόμενα διαδοχικών διαπομπών, καθώς ο στόχος κινείται στα όρια μεταξύ δύο κυψελών.

Πέρα από το στατικό τρόπο υπολογισμού της θέσης και κατεύθυνσης του στόχου (με a priori γνωστούς πίνακες μετασχηματισμού) υπάρχει και η δυνατότητα δυναμικού υπολογισμού τους. Η τελευταία προϋποθέτει το δυναμικό υπολογισμό των πινάκων μετασχηματισμού μεταξύ γειτονικών κυψελών, με διαδοχικά εναλλασσόμενες μετρήσεις από διαφορετικές –μεταξύ δύο γειτονικών – κυψελών, όταν ο στόχος βρίσκεται στην περιοχή επικάλυψής τους. Ο τρόπος αυτός υπολογισμού προαπαιτεί ιδιαίτερα ακριβείς μετρήσεις θέσης, κατεύθυνσης και ταχύτητας μια και οι μετρήσεις από τις δύο κυψέλες δεν μπορούν να είναι ταυτόχρονες, αλλά διαδοχικές. Για να προβλεφθεί μάλιστα και το ενδεχόμενο απότομων αλλαγών στο διάνυσμα κατάστασης (π.χ. απότομος ελιγμός του στόχου) συνιστάται ο επαναληπτικός προσδιορισμός του πίνακα μετασχηματισμού. Γενικά η ακρίβεια του δυναμικού τρόπου υπολογισμού είναι μικρότερη του αντίστοιχου στατικού.

Η ακρίβεια του συστήματος μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από την κυψέλη αναφοράς. Επομένως, συνετή θα ήταν η τοποθέτηση της κυψέλης αναφοράς στο κέντρο του χώρου λειτουργίας του συνολικού συστήματος και όχι σε μια άκρη αυτού.

Η αύξηση του χώρου λειτουργίας του συστήματος με την περιγραφείσα κυψελωτή διάταξη επιφέρει τίμημα σε υπολογιστικό κόστος και πολυπλοκότητα. Κατά συνέπεια, οδηγεί σε καθυστέρηση του συστήματος που μπορεί να καταστήσει ανούσια τη λειτουργία του.

– **Ανίχνευση θέσης χεριού-κεφαλιού**

Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει και στις δύο περιπτώσεις. Μια και η ακρίβεια του συστήματος εξαρτάται από τη σταθερότητα του περιβάλλοντος πολυδιαδρομικής διάδοσης, γίνεται κατανοητό ότι καλύτερα αποτελέσματα αναμένονται στην εφαρμογή του για εντοπισμό της θέσης του κεφαλιού του χρήστη.

Επιπρόσθετα, το σύστημα είναι ευαίσθητο σε κινήσεις του χεριού κατά τις οποίες ο πομπός στρέφεται σημαντικά ως προς το σύστημα των τριών δεκτών, με αποτέλεσμα αυτοί να είναι εκτός του κύριου λοβού εκπομπής. Βέβαια, πρέπει να τονιστεί, πως δεδομένου πως η εφαρμογή του συστήματος (σε Εικονικά Περιβάλλοντα) συνήθως επιβάλλει στο χρήστη να τείνει το χέρι του προς το σύστημα και όχι σε ιδιαίτερη γωνία ως προς αυτό, το πρόβλημα περιορίζεται.

Για περαιτέρω βελτίωση αυτής της παραμέτρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις διατάξεις πομπών σε διαφορετικές συχνότητες και διαφορετικές θέσεις στο χώρο, «φωτίζοντας» το στόχο υπό διαφορετικές γωνίες. Αυτό προϋποθέτει τη χρήση τριών διαφορετικών συστημάτων δεκτών στο στόχο (με την αντίστοιχη δυσκολία υλοποίησης)

– **Έξι βαθμοί ελευθερίας**

Το παρόν σύστημα επιτρέπει την καταγραφή των συντεταγμένων θέσης του στόχου. Για τον εντοπισμό της κατεύθυνσης αυτού απαιτείται η χρήση τοπολογίας 3-3. Το σύστημα σύμφωνα με την εκτίμηση του συγγραφέα δύναται να εκτιμήσει την κατεύθυνση του στόχου με ικανοποιητική ακρίβεια. Σε αυτήν την περίπτωση, ίσως, θα πρέπει να αυξηθεί η πλευρά του τριγώνου των δεκτών.

– **Πολλοί χρήστες**

Το σύστημα είναι σε θέση να εντοπίζει τη θέση διαφορετικών χρηστών με χρήση διαφορετικών διατάξεων τοπολογίας 1-3 σε διαφορετικές συχνότητες. Η ακρίβεια με την οποία όμως θα γίνεται η εκτίμηση είναι σημαντικά μειωμένη. Ο λόγος είναι οι ανακλάσεις από τους ίδιους τους χρήστες που καθιστούν ευμετάβλητο το περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης. Εντούτοις, πρέπει να τονιστεί πως πολλά σύγχρονα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας λειτουργούν υπό το καθεστώς ενός χρήστη. Σε αυτά τα συστήματα απευθύνεται το παρόν σύστημα εντοπισμού.

– **Απώλεια απευθείας οπτικής συνιστώσας**

Το πρόβλημα αυτό δεν αναμένεται να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα για το παρόν σύστημα. Μια και αυτό στοχεύει προς χρήση σε συστήματα με ένα μόνο χρήστη, δεν

αναμένεται η διακοπή της απευθείας οπτικής συνιστώσας μεταξύ αυτού και του Εικονικού Περιβάλλοντος (και άρα του συστήματος εντοπισμού). Εντούτοις, σε κάθε περίπτωση, προτείνεται η χρήση δύο ταυτόχρονων τοπολογιών 1-3 σε διαφορετικές συχνότητες, σε σχηματισμό περίπου 70° μεταξύ των. Η μία από τις δύο τοπολογίες θα είναι υπεύθυνη για τον εντοπισμό του στόχου και η δεύτερη θα ενεργοποιείται για τον ίδιο σκοπό όταν η πρώτη αποτύχει για έναν μικρό αριθμό διαδοχικών σαρώσεων. Σε αυτήν την περίπτωση ο ρόλος της κύριας και δευτερεύουσας τοπολογίας εναλλάσσεται μέχρι να παρουσιαστεί ξανά το φαινόμενο της απώλειας απευθείας οπτικής συνιστώσας. Οι επιπτώσεις στο ρυθμό ανανέωσης δεδομένων αναμένονται πολύ μικρές.

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν μια σειρά από πειράματα που μας βοήθησαν στην επιλογή των παραμέτρων του συστήματος εντοπισμού. Τα αρχικά πειράματα περιλάμβαναν την εκτίμηση της ακρίβειας μέτρησης απόστασης μεταξύ του πομπού και του δέκτη για τις τρεις συχνότητες, προσομοιώσεις των διαφόρων αλγορίθμων τριμεροποίησης και εκτίμηση της απόδοσης διαφόρων φίλτρων Kalman.

Από τα πειράματα αυτά καταλήξαμε στη χρήση του αλγορίθμου του κεντροειδούς εντοπισμού με ταυτόχρονα μεταβαλλόμενο κατώφλι για τον υπολογισμό των τριών αποστάσεων που απαιτούνται για την τριμεροποίηση. Η μέθοδος αυτή, για μία συγκεκριμένη περιοχή εμβέλειας, επιτρέπει την ασφαλή και εύκολη διόρθωση των μετρήσεων απόστασης. Για την μέθοδο της τριμεροποίησης παρατηρήθηκε πως η εξαιρετική ακρίβεια στον υπολογισμό των τριών αποστάσεων οδηγεί σε αντίστοιχα ικανοποιητική ακρίβεια των μεθόδων τριμεροποίησης. Δηλαδή η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος οφείλεται στην ακρίβεια με την οποία εκτιμώνται οι τρεις αποστάσεις πομπού-δεκτών.

Το σύστημα με τις επιλεγόμενες παραμέτρους χρησιμοποιήθηκε σε μια σειρά μετρήσεων με κινητό και ακίνητο στόχο. Τα αποτελέσματα υπήρξαν ιδιαίτερα ικανοποιητικά, ιδιαίτερα για τον ακίνητο στόχο. Για τον κινούμενο στόχο, οι μη ελεγχόμενες απολύτως κινήσεις οδήγησαν σε μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναμενόμενες. Ελέγχθηκε η χρήση ενός IMM φίλτρου με είσοδο τις εκτιμήσεις συντεταγμένων του αλγεβρικού αλγορίθμου τριμεροποίησης, χωρίς να βελτιώσει ιδιαίτερα την εκτίμηση του συστήματος.

Προτείνεται σαφέστατα από το συγγραφέα η εφαρμογή μη γραμμικών φίλτρων Kalman (EKF), με εισόδους τις μετρούμενες αποστάσεις, για την εκτίμηση των συντεταγμένων του στόχου. Τα παρόντα δεν εφαρμόστηκαν στην παρούσα διατριβή αλλά η εφαρμογή τους αναμένεται να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα εκτίμησης με κάποιο, ίσως, κόστος στο χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων. Επιπλέον, προτείνεται η εφαρμογή της μεθόδου ανίχνευσης μέγιστου σε συνδυασμό με κατάλληλους αλγορίθμους περιορισμού του παραθύρου αναμονής για την αντιμετώπιση της καθυστέρησης που η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

V. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

Όπως αναλύθηκε στο 1^ο κεφάλαιο, οι συσκευές αλληλεπίδρασης που προορίζονται για χρήση σε Εικονικά Περιβάλλοντα έχουν αποφασιστική σημασία για τον βαθμό στον οποίο ο χρήστης αισθάνεται εμπυθισμένος και παρών στον Εικονικό Κόσμο. Μία συσκευή αλληλεπίδρασης έχει ενσωματωμένη μία συσκευή εντοπισμού θέσης, σαν αυτές που αναλύθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Στο παρόν κεφάλαιο δεν ενδιαφερόμαστε για προβλήματα αλληλεπίδρασης που δημιουργούνται από τον εντοπισμό της θέσης της συσκευής αλληλεπίδρασης, μια και το θέμα έχει αναλυθεί διεξοδικά στα προηγούμενα κεφάλαια. Πλέον, ενδιαφερόμαστε για τις επιδράσεις που έχει η ίδια η συσκευή αλληλεπίδρασης, βάσει του σχεδιασμού και των φυσικών χαρακτηριστικών της, στις διάφορες διαδικασίες που ο χρήστης επιτελεί σε ένα Εικονικό Περιβάλλον.

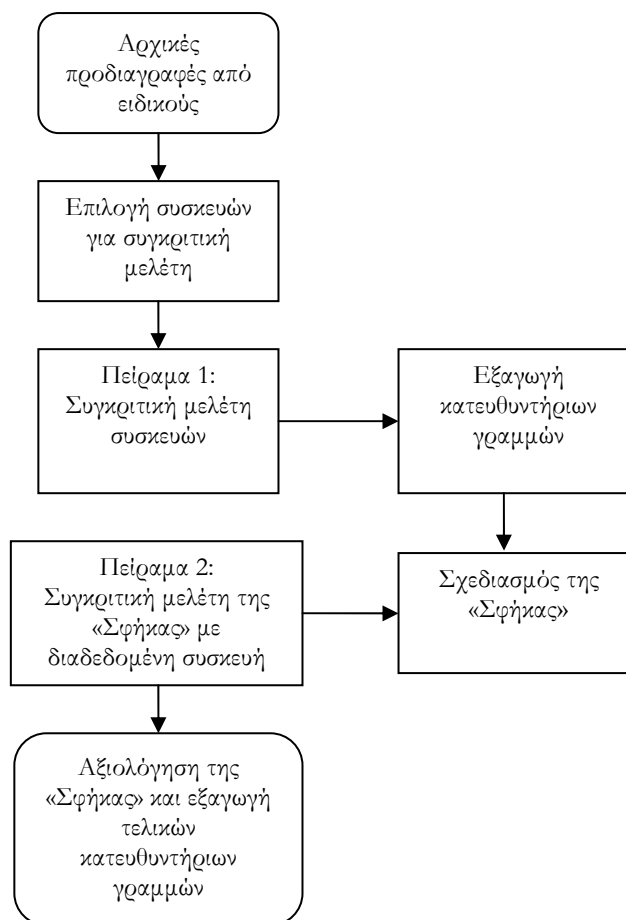
Υπάρχει πληθώρα συσκευών και διαδικασιών μέσα από τις οποίες ο χρήστης μπορεί να αλληλεπιδράσει με ένα Εικονικό Περιβάλλον. Η κάθε συσκευή διαθέτει τα δικά της χαρακτηριστικά και δύναται να επιτελέσει διαφορετικές λειτουργίες και με διαφορετικό τρόπο. Οι ερευνητικές προσπάθειες για τη δημιουργία νέων συσκευών αλληλεπίδρασης είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Ο λόγος είναι ο ραγδαίος βαθμός εξέλιξης των συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας και των δυνατοτήτων που αυτά προσφέρουν, καθώς και το γεγονός πως ο βαθμός αλληλεπίδρασης που επιτυγχάνεται με τις παρούσες συσκευές κρίνεται ανεπαρκής. Πιο συγκεκριμένα το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης με τον Εικονικό Κόσμο κρίνεται ως το πιο σημαντικό για την περαιτέρω εξέλιξη των VR συστημάτων ([STED02], [FELG92], [STAN98]). Οι χρησιμοποιούμενες ως τώρα συσκευές είτε διαφοροποιούνται αισθητά μεταξύ τους, είτε αποτελούν μετατροπές συσκευών και σκεπτικών που έχουν εφαρμοστεί για αλληλεπίδραση ανθρώπου με υπολογιστή. Στην πρώτη περίπτωση ο σχεδιασμός και η υλοποίηση αυτών βασίζεται περισσότερο στην εμπειρία και στο κατά πόσο ικανοποιούν τους κατασκευαστές τους, που συνήθως αποτελούν και πεπειραμένους χρήστες της Εικονικής Πραγματικότητας. Αυτό καθιστά τη χρήση τους από νέους χρήστες σχετικά προβληματική και εμποδίζει τους τελευταίους να τυποποιήσουν έστω και στοιχειωδώς τους τρόπους αλληλεπίδρασης σε διάφορα Εικονικά Περιβάλλοντα (με διαφορετικές συσκευές αλληλεπίδρασης). Στη δεύτερη περίπτωση και επειδή τα συστήματα VR παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφοροποιήσεις από τα απλά συστήματα υπολογιστών, η χρήση τυποποιημένων συσκευών με τις ελάχιστες δυνατές τροποποιήσεις συνήθως στερεί ένα μεγάλο μέρος δυνατοτήτων αλληλεπίδρασης από τους χρήστες.

Από τα προαναφερθέντα προκύπτει έκδηλη η ανάγκη για τυποποιημένες διαδικασίες στο σχεδιασμό και υλοποίηση των συσκευών αλληλεπίδρασης. Κάτι τέτοιο θα βοηθούσε τους σχεδιαστές, δίνοντας τους κατευθυντήριες γραμμές που θα μπορούσαν να ακολουθήσουν. Αφετέρου θα προσέδιδε στις συσκευές αλληλεπίδρασης κάποια τυπικά κοινά χαρακτηριστικά και θα βοηθούσε τους χρήστες (και κυρίως τους νέους χρήστες) στην ευκολότερη χρήση αυτών και στην πιο αποτελεσματική και αποδοτική αλληλεπίδραση με ένα VR σύστημα.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για το σχεδιασμό και την υλοποίηση νέων συσκευών ή συστημάτων που προορίζονται για ανθρώπινη χρήση. Αποδεδειγμένα η μέθοδος που έχει τη μεγαλύτερη επιτυχία ως προς την τελική αποδοχή των αποτελεσμάτων από τους προβλεπόμενους χρήστες είναι η ανθρωποκεντρική μέθοδος σχεδιασμού. Η μέθοδος στηρίζεται στην εμπλοκή των χρηστών σε όλα τα στάδια του σχεδιασμού, υλοποίησης και ελέγχου ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας και στην καθοδήγηση αυτών από την σχηματοποιημένη γνώμη των χρηστών. Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί σε κάποιο βαθμό στην αποτίμηση των συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας αλλά όχι ιδιαίτερα στον σχεδιασμό τους, εκτός λίγων εξαιρέσεων ([HOFF06]). Στην κατασκευή συσκευών αλληλεπίδρασης δεν υπάρχει καμία δημοσιευμένη εφαρμογή της μεθόδου. Στα πλαίσια της διατριβής εφαρμόστηκε η μέθοδος με σκοπό τη δημιουργία μιας νέας πρωτότυπης και ιδιαίτερα αποδοτικής συσκευής αλληλεπίδρασης.

5.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η επιτυχία του τελικού προϊόντος σε μία ανθρωποκεντρική διαδικασία σχεδιασμού εξαρτάται άμεσα από την επαναληπτική μέθοδο σχεδιασμού και αποτίμησής του, με την ενεργή συμμετοχή του χρήστη. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθ' όλη τη διάρκεια του σχεδιασμού να υπάρχει προσαρμοστικότητα στις αποφάσεις και να ευνοείται η δημιουργικότητα. Αυτό, βέβαια, δεν μπορεί να γίνει σε βάρος των τεχνικών περιορισμών και των πιθανών ορίων που επιβάλλουν οι ανάγκες των λειτουργιών που πρόκειται να επιτελεστούν με το προϊόν. Ο συγκερασμός των δημιουργικών ιδεών με τις πραγματικές τεχνικές δυνατότητες και τις ανάγκες του χρήστη οδηγεί στο βέλτιστο αποτέλεσμα. Βάσει αυτών σχεδιάστηκε η διαδικασία υλοποίησης της προτεινόμενης συσκευής αλληλεπίδρασης, η οποία ονομάστηκε (λόγω του τελικού σχήματός της) «Σφήμα» (Hornet). Η διαδικασία [KARA06] φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



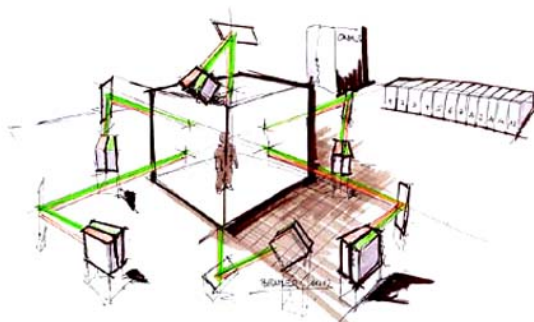
Εικόνα 156: Διαδικασία ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού της «Σφήκας»

Η ανθρωποκεντρική μέθοδος υλοποίησης και σχεδιασμού δεν ακολουθείται συχνά λόγω των εγγενών προβλημάτων που παρουσιάζει, παρά τα διαβεβαιωμένα βέλτιστα αποτελέσματα που αυτή επιφέρει. Το βασικό πρόβλημα είναι η εξαγωγή και η σχηματοποίηση της ανάδρασης των πληροφοριών που συγκεντρώνονται από τους χρήστες, μια και δεν υπάρχουν τυποποιημένοι τρόποι για τη διεργασία αυτή και κυρίως για τη μετατροπή αυτής της ανάδρασης σε τεχνικές οδηγίες [PATE06b]. Προς τούτο, αρχικά απευθυνθήκαμε σε εταιρείες που αποτελούν μεγάλους χρήστες συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας και καταγράψαμε μέσα από ερωτηματολόγια και συνεντεύξεις τις ανάγκες τους για τα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας [STED02], τη χρήση αυτών και τις προοπτικές που βλέπουν σε αυτά [KARA06]. Οι πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν ήταν για γενικότερη χρήση και περιλάμβαναν στοιχεία για συνηθισμένα σενάρια χρήσης συστημάτων VR, συνήθεις διεργασίες που επιτελούνται σε αυτά, τους στόχους χρήσης των συστημάτων, τις προτεραιότητες που τίθενται στα σενάρια χρήσης και τυχόν περιορισμούς. Τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης αυτής των πληροφοριών ήταν περισσότερο τεχνικά προσανατολισμένα και αφορούσαν σε βελτιώσεις υπάρχοντων συστημάτων και δυνατοτήτων και όχι σε τρόπους για αύξηση της χρησιμότητάς τους. Εντούτοις, διαπιστώθηκε η ανάγκη για την κατασκευή νέων συσκευών αλληλεπίδρασης με έξι βαθμούς ελευθερίας, προσαρμοσμένων στα εργονομικά χαρακτηριστικά του

ανθρώπινου χεριού. Τέτοιες συσκευές θεωρήθηκαν ως πολύ χρήσιμες για διεργασίες σχεδιασμού σε Εικονικά Περιβάλλοντα, μια και οι σχεδιαστές εργάζονται σε αυτά για μεγάλα χρονικά διαστήματα και οι υπάρχουσες συσκευές προκαλούν αποτελέσματα ψυχικής και σωματικής κόυρασης.

Την ανάγκη αυτή αποφασίσαμε να ικανοποιήσουμε με τη δημιουργία της «Σφήκας». Αν και η διαδικασία υλοποίησης της «Σφήκας» προσβλέπει στην υλοποίηση μιας συσκευής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας, κατά τη δημιουργία του πρωτοτύπου έπρεπε να πάρουμε υπόψη πιθανούς περιορισμούς που θέτουν τα συστήματα στα οποία θα ελεγχθεί η συσκευή. Έτσι επιλέξαμε τρία τυπικά συστήματα για την εφαρμογή της «Σφήκας»:

- Το HyPi-6 (Hybrid 6-sided Personal Immersion System), ένα κυβικό σύστημα VR με έξι τοίχους προβολής, διαστάσεων 3x3x3m. Το σύστημα είναι υβριδικό μια και μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε ενεργητική (με χρήση ενός SGI Onyx) όσο και παθητική μορφή προβολής (με χρήση ομάδας υπολογιστών –PC cluster).
- Ένα δυναμικό τοίχο (Powerwall) που είναι ένας επίπεδος προβολικός τοίχος με οπίσθια προβολή.
- Το PI-casso ([HOFF06]), ένα νέο φορητό σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας μικρών διαστάσεων. Το σύστημα αναπτύχθηκε ως μια φθηνότερη εναλλακτική λύση για συστήματα VR, παρέχοντας αυξημένες δυνατότητες για μία ποικιλία εφαρμογών.



Εικόνα 157: Το Σύστημα HyPi-6



Εικόνα 158: Ο δυναμικός τοίχος του ΕΜΟΙ



Εικόνα 159: Το φορητό σύστημα Pi-Casso

Έχοντας διατυπωμένη την ανάγκη για τη δημιουργία της «Σφήκας», ξεινήσαμε την επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμού της. Σε πρώτο στάδιο εξετάστηκαν τα χαρακτηριστικά μιας σειράς πρωτότυπων συσκευών λειτουργίας και η απόδοσή τους, όπως γίνεται αντιληπτή από έμπειρους χρήστες. Από αυτή τη διαδικασία επιλέξαμε τις δύο πιο δημοφιλείς συσκευές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε στο πρώτο πείραμα. Το πείραμα αφορούσε στη χρήση των συσκευών με τρία διαφορετικά μενού αλληλεπίδρασης, εξετάζοντας τη σχέση μεταξύ συσκευής, μενού και ενέργειας του χρήστη ως προς τις προτιμήσεις αυτού και την χρησιμότητα της συσκευής. Τα αποτελέσματα του πειράματος οδήγησαν στη δημιουργία κατευθυντήριων γραμμών για την κατασκευή, αφενός της «Σφήκας», αφετέρου μελλοντικών συσκευών αλληλεπίδρασης. Υλοποιώντας τη «Σφήκα», βάσει αυτών των οδηγιών, την εξετάσαμε συγκριτικά με την πιο διαδεδομένη συσκευή του πρώτου βήματος της διαδικασίας, σε ένα δεύτερο πείραμα με χρήστες. Τα αποτελέσματα του πειράματος απέδειξαν την αξία της ανθρωποκεντρικής διαδικασίας υλοποίησης που ακολουθήθηκε και χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω για την τελική έκδοση της «Σφήκας». Ταυτόχρονα, έδωσαν το έναυσμα για το σχεδιασμό μιας νέας γενιάς συσκευών αλληλεπίδρασης.

5.2 Επισκόπηση αρχικών πρωτοτύπων από έμπειρους χρήστες

Σε αυτό το πρώτο βήμα δημιουργήθηκε μία σειρά από πρωτότυπες συσκευές αλληλεπίδρασης. Για τη σχεδίαση τους ελήφθησαν υπόψη μελέτες περί της αλληλεπίδρασης ανθρώπου υπολογιστή (HCI) και της σχεδίασης αλληλεπιδραστικών μεθόδων για υπολογιστή. Ανθρωπομετρικές μετρήσεις για το ανθρώπινο χέρι, όπως αυτές που αναφέρονται στα [BAND86] και [KAPA92], ελήφθησαν σημαντικά υπόψη. Οι συσκευές αλληλεπίδρασης μπορούν να έχουν διαφορετικά σχήματα, που όμως πρέπει να παρέχουν εργονομικές λαβές για το ανθρώπινο χέρι. Επιπρόσθετα, η λαβή της συσκευής εκτός από την εργονομία πρέπει να έχει σχήμα που επιτρέπει στο χρήστη να κάνει ακριβείς κινήσεις, χωρίς να απαιτείται η άσκηση μεγάλης δύναμης, ούτε η ιδιαίτερη επικέντρωση της προσοχής του χρήστη στην κίνηση. Ένα κλασικό παράδειγμα από την καθημερινή ζωή αποτελεί το μολύβι, που επιτρέπει στους σχεδιαστές να κάνουν ακριβείς κινήσεις σχεδιάζοντας, χωρίς ιδιαίτερη απόσπαση της προσοχής τους από την κεντρική ενέργεια του σχεδιασμού. Επιπλέον, η συσκευή αλληλεπίδρασης πρέπει να παρέχει ευελιξία, ώστε οι χρήστες να μπορούν να την κρατήσουν με διαφορετικούς τρόπους, μη προκαλώντας έτσι αισθήματα κούρασης. Τέλος, η συσκευή θα πρέπει να έχει κατάλληλο σχήμα και όγκο για να ενσωματώσει το σύστημα εντοπισμού της θέσης της.

Η πρώτη από τις συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το αρχικό στάδιο, ήταν το ΜΙΚΕ, η συσκευή αλληλεπίδρασης που διαθέτει το εργαστήριο Εικονικής Πραγματικότητας του ΕΜΟΙ. Πρόκειται για μία συσκευή αλληλεπίδρασης έξι βαθμών ελευθερίας με τρία ενσωματωμένα πλήκτρα. Δύο πλήκτρα πίεσης βρίσκονται στο ένα μέρος της συσκευής και το τρίτο είναι ακριβώς από κάτω. Πρόκειται για μία ενσύρματη συσκευή που έχει ενσωματωμένο μαγνητικό αισθητήρα εντοπισμού. Η συσκευή δεν έχει οριοθετημένη λαβή και επιτρέπει στο χρήστη να την κρατήσει με

διάφορους τρόπους, ενώ για τη χρήση των πλήκτρων συνήθως χρησιμοποιείται ο αντίχειρας και ο δείκτης. Ο λόγος επιλογής της συγκεκριμένης συσκευής είναι αφενός το γεγονός πως ήταν η μόνη συσκευή που διέθετε το ΕΜΟΙ (και είναι γενικά μία πολύ διαδεδομένη συσκευή), αφετέρου το ότι δεν είχε ποτέ εξεταστεί σε πείραμα ως προς την εργονομία της.



Εικόνα 160: Η συσκευή αλληλεπίδρασης MIKE

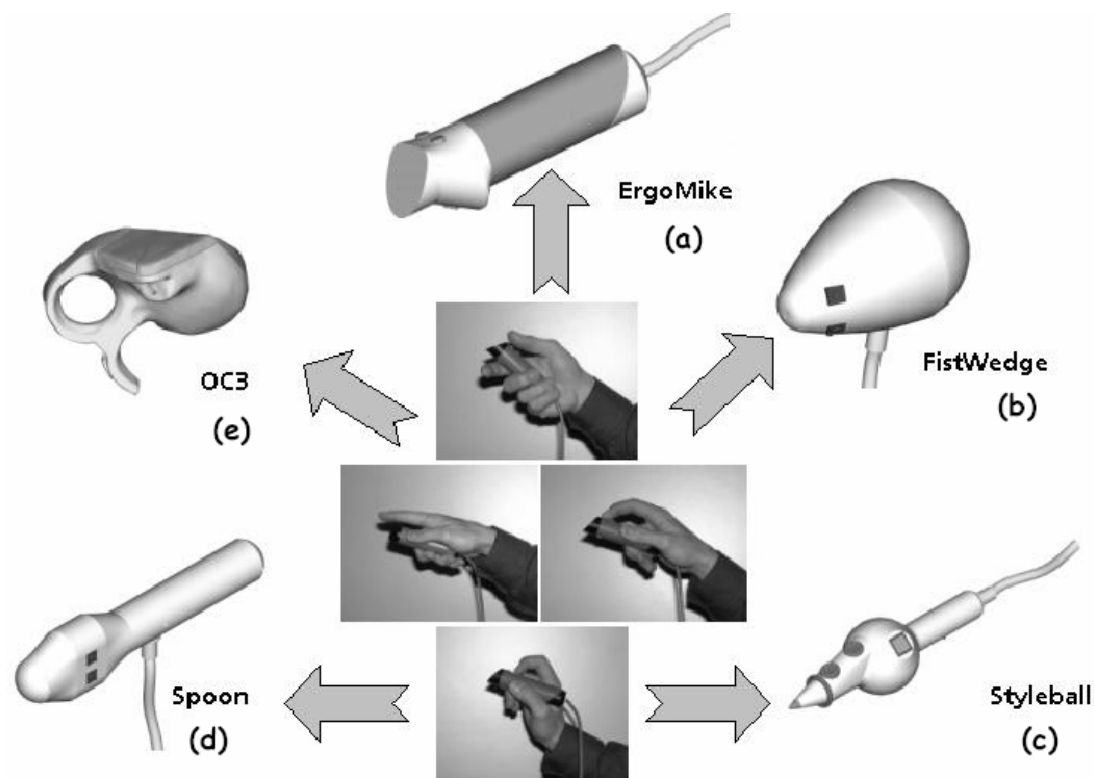
Για να διερευνηθούν οι προτιμήσεις των χρηστών για διάφορα είδη λαβών, υλοποιήθηκαν πέντε νέες συσκευές αλληλεπίδρασης. Ο στόχος ήταν η χρήση αυτών των συσκευών σε εφαρμογές τρισδιάστατης δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες απαιτούν συχνές αλλά ακριβείς κινήσεις. Επιπρόσθετα, αντικειμενικός σκοπός είναι η εύκολη και ενστικτώδης χρήση αυτών, ώστε να απαιτείται μικρότερος χρόνος εκπαίδευσης και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από σχετικά νέους χρήστες. Κάθε μία από τις πέντε συσκευές επιβάλλει στο χρήστη μία συγκεκριμένη λαβή. Οι λαβές αυτές προέκυψαν παρατηρώντας τις διαφορετικές λαβές που χρησιμοποιούσαν οι χρήστες για το MIKE. Οι πέντε αυτές συσκευές και οι αντιστοιχίες τους με το MIKE φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.

Η πρώτη συσκευή (Εικόνα 161α), το ErgoMIKE, έχει σχεδιαστεί ώστε να ευνοεί μία λαβή σύσφιξης κατά την οποία ο χρήστης τυλίγει τα δάχτυλά του γύρω από τη συσκευή. Τα δύο πλήκτρα έχουν τοποθετηθεί σε διεύθυνση κάθετη με τον άξονα της συσκευής (σε αντίθεση με το MIKE όπου ήταν παράλληλα), με αποτέλεσμα ο αντίχειρας να πρέπει να κινείται δεξιά-αριστερά και όχι πάνω-κάτω για τον χειρισμό τους. Το τρίτο πλήκτρο σχεδιάστηκε ώστε να κινείται παράλληλα με την κίνηση του δείκτη του χεριού, μόλις πιεστεί.

Η δεύτερη συσκευή (Εικόνα 161b), το Wedge, ευνοεί επίσης μία λαβή σύσφιξης, αντίστοιχη με αυτή που χρησιμοποιούν οι ζωγράφοι κρατώντας το πινέλο ή οι σχεδιαστές το στυλό

σχεδιάζοντας σε μεγάλη κλίμακα. Διαθέτει τρία πλήκτρα που είναι προσβάσιμα χρησιμοποιώντας τον αντίχειρα.

Η τρίτη συσκευή (Εικόνα 161c), το Styleball, έχει λαβή τσιμπίδας, όμοια με αυτή που χρησιμοποιούμε για ένα απλό μολύβι, κάνοντας χρήση του αντίχειρα, του δείκτη και του μεσαίου δακτύλου μόνο. Τα πλήκτρα είναι προσβάσιμα με το δείκτη. Η κεντρική σφαίρα σχεδιάστηκε ώστε να προσφέρει καλύτερο έλεγχο της συσκευής καθώς ο χρήστης αφήνει τα πλήκτρα.



Εικόνα 161: Αρχικές πρωτότυπες συσκευές αλληλεπίδρασης

Η τέταρτη συσκευή (Εικόνα 161d), το Spoon, προσφέρει την ίδια λαβή με την προηγούμενη συσκευή αλλά διαφέρει ως προς την τοποθέτηση των πλήκτρων και του μαγνητικού αισθητήρα εντοπισμού, που εδώ είναι τοποθετημένη στο εμπρόσθιο τμήμα της συσκευής. Η συσκευή παρέχει δυνατότητα για πολύ μικρές και ακριβείς κινήσεις, μια και είναι αυτή που μοιάζει, περισσότερο από κάθε άλλη, με ένα μολύβι. Τα πλήκτρα που είναι τοποθετημένα στο πλάι είναι προσβάσιμα με τον αντίχειρα. Ένα μειονέκτημα είναι πως κατά την εναλλαγή μεταξύ των δύο βασικών πλήκτρων πρέπει να μην χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και τα δύο. Αυτό γίνεται συνήθως, όπως είδαμε στην πράξη, απομακρύνοντας τον αντίχειρα από τη συσκευή, γεγονός που οδηγεί σε προσωρινή απώλεια του ελέγχου της συσκευής.

Η πέμπτη και τελευταία συσκευή (Εικόνα 161e), το OmniControl, επιβάλλει μία λαβή ούσιφιξης. Έχει το μεγάλο συγκριτικό πλεονέκτημα πως η λαβή της είναι εξαιρετικά εργονομική, ενώ επιτρέπει στο χρήστη να την κρατάει απλά στο χέρι του, χωρίς να τη χρησιμοποιεί και χωρίς να αλλάζει λαβή, δίνοντας τη δυνατότητα για ξεκούραση του χεριού. Αυτό επιτυγχάνεται με δύο

δακτύλιους που προσαρμόζονται στον δείκτη και το μεσαίο δάκτυλο. Η συσκευή διαθέτει δύο πλήκτρα τα οποία είναι τοποθετημένα ώστε η χρήση τους να γίνεται με κάμψη του αντίχειρα και η εναλλαγή από το ένα στο άλλο με κύλιση. Αξίζει να αναφερθεί πως η κάμψη του αντίχειρα έχει συνήθως εύρος γωνίας 35-40° και η κύλιση 45-60° ([BULL94]).

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσκευών φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Συσκευή	Μήκος	Πλάτος	Ύψος	Διάμετρος Χειρολαβής	Αριθμός πλήκτρων
MIKE	122	28	28	28	3
ErgoMIKE	120	31	37	29	3
Wedge	77	50	49	50	3
StyleBall	122	38	37	38	3
Spoon	143	35	20	20	3
OmniControl	87	81	80	60	2

Πίνακας 17: Χαρακτηριστικά πρωτότυπων συσκευών αλληλεπίδρασης

Σε όλες τις συσκευές ενσωματώθηκε μαγνητικός πομπός εντοπισμού. Η επιλογή του συστήματος εντοπισμού έγινε βάσει των συστημάτων στα οποία θα ελέγχονταν οι συσκευές (μεταξύ αυτών και το σύστημα του EMOI που διαθέτει ενσωματωμένο μαγνητικό σύστημα εντοπισμού).

Οι συσκευές χρησιμοποιήθηκαν για δεκαπέντε μέρες από οχτώ χρήστες που διέθεταν υψηλή εμπειρία σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας. Το πείραμα έγινε στις εγκαταστάσεις Εικονικής Πραγματικότητας του Fraunhofer IAO στη Στουτγκάρδη της Γερμανίας και περιλάμβανε τη χρήση των συσκευών σε διαφορετικές εφαρμογές, όπως ένα πρόγραμμα δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων και ένα εργαλείο αποτίμησης μοντέλων CAD (Computer Aided Design). Κάθε συσκευή χρησιμοποιήθηκε επτά ώρες μέσα σε αυτό το διάστημα. Ακολούθως και για δεκαπέντε πάλι μέρες οι συσκευές ενσωματώθηκαν σε ένα δυναμικό τοίχο όπου χρησιμοποιήθηκαν για επτά ώρες η καθεμία. Στο πείραμα αυτό δεν ακολουθήθηκε κάποιο συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Αντιθέτως οι χρήστες αφέθηκαν ελεύθεροι να χρησιμοποιήσουν τις συσκευές κατά το δοκούν, ώστε να παρατηρηθούν οι προτιμήσεις τους ή η δυσανεμία τους για κάθε συσκευή. Έτσι, είχαμε πραγματικούς χρήστες οι οποίοι χειρίζονταν τις συσκευές σε πραγματικές συνθήκες και με πραγματικές απαιτήσεις από αυτές.

Στο τέλος αυτής της πειραματικής διαδικασίας έγινε συζήτηση με τους χρήστες για τις προτιμήσεις τους ως προς τις συσκευές. Οι χρήστες κατέληξαν σε συμφωνία για τις δύο προτιμότερες συσκευές, που ήταν το MIKE και το OmniControl. Καμία άλλη συσκευή δεν προτιμήθηκε σε σχέση με το MIKE. Αυτό οφείλεται, κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό, στο ότι οι χρήστες ήταν όλοι εξοικειωμένοι με το MIKE για μεγάλο χρονικό διάστημα. Εντούτοις, οι χρήστες διατύπωσαν μια σειρά μειονεκτημάτων των συσκευών σε σχέση με το MIKE. Το βασικό

μειονέκτημα είναι πως φάνηκε δύσκολο, σε πολλές περιπτώσεις, στους χρήστες να χειριστούν τα πλήκτρα, ενώ σε πολλές περιπτώσεις η χειρολαβή προκαλούσε αίσθημα κούρασης ή ακόμα και σωματικό πόνο στον αντίχειρα (ιδίως όταν απαιτούνταν κάμψη του αντίχειρα).

Με το τέλος του πειράματος, καταλήξαμε στο συμπέρασμα πως το MIKE πρέπει να κρατηθεί ως συσκευή αναφοράς ώστε να συγκριθεί με την συσκευή που επρόκειτο να κατασκευαστεί. Ο λόγος είναι πως και στα δύο εργαστήρια (Fraunhofer-IAO και EMOI-EMPI), που επρόκειτο να γίνουν τα πειράματα, οι χρήστες είναι ιδιαίτερα εξοικειωμένοι με το MIKE. Έτσι, προχωρήσαμε στο επόμενο βήμα, τη χρήση του MIKE και του OmniControl σε ελεγχόμενες συνθήκες με προκαθορισμένο πειραματικό πρωτόκολλο και άπειρους χρήστες.

5.3 Πρώτο Πείραμα

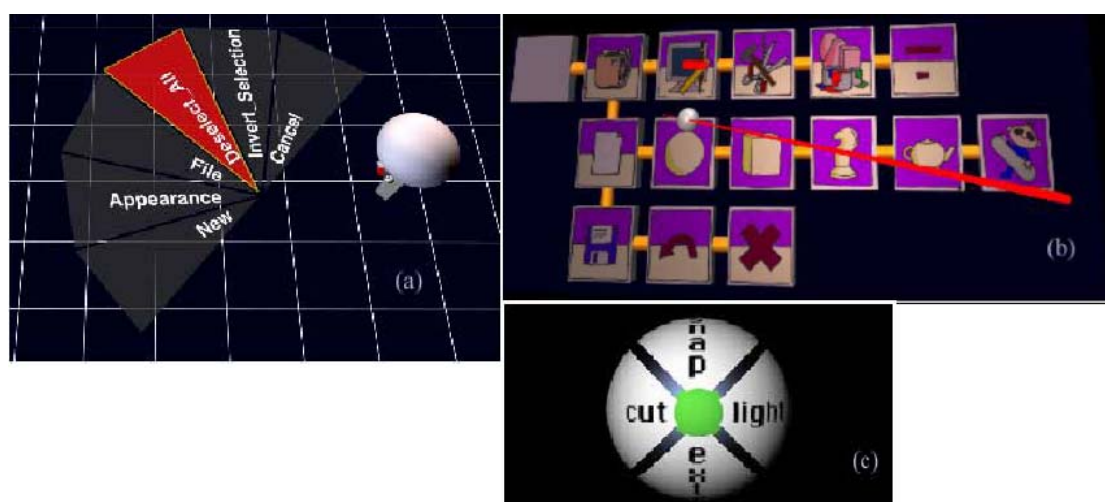
Το σύστημα στο οποίο συνδέθηκαν οι συσκευές αλληλεπίδρασης για το πρώτο πείραμα ήταν το HyPi-6, το οποίο ήταν συνδεδεμένο με ένα SGI Onyx, ενώ το συνολικό σύστημα υποστηριζόταν από το λειτουργικό Lightning. Χρησιμοποιήθηκε προβολή CRT με διακριτικότητα 1024x1024pixels, ενώ η προβολή ήταν ενεργή (στα 57Hz) και οι χρήστες έκαναν χρήση γυαλιών Stereographic συνδεδεμένων με τον ενεργό προβολέα (shutter glasses). Τέλος, το σύστημα ήταν εφοδιασμένο με μαγνητικούς αισθητήρες εντοπισμού (Wireless MotionStar).

5.3.1 Εξεταζόμενα Εικονικά Περιβάλλοντα

Οι συσκευές αλληλεπίδρασης πρέπει να εξετάζονται ως προς τη χρησιμότητά τους σε διαφορετικά Εικονικά Περιβάλλοντα. Τα περιβάλλοντα αυτά πρέπει να διαφοροποιούνται κυρίως ως προς τη λειτουργικότητά τους και τις απαιτήσεις που θέτουν ως προς την αλληλεπίδραση του χρήστη με αυτά. Έτσι, στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές εφαρμογές μοντελοποίησης και μία εφαρμογή οπτικοποίησης δεδομένων, χρησιμοποιώντας αντίστοιχα διαφορετικό μενού αλληλεπίδρασης η καθεμιά. Στις εφαρμογές μοντελοποίησης οι χρήστες κλήθηκαν να εκτελέσουν ένα αριθμό διεργασιών, να δημιουργήσουν ή να τροποποιήσουν γεωμετρικά σχήματα. Στην εφαρμογή οπτικοποίησης οι χρήστες, ακολουθώντας τις οδηγίες ενός επιβλέποντα, κλήθηκαν να αλληλεπιδράσουν με διάφορους τρόπους με ένα εικονικό εργαλείο κοπής μετάλλων. Οι διεργασίες επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι χρήστες να περάσουν ίσα χρονικά διαστήματα σε κάθε εφαρμογή (8-10 λεπτά) και να χρειαστεί να κάνουν αναλογικά ίδιο αριθμό κινήσεων και χειρισμών των συσκευών. Ο χρόνος που απαιτήθηκε από τους νέους χρήστες για την επιτέλεση των διεργασιών αλληλεπίδρασης μετρήθηκε πειραματικά. Κατά μέσο όρο ο κάθε χρήστης χρειαζόταν ένα λεπτό για την ολοκλήρωση μιας διεργασίας σε κάθε περιβάλλον.

Τα Εικονικά Περιβάλλοντα, όπως αναφέρθηκε, έκαναν χρήση διαφορετικών μενού αλληλεπίδρασης που ήταν προσαρμοσμένα στο είδος των διεργασιών που επέτασσαν οι εφαρμογές. Υπάρχει περίπτωση ορισμένες συσκευές αλληλεπίδρασης να είναι περισσότερο κατάλληλες για

συγκεκριμένα μενού αλληλεπίδρασης από άλλες. Έτσι, π.χ., κάποια μενού αλληλεπίδρασης απαιτούν συσκευές στόχευσης (pointing), ενώ άλλα μπορεί να απαιτούν τη χρήση ενός είδος τηλεχειριστηρίου ή σφαίρας για την επιλογή των λειτουργιών. Τα διαφορετικά μενού που χρησιμοποιήθηκαν επέτρεπαν την εξέταση οποιασδήποτε πιθανής σχέσης της κάθε συσκευής με αυτά, ώστε να απομονώνονται τα συμπεράσματα που αφορούν αποκλειστικά τη συσκευή με μεγαλύτερη ασφάλεια. Τα τρία μενού αλληλεπίδρασης, ένα μενού βεντάλιας, ένα γραμμικό και ένα σφαιρικό, φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα, ενώ τα βασικά χαρακτηριστικά τους δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί. Τα μενού αλληλεπίδρασης επιδρούν σε ένα σημαντικό βαθμό στον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται οι συσκευές αλληλεπίδρασης για την περιήγηση σε αυτά και την επιλογή των διαφόρων εντολών/λειτουργιών.



Εικόνα 162: Μενού αλληλεπίδρασης

Περιγραφή μενού	Γραμμικό	Σφαιρικό	Βεντάλια
Σχέδιο	Όμοιο με συνηθισμένα μενού υπολογιστών, αποτελείται από κουτιά με διαφορετικές επιλογές στο καθένα	Σφαίρα με 4 ορατές διακεκριμένες περιοχές σε όλα τα επίπεδα και υποεπίπεδα	Βεντάλια χωρισμένη σε τριγωνικές επιφάνειες με διαφορετικό αριθμό εντολών σε καθεμία
Παρουσία	Πάντα παρόν, μπορεί να μικραίνει	Παρόν, όταν ενεργοποιηθεί από τη συσκευή	Παρόν, όταν ενεργοποιηθεί από τη συσκευή
Επιλογή	Δείχνοντας στο μενού με μία συσκευή αλληλεπίδρασης και πατώντας ένα πλήκτρο ενεργοποιείται η λειτουργία που στοχεύει ο χρήστης	Περιστρέφοντας τη σφαίρα σε μία από τις τέσσερις περιοχές εντολών και πατώντας ένα πλήκτρο. Το πλήκτρο πρέπει να αφηθεί χωρίς να μετακινηθεί η σφαίρα από την επιλεγμένη περιοχή	Περιστρέφοντας το υπερτιθέμενο τρίγωνο στην επιλογή που θέλουμε και πιέζοντας ένα πλήκτρο στη συσκευή. Το πλήκτρο πρέπει να αφηθεί χωρίς να μετακινηθεί το τρίγωνο από την επιλεγμένη περιοχή

Περιγραφή μενού	Γραμμικό	Σφαιρικό	Βεντάλια
Χρώμα και ύφος	Κυριαρχεί το μωβ χρώμα με υπερτιθέμενες εικόνες	Άσπρο φόντο με υπερτιθέμενα μαύρα γράμματα	Μαύρο φόντο που γίνεται κόκκινο με άσπρα γράμματα αν επιλεγεί
Τοποθέτηση	Θέση σταθερή ως προς εξωτερικό σύστημα συντεταγμένων	Θέση προσαρμοζόμενη σε κινήσεις του χεριού	Θέση προσαρμοζόμενη σε κινήσεις του χεριού
Δομή	Ιεραρχία τριών επιπέδων	Ιεραρχία τριών επιπέδων	Ιεραρχία τριών επιπέδων
Συνολικός αριθμός επιλογών	Υψηλός	Χαμηλός	Υψηλός

Πίνακας 18: Χαρακτηριστικά των μενού αλληλεπίδρασης

5.3.2 Καθορισμός πειραματικής διαδικασίας

Στο πείραμα εξετάστηκαν οι δύο συσκευές αλληλεπίδρασης, το MIKE και το OmniControl που έχουν βάρος 56 και 150 γραμμάρια αντίστοιχα. Και οι δύο έφεραν ενσωματωμένο μαγνητικό αισθητήρα για τον εντοπισμό της θέσης και κατεύθυνσής τους. Οι χρήστες έφεραν στην πλάτη τους τσάντα που περιείχε εξοπλισμό του συστήματος εντοπισμού και καλωδιώσεις των συσκευών.

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δέκατρες (13) χρήστες (οχτώ άντρες και πέντε γυναίκες) με ηλικίες στην περιοχή 20-51 (και μέσο όρο 30 χρόνια και 7 μήνες). Οι επτά χρήστες ήταν φοιτητές και οι έξι είχαν πρότερη, αλλά περιορισμένη, εμπειρία σε συστήματα VR. Κάθε χρήστης χρησιμοποίησε κάθε μία από τις τρεις εφαρμογές και με τις δύο συσκευές. Επιτελούσαν την ίδια διαδικασία δύο φορές διαδοχικά στο ίδιο περιβάλλον, αλλάζοντας απλά τη συσκευή αλληλεπίδρασης.

Τρεις ή τέσσερις μέρες πριν το πείραμα, οι χρήστες έγιναν δέκτες 15λεπτης εκπαίδευσης στην χρήση τόσο των συσκευών όσο και των μενού αλληλεπίδρασης. Επιπρόσθετα, για πέντε λεπτά πριν την έναρξη του πειράματος, δόθηκαν στους χρήστες οδηγίες για το πως χρησιμοποιούνται οι συσκευές σε σχέση με το εκάστοτε μενού. Οι χρήστες συμπλήρωναν μια σειρά ερωτηματολογίων: ένα προ του πειράματος, ένα μετά από αυτό και άλλα μικρότερα κατά τη διάρκεια του πειράματος. Τα ερωτηματολόγια που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τα γενικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Ερωτηματολόγια	Συλλεγμένες Πληροφορίες	Στιγμή συμπλήρωσης
Γενικές πληροφορίες	Ηλικία, φύλλο, επάγγελμα, εμπειρία σε VR	Προ του πειράματος
Σύντομο	Επίπεδο χρηστικότητας της συσκευής	Μετά τη χρήση της κάθε

Ερωτηματολόγια	Συλλεγμένες Πληροφορίες	Στιγμή συμπλήρωσης
ερωτηματολόγιο χρησιμότητας συσκευής		συσκευής με κάθε μενού
Σύντομο ερωτηματολόγιο χρησιμότητας	Επίπεδο χρησιμότητας του μενού	Μετά τη χρήση κάθε μενού και με τις δύο συσκευές
Αναλυτικό ερωτηματολόγιο χρησιμότητας	Επίπεδο αίσθησης χρησιμότητας του Εικονικού Περιβάλλοντος	Μετά τη χρήση κάθε Εικονικού Περιβάλλοντος με τις δύο συσκευές
Αναλυτικό ερωτηματολόγιο συνολικής χρησιμότητας	Συγκριτική μελέτη των επιπέδων της αντιλαμβανόμενης χρησιμότητας για κάθε συσκευή και μενού	Μετά το πείραμα
Ερωτηματολόγιο εργονομίας	Επίπεδο αίσθησης άνεσης των χρηστών	Μετά το πείραμα

Πίνακας 19: Γενικά στοιχεία ερωτηματολογίων

Ένας επιβλέπων ήταν πάντα παρών στο εσωτερικό του HyPi-6 με το χρήστη, παρέχοντας οδηγίες για τις διεργασίες που έπρεπε να υλοποιηθούν σε διαδοχικά βήματα. Έτσι π.χ. στην εφαρμογή με το γραμμικό μενού οι χρήστες κλήθηκαν να μοντελοποιήσουν ένα ανθρώπινο πρόσωπο και έλαβαν διαδοχικές οδηγίες ως προς τη φόρτωση του μενού, την τοποθέτησή του στο περιβάλλον, την επιλογή των κατάλληλων εργαλείων μορφοποίησης και την χρήση αυτών. Στο σφαιρικό μενού απαιτήθηκε από τους χρήστες να περιστρέψουν ένα αντικείμενο, να δημιουργήσουν τομές σε αυτό, να ενεργοποιήσουν μια πηγή φωτός μέσα από το μενού και να την τοποθετήσουν στο αντικείμενο, και να πάρουν εικονική φωτογραφία του αντικειμένου (snapshot) υπό συγκεκριμένη γωνία. Στο μενού βεντάλιας οι χρήστες έπρεπε να ανασύρουν από τη μνήμη του συστήματος ένα τρισδιάστατο αντικείμενο, να ανοίξουν μία τρύπα σε αυτό, να το μεγεθύνουν και να το μετατρέψουν σε αντικείμενο wireframe δομής. Οι παραπάνω διεργασίες επιλέχθηκαν ούτως ώστε οι χρήστες να χρησιμοποιήσουν τις συσκευές αλληλεπίδρασης για να βρουν και να επιλέξουν τις κατάλληλες επιλογές από το μενού, να τοποθετήσουν και να επεξεργαστούν/χειριστούν αντικείμενα μέσα στον Εικονικό Κόσμο. Εκτός από τα στοιχεία που συλλέγονταν από ερωτηματολόγια, συλλογή πληροφοριών γινόταν και από δύο παρατηρητές εκτός του HyPi-6 που παρακολουθούσαν το πείραμα μέσα από κάμερες και μικρόφωνα.

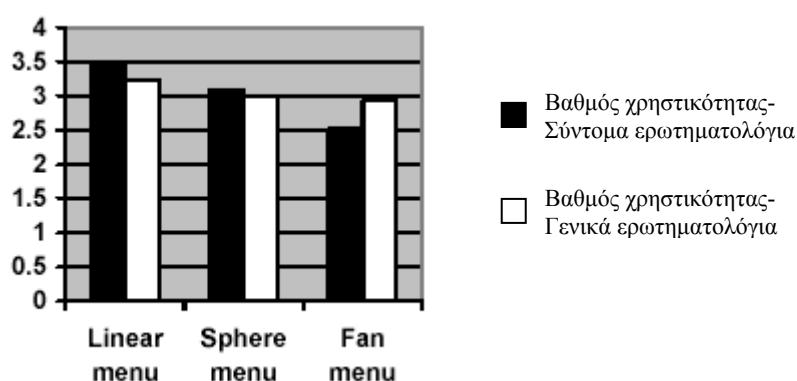
Οι χρήστες συνολικά είχαν έξι περιόδους δοκιμών (3 εφαρμογές x 2 συσκευές) με διαλείματα μεταξύ τους δύο λεπτά, στα οποία συμπλήρωναν τα μικρά ενδιάμεσα ερωτηματολόγια.

Ο συνολικός χρόνος καθεμίας περιόδου δοκιμών καταγράφηκε. Ο μέσος χρόνος του συνολικού πειράματος ανά χρήστη ήταν είκοσι τρία (23) λεπτά και είκοσι έξι (26) δευτερόλεπτα.

5.3.3 Αποτελέσματα

Η αρχική ανάλυση των αποτελεσμάτων των σύντομων ερωτηματολογίων του πειράματος έδειξε πως δεν υπάρχει επίδραση της σειράς χρήσης της κάθε εφαρμογής στην χρησιμότητα του αντίστοιχου μενού. Στη συνέχεια εξετάστηκε το κατά πόσο η σειρά με την οποία οι χρήστες χρησιμοποιούσαν τις συσκευές σε κάθε εφαρμογή, είχε επίδραση στο χρόνο εκτέλεσης της κάθε διεργασίας. Από μικτή ανάλυση των διακυμάνσεων των χρόνων βρέθηκε πως δεν υπήρχε καμία τέτοια επίδραση. Δεν βρέθηκαν επίσης σημαντικές επιδράσεις της πρότερης εμπειρίας σε συστήματα VR ως προς τη χρησιμότητα της κάθε συσκευής για συγκεκριμένο μενού, ως προς τη χρησιμότητα του μενού και ως προς το συνολικό χρόνο πειράματος.

Η ανάλυση των επιμέρους διακυμάνσεων των βαθμολογήσεων που έδωσαν οι χρήστες στα σύντομα ερωτηματολόγια και στο ερωτηματολόγιο χρησιμότητας που συμπλήρωναν μετά το τέλος του πειράματος για κάθε μενού ξεχωριστά, έδειξε πως υπάρχει διαφοροποίηση ανάλογα με το μενού που χρησιμοποιούνταν, όπως και αναμενόταν. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην ακόλουθη γραφική (μεγαλύτερος βαθμός σημαίνει αυξημένη χρησιμότητα).



Εικόνα 163: Αξιολόγηση χρησιμότητας των μενού αλληλεπίδρασης

Παρατηρήθηκε πως για κάθε εφαρμογή η προτίμηση των χρηστών σε κάποια συγκεκριμένη συσκευή ήταν περίπου ισότιμη. Ζητήθηκε επιπλέον από τους χρήστες να αξιολογήσουν τα τρία μενού αλληλεπίδρασης ως προς ποιο τους άρεσε περισσότερο. Το αποτέλεσμα ανέδειξε πιο αρεστό το γραμμικό μενού (10 χρήστες), ενώ το μενού βεντάλιας δεν προτιμήθηκε από κανένα. Ο βασικός λόγος επιλογής του γραμμικού μενού είναι η δυνατότητα της γρήγορης δημιουργίας ενός νοητικού μοντέλου λειτουργίας του από τον χρήστη, μια και μοιάζει, περισσότερο από τα υπόλοιπα, με το μενού ενός απλού υπολογιστή. Ένας επιπλέον λόγος αποτελεί και το γεγονός πως σε αντίθεση με τα άλλα μενού ήταν σταθερό, μια και η θέση του προσδιορίζεται σε παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων

και δεν μεταβάλλεται με τις κινήσεις του χεριού. Έτσι οι άπειροι κυρίως χρήστες διευκολύνονται στην χρήση του.

Τα ποσοτικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από τα ερωτηματολόγια έδωσαν περιορισμένες πληροφορίες ως προς πιθανές βελτιώσεις των συσκευών. Εντούτοις, κατέδειξαν διαφορές στη χρησιμότητα των συσκευών. Αυτή διερευνήθηκε περισσότερο με ποιοτικές παρατηρήσεις των επιβλεπόντων. Τα ποιοτικά αποτελέσματα αναλύθηκαν με την μέθοδο TBCA (Theme Based Content Analysis [NEAL01]) που έχει εφαρμοστεί αρκετές φορές στη διεθνή βιβλιογραφία για την αξιολόγηση των συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας. Η μέθοδος επιτρέπει την κατηγοριοποίηση των ποιοτικών αποτελεσμάτων σε ουσιαστικές νοηματικές κατηγορίες. Η ανάλυση που έγινε, οδήγησε σε κατηγοριοποίηση των σχολίων των χρηστών και των επιβλεπόντων ως προς τη χρησιμότητα των συσκευών αλληλεπίδρασης για διάφορες κατηγορίες, όπως π.χ. πρόσβαση και σχήμα των πλήκτρων, δυνατότητα χειρισμού και μετακίνησης αντικειμένων και μενού, επιλογή των τρισδιάστατων εικονιδίων του μενού, άνεση και ευκολία στη χρήση. Επιπρόσθετα, οι πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν ταξινομήθηκαν ανά κατηγορία για κάθε συσκευή και ανά διαφορετικό μενού, για να μελετηθούν οι επιδράσεις των τελευταίων. Η μέθοδος TBCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτίμηση συσκευών και μενού αλληλεπίδρασης, Εικονικών Κόσμων και Εικονικών Περιβαλλόντων και να παρέχει απευθείας πληροφορίες στους σχεδιαστές τους για την επανασχεδίαση και βελτίωση τους. Τα βασικά αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου είναι (περιληπτικά):

- Παρατηρήθηκαν δυσκολίες στην επιλογή των πλήκτρων. Και στις δύο συσκευές οι χρήστες δυσκολεύονταν να πιάσουν μόνο ένα πλήκτρο λόγω της μικρής τους απόστασης. Επιπρόσθετα για το MIKE υπήρχε κάποια απώλεια ελέγχου της συσκευής κατά την πίεση των πλήκτρων. Γενικά, το πρόβλημα της διάκρισης μεταξύ των πλήκτρων συνδέεται με το μέγεθος της παλάμης του εκάστοτε χρήστη. Χρήστες με μικρότερα χέρια μπορούν να ξεχωρίσουν ευκολότερα τα δύο πλήκτρα, ενώ με μεγάλα βρίσκουν τα πλήκτρα του MIKE ιδιαίτερα μικρά. Στον αντίποδα, χρήστες με μικρά χέρια βρίσκουν βαρύ σχετικά το OmniControl. Το πρόβλημα θα μπορούσε να λυθεί αν οι συσκευές μπορούσαν να προσαρμοστούν στο χρήστη, π.χ. με τη χρήση κυλιόμενων μερών που θα απομακρύνονται ή θα πλησιάζουν τα πλήκτρα μεταξύ τους. Επιπλέον, χρήσιμο θα ήταν τα πλήκτρα να έχουν διαφορετικό σχήμα (κυρίως για το MIKE) και διαφορετική υφή, κάνοντας το διαχωρισμό τους ευκολότερο.
- Ορισμένα προβλήματα χρησιμότητας προέκυπταν από τη χρήση των γυαλιών που θεωρήθηκαν βαριά και δεν μπορούσαν να εφαρμόσουν σε ανθρώπους με μυωπικά προβλήματα, υπερτιθέμενα των δικών τους γυαλιών.
- Παρατηρήθηκε μειωμένος βαθμός χρησιμότητας του Omnicontrol για τα μενού βεντάλιας και σφαίρας. Ο βασικός λόγος είναι πως σε αυτά τα μενού απαιτούνται πολλές περιστροφικές κινήσεις, οι οποίες σε συνδυασμό με το σχετικά μεγάλο βάρος της συσκευής προκαλούν ένα μικρό πόνο στον καρπό. Για το πρόβλημα αυτό προτείνεται η ελαχιστοποίηση των επιλογών

στα μενού αυτά, προκειμένου να απαιτούνται μικρότερες περιστροφικές κινήσεις. Εναλλακτικά μπορεί οι αλλαγές μεταξύ εντολών του ίδιου επιπέδου να γίνονται, για το μενού βεντάλιας, με πάτημα πλήκτρου, αντί για περιστροφή της συσκευής. Για το σφαιρικό μενού είναι δύσκολο, λόγω της φύσης του, να εφαρμοστούν ανάλογες λύσεις. Επιπρόσθετα το Omnicontrol, λόγω της σφαιρικής δομής του δυσκολεύει τους χρήστες στην αναγνώριση του σημείου στόχευσης.

- Συγκεκριμένες διεργασίες ανάγκαζαν τους χρήστες (και λόγω της μειωμένης εμπειρίας τους) να οδηγηθούν σε περίεργες στάσεις είτε του χεριού, είτε ολόκληρου του σώματος. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί μόνο με καλύτερη εκπαίδευση των χρηστών και εξοικείωση τους με το σύστημα, τη συσκευή και το μενού.
- Εμφανίστηκαν προβλήματα συστημικών καθυστερήσεων που οφείλονται κυρίως στο σύστημα εντοπισμού (το οποίο καταδεικνύει και το πρόβλημα που αντιμετώπισε η διατριβή στα προηγούμενα κεφάλαια). Οι καθυστερήσεις επέφεραν δυσκολία στην επιλογή των σωστών εντολών, άρα σε περιττές περιστροφικές κινήσεις και πρόκληση κούρασης στους χρήστες.
- Και στις δύο συσκευές παρατηρήθηκε μεγαλύτερη δυσκολία επιτέλεσης διεργασιών όταν το μενού ήταν προσαρμοσμένο στο σύστημα εντοπισμού της συσκευής. Προτείνεται η χρήση μενού σταθερού συστήματος συντεταγμένων. Τέτοιο ήταν το γραμμικό μενού, για το οποίο όμως εμφανίστηκε η δυσκολία αρχικής τοποθέτησης. Επιπλέον, το μενού συχνά επικαλυπτόταν από εικονικά αντικείμενα. Μια διαφοροποίηση της λογικής ιεραρχίας, τοποθετώντας το μενού υπερτιθέμενο οποιουδήποτε άλλου αντικειμένου θα έλυne το πρόβλημα.
- Η επιλογή κατάλληλων και μικρού αριθμού χρωμάτων που βοηθούν στη διάκριση των εντολών του μενού, ο σωστός φωτισμός, εικόνες έκδηλες της λειτουργίας που επιτελούν αν ενεργοποιηθούν είναι σημαντικοί παράγοντες για την ευκολότερη χρήση της συσκευής αλληλεπίδρασης. Επιπλέον, καθοριστικός παράγοντας για τα παραπάνω συνήθως είναι η διαχωριστική ικανότητα του προβολικού μηχανήματος.
- Πολλές φορές οι χρήστες επιτελούσαν μεγάλες κινήσεις στο HyPi-6 που επέφεραν κούραση. Μία διαδικασία κλιμάκωσης της κίνησης του εικονικού αντικειμένου με βάση τις κινήσεις του χρήστη θα βοηθούσε στην επίλυση του προβλήματος.

Τα παρατηρηθέντα προβλήματα και οι λύσεις που αναφέρονται πιο πάνω αποτελούν μια σειρά κατευθυντήριων γραμμών για το σχεδιασμό νέων συσκευών αλληλεπίδρασης. Αυτές ακολουθήθηκαν για τη δημιουργία της «Σφήμας», αλλά προσανατολίζονται και για γενικότερη μελλοντική χρήση.

5.4 Δεύτερο Πείραμα

Τα αποτελέσματα του προηγούμενου πειράματος δεν ανέδειξαν προτίμηση των χρηστών στη μία ή στην άλλη συσκευή. Αντιθέτως, τόνισαν μια σειρά πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της καθεμιάς και βοήθησαν στην αποσαφήνιση πιθανών βελτιώσεων. Έτσι, οδηγηθήκαμε στην απόφαση δημιουργίας της «Σφήμας», μιας συσκευής που θα συνδύαζε τα καλά χαρακτηριστικά των MIKE και

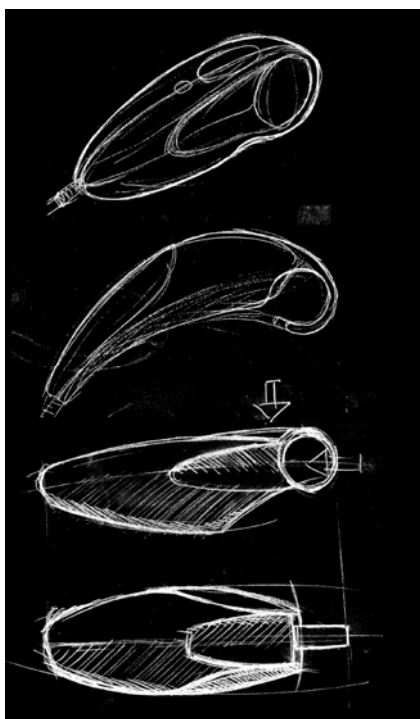
OmniControl, απαλείφοντας τα μειονεκτήματά τους στο μέγιστο δυνατό βαθμό, με χρήση των κατευθυντήριων γραμμών που προέκυψαν από το προηγούμενο πείραμα.

5.4.1 Σχεδιασμός και Υλοποίηση της «Σφήκας»

Η νέα συσκευή έπρεπε να συνδυάζει τα δύο σχήματα των προηγούμενων ώστε να εκμεταλλευτεί την ευκολία με την οποία ο χρήστης μπορεί να στοχεύσει με το MIKE και την ευκολότερη χειρολαβή του OmniControl, με μικρότερο όμως συνολικό βάρος από το τελευταίο. Οι κατευθυντήριες γραμμές που ακολουθήθηκαν (και προκύπτουν ως περιεκτική μετάφραση των αποτελεσμάτων του πρώτου πειράματος) είναι:

- Εύκολη πρόσβαση στα πλήκτρα
- Εύκολα διαχωρίσιμα πλήκτρα
- Μη απώλεια ελέγχου κατά το χειρισμό της συσκευής (π.χ. χρήση πλήκτρων)
- Ενσωματωμένη γεωμετρική ένδειξη της διεύθυνσης ένδειξης
- Μικρότερη καθυστέρηση μεταξύ των επιλογών των λειτουργιών του μενού και της ενεργοποίησης αυτών
- Πληροφόρηση για την επιλογή κάποιας εικόνας ή λειτουργίας του μενού
- Μεγαλύτερη ποικιλία στις χειρολαβές
- Μικρό βάρος

Βάσει των χαρακτηριστικών δημιουργήθηκε ένα αρχικό ελαστικό πρωτότυπο (Εικόνα 164) το οποίο βελτιωνόταν επαναληπτικά ώστε να διασφαλίσει πως το τελικό αποτέλεσμα θα έχει ελεγχθεί και από άποψη αφής (Εικόνα 165).



Εικόνα 164: Αρχικό σχέδιο της «Σφήκας»



Εικόνα 165: Έλεγχος αφής της «Σφήκας» και διαδοχικά στάδια υλοποίησης

Η «Σφήκα» ακολούθησε τις κατευθυντήριες γραμμές και ικανοποιεί τις προδιαγραφές που τέθηκαν. Πιο συγκεκριμένα:

- **Εύκολα προσβάσιμα και διαχωριζόμενα πλήκτρα:**
Η «Σφήκα» διαθέτει δύο πλήκτρα και ένα, μικρών διαστάσεων, χειριστήριο (joystick). Τα δύο πλήκτρα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα. Το ένα πλήκτρο (μεγαλύτερο και στο πάνω μέρος της συσκευής) είναι προσβάσιμο με τον αντίχειρα και το δεύτερο με το δείκτη. Πιέζοντας ένα πλήκτρο το άλλο εξωθείται, δίνοντας μια ανάδραση στο χρήστη ώστε να αποφύγει να το πιέσει ταυτόχρονα, ενισχύοντας την ευκολία διαχωρισμού τους. Το χειριστήριο είναι προσβάσιμο με τον αντίχειρα και ξεχωρίζει από τα πλήκτρα λόγω διαφορετικού σχήματος και διαφορετικής αίσθησης αφής. Το χειριστήριο έχει λειτουργικότητα όμοια με αυτή του τροχού ενός τυπικού ποντικιού υπολογιστή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα με ένα από τα δύο πλήκτρα ανά φορά.
- **Μη απώλεια ελέγχου κατά το χειρισμό της συσκευής (π.χ. χρήση πλήκτρων):**
Το σχήμα της «Σφήκας» είναι σχετικά πρωτότυπο λόγω του δακτυλίου στο εμπρόσθιο τμήμα της. Ο δακτύλιος επιτρέπει στον χρήστη (όπως και στο OmniControl) να χαλαρώσει τον καρπό, όταν δεν επιτελεί κάποια διεργασία με τη συσκευή, ενώ την κρατάει έχοντας περασμένο το δείκτη στο δακτύλιο. Όταν πιέζεται κάποιο από τα πλήκτρα, η συσκευή θα μένει σταθερή στην παλάμη του χρήστη, μια και ο δακτύλιος προσφέρει επιπλέον στήριξη στον δείκτη και στα υπόλοιπα δάχτυλα.
- **Ενσωματωμένη γεωμετρική ένδειξη της διεύθυνσης ένδειξης και διαφορετικές λαβές:**
Το μακρόστενο σχήμα της συσκευής καθώς και μία μικρή προεξοχή (σαν μύτη) στο μπροστινό μέρος βοηθούν το χρήστη να αντιληφθεί το σημείο στόχευσης, ενώ παρέχουν διαφορετικούς τρόπος λαβής της συσκευής. Επιπρόσθετα, πρέπει να ληφθεί υπόψη πως εκτός της τεχνικής αρτιότητας και της εργονομικότητας, μία συσκευή αλληλεπίδρασης πρέπει να είναι και αισθητικά ευχάριστη, διευκολύνοντας το χρήστη να συλλάβει πιο εύκολα τον τρόπο χρήσης της.
- **Μικρότερη καθυστέρηση μεταξύ των επιλογών των λειτουργιών του μενού και της ενεργοποίησης αυτών και πληροφόρηση για την επιλογή κάποιας εικόνας ή λειτουργίας του μενού:**
Το χειριστήριο της «Σφήκας» διαθέτει τέσσερις προκαθορισμένες θέσεις (πάνω, κάτω, αριστερά, δεξιά), οι οποίες όταν ενεργοποιηθούν προκαλούν έναν ήχο (κλικ) που γίνεται αντιληπτός από το χρήστη, παρέχοντας και μια ανάδραση αφής στον αντίχειρά του. Έτσι, ο χρήστης έχει άμεση πληροφόρηση για την επιλογή μιας εικόνας ή λειτουργίας. Το μεγάλο πλήκτρο και το χειριστήριο αντιστοιχήθηκαν με ένα σφαιρικό μενού αλληλεπίδρασης για εύκολη αντιστοιχία των κινήσεων. Τέλος ενσωματώθηκε ένας μεγαλύτερης ακρίβειας και γρηγορότερης απόκρισης μαγνητικός αισθητήρας εντοπισμού.
- **Μικρό βάρος:**

Το φυσικό μοντέλο της «Σφήκας» έχει πολύ λεπτά τοιχώματα και είναι κατασκευασμένο από ιδιαίτερα ανθεκτικό πλαστικό. Το τελικό βάρος της συσκευής είναι 78 γραμμάρια. Το πρωτότυπο της «Σφήκας» φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα



Εικόνα 166: Πρωτότυπο της «Σφήκας»



Εικόνα 167: συνηθέστερη λαβή «Σφήκας»

5.4.2 Σκοπός και λεπτομέρειες του Πειράματος

Μετά την υλοποίηση της «Σφήκας», αυτή έπρεπε να ελεγχθεί ως προς την εργονομία και τη χρησιμότητά της. Αυτό αποφασίσαμε να γίνει κατ' αντιπαραβολή με το MIKE. Ο λόγος είναι πως, αφενός το MIKE χρησιμοποιείται για μεγάλο χρονικό διάστημα από τους διεξάγοντες το πείραμα – κάνοντας τον έλεγχο της «Σφήκας» πιο αυστηρό – και αφετέρου έχοντας ως σκοπό την μελλοντική αντικατάσταση του ευρέως διαδεδομένου MIKE από τη «Σφήκα».

Το πείραμα έλαβε χώρα στο εργαστήριο Εικονικής Πραγματικότητας του ΕΜΟΙ. Το VR σύστημα του ΕΜΟΙ είναι ένας δυναμικός τοίχος που χρησιμοποιεί οπίσθια παθητική προβολή με δύο DLP προβολικά μηχανήματα. Η οθόνη προβολής έχει διαστάσεις 2x1,5 μέτρα και η διακριτικότητα είναι 1024x768pixels. Το σύστημα διαθέτει ενσωματωμένο μαγνητικό σύστημα εντοπισμού (Ascension MotionStar) για τις συσκευές αλληλεπίδρασης. Το κεφάλι των χρηστών

εντοπίζεται με οπτικούς αισθητήρες (Origin Instruments Dynasight). Οι χρήστες φορούν κατά την παραμονή τους στον Εικονικό Κόσμο γυαλιά με κάθετα μεταξύ τους πολωμένους φακούς.

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν τρία Εικονικά Περιβάλλοντα: το δομικό μοντέλο μιας πόλης αποτελούμενο από κτίρια, δρόμους και περιβάλλουσες περιοχές φύσης, ένα τρισδιάστατο μοντέλο του εσωτερικού ενός ανθρώπινου εγκεφάλου στο οποίο υπήρχε καρδιακός όγκος, και το σχεδιαστικό μοντέλο ενός αεροπλάνου. Σε κάθε περιβάλλον ζητήθηκε από τους χρήστες να πλοηγηθούν, να χειριστούν εικονικά αντικείμενα και να χρησιμοποιήσουν όλες τις διαθέσιμες επιλογές λειτουργιών. Στο περιβάλλον της πόλης, έμφαση δόθηκε στην ακριβή πλοήγηση στους δρόμους. Στο περιβάλλον του εγκεφάλου, έμφαση δόθηκε στη δημιουργία κατάλληλων τομών στο μοντέλο και στην κατάλληλη επιλογή χρωματισμών, ώστε να διαχωριστεί το τμήμα του όγκου. Στο περιβάλλον του αεροπλάνου, έμφαση δόθηκε στη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση τμημάτων του αεροσκάφους. Η επιλογή των λειτουργιών έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε οι χρήστες να καλύψουν όλες τις πιθανές λειτουργίες του μενού αλληλεπίδρασης και να χρησιμοποιήσουν τις συσκευές στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό, κάνοντας κάθε είδους πιθανή κίνηση. Και στα τρία περιβάλλοντα χρησιμοποιήθηκε το σφαιρικό μενού που φαίνεται στην Εικόνα 162c.

Το πείραμα έγινε με δεκαενέα χρήστες, εκ των οποίων δώδεκα ήταν άντρες και επτά γυναίκες, με ηλικίες στην περιοχή 20-62 χρονών (μέσος όρος: 32 χρόνια). Οχτώ χρήστες ήταν μηχανικοί διαφορετικών ειδικοτήτων και έξι ήταν φοιτητές. Έξι από τους χρήστες είχαν πρότερη εμπειρία σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας.

5.4.3 Διαδικασία

Το πείραμα για κάθε χρήστη διαρκούσε σαράντα (40) συνολικά λεπτά, ισομοιρασμένα σε κάθε συσκευή. Κάθε πείραμα με ένα χρήστη περιλάμβανε έξι διακριτές περιόδους (3 περιβάλλοντα x 2 συσκευές), διάρκειας περίπου 6,5 λεπτών η κάθε μία (13 περίπου λεπτά για κάθε εικονικό Περιβάλλον). Κάθε διακριτή περίοδος χωριζόταν σε δύο υποδιαστήματα. Στο ένα εξ' αυτών ο χρήστης ήταν σε όρθια στάση ενώ, στο άλλο ήταν καθισμένος σε καρέκλα μπροστά στο σύστημα. Η σειρά χρήσης της συσκευής και η θέση του χρήστη (καθιστή ή όρθια) επιλέχτηκε με τρόπο ώστε οι υποομάδες των χρηστών που ακολούθησαν μία σειρά διαδικασιών, να είναι μοιρασμένες περίπου. Δηλαδή, δέκα χρήστες χρησιμοποίησαν πρώτα το MIKE και στη συνέχεια τη «Σφήκα», εκ των οποίων οι πέντε πρώτα όρθιοι και μετά καθιστοί και οι υπόλοιποι πέντε αντίστροφα. Οι υπόλοιποι εννέα χρήστες χρησιμοποίησαν πρώτα τη «Σφήκα» και μετά το MIKE, ενώ πέντε εξ' αυτών πρώτα όρθιοι και στη συνέχεια καθιστοί, σε αντίθεση με τους άλλους τέσσερις της ίδιας ομάδας. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουμε πως το τελικό αποτέλεσμα θα επηρεαστεί μόνο από το χρόνο παραμονής και χρήσης του συστήματος. Οι χρήστες καθώς παραμένουν σε ένα Εικονικό Περιβάλλον για εύλογο χρονικό διάστημα αποκτούν μεγαλύτερη οικειότητα με αυτό και μπορούν να το χειριστούν καλύτερα, όντας υποκειμενικοί ως προς τη χρήση της συσκευής που χρησιμοποίησαν στο τέλος. Από την άλλη άποψη, τυχόν προβλήματα αδιαθεσίας που προκαλεί η παρατεταμένη παρουσία μπορούν

να επιδράσουν αρνητικά στην αντίληψη του χρήστη για τη συσκευή. Με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε αποκλείστηκαν αυτές οι επιδράσεις.

Πριν την εκκίνηση του πειράματος ο κάθε χρήστης παρακολούθησε μία εκπαιδευτική ταινία, διάρκειας είκοσι (20) λεπτών περίπου, που έδινε πληροφορίες σχετικά με το πείραμα, τα Εικονικά Περιβάλλοντα που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν, τις συσκευές και τον τρόπο χειρισμού, το μενού και τις διαφορετικές του λειτουργίες. Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος ένας επιβλέπωντας ήταν δίπλα στο χρήστη, δίνοντας προκαθορισμένες οδηγίες για τις διεργασίες που έπρεπε ο χρήστης να επιτελέσει. Με αυτή τη μέθοδο δόθηκε στους χρήστες η ίδια, ως ένα βαθμό, εκπαίδευση απαλείφοντας την παρέμβαση των εκτελούντων το πείραμα στο τελικό αποτέλεσμα.

Οι χρήστες συμπλήρωσαν δύο κύρια ερωτηματολόγια, ένα προ του πειράματος και ένα μετά από αυτό. Το ερωτηματολόγιο που ακολουθούσε το πείραμα περιλάμβανε διακριτά τμήματα που αφορούσαν την εργονομία και τη χρηστικότητα κάθε συσκευής. Μεταξύ των διακριτών περιόδων του πειράματος ο κάθε χρήστης συμπλήρωνε ένα σύντομο ερωτηματολόγιο για τη χρηστικότητα κάθε συσκευής. Ένα γενικότερο ερωτηματολόγιο χρηστικότητας συμπληρωνόταν όταν ολοκληρώνονταν οι δύο διαδοχικές περίοδοι στο ίδιο Εικονικό Περιβάλλον με τις δύο συσκευές. Τέλος, ένα ερωτηματολόγιο χρηστικότητας του μενού αλληλεπίδρασης συμπληρωνόταν μετά το τέλος των περιόδων του πειράματος που χρησιμοποιούσαν το μενού αυτό, για να μελετηθούν οι επιδράσεις του μενού στη σύγκριση των συσκευών.

Εκτός των στοιχείων που συλλέχθηκαν μέσα από τα ερωτηματολόγια, ποιοτικά στοιχεία συγκεντρώθηκαν από έναν επιβλέποντα που παρακολουθούσε τον χρήστη καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

5.4.4 Αποτελέσματα

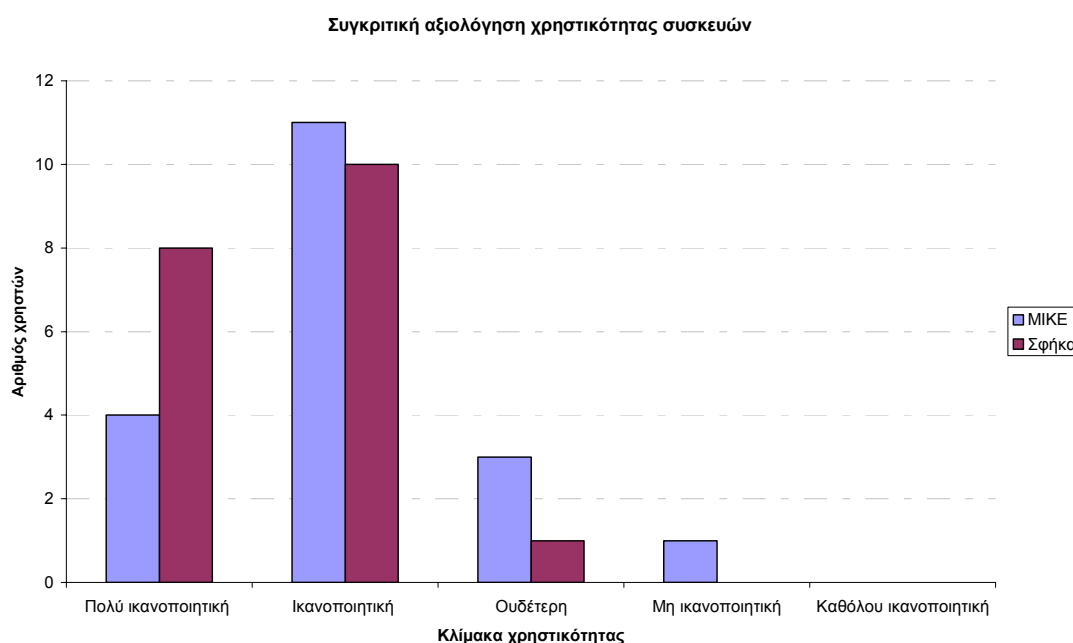
Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των ερωτηματολογίων έδειξε κατ' αρχάς πως δεν υπάρχει καμία επίδραση της θέσης (όρθιας ή καθιστής) στην αίσθηση χρηστικότητας της συσκευής. Επιπλέον, δεν παρατηρήθηκε καμία επίδραση της σειράς με την οποία εναλλάσσονταν οι θέσεις (δηλαδή το αν οι χρήστες ξεκινούσαν χρησιμοποιώντας μια συσκευή πρώτα καθιστοί και μετά σηκώνονταν ή το ανάποδο) στη βαθμολόγηση χρηστικότητας των συσκευών. Αυτό διαπιστώθηκε απομονώνοντας τα ερωτηματολόγια και εξετάζοντας του μέσους όρους και τις διακυμάνσεις των τελικών βαθμολογήσεων.

Βάσει των παραπάνω, τα στοιχεία από τα ερωτηματολόγια ομαδοποιήθηκαν ανά συσκευή, ανεξάρτητα από τη σειρά εναλλαγής της στάσης του χρήστη. Βάσει αυτής της ομαδοποίησης δεν βρέθηκε καμία επίδραση της εμπειρίας των χρηστών σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας στις βαθμολογήσεις χρηστικότητας των συσκευών και του μενού ή στη γενική χρηστικότητα του συστήματος. Το ίδιο ισχύει και για το φύλο των χρηστών. Ένας έλεγχος t ανά ζεύγη (paired t-test¹) φανερώνει πως η «Σφήκα» παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό χρηστικότητας από το MIKE. Πιο συγκεκριμένα στον έλεγχο t ανά ζεύγη είχαμε $t=-2,52$, $df=37$, $p<0,05$, μια και ο μέσος όρος της

¹ Βλ. Παράρτημα 5.1

βαθμολόγησης χρηστικότητας για το MIKE ήταν 3,55 και για τη «Σφήκα» 3,65 αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, μια και προέρχεται από ένα σημαντικό δείγμα χρηστών εκ των οποίων κάποιοι είχαν πρότερη εμπειρία με το MIKE. Ο χρόνος αλληλεπίδρασης είναι σημαντικός και επιτρέπει την εξαγωγή σχετικά ασφαλών συμπερασμάτων. Επομένως, ακολουθώντας τις κατευθυντήριες γραμμές που προέκυψαν από τα προηγούμενα βήματα, οδηγηθήκαμε στην κατασκευή μιας πιο εύχρηστης (και μάλιστα σημαντικά) συσκευής.

Με μία μόνο εξαίρεση, όλοι οι συμμετέχοντες στο πείραμα τόνισαν πως δεν είχαν κάποια σωματική κούραση χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε από τις δύο συσκευές. Επιπλέον δεκαεπτά (17) από τους συμμετέχοντες θεώρησαν τα πλήκτρα και στις δύο συσκευές εύκολα προσβάσιμα. Ζητήθηκε από τους χρήστες να συγκρίνουν τις δύο συσκευές ως προς τη χρηστικότητά τους (σε μία κλίμακα με βαθμολόγηση από το «Πολύ Ικανοποιητική» ως το «Καθόλου Ικανοποιητική»). Τα αποτελέσματα φαίνονται στην γραφική που παρατίθεται στη συνέχεια και η οποία υποδηλώνει την επικράτηση της «Σφήκα» στις προτιμήσεις των χρηστών.



Εικόνα 168: Αξιολόγηση χρηστικότητας συσκευών

Ζητήθηκε επιπλέον από τους χρήστες να σχολιάσουν περιγραφικά στα ερωτηματολόγια τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για την κάθε μία συσκευή. Τα σχόλια ομαδοποιούνται στον επόμενο πίνακα.

	MIKE	Σφήκα
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> - Πολύ εύκολο στη χρήση - Πολύ εύκολο στην πλοήγηση - Εύκολα προσβάσιμα πλήκτρα 	<ul style="list-style-type: none"> - Ευκολότερο στη χρήση από το MIKE - Καλύτερο σχήμα από το MIKE

	ΜΙΚΕ	Σφήμα
	<ul style="list-style-type: none"> - Μικρό μέγεθος και όγκος 	<ul style="list-style-type: none"> - Καλοσχεδιασμένα πλήκτρα - Πλήκτρα μεγαλύτερα από το ΜΙΚΕ - Εργονομικός σχεδιασμός - Παρουσία χειριστηρίου - Ευκολότερη αλληλεπίδραση - Ευκολότερη πλοήγηση - Ευκολότερος έλεγχος του περιβάλλοντος - Καθόλου κουραστικό - Εφαρμόζει καλύτερα στο χέρι σε σχέση με το ΜΙΚΕ - Ευκολότερη λαβή σε σχέση με το ΜΙΚΕ - Πιο σταθερός χειρισμός - Ευκολότερη κατανόηση των χρήσεων και του τρόπου λειτουργίας - Καλύτερο για νέους χρήστες
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> - Μη φυσικό σχέδιο - Πολύ απλοϊκό σχέδιο - Δυσκολία εναλλαγής μεταξύ πλήκτρων - Δυσκολία στην επιλογή αντικειμένων - Ανάγκη να κρατιέται οριζόντια - Όχι καλή εφαρμογή στο χέρι 	<ul style="list-style-type: none"> - Δύσκολη διασύνδεση των πλήκτρων με το σφαιρικό μενού - Δυσκολία εντοπισμού κατεύθυνσης στόχευσης σε σχέση με το ΜΙΚΕ

Πίνακας 20: Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα για τις δύο συσκευές

Από τους χρήστες, δεκαέξι (16) στους δεκαεννιά (19) εξέφρασαν την προτίμησή τους στην όρθια στάση χρησιμοποιώντας το ΜΙΚΕ και τη «Σφήμα» αντίστοιχα. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί πως η καθιστή ή όρθια στάση του χρήστη δεν είχε καμία επίδραση στην αξιολόγηση της χρησιμότητας των συσκευών. Ο λόγος προτίμησης της όρθιας στάσης και με τις δύο συσκευές ήταν η δυνατότητα μεγαλύτερων κινήσεων κυρίως με τα χέρια.

Χρήσιμα συμπεράσματα προέκυψαν και από τις σημειώσεις των επιβλεπόντων. Παρατηρήθηκε πως οι χρήστες σε καθιστή στάση είχαν μεγάλο πρόβλημα και στην πλοήγηση και στην αλληλεπίδραση. Πολλές φορές οι χρήστες μετακινούνταν με την καρτέλα για να επιτελέσουν εργασίες. Η συντριπτική πλειοψηφία των χρηστών δεν έβρισκε έναν εύκολο τρόπο να κρατήσει το

ΜΙΚΕ στην αρχή. Οι περισσότεροι το κρατούσαν ανάποδα αρχικά. Η μεγαλύτερη δυσκολία που παρατηρήθηκε σε σχέση με τη «Σφήκα» είναι η δυσκολία επιβεβαίωσης στόχευσης. Σε αυτό συνέβαλε το γεγονός πως, σε αντίθεση με το ΜΙΚΕ, η «Σφήκα» δεν διαθέτει καμία επίπεδη επιφάνεια που να επιτρέπει στο χρήστη να εντοπίσει καλύτερα τη στόχευσή της, μέσω παραλληλισμού της με το έδαφος. Για το λόγο αυτό (που είχε εντοπιστεί και είχε διατυπωθεί ως οδηγία από το προηγούμενο Πείραμα) είχε δημιουργηθεί μία προεξοχή στο πάνω εμπρόσθιο σημείο της «Σφήκας», αλλά όπως φάνηκε δεν ήταν αρκετό αυτό.

5.5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Σε ιδανικές συνθήκες, η δημιουργία κατευθυντήριων γραμμών για το σχεδιασμό συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας και των περιφερειακών τους θα έπρεπε να αποτελεί καταγεγραμμένη γνώση. Τέτοια όμως δύσκολα βρίσκεται στη διεθνή βιβλιογραφία, παρά μόνο αποσπασματικά. Ακόμα και σε περιπτώσεις που Εικονικά Περιβάλλοντα ελέγχονται ως προς τη χρησιμότητά τους, οι συγκρίσεις μεταξύ τους είναι πολύ δύσκολες λόγω της μεγάλης ποικιλίας των μεθόδων εκτίμησης χρησιμότητας και των διαφορετικών απαιτήσεων που θέτονται από διαφορετικές εφαρμογές. Δεν υπάρχει τυποποιημένο εργαλείο για την αποτίμηση της χρησιμότητας, αν και κάτι τέτοιο είναι τουλάχιστον αναγκαίο. Ένας συνδυασμός ελέγχων από έμπειρους χρήστες και εμπειρικών πειραμάτων (όπως αυτά που περιγράφηκαν πιο πάνω) μπορεί να παρέχει οδηγίες και συμβουλές για την βελτίωση υπάρχοντων συστημάτων και συσκευών και να αυξήσει την χρησιμότητα αυτών που είναι σε στάδιο υλοποίησης.

Είναι αρκετά δύσκολο να διατυπωθούν γενικές κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό μεταφορών αλληλεπίδρασης και δη, για συσκευές αλληλεπίδρασης, μια και αυτές σχεδόν πάντα θα υπολείπονται των τεχνολογικών επιτευγμάτων που είναι ραγδαίες ([AMD103]). Εντούτοις, υπάρχει η δυνατότητα υπόδειξης ανθρωποκεντρικών μεθόδων σχεδιασμού αυτών ([KARA06], [KARA04b]). Εκτελώντας πειράματα που εξετάζουν διαφορετικές συσκευές αλληλεπίδρασης σε ίδιες συνθήκες και ίδια περιβάλλοντα, μπορούμε να εξάγουμε γενικά συμπεράσματα για τη χρήση κατάλληλων συσκευών σε συνάρτηση με την προβλεπόμενη εφαρμογή και το μενού αλληλεπίδρασης.

Το πρώτο πείραμα που περιγράφηκε, τόνισε τη σημασία της εξέτασης της χρησιμότητας των συσκευών αλληλεπίδρασης με συγκεκριμένα περιβάλλοντα και μενού. Η φύση των διεργασιών που ο χρήστης πρέπει να επιτελέσει στο Εικονικό Περιβάλλον θέτουν συγκεκριμένες απαιτήσεις ως προς την αλληλεπίδραση (π.χ. στις κινήσεις του καρπού των χρηστών). Ομοίως, αν μία διεργασία απαιτεί μεγάλες και πολλές στον αριθμό περιστροφικές κινήσεις, η χρήση ενός πλήκτρου ή μιας επιλογής στη διαδικασία πλοήγησης που θα διευκολύνει την μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη (π.χ. τροχός) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη.

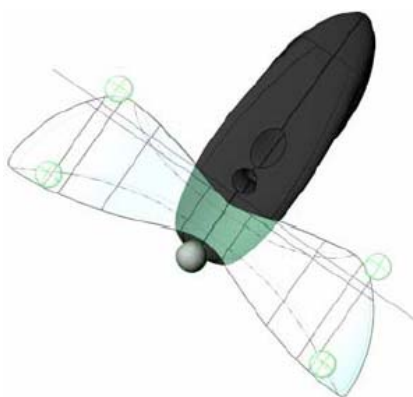
Η σχεδίαση πρωτότυπων συσκευών αλληλεπίδρασης με έξι βαθμούς ελευθερίας είναι ένας εξαιρετικά ενδιαφέρων και ακιμάζων ερευνητικός τομέας. Το πρώτο πείραμα απέδειξε την ανάγκη διεξαγωγής πειραμάτων με έμπειρους χρήστες για την αποτίμηση των συσκευών σε σύζευξη με διαφορετικά μενού αλληλεπίδρασης. Αν και οι συσκευές θα έπρεπε να μπορούν να προσαρμόζονται

σε διαφορετικές συνθήκες εργασίας, αυτό δεν θα συμβεί ποτέ στην πραγματικότητα σε απόλυτο βαθμό, δίχως να περιορίζει τη λειτουργικότητα των συσκευών ή των συστημάτων. Όπως φάνηκε στο πείραμα αυτό, εμφανίζονται προβλήματα σχετιζόμενα τόσο με τις συσκευές όσο και με μενού αλληλεπίδρασης που θα μπορούσαν να έχουν αποφευχθεί αν οι χρήστες χρησιμοποιούνταν από την αρχή στη διαδικασία σχεδίασης.

Το δεύτερο πείραμα ήρθε να επιβεβαιώσει τη σωστή εφαρμογή των συμπερασμάτων του πρώτου πειράματος στο σχεδιασμό της «Σφήκας». Η τελευταία κρίθηκε πιο εύχρηστη από μία συσκευή που ήταν ευρέως διαδεδομένη, έχοντας ως συγκριτικά πλεονεκτήματα χαρακτηριστικά που αποτελούν ακριβείς εφαρμογές των συμπερασμάτων του πρώτου πειράματος (π.χ. προσβάσιμα και εύκολα διαχωρίσιμα πλήκτρα, μη απώλεια ελέγχου, δυνατότητα χαλάρωσης χεριού). Η μόνη κατευθυντήρια γραμμή που δεν ακολουθήθηκε (σε ικανοποιητικό βαθμό) είναι η δημιουργία ενδεικτικών επιφανειών που βοηθούν το χρήστη να καταλάβει την κατεύθυνση στόχευσης. Προς τούτο, στο τελικό σχέδιο της «Σφήκας» η πάνω πλευρά της λειάνθηκε ώστε να γίνει επίπεδη, ενώ η προεξοχή έγινε πιο ευδιάκριτη.

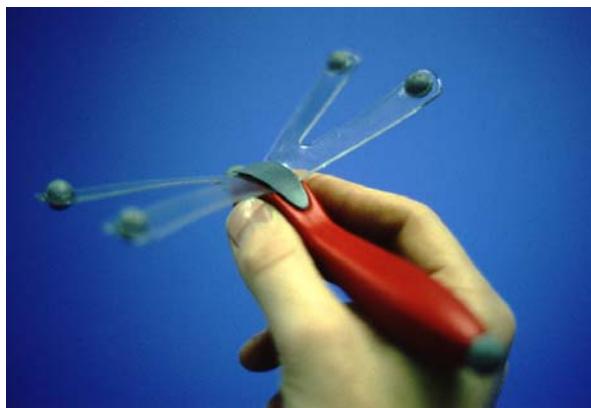
Στο πρώτο πείραμα τονίστηκε αρκετά το πρόβλημα της συστημικής καθυστέρησης που γίνεται αντιληπτή στο χρήστη, από το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την επιτέλεση μιας διεργασίας ως την εμφάνιση του οπτικοποιημένου αποτελέσματος της. Το πρόβλημα αυτό ουσιαστικά αποτελεί πρόβλημα του συστήματος εντοπισμού που είναι συνδεδεμένο με τη συσκευή. Επομένως αναμένεται πως μελλοντικά η χρήση των αποτελεσμάτων της διατριβής ως προς τα συστήματα εντοπισμού θα μπορέσει να παρέχει βελτίωση της κατάστασης. Πρέπει να τονιστεί πως κάτι τέτοιο δεν δοκιμάστηκε στα πλαίσια της διατριβής, μια και η ενασχόληση του συγγραφέα με το θέμα των συσκευών αλληλεπίδρασης προηγήθηκε χρονικά κατά πολύ της εντρύφησής του στα θέματα εντοπισμού.

Τέλος, μια βελτίωση που αναμενόταν να αυξήσει περαιτέρω τη χρηστικότητα των συσκευών είναι η αποκαλωδίωσή τους. Αυτό συνεπάγεται άμεσα τη χρήση διαφορετικής τεχνικής εντοπισμού (π.χ. οπτικοί αισθητήρες, ή η προσέγγιση που δίνεται σε αυτή τη διατριβή για τους ακουστικούς αισθητήρες). Προς τούτο, η «Σφήκα» τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με οπτικούς αισθητήρες εντοπισμού ([KARA04a]).



Εικόνα 169: Έκδοση της «Σφήκας» για οπτικά συστήματα εντοπισμού

Η διαδικασία του ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού που εφαρμόστηκε και παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό της διατριβής και οι κατευθυντήριες γραμμές που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν για τη γέννηση μιας καινούριας γενιάς συσκευών αλληλεπίδρασης από άλλους ερευνητές ([HOFF06]). Δύο τέτοιες είναι το Dragonfly και το BUG, που χρησιμοποιούνται με οπτικούς αισθητήρες εντοπισμού και φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 170: Το Dragonfly



Εικόνα 171: Το Bug

Κλείνοντας το κεφάλαιο, πρέπει να τονιστεί πως η εργασία που παρουσιάστηκε σε αυτό, υλοποιήθηκε με χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του Ερευνητικού προγράμματος VIEW (IST-2000-26089).

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό της διατριβής παρουσιάστηκε η επίδραση των συσκευών αλληλεπίδρασης στη διεπαφή του χρήστη με τα συστήματα Εικονική Πραγματικότητα. Εξηγήθηκε ο σημαντικότερος ρόλος των τελευταίων και τα προβλήματα που μπορούν να δημιουργήσουν στο χρήστη, οδηγώντας ουσιαστικά στη μη χρήση του Εικονικού κόσμου. Προχωρώντας ένα βήμα παραπάνω, παρουσιάστηκε το πρόβλημα απουσίας οδηγιών και κατευθυντήριων γραμμών που θα βοηθούσαν στην υλοποίηση πιο χρηστικών συσκευών αλληλεπίδρασης.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος προτείνεται και εξετάζεται η εφαρμογή μιας ανθρωποκεντρικής μεθόδου σχεδιασμού, που φέρνει το χρήστη νωρίς μέσα στη διαδικασία σχεδιασμού και συνδυάζεται ταυτόχρονα με τον έλεγχο των αρχικών πρωτοτύπων από έμπειρους χρήστες. Η ανθρωποκεντρική αυτή διαδικασία εφαρμόστηκε αφενός για την κατασκευή μιας νέας συσκευής αλληλεπίδρασης, που ονομάζεται «Σφήκα», αφετέρου για την παραγωγή γενικών κατευθυντήριων γραμμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αντίστοιχες μελλοντικές εφαρμογές σχεδιασμού.

Η διαδικασία χωριζόμενη σε τρία στάδια, επέτρεψε αρχικά την επιλογή, από έμπειρους χρήστες, δύο συσκευών, των οποίων η συγκριτική μελέτη χρησιμότητας στο δεύτερο στάδιο από άπειρους χρήστες, βοήθησε στην εξαγωγή των συμπερασμάτων ως προς τα χαρακτηριστικά της υπό

υλοποίησης συσκευής. Το δεύτερο αυτό στάδιο κατέδειξε την ισχυρή διασύνδεση μεταξύ της συσκευής αλληλεπίδρασης, του μενού και των απαιτήσεων της διεργασίας που επιτελείται. Μέσα από τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων από τη χρήση των συσκευών με διαφορετικά μενού και σε διαφορετικά περιβάλλοντα, καταλήξαμε στα γενικά επιθυμητά χαρακτηριστικά που πρέπει να φέρει μια συσκευή αλληλεπίδρασης για να επιδείξει υψηλή χρηστικότητα.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα, υλοποιήθηκε στο τελικό στάδιο η «Σφήκα» και ελέγχθηκε σε σύγκριση με μία διαδεδομένη συσκευή. Η νέα συσκευή επικράτησε σε σημαντικό βαθμό ως προς τη χρηστικότητα, καταδεικνύοντας αφενός τη σωστή εφαρμογή των συμπερασμάτων του προηγούμενου σταδίου και αφετέρου την ορθότητα των συμπερασμάτων.

Η μέθοδος αυτή καθαυτή που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να αξιολογηθεί σημαντικότερη από την υλοποίηση μίας καινούριας συσκευής, λόγω της απουσίας δομημένων μεθόδων συγκριτικής αποτίμησης συσκευών αλληλεπίδρασης και οδηγιών για τον σχεδιασμό τους. Η μέθοδος έχει αρχίσει ήδη να εφαρμόζεται ευρύτερα στο χώρο της Εικονικής Πραγματικότητας, οδηγώντας σε μια νέα γενιά συσκευών αλληλεπίδρασης, για τις οποίες ο συγγραφέας θεωρεί πως μπορούν να παρέχουν σημαντικές βελτιώσεις στον τομέα της αλληλεπίδρασης σε Εικονικά Περιβάλλοντα.

Παράρτημα 5.1 – Έλεγχος ανά ζεύγη

Ο έλεγχος t ανά ζεύγη είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για να συγκρίνουμε στατιστικούς όρους που αφορούν τον ίδιο πληθυσμό, αλλά δύο διαφορετικά δείγματα αυτού. Παρατηρήσεις από το πρώτο δείγμα δημιουργούν ζευγάρια με παρατηρήσεις από το δεύτερο δείγμα. Παραδείγματα χρήσης της μεθόδου είναι η παρατήρηση ενός πληθυσμού ανθρώπων πριν και μετά από κάποιο γεγονός (π.χ. γνωστικό επίπεδο μαθητών πριν και μετά ένα μάθημα) ή η σύγκριση δύο διαφορετικών μεθόδων στον ίδιο πληθυσμό (π.χ. διαφορετικές μέθοδοι εκτίμησης καρδιακής πίεσης στους ίδιους ανθρώπους).

Για να εξηγήσουμε τη μέθοδο ας θεωρήσουμε ένα δείγμα από n μαθητές, οι οποίοι εξετάζονται στο ίδιο διαγώνισμα πριν και μετά την επεξήγηση σε αυτούς μιας ομάδας ασκήσεων από τον καθηγητή τους. Θεωρώντας ως x και y αντίστοιχα τις τυχαίες μεταβλητές που περιγράφουν τις βαθμολογίες στον πρώτο και στο δεύτερο διαγώνισμα αντίστοιχα, η διαδικασία αναλύεται στα ακόλουθα βήματα:

1. Υπολογίζεται η απόκλιση στη βαθμολογία κάθε μαθητή μεταξύ των δύο διαγωνισμάτων

$$d_i = y_i - x_i, i = 1, 2, \dots, n$$

2. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των αποκλίσεων $\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$

3. Υπολογίζεται η τυπική απόκλιση των αποκλίσεων $s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}}$ και το τυπικό

$$\text{σφάλμα της μέσης διαφοράς } SE(\bar{d}) = \frac{s_d}{\sqrt{n}}$$

4. Υπολογίζεται ο όρος t από τη σχέση $T = \frac{\bar{d}}{SE(\bar{d})}$. Θεωρώντας πως η πραγματική μέση

απόκλιση είναι μηδενική, ο όρος t ακολουθεί κατανομή t με $(n-1)$ βαθμούς ελευθερίας, που

$$\text{δίνεται από τη σχέση: } f(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{n}\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)\Gamma\left(\frac{1}{2}\right)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{t^2}{n}\right)^{(n+1)/2}} \quad ([\text{KOKO91}])$$

5. Από πίνακες τιμών βρίσκουμε την τιμή της πιθανότητας που αντιστοιχεί στην τιμή του t για την κατανομή t_{n-1} , η οποία αποτελεί και το τελικό μέτρο ως προς τη βελτίωση ή μη της απόδοσης των μαθητών πριν και μετά την επεξήγηση των ασκήσεων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανά χείρας διατριβή αποτελεί την έως τώρα συνεισφορά του συγγραφέα στις ερευνητικές προσπάθειες που αποσκοπούν στην ενίσχυση της αλληλεπίδρασης του χρήστη με τα συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας. Η διατριβή εστίασε στα συστήματα εντοπισμού και στις συσκευές αλληλεπίδρασης που αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των περισσότερων συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας και συνεισφέρουν ιδιαίτερος σημαντικά στην ενίσχυση ή μη του αισθήματος Παρουσίας του χρήστη σε αυτά. Απέδειξε πως, με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών επεξεργασίας σήματος που βασίζονται στον κεντροειδή εντοπισμό και την προσαρμογή των καταφυλιών λήψης στο δέκτη, πολλά από τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η τεχνολογία των ακουστικών κυμάτων στην εφαρμογή της σε συστήματα εντοπισμού, μπορούν, αν όχι να λυθούν, τουλάχιστον να αντιμετωπιστούν ικανοποιητικά. Ως αποτέλεσμα η διατριβή προτείνει ένα σύστημα ακουστικού εντοπισμού θέσης, με τεχνολογικές δυνατότητες πολύ καλύτερες σε σχέση με αντίστοιχα που βασίζονται στην ίδια τεχνολογία και τουλάχιστον συγκρίσιμες, αν όχι καλύτερες, από διάφορα άλλα που βασίζονται σε τεχνολογίες διαφορετικών χαρακτηριστικών (τα οποία αντιμετωπίζουν και διαφορετικά προβλήματα). Το προτεινόμενο σύστημα αντιμετωπίζει ικανοποιητικά το πρόβλημα της μεταβλητής και μικρής ταχύτητας διάδοσης των ακουστικών κυμάτων, ενώ προτείνει επεκτάσεις που μπορούν να αντισταθμίσουν την απώλεια εντοπισμού του στόχου λόγω μη ύπαρξης απευθείας οπτικής συνιστώσας. Το σύστημα χρησιμοποιεί – εφαρμόζοντας μία μέθοδο σταθερού ρυθμού εσφαλμένων συναγερμών σε μία περιοχή μικρότερη από τη μέγιστη εμβέλεια (περιοχή λειτουργίας) – το προφίλ (που υποτίθεται ως επί το πλείστον σταθερό) πολυδιαδρομικής διάδοσης των ακουστικών κυμάτων για την διόρθωση των μετρήσεων απόστασης. Η μέθοδος οδηγεί σε πολύ υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα, γεγονός που επιτρέπει την εφαρμογή στατικών (και γρήγορων ως προς τον υπολογιστικό χρόνο) αλγορίθμων τριμεροποίησης για την εύρεση των συντεταγμένων του στόχου, με αρκετά υψηλή τελική ακρίβεια. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται, στηρίζεται στην αλγεβρική επίλυση του προβλήματος και δεν κάνει χρήση αρχικής εκτίμησης. Ακολουθώντας τις προαναφερθείσες λύσεις, ένα τέτοιο σύστημα εντοπισμού υλοποιήθηκε και ελέγχθηκε, πιστοποιώντας του λόγου το αληθές των συμπερασμάτων στα οποία κατέληξε η διατριβή.

Η διατριβή καταπιάνεται, επίσης, με το θέμα της υλοποίησης νέων συσκευών αλληλεπίδρασης με ανεπτυγμένα χαρακτηριστικά χρησιμότητας. Προς τούτο, επιλέχθηκε μία ανθρωποκεντρική μέθοδος σχεδιασμού και υλοποίησης, που επιτρέπει την εξαγωγή κατευθυντήριων γραμμών για το σχεδιασμό τέτοιων συσκευών. Η μέθοδος και οι γενικές κατευθυντήριες γραμμές που προέκυψαν, οδήγησαν στη δημιουργία μιας νέας συσκευής αλληλεπίδρασης, της οποίας η χρησιμότητα αποδείχθηκε σε μία σειρά πειραμάτων με πραγματικούς χρήστες και κατ' αντιπαράβολή με μία άλλη πολύ διαδεδομένη συσκευή. Πέραν της πρωτότυπης συσκευής – που αποτέλεσε την απαρχή για την υλοποίηση μιας σειράς τέτοιων συσκευών – ιδιαίτερη σημασία έχουν οι γενικές κατευθυντήριες

γραμμές που προέκυψαν. Οι τελευταίες είναι εύκολα μεταφραζόμενες σε τεχνικές προδιαγραφές ή προδιαγραφές σχεδίασης και αποτελούν μια συνεισφορά της διατριβής στον τομέα της αλληλεπίδρασης σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας, που στερείται αντίστοιχων καταγεγραμμένων και διακριβωμένων πηγών.

Όπως αναφέρθηκε, η διατριβή αποτελεί μια απλή συνεισφορά στον επιστημονικό χώρο των συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας. Σίγουρα όμως, δίνει τροφή για την περαιτέρω ενασχόληση, τόσο του συγγραφέα, όσο και άλλων πιθανών ερευνητών, με μια σειρά θεμάτων που χρήζουν βελτίωσης ή περαιτέρω έρευνας. Τα βασικά αυτά σημεία, όπως εντοπίζονται από τον συγγραφέα, είναι:

- Η χρήση μη γραμμικών φίλτρων Kalman για την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος της τριμεροποίησης. Αυτή αναμένεται να δώσει καλύτερες λύσεις σε περιπτώσεις όπου ο στόχος είναι στα όρια της περιοχής εμβέλειας και ο προτεινόμενος αλγόριθμος διόρθωσης των μετρήσεων οδηγεί σε μεγαλύτερα από τα αναμενόμενα σφάλματα.
- Η εγκατάσταση του συστήματος εντοπισμού σε σύστημα Εικονικής Πραγματικότητας για την αποτίμηση της συνολικής συστημικής καθυστέρησης που αυτό εισάγει.
- Η εφαρμογή μεθόδου ανίχνευσης μέγιστου με προσαρμοστικό παράθυρο δειγματοληψίας για τη μείωση της καθυστέρησης.
- Η εφαρμογή μεθόδων για τη μέτρηση της ταχύτητας του στόχου, μέσω της εξαγωγής της συχνότητας Doppler από το ληφθέν σύστημα.
- Η αναζήτηση αποδοτικότερων αλγορίθμων για τη διόρθωση σφάλματος σε περίπτωση εντοπισμού με τη μέθοδο της πρώτης αφίξεως, σε πραγματικό χρόνο.
- Η εφαρμογή μεθόδων TOFD (Time-of-Flight-Diffraction), στη μέθοδο του κεντροειδούς εντοπισμού για την μείωση της επίδρασης της πολυδιαδρομικής διάδοσης.
- Η ανάλυση με σκοπό την εύρεση βέλτιστων τοπολογιών αλληλοσυμπληρούμενων συστημάτων για την αντιμετώπιση του προβλήματος της απώλειας απευθείας οπτικής συνιστώσας.
- Η ανάλυση πιθανών δομών που θα αυξήσουν την περιοχή εμβέλειας του συστήματος. Στα πλαίσια της διατριβής έγιναν κάποιες απλές προσομοιώσεις με ένα κυψελωτό σύστημα οχτώ κυψελών που έδινε μια περιοχή εμβέλειας περίπου 10x10x2m. Εντούτοις, η ανάλυση που έγινε σε αυτό τον τομέα χρήζει σίγουρα περαιτέρω έρευνας ως προς πιο αποδοτικούς αλγορίθμους διαπομπών, τη βέλτιστη τοποθέτηση κυψελών, τις ανάγκες για επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων ή διαδοχική ειπομπή και τη μεταβολή της ακρίβειας εντοπισμού σε σχέση με τη θέση του στόχου.
- Ο συνδυασμός του ακουστικού συστήματος εντοπισμού με άλλους αισθητήρες (κυρίως αδρανειακούς), υλοποιώντας υβριδικές αρχιτεκτονικές εντοπισμού. Τέτοιες θα έχουν σίγουρα αυξημένο κόστος, αλλά μπορεί να αποτελέσουν μία επιλογή για αρκετά συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας.

- Η αυτοματοποιημένη διαδικασία έναρξης λειτουργίας του συστήματος. Σίγουρα απαιτείται μια σειρά προμετρήσεων για τον υπολογισμό των καμπύλων διόρθωσης μετρήσεων. Ο βέλτιστος και τυποποιημένος τρόπος υλοποίησης μικρού αριθμού μετρήσεων για ένα πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα αποτελεί θέμα προς διερεύνηση.
- Η επέκταση του συστήματος από τρεις σε έξι βαθμούς ελευθερίας.
- Η προσαρμογή της «Σφήκας» για τη λειτουργία της σε διαφορετικά Εικονικά Περιβάλλοντα και διαφορετικά συστήματα εντοπισμού (προς το παρόν η «Σφήκα» υποστηρίζει εντοπισμό με μαγνητικούς και οπτικούς αισθητήρες).
- Η εφαρμογή αντίστοιχης μεθόδου ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού για την εξέταση βασικών χαρακτηριστικών των μενού αλληλεπίδρασης σε συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας.

Η χρήση των συστημάτων Εικονικής Πραγματικότητας σε ευρεία κλίμακα σε βιομηχανικές και άλλες εφαρμογές είναι σχεδόν βέβαιη. Η αλληλεπίδραση του χρήστη με αυτά, ίσως, ποτέ δεν θα αγγίξει την αριότητα της φυσικής αλληλεπίδρασης. Εντούτοις, η διαρκής προσπάθεια βελτίωσης αυτής αποτελεί θεμέλιο λίθο για την εξέλιξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Με αυτό το σκεπτικό προεύτηκε και ο συγγραφέας κατά την εκπόνηση της ανά χείρας διατριβής.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΤΟ SENSORAMA	25
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΣΥΣΚΕΥΗ HMD	26
ΕΙΚΟΝΑ 3: CAVE™ ΣΥΣΤΗΜΑ	26
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	30
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΣΥΣΤΗΜΑ VR ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ	35
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΕΞΩΣΚΕΛΕΤΟΣ	36
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ	41
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΑΠΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥΣ ΠΟΛΟΥΣ	43
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΕΝΕΡΓΟΙ ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	49
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΙ ΣΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΡΑΣΗΣ	49
ΕΙΚΟΝΑ 11: 1 ^η ΖΩΝΗ FRESNEL	51
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΥΒΡΙΔΙΚΟ (ΑΚΟΥΣΤΙΚΟ+ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟ) ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ IS-900	57
ΕΙΚΟΝΑ 13: ΥΒΡΙΔΙΚΟ (ΑΚΟΥΣΤΙΚΟ+ΟΠΤΙΚΟ) ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ IS-1200	57
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ SPACETRAVELLER.....	60
ΕΙΚΟΝΑ 15: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΟΝΤΙΚΙ.....	60
ΕΙΚΟΝΑ 16: ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ «ΓΑΝΤΙ»	60
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ WANDA	60
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ SPACEBALL.....	61
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΚΛΑΣΙΚΟ ΧΕΙΡΙΣΤΗΡΙΟ	61
ΕΙΚΟΝΑ 20: ΔΕΙΓΜΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟ ΠΟΜΠΟ ΚΑΙ ΔΕΚΤΗ	70
ΕΙΚΟΝΑ 21: ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	72
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	73
ΕΙΚΟΝΑ 23: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΗΧΟΥ	74
ΕΙΚΟΝΑ 24: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	78
ΕΙΚΟΝΑ 25: ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΚΟΝΤΙΝΟ ΠΕΔΙΟ.	80
ΕΙΚΟΝΑ 26: ΚΑΤΟΨΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	81
ΕΙΚΟΝΑ 27: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ	83
ΕΙΚΟΝΑ 28: ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΜΕΓΑΦΩΝΟΥ	84
ΕΙΚΟΝΑ 29: ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕΓΑΦΩΝΩΝ	85
ΕΙΚΟΝΑ 30: ΤΥΠΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕΓΑΦΩΝΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	85
ΕΙΚΟΝΑ 31: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΦΩΝΩΝ: ΙΣΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟ, ΚΑΡΔΙΟΕΙΔΕΣ, ΥΠΕΡΚΑΡΔΙΟΕΙΔΕΣ, ΔΙΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟ, ΄ΠΙΣΤΟΛΙ΄.....	87
ΕΙΚΟΝΑ 32: ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟΥ	89
ΕΙΚΟΝΑ 33: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΜΙΚΡΟΦΩΝΑ.....	90
ΕΙΚΟΝΑ 34: ΚΕΡΑΜΙΚΟΙ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ (ΠΟΜΠΟΣ ΚΑΙ ΔΕΚΤΗΣ)	93
ΕΙΚΟΝΑ 35: ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ 1-3	97
ΕΙΚΟΝΑ 36: ΤΡΙΜΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΡΕΙΣ ΔΕΚΤΕΣ.....	98
ΕΙΚΟΝΑ 37: ΕΥΡΕΣΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΣΤΟΧΟΥ.....	106
ΕΙΚΟΝΑ 38: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΟΥΣ ΔΕΚΤΕΣ	108
ΕΙΚΟΝΑ 39: ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	109
ΕΙΚΟΝΑ 40: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΠΟ ΚΟΙΝΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΦΑΝΕΙΑΣ.....	111
ΕΙΚΟΝΑ 41: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ TDOA.....	113
ΕΙΚΟΝΑ 42: UNSCENTED ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ.....	120
ΕΙΚΟΝΑ 43: ΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΟΥ ΠΑΛΜΟΥ.....	157
ΕΙΚΟΝΑ 44: ΠΡΩΙΜΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΜΠΟΥ.....	161
ΕΙΚΟΝΑ 45: ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΤΗΣ 4ΜΗΖ.	161
ΕΙΚΟΝΑ 46: JK-FLIP FLOP : ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ, ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΛΗΘΕΙΑΣ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΧΡΟΝΙΣΜΟΥ... ..	163
ΕΙΚΟΝΑ 47: ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΛΗΘΕΙΑΣ ΤΟΥ 74LS90.....	163
ΕΙΚΟΝΑ 48: ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΙΡΕΣΕΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	164
ΕΙΚΟΝΑ 49: ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΑΛΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 555	165
ΕΙΚΟΝΑ 50: ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ 7404 ΚΑΙ 7408	166
ΕΙΚΟΝΑ 51: ΣΧΗΜΑΤΙΖΟΜΕΝΕΣ ΠΑΛΜΟΣΕΙΡΕΣ.....	167
ΕΙΚΟΝΑ 52: ΠΑΛΜΟΣΕΙΡΑ, ΣΗΜΑ ΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΛΟΓΙΚΗ ΑΘΡΟΙΣΗ ΣΕ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ	167

ΕΙΚΟΝΑ 53: ΠΑΛΜΟΣΕΙΡΕΣ, ΣΗΜΑ ΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΛΟΓΙΚΗ ΑΘΡΟΙΣΗ ΣΕ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ	168
ΕΙΚΟΝΑ 54: ΤΕΛΙΚΟ ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΜΠΟΥ	169
ΕΙΚΟΝΑ 55: ΤΟ ΠΛΗΡΕΣ ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΤΟΥ ΠΟΜΠΟΥ	170
ΕΙΚΟΝΑ 56: PCB ΣΧΕΔΙΟ ΤΟΥ ΠΟΜΠΟΥ	170
ΕΙΚΟΝΑ 57: ΠΛΑΚΕΤΑ ΠΟΜΠΟΥ	170
ΕΙΚΟΝΑ 58: ΠΑΛΜΟΙ 25, 33 ΚΑΙ 40ΚΗΖ ΑΠΟ ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	172
ΕΙΚΟΝΑ 59: ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΟ ΣΗΜΑ ΧΡΟΝΙΣΜΟΥ	172
ΕΙΚΟΝΑ 60: ΛΟΓΙΚΗ ΑΘΡΟΙΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΜΕ ΤΙΣ ΠΑΛΜΟΣΕΙΡΕΣ ΤΩΝ 25, 33 ΚΑΙ 40 ΚΗΖ	174
ΕΙΚΟΝΑ 61: ΕΚΠΙΕΜΠΟΜΕΝΟ ΣΗΜΑ (ΤΡΕΙΣ ΠΑΛΜΟΣΕΙΡΕΣ ΚΑΙ ΜΙΑ ΠΑΛΜΟΣΕΙΡΑ ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ)	175
ΕΙΚΟΝΑ 62: ΜΟΡΦΗ ΛΗΦΘΕΝΤΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ	177
ΕΙΚΟΝΑ 63: ΚΑΤΩΔΙΑΒΑΤΟ ΦΙΛΤΡΟ	178
ΕΙΚΟΝΑ 64: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΤΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ	179
ΕΙΚΟΝΑ 65: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΤΟΥ TL082	179
ΕΙΚΟΝΑ 66: ΚΥΚΛΩΜΑ ΨΑΛΙΔΙΣΜΟΥ	180
ΕΙΚΟΝΑ 67: ΨΑΛΙΔΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ	181
ΕΙΚΟΝΑ 68: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ	181
ΕΙΚΟΝΑ 69: PCB ΣΧΕΔΙΟ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ	182
ΕΙΚΟΝΑ 70: ΠΛΑΚΕΤΑ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ	182
ΕΙΚΟΝΑ 71: ΠΡΟΧΕΙΡΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	182
ΕΙΚΟΝΑ 72: ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ DAC PCI6110	185
ΕΙΚΟΝΑ 73: BNC-2110 CONNECTOR BLOCK	186
ΕΙΚΟΝΑ 74: DAC PCI6110	186
ΕΙΚΟΝΑ 75: ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ LEAD-EDGE TRACKING	187
ΕΙΚΟΝΑ 76: ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΣΤΟ ΔΕΚΤΗ, ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑΣ ΚΑΙ ΕΥΡΕΣΗ ΤΩΝ T_E ΚΑΙ T_S ΓΙΑ $K=0,5, 1, 2$ ΚΑΙ 3 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ	191
ΕΙΚΟΝΑ 77: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΟΥΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΓΙΑ $K=2$ ΚΑΙ $M=10$	193
ΕΙΚΟΝΑ 78: ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΟΥΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ	194
ΕΙΚΟΝΑ 79: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΕΣΦΑΛΜΕΝΩΝ ΣΥΝΑΓΕΡΜΩΝ ΜΕ ΤΟ ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ ΚΑΙ ΤΟ ΣΗΜΑΤΟΘΟΥΡΥΒΙΚΟ ΛΟΓΟ	197
ΕΙΚΟΝΑ 80: ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΚΑΤΩΦΛΙ ΣΤΟ ΔΕΚΤΗ	198
ΕΙΚΟΝΑ 81: ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΣΦΑΛΜΕΝΩΝ ΣΥΝΑΓΕΡΜΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΗΜΑΤΟΘΟΥΡΥΒΙΚΟΥ ΛΟΓΟΥ	199
ΕΙΚΟΝΑ 82: ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	200
ΕΙΚΟΝΑ 84: ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ ΓΙΑ $D=4\text{CM}$ ΚΑΙ $R=8\text{CM}$	201
ΕΙΚΟΝΑ 83: ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ ΓΙΑ $D=12\text{CM}$ ΚΑΙ $R=30\text{CM}$	201
ΕΙΚΟΝΑ 85: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΗΜΑΤΟΘΟΥΡΥΒΙΚΟΥ ΛΟΓΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΑ 25kHz	203
ΕΙΚΟΝΑ 86: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΗΜΑΤΟΘΟΥΡΥΒΙΚΟΥ ΛΟΓΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΑ 33kHz	204
ΕΙΚΟΝΑ 87: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΗΜΑΤΟΘΟΥΡΥΒΙΚΟΥ ΛΟΓΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΑ 40kHz	204
ΕΙΚΟΝΑ 88: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΠΟΛΥΔΙΑΔΡΟΜΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΓΙΑ $F=25\text{kHz}$ ΚΑΙ $R=270\text{CM}$	206
ΕΙΚΟΝΑ 89: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΑΝΕΠΑΡΚΟΥΣ ΓΕΙΩΣΗΣ	207
ΕΙΚΟΝΑ 90: ΝΕΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΔΕΚΤΗ	207
ΕΙΚΟΝΑ 91: ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΕΣ ΤΟΥ 74LS90 ΩΣ ΔΙΑΙΡΕΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	209
ΕΙΚΟΝΑ 92: ΠΡΟΣΟΨΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΕΚΤΩΝ	213
ΕΙΚΟΝΑ 93: ΚΑΤΟΨΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΕΚΤΩΝ	213
ΕΙΚΟΝΑ 94: ΛΗΦΘΕΝ ΣΗΜΑ ΓΙΑ $D=30\text{CM}$, $F=25\text{kHz}$	214
ΕΙΚΟΝΑ 95: ΛΗΦΘΕΝ ΣΗΜΑ ΓΙΑ $D=90\text{CM}$, $F=25\text{kHz}$	214
ΕΙΚΟΝΑ 96: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΣΦΑΛΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	216
ΕΙΚΟΝΑ 97: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ $1^{1\text{H}}$ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΙΜΗ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (1^{H} ΦΑΣΗ)	216
ΕΙΚΟΝΑ 98: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ $1^{1\text{H}}$ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΤΙΜΗ (Α) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (1^{H} ΦΑΣΗ)	217
ΕΙΚΟΝΑ 99: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ $1^{1\text{H}}$ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΤΙΜΗ (Β) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (1^{H} ΦΑΣΗ)	217
ΕΙΚΟΝΑ 100: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 2^{H} ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΙΜΗ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (1^{H} ΦΑΣΗ)	218
ΕΙΚΟΝΑ 101: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 2^{H} ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΙΜΗ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ (1^{H} ΦΑΣΗ)	218
ΕΙΚΟΝΑ 102: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 2^{H} ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΤΙΜΗ (Α) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (1^{H} ΦΑΣΗ)	218

ΕΙΚΟΝΑ 103: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 2ΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΤΙΜΗ (Α) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ (1Η ΦΑΣΗ).....	218
ΕΙΚΟΝΑ 104: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 2ΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΤΙΜΗ (Β) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (1Η ΦΑΣΗ).....	218
ΕΙΚΟΝΑ 105: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 2ΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΤΙΜΗ (Β) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ (1Η ΦΑΣΗ).....	218
ΕΙΚΟΝΑ 106: ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΜΠΩΝ	219
ΕΙΚΟΝΑ 107: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΛΥΔΙΑΔΡΟΜΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ	220
ΕΙΚΟΝΑ 108: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΛΥΔΙΑΔΡΟΜΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ	220
ΕΙΚΟΝΑ 109: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 1 ^{ΗΣ} ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΙΜΗ (Α) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (2 ^Η ΦΑΣΗ)	223
ΕΙΚΟΝΑ 110: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 1 ^{ΗΣ} ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΙΜΗ (Β) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (2 ^Η ΦΑΣΗ)	223
ΕΙΚΟΝΑ 111: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 1 ^{ΗΣ} ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΤΙΜΗ (Α) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (2 ^Η ΦΑΣΗ)	224
ΕΙΚΟΝΑ 112: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 1 ^{ΗΣ} ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΤΙΜΗ (Β) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (2 ^Η ΦΑΣΗ)	224
ΕΙΚΟΝΑ 113: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 2 ^{ΗΣ} ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΙΜΗ (Α) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (2 ^Η ΦΑΣΗ)	225
ΕΙΚΟΝΑ 114: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ 2 ^{ΗΣ} ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΤΙΜΗ (Α) ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (1Η ΦΑΣΗ).....	226
ΕΙΚΟΝΑ 115: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ (ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ: ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΠΡΩΤΗΣ ΑΦΙΞΗΣ, ΣΤΑΘΕΡΟ ΚΑΤΩΦΛΙ)	227
ΕΙΚΟΝΑ 116: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (33kHz, ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΠΡΩΤΗΣ ΑΦΙΞΗΣ)	227
ΕΙΚΟΝΑ 117: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ CFAR (33kHz, ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΠΡΩΤΗΣ ΑΦΙΞΗΣ).....	227
ΕΙΚΟΝΑ 118: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ (N=100ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΘΕΣΗ-25kHz).....	228
ΕΙΚΟΝΑ 119: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΡΩΤΗΣ ΑΦΙΞΗΣ ΣΤΟ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΧΩΡΟ (F=25kHz).....	229
ΕΙΚΟΝΑ 120: ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ ΣΕ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΤΜΗΜΑΤΑ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ (ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ ΚΑΙ ΚΑΤΩΨΗ)	229
ΕΙΚΟΝΑ 121: ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΑΝΑ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ (F=25kHz)	230
ΕΙΚΟΝΑ 122: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΣΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ (ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΗΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΚΑΤΩΦΛΙ-F=25kHz).....	231
ΕΙΚΟΝΑ 123: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΣΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΗΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΚΑΤΩΦΛΙ-F=25kHz)	231
ΕΙΚΟΝΑ 124: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΣΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΗΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΚΑΤΩΦΛΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ-F=25kHz).....	232
ΕΙΚΟΝΑ 125: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΗΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΚΑΤΩΦΛΙ-F=25kHz).....	233
ΕΙΚΟΝΑ 126: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΠΡΩΤΗΣ ΑΦΙΞΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟ ΚΑΤΩΦΛΙ-F=40kHz)	233
ΕΙΚΟΝΑ 127: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΚΤΙΜΗΤΗ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 5	235
ΕΙΚΟΝΑ 128: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΛΓΕΒΡΙΚΟΥ ΕΚΤΙΜΗΤΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 3.....	236
ΕΙΚΟΝΑ 129: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ CV ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 1	237
ΕΙΚΟΝΑ 130: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ CV ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 7	237
ΕΙΚΟΝΑ 131: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ CA ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 2	238
ΕΙΚΟΝΑ 132: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ CTR ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 1.....	238
ΕΙΚΟΝΑ 133: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ CTR ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 4.....	239
ΕΙΚΟΝΑ 134: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ IMM ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ΚΑΙ 3	240
ΕΙΚΟΝΑ 135: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ (3Η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΠΡΩΤΗΣ ΑΦΙΞΗΣ-ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ 40mV)	243
ΕΙΚΟΝΑ 136: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ (3Η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΠΡΩΤΗΣ ΑΦΙΞΗΣ-ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΚΑΤΩΦΛΙ ΜΕ K=5).....	243
ΕΙΚΟΝΑ 137: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ (3Η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΟΥΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ-ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΚΑΤΩΦΛΙ ΜΕ K=2,5).....	244

ΕΙΚΟΝΑ 138: ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ (3 ^Η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΟΥΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ-ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ $V=40mV$)	245
ΕΙΚΟΝΑ 139: ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΝΑΚΛΑΣΕΩΝ ΣΕ ΠΟΛΥ ΚΟΝΤΙΝΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ	245
ΕΙΚΟΝΑ 140: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΣΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ Α)ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ Β)ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ Γ)ΔΙΟΡΘΩΣΗ (3 ^Η ΣΕΙΡΑ-ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΗΣ-CFAR, $\kappa=2,5$, ΠΑΝΩ ΔΕΚΤΗΣ)	247
ΕΙΚΟΝΑ 141: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΣΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ Α)ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ Β)ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ Γ)ΔΙΟΡΘΩΣΗ (3 ^Η ΣΕΙΡΑ-ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΗΣ-CFAR, $\kappa=2,5$, ΑΡΙΣΤΕΡΟΣ ΔΕΚΤΗΣ)	248
ΕΙΚΟΝΑ 142: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΣΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ Α)ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ Β)ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ Γ)ΔΙΟΡΘΩΣΗ (3 ^Η ΣΕΙΡΑ-ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΗΣ-CFAR, $\kappa=2,5$, ΔΕΞΙΟΣ ΔΕΚΤΗΣ).....	249
ΕΙΚΟΝΑ 143: ΕΜΒΕΛΕΙΑ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΔΕΚΤΩΝ	250
ΕΙΚΟΝΑ 144: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ Α)ΠΑΝΩ Β)ΑΡΙΣΤΕΡΟ Γ)ΔΕΞΙΟ ΔΕΚΤΗ (3 ^Η ΣΕΙΡΑ-ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΗΣ-CFAR, $\kappa=2,5$).....	252
ΕΙΚΟΝΑ 145: ΜΕΤΑΒΟΛΗ GDOP ΓΙΑ $R=50, 150$ ΚΑΙ $250cm$ (ΑΛΓΕΒΡΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ)	254
ΕΙΚΟΝΑ 146: ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΕΛΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	256
ΕΙΚΟΝΑ 147: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΣ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΤΟΧΟΥ	258
ΕΙΚΟΝΑ 148: ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΤΟΧΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ	259
ΕΙΚΟΝΑ 149: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΣΗΣ-ΕΠΙΠΕΔΟ ΧΥ-1 ^Η ΚΙΝΗΣΗ	259
ΕΙΚΟΝΑ 150: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΣΗΣ-ΕΠΙΠΕΔΟ ΧΖ-1 ^Η ΚΙΝΗΣΗ	259
ΕΙΚΟΝΑ 151: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΣΗΣ-ΕΠΙΠΕΔΟ ΧΥ-2 ^Η ΚΙΝΗΣΗ	260
ΕΙΚΟΝΑ 152: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΣΗΣ-ΕΠΙΠΕΔΟ ΧΥ-ΚΙΝΗΣΗ 2Β.....	261
ΕΙΚΟΝΑ 153: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΣΗΣ-ΕΠΙΠΕΔΟ ΧΥ-3 ^Η ΚΙΝΗΣΗ	261
ΕΙΚΟΝΑ 154: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ IMM-ΕΠΙΠΕΔΟ ΧΥ-3 ^Η ΚΙΝΗΣΗ	262
ΕΙΚΟΝΑ 155: ΚΥΨΕΛΩΤΗ ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	263
ΕΙΚΟΝΑ 156: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΘΡΩΠΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ «ΣΦΗΚΑΣ»	269
ΕΙΚΟΝΑ 157: Το ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΥΡΙ-6	270
ΕΙΚΟΝΑ 158: Ο ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΤΟΙΧΟΣ ΤΟΥ ΕΜΟΙ	270
ΕΙΚΟΝΑ 159: Το ΦΟΡΗΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΡΙ-CASSO.....	270
ΕΙΚΟΝΑ 160: Η ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΙΚΕ	272
ΕΙΚΟΝΑ 161: ΑΡΧΙΚΕΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ	273
ΕΙΚΟΝΑ 162: ΜΕΝΟΥ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ.....	276
ΕΙΚΟΝΑ 163: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΕΝΟΥ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ	279
ΕΙΚΟΝΑ 164: ΑΡΧΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΤΗΣ «ΣΦΗΚΑΣ»	282
ΕΙΚΟΝΑ 165: ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΦΗΣ ΤΗΣ «ΣΦΗΚΑΣ» ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΧΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	282
ΕΙΚΟΝΑ 166: ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΤΗΣ «ΣΦΗΚΑΣ»	284
ΕΙΚΟΝΑ 167: ΣΥΝΗΘΕΣΤΕΡΗ ΛΑΒΗ «ΣΦΗΚΑΣ».....	284
ΕΙΚΟΝΑ 168: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ	287
ΕΙΚΟΝΑ 169: ΈΚΔΟΣΗ ΤΗΣ «ΣΦΗΚΑΣ» ΓΙΑ ΟΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ	290
ΕΙΚΟΝΑ 170: Το DRAGONFLY.....	291
ΕΙΚΟΝΑ 171: Το BUG.....	291

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΜΠΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ.....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΗΧΟΥ	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΗΧΟΥ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΥΓΡΑΣΙΑ ΓΙΑ $\theta=20^{\circ}\text{C}$ ΚΑΙ $p=101,25\text{kPASCAL}$ ΣΕ DB/KM	79
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΕΚΠΙΕΜΠΟΜΕΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΜΕΓΑΦΩΝΩΝ	85
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΩΝ ΔΕΚΤΩΝ	109
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΣΥΝΟΨΗ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ	131
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΩΝ.....	160
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΩΝ	176
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ.....	190
ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑΣ	192
ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΕΜΒΕΛΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΔΕΚΤΩΝ.....	202
ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΟΥ ΣΤΟΧΟΥ	255
ΠΙΝΑΚΑΣ 15: ΤΕΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΣΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ	255
ΠΙΝΑΚΑΣ 16: ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	257
ΠΙΝΑΚΑΣ 17: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ.....	274
ΠΙΝΑΚΑΣ 18: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΕΝΟΥ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ.....	277
ΠΙΝΑΚΑΣ 19: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΩΝ.....	278
ΠΙΝΑΚΑΣ 20: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ/ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΥΟ ΣΥΣΚΕΥΕΣ	288

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [ADEL96] Adelstein, B.D., Johnston, E.R., & Ellis, S.R. (1996). "Dynamic response of electromagnetic spatial displacement trackers". *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3), pp. 302-318
- [AMDI02] Amditis, A., Polychronopoulos, A., Karaseitanidis, I., Katsoulis, G., Bekiaris, E., (2002). "Multiple - Sensor - Collision avoidance system for automotive applications using an IMM approach for obstacle tracking". In *Proc. 5th International Conference on Information Fusion*, Annapolis MD, USA.
- [AMDI03] Amditis A., Karaseitanidis I., (2003). "Virtual Reality Technology , A Future Training and Educational Tool". In *Proc. of E-challenges conference 2003*, Bologna, Italy, pp.: 1567-1572.
- [APPL91] Applewhite, H., (1991). "Design of acoustic ranging systems", Technical Report 9 1-02, Piltown Incorporated: Beavertown, Oregon.
- [ASTU05] Astur, R., Kaufmann, H., Kim, G., Mania, K., Rizzo, A., Tendick, F. (2005). "Virtual Reality and Spatial Ability". Panel at *IEEE Virtual Reality 2005*, Bonn, Germany.
- [AYOA91] Aoyagi, S. Okabe, S. Sasaki, K. Takano, M. (1991). "Measurement of 3-D position and orientation of a robot using ultrasonic waves". In *Proc. IECON '91*, pp: 2466-2471 vol.3
- [AZUM94] Azuma R. and Bishop G., (1994). "Improving static and dynamic registration in a see-through hmd". In *Proc. of SIGGRAPH'94*, pp: 197-204
- [AZUM95a] Azuma, R. (1995). "Predictive tracking for augmented reality", Ph.D. dissertation, UNCCS at Chapel Hill, TR-95-007.
- [AZUM95b] Azuma, R. and Bishop G. (1995). "A Frequency Domain Analysis of Head Motion Prediction". In *Proc of SIGGRAPH' 95*, pp: 401-408.
- [BADL93] Badler, N., Hollick, M.J., & Graneri, J.P. (1993). "Real-time control of a virtual human using minimal sensors". *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2(1), pp. 82-86
- [BALA93] Balaguer, J. F., & Gobetti, E. (1993). "Virtuality Builder II: On the Topic of 3D Interaction". In D. Thalmann & N. Magnenat-Thalmann (Eds.), *Virtual Reality and Multimedia*, New York, NY: John Wiley and Sons, pp: 99-112.
- [BANC85] Bancroft, S., (1985). "An algebraic solution of the GPS equations". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 21, pp:56-59.
- [BAND86] Bandera J.E., Kern, P., Solf, J.J., (1986). "Leitfaden zur Auswahl, Anordnung und Gestaltung von kraftbetonten Stellteilen". *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz*, Dortmund. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag

- NW.
- [BARA54] Baranek, Leo L. (1954). *Acoustics*. New York: McGraw-Hill.
- [BARF95a] Barfield W. and Hendrix C., (1995a). "The effect of update rate on the sense of presence within virtual environments". *Virtual Reality: Research, Development and Applications* 1(1).
- [BARF95b] Barfield, W., & Hendrix, C. (1995b). "Factors affecting presence and performance in virtual environments". In R. M. Satava, K. Morgan, H. B. Sieburg, R. Matheus, & J. P. Christensen (Eds.), *Interactive Technology and the New Paradigm for Healthcare* (pp. 21-28). Amsterdam: IOS Press.
- [BARF98] Barfield, W., Baird, K. M., & Bjorneseth, O. J. (1998). "Presence in virtual environments as a function of type of input device and display update rate". *Displays*, 19(2), pp: 91-98.
- [BARS93] Bar-Shalom, Y. & Li, X.R. (1993). "Estimation and Tracking Principles, Techniques, and Software". Boston: Artech House
- [BARS01] Bar-Shalom Y., Rong Li X., Kirubarajan T., 2001, "Estimation with applications to Tracking and Navigation", John Wiley and Sons Inc.
- [BAUD93] Baudel, T., Beaudouin-Lafon, M., (1993). "Charade: remote control of objects using freehand gestures". *Communications of the ACM*, 36 (7), pp: 28-35.
- [BAYO03] Bayon, V., Griffiths, G., (2003). "Co-located interaction in virtual environments via decoupled interfaces". In *Proc. of the HCII2003*, Crete, Greece.
- [BHAT93] Bhatnagar, D.K. (1993). "Position trackers for Head Mounted Display systems: A survey", Department of Computer Sciences at the University of North Carolina at Chapel Hill.
- [BIOC02] Biocca, F., Brooks, F.P. Jr., Hodges, L.F., Mania, K., Slater, M., Steed, A., Whitton, M. (2002). "Understanding Virtual Environments: Immersion, Presence, and Performance". Full day course at ACM Siggraph 2002, San Antonio, USA.
- [BLAN04] Blanc, C., Trassoudaine, L., Le Guilloux, Y., Moreira, R., "Track to track fusion method applied to road obstacle detection". In *Proc. of the 7th Information Fusion Conference*, Stockholm, June, 2004
- [BLAC99] Blackman S.S. and Popoli R., (1999). "Design and Analysis of Modern Tracking Systems", Norwood, MA: Artech House.
- [BLAC00] Blackstock, D. T. (2000) "Fundamentals of physical acoustics". New York : John Wiley & Sons, Inc.
- [BLOM86] Blom H., "Overlooked potential of system with Markovian coefficients",

-
- Proc. 25th Congress on Decision and Control, Athens Greece, December, 1986, pp. 1758-1763
- [BLOM88] Blom, H.A.P. and Bar-Shalom, Y., (1988). "The Interacting Multiple Model for Systems with Markovian Switching Coefficients". IEEE Trans. On Automatic Control, 33(8), pp: 780-783
- [BLOO89] Blood, E.B. (1989). "Device for quantitatively measuring the relative position and orientation of two bodies in the presence of metals utilizing direct current magnetic fields". US Patent 4,849,692.
- [BOWM01a] Bowman, D.A., Johnson, D.B., Hodges, L.F., (2001). "Testbed evaluation of virtual environment interaction techniques". Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 10(1), pp: 75-95.
- [BOWM01b] Bowman, D., Wingrave, C., (2001). "Design and evaluation of menu systems for immersive virtual environments". In Proc. of IEEE Virtual Reality, 2001, pp: 149-156.
- [BRAD98] Bradski G. R., (1998). "Computer Vision Face Tracking For Use in a Perceptual User Interface", Intel Tech. Journal 2nd quarter 1998.
- [BROL05] Broll W., Lindt I., Ohlenburg J., Linder A., (2005). "A Framework for Realizing Multi-Modal VR and AR User Interfaces". In Proc. Of HCI International 2005, Las Vegas, USA.
- [BROW92] Brown, R.G. & Hwang, P.Y.C. (1992). Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. New York:John Wiley & Sons, Inc.
- [BRYS90] Bryson, S. and Fisher, S.S. (1990) Defining, modelling and measuring system lag in virtual environments. Stereoscopic Displays and Applications, SPIE vol 1256, 98-109.
- [BULL94] Bullinger, H-J., (1994). "Ergonomie, Produkt und Arbeitsplatzgestaltung", Teubner, Stuttgart.
- [BURD93] Burdea, G. & Coiffet, P. (1993). "The visual display system you wear" Virtual Reality, Hermes editions, France. CAE Electronics (1991)., CAE-7-3739-BR, Trade literature.
- [BURD96] Burdea, G., Richard, P., & Coiffet, P. (1996). "Multimodal virtual reality: input-output devices, system integration, and human factors human-virtual environment interaction". International Journal of Human-Computer Interaction, 8(1), pp: 5-24.
- [BURD03] Burdea, G. & Coiffet, P. (2003). "Virtual Reality Technology" New York, John Wiley & Sons, Inc
- [BUXT86] Buxton, W., (1986). "There's more to interaction than meets the eye: Some issues in manual input". Norman, D., Draper, S., (Eds.), User Centred

-
- System Design: New Perspectives on Human-Computer Interaction. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, N.J., pp: 319-337.
- [CARD91] Card, S.K., Mackinlay, J.D., Robertson, G.G., (1991). "A morphological analysis of the design space of input devices". *ACM transactions on information systems*, 9(2), pp: 99-122.
- [CHAI99] Chai L., Nguyen K., Hoff B., and Vincent T., (1999). "An adaptive estimator for registration in augmented reality. In Proc. of 2nd IEEE and ACM Int'l Workshop on Augmented Reality (IWAR) '99
- [CHAV84] Chavel, P. & Strand, P. (1984). "Range measurement using Talbot diffraction imaging of gratings", *Applied Optics*, 23(6), 862-870.
- [CHEV96] Chevrier, C. (1996). "Handling Interactions between Real and Virtual Worlds. In Proc. of the Computer Graphics International; IEEE Computer Society Press pp: 74-83.
- [COBB95] Cobb, S., Nichols, S. and Wilson, J.R. (1995). "Health and safety implications of virtual reality: in search of an experimental methodology". In: Proc. FIVE'95 (Framework for Immersive Virtual Environments), University of London.
- [CONG02] Cong L. and Zhuang W. (2002), "Hybrid TDOA/AOA mobile user location for wideband CDMA cellular systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, pp. 439-447.
- [CROC98] Crocker, M. J., (1998). "Handbook of Acoustics", Wiley, N. Y.,
- [DARK94] Darken, R., (1994). "Hands-off interaction with menus in virtual spaces". In Proc. of SPIE 1994, Stereoscopic displays and virtual reality systems, 2177, pp: 365-371.
- [DOHE90] Doherty, R. (1990). "DC magnetic fields guide 6D pointer". *Electronic Engineers Time*.
- [DOUC01] Doucet A., Gordon N. J., and Krishnamurthy V., (2001). "Particle Filters for state estimation of jump markov linear systems". *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 49 No..3 pp: 613-624.
- [DUCH98] Ducharme, A.D., Baum, P.N., Wyntjes, G., Shepard, O., & Markos, C.T. (1998). "Phase-based optical metrology system for helmet tracking." In Proc. of SPIE Vol. 3362 Helmet and Head-Mounted Displays III, AeroSense 98, Orlando, FL.
- [DURL94] Durlach, N.I., and Mavor A.S., (1994) "Virtual Reality: Scientific and Technical Challenges" National Academy Press. Washington D.C.
- [EAST01] Eastgate, R., (2001). "The Structured Development of Virtual Environments: Enhancing Functionality and Interactivity". PhD Thesis, University of

Nottingham, Nottingham.

- [ELIA90] Elias-Fuste, A.R. Broquetas-Ibars, A.P (1990). "Constant false alarm rate for a radar data fusion center with N parallel distributed cell averaging receivers" In Proc. of IEEE Radar Conference, 1990, pp: 507-510.
- [ELLI99] Ellis, S.R., Young, M.J., Adelstein, B.D., & Ehrlich, S.M. (1999). "Discrimination of changes in latency during voluntary hand movement of virtual objects". In Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society, Houston, TX.
- [ELLI04] Ellis, S.R., Mania, K., Adelstein, B.D., Hill, M. (2004). Generalizeability of Latency Detection in a variety of Virtual Environments. Human Factors and Ergonomics Society 48th Annual meeting, New Orleans, USA
- [EMUR98] Emura S. and Tachi S., (1998). "Multisensor integrated prediction for virtual reality". Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 7(4):410-422
- [ESCO65] Escobal P., (1965). "Methods of Orbit Determination". Robert E. Krieger Publishing Company
- [EVER94] Everest, F. A. (1994). "The master handbook of acoustics". New York : TAB Books
- [FANG86] Fang B.T., (1986). "Trilateration and Extension to Global Positioning System Navigation. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 9(6)
- [FELG92] Felger, W. (1992). "How Interactive Visualization Can Benefit from Multidimensional Input Devices". In Proc. of the Visual Data Interpretation, SPIE, pp. 15-24.
- [FERR91] Ferrin, F.J. (1991). "Survey of helmet tracking technologies", SPIE proceedings, Large Screen Projection, Avionics and Helmet Mounted Displays, 1456, 86-94.
- [FIGU93] Figueiredo, M., Bohm, K., & Teixeira, J. (1993). "Advanced Interaction Techniques in Virtual Environments". Computers and Graphics, 17(6), pp: 655-661.
- [FILI99] Filippi P., Bergassoli A., Habault D., Lefebvre J.P., (1999). "Acoustics : basic physics, theory and methods". San Diego : Academic Press, c1999.
- [FLET87] Fletcher, R. (1987). "Practical Methods of Optimization". John Wiley and Sons, Chichester, England.
- [FOX93] Foxlin, E. (1993). "Inertial head-tracking". M.S. Thesis, MIT Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Cambridge, MA.
- [FOX98] Foxlin, E., Harrington M., and Pfeifer, G., (1998). "Constellation: A Wide-range Wireless Motion-tracking System for Augmented Reality and Virtual Set Applications". In Proc. SIGGRAPH '98 (ACM Conf. on Computer

- Graphics and Interactive Techniques), pp: 371–378.
- [FOXLO2] Foxlin E. (2002). “Handbook of Virtual Environment Technology”, Lawrence Erlbaum Associates
- [FOY76] Foy W.H. (1976). “Position-location solutions by Taylor-series estimation”. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions, Volume 12, Issue 2, pp:187 - 194
- [FRAN88] Frank, L.H., Casali, J.G. and Wierville, W.W. (1988). “Effects of visual display and motion system delays on operator performance and uneasiness in a driving simulator”. Human Factors, 30, 201-217.
- [FUCH96] Fuchs, P. (1996). “Les interfaces de la réalité virtuelle”, Interfaces-Les journées de Montpellier, France.
- [GABB97a] Gabbard, J., Hix, D., (1997). “A taxonomy of usability characteristics in virtual Environments”. Deliverable to the Office of Naval Research, Virginia Polytechnics Institute and State University, VA.
- [GABB97b] Gabbard, J., Hix, D., Swan, E., (1999). “User-centred design and evaluation of virtual environments”. IEE Computer Graphics and Applications, 19, pp: 51-59.
- [GAVI92] Gavish, M. and Weiss, A. J. (1992). “Performance analysis of bearing-only target location algorithms”. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions, Volume 28, Issue 3, pp:817 - 828
- [GELB74] Gelb, A., (1974). “Applied Optimal Estimation. Cambridge”. Massachusetts: The MIT Press.
- [GETT93] Getting, I. (1993). The global positioning system. IEEE Spectrum, December, 1993.
- [GLEK05] Glekas G., (2005). “Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος ανίχνευσης κινητού στόχου με υπερήχους για συστήματα Εικονικής Πραγματικότητας”. Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ
- [GROK59] Grokinski, H. L., (1959). “Position estimation using only multiple simultaneous range measurements”. Aeronautical and Navigational Electronics, IRE Transactions, ANE-6, pp: 178-187.
- [HALL04] Drexel Hallaway, Steven Feiner, Tobias Höllerer: Bridging the Gaps: Hybrid Tracking for Adaptive Mobile Augmented Reality. Applied Artificial Intelligence 18(6): 477-500 (2004)
- [HARR66] Harris C. M., (1966). “Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature”. Journal of the Acoustical Society of America, 40, p. 148.
- [HETT92] Hettinger, L.J. and Riccio, G.E. (1992) “Visually induced motion sickness in virtual environments”. Presence, 1, 306-310.

-
- [HOFF96] Hoff, W., Nguyen, K., & Lyon, T. (1996). "Computer vision-based registration techniques for augmented reality". Proceedings of Intelligent Robots and Computer Vision XV, SPIE Vol. 2904, Boston, MA, pp. 538-548.
- [HOFF06] Hoffmann H., Stefani O., Patel H., (2006). "Extending the desktop workplace by a portable virtual reality system". International Journal of Human-Computer Studies, 64 (3), pp: 170-181.
- [HOGU04] Hogue, A., Jenkin, M.R., Allison, R.S., (2004). "An optical-inertial tracking system for fully-enclosed VR displays". In Proc. Computer and Robot Vision, 2004, pp: 22- 29
- [HU01] Hu, W. C. and Tang, W. H. (2001). "Automated least-squares adjustment of triangulation-trilateration figures". Journal of Surveying Engineering, Nov. 2001, pp: 133-141
- [IEC05] IEC 60268-4 (2005). "Sound system equipment – Part 4:Microphones"
- [ISO93] ISO 9613-1 (1993). "Acoustics -- Attenuation of sound during propagation outdoors -- Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere"
- [ITOH97] Itoh, T.; Sueda, H.; Watanabe, Y., (1997). "Motion compensation for ISAR via centroid tracking". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Volume 32, Issue 3, pp: 1191 - 1197
- [JACO93] Jacob, R. J. K., Leggett, J. J., Myers, B. A., & Pausch, R. (1993). "Interaction Styles and Input/Output Devices". Behaviour and Information Technology, 12(2), pp: 69-79.
- [JACO94] Jacob, R., Sibert, L., McFarlane, D., Mullen Jr., P., (1994). "Integrity and separability of input devices". ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 1(1), pp: 3-26.
- [JIAN04] Jiang B., You S., Neumann U., (2004). "A Robust Tracking System for Outdoor Augmented Reality", In Proc. IEEE VR 2004, Chicago.
- [JOHN01] Johnston L. A., and Krishnamurthy V., (2001) "An Improvement to the Interacting Multiple Model (IMM) Algorithm", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 49, No. 12.
- [JONE89] Jones, D., Hopeshi, K., Frankish, C., (1989). "Design guidelines for speech recognition interfaces". Applied Ergonomics, 20 (1), pp: 47-52.
- [JORG84] Jorgensen, F.S., (1984). "Navstart/Global Positioning System 18-Satellite Constellations". Global Positioning System, 2, The Institute of Navigation, Washington DC, pp:2-12
- [JULI95] Julier, S. J., Uhlmann, J. K., & Durrant-Whyte, H. F. (1995). "A new

- approach for $\bar{\cdot}$ filtering nonlinear systems". In Proc. of the American Control Conference pp: 1628-1632. Seattle, Washington: IEEE.
- [JULI96] Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (1996). "A general method for approximating nonlinear transformations of probability distributions". Technical Report RRG, Department of Engineering Science, University of Oxford
- [JUNG00] Jung, J. Y., Adelstein, B. D. and Ellis, S. R., (2000). "Predictive Compensator Optimization for Head Tracking Lag in Virtual Environments". In Proc. of IMAGE 2000 Conference.
- [KALA99] Kalawsky, R., (1999). "VRUSE – a computerised diagnostic tool: for usability evaluation of virtual/synthetic environment systems". Applied Ergonomics, 30, pp: 11-25.
- [KALM60] Kalman, R.E. (1960). "A new approach to linear filtering and prediction problems. ASME Transactions Journal of Basic Engineering, 82(1), pp: 35-45
- [KAPA92] Kapandji, I.A., (1992). "Funktionelle Anatomie der Gelenke" (2nd ed.), Bd. 1: Obere Extremitäten. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.
- [KARA04a] Karaseitanidis I., Stefani O. (2004). "Designing 3D input devices for immersive environments". In Proc. SMC (7) 2004: pp: 6280-6285
- [KARA04b] Karaseitanidis, I., Amditis, A., Patel, H., Stefani, O., Bekiaris, E., & Tzoumpas, A. (2004). "User-centred usability evaluation of VR input devices". In Proc. of Virtual Reality Design and Evaluation Workshop 2004, Nottingham, UK.
- [KARA05] Karaseitanidis I., Weiss A., Werner A., Amditis A., (2005). "Trends in VR tracking". In Proc. INTUITION 2nd International Workshop: VR&VE, Challenges and Opportunities, Paris, 24-25th November 2005
- [KARA06] Karaseitanidis, I., Amditis, A., Patel, H., Sharples, S.C., Bekiaris, E., Bullinger, A., Estoppey, K., (2006). "Evaluation of virtual reality products and applications from individual, organisational and societal perspectives". International Journal of Human-Computer Studies, 64 (3), pp: 251-266.
- [KAUR98] Kaur, K., (1998). "Designing Virtual Environments for Usability", PhD thesis, CityUniversity London, UK.
- [KAYE95] Kaye & Laby (1995). "Teables of Physical & Chemical constants". e-book <http://www.kayelaby.npl.co.uk>
- [KERR91] Kerr, T. H., (1991). "Streamlining Measurement Iteration for EKF Target Tracking". Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions, Volume 27, Issue 2, pp:408 – 420
- [KIM00] Kim, N., Kim, G.J., Park, C-M., Lee, I., Lim, S.H., (2000). "Multimodal

-
- menu presentation and selection in immersive virtual environments”. In Proc. of IEEE Virtual Reality 2000.
- [KING68] Kingsbury, H. F. and Wallace W. J., (1968). “Acoustic Absorption Characteristics of People”. *Sound and Vibration*, 2, 2 pp:15-16
- [KLEI1898] Klein F. and Sommerfeld A., (1898-1914). “Über die Theorie des Kreisels”. Leipzig, Berlin, B.G. Teubner,. 4 v. illus. 25 cm.
- [KOKO91] Kokolakis G., Spiliotis I., (1991). “Εισαγωγή στη θεωρία των πιθανοτήτων και στατιστική”, Εκδόσεις Συμμεών.
- [KOLA95] Kolasinski, E.M. (1995). “Simulator sickness in virtual environments”. Technical Report 1027, U.S. Army Research Institute for the Behavioural and Social Sciences, Alexandria, VA.
- [KOLL97] Koller, D., Klinker, G., Rose, E., Breen, D., Whitaker, R. & Tuceryan, M. (1997). “Real-time vision-based camera tracking for augmented reality applications”. Proceedings of ACM VRST 97 Conference, Lausanne, Switzerland.
- [KUIP75] Kuipers, J. (1975). “Object tracking and orientation determination means, system and process”. U.S. Patent 3,868,565.
- [KUIP76] Kuipers, J. (1975). “Tracking and determining orientation of object using coordinate transformation means, system and process”. U.S. Patent 3,983,474.
- [LAVI03a] LaViola. J. J., (2003). “A Testbed for Studying and Choosing Predictive Tracking Algorithms in Virtual Environments”. In Proc. of Immersive Projection Technology and Virtual Environments 2003, ACM Press, pp:189-198.
- [LAVI03b] LaViola J. J., (2003). “A comparison of unscented and extended kalman filtering for estimating quaternion motion”. In Proc. of Am. Control Conf., pp: 2435-2440
- [LECA99] Le Cadre, J.-P. and Jaetffret, C., (1999). “On the convergence of iterative methods for bearings-only tracking”. *Aerospace and Electronic Systems*, IEEE Transactions, Volume 35, Issue 3, pp:801 - 818
- [LEE02] Lee J. W., You S., and Neumann U., (2002). “Tracking with Omni-Directional Vision for Outdoor AR Systems”. In Proc. IEEE ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2002, pp. 47-56, Darmstadt, Germany.
- [LIU91] Liu, A., Tharp, G., Hirose, M. and Stark, L. (1991) “Visual factors affecting human operator performance with a head-mounted display”. SAE Technical Paper 911389.

-
- [LUDW06] Ludwig A. (2006). "Physics of sound". e-book http://www.silcom.com/~aludwig/Physics/Main/Physics_of_sound.html
- [LYNC98] Lynch, D. (1998). "Coriolis vibratory gyros". Included as Annex B in IEEE gyro and Accelerometer Panel Working Draft P1431/D16, Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros. IEEE Standards Department, June 1999.
- [MACK95] MacKenzie, I. S. (1995). "Input Devices and Interaction Techniques for Advanced Computing". In T. A. Furness & W. Barfield (Eds.), *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, (pp. 437-472). New York, NY: Oxford University Press.
- [MAHA01] Mahajan A. and Walworth M., (2001). "3-D Position Sensing using the Differences in the Time-of-Flights from a Wave Source to various Receivers". *Robotics and Automation, IEEE Transactions*, Volume 17, Issue 1, pp:91 - 94
- [MANA04] Manandhar, D., Y. Suh, Shibasaki R., (2004). "GPS Signal Acquisition and Tracking - An Approach towards Development of Software-based GPS Receiver", Technical Report of IEICE, ITS2004.
- [MANI04] Mania, K., Adelstein, B., Ellis, S.R., Hill, M. (2004). "Perceptual Sensitivity to Head Tracking Latency in Virtual Environments with Varying Degrees of Scene Complexity". In *Proc. ACM Siggraph Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, 39-47, ACM Press.
- [MANO93] Manolakis, D. E. and Lefas, C. C. (1993). "Systematic errors in ground referenced geometric height monitoring". *IEE Proceedings, Pt. F. (Radar and Signal Processing)*, 140, 2, pp:138-144
- [MANO96] Manolakis D., (1996). "Efficient solution and performance analysis of 3-D Position Estimation by Trilateration". *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions*, Volume 32, Issue 4, pp:1239 - 1248
- [MART01] Martin R., (2001). "Noise Power Spectral Density Estimation based on Optimal Smoothing and Minimum Statistics". *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Vol. 9, No. 5, pp: 504-512
- [MASO64] Mason W. P., (1964) "Piezoelectric crystals and their application to ultrasonics". Princeton, N.J : D. Van Nostrad Company
- [MCEW93] McEwan, T. (1993). Ultra-short pulse generator. U.S. Patent 5,274,271. Filed July 12, 1991.
- [MELL95] Mellor, J.P. (1995). "Realtime camera calibration for enhanced reality visualization". *Proceedings of Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine (CVRMed 95)*, Nice, France, pp. 471-475, IEEE.

-
- [MEYE92] Meyer K., Applewhite H. L., Biocca F. A. (1992). "A Survey of Position Trackers". *Presence* 1(2): 173-200
- [MINE94] Mine, M. (1994). "Interaction in a Virtual Environment". In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH 1994*, pp. 4:1-4:20.
- [MOHR04] Mohring C. L. M. and Bimber O., (2004). "Video see-through AR on consumer cell-phones". In *Proc. of International Symposium on Augmented and Mixed Reality (ISMAR)*, 2004.
- [MOLE99] Molet, T., Boulic, R., & Thalmann, D. (1999). "Human motion capture driven by orientation measurements". *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), pp. 187-203.
- [MOUR98] Moura B., (1998). "Optimal detection and tracking of randomly moving targets". In *Proc. of Telecommunications Symposium, ITS '98 SBT/IEEE International*
- [NEAL01] Neale, H., Nichols, S., (2001). "Theme-based content analysis: a flexible method for virtual environment evaluation". *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(2), pp: 167-189.
- [NEUM96] Neumann, U. & Cho, Y. (1996). "A self-tracking augmented reality system." *Proceedings of ACM VRST 96*, pp. 109-115
- [NEWT1687] Newton I. (1687). "Philosophiae naturalis principia mathematica". Book II, Proposition 49. London
- [NI05] <http://sine.ni.com/nifn/cds/view/comp/p/sn/n24:PCI/pg/9/lang/en/nid/1036/ap/daq/sd/bb2a2b6d60c42010VgnVCM100000940aa482RCRD>
- [NIXO98] Nixon, M.A., McCallum, B.C., Fright, W.R., & Price, N.B. (1998). "The effects of metals and interfering fields on electromagnetic trackers". *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), pp. 204-218
- [OKUY03] Okuyama M., Yamashita K. and Noda M., (2003). "Infrared and Ultrasonic Sensors Using Ferroelectric Thin Films". In *Proc. of 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '03)*, vol. 1, pp. 226-229, June 8-12, Boston
- [PARA06] Paraskeuopoulos N., (2006). "Ανάπτυξη Μεθόδων Επεξεργασίας Σημάτων σε Ραντάρ Συνεχούς Σήματος για Μέτρηση της Κίνησης Στόχων". *Διδακτορική Διατριβή*, Εκδόσεις ΕΜΠ
- [PART88] Parton V.Z. and Kudryavtsev B.A., (1988). "Electromagnetoelasticity: piezoelectrics and electrically conductive solids". New York: Gordon & Breach Science Publishers
- [PATE06a] Patel, H., Stefani, O., Nichols, S., Hoffmann, H., Karaseitanidis, I., Amditis, A., (2006). "Human centred design of 3D interaction devices to control

- virtual environments". *International Journal of Human-Computer Studies*, 64 (3), pp: 207-220
- [PATE06b] Patel H., Sharples S., Letourneur S., Johansson E., Hoffmann H., Lorisson, J., Saluäär D., Stefani O., (2006). "Practical evaluations of real user company needs for visualization technologies". *International Journal of Human-Computer Studies*, 64 (3), pp: 267-279
- [PAUS91] Pausch, R. (1991). "Virtual Reality on five dollars a day". In *Proc. ACM SIGCHI, New Orleans 1991*, pp. 265-270.
- [PIEK03] Piekarski W., Avery B., Thomas B.H., Malbezin P., (2003). "Hybrid Indoor and Outdoor Tracking for Mobile 3D Mixed Reality". *ISMAR 2003*. pp: 266-267
- [POLY02] Polychronopoulos, A., Karaseitanidis, I., Katsoulis, G., Amditis, A., Uzunoglu, N., (2002). "Interacting multiple filtering for a double-active-sensor Tracking system in sea environment". In *Proc. SET Panel Symposium on "Complementarity of Ladar and Radar"*, Symposium, Prague.
- [POLY04] Polychronopoulos A., (2004). "Σχεδίαση και ανάπτυξη συστήματος σύντηξης δεδομένων από πολλαπλές πηγές με χρήση εκτιμητών Kalman με εφαρμογή στην ανασύνθεση του οδικού περιβάλλοντος", *Διδακτορική Διατριβή, Εκδόσεις ΕΜΠ*
- [PROWAVE06] <http://www.prowave.com.tw/>
- [PSIA01] Psiaki M. L. (2001). "Smoother-Based GPS Signal Tracking in a Software Receiver". *Proceeding of ION GPS 2001*, pp. 2900-2913. Institute of Navigation.
- [QUIR98] Quirion G., Razavi F.S., Dumoulin B., Poirier M., Revcolevschi A. and Dhalenne G. (1998). "Ultrasonic Study of the Spin-Peierls System CuGeO_3 Under Pressure". *Phys. Rev. B58* , pp. 882.
- [RAAB77] Raab, F.H. (1977). "Remote object position locator". U.S. Patent 40554881
- [RAAB79] Raab, F.H., Blood, E.B., Steiner, T.O., Jones, H.R. (1979). "Magnetic position and orientation tracking system". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 15(5), pp. 709-718.
- [RAPP96] Rappaport T. S., Reed J. H., and Woerner B. D., (1996). "Position location using wireless communications on highways of the future," *IEEE Communications Magazine*, vol. 34, pp. 33–42.
- [REKK90] Rekkas, C. M., Lefas, C. C., and Krikelis, N. J., (1990). "Improving the accuracy of aircraft absolute altitude estimation using DME measurements". *International Journal of Systems Science*, Vol. 21, Issue 7, pp: 1381-1392
- [RIBO01a] Ribo, M. (2001). "State of the Art Report on Optical Tracking". Technical

-
- Report. VRVis 2001.
- [RIBO01b] Ribo M., Pinz A. and Fuhrmann A. (2001). "A new Optical Tracking System for Virtual and Augmented Reality Applications", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, Hungary, May 21- 23, 2001.
- [RICH96] Richard, P., Birbent, G., Coiffet, P., Burdea, G., Gomez, D. and Langrana, N. (1996). "Effect of frame rate and force feedback on virtual object manipulation". Presence, 5, 95-108.
- [RIMB05] Rimbert M. F. (2005). "Constant false alarm rate detection techniques based on empirical distribution function statistics", PhD, Purdue Libraries
- [RODG91] Rodgers, A.G. (1991). "Advances in head tracker technology- A key contributor to helmet vision system performance and implementation", Society for Information Display International Symposium, Digest of Technical Papers, May 6-10, 22,127-130.
- [ROLL00] Rolland, J. P., Davis, L. D., Baillot, Y. (2000). "A survey of tracking technology for virtual environments", in Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. Ed. Barfield and Caudell.
- [ROLL01] Rolland J. P., Baillot Y., and Goon A. A. (2001). "A Survey of Tracking Technology for Virtual Environments", in Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality (chap. 3), pp.67-112.
- [RONG03] Rong Li, X., Jilkov, V., "Survey of Maneuvering Target Tracking", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 39 (2003), No 4, pp 1333 – 1364
- [RUBI05] Rubio M., Quirós R., Pulido E., Heurta J., and Camahort E. (2005). "Wide Area Marker based Tracking". In Proc. of Visualization, Imaging, and Image Processing – 2005
- [RUDD98] Ruddle, R., Payne, S., Jones, D., (1998). "Navigating large-scale "desk-top" virtual buildings". Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 7(2), 179-192.
- [RUSD04] Rusdorf S., Brunnett G., (2004). "A Simple VR-Control Device Using Marker-Based Tracking of the Human Hand", Workshop IEEE VR2004, Chicago, 2004
- [SAAD99] Saad, E. W, Caudell, T. P., and Wunsch, D. C. II, (1999). "Predictive head tracking for virtual reality". In Proc. of International Joint Conference on Neural Networks, Washington, July, pp 3922-3936.
- [SKOL81] Skolnik M. I., (1981). "Introduction to Radar systems". McGraw-Hill International Editions

- [SKUD71] Skudrzyk E., (1971). "The foundations of acoustics : basic mathematics and basic acoustics". Springer-Verlag
- [SO95] So, R.H.Y. & Griffin, M.J. (1995). "Effects of lags on human operator transfer functions with head-coupled systems". *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 66(6), pp: 550-556
- [SOWI93] Sowizral H. and Barnes D., (1993) "Tracking Position and Orientation in a Large Volume". In *Proc. IEEE VRAIS 93*, pp: 132-139.
- [STAN98] Stanney, K. M., Mourant, R. R. and Kennedy. R. S., (1998). "Human Factors Issues in Virtual Environments: A Review of the Literature," *Presence*, Vol. 7:4, pp. 327-351.
- [STAT96] State, A., Hirota, G., Chen D.T., Garrett, W.F. & Livingston, M.A. (1996). "Superior Augmented Reality Registration by Integrating Landmark Tracking and Magnetic Tracking". *Proceedings of SIGGRAPH '96*. In *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*, pp: 429-438.
- [STED02] Stedmon A., Wilson J., D'Cruz M., Eastgate R., (2002). "From User Requirements to Functional and User Interface Specification: General Process". *VIEW of the future project deliverable, IST-2000-26089*
- [STEF05a] Stefani O., Amditis A., Bekiaris E., Bullinger A.H., Karaseitanidis I., "Virtual Reality Systems in New Working Environments", *Innovation and the Knowledge Economy: Issues, Applications, Case Studies*, 2005 IOS Press Amsterdam, ISBN: 1-58603-563-0
- [STEF05b] Stefani O., Hoffmann H., and Rauschenbach J., (2003). "Design of Interaction Devices for Optical Tracking in Immersive Environments". In *Proc. of HCI International*", volume 3, 2003.
- [STRA97] Strang, G. and Borre, K., (1997). "Linear Algebra, Geodesy, and GPS", *Wellesley-Cambridge*, Wellesley, MA.
- [STRE02] Streit, R.L. and Walsh, M.J. (2002). "Bearings-only target motion analysis with acoustic propagation models of uncertain fidelity". *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions*, Volume 38, Issue 4, pp: 1122 - 1137
- [SUTH68] Sutherland, I.E. (1968). "A head-mounted three-dimensional display". 1968 Fall Joint Computer Conference, *AFIPS Conference Proceedings*, 33, pp. 757-764
- [TAYL95] Taylor, J., Ed. (1995). *Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems*. CRC Press. ISBN: 0-8493-4440-9.
- [TEXA03] Texas Instruments (2003). "TMS320x280x, 281x DSP Serial Communication Interface (SCI) Reference Guide".

-
- [TEXA04a] Texas Instruments (2004). “TMS320F28x DSP Analog-to-Digital Converter (ADC) Reference Guide”.
- [TEXA04b] Texas Instruments (2004). “TMS320C28x DSP CPU and Instruction Set Reference Guide”.
- [TRAC05] TrackD API, [http://www.vrco.com/products/trackd/trackd api.html](http://www.vrco.com/products/trackd/trackd%20api.html).
- [VAN05] Van Rhijn A., Van Liere R., Mulder J. D., (2005). “An Analysis of Orientation Prediction and Filtering Methods for VR/AR”. In Proc. of IEEE VR, Bonn, 2005
- [VORO05] Vorozcovs, A. Hogue, A. Stuerzlinger, W., (2005). “The Hedgehog: a novel optical tracking method for spatially immersive displays”. In Proc. IEEE VR 2005, Bonn.
- [WAN01] Wan, E., & Van der Merwe, R. (2001). “The unscented Kalman Filter”. In S. Haykins (Ed.), *Kalman Filtering and neural networks*, pp: 221-280. New York: Wiley.
- [WANG90] Wang, J.F., Azuma R., Bishop, G., Chi, V., Eyles, J. & Fuchs, H. (1990). “Tracking a head-mounted display in a room-sized environment with head-mounted cameras”. SPIE Proceedings vol. 1290: *Helmet-Mounted Displays II*, Orlando, FL
- [WANG98] Wang, C. and Brandstein, M. S., (1998). “A hybrid real-time face tracking system”. In Proc. ICASSP, Seattle, WA, 1998, pp. 3737-3740
- [WANG00] Wang S. and Green M. (2000), “Mobile location method for non-line-of-sight situation,” in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, vol. 2, pp. 608–612.
- [WELC97] Welch G. and Bishop G., (1997). “SCAAT: Incremental tracking with incomplete information”. In Proc. of Computer Graphics, 31(Annual Conference Series), pp: 333–344.
- [WELC99] Welch G., Bishop G., Vicci L., Brumback S., Keller K., (1999). “The HiBall Tracker: High-Performance Wide-Area Tracking for Virtual and Augmented Environments”. In Proc. of VRST’99
- [WHIT85] White R. G. (1985). “Acoustic and vibration transducers and measurement techniques”. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 18, pp: 790-796
- [WILS02] Wilson, J.R., Eastgate, R.M., D’Cruz, M., (2002). “Structured Development of Virtual Environments”. Stanney, K. (Ed.), *Handbook of Virtual Environments*. Lawrence Erlbaum Associates, pp: 353-378.
- [WONG95] Wong G.S.K. and Embleton T.F.W (1995), “AIP Handbook of Condensor Microphones: Theory, Calibration, and Measurements”, American Institute of Physics, New York, New York, USA, ISBN: 1-56396-284-5.

- [WREN99] Wren J.E. and Baxa, E. G. Jr., (1999). "Constant False Alarm Rate Detection of Wake Vortices with Application to a Pulsed Doppler Lidar System". In Proc. of IEEE Radar Conference, 1999, pp: 90-95.
- [WU00] Wu J-R., and Ouhyoung M., (2000). "On latency compensation and its effects on head-motion trajectories in virtual environments". The visual computer, pp: 79-90,.
- [YAMA04] Yamashita K., Chansomphou L., Murakami H., Okuyama M., (2004). "Ultrasonic micro array sensors using piezoelectric thin films and resonant frequency tuning", Sensors and Actuators A: Phys. 114, pp: 147-153.
- [YAMA06] Yamashita. K., Okuyama M., (2006). "Sensitivity improvement of diaphragm type ultrasonic sensors by complementary piezoelectric polarization". Sensors and Actuators, A 127, pp: 119-122
- [YANG02] Yang Y. E., Baldwin J., and Smith A., (2002). "Multilateration Tracking and Synchronization Over Wide Areas". In Proc. IEEE Radar Conference (RadarCon-02)
- [YOU01] You S., Neumann U., (2001). "Fusion of Vision and Gyro Tracking for Robust Augmented Reality Registration". In Proc. IEEE VR 2001 pp: 71
- [YOUN59] Young, R.W., (1959). "Sabine Reverberation and Sound Power Calculations". Journal of Acoust. Soc. Am., 31, 7 pp:912-921
- [YOUN96] Youngblut, C., Johnson, R., Nash, S., Wienclaw, R. , Will, C. (1996). Review of Virtual Environment Interface Technology, IDA Paper P-3186, Institute for Defense Analyses, 1801 N. Beauregard Street, Alexandria, VA 22311-1772.
- [ZHAI98] Zhai, S., (1998). "User performance in relation to 3D input device design". ACM Computer Graphics, 32(4), pp: 50-54.
- [ZIMM95] Zimmerman,T.G., Smith, J.R., Paradiso, J.A., Allport, D., Gershenfeld, N. (1995). "Applying electric field sensing to human-computer interfaces". In Proceedings of the Computer-Human Interface Symposium '95. ACM Press.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Διεθνή περιοδικά με κριτές

1. **Karaseitanidis, I.**, Amditis, A., Patel, H., Sharples, S.C., Bekiaris, E., Bullinger, A., Estoppey, K., (2006). "Evaluation of virtual reality products and applications from individual, organisational and societal perspectives". *International Journal of Human-Computer Studies*, 64 (3), pp: 251-266.
2. Patel, H., Stefani, O., Nichols, S., Hoffmann, H., **Karaseitanidis, I.**, Amditis, A., (2006). "Human centred design of 3D interaction devices to control virtual environments". *International Journal of Human-Computer Studies*, 64 (3), pp: 207-220
3. Amditis A., **Karaseitanidis I.**, Bekiaris E., Sartor S., Ronnefahrt J., Dangelmaier M., "Introducing an Innovative and Efficient Seat User Interface for Professional drivers". Accepted under revision in *IEE Intelligent Transport Systems*.

Πρακτικά διεθνών συνεδρίων με κριτές

4. Amditis, A., Polychronopoulos, A., **Karaseitanidis, I.**, Katsoulis, G., Bekiaris, E., "Multiple - Sensor - Collision avoidance system for automotive applications using an IMM approach for obstacle tracking". *In Proc. 5th International Conference on Information Fusion*, 8-11 July 2002, Annapolis MD, USA.
5. Amditis A., **Karaseitanidis I.**, (2003). "Virtual Reality Technology , A Future Training and Educational Tool". *In Proc. of E-challenges conference 2003*, Bologna, Italy, pp.: 1567-1572.
6. **Karaseitanidis, I.**, Amditis, A., Patel, H., Stefani, O., Bekiaris, E., & Tzoumpas, A. (2004). "User-centred usability evaluation of VR input devices". *In Proc. of Virtual Reality Design and Evaluation Workshop*, 22-23 January, 2004, Nottingham, UK.
7. **Karaseitanidis I.**, Weiss A., Werner A., Amditis A., (2005). "Trends in VR tracking". *In Proc. INTUITION 2nd International Workshop: VR&VE, Challenges and Opportunities*, Paris, 24-25th November 2005
8. Polychronopoulos, A., **Karaseitanidis, I.**, Katsoulis, G., Amditis, A., Uzunoglu, N., "Interacting multiple filtering for a double-active-sensor Tracking system in sea environment", *Proc. SET Panel Symposium on "Complementarity of Ladar and Radar*, Symposium, Prague 22-23/04/02.
9. Amditis, A., Floudas, N., Polychronopoulos, A., Katsoulis, G., **Karaseitanidis, I.**, "Development of a MATLAB toolbox for trackers' simulation and testing in a multiple sensor network", *In Proc. SET-049 Symposium on Target Tracking and sensor Data Fusion*, Budapest, October, 2003.
10. Stefani O., Amditis A., Bekiaris E., Bullinger A.H., **Karaseitanidis I.**, "Virtual Reality Systems in New Working Environments", *Innovation and the Knowledge*

Economy: Issues, Applications, Case Studies, 2005 IOS Press Amsterdam, ISBN: 1-58603-563-0

11. Stefani, O., Wiederhold, B.K., Haselberger, F., **Karaseitanidis, I.**, Patel, H., Bullinger, A. (2005). "Developing Interaction Devices with 6 DOF for Virtual Environments". In *Proc. of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction*, July 22-27, Las Vegas, NV.
12. **Karaseitanidis I.**, Stefani O. (2004). "Designing 3D input devices for immersive environments". In *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, The Hague, The Netherlands, 2004, (7): pp: 6280-6285
13. Amditis A., **Karaseitanidis I.**, Boutsikaki N., Bekiaris E., Wilson J., "Evaluation Consolidation of Virtual Reality tools and applications within VIEW project". In *Proc. of the 10th International Conference on Human Computer Interaction*, June 22-27, 2003, Crete, Greece, pp: 1381-1385.
14. Amditis A., Lentziou Z., Tzoumbas A., **Karaseitanidis I.**, Bekiaris E., "Innovative methods for using Virtual Reality and Virtual Environments in education". In *Proc. of 3rd International Conference on New Horizons in Industry and Education*, 28 to 29 August 2003, Santorini, Greece, p. 195-199
15. Amditis A., Lentziou Z., **Karaseitanidis I.**, "Virtual Reality and Virtual Environment: new methods to be applied in education and industry". In *Proc. of 3rd International Conference on New Horizons in Industry and Education*, 25 to 26 August 2005, Corfu, Greece, p.
16. Amditis A., **Karaseitanidis I.**, Stefani O., Sartor S., "Advanced User Interface for the SAFEGUARD professional driver seat". In *Proc. of 10th International Conference on Human Computer Interaction*, June 22-27, 2003, Crete
17. Amditis A., Gemou M., Bekiaris E., **Karaseitanidis I.**, "Methodology for the Socio-economic consolidation of VR related applications: the VIEW example". In *Proc. of Virtual Reality Design and Evaluation Workshop*, 22-23 January, 2004, Nottingham, UK

Συμμετοχές σε Επιστημονικές επιτροπές

- Μέλος της επιστημονικής επιτροπής στο VRST 2005 (Virtual Reality Software Technology), Monterey, USA, 7-9 Νοεμβρίου, 2005.
- Μέλος της επιστημονικής επιτροπής στο VRST 2006 (Virtual Reality Software Technology), Λεμεσός, Κύπρος, 1-3 Νοεμβρίου, 2006.
- Κριτής στο Περιοδικό "Virtual Reality" για το Special Issue: "Collaborative VEs for Creative People", Springer, Verlag.

Άλλες δημοσιεύσεις μη σχετιζόμενες με τη διατριβή

18. **Karaseitanidis, I.**, Polychronopoulos, A., Amditis, A., Uzunoglu N., "Electromagnetic Interference in Athens' new Airport from the FM-band Radio Stations/Signals", *Proc. 6th International Symposium Transport Noise and Vibration*, 4-6 June 2002, St. Petersburg, Russia.
19. Mitropoulos, G., **Karaseitanidis, I.**, Polychronopoulos, A., Amditis, A., "Performance evaluation of a IEEE 802.11b WLAN in a typical office environment", *In Proc. European Microwave conference*, 6-10 October, Munich 2003
20. **Karaseitanidis, I.**, Mitropoulos, G., Polychronopoulos, A., Amditis, A., "Frequency Scan, Slot Antenna Array Design for Radar Applications" παρουσιάστηκε στο *IEEE Workshop Finite Elements for Microwave Engineering*, Chios, Greece, 2002.
21. Amditis A., Loveniers K., Bekiaris E., **Karaseitanidis I.**, Bullinger A., Sartor S., "Assistive Tools for the Functional Diagnosis of Health related Professional Drivers' Seats Vibration Problems", *In Proc. of the 6th International Symposium on Transport Noise and Vibration*, St. Petersburg, Russia, 4-6 June 2002
22. Amditis A., Bekiaris E., Hostens I., Bullinger A., **Karaseitanidis I.**, "An Aetiological Analysis of Seat related Occupational Accidents and Diseases of Professional Drivers". *In Proc of 2002 SAE International Body Engineering Conference and Exhibition*, July 9-11, 2002, Palais des Congres, Paris, France
23. Cabrera M.F., Arredondo M.T., Villalar J.L., Naranjo J.C., **Karaseitanidis I.**, "Mobile Systems as a Mean to Achieve E-Inclusion". *In Proc. of IEEE MELECON 2004*, May 12-15, 2004, Dubrovnik, Croatia
24. Angelos Amditis, **Karaseitanidis I.**, Gabrera M.F., Bekiaris E., Machate J., Naranjo J.C. "Towards an Informatics System Enabling Disabled people universal access to information and assistance services". *In Proc. of 10th International Conference on Human - Computer Interaction*, June 22-27, 2003, Crete, Greece.
25. Amditis A., Bekiaris E., **Karaseitanidis I.**, Cabrera M.F., Arredondo M.T., Lamas R., "An innovative wireless Telecommunication architecture to promote the independent living of disabled people". *In Proc. of COMCON 8*, Rethimnon, Crete, Greece, 25-29/8/2001.
26. Machate J., **Karaseitanidis I.**, Gabrera M.F., "Being Confident – Development of a TV-based Tele-Assistance System". *In Proc. of 10th International Conference on Human - Computer Interaction*, June 22-27, 2003, Crete, Greece.
27. Amditis A., **Karaseitanidis I.**, Bekiaris E., Hostens I., Bullinger A., "Innovative seat system for professional drivers – the SAFEGUARD project". *In Proc. of XVII International Annual Occupational Ergonomics and Safety Conference, Quality of Work and Products in Enterprises of the Future*, Munich, May 2003, pp: 877-880, Ergonomia Verlag