



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

Μοντελοποίηση Συστημάτων Εντοπισμού Θέσης Εσωτερικού Χώρου με χρήση “Δαχτυλικών Αποτυπωμάτων”

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Σ. Γεώργας

Επιβλέπων : Αθανάσιος Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

Μοντελοποίηση Συστημάτων Εντοπισμού Θέσης Εσωτερικού Χώρου με χρήση “Δαχτυλικών Αποτυπωμάτων”

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Σ. Γεώργας

Επιβλέπων : Αθανάσιος Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π

.....
Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Κανελλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Απρίλιος 2009

.....

Παναγιώτης Σ. Γεώργας

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

Copyright © Παναγιώτης Σ. Γεώργας, 2009

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

Ο ακριβής εντοπισμός θέσης σε εσωτερικούς χώρους αποτελεί τα τελευταία χρόνια έναν δημοφιλή και εξελισσόμενο κλάδο των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, με μεγάλη ποικιλία εφαρμογών στους τομείς της βιομηχανίας, της υγείας, της ασφάλειας, αλλά και σε πολλούς άλλους τομείς της καθημερινής ανθρώπινης δραστηριότητας. Η περιορισμένη έκταση των εσωτερικών χώρων, αλλά και οι ιδιαιτέρως απρόβλεπτες και δυσμενείς συνθήκες διάδοσης των σημάτων σε αυτούς, οι οποίες καθιστούν γνωστά συστήματα εντοπισμού θέσης εξωτερικών χώρων ανεπαρκή για εντοπισμό σε εσωτερικούς χώρους, αποτελούν πρόκληση για τους σχεδιαστές. Έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός συστημάτων εντοπισμού θέσης εσωτερικών χώρου, καθώς και ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών και μεθόδων εντοπισμού που αφορούν αυτά.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στις μεθόδους που βασίζονται στη συλλογή “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”. Η τεχνική αυτή, η οποία βασίζεται στη συλλογή πληροφοριών για τον εσωτερικό χώρο μέσω πολλαπλών μετρήσεων σε διάφορα σημεία του, δίνει ουσιαστικές λύσεις στο πρόβλημα του εντοπισμού εσωτερικού χώρου, ιδιαιτέρως αν εφαρμοστεί μέσω ενός ασύρματου τοπικού δικτύου. Στην διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται ένα μαθηματικό μοντέλο, μέσω του οποίου μελετάται διεξοδικά η λειτουργία ενός απλοποιημένου συστήματος εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, το οποίο χρησιμοποιεί τεχνική “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” και υποδομή ασύρματου τοπικού δικτύου προτύπου IEEE 802.11b. Χρησιμοποιώντας το μαθηματικό μοντέλο και πραγματοποιώντας κατάλληλες προσομοιώσεις, προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία του συστήματος, ενώ παράλληλα προτείνονται τρόποι βελτίωσης της αξιοπιστίας του συστήματος, αλλά και τρόποι βελτίωσης του μαθηματικού μοντέλου.

Πιο αναλυτικά, στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μία βιβλιογραφική επισκόπηση γνωστών μεθόδων και συστημάτων εντοπισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο σύστημα RADAR, το οποίο παρουσιάζεται αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο. Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται με το θέμα της μοντελοποίησης του καναλιού στους εσωτερικούς χώρους, το οποίο βοηθά στην κατανόηση και την αξιολόγηση των παραδοχών του μαθηματικού μοντέλου, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο τέταρτο κεφάλαιο. Στο πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνονται αποτελέσματα προσομοιώσεων και συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη ενός απλοποιημένου συστήματος μέσω του μοντέλου του τέταρτου κεφαλαίου, ενώ επίσης στο τέλος του πέμπτου κεφαλαίου προτείνεται μια παραλλαγή του μοντέλου αυτού, όσον αφορά το κριτήριο επιλογής της θέσης. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται κριτική επισκόπηση του μαθηματικού

μοντέλου του τέταρτου κεφαλαίου με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα του πέμπτου κεφαλαίου. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο προτείνονται μία μεθοδολογία σχεδίασης συστημάτων εντοπισμού εσωτερικού χώρου αλλά και ενδεχόμενοι τρόποι εφαρμογής του μαθηματικού μοντέλου σε πραγματικά συστήματα.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ

εντοπισμός εσωτερικού χώρου, δαχτυλικό αποτύπωμα, ισχύς λαμβανόμενου σήματος, ασύρματο τοπικό δίκτυο, μοντελοποίηση, κανονική κατανομή, τετραγωνικό πλέγμα

ABSTRACT

In the past few years, accurate indoor positioning constitutes one of the most popular and evolving applications of wireless telecommunications, with a great variety of commercial applications in the sectors of industry, health, safety, but also in a lot of other sectors of human activities. The limited extent of indoor spaces, but also especially the unpredicted and unfavourable propagation conditions of signals make the well-known outdoor positioning systems insufficient for indoor positioning. This is a technical challenge for the system designers. A large number of indoor positioning systems have been proposed, as well as a great range of technologies and methods of localisation that concern these.

This diploma thesis focuses on the methods that are based on the collection of fingerprints. This technique, which is based on the collection of information for the internal space via multiple measurements at various points, gives significant solution in the problem of indoor positioning, especially if it is applied through an already existing wireless local area network infrastructure. In the present diploma thesis, a mathematical model is employed in order to study extensively the operation of a simplified indoor positioning system, which uses fingerprinting and IEEE 802.11b wireless local area network infrastructure. The use of the mathematical model along with an extensive number of appropriate simulations lead us to interesting conclusions about the sensitivity of the factors that influence the reliability of the system. At the same time, methodologies for improvement of the system reliability are proposed and finally new techniques for improving the accuracy of the mathematical model are suggested.

More analytically, in the first chapter of the diploma thesis there is a bibliographic literature review of indoor positioning methods and systems, while particular emphasis is given in the RADAR system, which is presented in depth in the second chapter. In the third chapter we deal with the subject of modelling of indoor channels, something that helps us in the understanding and evaluation of the admissions of the mathematical model, which is described analytically in forth chapter. The fifth chapter includes simulation results and conclusions that result from the study of a simplified system through the analytical probabilistic model, while also at the end of the fifth chapter a novel modification of this model is proposed. In the sixth chapter there is a rigorous review of the probabilistic model, which is based on the analysis of the simulated results of fifth chapter. Finally, in the seventh chapter, firstly we propose a methodology for designing indoor positioning systems, but also techniques of how the mathematical model may be deployed in a real WLAN network that has incorporated an indoor positioning system.

KEY WORDS

indoor positioning, fingerprint, received signal strength (RSS), wireless local area network (WLAN), modeling, normal (Gauss) distribution, square grid

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παράδοση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο για το χρόνο που αφιέρωσε, τις συμβουλές και τις πολύτιμες υποδείξεις του για τη σύνταξη και ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα αντικείμενο για το οποίο είχα ιδιαίτερο προσωπικό ενδιαφέρον.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράστασή της, και ιδιαίτερος τον αδερφό μου Ηρακλή, για τις πολύτιμες συμβουλές του, ιδιαίτερος σε θέματα χρήσης του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Πίνακας Περιεχομένων

1	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	19
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
1.2	ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	19
1.3	ΑΙΤΙΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ.....	21
1.4	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ.....	24
1.4.1	ΤΡΙΓΩΝΙΣΜΟΣ (TRIANGULATION).....	24
1.4.1.1	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟΙ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΣΤΙΓΜΗΣ ΑΦΙΞΗΣ (Time Of Arrival: TOA) ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	25
1.4.1.2	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟΙ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΑΦΙΞΗΣ (Time difference of Arrival: TDOA) ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	30
1.4.1.3	ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟΙ ΣΤΗΝ ΙΣΧΥ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ (RSS-Based or Signal Attenuation-Based Methods).....	34
1.4.1.4	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟΙ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΜΕΤ' ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ (Roundtrip Time Of Flight: RTOF) ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	36
1.4.1.5	ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΤΗ ΦΑΣΗ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ (Received Signal Phase Method).....	38
1.4.1.6	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΤΙΣ ΓΩΝΙΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ (ANGULATION TECHNIQUES).....	41
1.4.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ (SCENE ANALYSIS).....	42
1.4.2.1	ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ (PROBABILISTIC METHODS).....	48
1.4.2.2	k ΠΛΗΣΙΕΣΤΕΡΟΙ ΓΕΙΤΟΝΕΣ (k-NEAREST-NEIGHBOR: kNN).....	53
1.4.2.3	ΝΕΥΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (NEURAL NETWORKS).....	56
1.4.2.4	ΜΗΧΑΝΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ (SUPPORT VECTOR MACHINE: SVM).....	62
1.4.2.5	ΕΛΑΧΙΣΤΟ Μ-ΓΩΝΟ (SMALLEST M-VERTEX POLYGON: SMP).....	67
1.4.3	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΓΓΥΤΗΤΑΣ (PROXIMITY ALGORITHMS).....	67
1.5	ΜΕΤΡΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (PERFORMANCE METRICS).....	68
1.6	ΑΠΑΡΙΘΜΗΣΗ ΓΝΩΣΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ.....	73
2	ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ RADAR.....	85
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	85
2.2	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΫΠΗΡΧΑΝ ΤΟΥ RADAR.....	85
2.3	ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ RADAR.....	87
2.3.1	ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ (EMPIRICAL METHOD).....	89
2.3.2	ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΩΝ (RADIO PROPAGATION MODEL).....	95
3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ.....	98
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	98
3.2	Η ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ.....	98
3.3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΛΗΨΗΣ ΣΤΟΝ ΔΕΚΤΗ.....	102
3.4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ ΤΙΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	

ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ, ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΑΦΟΡΑ ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ ΜΕΣΩ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΙΕΕΕ 802.11b.....	106
3.4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	107
3.4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ WLAN ΚΕΡΑΙΑ ΛΗΨΗΣ.....	109
3.4.3 ΣΩΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΚΑΡΤΑΣ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	110
3.4.4 Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	112
3.4.5 Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	119
3.4.6 Η ΣΤΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	121
3.4.7 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ.....	122
3.4.8 ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΤΟ ΙΔΙΟ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟΥ ΙΕΕΕ 802.11b ΔΙΚΤΥΟΥ.....	125
3.4.9 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”.....	127
4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΤΗ ΣΥΛΛΟΓΗ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”.....	129
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	129
4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	132
4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΔΥΟ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ.....	144
4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΠΟΛΛΕΣ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ.....	147
4.5 ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΜΕΣΩ ΧΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ.....	150
4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ.....	151
4.7 ΟΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	154
5 ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.....	158
5.1 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΑΤΑΙ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	158
5.1.1 ΤΑ ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	158
5.1.2 ΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	160
5.1.2.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”.....	160
5.1.2.2 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	161
5.1.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”.....	162
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΙΑΣ ΘΕΣΗΣ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΜΟΝΟ ΜΙΑ ΥΠΟΨΗΦΙΑ ΘΕΣΗ ΓΕΙΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ.....	164
5.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.8) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ.....	

ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ σ	165
5.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.8) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ Ν ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.....	166
5.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.8) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΕΚΘΕΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ α	168
5.2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.8) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ g	169
5.2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	171
5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΙΑΣ ΘΕΣΗΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	171
5.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.10) ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.8)	172
5.3.2 Ο ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	173
5.3.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.10) ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ.....	173
5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΙΑΣ ΘΕΣΗΣ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ ΜΕ ΤΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ ΤΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ.....	177
5.4.1 Η ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ.....	177
5.4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	178
5.4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	178
5.5 ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΤΟΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟ ΧΩΡΟ.....	182
5.5.1 ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ VORONOI ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	182
5.5.1.1 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ VORONOI ΜΕ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ.....	182
5.5.1.2 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ VORONOI ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ.....	183
5.5.1.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΙΚΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ VORONOI.....	185
5.5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟ ΧΩΡΟ.....	189
5.6 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.....	194
5.6.1 ΑΠΟΦΥΓΗ ΚΟΙΝΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”.....	195
5.6.2 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ.....	197
5.6.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΔΙΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ.....	202
5.7 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΜΙΑΣ ΘΕΣΗΣ ΕΤΣΙ ΩΣΤΕ ΝΑ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ ΤΟΥ ΤΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”.....	204
5.7.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”.....	204
5.7.2 ΕΝΑ ΝΕΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”.....	206
5.7.3 ΠΙΘΑΝΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΑΠΟΦΑΣΗΣ.....	210

5.7.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	212
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΚΕΨΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	217
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	217
6.2 ΜΕΛΕΤΗ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.10) ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ, ΟΤΑΝ ΑΥΤΕΣ ΕΠΙΛΕΓΟΝΤΑΙ ΜΕ ΣΕΙΡΑ ΑΥΞΟΥΣΑΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΤΟ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ” ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΣΗΣ.....	217
6.3 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.10) ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΕΝΑΝ ΓΡΑΦΟ ΕΠΓΥΤΗΤΑΣ.....	231
7 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	242
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	242
7.2 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΘΕΜΑΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	242
7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ.....	248
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	250

Πίνακας Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1.1: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟ ΣΕ ΤΟΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	26
ΣΧΗΜΑ 1.2: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟ ΣΕ ΤΔΟΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	31
ΣΧΗΜΑ 1.3: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΠΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΙ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΠΟΜΠΟΥ ΚΑΙ ΔΕΚΤΩΝ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟ ΣΕ RSS ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	35
ΣΧΗΜΑ 1.4: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΤΙΣ ΓΩΝΙΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	41
ΣΧΗΜΑ 1.5: ΤΟ ΤΕΧΝΗΤΟ ΝΕΥΡΟ, Η ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΕΝΟΣ ΝΕΥΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	57
ΣΧΗΜΑ 1.6: ΕΝΑ MLP ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΔΥΟ ΚΡΥΜΜΕΝΑ ΕΠΙΠΕΔΑ.....	61
ΣΧΗΜΑ 1.7: ΤΑ ΔΥΟ ΟΡΙΑΚΑ ΥΠΕΡΕΠΙΠΕΔΑ ΠΟΥ ΧΩΡΙΖΟΥΝ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΣΕ ΔΥΟ ΚΛΑΣΕΙΣ, ΚΑΙ ΕΝΑ ΥΠΟΨΗΦΙΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΥΠΕΡΕΠΙΠΕΔΟ.....	64
ΣΧΗΜΑ 3.1: ΠΟΙΟΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΥ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΟΜΠΟ.....	102
ΣΧΗΜΑ 3.2: Ο ΤΕΤΑΡΤΟΣ ΟΡΟΦΟΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ SCHOOL OF INFORMATION SCIENCES ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΤΟΥ ΡΙΤΤΣΒΟΥΡΓΗ. ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS401, SIS410 ΚΑΙ SIS418 ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΤΕΤΑΡΤΟ ΟΡΟΦΟ, ΕΝΩ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS501 ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΣΤΟΝ ΠΕΜΠΤΟ ΟΡΟΦΟ.	107
ΣΧΗΜΑ 3.3: Ο ΠΡΩΤΟΣ ΟΡΟΦΟΣ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ HILLMAN ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΤΟΥ ΡΙΤΤΣΒΟΥΡΓΗ. ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ hlg-a-card1 ΚΑΙ hlg-b-card1 ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΙΣΟΓΕΙΟ, ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ hl2-a-card1 ΚΑΙ hl2-b-card1 ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΔΕΥΤΕΡΟ ΟΡΟΦΟ, ΕΝΩ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ hl4-a-card1 ΚΑΙ hl4-b-card1 ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΤΕΤΑΡΤΟ ΟΡΟΦΟ.....	108
ΣΧΗΜΑ 3.4: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ 5 ΛΕΠΤΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΚΠΙΕΜΠΕΙ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS410.....	114
ΣΧΗΜΑ 3.5: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.4 ΓΙΑ ΕΚΠΙΟΜΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS501.	115
ΣΧΗΜΑ 3.6: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.4 ΓΙΑ ΕΚΠΙΟΜΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS401.	115
ΣΧΗΜΑ 3.7: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ 26 ΗΜΕΡΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΚΠΙΕΜΠΕΙ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS401.....	116
ΣΧΗΜΑ 3.8: Η ΕΚΤΡΟΠΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΙΚΡΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ.....	118
ΣΧΗΜΑ 3.9: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.8 ΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ.....	118
ΣΧΗΜΑ 3.10: Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΙΚΡΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ.....	120
ΣΧΗΜΑ 3.11: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.10 ΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ.....	120
ΣΧΗΜΑ 3.12: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ L3 ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΙΘΟΥΣΩΝ ΓΙΑ ΣΗΜΑΤΑ ΕΚΠΙΕΜΠΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΡΙΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.....	121
ΣΧΗΜΑ 3.13: ΟΙ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΙΣΧΥΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ 24 ΩΡΩΝ, ΣΕ ΤΡΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΑ.....	124

ΣΧΗΜΑ 3.14: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.13 ΑΛΛΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΙΣΧΥΩΝ.	124
ΣΧΗΜΑ 3.15: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.13 ΑΛΛΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΚΤΡΟΠΕΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΤΩΝ ΙΣΧΥΩΝ.	125
ΣΧΗΜΑ 4.1: Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ A , ΓΙΑ $\sigma=1$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ N .	136
ΣΧΗΜΑ 4.2: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 4.1, ΓΙΑ $N=3$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ σ .	136
ΣΧΗΜΑ 4.3: Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ B , ΓΙΑ $\sigma=1$, $N=3$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ λ .	139
ΣΧΗΜΑ 4.4: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 4.3, ΓΙΑ $\sigma=1$, $\lambda=4$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ N .	139
ΣΧΗΜΑ 4.5: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 4.3, ΓΙΑ $N=3$, $\lambda=4$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ σ .	140
ΣΧΗΜΑ 4.6: ΟΙ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ A ΚΑΙ B , ΓΙΑ $N=3$, $\sigma=1$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ λ .	143
ΣΧΗΜΑ 4.7: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 4.6, ΓΙΑ $N=3$, $\lambda=4$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ σ .	143
ΣΧΗΜΑ 5.1: ΤΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΕ ΔΙΑΣΤΗΜΑ $g=1$ m.	159
ΣΧΗΜΑ 5.2: ΤΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΕ ΔΙΑΣΤΗΜΑ $g=0.5$ m.	159
ΣΧΗΜΑ 5.3: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ σ ΣΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΟΤΑΝ ΛΑΜΒΑΝΕΤΑΙ ΥΠΟΨΗ ΜΙΑ ΓΕΙΤΟΝΙΚΗ ΥΠΟΨΗΦΙΑ ΘΕΣΗ.	166
ΣΧΗΜΑ 5.4: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.3, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ N .	167
ΣΧΗΜΑ 5.5: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.3, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΚΘΕΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ α .	169
ΣΧΗΜΑ 5.6: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.3, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ g .	170
ΣΧΗΜΑ 5.7: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ σ ΣΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΟΤΑΝ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ ΟΛΕΣ ΟΙ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ.	175
ΣΧΗΜΑ 5.8: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.7, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ N .	175
ΣΧΗΜΑ 5.9: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.7, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΚΘΕΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ α .	176
ΣΧΗΜΑ 5.10: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.7, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ g .	176
ΣΧΗΜΑ 5.11: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ σ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ.	180
ΣΧΗΜΑ 5.12: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.11, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΚΘΕΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ α .	181
ΣΧΗΜΑ 5.13: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.11, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ g .	181
ΣΧΗΜΑ 5.14: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ VORONOI ΟΤΑΝ ΙΣΧΥΟΥΝ $\alpha=5$, $g=0.5$ m ΚΑΙ ΕΚΠΕΜΠΟΥΝ ΤΑ ΣΠ2 ΚΑΙ ΣΠ15.	185
ΣΧΗΜΑ 5.15: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.14, ΓΙΑ $\alpha=8$.	192
ΣΧΗΜΑ 5.16: ΤΑ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΑ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΑ” ΣΤΟΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟ ΧΩΡΟ ΟΤΑΝ ΕΚΠΕΜΠΟΥΝ ΔΥΟ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ (ΣΠ12 ΚΑΙ ΣΠ16) ΣΤΗΝ ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΑΚΡΑΙΑ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.	200
ΣΧΗΜΑ 5.17: Η ΜΕΣΗ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.	200
ΣΧΗΜΑ 5.18: Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ (2,2) ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ σ ΟΤΑΝ ΕΝΑΣ ΙΔΙΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΥΝ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ.	203

ΣΧΗΜΑ 5.19: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΟΤΑΝ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ ΤΟΥ ΤΑ ΜΕΤΡΑ ΤΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”	209
ΣΧΗΜΑ 5.20: Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ x ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ σ	215
ΣΧΗΜΑ 5.21: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.20, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ N	215
ΣΧΗΜΑ 5.22: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.20, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ α	216
ΣΧΗΜΑ 5.23: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.20, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ g	216
ΣΧΗΜΑ 6.1: Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ (4.10) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ. ΟΙ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ ΜΕ ΣΕΙΡΑ ΑΥΞΟΥΣΑΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΑΥΤΟ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΣΗΣ	219
ΣΧΗΜΑ 6.2: Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΠΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΙ Ο (4.10) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ σ , ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ. ΟΙ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ ΜΕ ΣΕΙΡΑ ΑΥΞΟΥΣΑΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΑΥΤΟ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΣΗΣ	221
ΣΧΗΜΑ 6.3: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.2, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ N	221
ΣΧΗΜΑ 6.4: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.2, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ α	222
ΣΧΗΜΑ 6.5: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.2, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ g	222
ΣΧΗΜΑ 6.6: ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΤΟΥ (4.10) ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΠΑΡΑΔΟΧΗΣ ΤΗΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑΣ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ g ΚΑΙ σ	228
ΣΧΗΜΑ 6.7: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.6, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ g ΚΑΙ N	229
ΣΧΗΜΑ 6.8: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.6, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ g ΚΑΙ α	229
ΣΧΗΜΑ 6.9: ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΓΡΑΦΟΥ DELAUNAY ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ VORONOI	232
ΣΧΗΜΑ 6.10: ΓΡΑΦΟΣ DELAUNAY ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ VORONOI ΟΤΑΝ ΙΣΧΥΟΥΝ $N=2$, $\alpha=3.3$ ΚΑΙ $g=0.75$ m	234
ΣΧΗΜΑ 6.11: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ (4.10) ΟΤΑΝ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ ΤΙΣ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΥΠΟΔΕΙΚΝΥΕΙ Ο ΓΡΑΦΟΣ DELAUNAY, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ σ ΚΑΙ ΓΙΑ $N=4$, $\alpha=3.3$ ΚΑΙ $g=0.75$ m	237
ΣΧΗΜΑ 6.12: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=4$, $\alpha=3.3$ ΚΑΙ $g=1.25$ m	238
ΣΧΗΜΑ 6.13: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=4$, $\alpha=1$ ΚΑΙ $g=0.75$ m	238
ΣΧΗΜΑ 6.14: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=4$, $\alpha=1$ ΚΑΙ $g=1.25$ m	239
ΣΧΗΜΑ 6.15: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=2$, $\alpha=3.3$ ΚΑΙ $g=0.75$ m	239
ΣΧΗΜΑ 6.16: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=2$, $\alpha=3.3$ ΚΑΙ $g=1.25$ m	240
ΣΧΗΜΑ 6.17: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=2$, $\alpha=1$ ΚΑΙ $g=0.75$ m	240
ΣΧΗΜΑ 6.18: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=2$, $\alpha=1$ ΚΑΙ $g=1.25$ m	241

Πίνακας Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: Η ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ CDFS ΤΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ, ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΙΣΧΥΡΟΤΕΡΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΥΧΑΙΑΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ...	90
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΠΙΝΑΚΑΣ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΓΙΑ 8 ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.	163
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: ΠΙΝΑΚΑΣ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟΛΟΙΠΑ 8 ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.....	164
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: ΟΙ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ (4.10) ΓΙΑ $\sigma=2.13$ dBm, $\alpha=5$, $g=0.5$ m, ΚΑΙ ΓΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗ ΤΩΝ ΣΠ12 ΚΑΙ ΣΠ15.....	186
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: ΟΠΩΣ ΣΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ 5.3, ΓΙΑ $\alpha=8$	193
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: ΟΙ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ (4.10) ΓΙΑ $\sigma=2.13$ dBm, $\alpha=3.3$, $g=0.75$ m, ΚΑΙ ΓΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗ ΤΩΝ ΣΠ12 ΚΑΙ ΣΠ16.	201
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: ΤΙΜΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ (2,2) ΟΤΑΝ ΕΝΑΣ ΙΔΙΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΥΝ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ.	203
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΜΕ ΣΕΙΡΑ ΑΥΞΟΥΣΑΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΑΥΤΟ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΣΗΣ, ΟΤΑΝ ΙΣΧΥΕΙ $g=0.75$ m.....	220
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ K , ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ σ , N , α και g	223
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3: ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΙΣ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΟΥΣ ΑΥΞΩΝΤΕΣ ΑΡΙΘΜΟΥΣ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.10.....	235

Γλωσσάρι Σχημάτων

TOA	Χρονική στιγμή άφιξης του σήματος στον δέκτη (Time of Arrival)
TDOA	Χρονική διαφορά άφιξης του σήματος ανάμεσα σε δύο δέκτες (Time Difference Of Arrival)
RSS	Ισχύς λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength)
A	Το τετράγωνο της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης ανάμεσα σε ένα δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων ισχύος του online σταδίου και στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης
B	Το τετράγωνο της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης ανάμεσα σε ένα δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων ισχύος του online σταδίου και στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” μίας υποψήφιας θέσης που δεν είναι η πραγματική
λ	Παράμετρος μη-κεντρικότητας της τυχαίας μεταβλητής B (non-centrality parameter)
σ	Τυπική απόκλιση της μετρούμενης ισχύος (standard deviation)
N	Ο αριθμός των σημείων πρόσβασης που εκπέμπουν
α	Εκθέτης απωλειών διαδρομής (path loss exponent)
g	Διάστημα πλέγματος (grid spacing)
ΣΠ ή AP	Σημείο Πρόσβασης (Access Point)
K	Ο αριθμός των διαφόρων της πραγματικής υποψήφιας θέσεων που λαμβάνονται υπόψη

1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ασύρματα συστήματα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους (wireless indoor positioning systems) αποτελούν έναν πολύ δημοφιλή κλάδο των ασύρματων τηλεπικοινωνιών τα τελευταία χρόνια. Βρίσκουν εφαρμογή στην βιομηχανία, στα συστήματα υγείας και ασφάλειας, αλλά και σε πάρα πολλές δραστηριότητες της καθημερινής μας ζωής. Ένα σύστημα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο θα μπορούσε να βοηθήσει στον εντοπισμό ενός ηλικιωμένου ατόμου ή ενός ατόμου με ειδικές ανάγκες ή προβλήματα υγείας, σε ένα νοσοκομείο, σε έναν οίκο ευγηρίας, ή σε ένα οποιοδήποτε μεγάλο κτίριο. Παράλληλα θα μπορούσε να βοηθήσει τους υπάλληλους των φυλακών και την αστυνομία να εντοπίζουν τα ίχνη επικίνδυνων κακοποιών, καθώς και να διευκολύνει στρατιωτικές αποστολές. Επίσης, θα ήταν χρήσιμο στον εντοπισμό ενός πυροσβέστη σε ένα φλεγόμενο κτίριο, και στον εντοπισμό εκπαιδευμένων σκύλων της αστυνομίας την ώρα που ψάχνουν εκρηκτικά ή επιζώντες. Όμως, εκτός από τον εντοπισμό ανθρώπων για λόγους υγείας και ασφάλειας, ένα σύστημα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους θα μπορούσε να είναι πολύτιμο και για τον εντοπισμό αντικειμένων. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να βοηθήσει στον εντοπισμό χρήσιμων εργαλείων και εξαρτημάτων μέσα σε ένα εργοστάσιο, στην εύρεση απαραίτητων αντικειμένων που είναι πιθανό να χαθούν μέσα σε μία αποθήκη, καθώς και στον εντοπισμό απαραίτητου ιατρικού εξοπλισμού μέσα σε ένα νοσοκομείο. Όμως, πέρα από όλα τα παραπάνω παραδείγματα, υπάρχουν αναρίθμητοι λόγοι για τους οποίους κάποιο πρόσωπο, κάποια εταιρεία ή κάποιος οργανισμός, είναι δυνατό να θελήσει να χρησιμοποιήσει ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εμπορικής εφαρμογής σε έναν εσωτερικό χώρο, για δικούς του ιδιαίτερους λόγους. Επομένως, λόγω των πολλών εφαρμογών, είναι αναγκαία η συνεχής βελτίωση των συστημάτων εντοπισμού θέσης εσωτερικών χώρων.

1.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ

Στην απλούστερη περίπτωση, ένα σύστημα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο αποτελείται τουλάχιστον από έναν πομπό σήματος, και έναν δέκτη, ο οποίος επεξεργάζεται κάποια χαρακτηριστικά του σήματος, με σκοπό την όσο το δυνατό καλύτερη προσέγγιση της ζητούμενης θέσης. Στην πραγματικότητα, χρησιμοποιούνται όχι μία αλλά πολλές μονάδες μέτρησης του σήματος, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούμε και τις συνθήκες που επικρατούν, τις οποίες τις

τοποθετούμε σε καθορισμένα σημεία. Τα πολλαπλά σημεία μέτρησης του σήματος συγκροτούν ένα ασύρματο δίκτυο, και όλες οι μετρήσεις λαμβάνονται υπόψη σε ένα συγκεκριμένο αλγόριθμο, με σκοπό να εντοπιστεί η ζητούμενη θέση. Σε άλλες περιπτώσεις, το δίκτυο αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό πομπών και ένα μεγάλο αριθμό δεκτών. Υπάρχουν όμως και άλλα είδη αρχιτεκτονικών, καθώς και μεγάλη ποικιλία αλγόριθμων που είναι δυνατό να εφαρμόζονται.

Υπάρχουν οι εξής τέσσερις περιπτώσεις τοπολογίας ασύρματων δικτύων εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο [1], [21]:

1) Σύστημα απομακρυσμένου εντοπισμού (Remote positioning system): Ο πομπός είναι κινητός και οι μονάδες μέτρησης, οι οποίες βρίσκονται σε σταθερές καθορισμένες θέσεις, λαμβάνουν το σήμα του πομπού. Το τελικό αποτέλεσμα υπολογίζεται σε έναν κύριο υπολογιστή.

2) Σύστημα αυτο-εντοπισμού (Self-positioning system): Σε σταθερά καθορισμένα σημεία είναι τοποθετημένοι πομποί. Τα σήματα που εκπέμπουν λαμβάνονται από τη μονάδα μέτρησης, η οποία είναι κινητή και έχει την ικανότητα να επεξεργάζεται τα λαμβανόμενα σήματα, με σκοπό να εντοπίσει τη ζητούμενη θέση.

3) Έμμεσο σύστημα απομακρυσμένου εντοπισμού (Indirect remote positioning system): Έχει την ίδια τοπολογία με ένα self-positioning system, με τη διαφορά ότι οι μετρήσεις των κινούμενων μονάδων μέτρησης στέλνονται με ασύρματο τρόπο σε έναν καθορισμένο σταθερό δέκτη για επεξεργασία.

4) Έμμεσο σύστημα αυτο-εντοπισμού (Indirect self-positioning system): Το αποτέλεσμα που υπολογίζεται σε μία σταθερή και καθορισμένη μονάδα, στέλνεται με ασύρματο τρόπο σε έναν κινητό δέκτη.

Για τη δημιουργία ενός συστήματος εντοπισμού, θα μπορούσαμε να κατασκευάσουμε από την αρχή μία υποδομή ασύρματου δικτύου, η οποία θα ήταν ιδανική για την εφαρμογή ενός συγκεκριμένου αλγόριθμου εντοπισμού θέσης που έχουμε επιλέξει. Αυτό θα βοηθούσε να έχουμε ακριβώς την υποδομή που θα χρειαζόταν ο αλγόριθμος εντοπισμού θέσης για να δώσει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Όμως, το να κατασκευάσουμε ένα νέο δίκτυο με νέα υποδομή από την αρχή, μπορεί να είναι μία διαδικασία που κοστίζει αρκετά χρήματα και χρονοβόρα. Έτσι πολλές φορές, συμφέρει

καλύτερα να εκμεταλλευόμαστε ήδη υπάρχουσες υποδομές δικτύων, όπως για παράδειγμα WLAN, GPS, δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, και να προσαρμόζουμε σε αυτές έναν κατάλληλο αλγόριθμο εντοπισμού θέσης.

1.3 ΑΙΤΙΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Το περιβάλλον ενός εσωτερικού χώρου έχει κάποια χαρακτηριστικά που καθιστούν πολύ δύσκολη την μοντελοποίηση της διάδοσης των σημάτων μέσα σε αυτό. Αυτό, γιατί οι εσωτερικοί χώροι έχουν συνήθως πολλούς σκεδαστές, οι οποίοι αλλάζουν συχνά θέσεις. Το περιβάλλον σε έναν εσωτερικό χώρο είναι τυχαία διαμορφωμένο και απρόβλεπτο. Τα πατώματα, οι τοίχοι, οι άνθρωποι, και τα κάθε λογής αντικείμενα που είναι τυχαία διασκορπισμένα σε έναν εσωτερικό χώρο, είναι υπεύθυνα για σκεδάσεις, ανακλάσεις, αλλά και σημαντικές εξασθενίσεις στα σήματα που διαδίδονται στο χώρο. Επίσης, η κίνηση ανθρώπων και αντικειμένων προκαλεί μεταβολή του περιβάλλοντος. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα το σήμα να διαδίδεται μέσω πολλαπλών διαδρομών λόγω πολλαπλών ανακλάσεων, και να φτάνει στο δέκτη σαν ένα άθροισμα σημάτων με διαφορετικές φάσεις και εξασθενίσεις. Έτσι, το λαμβανόμενο σήμα επηρεάζεται από μακροχρόνιες διαλείψεις που οφείλονται στο τυχαίο περιβάλλον, αλλά κυρίως υποφέρει από βραχυχρόνιες διαλείψεις, οι οποίες οφείλονται στις πολλαπλές διαδρομές του σήματος, και γίνονται ιδιαίτερα αισθητές όταν ο δέκτης κινείται, ή όταν μεταβάλλεται το περιβάλλον. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη διάδοση στον εσωτερικό χώρο υπάρχουν στο κεφάλαιο 3. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί ένα μοντέλο διάδοσης για τους εσωτερικούς χώρους, γιατί τα χαρακτηριστικά τους και η πιθανή μεταβολή τους κάνουν τη διάδοση των σημάτων εξαιρετικά απρόβλεπτη, ενώ τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος διαφέρουν αισθητά ανάλογα με το είδος του εσωτερικού χώρου.

Επίσης, μέσα σε έναν εσωτερικό χώρο είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη [3]. Και ακόμα και αν βρεθεί, είναι πολύ πιθανό κάποια στιγμή να παρεμβληθεί κάποιο εμπόδιο. Η έλλειψη οπτικής επαφής έχει ως αποτέλεσμα ο δέκτης να μην μπορεί να ξεχωρίζει το άμεσα εκπεμπόμενο σήμα από τα σήματα που ακολούθησαν πολλαπλές διαδρομές, με αποτέλεσμα να γίνεται λανθασμένη εκτίμηση του σήματος.

Όμως, οι συνθήκες που επικρατούν σε ένα περιβάλλον δεν επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο όλα τα είδη σήματος που μπορεί να διαδίδονται σε αυτό. Για παράδειγμα, κάποιες συχνότητες μπορεί να εξασθενούν περισσότερο από κάποιες άλλες, ενώ ένα συγκεκριμένο είδος διαμόρφωσης του σήματος πληροφορίας μπορεί να δίνει καλύτερο σηματοθορυβικό λόγο στο δέκτη, από ότι ένα άλλο είδος διαμόρφωσης. Επίσης, ένα σήμα που εκπέμπεται και έχει πολύ μεγάλο εύρος ζώνης, είναι δυνατό να

είναι πιο ανεκτικό σε περιβάλλοντα με σημαντικό θόρυβο και σε παρεμβολές, από ότι ένα σήμα μικρού εύρους ζώνης. Και ένα σήμα μεγάλης ισχύος κινδυνεύει λιγότερο από το θόρυβο και τις παρεμβολές από ότι ένα σήμα μικρής ισχύος. Από αυτά συμπεραίνουμε ότι η ορθή και αξιόπιστη μέτρηση του σήματος δεν επηρεάζεται μόνο από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά και από τα χαρακτηριστικά του σήματος που εκπέμπουμε, όπως για παράδειγμα η διαμόρφωση, το εύρος ζώνης, η φέρουσα συχνότητα, η ισχύς, και πολλά άλλα χαρακτηριστικά.

Όμως, ανάλογα με ποιο χαρακτηριστικό του σήματος μετράμε, παρουσιάζονται και διαφορετικά προβλήματα. Δηλαδή, διαφορετικές αιτίες σφαλμάτων παρουσιάζονται όταν μετράμε το χρόνο διάδοσης του σήματος, και διαφορετικές αιτίες σφαλμάτων παρουσιάζονται όταν μετράμε άλλα χαρακτηριστικά του σήματος, όπως για παράδειγμα τη φάση, τη γωνία ή την εξασθένιση. Έτσι, για παράδειγμα, όταν μετράμε τη χρονική στιγμή άφιξης ενός σήματος στο δέκτη (Time Of Arrival), [2] μας ενδιαφέρει να μπορέσει ο δέκτης να εντοπίσει το σήμα που προέρχεται απευθείας από τον πομπό και να το ξεχωρίσει από τα σήματα που προέρχονται από πολλαπλές διαδρομές, γιατί μόνο αυτό μας δίνει πληροφορία για τον χρόνο που απαιτείται για να διαδοθεί το σήμα σε μία απόσταση χωρίς να παρεμβάλλονται εμπόδια. Έτσι, όταν μετράμε τη χρονική στιγμή άφιξης ενός σήματος στο δέκτη, είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, γιατί μόνο τότε είναι εύκολο ο δέκτης να ξεχωρίσει το άμεσο σήμα από τα σήματα που ακολούθησαν πολλαπλές διαδρομές. Αν όμως μετράμε την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength), [2] τότε δεν μας απασχολεί τόσο η παρουσία ή όχι οπτικής επαφής και ο εντοπισμός του άμεσου σήματος στο δέκτη. Αλλά, υποθέτοντας ένα απρόβλεπτο περιβάλλον, μας ενδιαφέρει κυρίως να μοντελοποιήσουμε όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται τη σχέση μεταξύ ισχύος και απόστασης διάδοσης στο περιβάλλον αυτό.

Επίσης, ανάλογα με το ποιο χαρακτηριστικό του σήματος μετράμε και ποια τεχνολογία μέτρησης χρησιμοποιούμε, παρουσιάζονται και νέα είδη σφαλμάτων στη μέτρηση των σημάτων, πέρα από τα συνηθισμένα σφάλματα που προκαλεί το περιβάλλον του εσωτερικού χώρου. Για παράδειγμα, η έλλειψη συγχρονισμού μεταξύ πομπού και μονάδων μέτρησης, μπορεί να προκαλέσει ένα επιπλέον σφάλμα στη μέτρηση του χρόνου διάδοσης του σήματος, πέρα από τα γνωστά σφάλματα που προκαλεί ο μη εντοπισμός οπτικής επαφής.

Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το σήμα που μετράει ένας δέκτης σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου, υποφέρει από μεγάλο σφάλμα. Το σφάλμα οφείλεται σε αρκετούς παράγοντες, όπως είναι το περιβάλλον, που μεταβάλλεται, προκαλεί πολλαπλές διαδρομές, εξασθενίσεις και είναι δύσκολο να εντοπίσουμε οπτικές επαφές μέσα σε αυτό, τα χαρακτηριστικά του σήματος που

μεταδίδεται, όπως το εύρος ζώνης, η ισχύς και η διαμόρφωση, και τα σφάλματα που προκύπτουν από τη διαδικασία μέτρησης που επιλέγουμε, όπως η έλλειψη συγχρονισμού σε ένα σύστημα που μετράει το χρόνο διάδοσης του σήματος.

Επομένως, τα σφάλματα στις μετρήσεις του σήματος, μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλο σφάλμα στον εντοπισμό μίας θέσης στο χώρο. Για αυτό το λόγο, τα συστήματα εντοπισμού θέσης χρησιμοποιούν τεχνολογίες και αλγόριθμους που μας βοηθούν να ελαττώσουμε το μεγάλο σφάλμα που έχει η εκτίμηση μίας θέσης στο χώρο. Η χρησιμοποίηση της κατάλληλης τεχνικής για την εκπομπή και τη λήψη σημάτων, θα μπορούσε να μετριάσει τις δυσμενείς συνέπειες του εσωτερικού περιβάλλοντος. Ένα καλό παράδειγμα, είναι η τεχνική direct sequence spread-spectrum (DSSS). Σύμφωνα με αυτή την τεχνική το σήμα πληροφορίας κωδικοποιείται με συγκεκριμένο κώδικα, και χρησιμοποιεί μεγάλο εύρος ζώνης. Αν υπάρχει σωστός συγχρονισμός, τότε αποκωδικοποιείται μόνο το σήμα που φτάνει άμεσα από τον πομπό, ενώ τα υπόλοιπα που φτάνουν στο δέκτη λόγω πολλαπλών διαδρομών, απορρίπτονται. Έτσι, στην περίπτωση αυτή, η τεχνική DSSS μας βοηθά να διακρίνουμε το επιθυμητό σήμα από τα σήματα πολλαπλών διαδρομών, και έτσι μειώνεται η πιθανότητα σφάλματος, γιατί αυξάνεται η πιθανότητα να ξεχωρίσουμε σωστά το επιθυμητό σήμα από τα ανεπιθύμητα σήματα πολλαπλών διαδρομών.

Επίσης, ανάλογα με ποιο χαρακτηριστικό του σήματος μετράμε, η εφαρμογή ενός κατάλληλου αλγόριθμου και μίας σωστής τοπολογίας του δικτύου, θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση των σφαλμάτων. Για παράδειγμα, αν αποφασίζαμε να μετράμε τους χρόνους διάδοσης των σημάτων, θα φροντίζαμε να τοποθετούμε τους δέκτες σε τέτοιες θέσεις στον χώρο, ώστε η πιθανότητα να βρεθούν οπτικές επαφές να είναι μεγάλη. Επίσης, υπάρχει η πιθανότητα να χρειαζόταν να αυξήσουμε τον αριθμό των δεκτών, για να πάρουμε περισσότερα δείγματα πριν πάρουμε την οριστική απόφαση για τον εντοπισμό μίας άγνωστης θέσης. Ένας άλλος πολύ καλός τρόπος να μειώσουμε το σφάλμα, είναι να χρησιμοποιήσουμε αλγόριθμους που δεν προσπαθούν κυρίως να βελτιώσουν τη μέτρηση κάποιου χαρακτηριστικού του σήματος, αλλά συγκρίνουν τις μετρήσεις με τα “αποτυπώματα” που έχουν συλλεχθεί σε έναν χώρο. Οι αλγόριθμοι αυτοί, οι οποίοι εξηγούνται αναλυτικά στη συνέχεια, μειώνουν το σφάλμα, γιατί δεν επηρεάζονται άμεσα από την ορθότητα των μετρήσεων, αλλά έχουν ήδη λάβει υπόψη τους τα σφάλματα των μετρήσεων, παίρνοντας τιμές του σήματος σαν “αποτυπώματα” σε όλο τον χώρο, και συγκρίνοντας τις μετρήσεις με αυτές τις τιμές.

Συμπερασματικά, υπάρχουν πολλές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό μίας άγνωστης θέσης σε έναν εσωτερικό χώρο. Κάθε μέθοδος προσπαθεί να μειώσει το σφάλμα εντοπισμού θέσης, με

το δικό της ξεχωριστό τρόπο. Ανάλογα με την περίπτωση για την οποία χρησιμοποιούμε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο, και τις απαιτήσεις που έχουμε, κάθε μέθοδος έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επίσης, ακόμα και αν πετύχουμε πολύ καλή ακρίβεια, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες στους οποίους πρέπει να δώσουμε σημασία, όπως για παράδειγμα το χρηματικό κόστος και η πολυπλοκότητα του συστήματος, στους οποίους θα αναφερθούμε στην παράγραφο 1.5 αναλυτικά.

1.4 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε μερικούς αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται στα συστήματα εντοπισμού θέσης εσωτερικών χώρων.

1.4.1 ΤΡΙΓΩΝΙΣΜΟΣ (TRIANGULATION)

Οι αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιούν τριγωνισμό (triangulation), εκμεταλλεύονται τις τριγωνικές ιδιότητες για να εκτιμήσουν τη θέση ενός αντικειμένου. Οι triangulation τεχνικές υποδιαιρούνται σε δύο κατηγορίες [1] : τις τεχνικές υπολογισμού απόστασης (lateration), και τις τεχνικές που χρησιμοποιούν τις γωνίες κατεύθυνσης των σημάτων (angulation).

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν lateration, για να εκτιμήσουν τη θέση ενός αντικειμένου, υπολογίζουν τις αποστάσεις του αντικειμένου αυτού από διάφορα σημεία αναφοράς. Η απόσταση μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη, υπολογίζεται έμμεσα, χρησιμοποιώντας κάποια χαρακτηριστικά του λαμβανόμενου σήματος, όπως είναι ισχύς (Received Signal Strength: RSS), η χρονική στιγμή άφιξης του σήματος (Time Of Arrival: TOA), η διαφορά χρονικών στιγμών άφιξης (Time Difference Of Arrival: TDOA), η χρονική διάρκεια διάδοσης μετ' επιστροφής (Roundtrip Time Of Flight: RTOF), και η φάση του λαμβανόμενου σήματος. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά το πώς χρησιμοποιείται το κάθε ένα από τα χαρακτηριστικά του λαμβανόμενου σήματος που αναφέραμε παραπάνω, για τον υπολογισμό των αποστάσεων που χρειάζεται ένας αλγόριθμος για να εκτιμήσει τη θέση ενός αντικειμένου.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούν τις γωνίες κατεύθυνσης των σημάτων (Angulation Techniques), ή αλλιώς τεχνικές εκτίμησης της γωνίας άφιξης (Angle Of Arrival (AOA) Estimation), υπολογίζουν τη θέση ενός αντικειμένου σε έναν εσωτερικό χώρο, λαμβάνοντας υπόψη τις γωνίες των κατευθύνσεων διάδοσης των σημάτων.

1.4.1.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟΙ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΣΤΙΓΜΗΣ ΑΦΙΞΗΣ (Time Of Arrival: TOA) ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

Θα μελετήσουμε τη δυνατότητα εντοπισμού θέσης σε έναν διδιάστατο (2-D) εσωτερικό χώρο. Έστω ότι υπάρχουν τρεις δέκτες που είναι τοποθετημένοι σε τρία καθορισμένα σημεία A, B και C, με γνωστές συντεταγμένες: (x_1, y_1) , (x_2, y_2) και (x_3, y_3) , αντίστοιχα. Το αντικείμενο του οποίου τη θέση πρέπει να εκτιμήσουμε, είναι ταυτόχρονα και ο πομπός του σήματος που λαμβάνουν οι δέκτες. Ο πομπός θεωρούμε ότι βρίσκεται σε μία θέση (P) στο χώρο με συντεταγμένες (x, y) , τις τιμές των οποίων θα πρέπει να εκτιμήσουμε.

Αν υποθέσουμε ότι υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και κάθε δέκτη, και ότι το σήμα διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), τότε η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη ισούται με το γινόμενο της χρονικής διάρκειας διάδοσης του σήματος από τον πομπό στον δέκτη, επί την ταχύτητα του φωτός.

Επομένως, υπολογίζουμε τις αποστάσεις R_1 , R_2 και R_3 , μεταξύ του πομπού και του δέκτη A, B και C αντίστοιχα, ως εξής:

$$R_1^2 = (c(t_1 - t_0))^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \quad (1.1)$$

$$R_2^2 = (c(t_2 - t_0))^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 \quad (1.2)$$

$$R_3^2 = (c(t_3 - t_0))^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2, \quad (1.3)$$

όπου t_0 η χρονική στιγμή εκπομπής του σήματος, και t_1, t_2, t_3 οι χρονικές στιγμές λήψης του σήματος από τους δέκτες A, B, C αντίστοιχα.

Παρατηρούμε ότι προέκυψε ένα μη γραμμικό σύστημα, με αγνώστους τις συντεταγμένες (x, y) . Αν απεικονίσουμε γραφικά το σύστημα αυτό (ΣΧΗΜΑ 1.1), παρατηρούμε ότι η λύση προκύπτει ως η τομή τριών κύκλων, με κέντρα τα σημεία A, B και C. Στόχος μας είναι να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες (x, y) του πομπού, και άρα να λύσουμε το παραπάνω σύστημα.

Αν θέλαμε να εντοπίσουμε τη θέση ενός αντικειμένου στον τρισδιάστατο (3-D) χώρο, τότε θα εμφανιζόταν και η μεταβλητή z στο σύστημά μας, και επομένως η λύση θα προέκυπτε ως η τομή σφαιρών, με κέντρα τους σταθμούς βάσης. Σε αυτή την περίπτωση όμως θα ήταν απαραίτητο να υπάρχουν τουλάχιστον τέσσερις σταθμοί βάσης στον χώρο, για να δώσει το μη γραμμικό σύστημα των σφαιρών μοναδική λύση.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να λυθεί ένα μη γραμμικό σύστημα της παραπάνω μορφής, που αναφέρεται στον διδιάστατο χώρο.

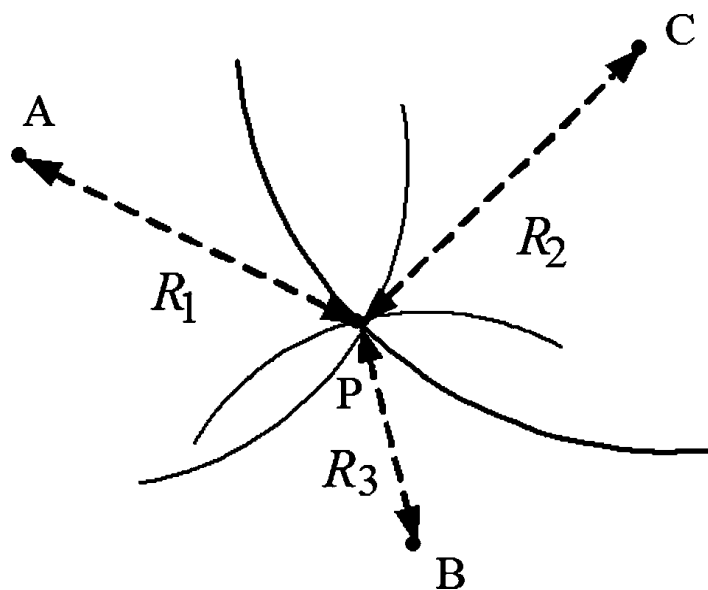
Ένας απλός τρόπος είναι να εντοπίσουμε με γραφικό τρόπο το σημείο στο οποίο τέμνονται οι τρεις κύκλοι.

Ένας άλλος τρόπος είναι να λύσουμε το σύστημα των εξισώσεων (1.1) και (1.2) [4]. Το σύστημα των εξισώσεων (1.1) και (1.2) δίνει δύο λύσεις, και από τις δύο αυτές λύσεις διαλέγουμε αυτήν που ικανοποιεί καλύτερα την εξίσωση (1.3).

Παρατηρούμε ότι για να δώσει μία μοναδική λύση ένα μη γραμμικό σύστημα κύκλων, πρέπει να έχουμε στη διάθεσή μας τουλάχιστον τρεις κύκλους. Άρα, για να εντοπίσουμε τη θέση ενός αντικειμένου στον διδιάστατο χώρο, πρέπει να έχουμε στη διάθεσή μας τουλάχιστον τρεις δέκτες.

Αν έχουμε στη διάθεσή μας αρκετούς σταθμούς βάσης, οι οποίοι λαμβάνουν το σήμα που εκπέμπει ο πομπός, τότε μπορούμε να εκτιμήσουμε την θέση του πομπού με τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων (Least-Squares Algorithm).

Η μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων εφαρμόζεται ως εξής. Έστω ότι έχουμε N σταθμούς βάσης, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε καθορισμένες θέσεις (x_i, y_i) , και κάθε σταθμός βάσης λαμβάνει το σήμα τη χρονική στιγμή t_i , $i=1, \dots, N$.



ΣΧΗΜΑ 1.1: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟ ΣΕ ΤΟΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.

Η πραγματική απόσταση μεταξύ του πομπού και του σταθμού βάσης στη θέση (x_i, y_i) είναι: $\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$, όπου (x, y) οι πραγματικές συντεταγμένες του πομπού, τις οποίες θέλουμε να εκτιμήσουμε, με όσο το δυνατό μικρότερο σφάλμα. Η απόσταση όμως που μετράμε πειραματικά είναι $d_i = c(t_i - t_0)$, και δεν είναι ακριβώς ίση με την πραγματική απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, αφού η μέτρηση TOA του σήματος πιθανότατα εμπεριέχει σφάλμα. Επομένως, ισχύει [5]:

$d_i = c(t_i - t_0) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} + v_i$, όπου v_i είναι το σφάλμα της μέτρησης. Το σφάλμα της μέτρησης v_i θα μπορούσε να θεωρηθεί τυχαία μεταβλητή γνωστής κατανομής, και τότε θα μπορούσαμε να εκτιμήσουμε ορθότερα την πραγματική θέση του πομπού. Όμως, σε έναν εσωτερικό χώρο είναι σχεδόν αδύνατο να δώσουμε στο σφάλμα μέτρησης μία συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας. Έτσι, στην περίπτωση που δεν δίνεται στο σφάλμα μία συγκεκριμένη κατανομή, ένας πολύ καλός τρόπος να εκτιμήσουμε την πραγματική θέση του πομπού όσο το δυνατό ορθότερα, είναι να ελαχιστοποιήσουμε τα σφάλματα των μετρήσεων με τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων. Σύμφωνα με τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων, σκοπός μας είναι να ελαχιστοποιήσουμε τη συνάρτηση:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^N f_i(x, y)^2, \text{ όπου } f_i(x, y) = c(t_i - t_0) - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \text{ η συνάρτηση του σφάλματος}$$

μέτρησης στον δέκτη που είναι τοποθετημένος στη θέση (x_i, y_i) .

Αν επιλέξουμε κατάλληλες τιμές a_i ως βάρη, [1] δηλαδή τιμές που εκφράζουν την ειδική σημασία κάθε μέτρησης, δηλαδή το πόσο αξιόπιστη είναι η μέτρηση σε κάθε δέκτη, τότε η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων με βάρη μας δίνει την εξής συνάρτηση σφάλματος, την οποία πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^N a_i^2 f_i(x, y)^2. \text{ Η μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων με βάρη μας δίνει μία πολύ καλύτερη}$$

εκτίμηση της ζητούμενης θέσης, γιατί δεν δίνει μεγάλη σημασία στις TOA μετρήσεις που περιέχουν μεγάλο σφάλμα.

Ένα μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου των Ελαχίστων Τετραγώνων είναι ότι επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από πειραματικές μετρήσεις οι οποίες διαφέρουν αρκετά από την πραγματική τιμή. Έστω δηλαδή ότι έχουμε πάρει μετρήσεις από διάφορους σταθμούς βάσης, και όλες οι αποστάσεις που

υπολογίσαμε πειραματικά μέσω του ΤΟΑ έχουν σχετικά μικρά σφάλματα, εκτός από μία μέτρηση απόστασης που διαφέρει πολύ από την πραγματική τιμή. Τότε, η μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων θα δώσει χειρότερη εκτίμηση των συντεταγμένων (x,y), από την εκτίμηση που θα έδινε αν λαμβάναμε υπόψη μας τις μετρήσεις με τα φυσιολογικά σφάλματα και απορρίπταμε τη μέτρηση απόστασης με το μεγάλο σφάλμα. Δηλαδή, αν η μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων γνώριζε ποιες μετρήσεις περιέχουν μεγάλο σφάλμα, και τις απέρριπτε, τότε θα έδινε καλύτερο αποτέλεσμα.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της κακής εκτίμησης των συντεταγμένων (x,y), που οφείλεται στις μετρήσεις με μεγάλες αποκλίσεις από την πραγματική τιμή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος που ονομάζεται αλγόριθμος υπολοιπόμενης στάθμισης (Residual Weighting algorithm: RWGH) [5], [6]. Ο αλγόριθμος αυτός παίρνει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς που μπορούν να προκύψουν από το σύνολο των μετρήσεων των σταθμών βάσης. Αν υπάρχουν N σταθμοί βάσης και ο κάθε σταθμός βάσης παίρνει μία μοναδική μέτρηση, κάθε συνδυασμός μετρήσεων περιλαμβάνει από τρεις ως N μετρήσεις, και συνολικά προκύπτουν

$$C = \sum_{k=3}^N \frac{N!}{k!(N-k)!} \text{ συνδυασμοί. Κάθε συνδυασμός, ο οποίος είναι ένα υποσύνολο του συνόλου όλων}$$

των πειραματικών μετρήσεων, πρέπει να περιέχει τουλάχιστον τρεις μετρήσεις, γιατί, όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, για να προκύψει μία μοναδική λύση σε μη γραμμικό σύστημα κύκλων πρέπει να έχουμε τουλάχιστον τρεις μετρήσεις στη διάθεσή μας. Σύμφωνα με τον RWGH αλγόριθμο, για κάθε ένα από τα C σύνολα μετρήσεων, εφαρμόζουμε τη μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων. Έστω δηλαδή ότι χρησιμοποιούμε το σύνολο μετρήσεων του i -στου από τους C δυνατούς συνδυασμούς. Αν εφαρμόσουμε τη μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων στο σύνολο αυτό των μετρήσεων, τότε παίρνουμε μία εκτίμηση $(x,y)_i$ για τη θέση του πομπού, και το συνολικό σφάλμα μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών αποστάσεων που προκύπτει είναι $\varepsilon_{(x,y)_i}$. Όμως, παρατηρούμε ότι το συνολικό σφάλμα είναι λογικό να είναι μεγάλο αν προκύπτει από σύνολο πολλών μετρήσεων, και είναι πιθανό να είναι μεγαλύτερο από το συνολικό σφάλμα που θα προέκυπτε από ένα σύνολο με μεγαλύτερο ποσοστό αναξιόπιστων μετρήσεων, αλλά μικρότερο αριθμό συνολικών μετρήσεων. Έτσι, για να δώσουμε μία πιο ποιοτική ερμηνεία του συνολικού σφάλματος που προκύπτει από τη μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων σε ένα σύνολο μετρήσεων, όπου το συνολικό σφάλμα είναι απαλλαγμένο από την επιρροή του αριθμού των μετρήσεων που περιέχει το σύνολο αυτό, χρησιμοποιούμε το κανονικοποιημένο συνολικό σφάλμα, που ορίζεται ως: $\bar{\varepsilon}_{(x,y)_i} = \varepsilon_{(x,y)_i} / N_i$, όπου N_i ο αριθμός των μετρήσεων του i -στου συνδυασμού.

Σύμφωνα με τον RWGH αλγόριθμο, η τελική εκτίμηση της ζητούμενης θέσης (x,y) προκύπτει ως γραμμικός συνδυασμός όλων των εκτιμήσεων $(x,y)_i$ που προκύπτουν από κάθε έναν από τους C συνδυασμούς μετρήσεων που μπορούμε να έχουμε. Κάθε εκτίμηση $(x,y)_i$ παίρνει ως “βάρος” το κανονικοποιημένο της συνολικό σφάλμα με τέτοιο τρόπο ώστε, όσο πιο μεγάλο είναι το κανονικοποιημένο της συνολικό σφάλμα, τόσο λιγότερο βάρος έχει η συμμετοχή της εκτίμησης $(x,y)_i$ στην τελική εκτίμηση (x,y) της ζητούμενης θέσης. Δηλαδή:

$$(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^C (x,y)_i / \bar{\epsilon}_{(x,y)_i}}{\sum_{i=1}^C 1 / \bar{\epsilon}_{(x,y)_i}} .$$

Επομένως, συμπεραίνουμε ότι ο αλγόριθμος RWGH δίνει μεγαλύτερο βάρος σε σύνολα μετρήσεων όπου η εφαρμογή της μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων δίνει σχετικά μικρά συνολικά σφάλματα. Δηλαδή, ο αλγόριθμος RWGH δίνει μεγαλύτερη σημασία σε σύνολα μετρήσεων TOA που δεν περιέχουν μετρήσεις που διαφέρουν αρκετά από τις πραγματικές τιμές. Έτσι, λύνεται το πρόβλημα που παρουσιάζεται όταν υπάρχουν έστω και λίγες τιμές TOA που διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικές τιμές. Ένας πολύ σημαντικός λόγος για τον οποίον μπορεί να εμφανιστεί μία μέτρηση TOA που να διαφέρει σημαντικά από την πραγματική τιμή, είναι η έλλειψη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Δηλαδή, αν μεταξύ πομπού και δέκτη παρεμβάλλονται εμπόδια, τότε το σήμα που στέλνει ο πομπός, αν φτάσει άμεσα στον δέκτη, φτάνει αρκετά εξασθενημένο, και είναι δύσκολο να το ξεχωρίσει ο δέκτης από τα άλλα σήματα που κατέφθασαν μετά από πολλαπλές ανακλάσεις. Έτσι, είναι πιθανό η μέτρηση TOA του σήματος να περιλαμβάνει σημαντικά μεγάλο σφάλμα. Επομένως, η μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων επηρεάζεται σημαντικά από την έλλειψη οπτικών επαφών μεταξύ πομπού και σταθμών βάσης. Όμως, ο RWGH αλγόριθμος μειώνει αρκετά την αρνητική επίδραση των TOA μετρήσεων με μεγάλο σφάλμα, και άρα μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά και σε συνθήκες μη οπτικής επαφής (Non Line Of Sight). Το μειονέκτημα όμως του αλγόριθμου αυτού σε σχέση με τη μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων είναι ότι απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Ένας άλλος αλγόριθμος που χρησιμοποιεί τις μετρήσεις TOA ενός σήματος για να υπολογίσει αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη, είναι ο αλγόριθμος Πλησιέστερου Γείτονα (Closest Neighbor: CN) [6]. Ο αλγόριθμος CN λειτουργεί ως εξής. Έστω ότι σε έναν εσωτερικό χώρο υπάρχουν διάφοροι σταθμοί βάσης σε καθορισμένα σημεία. Υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ του αντικειμένου άγνωστης θέσης και κάθε σταθμού βάσης, χρησιμοποιώντας τις χρονικές στιγμές TOA που μετρώνται,

πολλαπλασιάζοντες τις με την ταχύτητα του φωτός. Η θέση του σταθμού βάσης που απέχει τη μικρότερη απόσταση από το αντικείμενο άγνωστης θέσης, θεωρούμε ότι είναι και η θέση του αντικειμένου που θέλουμε να εντοπίσουμε. Έτσι, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος CN δεν προσπαθεί να υπολογίσει τις ακριβείς συντεταγμένες του αντικειμένου που θέλουμε να εντοπίσουμε στο χώρο, αλλά μας ενημερώνει για τον σταθμό βάσης που βρίσκεται πλησιέστερα στο αντικείμενο άγνωστης θέσης. Δηλαδή, χωρίζουμε το χώρο σε συγκεκριμένες περιοχές, και κάθε περιοχή αντιπροσωπεύεται από έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης. Ο αλγόριθμος CN ελέγχει σε ποια περιοχή του χώρου ανήκει ο πλησιέστερος σταθμός βάσης, και άρα μας πληροφορεί σε ποια περιοχή του χώρου εντοπίζεται το αντικείμενο άγνωστης θέσης.

Όλα τα συστήματα που υπολογίζουν αποστάσεις βασιζόμενα σε TOA μετρήσεις, επιδιώκουν να ελαττώσουν το σφάλμα της θέσης που εντοπίζουν. Μία σημαντική αιτία που προκαλεί σφάλματα στις TOA μετρήσεις, είναι οι συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον μελέτης μας, όπως ο θόρυβος, οι παρεμβολές, οι εξασθενίσεις, οι πολλαπλές ανακλάσεις, αλλά κυρίως η έλλειψη οπτικών επαφών. Επίσης, οι TOA μετρήσεις είναι πιθανό να περιέχουν μεγάλο σφάλμα, σε περίπτωση που δεν υπάρχει ακριβής συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δεκτών. Επομένως, τα συστήματα που υπολογίζουν αποστάσεις βασιζόμενα σε TOA μετρήσεις, πρέπει να βρίσκουν τρόπους ώστε να ελαττώνουν την αρνητική επίδραση που έχει η έλλειψη οπτικών επαφών, και γενικότερα οι σύνθετες και απρόβλεπτες περιβαλλοντικές συνθήκες, στο τελικό αποτέλεσμα. Επίσης, είναι αναγκαίο να βρίσκουν τρόπους βελτίωσης του συγχρονισμού μεταξύ πομπών και δεκτών.

1.4.1.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟΙ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΑΦΙΞΗΣ (Time difference of Arrival: TDOA) ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

Θα μελετήσουμε πάλι την περίπτωση όπου θέλουμε να εντοπίσουμε τη θέση ενός αντικειμένου σε έναν διδιάστατο (2-D) εσωτερικό χώρο. Έστω, πάλι, ότι υπάρχουν τρεις δέκτες που είναι τοποθετημένοι σε τρία καθορισμένα σημεία A, B και C, με γνωστές συντεταγμένες: (x_1, y_1) , (x_2, y_2) και (x_3, y_3) , αντίστοιχα. Το αντικείμενο του οποίου τη θέση πρέπει να εκτιμήσουμε, είναι ταυτόχρονα και ο πομπός του σήματος που λαμβάνουν οι δέκτες. Ο πομπός θεωρούμε ότι βρίσκεται σε μία θέση (P) στο χώρο με συντεταγμένες (x, y) , τις τιμές των οποίων θα πρέπει να εκτιμήσουμε. Ένας αλγόριθμος που βασίζεται στη χρονική διαφορά της άφιξης (Time Difference Of Arrival: TDOA) του σήματος σε δύο διαφορετικούς δέκτες, υπολογίζει τη διαφορά των αποστάσεων του πομπού από τους δύο δέκτες, και όχι την κάθε απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη ξεχωριστά, όπως θα έκανε ένας αλγόριθμος βασιζόμενος σε TOA μετρήσεις.

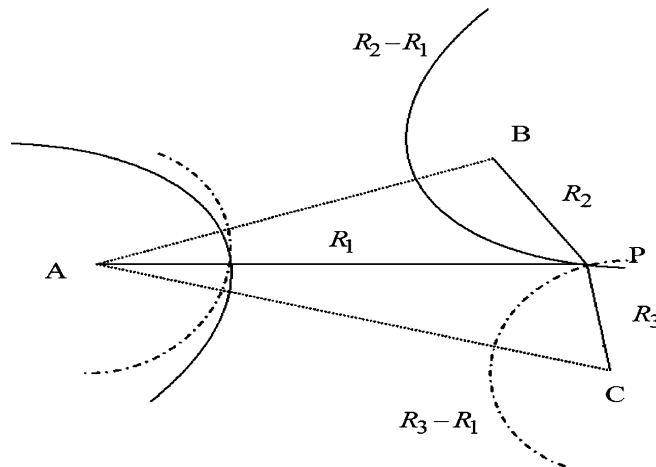
Έστω ότι ο πομπός εκπέμπει ένα σήμα τη χρονική στιγμή t_0 , και οι σταθμοί βάσης A, B, C λαμβάνουν το σήμα τις χρονικές στιγμές t_1, t_2, t_3 αντίστοιχα. Όμως, υπάρχει η δυνατότητα να μετρήσουμε μόνο τη χρονική διαφορά άφιξης του σήματος μεταξύ δύο σταθμών βάσης. Δεν υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης των ακριβών χρονικών στιγμών άφιξης του σήματος σε κάθε σταθμό βάσης ξεχωριστά. Έτσι, μετράται η χρονική διαφορά άφιξης του σήματος $\tau_2 = (t_2 - t_1)$ μεταξύ των σταθμών βάσης A και B, και μετράται και η χρονική διαφορά άφιξης του σήματος $\tau_3 = (t_3 - t_1)$ μεταξύ των σταθμών βάσης A και C. Γνωρίζοντας ότι σε περίπτωση οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη, η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη προσεγγίζεται πολύ καλά ως το γινόμενο της χρονικής διάρκειας διάδοσης του σήματος επί την ταχύτητα του φωτός, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$c \cdot \tau_2 = c(t_2 - t_1) = c(t_2 - t_0) - c(t_1 - t_0) = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (1.4)$$

$$c \cdot \tau_3 = c(t_3 - t_1) = c(t_3 - t_0) - c(t_1 - t_0) = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (1.5)$$

Παρατηρούμε ότι προκύπτει ένα μη γραμμικό σύστημα, το οποίο γεωμετρικά παρουσιάζεται ως η τομή δύο υπερβολών, στον διδιάστατο χώρο (ΣΧΗΜΑ 1.2).

Η τομή των υπερβολών μας δίνει δύο σημεία, τα οποία είναι οι δύο πιθανές θέσεις στις οποίες θα μπορούσε να βρίσκεται ο δέκτης.



ΣΧΗΜΑ 1.2: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟ ΣΕ ΤΔΟΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Ένα σύστημα υπερβολών θα μπορούσε να λυθεί με πολλούς τρόπους.

Ένας τρόπος θα ήταν να εντοπίζαμε γραφικά τα σημεία τομής των υπερβολών.

Ένας άλλος τρόπος είναι να προσπαθούσαμε να λύσουμε απευθείας το σύστημα με κάποιες από τις γνωστές μεθόδους επίλυσης μη γραμμικών συστημάτων της αριθμητικής ανάλυσης.

Ένας άλλος τρόπος θα ήταν να λύναμε το εξής σύστημα [4] :

$$(R_{21} + R_I)^2 = ((R_2 - R_1) + R_I)^2 = R_2^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2$$

$$(R_{31} + R_I)^2 = ((R_3 - R_1) + R_I)^2 = R_3^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2, \text{ όπου } R_1, R_2, R_3 \text{ ορίστηκαν παραπάνω στον}$$

βασικό σε ΤΟΑ μετρήσεις αλγόριθμο, και $R_{21} = c \cdot \tau_2$, $R_{31} = c \cdot \tau_3$. Το σύστημα αυτό είναι γραμμικό και μας δίνει μία μοναδική λύση (x, y) συναρτήσει όμως του R_1 . Στη

συνέχεια, αντικαθιστούμε τη λύση (x, y) στον τύπο $R_1^2 = (c(t_1 - t_0))^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2$, και προκύπτει

μία δευτεροβάθμια εξίσωση του R_1 . Λύνοντας τη δευτεροβάθμια αυτή εξίσωση, αν έχει πραγματικές ρίζες, είναι πιθανό να πάρουμε δύο απλές ή μία διπλή πραγματική ρίζα. Επιλέγουμε τις θετικές τιμές του R_1 , τις αντικαθιστούμε στη λύση (x, y) , η οποία ήταν συνάρτηση του R_1 , και έτσι προκύπτουν μία ή δύο λύσεις (x, y) , αναλόγως αν υπήρχαν μία ή δύο μη αρνητικές ρίζες R_1 .

Ένας άλλος τρόπος λύσης του μη γραμμικού συστήματος θα ήταν να το μετατρέπαμε σε γραμμικό, με τη βοήθεια των σειρών Taylor, και στη συνέχεια να το λύναμε χρησιμοποιώντας έναν επαναληπτικό αλγόριθμο.

Σε περίπτωση που έχουμε στη διάθεσή μας περισσότερους σταθμούς βάσης, θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων [4] για να εκτιμήσουμε τις συντεταγμένες (x, y) του αντικειμένου άγνωστης θέσης.

Αν θέλαμε να εντοπίσουμε ένα αντικείμενο στον τρισδιάστατο (3-D) χώρο, τότε η λύση θα προέκυπτε ακολουθώντας τις ίδιες μεθόδους όπως στον διδιάστατο χώρο, με τη διαφορά ότι οι εξισώσεις περιέχουν πλέον και τη μεταβλητή z . Επίσης, θα ήταν απαραίτητο να έχουμε στη διάθεσή μας τουλάχιστον έναν περισσότερο σταθμό βάσης από ό,τι στον διδιάστατο χώρο, γιατί η αύξηση των άγνωστων μεταβλητών, απαιτεί αύξηση των εξισώσεων του συστήματος, και άρα αύξηση των σταθμών βάσης.

Από τις παραπάνω εξισώσεις, παρατηρούμε ότι σε καμία εξίσωση δεν υπάρχει εξάρτηση από τη χρονική στιγμή εκπομπής t_0 του πομπού. [1], [4] Δηλαδή, αν υπάρξει αποσυγχρονισμός μεταξύ πομπού και δεκτών, αυτό δεν θα έχει επίδραση στην ακρίβεια του αποτελέσμάτος μας. Έτσι, η ευθύνη

για συγχρονισμό στις TDOA μετρήσεις ανατίθεται μόνο στους σταθμούς βάσης, ενώ ο πομπός απαλλάσσεται από την ευθύνη της εκπομπής σε ακριβείς χρονικές στιγμές. Έτσι, στους βασιζόμενους σε TDOA μετρήσεις αλγόριθμους είμαστε ανεκτικοί σε οποιαδήποτε αιτία μπορεί να αποσυγχρονίσει τον πομπό.

Τέλος, θα μελετήσουμε τις μεθόδους με τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε τη χρονική διαφορά λήψης του σήματος μεταξύ δύο σταθμών βάσης. Μία γνωστή μέθοδος υπολογισμού του TDOA μεταξύ δύο σταθμών βάσης, είναι να χρησιμοποιήσουμε τον τύπο της συσχέτισης ανάμεσα στα σήματα που λαμβάνουν οι σταθμοί βάσης αυτοί [1]. Έστω ότι εκπέμπεται το σήμα $s(t)$. Τότε, ο i -στός σταθμός βάσης θα λάβει το σήμα: $x_i(t) = s(t - d_i) + n_i(t)$, το οποίο είναι το σήμα $s(t)$, καθυστερημένο κατά d_i μονάδες χρόνου, και επιβαρυνμένο από την παρουσία θορύβου $n_i(t)$. Ο j -στός σταθμός βάσης θα λάβει το σήμα: $x_j(t) = s(t - d_j) + n_j(t)$, το οποίο είναι το σήμα $s(t)$, καθυστερημένο κατά d_j μονάδες χρόνου, και επιβαρυνμένο από την παρουσία θορύβου $n_j(t)$. Η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης μεταξύ των σημάτων που λαμβάνουν ο i -στός και ο j -στός σταθμός βάσης είναι η εξής:

$$\hat{R}_{x_i, x_j}(\tau) = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T x_i(t) \cdot x_j(t - \tau) dt, \quad (1.6)$$

όπου T μία χρονική περίοδος λήψης του σήματος στους δύο σταθμούς βάσης, και τ η χρονική διαφορά λήψης του σήματος (TDOA) μεταξύ των δύο σταθμών βάσης, η οποία πρόκειται να υπολογιστεί με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Έτσι, η καλύτερη δυνατή εκτίμηση της τιμής TDOA μεταξύ των δύο σταθμών βάσης, είναι η τιμή τ που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση συσχέτισης $\hat{R}_{x_i, x_j}(\tau)$. Η συνάρτηση συσχέτισης είναι ένα μέτρο ομοιότητας μεταξύ του σήματος που λαμβάνει ο i -στός σταθμός βάσης και της χρονικά καθυστερημένης μορφής του σήματος που λαμβάνει ο j -στός σταθμός βάσης. Επομένως, η μεγιστοποίηση της συνάρτησης συσχέτισης δηλώνει ότι τα σήματα των δύο σταθμών βάσης είναι όσο το δυνατό περισσότερο όμοια. Και αυτό, είναι κάτι που θα πρέπει να συμβαίνει, αφού οι σταθμοί βάσης λαμβάνουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές το ίδιο σήμα, το οποίο το εκπέμπει ο πομπός.

Εκτός από την έλλειψη συγχρονισμού μεταξύ των σταθμών βάσης, μία ακόμα αιτία σφάλματος στις TDOA μετρήσεις είναι και η έλλειψη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Στην περίπτωση αυτή, δεν λαμβάνεται πάντα υπόψη το σήμα που στέλνει άμεσα ο πομπός, αλλά είναι πιθανό να ληφθεί

υπόψη κάποιο σήμα που προέρχεται από πολλαπλές ανακλάσεις, και έτσι το τελικό αποτέλεσμα υποφέρει από σφάλμα. Έτσι, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται μέθοδοι υπολογισμού του TDOA μεταξύ των σταθμών βάσης, οι οποίες να ελαττώνουν τα σφάλματα που προκύπτουν από διάφορες αιτίες, όπως η έλλειψη οπτικής επαφής ή ο αποσυγχρονισμός.

1.4.1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟΙ ΣΤΗΝ ΙΣΧΥ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ (RSS-Based or Signal Attenuation-Based Methods)

Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν χρονικές μετρήσεις στα σήματα που λαμβάνουν οι δέκτες, υποφέρουν από την πιθανή έλλειψη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτό, γιατί αν δεν υπάρχει οπτική επαφή, τότε υπάρχει κίνδυνος να ληφθεί υπόψη στις χρονικές μετρήσεις ένα σήμα πολλαπλής διαδρομής, και όχι το άμεσο σήμα που στέλνει ο πομπός. Και αυτό επηρεάζει την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Μία μέθοδος που θα μπορούσε να εκτιμήσει τη θέση ενός αντικειμένου, χωρίς να εξαρτάται τόσο άμεσα από μία πιθανή έλλειψη οπτικής επαφής, είναι να χρησιμοποιήσουμε μετρήσεις που δείχνουν την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος ή την εξασθένηση του σήματος (Received Signal Strength: RSS ή Signal Attenuation) που εκπέμπει ο πομπός στους δέκτες.

Έστω ότι ο πομπός εκπέμπει ένα σήμα, και ένας σταθμός βάσης λαμβάνει το σήμα αυτό εξασθενημένο κατά LS . Αυτό που χρειάζεται είναι να βρεθεί ένας τρόπος να συσχετίσουμε την εξασθένηση του σήματος με την απόσταση ανάμεσα στον πομπό και τον σταθμό βάσης. Η συσχέτιση αυτή μεταξύ απόστασης και RSS επιτυγχάνεται αν μοντελοποιήσουμε τη διάδοση του σήματος στον εσωτερικό χώρο που βρισκόμαστε. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα εμπειρικό, ένα στατιστικό, ή ένα αναλυτικό μοντέλο, για τον εσωτερικό χώρο μας. Αν καταφέρουμε και μοντελοποιήσουμε τη διάδοση του σήματος στο χώρο, τότε έχουμε στη διάθεσή μας συναρτήσεις, οι οποίες δείχνουν με ποιο τρόπο εξασθενεί το σήμα όταν διαδίδεται, εξαιτίας των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν στον συγκεκριμένο χώρο, και οι οποίες επηρεάζουν τη διάδοση του σήματος.

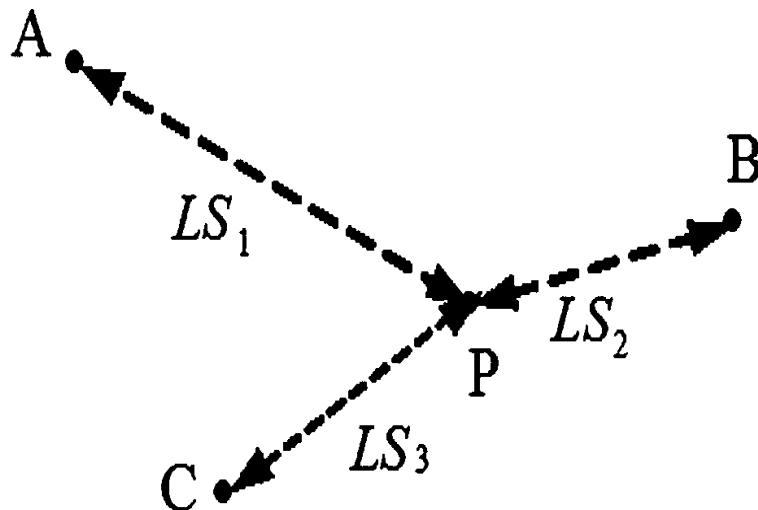
Έτσι, αν τοποθετήσουμε σε καθορισμένες θέσεις A: (x_1, y_1) , B: (x_2, y_2) και C: (x_3, y_3) στον εσωτερικό χώρο τους σταθμούς βάσης, όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 1.3, τότε μπορούμε να πάρουμε τις μετρήσεις LS_1 , LS_2 και LS_3 αντίστοιχα, οι οποίες δείχνουν την εξασθένηση του σήματος σε κάθε σταθμό βάσης. Επομένως, αν χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο διάδοσης που έχουμε στη διάθεσή μας για τον συγκεκριμένο χώρο, μπορούμε να υπολογίσουμε τις αποστάσεις R_1 , R_2 και R_3 ανάμεσα στον πομπό και τους σταθμούς βάσης A, B και C αντίστοιχα. Έτσι, όπως και στον αλγόριθμο που βασίζεται σε TOA μετρήσεις, προκύπτει το εξής μη γραμμικό σύστημα,

$$\begin{aligned}
 R_1^2 &= (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \\
 R_2^2 &= (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 \\
 R_3^2 &= (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2
 \end{aligned}
 \tag{1.7}$$

η λύση του οποίου, και άρα η θέση του αντικειμένου που θέλουμε να εντοπίσουμε, είναι η τομή τριών κύκλων.

Για να έχει το σύστημα μοναδική λύση, πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον τρεις σταθμοί βάσης. Ομοίως, αν θέλαμε να εντοπίσουμε ένα αντικείμενο στον τρισδιάστατο (3-D) χώρο, θα έπρεπε να υπάρχουν τουλάχιστον τέσσερις σταθμοί βάσης, για να δώσει μοναδική λύση ένα μη γραμμικό σύστημα τομής σφαιρών.

Όμως, όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, είναι πολύ δύσκολο να μοντελοποιήσουμε με επιτυχία τη διάδοση σε έναν εσωτερικό χώρο. Αυτό, γιατί οι συνθήκες σκίασης και πολλαπλών διαδρομών προκαλούν έντονες και αρκετά απρόβλεπτες διαλείψεις, και επομένως υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι τιμές του μοντέλου να διαφέρουν αρκετά από τις πραγματικές τιμές. Επομένως, πολλές φορές, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν RSS μετρήσεις οδηγούν σε μεγάλα σφάλματα.



ΣΧΗΜΑ 1.3: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΠΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΙ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΠΟΜΠΟΥ ΚΑΙ ΔΕΚΤΩΝ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟ ΣΕ RSS ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.

Όμως, σε κάποιες περιπτώσεις, όπως μεγάλη πιθανότητα έλλειψης οπτικών επαφών, μεγάλη πιθανότητα αποσυγχρονισμού πομπού και δεκτών, ή μεγάλο χρηματικό κόστος συστήματος χρονικών μετρήσεων, θα μπορούσε να προτιμηθεί ένας αλγόριθμος βασισμένος σε RSS μετρήσεις, αντί ενός αλγόριθμου που χρησιμοποιεί χρονικές μετρήσεις. Έχουν μελετηθεί διάφοροι τρόποι που προσπαθούν να βελτιώσουν την ακρίβεια ενός αλγόριθμου που βασίζεται σε RSS μετρήσεις. Μία καλή προσπάθεια σε αυτή την κατεύθυνση, είναι να μοντελοποιήσουμε τη διάδοση του σήματος χρησιμοποιώντας το Ελλειπτικό Μοντέλο Διάδοσης (Ellipse Propagation Model) [7]. Το μοντέλο αυτό προσπαθεί να βελτιώσει τα σφάλματα που προκύπτουν όταν χρησιμοποιούμε αποκλειστικά το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου (Free Space Propagation Model) για τη διάδοση του σήματος. Αν χρησιμοποιείται αποκλειστικά το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου, δηλαδή το μοντέλο στο οποίο θεωρούμε ότι η εξασθένηση του σήματος είναι απλώς αντιστρόφως ανάλογη με μία τάξη της απόστασης, τότε το μοντέλο αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί σαν μία σφαιρική επιφάνεια με κέντρο έναν σταθμό βάσης. Στην επιφάνεια της σφαίρας, οι τιμές RSS είναι ίσες. Όμως, το μοντέλο ελεύθερου χώρου σε όλες τις κατευθύνσεις διάδοσης δεν είναι πολύ ρεαλιστικό. Για αυτό το λόγο, προτάθηκε το Ellipse Propagation Model, το οποίο λαμβάνει καλύτερα υπόψη του τις αντιξοότητες ενός εσωτερικού περιβάλλοντος, και αντί για σφαίρα, θεωρεί ότι η επιφάνεια με ίσες RSS τιμές γύρω από έναν σταθμό βάσης, είναι μία επιφάνεια έλλειψης. Το Ellipse Propagation Model θεωρεί ότι το μοντέλο ελεύθερου χώρου ισχύει μόνο σε κάποιες συγκεκριμένες κατευθύνσεις του χώρου, δηλαδή μόνο στο κύριο επίπεδο της έλλειψης. Έτσι, το Ellipse Propagation Model ελαττώνει τα σφάλματα που έχουμε, αν θεωρήσουμε ότι ισχύει το Free Space Propagation Model σε όλες τις κατευθύνσεις του χώρου.

Ένας άλλος αλγόριθμος βασισμένος σε RSS μετρήσεις, που θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια εντοπισμού της θέσης ενός αντικειμένου σε έναν εσωτερικό χώρο, είναι ένας αλγόριθμος συγκεκριμένης λογικής δύο σταδίων (two-stage fuzzy logic), ο οποίος περιγράφεται αναλυτικά στο [8]. Η βασική προσπάθεια ενός fuzzy logic αλγόριθμου είναι να προσπαθήσει να μετατρέψει εκφράσεις της γλώσσας του ανθρώπου σε μαθηματικά μοντέλα.

1.4.1.4 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟΙ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΜΕΤ' ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ (Roundtrip Time Of Flight: RTOF) ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

Ένα σημαντικό πρόβλημα που έχουν να αντιμετωπίσουν οι αλγόριθμοι οι οποίοι χρησιμοποιούν χρονικές μετρήσεις, είναι η απαίτηση που υπάρχει για ακριβή συγχρονισμό. Επομένως, θα ήταν χρήσιμο να βρεθούν αλγόριθμοι οι οποίοι, αν και στηρίζονται σε χρονικές μετρήσεις, να μην δίνουν αποτέλεσμα το οποίο θα επηρεάζεται σημαντικά από πιθανή έλλειψη συγχρονισμού. Μία μέθοδος η

οποία είναι πολύ πιο ανεκτική σε περιπτώσεις αποσυγχρονισμού μεταξύ δεκτών, και μεταξύ πομπού και δεκτών, είναι αυτή που χρησιμοποιεί τις μετρήσεις Roundtrip Time Of Flight (RTOF), δηλαδή τις τιμές που δείχνουν τη χρονική διάρκεια διάδοσης ενός σήματος από τη στιγμή που εκπέμπεται προς τον δέκτη, μέχρι τη χρονική στιγμή που επιστρέφει ξανά στον πομπό.

Σε έναν αλγόριθμο ο οποίος χρησιμοποιεί RTOF μετρήσεις, οι σταθμοί βάσης συμπεριφέρονται όπως τα ραντάρ. Ο σταθμός βάσης εκπέμπει ένα σήμα. Το σήμα αυτό φτάνει σε έναν αναμεταδότη, ο οποίος στέλνει το σήμα που έφτασε σε αυτόν ξανά στον σταθμό βάσης από τον οποίο προήλθε το αρχικό σήμα. Τότε, ο σταθμός βάσης μετράει τη χρονική διάρκεια που έκανε το σήμα για να φτάσει στον αναμεταδότη και να επιστρέψει από τον αναμεταδότη πάλι στον σταθμό βάσης.

Κάθε σταθμός βάσης μετράει το RTOF του σήματος που εκπέμπει προς τον αναμεταδότη, ενώ ο αναμεταδότης είναι το αντικείμενο του οποίου τη θέση θέλουμε να εντοπίσουμε. Έχοντας στη διάθεσή μας τις RTOF μετρήσεις όλων των σταθμών βάσης, μπορούμε να υπολογίσουμε τις αποστάσεις κάθε σταθμού βάσης από το αντικείμενο άγνωστης θέσης, και τότε η μελέτη γίνεται όπως θα γινόταν αν εφαρμόζαμε έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί TOA μετρήσεις. Δηλαδή, παρατηρούμε ότι προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων, το οποίο μοιάζει αρκετά με το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει σε έναν αλγόριθμο που βασίζεται σε TOA μετρήσεις. Η μόνη διαφορά με έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί TOA μετρήσεις, είναι ότι από μία RTOF μέτρηση δεν υπολογίζουμε απλά την απόσταση, αλλά υπολογίζουμε το διπλάσιο της απόστασης μεταξύ σταθμού βάσης και αναμεταδότη.

Η χρησιμοποίηση RTOF μετρήσεων ελαττώνει την αρνητική επίδραση που θα είχε η έλλειψη συγχρονισμού στο τελικό αποτέλεσμα. Αυτό γιατί, την ευθύνη για την RTOF μέτρηση την έχει μόνο ο σταθμός βάσης που εκπέμπει το σήμα, χωρίς να χρειάζεται να συγχρονιστεί με άλλους πομπούς ή δέκτες. Όμως, η πιθανότητα έλλειψης οπτικής επαφής μεταξύ σταθμού βάσης και αναμεταδότη, εξακολουθεί να είναι μία σημαντική αιτία σφάλματος στο τελικό αποτέλεσμα.

Τέλος, μία ακόμα σημαντική αιτία σφάλματος στο τελικό αποτέλεσμα, είναι η καθυστέρηση του σήματος στον αναμεταδότη. Όταν το σήμα φτάσει στον αναμεταδότη, αυτό θα καθυστερήσει για ένα χρονικό διάστημα, μέχρι να αναμεταδοθεί προς τον σταθμό βάσης. Αν ο χρόνος που το σήμα καθυστερεί στον αναμεταδότη είναι αμελητέος σε σύγκριση με το χρόνο διάδοσης από και προς τον σταθμό βάσης, τότε και το σφάλμα στην RTOF μέτρηση είναι αμελητέο. Έτσι, σε χώρους σχετικά μεγάλης έκτασης, όπου ο χρόνος διάδοσης σήματος είναι πιο μεγάλος, το πρόβλημα που προκύπτει από τη χρονική διάρκεια επεξεργασίας στον αναμεταδότη είναι μικρό. Αν όμως ο χώρος στον οποίον βρίσκεται το αντικείμενο που θέλουμε να εντοπίσουμε είναι σχετικά μικρός, τότε η καθυστέρηση στον

αναμεταδότη δεν είναι αμελητέα, και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η RTOF μέτρηση να υποφέρει από σφάλμα, το οποίο δεν μπορεί να αγνοηθεί. Όμως, συνήθως η έκταση που έχει ένα εσωτερικό περιβάλλον είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με την έκταση που έχει ένας εξωτερικός χώρος. Άρα, στη μελέτη εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο που βασίζεται σε RTOF μετρήσεις, είναι πολλές φορές αναγκαίο να λαμβάνουμε υπόψη μας την καθυστέρηση στον αναμεταδότη, και να βρίσκουμε τρόπους ώστε να ελαττώνεται το σφάλμα που οφείλεται στην καθυστέρηση αυτή.

Ένα σύστημα που είναι κατάλληλο για εσωτερικούς χώρους μικρής έκτασης και χαρακτηρίζεται από μικρό χρόνο καθυστέρησης στον αναμεταδότη, είναι το Μικροκυματικό Σύστημα Διαμόρφωσης Οπισθοδιασποράς (Microwave Backscatter Modulation System) [9]. Σε ένα τέτοιο σύστημα, δεν υπάρχει πηγή ακτινοβολίας στον αναμεταδότη. Ο σταθμός βάσης εκπέμπει ένα φέρον σήμα με συχνότητα που ανήκει στη ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency: RF), και αυτό λαμβάνεται από τον αναμεταδότη, διαμορφώνεται, και επανεκπέμπεται όχι από κάποια RF πηγή, αλλά σαν να ήταν ο αναμεταδότης ένας απλός σκεδαστής. Σε ένα Microwave Backscatter Modulation System, φροντίζουμε η καθυστέρηση στον αναμεταδότη να είναι όσο το δυνατό πιο αμελητέα. Επίσης, ένα τέτοιο σύστημα είναι οικονομικά συμφέρον, γιατί η έλλειψη RF πηγής στον αναμεταδότη δίνει τη δυνατότητα μικρότερης κατανάλωσης ισχύος από αυτόν, και άρα αυξάνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας που πιθανόν να χρησιμοποιεί.

1.4.1.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΤΗ ΦΑΣΗ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ (Received Signal Phase Method)

Ένας εναλλακτικός τρόπος μέτρησης της απόστασης μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη, είναι μέσω της φάσης του σήματος που λαμβάνει ο δέκτης (Received Signal Phase Method ή Phase Of Arrival (POA)).

Μία συνάρτηση, για να είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα, πρέπει να είναι της μορφής: $F(\omega t - kz)$, και να μεταβάλλεται με περιοδικό τρόπο, και χρονικά, αλλά και χωρικά. Δηλαδή, το κύμα πρέπει να διαδίδεται και στο άξονα t του χρόνου, αλλά και στον άξονα z του χώρου. Αν υποθέσουμε ότι ο χώρος μέσα στον οποίον διαδίδεται το κύμα δεν είναι αγωγίμος, τότε ισχύει: $k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$, όπου ϵ η διηλεκτρική σταθερά του χώρου, μ η μαγνητική διαπερατότητα του χώρου, ω η γωνιακή συχνότητα του κύματος στον χρόνο, και k ο κυματικός αριθμός. Επίσης, η ταχύτητα φάσης v του κύματος ορίζεται ως η ταχύτητα που πρέπει να έχει ένας κινούμενος παρατηρητής έτσι που να βλέπει συνέχεια τη φάση $(\omega t - kz)$ σταθερή [10]. Για να συμβεί αυτό πρέπει να ισχύει: $\Delta z \cdot k = \Delta t \cdot \omega$. Επομένως, η ταχύτητα φάσης ορίζεται ως εξής: $v = \Delta z / \Delta t = \omega / k$. Αν υποθέσουμε ότι ο χώρος στον οποίον διαδίδεται το κύμα

προσεγγίζεται αρκετά ικανοποιητικά από ένα περιβάλλον κενού χώρου, τότε θεωρούμε ότι η ταχύτητα φάσης του κύματος ισούται με την ταχύτητα του φωτός, c . Οπότε τότε, ο κυματικός αριθμός ισούται με: $k = \omega / c$.

Έστω ότι ένας πομπός, ο οποίος βρίσκεται σε μία σταθερή θέση z_0 , εκπέμπει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα της παραπάνω μορφής. Ένας δέκτης, ο οποίος βρίσκεται στη θέση z_1 θα λάβει ένα σήμα με φάση: $\omega \cdot t - \varphi_1 = \omega \cdot t - k \cdot \Delta z = \omega \cdot t - (\omega / c) \cdot \Delta z$, όπου $\Delta z = z_1 - z_0$. Αν ο δέκτης έχει την ικανότητα να μετρήσει τη σταθερά φ_1 της φάσης, αν $0 < \varphi_1 < 2\pi$ και αν γνωρίζουμε τη θέση z_0 του πομπού, τότε η θέση z_1 του δέκτη μπορεί να υπολογιστεί πολύ απλά από τις εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= (\omega / c) \cdot \Delta z \Rightarrow \Delta z = (\varphi_1 \cdot c) / \omega, \\ \text{και } z_1 &= \Delta z + z_0. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Όλα τα παραπάνω, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο. Έστω ότι σε καθορισμένες θέσεις στο χώρο είναι τοποθετημένοι πομποί, οι οποίοι εκπέμπουν ημιτονοειδές σήμα της μορφής: $\sin(2\pi f t + \varphi)$, όπου υποθέτουμε ότι $\varphi = 0$, και f η συχνότητα. Το αντικείμενο του οποίου τη θέση θέλουμε να εντοπίσουμε, είναι ένας δέκτης, ο οποίος λαμβάνει τα σήματα που εκπέμπουν οι πομποί. Το σήμα που προέρχεται από τον i -στό πομπό, ο δέκτης θα το λάβει στη μορφή: $\sin(\omega \cdot t - \varphi_i)$. Έστω ότι ο δέκτης μπορεί να μετρήσει τη σταθερά της φάσης φ_i . Αν το μήκος κύματος λ του σήματος είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη δυνατή απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη στον χώρο, τότε η σταθερά της φάσης περιορίζεται από 0 ως $2\pi \text{ rad}$, δηλαδή $0 < \varphi_i < 2\pi$, και ο δέκτης μπορεί εύκολα να υπολογίσει την απόστασή του Δz_i από τον πομπό, με τη βοήθεια της σχέσης:

$$\varphi_i = (\omega / c) \cdot \Delta z_i = (2\pi / \lambda) \cdot \Delta z_i \Rightarrow \Delta z_i = (\varphi_i \cdot c) / \omega = (\varphi_i \cdot \lambda) / 2\pi, \text{ όπου } \omega = 2\pi f.$$

Αν ίσχυε $\Delta z_i > \lambda$, τότε θα προέκυπτε $\varphi_i > 2\pi$. Όμως, αν και στην πραγματικότητα η γωνία θα έπρεπε να ήταν $\varphi_i > 2\pi$, ο δέκτης πιθανότατα θα την αντιληφθεί σαν μία γωνία που περιορίζεται στο διάστημα $0 < \varphi_i < 2\pi$. Επομένως, αν μετρήσουμε στο λαμβανόμενο σήμα μία σταθερά της φάσης φ_i , η οποία θα βρίσκεται στο διάστημα $0 < \varphi_i < 2\pi$, γνωρίζουμε ότι στην πραγματικότητα, η πραγματική σταθερά της φάσης, η οποία θα αντιπροσωπεύει άμεσα την αληθινή απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, ισούται με: $\varphi_i \pm 2k\pi$, όπου k ακέραιος αριθμός. Επομένως, τότε, η αληθινή απόσταση Δz_i

μεταξύ πομπού και δέκτη προκύπτει από τη σχέση:

$$\varphi_i \pm 2k\pi = 2\pi \cdot \Delta z_i / \lambda \Rightarrow \Delta z_i = \lambda \cdot (\varphi_i \pm 2k\pi) / (2\pi)$$

Άρα, υπάρχει η δυνατότητα να εντοπίσουμε ένα σύνολο από πιθανές τιμές απόστασης Δz_i μεταξύ πομπού και δέκτη, και όχι μία μοναδική τιμή Δz_i . Μόνο αν είμαστε σίγουροι ότι στο χώρο μελέτης μας δεν μπορεί να υπάρξει απόσταση Δz_i μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του σήματος, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε μία μοναδική τιμή για την απόσταση Δz_i , η οποία προκύπτει από τον παραπάνω τύπο για $k=0$. Επομένως, αν η μέγιστη δυνατή απόσταση στον χώρο μεταξύ πομπών και δέκτη δεν είναι μικρότερη από το μήκος κύματος, τότε η μέθοδος POA δεν εξασφαλίζει μία μοναδική τιμή για τη ζητούμενη απόσταση, και επομένως καλείται να βρει λύσεις στο πρόβλημα αυτό.

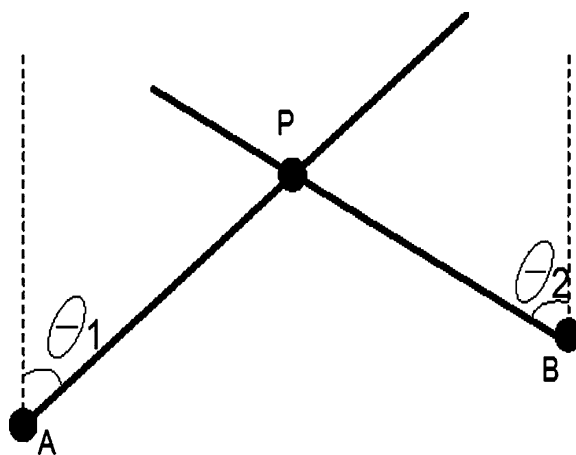
Ο δέκτης μπορεί να μετρήσει τις φάσεις των σημάτων που λαμβάνει από όλους τους πομπούς, και να χρησιμοποιήσει τις μετρήσεις του, για να υπολογίσει την απόστασή του από τον κάθε πομπό. Αν υπολογίσουμε τις αποστάσεις μεταξύ πομπών και δέκτη, μπορούμε πλέον να εργαστούμε όπως θα εργαζόμασταν και σε έναν αλγόριθμο βασισμένο σε TOA μετρήσεις. Επιπλέον, αν είχαμε τη δυνατότητα να μετρήσουμε τη διαφορά φάσης των σημάτων που φτάνουν στο δέκτη, προερχόμενα από διάφορα ζεύγη πομπών, θα μπορούσαμε να εργαστούμε όπως θα εργαζόμασταν σε έναν αλγόριθμο που βασίζεται σε TDOA μετρήσεις.

Η τιμή της φάσης που μετράει ο δέκτης είναι πολύ πιθανό να υποφέρει από σφάλμα. Εκτός από το θόρυβο και τις παρεμβολές που επικρατούν στον δέκτη, μπορεί και η παρουσία σημάτων που προέρχονται από πολλαπλές ανακλάσεις, να είναι υπεύθυνα για σφάλματα στη μέτρηση της φάσης. Έτσι, ακόμα και αν ο δέκτης μπορεί να διακρίνει το σήμα που προέρχεται άμεσα από τον πομπό μέσω οπτικής επαφής από σήματα πολλαπλών διαδρομών, υπάρχει ο κίνδυνος η φάση που μετράει ο δέκτης να εμπεριέχει σφάλμα. Όμως, σε περίπτωση που δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, τότε ο δέκτης είναι πολύ πιθανό να μην καταφέρει να διακρίνει το σήμα που εκπέμπει άμεσα ο πομπός, από σήματα που προέρχονται μέσω πολλαπλών διαδρομών. Έτσι, σε περίπτωση που αντί για το άμεσο σήμα, μετράμε τη φάση ενός σήματος που προήλθε από πολλαπλές ανακλάσεις, η φάση που μετράμε δεν έχει καμία σχέση και θα διαφέρει πολύ από τη φάση που θα μας πληροφορούσε για την πραγματική απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Επομένως, σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλη πιθανότητα έλλειψης οπτικής επαφής μεταξύ πομπών και δέκτη [1], το σφάλμα μέτρησης της φάσης είναι πολύ σημαντικό, και επομένως η εκτίμηση της θέσης ενός αντικειμένου είναι αρκετά αναξιόπιστη.

1.4.1.6 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΤΙΣ ΓΩΝΙΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ (ANGULATION TECHNIQUES)

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούν τις γωνίες κατεύθυνσης των σημάτων (Angulation Techniques), ή αλλιώς τεχνικές εκτίμησης της γωνίας άφιξης (Angle Of Arrival (AOA) Estimation), υπολογίζουν τη θέση ενός αντικειμένου σε έναν εσωτερικό χώρο, λαμβάνοντας υπόψη τις γωνίες των κατευθύνσεων διάδοσης των σημάτων.

Έστω ότι θέλουμε να εντοπίσουμε ένα αντικείμενο στον διδιάστατο (2-D) χώρο, και υπάρχουν δύο σταθμοί βάσης A και B , οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε σταθερές θέσεις με συντεταγμένες (x_1, y_1) και (x_2, y_2) αντίστοιχα (ΣΧΗΜΑ 1.4). Το αντικείμενο άγνωστης θέσης βρίσκεται στην θέση (P) , με συντεταγμένες (x, y) , τις οποίες θα πρέπει να υπολογίσουμε.



ΣΧΗΜΑ 1.4: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΤΙΣ ΓΩΝΙΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ.

Η κατεύθυνση διάδοσης του σήματος από τη θέση P στη θέση A έχει γωνία θ_1 ως προς την κατακόρυφο που διέρχεται από το A . Επίσης, η κατεύθυνση διάδοσης του σήματος από τη θέση P στη θέση B έχει γωνία θ_2 ως προς την κατακόρυφο που διέρχεται από το B . Αν θεωρήσουμε ότι ο άξονας y είναι κατακόρυφος, και $r_1 = (PA)$, $r_2 = (PB)$, τότε προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις [4]:

$$x = x_1 + r_1 \cdot \sin \theta_1$$

$$y = y_1 + r_1 \cdot \cos \theta_1$$

$$x = x_2 - r_2 \cdot \sin \theta_2$$

$$y=y_2+r_2 \cdot \cos\theta_2 \quad (1.9)$$

Παρατηρούμε ότι το σύστημα αυτό μας δίνει μία μοναδική λύση (x,y) , η οποία είναι και η θέση του αντικειμένου που θέλουμε να εντοπίσουμε. Επομένως, για να εντοπίσουμε ένα αντικείμενο στον διδιάστατο χώρο, αρκεί να έχουμε στη διάθεσή μας δύο σταθμούς βάσης. Ομοίως, αν θέλαμε να εντοπίσουμε ένα αντικείμενο στον τρισδιάστατο (3-D) χώρο, θα χρειαζόμασταν οπωσδήποτε έναν παραπάνω σταθμό βάσης. Επίσης, ένας άλλος τρόπος υπολογισμού των συντεταγμένων (x,y) είναι με τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων [4]. Η μέθοδος αυτή θα ήταν πιο χρήσιμη αν είχαμε στη διάθεσή μας πολλούς σταθμούς βάσης.

Οι γωνίες των κατευθύνσεων διάδοσης των σημάτων μπορούν να μετρηθούν [1] χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραίες ή στοιχειοκεραίες.

[1], [4] Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των AOA τεχνικών είναι ότι απαιτούν μικρό αριθμό σταθμών βάσεων. Δηλαδή, ο εντοπισμός της θέσης ενός αντικειμένου στον 2-D χώρο απαιτεί μόλις δύο σταθμούς βάσης, ενώ για να εντοπίσουμε ένα αντικείμενο στον 3-D χώρο, χρειαζόμαστε μόλις τρεις σταθμούς βάσης. Επίσης, ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν AOA μετρήσεις δεν απαιτούν συγχρονισμό ανάμεσα στους σταθμούς βάσης, και ανάμεσα στον πομπό και τους σταθμούς βάσης.

Όμως, ένα μειονέκτημα [1] των AOA μεθόδων είναι ότι απαιτούν εξοπλισμό, ο οποίος είναι μεγάλος και πολύπλοκος. Επίσης, η μέτρηση μίας γωνίας κατεύθυνσης διάδοσης ενός σήματος μπορεί να περιλαμβάνει σφάλμα, [1], [4] το οποίο είναι πιθανό να οφείλεται στις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον, όπως θόρυβος, παρεμβολές, σκίαση, πολλαπλές ανακλάσεις. Όμως, το σφάλμα μέτρησης της γωνίας μπορεί να είναι πολύ μεγάλο, αν δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη του σήματος. Στην περίπτωση έλλειψης οπτικής επαφής, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ο σταθμός βάσης να μετρήσει τη γωνία κατεύθυνσης ενός σήματος το οποίο προέρχεται από πολλαπλές ανακλάσεις, και έτσι η τιμή της γωνίας που μετράει να μην έχει σχέση με την πραγματική τιμή που θα έπρεπε να μετρήσουμε. Εκτός από τα σφάλματα που προέρχονται από τις επιδράσεις του εσωτερικού χώρου στη διάδοση του σήματος, πολλά σφάλματα μπορεί να προκύψουν και από τα όργανα μέτρησης των γωνιών. Για παράδειγμα, αν ο γωνιακός προσανατολισμός σε έναν πίνακα κεραιών δεν είναι σωστός, τότε αυτό μπορεί να προκαλέσει σφάλμα στις μετρήσεις [4].

1.4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ (SCENE ANALYSIS)

Οι αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο, οι οποίοι στηρίζονται σε ανάλυση τοποθεσίας

(scene analysis), λειτουργούν σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη συλλογή όσο το δυνατό περισσότερων πληροφοριών για τα χαρακτηριστικά του χώρου στον οποίο βρίσκεται το αντικείμενο άγνωστης θέσης. Δηλαδή, κατά το πρώτο στάδιο ενός αλγόριθμου που βασίζεται σε scene analysis, το οποίο λέγεται offline stage, πραγματοποιούνται μετρήσεις ενός χαρακτηριστικού του σήματος σε πολλά σημεία του περιβάλλοντος μελέτης μας. Οι τιμές από τις μετρήσεις που πραγματοποιούμε στο χώρο μας βοηθούν να συγκεντρώσουμε σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το πώς συμπεριφέρεται το σήμα σε διάφορα σημεία του εσωτερικού χώρου. Οι πληροφορίες που συλλέγουμε μελετώντας τη συμπεριφορά του σήματος σε διάφορα σημεία του περιβάλλοντος, αποτελούν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” (fingerprints) του εσωτερικού χώρου. Κατά το δεύτερο στάδιο, το οποίο λέγεται online stage, πραγματοποιούνται μετρήσεις, και οι μετρήσεις συγκρίνονται με τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” που συλλέχθηκαν κατά το offline στάδιο, με σκοπό να εκτιμηθεί η θέση ενός αντικειμένου. Τις περισσότερες φορές, το χαρακτηριστικό των σημάτων το οποίο μετράται σε μία scene analysis, είναι η τιμή RSS των σημάτων [1].

Πιο συγκεκριμένα, σε ένα σύστημα που βασίζεται σε scene analysis, θεωρούμε ότι υπάρχουν σταθμοί βάσης, οι οποίοι είναι σημεία πρόσβασης (access points: APs) τα οποία βρίσκονται σε διάφορες θέσεις στο χώρο. Επίσης, υπάρχουν υποψήφιας θέσεις στον χώρο, οι οποίες έχουν καθορισμένες γνωστές συντεταγμένες. Το offline stage λειτουργεί ως εξής. Οι σταθμοί βάσης εκπέμπουν σήματα, και σε κάθε υποψήφια θέση, η οποία όπως έχουμε πει έχει γνωστές συντεταγμένες, μετρώνται οι τιμές RSS των σημάτων που εκπέμπονται από τους σταθμούς βάσης. Οι RSS μετρήσεις οι οποίες συλλέγονται σε όλες τις υποψήφιας θέσεις, μας οδηγούν στη δημιουργία των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” του χώρου μελέτης μας. Επομένως, κατά το offline stage, στοχεύουμε να κατασκευάσουμε έναν ραδιοχάρτη (radio map), ο οποίος προκύπτει από όλες τις RSS μετρήσεις που αντιστοιχούν σε κάθε υποψήφια θέση του εσωτερικού χώρου. Η κατασκευή του radio map διαφέρει ανάλογα με τον αλγόριθμο εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιούμε. Δηλαδή, ο radio map σε ορισμένες περιπτώσεις, θα μπορούσε να περιλαμβάνει για κάθε υποψήφια θέση μόνο τη μέση τιμή των RSS μετρήσεων από κάθε σταθμό βάσης. Σε άλλες όμως περιπτώσεις, ο radio map θα μπορούσε να περιέχει στατιστικές πληροφορίες, σχετικά με την πιθανότητα μέτρησης διάφορων RSS τιμών σε κάθε υποψήφια θέση. Επομένως, η κατασκευή ενός radio map είναι μία διαδικασία η οποία αξιοποιεί τις RSS μετρήσεις ανάλογα με τη μέθοδο εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιούμε.

Μετά από τη συλλογή των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” του χώρου μελέτης μας, ακολουθεί το online stage. Κατά τη διάρκεια του σταδίου αυτού, το αντικείμενο άγνωστης θέσης έχει τη δυνατότητα να

μετράει τις τιμές RSS των σημάτων που εκπέμπουν οι διάφοροι σταθμοί βάσης. Στη συνέχεια, οι RSS τιμές που συλλέγονται από το αντικείμενο άγνωστης θέσης, παρεμβάλλονται με τις τιμές του radio map που κατασκευάστηκε κατά το offline stage, και υπολογίζεται το τελικό αποτέλεσμα. Δηλαδή, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιούμε, επεξεργάζεται τις πληροφορίες που μας δίνει ο radio map για κάθε μία υποψήφια θέση, λαμβάνοντας υπόψη τις online μετρήσεις, και συμπεραίνει ποιες υποψήφιες θέσεις βρίσκονται πλησιέστερα στο αντικείμενο άγνωστης θέσης. Έτσι, ανάλογα με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιούμε, και το είδος του radio map που αυτός απαιτεί, τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” που συλλέξαμε και οι online RSS μετρήσεις χρησιμοποιούνται με κατάλληλο τρόπο, ώστε να προκύψει μία εκτίμηση της θέσης του αντικειμένου που θέλουμε να εντοπίσουμε.

Η κατασκευή ενός radio map, κατά το offline stage, μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά με τον εξής τρόπο [12]. Έστω ότι υπάρχουν στο χώρο N υποψήφιες θέσεις (l_i) , με γνωστές συντεταγμένες (x_i, y_i) , $i=1, \dots, N$. Επίσης, υπάρχουν σταθμοί βάσης, οι οποίοι εκπέμπουν σήματα. Η κάθε μία υποψήφια θέση μετράει τις τιμές RSS των σημάτων που λαμβάνει από k σταθμούς βάσης, για κάποιο χρονικό διάστημα. Είναι πολύ πιθανό οι υποψήφιες θέσεις να μη χρειάζεται να μετράνε σήματα από όλους τους σταθμούς βάσης, για διάφορους λόγους, όπως για λόγους μείωσης της πολυπλοκότητας του συστήματος. Έτσι, μία υποψήφια θέση l_i , κάθε φορά που παίρνει μία μέτρηση RSS_{ap} από κάθε έναν από τους k σταθμούς βάσης που λαμβάνει υπόψη της, δίνει το εξής διάνυσμα μετρήσεων:

$$r = (RSS_{ap1}, \dots, RSS_{apk}) .$$

Αν σε ένα χρονικό διάστημα, η υποψήφια θέση l_i πάρει πολλά διανύσματα μετρήσεων r , τότε οι μετρήσεις θα αναλυθούν και θα επεξεργαστούν με κατάλληλο τρόπο, όπως υπαγορεύει ο αλγόριθμος που χρησιμοποιούμε. Έτσι, από την επεξεργασία των μετρήσεων της υποψήφιας θέσης l_i , προκύπτουν νέα διανύσματα r , που περιλαμβάνουν τις τιμές που χρειαζόμαστε για να δημιουργήσουμε ένα “δαχτυλικό αποτύπωμα” στη θέση αυτή.

Έστω ότι θέλουμε να παράγουμε ένα “δαχτυλικό αποτύπωμα” για την υποψήφια θέση l_i . Αν για την παραγωγή του “δαχτυλικού αποτύπωματος” αυτού απαιτείται να έχουμε στη διάθεσή μας M κατάλληλες τιμές RSS για τον κάθε έναν από τους k σταθμούς βάσης, τότε η l_i θέση θα μας δώσει έναν $(M \times k)$ πίνακα RSS τιμών της μορφής:

$$R_i = [r_1, \dots, r_M] .$$

Ομοίως, για να πάρουμε ένα “δαχτυλικό αποτύπωμα” για κάθε μία υποψήφια θέση, παίρνουμε έναν

παρόμοιο με πριν (Mxk) πίνακα για κάθε μία υποψήφια θέση. Έτσι, ορίζουμε τον radio map με τον εξής τρόπο:

$$M = \left[\left[l_1, (R_1, a_1) \right], \left[l_2, (R_2, a_2) \right], \dots, \left[l_N, (R_N, a_N) \right] \right],$$

όπου $l_i, i=1, \dots, N$, η αντίστοιχη υποψήφια θέση.

Η σταθερές a_i παίρνουν τιμές οι οποίες εξαρτώνται από το είδος του radio map που κατασκευάζεται. Δηλαδή, αν θεωρήσουμε ότι οι RSS τιμές στον radio map είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν λογαριθμο-κανονική κατανομή, τότε ισχύει $M=1$, τα διανύσματα r περιλαμβάνουν τις μέσες τιμές της κατανομής, και οι τιμές a_i αντιπροσωπεύουν τις τυπικές αποκλίσεις της κατανομής. Επίσης, αν θεωρήσουμε ότι ο radio map πρέπει να περιέχει για κάθε υποψήφια θέση ένα ιστόγραμμα, το οποίο θα δείχνει τη συχνότητα εμφάνισης κάποιων RSS διανυσμάτων, τότε ισχύει $M \geq 1$, και οι τιμές a_i αντιστοιχούν στη συχνότητα εμφάνισης των αντίστοιχων RSS τιμών. Όμως, υπάρχουν και πολλές άλλες περιπτώσεις, όπως η περίπτωση όπου ισχύει $M=1$ και $a_i=0$, επειδή μας ενδιαφέρει μόνο ο μέσος όρος των RSS μετρήσεων που παίρνει κάθε υποψήφια θέση για κάθε σταθμό βάσης που λαμβάνει υπόψη της.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούν scene analysis επιδιώκουν να ελαττώσουν την αρνητική επίδραση που έχουν οι αντιξοότητες του περιβάλλοντος στο τελικό αποτέλεσμα. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούν τριγωνισμό (triangulation) επηρεάζονται πολύ από παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση του σήματος, όπως θόρυβος, παρεμβολές, πολλαπλές ανακλάσεις, διαθλάσεις, εξασθενήσεις, σκίαση, σκεδάσεις. Επίσης, η έλλειψη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη, πολλές φορές, είναι μία πολύ σημαντική αιτία σφάλματος στις triangulation τεχνικές. Και στην περίπτωση των τεχνικών τριγωνισμού που βασίζονται σε RSS μετρήσεις, η πιθανότητα σημαντικών σφαλμάτων είναι μεγάλη, λόγω της αδυναμίας να βρεθεί ένα μοντέλο που να αντιστοιχίζει την RSS μέτρηση με την αντίστοιχη απόσταση με καλή ακρίβεια, σε έναν εσωτερικό χώρο. Επομένως, μία μεγάλη πρόκληση των τεχνικών που χρησιμοποιούν scene analysis, είναι να αντιμετωπίσουν με επιτυχία το πρόβλημα που δημιουργείται από την επίδραση των συνθηκών διάδοσης στις μετρήσεις, και ιδιαιτέρως στις RSS μετρήσεις, επειδή αυτές χρησιμοποιούνται συχνότερα στη scene analysis.

Ένα πλεονέκτημα των τεχνικών scene analysis είναι ότι μελετούν το πρόβλημα εντοπισμού θέσης με μία διαφορετική οπτική γωνία από ότι οι triangulation τεχνικές. Δηλαδή, οι scene analysis τεχνικές δεν στηρίζονται σε μία ή λίγες μετρήσεις, η ακρίβεια των οποίων θα επηρέαζε σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα σε μεγάλο βαθμό. Αντιθέτως, στηρίζονται σε ένα μεγάλο σύνολο μετρήσεων, το οποίο

αναλύεται με κατάλληλο τρόπο για να μας δώσει μία εικόνα για το περιβάλλον μελέτης μας. Έτσι, η προσοχή των scene analysis τεχνικών επικεντρώνεται περισσότερο στο να καταφέρουν να πάρουν και να εκμεταλλευτούν τις μετρήσεις με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποτυπωθούν όσο το δυνατό καλύτερα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, και δεν επικεντρώνεται τόσο πολύ στο πόσο ακριβείς είναι οι μετρήσεις. Σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου, οι τιμές RSS που μετρώνται σε μία σταθερή θέση είναι πολύ πιθανό να διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους, λόγω της πολυπλοκότητας και της συνεχούς μεταβολή του περιβάλλοντος. Αν χρησιμοποιούσαμε μία triangulation τεχνική, τότε το σφάλμα θέσης θα ήταν μεγάλο, γιατί οι μεγάλες αποκλίσεις των RSS τιμών από το μοντέλο μεταξύ RSS και αντίστοιχης απόστασης που θα χρησιμοποιούσαμε, θα έκαναν το μοντέλο αυτό να μην είναι λειτουργικό. Όμως, οι scene analysis τεχνικές δεν επηρεάζονται τόσο πολύ από τις μεταβολές των RSS τιμών που μετρώνται. Αυτό, γιατί κατά το offline στάδιο, σε κάθε μία από τις υποψήφια θέσεις, συλλέγονται αρκετές μετρήσεις, οι οποίες προφανώς διαφέρουν μεταξύ τους, λόγω των συνθηκών εσωτερικού χώρου. Έτσι, το offline στάδιο μας βοηθά να γνωρίζουμε σε κάποιο βαθμό, με έμμεσο τρόπο, το πώς μεταβάλλονται οι RSS μετρήσεις σε διάφορα γνωστά σημεία του χώρου. Επομένως, οι ασταθείς RSS μετρήσεις δεν αποτελούν μεγάλο πρόβλημα, επειδή οι μεταβολές των μετρήσεων σε διάφορα σημεία του χώρου προσπαθούν να προβλεφθούν στο offline στάδιο, και άρα είμαστε προετοιμασμένοι για αυτές.

Επιπλέον, στις scene analysis τεχνικές δεν συγκρίνουμε μόνο μία online μέτρηση με μία ή λίγες τιμές του radio map. Αντιθέτως, έστω και με έμμεσο τρόπο, συγκρίνουμε πολλές offline τιμές με online τιμές. Έτσι, αν λόγω κάποιας μεταβολής του περιβάλλοντος άλλαζαν αρκετά κάποιες RSS τιμές στο online στάδιο, σε σύγκριση με τις τιμές που θα μετράγαμε στο offline στάδιο, τότε το τελικό αποτέλεσμα θα περιείχε μεγαλύτερο σφάλμα αν έπρεπε να συγκρίνουμε λίγες τιμές μεταξύ τους, από ότι αν έπρεπε να συγκρίνουμε πολλές τιμές μεταξύ τους, γιατί τότε οι μετρήσεις με μεγάλες αποκλίσεις θα ήταν αμελητέα ποσότητα στο σύνολο όλων των μετρήσεων που θα συγκρίνονταν.

Ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα των scene analysis τεχνικών είναι ότι δεν απαιτούν την ύπαρξη οπτικών επαφών, και επομένως είναι πολύ λειτουργικές σε περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων.

Όμως, σε πολλές περιπτώσεις, κάποιες τιμές που αποθηκεύονται σε έναν radio map μπορεί να μας οδηγήσουν σε λάθος συμπεράσματα για τη θέση ενός αντικειμένου. Για παράδειγμα, έστω ότι υπάρχουν δύο υποψήφια θέσεις A και B , και το αντικείμενο άγνωστης θέσης βρίσκεται πολύ κοντά στην υποψήφια θέση A , και μακριά από την υποψήφια θέση B . Σε αυτή την περίπτωση, θα ήταν λογικό οι online μετρήσεις του αντικειμένου να είναι πιο κοντά στις μετρήσεις της κοντινής υποψήφιας θέσης

A , παρά στις μετρήσεις της μακρινής θέσης B . Όμως, αν το τμήμα του εσωτερικού χώρου στο οποίο βρίσκεται το αντικείμενο υποφέρει από έντονες διαλείψεις, τότε είναι πιθανό οι online μετρήσεις του αντικειμένου να διαφέρουν αρκετά από τις offline τιμές της κοντινής στο αντικείμενο θέσης A . Και αν τύχει οι online μετρήσεις να είναι πολύ κοντά στις offline μετρήσεις της θέσης B , τότε η μέθοδος είναι πιθανό να θεωρήσει ότι το αντικείμενο βρίσκεται κοντά στη θέση B , αν και στην πραγματικότητα η θέση B δεν είναι κοντινή στο αντικείμενο. Άρα, η κατασκευή του radio map, καθώς και η επιλογή των υποψήφιων θέσεων, πρέπει να γίνονται προσεχτικά ώστε να μειώνεται όσο το δυνατό περισσότερο η πιθανότητα να πάρουμε παραπλανητικά αποτελέσματα σχετικά με τη θέση ενός αντικειμένου. Επίσης, σε μία άλλη περίπτωση, όπου οι offline RSS τιμές δύο υποψήφιων θέσεων τυχαίνει να είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, υπάρχει η πιθανότητα η μέθοδος εντοπισμού θέσης να μην μπορέσει να διακρίνει με επιτυχία ποια από τις δύο υποψήφιες θέσεις προσεγγίζει καλύτερα τη θέση του αντικειμένου. Επομένως, ένας σημαντικός στόχος σε μία μέθοδο scene analysis είναι να κατασκευαστεί ο radio map με όσο το δυνατό καλύτερο τρόπο. Δηλαδή, τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” πρέπει να παίρνονται στα σωστά σημεία του χώρου, και οι offline μετρήσεις πρέπει να συλλέγονται και να επεξεργάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι όσο το δυνατό πιο ακριβές.

Τέλος, στις scene analysis μεθόδους, αντιστοιχίζουμε τη θέση του αντικειμένου άγνωστης θέσης με την πιο κατάλληλη υποψήφια θέση. Όμως, η αντιστοίχιση αυτή δεν μας δίνει μία ακριβή θέση για το αντικείμενο, αλλά μας δείχνει την περιοχή του χώρου στην οποία βρίσκεται το αντικείμενο. Δηλαδή, το περιβάλλον μελέτης μας χωρίζεται σε μικρότερες υποπεριοχές. Κάθε υποπεριοχή αντιπροσωπεύεται από μία ή περισσότερες υποψήφιες θέσεις. Έτσι, όταν θεωρούμε μία υποψήφια θέση ως τη θέση του αντικειμένου, στη πραγματικότητα θεωρούμε ότι το αντικείμενο βρίσκεται στην υποπεριοχή του χώρου μελέτης μας, η οποία αντιπροσωπεύεται από την υποψήφια θέση αυτή. Όμως, άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούν scene analysis δίνουν ως αποτέλεσμα τις συντεταγμένες στις οποίες βρίσκεται το αντικείμενο άγνωστης θέσης.

Τα σημεία στα οποία διαφέρουν οι διάφορες τεχνικές που βασίζονται στην scene analysis είναι η μέθοδος κατασκευής του radio map, και ο τρόπος με τον οποίον εκμεταλλεύονται τις online μετρήσεις και τον radio map, για τον εντοπισμό μιας θέσης. Κάποιοι γνωστοί αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης οι οποίοι βασίζονται στη χρήση “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, είναι οι εξής: πιθανοτικές μέθοδοι (probabilistic methods), k πλησιέστεροι γείτονες (k -nearest-neighbor: k NN), νευρικά δίκτυα (neural networks), μηχανή υποστήριξης διανυσμάτων (support vector machine: SVM), και ελάχιστο M -γωνο (smallest M -vertex polygon: SMP). Οι αλγόριθμοι αυτοί περιγράφονται στη συνέχεια.

1.4.2.1 ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ (PROBABILISTIC METHODS)

Οι πιθανοτικές μέθοδοι (probabilistic methods) συλλέγουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” τα οποία εκφράζουν την πιθανότητα εμφάνισης διάφορων τιμών σε κάθε μία υποψήφια θέση. Δηλαδή, έστω ότι στο χώρο υπάρχουν οι υποψήφιες θέσεις l_1, l_2, \dots, l_n , και s είναι ένα διάνυσμα RSS μετρήσεων. Το διάνυσμα RSS μετρήσεων του online σταδίου είναι της μορφής $s = (RSS_1, RSS_2, \dots, RSS_k)$, και αποτελείται από μία RSS μέτρηση για κάθε έναν από τους k σταθμούς βάσης εκπομπής σήματος που λαμβάνουμε υπόψη μας. Τότε, οι offline πληροφορίες που μας δίνουν οι πιθανοτικές μέθοδοι για το χώρο μελέτης μας είναι οι πιθανότητες $P(s|l_i)$, που εκφράζουν την πιθανότητα λήψης του διανύσματος μετρήσεων s στην i -στή υποψήφια θέση. Επιπλέον, σε άλλες περιπτώσεις [12], ο radio map θα μπορούσε να περιέχει ως πληροφορίες τις πιθανότητες $P(l_i|s)$, που εκφράζουν την πιθανότητα ένα αντικείμενο να βρίσκεται στην i -στή υποψήφια θέση, δεδομένου ότι το διάνυσμα μετρήσεων είναι το s . Επομένως, σε κάθε περίπτωση, οι πιθανοτικές μέθοδοι εξετάζουν το πρόβλημα εντοπισμού θέσης, δίνοντας μία στατιστική εικόνα των χαρακτηριστικών διάδοσης στο χώρο μελέτης μας.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι υπολογισμού των απαραίτητων πιθανοτήτων σε μία probabilistic method. Μία γνωστή μέθοδος είναι να δημιουργήσουμε ένα ιστόγραμμα μετρήσεων σε κάθε μία υποψήφια θέση l_i , και για κάθε έναν σταθμό βάσης b_j , από τον οποίον λαμβάνει σήματα η υποψήφια θέση αυτή. Έτσι, αν στη θέση l_i συγκεντρώσουμε ένα ικανοποιητικό σύνολο RSS μετρήσεων από σήματα που προέρχονται από τον j -στό σταθμό βάσης (b_j), τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τις υπό συνθήκη πιθανότητες $P(RSS_j|b_j, l_i)$, για διάφορες τιμές RSS_j . Η $P(RSS_j|b_j, l_i)$ εκφράζει την πιθανότητα ο j -στός σταθμός βάσης (b_j) να δίνει τη μέτρηση RSS_j στην υποψήφια θέση l_i . Αν η θέση l_i μετράει RSS τιμές σημάτων που εκπέμπονται από k σταθμούς βάσης, και από τις RSS μετρήσεις δημιουργήσουμε ένα ιστόγραμμα για κάθε έναν από τους k σταθμούς βάσης, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τις υπό συνθήκη πιθανότητες $P(RSS_j|b_j, l_i)$, για $j = 1, \dots, k$, και για διάφορες τιμές RSS_j . Έτσι, αν θεωρήσουμε ότι οι σταθμοί βάσης είναι ανεξάρτητοι, τότε μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τις πιθανότητες $P(RSS_j|b_j, l_i)$, και να υπολογίσουμε την υπό συνθήκη πιθανότητα [13],

$$P(o|l_i) = \prod_{j=1}^k P(RSS_j|b_j, l_i),$$

η οποία εκφράζει την πιθανότητα να ληφθεί το συγκεκριμένο διάνυσμα μετρήσεων $\mathbf{o} = (RSS_1, RSS_2, \dots, RSS_k)$ στη θέση l_i . Στη συνέχεια, οι πιθανότητες $P(\mathbf{o}|l_i)$ που υπολογίζονται για κάθε μία υποψήφια θέση l_i , και για διάφορα διανύσματα μετρήσεων \mathbf{o} , είναι δυνατό να καταγραφούν στον radio map.

Ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού των απαραίτητων πιθανοτήτων για μια probabilistic method, πέραν της κατασκευής ιστογραμμάτων, είναι να θεωρήσουμε ότι οι RSS τιμές των σημάτων της κάθε υποψήφιας θέσης είναι τυχαίες μεταβλητές, οι οποίες ακολουθούν μία γνωστή σε εμάς κατανομή πιθανότητας. Για παράδειγμα, αν θεωρούσαμε ότι οι RSS τιμές κάθε μίας υποψήφιας θέσης ακολουθούν κατανομή Gauss, τότε οι RSS μετρήσεις που συλλέγονται σε κάθε υποψήφια θέση, θα βοηθούσαν να υπολογίσουμε την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της κατανομής Gauss στην αντίστοιχη υποψήφια θέση. Επομένως, μελετώντας τη συμπεριφορά και τις τιμές γνωστών κατανομών, με υπολογισμένες μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις, μπορούμε να υπολογίσουμε τις απαραίτητες πιθανότητες $P(\mathbf{o}|l_i)$, οι οποίες εκφράζουν την πιθανότητα το διάνυσμα μετρήσεων, το οποίο είναι τυχαία μεταβλητή γνωστής κατανομής, να πάρει την τιμή \mathbf{o} , στην θέση l_i . Επίσης, αν υποθέσουμε ότι όλες οι υποψήφιες θέσεις, οι οποίες συλλέγουν RSS μετρήσεις, είναι ανεξάρτητες, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική πιθανότητα μίας υποψήφιας θέσης, πολλαπλασιάζοντας τις επιμέρους πιθανότητες όλων των υποψήφιων θέσεων.

Στη συνέχεια, μετά από το offline στάδιο, όπου συλλέγονται οι απαραίτητες στατιστικές πληροφορίες για τον χώρο μελέτης μας, με τον υπολογισμό των κατάλληλων πιθανοτήτων σε διάφορα σημεία του χώρου, ακολουθεί το online στάδιο. Κατά το online στάδιο, το αντικείμενο άγνωστης θέσης συλλέγει ένα διάνυσμα μετρήσεων $\mathbf{s} = (RSS_1, RSS_2, \dots, RSS_k)$, από k σταθμούς βάσης. Αν για κάθε μία υποψήφια θέση γνωρίζουμε την πιθανότητα $P(l_i|\mathbf{s})$, η οποία εκφράζει την πιθανότητα να βρισκόμαστε στη θέση αυτή, δεδομένου ότι το online διάνυσμα τιμών είναι το \mathbf{s} , τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το αντικείμενο άγνωστης θέσης βρίσκεται πλησιέστερα στην υποψήφια θέση l_i με τη μεγαλύτερη πιθανότητα $P(l_i|\mathbf{s})$. Επομένως, μπορούμε να εκτιμήσουμε τη θέση ενός αντικειμένου, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω κανόνα απόφασης:

“Διάλεξε την υποψήφια θέση l_i , αν $P(l_i|\mathbf{s}) > P(l_j|\mathbf{s})$, για $i, j=1, 2, 3, \dots, n$, $j \neq i$, και n ο αριθμός των υποψήφιων θέσεων στο χώρο”.

Όμως, ο παραπάνω κανόνας απόφασης βασίζεται στην “εκ των υστέρων” πιθανότητα” $P(l_i|s)$, η οποία δεν μπορεί να προκύψει άμεσα από τα ιστογράμματα που δημιουργούμε στην υποψήφια θέση l_i , κατά το offline στάδιο. Αν χρησιμοποιήσουμε τον τύπο του Bayes (Bayes' formula), τότε η πιθανότητα $P(l_i|s)$, μπορεί να γραφεί στην εξής μορφή [14] :

$$P(l_i|s) = P(s|l_i) \cdot P(l_i) / P(s) = P(s|l_i) \cdot P(l_i) / \sum_{i=1}^n P(s|l_i) \cdot P(l_i), \quad \text{όπου } P(l_i) \text{ η πιθανότητα ένα}$$

αντικείμενο να βρίσκεται στη θέση l_i . Επομένως, αν θεωρήσουμε ότι ισχύει $P(l_i) = P(l_j)$, για $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$, τότε ο παραπάνω κανόνας απόφασης μπορεί να πάρει την εξής μορφή:

“Διάλεξε την υποψήφια θέση l_i , αν $P(s|l_i) > P(s|l_j)$, για $i, j = 1, 2, 3, \dots, n, j \neq i$, και n ο αριθμός των υποψήφιων θέσεων στο χώρο”.

Ο κανόνας αυτός αποφασίζει ποια είναι η πλησιέστερη υποψήφια θέση στο αντικείμενο άγνωστης θέσης, βασιζόμενος στις “εκ των προτέρων” γνωστές πιθανότητες” $P(s|l_i)$, οι οποίες προκύπτουν άμεσα από τα ιστογράμματα που δημιουργούμε σε κάθε μία υποψήφια θέση l_i , κατά το offline στάδιο.

Όμως, οι παραπάνω κανόνες απόφασης, δεν μας δίνουν μία εκτίμηση για τις ακριβείς συντεταγμένες του αντικειμένου άγνωστης θέσης. Αντιθέτως, οι κανόνες απόφασης αυτοί μας πληροφορούν για την υποψήφια θέση του χώρου, στην οποία το αντικείμενο άγνωστης θέσης βρίσκεται πιο κοντά. Επομένως, θα ήταν χρήσιμο να λαμβάναμε υπόψη μας και κανόνες απόφασης, οι οποίοι δεν θα μας ενημέρωναν απλά σε ποια υποπεριοχή του χώρου βρίσκεται ένα αντικείμενο, αλλά θα μας έδιναν και πιο ακριβείς πληροφορίες. Μία καλή προσπάθεια προς αυτή την κατεύθυνση, είναι να εκτιμήσουμε τις ακριβείς συντεταγμένες ενός αντικειμένου άγνωστης θέσης, παίρνοντας με κατάλληλο τρόπο το μέσο όρο των συντεταγμένων όλων των υποψήφιων θέσεων. Δηλαδή, έστω ότι οι n υποψήφιες θέσεις l_i στο χώρο έχουν γνωστές συντεταγμένες (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, n$, και ότι το αντικείμενο άγνωστης θέσης πήρε το διάνυσμα μετρήσεων s κατά το online στάδιο. Τότε, μία εκτίμηση των συντεταγμένων (x, y) του αντικειμένου άγνωστης θέσης στον διδιάστατο (2-D) χώρο μπορεί να γίνει, αν υπολογίσουμε τον μέσο όρο των συντεταγμένων (x_i, y_i) όλων των υποψήφιων θέσεων, θεωρώντας ως βάρη τις

πιθανότητες $P(l_i|s)$ των υποψήφιων θέσεων. Δηλαδή, η εκτίμηση των συντεταγμένων (x,y) , γίνεται ως εξής:

$$(x,y) = \sum_{i=1}^n \left(P(l_i|s) \cdot (x_i, y_i) \right) . \quad (1.10)$$

Ο μέσος όρος αυτός δίνει μεγαλύτερη σημασία στις συντεταγμένες των υποψήφιων θέσεων στις οποίες είναι περισσότερο πιθανό να βρισκόμαστε, δεδομένου ότι το διάνυσμα online μετρήσεων είναι το s .

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των Πιθανοτικών Μεθόδων είναι ότι καταναλώνουν πολλή μνήμη στη βάση δεδομένων κατά το offline στάδιο, ενώ παράλληλα η χρονική διάρκεια του σταδίου αυτού είναι μεγάλη. Όμως, λόγω του ότι οι συγκρίσεις του online σταδίου χρησιμοποιούν ιστογράμματα, η αξιοπιστία των Πιθανοτικών Μεθόδων είναι ικανοποιητική. Επίσης, οι Πιθανοτικές Μέθοδοι εξασφαλίζουν καλή ευρωστία (robustness) και εξελιξιμότητα (scalability) [11]. Οι έννοιες ευρωστία και εξελιξιμότητα θα εξηγηθούν στην παράγραφο 1.5.

Παρακάτω, τίθενται ορισμένα θέματα [14], [15], όπως η διαμέτρηση (calibration), η ενεργή εκμάθηση (active learning), η εκτίμηση λάθους (error estimation), η ακολούθηση ιχνών με ιστορία (tracking with history), τα οποία σχετίζονται άμεσα με τη μελέτη των πιθανοτικών μεθόδων.

Σε μία πιθανοτική μέθοδο, ένα από τα πρώτα προβλήματα που πρέπει να λυθούν είναι με ποιο τρόπο θα επιλεγούν τα σημεία διαμέτρησης (calibration points), δηλαδή οι υποψήφιες θέσεις, και με ποιο τρόπο θα συλλεχθούν τα δεδομένα διαμέτρησης (calibration data), δηλαδή οι κατάλληλες offline RSS μετρήσεις. Υπάρχουν πολλοί τρόποι επιλογής υποψήφιων θέσεων και συλλογής calibration data, οι οποίοι έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ένας τρόπος είναι να χρησιμοποιηθεί ένα πιθανοτικό πλέγμα (probability grid), διαιρώντας το χώρο σε κυψέλες ορισμένου μεγέθους. Ένας άλλος τρόπος είναι ο μετρητής (calibrator) να περιφέρεται στο χώρο και να συλλέγει συνεχώς RSS μετρήσεις, καταγράφοντας τη χρονική στιγμή κάθε μέτρησης, αλλά και τις χρονικές στιγμές και τις συντεταγμένες των θέσεων του χώρου, όπου ο calibrator αλλάζει κατεύθυνση ή ταχύτητα. Ένας τρίτος τρόπος θα ήταν η ομαδοποίηση του χώρου μελέτης μας σε συστάδες (clusters), και η συλλογή ενός κατάλληλου αριθμού από διανύσματα μετρήσεων σε κάθε cluster, έτσι ώστε να έχουμε μία καλή εκτίμηση της συμπεριφοράς του σήματος στην περιοχή του cluster. Μετά το calibration στάδιο, έχουμε πλέον στη διάθεσή μας τις απαραίτητες πιθανότητες που απαιτούν οι probabilistic methods, για κάθε υποψήφια θέση και για διάφορα διανύσματα τιμών.

Όμως, ο αριθμός των υποψήφιων θέσεων (calibration points) που επιλέγουμε, καθώς και ο αριθμός των μετρήσεων (calibration data) σε κάθε μία υποψήφια θέση, διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή του χώρου μελέτης μας. Αυτό γιατί, η ομοιότητα στις μετρήσεις ανάμεσα σε δύο υποψήφιες θέσεις, οι πιθανές έντονες διαλείψεις σε κάποιες περιοχές του χώρου, και άλλοι πολλοί λόγοι, μπορούν να μας αναγκάσουν να συλλέξουμε περισσότερες πληροφορίες για ορισμένες περιοχές του χώρου από ότι για άλλες. Από την άλλη, σε περιοχές του χώρου μελέτης μας στις οποίες δεν υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στο τελικό αποτέλεσμα, μπορούμε να μειώσουμε τις υποψήφιες θέσεις, ακόμα και τα calibration data. Η επιλογή ενός μεγάλου αριθμού υποψηφίων θέσεων είναι κάτι που πρέπει να αποφεύγεται, επειδή μπορεί να είναι χρονοβόρο, ή σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να είναι και ανέφικτο. Όμως, η μείωση των calibration points δεν πρέπει να συνοδεύεται από μείωση στην ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να επιλέξουμε τις σωστές θέσεις στο χώρο για calibration points. Μία πρακτική μέθοδος επιλογής των κατάλληλων calibration points σε έναν χώρο, είναι να λάβουμε υπόψη μας το αναμενόμενο μελλοντικό σφάλμα $E[err|l_i]$ που θα έδινε το κάθε ένα υποψήφιο calibration point l_i . Έτσι, υπολογίζοντας το αναμενόμενο μελλοντικό σφάλμα σε μία θέση στο χώρο, μπορούμε να κρίνουμε αν η θέση αυτή είναι κατάλληλη για calibration point ή όχι.

Επίσης, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η αβεβαιότητα στην εκτίμηση της θέσης ενός αντικειμένου μπορεί να περιγραφεί από μία κατάλληλη κατανομή πιθανότητας. Η αβεβαιότητα, η οποία σχετίζεται με την αντίστοιχη της κατανομή πιθανότητας, είναι δυνατό να απεικονισθεί με γραφικό τρόπο. Η απεικόνιση της αβεβαιότητας μιας θέσης θα μπορούσε να γίνει με τη βοήθεια μιας έλλειψης, με κέντρο την εκτιμώμενη θέση, και με προσανατολισμό και μέγεθος που θα περιέγραφαν την αβεβαιότητα.

Τέλος, [13] θα αναφερθούμε στην προσπάθεια διαμέτρησης (calibration effort), η οποία εκφράζει το συνολικό κόστος που έχουν ως τίμημα οι calibration διαδικασίες. Η calibration effort επηρεάζεται από τον αριθμό των μετρήσεων που χρειάζονται για να σχηματίσουμε ένα δείγμα σε μία υποψήφια θέση, από τη χρονική διάρκεια δειγματοληψίας, και από τον αριθμό των υποψήφιων θέσεων που δειγματοληπτούν στο χώρο. Αν μειώσουμε κάποιους από αυτούς τους παράγοντες, τότε η calibration effort μειώνεται. Όμως, παράλληλα μειώνεται και η ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Επομένως, ο στόχος μας είναι να βρούμε τρόπους με τους οποίους να μειώνουμε την calibration effort, χωρίς όμως να μειώνουμε σημαντικά την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Μία μέθοδος η οποία θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια, εξαλείφοντας τα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω της μείωσης του αριθμού των calibration points, και άλλων παραγόντων που μειώνουν την calibration effort, είναι η

χρήση ενός αλγόριθμου που βασίζεται σε ένα μοντέλο που ονομάζεται Hidden Markov Model.

Το Hidden Markov Model [13], εκτός από τα calibration data, λαμβάνει υπόψη του και τα ίχνη του χρήστη (user traces), τα οποία είναι μία σειρά από RSS μετρήσεις οι οποίες καταγράφονται από την κίνηση του χρήστη στο περιβάλλον. Η διαφορά των user traces από τα calibration points είναι ότι, όταν ο χρήστης καταγράφει μία RSS μέτρηση, δεν καταγράφει και την ακριβή θέση του σημείου στο οποίο πραγματοποιήθηκε η μέτρηση αυτή. Από την άλλη, η καταγραφή της ακριβούς θέσης ενός calibration point κατά τη συλλογή των calibration data, είναι μία χρονοβόρα διαδικασία, ενώ η απλή συλλογή μετρήσεων είναι πιο απλή διαδικασία. Έτσι, η μέθοδος που χρησιμοποιεί το Hidden Markov Model λαμβάνει υπόψη της και τα user traces, με σκοπό να βελτιώσει την ανακρίβεια της τελικής εκτίμησης της θέσης. Η ανακρίβεια αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι, επιθυμώντας να μειώσουμε την calibration effort, περιορίσαμε τον αριθμό των calibration points, και έτσι ο radio map δίνει λιγότερες πληροφορίες από όσες θα χρειαζόμασταν για ένα ικανοποιητικά ακριβές αποτέλεσμα. Το σύστημα που βασίζεται στο Hidden Markov Model αρχικά δίνει περιορισμένη ακρίβεια, επειδή στην αρχή στηρίζεται κυρίως στα περιορισμένα calibration points. Όμως, η ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος συνεχώς βελτιώνεται, καθώς το σύστημα έχει την ικανότητα, ενώ αυξάνονται τα user traces τα οποία λαμβάνει υπόψη του, να αυξάνει σταδιακά και την ακρίβειά του. Σε ένα Hidden Markov Model, οι εσωτερικές καταστάσεις είναι κρυμμένες, ενώ μόνο οι έξοδοι των εσωτερικών καταστάσεων είναι φανερές. Και στην περίπτωση χρήσης ενός Hidden Markov Model σε μία μέθοδο εντοπισμού θέσης, όπου λαμβάνονται υπόψη και τα user traces, οι εσωτερικές κρυμμένες καταστάσεις θεωρούμε ότι είναι οι διάφορες θέσεις του χρήστη, ενώ οι φανερές έξοδοι θεωρούμε ότι είναι οι μετρήσεις σήματος.

Επίσης, μία δυνατή εφαρμογή της βασιζόμενης σε Hidden Markov Model μεθόδου, είναι η συνεχής εκτίμηση της τροχιάς (tracking) ενός αντικειμένου, το οποίο κινείται στο χώρο. Αυτό, γιατί η Hidden Markov Model μέθοδος λαμβάνει υπόψη της τη σειρά των θέσεων που καταλαμβάνει το αντικείμενο άγνωστης θέσης στο χώρο με την πάροδο του χρόνου. Επομένως, με το να μελετήσουμε την τροχιά ενός κινητού αντικειμένου στο χώρο χωρίς τη βοήθεια ενός Hidden Markov Model συστήματος, αλλά με απλή εκτίμηση κάθε θέσης, βασιζόμενοι μόνο στην κλασική μέθοδο εντοπισμού θέσης με radio map, η πληροφορία της χρονικής σειράς των μετρήσεων του αντικειμένου μένει ανεκμετάλλευτη, και έτσι δεν επωφελούμαστε από τα πλεονεκτήματα που θα μας έδινε μία Hidden Markov Model μέθοδος.

1.4.2.2 *k* ΠΛΗΣΙΕΣΤΕΡΟΙ ΓΕΙΤΟΝΕΣ (*k*-NEAREST-NEIGHBOR: *k*NN)

Ο αλγόριθμος *k* Πλησιέστερων Γειτόνων (*k*-nearest-neighbor: *k*NN) συγκρίνει τις μετρήσεις που συλλέχθηκαν κατά το online στάδιο με τις offline τιμές που είναι αποθηκευμένες στον radio map. Στη

συνέχεια, από το σύνολο όλων των υποψήφιων θέσεων, επιλέγει τις k υποψήφιες θέσεις με offline τιμές που βρίσκονται πιο κοντά στις online μετρήσεις, και λαμβάνει υπόψη του τις k υποψήφιες θέσεις που επέλεξε, με σκοπό να εκτιμήσει τη θέση του αντικείμενου άγνωστης θέσης.

Πιο αναλυτικά, κατά το offline στάδιο, για κάθε μία υποψήφια θέση l_i αποθηκεύεται στον radio map ένα διάνυσμα τιμών: $s_i = (RSS_{1i}, RSS_{2i}, \dots, RSS_{mi})$, το οποίο αποτελείται από RSS τιμές που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των σημάτων που εκπέμπονται από m σταθμούς βάσης στην υποψήφια θέση l_i . Επίσης, υποθέτουμε ότι κατά το online στάδιο, το αντικείμενο άγνωστης θέσης λαμβάνει ένα διάνυσμα RSS μετρήσεων $o = (o_1, o_2, \dots, o_m)$ από m σταθμούς βάσης. Τότε, ο kNN αλγόριθμος θα προσπαθήσει να υπολογίσει τις αποστάσεις ανάμεσα στο διάνυσμα online μετρήσεων o και στο διάνυσμα offline τιμών s_i κάθε μίας υποψήφιας θέσης l_i . Ένα χρήσιμο μέτρο της απόστασης μεταξύ δύο διανυσμάτων στον χώρο είναι η ευκλείδεια διανυσματική απόσταση. Επομένως, αν χρησιμοποιηθεί η ευκλείδεια απόσταση για να μετρήσουμε το πόσο κοντά βρίσκεται το διάνυσμα online μετρήσεων στο διάνυσμα offline τιμών κάθε μίας υποψήφιας θέσης, τότε μπορεί να πραγματοποιηθούν οι εξής υπολογισμοί [11] :

$$d_i = \sqrt{(o_1 - RSS_{1i})^2 + (o_2 - RSS_{2i})^2 + \dots + (o_m - RSS_{mi})^2}, \quad i = 1, \dots, n,$$

όπου n ο αριθμός των υποψήφιων θέσεων, και d_i η ευκλείδεια απόσταση του διανύσματος online τιμών o από το διάνυσμα offline τιμών s_i της υποψήφιας θέσης l_i .

Όταν ο kNN αλγόριθμος έχει πλέον στη διάθεσή του τις παραπάνω αποστάσεις ανάμεσα σε online και offline διανύσματα, καλείται να επιλέξει τις k υποψήφιες θέσεις με τις μικρότερες αποστάσεις d_i . Δηλαδή, καλείται να επιλέξει τις k υποψήφιες θέσεις με offline τιμές που βρίσκονται πιο κοντά στις online μετρήσεις. Επομένως, ο kNN αλγόριθμος, από τις n συνολικά υποψήφιες θέσεις του χώρου, διαλέγει τις k υποψήφιες θέσεις στις οποίες θεωρεί ότι το αντικείμενο άγνωστης θέσης βρίσκεται πιο κοντά.

Ο τελικός στόχος ενός kNN αλγόριθμου, όπως και κάθε αλγόριθμου εντοπισμού θέσης, είναι να δώσει μία εκτίμηση της θέσης ενός αντικειμένου. Αν χωρίζαμε το χώρο μελέτης μας σε υποπεριοχές, και κάθε υποπεριοχή αντιπροσωπευόταν από μία ή περισσότερες υποψήφιες θέσεις, τότε ο kNN αλγόριθμος θα εκτιμούσε ότι το αντικείμενο άγνωστης θέσης βρίσκεται στην υποπεριοχή του χώρου, στην οποία θα ανήκαν οι περισσότερες από τις k υποψήφιες θέσεις που έχουν επιλεγθεί.

Αν θέλουμε να εντοπίσουμε τις συντεταγμένες της θέσης ενός αντικειμένου, και όχι απλά σε ποια

υποπεριοχή βρίσκεται, τότε οι συντεταγμένες (x,y) του αντικείμενου άγνωστης θέσης υπολογίζονται παίρνοντας το μέσο όρο των συντεταγμένων (x_i,y_i) των k υποψήφιων θέσεων που επιλέξαμε, δηλαδή:

$$(x,y)=\left(\left(x_1,y_1\right)+\dots+\left(x_k,y_k\right)\right)/k .$$

Όμως, από τις k υποψήφιες θέσεις που επιλέγουμε, δεν έχουν όλες την ίδια απόσταση από το αντικείμενο άγνωστης θέσης. Επίσης, αν κάποιες από τις k υποψήφιες θέσεις απέχουν πολύ περισσότερο από το αντικείμενο άγνωστης θέσης από ότι οι άλλες, τότε ο υπολογισμός του μέσου όρου από τον παραπάνω τύπο μπορεί να μας οδηγήσει σε σημαντικό σφάλμα. Επομένως, σε περιπτώσεις όπου ο μέσος όρος μας δίνει σημαντικό σφάλμα, θα ήταν καλύτερο να τροποποιήσουμε τον υπολογισμό του. Δηλαδή, [1] ο μέσος όρος των συντεταγμένων των k υποψήφιων θέσεων, μπορεί να λαμβάνει υπόψη του ως βάρη τις αποστάσεις των διανυσμάτων offline τιμών των k υποψήφιων θέσεων από το διάνυσμα online μετρήσεων. Έτσι, με τον υπολογισμό ενός μέσου όρου συντεταγμένων με βάρη, το τελικό σφάλμα μειώνεται, γιατί δίνεται μεγαλύτερη σημασία στις συντεταγμένες των υποψήφιων θέσεων που έχουν μικρότερες αποστάσεις d_i από το αντικείμενο άγνωστης θέσης. Όμως, αν και βελτιώνεται η αξιοπιστία του συστήματος, όταν χρησιμοποιούνται βάρη αυξάνεται η πολυπλοκότητα του αλγόριθμου.

Η απόσταση που υπολογίζει ο kNN αλγόριθμος ανάμεσα στο διάνυσμα RSS τιμών μίας υποψήφιας θέσης (x_i,y_i) και στο διάνυσμα μετρήσεων της θέσης του αντικείμενου άγνωστης θέσης, είναι δυνατό να μεταβάλλεται, ακόμα και αν το αντικείμενο άγνωστης θέσης μένει ακίνητο. Αυτό, γιατί στο σημείο όπου βρίσκεται το αντικείμενο άγνωστης θέσης, είναι δυνατό το σήμα να μεταβάλλεται έντονα, και έτσι οι online RSS μετρήσεις στο σημείο αυτό να διαφέρουν σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις, αν και η θέση του αντικειμένου άγνωστης θέσης και μία υποψήφια θέση βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, είναι δυνατό τα RSS διανύσματά τους να διαφέρουν πολύ. Έτσι, αν και ο radio map προσπαθούμε να δίνει μία όσο το δυνατό καλύτερη απεικόνιση των χαρακτηριστικών διάδοσης του χώρου, και οι τιμές του radio map προσπαθούμε να ενσωματώνουν τη μεταβλητότητα των RSS τιμών στο χώρο, καμιά φορά η αβεβαιότητα των μετρήσεων είναι τόσο μεγάλη, ώστε δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι πως ο υπολογισμός μίας διανυσματικής απόστασης μας πληροφορεί σωστά για το πόσο κοντά σε μία υποψήφια θέση βρίσκεται η θέση του αντικείμενου, στην πραγματικότητα. Επομένως, αν στον αλγόριθμο kNN ίσχυε $k=1$, δηλαδή αν μας ενδιέφερε μόνο η μικρότερη διανυσματική απόσταση που υπολογίστηκε για την εκτίμηση της θέσης ενός αντικειμένου,

τότε είναι πιθανό η εκτίμηση της θέσης του αντικειμένου να είναι αναξιόπιστη. Όμως, αν ο kNN αλγόριθμος επέλεγε μία τιμή του k μεγαλύτερη του ένα, τότε το σφάλμα στο τελικό αποτέλεσμα θα μειωνόταν. Αυτό, γιατί όσο περισσότερες διανυσματικές αποστάσεις λαμβάνουμε υπόψη μας στο τελικό αποτέλεσμα, τόσο μικρότερο είναι το πιθανό ποσοστό των αναξιόπιστων διανυσματικών αποστάσεων. Επομένως, οι kNN αλγόριθμοι είναι καλό να επιλέγουν μεγάλες τιμές του k , για να αντιμετωπίζουν τα προβλήματα που δημιουργούν στη διάδοση του σήματος τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός εσωτερικού χώρου.

Σύμφωνα με την [22], οι βασικές περιπτώσεις που καθιστούν αναγκαία την επιλογή μεγαλύτερων αριθμών k είναι όταν υπάρχουν παραπάνω από μία υποψήφιες θέσεις με “δαχτυλικά αποτυπώματα” που απέχουν παρόμοιες διανυσματικές αποστάσεις από το δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων του online σταδίου, ή όταν υπάρχουν υποψήφιες θέσεις που απέχουν, όχι ιδιαίτερα μικρές, αλλά παρόμοιες φυσικές αποστάσεις από την πραγματική θέση, και παράλληλα βρίσκονται ανά ζεύγη σε αντίθετους προσανατολισμούς σε σχέση με την πραγματική θέση. Στις περιπτώσεις αυτές, ο μέσος όρος των k υποψήφιων θέσεων θα προσέγγιζε καλύτερα την πραγματική θέση.

Όμως, αν η τιμή του k είναι μεγάλη, τότε ο μέσος όρος των συντεταγμένων των k υποψήφιων θέσεων είναι πιθανό να επηρεάζεται και από υποψήφιες θέσεις οι οποίες δίνουν αρκετά μεγάλες διανυσματικές αποστάσεις. Ένας τρόπος ελάττωσης του σφάλματος αυτού είναι ο υπολογισμός ενός μέσου όρου με βάρη, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Έτσι, από όλα αυτά συμπεραίνουμε πως η επιλογή της τιμής του k δεν είναι καθόλου εύκολη υπόθεση, και επομένως υπάρχει ανάγκη να εκλεχθεί μία βέλτιστη τιμή του k , η οποία να δίνει το ελάχιστο δυνατό σφάλμα σε έναν kNN αλγόριθμο.

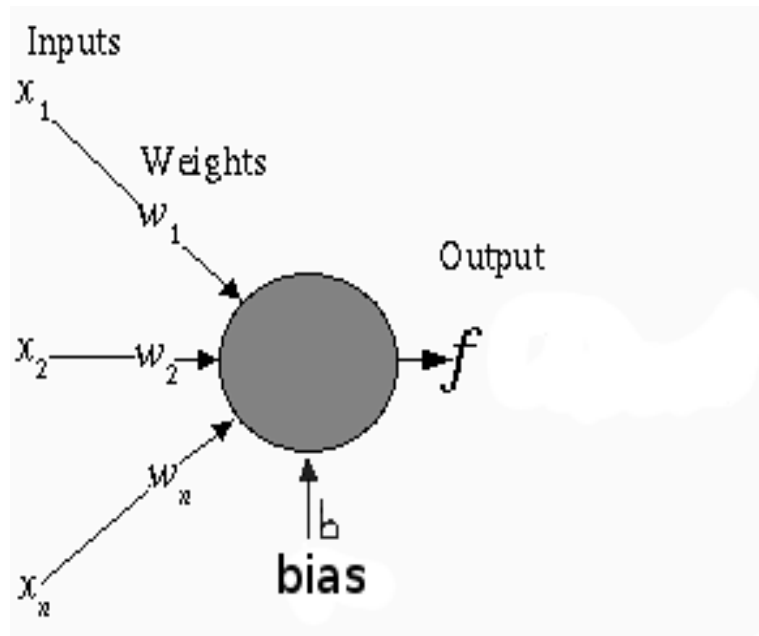
Έχει παρατηρηθεί [11], [23] ότι ο kNN αλγόριθμος παρουσιάζει πολύ ικανοποιητική ακρίβεια, και μάλιστα η ακρίβειά του είναι καλύτερη σε σχέση με άλλους αλγόριθμους, όπως η Πιθανοτική Μέθοδος ή τα Νευρικά δίκτυα. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του kNN αλγόριθμου είναι το πιθανώς μεγάλο χρονικό διάστημα που απαιτείται για να εκτιμήσει μία θέση [11], [23]. Όμως, το χρονικό αυτό διάστημα μπορεί να μειωθεί αισθητά αν μειωθεί και ο αριθμός των πληροφοριών που αποθηκεύονται κατά το offline στάδιο [11]. Επίσης, έχει αναφερθεί [11] ότι ο kNN αλγόριθμος εξασφαλίζει καλή ευρωστία (robustness) και εξελιξιμότητα (scalability).

1.4.2.3 ΝΕΥΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (NEURAL NETWORKS)

Τα Νευρικά Δίκτυα (Neural Networks) έχουν την ικανότητα να προσεγγίζουν μη γραμμικές συναρτήσεις πολλών μεταβλητών με ικανοποιητική ακρίβεια. Η ιδιότητα αυτή των Neural Networks θα μπορούσε να αξιοποιηθεί και στα προβλήματα εντοπισμού θέσης, αν χρησιμοποιήσουμε Neural

Networks για να προσεγγίσουμε τη μη γραμμική αντιστοίχιση μεταξύ RSS τιμών και πιθανών θέσεων ενός αντικείμενου άγνωστης θέσης στο χώρο.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες των Neural Networks [16]. Η βασική δομική μονάδα ενός Neural Network είναι το “τεχνητό νεύρο” (artificial neuron). Όπως φαίνεται και στο ΣΧΗΜΑ 1.5, ένα “τεχνητό νεύρο” παίρνει ως εισόδους (inputs) μία σειρά τιμών x_i . Κάθε είσοδος x_i πολλαπλασιάζεται με μία αντίστοιχη της τιμή βάρους w_i (weights), και στο άθροισμα όλων αυτών των γινομένων προστίθεται συνήθως μία τιμή b (bias). Το τελικό άθροισμα που προκύπτει εισάγεται ως άγνωστη μεταβλητή στη συνάρτηση μεταφοράς f του “τεχνητού νεύρου”. Η συνάρτηση f συνηθίζεται να είναι μία συνάρτηση γνωστής μορφής, η οποία εκλέγεται αυθαίρετα, δηλαδή δεν συσχετίζεται άμεσα με τη συνάρτηση F που προσεγγίζει το Neural Network, και δίνει ως αποτέλεσμα ένα περιορισμένο εύρος τιμών. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να είναι μία συνάρτηση που δίνει ως αποτέλεσμα δύο μόνο τιμές, ή θα μπορούσε να είναι μία log-sigmoid συνάρτηση. Το αποτέλεσμα της συνάρτησης $f\left(\sum x_i \cdot w_i + b\right)$ είναι και η έξοδος (output) του “τεχνητού νεύρου”. Όμως, σε ένα Neural Network, δεν συμμετέχει μόνο ένα, αλλά συμμετέχουν πολλά neurons, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο τρόπο. Επίσης, ένα Neural Network αποτελείται από μεταβλητές εισόδου, αλλά και από μεταβλητές εξόδου, οι οποίες παίρνουν επιθυμητές τιμές.



ΣΧΗΜΑ 1.5: ΤΟ ΤΕΧΝΗΤΟ ΝΕΥΡΟ, Η ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΕΝΟΣ ΝΕΥΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Έτσι, ένα Neural Network είναι δυνατό να αποτελείται από διάφορα επίπεδα (layers), όπου το κάθε επίπεδο αποτελείται από ένα σύνολο από “τεχνητά νεύρα”. Το πρώτο επίπεδο ονομάζεται επίπεδο εισόδου (input layer), ενώ το τελευταίο επίπεδο ονομάζεται επίπεδο εξόδου (output layer). Επομένως, μερικά θέματα που πρέπει να λύσει κάποιος που ασχολείται με την αρχιτεκτονική ενός Neural Network, είναι ο αριθμός των εισόδων και των εξόδων, ο αριθμός των layers και ο αριθμός των neurons σε κάθε layer, ο τρόπος με τον οποίον συνδέονται τα επίπεδα μεταξύ τους, και η επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων μεταφοράς f .

Έστω ότι υπάρχει ένα διάνυσμα μεταβλητών $A=(a_1, \dots, a_n)$ και ένα διάνυσμα μεταβλητών $B=(b_1, \dots, b_m)$, και ότι κάθε ένα διάνυσμα τιμών A αντιστοιχίζεται με ένα διάνυσμα τιμών B , με κατάλληλο τρόπο. Δηλαδή, υπάρχει μία συναρτησιακή σχέση ανάμεσα στα A και B , μέσω μίας συνάρτησης F . Όμως, η συνάρτηση F είναι περίπλοκη, μη γραμμική και είναι δύσκολο να υπολογιστεί. Επίσης, πολλές φορές, αν και γνωρίζουμε με ποια λογική οι τιμές A αντιστοιχίζονται με κατάλληλες τιμές B , πολλές φορές δεν είναι εύκολο να αποτυπώσουμε ή να χειριστούμε ένα μαθηματικό τύπο που να συσχετίζει τις τιμές A με τις τιμές B με τον επιθυμητό τρόπο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ένα χρήσιμο εργαλείο που μας βοηθά να προσεγγίσουμε μη γραμμικές, πολύπλοκες, αλλά και απλούστερες, συναρτήσεις, είναι τα Neural Networks. Ένα Neural Network συμπεριφέρεται σαν ένα σύστημα, η είσοδος του οποίου είναι το διάνυσμα μεταβλητών $A=(a_1, \dots, a_n)$, η έξοδος του είναι το διάνυσμα μεταβλητών $B=(b_1, \dots, b_m)$, και ο στόχος του είναι να προσεγγίζει τη συνάρτηση $F: A \rightarrow B$, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Η δομή του συστήματος αυτού είναι ένα σύνολο από “τεχνητά νεύρα”, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο τρόπο, και οι έξοδοι των “τεχνητών νεύρων”, πολλαπλασιασμένες με κατάλληλα βάρη (weights), αποτελούν εισόδους άλλων “τεχνητών νεύρων” που ανήκουν σε ανώτερα layers. Είσοδοι στα neurons αποτελούν και οι τιμές bias. Επίσης σε κάθε neuron εφαρμόζεται μία αυθαίρετη συνάρτηση f , όπως αναφέραμε παραπάνω.

Επομένως, μία βασική προϋπόθεση για να δώσουμε σε ένα Neural Network τη συμπεριφορά μίας συνάρτησης F , είναι να υπολογίσουμε τις κατάλληλες τιμές για τα βάρη (weights) και τις κατάλληλες τιμές bias, έτσι ώστε η αντιστοίχιση $F: A \rightarrow B$ να γίνεται με όσο το δυνατό πιο σωστό τρόπο. Άλλωστε, εκτός από την τοπολογία του δικτύου, οι τιμές των weights και bias είναι αυτές που κάνουν ένα Neural Network να ξεχωρίζει από ένα άλλο ως προς τη συνάρτηση που προσεγγίζει. Ο προσδιορισμός των κατάλληλων τιμών των weights και bias γίνεται με μία διαδικασία εκμάθησης του δικτύου (learning rules). Κατά τη διαδικασία εκμάθησης χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος εξάσκησης

(training algorithm), κατά τη διάρκεια του οποίου οι τιμές των weights και bias τροποποιούνται συνεχώς, μέχρι το Neural Network να μας δώσει τη συμπεριφορά που επιθυμούμε σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό. Υπάρχουν διάφορες διαδικασίες εκμάθησης, όπως η επιβλεπόμενη εκμάθηση (supervised learning), η εκμάθηση ενίσχυσης (reinforcement learning), η μη επιβλεπόμενη εκμάθηση (unsupervised learning). Σύμφωνα με τη supervised learning, για την εξάσκηση (training) του Neural Network, χρησιμοποιούνται εκ των προτέρων γνωστά ζεύγη (A , B) τιμών εισόδου και εξόδου της συνάρτησης που θέλουμε να προσεγγίσουμε. Έτσι, σε ένα offline στάδιο, κατά το οποίο πραγματοποιείται ο training algorithm, οι εισοδοί του Neural Network είναι διάνυσματα τιμών A , για τα οποία γνωρίζουμε τις αντίστοιχες τιμές B που δίνει η συνάρτηση F . Επομένως, κατά τον training algorithm, οι τιμές των weights και των bias αλλάζουν συνεχώς, μέχρι τη στιγμή που οι έξοδοι του Neural Network προσεγγίζουν αρκετά καλά τις επιθυμητές τιμές B . Η μέθοδος εκμάθησης που χρησιμοποιείται συγκρίνει συνεχώς τις πραγματικές με τις αναμενόμενες τιμές εξόδου, και χρησιμοποιεί τα σφάλματα μεταξύ πραγματικών και αναμενόμενων τιμών για να υπολογίζει και να τροποποιεί τις τιμές των weights και bias. Έτσι, γνωρίζοντας τις κατάλληλες τιμές των weights και bias, το Neural Network είναι πλέον σε θέση να προσεγγίσει τη συνάρτηση F που επιθυμούμε.

Στην περίπτωση ενός προβλήματος εντοπισμού θέσης, η συνάρτηση F την οποία καλείται να προσεγγίσει ένα Neural Network είναι μία συνάρτηση αντιστοίχισης των RSS τιμών με κατάλληλες θέσεις στο χώρο. Πιο συγκεκριμένα, κάθε διάνυσμα RSS τιμών του online σταδίου πρέπει να αντιστοιχίζεται με μία θέση στο χώρο, η οποία είναι η εκτιμώμενη θέση του αντικείμενου άγνωστης θέσης, και η οποία θα πρέπει να προσεγγίζει την πραγματική θέση του αντικείμενου με καλή ακρίβεια. Οι μόνες αντιστοιχίσεις RSS τιμών και θέσης για τις οποίες είμαστε βέβαιοι, είναι οι RSS τιμές που αποθηκεύονται στον radio map για κάθε μία υποψήφια θέση του χώρου, η οποία έχει γνωστές συντεταγμένες. Η συμπεριφορά του Neural Network θα είναι σωστή, αν για κάθε online διάνυσμα RSS μετρήσεων που παίρνει ως είσοδο, η έξοδος που δίνει είναι μία θέση, η οποία βρίσκεται πιο κοντά στην υποψήφια θέση με τις κοντινότερες στο διάνυσμα εισόδου offline τιμές. Ενώ, στην περίπτωση προβλήματος εντοπισμού θέσης, η είσοδος του Neural Network είναι ένα διάνυσμα RSS τιμών του online σταδίου, η έξοδος του συνηθίζεται να είναι ένα διάνυσμα δύο ή τριών μεταβλητών, που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες μίας θέσης στον διδιάστατο (2-D) ή στον τρισδιάστατο (3-D) χώρο αντίστοιχα. Επίσης, κατά το offline στάδιο του προβλήματος εντοπισμού θέσης, πραγματοποιείται η διαδικασία εκμάθησης του Neural Network. Κατά τον training algorithm, λαμβάνονται υπόψη τα γνωστά RSS διάνυσματα του radio map και οι αντίστοιχες υποψήφιες θέσεις στις οποίες αναφέρονται,

και υπολογίζονται σταδιακά οι κατάλληλες τιμές των weights και bias. Έτσι, με τον υπολογισμό των τιμών αυτών, το Neural Network είναι πλέον σε θέση να προσεγγίζει τη θέση ενός αντικειμένου, βασιζόμενο στις RSS τιμές που παίρνει ως εισόδους.

Συνήθως, στα προβλήματα εντοπισμού θέσης που βασίζονται σε Neural Networks, χρησιμοποιείται ένα δίκτυο που ονομάζεται δίκτυο Πολυεπίπεδου Εκτιμητή (Multilayer Perceptron (MLP) network) [11]. Τα MLP δίκτυα είναι από τα πιο γνωστά Νευρικά Δίκτυα που χρησιμοποιούν supervised learning για τον υπολογισμό των τιμών των weights και bias. Ένα MLP δίκτυο αποτελείται από ένα επίπεδο εισόδου (input layer), από ένα επίπεδο εξόδου (output layer), και από ένα ή περισσότερα κρυμμένα επίπεδα (hidden layers). Στο ΣΧΗΜΑ 1.6 παρουσιάζεται ένα MLP δίκτυο με δύο κρυμμένα επίπεδα. Τα σήματα εισόδου διαδίδονται μέσω του δικτύου, επεξεργάζονται κατάλληλα, και φτάνουν στην έξοδο του δικτύου. Κάθε ενδιάμεσο “τεχνητό νεύρο” παίρνει ως εισόδους τις εξόδους “τεχνητών νεύρων” του προηγούμενου layer, πολλαπλασιασμένες η κάθε μία με την αντίστοιχη τιμή βάρους (weight) της, και τις προσθέτει. Στη συνέχεια, στο άθροισμα αυτό προσθέτει συνήθως μία τιμή bias, και στο τελικό άθροισμα εφαρμόζει μία συνάρτηση f . Οι τιμές weights και bias έχουν υπολογιστεί ήδη κατά το training στάδιο. Επομένως, η είσοδος $a_i(l)$ και η έξοδος $o_i(l)$ του i -στού “τεχνητού νεύρου” στο l -στό layer, μπορούν να περιγραφούν από τους αντίστοιχους τύπους:

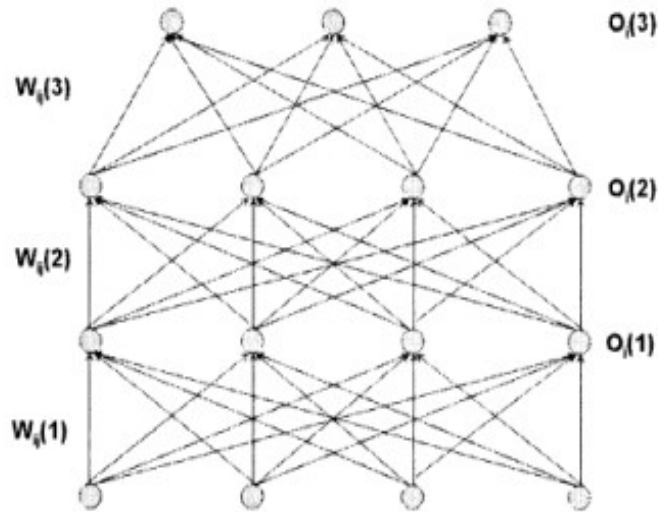
$$a_i(l) = \sum_{j=1}^{N_{l-1}} o_j(l-1) \cdot w_{ij}(l) + b_i(l)$$

$$o_i(l) = f(a_i(l)) \quad (1.11)$$

Το $(l-1)$ -στό layer αποτελείται από N_{l-1} neurons, και η έξοδος του j -στού neuron στο $(l-1)$ layer συμβολίζεται με $o_j(l-1)$. Επίσης, η τιμή $w_{ij}(l)$ συμβολίζει την τιμή του βάρους (weight), που αναφέρεται στη σύνδεση της εξόδου του j -στού neuron στο $(l-1)$ -στό επίπεδο, με την είσοδο του i -στού neuron στο l -στό επίπεδο. Η τιμή $b_i(l)$ συμβολίζει την τιμή bias που λαμβάνουμε υπόψη μας στην είσοδο του i -στού neuron στο l -στό επίπεδο. Σε ένα MLP δίκτυο, η συνάρτηση f συνηθίζεται να είναι μία ομαλή μη γραμμική συνάρτηση, διαφορίσιμη σε κάθε σημείο της. Δύο γνωστοί τύποι συναρτήσεων f που χρησιμοποιούνται συχνά είναι η log-sigmoid function:

$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$, και η

hyperbolic tangent function: $f(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$.



ΣΧΗΜΑ 1.6: ΕΝΑ MLP ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΔΥΟ ΚΡΥΜΜΕΝΑ ΕΠΙΠΕΔΑ.

Αν και τα Neural Networks προσεγγίζουν με καλή ακρίβεια μη γραμμικές πολυμεταβλητές συναρτήσεις, χρησιμοποιώντας αυθαίρετες συναρτήσεις που δίνουν περιορισμένο εύρος τιμών, [17] σε ορισμένες εφαρμογές τα Neural Networks μπορεί να δίνουν σφάλματα πάνω από το επιτρεπτό όριο. Επίσης, η ανάγκη για ορθότερα αποτελέσματα, μπορεί να επιβάλλει αλλαγή στον αριθμό των “τεχνητών νεύρων” και των layers, καθώς επίσης και την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων κατά το training στάδιο, αυξάνοντας τη χρονική διάρκεια του training σταδίου, η οποία είναι ήδη σχετικά μεγάλη.

Ένα επιπλέον πρόβλημα που παρατηρείται στα Νευρικά Δίκτυα ονομάζεται overfitting [24]. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται όταν το νευρικό δίκτυο, στην προσπάθειά του να δώσει εξόδους όσο το δυνατό πιο κοντά στις αναμενόμενες τιμές κατά το training στάδιο, αρχίζει ξαφνικά να χάνει την αξιοπιστία του ως προς την ορθότητα των εξόδων του για μη προκαθορισμένες τιμές εισόδου. Έτσι, ο σχεδιαστής του συστήματος πρέπει να είναι πολύ προσεχτικός σχετικά με τον αριθμό των πληροφοριών και τον χρόνο λειτουργίας του training σταδίου, ώστε να αποφύγει το overfitting.

Επίσης, έχει καταγραφεί [11], [23] ότι τα Νευρικά Δίκτυα παρουσιάζουν ακρίβεια χαμηλότερη από ότι άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούν scene analysis. Όμως, ένα σημαντικό πλεονέκτημα των Νευρικών Δικτύων είναι ότι εμφανίζουν τους μικρότερους χρόνους υπολογισμού για την εκτίμηση μιας θέσης [11], [23]. Επίσης, θετικό των Νευρικών Δικτύων είναι ότι επιχειρούν να δώσουν σαν έξοδο τις συντεταγμένες μιας θέσης, και όχι την πλησιέστερη υποψήφια θέση, ενώ παράλληλα, μετά από κατάλληλες μετρήσεις, μπορούν να δουλέψουν με ευρωστία (robustness) και εξελιξιμότητα (scalability) [11].

1.4.2.4 ΜΗΧΑΝΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ (SUPPORT VECTOR MACHINE: SVM)

Η Μηχανή Υποστήριξης Διανυσμάτων (Support Vector Machine: SVM) είναι μία τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για εφαρμογές ταξινόμησης (classification) και παλινδρόμησης (regression). Όπως και στα Neural Networks, έτσι και στις τεχνικές SVM, λαμβάνει χώρα ένα αρχικό στάδιο εξάσκησης (training), κατά τη διάρκεια του οποίου χρησιμοποιούνται οι γνωστές offline αντιστοιχίσεις μεταξύ υποψήφιων θέσεων και αντίστοιχων RSS τιμών. Το θεωρητικό υπόβαθρο της Μηχανής Υποστήριξης Διανυσμάτων περιλαμβάνει τη θεωρία στατιστικής εκμάθησης (statistical learning theory) [23].

Αρχικά, θα περιγράψουμε τη SVM στην περίπτωση που εφαρμόζεται σε ένα πρόβλημα ταξινόμησης (Classification) [18]. Στην περίπτωση αυτή, η τεχνική ονομάζεται Support Vector Classification (SVC). Έστω ότι βρισκόμαστε στον n -διάστατο χώρο, και κάθε ένα σημείο του n -διάστατου χώρου, είναι ένα διάνυσμα της μορφής $X=(x_1, \dots, x_n)$. Επίσης, έστω ότι τα διανύσματα X τα ταξινομούμε σε δύο κλάσεις, τις Y_1 και Y_2 . Δηλαδή, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι η πρώτη κλάση είναι η $Y_1 = +1$, ενώ η δεύτερη κλάση είναι η $Y_2 = -1$. Επιπλέον, έχουμε στη διάθεσή μας έναν σύνολο διανυσμάτων X_i , το κάθε διάνυσμα του οποίου ξέρουμε εκ των προτέρων σε ποια κλάση Y_i ανήκει. Όλες αυτές οι γνωστές αντιστοιχίσεις $X_i - Y_i$ αποτελούν ένα σύνολο από δείγματα εξάσκησης (training samples). Το πρώτο βήμα μίας SVC τεχνικής είναι το στάδιο εξάσκησης (training). Κατά τη διάρκεια του σταδίου αυτού, βασική επιδίωξη είναι να βρεθεί ένα υπερεπίπεδο (hyperplane) στον n -διάστατο χώρο, το οποίο να διαχωρίζει τα training samples με τέτοιο τρόπο, ώστε τα διανύσματα X_i που ανήκουν στην ίδια κλάση, να βρίσκονται στην ίδια μεριά του υπερεπίπεδου. Έτσι, ένα τυχαίο διάνυσμα X , το οποίο βρίσκεται στον n -διάστατο χώρο πιο κοντά στα δείγματα εξάσκησης της κλάσης Y_1 από ότι της κλάσης Y_2 , θα βρίσκεται στην πλευρά του υπερεπίπεδου που αντιπροσωπεύει την κλάση Y_1 . Επομένως, μετά από την εύρεση του κατάλληλου υπερεπίπεδου, μπορούμε πλέον να αποφασίζουμε σε

ποια κλάση ανήκει κάθε διάνυσμα X του n -διάστατου χώρου.

Όμως, δεν υπάρχει ένα μοναδικό υπερεπίπεδο. Αντιθέτως, υπάρχουν πολλά υποψήφια υπερεπίπεδα, τα οποία θα μπορούσαν να διαχωρίζουν τα δείγματα εξάσκησης στις σωστές κλάσεις. Ο στόχος μίας SVC τεχνικής είναι να επιλέξει το βέλτιστο υπερεπίπεδο από ένα σύνολο υποψήφιων υπερεπιπέδων. Ένα υπερεπίπεδο το οποίο διαχωρίζει δύο διαφορετικά σύνολα από σημεία είναι βέλτιστο, αν απέχει ίσες αποστάσεις από το κοντινότερο σε αυτό σημείο του κάθε συνόλου. Τότε, το βέλτιστο υπερεπίπεδο ονομάζεται υπερεπίπεδο μέγιστου περιθωρίου (maximum-margin hyperplane), και το περιθώριο ανάμεσα σε αυτό και τα δύο σύνολα σημείων που διαχωρίζει γίνεται μέγιστο.

Η μαθηματική αποτύπωση του hyperplane θα μπορούσε να είναι η εξής: $W \cdot X + b = 0$, όπου X ένα τυχαίο σημείο του n -διάστατου χώρου, και W , b είναι ένα άγνωστο διάνυσμα, και μία άγνωστη σταθερά, αντίστοιχα, που θα πρέπει να υπολογιστούν.

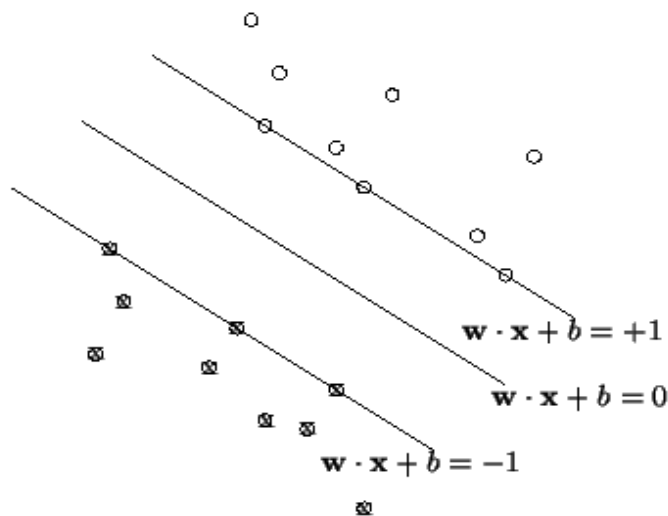
Το περιθώριο που χωρίζει τα δύο σύνολα σημείων των κλάσεων y_1 και y_2 αντίστοιχα, είναι ο χώρος ανάμεσα σε δύο hyperplanes, τα οποία έχουν εξισώσεις: (1): $W \cdot X + b = +1$ και (2): $W \cdot X + b = -1$.

Τα hyperplanes αυτά, καθώς και ένα υποψήφιο βέλτιστο hyperplane, που βρίσκεται ανάμεσά τους, στην περίπτωση ενός διδιάστατου χώρου, απεικονίζονται στο ΣΧΗΜΑ 1.7. Ο χώρος ανάμεσα σε αυτά τα δύο hyperplanes δεν επιτρέπεται να περιλαμβάνει training samples. Επομένως, για κάθε ένα training sample X_i θα ισχύει: $W \cdot X_i + b \geq +1$, αν το training sample X_i ανήκει στην κλάση $y_1 = +1$, και, $W \cdot X_i + b \leq -1$ αν το training sample X_i ανήκει στην κλάση $y_2 = -1$. Έτσι, οι ζητούμενες τιμές W και b υπολογίζονται αν, σεβόμενοι τις παραπάνω δύο ανισωτικές σχέσεις, εκτιμήσουμε τη μέγιστη δυνατή απόσταση ανάμεσα στα hyperplanes (1) και (2). Και, γνωρίζοντας πλέον κατάλληλες τιμές για τα W και b , έχουμε βρει το βέλτιστο hyperplane που επιθυμούμε.

Όμως, στην πραγματικότητα, η εύρεση του βέλτιστου hyperplane δεν είναι μία εύκολη διαδικασία. Επίσης, είναι πιθανό να υπάρχουν training samples τα οποία να μην επαληθεύουν τις παραπάνω ανισωτικές σχέσεις, εισάγοντας σφάλματα στο τελικό αποτέλεσμα. Έτσι, τις περισσότερες φορές, χρησιμοποιούνται τεχνικές ελαχιστοποίησης του σφάλματος στην επιλογή του βέλτιστου hyperplane, και επιδιώκεται η επιλογή ενός hyperplane που διαχωρίζει δύο κλάσεις, το οποίο να προσεγγίζει όσο το δυνατό περισσότερο το βέλτιστο.

Πολλές φορές, τα δύο σύνολα σημείων που εκπροσωπούν τις δύο κλάσεις δεν μπορούν να διαχωριστούν γραμμικά. Έτσι, δεν μπορεί να βρεθεί άμεσα ένα hyperplane που να τα διαχωρίζει. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται να αντιστοιχίσουμε τα σημεία του n -διάστατου χώρου με σημεία ενός

άλλου χώρου F , μέσω μίας μη γραμμικής συνάρτησης [18]. Οι μη γραμμικές συναρτήσεις ϕ οι οποίες είναι υπεύθυνες για την απεικόνιση: $\phi: R^n \rightarrow F$, δηλαδή για την απεικόνιση του χώρου R^n στον χώρο F , λέγονται συναρτήσεις Kernel. Δύο γνωστές Kernel συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται συχνά σε SVM τεχνικές είναι οι πολυωνυμικές kernel συναρτήσεις και οι Gaussian RBF kernel συναρτήσεις. Μετά την επιλογή της κατάλληλης Kernel συνάρτησης, και αφού γίνουν οι απαραίτητες απεικονίσεις στον χώρο F , τότε τα δύο νέα σύνολα σημείων του χώρου F , που εκπροσωπούν τις δύο κλάσεις, μπορούν πλέον να διαχωριστούν γραμμικά, με τη βοήθεια ενός hyperplane. Επομένως, η μελέτη συνεχίζεται όπως πριν, με τη μόνη διαφορά πως αντί των τιμών X χρησιμοποιούμε τις αντίστοιχες τιμές $\phi(X)$.



ΣΧΗΜΑ 1.7: ΤΑ ΔΥΟ ΟΡΙΑΚΑ ΥΠΕΡΕΠΙΠΕΔΑ ΠΟΥ ΧΩΡΙΖΟΥΝ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΣΕ ΔΥΟ ΚΛΑΣΕΙΣ, ΚΑΙ ΕΝΑ ΥΠΟΨΗΦΙΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΥΠΕΡΕΠΙΠΕΔΟ.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε SVC τεχνική σε ένα πρόβλημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, τα training samples που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ενός βέλτιστου hyperplane κατά το training στάδιο, είναι οι offline RSS τιμές του radio map και οι αντίστοιχες θέσεις του χώρου στις οποίες αναφέρονται. Όμως, σε προβλήματα εντοπισμού θέσης, δεν αρκεί ο διαχωρισμός του χώρου μελέτης μας σε δύο μόνο κλάσεις. Αντιθέτως, ο χώρος χωρίζεται σε πολλές κλάσεις, και ανάλογα με το διάνυσμα online RSS τιμών που μετράται κάθε φορά, η SVC τεχνική καλείται να αποφασίσει σε ποια κλάση, και άρα σε ποια περιοχή του χώρου, βρίσκεται ένα αντικείμενο άγνωστης θέσης. Επομένως, σε

προβλήματα εντοπισμού θέσης χρησιμοποιούνται SVC τεχνικές, που έχουν τη δυνατότητα να ταξινομήσουν διανύσματα τιμών σε πολλές κλάσεις, και όχι μόνο σε δύο κλάσεις.

Ένας τρόπος επέκτασης των κλάσεων στις οποίες ταξινομεί μία SVC τεχνική από δύο σε περισσότερες, είναι να χρησιμοποιήσουμε μία SVC τεχνική ταξινόμησης ως προς πολλά χαρακτηριστικά. Η ταξινόμηση ως προς ένα χαρακτηριστικό, σημαίνει ότι τα διανύσματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, δηλαδή σε αυτά που έχουν αυτό το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό, και σε αυτά που δεν το έχουν. Επομένως, η ταξινόμηση ως προς ένα χαρακτηριστικό θα μπορούσε να ταυτιστεί με τη μελέτη ταξινόμησης σε δύο κλάσεις, που αναλύσαμε παραπάνω. Ένας τρόπος με τον οποίον θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μία ταξινόμηση ως προς πολλά χαρακτηριστικά, [18] είναι να πραγματοποιηθούν, παράλληλα, SVC τεχνικές ως προς ένα διαφορετικό χαρακτηριστικό η κάθε μία, και να συνδυαστούν τα αποτελέσματα όλων των τεχνικών αυτών.

Τέλος, θα αναφερθούμε στην χρησιμοποίηση SVM τεχνικών σε εφαρμογές παλινδρόμησης (regression) [19]. Στην περίπτωση αυτή, η διαδικασία ονομάζεται Support Vector Regression (SVR). Έστω ότι σε ένα πρόβλημα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο, κατά το offline στάδιο, έχει συλλεχθεί ένας αριθμός από διανύσματα RSS τιμών. Κάθε διάνυσμα αντιστοιχεί σε μία υποψήφια θέση γνωστών συντεταγμένων (x_i, y_i) , αν πρόκειται για διδιάστατο χώρο (2-D), και περιλαμβάνει μία σειρά από RSS τιμές, κάθε μία από τις οποίες χαρακτηρίζει ένα σταθμό βάσης εκπομπής σήματος. Αν αποφασίσουμε να λύσουμε το πρόβλημα εντοπισμού θέσης ενός αντικειμένου με μία regression μέθοδο, τότε θα πρέπει να βρούμε μία συναρτησιακή σχέση που να συνδέει τα RSS διανύσματα με αντίστοιχες συντεταγμένες θέσεων στο χώρο. Οι παράμετροι της συνάρτησης αυτής υπολογίζονται μέσω μίας διαδικασίας ελαχιστοποίησης των διαφορών ανάμεσα στις αναμενόμενες τιμές των συντεταγμένων και στις τιμές των συντεταγμένων που δίνει ως τιμή η συνάρτηση, για τα διάφορα offline RSS διανύσματα, που είναι αποθηκευμένα στον radio map. Επομένως, η χρησιμοποίηση SVM τεχνικής, για τη μελέτη ενός προβλήματος εντοπισμού θέσης με μία regression μέθοδο, έχει αρκετές ομοιότητες με τη μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων, στην οποία είχαμε αναφερθεί πιο πριν.

Έστω ότι το κάθε ένα διάνυσμα RSS τιμών, είναι της μορφής: $s = (RSS_1, \dots, RSS_k)$, επειδή περιλαμβάνει τιμές που χαρακτηρίζουν k σταθμούς βάσης εκπομπής σήματος. Επίσης, τα διανύσματα RSS τιμών που αποθηκεύονται στον radio map, κατά το offline στάδιο, είναι τα: s_1, s_2, \dots, s_N , και αντιστοιχούν στις υποψήφιες θέσεις με συντεταγμένες $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$ αντίστοιχα. Αν επιθυμούμε οποιαδήποτε διανύσματα RSS τιμών, να αντιστοιχίζονται με τις αντίστοιχες συντεταγμένες

τους, μέσω μίας γραμμικής συνάρτησης, τότε θα πρέπει και τα offline διανύσματα τιμών να συσχετίζονται με τις αντίστοιχες γνωστές συντεταγμένες τους, με όσο το δυνατό πιο γραμμικό τρόπο. Όμως, είναι πολύ σπάνιο οι αποθηκευμένες RSS τιμές s_i του radio map να συνδέονται συναρτησιακά με τις αντίστοιχες τους συντεταγμένες υποψήφιων θέσεων, με γραμμικό τρόπο. Αυτό μπορεί να λυθεί, αν χρησιμοποιήσουμε μία μη γραμμική συνάρτηση Kernel, για να απεικονίσουμε τον χώρο R^N , στον οποίον ανήκουν τα διανύσματα RSS τιμών, σε ένα άλλον χώρο F. Με αυτή την απεικόνιση: $\varphi: R^N \rightarrow F$, τα νέα σημεία $\varphi(s_i)$ που προκύπτουν, συνδέονται συναρτησιακά με τις αντίστοιχες συντεταγμένες τους με σαφώς πιο γραμμικό τρόπο από ότι πριν την απεικόνιση.

Επομένως, σε ένα πρόβλημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, που αντιμετωπίζεται με τη βοήθεια μίας Support Vector Regression μεθόδου, επιδιώκουμε να βρούμε μία γραμμική συνάρτηση, που να μοντελοποιεί την σχέση μεταξύ κάθε σημείου $\varphi(s)$ με τις αντίστοιχες συντεταγμένες του. Έτσι, αν μας ενδιαφέρει η μία μόνο συντεταγμένη x της θέσης ενός αντικειμένου, η γραμμική συνάρτηση f περιγράφεται ως εξής:

$$x = f(\varphi(s)) = \varphi(s)^T \cdot W + b,$$

όπου το διάνυσμα W , και η σταθερά b, είναι άγνωστοι, οι οποίοι πρέπει να υπολογιστούν. Ο υπολογισμός των W και b αποτελεί το στάδιο εκμάθησης (learning) μιας SVR μεθόδου. Κατά το στάδιο αυτό, χρησιμοποιούνται τα offline διανύσματα τιμών, και οι αντίστοιχες γνωστές συντεταγμένες στις οποίες αναφέρονται. Η βασική ιδέα της SVR μεθόδου, κατά το learning στάδιο, είναι να ελαχιστοποιηθούν όσο το δυνατό περισσότερο οι διαφορές: $(x_i - f(\varphi(s_i)))$, για κάθε διάνυσμα τιμών s_i που είναι αποθηκευμένο στον radio map. Δηλαδή, επιδιώκεται το συνολικό σφάλμα ανάμεσα στις τιμές που δίνει η συνάρτηση f για κάθε offline διάνυσμα s_i , και στις αναμενόμενες γνωστές συντεταγμένες x_i , να ελαχιστοποιείται. Έτσι, υπολογίζοντας τα W και b, η μέθοδος SVR είναι πλέον σε θέση, για κάθε διάνυσμα online RSS τιμών, να εκτιμά μία τιμή της συντεταγμένης x της θέσης ενός αντικειμένου, μέσω της συνάρτησης f. Αν θέλουμε, εκτός από τη γραμμική συνάρτηση $f(\varphi(s))$ για τη συντεταγμένη x, να υπολογίσουμε τις αντίστοιχες γραμμικές συναρτήσεις και για τις υπόλοιπες συντεταγμένες θέσης ενός αντικειμένου, εργαζόμαστε με παρόμοιο τρόπο.

Η Μηχανή Υποστήριξης Διανυσμάτων είναι μία νεότερη μέθοδος, η οποία δίνει ως αποτέλεσμα ή τις συντεταγμένες μιας θέσης ή τον πλησιέστερο σταθμό βάσης, ανάλογα αν λειτουργεί για Support Vector Regression ή Support Vector Classification, αντίστοιχα. Σχετικά με την αξιοπιστία, αναφέρεται [23] ότι όταν η SVM λειτουργεί για ταξινόμηση, τότε αποδίδει ικανοποιητικά μικρό ποσοστό σφαλμάτων, και

μάλιστα μικρότερο από πολλές άλλες μεθόδους, ενώ όταν λειτουργεί για προβλήματα παλινδρόμησης, τότε τα αποτελέσματά της ως προς την ακρίβεια πλησιάζουν πολύ αυτά του kNN αλγόριθμου. Επίσης, η SVM χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλό χρόνο υπολογισμού για την εκτίμηση μιας θέσης [23], ενώ η επιλογή της σωστής συνάρτησης Kernel θα μπορούσε να είναι κρίσιμη για τον σχεδιαστή του συστήματος.

1.4.2.5 ΕΛΑΧΙΣΤΟ Μ-ΓΩΝΟ (SMALLEST M-VERTEX POLYGON: SMP)

Η διαφορά του SMP [1] [20] αλγόριθμου από τους άλλους αλγόριθμους της scene analysis είναι ότι εντοπίζει υποψήφιες θέσεις ως πιθανές θέσεις του αντικειμένου που θέλουμε να εντοπίσουμε, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές ως προς έναν μόνο σταθμό βάσης εκπομπής σήματος κάθε φορά. Δηλαδή, ο SMP αλγόριθμος συγκρίνει την online RSS μέτρηση του σήματος που εκπέμπεται από έναν σταθμό βάσης, με τις offline τιμές όλων των υποψήφιων θέσεων γνωστών συντεταγμένων, που αφορούν μόνο το σήμα που εκπέμπει ο σταθμός βάσης αυτός. Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τις τιμές αυτές, ο αλγόριθμος επιλέγει τουλάχιστον μία υποψήφια θέση ως πιθανή θέση του αντικειμένου που θέλουμε να εντοπίσουμε. Αν ο αλγόριθμος επαναλάβει την ίδια διαδικασία για όλους τους M σταθμούς βάσης εκπομπής σήματος, τότε για κάθε έναν σταθμό βάσης, έχει στη διάθεσή του μία ή περισσότερες υποψήφιες θέσεις. Έτσι, προκύπτει ένας αριθμός από πολύγωνα. Κάθε πολύγωνο αποτελείται από M κορυφές (M-vertex polygons), όπου σε κάθε κορυφή αντιστοιχεί μία πιθανή υποψήφια θέση ενός αντικειμένου, που αφορά έναν από τους M σταθμούς βάσης. Αν σε έναν σταθμό βάσης αντιστοιχούν πάνω από μία υποψήφιες θέσεις ως πιθανές θέσεις του αντικειμένου που θέλουμε να εντοπίσουμε, τότε οι πιθανές θέσεις αυτές θα αποτελέσουν κορυφές ξεχωριστών M-vertex polygons. Ο SMP αλγόριθμος εντοπίζει τη θέση ενός αντικειμένου, επιλέγοντας το μικρότερο M-vertex polygon, δηλαδή αυτό με τη μικρότερη περίμετρο, και υπολογίζοντας το μέσο όρο των συντεταγμένων των κορυφών του.

1.4.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΓΓΥΤΗΤΑΣ (PROXIMITY ALGORITHMS)

Οι αλγόριθμοι εγγύτητας (proximity algorithms) [1] δεν δίνουν ακριβείς πληροφορίες για τις συντεταγμένες στις οποίες βρίσκεται ένα αντικείμενο άγνωστης θέσης, αλλά δίνουν πληροφορίες για την περιοχή του χώρου στην οποία είναι πιθανό να βρίσκεται το αντικείμενο αυτό. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να μας πληροφορήσουν σε ποιο δωμάτιο ενός σπιτιού, ή κοντά σε ποιο σημείο αναφοράς, βρίσκεται το αντικείμενο άγνωστης θέσης.

Συνήθως, το σύστημα που εφαρμόζει έναν proximity αλγόριθμο, αποτελείται από ένα πυκνό πλέγμα από κεραίες, το οποίο καλύπτει τον χώρο μελέτης. Κάθε κεραία είναι τοποθετημένη σε μία θέση

γνωστών συντεταγμένων. Αν στο αντικείμενο άγνωστης θέσης τοποθετηθεί ένας πομπός σήματος, τότε το αντικείμενο βρίσκεται κοντά στην κεραία που ανιχνεύει το σήμα. Έτσι, γνωρίζουμε ότι το αντικείμενο βρίσκεται στο τμήμα του χώρου μελέτης, το οποίο αντιπροσωπεύεται από την κεραία αυτή. Αν το σήμα που εκπέμπει το αντικείμενο ανιχνευθεί από περισσότερες από μία κεραίες, τότε θεωρούμε ότι το αντικείμενο βρίσκεται κοντά στην κεραία που ανιχνεύει το ισχυρότερο σήμα.

Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι σχετικά εύκολο να εφαρμοστεί. Επίσης, η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαφορετικά συστήματα και διάφορα είδη φυσικού εξοπλισμού. Δύο γνωστά είδη συστημάτων εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, που συνηθίζουν να εφαρμόζουν proximity αλγόριθμους, είναι αυτά που χρησιμοποιούν υπέρυθη ακτινοβολία (infrared radiation: IR) και ασύρματη επικοινωνία αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency identification: RFID). Επίσης, μία άλλη κατηγορία συστημάτων που θα ήταν ιδανικά για την εφαρμογή proximity αλγορίθμων είναι τα κυψελωτά δίκτυα. Αυτό, γιατί ένα κυψελωτό δίκτυο μπορεί να μας ενημερώσει σε ποια κυψέλη βρίσκεται ένα αντικείμενο κάποια χρονική στιγμή, και όχι σε ποιες ακριβείς συντεταγμένες. Έτσι, η μέθοδος αναγνώρισης κυψέλης (cell identification: Cell-ID) ή μέθοδος κυψέλης προέλευσης (cell of origin: COO) είναι αρκετά χρήσιμη για τον εντοπισμό μίας θέσης με έναν proximity αλγόριθμο, γιατί βασίζεται στα κυψελωτά δίκτυα, τα οποία είναι ευρέως εφαρμοσμένα στις μέρες μας και μπορούν να υποστηριχθούν από όλα τα κινητά τηλέφωνα.

1.5 ΜΕΤΡΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (PERFORMANCE METRICS)

Τις περισσότερες φορές όπου μελετάται ένα σύστημα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο δίνεται περισσότερη προσοχή στο πόσο ακριβές είναι το τελικό αποτέλεσμα. Όμως, η ακρίβεια στον εντοπισμό μιας θέσης δεν είναι ο μοναδικός στόχος που πρέπει να έχει ένα σύστημα. Αντιθέτως, υπάρχουν και άλλα κριτήρια απόδοσης των συστημάτων εντοπισμού θέσης, και επομένως, για να έχουμε μία συνολική και ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς ενός συστήματος, πρέπει να γνωρίζουμε πώς συμπεριφέρεται το σύστημα ως προς κάθε ένα κριτήριο. Μερικά γνωστά κριτήρια απόδοσης (performance metrics) των συστημάτων εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο είναι: μέση ακρίβεια (accuracy), κατανομή ακρίβειας (precision), πολυπλοκότητα (complexity), εξελιξιμότητα (scalability), ευρωστία (robustness), και κόστος (cost). Ανάλογα με την εφαρμογή και τις ανάγκες που έχουμε κάθε φορά, επιλέγουμε ποια performance metrics μας ενδιαφέρουν περισσότερο σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης. Επίσης, αν βελτιώσουμε την επίδοση του συστήματος ως προς ένα κριτήριο απόδοσης, αυτό μπορεί να προκαλέσει παράλληλα τη μείωση της επίδοσης του συστήματος ως προς ένα άλλο κριτήριο απόδοσης. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα κριτήρια απόδοσης που

αναφέραμε παραπάνω [1], [11].

1) Μέση ακρίβεια (Accuracy):

Η μέση ακρίβεια (accuracy) είναι η πιο σημαντική απαίτηση σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης. Συνήθως, για να εκτιμηθεί το σφάλμα στον εντοπισμό της θέσης ενός αντικειμένου, χρησιμοποιείται ο υπολογισμός της Ευκλείδειας απόστασης ανάμεσα στην εκτιμώμενη και στην πραγματική θέση ενός αντικειμένου. Έστω ότι ένας αλγόριθμος εντοπισμού θέσης πραγματοποιείται πολλές φορές, και κάθε φορά υπολογίζεται η Ευκλείδεια απόσταση ανάμεσα στην εκτιμώμενη και στην πραγματική θέση του αντικειμένου άγνωστης θέσης. Τότε, ο μέσος όρος όλων των Ευκλείδειων αποστάσεων που υπολογίστηκαν μας δίνει ένα πολύ συνηθισμένο μέτρο της ακρίβειας ενός συστήματος, το οποίο ονομάζεται μέση απόσταση σφάλματος (mean distance error). Όσο υψηλότερη είναι η accuracy ενός συστήματος εντοπισμού θέσης, τόσο καλύτερο είναι το σύστημα. Όμως, όπως αναφέραμε και παραπάνω, η βελτίωση της accuracy ενός συστήματος, μπορεί να προκαλέσει παράλληλα τη μείωση της απόδοσης του συστήματος ως προς ένα άλλο κριτήριο απόδοσης.

2) Κατανομή ακρίβειας (Precision):

Έστω ότι ο αλγόριθμος ενός συστήματος εντοπισμού θέσης εκτελείται πολλές φορές, και κάθε φορά καταγράφεται η απόσταση σφάλματος (distance error), δηλαδή η Ευκλείδεια απόσταση ανάμεσα στην εκτιμώμενη και στην πραγματική θέση του αντικειμένου άγνωστης θέσης. Τότε, παρατηρείται ότι η απόσταση σφάλματος δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται, ακολουθώντας μάλιστα μία συγκεκριμένη κατανομή. Η κατανομή ακρίβειας (precision) ενός συστήματος εντοπισμού θέσης μελετά την κατανομή του distance error, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται, και όχι απλά τον μέσο όρο (mean distance error), που υπολογίζει η accuracy.

Ένα συνηθισμένο μέτρο της precision ενός συστήματος εντοπισμού θέσης είναι η Cumulative Probability Function (CDF) της απόστασης σφάλματος. Η CDF, η οποία λέγεται και συνάρτηση κατανομής πιθανότητας, συμβολίζεται με: $F_X(x) = P(X \leq x)$, και εκφράζει την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή X να πάρει τιμές μικρότερες ή ίσες του x . Η CDF είναι αύξουσα, και προσεγγίζει την τιμή ένα, όταν οι τιμές του x τείνουν στο άπειρο. Στην περίπτωση της μελέτης εντοπισμού θέσης, όταν δύο συστήματα εντοπισμού θέσης συγκρίνονται μεταξύ τους και έχουν ίδια accuracy, τότε προτιμάται το σύστημα στο οποίο η κατανομή του distance error είναι συγκεντρωμένη σε μικρότερες τιμές. Επομένως, η precision ενός συστήματος είναι καλύτερη, αν η κατανομή του distance error είναι

συγκεντρωμένη σε μικρότερες τιμές, γιατί τότε η γραφική παράσταση της CDF του συστήματος φτάνει γρηγορότερα σε υψηλές τιμές πιθανότητας, και αυτό έχει ως συνέπεια η πιθανότητα να πάρει το distance error μικρή τιμή να είναι μεγαλύτερη.

Για παράδειγμα, ένα σύστημα εντοπισμού θέσης με precision 90% μέσα σε 2.3 m (η CDF του distance error για 2.3 m είναι 0.9), προτιμάται από ένα σύστημα με precision 50% μέσα σε 2.3 m (η CDF του distance error για 2.3 m είναι 0.5). Επίσης, ένα σύστημα όπου η CDF του distance error για 1 m είναι 0.8, προτιμάται από ένα σύστημα όπου η CDF του distance error είναι 0.8 για 2 m.

Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις, η precision σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης ορίζεται ως η τυπική απόκλιση της απόστασης σφάλματος, ή ως η geometric dilution of precision (GDOP) [1].

3) Πολυπλοκότητα (Complexity):

Ένα είδος πολυπλοκότητας (complexity) των συστημάτων εντοπισμού θέσης είναι η πολυπλοκότητα που αφορά το λογισμικό (software) ενός συστήματος (software complexity). Με τον όρο software complexity εννοούμε την υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου που χρησιμοποιεί ένα σύστημα εντοπισμού θέσης.

Ο προσδιορισμός της πολυπλοκότητας δεν είναι το ίδιο σημαντικός για όλα τα συστήματα εντοπισμού θέσης. Για παράδειγμα, αν ο υπολογισμός ενός αλγόριθμου εντοπισμού θέσης γίνεται σε έναν κεντρικό εξυπηρετητή (server) υπολογιστή, τότε, όση υπολογιστική πολυπλοκότητα και να έχει ο αλγόριθμος, η επεξεργασία του γίνεται συνήθως σε μικρό χρόνο, και η κατανάλωση ισχύος δεν είναι περιοριστικός παράγοντας. Όμως, αν την επεξεργασία του αλγόριθμου την αναλαμβάνει μία μικρή υπολογιστική μονάδα, η οποία είναι τοποθετημένη στο αντικείμενο άγνωστης θέσης, τότε η υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου έχει μεγάλη σημασία. Αυτό συμβαίνει, γιατί σε μία μικρή υπολογιστική μονάδα, η ικανότητα επεξεργασίας είναι λιγότερο ισχυρή, και τα αποθέματα ισχύος είναι πολύ λιγότερα, από ότι ένας κεντρικός εξυπηρετητής. Επομένως, μία μικρή υπολογιστική μονάδα επεξεργάζεται έναν αλγόριθμο σε αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι ένας κεντρικός server. Επίσης, οι μικρές υπολογιστικές μονάδες συνήθως χρησιμοποιούν μπαταρίες, και επομένως η κατανάλωση ισχύος, η οποία συντελεί στη μείωση της διάρκειας ζωής μιας μπαταρίας, πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Έτσι, η πολυπλοκότητα ενός αλγόριθμου εντοπισμού θέσης πρέπει να είναι μικρή, γιατί τότε ο χρόνος επεξεργασίας μειώνεται, και η κατανάλωση ισχύος είναι μικρότερη.

Ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο ο χρόνος επεξεργασίας ενός αλγόριθμου πρέπει να είναι μικρός, είναι και η κινητικότητα του αντικείμενου άγνωστης θέσης. Δηλαδή, αν το αντικείμενο άγνωστης

θέσης αλλάξει μία θέση, τότε η καθυστέρηση μέχρι να ενημερωθεί το σύστημα για τη νέα θέση πρέπει να είναι μικρή, ώστε το κινούμενο αντικείμενο να μην έχει προλάβει να απομακρυνθεί πολύ από τη νέα θέση κατά τη διάρκεια της καθυστέρησης αυτής. Όμως, όπως περιγράψαμε παραπάνω, σε ορισμένα συστήματα, όπως αυτά όπου η επεξεργασία γίνεται σε κάποιον server, δεν χρειάζεται να δώσουμε τόσο μεγάλη σημασία στο μέγεθος της πολυπλοκότητας, γιατί ο χρόνος επεξεργασίας είναι από τη φύση του γρήγορος, ενώ δεν χρησιμοποιείται μπαταρία, η οποία έχει περιορισμένο χρόνο ζωής. Σε άλλα συστήματα όμως, ο περιορισμός της υπολογιστικής πολυπλοκότητας είναι απαραίτητος.

4) Ευρωστία (Robustness):

Ένα σύστημα εντοπισμού θέσης χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευρωστία (robustness), αν εξακολουθεί να λειτουργεί κανονικά σε περίπτωση που συμβεί ένα από τα δύο παρακάτω περιστατικά.

Η πρώτη περίπτωση είναι αν το σύστημα μετρήσει στο σήμα μία τιμή την οποία δεν την είχε ξαναδεί ποτέ στο παρελθόν. Έτσι, αν εμφανιστούν κάποιες RSS τιμές, ή και άλλου τύπου μετρήσεις, οι οποίες δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ άλλη φορά στο παρελθόν, και η λειτουργία του συστήματος δεν επηρεασθεί αρνητικά, τότε το σύστημα συμπεριφέρεται με μεγάλη ευρωστία. Ένα παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι ένα που χρησιμοποιεί kNN αλγόριθμο. Σε αυτή την περίπτωση, ένα νέο RSS διάνυσμα που λαμβάνεται για πρώτη φορά, απλά χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των κατάλληλων αποστάσεων του από τα διανύσματα του radio map, και έτσι δεν αποτελεί πρόβλημα.

Η δεύτερη περίπτωση, που αποτελεί κριτήριο της ευρωστίας, είναι όταν μερικά αναμενόμενα σήματα παύουν να είναι διαθέσιμα. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί, αν κάποιος παράγοντες εμπόδιζαν την εκπομπή ή τη λήψη του σήματος ενός πομπού, ή αν κάποιες μονάδες μέτρησης του σήματος θέτονταν εκτός λειτουργίας, λόγω άσχημων περιβαλλοντικών συνθηκών ή άλλων παραγόντων. Έτσι, αν ένα σύστημα εντοπισμού θέσης αναγκαστεί να λειτουργήσει με ελλειπείς πληροφορίες, και καταφέρει όμως να μην επηρεαστεί από αυτό, τότε το σύστημα χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευρωστία. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που ένας σταθμός βάσης τίθεται εκτός λειτουργίας, ένα σύστημα που χρησιμοποιεί Πιθανοτική Μέθοδο απλά θα χρειαστεί να κάνει κάποιες μικρές αλλαγές. Δηλαδή, μετατρέπει με κατάλληλο τρόπο τις τιμές των πιθανοτήτων που σχετίζονται με τον εκτός λειτουργίας σταθμό βάσης, και στη συνέχεια η λειτουργία γίνεται φυσιολογικά, όπως πριν.

5) Εξελιξιμότητα (Scalability):

Ένα σύστημα εντοπισμού θέσης που χαρακτηρίζεται από εξελιξιμότητα (scalability) έχει την ικανότητα να συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά, σε περίπτωση που η έκταση του περιβάλλοντος μελέτης γίνει μεγαλύτερη από ότι πριν.

Συνήθως, η εξελιξιμότητα ενός συστήματος εντοπισμού θέσης μελετάται σε δύο άξονες, με δύο διαφορετικές κλίμακες. Η κλίμακα του πρώτου άξονα αφορά το μέγεθος της έκτασης που μελετά το σύστημα εντοπισμού θέσης στο περιβάλλον. Πολλές φορές, όταν η έκταση μεγαλώνει, και επομένως οι αποστάσεις μεταξύ πομπών και δεκτών αυξάνονται, τότε η αξιοπιστία του εντοπισμού μιας θέσης μειώνεται. Ο δεύτερος άξονας αφορά την πυκνότητα του εξοπλισμού ασύρματης επικοινωνίας ενός συστήματος εντοπισμού θέσης, δηλαδή τον αριθμό μονάδων υποδομής ασύρματης επικοινωνίας του συστήματος, ανά μονάδα έκτασης περιοχής μελέτης, και ανά χρονική περίοδο. Αν οι μονάδες υποδομής ενός συστήματος που είναι συνωστισμένες σε μία περιοχή αυξάνονται, ή αν μεγαλώνει η έκταση του χώρου μελέτης, τότε ο αριθμός των κορεσμένων ασύρματων πόρων αυξάνεται, χρειάζονται περισσότεροι υπολογισμοί για τον αλγόριθμο εντοπισμού μιας θέσης, και πολλές φορές απαιτείται μεγαλύτερη υποδομή για λειτουργήσει σωστά το σύστημα.

Επίσης, ένα άλλο μέτρο της scalability ενός συστήματος είναι ο αριθμός των διαστάσεων του τελικού αποτελέσματος, δηλαδή, αν ένα αντικείμενο εντοπίζεται στον διδιάστατο (2-D) ή στον τρισδιάστατο χώρο (3-D). Κάποια συστήματα έχουν την ικανότητα να εντοπίζουν ένα αντικείμενο ή στον 2-D ή στον 3-D χώρο, ενώ κάποια άλλα συστήματα, δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει σε ποιον από τους δύο χώρους, δηλαδή στον 2-D ή 3-D, επιθυμεί να εντοπιστεί ένα αντικείμενο.

6) Κόστος (Cost):

Σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης, υπάρχουν διάφορα είδη κόστους (cost), όπως το χρηματικό κόστος, το κόστος χρόνου, το κόστος χώρου, και το ενεργειακό κόστος.

Το χρηματικό κόστος είναι ένας σημαντικός περιορισμός σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης. Πολλές φορές, οι ενέργειες που πραγματοποιούνται με σκοπό να βελτιωθεί η απόδοση ενός συστήματος ως προς κάποια κριτήρια απόδοσης, έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθούν οι χρηματικές δαπάνες. Επομένως, σε αρκετές περιπτώσεις, υπάρχει η ανάγκη για ισορροπία ανάμεσα στην απόδοση ενός συστήματος και στο χρηματικό κόστος.

Το κόστος χρόνου σχετίζεται με τον χρόνο που θυσιάζεται σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης. Πολλές φορές, ο χρόνος αυτός σχετίζεται με την εγκατάσταση και τη συντήρηση ενός συστήματος.

Το κόστος χώρου έχει να κάνει με το βαθμό συνωστισμού των μονάδων μέτρησης ενός συστήματος

εντοπισμού θέσης σε έναν χώρο. Πολλές φορές, σε μία εφαρμογή εντοπισμού θέσης υπάρχει περιορισμός στον χώρο που πρέπει να χρησιμοποιηθεί, και επομένως τότε είναι σημαντική η σωστή εκμετάλλευση του χώρου μελέτης.

Το ενεργειακό κόστος σχετίζεται με την κατανάλωση ενέργειας σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης. Όμως, το ενεργειακό κόστος δεν αφορά στον ίδιο βαθμό όλα τα είδη συστημάτων. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις όπου το αντικείμενο άγνωστης θέσης επικοινωνεί ασύρματα με το υπόλοιπο σύστημα με εντελώς ενεργειακά παθητικό τρόπο, τότε ο πομπός θα μπορούσε να έχει σχεδόν απεριόριστο χρόνο ζωής. Μία τέτοια μονάδα θα μπορούσε να είναι ένα παθητικό RFID tag. Όμως, σε άλλες περιπτώσεις, το αντικείμενο άγνωστης θέσης επικοινωνεί ασύρματα, αντλώντας ενέργεια από μία μπαταρία περιορισμένου χρόνου ζωής. Τότε, το ενεργειακό κόστος είναι σημαντικό και πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερο.

Επίσης, υπάρχουν και άλλα είδη κόστους, όπως το κόστος υλισμικού (hardware cost). Το hardware cost θα μπορούσε να είναι μηδενικό, αν για την υλοποίηση ενός αλγόριθμου εντοπισμού θέσης χρησιμοποιηθεί ένας ήδη υπάρχων εξοπλισμός, ο οποίος θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς.

1.6 ΑΠΑΡΙΘΜΗΣΗ ΓΝΩΣΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε κάποια γνωστά συστήματα εντοπισμού θέσης, τα οποία εφαρμόζονται σε εσωτερικούς χώρους. Πρόκειται για γνωστές υποδομές δικτύων, οι οποίες αρχικά έχουν σχεδιασθεί για να εξυπηρετούν άλλες εφαρμογές, αλλά έχουν προσαρμοστεί με κατάλληλο τρόπο ώστε να εξυπηρετούν εφαρμογές εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου. Τα συστήματα εντοπισμού θέσης που παρουσιάζουμε παρακάτω [1], έχουν ταξινομηθεί με κριτήριο την ασύρματη τεχνολογία που χρησιμοποιούν, ενώ για κάθε κατηγορία δίνονται διάφορες πληροφορίες, όπως ο αλγόριθμος εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιεί, και οι περιπτώσεις στις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί.

1) Βασιζόμενα σε τεχνολογία GPS:

Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού (Global Positioning System: GPS) (ή το DGPS) [25] είναι ένα από τα πιο πετυχημένα συστήματα εντοπισμού θέσης σε εξωτερικούς χώρους. Όμως, σε ένα εσωτερικό περιβάλλον, η κάλυψη του δορυφορικού σήματος είναι ακατάλληλη για να δώσει ο αλγόριθμος ακριβή αποτελέσματα. Έτσι, σε έναν εσωτερικό χώρο, το GPS είναι ακατάλληλο, λόγω της πολύ μειωμένης ακρίβειάς του.

Μία παραλλαγή του GPS, η οποία βελτιώνει την ακρίβεια του συμβατικού GPS σε έναν εσωτερικό χώρο, είναι ένα ασύρματο assisted GPS (A-GPS). Το A-GPS, το οποίο προτείνεται από την εταιρεία SnapTrack, παρέχει accuracy από 5 ως 50 m στα περισσότερα εσωτερικά περιβάλλοντα. Η A-GPS τεχνολογία χρησιμοποιεί δύο GPS δέκτες, οι οποίοι ταυτόχρονα ανιχνεύουν τους ίδιους δορυφόρους και λαμβάνουν σήματα από αυτούς. Ο ένας από τους δύο δέκτες είναι ένας δέκτης αναφοράς, και ανήκει σε έναν εξυπηρετητή εντοπισμού (location server). Ο άλλος δέκτης είναι ένας μερικός δέκτης, και ανήκει σε έναν ασύρματο κινητό σταθμό. Ο δέκτης αναφοράς βοηθά τον δέκτη του κινητού σταθμού να ανιχνεύσει ασθενή GPS σήματα. Ο ασύρματος κινητός σταθμός λαμβάνει μετρήσεις και από το συμβατικό GPS και από το εσωτερικό ασύρματο δίκτυο. Οι μετρήσεις συνδυάζονται και επεξεργάζονται με κατάλληλο τρόπο από τον location server, ο οποίος στη συνέχεια κάνει μία εκτίμηση θέσης.

Μία άλλη παραλλαγή του GPS ασθενών σημάτων, είναι μία τεχνολογία ακολούθησης ιχνών (tracking) η οποία ονομάζεται SuperSense. Η τεχνολογία αυτή είναι κατάλληλη για εσωτερικά κτιρίων και για βαθιά αστικά φαράγγια, λόγω του ότι η ευαισθησία ακολούθησης ιχνών (tracking sensitivity) είναι πέρα από -158 dBm.

Επίσης, μία άλλη τεχνική εντοπισμού θέσης, βασιζόμενη στο GPS, η οποία είναι κατάλληλη για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, με καλή precision, είναι η Locata [26]. Η τεχνική αυτή προτάθηκε από την Locata Corporation, και η τοπολογία της αποτελείται από ένα δίκτυο, το οποίο λέγεται LocataNet, στο οποίο διαδίδονται σήματα που μοιάζουν με του GPS. Ο εντοπισμός μιας θέσης γίνεται χρησιμοποιώντας μετρήσεις της φάσης του φέροντος σήματος.

2) Βασιζόμενα σε συστήματα RFID:

Ένα σύστημα αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Identification: RFID) έχει την ικανότητα να αναγνωρίζει συγκεκριμένα αντικείμενα ή πρόσωπα, χρησιμοποιώντας ραδιοκύματα. Το RFID σύστημα λειτουργεί με τον εξής τρόπο. Ένας πομποδέκτης RF συχνοτήτων στέλνει ένα RF σήμα σε έναν αναμεταδότη. Ο αναμεταδότης αυτός λέγεται RFID tag και περιλαμβάνει όλες τις χαρακτηριστικές πληροφορίες που χρειάζεται το RFID σύστημα για να τον αναγνωρίσει. Ο RFID tag εισάγει στο σήμα που έλαβε τις χαρακτηριστικές του πληροφορίες, και επανεκπέμπει τη νέα έκδοσή του RF σήματος προς τον πομποδέκτη. Στη συνέχεια, ο πομποδέκτης προωθεί το σήμα σε μία μονάδα, η οποία λέγεται RFID reader. Ο RFID reader επεξεργάζεται ψηφιακά το σήμα και έτσι αποκτά την χαρακτηριστική πληροφορία του RFID tag. Οι RFID readers και tags επικοινωνούν μεταξύ τους

ασύρματα, ακολουθώντας ένα καθορισμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας.

Οι μονάδες RFID tag χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις παθητικές (passive) και στις ενεργητικές (active). Τα passive RFID tags έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως ότι λειτουργούν χωρίς μπαταρία, όμως το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ότι το εύρος λειτουργίας τους είναι πολύ μικρό, και κυμαίνεται από 1 ως 2 m. Από την άλλη, τα active RFID tags λειτουργούν σε πολύ μεγαλύτερο εύρος, το οποίο μπορεί να είναι και δεκάδες μέτρα, όμως χρησιμοποιούν μπαταρία, η οποία έχει περιορισμένη διάρκεια ζωής. Τα passive RFID συστήματα συνήθως χρησιμοποιούν τις εξής μπάντες συχνοτήτων: LF (125 kHz), HF (13.56MHz), UHF (433 , 868-915 MHz), και μικροκυματικές συχνότητες (2.45 GHz , 5.8 GHz). Οι μπάντες συχνοτήτων που χρησιμοποιούν τα active RFID συστήματα είναι όμοιες με αυτές των passive, εκτός από τις LF και HF μπάντες.

Ένα πολύ γνωστό σύστημα εντοπισμού θέσης, το οποίο χρησιμοποιεί RFID τεχνολογία, είναι το SpotON [27]. Το SpotON σύστημα χρησιμοποιεί έναν συναθροιστικό αλγόριθμο που βασίζεται στην ανάλυση RSS τιμών, για να εντοπίσει ένα αντικείμενο στον τρισδιάστατο (3-D) χώρο. Η τοπολογία ενός SpotON δικτύου δεν βασίζεται σε κάποια κεντρική διαχείριση, αλλά οι δομικές μονάδες του δικτύου επικοινωνούν με Ad Hoc τρόπο. Οι δομικές μονάδες αυτές λειτουργούν σαν αισθητήρες που συνεργάζονται μεταξύ τους για να εντοπίσουν τη θέση ενός αντικειμένου. Οι RSS τιμές των σημάτων που λαμβάνουν τα SpotON tags χρησιμοποιούνται με κατάλληλο τρόπο ώστε να υπολογιστούν οι αποστάσεις μεταξύ των tags. Η accuracy και η precision ενός συστήματος μπορούν να βελτιωθούν, αν εκμεταλλευτούμε με σωστό τρόπο την πυκνότητα των tags και τη συσχέτιση των πολλαπλών μετρήσεων.

Ένα άλλο σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου που χρησιμοποιεί ενεργητικού (active) RFID τεχνολογία είναι το LANDMARC [28]. Το σύστημα αυτό συνηθίζεται να λειτουργεί στα 308 MHz. Μία ιδέα που εισάγει ένα LANDMARC σύστημα, είναι να αυξήσει την accuracy χωρίς την τοποθέτηση επιπλέον readers, αλλά με την τοποθέτηση επιπρόσθετων ετικετών αναφοράς (reference tags) που αφορούν καθορισμένες θέσεις στο χώρο. Τα reference tags βοηθούν στην βαθμονόμηση (calibration) του χώρου, και παίζουν το ρόλο των σημείων αναφοράς (reference points) στο σύστημα. Το LANDMARC σύστημα χρησιμοποιεί τις RSS μετρήσεις μεταξύ tag και readers. Ο αλγόριθμος που εφαρμόζει ένα LANDMARC σύστημα για να εντοπίσει μία θέση είναι ο kNN. Έχει διαπιστωθεί ότι η απόσταση σφάλματος σε ένα LANDMARC σύστημα είναι περίπου 1 m σε ποσοστό 50%, ενώ οι μέγιστες αποστάσεις σφάλματος είναι μικρότερες από 2 m.

3) Βασιζόμενα σε κυψελωτά δίκτυα:

Το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας με πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης κώδικα (Global System of Mobile / Code Division Multiple Access: GSM / CDMA) έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές φορές ως βάση για τη δημιουργία συστημάτων εντοπισμού θέσης σε εξωτερικούς χώρους. Η accuracy ενός συστήματος εντοπισμού θέσης εξωτερικού χώρου είναι σχετικά μικρή (50-200 m), αν η μέθοδος χρησιμοποιεί αναγνώριση κυψέλης (cell-ID) ή ενισχυμένη παρατηρηθείσα χρονική διαφορά (enhanced observed time difference: E-OTD). Στις περισσότερες περιπτώσεις, η accuracy είναι υψηλότερη σε περιοχές με πυκνή κάλυψη, όπως αστικές περιοχές, ενώ είναι χαμηλότερη σε περιοχές αραιής ραδιοκάλυψης, όπως αγροτικές περιοχές [29].

Όμως, αν χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος εντοπισμού θέσης εξωτερικού χώρου βασιζόμενος σε GSM σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου, τότε η εκτίμηση μιας θέσης θα υποφέρει από σημαντικά μεγάλο σφάλμα. Επομένως, για να εντοπιστεί μία θέση σε έναν εσωτερικό χώρο χρησιμοποιώντας το GSM σύστημα, επιβάλλεται να χρησιμοποιηθούν συστήματα που λειτουργούν σε εσωτερικούς χώρους με ανεκτό σφάλμα και ικανοποιητική ακρίβεια. Ο εντοπισμός θέσης που βασίζεται σε κυψελωτά δίκτυα είναι πιθανός σε εσωτερικούς χώρους, αν ο εσωτερικός χώρος που μας ενδιαφέρει καλύπτεται από μερικούς σταθμούς βάσης ή από έναν σταθμό βάσης που δίνει σχετικά ισχυρές RSS μετρήσεις στους δέκτες. Στην [30] παρουσιάζεται ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικών χώρων που βασίζεται στο GSM δίκτυο. Η accuracy του συστήματος αυτού είναι καλή, και η βασική του ιδέα είναι η χρήση του “δαχτυλικού αποτυπώματος” διευρυμένων ισχύων σημάτων (wide signal-strength fingerprint). Εκτός από τις 6 ισχυρότερες κυψέλες, τις οποίες ούτως ή άλλως γνωρίζει μία κινητή μονάδα στο GSM σύστημα, το “δαχτυλικό αποτύπωμα” διευρυμένων ισχύων σημάτων περιλαμβάνει επιπρόσθετα μετρήσεις και από άλλες κυψέλες πέρα των έξι ισχυρότερων. Έτσι, το “δαχτυλικό αποτύπωμα” περιλαμβάνει επιπλέον τιμές σήματος από πάνω από 29 GSM κανάλια, τα οποία δίνουν σήματα που μπορούν να ανιχνευτούν, αλλά είναι ακατάλληλα για αποδοτική επικοινωνία. Τα συστήματα που περιλαμβάνουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” διευρυμένων ισχύων σημάτων μπορούν να χρησιμοποιήσουν weighted kNN αλγόριθμο. Σε πειράματα που πραγματοποίησαν οι παραπάνω, συλλέγοντας “δαχτυλικά αποτυπώματα” διευρυμένων ισχύων σημάτων σε τρία πολυόροφα κτίρια και πραγματοποιώντας weighted kNN αλγόριθμο, παρατηρήθηκαν διαφοροποιήσεις, και επιτεύχθηκε μία accuracy της τάξης των 2.5 m.

4) Βασιζόμενα σε επικοινωνία εξαιρετικά υψηλού εύρους ζώνης (Ultra Wideband: UWB):

Η μετάδοση σε εξαιρετικά υψηλό εύρος ζώνης (Ultra Wideband: UWB) είναι ένας τύπος ασύρματης επικοινωνίας, ο οποίος προσφέρει ποιοτική ασύρματη επικοινωνία σε μικρές αποστάσεις, με μεγάλες ταχύτητες. Κατά την UWB επικοινωνία, ο πομπός στέλνει παλμούς μικρής διάρκειας (συνήθως <1 ns), με χαμηλό duty cycle (συνήθως 1:1000), ενώ το εύρος ζώνης εκπομπής είναι πολύ μεγάλο, και πολλές φορές μπορεί να ξεπερνά τα 500 MHz. Σε αντίθεση με πολλά συστήματα, όπως τα RFID, που λειτουργούν σε απλές μπάντες συχνοτήτων, η UWB επικοινωνία μπορεί να γίνεται σε πολλές μπάντες συχνοτήτων ταυτόχρονα, οι οποίες μπορεί να κυμαίνονται από 3.1 ως 10.6 GHz. Ένα πλεονέκτημα [31] της UWB επικοινωνίας, είναι ότι η μικρή χρονική διάρκεια των παλμών έχει ως συνέπεια η συνολική κατανάλωση ισχύος να είναι μικρή. Επίσης, τα UWB συστήματα αντιμετωπίζουν με αρκετή επιτυχία τα προβλήματα παρεμβολών, ενώ τα κανονικά σήματα μπορούν εύκολα να ξεχωρισθούν από τα σήματα που προέρχονται από πολλαπλές διαδρομές. Τα UWB σήματα μπορούν να διέρχονται εύκολα μέσα από υλικά, όπως τοίχοι και ρούχα, όμως όταν διέρχονται από άλλα υλικά, όπως μεταλλικά και υγρά, προκαλούν προβλήματα παρεμβολών [1]. Αυτό το μειονέκτημα μπορεί όμως να αντιμετωπισθεί, τοποθετώντας περισσότερους UWB readers στο σύστημα, ή τοποθετώντας τους UWB readers σε κατάλληλες θέσεις.

Μία σημαντική ιδιότητα των UWB συστημάτων είναι ότι επιτρέπουν να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια η χρονική στιγμή άφιξης ενός σήματος. Δηλαδή, οι μικρής διάρκειας παλμοί του εκπεμπόμενου σήματος, καθώς και ο σωστός συγχρονισμός της UWB επικοινωνίας, επιτρέπουν να γίνονται ακριβείς TOA (Time Of Arrival) και TOF (Time Of Flight) μετρήσεις σε έναν δέκτη [31], [32]. Στη συνέχεια, οι ακριβείς χρονικές μετρήσεις της UWB επικοινωνίας χρησιμοποιούνται από έναν κατάλληλο αλγόριθμο εντοπισμού, και αυτός εκτιμά μία θέση στον διδιάστατο ή στον τρισδιάστατο εσωτερικό χώρο με πολύ υψηλή accuracy (περίπου 20 cm). Στην περίπτωση του εντοπισμού θέσης στον τρισδιάστατο (3-D) χώρο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα που μετρά TDOA μετρήσεις ανάμεσα σε διάφορους δέκτες που λαμβάνουν ένα UWB σήμα. Εναλλακτικά, οι δέκτες θα μπορούσαν να πραγματοποιούν γωνιακές AOA μετρήσεις UWB σημάτων. Όμως, αν το σύστημα πραγματοποιεί και TDOA και AOA μετρήσεις ταυτόχρονα, τότε ο αριθμός των δεκτών μπορεί να μειωθεί.

Ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου που βασίζεται σε UWB επικοινωνία είναι το Ubisense system [33]. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, ειδικοί αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε καθορισμένα σημεία στο χώρο μελέτης, και ταξινομούνται σε διάφορες κυψέλες. Κάθε κυψέλη αποτελείται το λιγότερο από τέσσερις αισθητήρες. Στα αντικείμενα άγνωστης θέσης τοποθετούνται ετικέτες (tags) που εκπέμπουν UWB σήματα. Τα σήματα αυτά λαμβάνονται από τους ειδικούς

αισθητήρες. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται AOA και TDOA μετρήσεις, οι οποίες επεξεργάζονται κατάλληλα από το δίκτυο, με σκοπό να εκτιμηθεί η θέση ενός αντικειμένου, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Τα tags και οι αισθητήρες μπορούν να απέχουν αποστάσεις ακόμα και της τάξης των 150 ft. Επίσης, η υποδομή Ubisense δικτύων, εκτός των άλλων, απαιτεί την ύπαρξη ειδικών καναλιών ελέγχου πολλαπλής προσπέλασης διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access: TDMA), καθώς και μία Ubisense Smart Space software πλατφόρμα.

Μία άλλη εφαρμογή της UWB επικοινωνίας στα συστήματα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου είναι το Local Position Radar (LPR) [34] της Siemens. Το LPR σύστημα βασίζεται στις RTOF μετρήσεις ανάμεσα στους σταθμούς βάσης και τον αναμεταδότη. Για την πραγματοποίηση των RTOF μετρήσεων χρησιμοποιείται η αρχή των διαμορφωμένων κατά συχνότητα συνεχών κυμάτων (Frequency Modulated Continuous Wave: FMCW) των ραντάρ. Τα LPR συστήματα έχουν εφαρμογή σε συστήματα εντοπισμού που αφορούν γερανούς, και σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές, ενώ είναι κατάλληλα μόνο σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει οπτική επαφή σε κάθε επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη.

5) Βασιζόμενα σε ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks: WLANs (IEEE 802.11)):

Τα Wireless Local Area Networks (WLANs) είναι ασύρματα τοπικά δίκτυα τα οποία λειτουργούν στην ISM μπάνα συχνότητων των 2.4 GHz και χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές. Οι ρυθμοί μετάδοσης των δικτύων αυτών είναι 11, 54 ή 108 Mbps, και το χωρικό εύρος λειτουργίας τους κυμαίνεται από 50 ως 100 m. Τα WLANs ακολουθούν τα IEEE 802.11 πρωτόκολλα λειτουργίας. Η υποδομή ενός WLAN δικτύου μπορεί να χρησιμεύσει με μεγάλη επιτυχία στη δημιουργία ενός συστήματος εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, απλά προσθέτοντας έναν εξυπηρετητή εντοπισμού (location server) στο αρχικό WLAN δίκτυο. Έχει διαπιστωθεί ότι η accuracy ενός συστήματος εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου που βασίζεται σε WLAN, και χρησιμοποιεί RSS τιμές, κυμαίνεται από 3 ως 30 m.

Μία πρωτοποριακή εφαρμογή του WLAN για τον εντοπισμό θέσης εσωτερικών χώρων είναι το σύστημα RADAR [22]. Το σύστημα αυτό εφαρμόζει τον kNN αλγόριθμο, ή απλά έναν αλγόριθμο πλησιέστερου γείτονα (nearest neighbor). Η θέση ενός αντικειμένου άγνωστης θέσης μπορεί να εντοπιστεί με δύο διαφορετικούς εναλλακτικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος βασίζεται στις εμπειρικές RSS μετρήσεις που πραγματοποιούνται στις υποψήφιες θέσεις, κατά το offline στάδιο της scene

analysis. Ο δεύτερος εναλλακτικός τρόπος προσέγγισης του προβλήματος εντοπισμού μιας θέσης, είναι η μοντελοποίηση της διάδοσης του σήματος στον χώρο μελέτης. Συγκεκριμένα, τα κλασικά Rice και Rayleigh μοντέλα διαλείψεων, αντικαθιστώνται από μοντέλα διάδοσης που λαμβάνουν υπόψη τους τις εξασθενίσεις λόγω των τοίχων ενός χώρου, δηλαδή τον παράγοντα Wall Attenuation Factor (WAF). Η accuracy του RADAR είναι 2-3 m. Το σύστημα RADAR θα μελετηθεί λεπτομερώς στο κεφάλαιο 2. Στη συνέχεια, προτάθηκε μία άλλη εκδοχή του RADAR, σύμφωνα με την οποία το RADAR ενισχύεται από έναν Viterbi-like αλγόριθμο [36]. Στην περίπτωση αυτή, η precision είναι 50% μέσα σε 2.37-2.65 m και 90% μέσα σε 5.93-5.97 m.

Μία άλλη εφαρμογή συστήματος εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου που βασίζεται σε WLAN είναι το Horus system [37], [38]. Το σύστημα αυτό χωρίζει το χώρο σε κλάσεις, και εφαρμόζει πιθανοτική μέθοδο (probabilistic method) για τον εντοπισμό μιας θέσης. Η precision μπορεί να ξεπεράσει το 90% μέσα σε 2.1 m. Στην [39] αναφέρεται ένα Bayesian σύστημα εντοπισμού που βασίζεται σε πλέγμα σε μία μικρή έκταση ενός κτιρίου, πετυχαίνοντας ακρίβεια 50% μέσα σε 1.5 m. Επίσης, ένα άλλο δίκτυο που έχει WLAN υποδομή και εντοπίζει μία θέση εφαρμόζοντας πιθανοτική μέθοδο είναι το Nibble [40].

Μία εφαρμογή WLAN τεχνολογίας στον εντοπισμό εσωτερικού χώρου, που βασίζεται σε νευρικά δίκτυα, είναι αυτή που προτείνεται στην [41]. Στη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιείται αρχιτεκτονική νευρικού δικτύου τριών επιπέδων (layers), με τρεις μονάδες εισόδου, οχτώ μονάδες κρυμμένου επιπέδου, και δύο εξόδους, έτσι ώστε το σφάλμα στις διαδικασίες εξάσκησης (training) και δοκιμής (testing) να είναι το ελάχιστο, και το δίκτυο να είναι λιγότερο ευαίσθητο σε overfitting. Αν αυξηθεί ο αριθμός των training δειγμάτων, τότε η accuracy του συστήματος μπορεί να μειωθεί και στα 1.5 m.

Ένας κλάδος στον οποίον εφαρμόζονται ευρέως μέθοδοι εντοπισμού θέσης είναι η ρομποτική. Ένας Bayesian αλγόριθμος [42], [43] εντοπισμού ρομπότ που βασίζεται σε πλέγμα, ο οποίος χρησιμοποιεί υποδομή IEEE 802.11, εκτελείται στα εξής δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο, χρησιμοποιείται ένα πιθανοτικό μοντέλο για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων και τον εντοπισμό της υποψήφιας θέσης με τη μεγαλύτερη πιθανότητα. Οι υπολογισμοί βασίζονται στις RSS τιμές των σημάτων που εκπέμπουν εννέα σταθμοί βάσης. Κατά το δεύτερο στάδιο, ο αλγόριθμος εκμεταλλεύεται την περιορισμένη μέγιστη ταχύτητα των κινητών αντικειμένων άγνωστης θέσης, με σκοπό να ξεκαθαρίσει τα αποτελέσματα του πρώτου σταδίου, και να απορρίψει τις λύσεις με σημαντική αλλαγή στη θέση του κινητού αντικειμένου. Η σημασία του δεύτερου σταδίου φαίνεται από το γεγονός ότι, αν πραγματοποιηθεί το δεύτερο στάδιο, η ακρίβεια είναι 83% μέσα σε 1.5 m, ενώ αν δεν

πραγματοποιηθεί, η ακρίβεια είναι 77% μέσα σε 1.5 m. Παρόμοια αποτελέσματα στην ακρίβεια πετυχαίνονται και στην [44], όπου εφαρμόζεται μία Monte Carlo τεχνική εντοπισμού θέσης. Στην [45] παρουσιάζεται μία πρακτική εύρωστη Bayesian μέθοδος εντοπισμού θέσης που βασίζεται σε ένα 802.11 δίκτυο, η οποία μπορεί να μειώσει δραματικά τον απαιτούμενο χρόνο εξάσκησης (training) στο σύστημα, ενώ παράλληλα μπορεί να δώσει ικανοποιητική accuracy σε πολλές εφαρμογές. Στην [15] προτείνεται ένα σύστημα εντοπισμού με βοήθεια ακολούθησης ιχνών (tracking-assistant). Το σύστημα αυτό αναπτύσσει το Ekahau σύστημα, το οποίο είναι ένα εμπορικό σύστημα εντοπισμού θέσης, που συνδυάζει Bayesian δίκτυα, στοχαστική πολυπλοκότητα και μέθοδο online ανταγωνιστικής εκμάθησης. Επίσης, στην [47] προτείνεται ένα σύστημα που χρησιμοποιεί υποδομή WLAN, βασίζεται σε ένα στατιστικό μοντέλο διάδοσης σήματος, και έχει τη δυνατότητα να μεταφέρεται μεταξύ δύο καταστάσεων, την κατάσταση ακολούθησης ιχνών (tracking) και την κατάσταση μη ακολούθησης ιχνών (nontracking), για να επιτευχθεί μεγαλύτερη μέση ακρίβεια (accuracy). Σε περίπτωση που το αντικείμενο άγνωστης θέσης είναι ακίνητο, το σύστημα αυτό πετυχαίνει ακρίβεια 2 m με πιθανότητα 90%, ενώ αν το αντικείμενο κινείται, πετυχαίνεται ακρίβεια 5 m με πιθανότητα 90%.

Τέλος, αν και τα περισσότερα συστήματα εντοπισμού θέσης που βασίζονται σε WLAN αρχιτεκτονική χρησιμοποιούν RSS μετρήσεις, υπάρχουν και συστήματα εντοπισμού βασιζόμενα σε WLAN που χρησιμοποιούν TDOA μετρήσεις. Ένα παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι το AeroScout (ή BlueSoft) [48]. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί TDOA αλγόριθμο και απαιτεί πολύ καλό συγχρονισμό.

6) Βασιζόμενα σε επικοινωνία Bluetooth (IEEE 802.15):

Η ασύρματη επικοινωνία Bluetooth λειτουργεί στην 2.4 GHz ISM μπάντα, έχει μικρότερο ρυθμό μετάδοσης από το WLAN (1 Mbps), μικρότερο εύρος λειτουργίας (συνήθως 10-15 m), και χρησιμοποιείται σε πολλές IP δικτυακές εφαρμογές. Σε ένα Bluetooth σύστημα, κάθε Bluetooth ετικέτα (tag) έχει ένα μοναδικό ID, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό του.

Ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου που βασίζεται στην Bluetooth επικοινωνία, είναι το Topaz [1]. Το Topaz σύστημα αποτελείται από εξυπηρετητές (servers) που επεξεργάζονται πληροφορίες για τον εντοπισμό μιας θέσης, και σημεία πρόσβασης (access points) και tags, που επικοινωνούν ασύρματα με το δίκτυο. Η accuracy είναι 2 m, η precision είναι 95% μέσα σε 2 m, ενώ η καθυστέρηση εντοπισμού είναι 15-30 s. Η απόδοση βελτιώνεται στο νέας γενιάς Topaz σύστημα, το οποίο ενσωματώνει και άλλες τεχνολογίες, όπως υπέρυθρα συστήματα, μαζί με τα Bluetooth συστήματα.

Μία άλλη εφαρμογή της Bluetooth επικοινωνίας στα συστήματα εντοπισμού εσωτερικού χώρου, είναι η Bluetooth Local Positioning Application (BLPA) [49]. Η εφαρμογή αυτή χρησιμοποιεί ένα απλό μοντέλο διάδοσης για να μετατρέψει τις RSS τιμές σε αντίστοιχες αποστάσεις, και στη συνέχεια χρησιμοποιεί ένα Extended Kalman Filter (EKF) για να εκτιμήσει μία θέση στον τρισδιάστατο (3-D) χώρο. Η accuracy της BLPA είναι 3.76 m.

7) Χρήση Εξαιρετικά Υψηλών Συχνοτήτων (Ultra High Frequency: UHF):

Τα συστήματα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου που χρησιμοποιούν συχνότητες Ultra High Frequency (UHF), λειτουργούν στην μπάντα 433 MHz, ή στην 868 MHz και στην 2.4 GHz ISM μπάντα. Σε αυτά τα φάσματα συχνότητας, η εξασθένιση του σήματος στους τοίχους είναι μέτρια.

Μερικά από τα συστήματα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου που λειτουργούν σε UHF συχνότητες, είναι το 3-D ID σύστημα από την PinPoint [50], και το TDOA σύστημα από την WhereNet [1]. Η απόδοση των δύο αυτών συστημάτων είναι παρόμοια με αυτή των WLAN συστημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Όμως, ένα σημαντικό πλεονέκτημά τους είναι ότι το hardware και κάποια ειδικά πρωτόκολλα επιτρέπουν να γίνεται ελάχιστη κατανάλωση ισχύος. Για παράδειγμα, το σύστημα WhereNet, χρησιμοποιεί την ίδια μπάντα 2.4 GHz με τα WLAN και Bluetooth συστήματα, όμως διαφέρει ως προς αυτά στο ότι χρησιμοποιεί ένα ειδικό πρωτόκολλο ANSI 371.1, το οποίο επιτρέπει χαμηλή ισχύ στο φάσμα των συχνοτήτων. Το WhereNet σύστημα εκτιμά μία θέση, πραγματοποιώντας TDOA χρονικές μετρήσεις στους δέκτες, μετρώντας τα σήματα που εκπέμπουν τα διάφορα tags, και εφαρμόζοντας έναν αντίστοιχο αλγόριθμο εντοπισμού θέσης. Από την άλλη, το PinPoint 3-D ID σύστημα χρησιμοποιεί RTOF μετρήσεις για να εντοπίσει τη θέση ενός αντικειμένου. Σε ένα τέτοιο σύστημα, ένας αριθμός από κεραίες είναι τοποθετημένες σε γνωστές θέσεις στον χώρο. Όταν ένα κινητό tag, που είναι και το αντικείμενο άγνωστης θέσης, λάβει έναν αριθμό σημάτων, τότε τα σήματα αυτά τα διαμορφώνει εισάγοντας σε αυτά τον χαρακτηριστικό ID αριθμό του, και τα επανεκπέμπει σε διαφορετικές συχνότητες. Επίσης, υπάρχει ένας ειδικός ελεγκτής, ο οποίος κινείται περιοδικά ανάμεσα στις κεραίες, και συλλέγει κατάλληλες πληροφορίες που είναι χρήσιμες για τη λειτουργία του συστήματος. Το PinPoint 3-D ID σύστημα χρησιμοποιεί μία Bayesian προσέγγιση για τον εντοπισμό μιας θέσης, πετυχαίνει accuracy 1 m, λειτουργεί σε χωρική έκταση 30 m, και χρειάζεται 5 s για την ανανέωση του υπολογισμού μιας θέσης.

Ένα άλλο σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου που λειτουργεί σε UHF συχνότητες είναι το

MeshNetwork Positioning system (MPS). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί QDMA τεχνολογία, αποτελείται από ένα δίκτυο της μορφής Ad-Hoc, και χρησιμοποιεί lateration τεχνική για τον εντοπισμό μιας θέσης. Επίσης λειτουργεί στην 2.4-GHz ISM μπάντα, και χρησιμοποιείται DSSS τεχνική. Ένα MPS σύστημα χρειάζεται λιγότερο από 1 s για να μας πληροφορήσει για τη θέση ενός αντικειμένου που κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από 200 mi/h. Η accuracy ενός MPS συστήματος είναι 10 m.

8) Χρήση πολλαπλών μέσων (Multiple Media):

Πολλές φορές, ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου σχεδιάζεται για ένα συγκεκριμένο μόνο περιβάλλον, με τις δικές του ξεχωριστές συνθήκες. Όμως, όταν το σύστημα αυτό καλείται να λειτουργήσει σε ένα διαφορετικό περιβάλλον, στο οποίο επικρατούν διαφορετικές συνθήκες, τότε είναι δυνατό να παρουσιαστούν διάφορα προβλήματα. Μία λύση του προβλήματος αυτού είναι η χρησιμοποίηση πολλαπλών μέσων (multiple media), δηλαδή διαφορετικών τρόπων μετάδοσης της πληροφορίας. Έτσι, σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, αντί για ένα, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αρκετά είδη αισθητήρων για τον εντοπισμό μιας θέσης, δηλαδή διαφορετικές τεχνολογίες. Μία μέθοδος που προτείνεται με στόχους να γεφυρώσει τις διαφορές ανάμεσα στα διαφορετικά είδη αισθητήρων, και να ξεπεράσει τους περιορισμούς που εισάγει η χρήση ενός μόνο τύπου αισθητήρων εντοπισμού θέσης, είναι η χρήση υβριδικών συστημάτων. Τα υβριδικά συστήματα επιχειρούν να περιορίσουν τα μειονεκτήματα της χρήσης μίας και μόνο μίας τεχνολογίας, εισάγοντας πολλαπλούς τύπους αισθητήρων εντοπισμού θέσης.

Ένα σύστημα της παραπάνω μορφής είναι το SmartLOCUS [51]. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί συγχρονισμένες RF και υπέρηχες (ultrasound) μετρήσεις, οι οποίες μετράνε τις χρονικές διαφορές ανάμεσα στους χρόνους διάδοσης των σημάτων (differential time-of-flight), με σκοπό να υπολογίσουν τις αποστάσεις μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων. Η τοπολογία του δικτύου αποτελείται από ένα σύνολο από κόμβους. Από το σύνολο των κόμβων, οι τρεις ή τέσσερις κόμβοι, ανάλογα αν εντοπίζουμε μία θέση στον 2-D ή στον 3-D χώρο, είναι τοποθετημένοι σε προκαθορισμένες κατάλληλες θέσεις. Οι υπόλοιποι κόμβοι μπορούν να κινούνται ελεύθερα, και οι πληροφορίες για τις θέσεις, για τις οποίες ενημερώνεται το υπόλοιπο σύστημα, ανανεώνονται συνεχώς.

Μία άλλη κατηγορία υβριδικών συστημάτων εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, είναι αυτά που συνδυάζουν την IR και την RF ασύρματη επικοινωνία. Τα συστήματα αυτά εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα που έχει το κάθε ένα από αυτά τα δύο είδη ασύρματης επικοινωνίας, δηλαδή την υψηλή accuracy σε έναν χώρο δωματίου των IR συστημάτων [52], και τη μεγάλη διαθεσιμότητα των

UHF τεχνικών. Σε μερικά συστήματα αυτού του είδους, κατάλληλα tags εκπέμπουν IR και RF σήματα, τα οποία περιλαμβάνουν τον χαρακτηριστικό ID αριθμό τους.

Το σύστημα EIRIS είναι ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνολογία IRFID. Η IRFID είναι μία τριπλή τεχνολογία η οποία συνδυάζει επικοινωνίες IR, RF και LF. Το EIRIS σύστημα συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της κάθε μιας τεχνικής, δηλαδή την ακρίβεια εντοπισμού της IR τεχνικής σε έναν χώρο δωματίου, το μεγάλο εύρος λειτουργίας της RF μετάδοσης, και την προσαρμοσμένου εύρους ευαισθησία (tailored range sensitivity) της LF μετάδοσης. Όμως, σε σύγκριση με τα RF και IR υβριδικά συστήματα, το EIRIS σύστημα είναι συνήθως πιο ακριβό.

9) Χρήση συστήματος ασύρματης τηλεφωνίας (Cordless Phone System):

Το Cordless Phone System είναι ένα σύγχρονο σύστημα ασύρματης τηλεφωνίας, το οποίο αντικαθιστά το κλασικό καλώδιο με έναν ασύρματο τρόπο επικοινωνίας. Ένα είδος Cordless Phone System που χρησιμοποιεί ψηφιακή επεξεργασία είναι το σύστημα Ψηφιακά Ενισχυμένων Ασύρματων Τηλεπικοινωνιών (Digital Enhanced Cordless Telecommunications: DECT). Η DECT επικοινωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στη δημιουργία συστημάτων εντοπισμού θέσης εσωτερικών χώρων. Στην [53] προτείνεται η εφαρμογή ενός ασύρματου κυψελωτού δικτύου εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, το οποίο βασίζεται στα συστήματα DECT. Το σύστημα που πρότειναν ονομάζεται Gaussian Process Positioning System (GPPS), γιατί χρησιμοποιείται ο Gaussian process (GP) αλγόριθμος για τον εντοπισμό της θέσης ενός τηλεφώνου στο χώρο. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στις RSS μετρήσεις των τηλεφώνων σε ένα DECT δίκτυο. Επίσης, ένα σύστημα GPPS που στηρίζεται σε DECT δίκτυο μπορεί να πετύχει accuracy 7.5 m. Αν σε ένα DECT κυψελωτό δίκτυο εντοπισμού θέσης, αντί για τον GP αλγόριθμο, εφαρμοστεί ο kNN αλγόριθμος, τότε πετυχαίνεται accuracy 7 m.

Πέρα από το DECT, ένα άλλο γνωστό σύστημα ασύρματης τηλεφωνίας είναι το Personal Handyphone System (PHS). Το σύστημα αυτό αντικαθιστά την κλασική καλωδιακή σύνδεση της σταθερής τηλεφωνίας, και βασίζεται σε ένα κυψελωτό ασύρματο δίκτυο. Το PHS θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός συστήματος εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου. Ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, το οποίο βασίζεται στο κυψελωτό δίκτυο ενός PHS, είναι το Locus [54]. Το Locus σύστημα χρησιμοποιεί RSS μετρήσεις και εφαρμόζει scene analysis για να εντοπίσει μία άγνωστη θέση. Το μέσο σφάλμα είναι 40-50 m.

10) Χρήση τεχνικών ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Wireless Sensor Network Techniques):

Η δραματική πρόοδος στις RF επικοινωνίες και στη σχεδίαση μικροηλεκτρομηχανολογικών (microelectromechanical: MEMS) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (IC), έχει κάνει δυνατή τη χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως στα συστήματα εντοπισμού θέσης εσωτερικών χώρων [55]. Σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου που βασίζεται σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, είναι πολύ σημαντικά η επικοινωνία, αλλά και οι μετρήσεις σήματος, ανάμεσα στα διάφορα ζεύγη αισθητήρων, καθώς και ο τρόπος με τον οποίον πραγματοποιούνται αυτά. Σημαντικά πρότυπα που αφορούν δίκτυα αισθητήρων, είναι το IEEE 802.15.4 physical (PHY) και το Medium Access Control (MAC) επιπέδου πρότυπο για χαμηλής μετάδοσης WPANs, και το επίπεδο δικτύου και εφαρμογής ZigBee [56]. Τα πρότυπα αυτά επιτρέπουν μετρήσεις και ανταλλαγή κατάλληλων πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων ζευγών αισθητήρων, όταν οι αισθητήρες συμμετέχουν σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου. Επίσης, τα περισσότερα συστήματα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, που βασίζονται σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, χρησιμοποιούν RSS μετρήσεις [57], [58]. Υπάρχουν όμως και συστήματα που χρησιμοποιούν TOA μετρήσεις [57], [46], ενώ άλλα, όπως το Ad Hoc Positioning System (APS), χρησιμοποιούν AOA μετρήσεις [35].

2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ RADAR

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σύστημα RADAR [22] είναι ένα πρωτοπόρο και δημοφιλές σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, το οποίο χρησιμοποιεί ως υποδομή ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (Wireless Local Area Network: WLAN) ραδιοσυχνοτήτων (radio-frequency: RF). Τα WLAN δίκτυα είναι ευρέως διαδεδομένα, και χρησιμοποιούνται σε μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Επομένως, η χρησιμοποίηση WLAN ως υποδομή για το σχηματισμό συστημάτων εντοπισμού είναι αρκετά πρακτική, αλλά και περισσότερο εφαρμόσιμη σε σχέση με άλλα είδη δικτύων. Σκοπός του συστήματος RADAR δεν είναι μόνο ο εντοπισμός ενός ακίνητου αντικειμένου στον εσωτερικό χώρο, αλλά και ο εντοπισμός κινούμενων αντικειμένων. Πριν το RADAR είχαν προταθεί κάποια συστήματα εντοπισμού κινούμενων αντικειμένων σε εσωτερικό χώρο, τα οποία όμως είχαν σοβαρά μειονεκτήματα. Επομένως, με τα WLANs γίνεται μία αξιόλογη προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν τα πλεονεκτήματα των RF WLANs, ξεπερνώντας παράλληλα κάποια μειονεκτήματα που προέκυπταν από τη χρήση άλλων ασύρματων δικτύων. Επίσης, σημειώνεται ότι το RADAR χρησιμοποιεί την τεχνική των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, και επιπλέον, αναφέρεται ότι πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ότι το σύστημα RADAR έχει ικανοποιητική ακρίβεια [22], της τάξης των 2 – 3 m [1].

2.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΫΠΗΡΧΑΝ ΤΟΥ RADAR

Παρακάτω καταγράφονται [22] μερικά συστήματα εντοπισμού εσωτερικού χώρου τα οποία προϋπήρχαν του RADAR, καθώς και τα βασικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

1 Το σύστημα Ενεργού Διακριτικού (Active Badge) [52], [59] χρησιμοποιεί ως υποδομή ένα δίκτυο υπέρυθρης (infrared: IR) ακτινοβολίας με τον εξής τρόπο. Από ένα ειδικό διακριτικό που φοράει κάποιο πρόσωπο, εκπέμπεται ένα IR σήμα κάθε 10 δευτερόλεπτα. Τα σήματα αυτά λαμβάνονται από αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι σε συγκεκριμένες θέσεις σε ένα κτίριο, και στη συνέχεια τα σήματα αυτά επεξεργάζονται με κατάλληλο τρόπο. Το πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι ότι εντοπίζει τις θέσεις με καλή ακρίβεια. Όμως, το σύστημα Active Badge χαρακτηρίζεται και από σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η αδυναμία επέκτασης λόγω περιορισμένης κάλυψης λειτουργίας, το σημαντικό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, καθώς και το γεγονός ότι η αξιοπιστία του συστήματος μειώνεται λόγω του ηλιακού φωτός. Και το τελευταίο μειονέκτημα θα ήταν ιδιαίτερα έντονο σε εσωτερικούς χώρους με παράθυρα.

2 Ένα άλλο σύστημα [60] εντοπισμού που χρησιμοποιεί IR ακτινοβολία λειτουργεί ως εξής. Από καθορισμένες θέσεις στην οροφή ενός κτιρίου εκπέμπονται IR παλμοί, οι οποίοι γίνονται αισθητοί από έναν ειδικό αισθητήρα. Ο αισθητήρας αποτελεί εξάρτημα μιας ειδικής μονάδας που προσαρτάται στο κεφάλι του προσώπου που πρόκειται να εντοπιστεί. Το σύστημα αυτό παρουσιάζει παρόμοια μειονεκτήματα με αυτά του συστήματος Active Badge.

3 Για σκοπούς εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ένα σύστημα που χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη βιομηχανία δημιουργίας κινούμενων εικόνων με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή (computer animation industry), το οποίο βασίζεται στα μαγνητικά πεδία παλλόμενου συνεχούς ρεύματος (Direct Current: DC) [22]. Το σύστημα αυτό έχει υψηλού βαθμού ακρίβεια. Όμως, έχει μεγάλο κόστος, και επιπλέον, η έκταση στην οποία μπορεί να λειτουργήσει είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα η επέκταση του συστήματος να είναι εξαιρετικά δύσκολη.

4 Τα κυψελωτά συστήματα, τα οποία εξασφαλίζουν ικανοποιητικής αξιοπιστίας εντοπισμό [61] κινητών τηλεφώνων σε εξωτερικούς χώρους, είναι αναποτελεσματικά για εντοπισμό στον εσωτερικό χώρο, λόγω παραγόντων όπως πολλαπλές ανακλάσεις ή προβλήματα συγχρονισμού [22].

5 Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, έχουν γίνει απόπειρες χρήσης του συστήματος GPS και για τον εντοπισμό σε εσωτερικούς χώρους. Όμως, μέσα σε εσωτερικούς χώρους η κάλυψη του δορυφορικού σήματος των συστημάτων GPS γίνεται ακατάλληλη για ακριβή αποτελέσματα.

6 Στο πρόγραμμα Daedalus [62] αναφέρεται ένα κυψελωτό σύστημα εντοπισμού εσωτερικών χώρων. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, κάθε σταθμός βάσης στέλνει τα δικά του αναγνωριστικά σήματα, τα οποία αντιστοιχούν στις ιδιαίτερες συντεταγμένες που είναι τοποθετημένος κάθε σταθμός βάσης. Η θέση ενός κινούμενου αντικειμένου άγνωστης θέσης θεωρείται ότι είναι οι συντεταγμένες ενός από τους σταθμούς βάσης. Ένα βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η περιορισμένη ακρίβεια στην πληροφόρηση για μία θέση, λόγω του ενδεχομένως μεγάλου μεγέθους των κυψελών.

Είναι εμφανές ότι τα διάφορα συστήματα που αναφέρθηκαν δεν είναι ιδανικά, και ακόμα και αν κάποια από αυτά έχουν ικανοποιητική ακρίβεια, τότε παράλληλα υστερούν σε άλλους σημαντικούς τομείς. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα μειονεκτήματα που καταγράφηκαν στα συστήματα είναι το περιορισμένο χωρικό εύρος λειτουργίας, η αδυναμία για εξελισσιμότητα (scalability) και το κόστος. Επίσης, αναφέρθηκαν και άλλου είδους προβλήματα, όπως η έκθεση του ηλιακού φωτός στα IR

συστήματα, οι δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες διάδοσης στα κυψελωτά και στα GPS συστήματα, και τα προβλήματα συγχρονισμού, ή τα προβλήματα της μεγάλης έκτασης των κυψελών, στα κυψελωτά συστήματα.

Η επιτυχία του συστήματος RADAR είναι ότι καταφέρνει να περιορίσει πολλά από τα μειονεκτήματα άλλων συστημάτων που αναφέρθηκαν, αλλά παράλληλα πετυχαίνει αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια εντοπισμού. Τα βασιζόμενα σε RF ακτινοβολία ασύρματα τοπικά δίκτυα που χρησιμοποιούνται στα συστήματα RADAR εξασφαλίζουν εύρος λειτουργίας ικανοποιητικών διαστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, στα WLANs (IEEE 802.11) το χωρικό εύρος λειτουργίας συνήθως κυμαίνεται από 50 ως 100 m [1]. Στην [22] καταγράφεται ως 200, 50 και 25 m για ανοιχτά, ημιανοιχτά και κλειστά περιβάλλοντα γραφείου, αντίστοιχα. Έτσι, η χρήση των WLANs καθιστά ικανό το σύστημα εντοπισμού για πιθανή μελλοντική επέκταση της λειτουργίας του. Επίσης, λόγω του ότι τα WLANs είναι ευρέως διαδεδομένα, και έχουν πολλές εφαρμογές, είναι λογικό το κόστος τους να είναι σχετικά χαμηλό. Παράλληλα όμως, ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης ασύρματων τοπικών δικτύων είναι ότι είναι ευέλικτα ως προς τις προγραμματιστικές τους ικανότητες, και συνεπώς έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν ταυτόχρονα διαφορετικές υπηρεσίες. Έτσι, σε αντίθεση με τα IR συστήματα εντοπισμού, τα οποία είναι ικανά να προσφέρουν μόνο υπηρεσίες εντοπισμού, τα συστήματα εντοπισμού που χρησιμοποιούν WLANs είναι ικανά να προσφέρουν ταυτόχρονα και υπηρεσίες εντοπισμού, αλλά και δικτυακές υπηρεσίες (networking services) [22].

Επιπλέον, η χρήση WLANs που βασίζονται σε RF ακτινοβολία είναι κατάλληλη για τη λειτουργία αλγόριθμων που βασίζονται στην τεχνική των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”. Και όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 1, οι αλγόριθμοι οι οποίοι χρησιμοποιούν τεχνικές “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” παρουσιάζουν αξιολόγητα πλεονεκτήματα στον εντοπισμό θέσεων σε εσωτερικούς χώρους.

Τέλος, στην [22] αναφέρεται ότι αν και το σύστημα RADAR φαίνεται να έχει ομοιότητες με το Duress Alarm Location System (DALs) [63], στη πραγματικότητα έχουν σημαντικές διαφορές.

2.3 ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ RADAR

Το σύστημα RADAR [22] βασίζεται στη συλλογή “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” και επομένως λειτουργεί σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο, το οποίο λέγεται offline, υπολογίζονται διανύσματα τιμών ισχύος που αφορούν καθορισμένες θέσεις του εσωτερικού χώρου, τα οποία αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων. Στη συνέχεια, ακολουθεί το online στάδιο, το οποίο υλοποιεί έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο, ο οποίος συγκρίνει μετρήσεις που πραγματοποιούνται κατά το στάδιο αυτό με τις αποθηκευμένες τιμές στη βάση δεδομένων, με σκοπό να γίνει μία εκτίμηση για μια θέση. Επίσης, όπως

έχουμε ήδη αναφέρει, στο σύστημα RADAR χρησιμοποιείται υποδομή δικτύου WLAN βασιζόμενου σε RF ακτινοβολία. Έτσι, θεωρείται ότι το αντικείμενο άγνωστης θέσης είναι ένας φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής (laptop), ο οποίος είναι εξοπλισμένος με την αντίστοιχη κατάλληλη κάρτα δικτύου WLAN. Επιπλέον, στο σύστημα που μελετάται θεωρείται ότι τα σήματα εκπέμπονται από τον κινούμενο φορητό υπολογιστή, και όχι από τους σταθερούς σταθμούς βάσης. Όμως, αν συνέβαινε το αντίθετο, δεν θα υπήρχε επίδραση στην αξιοπιστία του συστήματος [22].

Κατά το offline στάδιο, ο φορητός υπολογιστής εκπέμπει σήματα από τις καθορισμένες υποψήφιες θέσεις του εσωτερικού χώρου. Έτσι, για κάθε μία υποψήφια θέση, πραγματοποιούνται σε κάθε σταθμό βάσης πολλαπλές μετρήσεις. Στη συνέχεια, οι μετρήσεις αυτές επεξεργάζονται με κατάλληλο τρόπο έτσι ώστε να προκύψουν συγκεκριμένες τιμές, οι οποίες, όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 1, θα είναι τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” του εσωτερικού χώρου λειτουργίας. Όμως, κατά τη μελέτη [22] του συστήματος RADAR, διαπιστώθηκε ότι η μετρούμενη ισχύς στους σταθμούς βάσης εξαρτάται από τον προσανατολισμό του χρήστη του φορητού υπολογιστή, και μάλιστα, ο προσανατολισμός του χρήστη θα μπορούσε να μειώσει την μετρούμενη ισχύ ακόμα και πάνω από 5 dBm. Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3, η επίδραση του προσανατολισμού του χρήστη έχει παρατηρηθεί και σε άλλες μελέτες. Επομένως, στο σύστημα RADAR αποφασίστηκε να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η επίδραση του προσανατολισμού του σώματος του χρήστη με τον εξής τρόπο. Οι πολλαπλές μετρήσεις ισχύος του offline σταδίου δεν αφορούν μόνο τις συγκεκριμένες υποψήφιες θέσεις του εσωτερικού χώρου, αλλά αφορούν και τους δυνατούς προσανατολισμούς που θα μπορούσε να έχει το σώμα του χρήστη σε κάθε μία υποψήφια θέση.

Έτσι, για να συλλεχθούν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, πραγματοποιείται σε κάθε σταθμό βάσης μία σειρά μετρήσεων για κάθε έναν συνδυασμό της μορφής: (x,y,d) , όπου (x,y) οι συντεταγμένες μίας υποψήφιας θέσης, και d ο προσανατολισμός του χρήστη, ο οποίος μπορεί να αντιπροσωπεύει τον βορά, τον νότο, την ανατολή ή τη δύση. Συνεπώς, κατά το offline στάδιο του συστήματος RADAR, κάθε σταθμός βάσης πραγματοποιεί ένα σύνολο μετρήσεων για κάθε μία υποψήφια θέση (x,y) , και για κάθε έναν δυνατό προσανατολισμό d χρήστη σε κάθε υποψήφια θέση. Στη συνέχεια, για κάθε σύνολο μετρήσεων που αφορά κάθε δυνατό συνδυασμό υποψήφιας θέσης και προσανατολισμού που αναφέραμε, υπολογίζεται η μέση τιμή του (mean), η ενδιάμεση τιμή του (median) ή η τυπική του απόκλιση. Όμως, στο σύστημα RADAR συνηθίζεται περισσότερο η μέση τιμή [22].

Κατά το online στάδιο χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος Πλησιέστερου (ή Πλησιέστερων) Γείτονα (ή Γειτόνων) στον χώρο των σημάτων (Nearest Neighbor(s) in Signal Space: NNSS). Με άλλα λόγια,

χρησιμοποιείται ο kNN αλγόριθμος, ο οποίος περιγράφηκε στο κεφάλαιο 1, στη γενική του όμως μορφή. Δηλαδή, υπάρχει ελαστικότητα ως προς τον αριθμό k που χρησιμοποιείται, ο οποίος θα μπορούσε να πάρει και την τιμή ένα, ενώ στην [22] γίνεται προσπάθεια να εντοπιστεί πειραματικά το βέλτιστο k . Όμως, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, υπάρχει ελαστικότητα και ως προς τον αριθμό των δειγματικών μετρήσεων που πραγματοποιούνται κατά το online στάδιο για τη σύγκριση με τις πληροφορίες της βάσης δεδομένων. Επίσης, παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιείται στον kNN αλγόριθμο κατά κόρον η ευκλείδεια διανυσματική απόσταση, δεν υπάρχει αυστηρός περιορισμός σχετικά με το μέτρο διανυσματικής απόστασης που πρέπει να χρησιμοποιείται για τις συγκρίσεις με τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” [22].

Ένα σημαντικό σημείο που διαχωρίζει τη λειτουργία του συστήματος RADAR είναι ο τρόπος δημιουργίας των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”. Υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις ως προς το θέμα αυτό. Σύμφωνα με την πρώτη προσέγγιση, η χαρακτηριστική τιμή, όπως η μέση τιμή, η οποία αντιπροσωπεύει κάθε έναν δυνατό συνδυασμό (x,y,d) σε κάθε σταθμό βάσης, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο σύνολο πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά το offline στάδιο. Από την άλλη, σύμφωνα με τη δεύτερη προσέγγιση, οι χαρακτηριστικές αυτές τιμές δεν υπολογίζονται μέσω πειραματικών μετρήσεων, αλλά υπολογίζονται άμεσα, χρησιμοποιώντας κατευθείαν τον μαθηματικό τύπο ενός μοντέλου διάδοσης σήματος (signal propagation model). Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε τη μελέτη του συστήματος RADAR, όπως προκύπτει από την [22], για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις ξεχωριστά.

2.3.1 ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ (EMPIRICAL METHOD)

Σύμφωνα με την Εμπειρική Μέθοδο (Empirical Method), για τον σχηματισμό κάθε μίας μοναδικής χαρακτηριστικής τιμής που αντιπροσωπεύει κάθε μοναδικό συνδυασμό σταθμού βάσης, υποψήφιας θέσης και προσανατολισμού χρήστη, χρησιμοποιούνται οι πειραματικές μετρήσεις που συλλέχθηκαν κατά το offline στάδιο. Στη συνέχεια, όλες οι χαρακτηριστικές τιμές αυτές αποτελούν τον διανυσματικό χώρο αναζήτησης για τον αλγόριθμο Πλησιέστερου Γείτονα (NNSS) που εκτελείται κατά το online στάδιο.

Παρακάτω καταγράφονται κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα που προκύπτουν από την [22] και αφορούν τη λειτουργία του συστήματος RADAR σύμφωνα με την Εμπειρική Μέθοδο, σε έναν εσωτερικό χώρο πολλών δωματίων και διαστάσεων περίπου 22.5 m x 43.5 m.

- **Σύγκριση NNSS με δύο άλλους αλγόριθμους**

Η Εμπειρική Μέθοδος, όταν χρησιμοποιεί τον kNN αλγόριθμο για $k=1$, συγκρίνεται ως προς την αξιοπιστία με δύο άλλες μεθόδους εντοπισμού θέσης. Η πρώτη λέγεται μέθοδος Τυχαίας Επιλογής (Random Selection), και επιλέγει στην τύχη μία υποψήφια θέση ως την πραγματική. Η δεύτερη μέθοδος λέγεται Επιλογή Ισχυρότερου Σταθμού Βάσης (Strongest Base Station Selection) [62], και εκτιμά ότι η πραγματική θέση ενός φορητού υπολογιστή είναι αυτή που αντιστοιχεί στον σταθμό βάσης που μετρά το ισχυρότερο σήμα.

Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 1.5, ένα καλό μέτρο της ακρίβειας ενός αλγόριθμου εντοπισμού θέσης είναι η απόσταση σφάλματος (distance error), η οποία εκφράζει την ευκλείδεια απόσταση ανάμεσα στην πραγματική και την εκτιμώμενη θέση ενός αντικειμένου. Στη συνέχεια, συγκρίνονται μεταξύ τους οι συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας (Cumulative Distribution Function: CDF) της απόστασης σφάλματος των τριών αλγόριθμων που αναφέραμε, και τα αποτελέσματα των συγκρίσεων για πιθανότητες 25%, 50% και 75% καταγράφονται στον ΠΙΝΑΚΑ 2.1 [22].

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: Η ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ CDFS ΤΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ, ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΙΣΧΥΡΟΤΕΡΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΥΧΑΙΑΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ.

Μέθοδος	25%	50%	75%
	Απόσταση σφάλματος (meters)		
Empirical Method	1.92	2.94	4.69
Strongest Base Station Selection	4.54	8.16	11.5
Random Selection	10.37	16.26	25.63

Από τα αποτελέσματα του ΠΙΝΑΚΑ 2.1 προκύπτει ότι η ακρίβεια της Εμπειρικής Μεθόδου είναι σαφώς καλύτερη από τις άλλες δύο μεθόδους. Επίσης, η ακρίβεια της Εμπειρικής Μεθόδου φαίνεται να είναι αρκετά ικανοποιητική.

Άλλωστε, μία ακρίβεια της τάξης των τριών περίπου μέτρων αντιστοιχεί, κατά προσέγγιση, στις διαστάσεις ενός γραφείου ή οποιουδήποτε δωματίου σε έναν εσωτερικό χώρο.

- **Μελέτη βέλτιστης τιμής k του kNN αλγόριθμου**

Πολλές φορές, ο απλός αλγόριθμος Πλησιέστερου Γείτονα θα ήταν πιο αξιόπιστος, αν επιλέγονταν

μετά τις συγκρίσεις του online σταδίου περισσότερες από μία υποψήφιες θέσεις. Δηλαδή, θα ήταν προτιμότερο αν χρησιμοποιείτο ένας kNN αλγόριθμος με $k > 1$. Οι βασικές περιπτώσεις που, σύμφωνα με την [22], καθιστούν αναγκαία την επιλογή μεγαλύτερων αριθμών k είναι οι εξής. Πρώτον, όταν υπάρχουν παραπάνω από μία υποψήφιες θέσεις με “δαχτυλικά αποτυπώματα” που απέχουν παρόμοιες διανυσματικές αποστάσεις από το δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων του online σταδίου. Δεύτερον, καλό είναι να χρησιμοποιείται ο kNN αλγόριθμος με $k > 1$, όταν υπάρχουν υποψήφιες θέσεις που απέχουν, όχι ιδιαίτερα μικρές, αλλά παρόμοιες φυσικές αποστάσεις από την πραγματική θέση, και παράλληλα βρίσκονται ανά ζεύγη σε αντίθετους προσανατολισμούς σε σχέση με την πραγματική θέση. Στις περιπτώσεις αυτές, ο μέσος όρος των k υποψήφιων θέσεων θα προσεγγίσει καλύτερα την πραγματική θέση. Στην παράγραφο 1.4.2.2 περιγράφεται το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής του k .

Κατά την εφαρμογή [22] του kNN αλγόριθμου της Εμπειρικής Μεθόδου του RADAR, για διάφορες τιμές του k , παρατηρήθηκε ότι για μικρές τιμές του k η ακρίβεια βελτιώνεται, αλλά όχι πολύ σημαντικά. Για παράδειγμα, για $k=5$, η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος είναι 25% για 1.5 m, και 50% για 2.75 m. Οι τιμές αυτές είναι ελαφρά βελτιωμένες σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του ΠΙΝΑΚΑ 2.1. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η ακρίβεια μειώνεται όταν οι τιμές του k είναι μεγάλες.

Ο λόγος για τον οποίον η ακρίβεια δεν αυξάνεται σημαντικά όταν οι τιμές k είναι μικρές, αναφέρεται ότι είναι το γεγονός ότι, συχνά, μερικές από τις υποψήφιες θέσεις που επιλέγονται για το μέσο όρο του kNN αλγόριθμου ταυτίζονται. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι σε πολλές περιπτώσεις τυχαίνει να επιλέγονται για το μέσο όρο του kNN αλγόριθμου υποψήφιες θέσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικούς προσανατολισμούς του χρήστη, αλλά στην ίδια υποψήφια θέση. Επίσης, η μείωση της ακρίβειας για μεγάλες τιμές του k οφείλεται στο ότι ο μέσος όρος του kNN αλγόριθμου είναι πιθανό να επηρεάζεται αρνητικά από υποψήφιες θέσεις οι οποίες απέχουν μεγάλες αποστάσεις από την πραγματική θέση.

- **Η αξιοπιστία του συστήματος όταν το ανθρώπινο σώμα δεν εμποδίζει το σήμα**

Στην ιδανική περίπτωση όπου το ανθρώπινο σώμα δεν εμποδίζει τη διάδοση του σήματος εκπομπής του φορητού υπολογιστή, τότε δεν χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψη κατά το offline στάδιο οι πιθανοί προσανατολισμοί του σώματος του χρήστη. Ένας εναλλακτικός τρόπος, ο οποίος προσεγγίζει ικανοποιητικά την περίπτωση όπου δεν λαμβάνεται υπόψη κατά το offline στάδιο ο προσανατολισμός

του χρήστη, είναι αν σε κάθε συνδυασμό υποψήφιας θέσης και σταθμού βάσης λαμβάνεται υπόψη μόνο ο προσανατολισμός του χρήστη που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη μέση ισχύ. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρήθηκε [22] ότι με τη λειτουργία του kNN αλγόριθμου για $k=1$, η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος είναι 25% για 1.8 m, και 50% για 2.67 m, που αντιστοιχεί σε ελαφρά βελτίωση της ακρίβειας σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του ΠΙΝΑΚΑ 2.1.

Το πιο ενδιαφέρον όμως συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι, μετά τη λειτουργία του αλγόριθμου kNN για k από 2 ως και 4, η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος είναι 25% για περίπου 1 m, και 50% για περίπου 2.13 m, και επομένως η ακρίβεια του συστήματος βελτιώνεται σημαντικά σε σχέση με την περίπτωση όπου το σώμα του χρήστη εμποδίζει τη διάδοση του σήματος. Η σημαντική βελτίωση στην ακρίβεια οφείλεται στο ότι δεν είναι πλέον δυνατό κάποιες από τις k μέσες ισχύεις που επιλέγει ο kNN αλγόριθμος να αντιστοιχούν σε διαφορετικούς προσανατολισμούς του χρήστη στην ίδια υποψήφια θέση, και συνεπώς ο μέσος όρος του kNN αλγόριθμου περιλαμβάνει μόνο k ξεχωριστές υποψήφιες θέσεις.

- **Η επίδραση του αριθμού των υποψήφιων θέσεων**

Κατά τη μελέτη της Εμπειρικής Μεθόδου του συστήματος RADAR [22] παρατηρήθηκε πειραματικά η επίδραση του αριθμού των υποψήφιων θέσεων στην αξιοπιστία του συστήματος. Τα αποτελέσματα του ΠΙΝΑΚΑ 2.1 αντιστοιχούν σε 70 υποψήφιες θέσεις.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι όταν στο σύστημα υπάρχουν 5 ή λιγότερες υποψήφιες θέσεις, τότε η απόσταση σφάλματος είναι κατά έναν παράγοντα 2 ως 4 χειρότερη σε σχέση με όταν υπάρχουν 70 υποψήφιες θέσεις. Επίσης, συγκρίνοντας με την περίπτωση που υπάρχουν στο σύστημα 70 υποψήφιες θέσεις, η ενδιάμεση απόσταση σφάλματος χειροτερεύει κατά λιγότερο από 33% όταν υπάρχουν 20 υποψήφιες θέσεις, και χειροτερεύει λιγότερο από 10% όταν υπάρχουν στο σύστημα 40 υποψήφιες θέσεις.

Επομένως, παρατηρείται ότι από ένα σημείο και μετά, η αύξηση των υποψήφιων θέσεων επηρεάζει σε πολύ μικρό βαθμό την αξιοπιστία του συστήματος. Αυτό οφείλεται στο ότι, όταν ο αριθμός των υποψήφιων θέσεων μεγαλώνει, τότε οι υποψήφιες θέσεις πλησιάζουν περισσότερο μεταξύ τους, με αποτέλεσμα η μεταβλητότητα της μετρούμενης ισχύος να επηρεάζει ακόμα πιο αρνητικά της αξιοπιστία του συστήματος. Η μείωση της πιθανότητας ορθής εκτίμησης λόγω της μείωσης της

απόστασης ανάμεσα στις υποψήφιες θέσεις εξηγείται λεπτομερώς στα κεφάλαια 4 και 5. Έτσι, η αύξηση της ακρίβειας λόγω αύξησης των υποψήφιων θέσεων, εξουδετερώνεται σε μεγάλο βαθμό από τη μείωση της πιθανότητας ορθής εκτίμησης, όταν οι υποψήφιες θέσεις αρχίζουν να πλησιάζουν μεταξύ τους αποστάσεις μικρότερες από ένα κατώτατο όριο. Επίσης, στην [22] προτείνεται ο αριθμός 40 υποψήφιων θέσεων ως επαρκής, ενώ αναφέρεται η ενδεχόμενη ελάττωση του αριθμού αυτού σε περίπτωση που οι υποψήφιες θέσεις είναι ομοιόμορφα τοποθετημένες στον εσωτερικό χώρο.

- **Η επίδραση του αριθμού των δειγματικών διανυσμάτων μετρούμενης ισχύος του online σταδίου**

Ιδανικά, η αξιοπιστία του συστήματος θα ήταν καλύτερη αν κατά το online στάδιο συλλεγόταν στα σημεία πρόσβασης ένας πολύ μεγάλος αριθμός από δειγματικά διανύσματα τιμών ισχύος που εκπέμπει ο φορητός υπολογιστής. Αυτό όμως είναι πρακτικά αδύνατο να συμβεί στην πραγματικότητα, και ιδιαίτερα σε από τη στιγμή που η συσκευή άγνωστης θέσης κινείται.

Από πειραματικές μετρήσεις [22] παρατηρήθηκε ότι αρκεί ένας μικρός αριθμός από online δειγματικές μετρήσεις για να προσεγγιστεί η ακρίβεια των τιμών του ΠΙΝΑΚΑ 2.1, για τις τιμές του οποίου είχε χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός από online δείγματα (περισσότερα από 20). Πιο συγκεκριμένα, προκύπτει ότι σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του ΠΙΝΑΚΑ 2.1, όταν χρησιμοποιείται μόνο μία online δειγματική μέτρηση, τότε η ενδιάμεση απόσταση σφάλματος είναι περίπου 30% χειρότερη, όταν χρησιμοποιούνται 2 online δειγματικές μετρήσεις, η ενδιάμεση απόσταση σφάλματος είναι περίπου 11% χειρότερη, ενώ όταν χρησιμοποιούνται 3 online δειγματικές μετρήσεις, τότε η ενδιάμεση απόσταση σφάλματος χειροτερεύει ελάχιστα, αφού δεν αυξάνεται πάνω από 4%.

- **Η επίδραση του προσανατολισμού του χρήστη**

Για να επιβεβαιωθεί πειραματικά η μείωση της αξιοπιστίας του συστήματος, όταν δεν λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός του χρήστη του φορητού υπολογιστή, πραγματοποιήθηκε στην [22] το εξής πείραμα. Σύμφωνα με το πείραμα αυτό, κάθε φορά, κατά το online στάδιο ο προσανατολισμός του χρήστη ήταν αντίθετος με τον μοναδικό προσανατολισμό που λαμβανόταν υπόψη κατά το offline στάδιο. Τα αποτελέσματα δείχνουν, ότι στη ακραία αυτή δυσμενή περίπτωση, υπάρχει σημαντική

μείωση της ακρίβειας, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνά το 50 %. Επομένως, επιβεβαιώνεται το πόσο σημαντικό είναι για την αξιοπιστία του συστήματος να συλλέγονται μετρήσεις κατά το offline στάδιο για τους διάφορους προσανατολισμούς που μπορεί να έχουν τα σώματα των χρηστών των φορητών υπολογιστών. Επίσης, επισημαίνεται ότι ακόμα και σε αυτή την ακραία περίπτωση, η Εμπειρική Μέθοδος είναι σαφώς πιο ακριβής από τη μέθοδο Επιλογής Ισχυρότερου Σταθμού Βάσης και τη μέθοδο Τυχαίας Επιλογής.

- **Ανίχνευση ενός κινητού χρήστη**

Μέχρι στιγμής, τα πειραματικά αποτελέσματα αφορούσαν έναν ακίνητο χρήστη φορητού υπολογιστή. Στην περίπτωση που ο φορητός υπολογιστής κινείται, είναι πιθανό να υπάρχει κάποια μείωση της ακρίβειας σε σχέση με την περίπτωση που ο φορητός υπολογιστής θα ήταν ακίνητος.

Στην [22] έγινε προσπάθεια να παρατηρηθεί η ενδεχόμενη αυτή μείωση της ακρίβειας, ανάγοντας το πρόβλημα της ανίχνευσης του κινούμενου χρήστη σε μία σειρά συνεχόμενων προβλημάτων εντοπισμού ακίνητου χρήστη. Για το σκοπό αυτό θεωρήθηκε ένα χρονικά κυλιόμενο παράθυρο (sliding window) κατά το οποίο συλλέγονται 10 δείγματα μετρήσεων σε κάθε σταθμό βάσης, με σκοπό να υπολογίζονται οι απαραίτητες μέσες ισχύεις των σημάτων στα συνεχόμενα προβλήματα εντοπισμού ακίνητου χρήστη.

Από την [22] προκύπτει ότι η απόσταση σφάλματος όταν ανιχνεύεται ένας κινούμενος χρήστης είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από ότι όταν εντοπίζεται ένας ακίνητος χρήστης. Η ενδιάμεση απόσταση σφάλματος προκύπτει ίση με 3.5 m.

Παρά το γεγονός ότι εντοπίζει τις θέσεις των χρηστών με υψηλό βαθμό ακρίβειας, η Εμπειρική Μέθοδος έχει ορισμένα μειονεκτήματα. Το κυριότερο από αυτά είναι το γεγονός ότι η διαδικασία συλλογής των απαραίτητων μετρήσεων του offline σταδίου είναι επίμοχθη και χρονοβόρα. Επιπλέον, το πρόβλημα αυτό εντείνεται ακόμα περισσότερο, όταν η διαδικασία συλλογής μετρήσεων χρειάζεται να επαναληφθεί, σε περιπτώσεις όπως όταν τοποθετείται ένας νέος σταθμός βάσης.

2.3.2 ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΩΝ (RADIO PROPAGATION MODEL)

Τα πρακτικά προβλήματα που δημιουργούνται κατά την επίπονη διαδικασία της συλλογής μετρήσεων στο offline στάδιο θα μπορούσαν να αντικατασταθούν από έναν μαθηματικό υπολογισμό των μέσων ισχύων που υπολογίζονται κατά το στάδιο αυτό. Με τον άμεσο μαθηματικό υπολογισμό, ο σχεδιαστής του συστήματος απαλλάσσεται από την εξάρτησή του από τη συλλογή και την επεξεργασία δειγματικών μετρήσεων. Έτσι, τα προβλήματα της Εμπειρικής Μεθόδου θα μπορούσαν να περιοριστούν με τη χρήση ενός κατάλληλου μοντέλου διάδοσης σημάτων, το οποίο θα αποτελούσε ένα χρήσιμο εργαλείο υπολογισμού των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”. Ο κίνδυνος όμως της άμεσης πραγματοποίησης του offline σταδίου με τη βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου διάδοσης, είναι να μην γίνει σωστή επιλογή του μοντέλου, ή οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου να μην προσαρμόζονται επιτυχώς στις πραγματικές συνθήκες διάδοσης. Έτσι, η αξιοπιστία του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ορθότητα της χρήσης του μοντέλου.

Στην [22] έγιναν διάφορες σκέψεις σχετικά με την κατάλληλη επιλογή ενός μοντέλου διάδοσης. Αρχικά, πριν προταθεί το μοντέλο διάδοσης που θα χρησιμοποιεί το σύστημα RADAR, απορρίφθηκαν το μοντέλο διαλείψεων Rayleigh και το μοντέλο κατανομής Rice. Τα μοντέλα αυτά, τα οποία περιγράφονται στην παράγραφο 3.3, συνηθίζεται να μοντελοποιούν την περιβάλλουσα του σήματος λήψης σε συνθήκες διάδοσης μη οπτικής επαφής και οπτικής επαφής, αντίστοιχα. Ο λόγος που απορρίφθηκε η κατανομή Rayleigh είναι ότι η παραδοχή ότι δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη δεν είναι πάντα ρεαλιστική στον εσωτερικό χώρο. Επίσης, αν και η κατανομή Rice φαίνεται πιο ρεαλιστική για τον εσωτερικό χώρο μελέτης, θα ήταν πρακτικά δύσκολο να χρησιμοποιηθεί, επειδή θα ήταν δύσκολος ο υπολογισμός των παραμέτρων της, δηλαδή της ισχύος της ισχυρής συνιστώσας του λαμβανόμενου σήματος και της τοπικής μέσης ισχύος των ασθενών συνιστωσών.

Τελικά, η [22] καταλήγει ότι ένα μοντέλο το οποίο είναι κατάλληλο για τους υπολογισμούς του offline σταδίου του συστήματος RADAR είναι το μοντέλο διάδοσης Παράγοντα Εξασθένησης Τοίχων (Wall Attenuation Factor: WAF). Το μοντέλο αυτό αποτελεί μία προσαρμογή του μοντέλου διάδοσης Παράγοντα Εξασθένησης Πατωμάτων (Floor Attenuation Factor propagation model: FAF) [64], το οποίο είναι ευέλικτο στην προσαρμογή του σε εσωτερικούς χώρους διαφορετικών χαρακτηριστικών, ενώ παράλληλα λαμβάνει υπόψη του τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large-scale). Το μοντέλο Παράγοντα Εξασθένησης Τοίχων (WAF) θεωρεί τους τοίχους των εσωτερικών χώρων ως εμπόδια στη

διάδοση των σημάτων. Η μέση ισχύς του μοντέλου Παράγοντα Εξασθένησης Τοίχων σε έναν δέκτη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P(d) = P(d_0) - 10 n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) - nW * WAF, \text{ για } nW < C, \text{ ή}$$

$$P(d) = P(d_0) - 10 n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) - C * WAF, \text{ για } nW \geq C, \quad (2.1)$$

όπου n εκφράζει τον εκθέτη αύξησης των απωλειών διαδρομής με την απόσταση, $P(d_0)$ η ισχύς σήματος σε μία απόσταση αναφοράς d_0 από τον πομπό, d η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, C ο μέγιστος αριθμός τοίχων για τους οποίους ο παράγοντας εξασθένησης είναι σημαντικός, nW ο αριθμός των τοίχων μεταξύ πομπού και δέκτη, και WAF ο παράγοντας εξασθένησης τοίχων. Η $P(d)$ μετράται σε *Decibel*.

Πολλά μοντέλα απωλειών διαδρομής (path loss models) υπολογίζουν μία τιμή απόλυτης μέσης ισχύος λήψης η οποία αφορά μία συγκεκριμένη απόσταση από τον πομπό. Όμως, όπως περιγράφεται αναλυτικά και στα κεφάλαια 3.2 και 3.3, στην πραγματικότητα οι τοπικές μέσες ισχύεις που μετρώνται σε διαφορετικές θέσεις ενός χώρου που ισαπέχουν από τον πομπό δεν είναι πάντα ίσες. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στην ανομοιομορφία του περιβάλλοντος, λόγω παραγόντων όπως διαφορές στον αριθμό και στο είδος των εμποδίων που αντιμετωπίζει το διαδιδόμενο σήμα. Το μοντέλο Παράγοντα Εξασθένησης Τοίχων είναι σαφώς πιο βελτιωμένο από άλλα μοντέλα απωλειών διαδρομής, επειδή λαμβάνει υπόψη του την ανομοιομορφία του περιβάλλοντος. Όμως, είναι αρκετά απλοποιημένο λόγω του ότι ασχολείται μόνο με την ανομοιομορφία που προκαλούν οι τοίχοι του χώρου. Η εφαρμογή ενός ακριβούς μοντέλου είναι δύσκολη, επειδή ο αριθμός και το είδος των εμποδίων ενός χώρου είναι απρόβλεπτα. Επίσης, ένα άλλο γεγονός που επηρεάζει την ακρίβεια του μοντέλου Παράγοντα Εξασθένησης Τοίχων είναι το ότι δεν λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών (multipath).

Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου Παράγοντα Εξασθένησης Τοίχων μπορούν να υπολογιστούν έπειτα από μία σειρά κατάλληλων μετρήσεων στον χώρο λειτουργίας του συστήματος. Όμως, οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται είναι λιγότερο επίπονες από το offline στάδιο της Εμπειρικής Μεθόδου, καθώς είναι λιγότερες και σε αριθμό, αλλά και σε συχνότητα επανάληψης. Για παράδειγμα, οι μετρήσεις για τις παραμέτρους θα μπορούσαν να γίνουν μία φορά μόνο, και από εκεί και πέρα, αν το

περιβάλλον δεν μεταβάλλεται θεαματικά, οι παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν όσες φορές χρειαστεί από το μαθηματικό μοντέλο για άμεσους υπολογισμούς του offline σταδίου.

Στην [22] περιγράφεται ο τρόπος πειραματικού υπολογισμού των παραμέτρων nW , WAF , C , n και $P(d_0)$. Ο αριθμός nW των τοίχων που παρεμβαίνουν μεταξύ πομπού και δέκτη υπολογίζεται με τη βοήθεια του Cohen-Sutherland line-clipping αλγόριθμου [65]. Ο παράγοντας εξασθένησης τοίχων υπολογίζεται με τον εξής τρόπο. Στην αρχή μετράται η ισχύς λήψης σε έναν δέκτη όταν υπάρχει οπτική επαφή με τον πομπό, και στη συνέχεια οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ενώ ο αριθμός των τοίχων που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη αυξάνεται διαδοχικά κατά ένα. Παρατηρήθηκε ότι όταν ο αριθμός των τοίχων που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη ξεπερνούν μία τιμή C , τότε η εξασθένηση μεταβάλλεται ελάχιστα. Επίσης, οι τιμές των παραμέτρων n και $P(d_0)$ υπολογίζονται πραγματοποιώντας γραμμική παλινδρόμηση (linear regression) ανάμεσα στις πειραματικές μετρήσεις και στις θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές ισχύος του τύπου (2.1) συναρτήσεως του λογαρίθμου της απόστασης. Πραγματοποιώντας γραμμικές παλινδρομήσεις για διάφορους σταθμούς βάσης ξεχωριστά, παρατηρήθηκε [22] ότι οι τιμές των παραμέτρων n και $P(d_0)$ δεν διέφεραν αξιοσημείωτα. Η παρατήρηση αυτή είναι πολύ ενθαρρυντική, επειδή αν ισχύει αυτή η σχετική ανεξαρτησία των παραμέτρων αυτών από τις θέσεις των σταθμών βάσης, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν μοναδικές τιμές για τις n και $P(d_0)$, ανεξαρτήτως ποιου σταθμός βάσης πραγματοποιεί μετρήσεις, με αποτέλεσμα να μειώνονται αισθητά οι μετρήσεις, οι υπολογισμοί, και άρα και το γενικότερο κόστος του συστήματος. Επίσης, η τελευταία παρατήρηση δείχνει ότι το σύστημα RADAR θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε ένα διαφορετικό τμήμα ενός κτιρίου, χωρίς να χρειάζεται να αλλάξουν οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς του offline σταδίου.

Συγκρίνοντας την ακρίβεια της μεθόδου που χρησιμοποιεί ένα μοντέλο διάδοσης, με την ακρίβεια της Εμπειρικής Μεθόδου και της μεθόδου Επιλογής Ισχυρότερου Σταθμού Βάσης, προκύπτουν τα εξής [22]. Η ακρίβεια είναι 50% μέσα σε 4.3 m, 2.94 m και 8.16 m, και 25% μέσα σε 1.86 m, 1.92 m και 4.94 m για τη μέθοδο που χρησιμοποιεί μοντέλο απωλειών, για την Εμπειρική Μέθοδο και για τη μέθοδο Ισχυρότερου Σταθμού Βάσης, αντίστοιχα.

Επομένως, η μέθοδος που βασίζεται σε μοντέλο απωλειών απελευθερώνει τον σχεδιαστή του συστήματος από τις εκτεταμένες πειραματικές μετρήσεις, αλλά όμως δεν είναι τόσο ακριβής όσο η Εμπειρική Μέθοδος. Επιπλέον, η μέθοδος που βασίζεται σε μοντέλο απωλειών είναι σαφώς πιο αξιόπιστη από τη μέθοδο Ισχυρότερου Σταθμού Βάσης.

3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε περιπτώσεις όπου ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο που βασίζεται σε “δαχτυλικά αποτυπώματα”, η γνώση της κατανομής και των στατιστικών χαρακτηριστικών της ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων είναι πολύ σημαντική. Για παράδειγμα, μία σωστή εκτίμηση, ή ένας σωστός υπολογισμός, του μέσου όρου της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος στις διάφορες θέσεις του εσωτερικού χώρου οδηγεί σε ακριβείς υπολογισμούς των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, και τότε η πιθανότητα εσφαλμένης εκτίμησης μιας θέσης μειώνεται. Επιπλέον, η σωστή εκτίμηση της στατιστικής κατανομής της ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός αξιόπιστου μαθηματικού μοντέλου που να περιγράφει τη λειτουργία του συστήματος. Όμως, εκτός από τη συμβολή στην ορθή καταγραφή των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” και στην πετυχημένη μοντελοποίηση του συστήματος, η μελέτη της συμπεριφοράς του σήματος στον χώρο που διαδίδεται και η ορθή εκτίμηση των στατιστικών χαρακτηριστικών του, αλλά και η μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν και μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά αυτά, συμβάλουν στην βαθιά κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος εντοπισμού θέσης.

Ο χαρακτηριστικός τρόπος με τον οποίο διαδίδεται ένα σήμα, και η ισχύς λήψης του, εξαρτώνται από το περιβάλλον διάδοσης, αλλά και από τη συχνότητα, τη διαμόρφωση, την ισχύ εκπομπής, το εύρος ζώνης, και γενικότερα από τα χαρακτηριστικά του συστήματος ασύρματου δικτύου που χρησιμοποιείται ως υποδομή για την ανάπτυξη του συστήματος εντοπισμού θέσης. Επομένως, όταν μελετάται η στατιστική συμπεριφορά της ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων, είναι σημαντικό να διερευνώνται με προσοχή και να αναφέρονται με έμφαση όλα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και του συστήματος που επικρατούν κατά τη διάδοση. Επομένως, αναφέρουμε ρητά ότι μελετάμε την κατανομή και τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ισχύος λαμβανόμενων σημάτων, τα οποία λαμβάνονται από δέκτες ασύρματου δικτύου προτύπου IEEE 802.11b (Wi-Fi), και διαδίδονται σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου.

3.2 Η ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ

Κάτω από ιδανικές συνθήκες, αν ένα σήμα διαδιδόταν σε ένα περιβάλλον απαλλαγμένο από οποιοδήποτε σκεδαστή, τότε η ισχύς λήψης του σε έναν δέκτη θα ήταν εύκολο να μετρηθεί και να προβλεφθεί. Όμως, ένα περιβάλλον διάδοσης που να προσεγγίζει αυτές τις προϋποθέσεις είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί. Αντιθέτως, σε πραγματικές συνθήκες διάδοσης, πολύ συχνά λαμβάνουν χώρα

διάφορα φαινόμενα που εμποδίζουν την ομαλή ευθύγραμμη πορεία του σήματος. Τρεις βασικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν τη διάδοση των ραδιοσημάτων είναι η ανάκλαση, η σκέδαση και η περίθλαση. Πιο συγκεκριμένα, το σήμα ανακλάται όταν προσπίπτει σε λείες επιφάνειες με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος του σήματος, ενώ η σκέδαση, η οποία χαρακτηρίζεται από ανακλάσεις τυχαίων κατευθύνσεων, συμβαίνει όταν το σήμα προσκρούσει σε τραχειά επιφάνεια, ή σε επιφάνεια με διαστάσεις συγκρίσιμες ή μικρότερες από το μήκος κύματος του σήματος [67]. Η περίθλαση είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει όταν ανάμεσα στον πομπό και στο δέκτη του σήματος παρεμβάλλεται ένα εμπόδιο. Στην περίπτωση αυτή, κατά την πρόσκρουση του σήματος στο εμπόδιο, παρατηρείται ότι διαδίδονται δευτερογενή κύματα στο πίσω μέρος του εμποδίου [67], τα οποία εκπέμπονται λόγω της επαγωγής ρευμάτων πάνω στο εμπόδιο κατά την πρόσκρουση [68]. Όμως, το φαινόμενο της περίθλασης είναι πολύ σημαντικό στις τηλεπικοινωνίες γιατί επιτρέπει την ανίχνευση σήματος ακόμα και μετά από την παρεμβολή εμποδίου μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερος όταν το μήκος κύματος του σήματος είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις του εμποδίου, γιατί τότε το σήμα που προέρχεται από την περίθλαση εξασθενεί, χωρίς να μηδενίζεται [68]. Όμως, τις περισσότερες φορές, όταν το σήμα συμμετέχει σε κάποιο φαινόμενο που επηρεάζει την ομαλή διάδοσή του, ένα μέρος της ενέργειάς του απορροφάται από το αντικείμενο στο οποίο προσκρούει. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το μέγεθος της εξασθένησης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος και τα χαρακτηριστικά του υλικού του αντικειμένου πρόσκρουσης. Επίσης, ορισμένα υλικά επιτρέπουν τη διάθλαση των σημάτων, δηλαδή την διάδοση σημάτων μέσα από αυτά, με κατεύθυνση διάδοσης διαφορετική της αρχικής, και με ενέργεια συνήθως μικρότερη της αρχικής.

Από τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι λόγω των διαφόρων φαινομένων που επηρεάζουν την ευθύγραμμη ομαλή διάδοση των σημάτων, στον δέκτη φτάνουν τελικά πολλές εκδοχές του εκπεμπόμενου σήματος, προερχόμενες από διάφορες κατευθύνσεις, που χαρακτηρίζονται από διαφορετικά πλάτη και φάσεις. Το φαινόμενο αυτό λέγεται διάδοση πολλαπλών διαδρομών [67], [69] (multipath). Η διάδοση πολλαπλών διαδρομών έχει ως συνέπεια το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης να είναι μία αρκετά παραμορφωμένη εκδοχή του αρχικού σήματος, λόγω της διανυσματικής πρόσθεσης στο δέκτη όλων των διαφορετικών συνιστωσών του αρχικού σήματος που λαμβάνει. Επίσης, η ισχύς του σήματος που λαμβάνει ο δέκτης μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη του εκπεμπόμενου σήματος, ανάλογα με το αν οι λαμβανόμενες συνιστώσες συμβάλλουν ενισχυτικά ή όχι. Όμως, η ισχύς που λαμβάνει τελικά ο δέκτης είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθεί. Αυτό οφείλεται στο ότι είναι

πρακτικά αδύνατο να εντοπιστούν όλες οι διαφορετικές διαδρομές που ακολουθεί ένα σήμα πριν φτάσει στο δέκτη, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου το περιβάλλον διάδοσης χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό και διαφορετικά είδη σκεδαστών και εμποδίων. Επομένως, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος παίρνει στο δέκτη μία απρόβλεπτη, τυχαία τιμή, και η στατιστική κατανομή της ισχύος μπορεί να εκτιμηθεί είτε μετά από πειραματικές μετρήσεις, είτε μετά από την εφαρμογή κανόνων της στατιστικής επιστήμης. Επίσης, εκτός από τα φαινόμενα που αναφέρθηκαν, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, όπως η παρεμβολή ή ο θόρυβος, οι οποίοι προστίθενται στο λαμβανόμενο σήμα του δέκτη και δυσχεραίνουν ακόμα περισσότερο την πρόβλεψη της λαμβανόμενης ισχύος του σήματος.

Ένα ασύρματο δίκτυο του προτύπου IEEE 802.11b (Wi-Fi), το οποίο είναι και το είδος δικτύου που θα μας απασχολήσει στη συνέχεια, χρησιμοποιεί την μάντα των 2.4 GHz της ζώνης των εξαιρετικά υψηλών συχνοτήτων (Ultra High Frequencies: UHF) των ραδιοκυμάτων. Σε αυτή την μάντα συχνοτήτων το μήκος κύματος είναι της τάξης των 12.5 cm. Επίσης, σε έναν εσωτερικό χώρο, ο οποίος αποτελεί το περιβάλλον μελέτης μας, το διαδιδόμενο σήμα προσκρούει σε τοίχους, πατώματα, οροφές, αλλά και σε ένα μεγάλο και απρόβλεπτο συνήθως πλήθος σκεδαστών, όπως τα διάφορα μεγεθών και υλικών αντικείμενα και οι άνθρωποι που βρίσκονται στο χώρο. Η σύγκριση του μήκους κύματος με τις διαστάσεις των διαφόρων σκεδαστών του χώρου διάδοσης μπορεί να εξηγήσει σε τι βαθμό λαμβάνουν χώρα τα διάφορα φαινόμενα που περιγράψαμε παραπάνω, τα οποία επηρεάζουν την ομαλή πορεία του σήματος. Για παράδειγμα, τα μήκη κύματος των UHF σημάτων, όπως τα σήματα ενός Wi-Fi ασύρματου τοπικού δικτύου, έχουν διαστάσεις οι οποίες καθιστούν τα σήματα ικανά να διαπερνούν τοίχους με μέτρια εξασθένηση [1]. Αντιθέτως, ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπως το φως, τα οποία χαρακτηρίζονται από πολύ μικρά μήκη κύματος, δεν είναι ικανά να διαπερνούν τους τοίχους ενός χώρου.

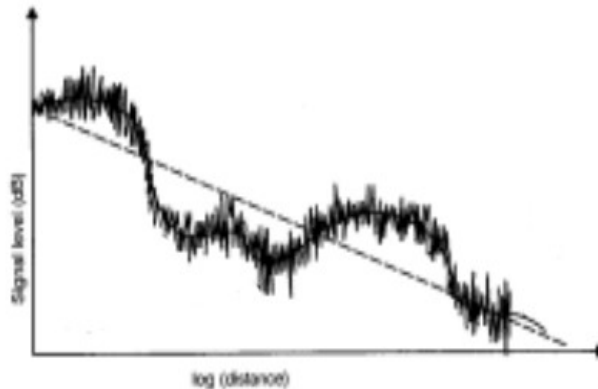
Ένα άλλο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της διάδοσης σημάτων της μάντας των 2.4 GHz είναι η απορρόφηση τους από το ανθρώπινο σώμα. Το γεγονός αυτό θα διαπιστωθεί και από πειραματικές μετρήσεις [66], που θα παρουσιάσουμε παρακάτω. Η σημαντική απορρόφηση της ισχύος από τον άνθρωπο οφείλεται στο ότι το ανθρώπινο σώμα αποτελείται κυρίως από νερό, και τα 2.4 GHz αποτελούν συχνότητα συντονισμού των μορίων του νερού [70]. Επιπλέον, το γεγονός ότι σε πολλά μέρη του κόσμου δεν χρειάζεται άδεια εκπομπής (license-free) στα 2.4 GHz, καθιστά την μάντα των 2.4 GHz μία πολύ δημοφιλή ζώνη συχνοτήτων, στην οποία λειτουργούν ασύρματα δίκτυα, αλλά και άλλες συσκευές, όπως φούρνοι μικροκυμάτων, συσκευές Bluetooth, ασύρματα τηλέφωνα που λειτουργούν στα 2.4 GHz, και εξοπλισμοί συγκόλλησης [70]. Επομένως, στα Wi-Fi δίκτυα υπάρχει

σημαντικός κίνδυνος παρεμβολών. Όμως, αν το σήμα παρεμβολής παρεμβάλλει μόνο σε μεμονωμένες συχνότητες, τότε το σήμα λήψης δεν επηρεάζεται αξιοσημείωτα από την παρεμβολή, επειδή στα IEEE 802.11b δίκτυα εφαρμόζονται τεχνικές εξάπλωσης φάσματος (spread spectrum) [71], και συνεπώς το εύρος ζώνης διάδοσης είναι μεγάλο.

Όταν σε έναν δέκτη συμβάλλουν πολλά κύματα, τα οποία διαφέρουν κατά πλάτος και κατά φάση, τότε μία μετακίνηση του δέκτη θα είχε ως συνέπεια η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος να αλλάξει δραματικά. Η αλλαγή αυτή οφείλεται στο ότι σε κάθε μία θέση του χώρου οι διάφορες κυματικές συνιστώσες συμβάλλουν με τελείως διαφορετικό και τυχαίο τρόπο. Για να παρατηρηθούν στο δέκτη δραματικές αλλαγές στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος, αρκεί ο δέκτης να μετακινηθεί κατά μία απόσταση συγκρίσιμη ή μεγαλύτερη του μισού μήκους κύματος του σήματος [67]. Επομένως, στα δίκτυα IEEE 802.11b, όπου το μήκος κύματος των σημάτων είναι της τάξης των 12.5 cm, αρκεί ο δέκτης να μετακινηθεί μερικά εκατοστά για να μεταβληθεί ραγδαία η μετρούμενη ισχύς. Όμως, παρά το γεγονός ότι μικρές μετακινήσεις του δέκτη προκαλούν απότομες αυξήσεις ή μειώσεις στην μετρούμενη ισχύ, αν μελετηθεί συνολικά η μεταβολή της μετρούμενης ισχύος του δέκτη ως προς την απόσταση μετακίνησης του δέκτη, για ένα μεγάλο εύρος τιμών απόστασης, τότε παρατηρείται διαισθητικά ότι η μέση τιμή της ισχύος έχει την τάση να μειώνεται σταδιακά και αργά με την αύξηση της απόστασης από τον πομπό, ενώ παράλληλα παρατηρείται μία πολύ αργή αυξομείωσή της [69]. Η συμπεριφορά αυτή της μετρούμενης ισχύος ως προς την απόσταση απεικονίζεται ποιοτικά στο ΣΧΗΜΑ 3.1. Η ένταση με την οποία συμβαίνουν οι μεταβολές στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά του σήματος, του ασύρματου συστήματος και του περιβάλλοντος διάδοσης.

Συμπερασματικά, τα σήματα που διαδίδονται μέσω ενός IEEE 802.11b ασύρματου δικτύου επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, με αποτέλεσμα οι δέκτες να λαμβάνουν σήματα τα οποία διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από τα εκπεμπόμενα, έχοντας μεταβληθεί με απρόβλεπτο τρόπο. Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη διάδοση των σημάτων είναι το περιβάλλον διάδοσης και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Ιδιαίτερος, όταν ένα σήμα διαδίδεται σε έναν εσωτερικό χώρο, όπως για παράδειγμα σε έναν όροφο ενός κτιρίου, τότε το λαμβανόμενο σήμα στον δέκτη είναι ακόμα πιο απρόβλεπτο. Αυτό συμβαίνει επειδή σε έναν εσωτερικό χώρο υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από σκεδαστές, οι οποίοι είναι συγκεντρωμένοι σε μία σχετικά μικρή έκταση κοντά στο σημείο που είναι τοποθετημένος ο δέκτης. Επομένως, σε έναν εσωτερικό χώρο η πυκνότητα των σκεδαστών είναι συνήθως μεγάλη [66], με αποτέλεσμα τα διάφορα φαινόμενα που επηρεάζουν τη διάδοση των

σημάτων να είναι πιο έντονα. Έτσι, σε έναν εσωτερικό χώρο, οι μεταβολές του σήματος στον δέκτη είναι ιδιαίτερος δύσκολο να προβλεφθούν. Επίσης, το γεγονός ότι σε έναν εσωτερικό χώρο πολλές φορές είναι δύσκολο να βρεθεί οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη (Line Of Sight: LOS) [66], [1], αλλά και το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά ενός εσωτερικού χώρου συνήθως μεταβάλλονται με το χρόνο, αυξάνουν ακόμα περισσότερο την τυχαιότητα του σήματος λήψης στον δέκτη.



ΣΧΗΜΑ 3.1: ΠΟΙΟΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΥ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΟΜΠΟ.

3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΛΗΨΗΣ ΣΤΟΝ ΔΕΚΤΗ

Οι μεταβολές της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, καθώς ο δέκτης μετακινείται, μπορούν να χωριστούν σε δύο διαφορετικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τη βαθμιαία μείωση της τοπικής μέσης ισχύος του λαμβανόμενου σήματος με την αύξηση της απόστασης από το δέκτη, αλλά και τις αργές αυξομειώσεις της. Στην περίπτωση αυτή, οι μεταβολές στο λαμβανόμενο σήμα ονομάζονται διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large-scale fading). Από την άλλη, οι μεταβολές της δεύτερης κατηγορίας ονομάζονται διαλείψεις μικρής κλίμακας (small-scale fading), και εκφράζουν τις δραματικές μεταβολές στην ισχύ που μετράει ο δέκτης όταν αυτός μετακινηθεί κατά μία πολύ μικρή απόσταση. Συνήθως, η μοντελοποίηση του λαμβανόμενου σήματος σε έναν δέκτη χωρίζει το σήμα σε δύο όρους, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τις διαλείψεις μεγάλης και μικρής κλίμακας αντίστοιχα [66], [67].

Ο όρος της λαμβανόμενης ισχύος ο οποίος εμφανίζει διαλείψεις μεγάλης κλίμακας θεωρείται ότι είναι ο τοπικός μέσος όρος (local mean) της ισχύος του σήματος λήψης. Ο τοπικός μέσος όρος του σήματος λήψης σε μία συγκεκριμένη θέση ισούται με το μέσο όρο ενός ικανοποιητικού αριθμού δειγματικών

τιμών ισχύων που μετράει ένας δέκτης στη θέση αυτή. Ισοδύναμα, στις κινητές επικοινωνίες, ο τοπικός μέσος όρος θα μπορούσε να υπολογιστεί από το μέσο όρο μετρήσεων ισχύος του δέκτη καθώς αυτός μετακινείται αποστάσεις ίσες με 20 ως 40 φορές το μήκος κύματος του σήματος [69]. Όμως, είναι πολύ πιθανό η τιμή του τοπικού μέσου όρου σε μία θέση να διαφέρει από την τιμή του τοπικού μέσου όρου σε μία άλλη θέση, η οποία ανήκει στο ίδιο περιβάλλον διάδοσης και απέχει την ίδια απόσταση από τον πομπό. Η διαφορά ανάμεσα στους τοπικούς μέσους όρους των ισχύων που λαμβάνουν δέκτες οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις, που ισαπέχουν όμως από τον πομπό, οφείλεται στο γεγονός ότι το περιβάλλον διάδοσης δεν είναι ομοιόμορφο. Δηλαδή, τα σήματα που φτάνουν στους δέκτες που ισαπέχουν από τον πομπό, έχουν επηρεαστεί με διαφορετικό και απρόβλεπτο τρόπο από το περιβάλλον κατά τη διάδοσή τους. Για παράδειγμα, μπορεί η διάδοση του σήματος να εμποδίζεται από διαφορετικό αριθμό ή υλικό τοίχων, ή από διαφορετικό αριθμό ανθρώπων, σε έναν απλό εσωτερικό χώρο, μέχρι το σήμα να φτάσει σε ισαπέχοντες από τον πομπό δέκτες. Επομένως, η σκίαση (shadowing), η οποία είναι το φαινόμενο που εκφράζει την ανομοιομορφία αυτή του περιβάλλοντος, επηρεάζει με τυχαίο τρόπο το σήμα λήψης σε μία θέση, και ο τοπικός μέσος όρος μελετάται σαν μία τυχαία μεταβλητή. Συγκεκριμένα, έχει διαπιστωθεί ότι, με πολύ καλή ακρίβεια, ο τοπικός μέσος όρος της ισχύος ενός λαμβανόμενου σήματος που μετράται σε dB, μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί λογαριθμική-κανονική κατανομή, με μέση τιμή ίση με απόλυτη μέση τιμή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος [66], [67], [69]. Η λογαριθμική-κανονική κατανομή των τοπικών μέσων όρων εξηγεί τις αργές διαλείψεις μεγάλης κλίμακας.

Αν και ο τοπικός μέσος όρος της μετρούμενης ισχύος είναι τυχαία μεταβλητή, και συνεπώς είναι δύσκολο να εκτιμηθεί με ακρίβεια, η μέση τιμή των τοπικών μέσων όρων μπορεί να εκτιμηθεί, χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο μοντέλο απωλειών διαδρομής (path loss). Κατά καιρούς, έχουν προταθεί πολλά μοντέλα απωλειών διαδρομής, τα οποία εκφράζουν το λόγο της μέσης εκπεμπόμενης ισχύος από τον πομπό προς τη μέση ισχύ λήψης στον δέκτη [69]. Κάθε μοντέλο απωλειών διαδρομής προσαρμόζεται πάνω στις ιδιαίτερες συνθήκες του περιβάλλοντος διάδοσης, και μοντελοποιεί την διάδοση του σήματος λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες παραδοχές. Επομένως, η χρησιμοποίηση ενός κατάλληλου μοντέλου απωλειών διαδρομής, το οποίο αναφέρεται σε συνθήκες διάδοσης οι οποίες προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά τις πραγματικές συνθήκες, μπορεί να μας βοηθήσει να υπολογίσουμε με καλή προσέγγιση την απόλυτη μέση τιμή της ισχύος σε έναν δέκτη που απέχει μία συγκεκριμένη απόσταση από τον πομπό. Τότε, μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι η απόλυτη μέση τιμή αποτελεί τη μέση τιμή των τοπικών μέσων όρων που αφορούν την ίδια απόσταση από τον πομπό, οι

οποίοι όπως έχουμε αναφέρει, μπορούμε να παραδεχτούμε ότι ακολουθούν λογαριθμική-κανονική κατανομή.

Όμως, δεν αρκεί μόνο η μοντελοποίηση των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας. Για να επιτευχθεί μία ολοκληρωμένη και συνολική μοντελοποίηση της μετρούμενης ισχύος στον δέκτη, πρέπει να χρησιμοποιηθούν στατιστικά μοντέλα που να λαμβάνουν υπόψη και τις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Μία κλασική παραδοχή στην επιστήμη των τηλεπικοινωνιών είναι ότι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, η οποία μεταβάλλεται συνεχώς και απότομα εμφανίζοντας διαλείψεις μικρής κλίμακας, αν μελετηθεί συνολικά μέσα σε ένα μεγάλο εύρος τιμών αποστάσεων από τον πομπό, εμφανίζει μία μέση τιμή, η οποία μεταβάλλεται αργά, και ισοδυναμεί με τους τοπικούς μέσους όρους, οι οποίοι εμφανίζουν διαλείψεις μεγάλης κλίμακας. Επομένως, σύμφωνα με την κλασική αυτή παραδοχή, η ισχύς που μετρά ένας δέκτης είναι το άθροισμα δύο όρων. Ο πρώτος όρος είναι ο τοπικός μέσος όρος της ισχύος, ο οποίος ακολουθεί λογαριθμική-κανονική κατανομή, οφείλεται στην ανομοιομορφία του περιβάλλοντος διάδοσης, και εκφράζει τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας. Από την άλλη, σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, ο δεύτερος όρος εκφράζει τις διαλείψεις μικρής κλίμακας, και επιπλέον θεωρείται ότι οφείλεται αποκλειστικά στο φαινόμενο της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών (multipath). Επομένως, σύμφωνα με το μοντελοποίηση αυτή, η γραφική παράσταση της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος ως προς την απόσταση από τον πομπό, παρουσιάζει δύο χαρακτηριστικές συμπεριφορές. Η πρώτη συμπεριφορά γίνεται αντιληπτή μελετώντας το διάγραμμα μακροσκοπικά, και αφορά το μέσο όρο της περιβάλλουσας, ο οποίος μεταβάλλεται αργά, αντιπροσωπεύοντας τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας των τοπικών μέσων όρων, οι οποίοι ακολουθούν λογαριθμική-κανονική κατανομή. Η δεύτερη συμπεριφορά που παρατηρείται αφορά τις μεταβολές της περιβάλλουσας, η οποία μεταβάλλεται δραματικά γύρω από τις μέσες τιμές της, οι οποίες εμφανίζουν την προηγούμενη συμπεριφορά. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η πρώτη συμπεριφορά αντιπροσωπεύει την ανομοιομορφία του περιβάλλοντος, ενώ η δεύτερη θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το φαινόμενο της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών [72].

Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα που αναλύουν το λαμβανόμενο σήμα στον δέκτη σύμφωνα με την προηγούμενη λογική. Ένα πολύ δημοφιλές μαθηματικό μοντέλο, το οποίο περιγράφει τη συμπεριφορά της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος, είναι η κατανομή Rayleigh. Μία βασική προϋπόθεση για να ακολουθεί η περιβάλλουσα του σήματος λήψης στον δέκτη την κατανομή Rayleigh, είναι να συμβάλλουν στο δέκτη ένας μεγάλος αριθμός από συνιστώσες σημάτων που προέρχονται από πολλαπλές διαδρομές, οι οποίες έχουν τυχαίες φάσεις, και πλάτη τα οποία ακολουθούν την ίδια

κατανομή και έχουν ίσες μέσες τιμές και διασπορές [68]. Από τη βασική προϋπόθεση αυτή, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η κατανομή Rayleigh θα μπορούσε να είναι έγκυρη μόνο σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή (Non-Line-Of-Sight: NLOS) μεταξύ πομπού και δέκτη [69], γιατί μόνο τότε οι συμβαλλόμενες συνιστώσες στον δέκτη είναι πιθανό να έχουν συγκρίσιμα πλάτη. Επίσης, η κατανομή Rayleigh περιγράφει τη στατιστική συμπεριφορά της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος λόγω της επίδρασης αποκλειστικά του φαινομένου διάδοσης πολλαπλών διαδρομών, και ερμηνεύει τις διαλείψεις μικρής κλίμακας, οι οποίες αποτελούν τις δραματικές μεταβολές του λαμβανόμενου σήματος, γύρω από τον τοπικό μέσο όρο της περιβάλλουσας.

Σε περιπτώσεις, όπως η διάδοση σε μία μακροκυψέλη ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών, είναι σχεδόν αδύνατο να εντοπιστεί οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, και επομένως η κατανομή Rayleigh μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγάλη ακρίβεια. Όμως, υπάρχουν πολλές άλλες περιπτώσεις, όπως η διάδοση σε μικροκυψέλες συστημάτων κινητών επικοινωνιών, ή η διάδοση σε δορυφορικά συστήματα, όπου η ύπαρξη οπτικής επαφής (Line-Of-Sight: LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη δεν είναι σπάνια [73], και συνεπώς η κατανομή Rayleigh δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Το μαθηματικό μοντέλο το οποίο είναι κατάλληλο σε περιπτώσεις όπου υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη είναι η στατιστική κατανομή Rice. Έχει αποδειχθεί ότι η περιβάλλουσα του σήματος λήψης στον δέκτη μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί κατανομή Rice, όταν στον δέκτη συμβάλλει ένας μεγάλος αριθμός από κυματικές συνιστώσες, από τις οποίες κάποια συνιστώσα είναι σημαντικά ισχυρότερη από τις άλλες [69], [22]. Συνήθως, η ισχυρή συνιστώσα είναι το σήμα που φτάνει στον δέκτη απευθείας, λόγω οπτικής επαφής, ενώ οι υπόλοιπες ασθενέστερες συνιστώσες προέρχονται από το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών. Η κατανομή Rice προκύπτει από τη συμβολή στον δέκτη της ισχυρής και των ασθενών κυματικών συνιστωσών. Συνεπώς, η κατανομή Rice συχνά αντικαθιστά την κατανομή Rayleigh σε περιπτώσεις όπου υπάρχει οπτική επαφή ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη. Επίσης, όπως και με την κατανομή Rayleigh, η κατανομή Rice εκφράζει τις διαλείψεις μικρής κλίμακας που οφείλονται στο φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών.

Παρά το γεγονός ότι έχουν ανακαλυφθεί αρκετά μαθηματικά μοντέλα που βοηθούν στην πρόβλεψη του σήματος λήψης ενός δέκτη, μερικές φορές οι συνθήκες διάδοσης ενός σήματος καθιστούν πολύ δύσκολη την ικανοποιητική προσαρμογή ενός μοντέλου στις πραγματικές συνθήκες. Για παράδειγμα, το γεγονός ότι σε έναν εσωτερικό χώρο το σήμα που λαμβάνει ένας δέκτης είναι ιδιαίτερος απρόβλεπτο, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα να μην τηρούνται σε μεγάλο βαθμό οι παραδοχές ενός μαθηματικού μοντέλου, ή η διασπορά ενός μοντέλου να είναι απαγορευτικά μεγάλη. Επιπλέον, όπως

παρατηρήθηκε στο RADAR [22], σε έναν εσωτερικό χώρο, η κατανομή Rayleigh δεν είναι πάντα αξιόπιστη για τη μελέτη του σήματος λήψης, επειδή η παραδοχή ότι δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη δεν είναι πάντα ρεαλιστική. Επίσης, υποστήριξαν πως, αν και η κατανομή Rice φαίνεται πιο ρεαλιστική για τον εσωτερικό χώρο μελέτης τους, θα ήταν πρακτικά δύσκολο να χρησιμοποιηθεί, επειδή θα ήταν δύσκολος ο υπολογισμός των παραμέτρων της, δηλαδή της ισχύος του ισχυρής συνιστώσας του λαμβανόμενου σήματος και της τοπικής μέσης ισχύος των ασθενών συνιστωσών.

Από τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι η πρόβλεψη της ισχύος του σήματος που λαμβάνει ένας δέκτης σε έναν εσωτερικό χώρο δεν είναι εύκολη υπόθεση. Επομένως, στην περίπτωση της διάδοσης σε εσωτερικό χώρο, θα ήταν χρήσιμο αν γινόταν μία προσεχτική πειραματική μελέτη της στατιστικής συμπεριφοράς του σήματος λήψης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη [66], η οποία αποτελεί μία σε βάθος πειραματική μελέτη της κατανομής και των στατιστικών χαρακτηριστικών των σημάτων που λαμβάνονται από δέκτες ασύρματου δικτύου προτύπου IEEE 802.11b (Wi-Fi), και διαδίδονται σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου.

3.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ ΤΙΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ, ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΑΦΟΡΑ ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ ΜΕΣΩ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ IEEE 802.11b

Στην [66] υπάρχει μία εκτενής πειραματική μελέτη των στατιστικών ιδιοτήτων της ισχύος των σημάτων που διαδίδονται σε εσωτερικούς χώρους και λαμβάνονται από δέκτες IEEE 802.11b ασύρματων δικτύων.

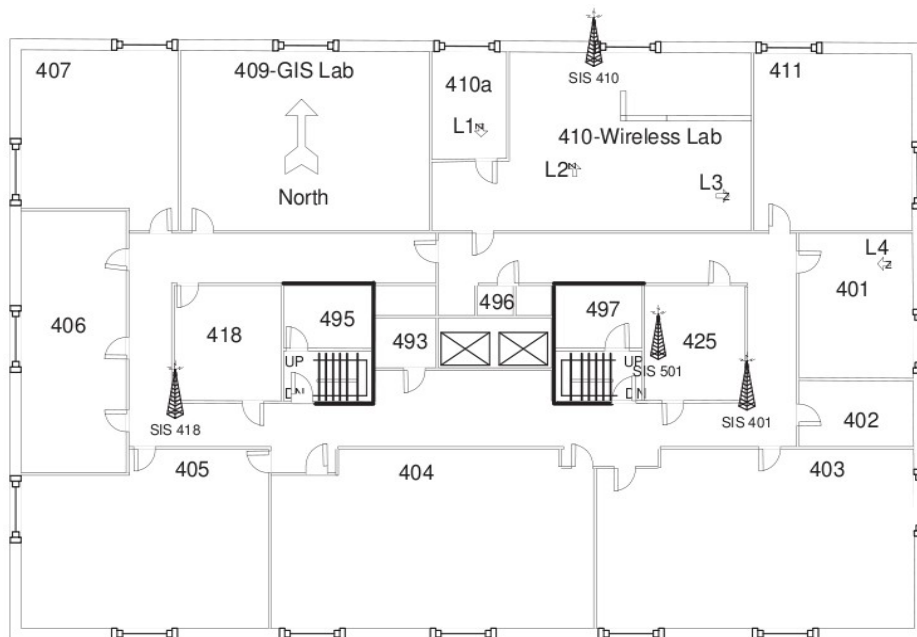
Ένα σημαντικό κίνητρο για την πειραματική μελέτη αυτή ήταν η σχετική ασάφεια και ανεπάρκεια πληροφοριών σχετικά με την κατανομή της ισχύος λαμβανόμενων σημάτων σε περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων, οι οποίες θα βοηθούσαν στην ανάπτυξη συστημάτων εντοπισμού θέσεων σε εσωτερικούς χώρους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αντικρουόμενων απόψεων προκύπτουν από τις μελέτες [74] και [70], οι οποίες αφορούσαν διάδοση σε εσωτερικό χώρο μέσω υποδομής ασύρματου δικτύου. Σύμφωνα με τις μελέτες αυτές, ενώ η πρώτη ισχυρίζεται ότι η ισχύς των λαμβανόμενων σημάτων ακολουθεί κανονική κατανομή, η άλλη μελέτη απορρίπτει αυτό το συμπέρασμα. Όμως, και οι δύο αυτές μελέτες χαρακτηρίζονταν από ανεπαρκή τεκμηρίωση των συμπερασμάτων τους.

Αντιθέτως, η πειραματική έρευνα της μελέτης [66] λαμβάνει υπόψη πολλές διαφορετικές

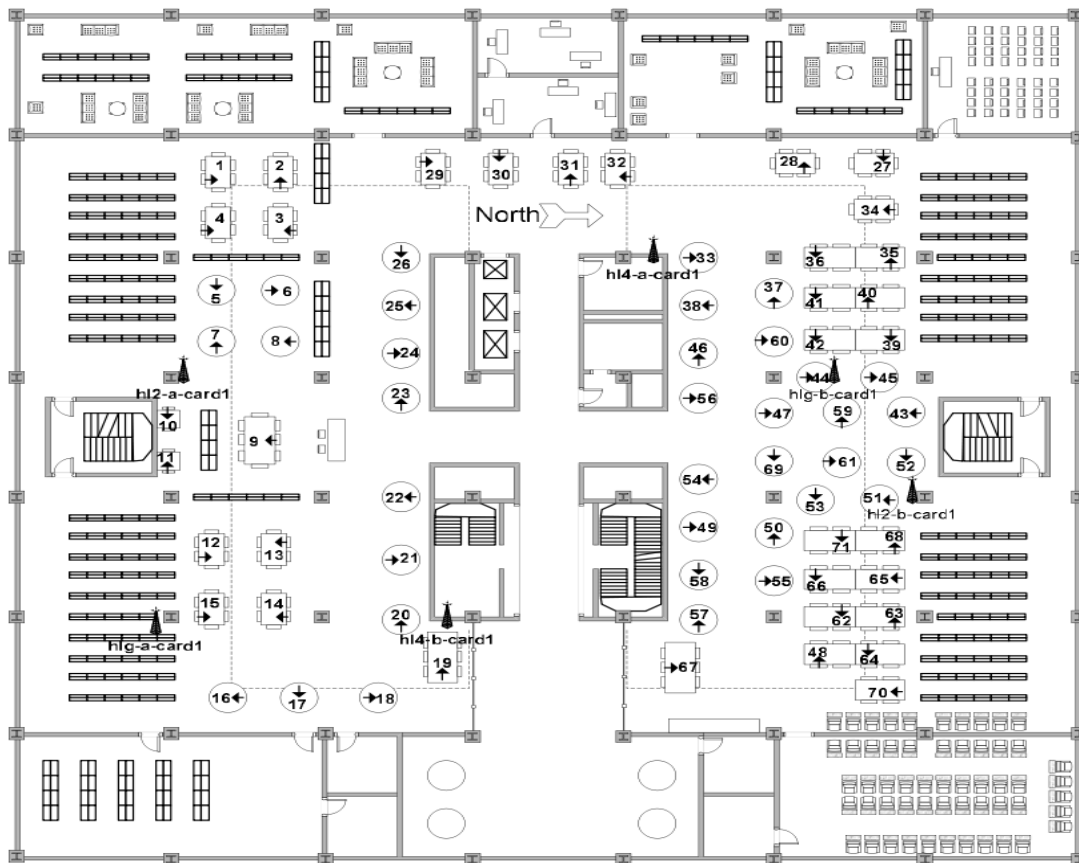
παραμέτρους, είναι εκτενής και εξετάζει το θέμα της στατιστικής συμπεριφοράς της μετρούμενης ισχύος σε βάθος. Τα συμπεράσματα της έρευνας αυτής, βοηθούν στον ορθό υπολογισμό των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” του χώρου μελέτης, αλλά και στην επιτυχημένη εκτίμηση της κατανομής και των στατιστικών χαρακτηριστικών της μετρούμενης ισχύος. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται μερικά βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη [66] σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τις στατιστικές ιδιότητες της ισχύος των σημάτων λήψης, και τους παράγοντες από τους οποίους επηρεάζονται αυτά.

3.4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής έρευνας [66], έγιναν μετρήσεις σε διάφορες θέσεις δύο διαφορετικών εσωτερικών χώρων. Οι μετρήσεις της ισχύος των σημάτων πραγματοποιούνταν από φορητούς υπολογιστές (laptops), οι οποίοι ήταν εξοπλισμένοι με κάρτες διεπαφής δικτύου (Network Interface Cards: NICs), για ασύρματο δίκτυο του προτύπου IEEE 802.11b. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε δύο διαφορετικά είδη εσωτερικών χώρων, οι οποίοι διέφεραν κυρίως ως προς τις αποστάσεις των πομπών από τους δέκτες, αλλά και ως προς την πυκνότητα των σκεδαστών.



ΣΧΗΜΑ 3.2: Ο ΤΕΤΑΡΤΟΣ ΟΡΟΦΟΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ SCHOOL OF INFORMATION SCIENCES ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΤΟΥ PITTSBURGH. ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS401, SIS410 ΚΑΙ SIS418 ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΤΕΤΑΡΤΟ ΟΡΟΦΟ, ΕΝΩ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS501 ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΣΤΟΝ ΠΕΜΠΤΟ ΟΡΟΦΟ.



ΣΧΗΜΑ 3.3: Ο ΠΡΩΤΟΣ ΟΡΟΦΟΣ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ HILLMAN ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΤΟΥ PITTSBURGH. ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ hlg-a-card1 ΚΑΙ hlg-b-card1 ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΙΣΟΓΕΙΟ, ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ hl2-a-card1 ΚΑΙ hl2-b-card1 ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΔΕΥΤΕΡΟ ΟΡΟΦΟ, ΕΝΩ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ hl4-a-card1 ΚΑΙ hl4-b-card1 ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΤΕΤΑΡΤΟ ΟΡΟΦΟ.

Το πρώτο είδος εσωτερικού χώρου στο οποίο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις είναι ένα περιβάλλον μικρών γραφείων (small office environment). Ο εσωτερικός αυτός χώρος, ο οποίος απεικονίζεται στο ΣΧΗΜΑ 3.2, αποτελεί τον τέταρτο όροφο ενός οκταόροφου κτιρίου (το οποίο είναι το School of Information Sciences του Πανεπιστημίου του Pittsburgh). Οι διαστάσεις του χώρου μελέτης είναι περίπου 23 m x 37 m. Επίσης, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε διάφορες θέσεις του χώρου, και λαμβάνονται υπόψη τα σήματα που εκπέμπονται από τέσσερα σημεία πρόσβασης (Access Points: APs), από τα οποία τα τρία βρίσκονται στον τέταρτο όροφο του κτιρίου, και ένα βρίσκεται στον πέμπτο όροφο.

Το δεύτερο είδος εσωτερικού χώρου αποτελεί ένα περιβάλλον μεγάλης αίθουσας (large hall environment). Ο χώρος αυτός είναι ο πρώτος όροφος του κτιρίου μιας βιβλιοθήκης (βιβλιοθήκη Hillman του Πανεπιστημίου του Pittsburgh), η οποία αποτελείται από πέντε πατώματα, περιλαμβάνοντας και το ισόγειο. Στο ΣΧΗΜΑ 3.3 φαίνεται μία κάτοψη του χώρου. Οι διαστάσεις του χώρου μελέτης είναι περίπου 60 m x 60 m. Τα σημεία πρόσβασης που εκπέμπουν σήματα βρίσκονται σε διαφορετικούς ορόφους από τους δέκτες. Επίσης, όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο ανοιχτές περιοχές του πρώτου ορόφου, οι οποίες μοιράζονται την ίδια οροφή με τον δεύτερο όροφο, και στο ΣΧΗΜΑ 3.3 παρουσιάζονται με διακεκομμένες γραμμές.

Στην πειραματική μελέτη αυτή ερευνάται η επίδραση που έχουν στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength: RSS) και στα στατιστικά χαρακτηριστικά αυτής, διάφοροι παράγοντες, όπως η παρουσία ή όχι του χρήστη του φορητού υπολογιστή κατά τη μέτρηση και ο προσανατολισμός του χρήστη, το είδος της κάρτας ασύρματου δικτύου των φορητών υπολογιστών, η χρονική στιγμή μέσα στη μέρα ή την εβδομάδα των μετρήσεων, η ελάχιστη διάρκεια των μετρήσεων για να υπολογιστεί ένα “δαχτυλικό αποτύπωμα”, και η μορφολογία, τα υλικά και οι περιβαλλοντικές συνθήκες του εσωτερικού χώρου στον οποίον πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Παράλληλα με τους παράγοντες αυτούς, ερευνάται και η επίδραση που έχουν στα χαρακτηριστικά της μετρούμενης ισχύος και άλλοι παράγοντες, όπως η απόσταση του δέκτη από τον πομπό, η ύπαρξη ή όχι οπτικής επαφής, και η πυκνότητα των σκεδαστών γύρω από το δέκτη. Επίσης, πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με σταθερούς τους δέκτες, ενώ δεν ερευνήθηκε η επίδραση του προσανατολισμού, της κατευθυντικότητας και του τύπου των κεραιών, στα χαρακτηριστικά της μετρούμενης ισχύος.

3.4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ WLAN ΚΕΡΑΙΑ ΛΗΨΗΣ

Για να διαπιστωθεί η επίδραση της παρουσίας του ανθρώπινου σώματος του χρήστη του φορητού υπολογιστή στην μετρούμενη ισχύ, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με και χωρίς την παρουσία του χρήστη, και σχηματίστηκαν οι αντίστοιχες κατανομές μετρούμενης ισχύος. Συγκρίνοντας τις κατανομές ισχύος που αντιστοιχούσαν σε μετρήσεις με και χωρίς την παρουσία του χρήστη, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η παρουσία του χρήστη του φορητού υπολογιστή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είχε ως αποτέλεσμα η κατανομή της μετρούμενης ισχύος να εξαπλωθεί σημαντικά γύρω από μία νέα, ελαφρώς μεταβαλλόμενη, μέση τιμή.

Μία πιθανή εξήγηση της σημαντικής εξάπλωσης της κατανομής της μετρούμενης ισχύος, όταν ο χρήστης είναι παρών στις μετρήσεις, είναι ότι τα σήματα ανακλώνται και σκεδάζονται πάνω στο σώμα του χρήστη, με αποτέλεσμα η μετρούμενη ισχύς να μεταβάλλεται αρκετά.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τις μετρήσεις αυτές είναι ότι κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος εντοπισμού θέσης, είναι πολύ σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της παρουσίας του σώματος του χρήστη. Επομένως, αν στο σύστημα εντοπισμού θέσης που σχεδιάζεται, πρόκειται να είναι παρόντες οι χρήστες των φορητών υπολογιστών κατά τη λειτουργία του συστήματος, τότε είναι απαραίτητο οι μετρήσεις για τον υπολογισμό των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” να γίνονται παρουσία του χρήστη του φορητού υπολογιστή. Αν δεν λαμβάνεται υπόψη η παρουσία ή η απουσία του χρήστη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, τότε η πιθανότητα εσφαλμένης λειτουργίας του συστήματος αυξάνεται.

Όμως, δεν είναι μόνο το γεγονός της παρουσίας του χρήστη που επηρεάζει τις τιμές της μετρούμενης ισχύος. Οι τιμές της μετρούμενης ισχύος μεταβάλλονται αισθητά και όταν αλλάζει ο προσανατολισμός του σώματος του χρήστη του φορητού υπολογιστή. Η επίδραση αυτή του προσανατολισμού του χρήστη, η οποία είχε αναφερθεί και στη μελέτη του συστήματος RADAR [22], επιβεβαιώθηκε έπειτα από μία σειρά πειραματικών μετρήσεων.

Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι, όταν ο προσανατολισμός του χρήστη που χειριζόταν τον φορητό υπολογιστή είχε ως αποτέλεσμα το σώμα του χρήστη να βρίσκεται ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη και να παρεμβαίνει στην ομαλή διάδοση του σήματος, τότε η μέση τιμή των μετρούμενων ισχύων μειωνόταν αισθητά. Μία εξήγηση της συμπεριφοράς αυτής είναι ότι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στα 2.4 GHz, που είναι η μπάντα λειτουργίας του IEEE 802.11b δικτύου, η απορρόφηση του σήματος από το ανθρώπινο σώμα είναι πολύ μεγάλη. Έτσι, όταν το ανθρώπινο σώμα εμποδίζει την άμεση διάδοση του σήματος μεταξύ πομπού και δέκτη, τότε οι τιμές της μετρούμενης ισχύος μειώνονται σημαντικά. Από όλα αυτά συμπεραίνεται ότι για να είναι αξιόπιστο το σύστημα εντοπισμού θέσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός του χρηστών των φορητών υπολογιστών.

3.4.3 ΣΩΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΚΑΡΤΑΣ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Με μία σειρά από κατάλληλες πειραματικές μετρήσεις, ερευνήθηκε ο βαθμός στον οποίον οι τιμές των μετρούμενων ισχύων εξαρτώνται από το είδος των καρτών ασύρματου δικτύου των φορητών υπολογιστών. Ήδη από τις μελέτες [37], [75] είχε αναφερθεί ότι μέσω διαφορετικών ειδών καρτών ασύρματου δικτύου μπορούσαν να υπολογιστούν διαφορετικά “δαχτυλικά αποτυπώματα”.

Κάθε κάρτα ασύρματου IEEE 802.11b δικτύου ενός κατασκευαστή διαφέρει από την κάρτα ενός άλλου κατασκευαστή ως προς διάφορους παράγοντες, όπως η ακρίβεια μέτρησης της ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων, το εύρος των τιμών που μπορούν να μετρήσουν, και η ελάχιστη απόσταση στην οποία οι ισχείς δύο σημάτων μπορούν να θεωρηθούν ότι έχουν ξεχωριστές τιμές.

Από μετρήσεις έχει παρατηρηθεί ότι κάρτες ασύρματου δικτύου διαφορετικών κατασκευαστών δίνουν μετρήσεις με μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις οι οποίες διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Άλλωστε, το γεγονός ότι οι κάρτες δικτύου διαφορετικών κατασκευαστών έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, δικαιολογεί την ασυμφωνία στις μετρήσεις. Επομένως, σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται η ίδιου τύπου κάρτα ασύρματου δικτύου σε όλες τις μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα κατά το offline και το online στάδιο. Επιπλέον, συγκρίνοντας δύο διαφορετικές κάρτες του ίδιου ακριβώς τύπου και κατασκευαστή, παρατηρήθηκαν διαφορές στις μέσες τιμές των μετρούμενων ισχύων της τάξης του 1 dB, ενώ οι διαφορές ως προς τα άλλα στατιστικά χαρακτηριστικά της μετρούμενης ισχύος ήταν πολύ μικρές.

Σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των καρτών ασύρματου δικτύου που ενδιαφέρουν τον σχεδιαστή του συστήματος είναι το εύρος τιμών ισχύος που μπορούν να μετρηθούν, και η τυπική απόκλιση των τιμών της μετρούμενης ισχύος.

Σχετικά με το εύρος των μετρήσεων, η κάρτα δικτύου που έχει τη δυνατότητα να μετρήσει μεγάλο εύρος τιμών ισχύων λαμβανόμενων σημάτων, δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα εντοπισμού θέσης να αναγνωρίσει πολλές διαφορετικές υποψήφιες θέσεις, μετρώντας τιμές ισχύος με επαρκώς διαφορετικές μέσες τιμές στις θέσεις αυτές.

Από την άλλη, ένα σύστημα εντοπισμού θέσης είναι καλό να μετρά τιμές ισχύος σε μία θέση, οι οποίες να έχουν μικρή τυπική απόκλιση. Αυτό είναι καλό να ισχύει, γιατί αν η τυπική απόκλιση σε μία θέση είναι μικρή, τότε μειώνεται η πιθανότητα η μετρούμενη τιμή ισχύος στη θέση αυτή να είναι πιο κοντά στη μέση τιμή μίας άλλης υποψήφιας θέσης, και επομένως μειώνεται η πιθανότητα σφάλματος στην εκτίμηση μιας θέσης. Όμως, δύο κάρτες δικτύου διαφορετικού τύπου είναι δυνατό να παίρνουν μετρήσεις με διαφορετικές τυπικές αποκλίσεις, ακόμα και αν καταγράφουν μετρήσεις στην ίδια ακριβώς θέση και μετρούν τα ίδια σήματα κάτω από τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η διαφορά αυτή στις τυπικές αποκλίσεις οφείλεται στα διαφορετικά εύρη τιμών ισχύων που μπορούν να μετρήσουν οι κάρτες δικτύων διαφορετικού τύπου. Έτσι, αν μία κάρτα δικτύου έχει την ικανότητα να καταγράφει μεγάλο εύρος τιμών ισχύος, τότε πραγματοποιεί μετρήσεις με μεγαλύτερη ανάλυση, και καταγράφει τιμές με μεγαλύτερη μεταβλητότητα και άρα μεγαλύτερη τυπική απόκλιση στο

λαμβανόμενο σήμα. Όμως, αν η κάρτα δικτύου έχει τη δυνατότητα να καταγράφει ένα μικρό εύρος τιμών ισχύος, τότε ένας μεγάλος αριθμός από πραγματικές τιμές ισχύος μπορεί να αντιστοιχισθούν από την κάρτα δικτύου στην ίδια καταγραφόμενη τιμή, και επομένως η τυπική απόκλιση των μετρούμενων τιμών ισχύος να είναι μικρή.

Επομένως, σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, η IEEE 802.11b κάρτα θα έπρεπε να επιλέγεται έτσι ώστε να έχει τη δυνατότητα να καταγράφει όσο το δυνατό μεγαλύτερο εύρος τιμών ισχύος, αλλά παράλληλα να μετρά τιμές με όσο το δυνατό μικρότερη τυπική απόκλιση. Όμως, οι κάρτες δικτύου διαφορετικού τύπου παρέχουν εργαλεία λογισμικού διαφορετικής ποιότητας, τα οποία πολλές φορές περιορίζουν την συλλογή και την αναγραφή των δεδομένων. Έτσι, ο σχεδιαστής του συστήματος εντοπισμού θέσης οφείλει να επιλέξει την καταλληλότερη για το σύστημα IEEE 802.11b κάρτα, βρίσκοντας την ισορροπία ανάμεσα στους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

3.4.4 Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

Στον εσωτερικό χώρο που αποτελεί περιβάλλον μικρών γραφείων (ΣΧΗΜΑ 3.2), πάρθηκαν μετρήσεις ισχύος σε διάφορες θέσεις, για σήματα προερχόμενα από διάφορα σημεία πρόσβασης, και σχηματίστηκαν συνολικά 75 ιστογράμματα των μετρούμενων ισχύων. Από τα 75 αυτά ιστογράμματα, τα 64 παρουσίαζαν μία σημαντική εκτροπή αριστερά της μέσης τιμής (left-skewed), τα 7 ήταν συμμετρικά, ενώ τα 4 παρουσίαζαν σημαντική εκτροπή δεξιά της μέσης τιμής (right-skewed). Από την άλλη, στον εσωτερικό χώρο που αποτελεί περιβάλλον μεγάλης αίθουσας (ΣΧΗΜΑ 3.3), σχηματίστηκαν συνολικά 299 ιστογράμματα των μετρούμενων ισχύων, από τα οποία τα 191 παρουσίαζαν μία σημαντική εκτροπή αριστερά της μέσης τιμής, τα 51 ήταν συμμετρικά, ενώ τα 57 παρουσίαζαν σημαντική εκτροπή δεξιά της μέσης τιμής.

Από αυτά συμπεραίνεται ότι η κατανομή της μετρούμενης ισχύος δεν είναι δεδομένη σε έναν εσωτερικό χώρο, αλλά ανάλογα με τις συνθήκες μπορεί να πάρει διαφορετικές μορφές. Επίσης, συμπεραίνεται ότι τα ιστογράμματα δεν είναι συχνά συμμετρικά, και επομένως οι κατανομές δεν μπορούν να προσεγγίζονται ως κανονικές συχνά, εκτός και αν οι συνθήκες είναι κατάλληλες για να συμβεί αυτό. Μία κατανομή θα μπορούσε να προσεγγισθεί ως κανονική, μόνο αν παρουσιάζει πολύ μικρή εκτροπή, ή αν είναι σχεδόν συμμετρική.

Η εκτροπή (skewness) προς τα αριστερά ή προς τα δεξιά μίας κατανομής, γραφικά, μοιάζει με μία διαπλάτυνση στην αριστερή, ή αντίστοιχα στην δεξιά ουρά, μιας συμμετρικής κατανομής, με αποτέλεσμα η κατανομή να χάνει το συμμετρικό της σχήμα. Η εκτροπή, όταν αντιπροσωπεύεται από μαθηματικό τύπο, παίρνει αρνητικές τιμές όταν τείνει προς τα αριστερά, ενώ η εκτροπή προς τα δεξιά

παίρνει θετικές τιμές. Επίσης, η εκτροπή μίας κατανομής θεωρείται ότι είναι σημαντική, όταν η τιμή της είναι μεγαλύτερη από τη διπλάσια τιμή του τυπικού της σφάλματος. Το τυπικό σφάλμα της

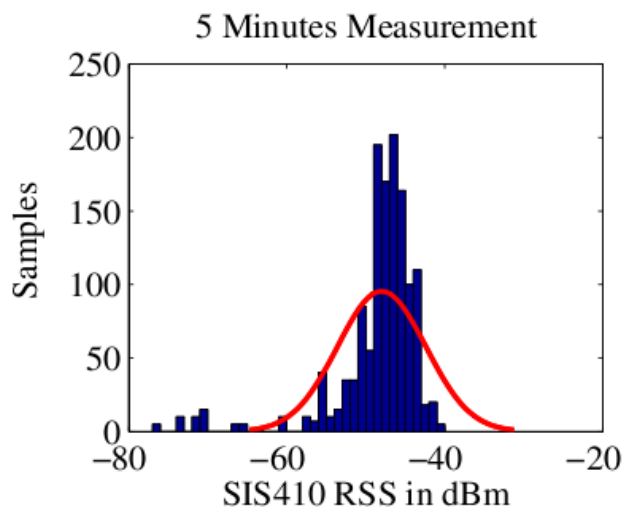
εκτροπής μπορεί να εκτιμηθεί ως: $\sqrt{\frac{6}{N}}$, όπου N ο αριθμός των δειγμάτων της κατανομής [76]. Όταν η εκτροπή μίας κατανομής είναι σημαντική, τότε δεν μπορεί να προσεγγισθεί ως κανονική.

Μία σημαντική παρατήρηση πάνω σε αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα είναι ότι τα ιστογράμματα με σημαντική εκτροπή προς τα αριστερά είναι συνήθως αυτά που έχουν μεγάλες μέσες τιμές μετρούμενης ισχύος. Και τις περισσότερες φορές, η μέση τιμή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος είναι μεγάλη, όταν ο δέκτης βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από τον πομπό, ή όταν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη.

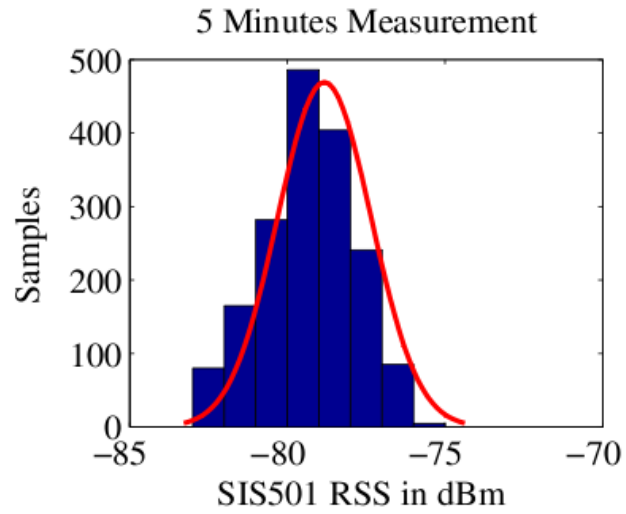
Η εκτροπή της κατανομής της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος προς τα αριστερά εξηγείται από τα εξής. Από τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρείται ότι η μέση ισχύς μπορεί να ξεπεραστεί μόνο από ένα περιορισμένο εύρος τιμών μεγαλύτερων της, το οποίο είναι συνήθως σταθερό σε όλα τα ιστογράμματα. Από την άλλη, οι μικρότερες της μέσης ισχύος τιμές που μετρά ο δέκτης περιορίζονται από την ευαισθησία της IEEE 802.11b κάρτας δικτύου. Δηλαδή, όσο μικρότερη είναι η ελάχιστη τιμή που μπορεί να μετρήσει μία κάρτα δικτύου, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων να είναι κατά πολύ μικρότερες από τη μέση ισχύ. Επομένως, αν η μέση τιμή της ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων σε ένα σημείο είναι μεγάλη, τότε, λόγω της μεγάλης απόστασης της μέσης τιμής από την ελάχιστη δυνατή μετρούμενη τιμή της κάρτας δικτύου, η πιθανότητα μεγάλων αποκλίσεων των μετρούμενων τιμών αριστερά της μέσης τιμής είναι μεγάλη, και συνεπώς, η κατανομή της μετρούμενης ισχύος πολύ συχνά παρουσιάζει μία εκτροπή προς τα αριστερά. Αντιθέτως, αν η μέση τιμή της ισχύος σε μία θέση είναι αρκετά μικρή, τότε η ευαισθησία της κάρτας δικτύου περιορίζει τις πιθανές αποκλίσεις αριστερά της μέσης τιμής, με αποτέλεσμα η κατανομή των μετρούμενων ισχύων να προσεγγίζει την λογαριθμο-κανονική κατανομή (ή την κανονική κατανομή, αν η ισχύς μετριέται σε dB).

Ένα καλό παράδειγμα που δείχνει την εξάρτηση της κατανομής ισχύος από το μέγεθος της μέσης τιμής είναι τα πειραματικά αποτελέσματα των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 3.4, 3.5 και 3.6, τα οποία προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις στον χώρο μικρών αιθουσών. Στο ΣΧΗΜΑ 3.4 το ιστόγραμμα προέκυψε από μετρήσεις συνολικής διάρκειας 5 λεπτών, σε μία θέση η οποία απέχει μικρή απόσταση από τον πομπό, ενώ παράλληλα υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Έτσι, η μέση τιμή ισχύων στη θέση αυτή είναι μεγάλη, και η κατανομή δεν είναι συμμετρική, αλλά παρουσιάζει μία σημαντική εκτροπή

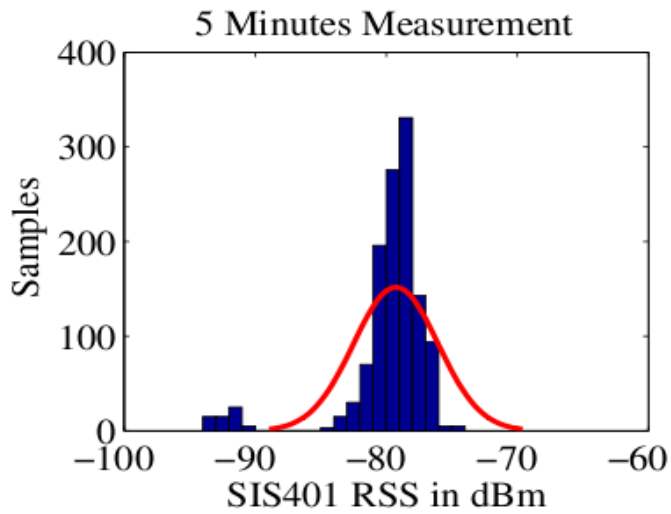
αριστερά της μέσης τιμής. Από την άλλη, το ιστόγραμμα του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.5 προέκυψε από μετρήσεις συνολικής διάρκειας 5 λεπτών σε έναν δέκτη ο οποίος λάμβανε σήματα από έναν πομπό, ο οποίος δεν βρισκόταν στον ίδιο όροφο με τον δέκτη, αλλά βρισκόταν έναν όροφο πάνω από αυτόν. Επομένως, το γεγονός της έλλειψης οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη, αλλά και της μεγάλης απόστασής τους, και συνεπώς της μικρής μέσης τιμής, δικαιολογεί την συμμετρικότητα της κατανομής, η οποία θα μπορούσε να προσεγγισθεί από την κανονική κατανομή. Επίσης, εκτροπή προς τα αριστερά παρουσιάζεται και στο ΣΧΗΜΑ 3.6. Το ιστόγραμμα του σχήματος αυτού, το οποίο προέκυψε από μετρήσεις συνολικής διάρκειας 5 λεπτών, αφορά λήψη σημάτων από έναν πομπό που βρίσκεται στον ίδιο όροφο με τον δέκτη, χωρίς όμως να υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Όμως, παρατηρούμε ότι παρά το γεγονός ότι και στις μετρήσεις που αντιπροσωπεύει το σχήμα 3.5, αλλά και στις μετρήσεις που αντιπροσωπεύει το ΣΧΗΜΑ 3.6, ο δέκτης δεν είχε οπτική επαφή με τον πομπό, ενώ επίσης οι μέσες τιμές δεν διαφέρουν κατά πολύ, οι κατανομές των σχημάτων αυτών δεν είναι και οι δύο συμμετρικές. Επομένως, προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε μία θέση όπου η μέση τιμή μετρούμενων ισχύων έχει μικρή τιμή, η κατανομή των μετρήσεων είναι πολύ πιθανό να προσεγγίζει την κανονική κατανομή, χωρίς να σημαίνει όμως ότι αυτού του είδους εξάρτηση μέσης τιμής και κατανομής ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις.



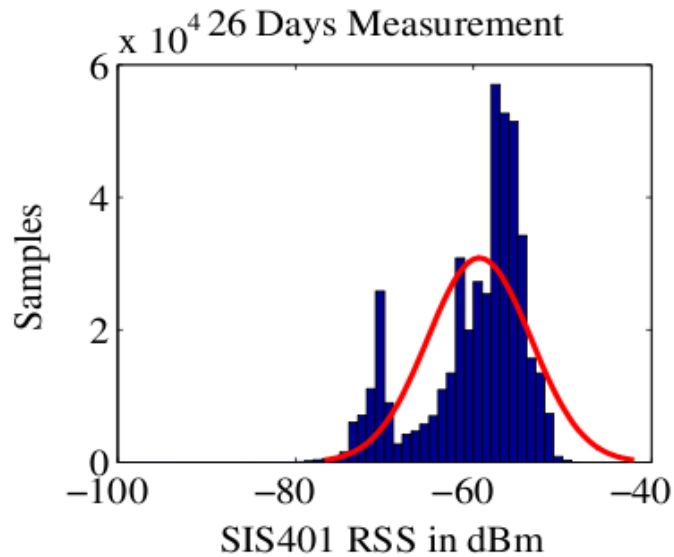
ΣΧΗΜΑ 3.4: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ 5 ΛΕΠΤΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΚΠΕΜΠΕΙ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS410.



ΣΧΗΜΑ 3.5: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.4 ΓΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS501.



ΣΧΗΜΑ 3.6: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.4 ΓΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS401.



ΣΧΗΜΑ 3.7: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ 26 ΗΜΕΡΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΚΠΕΜΠΕΙ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ SIS401.

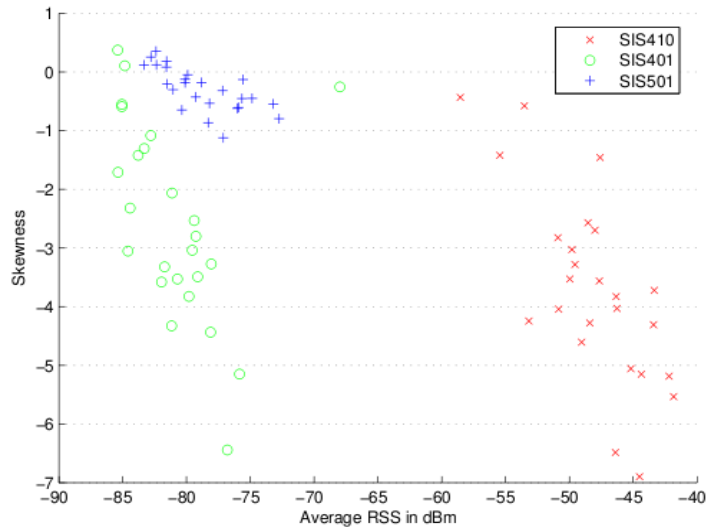
Επίσης, στο ΣΧΗΜΑ 3.7 παρουσιάζεται η κατανομή για μετρήσεις στην ίδια ακριβώς θέση με το ΣΧΗΜΑ 3.6 , και από το ίδιο ακριβώς σημείο πρόσβασης, με τη διαφορά ότι η συνολική διάρκεια των μετρήσεων ήταν 26 ημέρες αντί για 5 λεπτά. Συγκρίνοντας τα ΣΧΗΜΑΤΑ 3.6 και 3.7, παρατηρούμε ότι και στις μετρήσεις μικρής διάρκειας, αλλά και στις μετρήσεις μεγάλης διάρκειας, υπάρχει στην κατανομή εκτροπή αριστερά της μέσης τιμής. Επίσης, στην κατανομή των μετρήσεων μεγάλης διάρκειας του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.7 παρατηρείται και δευτερεύων λοβός αριστερότερα του κύριου λοβού της κατανομής.

Όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρώντας συνολικά όλες τις κατανομές της πειραματικής μελέτης, και στα δύο είδη περιβάλλοντων, σπάνια εμφανίζονται κατανομές με πολλαπλούς λοβούς, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του [70].

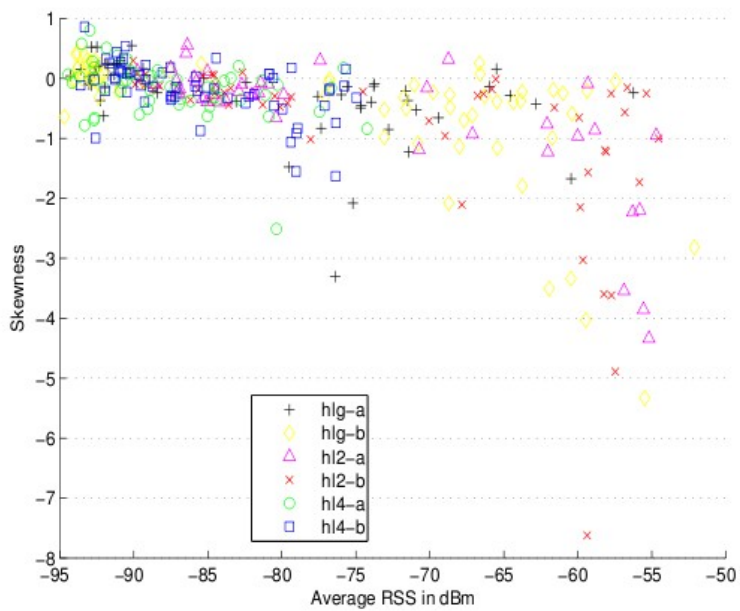
Επιπλέον, στα ΣΧΗΜΑΤΑ 3.8 και 3.9 παρουσιάζονται οι εκτροπές των κατανομών σε διάφορες θέσεις στα δύο είδη περιβάλλοντων. Συγκεκριμένα, στο ΣΧΗΜΑ 3.8 παρουσιάζονται οι τιμές της εκτροπής των κατανομών ως προς τη μέση τιμή μετρούμενων ισχύων, σε διάφορες θέσεις του περιβάλλοντος

μικρών γραφείων, και για τρία σημεία πρόσβασης. Ομοίως, στο ΣΧΗΜΑ 3.9 παρουσιάζονται οι τιμές της εκτροπής των κατανομών ως προς τις αντίστοιχες μέσες τιμές μετρούμενων ισχύων, για διάφορα σημεία πρόσβασης, αλλά όμως για διάφορες θέσεις λήψης του περιβάλλοντος μεγάλης αίθουσας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.8, το οποίο αφορά μετρήσεις στο περιβάλλον μικρών γραφείων, οι κατανομές της ισχύος λήψης των σημάτων που εκπέμπονται από το σημείο πρόσβασης SIS501, το οποίο δεν βρίσκεται στον ίδιο όροφο με τους δέκτες, εμφανίζουν τιμές εκτροπής κοντά στο μηδέν. Αντιθέτως, οι κατανομές της ισχύος λήψης στους ίδιους δέκτες, αλλά από σήματα εκπεμπόμενα από τα σημεία πρόσβασης SIS410 και SIS401 που βρίσκονται στον ίδιο όροφο με τους δέκτες, παρουσιάζουν πολύ μεγάλη αρνητική εκτροπή. Από τις θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, οι περισσότερες είχαν οπτική επαφή με το σημείο πρόσβασης SIS410, ενώ καμία δεν είχε οπτική επαφή με το σημείο πρόσβασης SIS401. Επίσης, από το ΣΧΗΜΑ 3.9, το οποίο αφορά μετρήσεις στο περιβάλλον μεγάλης αίθουσας, παρατηρείται ότι οι περισσότερες από τις θέσεις με μικρές μέσες τιμές ισχύος λήψης παρουσιάζουν κατανομές με τιμές εκτροπής κοντά στο μηδέν, ενώ οι περισσότερες από τις θέσεις με μεγάλες μέσες τιμές ισχύος λήψης παρουσιάζουν κατανομές με μεγαλύτερες τιμές αρνητικής εκτροπής.

Συμπερασματικά, τα περισσότερα από τα ιστογράμματα που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις δεν είναι συμμετρικά. Επομένως, η παραδοχή της κανονικής κατανομής στις λαμβανόμενες ισχύεις ενός εσωτερικού χώρου πολλές φορές δεν είναι ικανοποιητική. Επίσης, παρατηρείται ότι στις θέσεις του χώρου όπου η μέση τιμή των μετρούμενων ισχύων παίρνει μικρές τιμές, πολλές φορές, η εκτροπή των κατανομών είναι μικρή, ενώ πολλές φορές, εκεί όπου υπάρχουν ισχυρές μέσες τιμές, οι εκτροπές είναι μεγάλες. Όμως, όπως φαίνεται κυρίως στο ΣΧΗΜΑ 3.8, η εξάρτηση αυτή ανάμεσα στη μέση τιμή και στην εκτροπή, είναι συνηθισμένη, χωρίς όμως να σημαίνει ότι ισχύει πάντα. Επομένως, σε χώρους όπου υπάρχουν σπάνια οπτικές μεταξύ πομπών και δεκτών, ή οι αποστάσεις μεταξύ πομπών και δεκτών είναι μεγάλες, οι μέσες τιμές λαμβανόμενων ισχύων είναι συνήθως μικρές, και έτσι οι κατανομές είναι συχνότερα συμμετρικές από ότι σε χώρους που δεν πληρούν αυτές τις προδιαγραφές. Για παράδειγμα, το περιβάλλον μεγάλης αίθουσας, με σημεία πρόσβασης σε διαφορετικούς ορόφους, πληρεί συχνότερα αυτές τις προδιαγραφές σε σύγκριση με το περιβάλλον μικρών γραφείων. Συνεπώς, η παραδοχή της κανονικής κατανομής είναι περισσότερο πετυχημένη κάτω υπό ορισμένες συνθήκες.



ΣΧΗΜΑ 3.8: Η ΕΚΤΡΟΠΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΙΚΡΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ.



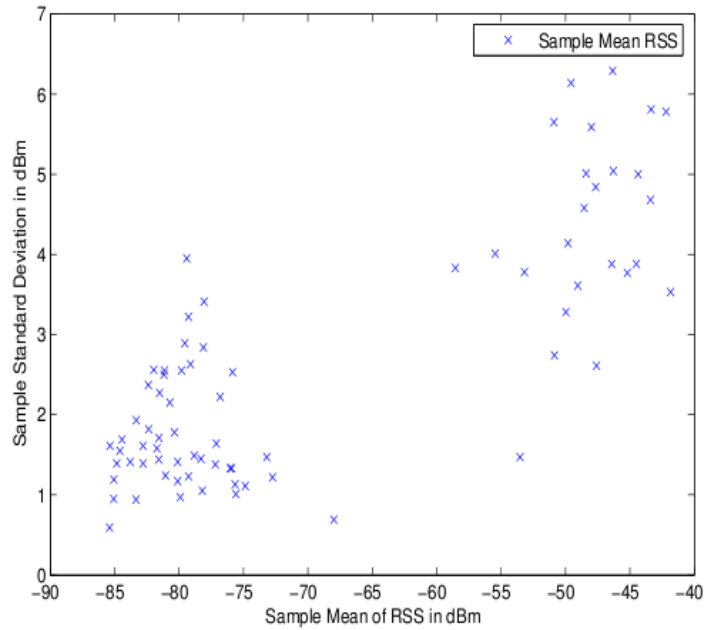
ΣΧΗΜΑ 3.9: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.8 ΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ.

3.4.5 Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

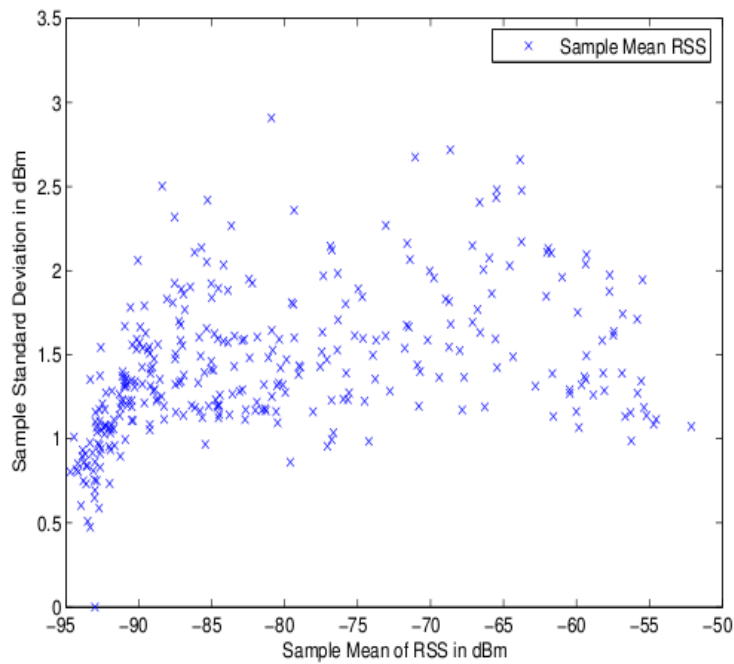
Από τις κατανομές που σχηματίστηκαν από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες θέσεις των δύο περιβάλλοντων μελέτης, για σήματα που εκπέμπονται από διάφορα σημεία πρόσβασης, παρατηρείται ότι οι τυπικές αποκλίσεις διαφέρουν από θέση σε θέση, αλλά και από σημείο πρόσβασης σε σημείο πρόσβασης. Όμως, στο περιβάλλον μικρών αιθουσών οι τυπικές αποκλίσεις μπορεί να πάρουν πολύ μεγαλύτερες τιμές από ότι στο περιβάλλον μεγάλης αίθουσας. Επομένως, σε δύο εσωτερικούς χώρους που διαφέρουν σημαντικά ως προς τις αποστάσεις μεταξύ πομπών και δεκτών, αλλά και ως προς την ύπαρξη οπτικών επαφών μεταξύ πομπών και δεκτών, μπορεί να μετρώνται τυπικές αποκλίσεις πολύ διαφορετικών μεγεθών.

Επίσης, παρατηρείται μία εξάρτηση ανάμεσα στο μέγεθος της μέσης τιμής ισχύων λήψης σε μία θέση και την αντίστοιχη τυπική απόκλιση, παρόμοια με την εξάρτηση ανάμεσα στο μέγεθος της μέσης τιμής και την εκτροπή της κατανομής, που περιγράφηκε προηγουμένως. Στο ΣΧΗΜΑ 3.10 απεικονίζεται η τυπική απόκλιση των κατανομών σε διάφορες θέσεις του περιβάλλοντος μικρών γραφείων, και για λήψη σημάτων εκπεμπόμενα από διάφορα σημεία πρόσβασης, ως προς τις αντίστοιχες μέσες τιμές των ισχύων λήψης. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η τυπική απόκλιση έχει μεγάλες τιμές όταν οι μέσες τιμές είναι υψηλές, λόγω οπτικής επαφής των θέσεων από το σημείο πρόσβασης. Επίσης, στο ΣΧΗΜΑ 3.11, που απεικονίζει τις τυπικές αποκλίσεις των κατανομών στο περιβάλλον μεγάλης αίθουσας ως προς τις αντίστοιχες μέσες τιμές ισχύων των κατανομών, για διάφορες θέσεις και για διάφορα σημεία πρόσβασης, οι μικρότερες τυπικές αποκλίσεις συνήθως παρατηρούνται όταν δεν υπάρχουν οπτικές επαφές μεταξύ πομπών και δεκτών.

Συμπερασματικά, στα δύο αυτά περιβάλλοντα μελέτης μας, είναι συνηθισμένη η σύνδεση μικρών τιμών τυπικών αποκλίσεων με ασθενείς μέσες τιμές ισχύος, και μεγάλων τιμών τυπικών αποκλίσεων με ισχυρές μέσες τιμές ισχύος. Και δύο από τους βασικότερους λόγους που συντελούν στο να έχει ένας δέκτης ισχυρή μέση τιμή λαμβανόμενων ισχύων, είναι ο δέκτης να βρίσκεται κοντά στο σημείο πρόσβασης, ή να έχει οπτική επαφή με το σημείο πρόσβασης. Επομένως, η εφαρμογή ενός συστήματος εντοπισμού θέσης σε έναν εσωτερικό χώρο, στον οποίον δεν βρίσκονται συχνά οπτικές επαφές μεταξύ πομπών και δεκτών, και οι αποστάσεις πομπών και δεκτών είναι συχνά μεγάλες, θα μπορούσε να εξασφαλίσει αρκετά συχνά μικρές τυπικές αποκλίσεις στις κατανομές των μετρούμενων ισχύων. Και αν οι τυπικές αποκλίσεις είναι μικρές, τότε αυτό το γεγονός φαίνεται να ευνοεί την ακρίβεια του συστήματος εντοπισμού θέσης, επειδή οι τιμές ισχύος που μετρώνται σε μία θέση δύσκολα αποκλίνουν από τη μέση τιμή τους, που είναι το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της θέσης αυτής.



ΣΧΗΜΑ 3.10: Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΙΚΡΩΝ ΓΡΑΦΕΙΩΝ.

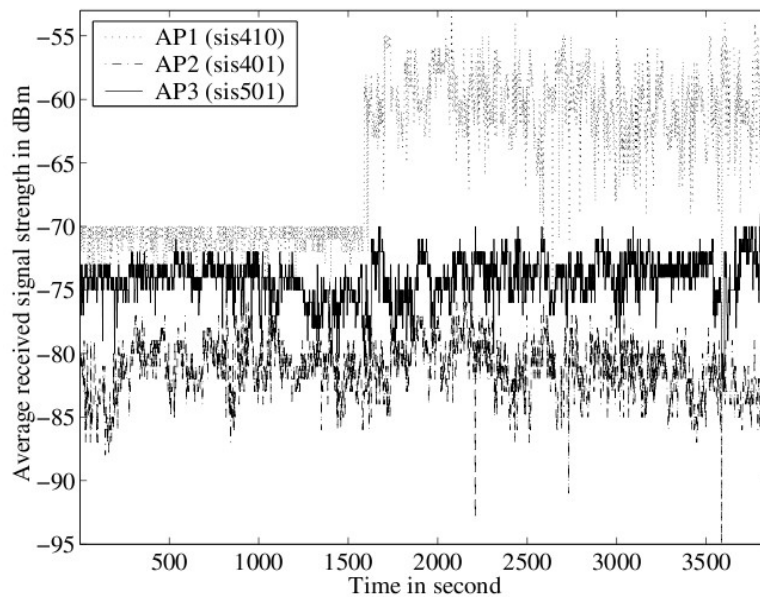


ΣΧΗΜΑ 3.11: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.10 ΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ.

Όμως, πρέπει να αναφερθεί ότι η απομάκρυνση ενός δέκτη από τον πομπό, η οποία φαίνεται να συντελεί στην βελτίωση της ακρίβειας του συστήματος λόγω μείωσης της τυπικής απόκλισης, μπορεί στην πραγματικότητα να χειροτερεύσει την ακρίβεια του συστήματος, λόγω μείωσης στη διαφορά ανάμεσα στα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των γειτονικών υπογήφινων θέσεων του συστήματος. Όμως, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια του συστήματος εντοπισμού θέσης θα μελετηθούν αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.

3.4.6 Η ΣΤΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

Μία σημαντική ιδιότητα των στοχαστικών διαδικασιών είναι η στατικότητα [77]. Η στατικότητα, από μία πολύ διαισθητική άποψη, εκφράζει ένα είδος ανεξαρτησίας της στοχαστικής διαδικασίας από το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στο οποίο λαμβάνει χώρα. Θεωρώντας την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος ως στοχαστική διαδικασία, ένα πλήθος πειραματικών μετρήσεων έδειξε ότι η μετρούμενη ισχύς στους δέκτες δεν είναι στατική.



ΣΧΗΜΑ 3.12: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ L3 ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΙΘΟΥΣΩΝ ΓΙΑ ΣΗΜΑΤΑ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΡΙΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.

Επίσης, ένα από τα πειράματα το οποίο δείχνει τη μη στατικότητα των μετρούμενων ισχύων είναι το εξής. Στη θέση *L3* του περιβάλλοντος μικρών γραφείων, που απεικονίζεται στο ΣΧΗΜΑ 3.2, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις συνολικής διάρκειας μίας ώρας, για σήματα εκπεμπόμενα από τα σημεία πρόσβασης SIS401, SIS410 και SIS501. Οι μετρήσεις των ισχύων στη θέση αυτή, από τα τρία αυτά σημεία πρόσβασης, παρουσιάζονται γραφικά στο ΣΧΗΜΑ 3.12.

Ενώ το περιβάλλον διάδοσης ήταν σταθερό, ξαφνικά εμφανίστηκε ένα πρόσωπο στη θέση *L2*, το οποίο άρχισε να χειρίζεται τον φορητό υπολογιστή του. Τότε, όπως φαίνεται και στο ΣΧΗΜΑ 3.12, η μεταβολή αυτή στο περιβάλλον διάδοσης είχε ως αποτέλεσμα οι μετρούμενες ισχύεις από το σημείο πρόσβασης SIS410 να αυξηθούν απότομα γύρω από ένα νέο υψηλότερο επίπεδο μέσης τιμής. Η αλλαγή αυτή θα μπορούσε να εξηγηθεί από το ότι η μεταβολή στο περιβάλλον διάδοσης είχε ως αποτέλεσμα οι συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών (multipath) να συμβάλλουν ενισχυτικά στον δέκτη. Επομένως, από το πείραμα αυτό φαίνεται ότι η μετρούμενη ισχύς εξαρτάται από το χρόνο, αφού η κατανομή της μπορεί να μεταβάλλεται με το πέρασμα του χρόνου, και είναι μία μη στατική στοχαστική διαδικασία.

3.4.7 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα πείραμα το οποίο δείχνει την εξάρτηση της κατανομής και των στατιστικών χαρακτηριστικών της μετρούμενης ισχύος από τον χρόνο. Σύμφωνα με το πείραμα αυτό, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ισχύος από έναν φορητό υπολογιστή τοποθετημένο στη θέση *L1* του περιβάλλοντος μικρών γραφείων, το οποίο απεικονίζεται στο ΣΧΗΜΑ 3.2. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν σε τρεις ξεχωριστές ημέρες, και κάθε φορά είχαν συνολική διάρκεια 24 ώρες. Ο φορητός υπολογιστής λάμβανε σήματα από ένα συγκεκριμένο σημείο πρόσβασης, χωρίς την παρουσία του χρήστη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Στα ΣΧΗΜΑΤΑ 3.13, 3.14 και 3.15 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές, οι μεταβλητότητες και οι εκτροπές των κατανομών, αντίστοιχα, που προέκυψαν από τις μετρήσεις αυτές. Επίσης, η παρουσία ανθρώπων στην ίδια αίθουσα με τον φορητό υπολογιστή, αλλά και η κατάσταση, δηλαδή ανοιχτή ή κλειστή, της πόρτας της αίθουσας αυτής, ήταν απρόβλεπτοι παράγοντες.

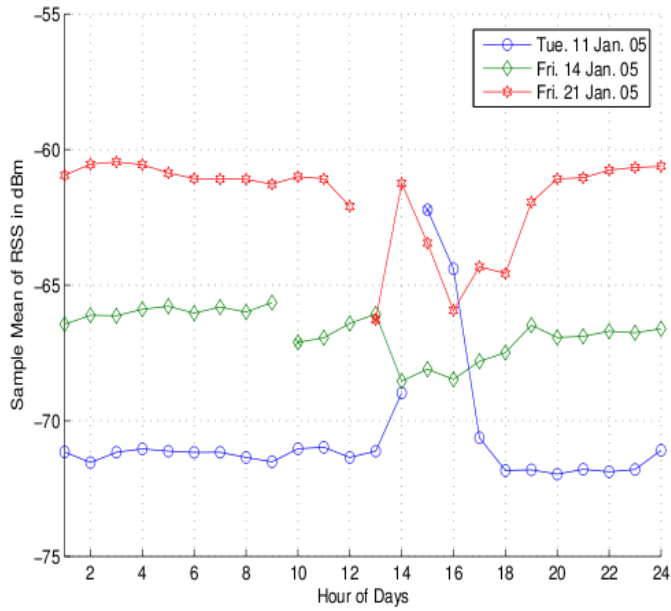
Από τα πειραματικά αποτελέσματα των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 3.13 και 3.14, παρατηρείται ότι νωρίς το πρωί και αργά το βράδυ οι μέσες τιμές και οι μεταβλητότητες των κατανομών ήταν σε μεγάλο βαθμό σταθερές. Αυτό οφείλεται στο ότι αυτές τις ώρες, δεν βρίσκονταν άνθρωποι στην αίθουσα όπου πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις, και η πόρτα της αίθουσας ήταν κλειστή. Επομένως, το περιβάλλον

διάδοσης δεν είχε μεταβολές. Στις ώρες όμως μεταξύ περίπου 10:00 και 20:00, οι μέσες τιμές και οι μεταβλητότητες αυξήθηκαν ή μειώθηκαν αισθητά, ενώ παράλληλα μεταβάλλονται αρκετά μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στο ότι κατά το χρονικό διάστημα αυτό υπήρχαν άνθρωποι στο περιβάλλον διάδοσης των σημάτων, ο αριθμός και οι θέσεις των οποίων μεταβάλλονταν απρόβλεπτα. Επίσης, η πόρτα της αίθουσας στην οποία πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις ήταν συχνά ανοιχτή.

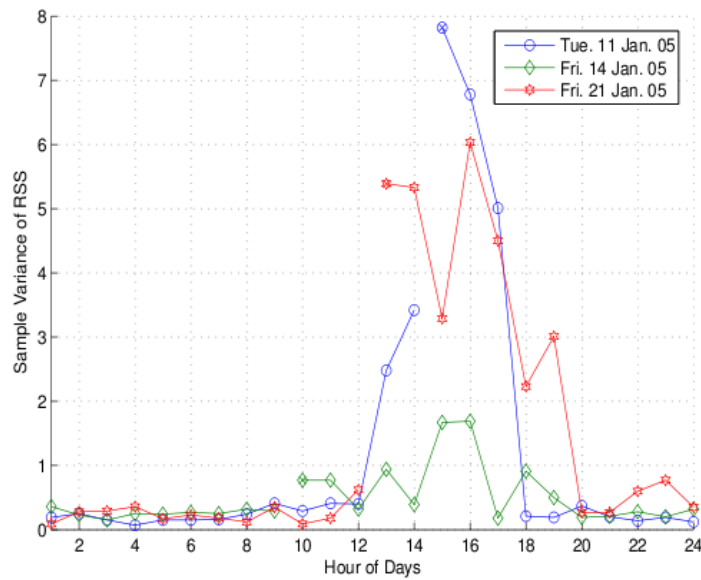
Στο χρονικό διάστημα μεταξύ περίπου 10:00 και 20:00, όπου η ανθρώπινη παρουσία ήταν σημαντική, οι μέσες τιμές των ισχύων δεν μεταβλήθηκαν με τον ίδιο τρόπο. Όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο σχήμα, κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, στο ένα εικοσιτετράωρο οι μέσες τιμές ήταν μεγαλύτερες από ότι τις υπόλοιπες ώρες του εικοσιτετράωρου, ενώ στα άλλα δύο εικοσιτετράωρα μετρήσεων οι μέσες τιμές ήταν μικρότερες. Το γεγονός ότι οι μέσες τιμές άλλοτε αυξάνονται και άλλοτε μειώνονται, οφείλεται στο ότι η μεταβολή του περιβάλλοντος διάδοσης έχει ως αποτέλεσμα οι συνιστώσες του φαινομένου πολλαπλών διαδρομών άλλες φορές να συμβάλλουν ενισχυτικά, και άλλες φορές όχι.

Επίσης, αν και κατά τις τελευταίες βραδινές και πρώτες πρωινές ώρες οι μετρούμενες ισχύεις ήταν σε μεγάλο βαθμό σταθερές, οι τιμές στις οποίες ισορροπούσαν διέφεραν αρκετά στις τρεις διαφορετικές ημέρες. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στο ότι αν και ο φορητός υπολογιστής ήταν τοποθετημένος και τις τρεις ημέρες στη θέση *L1*, στην πραγματικότητα, κάθε διαφορετική ημέρα πιθανότατα ήταν ελαφρώς μετατοπισμένος σε σχέση με τις υπόλοιπες. Έτσι, ακόμα και μία ελάχιστη μετατόπιση του δέκτη θα μπορούσε να μεταβάλλει τα επίπεδα τιμών των μετρούμενων ισχύων. Όμως, αυτό το γεγονός πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη από τον σχεδιαστή ενός δικτύου εντοπισμού θέσης, επειδή οι τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” είναι πιθανό να διαφέρουν από μέρα σε μέρα.

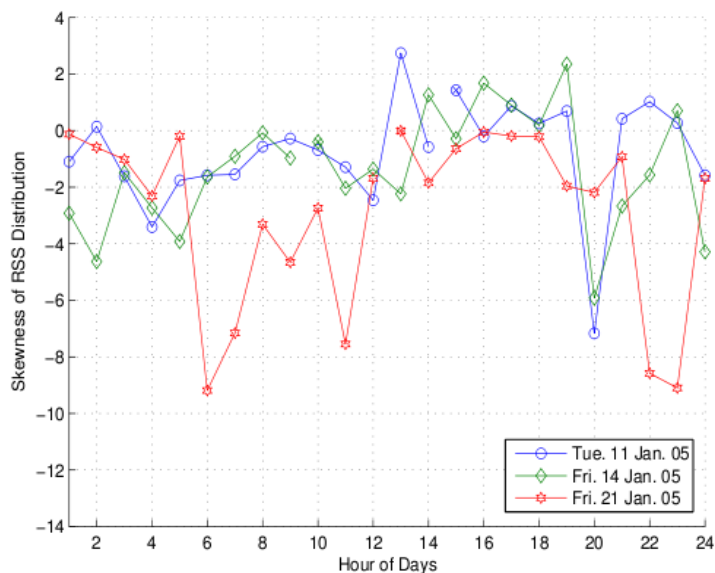
Σχετικά με τις εκτροπές των κατανομών, που παρουσιάζονται στο ΣΧΗΜΑ 3.15, παρατηρείται ότι, και στα τρία διαφορετικά εικοσιτετράωρα μετρήσεων, κατά τις τελευταίες βραδινές και πρώτες πρωινές ώρες οι κατανομές συχνά εκτρέπονται προς τα αριστερά, ενώ κατά τις απογευματινές ώρες, όταν κοντά στον δέκτη είναι συγκεντρωμένοι περισσότεροι άνθρωποι, οι κατανομές συχνά παρουσιάζουν εκτροπή προς τα δεξιά. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν την εξάρτηση της κατανομής της ισχύος των σημάτων λήψης από τις μεταβολές του περιβάλλοντος διάδοσης των σημάτων.



ΣΧΗΜΑ 3.13: ΟΙ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΙΣΧΥΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ 24 ΩΡΩΝ, ΣΕ ΤΡΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΩΡΑ.



ΣΧΗΜΑ 3.14: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.13 ΑΛΛΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΙΣΧΥΩΝ.



ΣΧΗΜΑ 3.15: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 3.13 ΑΛΛΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΚΤΡΟΠΕΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΤΩΝ ΙΣΧΥΩΝ.

Από το πείραμα αυτό προκύπτει το συμπέρασμα ότι η κατανομή και τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ισχύος των σημάτων που λαμβάνει ένας δέκτης εξαρτώνται από το χρόνο, αφού μπορεί να μεταβάλλονται για διαφορετικές χρονικές περιόδους μέσα στη μέρα, αλλά και από μέρα σε μέρα για την ίδια χρονική περίοδο. Επίσης, παρατηρείται ότι οι σημαντικές μεταβολές της κατανομής ή των στατιστικών χαρακτηριστικών της μετρούμενης ισχύος συμβαίνουν όταν μεταβάλλεται το περιβάλλον διάδοσης των σημάτων. Όμως, τις περισσότερες φορές οι περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως και η μεταβολή του περιβάλλοντος, είναι απρόβλεπτα, με αποτέλεσμα η ακριβής εκτίμηση των στατικών ιδιοτήτων της μετρούμενης ισχύος να είναι σχεδόν αδύνατη.

3.4.8 ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΤΟ ΙΔΙΟ ΚΑΝΑΛΙ ΤΟΥ ΙΕΕΕ 802.11b ΔΙΚΤΥΟΥ

Για να μελετηθεί η ανεξαρτησία των σημάτων που εκπέμπουν διαφορετικά σημεία πρόσβασης, και η παρεμβολή μεταξύ σημάτων που εκπέμπονται στο IEEE 802.11b στις ίδιες συχνότητες, λήφθηκαν υπόψη οι συντελεστές συσχέτισης ανάμεσα στις μετρούμενες ισχύεις των σημάτων λήψης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής συσχέτισης που αφορά δύο σήματα, τόσο περισσότερο εξαρτώμενα είναι τα σήματα μεταξύ τους, ενώ όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής συσχέτισης, τόσο περισσότερο

ανεξάρτητα είναι τα σήματα μεταξύ τους. Επίσης, ο αριθμός των καναλιών που χρησιμοποιεί το IEEE 802.11b δίκτυο είναι περιορισμένος. Επομένως, αν ο αριθμός των σημείων πρόσβασης του συστήματος εντοπισμού θέσης είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των καναλιών, τότε κάποια σημεία πρόσβασης εκπέμπουν στα ίδια κανάλια με άλλα, και άρα στις ίδιες συχνότητες. Στις περιπτώσεις αυτές, το πόσο σημαντική είναι η παρεμβολή ενός σήματος σε ένα άλλο σήμα που εκπέμπεται στο ίδιο κανάλι, μπορεί να φανεί από το συντελεστή συσχέτισης. Δηλαδή, όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής συσχέτισης που αφορά δύο σήματα που εκπέμπονται στο ίδιο κανάλι, τόσο μεγαλύτερη είναι η παρεμβολή μεταξύ τους, και αντιστρόφως. Ένα ενδεχόμενο συμπέρασμα ότι τα σήματα που εκπέμπουν τα σημεία πρόσβασης στις ίδιες συχνότητες δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους, θα μπορούσε να είναι ενδεικτικό ενός πετυχημένου μηχανισμού αποφυγής συγκρούσεων του IEEE 802.11b συστήματος.

Για το περιβάλλον μικρών γραφείων υπολογίστηκαν πολλές τιμές συντελεστών συσχέτισης για σήματα εκπεμπόμενα από διάφορα σημεία πρόσβασης. Μελετώντας τις τιμές των συντελεστών συσχέτισης προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα σήματα του IEEE 802.11b δικτύου δεν έχουν πολύ μεγάλη συσχέτιση μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, τα σήματα που εκπέμπονται από διαφορετικά σημεία πρόσβασης, ανεξαρτήτως αν χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες ή όχι, μπορεί να υποθεθεί ότι είναι ασυσχέτιστα. Επομένως, στο περιβάλλον μικρών γραφείων που έγιναν οι μετρήσεις, είναι λογική η υπόθεση ότι οι ισχείς λαμβανόμενων σημάτων σε ένα δέκτη, για σήματα που εκπέμπονται από διαφορετικά σημεία πρόσβασης, είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.

Επίσης, παρατηρώντας τους συντελεστές συσχέτισης ανάμεσα στις μετρούμενες ισχείς για σήματα που εκπέμπονται στο περιβάλλον μικρών γραφείων από δύο σημεία πρόσβασης χρησιμοποιώντας το ίδιο κανάλι, και άρα τις ίδιες συχνότητες, είναι εμφανές ότι οι ισχείς λήψης από τα δύο αυτά σημεία πρόσβασης έχουν από χαμηλή ως μικροσκοπική συσχέτιση μεταξύ τους. Επομένως, στο περιβάλλον μικρών γραφείων που μελετάται, τα σήματα του IEEE 802.11b δικτύου, που αποτελεί την υποδομή του συστήματος εντοπισμού θέσης, μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια ότι δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους.

Ομοίως, στο περιβάλλον μεγάλης αίθουσας, για όλους τους συνδυασμούς ζεύγων σημείων πρόσβασης, από τα οποία άλλα ζεύγη χρησιμοποιούσαν το ίδιο κανάλι και άλλα όχι, υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης ανάμεσα στις ισχείς μέτρησης των σημάτων που εκπέμπονταν από τα ζεύγη σημείων πρόσβασης αυτά, και για διάφορες θέσεις του χώρου. Από τους υπολογισμούς των συντελεστών συσχέτισης παρατηρείται ότι οι συντελεστές συσχέτισης ανάμεσα σε οποιοδήποτε ζεύγος σημάτων είχαν τιμές από μέτριες ως πολύ μικρές. Επομένως, και στο περιβάλλον μεγάλης αίθουσας που μελετάται, είναι λογική η υπόθεση ότι οι μετρούμενες ισχείς για σήματα που εκπέμπονται από

διαφορετικά σημεία πρόσβασης είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Επίσης, στο περιβάλλον αυτό, μπορεί να υποθεθεί ότι τα σήματα που εκπέμπονται από σημεία πρόσβασης που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχρότητες δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους.

3.4.9 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”

Ιδανικά, για την πετυχημένη καταγραφή ενός “δαχτυλικού αποτυπώματος” σε μία θέση απαιτούνται όσο το δυνατό περισσότερες δειγματικές τιμές μετρούμενης ισχύος στη θέση αυτή. Βέβαια, μία βασική προϋπόθεση είναι, κατά τη διάρκεια των δειγματικών μετρήσεων, οι περιβαλλοντικές συνθήκες να μην μεταβάλλονται σημαντικά. Άλλωστε, τα στατιστικά χαρακτηριστικά του λαμβανόμενου σήματος, και άρα και τα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, αναφέρονται κάθε φορά σε συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες διάδοσης σημάτων.

Στην περίπτωση που το “δαχτυλικό αποτύπωμα” αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή της ισχύος που μετρά ο δέκτης σε μία θέση, τότε είναι πολύ πιθανό να αρκεί ένας σχετικά μικρός αριθμός από δειγματικές μετρήσεις ισχύος για τη σωστή καταγραφή ενός “δαχτυλικού αποτυπώματος”. Μία πιθανή εξήγηση του γεγονότος αυτού είναι ότι, όπως παρατηρείται και σε διάφορες πειραματικές μετρήσεις [66], η μέση τιμή ισχύος που μετρά ένας δέκτης σε μία θέση παρουσιάζει σχετικά μεγαλύτερη σταθερότητα και μικρότερες μεταβολές από ότι άλλες στατιστικές ιδιότητες της μετρούμενης ισχύος. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τη λειτουργία του συστήματος RADAR [22], ένας μικρός αριθμός 20 δειγματικών μετρήσεων ανά θέση και προσανατολισμό χρήστη αρκεί για αξιόπιστη καταγραφή “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”. Από την άλλη, αν το “δαχτυλικό αποτύπωμα” αντιπροσωπεύει ένα ιστόγραμμα τιμών ισχύος που μετρά ο δέκτης σε μία θέση, τότε απαιτείται σχετικά μεγάλος αριθμός δειγματικών μετρήσεων. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τις μελέτες [78] και [47], χρειάστηκαν 300 δειγματικές μετρήσεις για την αξιόπιστη καταγραφή ενός “δαχτυλικού αποτυπώματος” που αφορά ένα συγκεκριμένο συνδυασμό θέσης του χώρου και προσανατολισμού του χρήστη.

Επίσης, η συνολική χρονική διάρκεια των δειγματικών μετρήσεων για το σχηματισμό ενός “δαχτυλικού αποτυπώματος” εξαρτάται από την περίοδο δειγματοληψίας, δηλαδή τη χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών δειγματικών μετρήσεων. Παραδείγματα διαφορετικών περιόδων δειγματοληψίας είναι το σύστημα RADAR [22], όπου η χρονική διάρκεια ανάμεσα σε δύο διαδοχικές μετρήσεις ισχύος ήταν 0,25 sec, και η μελέτη [47], όπου ήταν 2 sec. Όμως, η περίοδος δειγματοληψίας περιορίζεται από το λογισμικό (software) ή από το υλισμικό (hardware) του ασύρματου δικτύου, που αποτελεί την υποδομή του συστήματος εντοπισμού θέσης.

Εκτός από την κατάλληλη αξιοποίηση ενός αριθμού δειγματικών τιμών ισχύος που συλλέγονται στις υποψήφιες θέσεις ενός χώρου, ο σχηματισμός των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” θα μπορούσε να γίνει και με μαθηματικό τρόπο, επιλέγοντας ένα κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο απωλειών διαδρομής (path loss), και προσαρμόζοντάς το όσο το δυνατό καλύτερα στις συνθήκες του χώρου διάδοσης των σημάτων.

4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΤΗ ΣΥΛΛΟΓΗ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην [79] επιχειρείται για πρώτη φορά η ανάπτυξη ενός αναλυτικού μαθηματικού μοντέλου που να περιγράφει τη λειτουργία ενός συστήματος εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, που βασίζεται σε προϋπάρχουσα υποδομή ασύρματου τοπικού δικτύου και χρησιμοποιεί αλγόριθμο βασιζόμενο στη μέθοδο των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”.

Πριν από την εργασία αυτή, είχαν ήδη γίνει αρκετές μελέτες σχετικά με τη συμπεριφορά και την απόδοση διαφορετικών συστημάτων εντοπισμού θέσης. Από τη σύγκριση των διαφόρων συστημάτων, είχε γίνει σαφές ότι συστήματα εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιούνταν σε εξωτερικούς χώρους, όπως το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού (Global Positioning System: GPS), παρουσίαζαν σημαντικές δυσκολίες όταν καλούνταν να εντοπίσουν μία θέση σε έναν εσωτερικό χώρο [80]. Αντιθέτως, είχε γίνει αποδεκτό από τους αρμόδιους επιστήμονες ότι η χρήση αλγόριθμων που χρησιμοποιούν την τεχνική των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” παρουσίαζαν σημαντικά προτερήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους εντοπισμού στον εσωτερικό χώρο. Επίσης, τα συστήματα εντοπισμού θέσης, όπως το RADAR [22], τα οποία είχαν χρησιμοποιήσει ως υποδομή ήδη υπάρχοντα ασύρματα τοπικά δίκτυα, είχαν εισαγάγει σημαντικά πλεονεκτήματα στον τομέα του εντοπισμού θέσης εσωτερικών χώρων. Όμως, όλα τα συμπεράσματα για τη απόδοση των βασιζόμενων σε “δαχτυλικά αποτυπώματα” συστημάτων εντοπισμού θέσης προέκυπταν μετά από την λειτουργία των συστημάτων και την ανάλυση και αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων και μετρήσεων. Δηλαδή, δεν υπήρχε κάποιο αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο, το οποίο να χρησιμοποιούταν σαν βάση για τη σχεδίαση και την πρόβλεψη της απόδοσης των συστημάτων εντοπισμού. Η καινοτομία στην [79] ήταν ότι για πρώτη φορά προτεινόταν ένα αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει και εξηγεί τη συμπεριφορά ενός συστήματος εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου που βασίζεται στην τεχνική των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”.

Έτσι, με τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου, οι σχεδιαστές συστημάτων αυτού του είδους θα μπορούσαν να διευκολυνθούν σε μεγάλο βαθμό, γιατί έχουν στα χέρια τους μία θεωρητική βάση, η οποία τους δίνει τη δυνατότητα να κατανοήσουν και να εξηγήσουν τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος, να το σχεδιάσουν σε θεωρητικό επίπεδο, αλλά και να προβλέψουν με ικανοποιητική μαθηματική ακρίβεια την απόδοσή του. Επομένως, η ύπαρξη ενός αναλυτικού μαθηματικού μοντέλου θα έδινε στους σχεδιαστές τη δυνατότητα να προβλέπουν εκ των προτέρων τη συμπεριφορά του

συστήματος, χωρίς να είναι αναγκαίο να βγάζουν συμπεράσματα για την απόδοσή του μετά από την πειραματική λειτουργία του και μετά από συνεχείς ρυθμίσεις, διαδικασία η οποία είναι χρονοβόρα και απαιτεί μεγαλύτερο κόστος.

Το σύστημα εντοπισμού θέσης που θα μελετήσουμε, και πάνω σε αυτό θα στηριχθεί το μαθηματικό μοντέλο, εφαρμόζεται σε έναν εσωτερικό χώρο, ο οποίος θα μπορούσε να είναι ένας όροφος ενός κτιρίου. Ο αλγόριθμος εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιείται πραγματοποιεί scene analysis. Επομένως, ο χώρος αποτελείται από ένα σύνολο από υποψήφιες θέσεις (location candidates), η κάθε μία από τις οποίες, κατά το offline στάδιο, λαμβάνει σήματα από διάφορα σημεία πρόσβασης (access points), και σχηματίζει το δικό της χαρακτηριστικό “δαχτυλικό αποτύπωμα” (fingerprint).

Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε νοητικά πως οι υποψήφιες θέσεις είναι τα σημεία τομής ενός τετραγωνικού πλέγματος, το οποίο καλύπτει όλη την επιφάνεια του εσωτερικού χώρου μελέτης. Οι υποψήφιες θέσεις, οι οποίες θεωρούμε ότι είναι οι μόνες θέσεις του χώρου στις οποίες μπορεί να βρίσκεται το αντικείμενο άγνωστης θέσης, έχουν καθορισμένες συντεταγμένες (x_i, y_i) ή (x_i, y_i, z_i) , ανάλογα αν εντοπίζουμε ένα αντικείμενο στον διδιάστατο ή στον τρισδιάστατο χώρο αντίστοιχα. Επίσης, παραδεχόμαστε ότι η κάθε υποψήφια θέση λαμβάνει σήματα από όλα τα σημεία πρόσβασης, αν και στην πραγματικότητα μόνο μερικά από τα σημεία πρόσβασης μπορεί να είναι ορατά, και μάλιστα ο αριθμός των ορατών σημείων πρόσβασης μπορεί να μεταβάλλεται με το χρόνο. Για το σχηματισμό του συστήματος εντοπισμού θέσης που μελετάμε χρησιμοποιείται μία προϋπάρχουσα υποδομή ενός ασύρματου τοπικού δικτύου (Wireless Local Area Network: WLAN). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται [79] σημεία πρόσβασης που επικοινωνούν στο σύστημα μέσω ενός δικτύου με πρότυπο IEEE 802.11b (Wi-Fi).

Ο αλγόριθμος εντοπισμού θέσης λειτουργεί ως εξής. Κατά το online στάδιο, το αντικείμενο άγνωστης θέσης λαμβάνει ένα διάνυσμα μετρήσεων ισχύων λαμβανόμενων σημάτων (Received Signal Strength: RSS), το οποίο περιλαμβάνει μετρήσεις από κάθε ένα σημείο πρόσβασης (access point). Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ευκλείδειες αποστάσεις ανάμεσα στο διάνυσμα μετρήσεων του αντικειμένου άγνωστης θέσης και στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” κάθε μίας υποψήφιας θέσης. Το “δαχτυλικό αποτύπωμα” κάθε μίας υποψήφιας θέσης είναι ένα διάνυσμα RSS τιμών που σχηματίστηκε κατά το offline στάδιο. Η θέση του αντικειμένου θεωρούμε ότι είναι η υποψήφια θέση της οποίας το “δαχτυλικό αποτύπωμα” απέχει την ελάχιστη ευκλείδεια διανυσματική απόσταση από το διάνυσμα RSS μετρήσεων που συλλέγει το αντικείμενο κατά το online στάδιο.

Το σύστημα εντοπισμού θέσης αυτό, στο οποίο αναφέρεται το μαθηματικό μοντέλο που μελετάται,

είναι παρόμοιο με το σύστημα RADAR [22]. Μία μικρή διαφορά του συστήματος που μελετάμε από το RADAR είναι ότι δεν λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός των χρηστών των φορητών υπολογιστών, που πραγματοποιούν μετρήσεις, αλλά γίνεται η υπόθεση ότι οι μεταβολές στις ισχύεις των λαμβανόμενων σημάτων λόγω προσανατολισμού εξουδετερώνονται όταν υπολογίζονται οι μέσο όροι των λαμβανόμενων ισχύων στις διάφορες υποψήφιες θέσεις. Μία άλλη διαφορά από το RADAR είναι ότι κατά το online στάδιο συγκρίνουμε με τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” μόνο ένα δειγματικό διάλυμα μετρήσεων που συλλέγει το αντικείμενο άγνωστης θέσης, και όχι το μέσο όρο πολλών δειγματικών διανυσμάτων μετρήσεων. Επίσης, στο σύστημα RADAR τα σήματα εκπέμπονται από τις υποψήφιες θέσεις και όχι από τα σημεία πρόσβασης.

Όμως, η απόφαση για τη θέση ενός αντικειμένου άγνωστης θέσης είναι πιθανό πολλές φορές να είναι εσφαλμένη. Η απόδοση και η αξιοπιστία του συστήματος εντοπισμού θέσης εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στο χώρο μελέτης, ή η τοπολογία και η συμπεριφορά του ασύρματου δικτύου. Επίσης, ο σχεδιασμός του συστήματος εξαρτάται από τις απαιτήσεις που έχει ο σχεδιαστής και από το σε ποια κριτήρια απόδοσης δίνει προτεραιότητα. Αλλά και η σχέση ανάμεσα στα κριτήρια απόδοσης του συστήματος εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν. Για παράδειγμα, σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον, η μείωση της precision λόγω αύξησης της accuracy μπορεί να είναι μικρότερη από ότι σε ένα άλλο περιβάλλον. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιείται είναι ότι καταφέρνει να εισάγει σε μαθηματικούς τύπους διάφορες παραμέτρους, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, στο μοντέλο υπάρχουν παράμετροι που εκφράζουν τη διάδοση του σήματος στο χώρο μελέτης, και κυρίως τη μεταβλητότητα και την εξασθένηση των σημάτων διάδοσης, τις διαστάσεις του τετραγωνικού πλέγματος των υποψήφιων θέσεων, και τον αριθμό των σημείων πρόσβασης, και μελετάται ο τρόπος με τον οποίον οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν την αξιοπιστία του συστήματος. Έτσι, με τη βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου, έχουμε τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα στην απόφαση για τη θέση ενός αντικειμένου.

Επομένως, η χρήση του μαθηματικού μοντέλου [79] αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο θεωρητικό υπόβαθρο που βοηθά στην κατανόηση, την ανάλυση και στην όσο το δυνατό καλύτερη και αποδοτικότερη σχεδίαση ενός συστήματος εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου. Όμως, η μελέτη ενός μαθηματικού μοντέλου απαιτεί να γίνουν κάποιες παραδοχές που αφορούν τη λειτουργία του συστήματος, οι οποίες όμως σε ορισμένες περιπτώσεις δεν αντιστοιχούν στην πραγματικότητα σε μεγάλο βαθμό. Επομένως,

όσο λιγότερο ρεαλιστικές είναι οι παραδοχές, τόσο περισσότερο αποκλίνουν τα αποτελέσματα που μας δίνει το μαθηματικό μοντέλο από τα πραγματικά αποτελέσματα που θα μας έδινε μία πειραματική λειτουργία του συστήματος. Στην παράγραφο 4.7, περιγράφονται αναλυτικά οι παραδοχές του μαθηματικού μοντέλου, και σχολιάζεται η αξιοπιστία τους. Επιπλέον, ο σχεδιαστής του συστήματος οφείλει να δώσει στις παραμέτρους του μαθηματικού μοντέλου που αντιπροσωπεύουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες του συστήματος κατάλληλες τιμές, έτσι ώστε το θεωρητικό μοντέλο να εξομοιώνει σε ικανοποιητικό βαθμό τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, και ως αποτέλεσμα, τα θεωρητικά αποτελέσματα να προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τα πραγματικά.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μαθηματικό μοντέλο [79] που μελετάται θεωρεί πως η ισχύς του σήματος που λαμβάνει μία υποψήφια θέση από ένα σημείο πρόσβασης είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί συγκεκριμένη κατανομή. Η πιο σημαντική υπόθεση του μαθηματικού μοντέλου είναι ότι η κατανομή αυτή είναι κανονική (Normal ή Gauss). Στο κεφάλαιο 3 εξηγείται αναλυτικά ο λόγος για τον οποίον επιλέγεται η κανονική κατανομή, ποια πειραματικά αποτελέσματα αιτιολογούν την επιλογή αυτή και κάτω υπό ποιες συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος η επιλογή αυτή είναι πιο ρεαλιστική. Όπως προκύπτει από το κεφάλαιο 3, όχι πάντα, αλλά μόνο υπό ορισμένες προϋποθέσεις η κατανομή της ισχύος θα μπορούσε να προσεγγιστεί ως κανονική.

Επομένως, η ισχύς λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength: RSS) σε μία υποψήφια θέση από το σήμα που εκπέμπει το i -στό σημείο πρόσβασης είναι μία τυχαία μεταβλητή ρ_i που ακολουθεί κατανομή Gauss. Η τυχαία μεταβλητή έχει μέση τιμή ίση με την πραγματική μέση τιμή r_i των μετρήσεων που λαμβάνει η υποψήφια θέση αυτή από το i -στό σημείο πρόσβασης, και τυπική απόκλιση σ_i . Η μέση τιμή r_i , η οποία ταυτίζεται με τη μέση τιμή $E\{\rho_i\}$ της τυχαίας μεταβλητής ρ_i , είναι απλά ένα συστατικό του “δαχτυλικού αποτυπώματος” (location fingerprint) που έχει σχηματίσει η υποψήφια θέση κατά το offline στάδιο. Το “δαχτυλικό αποτύπωμα” $\tilde{R} = (r_1, r_2, \dots, r_N)$ λέγεται διάνυσμα μέσων τιμών ισχύων λαμβανόμενων σημάτων (average RSS vector) και αποτελείται από τους μέσους όρους των RSS μετρήσεων που λαμβάνει η υποψήφια θέση από κάθε ένα από τα N σημεία πρόσβασης.

Συνεπώς, σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο, το αντικείμενο άγνωστης θέσης, το οποίο θεωρούμε ότι μπορεί να βρίσκεται μόνο σε μία από τις υποψήφιες θέσεις του χώρου, και όχι σε κάποιο ενδιάμεσο

σημείο τους, κατά το online στάδιο συλλέγει ένα διάνυσμα RSS μετρήσεων: $R=(\rho_1,\rho_2,\dots,\rho_N)$. Η παράμετρος N αντιπροσωπεύει το συνολικό αριθμό των σημείων πρόσβασης που εκπέμπουν στο σύστημα. Το διάνυσμα αυτό, το οποίο λέγεται δειγματικό διάνυσμα ισχύων λαμβανόμενων σημάτων (sample RSS vector), αποτελείται από τυχαίες μεταβλητές ρ_i , με $i=1, 2, \dots, N$. Κάθε τιμή ρ_i , που αφορά το σήμα που λαμβάνει η υποψήφια θέση από ένα σημείο πρόσβασης, ακολουθεί κανονική κατανομή. Η μέση τιμή του δειγματικού διανύσματος \mathbf{R} που συλλέγει το αντικείμενο άγνωστης θέσης ταυτίζεται με το “δαχτυλικό αποτύπωμα” \tilde{R} της πραγματικής υποψήφιας θέσης του χώρου στην οποία ανήκει το αντικείμενο άγνωστης θέσης.

Επίσης, στο μαθηματικό μοντέλο αυτό παραδεχόμαστε ότι οι τυχαίες μεταβλητές ρ_i , με $i=1, 2, \dots, N$, είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες, και ότι οι τυπικές αποκλίσεις των τυχαίων μεταβλητών ρ_i είναι μεταξύ τους ίσες και ισούνται με σ . Όπως φαίνεται και στην αντίστοιχη μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών της μετρούμενης ισχύος στο κεφάλαιο 3, η παραδοχή της ανεξαρτησίας των σημάτων που εκπέμπουν διαφορετικά σημεία πρόσβασης είναι σε μεγάλο βαθμό ρεαλιστική.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου που προτείνεται λειτουργεί ως εξής: το αντικείμενο άγνωστης θέσης συλλέγει ένα δειγματικό διάνυσμα RSS μετρήσεων από όλα τα σημεία πρόσβασης, και ως θέση του αντικειμένου άγνωστης θέσης επιλέγεται η υποψήφια θέση με “δαχτυλικό αποτύπωμα” που απέχει τη μικρότερη ευκλείδεια διανυσματική απόσταση από το δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων. Επομένως, παρατηρούμε ότι στο σύστημα υπάρχουν δύο κατηγορίες ευκλείδειων διανυσματικών αποστάσεων. Η πρώτη κατηγορία είναι η ευκλείδεια διανυσματική απόσταση:

$$Z_1 = \left[\sum_{i=1}^N (\rho_i - r_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

ανάμεσα στο δειγματικό διάνυσμα RSS μετρήσεων (\mathbf{R}) που συλλέγει το αντικείμενο άγνωστης θέσης σε μία υποψήφια θέση που είναι η πραγματική και το “δαχτυλικό αποτύπωμα” (\tilde{R}) στην υποψήφια θέση αυτή. Η δεύτερη κατηγορία είναι η ευκλείδεια διανυσματική απόσταση:

$$Z_2 = \left[\sum_{i=1}^N (\rho_i - s_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

ανάμεσα στο δειγματικό διάνυσμα RSS μετρήσεων (\mathbf{R}) που συλλέγει το αντικείμενο άγνωστης θέσης σε μία υποψήφια θέση και το “δαχτυλικό αποτύπωμα” $\tilde{S} = (s_1, s_2, \dots, s_N)$ που δεν αντιστοιχεί όμως στην πραγματική υποψήφια θέση στην οποία ανήκει το αντικείμενο άγνωστης θέσης.

Για να μελετηθεί η πιθανότητα σφάλματος στην επιλογή της θέσης του αντικειμένου άγνωστης θέσης θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμο αν μπορούσαμε να μελετήσουμε την κατανομή πιθανότητας των διανυσματικών αποστάσεων Z_1 και Z_2 . Αυτό γιατί, γνωρίζοντας τις κατανομές αυτές, μπορούμε να τις συγκρίνουμε και να πάρουμε τις απαραίτητες στατιστικές πληροφορίες που χρειαζόμαστε για να μελετήσουμε την απόδοση του συστήματος. Για παράδειγμα, αν η διανυσματική απόσταση του δειγματικού διανύσματος \mathbf{R} ενός αντικειμένου άγνωστης θέσης από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής του θέσης είναι μικρότερη ή ίση από ότι η απόσταση του \mathbf{R} από τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των άλλων υποψηφίων θέσεων που δεν είναι οι πραγματικές θέσεις του αντικειμένου, δηλαδή αν ισχύει $Z_1 \leq Z_2$, τότε ο αλγόριθμος επιλέγει τη θέση του αντικειμένου χωρίς σφάλμα. Αν γνωρίζουμε τις κατανομές των Z_1 και Z_2 , τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα του ενδεχομένου $Z_1 \leq Z_2$ και άρα την πιθανότητα η εκτίμηση της θέσης ενός αντικειμένου να είναι ορθή. Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφεται μας δίνει τη δυνατότητα να θεωρήσουμε τις παραπάνω αποστάσεις Z_1 και Z_2 ως τυχαίες μεταβλητές και επομένως να μελετήσουμε τις κατάλληλες πιθανότητες που αντιπροσωπεύουν την ορθή απόδοση του συστήματος. Επιπλέον, μας δίνει τη δυνατότητα να μελετήσουμε τους διάφορους περιβαλλοντικούς, τεχνικούς, και όχι μόνο, παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται οι κατανομές πιθανότητας, και τον τρόπο με τον οποίον οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τις στατιστικές πληροφορίες για την απόδοση του συστήματος. Επομένως, το μαθηματικό μας μοντέλο αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στη μελέτη και σχεδίαση του συστήματος.

Αρχικά, θα περιγράψουμε την κατανομή της απόστασης Z_1 ανάμεσα στο δειγματικό διάνυσμα που συλλέγει το αντικείμενο άγνωστης θέσης και το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής του θέσης.

Η απόσταση $Z_1 = \left[\sum_{i=1}^N (\rho_i - r_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ αποτελείται από ένα άθροισμα παραγόντων $q_i = (\rho_i - r_i)$, για $i = 1, \dots$

, N . Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μέση του δειγματικού διανύσματος $R=(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N)$ που συλλέγει ένα αντικείμενο άγνωστης θέσης ταυτίζεται με το “δαχτυλικό αποτύπωμα” $\tilde{R}=(r_1, r_2, \dots, r_N)$ της υποψήφιας θέσης που είναι η πραγματική θέση του αντικειμένου. Επομένως, κάθε ένας από τους N παράγοντες q_i είναι τυχαία μεταβλητή κανονικής κατανομής, με μηδενική μέση τιμή, επειδή η μέτρηση ρ_i είναι τυχαία μεταβλητή κανονικής κατανομής, με μέση τιμή: $E(\rho_i)=r_i$. Αν θεωρήσουμε το τετράγωνο της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης Z_1 , ως $A=Z_1^2$, τότε παρατηρούμε ότι το τετράγωνο A , το οποίο είναι τυχαία μεταβλητή, αποτελείται από το άθροισμα των τετραγώνων N

κανονικών τυχαίων μεταβλητών q_i , δηλαδή ισχύει: $A=\sum_{i=1}^N q_i^2$. Όμως, το άθροισμα τετραγώνων

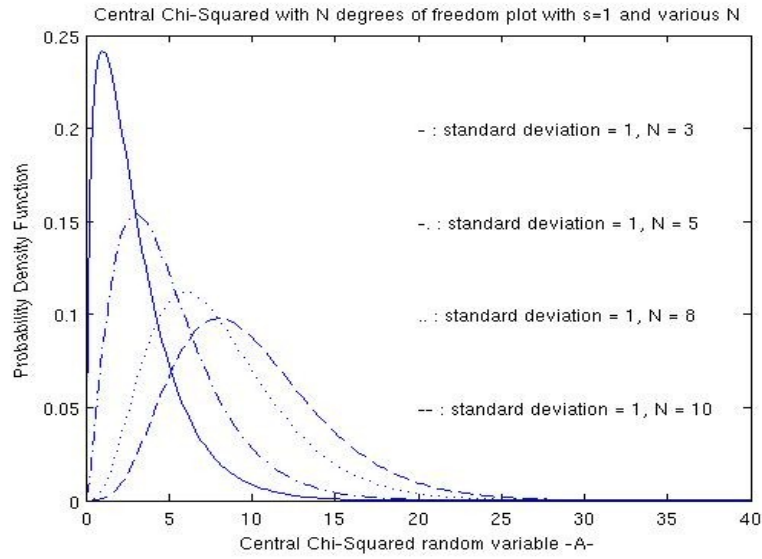
κανονικών κατανομών μηδενικής μέσης τιμής δεν ακολουθεί πλέον κανονική κατανομή, αλλά ακολουθεί μία κατανομή η οποία ονομάζεται κατανομή Χ-Τετράγωνο [81]. Συγκεκριμένα, λόγω του ότι οι κανονικές κατανομές q_i έχουν μηδενική μέση τιμή και είναι N στον αριθμό, και ότι ισχύει $A \geq 0$, η τυχαία μεταβλητή A ακολουθεί κεντροκοιμημένη κατανομή Χ-Τετράγωνο με N βαθμούς ελευθερίας (central chi-squared distribution with N degrees of freedom). Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής A είναι [81], [82]:

$$p_{X^2_N}(A) = \frac{1}{\sigma^N 2^{N/2} \Gamma(N/2)} e^{-A/(2\sigma^2)} A^{(N/2)-1}, \quad (4.3)$$

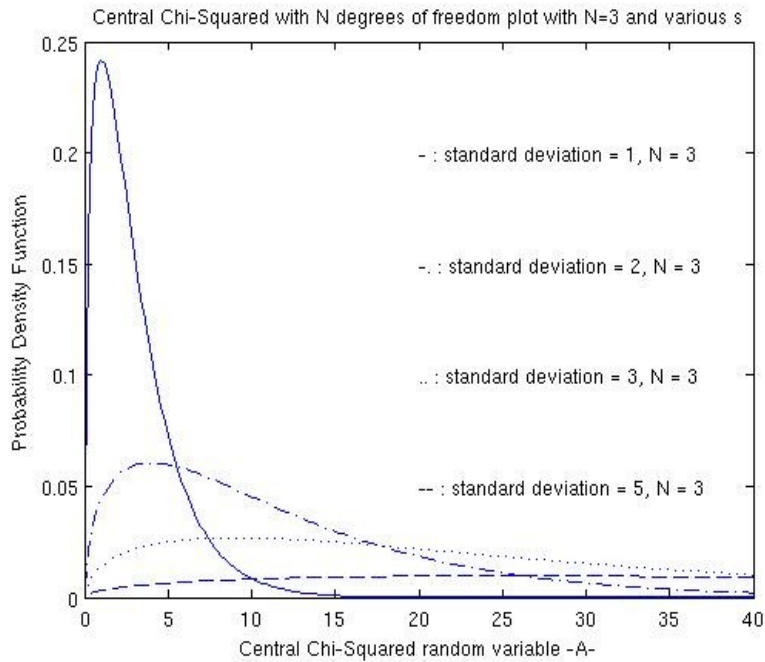
όπου $A \geq 0$, και Γ η γνωστή στα μαθηματικά συνάρτηση Γάμμα, που ορίζεται ως:

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx \quad [83].$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής A εξαρτάται από την τυπική απόκλιση σ των μετρήσεων ρ_i και από τον αριθμό N των σημείων πρόσβασης. Στο ΣΧΗΜΑ 4.1 απεικονίζεται το πώς η μεταβολή του παράγοντα N επηρεάζει την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της A . Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι για σταθερή τυπική απόκλιση $\sigma=1$, όταν ο αριθμός N των σημείων πρόσβασης αυξάνεται, τότε η μέγιστη τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας μειώνεται και μεταφέρεται προς τα δεξιά, και με την αύξηση της τιμής N η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας απλώνεται περισσότερο γύρω από τη μέγιστη τιμή της.



ΣΧΗΜΑ 4.1: Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ A, ΓΙΑ $\sigma=1$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ N.



ΣΧΗΜΑ 4.2: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 4.1, ΓΙΑ $N=3$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ σ .

Από την άλλη, στο ΣΧΗΜΑ 4.2 απεικονίζεται η επίδραση που έχει η μεταβολή της τυπικής απόκλισης σ στην συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της A . Από τις καμπύλες του σχήματος αυτού είναι εμφανές ότι για σταθερό αριθμό από σημεία πρόσβασης, όσο η τυπική απόκλιση σ αυξάνεται, τόσο η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής A απλώνεται σε όλο και μεγαλύτερο εύρος τιμών A . Επίσης, για μεγάλες τιμές της σ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας τείνει να είναι ισοκαταναμημένη σε πολύ μεγάλο εύρος τιμών της μεταβλητής A .

Στη συνέχεια, θα περιγράψουμε την κατανομή B του τετραγώνου της ευκλείδειας απόστασης του δειγματικού διανύσματος που συλλέγει το αντικείμενο άγνωστης θέσης από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” μίας υποψήφιας θέσης, η οποία δεν είναι η πραγματική θέση του αντικειμένου. Όπως και

στην προηγούμενη περίπτωση, η κατανομή $B = \sum_{i=1}^N (\rho_i - s_i)^2$ αποτελείται από το άθροισμα των

τετραγώνων N κανονικών τυχαίων μεταβλητών: $t_i = \rho_i - s_i$, με τη μόνη διαφορά ότι οι κανονικές τυχαίες μεταβλητές t_i δεν έχουν μηδενικές μέσες τιμές, αλλά έχουν μέσες τιμές ίσες με:

$\mu_i = E\{t_i\} = E\{\rho_i\} - s_i = r_i - s_i$, με $i = 1, \dots, N$. Αυτό συμβαίνει γιατί η μέση τιμή του δειγματικού

διανύσματος $R = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N)$ που συλλέγει ένα αντικείμενο άγνωστης θέσης είναι ίση με το “δαχτυλικό αποτύπωμα” $\tilde{R} = (r_1, r_2, \dots, r_N)$ της υποψήφιας θέσης που είναι η πραγματική θέση του

αντικειμένου, και όχι ίση με το “δαχτυλικό αποτύπωμα” $\tilde{S} = (s_1, s_2, \dots, s_N)$ μίας άλλης υποψήφιας θέσης, η οποία δεν είναι η πραγματική θέση του αντικειμένου. Ομοίως με πριν, η τυχαία μεταβλητή

$B = \sum_{i=1}^N t_i^2$, η οποία είναι άθροισμα τετραγώνων κανονικών τυχαίων μεταβλητών, ακολουθεί κατανομή

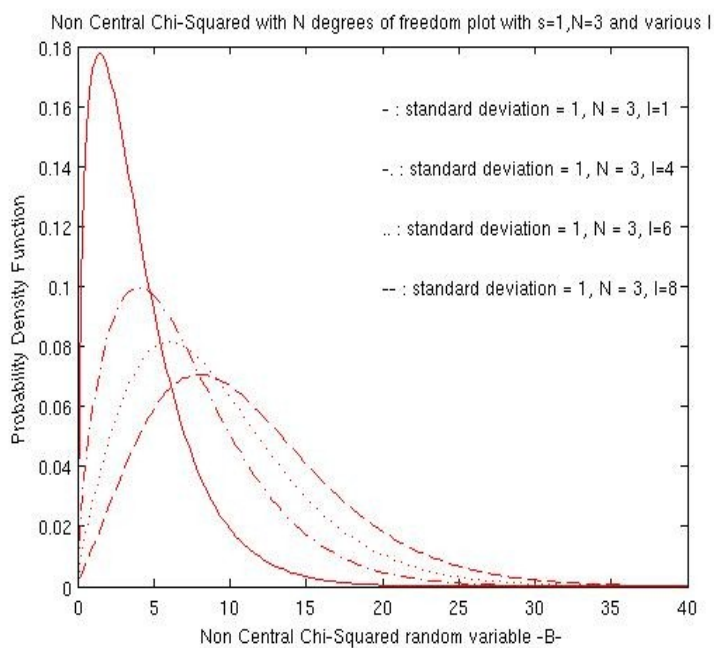
X-Τετράγωνο. Όμως, το γεγονός ότι οι κανονικές τυχαίες μεταβλητές t_i δεν έχουν μηδενική μέση τιμή, αλλά έχουν διάφορες ή ίσες του μηδενός μέσες τιμές μ_i , έχει ως συνέπεια η X-Τετράγωνο κατανομή της B να μην είναι κεντρικοποιημένη (central), αλλά να είναι μη-κεντρικοποιημένη (non-central). Επομένως, η τυχαία μεταβλητή B , η οποία είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός και αποτελείται από N κανονικές μεταβλητές t_i , ακολουθεί μη-κεντρικοποιημένη κατανομή X-Τετράγωνο με N βαθμούς ελευθερίας (non-central chi-squared distribution with N degrees of freedom).

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής B είναι [79]:

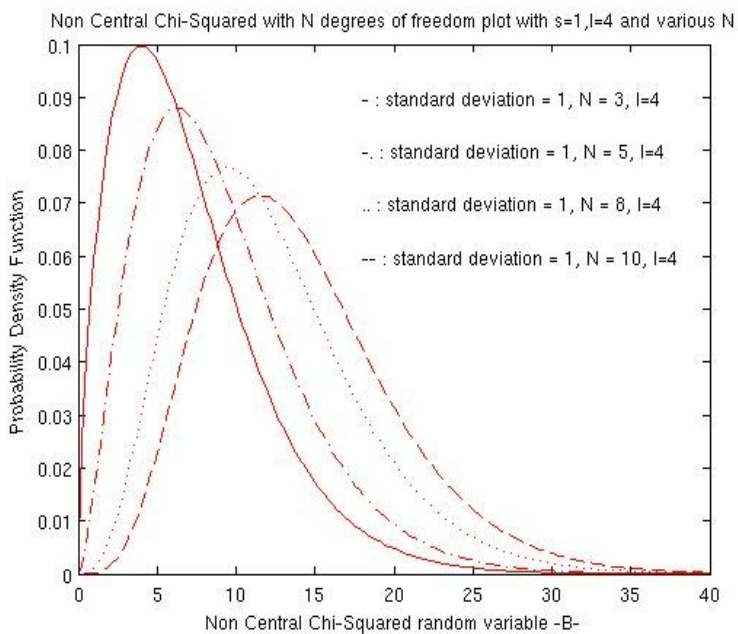
$$p_{X^2_{\lambda}}(B) = e^{-\frac{\lambda+B}{2\sigma^2}} \frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{B}{\lambda}\right)^{\frac{N-2}{4}} I_{\frac{N-2}{2}}\left(\frac{\sqrt{\lambda B}}{\sigma}\right), \quad (4.4)$$

όπου $B \geq 0$, $I_a(x)$ η α -τάξης τροποποιημένη συνάρτηση Bessel, και $\lambda = \sum_{i=1}^N \mu_i^2$ η παράμετρος μη-κεντρικότητας (non-centrality parameter). Η παράμετρος μη-κεντρικότητας λ εκφράζει την απόσταση ανάμεσα στα “δαχτυλικά αποτυπώματα” της πραγματικής θέσης του αντικειμένου άγνωστης θέσης και μίας γειτονικής της υποψήφιας θέσης. Έτσι, η παράμετρος μη-κεντρικότητας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ως ένα μέτρο της απόστασης ανάμεσα στις υποψήφιες θέσεις του τετραγωνικού πλέγματος του χώρου μελέτης μας. Όση μεγαλύτερη απόσταση έχουν μεταξύ τους δύο γειτονικές θέσεις του τετραγωνικού πλέγματος, τόσο περισσότερο θα διαφέρουν μεταξύ τους οι RSS μετρήσεις από τα σημεία πρόσβασης στις θέσεις αυτές και άρα τόσο θα αυξάνεται η διαφορά ανάμεσα στα “δαχτυλικά αποτυπώματα” $\tilde{R} = (r_1, r_2, \dots, r_N)$ και $\tilde{S} = (s_1, s_2, \dots, s_N)$ των δύο αυτών γειτονικών θέσεων. Επομένως, όταν αυξάνεται η απόσταση μεταξύ δύο υποψήφιων θέσεων στο τετραγωνικό πλέγμα, οι τιμές $\mu_i = r_i - s_i$ αυξάνονται, και συνεπώς η παράμετρος λ αυξάνεται.

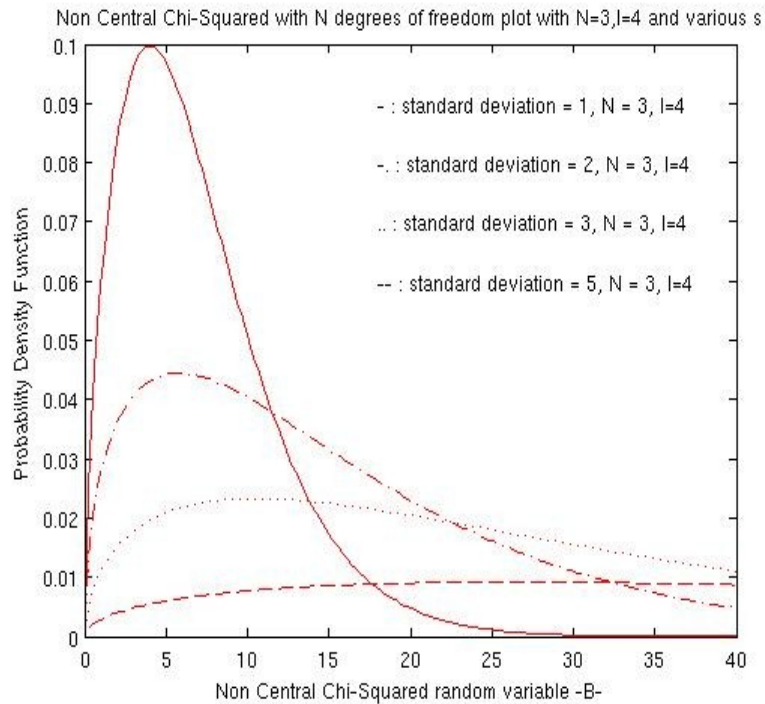
Συγκριτικά με τη μεταβλητή A , η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής B δεν εξαρτάται μόνο από την τυπική απόκλιση σ των μετρήσεων ρ_i και από τον αριθμό N των σημείων πρόσβασης, αλλά εξαρτάται και από την παράμετρο μη-κεντρικότητας λ . Στα ΣΧΗΜΑΤΑ 4.3, 4.4 και 4.5 απεικονίζεται το πώς επηρεάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής B από τη μεταβολή της παραμέτρου λ , από τη μεταβολή του αριθμού N των σημείων πρόσβασης και από τη μεταβολή της τυπικής απόκλισης σ , αντίστοιχα. Μελετώντας το ΣΧΗΜΑ 4.3, παρατηρούμε ότι για σταθερές τιμές των σ και N , όταν αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου λ , τότε η μέγιστη τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της B μετατοπίζεται δεξιότερα και παράλληλα ελαττώνεται, ενώ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας απλώνεται σε μεγαλύτερο εύρος τιμών γύρω από τη μέγιστη τιμή της. Επίσης, όπως προκύπτει από το ΣΧΗΜΑ 4.4, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο μεταβάλλεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της B όταν αυξάνεται ο αριθμός N των σημείων πρόσβασης, όταν οι τιμές των σ και λ είναι σταθερές.



ΣΧΗΜΑ 4.3: Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ B , ΓΙΑ $\sigma=1, N=3$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ λ .



ΣΧΗΜΑ 4.4: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 4.3, ΓΙΑ $\sigma=1, \lambda=4$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ N .



ΣΧΗΜΑ 4.5: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 4.3, ΓΙΑ $N=3$, $\lambda=4$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ σ .

Τέλος, από τις καμπύλες του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 4.5 παρατηρούμε ότι, όπως και στην περίπτωση της μεταβλητής A , για σταθερό αριθμό από σημεία πρόσβασης και σταθερό λ , όσο η τυπική απόκλιση σ αυξάνεται, τόσο η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής B απλώνεται σε όλο και μεγαλύτερο εύρος τιμών B . Επίσης, για μεγάλες τιμές της σ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας τείνει να είναι ισοκατανεμημένη σε πολύ μεγάλο εύρος τιμών της μεταβλητής B .

Έχοντας μελετήσει τη συμπεριφορά των κατανομών των μεταβλητών A και B στη μεταβολή των παραμέτρων σ , N και λ , το βασικό ερώτημα που προκύπτει είναι ποιες τιμές θα επιδιώξει ο σχεδιαστής του συστήματος εντοπισμού θέσης να έχουν οι παράμετροι αυτές, έτσι ώστε το σφάλμα στην εκτίμηση μιας θέσης να είναι όσο το δυνατό μικρότερο. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σύμφωνα με τον αλγόριθμο του συστήματος που μελετάμε, ως θέση του αντικείμενου άγνωστης θέσης επιλέγεται η υποψήφια θέση το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της οποίας απέχει την ελάχιστη απόσταση από το δειγματικό διάνυσμα του αντικείμενου άγνωστης θέσης. Αν όμως η απόσταση του δειγματικού διανύσματος από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης ενός αντικείμενου δεν μετρηθεί ως η ελάχιστη,

δηλαδή αν τιμή A προκύψει μεγαλύτερη από μία τιμή B , τότε η υποψήφια θέση που θα επιλεγεί ως η θέση στην οποία βρίσκεται το αντικείμενο δεν θα είναι η πραγματική του θέση. Επομένως, αν ισχύει $A > B$, υπάρχει σφάλμα στην εκτίμηση μιας θέσης. Όμως, όταν το μέγιστο της κατανομής της μεταβλητής A βρίσκεται αριστερότερα του μεγίστου της κατανομής της μεταβλητής B , όταν τα μέγιστα των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των A και B απέχουν πολύ μεταξύ τους, και όταν κάθε μία κατανομή είναι συγκεντρωμένη σε ένα στενό εύρος τιμών γύρω από την τιμή μέγιστης πιθανότητας, τότε η πιθανότητα να ισχύσει $A > B$, και επομένως να έχουμε σφάλμα στην επιλογή της θέσης, ελαττώνεται.

Μελετώντας τις καμπύλες σχετικά με την κεντρικοποιημένη Χ-Τετράγωνο κατανομή της μεταβλητής A , συμπεραίνουμε ότι οι τιμές των παραμέτρων σ και N θα έπρεπε να είναι μικρές, γιατί τότε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της A είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά, απέχοντας πιθανότατα αρκετά από το μέγιστο της κατανομής της μεταβλητής B , και είναι συγκεντρωμένη σε ένα σχετικά μικρό εύρος τιμών γύρω από την τιμή μέγιστης πιθανότητας. Έτσι, αν υποθέσουμε παράλληλα ότι και το μέγιστο της κατανομής της B βρίσκεται αρκετά δεξιότερα από αυτό της κατανομής A , και ότι η κατανομή της B είναι συγκεντρωμένη σε ικανοποιητικά στενό εύρος τιμών, τότε η μεταβολή που προκαλεί η μείωση των παραμέτρων σ και N στην κατανομή της A συντελεί στο να μειωθεί η πιθανότητα σφάλματος.

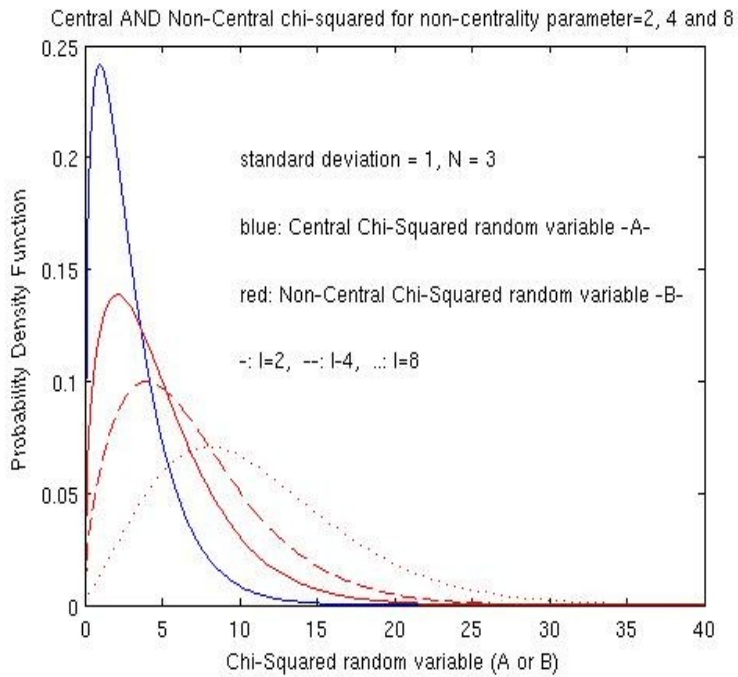
Ομοίως, μελετώντας τις σχετικές με τη μη-κεντρικοποιημένη Χ-Τετράγωνο κατανομή της μεταβλητής B καμπύλες, μία μεγάλη τιμή της παραμέτρου μη-κεντρικότητας λ θα είχε ως αποτέλεσμα το μέγιστο της κατανομής της μεταβλητής B να μετακινηθεί αρκετά δεξιότερα, ενώ μία μεγάλη τιμή της παραμέτρου N θα είχε το ίδιο αποτέλεσμα. Επίσης, οι μικρές τιμές της τυπικής απόκλισης σ εξασφαλίζουν τη συγκέντρωση της κατανομής σε σχετικά στενό εύρος τιμών γύρω από την τιμή μέγιστης πιθανότητας. Επομένως, οι μεγάλες τιμές των παραμέτρων λ και N , και η μικρή τιμή της παραμέτρου σ , θα συντελούσαν στο να μειωθεί το σφάλμα στην επιλογή της θέσης, με την υπόθεση βέβαια ότι και το μέγιστο της κατανομής της A βρίσκεται αρκετά αριστερότερα και η κατανομή της A είναι συγκεντρωμένη σε ικανοποιητικά στενό εύρος τιμών.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις αφορούν τη μελέτη κάθε μίας κατανομής ξεχωριστά. Όμως, τα συμπεράσματα σχετικά με την επιλογή των τιμών των διάφορων παραμέτρων δεν είναι ακόμα ασφαλή, γιατί η αύξηση ή μείωση μίας παραμέτρου θα ήταν δυνατό να μεταβάλλει την κατανομή A έτσι ώστε να ευνοηθεί η μείωση της πιθανότητας σφάλματος, αλλά παράλληλα να μεταβάλλει την κατανομή της B με τρόπο που να συντελεί στην αύξηση της πιθανότητας σφάλματος, ή το αντίστροφο. Επομένως,

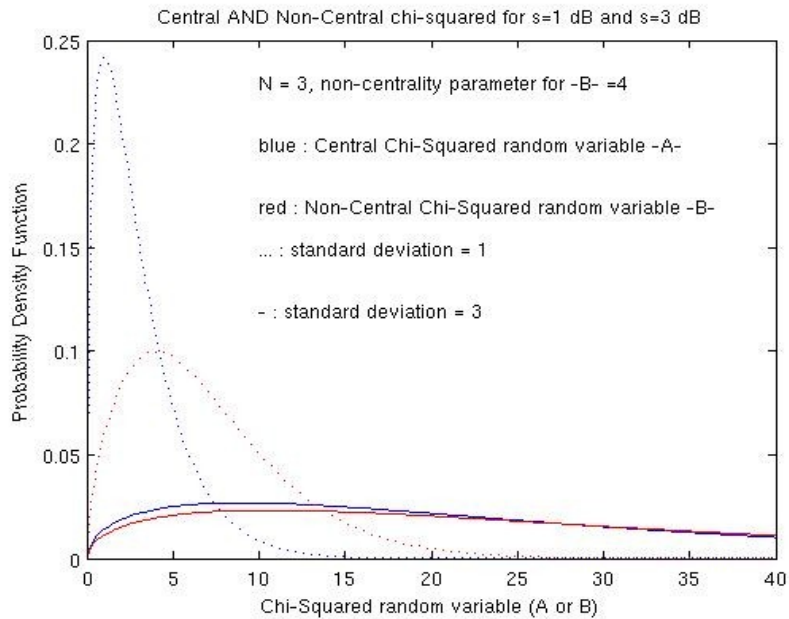
για να σχηματίσουμε ένα ολοκληρωμένο συμπέρασμα για το πώς οι μεταβολές των παραμέτρων σ , N και λ επηρεάζουν την πιθανότητα σφάλματος, πρέπει να συνδυάσουμε τα συμπεράσματά μας που αφορούν κάθε μία κατανομή ξεχωριστά, και κυρίως να μελετήσουμε το πώς μεταβάλλονται και οι δύο κατανομές A και B μαζί. Δηλαδή, πρέπει να παρατηρήσουμε για ποιες τιμές των παραμέτρων τα μέγιστα των δύο κατανομών απομακρύνονται μεταξύ τους, ενώ παράλληλα και οι δύο κατανομές συγκεντρώνονται σε στενά εύρη τιμών. Και μόνο αν εμφανίσουν αυτή τη συμπεριφορά και οι δύο κατανομές η πιθανότητα σφάλματος θα μειωθεί.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα συμπεράσματά μας, παρατηρούμε ότι όταν η παράμετρος μη-κεντρικότητας λ αυξάνεται, τότε η κατανομή της μεταβλητής A μένει σταθερή, ενώ το μέγιστο της κατανομή της μη-κεντρικοποιημένης Χ-Τετράγωνο μεταβλητής B μετακινείται ακόμα πιο δεξιά από το μέγιστο της κατανομή της A . Αυτό επιβεβαιώνεται και από το ΣΧΗΜΑ 4.6, όπου είναι φανερό ότι για μεγάλη τιμή της παραμέτρου λ , και σταθερές τις παραμέτρους σ και N , τα μέγιστα των κατανομών των A και B είναι απομακρυσμένα αρκετά μεταξύ τους, ενώ η διαπλάτυνση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της B δεν είναι τόσο αξιόλογη ώστε να επηρεάζει σημαντικά την πιθανότητα σφάλματος. Επομένως, όταν οι τιμές της παραμέτρου μη-κεντρικότητας λ είναι μεγάλες, τότε η πιθανότητα σφάλματος στην επιλογή μιας θέσης μειώνεται, γιατί μειώνεται η πιθανότητα η μεταβλητή B να είναι μικρότερη από μία τιμή της μεταβλητής A .

Επίσης, τα προηγούμενα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της μεταβολής της τυπικής απόκλισης σ στις κατανομές των A και B , μας οδηγούν στη διαπίστωση ότι για μεγάλες τιμές της σ οι κατανομές των μεταβλητών A και B τείνουν να ταυτιστούν. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνεται από το ΣΧΗΜΑ 4.7, σύμφωνα με το οποίο, όταν η παράμετρος σ αυξάνεται, με σταθερές τις άλλες παραμέτρους, τότε οι κατανομές και των δύο μεταβλητών A και B διευρύνονται και τείνουν να ισοκατανεμηθούν σε ένα πολύ μεγάλο εύρος τιμών. Επομένως, ο σχεδιαστής του συστήματος εντοπισμού θέσης επιδιώκει η τιμή της τυπικής απόκλισης σ να είναι μικρή, γιατί αν η τιμή της σ είναι μεγάλη, τότε οι κατανομές των A και B πλησιάζουν αισθητά η μία την άλλη, τείνοντας να ταυτισθούν. Και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η πιθανότητα ορθής απόφασης στην επιλογή μιας θέσης να μειώνεται, γιατί όταν οι κατανομές των A και B τείνουν να εξισωθούν, τότε για κάθε ευκλείδεια διανυσματική απόσταση που υπολογίζεται, η πιθανότητα η αντίστοιχη υποψήφια θέση να είναι η πραγματική θέση ενός αντικειμένου είναι σχεδόν ίση με την πιθανότητα να μην είναι η πραγματική θέση. Έτσι, για μεγάλες τιμές της σ , η ελάχιστη ευκλείδεια απόσταση που υπολογίζεται είναι αρκετά πιθανό να μην αφορά την πραγματική θέση ενός αντικειμένου, και έτσι η πιθανότητα σφάλματος αυξάνεται.



ΣΧΗΜΑ 4.6: ΟΙ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ Α ΚΑΙ Β, ΓΙΑ $N=3$, $\sigma=1$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ λ



ΣΧΗΜΑ 4.7: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 4.6, ΓΙΑ $N=3$, $\lambda=4$ ΚΑΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ σ .

Σ

4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΔΥΟ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ

Προηγουμένως, η σύγκριση της κεντροκοποιημένης και της μη-κεντροκοποιημένης Χ-Τετράγωνο κατανομής μας βοήθησε να πάρουμε μία ιδέα σχετικά με το αν οι μεταβολές κάποιων παραμέτρων του συστήματος επηρεάζουν θετικά ή αρνητικά την ορθότητα της απόφασης για την επιλογή μιας θέσης. Όμως, τα συμπεράσματά μας ήταν διαισθητικά και δεν δίνουν ακριβείς και ποσοτικές πληροφορίες. Επομένως, στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να βρούμε ένα μέτρο που να δίνει αριθμητικές πληροφορίες σχετικά με το βαθμό που επηρεάζουν οι μεταβολές μερικών παραμέτρων του συστήματος το σφάλμα εντοπισμού. Και ένα πολύ χρήσιμο μέτρο προς αυτή την κατεύθυνση είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας ορθής εκτίμησης μιας θέσης [79].

Υποθέτουμε ότι στον χώρο υπάρχουν μόνο δύο υποψήφιες θέσεις. Η μία, η οποία έχει “δαχτυλικό αποτύπωμα” $\tilde{R} = (r_1, r_2, \dots, r_N)$, είναι η πραγματική θέση ενός αντικειμένου του οποίου τη θέση θέλουμε να εντοπίσουμε, ενώ η άλλη υποψήφια θέση έχει “δαχτυλικό αποτύπωμα” $\tilde{S} = (s_1, s_2, \dots, s_N)$. Τότε, η πιθανότητα ορθής εκτίμησης της θέσης του αντικειμένου είναι ίση με την πιθανότητα του ενδεχομένου η απόσταση του δειγματικού διανύσματος από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης του αντικειμένου να είναι μικρότερη ή ίση από την απόσταση του δειγματικού διανύσματος από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποψήφιας θέσης η οποία δεν είναι η πραγματική. Συνεπώς, η πιθανότητα ορθής εκτίμησης της θέσης του αντικειμένου θα μπορούσε να είναι ίση με την

πιθανότητα του ενδεχομένου: $A \leq B$, όπου $A = \sum_{i=1}^N (\rho_i - r_i)^2$ το τετράγωνο της ευκλείδειας

διανυσματικής απόστασης του δειγματικού διανύσματος που συλλέγει το αντικείμενο άγνωστης θέσης από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποψήφιας θέσης που είναι η πραγματική θέση του αντικειμένου,

και $B = \sum_{i=1}^N (\rho_i - s_i)^2$ το τετράγωνο της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης του δειγματικού

διανύσματος που συλλέγει το αντικείμενο άγνωστης θέσης από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” μίας υποψήφιας θέσης, η οποία δεν είναι η πραγματική θέση του αντικειμένου.

Πιο αναλυτικά, το ενδεχόμενο $A \leq B$ μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$\begin{aligned}
 A \leq B &\Rightarrow \\
 A - B \leq 0 &\Rightarrow \\
 \sum_{i=1}^N (\rho_i - r_i)^2 - \sum_{i=1}^N (\rho_i - s_i)^2 \leq 0 &\Rightarrow \\
 2 \sum_{i=1}^N \rho_i \beta_i + \sum_{i=1}^N \gamma_i \leq 0, & \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

όπου: $\beta_i = s_i - r_i$ και $\gamma_i = r_i^2 - s_i^2$.

Η μεταβλητή $C = 2 \sum_{i=1}^N \rho_i \beta_i + \sum_{i=1}^N \gamma_i$ ακολουθεί κανονική κατανομή επειδή αποτελεί γραμμικό συνδυασμό των κανονικών μεταβλητών ρ_i . Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι κανονικές μεταβλητές ρ_i έχουν μέση τιμή r_i και τυπική απόκλιση σ . Από τις ιδιότητες της κατανομής Gauss προκύπτει ότι η μέση τιμή της κανονικής κατανομής C είναι:

$$\mu_C = 2 \sum_{i=1}^N r_i \beta_i + \sum_{i=1}^N \gamma_i, \quad (4.6)$$

ενώ η τυπική της απόκλιση είναι:

$$\sigma_C = \sqrt{\sum_{i=1}^N (2\beta_i \sigma)^2}. \quad (4.7)$$

Επομένως, συμπεραίνουμε ότι τελικώς η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης είναι ίση με την πιθανότητα η κανονική τυχαία μεταβλητή C να είναι μικρότερη ή ίση του μηδενός. Όμως, αν μία τυχαία μεταβλητή γνωρίζουμε ότι ακολουθεί κατανομή Gauss, και η μέση τιμή της και η τυπική της απόκλιση είναι γνωστές σε εμάς, τότε γνωρίζουμε και την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής αυτής. Επομένως, από τη στιγμή που η μεταβλητή C ακολουθεί κατανομή Gauss με γνωστή μέση τιμή μ_C και γνωστή τυπική απόκλιση σ_C , τότε γνωρίζουμε την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της C , και συνεπώς μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα του ενδεχομένου: $C \leq 0$,

που ισοδυναμεί με το ενδεχόμενο: $A \leq B$.

Έτσι, με τη βοήθεια της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της C , η πιθανότητα ορθής απόφασης στην επιλογή της θέσης ενός αντικειμένου υπολογίζεται ως εξής:

$$Pr(C \leq 0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_C} e^{-\frac{(C-\mu_C)^2}{2\sigma_C^2}} dC = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_C}{\sqrt{2}\sigma_C}} e^{-t^2} dt = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(-\frac{\mu_C}{\sqrt{2}\sigma_C}\right), \quad (4.8)$$

όπου: $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ [84] η συνάρτηση σφάλματος.

Με μία πρώτη ματιά, παρατηρούμε ότι ο μαθηματικός τύπος της πιθανότητας ορθής εκτίμησης εξαρτάται από τη μέση τιμή μ_C και την τυπική απόκλιση σ_C της τυχαίας μεταβλητής C . Όμως, η μέση τιμή μ_C εξαρτάται από τον αριθμό N των σημείων πρόσβασης, από τις παραμέτρους β_i και γ_i , και από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” $\vec{R} = (r_1, r_2, \dots, r_N)$ της πραγματικής θέσης του αντικείμενου άγνωστης θέσης. Επίσης, η τυπική απόκλιση σ_C εξαρτάται από τον αριθμό N των σημείων πρόσβασης, από την παράμετρο β_i , και από την τυπική απόκλιση σ των κανονικών κατανομών ρ_i . Οι παράμετροι όμως $\beta_i = s_i - r_i$ και $\gamma_i = r_i^2 - s_i^2$ εξαρτώνται από τη διαφορά των μέσων τιμών των ισχύων που λαμβάνουν οι δύο υποψήφιος θέσεις από το i -στό σημείο πρόσβασης, και άρα εκφράζουν τη διαφορά των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” στις θέσεις αυτές.

Δύο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαφορά των μέσων μετρούμενων ισχύων σε δύο υποψήφιος θέσεις, και άρα επηρεάζουν τις τιμές των μεταβλητών β_i και γ_i , είναι η εξασθένιση του σήματος στο περιβάλλον εσωτερικού χώρου όπου πραγματοποιείται η μελέτη, και η απόσταση μεταξύ των δύο υποψήφιος θέσεων. Η εξάρτηση των μεταβλητών β_i και γ_i από την εξασθένιση των σημάτων οφείλεται στο ότι, αν στο περιβάλλον εσωτερικού χώρου η εξασθένιση των σημάτων είναι μεγάλη, τότε είναι λογικό οι μετρούμενες ισχύεις, και άρα και τα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, σε διαφορετικές υποψήφιος θέσεις, να διαφέρουν περισσότερο μεταξύ τους. Επίσης, η εξάρτηση των μεταβλητών αυτών από την απόσταση μεταξύ των υποψήφιος θέσεων, οφείλεται στο ότι μία μεγάλη απόσταση ανάμεσα σε δύο υποψήφιος θέσεις εκφράζει προσεγγιστικά μία μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις αποστάσεις των υποψήφιος θέσεων αυτών από το ίδιο σημείο πρόσβασης, και επομένως εκφράζει μεγάλη διαφορά στις τιμές των μετρούμενων ισχύων στις υποψήφιος θέσεις αυτές. Επομένως, αν η

εξασθένιση των σημάτων στον χώρο αντιπροσωπευθεί από μία σταθερά α ενός κατάλληλου μοντέλου απωλειών διαδρομής (path loss), και αν οι αποστάσεις ανάμεσα στις υποψήφιες θέσεις ενός τετραγωνικού πλέγματος αντιπροσωπευθούν από μία παράμετρο g , τότε θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι απόλυτες τιμές των παραμέτρων β_i και γ_i αυξάνονται ή μειώνονται, με την αύξηση ή μείωση, αντίστοιχα, των παραμέτρων α και g . Έτσι, οι παράμετροι β_i και γ_i μπορούν να συσχετιστούν με την παράμετρο μη-κεντρικότητας λ , η οποία, όπως αναφέραμε προηγουμένως, είναι ένα διαισθητικό μέτρο της απόστασης ανάμεσα στις υποψήφιες θέσεις του τετραγωνικού πλέγματος του χώρου μελέτης μας, και κατ' επέκταση και της διανυσματικής απόστασης ανάμεσα στα “δαχτυλικά αποτυπώματα”.

Από όλα αυτά συμπεραίνουμε ότι η πιθανότητα ορθής εκτίμησης της θέσης ενός αντικειμένου εξαρτάται από τη συμπεριφορά του σήματος στον εσωτερικό χώρο μελέτης ως προς την εξασθένισή του και τη μεταβλητότά του, αλλά και από διάφορες παραμέτρους της τοπολογίας του συστήματος, όπως ο τρόπος επιλογής των υποψήφιων θέσεων και των σημείων πρόσβασης. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσαμε να μελετήσουμε την πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης λαμβάνοντας υπόψη το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής υποψήφιας θέσης, τον αριθμό N των access points, την τυπική απόκλιση σ των κανονικών κατανομών ρ_i , και τις διαφορές του “δαχτυλικού αποτυπώματος” της πραγματικής υποψήφιας θέσης από τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των μη πραγματικών υποψήφιων θέσεων. Η διαφορά ανάμεσα στα “δαχτυλικά αποτυπώματα” της πραγματικής και μιας μη πραγματικής υποψήφιας θέσης θα μπορούσε να μελετηθεί μέσω της απόστασης g των υποψήφιων θέσεων του τετραγωνικού πλέγματος και μέσω της σταθεράς εξασθένισης α του εσωτερικού χώρου. Η εξάρτηση της ορθότητας της εκτίμησης μιας θέσης από κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά είχε επαληθευθεί και στη μελέτη των Χ-Τετράγωνο κατανομών των μεταβλητών A και B .

4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΠΟΛΛΕΣ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ

Ο προηγούμενος τύπος της πιθανότητας ορθής εκτίμησης αφορούσε την απλοποιημένη περίπτωση όπου υπάρχουν δύο μόνο υποψήφιες θέσεις. Όμως, στα πραγματικά συστήματα που χρησιμοποιούν μέθοδο “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, ο αριθμός των υποψήφιων θέσεων είναι πολύ μεγαλύτερος από δύο. Επομένως, είναι αναγκαίο να βρεθεί ένας νέος τύπος που να εκφράζει την πιθανότητα ορθής εκτίμησης και στην περίπτωση που υπάρχουν πολλές υποψήφιες θέσεις.

Στην προηγούμενη περίπτωση, η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης είχε οριστεί ως η πιθανότητα του ενδεχομένου: $\{ C=A-B \leq 0 \}$, δηλαδή η πιθανότητα του ενδεχομένου το τετράγωνο A

της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης του δειγματικού RSS διανύσματος από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης του αντικειμένου άγνωστης θέσης να είναι μικρότερο ή ίσο από το τετράγωνο B της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης του δειγματικού RSS διανύσματος από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της γειτονικής υποψήφιας θέσης που δεν είναι η πραγματική. Στην περίπτωση όμως που στο σύστημα υπάρχουν πολλές υποψήφιας θέσεις, τότε για να μην υπάρχει σφάλμα στην εκτίμηση της θέσης ενός αντικειμένου, θα πρέπει το δειγματικό RSS διάνυσμα να απέχει από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής υποψήφιας θέσης απόσταση μικρότερη ή ίση από την απόστασή του από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” κάθε μίας γειτονικής της πραγματικής υποψήφιας θέσης. Επομένως, αν εκτός της πραγματικής θέσης υπάρχουν συνολικά στο σύστημα K υποψήφιας θέσεις, αν η πραγματική θέση του αντικειμένου που θέλουμε να εντοπίσουμε είναι η m -στή υποψήφια θέση, και αν B_j είναι το τετράγωνο της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης του δειγματικού RSS διανύσματος από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της j -στής υποψήφιας θέσης η οποία δεν είναι η πραγματική, τότε για να μην υπάρχει σφάλμα στην εκτίμηση μιας θέσης, θα πρέπει να ισχύει: $C_j = A - B_j \leq 0$, για κάθε $j = 1, \dots, K$, και $j \neq m$.

Από όλα τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στην περίπτωση όπου στο σύστημα υπάρχουν πολλές υποψήφιας θέσεις, τότε η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης προκύπτει από τον εξής τύπο:

$$Pr\{Correct\ Estimation\} = Pr\{C_1 \leq 0, \dots, C_K \leq 0\}. \quad (4.9)$$

Επομένως, για υπολογιστεί η πιθανότητα ορθής εκτίμησης είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών της μορφής: $C_j = A - B_j \leq 0$, για $j = 1, \dots, K$, και $j \neq m$.

Όμως, παρά το γεγονός ότι είναι γνωστή η κατανομή κάθε μίας από τις κανονικές τυχαίες μεταβλητές C_j ξεχωριστά, η εύρεση της από κοινού συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών C_j δεν είναι εύκολη υπόθεση, γιατί απαιτεί πολλούς υπολογισμούς και μελέτη της συσχέτισης ανάμεσα στις μεταβλητές αυτές. Ιδιαίτερα, αν ο συνολικός αριθμός K των διάφορων της πραγματικής υποψήφιας θέσεων είναι αρκετά μεγάλος, τότε ο εντοπισμός της από κοινού κατανομής γίνεται ακόμα πιο δύσκολος.

Ένας καλός τρόπος υπολογισμού της πιθανότητας ορθής εκτίμησης μιας θέσης, χωρίς να χρειάζεται να

χρησιμοποιηθεί η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών C_j , είναι να κάνουμε την παραδοχή ότι οι τυχαίες μεταβλητές C_j είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση, η παραδοχή της ανεξαρτησίας απλοποιεί τον τύπο της πιθανότητας ορθής εκτίμησης μιας θέσης σε αυτή τη μορφή:

$$Pr\{Correct\ Estimation\} = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^K Pr\{C_j \leq 0\}, \quad (4.10)$$

όπου $Pr\{C_j \leq 0\}$ είναι ο τύπος (4.8) της πιθανότητας ορθής εκτίμησης σε συστήματα που αποτελούνται από δύο μόνο υποψήφια θέσεις, όταν οι δύο θέσεις αυτές είναι η πραγματική θέση του αντικειμένου άγνωστης θέσης και η j -στή υποψήφια θέση του πραγματικού συστήματος.

Όμως, η υπόθεση ότι οι μεταβλητές C_j είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους δεν είναι σωστή. Αυτό, γιατί όλες οι μεταβλητές $C_j = A - B_j$ εξαρτώνται από την μεταβλητή A , και άρα εμμέσως εξαρτώνται από το δειγματικό διάνυσμα ισχύων που συλλέγει το αντικείμενο άγνωστης θέσης και από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης του αντικειμένου. Επίσης, όλα τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” συσχετίζονται μεταξύ τους επειδή συλλέγουν σήματα από τα ίδια σημεία πρόσβασης. Επομένως, ο παραπάνω τύπος της πιθανότητας ορθής εκτίμησης μιας θέσης, όταν υπάρχουν K διάφορες της πραγματικής υποψήφιας θέσεις στο σύστημα και η πραγματική θέση ενός αντικειμένου είναι η m -στή υποψήφια θέση, είναι προσεγγιστικός και εμπεριέχει σφάλμα, αφού οι μεταβλητές C_j δεν μπορεί να είναι ανεξάρτητες. Όμως, όταν η συσχέτιση ανάμεσα στις μεταβλητές C_j ελαττώνεται, τότε ελαττώνεται και το σφάλμα του παραπάνω τύπου. Στο κεφάλαιο 6 θα διερευνήσουμε πόσο σημαντικό είναι το σφάλμα του προσεγγιστικού τύπου της πιθανότητας ορθής απόφασης, κάτω υπό ποιες συνθήκες είναι ανεκτό, αλλά και με ποιους τρόπους θα μπορούσε ο τύπος αυτός να βελτιωθεί.

Επίσης, τονίζουμε ότι η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης δεν αποτελεί μέτρο της μέσης ακρίβειας (accuracy), ή της κατανομής της ακρίβειας (precision). Οι έννοιες accuracy και precision εξηγήθηκαν στην παράγραφο 1.5. Θα μπορούσαμε όμως να πούμε ότι η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης αποτελεί μία ιδιαίτερη περίπτωση της precision, όταν η απόσταση σφάλματος είναι ίση με μηδέν. Έτσι, η πιθανότητα ορθής εκτίμησης ισούται με την τιμή της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος, για απόσταση σφάλματος ίση με μηδέν.

4.5 ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΜΕΣΩ ΧΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ

Μέχρι τώρα έχει μελετηθεί ένας τρόπος μοντελοποίησης συστημάτων εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, ο οποίος στηρίζεται σε διάφορες παραδοχές, όπως η παραδοχή της κανονικής κατανομής των λαμβανόμενων ισχύων. Οι τύποι υπολογισμού της πιθανότητας ορθής εκτίμησης, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, απεικονίζουν την μοντελοποίηση του συστήματος με έναν αναλυτικό μαθηματικό τρόπο. Όμως, οι τύποι αυτοί παρουσιάζουν σφάλματα, επειδή είτε λαμβάνουν υπόψη λιγότερους υποψήφιους γείτονες από ό,τι πρέπει κατά τη μελέτη του συστήματος, είτε θεωρούν ανεξαρτησία ανάμεσα στις μεταβλητές C_j οι οποίες εξηγήθηκαν παραπάνω.

Ένας εναλλακτικός τρόπος χειρισμού της μοντελοποίησης του συστήματος εντοπισμού θέσης είναι η απευθείας χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή για τον υπολογισμό της αξιοπιστίας του συστήματος, χωρίς τη χρησιμοποίηση ενός αναλυτικού μαθηματικού τύπου. Σύμφωνα με τον τρόπο αυτόν, η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης δεν υπολογίζεται μέσω αναλυτικών μαθηματικών τύπων, αλλά υπολογίζεται με άμεσο τρόπο, προσομοιώνοντας στον υπολογιστή τη λειτουργία του συστήματος εντοπισμού θέσης, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις παραδοχές του συστήματος.

Ο άμεσος υπολογισμός της πιθανότητας ορθής εκτίμησης πραγματοποιείται μέσω της δημιουργίας ενός κατάλληλου αλγόριθμου σε μία γλώσσα προγραμματισμού. Πιο συγκεκριμένα, για να υπολογιστεί η πιθανότητα ορθής εκτίμησης απευθείας μέσω υπολογιστή, κατά τον αλγόριθμο, λαμβάνεται ένας πολύ μεγάλος αριθμός από τυχαία δειγματικά διανύσματα τιμών, τα οποία όμως ακολουθούν κανονική κατανομή, με μέση τιμή ίση με το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποψήφιας θέσης που θεωρούμε ότι είναι η πραγματική. Στη συνέχεια, για κάθε ένα από τα δειγματικά διανύσματα, υπολογίζεται η απόστασή του από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης και συγκρίνεται με τις αποστάσεις του από τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των άλλων υποψήφιων θέσεων. Η πιθανότητα ορθής εκτίμησης προκύπτει από το λόγο του αριθμού των δειγματικών διανυσμάτων που απείχαν από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης απόσταση μικρότερη ή ίση από τις αποστάσεις τους από τα άλλα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, προς το συνολικό αριθμό των δειγματικών διανυσμάτων.

Το σημαντικό πλεονέκτημα του άμεσου υπολογισμού της πιθανότητας ορθής εκτίμησης μέσω υπολογιστή, είναι ότι περιλαμβάνει μόνο τα σφάλματα λόγω των βασικών παραδοχών της μοντελοποίησης του συστήματος, και δεν περιλαμβάνει τα επιπρόσθετα σφάλματα που εισάγουν οι

δύο αναλυτικοί μαθηματικοί τύποι που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Όμως, το μειονέκτημα του απευθείας υπολογισμού των πιθανοτήτων είναι το κόστος σε χρόνο της προσομοίωσης του αλγόριθμου, και η ενδεχόμενη πολυπλοκότητα του αλγόριθμου. Στην περίπτωση του άμεσου υπολογισμού, ο μελετητής του συστήματος περιορίζεται από την ταχύτητα επεξεργασίας του ηλεκτρονικού υπολογιστή, ενώ επίσης επιδιώκει να αναπτύξει έναν αλγόριθμο με όσο το δυνατό μικρότερη πολυπλοκότητα. Επίσης, η χρήση ενός αναλυτικού μαθηματικού τύπου παρέχει στον μελετητή καλύτερη διαισθητική επαφή και καλύτερη θεωρητική τριβή με το αντικείμενο μελέτης, από ότι μία απευθείας προγραμματιστική προσομοίωση.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα της πιθανότητας ορθής εκτίμησης μέσω άμεσης προσομοίωσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια, προέκυψαν με προγραμματισμό σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB (Version 7.0.0.19901 (R14)). Στον αλγόριθμο χρησιμοποιήθηκαν 100000 δειγματικά διανύσματα. Μετά από συνεχείς προσομοιώσεις, παρατηρήθηκε ότι για αριθμούς δειγματικών διανυσμάτων μεγαλύτερους από 100000 τα αποτελέσματα ήταν σχεδόν ίδια. Επίσης, έγιναν πολλές τροποποιήσεις στον αλγόριθμο, μέχρι ο χρόνος εκτέλεσής του να γίνει ανεκτός. Παρατηρήθηκε ότι όταν ο αλγόριθμος δεν κάνει 100000 ξεχωριστές συγκρίσεις αποστάσεων των δειγματικών διανυσμάτων από τα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, αλλά συγκρίνει πίνακες δεδομένων μεταξύ τους, όσο μεγάλου μεγέθους και αν είναι, τότε η ταχύτητα προσομοίωσης είναι εντυπωσιακά υψηλότερη.

4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Η απόσταση σφάλματος (distance error) εκφράζει την ευκλείδεια απόσταση ανάμεσα στην εκτιμώμενη και την πραγματική θέση ενός αντικειμένου. Όπως έχουμε πει στην παράγραφο 1.5, η μέση τιμή της απόστασης σφάλματος αποτελεί ένα πολύ γνωστό μέτρο της μέσης ακρίβειας (accuracy) ενός συστήματος εντοπισμού θέσης, ενώ η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος αποτελεί ένα πολύ γνωστό εργαλείο μέτρησης της κατανομής της ακρίβειας (precision) του συστήματος. Έτσι, αν για ένα σύστημα εντοπισμού θέσης υπολογιστεί η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (Cumulative Probability Function: CDF) της απόστασης σφάλματος, τότε μπορεί να συγκριθεί ως προς την ακρίβεια με πολλά άλλα συστήματα.

Ένας τρόπος με τον οποίον θα μπορούσε να υπολογιστεί η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας στο μοντελοποιημένο σύστημα που μελετάμε, είναι αν δουλεύαμε με παρόμοιο τρόπο με την παράγραφο 4.5. Δηλαδή αν δεν χρησιμοποιούσαμε κάποιον μαθηματικό τύπο, αλλά καταγράφαμε την αποστάσεις

σφάλματος για έναν πολύ μεγάλο αριθμό από τυχαία δειγματικά διανύσματα τιμών.

Εναλλακτικά, ο υπολογισμός της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος θα μπορούσε να γίνει αν χρησιμοποιούσαμε τον αναλυτικό μαθηματικό τύπο (4.8). Τότε, η διαδικασία υπολογισμού θα γινόταν ως εξής. Αρχικά, θα υπολογίζαμε την πιθανότητα να εκτιμηθεί από τον αλγόριθμο ως πραγματική μία άλλη υποψήφια θέση η οποία δεν είναι η πραγματική. Για παράδειγμα, η πιθανότητα να εκτιμηθεί, λανθασμένα, ως πραγματική η j -στή υποψήφια θέση, αντί της i -στής υποψήφιας θέσης, που είναι η πραγματική, θα μπορούσε να υπολογιστεί από τον εξής τύπο [85]:

$$Pr\{\text{Selecting } j \text{ instead } i\} = (1 - Pr_{i,j}) \prod_{k \neq i,j} Pr_{j,k}, \quad (4.11)$$

όπου $Pr_{m,n}$ είναι ο (4.8), όταν λαμβάνει υπόψη του την m -στή και την n -στή υποψήφια θέση, και από αυτές η m -στή υποψήφια θέση είναι η πραγματική θέση.

Έτσι, ο (4.11) εκφράζει την πιθανότητα να εκτιμηθεί ως πραγματική θέση η j και όχι η i , και ταυτόχρονα την πιθανότητα να επιλεγθεί η j -στή υποψήφια θέση αντί οποιαδήποτε άλλης, πέραν της i -στής, υποψήφιας θέσης.

Στη συνέχεια, αν υπολογιστεί ο (4.11) για κάθε δυνατή τιμή της παραμέτρου j , και αν οι τιμές της πιθανότητας που υπολογίζει παρουσιάζονται ως συνάρτηση της απόστασης σφάλματος, δηλαδή ως συνάρτηση της απόστασης ανάμεσα στην i -στή υποψήφια θέση και σε κάθε j -στή υποψήφια θέση που εκτιμάται εσφαλμένα ως η πραγματική, τότε μπορεί εύκολα να προκύψει η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος, όταν η πραγματική θέση είναι η i -στή. Επιπλέον, αν υπολογιστεί η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος θεωρώντας κάθε φορά μία διαφορετική υποψήφια θέση ως την πραγματική, και αν πάρουμε το μέσο όρο των αποτελεσμάτων αυτών, τότε μπορεί να προκύψει η μέση συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος, η οποία εκφράζει όλο το σύστημα συνολικά. Όμως, σημειώνουμε ότι αν η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος υπολογιστεί με αναλυτικό μαθηματικό τρόπο, τότε περιέχει σφάλμα, γιατί, όπως συμβαίνει και στον (4.10), ο (4.11) θεωρεί ότι υπάρχει ανεξαρτησία μεταξύ των συγκρίσεων των αποστάσεων των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”.

Στη συνέχεια της μελέτης μας θα εστιάσουμε στην πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης, και όχι στην συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος. Άλλωστε, ο υπολογισμός της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος εξαρτάται από τις υπολογισμένες τιμές της πιθανότητα ορθής εκτίμησης των θέσεων, και συνεπώς, η σε βάθος μελέτη της πιθανότητας ορθής

εκτίμησης, και η κατανόηση των παραγόντων από τους οποίους εξαρτάται, είναι θεμελιώδης για τον σχεδιασμό ενός συστήματος.

Όμως, πρέπει να τονίσουμε ότι η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος δεν εξαρτάται μόνο από την πιθανότητα ορθής, ή λανθασμένης εκτίμησης μιας θέσης, αλλά εξαρτάται και από την ακρίβεια πληροφορίας (ανάλυση πληροφορίας) που δίνει το σύστημα για τις πιθανές θέσεις ενός αντικειμένου. Η ακρίβεια (ή ανάλυση) της πληροφορίας των θέσεων αφορά το πόση είναι η ελάχιστη δυνατή απόσταση για την οποία το σύστημα θεωρεί δύο θέσεις του χώρου σαν ξεχωριστές. Αν στο σύστημα υπάρχουν υποψήφιας θέσεις καθορισμένων συντεταγμένων, και αν το σύστημα θεωρεί ότι ένα αντικείμενο άγνωστης θέσης μπορεί να βρίσκεται μόνο σε κάποια υποψήφια θέση, και όχι σε κάποια ενδιάμεση τυχαία θέση, τότε η ακρίβεια της πληροφορίας για τις πιθανές θέσεις εξαρτάται άμεσα από τις αποστάσεις ανάμεσα στις υποψήφιας θέσεις, ή από το τετραγωνικό πλέγμα των υποψήφιας θέσεων, αν αυτές είναι σε συμμετρία. Από την άλλη, αν ο αλγόριθμος εντοπισμού δίνει ως πληροφορία τις συντεταγμένες μίας θέσης, τότε η ακρίβεια της πληροφορίας είναι μεγάλη.

Σε ένα σύστημα που αποτελείται από υποψήφιας θέσεις, η εξάρτηση της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος από την πιθανότητα ορθής εκτίμησης και από την ακρίβεια (ή ανάλυση) της πληροφορίας για τις πιθανές θέσεις, φαίνεται από το εξής παράδειγμα. Έστω ότι σε ένα σύστημα εντοπισμού η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης είναι μεγάλη, αλλά όμως οι υποψήφιας θέσεις είναι αρκετά απομακρυσμένες μεταξύ τους, και συνεπώς η ακρίβεια της πληροφορίας για τις πιθανές θέσεις είναι μικρή. Τότε, ακόμα και αν ο αλγόριθμος επιλέξει τη σωστή υποψήφιας θέση ως πραγματική, είναι πιθανό η πραγματική θέση να μην ταυτίζεται με την υποψήφιας θέση επιλογής, αλλά να είναι απομακρυσμένη από αυτήν. Έτσι, αν και η πιθανότητα ορθής εκτίμησης είναι υψηλή, είναι δυνατό να υπάρχει σημαντική απόσταση σφάλματος (distance error). Επομένως, φαίνεται η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος να εξαρτάται όχι μόνο από την πιθανότητα ορθής εκτίμησης, αλλά και από την ακρίβεια (ή ανάλυση) της πληροφορίας για τις πιθανές θέσεις.

Επιπλέον, όπως θα εξηγηθεί με πειραματικό τρόπο και στο κεφάλαιο 5, υπάρχει μία αντίστροφη αναλογία ανάμεσα στην ακρίβεια (ή ανάλυση) της πληροφορίας για τις πιθανές θέσεις και στην πιθανότητα ορθής εκτίμησης, λόγω της εξάρτησης της πιθανότητας ορθής εκτίμησης από το διάστημα του τετραγωνικού πλέγματος των υποψήφιας θέσεων. Έτσι, ο σχεδιαστής του συστήματος οφείλει να λάβει σοβαρά υπόψη του τους δύο αυτούς παράγοντες, με σκοπό να εξασφαλίσει για το σύστημα ικανοποιητικές τιμές μέσης ακρίβειας (accuracy) και κατανομής της ακρίβειας (precision).

Τέλος, αναφέρουμε ότι η απόσταση σφάλματος επηρεάζεται και από την ενδεχόμενη κίνηση του

αντικειμένου άγνωστης θέσης. Αν το αντικείμενο κινείται γρήγορα, ή αν ο χρόνος εκτίμησης της θέσης του κινούμενου αντικειμένου είναι μεγάλος, τότε αυτό πιθανότατα θα έχει ως αποτέλεσμα όταν το σύστημα ενημερώσει τον χρήστη του για μια θέση, τότε η πραγματική θέση του αντικειμένου να έχει αλλάξει.

4.7 ΟΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Οι κυριότερες παραδοχές που έγιναν κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος είναι οι εξής:

1) Θεωρήσαμε ότι η τιμή της ισχύος που μετράται σε κάθε υποψήφια θέση του εσωτερικού χώρου ακολουθεί κανονική κατανομή. Όμως, στην πραγματικότητα, όπως εξηγήσαμε και στην παράγραφο 3.4.4, η παραδοχή αυτή δεν είναι αρκετά αξιόπιστη, και μόνο σε ορισμένες συνθήκες, όπως συνθήκες έλλειψης οπτικής επαφής ή σε περιπτώσεις μεγάλης απόστασης του δέκτη από τον πομπό, η παραδοχή της κανονικής κατανομής θα είχε περισσότερες πιθανότητες να είναι αξιόπιστη.

2) Υποθέσαμε ότι η τυπική απόκλιση της μετρούμενης ισχύος σε μία υποψήφια θέση έχει σταθερή τιμή, ανεξαρτήτως από ποιο σημείο πρόσβασης προέρχεται το σήμα που μετράται. Επίσης, θεωρήσαμε ότι η τιμή της τυπικής απόκλισης είναι η ίδια για όλες τις υποψήφιες θέσεις. Όμως, όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 3.4.5, έχει παρατηρηθεί ότι στην πραγματικότητα, σε εσωτερικούς χώρους σαν αυτόν που μελετάμε, οι τυπικές αποκλίσεις διαφέρουν από θέση σε θέση, αλλά και από σημείο πρόσβασης σε σημείο πρόσβασης. Άλλωστε, οι χρονικές μεταβολές και η χωρική ανομοιομορφία των περιβαλλοντικών συνθηκών διάδοσης των σημάτων, και ιδιαίτερος σε έναν εσωτερικό χώρο ο οποίος χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη τυχαιότητα στη διάδοση των σημάτων, θα απέτρεπαν μία τέτοια παραδοχή. Επίσης, αν ο μελετητής του συστήματος αποφασίσει να αποδώσει στον εσωτερικό χώρο μία τυποποιημένη τιμή τυπικής απόκλισης, χωρίς να την υπολογίσει πειραματικά, τότε είναι πολύ πιθανό η τιμή αυτή να μην αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά τις πραγματικές συνθήκες διάδοσης, και έτσι να περιέχει σημαντικό σφάλμα.

3) Θεωρήσαμε ότι κάθε αντικείμενο άγνωστης θέσης είναι δυνατό να βρίσκεται μόνο σε μία από τις υποψήφιες θέσεις του συστήματος, και όχι σε κάποια άλλη ενδιάμεση τυχαία θέση. Αυτό όμως είναι δύσκολο να πραγματοποιείται συχνά στην πράξη. Η παραδοχή αυτή είναι θεμελιώδης για την ανάπτυξη του μοντέλου του συστήματος, επειδή μόνο αν ισχύει αυτή η παραδοχή, κάθε δειγματικό διάλυμα τιμών μετρούμενης ισχύος που λαμβάνεται κατά το online στάδιο θα μπορούσε να έχει μέση

τιμή ίση με το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποψήφιας θέσης που είναι η πραγματική θέση. Όμως, εκτός από την μη ικανοποίηση της παραπάνω παραδοχής, υπάρχουν και άλλες περιπτώσεις όπου το δειγματικό διάνυσμα τιμών ισχύος θα μπορούσε να μην έχει μία μέση τιμή ίση με την τιμή ενός από τα καταγεγραμμένα στη βάση δεδομένων του συστήματος “δαχτυλικά αποτυπώματα”. Για παράδειγμα, οι πραγματικές τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” θα μπορούσαν να είναι διαφορετικές των καταγεγραμμένων, λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών, ή λόγω μη σωστής μέτρησης ή μη σωστού υπολογισμού τους κατά το offline στάδιο.

4) Θεωρήθηκε ότι οι τυχαίες μεταβλητές που αφορούν τις μετρούμενες ισχύεις από τα σήματα που εκπέμπονται από τα σημεία πρόσβασης, οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή, είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η παραδοχή αυτή είναι αποδεκτή, αφού δεν υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στα σήματα που εκπέμπονται από διαφορετικά σημεία πρόσβασης. Άλλωστε, η ανεξαρτησία των σημείων πρόσβασης αποδείχθηκε και στην παράγραφο 3.4.8, όπου μελετήθηκαν αρκετές τιμές συντελεστών συσχέτισης που προέκυψαν πειραματικά.

5) Κατά τη μελέτη του συστήματος με τη βοήθεια του μοντέλου που αναπτύχθηκε, θεωρούμε ότι κάθε στιγμή, σε κάθε υποψήφια θέση είναι ορατά όλα τα σημεία πρόσβασης. Όμως, κυρίως λόγω της εξασθένισης των σημάτων, ορισμένα σημεία πρόσβασης είναι δυνατό να μην είναι ορατά από ορισμένες θέσεις. Επίσης, λόγω μεταβολών των περιβαλλοντικών συνθηκών, είναι δυνατό σε κάποιες υποψήφιες θέσεις να μεταβάλλεται το είδος και ο αριθμός των ορατών σημείων πρόσβασης. Επίσης, έχει αναφερθεί ότι στην πράξη μόνο λίγα σημεία πρόσβασης συνηθίζεται να είναι ορατά στα WLANs [79].

6) Οι τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” στα κεφάλαια 5 και 6 δεν προέκυψαν πειραματικά, αλλά χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο απωλειών διαδρομής. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μέσων απωλειών διαδρομής του (5.1), το οποίο, αν αντικατασταθεί στον (5.2), υπολογίζει την απόλυτη μέση τιμή της μετρούμενης ισχύος σε μία υποψήφια θέση, για σήμα εκπεμπόμενο από ένα σημείο πρόσβασης. Όμως, όπως περιγράψαμε και στο κεφάλαιο 3, οι τιμές που υπολογίζονται με αυτόν τον τρόπο δεν λαμβάνουν υπόψη τους την ανομοιομορφία του περιβάλλοντος, και συνεπώς αγνοούνται οι μεταβολές που μπορεί να έχει η τοπική μέση τιμή της ισχύος σε ίσες αποστάσεις από τον πομπό, η οποία θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι ακολουθεί λογαριθμο-κανονική κατανομή. Συνεπώς, αν ο

μελετητής του συστήματος επιθυμεί να υπολογίσει τις τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” χρησιμοποιώντας κάποιο μαθηματικό τύπο, και όχι πειραματικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει ένα εναλλακτικό μοντέλο μέτρησης της τοπικής μέσης ισχύος, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη του σε ικανοποιητικό βαθμό την ανομοιομορφία του περιβάλλοντος διάδοσης. Ένα καλό παράδειγμα τέτοιου μοντέλου είναι το μοντέλο Παράγοντα Εξασθένησης Τοίχων (Wall Attenuation Factor: WAF) [22], το οποίο λαμβάνει υπόψη του τις επιδράσεις της ύπαρξης τοίχων μεταξύ πομπού και δέκτη στον εσωτερικό χώρο. Επίσης, πρέπει να σημειώσουμε ότι η εφαρμογή οποιουδήποτε μαθηματικού μοντέλου για τον υπολογισμό των ισχύων είναι πιθανό να περιλαμβάνει σφάλματα, λόγω μη καλής προσαρμογής του στις πραγματικές συνθήκες διάδοσης.

7) Υποθέτουμε ότι κατά τους υπολογισμούς των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” αγνοείται ο προσανατολισμός του χρήστη που πραγματοποιεί τις μετρήσεις. Όμως, όπως έχουμε αναφέρει και στην παράγραφο 3.4.2, για να είναι αξιόπιστο το σύστημα εντοπισμού θέσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός του χρηστών των φορητών υπολογιστών που πραγματοποιούν τις μετρήσεις. Αντιθέτως, το αναλυτικό μας μοντέλο υποθέτει ότι οι μεταβολές στις μετρούμενες ισχύεις λόγω του προσανατολισμού του χρήστη εξουδετερώνονται μεταξύ τους όταν πραγματοποιούνται μετρήσεις σε όλες τις υποψήφιες θέσεις [79]. Επίσης, στο σύστημα που μοντελοποιούμε δεν λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός των κεραιών, ο οποίος είναι πιθανό να επηρεάζει τις μετρούμενες τιμές και κατ' επέκταση την αξιοπιστία του συστήματος.

8) Στο σύστημα που μοντελοποιούμε (στο κεφάλαιο 5) χρησιμοποιήθηκε ένα νοητό απλό τετραγωνικό πλέγμα, πάνω στο οποίο είναι συμμετρικά τοποθετημένες οι υποψήφιες θέσεις. Βασιζόμενοι σε αυτό, μελετάμε την εξάρτηση από τη σταθερά g που εκφράζει το διάστημα πλέγματος. Όμως, σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, οι υποψήφιες θέσεις είναι πολύ δύσκολο να είναι διατεταγμένες με έναν τόσο συμμετρικό τρόπο, αφού υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί στον εσωτερικό χώρο, όπως τοίχοι ή άλλα απρόβλεπτα αντικείμενα, τα οποία εμποδίζουν τη συμμετρία. Έτσι, η σταθερά g που μελετάται δεν μπορεί να είναι ίση μεταξύ όλων των γειτονικών υποψήφιων θέσεων. Επίσης, αν και στο απλοποιημένο σύστημα που μελετάμε τα σημεία πρόσβασης θεωρείται ότι είναι τοποθετημένα σε καθορισμένες θέσεις του πλέγματος, στην πραγματικότητα τα σημεία πρόσβασης τοποθετούνται συνήθως σε τυχαίες θέσεις, λόγω περιορισμών του κτιρίου, ή λόγω του ότι οι θέσεις των σημείων πρόσβασης προϋπήρχαν στο ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιείται ως υποδομή για την

ανάπτυξη του συστήματος εντοπισμού θέσης.

9) Όταν χρησιμοποιείται ο (4.10), γίνεται η παραδοχή ότι οι μεταβλητές C_j είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Όμως, όπως έχουμε εξηγήσει, η παραδοχή αυτή είναι εσφαλμένη, και μόνο κάτω υπό ορισμένες συνθήκες το σφάλμα της θα μπορούσε να μειωθεί.

10) Όταν υπολογίζουμε την πιθανότητα ορθής εκτίμησης, δεν λαμβάνουμε υπόψη μας ότι το αντικείμενο άγνωστης θέσης είναι δυνατό να κινείται. Όμως, στη πραγματικότητα, ακόμα και αν ο αλγόριθμος επιλέξει επιτυχώς την πραγματική θέση που έχει το αντικείμενο άγνωστης θέσης τη στιγμή που λαμβάνεται το δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων του online σταδίου, είναι πιθανό η πραγματική θέση του αντικείμενου να έχει αλλάξει κατά τη χρονική διάρκεια που απαιτείται από το σύστημα για να εκτιμήσει μία θέση. Το σφάλμα στην αξιοπιστία του συστήματος λόγω κίνησης του αντικείμενου, εξαρτάται από την ταχύτητα του αντικείμενου άγνωστης θέσης, αλλά και από το χρόνο υπολογισμού του συστήματος για την εκτίμηση μιας θέσης. Σύμφωνα όμως με το μοντέλο που μελετάμε, ή το αντικείμενο θεωρείται ακίνητο, ή ο χρόνος υπολογισμού για την εκτίμηση μιας θέσης θεωρείται αμελητέος, ή, γενικότερα, το μοντέλο ενδιαφέρεται μόνο για την ορθότητα της εκτίμησης της θέσης που είχε το αντικείμενο τη στιγμή που λήφθηκε το δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων του online σταδίου. Επίσης, αν μπορεί να προβλεφθεί ο τρόπος κίνησης του αντικείμενου, τότε είναι ευκολότερο για τον σχεδιαστή του συστήματος να διορθώσει το σφάλμα λόγω κίνησης.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο που προτείνεται για το σύστημα εντοπισμού θέσης, σε ορισμένες περιπτώσεις βασίζεται σε παραδοχές που είναι αμφισβητήσιμες, και αυτό είναι αρνητικό για την αξιοπιστία του. Όμως, η μοντελοποίηση του συστήματος που προτείνεται, δεν παύει να αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιαστή του συστήματος, το οποίο τον βοηθά να κάνει μία πρωταρχική εκτίμηση και έναν πρωταρχικό σχεδιασμό ενός συστήματος. Επιπλέον, το μοντέλο αποτελεί ένα σημαντικό θεωρητικό και μαθηματικό υπόβαθρο για την κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος.

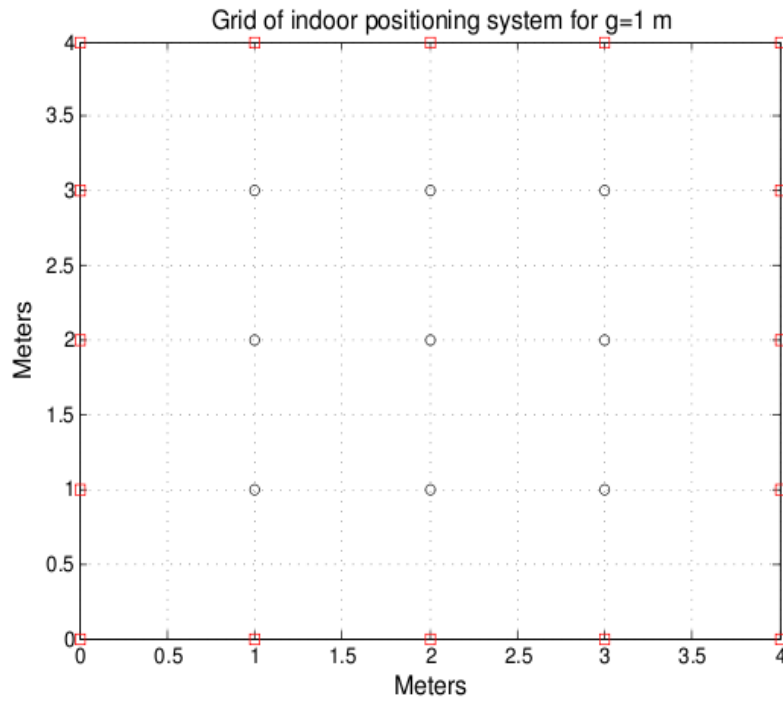
5 ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.

5.1 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΑΤΑΙ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

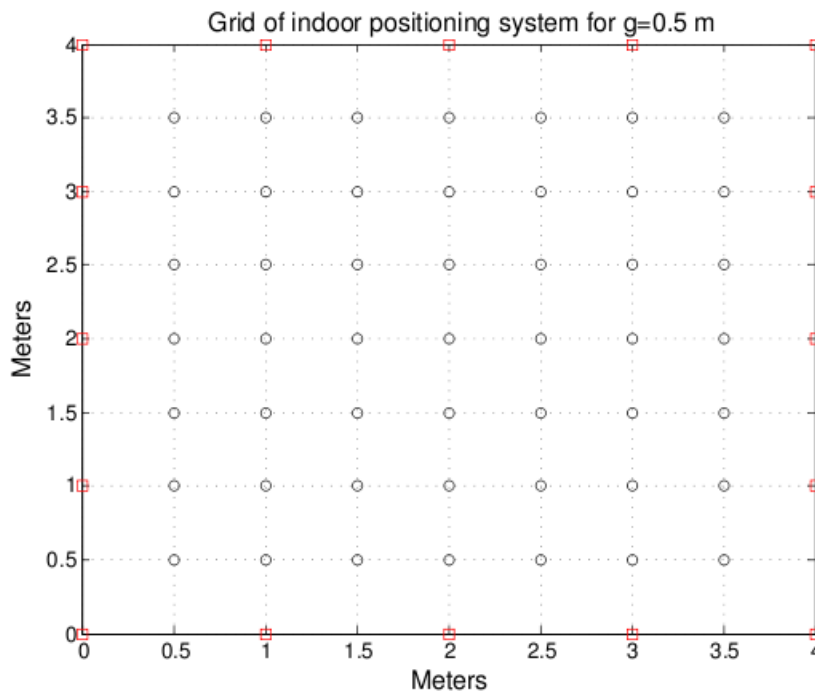
5.1.1 ΤΑ ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το σύστημα εντοπισμού θέσης που θα μελετήσουμε μέσω του μαθηματικού μοντέλου εφαρμόζεται σε έναν εσωτερικού τύπου χώρο. Το σύστημα εντοπισμού θέσης αυτό, το οποίο θεωρούμε ότι πληρεί τις προϋποθέσεις που είναι αναγκαίες για να μπορεί να μελετηθεί με τη βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου που παρουσιάστηκε προηγουμένως, περιλαμβάνει ένα νοητό τετραγωνικό πλέγμα υποψήφιων θέσεων. Στο ΣΧΗΜΑ 5.1 απεικονίζεται το τετραγωνικό πλέγμα, στην περίπτωση που οι κάθετες ή οριζόντιες αποστάσεις μεταξύ των υποψήφιων θέσεων είναι $g = 1$ m. Η παράμετρος g ονομάζεται διάστημα πλέγματος (grid spacing) και εκφράζει τις οριζόντιες ή κάθετες αποστάσεις μεταξύ γειτονικών υποψήφιων θέσεων του πλέγματος, οι οποίες είναι συμμετρικά τοποθετημένες στον εσωτερικό χώρο του πλέγματος. Οι διαστάσεις του τετραγωνικού πλέγματος είναι σταθερές και ίσες με $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, ενώ οι ακραίες θέσεις του πλέγματος, οι οποίες στο ΣΧΗΜΑ 5.1 είναι μαρκαρισμένες με ένα μικρό τετραγωνάκι, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά μόνο για την τοποθέτηση σημείων πρόσβασης (access points). Δηλαδή, οι εξής 16 θέσεις, με συντεταγμένες: $(0, 0)$, $(4, 4)$, $(0, 4)$, $(4, 0)$, $(2, 0)$, $(4, 2)$, $(2, 4)$, $(0, 2)$, $(1, 0)$, $(4, 1)$, $(3, 4)$, $(0, 3)$, $(3, 0)$, $(4, 3)$, $(1, 4)$ και $(0, 1)$, δεσμεύονται μόνο για την τοποθέτηση των σημείων πρόσβασης ΣΠ1, ΣΠ2, ΣΠ3, ΣΠ4, ΣΠ5, ΣΠ6, ΣΠ7, ΣΠ8, ΣΠ9, ΣΠ10, ΣΠ11, ΣΠ12, ΣΠ13, ΣΠ14, ΣΠ15 και ΣΠ16 αντίστοιχα. Κατά τη λειτουργία του συστήματος εντοπισμού δεν είναι απαραίτητο να εκπέμπουν πάντα ταυτόχρονα όλα τα σημεία πρόσβασης, αλλά εκπέμπουν όποια από αυτά κρίνει ο μελετητής του συστήματος. Ο μελετητής του συγκεκριμένου συστήματος εντοπισμού θεωρείται ότι έχει τη δυνατότητα να τοποθετεί σημεία πρόσβασης σε όποιες από τις 16 δεσμευμένες θέσεις επιθυμεί, και με τον τρόπο που αυτός κρίνει.

Οι υπόλοιπες μαρκαρισμένες θέσεις του σχήματος είναι οι υποψήφιες θέσεις του συστήματος εντοπισμού θέσης. Η τιμή της παραμέτρου g καθορίζει έμμεσα και τον συνολικό αριθμό των υποψήφιων θέσεων του συστήματος εντοπισμού θέσης, το πλέγμα του οποίου έχει περιορισμένες διαστάσεις. Για παράδειγμα, στο τετραγωνικό πλέγμα του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.1, όπου οι αποστάσεις μεταξύ υποψήφιων θέσεων είναι $g=1$ m, ο συνολικός αριθμός υποψήφιων θέσεων είναι 9.



ΣΧΗΜΑ 5.1: ΤΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΕ ΔΙΑΣΤΗΜΑ $g=1$ m.



ΣΧΗΜΑ 5.2: ΤΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΕ ΔΙΑΣΤΗΜΑ $g=0.5$ m.

Επίσης, στο τετραγωνικό πλέγμα του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.2, όπου οι αποστάσεις μεταξύ υποψήφιων θέσεων είναι $g=0.5$ m, ο συνολικός αριθμός υποψήφιων θέσεων είναι 49. Πάλι, στο ΣΧΗΜΑ 5.2 οι συντεταγμένες που είναι μαρκαρισμένες με τετραγωνάκια αποτελούν θέσεις στις οποίες δεσμεύονται μόνο σημεία πρόσβασης.

Στους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν, θεωρούμε ότι η υποψήφια θέση με συντεταγμένες (2, 2) είναι η πραγματική θέση ενός αντικείμενου, τη θέση του οποίου θέλουμε να εντοπίσουμε. Πρέπει να τονίσουμε ότι στο σύστημα εντοπισμού θέσης που μελετάται έχει γίνει η παραδοχή ότι οι υποψήφιες θέσεις και τα σημεία πρόσβασης βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, γεγονός το οποίο είναι πολύ δύσκολο να ισχύει στην πραγματικότητα. Επίσης, παράγοντες όπως οι περιορισμένες διαστάσεις του τετραγωνικού πλέγματος, ή οι ίσες αποστάσεις μεταξύ υποψήφιων θέσεων και η συμμετρικότητα αυτών, κάνουν το συγκεκριμένο σύστημα εντοπισμού θέσης αρκετά απλοποιημένο.

5.1.2 ΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

5.1.2.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”

Για λόγους ελάττωσης του κόστους σε χρόνο και χρήμα, οι τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, η γνώση των οποίων είναι απαραίτητη για τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος, είναι πολλές φορές χρήσιμο να υπολογίζονται με τη βοήθεια ενός τυποποιημένου μοντέλου απωλειών διαδρομής σήματος, και όχι μετά από πραγματικές μετρήσεις κατά το offline στάδιο. Έτσι, στο σύστημα που μελετάται, αποφασίζεται για τους υπολογισμούς των μέσων τιμών στις διάφορες υποψήφιες θέσεις του συστήματος, και άρα για τους υπολογισμούς των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” αυτών, να χρησιμοποιηθεί ο εξής τύπος της απόλυτης μέσης τιμής απωλειών διαδρομής (mean path loss) [87], [69]:

$$L(d_{j,k}) = L(d_0) + 10 \cdot \alpha \cdot \log_{10} \left(\frac{d_{j,k}}{d_0} \right), \quad (5.1)$$

όπου: $L(d_0)$ οι απώλειες διαδρομής σε απόσταση d_0 από τον πομπό και για διάδοση οπτικής επαφής, α ο εκθέτης απωλειών διαδρομής, και $d_{j,k}$ η απόσταση μεταξύ της k-στής υποψήφιας θέσης και του j-στού σημείου πρόσβασης. Ο τύπος αυτός είναι εκφρασμένος σε decibel.

Ο παραπάνω όμως τύπος δίνει τις μέσες απώλειες διαδρομής σε έναν χώρο, και δεν εκφράζει τη μέση

ισχύ λήψης. Επομένως, τελικώς, η μέση ισχύς λαμβανόμενου σήματος στην k -στή υπονήφια θέση, για σήματα εκπεμπόμενα από το j -στό σημείο πρόσβασης, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_{j,k} = P_t - L(d_{j,k}), \quad (5.2)$$

όπου P_t η ισχύς εκπομπής σε κάθε σημείο πρόσβασης. Ο τύπος αυτός εκφράζεται σε decibel.

Στη συνέχεια, αν ο συνολικός αριθμός των σημείων πρόσβασης είναι N , και αν υποτεθεί ότι σε κάθε υπονήφια θέση είναι πάντα ορατά τα σήματα από όλα τα σημεία πρόσβασης, τότε για τον υπολογισμό του “δαχτυλικού αποτυπώματος” στην k -στή υπονήφια θέση του συστήματος, απαιτείται ο υπολογισμός όλων των ισχύων $P_{j,k}$, για $j = 1, \dots, N$.

5.1.2.2 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

Σχετικά με τις απώλειες διαδρομής $L(d_0)$, δύο κατάλληλες τιμές για απόσταση $d_0 = 1$ m, θα μπορούσαν να είναι 41.5 dBm για συνθήκες διάδοσης οπτικής επαφής, και 37.3 dBm για διάδοση χωρίς οπτική επαφή [79]. Επίσης, σχετικά με τον εκθέτη απωλειών διαδρομής, σύμφωνα με κάποια εμπειρικά αποτελέσματα, σε ραδιοδιαύλους εσωτερικών χώρων ισχύει: $2 \leq \alpha \leq 4$ [69]. Όμως, πιο συγκεκριμένα αποτελέσματα, τα οποία αναφέρονται σε συχνότητα φέροντος 2.4 GHz, η οποία είναι και η συχνότητα εκπομπής στο IEEE 802.11b δίκτυο που θεωρείται ότι είναι η υποδομή του συστήματος εντοπισμού θέσης, είναι $\alpha \approx 2$ για συνθήκες διάδοσης οπτικής επαφής, και $\alpha = 3.3$ για συνθήκες διάδοσης μη οπτικής επαφής [86]. Τα αποτελέσματα στο [86] προέκυψαν από πολλές μετρήσεις σε διαφορετικά σενάρια διάδοσης σε εσωτερικό χώρο. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως όταν η φέρουσα συχνότητα των σημάτων είναι 914 MHz, τότε η σταθερά α θα μπορούσε να πάρει τιμές μεταξύ 1 και 6 [64]. Επίσης, σε ένα IEEE 802.11b δίκτυο, το οποίο παραδεχόμαστε ότι αποτελεί την υποδομή του συστήματος εντοπισμού θέσης, η ισχύς εκπομπής σε κάθε σημείο πρόσβασης συνηθίζεται να είναι $P_t = 15$ dBm.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος, η οποία είναι απαραίτητη για τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος εντοπισμού, και οι δυνατές τιμές της οποίας πρέπει να προσδιοριστούν, είναι η τυπική απόκλιση σ της ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων. Σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τη μελέτη του συστήματος εντοπισμού, η κατανομή της μετρούμενης ισχύος είναι κανονική, ενώ παράλληλα γίνεται η παραδοχή ότι η τυπική απόκλιση είναι ίση για σήματα

εκπεμπόμενα από κάθε σημείο πρόσβασης, και σε κάθε υποψήφια θέση του χώρου. Όμως, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3, η παραδοχή της μοναδικής τιμής της τυπικής απόκλισης πολύ σπάνια είναι ρεαλιστική. Μία τιμή που έχει καταγραφεί για την τυπική απόκλιση, για εκπομπές σε IEEE 802.11 δίκτυο, είναι $\sigma = 2.13$ dBm [74]. Επίσης, στην [87] έχουν προταθεί και άλλες τιμές τυπικής απόκλισης, για διαφορετικές συνθήκες διάδοσης σε εσωτερικό χώρο [87].

Λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες δυνατές τιμές που θα μπορούσαν να πάρουν οι βασικές παράμετροι του μαθηματικού μοντέλου, μπορούν να γίνουν οι παραδοχές ότι, αν στον εσωτερικό χώρο του συστήματος που μελετάται κυριαρχούν συνθήκες διάδοσης οπτικής επαφής, τότε ισχύει $L(d_0) = 41.5$ dBm και $\alpha = 2$, ενώ αν κυριαρχούν συνθήκες μη οπτικής επαφής, τότε ισχύει $L(d_0) = 37.3$ dBm και $\alpha = 3.3$. Όμως, όπως έχει παρατηρηθεί και στο αντίστοιχο κεφάλαιο 3 σχετικά με τις στατιστικές ιδιότητες της μετρούμενης ισχύος, η κανονική κατανομή της ισχύος λήψης είναι πιο συνηθισμένη σε συνθήκες διάδοσης μη οπτικής επαφής, ή για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ πομπών και δεκτών. Επομένως, αν υποθεθεί ότι στον εσωτερικό χώρο που μελετάμε επικρατούν κυρίως συνθήκες μη οπτικής επαφής, και συνεπώς αν χρησιμοποιήσουμε τις αντίστοιχες στην περίπτωση μη οπτικών επαφών τιμές των παραπάνω παραμέτρων, τότε τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου που αναλύει το σύστημα εντοπισμού είναι πιθανό να είναι περισσότερο ακριβή. Επίσης, στο σύστημα εντοπισμού που μελετάμε, γίνεται η παραδοχή ότι ισχύει $\sigma = 2.13$ dBm. Πάντως, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές των παραμέτρων δεν είναι δεσμευτικές, αλλά μπορεί να διαφέρουν από εσωτερικό χώρο σε εσωτερικό χώρο, και να μεταβάλλονται όταν αλλάζουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες του χώρου.

5.1.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”

Στους ΠΙΝΑΚΕΣ 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ισχύος σε όλες τις υποψήφιες θέσεις του τετραγωνικού πλέγματος του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.1, και για σήματα εκπεμπόμενα και από τα 16 σημεία πρόσβασης. Οι ισχείς αυτές έχουν υπολογιστεί για $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm, $\alpha = 3.3$ και $P_t = 15$ dBm, χρησιμοποιώντας τους (5.1) και (5.2). Επομένως, οι πίνακες αυτοί καταγράφουν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” στις υποψήφιες θέσεις του πλέγματος του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.1.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” μέσω ενός μοντέλου απωλειών διαδρομής προσδίδει σφάλμα στις τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, λόγω μη απόλυτα ακριβούς προσαρμογής του μοντέλου στις πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες, και

επομένως προσδίδει πρόσθετο σφάλμα στην πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται οι τύποι (4.8) και (4.10), για διάφορες τιμές των παραμέτρων σ , N , a και g , με σκοπό να φανεί μέσω του αναλυτικού μαθηματικού μοντέλου του συστήματος, με ποιον τρόπο επηρεάζεται η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης.

Για να μπορέσουν να εφαρμοστούν οι (4.8) και (4.10) πρέπει να είναι γνωστά ο αριθμός N των σημείων πρόσβασης, η τυπική απόκλιση σ , το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της θεωρούμενης πραγματικής θέσης, και τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υπόλοιπων υποψήφιων θέσεων τις οποίες λαμβάνουν υπόψη οι τύποι. Τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υποψήφιων θέσεων υπολογίζονται από τους (5.1) και (5.2), τοποθετώντας κατάλληλες τιμές στις παραμέτρους a , d_0 , $L(d_0)$ και P_t . Επίσης, οι διάφορες τιμές του διαστήματος πλέγματος g επηρεάζουν τις συντεταγμένες των υποψήφιων θέσεων, τις αποστάσεις τους από τα σημεία πρόσβασης, και επομένως επηρεάζουν τις τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΠΙΝΑΚΑΣ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΓΙΑ 8 ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.

(dBm)		ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΠΟΥ ΕΚΠΕΜΠΟΥΝ							
		(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(0,4)	(1,0)	(1,4)	(2,0)
Σ Υ Ν Τ Ε Τ Α Γ Μ Ε Ν Ε Σ Υ Π Ο Ψ Η Φ Ι Ω Ν Θ Ε Σ Σ Ε Ω Ν	(2, 2)	-37.2010	-33.8330	-32.2340	-33.8330	-37.2010	-33.8330	-33.8330	-32.2340
	(2, 1)	-33.8330	-32.2340	-33.8330	-37.2010	-40.6801	-27.2670	-38.8000	-22.3000
	(1, 2)	-33.8330	-27.2670	-22.3000	-27.2670	-33.8330	-32.2340	-32.2340	-33.8330
	(1, 1)	-27.2670	-22.3000	-27.2670	-33.8330	-38.8000	-22.3000	-38.05	-27.2670
	(3, 2)	-40.6801	-38.8000	-38.0450	-38.8000	-40.6801	-37.2010	-37.2010	-33.8330
	(3, 1)	-38.8000	-38.0450	-38.8000	-40.6801	-43.0120	-33.8330	-40.6801	-27.2670
	(2, 3)	-40.6801	-37.2010	-33.8330	-32.2340	-33.8330	-38.8000	-27.2670	-38.0450
	(3, 3)	-43.0120	-40.6801	-38.8000	-38.0450	-38.8000	-40.6801	-33.8330	-38.8000
	(1, 3)	-38.8000	-33.8330	-27.2670	-22.3000	-27.2670	-38.0450	-22.3000	-38.8000

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: ΠΙΝΑΚΑΣ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟΛΟΙΠΑ 8 ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.

(dBm)		ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΠΟΥ ΕΚΠΕΜΠΟΥΝ							
		(2,4)	(3,0)	(3,4)	(4,0)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
Σ Υ Ν Τ Ε Τ Α Γ Μ Ε Ν Ε Σ Υ Π Ο Ψ Η Φ Ι Ω Ν Θ Ε Σ Ε Ω Ν	(2,2)	-32.2340	-33.8330	-33.8330	-37.2010	-33.8330	-32.2340	-33.8330	-37.2010
	(2,1)	-38.0450	-27.2670	-38.8000	-33.8330	-32.2340	-33.8330	-37.2010	-40.6801
	(1,2)	-33.8330	-37.2010	-37.2010	-40.6801	-38.8000	-38.0450	-38.8000	-40.6801
	(1,1)	-38.8000	-33.8330	-40.6801	-38.8000	-38.0450	-38.8000	-40.6801	-43.0120
	(3,2)	-33.8330	-32.2340	-32.2340	-33.8330	-27.2670	-22.3000	-27.2670	-33.8330
	(3,1)	-38.8000	-22.3000	-38.0450	-27.2670	-22.3000	-27.2670	-33.8330	-38.8000
	(2,3)	-22.3000	-38.8000	-27.2670	-40.6801	-37.2010	-33.8330	-32.2340	-33.8330
	(3,3)	-27.2670	-38.0450	-22.3000	-38.8000	-33.8330	-27.2670	-22.3000	-27.2670
	(1,3)	-27.2670	-40.6801	-33.8330	-43.0120	-40.6801	-38.8000	-38.0450	-38.8000

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΙΑΣ ΘΕΣΗΣ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΜΟΝΟ ΜΙΑ ΥΠΟΨΗΦΙΑ ΘΕΣΗ ΓΕΙΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ

Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος (4.8), για να υπολογιστεί η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης στο απλοποιημένο σύστημα εντοπισμού που παρουσιάστηκε προηγουμένως, για διάφορες τιμές των παραμέτρων σ , N , a και g . Ο (4.8) υπολογίζει την πιθανότητα ορθής εκτίμησης με σημαντικό σφάλμα, γιατί λαμβάνει υπόψη του μόνο μία γειτονική της πραγματικής υποψήφια θέση, αγνοώντας ότι μία υποψήφια θέση η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη στον τύπο, θα μπορούσε κατά το online στάδιο της πραγματικής λειτουργίας του συστήματος εντοπισμού να θεωρηθεί λανθασμένα ως η πραγματική θέση.

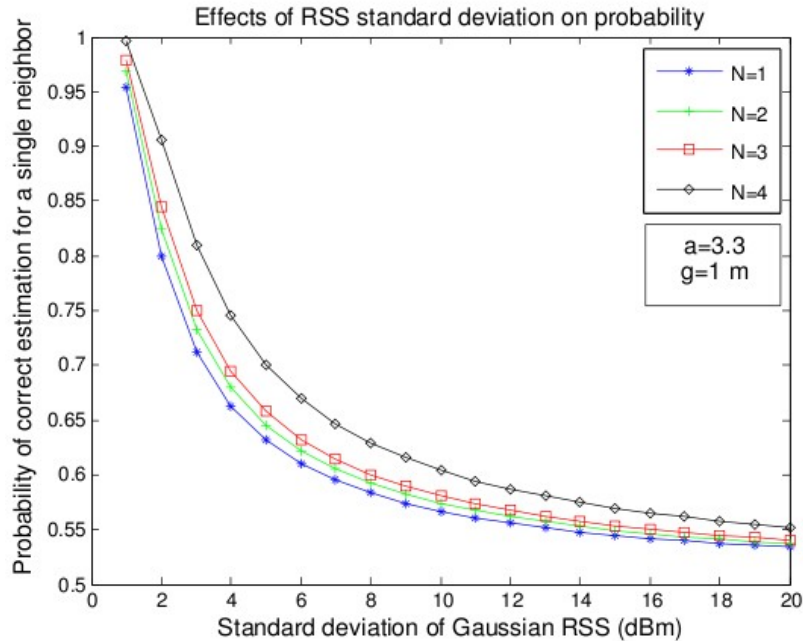
Στο σύστημα εντοπισμού θέσης που μελετάμε, θεωρούμε ότι η πραγματική θέση ενός αντικειμένου είναι η υποψήφια θέση του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.1 με συντεταγμένες (2, 2). Επίσης, όταν ισχύει $g=1$ m, θεωρούμε ότι η μοναδική υποψήφια θέση, εκτός της πραγματικής, που λαμβάνει υπόψη του ο (4.8),

είναι η υποψήφια σχέση του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.1 με συντεταγμένες (2, 1). Επιπλέον, για τους παρακάτω υπολογισμούς, θεωρούμε ότι στον εσωτερικό χώρο διάδοσης των σημάτων ισχύει $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm και $P_t = 15$ dBm. Οι τιμές των άλλων παραμέτρων μεταβάλλονται ανάλογα με τις παρατηρήσεις που επιθυμούμε να κάνουμε.

5.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.8) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ σ

Στο ΣΧΗΜΑ 5.3 απεικονίζονται οι τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης του τύπου (4.8) ως προς την τυπική απόκλιση σ . Τα αποτελέσματα αυτά προήλθαν από τη χρήση του προγράμματος MATLAB (Version 7.0.0.19901 (R14)). Κάθε μία από τις 4 καμπύλες του σχήματος αναφέρεται σε εκπομπή σημάτων από διαφορετικό αριθμό N σημείων πρόσβασης. Συγκεκριμένα, αν ισχύει $N=1$, τότε στο σύστημα εκπέμπει μόνο το σημείο πρόσβασης ΣΠ1, αν ισχύει $N=2$, τότε εκπέμπουν τα σημεία πρόσβασης ΣΠ1 και ΣΠ2, αν ισχύει $N=3$, τότε εκπέμπουν τα σημεία πρόσβασης ΣΠ1, ΣΠ2 και ΣΠ3, ενώ αν ισχύει $N=4$, τότε εκπέμπουν στο σύστημα τα σημεία πρόσβασης ΣΠ1, ΣΠ2, ΣΠ3 και ΣΠ4. Επίσης, για την πραγματοποίηση των υπολογισμών, η τυπική απόκλιση σ παίρνει τιμές από 1 dBm ως 20 dBm, με βήμα 1 dBm. ο εκθέτης απωλειών διαδρομής παίρνει την τιμή $\alpha=3.3$, ενώ το διάστημα πλέγματος είναι $g=1$ m.

Από τις καμπύλες του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.3, παρατηρούμε ότι για οποιοδήποτε αριθμό από σημεία πρόσβασης, όταν η τυπική απόκλιση σ της ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων αυξάνεται, τότε η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μειώνεται δραματικά. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο ότι όταν η τυπική απόκλιση είναι μεγάλη, τότε το δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων ισχύος είναι πιθανό να απέχει διανυσματικά από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης απόσταση μεγαλύτερη από ότι από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” μιας άλλης υποψήφιας θέσης διάφορης της πραγματικής, και τότε να γίνει σφάλμα στην εκτίμηση μιας θέσης. Επίσης, παρατηρούμε ότι για πολύ μικρές τιμές της τυπικής απόκλισης, η πιθανότητα ορθής εκτίμησης παίρνει μεγάλες τιμές, και επιπλέον, η πιθανότητα δεν μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της τυπικής απόκλισης, αλλά συμπεριφέρεται παρόμοια με μία εκθετική συνάρτηση αρνητικού εκθέτη. Τέλος, από το ΣΧΗΜΑ 5.3 είναι εμφανές ότι όταν ο αριθμός N των σημείων πρόσβασης είναι μεγάλος, τότε η πιθανότητα ορθής εκτίμησης παίρνει μεγαλύτερες τιμές.

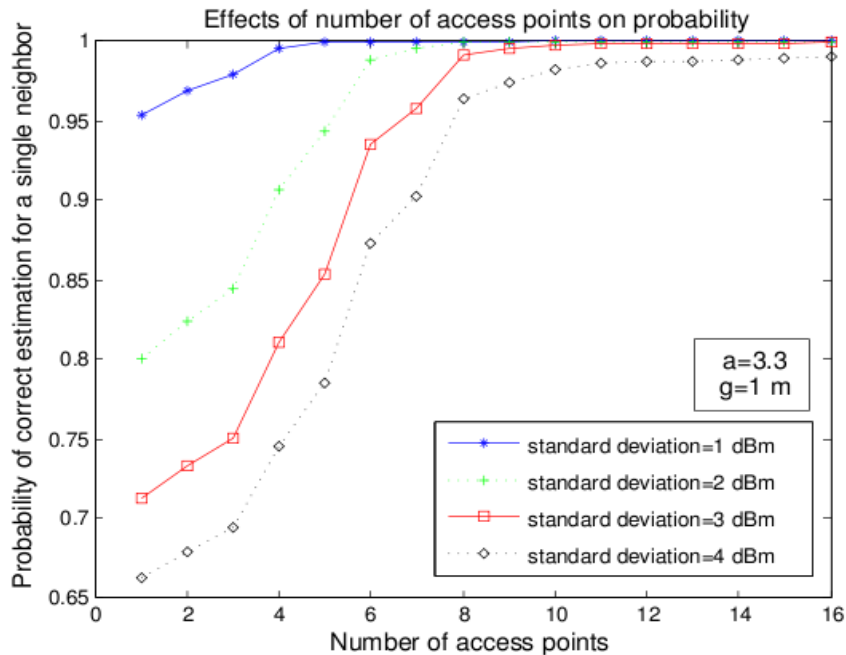


ΣΧΗΜΑ 5.3: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ σ ΣΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΟΤΑΝ ΛΑΜΒΑΝΕΤΑΙ ΥΠΟΨΗ ΜΙΑ ΓΕΙΤΟΝΙΚΗ ΥΠΟΨΗΦΙΑ ΘΕΣΗ.

5.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.8) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ N ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Στο ΣΧΗΜΑ 5.4 απεικονίζονται οι τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης του (4.8) ως προς τον αριθμό N των σημείων πρόσβασης που λαμβάνονται υπόψη, για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης των μετρούμενων ισχύων. Τα αποτελέσματα αυτά προήλθαν από τη χρήση του προγράμματος MATLAB. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα παρουσιάζονται 4 καμπύλες, οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές τυπικής απόκλισης $\sigma=1$ dBm, $\sigma=2$ dBm, $\sigma=3$ dBm και $\sigma=4$ dBm. Κάθε μία από τις 4 αυτές καμπύλες δείχνει την εξάρτηση της πιθανότητας ορθής εκτίμησης από τον αριθμό των σημείων πρόσβασης, ο οποίος κυμαίνεται από $N=1$ ως $N=16$. Τα σημεία πρόσβασης λαμβάνονται υπόψη με τη σειρά αρίθμησής τους, δηλαδή η επιλογή τους ξεκινά από το ΣΠ1, και στη συνέχεια επιλέγονται με αύξουσα σειρά, επιλέγοντας όσα υπαγορεύει κάθε φορά ο αριθμός N . Για παράδειγμα, αν ισχύει $N=2$, τότε θεωρείται ότι εκπέμπουν τα σημεία πρόσβασης ΣΠ1 και ΣΠ2, ενώ αν ισχύει $N=3$, τότε εκπέμπουν τα σημεία πρόσβασης ΣΠ1, ΣΠ2 και ΣΠ3. Επίσης, για την πραγματοποίηση των

υπολογισμών, ο εκθέτης απωλειών διαδρομής παίρνει την τιμή $\alpha=3.3$, ενώ το διάστημα πλέγματος είναι $g=1$ m.



ΣΧΗΜΑ 5.4: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.3, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ N .

Από το ΣΧΗΜΑ 5.4, παρατηρούμε ότι η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης αυξάνεται, όταν αυξάνεται ο αριθμός των σημείων πρόσβασης που χρησιμοποιούνται στο σύστημα. Η συμπεριφορά αυτή είναι η ίδια και για τις τέσσερις τιμές της τυπικής απόκλισης. Επίσης, παρατηρούμε ότι μικρότερες τιμές της τυπικής απόκλισης δίνουν μεγαλύτερες τιμές πιθανότητας ορθής εκτίμησης. Όμως, αν και οι καμπύλες του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.4 αρχικά διαφέρουν αισθητά, για μεγαλύτερες τιμές του αριθμού N οι καμπύλες πλησιάζουν αρκετά μεταξύ τους. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι σε κάθε καμπύλη του σχήματος, μετά από έναν συγκεκριμένο αριθμό από σημεία πρόσβασης οι τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης παύουν να αυξάνονται σημαντικά. Στο συγκεκριμένο σχήμα φαίνεται ότι για τιμές $N > 8$, και οι τέσσερις καμπύλες έχουν σταματήσει να αυξάνονται σημαντικά.

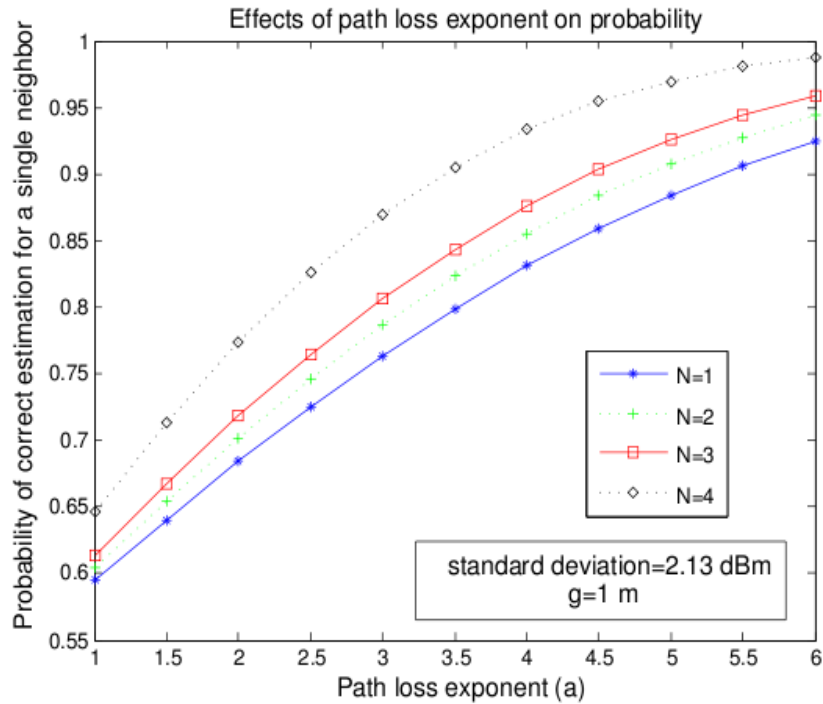
Μία πιθανή εξήγηση της αύξησης της πιθανότητας ορθής εκτίμησης λόγω αύξησης της παραμέτρου N είναι η εξής. Όταν οι υποψήφιες θέσεις λαμβάνουν σήματα από πολλά σημεία πρόσβασης, τότε τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υποψήφιων θέσεων διαχωρίζονται περισσότερο μεταξύ τους. Έτσι,

μειώνεται η πιθανότητα ένα δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων να πλησιάσει περισσότερο το “δαχτυλικό αποτύπωμα” μίας υποψήφιας θέσης που δεν είναι η πραγματική, και συνεπώς η πιθανότητα ορθής εκτίμησης αυξάνεται.

5.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.8) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΕΚΘΕΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ α

Με κατάλληλο αλγόριθμο στο πρόγραμμα MATLAB, σχηματίστηκαν γραφικές παραστάσεις της πιθανότητας ορθής εκτίμησης του (4.8) ως προς διάφορες τιμές που θα μπορούσε να πάρει ο εκθέτης απωλειών διαδρομής. Ο εκθέτης α αντιπροσωπεύει τις περιβαλλοντικές συνθήκες που θα μπορούσαν να επικρατούν στον εσωτερικό χώρο. Στο ΣΧΗΜΑ 5.5 παρουσιάζονται 4 γραφικές παραστάσεις της πιθανότητας ορθής εκτίμησης του (4.8) ως προς την τιμή του α , που αντιστοιχούν σε εκπομπή από $N=1$, $N=2$, $N=3$ και $N=4$ σημεία πρόσβασης. Τα σημεία πρόσβασης επιλέγονται με τον ίδιο τρόπο όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις. Για τους υπολογισμούς που κατέληξαν στο σχήμα αυτό, θεωρήθηκαν τιμές του εκθέτη απωλειών διαδρομής από $\alpha=1$ ως $\alpha=6$, με βήμα 0.5, καθώς επίσης θεωρήθηκε $\sigma=2.13$ dBm και $g=1$ m.

Παρατηρώντας τις καμπύλες του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.5, είναι εμφανές ότι, για οποιοδήποτε αριθμό σημείων πρόσβασης, όταν ο εκθέτης απωλειών διαδρομής αυξάνεται, τότε αυξάνεται και η πιθανότητα ορθής εκτίμησης του (4.8). Μία διαισθητική εξήγηση της συμπεριφοράς αυτής είναι ότι, όταν ο εκθέτης απωλειών διαδρομής που αντιπροσωπεύει τις περιβαλλοντικές συνθήκες ενός χώρου είναι μεγάλος, τότε λόγω μεγάλης εξασθένησης των σημάτων, οι λαμβανόμενες ισχύεις σε δύο γειτονικές υποψήφιας θέσεις διαφέρουν αρκετά, και συνεπώς μειώνεται η πιθανότητα το δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων να απέχει λιγότερο από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” μίας υποψήφιας θέσης γειτονικής της πραγματικής. Επίσης, όπως και στα προηγούμενα σχήματα, παρατηρείται ότι όταν αυξάνεται ο αριθμός των σημείων πρόσβασης τότε αυξάνεται και η πιθανότητα ορθής εκτίμησης.



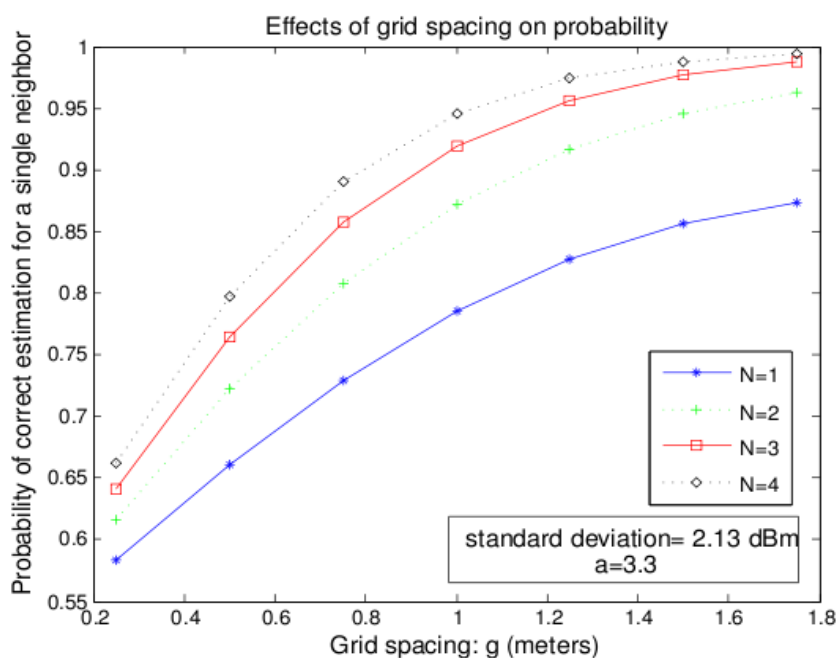
ΣΧΗΜΑ 5.5: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.3, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΚΘΕΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ α .

5.2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.8) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ g

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται το μαθηματικό μοντέλο, μέσω του τύπου (4.8), με σκοπό να μελετηθεί η εξάρτηση της πιθανότητας ορθής εκτίμησης μιας θέσης από τις διάφορες τιμές που μπορεί να πάρει το διάστημα πλέγματος g . Συγκεκριμένα, στο ΣΧΗΜΑ 5.6 υπάρχουν τέσσερις γραφικές παραστάσεις, κάθε μία από τις οποίες παρουσιάζει τις τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης που αντιστοιχούν στις τιμές $g=0.25$ m, $g=0.5$ m, $g=0.75$ m, $g=1$ m, $g=1.25$ m, $g=1.5$ m και $g=1.75$ m του διαστήματος πλέγματος. Οι τιμές αυτές του διαστήματος πλέγματος αντιστοιχούν σε υπονήφια θέση, γειτονική της πραγματικής θέσης, με συντεταγμένες (2, 1.75), (2, 1.5), (2, 1.25), (2, 1), (2, 0.75), (2, 0.5) και (2, 0.25) αντίστοιχα. Επίσης, οι τέσσερις καμπύλες του σχήματος αντιστοιχούν σε εκτομή από $N=1$, $N=2$, $N=3$ και $N=4$ σημεία πρόσβασης, τα οποία επιλέγονται με τον ίδιο τρόπο όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις. Όλα τα αποτελέσματα του σχήματος προέκυψαν μετά από προγραμματισμό σε περιβάλλον MATLAB, και για τους υπολογισμούς θεωρήθηκε ότι οι τιμές σ και α είναι 2.13 dBm

και 3.3 αντίστοιχα.

Από τα αποτελέσματα του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.6, παρατηρείται ότι όταν αυξάνεται το διάστημα πλέγματος, τότε αυξάνεται η πιθανότητα ορθής εκτίμησης του (4.8). Η συμπεριφορά αυτή θα μπορούσε να εξηγηθεί από το ότι όταν αυξάνεται η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών θέσεων, τότε αυξάνεται και η διαφορά των αποστάσεών τους από τα σημεία πρόσβασης, με αποτέλεσμα τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των δύο θέσεων να απομακρύνονται μεταξύ τους, και συνεπώς η πιθανότητα ένα δειγματικό διάλυμα μετρήσεων να πλησιάσει περισσότερο μία υποψήφια θέση διάφορη της πραγματικής να μειώνεται. Ο τρόπος μεταβολής στις καμπύλες του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.6 είναι παρόμοιος με αυτόν στις καμπύλες του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.5, επειδή και στις δύο περιπτώσεις, είτε αυξηθεί το διάστημα πλέγματος είτε αυξηθεί ο εκθέτης απωλειών διαδρομής, το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο, δηλαδή να διαχωριστούν περισσότερο τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των γειτονικών υποψήφιων θέσεων. Επίσης, από το σχήμα παρατηρείται πως, όπως και σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, η εκπομπή από περισσότερα σημεία πρόσβασης έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης μιας θέσης.



ΣΧΗΜΑ 5.6: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.3, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ g .

5.2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανές ότι η μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου, μέσω του τύπου (4.8), αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον μελετητή του συστήματος. Ο μελετητής του συστήματος, χρησιμοποιώντας τον (4.8), μπορεί για συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως για συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων σ και a , να επιλέξει τις καταλληλότερες τιμές των παραμέτρων N και g , χωρίς να αναγκαστεί να θέσει σε πραγματική λειτουργία το σύστημα για να εντοπίσει πειραματικά τις καταλληλότερες παραμέτρους. Οι παράμετροι N και g μπορούν να ελεγχθούν από τον μελετητή του συστήματος. Όμως, οι παράμετροι σ και a δεν μπορούν να ελεγχθούν, γιατί εξαρτώνται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάδοση των σημάτων, αλλά μπορούν μόνο να εκτιμηθούν.

Όμως, οι πιθανότητες ορθής εκτίμησης που υπολογίζονται μέσω του (4.8) δεν είναι απόλυτα ακριβείς, γιατί περιέχουν σφάλματα τα οποία δεν οφείλονται μόνο στις παραδοχές του μαθηματικού μοντέλου και στον υπολογισμό των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” μέσω ενός μοντέλου απωλειών διαδρομής, αλλά οφείλονται και στο γεγονός ότι ο (4.8) είναι αρκετά απλοποιημένος και λαμβάνει υπόψη μία μόνο γειτονική υποψήφια θέση.

5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΙΑΣ ΘΕΣΗΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Όπως είδαμε, η μοντελοποίηση του συστήματος εντοπισμού μέσω του (4.8) βοηθά να εξαχθούν ενδιαφέροντα ποιοτικά συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο συμπεριφοράς του συστήματος λόγω μεταβολής διαφόρων παραγόντων. Όμως, ο (4.8) είναι ιδιαίτερος απλοποιημένος, αφού λαμβάνει υπόψη του μόνο δύο υποψήφιες θέσεις, και το γεγονός αυτό προσδίδει επιπλέον σφάλμα στα αριθμητικά του αποτελέσματα.

Ένα εναλλακτικό μέσο χειρισμού της μαθηματικής μοντελοποίησης του συστήματος εντοπισμού θέσης είναι ο τύπος (4.10). Το σημαντικό πλεονέκτημα του μαθηματικού αυτού τύπου σε σχέση με τον προηγούμενο είναι ότι λαμβάνει υπόψη του όλες τις υποψήφιες θέσεις του συστήματος εντοπισμού, και όχι μόνο δύο. Έτσι, λόγω του πλεονεκτήματος αυτού, ο (4.10) υπολογίζει με πιο ορθόδοξο τρόπο την πιθανότητα ορθής εκτίμησης, και φαίνεται να δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Όμως, το μειονέκτημα του (4.10) είναι ότι προσδίδει στην πιθανότητα ορθής εκτίμησης ένα σφάλμα, το οποίο οφείλεται στην παραδοχή της ανεξαρτησίας των τυχαίων μεταβλητών C_k που αναφέρθηκαν στο

5.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.10) ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.8)

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ο τύπος (4.10) για να υπολογιστεί η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης στο απλοποιημένο σύστημα εντοπισμού που παρουσιάστηκε προηγουμένως, για διάφορες τιμές των παραμέτρων σ , N , a και g . Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν μέσω του προγράμματος MATLAB, και οδήγησαν στο σχηματισμό των καμπύλων των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 5.7, 5.8, 5.9 και 5.10, οι οποίες μας δείχνουν τη μεταβολή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης, λόγω μεταβολής των παραμέτρων σ , N , a και g αντίστοιχα. Στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.7, 5.8, 5.9 και 5.10, οι τιμές όλων των παραμέτρων είναι οι ίδιες με τις τιμές τους στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.3, 5.4, 5.5 και 5.6 αντίστοιχα, με τη μόνη διαφορά ότι χρησιμοποιείται ο (4.10) αντί του (4.8). Δηλαδή, θεωρούμε ότι κατά τους υπολογισμούς του (4.10) επικρατούσαν οι ίδιες ακριβώς συνθήκες με αυτές που επικρατούσαν κατά τους υπολογισμούς του (4.8). Επίσης, θεωρούμε πάλι ότι για οποιοδήποτε μήκος του διαστήματος πλέγματος, η πραγματική θέση του αντικειμένου που πρέπει να εντοπιστεί είναι η υποψήφια θέση με συντεταγμένες (2, 2).

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των υπολογισμών, είναι εμφανές ότι όλες οι καμπύλες στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.7, 5.8, 5.9 και 5.10 παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με τις αντίστοιχες καμπύλες στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.3, 5.4, 5.5 και 5.6. Δηλαδή, η μελέτη του συστήματος μέσω του (4.10) επιβεβαιώνει το ότι η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης αυξάνεται όταν αυξάνονται οι παράμετροι N , a και g , ενώ μειώνεται όταν αυξάνεται η τυπική απόκλιση σ της μετρούμενης ισχύος.

Όμως, παρατηρείται ότι οι τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης που υπολογίζονται από τον τύπο (4.10) είναι γενικά χαμηλότερες. Για παράδειγμα, στο ΣΧΗΜΑ 5.7 η χαμηλότερη τιμή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης είναι μικρότερη από 0.1, ενώ στο ΣΧΗΜΑ 5.3 η χαμηλότερη τιμή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης είναι μεγαλύτερη από 0.5. Επίσης, ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι στο ΣΧΗΜΑ 5.8, όπου, ακόμα και όταν επικρατούν οι ευνοϊκότερες δυνατές περιβαλλοντικές συνθήκες, δηλαδή όταν ισχύει $\sigma=1$ dBm, η χαμηλότερη δυνατή τιμή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης είναι μικρότερη από τη χαμηλότερη δυνατή τιμή της στο ΣΧΗΜΑ 5.4, όταν ισχύει $\sigma=4$ dBm και επομένως οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι σαφώς δυσμενέστερες για την ακρίβεια του συστήματος. Οι διαφορές στα επίπεδα τιμών της πιθανότητας ορθής εκτίμησης επιβεβαιώνονται και από τις συγκρίσεις των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 5.5 και 5.6 με τα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.9 και 5.10 αντίστοιχα.

Μία εξήγηση της μείωσης των τιμών των πιθανοτήτων όταν υπολογίζονται με τον (4.10) είναι ότι, όταν κατά τον υπολογισμό της πιθανότητας ορθής εκτίμησης λαμβάνονται υπόψη πολλές συγκρίσεις

αποστάσεων από τα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, τότε αυξάνεται η πιθανότητα να βρεθεί κάποιο “δαχτυλικό αποτύπωμα” που να θεωρηθεί λανθασμένα ότι ανήκει στην πραγματική θέση, και συνεπώς η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μειώνεται.

Τέλος, παρατηρείται πως, αν και ο τρόπος με τον οποίον αυξάνονται ή μειώνονται οι καμπύλες του (4.10) είναι παρόμοιος με τον τρόπο με τον οποίον αυξάνονται ή μειώνονται οι αντίστοιχες καμπύλες του (4.8), στις καμπύλες του (4.10) παρατηρούνται συχνά πιο απότομες μεταβολές.

5.3.2 Ο ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

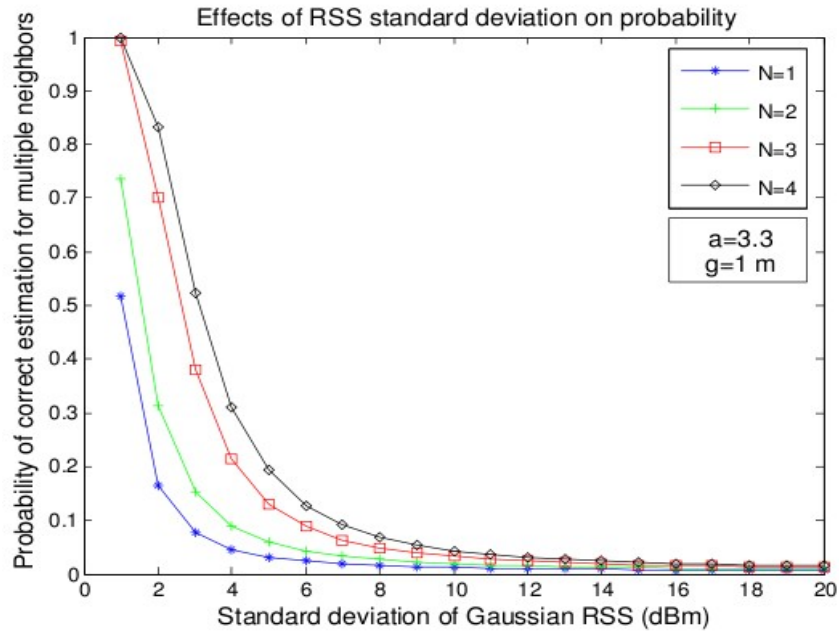
Όπως προκύπτει και από τα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.6 και 5.10, η αύξηση του μήκους του διαστήματος πλέγματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας ορθής εκτίμησης. Όμως, η επιλογή μεγάλων τιμών διαστήματος πλέγματος με σκοπό την αύξηση της πιθανότητας ορθής εκτίμησης των θέσεων του συστήματος, έχει ως αντίτιμο τη μείωση των δυνατών υποψήφιων θέσεων στον χώρο, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακρίβεια (ή ανάλυση) των πληροφοριών που δίνει το σύστημα για τις πιθανές θέσεις ενός αντικειμένου. Αλλά και αντιστρόφως, όταν το διάστημα πλέγματος μικραίνει και η ακρίβεια των πληροφοριών που δίνει το σύστημα για τις πιθανές θέσεις ενός αντικειμένου αυξάνεται, λόγω αύξησης των δυνατών υποψήφιων θέσεων στον χώρο, τότε η πιθανότητα ορθής εκτίμησης των θέσεων του συστήματος μειώνεται. Επομένως, όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 4.6, υπάρχει μία αντιστρόφως ανάλογη σχέση ανάμεσα στην πιθανότητα ορθής εκτίμησης και στην ακρίβεια των πληροφοριών που δίνει ένας αλγόριθμος για τις πιθανές θέσεις, η οποία επηρεάζει την συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της απόστασης σφάλματος (distance error), και κατ' επέκταση τη μέση ακρίβεια (accuracy) και την κατανομή της ακρίβειας (precision) του συστήματος. Έτσι, ο σχεδιαστής του συστήματος δεν πρέπει να επιδιώκει την απεριόριστη αύξηση ή μείωση της παραμέτρου g , αλλά οφείλει να επιλέξει μία τιμή της g η οποία να είναι συμβιβαστική και να εξασφαλίζει συνολικά ικανοποιητική απόσταση σφάλματος στην εκτίμηση των θέσεων του συστήματος.

5.3.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.10) ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ

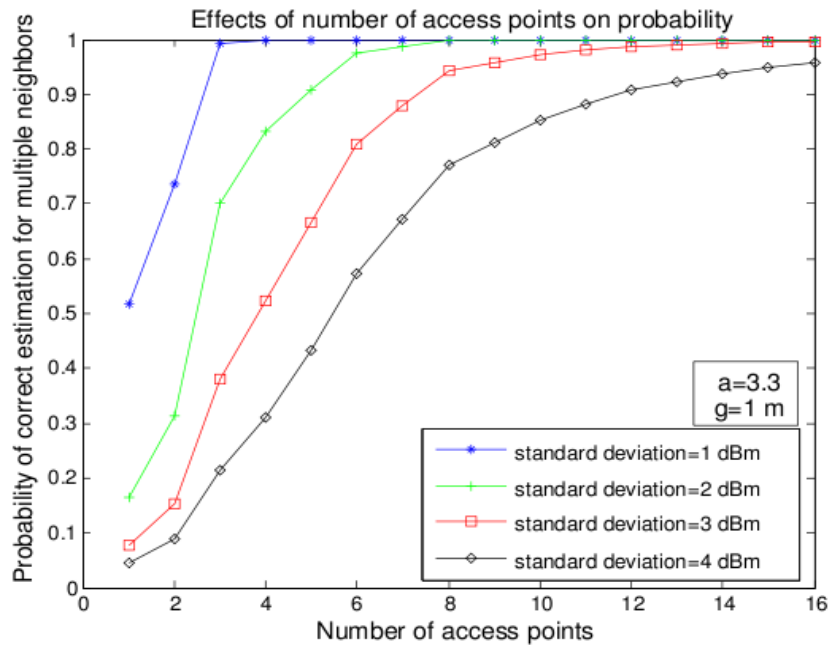
Αν ο μελετητής του συστήματος εντοπισμού θέσης αποφασίσει να μοντελοποιήσει το σύστημα, με τον τρόπο που περιγράψαμε, και να βασιστεί στα αποτελέσματα του τύπου (4.10), τότε είναι σε θέση να προτείνει κατάλληλες τιμές για τις διάφορες παραμέτρους του συστήματος. Η επιλογή των τιμών εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα, αλλά και από τις προδιαγραφές που

επιθυμεί να ικανοποιεί το σύστημα και τις απαιτήσεις που έχει.

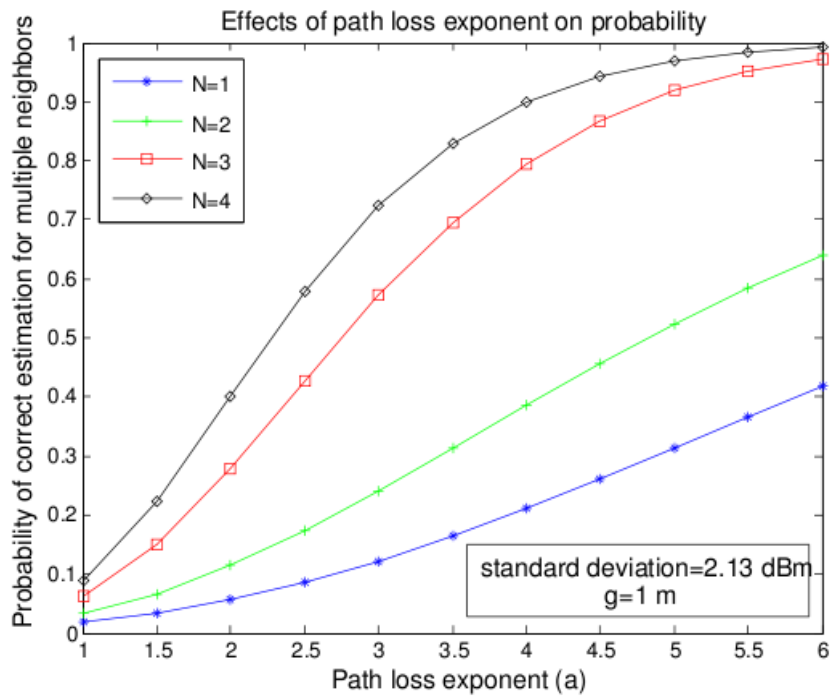
Για παράδειγμα, αν ο μελετητής του συστήματος επιθυμεί το σύστημα να έχει εξαιρετική ακρίβεια στη θέση (2, 2), με πιθανότητα ορθής εκτίμησης τουλάχιστον 0.95, και αν ισχύουν $\sigma=2$ dBm, $\alpha=3.3$ και $g=1$ m, τότε, βασιζόμενος στο ΣΧΗΜΑ 5.8, το οποίο αναφέρεται στην υποψήφια θέση (2, 2) του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.1 και προκύπτει από τον (4.10), θα επέλεγε να εκπέμπουν 6 σημεία πρόσβασης. Δεν θα επέλεγε περισσότερα, επειδή όπως φαίνεται και στο ΣΧΗΜΑ 5.8, ένας μεγαλύτερος αριθμός σημείων πρόσβασης θα αύξανε ελάχιστα την πιθανότητα. Άλλωστε, τα 6 σημεία πρόσβασης ικανοποιούν την προδιαγραφή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης, ενώ η χρήση επιπρόσθετων σημείων πρόσβασης θα επιβάρυνε το κόστος του εξοπλισμού. Όμως, σε ορισμένες περιπτώσεις, ο υπεύθυνος του συστήματος εντοπισμού περιορίζεται ως προς το μέγιστο αριθμό σημείων πρόσβασης που μπορεί να χρησιμοποιήσει, για λόγους όπως οικονομικούς, ή λόγω περιορισμένων σημείων πρόσβασης στο ασύρματο σύστημα που θα αποτελέσει την υποδομή του συστήματος εντοπισμού. Σε μία τέτοια περίπτωση, που ο υπεύθυνος του συστήματος εντοπισμού μπορεί για παράδειγμα να χρησιμοποιήσει μόνο μέχρι και 4 σημεία πρόσβασης, τότε, σύμφωνα με το ΣΧΗΜΑ 5.8, η πιθανότητα ορθής εκτίμησης που αφορά την υποψήφια θέση (2, 2) θα μειωθεί κάτω από 0.9, και επομένως η προδιαγραφή του συστήματος, σύμφωνα με την οποία η πιθανότητα ορθής εκτίμησης θα πρέπει να ξεπερνά το 0.95, δεν θα ικανοποιείται. Τότε, ο σχεδιαστής, αν δεν επιθυμεί να αποδεχτεί τη μείωση της ακρίβειας, μπορεί να ενεργήσει με κατάλληλους τρόπους ώστε να ικανοποιείται ξανά η προδιαγραφή. Μία ενέργεια προς αυτή την κατεύθυνση θα ήταν να αυξήσει το μήκος του διαστήματος πλέγματος ανάμεσα στις υποψήφιες θέσεις, τόσο ώστε η πιθανότητα ορθής εκτίμησης να ικανοποιήσει την προδιαγραφή. Το αντίτιμο σε αυτή την ενέργεια θα ήταν η μείωση των πιθανών θέσεων εντοπισμού στον χώρο, και άρα η μείωση της ακρίβειας της πληροφορίας που δίνει το σύστημα για τις πιθανές θέσεις. Επιπλέον, θα ήταν δυνατή και η περίπτωση ο υπεύθυνος του συστήματος εντοπισμού να έχει στη διάθεσή του τα 6 σημεία πρόσβασης που ικανοποιούν την προδιαγραφή, αλλά αυτά να μην είναι όλα ορατά από την υποψήφια θέση (2, 2). Σε αυτή την περίπτωση, κάποια από τα σημεία πρόσβασης θα μπορούσαν να μετακινηθούν και να τοποθετηθούν σε νέες θέσεις έτσι ώστε να γίνονται ορατά και τα 6 σημεία πρόσβασης στην υποψήφια θέση αυτή, και συνεπώς να ικανοποιείται η προδιαγραφή. Όμως, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, η αλλαγή στις θέσεις των σημείων πρόσβασης είναι πιθανό να μεταβάλλει τις τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης.



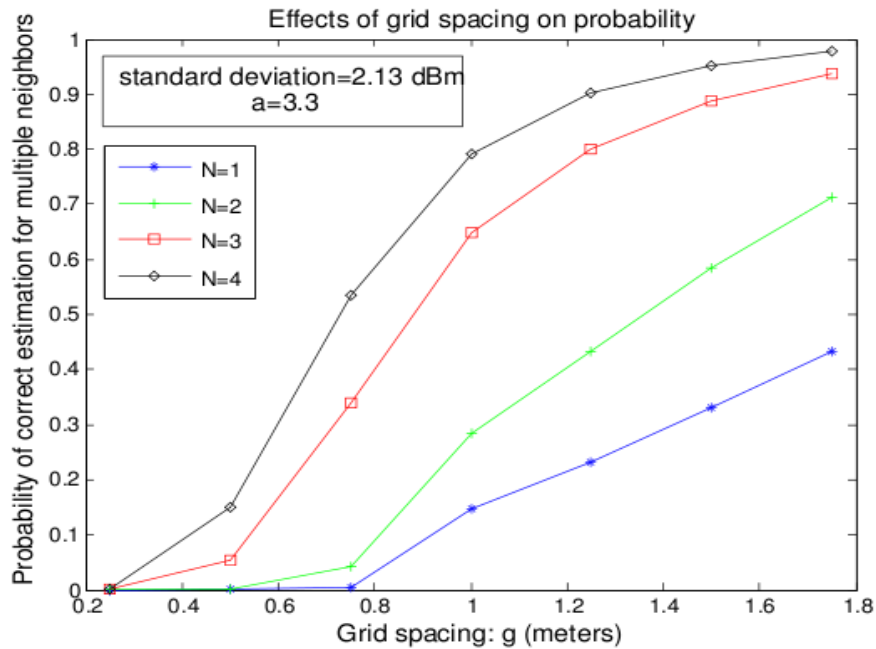
ΣΧΗΜΑ 5.7: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ σ ΣΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΟΤΑΝ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ ΟΛΕΣ ΟΙ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ.



ΣΧΗΜΑ 5.8: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.7, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ N .



ΣΧΗΜΑ 5.9: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.7, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΚΘΕΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ α .



ΣΧΗΜΑ 5.10: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.7, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ g .

Όλα τα παραπάνω είναι παραδείγματα ενδεικτικά της μελέτης που μπορεί να κάνει ο υπεύθυνος ενός συστήματος εντοπισμού θέσης, αν βασιστεί στον τύπο (4.10) του μοντελοποιημένου συστήματος. Όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι αν ο μελετητής του συστήματος βασιστεί στον (4.10), τότε πολλές φορές οι αριθμητικές τιμές που λαμβάνει υπόψη του είναι πιθανό να εμπεριέχουν σφάλμα, όχι μόνο λόγω της μοντελοποίησης του συστήματος, αλλά και λόγω των παραδοχών του.

5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΙΑΣ ΘΕΣΗΣ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ ΜΕ ΤΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ ΤΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ

5.4.1 Η ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ

Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 4.5, ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της πιθανότητας ορθής εκτίμησης είναι ο άμεσος υπολογισμός της μέσω ενός προγράμματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, χωρίς τη μεσολάβηση ενός αναλυτικού μαθηματικού τύπου. Οι απευθείας υπολογισμοί έχουν το μειονέκτημα του κόστους σε χρόνο, της ενδεχόμενης πολυπλοκότητας, της εξάρτησης από τις υπολογιστικές ικανότητες του ηλεκτρονικού υπολογιστή, και της απομάκρυνσης του μελετητή από τη θεωρητική τεκμηρίωση του συστήματος. Όμως, το σημαντικό πλεονέκτημα του άμεσου υπολογισμού της πιθανότητας ορθής εκτίμησης μέσω υπολογιστή είναι ότι δίνει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα στο μοντελοποιημένο σύστημα, και αποτελεί κριτήριο αξιοπιστίας για οποιοδήποτε αναλυτικό μαθηματικό τύπο χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει την πιθανότητα ορθής εκτίμησης στο μοντελοποιημένο σύστημα αυτό. Ο λόγος για τον οποίο τα αποτελέσματα του απευθείας υπολογισμού θεωρούνται ως τα πλέον αξιόπιστα για το μοντελοποιημένο σύστημα, είναι ότι, στον αλγόριθμο του απευθείας υπολογισμού μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, λαμβάνονται υπόψη όλες οι παραδοχές της μοντελοποίησης του συστήματος, και ο αλγόριθμος του online σταδίου εκτελείται σωστά, χωρίς όμως να γίνονται οι παραδοχές της ανεξαρτησίας των συγκρίσεων των αποστάσεων από τα “δαχτυλικά αποτυπώματα”. Επομένως, δεδομένου ότι το σύστημα είναι μοντελοποιημένο με τον τρόπο που έχει ήδη αναφερθεί, για να ελεγχθεί η ακρίβεια ενός αναλυτικού μαθηματικού τύπου, ο αναλυτικός μαθηματικός τύπος συγκρίνεται με τα αποτελέσματα των απευθείας υπολογισμών, επειδή αυτά είναι τα πιο αξιόπιστα, λόγω του ότι περιέχουν μόνο τα σφάλματα των

παραδοχών της μοντελοποίησης του συστήματος, και κανένα άλλο επιπρόσθετο σφάλμα.

5.4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Όπως είναι ήδη γνωστό από την παράγραφο 4.5, για τον απευθείας υπολογισμό της πιθανότητας ορθής εκτίμησης, χωρίς τη μεσολάβηση ενός αναλυτικού μαθηματικού τύπου, σχηματίστηκε αλγόριθμος, ο οποίος χρησιμοποιεί 100000 τυχαία διανύσματα τιμών που ακολουθούν κανονική κατανομή, με μέση τιμή ίση με το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποτιθέμενης πραγματικής θέσης και ρυθμιζόμενη τιμή τυπικής απόκλισης. Κατά τον αλγόριθμο, για κάθε ένα από τα 100000 δειγματικά διανύσματα, συγκρίνουμε την ευκλείδεια διανυσματική απόστασή του από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποτιθέμενης πραγματικής θέσης με τις αποστάσεις του από τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υπόλοιπων υποψήφιων θέσεων, ελέγχοντας αν υπάρχει σφάλμα στην εκτίμηση της θέσης. Στη συνέχεια, ο αριθμός των δειγματικών διανυσμάτων για τα οποία δεν υπήρξε σφάλμα στην εκτίμηση της θέσης, διαιρείται με το συνολικό αριθμό των δειγματικών διανυσμάτων, που είναι 100000, και το πηλίκο είναι η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης.

Στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.11, 5.12 και 5.13 συγκρίνονται οι τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης που προκύπτουν από την απευθείας προσομοίωση (simulation) στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και από τους τύπους (4.8) και (4.10), οι οποίες μεταβάλλονται ως προς την τυπική απόκλιση της μετρούμενης ισχύος, ως προς τον εκθέτη απωλειών διαδρομής και ως προς το διάστημα πλέγματος, αντίστοιχα. Όλα τα αποτελέσματα προέκυψαν μέσω του προγράμματος MATLAB. Στο ΣΧΗΜΑ 5.11 η τυπική απόκλιση σ παίρνει τιμές από 1 dBm ως 20 dBm, με βήμα 1 dBm, οι τιμές της παραμέτρου N είναι 1, 2, 3 και 4, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι είναι $\alpha=3.3$ και $g=1$ m. Στο ΣΧΗΜΑ 5.12 ο εκθέτης απωλειών διαδρομής παίρνει τιμές από 1 ως 6, με βήμα 0.5, οι τιμές της παραμέτρου N είναι 1, 2, 3 και 4, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι είναι $\sigma=2.13$ dBm και $g=1$ m. Επίσης, στο ΣΧΗΜΑ 5.13 το διάστημα πλέγματος παίρνει τιμές από 0.5 ως 1.75, με βήμα 0.25, οι τιμές της παραμέτρου N είναι 1, 2, 3 και 4, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι είναι $\sigma=2.13$ dBm και $\alpha=3.3$. Για κάθε τιμή της παραμέτρου N , επιλέχθηκαν ακριβώς τα ίδια σημεία πρόσβασης με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Επιπλέον, για τους υπολογισμούς των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 5.11, 5.12 και 5.13 θεωρούμε ότι στον εσωτερικό χώρο διάδοσης των σημάτων ισχύει $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm και $P_t = 15$ dBm.

5.4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις καμπύλες των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 5.11, 5.12 και 5.13, παρατηρούμε ότι οι καμπύλες που προκύπτουν από την εφαρμογή των δύο αναλυτικών μαθηματικών τύπων όχι μόνο δεν ταυτίζονται με

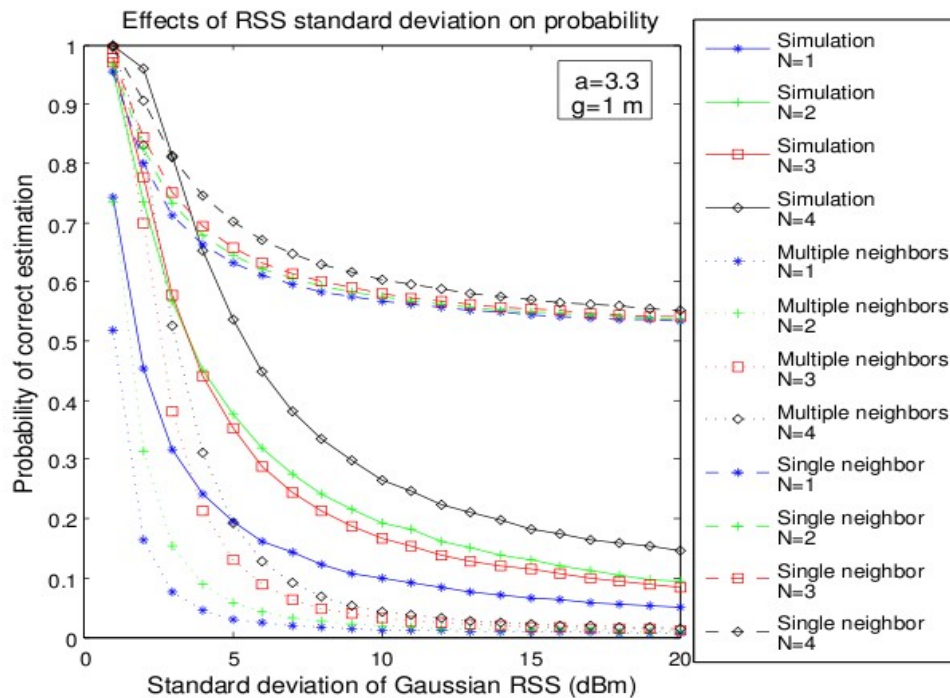
τους απευθείας υπολογισμούς στον υπολογιστή, αλλά πολλές φορές διαφέρουν αισθητά μεταξύ τους. Εντούτοις, στο ΣΧΗΜΑ 5.11 φαίνεται ότι οι πιθανότητες που προέκυψαν από τους αναλυτικούς μαθηματικούς τύπους έχουν την τάση να πλησιάζουν τις απευθείας υπολογισμένες πιθανότητες, όταν η τυπική απόκλιση των λαμβανόμενων ισχύων παίρνει μικρές τιμές, και όταν παράλληλα εκπέμπουν περισσότερα σημεία πρόσβασης. Επίσης, από τα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.12 και 5.13 παρατηρείται ότι όταν οι τιμές των παραμέτρων α και g είναι μεγάλες, και όταν παράλληλα εκπέμπουν περισσότερα σημεία πρόσβασης, τότε οι πιθανότητες που προκύπτουν από τους αναλυτικούς μαθηματικούς τύπους έχουν την τάση να πλησιάζουν τις απευθείας υπολογισμένες πιθανότητες.

Μία πιθανή εξήγηση της παρατήρησης ότι, όταν οι τιμές των παραμέτρων είναι ευνοϊκές για την αξιοπιστία του συστήματος, δηλαδή όταν η παράμετρος σ παίρνει μικρές τιμές και οι παράμετροι N , α και g παίρνουν μεγάλες τιμές, τότε οι (4.8) και (4.10) τείνουν να πλησιάζουν τους απευθείας υπολογισμούς, είναι η εξής. Όταν οι τιμές των παραμέτρων είναι ευνοϊκές, τότε μειώνεται η πιθανότητα ένα δειγματικό διάνυσμα να πλησιάζει το “δαχτυλικό αποτύπωμα” μιας υποψήφιας θέσης γειτονικής της πραγματικής. Αν ισχύει αυτό, τότε υπάρχουν αρκετές υποψήφιας θέσεις, με “δαχτυλικά αποτυπώματα” τόσο απομακρυσμένα από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης, ώστε η πιθανότητα να θεωρηθεί λανθασμένα κάποια από αυτές ως η πραγματική θέση να είναι ελάχιστη. Συνεπώς, τότε, ο αριθμός των υποψήφιων θέσεων που χρειάζονται να λαμβάνονται υπόψη για συγκρίσεις στον (4.10) μειώνεται, με αποτέλεσμα ο απλοποιημένος τύπος (4.8) να περιέχει μικρότερο σφάλμα. Επίσης, οι απαραίτητες συγκρίσεις του (4.10) γίνονται περισσότερο ανεξάρτητες, με αποτέλεσμα το σφάλμα της ανεξαρτησίας που θεωρεί ο (4.10) να μειώνεται.

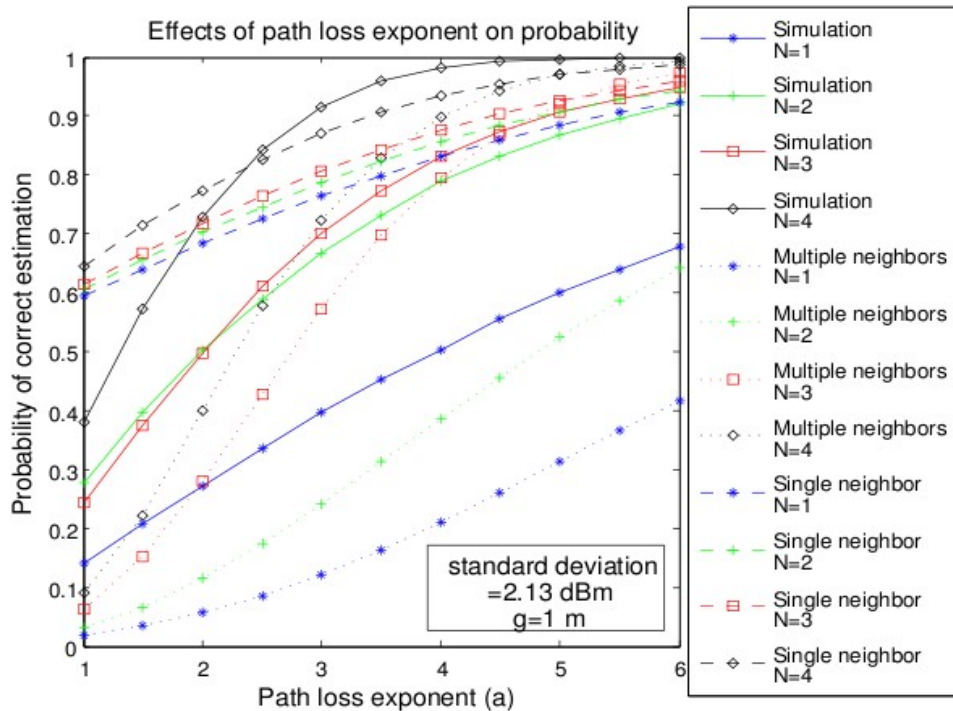
Όμως, παρότι ο (4.10) πιστεύαμε ότι θα ήταν πολύ πιο αξιόπιστος από τον (4.8), επειδή υπολογίζει την πιθανότητα ορθής εκτίμησης με πιο ορθόδοξο τρόπο, παρατηρείται ότι αυτό δεν ισχύει πάντα. Από τις καμπύλες των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 5.12 και 5.13 διαπιστώνουμε ότι κάτω υπό ορισμένες συνθήκες, τα αποτελέσματα του (4.8) πλησιάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα του απευθείας υπολογισμού της πιθανότητας μέσω υπολογιστή, από ότι τα αποτελέσματα του (4.10). Επομένως, υπάρχει ασάφεια σχετικά με το ποιος από τους δύο αναλυτικούς μαθηματικούς τύπους είναι πιο αξιόπιστος, αλλά και σχετικά με το ποιος από τους δύο τύπους είναι προτιμότερο να επιλέγεται κάθε φορά, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν.

Από τα τελευταία συμπεράσματα, γίνεται σαφές ότι ούτε ένας αναλυτικός μαθηματικός τύπος που λαμβάνει υπόψη του δύο μόνο υποψήφιας θέσεις, αλλά ούτε και ένας που λαμβάνει υπόψη του όλες τις υποψήφιας θέσεις του συστήματος εντοπισμού θεωρώντας ανεξαρτησία των συγκρίσεων, δίνουν

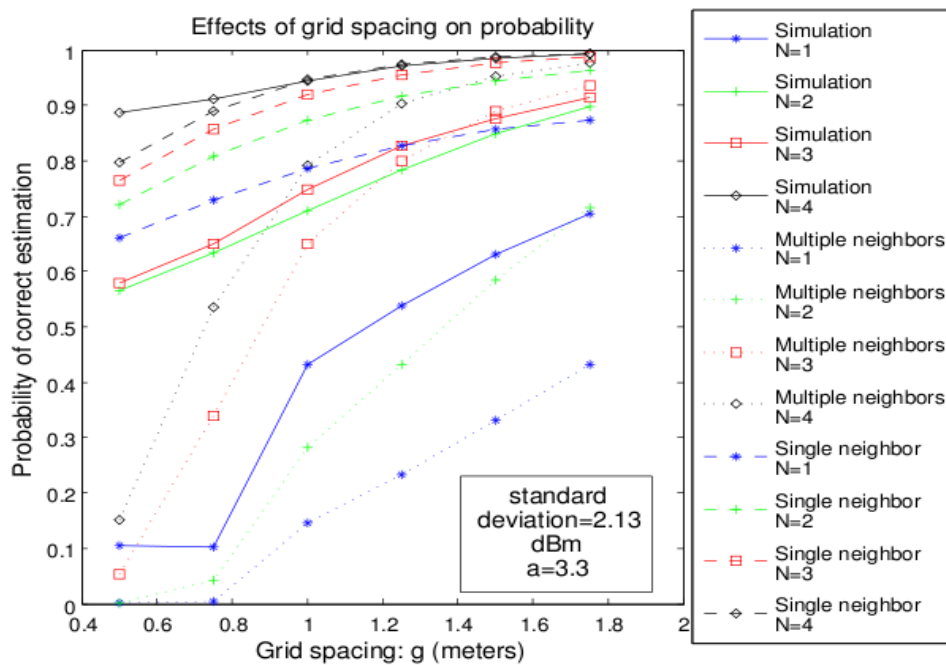
αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, παρατηρείται ότι τις περισσότερες φορές, τα αποτελέσματα του (4.8) έχουν γενικότερα υψηλότερες τιμές από τα απευθείας υπολογισμένα αποτελέσματα, ενώ τα αποτελέσματα του (4.10) έχουν γενικότερα χαμηλότερες τιμές από αυτές της απευθείας προσομοίωσης. Η παρατήρηση αυτή δίνει την υποψία πως ένας ενδιάμεσος τύπος των δύο προηγούμενων αναλυτικών μαθηματικών τύπων, ο οποίος θα θεωρούσε ανεξαρτησία των συγκρίσεων, αλλά όμως θα λάμβανε υπόψη του έναν αριθμό από υποψήφιας θέσεις μικρότερο του συνολικού τους αριθμού, θα έδινε αποτελέσματα που θα πλησίαζαν πολύ περισσότερο τα αποτελέσματα των απευθείας υπολογισμών. Στο κεφάλαιο 6, θα προσπαθήσουμε να ερευνήσουμε την ιδέα αυτή, και γενικότερα θα ασχοληθούμε με τρόπους βελτιστοποίησης του τύπου (4.10) για τον υπολογισμό της πιθανότητας ορθής εκτίμησης.



ΣΧΗΜΑ 5.11: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ σ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ.



ΣΧΗΜΑ 5.12: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.11, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΚΘΕΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ α .



ΣΧΗΜΑ 5.13: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.11, ΓΙΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ g .

5.5 ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΤΟΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟ ΧΩΡΟ

5.5.1 ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ VORONOI ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

5.5.1.1 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ VORONOI ΜΕ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ

Αν σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης οι υποψήφιες θέσεις λαμβάνουν σήματα από N σημεία πρόσβασης, τότε το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της κάθε υποψήφιας θέσης είναι ένα διάνυσμα τιμών N διαστάσεων. Έτσι, τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” της βάσης δεδομένων του συστήματος εντοπισμού, αλλά και κάθε δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων ισχύος του online σταδίου, θα μπορούσαν να απεικονιστούν σε έναν N -διάστατο διανυσματικό χώρο.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο που εκτελεί το σύστημα για να εντοπίσει μία θέση, ο οποίος, όπως έχουμε περιγράψει, είναι ένας αλγόριθμος εύρεσης του “Πλησιέστερου Γείτονα” (Nearest Neighbor), κάθε φορά που λαμβάνεται ένα δειγματικό διάνυσμα τιμών ισχύος, συγκρίνονται οι ευκλείδειες διανυσματικές αποστάσεις του από όλα τα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, και ως πραγματική θέση εκτιμάται η υποψήφια θέση στην οποία αντιστοιχεί το “δαχτυλικό αποτύπωμα” με την ελάχιστη απόσταση.

Αν επιχειρήσουμε να απεικονίσουμε στον N -διάστατο χώρο την εφαρμογή του αλγόριθμου αυτού για όλα τα δυνατά δειγματικά διανύσματα τιμών ισχύος που μπορούν να υπάρξουν, τα οποία είναι όλα τα σημεία του N -διάστατου χώρου, θα παρατηρήσουμε ότι ο N -διάστατος χώρος χωρίζεται σε διάφορες νοητές υποπεριοχές. Κάθε υποπεριοχή αντιστοιχεί σε ένα “δαχτυλικό αποτύπωμα” μιας υποψήφιας θέσης, και περιλαμβάνει όλα τα σημεία του N -διάστατου χώρου τα οποία απέχουν από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” αυτό απόσταση μικρότερη από ότι από τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των άλλων υποψήφιων θέσεων. Επομένως, κάθε ένα δειγματικό διάνυσμα τιμών που μετράται στο online στάδιο θα βρίσκεται σε μία από τις υποπεριοχές στις οποίες χωρίζεται ο N -διάστατος χώρος, και ο αλγόριθμος του συστήματος θα θεωρεί ως πραγματική θέση την υποψήφια θέση που αντιπροσωπεύει η υποπεριοχή αυτή. Θα μπορούσε όμως το δειγματικό διάνυσμα να ανήκει στο όριο μεταξύ δύο υποπεριοχών, και τότε ο αλγόριθμος θα επέλεγε ως πραγματική θέση οποιαδήποτε από τις δύο υποψήφιες θέσεις που αντιστοιχούν στις δύο αυτές υποπεριοχές.

Όμως, η διαίρεση του χώρου σε υποπεριοχές, έτσι ώστε, κάθε σημείο μίας υποπεριοχής να απέχει από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” που εκπροσωπεί την υποπεριοχή απόσταση μικρότερη ή ίση από ότι από

κάθε άλλο “δαχτυλικό αποτύπωμα”, δεν είναι εύκολη υπόθεση. Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη διαίρεση του N-διάστατου χώρου στις υποπεριοχές που περιγράφηκαν είναι το διάγραμμα Voronoi [85]. Αυτό εξηγείται ως εξής. Αν στον N-διάστατο χώρο υπάρχει ένα σύνολο διανυσμάτων P_i , με $i = 1, \dots, M$ και M φυσικός αριθμός, τότε το διάγραμμα Voronoi διαιρεί το χώρο με τον εξής τρόπο. Τα σημεία του διαγράμματος Voronoi είναι κατανομημένα στον N-διάστατο χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε, ανάμεσα σε οποιοδήποτε ζεύγος των διανυσμάτων P_i , σχηματίζεται ένα υπερεπίπεδο (hyperplane), κάθε σημείο του οποίου ισαπέχει από τα δύο διανύσματα του ζεύγους. Έτσι, με το σχηματισμό όλων αυτών των υπερεπιπέδων, ο N-διάστατος χώρος διαιρείται σε υποπεριοχές, οι οποίες έχουν σαν σύνορα τα σημεία του διαγράμματος Voronoi. Κάθε μία από αυτές τις υποπεριοχές αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό διάνυσμα P_i , και συνεπώς ο χώρος διαιρείται συνολικά σε M υποπεριοχές. Το χαρακτηριστικό κάθε υποπεριοχής είναι ότι, κάθε σημείο P του N-διάστατου χώρου που ανήκει σε μία υποπεριοχή, απέχει από το διάνυσμα P_j στο οποίο αντιστοιχεί η υποπεριοχή αυτή απόσταση μικρότερη ή ίση από ότι από οποιοδήποτε άλλο διάνυσμα P_i , με $i = 1, \dots, M$ και $i \neq j$. Δηλαδή, αν οι διανυσματικές αποστάσεις είναι ευκλείδειες και συμβολίζονται με $\|\dots\|$, τότε για κάθε διάνυσμα P που ανήκει στην υποπεριοχή αυτή θα ισχύει:

$$\|P_j - P\| \leq \|P_i - P\|, \text{ για } i = 1, \dots, M \text{ και } i \neq j.$$

Αν το σύνολο των διανυσμάτων P_i ήταν το σύνολο των δαχτυλικών αποτυπωμάτων του συστήματος εντοπισμού θέσης, τότε το διάγραμμα Voronoi θα διαιρούσε τον N-διάστατο χώρο σε κατάλληλες υποπεριοχές, έτσι ώστε κάθε σημείο μίας υποπεριοχής να απέχει από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” που εκπροσωπεί την υποπεριοχή αυτή απόσταση μικρότερη ή ίση από ότι από κάθε άλλο “δαχτυλικό αποτύπωμα”. Έτσι, από τον ορισμό του διαγράμματος Voronoi, συμπεραίνουμε ότι αυτό αποτελεί ένα ιδανικό εργαλείο για την τμηματοποίηση του χώρου στις υποπεριοχές που περιγράψαμε, και επομένως το διάγραμμα Voronoi αποτελεί ένα σημαντικό μέσο απεικόνισης της λειτουργίας του αλγόριθμου εντοπισμού, και της λογικής με την οποία ο αλγόριθμος αποφασίζει για τον εντοπισμό της πραγματικής θέσης.

5.5.1.2 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ VORONOI ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ

Οι υποπεριοχές στις οποίες διαιρείται ο χώρος μέσω του διαγράμματος Voronoi, θα μπορούσαν να βοηθήσουν τον μελετητή ενός συστήματος εντοπισμού θέσης να αποκτήσει στατιστικές πληροφορίες

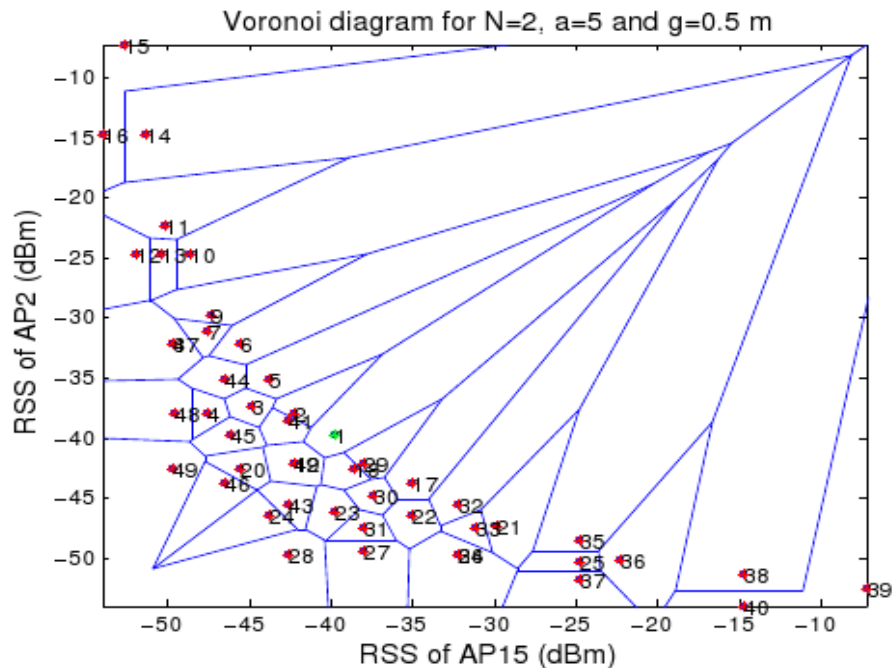
για το σύστημα. Αυτό οφείλεται στο ότι η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης ισοδυναμεί με την πιθανότητα να βρεθεί ένα δειγματικό διάνυσμα τιμών στην υποπεριοχή του N -διάστατου χώρου που αντιστοιχεί στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης, ή στα όρια της υποπεριοχής αυτής. Επίσης, αν το δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων ανήκει σε μία υποπεριοχή που εκπροσωπείται από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” μιας υποψήφιας θέσης που είναι διάφορη της πραγματικής, τότε ο αλγόριθμος κάνει σφάλμα στην εκτίμηση της θέσης. Και γενικότερα, η πιθανότητα να εκτιμηθεί οποιαδήποτε υποψήφια θέση από τον αλγόριθμο ως η πραγματική, ισοδυναμεί με την πιθανότητα ένα δειγματικό διάνυσμα τιμών να βρεθεί στην υποπεριοχή του N -διάστατου χώρου που εκπροσωπεί την υποψήφια θέση αυτή, ή στα όρια της υποπεριοχής. Έτσι, από αυτά, παρατηρούμε ότι υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στις υποπεριοχές του χώρου που διαιρεί το διάγραμμα Voronoi, και σε διάφορες πιθανότητες που μπορούν να υπολογιστούν.

Έτσι, αν ο μελετητής του συστήματος εντοπισμού γνωρίζει τις στατιστικές ιδιότητες των μετρούμενων ισχύων και τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητάς τους, τότε έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει την πιθανότητα που έχει μία υποψήφια θέση να επιλεγεί από τον αλγόριθμο ως η πραγματική. Ο υπολογισμός αυτός θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί, αν ο μελετητής υπολογίσει την πιθανότητα που έχει ένα δειγματικό διάνυσμα τιμών, το οποίο έχει γνωστή κατανομή, να βρεθεί μέσα στην υποπεριοχή που αντιστοιχεί στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποψήφιας θέσης αυτής, ή να βρεθεί στα όρια της υποπεριοχής.

Όμως, πολλές φορές τα όρια των υποπεριοχών του διαγράμματος Voronoi είναι πολύπλοκα, και επομένως ο υπολογισμός των πιθανοτήτων είναι εξαιρετικά δύσκολος. Έτσι, η εξαγωγή ποσοτικών στατιστικών πληροφοριών με τη βοήθεια του διαγράμματος Voronoi δεν είναι πάντα εγγυημένη. Όμως, το διάγραμμα Voronoi θα μπορούσε να βοηθήσει το μελετητή του συστήματος να πραγματοποιήσει ενδιαφέρουσες ποιοτικές παρατηρήσεις σχετικά με τις διάφορες πιθανότητες. Για παράδειγμα, είναι πιθανό να υπάρχει κάποιο είδος εξάρτησης ανάμεσα στο μέγεθος της υποπεριοχής που αντιστοιχεί σε ένα “δαχτυλικό αποτύπωμα”, και στο μέγεθος της πιθανότητας να εντοπιστεί ένα δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων στην υποπεριοχή αυτή, και επομένως στο μέγεθος της πιθανότητας να εκλεχθεί από τον αλγόριθμο η αντίστοιχη υποψήφια θέση ως η πραγματική. Στη συνέχεια, θα επιχειρηθεί μία διερεύνηση σχετικά με το σε τι βαθμό υπάρχει ποιοτική εξάρτηση του μεγέθους των πιθανοτήτων από τα χαρακτηριστικά των υποπεριοχών που δίνει το διάγραμμα Voronoi.

5.5.1.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΙΚΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ VORONOI

Στο ΣΧΗΜΑ 5.14 απεικονίζονται στον διανυσματικό χώρο όλα τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” και το διάγραμμα Voronoi, για το σύστημα εντοπισμού θέσης που μελετάμε, όταν ισχύουν $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm, $P_t = 15$ dBm, $\alpha=5$, $g=0.5$ m, ενώ παράλληλα στο κέντρο του πλέγματος βρίσκεται η υπονήφια θέση (2, 2) και εκπέμπουν τα σημεία πρόσβασης ΣΠ2 (AP2) και ΣΠ15 (AP15). Το διάγραμμα αυτό σχηματίστηκε με τη βοήθεια μίας ειδικής συνάρτησης του προγράμματος MATLAB. Επιλέχθηκε να εκπέμπουν μόνο δύο σημεία πρόσβασης, επειδή σε αυτή την περίπτωση το διάγραμμα Voronoi απεικονίζεται σε δύο διαστάσεις, και έτσι η μελέτη του γίνεται οπτικά ευκολότερη. Επίσης, λόγω του ότι ισχύει $g=0.5$ m, ο συνολικός αριθμός των υπονήφιων θέσεων είναι 49, και άρα στο διάγραμμα Voronoi υπάρχουν συνολικά 49 δαχτυλικά αποτυπώματα που αντιστοιχούν στις υπονήφιες θέσεις αυτές. Σε ελάχιστες περιπτώσεις, τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” φαίνεται στο σχήμα να ταυτίζονται. Επίσης, σε κάθε δαχτυλικό αποτύπωμα του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.14 αντιστοιχίζεται ένας αριθμός. Ο αριθμός αυτός είναι ο αύξων αριθμός της υπονήφιας θέσης που αντιστοιχεί στο δαχτυλικό αποτύπωμα αυτό. Στις δύο πρώτες στήλες του ΠΙΝΑΚΑ 5.3 παρουσιάζεται κάθε μία από τις συνολικά 49 υπονήφιες θέσεις και ο αντίστοιχος αύξων αριθμός της.



ΣΧΗΜΑ 5.14: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ VORONOI ΟΤΑΝ ΙΣΧΥΟΥΝ $\alpha=5$, $g=0.5$ m ΚΑΙ ΕΚΠΕΜΠΟΥΝ ΤΑ ΣΠ2 ΚΑΙ ΣΠ15.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: ΟΙ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ (4.10) ΓΙΑ $\sigma=2.13$ dBm, $\alpha=5$, $g=0.5$ m, ΚΑΙ ΓΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗ ΤΩΝ ΣΠ2 ΚΑΙ ΣΠ15.

Αύξων αριθμός υποψήφιας θέσης	Συντεταγμένες πραγματικής θέσης	Πιθανότητα ορθής εκτίμησης υπολογισμένη μέσω του (4.10)
1	(2, 2)	0.0865
2	(2, 1.5)	0.0621
3	(2, 1)	0.0530
4	(2, 0.5)	0.0786
5	(1.5, 2)	0.1045
6	(1.5, 1.5)	0.1342
7	(1.5, 1)	0.1135
8	(1.5, 0.5)	-
9	(1, 2)	0.163
10	(1, 1.5)	0.2843
11	(1, 1)	0.3565
12	(1, 0.5)	0.3123
13	(0.5, 2)	0.2341
14	(0.5, 1.5)	0.6615
15	(0.5, 1)	0.9283
16	(0.5, 0.5)	0.6764
17	(2.5, 2)	0.1045
18	(2.5, 1.5)	0.0489
19	(2.5, 1)	-
20	(2.5, 0.5)	0.0665
21	(3, 2)	0.1630
22	(3, 1.5)	0.0789
23	(3, 1)	0.0597
24	(3, 0.5)	0.1138
25	(3.5, 2)	0.2341
26	(3.5, 1.5)	-
27	(3.5, 1)	0.1694
28	(3.5, 0.5)	0.3027
29	(2, 2.5)	0.0621
30	(2, 3)	0.0530

31	(2, 3.5)	0.0786
32	(2.5, 2.5)	0.1342
33	(2.5, 3)	0.1135
34	(2.5, 3.5)	-
35	(3, 2.5)	0.2843
36	(3, 3)	0.3565
37	(3, 3.5)	0.3123
38	(3.5, 2.5)	0.6615
39	(3.5, 3)	0.9283
40	(3.5, 3.5)	0.6764
41	(1.5, 2.5)	0.0489
42	(1.5, 3)	-
43	(1.5, 3.5)	0.0665
44	(1, 2.5)	0.0789
45	(1, 3)	0.0597
46	(1, 3.5)	0.1138
47	(0.5, 2.5)	-
48	(0.5, 3)	0.1694
49	(0.5, 3.5)	0.3027

Στη συνέχεια, θα επιχειρηθεί να κατανοηθεί η συσχέτιση ανάμεσα στα χαρακτηριστικά των πολυγώνων που δίνει το διάγραμμα Voronoi, και στις πιθανότητες ορθής εκτίμησης. Για να γίνει η διερεύνηση αυτή θεωρήθηκαν χρήσιμοι οι υπολογισμοί των πιθανοτήτων ορθής εκτίμησης, θεωρώντας κάθε φορά ως πραγματική θέση μία διαφορετική υποψήφια θέση από το σύνολο των 49 υποψήφιων θέσεων, για τις οποίες προέκυψε το διάγραμμα Voronoi του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.14. Οι πιθανότητες αυτές καταγράφονται στην τρίτη στήλη του ΠΙΝΑΚΑ 5.3, και υπολογίστηκαν από τον (4.10), μέσω του προγράμματος MATLAB, για τις ίδιες ακριβώς συνθήκες κατά τις οποίες προέκυψε το ΣΧΗΜΑ 5.14, με τιμή τυπικής απόκλισης σ των μετρούμενων ισχύων ίση με 2.13 dBm. Έτσι, στον ΠΙΝΑΚΑ 5.3, για κάθε μία από τις 49 υποψήφιες θέσεις καταγράφεται η αντίστοιχη τιμή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης που προκύπτει από τον (4.10) αν η θέση αυτή θεωρηθεί ως πραγματική. Σε λίγες περιπτώσεις στον ΠΙΝΑΚΑ 5.3 το πρόγραμμα MATLAB δεν κατάφερε να δώσει αποτελέσματα τιμών πιθανότητας, επειδή κατά τη διάρκεια των πράξεων εμφανίστηκε η ανάγκη διαίρεσης με το μηδέν. Αυτές οι περιπτώσεις όμως είναι λίγες και δεν επηρεάζουν τη συνολική μελέτη του πίνακα .

Παρατηρώντας μαζί, και το ΣΧΗΜΑ 5.14 και τον ΠΙΝΑΚΑ 5.3, μπορούν να γίνονται αντιστοιχίσεις ανάμεσα στον αύξων αριθμό κάθε μίας υποψήφιας θέσης, στο πολύγωνο του διαγράμματος Voronoi που αντιστοιχεί στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” αυτής, και στην πιθανότητα ορθής εκτίμησης αν θεωρηθεί η υποψήφια θέση αυτή ως πραγματική. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη και το ΣΧΗΜΑ 5.14 και τον ΠΙΝΑΚΑ 5.3, παρατηρούμε ότι υποψήφιας θέσεις όπως οι 3, 4, 20, 22, 23, 30, 31, 41, 43, 45, στα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των οποίων αντιστοιχούν πολύγωνα μικρών εμβαδών, χαρακτηρίζονται από πολύ μικρές πιθανότητες ορθής εκτίμησης, που είναι συνήθως μικρότερες από 0.1. Επίσης, παρατηρούμε ότι υποψήφιας θέσεις, όπως οι 9, 21, 24, 46, που αντιστοιχούν σε πολύγωνα με λίγο μεγαλύτερα εμβαδά, χαρακτηρίζονται συνήθως από πιθανότητες ελαφρώς μεγαλύτερες. Ίδιων μεγεθών πιθανότητες παρατηρούνται συνήθως και σε περιπτώσεις που τα εμβαδά των πολυγώνων του διαγράμματος Voronoi είναι αισθητά μεγαλύτερα. Μερικά παραδείγματα υποψήφιας θέσεων που αντιστοιχούν σε τέτοιες περιπτώσεις είναι οι 5, 6, 17, 32. Όμως, υπάρχουν περιπτώσεις, όπως οι υποψήφιας θέσεις 14 και 38, στις οποίες αντιστοιχούν πολύγωνα μεγάλων εμβαδών, και ταυτόχρονα μεγάλες τιμές πιθανότητας. Επίσης, υπάρχουν λίγες περιπτώσεις όπως οι υποψήφιας θέσεις 13 και 25, στις οποίες αντιστοιχούν πολύγωνα μικρών εμβαδών, αλλά όμως χαρακτηρίζονται από τιμές πιθανότητας μεγαλύτερες από τιμές που χαρακτηρίζουν πολλές άλλες υποψήφιας θέσεις, στις οποίες αντιστοιχούν μεγαλύτερα εμβαδά.

Επομένως, από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι στην περίπτωση του μοντελοποιημένου συστήματος που μελετάμε, μία υπόθεση ότι η πιθανότητα ορθής εκτίμησης είναι ανάλογη των μεγεθών των υποπεριοχών που προκύπτουν από το διάγραμμα Voronoi, δεν είναι ασφαλής.

Η εξήγηση της μη ασφαλούς διαπίστωσης αυτής προκύπτει από το είδος της κατανομής των μετρούμενων ισχύων. Αν η μετρούμενη ισχύς είχε ομοιόμορφη κατανομή σε όλον τον διδιάστατο χώρο, τότε η πιθανότητα εκλογής μίας υποψήφιας θέσης από τον αλγόριθμο ως η πραγματική, θα ήταν ίση με το γινόμενο της σταθερής τιμής της πυκνότητας πιθανότητας επί το εμβαδό του αντίστοιχου πολυγώνου. Σε αυτή την περίπτωση, η πιθανότητα ορθής εκτίμησης θα ήταν ευθέως ανάλογη των εμβαδών των υποπεριοχών που δίνει το διάγραμμα Voronoi. Όμως μία τέτοια κατανομή πυκνότητας πιθανότητας δεν θα μπορούσε να ισχύει. Στο σύστημα που μελετάμε παραδεχόμαστε ότι η μετρούμενη ισχύς ακολουθεί κανονική κατανομή, και επίσης κάθε δειγματικό διάλυσμα μετρήσεων ισχύος σε μία υποψήφια θέση έχει ως μέση τιμή το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποψήφιας θέσης αυτής. Η πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του διαγράμματος Voronoi, υπολογίζοντας την πιθανότητα που έχει ένα δειγματικό διάλυσμα

μετρήσεων, γνωστής κατανομής, να βρεθεί στο εσωτερικό ή στα όρια του πολυγώνου που αντιστοιχεί στην πραγματική θέση. Όμως, λόγω του ότι η κατανομή του δειγματικού διανύσματος μετρήσεων είναι συγκεντρωμένη γύρω από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης, η πιθανότητα ορθής εκτίμησης δεν εξαρτάται μόνο από το εμβαδό και το σχήμα του αντίστοιχου πολυγώνου του διαγράμματος Voronoi, αλλά εξαρτάται και από τη θέση του “δαχτυλικού αποτυπώματος” μέσα στο πολύγωνο αυτό. Δηλαδή, ακόμα και αν ένα πολύγωνο που αντιστοιχεί στην πραγματική θέση είναι μεγάλο, αν το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης βρίσκεται πολύ κοντά στα όρια του πολυγώνου, τότε η πιθανότητα ένα δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων να βρεθεί εκτός του πολυγώνου αυξάνεται, με αποτέλεσμα η πιθανότητα ορθής εκτίμησης να μην είναι μεγάλη.

Επομένως, μελετώντας την πιθανότητα μέσω του διαγράμματος Voronoi, παρατηρούμε ότι η πιθανότητα ορθής εκτίμησης αυξάνεται όταν μειώνονται οι ακμές που πλησιάζει το “δαχτυλικό αποτύπωμα” στο πολύγωνο που αντιστοιχεί στην πραγματική θέση, και όταν αυξάνονται οι αποστάσεις του “δαχτυλικού αποτυπώματος” από τις ακμές του πολυγώνου. Απλά, συνήθως οι συνθήκες αυτές έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να συμβούν σε πολύγωνα μεγαλύτερου εμβαδού, χωρίς όμως αυτό να αποτελεί κάποιον κανόνα.

Επίσης, το μέγεθος της πιθανότητας ορθής εκτίμησης επηρεάζεται και από την τυπική απόκλιση σ . Αυτό συμβαίνει επειδή διαφορετικές τιμές της σ , προκαλούν τη σχετική σταθεροποίηση της κανονικής κατανομής σε μικρές τιμές, σε διαφορετικές διανυσματικές αποστάσεις από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης. Έτσι, ανάλογα με τη σ , διαφέρουν οι τιμές των διανυσματικών αποστάσεων, οι οποίες όταν ξεπεραστούν από τα όρια των πολυγώνων, τότε οι διαφορές ανάμεσα στις πιθανότητες που αντιστοιχούν στα πολύγωνα αυτά είναι μικρές.

Όλα τα συμπεράσματα αυτά θα μπορούσαν να γενικευτούν και στον N-διάστατο χώρο.

5.5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟ ΧΩΡΟ

Στη συνέχεια, θα καταγράψουμε και θα μελετήσουμε κάποια συμπεράσματα που προκύπτουν από την απεικόνιση των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” στον διανυσματικό χώρο.

1) Μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση που προκύπτει από το ΣΧΗΜΑ 5.14 (αλλά και από το ΣΧΗΜΑ 5.15 που θα εξηγηθεί παρακάτω) είναι ότι, αν και οι υποψήφιες θέσεις είναι συμμετρικά τοποθετημένες σε ένα τετραγωνικό πλέγμα, τα “δαχτυλικά αποτυπώματά” τους δεν είναι συμμετρικά τοποθετημένα στον διανυσματικό χώρο. Το φαινόμενο αυτό καταγράφεται και στην [85]. Επίσης, η

μορφή και η διαστάσεις των πολυγώνων στα οποία διαιρεί το χώρο το διάγραμμα Voronoi, ποικίλλουν.

2) Μία πρώτη παρατήρηση που προκύπτει από τις πληροφορίες των ΠΙΝΑΚΩΝ 5.3 (και 5.4) είναι ότι η τιμή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης δεν είναι σταθερή, αλλά στις περισσότερες των περιπτώσεων η τιμή της διαφέρει από υποψήφια θέση σε υποψήφια θέση που θεωρείται ως πραγματική. Επομένως, ο μελετητής του συστήματος πρέπει να είναι πολύ προσεκτικός όταν λαμβάνει υπόψη του μία τιμή πιθανότητας ορθής εκτίμησης, επειδή αυτή αναφέρεται σε μία μόνο υποψήφια θέση που θεωρείται ως πραγματική, και θα ήταν εσφαλμένο να θεωρήσει ότι η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει οποιαδήποτε υποψήφια θέση του συστήματος.

Το γεγονός ότι οι υποψήφιες θέσεις του πλέγματος χαρακτηρίζονται από μία μεγάλη ποικιλία διαφορετικών τιμών πιθανότητας ορθής εκτίμησης, θα μπορούσε να εξηγηθεί ως εξής. Λόγω της ασυμμετρίας που έχουν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” στον διανυσματικό χώρο, είναι λογικό κάθε “δαχτυλικό αποτύπωμα” να απέχει τις δικές του χαρακτηριστικές αποστάσεις από τα άλλα “δαχτυλικά αποτυπώματα”. Έτσι, κάθε “δαχτυλικό αποτύπωμα” έχει τη δική του χαρακτηριστική πιθανότητα που αφορά το πόσο πιθανό είναι για ένα δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων να μην απέχει ελάχιστη απόσταση από κάποιο από τα άλλα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, και επομένως κάθε “δαχτυλικό αποτύπωμα” έχει τη δική του χαρακτηριστική πιθανότητα ορθής εκτίμησης.

3) Παρατηρώντας το ΣΧΗΜΑ 5.14, είναι εμφανές ότι τα περισσότερα “δαχτυλικά αποτυπώματα” απέχουν μικρές αποστάσεις μεταξύ τους στον διδιάστατο χώρο. Επίσης, από τον ΠΙΝΑΚΑ 5.3 γίνεται αντιληπτό ότι η πλειοψηφία των καταγεγραμμένων πιθανοτήτων έχουν μικρές τιμές. Όμως, στο ΣΧΗΜΑ 5.14 παρατηρείται ότι οι υποψήφιες θέσεις 14, 15, 16, 38, 39 και 40, οι οποίες σύμφωνα με τον ΠΙΝΑΚΑ 5.3 χαρακτηρίζονται από αισθητά μεγαλύτερες τιμές πιθανότητας, έχουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” τα οποία είναι πολύ πιο απομακρυσμένα από τα υπόλοιπα “δαχτυλικά αποτυπώματα”.

Επομένως, παρατηρείται πως ένα “δαχτυλικό αποτύπωμα”, όσο πιο απομακρυσμένο είναι από τα υπόλοιπα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, τόσο μεγαλώνει η πιθανότητα ορθής εκτίμησης της υποψήφιας θέσης του.

Το φαινόμενο αυτό εξηγείται με φυσικό τρόπο ως εξής. Όταν η διανυσματική απόσταση ανάμεσα στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης και στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” μιας άλλης υποψήφιας θέσης αυξάνεται, τότε μειώνεται η πιθανότητα ένα δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων να πλησιάσει περισσότερο το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της μη πραγματικής υποψήφιας θέσης, και

επομένως η πιθανότητα ορθής εκτίμησης αυξάνεται. Επίσης, όσα περισσότερα “δαχτυλικά αποτυπώματα” υποψήφιων θέσεων διαφόρων της πραγματικής θέσης απομακρυνθούν από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης, τόσο περισσότερο αυξάνεται η πιθανότητα ορθής εκτίμησης.

4) Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όταν οι τιμές των παραμέτρων α , g ή N αυξάνονται, τότε τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” του συστήματος απομακρύνονται περισσότερο μεταξύ τους στον διανυσματικό χώρο. Επομένως, αυτό έχει ως συνέπεια η πιθανότητες ορθής εκτίμησης, που αφορούν όλες τις υποψήφιες θέσεις του συστήματος, να παίρνουν γενικά υψηλότερες τιμές.

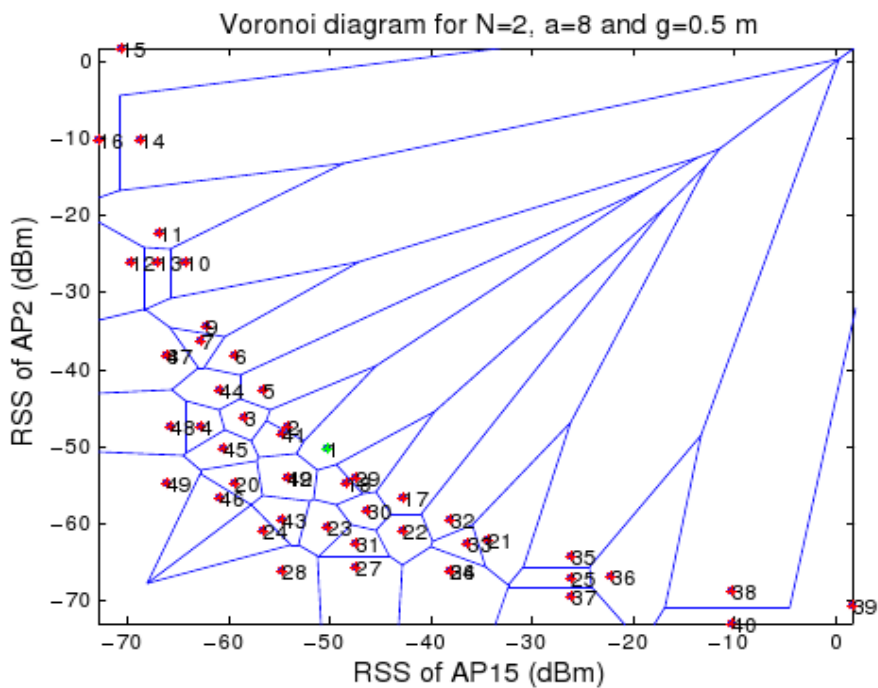
Από τα αποτελέσματα του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.15 και του ΠΙΝΑΚΑ 5.4 επαληθεύεται η προηγούμενη διαπίστωση, όταν αυτή αφορά του εκθέτη απωλειών διαδρομής. Το ΣΧΗΜΑ 5.15 απεικονίζει τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” του συστήματος στον διδιάστατο διανυσματικό χώρο και το διάγραμμα Νογοποι, όταν ισχύουν οι ίδιες ακριβώς συνθήκες με αυτές που ίσχυαν κατά τους υπολογισμούς του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.14, με τη μόνη διαφορά ότι ο εκθέτης απωλειών διαδρομής αυξήθηκε από 5 σε 8. Επίσης, ο ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4 καταγράφει τις πιθανότητες ορθής εκτίμησης που αντιστοιχούν σε όλες τις υποψήφιες θέσεις του συστήματος. Οι πιθανότητες υπολογίστηκαν από τον (4.10). Κατά τους υπολογισμούς του ΠΙΝΑΚΑ 5.4 ίσχυαν ακριβώς οι ίδιες συνθήκες με αυτές που ίσχυαν κατά τους υπολογισμούς του ΠΙΝΑΚΑ 5.3, με μόνη διαφορά τη νέα τιμή της παραμέτρου α που, όπως είπαμε, είναι 8. Επίσης, όλα τα αποτελέσματα προέκυψαν μετά από προγραμματισμό σε περιβάλλον MATLAB, ενώ κάθε υποψήφια θέση χαρακτηρίζεται από έναν αύξων αριθμό, έτσι ώστε να μπορούν να γίνονται εύκολα αντιστοιχίσεις μεταξύ του σχήματος και του πίνακα.

Παρατηρώντας το ΣΧΗΜΑ 5.15, είναι εμφανές ότι τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” στην περίπτωση που ισχύει $\alpha=8$ είναι περισσότερο απομακρυσμένα μεταξύ τους από ότι όταν ίσχυε $\alpha=5$. Πιο συγκεκριμένα, στο ΣΧΗΜΑ 5.15, που αναφέρεται σε $\alpha=8$, τα δύο πιο απομακρυσμένα “δαχτυλικά αποτυπώματα” διαφέρουν κατά πάνω από 70 dBm και ως προς τα δύο σημεία πρόσβασης, ενώ στο ΣΧΗΜΑ 5.14, που αναφέρεται σε $\alpha=5$, τα δύο πιο απομακρυσμένα “δαχτυλικά αποτυπώματα” διαφέρουν κατά λιγότερο από 60 dBm και ως προς τα δύο σημεία πρόσβασης. Παράλληλα, στον ΠΙΝΑΚΑ 5.4, που αναφέρεται σε $\alpha=8$, παρατηρούμε γενικά υψηλότερες τιμές πιθανοτήτων ορθής εκτίμησης από ότι στον ΠΙΝΑΚΑ 5.3, που αναφέρεται σε $\alpha=5$.

Επομένως, από όλες αυτές τις παρατηρήσεις επαληθεύουμε ότι όταν αυξάνεται ο εκθέτης απωλειών διαδρομής, τότε τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” έχουν την τάση να απομακρύνονται μεταξύ τους, και

συνεπώς μειώνεται η πιθανότητα ένα δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων να πλησιάζει σημαντικά “δαχτυλικά αποτυπώματα” που αντιστοιχούν σε διάφορες της πραγματικής υποψήφιας θέσεις, με αποτέλεσμα η πιθανότητα ορθής εκτίμησης να αυξάνεται.

Επίσης, πρέπει να επαναλάβουμε ότι το μέγεθος της πιθανότητας ορθής εκτίμησης εξαρτάται και από την τυπική απόκλιση σ των μετρούμενων ισχύων, αφού επηρεάζει την πιθανότητα ενός δειγματικού διανύσματος μετρήσεων να πλησιάζει άλλα “δαχτυλικά αποτυπώματα”. Επιπλέον, η μείωση του αριθμού των υποψήφιας θέσεων του συστήματος, είτε λόγω μεταβολής του g είτε όχι, είναι πιθανό να συμβάλει στην αύξηση της πιθανότητας ορθής εκτίμησης, ιδιαιτέρως αν οι υποψήφιας θέσεις που αφαιρούνται είχαν “δαχτυλικά αποτυπώματα” που πλησίαζαν αρκετά το δαχτυλικό αποτύπωμα της πραγματικής θέσης.



ΣΧΗΜΑ 5.15: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.14, ΓΙΑ $\alpha=8$.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: ΟΠΩΣ ΣΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ 5.3, ΓΙΑ $\alpha=8$.

Αύξων αριθμός υποψήφιας θέσης	Συντεταγμένες πραγματικής θέσης	Πιθανότητα ορθής εκτίμησης υπολογισμένη μέσω του (4.10)
1	(2, 2)	0.4277
2	(2, 1.5)	0.3043
3	(2, 1)	0.3019
4	(2, 0.5)	0.3718
5	(1.5, 2)	0.4465
6	(1.5, 1.5)	0.4592
7	(1.5, 1)	0.3355
8	(1.5, 0.5)	-
9	(1, 2)	0.4492
10	(1, 1.5)	0.5534
11	(1, 1)	0.6098
12	(1, 0.5)	0.5498
13	(0.5, 2)	0.4294
14	(0.5, 1.5)	0.8360
15	(0.5, 1)	0.9959
16	(0.5, 0.5)	0.8373
17	(2.5, 2)	0.4465
18	(2.5, 1.5)	0.2702
19	(2.5, 1)	-
20	(2.5, 0.5)	0.3590
21	(3, 2)	0.4492
22	(3, 1.5)	0.3851
23	(3, 1)	0.3553
24	(3, 0.5)	0.4548
25	(3.5, 2)	0.4294
26	(3.5, 1.5)	-
27	(3.5, 1)	0.5695
28	(3.5, 0.5)	0.7464
29	(2, 2.5)	0.3043

30	(2, 3)	0.3019
31	(2, 3.5)	0.3718
32	(2.5, 2.5)	0.4592
33	(2.5, 3)	0.3355
34	(2.5, 3.5)	-
35	(3, 2.5)	0.5534
36	(3, 3)	0.6098
37	(3, 3.5)	0.5498
38	(3.5, 2.5)	0.8360
39	(3.5, 3)	0.9959
40	(3.5, 3.5)	0.8373
41	(1.5, 2.5)	0.2702
42	(1.5, 3)	-
43	(1.5, 3.5)	0.3590
44	(1, 2.5)	0.3851
45	(1, 3)	0.3553
46	(1, 3.5)	0.4548
47	(0.5, 2.5)	-
48	(0.5, 3)	0.5695
49	(0.5, 3.5)	0.7464

Επαναλαμβάνουμε ότι ο τύπος (4.10) προσδίδει σφάλμα στα αποτελέσματα. Επίσης, το σφάλμα του δεν είναι σταθερό, αλλά μεταβάλλεται όταν αλλάζουν οι πειραματικές συνθήκες. Όμως, ακόμα και έτσι, αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο, το οποίο μας βοηθά να καταλήξουμε στα παραπάνω ποιοτικά συμπεράσματα.

5.6 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Όπως έχουμε παρατηρήσει από τις διάφορες καμπύλες που αφορούν το μοντελοποιημένο σύστημα που μελετάμε, ο αριθμός των σημείων πρόσβασης που επιλέγονται να εκπέμπουν επηρεάζει την πιθανότητα ορθής εκτίμησης. Όμως, μέχρι τώρα, δεν έχουμε μελετήσει το πόσο επηρεάζει την

αξιοπιστία του συστήματος η τοποθέτηση ενός συγκεκριμένου αριθμού από σημεία πρόσβασης σε διαφορετικές θέσεις.

5.6.1 ΑΠΟΦΥΓΗ ΚΟΙΝΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”

Ένα σημαντικό θέμα που πρέπει να λαμβάνει υπόψη του ο μελετητής ενός συστήματος όταν τοποθετεί τα σημεία πρόσβασης, είναι ο κίνδυνος να υπάρξουν κοινά “δαχτυλικά αποτυπώματα” σε κάποιες υποψήφιες θέσεις. Αν συμβεί αυτό, τότε είναι πολύ πιθανό αν ένα αντικείμενο άγνωστης θέσης βρεθεί σε μία υποψήφια θέση που έχει κοινά “δαχτυλικά αποτυπώματα” με άλλες θέσεις, τότε ο αλγόριθμος θα μπορούσε να θεωρήσει ως πραγματική θέση οποιαδήποτε από τις υποψήφιες θέσεις έχουν κοινά “δαχτυλικά αποτυπώματα”, όσο μακριά και αν βρίσκονται από την πραγματική θέση. Και αυτό θα ήταν αρνητικό για την αξιοπιστία του συστήματος. Επίσης, για τους ίδιους λόγους, εξίσου αρνητικό για την αξιοπιστία του συστήματος είναι η ύπαρξη υποψήφιων θέσεων με “δαχτυλικά αποτυπώματα” που απέχουν πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ τους στον διανυσματικό χώρο.

Ένα καλό παράδειγμα που παρουσιάζει το πρόβλημα αυτό είναι το εξής. Έστω ότι στο σύστημα εντοπισμού που μελετάμε θέλουμε να ισχύει $N=2$, δηλαδή επιθυμούμε να εκπέμπουν δύο σημεία πρόσβασης, και έστω ότι επιλέγουμε να εκπέμπουν τα σημεία πρόσβασης ΣΠ5 και ΣΠ7, τα οποία αντιστοιχούν στις συντεταγμένες (2,0) και (2,4) του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.1, αντίστοιχα. Τότε, από τους ΠΙΝΑΚΕΣ 5.1 και 5.2 παρατηρούμε ότι οι υποψήφιες θέσεις (1,1) και (3,1) λαμβάνουν την ίδια μέση ισχύ από το ΣΠ5 και την ίδια μέση ισχύ από το ΣΠ7, ενώ και οι υποψήφιες θέσεις (1,2) και (3,2) λαμβάνουν ίδια μέση ισχύ από το ΣΠ5 και ίδια μέση ισχύ από το ΣΠ7. Επίσης, η μέση ισχύς του ΣΠ5 είναι ίση στις υποψήφιες θέσεις (1,3) και (3,3), ενώ παράλληλα οι δύο αυτές υποψήφιες θέσεις λαμβάνουν την ίδια μέση ισχύ από το ΣΠ7. Επομένως, όταν εκπέμπουν τα ΣΠ5 και ΣΠ7, τότε αν το τετραγωνικό πλέγμα του συστήματος που μοντελοποιούμε είναι αυτό που απεικονίζεται στο ΣΧΗΜΑ 5.1, η υποψήφια θέση (1,1) έχει το ίδιο “δαχτυλικό αποτύπωμα” με την υποψήφια θέση (3,1), η υποψήφια θέση (1,2) έχει το ίδιο “δαχτυλικό αποτύπωμα” με την υποψήφια θέση (3,2), και η υποψήφια θέση (1,3) έχει το ίδιο “δαχτυλικό αποτύπωμα” με την υποψήφια θέση (3,3). Έτσι, στο σύστημα υπάρχει αυξημένος κίνδυνος σφάλματος.

Όμως, αν αλλάξουμε τις θέσεις των δύο σημείων πρόσβασης που εκπέμπουν, και τα μετακινήσουμε στις θέσεις (0,1) και (4,3), οι οποίες αντιστοιχούν στα σημεία πρόσβασης ΣΠ16 και ΣΠ14, τότε από τους ΠΙΝΑΚΕΣ 5.1 και 5.2 φαίνεται ότι δεν υπάρχουν υποψήφιες θέσεις οι οποίες να λαμβάνουν ίσες μέσες ισχύς και από το ΣΠ14 και από το ΣΠ16. Επομένως, παρατηρούμε ότι με την αλλαγή της θέσεως των σημείων πρόσβασης που εκπέμπουν στο σύστημα, κάθε υποψήφια έχει πλέον το δικό της

ξεχωριστό “δαχτυλικό αποτυπώμα”, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ακρίβεια του συστήματος.

Αν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υποψήφιων θέσεων του συστήματος υπολογίζονται με τη βοήθεια του μοντέλου απωλειών διαδρομής του (5.1), τότε όλες οι υποψήφιες θέσεις που απέχουν την ίδια απόσταση από κάθε σημείο πρόσβασης έχουν τα ίδια “δαχτυλικά αποτυπώματα”. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που αναφέραμε προηγουμένως, όταν εξέπεμπαν τα ΣΠ5 και ΣΠ7, τότε οι υποψήφιες θέσεις (1,1) και (3,1) απείχαν ίσες αποστάσεις από ΣΠ5, και ίσες αποστάσεις από το ΣΠ7, και συνεπώς είχαν τα ίδια “δαχτυλικά αποτυπώματα”. Όταν όμως εξέπεμπαν οι ΣΠ14 και ΣΠ16, τότε οι υποψήφιες θέσεις (1,1) και (3,1) απείχαν διαφορετικές αποστάσεις από ΣΠ14, και διαφορετικές αποστάσεις από το ΣΠ16, με αποτέλεσμα να μην έχουν πλέον τα ίδια “δαχτυλικά αποτυπώματα”. Επομένως, ένας καλός τρόπος αποφυγής όμοιων “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” είναι ο μελετητής να φροντίσει ώστε τα σημεία πρόσβασης να εκπέμπουν σε τέτοιες θέσεις, ώστε να μην υπάρχουν υποψήφιες θέσεις που απέχουν ίσες αποστάσεις από κάθε ένα σημείο πρόσβασης.

Όμως, αυτός ο τρόπος αποφυγής δεν είναι απόλυτα σωστός, επειδή στις πραγματικές συνθήκες διάδοσης, δύο δέκτες που ισαπέχουν από τον ίδιο πομπό δεν είναι βέβαιο ότι θα λαμβάνουν ίσες ή σχεδόν ίσες μέσες ισχύεις. Άλλωστε, ακόμα και ο μαθηματικός τύπος (5.1) από τον οποίον προέρχεται το συμπέρασμα της εξάρτησης από την απόσταση, δεν είναι απόλυτα σωστός, αφού, όπως έχουμε ήδη αναφέρει στο κεφάλαιο 3, ο τοπικός μέσος όρος της ισχύος μπορεί λόγω φαινομένου σκίασης να διαφέρει από την απόλυτη μέση τιμή που υπολογίζουν οι (5.1) και (5.2), και μάλιστα συνηθίζεται να θεωρείται ότι ακολουθεί λογαριθμο-κανονική κατανομή.

Ένα άλλο σημείο όπου πρέπει να εστιάσουμε είναι το γεγονός ότι η αύξηση του αριθμού των σημείων πρόσβασης που εκπέμπουν μειώνει την πιθανότητα να υπάρχουν υποψήφιες θέσεις με ίδια ή πολύ κοντινά “δαχτυλικά αποτυπώματα”. Για παράδειγμα, όταν ισχύει $N=2$ και εκπέμπουν τα ΣΠ5 και ΣΠ7, τότε, όπως είπαμε, οι υποψήφιες θέσεις (1,1) και (3,1) έχουν κοινά δαχτυλικά αποτυπώματα. Αν όμως αυξήσουμε τον αριθμό των σημείων πρόσβασης που εκπέμπουν κατά ένα, δηλαδή αν ισχύσει $N=3$, προσθέτοντας το σημείο πρόσβασης ΣΠ13 στις συντεταγμένες (3,0), τότε οι υποψήφιες θέσεις (1,1) και (3,1) λαμβάνουν διαφορετικές μέσες ισχύεις από το ΣΠ13, με αποτέλεσμα τα “δαχτυλικά αποτυπώματά” τους να απομακρυνθούν στον διανυσματικό χώρο. Πάντως, αν και αυτό δε συμβαίνει πάντα, είναι λογικό, όταν αυξάνεται η παράμετρος N , τότε να μειώνεται η πιθανότητα να υπάρχουν υποψήφιες θέσεις που να λαμβάνουν ίσες μέσες ισχύεις από κάθε ένα σημείο πρόσβασης, και έτσι να μειώνεται η πιθανότητα να υπάρχουν υποψήφιες θέσεις με ίδια ή πολύ κοντινά “δαχτυλικά αποτυπώματα”.

5.6.2 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ

Στη συνέχεια, θα διερευνήσουμε την επίδραση που έχει στην πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας υποψήφιας θέσης η απόστασή της από τα σημεία πρόσβασης. Για να μελετήσουμε αυτό, πειραματιστήκαμε τοποθετώντας τα σημεία πρόσβασης ΣΠ16 (AP16) και ΣΠ12 (AP12) στις συντεταγμένες (0,1) και (0,3) αντίστοιχα της αριστερής ακραίας πλευράς του τετραγωνικού πλέγματος. Στη συνέχεια, θεωρώντας ότι ισχύει $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm, $P_t = 15$ dBm, $\sigma = 2.13$ dBm, $\alpha = 3.3$ και $g = 0.75$ m, υπολογίσαμε τις πιθανότητες ορθής εκτίμησης για τις 25 υποψήφιες θέσεις του πλέγματος, μέσω του (4.10) και με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB. Οι υπολογισμένες πιθανότητες καταγράφονται στον ΠΙΝΑΚΑ 5.5 και είναι ταξινομημένες κατά φθίνουσα σειρά. Επίσης, μέσω κατάλληλης συνάρτησης του MATLAB απεικονίσαμε στο ΣΧΗΜΑ 5.16 τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υποψήφιων θέσεων αυτών στον διδιάστατο χώρο, καθώς και το διάγραμμα Voronoi. Έτσι, είναι δυνατή η αντιστοίχιση της πιθανότητας ορθής εκτίμησης κάθε μίας υποψήφιας θέσης του ΠΙΝΑΚΑ 5.5 με τη θέση του αντίστοιχου “δαχτυλικού αποτυπώματός” της στο ΣΧΗΜΑ 5.16.

Από τον ΠΙΝΑΚΑ 5.5 παρατηρούμε ότι οι υποψήφιες θέσεις του πλέγματος με τετμημένη 0.5, οι οποίες βρίσκονται στην πλησιέστερη ευθεία που είναι παράλληλη με την ευθεία όπου είναι τοποθετημένα τα σημεία πρόσβασης, έχουν τις μεγαλύτερες πιθανότητες ορθής εκτίμησης στο σύστημα, οι οποίες ξεπερνούν την τιμή 0.85. Οι υποψήφιες θέσεις του πλέγματος με τετμημένη 1.25, οι οποίες βρίσκονται στην αμέσως επόμενη πλησιέστερη ευθεία που είναι παράλληλη με την ευθεία όπου είναι τοποθετημένα τα σημεία πρόσβασης, έχουν μεγάλες τιμές πιθανότητας ορθής εκτίμησης στο σύστημα, οι οποίες είναι μεταξύ 0.6 και 0.7. Επίσης, οι υποψήφιες θέσεις με τετμημένη 2, οι οποίες είναι τοποθετημένες στην ευθεία που είναι η τρίτη πλησιέστερη ευθεία υποψήφιων θέσεων στην ευθεία των σημείων πρόσβασης, έχουν πιθανότητες μικρότερες από 0.35 και μεγαλύτερες από 0.25. Τέλος, οι υποψήφιες θέσεις που έχουν τετμημένες 2.75 και 3.5, οι οποίες είναι τοποθετημένες στις πιο απόμακρες ευθείες που είναι παράλληλες στην ευθεία των σημείων πρόσβασης, έχουν πολύ μικρές τιμές πιθανότητας ορθής εκτίμησης, αρκετά κοντινές μεταξύ τους και μικρότερες από 0.2.

Επομένως, παρατηρούμε ότι οι υποψήφιες θέσεις που βρίσκονται πιο κοντά στα σημεία πρόσβασης, έχουν μεγαλύτερες τιμές πιθανότητας ορθής εκτίμησης από ότι οι υποψήφιες θέσεις που είναι πιο απομακρυσμένες από τα σημεία πρόσβασης. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι από ένα σημείο και μετά, όταν μεγαλώνουν οι αποστάσεις των υποψήφιων θέσεων από τα σημεία πρόσβασης, οι πιθανότητες

ορθής εκτίμησης δεν μεταβάλλονται πολύ αξιόλογα.

Η συμπεριφορά αυτή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης επιβεβαιώνεται και στο ΣΧΗΜΑ 5.16. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι πράγματι οι υποψήφιος θέσεις που είναι πιο κοντινές στα σημεία πρόσβασης έχουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” που είναι πιο απομακρυσμένα από τα υπόλοιπα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, και επομένως έχουν υψηλότερες τιμές πιθανότητας ορθής εκτίμησης. Επίσης, σε μεγάλες αποστάσεις από τα σημεία πρόσβασης τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υποψήφιος θέσεων απέχουν μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μικρές τιμές πιθανότητας ορθής εκτίμησης.

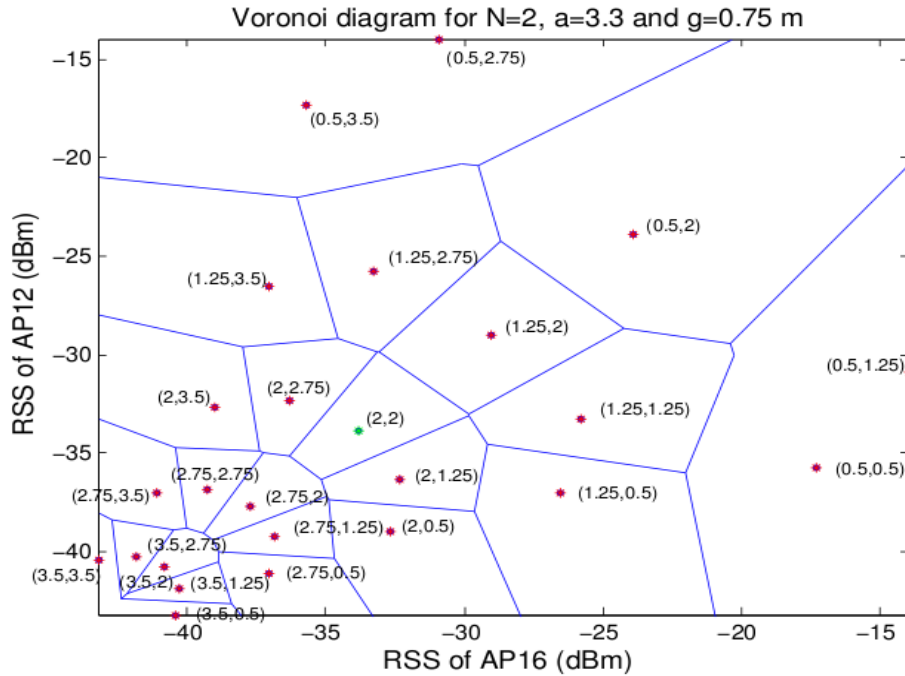
Μία λογική εξήγηση της εξάρτησης του μεγέθους της πιθανότητας ορθής εκτίμησης μιας υποψήφιος θέσης από την απόστασή της από τα σημεία πρόσβασης, προκύπτει αν παρατηρήσουμε προσεκτικά τη γραφική παράσταση της μέσης λαμβανόμενης ισχύος από ένα σημείο πρόσβασης ως προς την απόσταση από αυτό. Μία τέτοια γραφική παράσταση απεικονίζεται στο ΣΧΗΜΑ 5.17, όπου τα αποτελέσματα προέκυψαν μέσω του προγράμματος MATLAB, εφαρμόζοντας τους (5.1) και (5.2), και θεωρώντας ότι ισχύει $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm, $P_t = 15$ dBm και $\alpha=3.3$. Από το ΣΧΗΜΑ 5.17 παρατηρούμε ότι αν μία υποψήφιος θέση βρίσκεται κοντά στο σημείο πρόσβασης, τότε αν οι δύο πλησιέστερες σε αυτήν γειτονικές υποψήφιος θέσεις απέχουν από το σημείο πρόσβασης κατά d_n m λιγότερο και κατά d_n m περισσότερο, τότε οι γειτονικές αυτές υποψήφιος θέσεις λαμβάνουν μέση ισχύ από το σημείο πρόσβασης αυτό κατά d_1 dBm μεγαλύτερη και κατά d_2 dBm μικρότερη αντίστοιχα. Από την άλλη, αν μία υποψήφιος θέση βρίσκεται μακριά από το ίδιο σημείο πρόσβασης, τότε αν οι δύο πλησιέστερες σε αυτήν γειτονικές υποψήφιος θέσεις απέχουν από το σημείο πρόσβασης κατά d_n m λιγότερο και κατά d_n m περισσότερο, τότε οι γειτονικές αυτές υποψήφιος θέσεις λαμβάνουν μέση ισχύ από το σημείο πρόσβασης αυτό κατά d_3 dBm μεγαλύτερη και κατά d_4 dBm μικρότερη αντίστοιχα. Όμως, οι διαφορές d_1 και d_2 είναι σαφώς μεγαλύτερες από τις διαφορές d_3 και d_4 . Επομένως, αν μας ενδιαφέρει η εκπομπή ενός μόνο σημείου πρόσβασης, η μέση μετρούμενη ισχύς σε μία υποψήφιος θέση η οποία βρίσκεται κοντά στο σημείο πρόσβασης αυτό, θα διαφέρει αρκετά από τις μέσες μετρούμενες ισχύεις των πλησιέστερων σε αυτή γειτονικών υποψήφιος θέσεων, και συνεπώς θα διαφέρει αρκετά από τις μέσες μετρούμενες ισχύεις όλων των διάφορων αυτής υποψήφιος θέσεων. Αν όμως μία υποψήφιος θέση είναι απομακρυσμένη από το σημείο πρόσβασης αυτό, τότε η μέση μετρούμενη ισχύς της διαφέρει πολύ λιγότερο από τις μέσες μετρούμενες ισχύεις των γειτονικών της υποψήφιος θέσεων. Επίσης, από το ΣΧΗΜΑ 5.17 παρατηρούμε ότι για μεγάλες αποστάσεις των

υποψήφιων θέσεων από το σημείο πρόσβασης, όταν αυξάνεται η απόσταση μιας υποψήφιας θέσης από το σημείο πρόσβασης, τότε οι διαφορές της μετρούμενης μέσης ισχύος της από τις μέσες ισχύεις των γειτονικών της θέσεων δεν μεταβάλλονται αξιόλογα. Αυτό άλλωστε επιβεβαιώνεται από την παρατήρηση που κάναμε προηγουμένως, σχετικά με τις πολύ μικρές μεταβολές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης όταν οι αποστάσεις από τα σημεία πρόσβασης είναι μεγάλες.

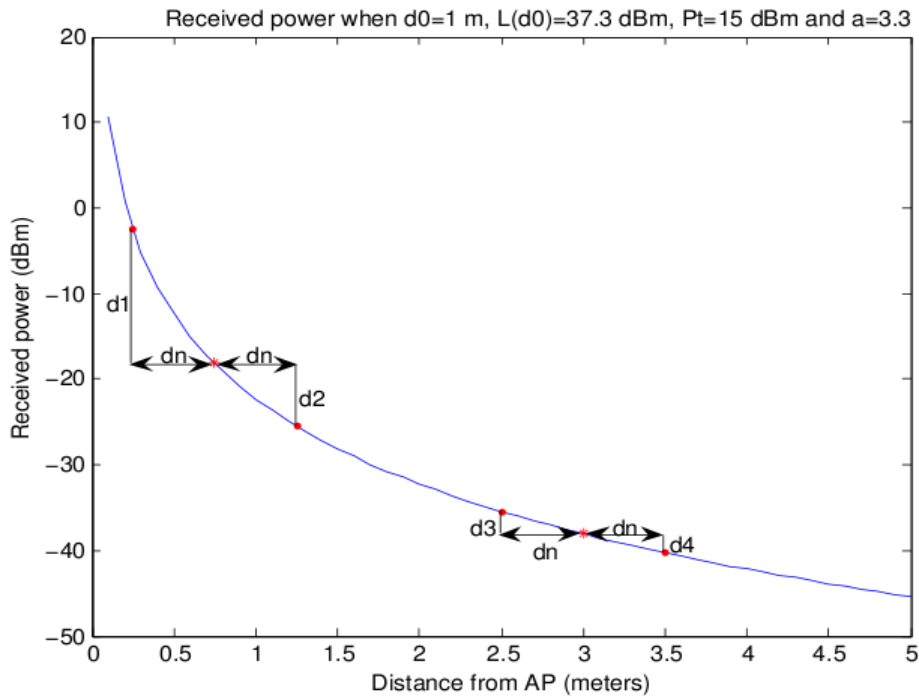
Έτσι, επεκτείνοντας τα συμπεράσματα αυτά στη γενικότερη περίπτωση όπου εκπέμπουν πολλά σημεία πρόσβασης, μπορούμε να πούμε ότι λόγω λογαριθμικής συμπεριφοράς της μέσης μετρούμενης ισχύος, η οποία μετράται σε dBm, οι υποψήφιες θέσεις οι οποίες βρίσκονται πλησιέστερα σε κάποιο σημείο πρόσβασης έχουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” που είναι πιο απομακρυσμένα από τα υπόλοιπα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, από ότι οι υποψήφιες θέσεις οι οποίες βρίσκονται πιο μακριά από κάποιο σημείο πρόσβασης. Και, όπως έχουμε ήδη εξηγήσει, στα απομακρυσμένα μεταξύ τους “δαχτυλικά αποτυπώματα” συνηθίζεται να αντιστοιχούν υψηλότερες τιμές πιθανότητας ορθής εκτίμησης από ότι όταν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” πλησιάζουν μεταξύ τους.

Όμως, πρέπει να σημειώσουμε ότι η λογαριθμική συμπεριφορά της μετρούμενης ισχύος, η οποία μετράται σε dBm, προκύπτει από τους τύπους (5.1) και (5.2), οι οποίοι μοντελοποιούν τη διάδοση του σήματος, και συνεπώς δε στηρίζεται σε πραγματικές συνθήκες διάδοσης. Εντούτοις, όπως έχουμε αναφέρει και κατά τη μελέτη των στατιστικών ιδιοτήτων της μετρούμενης ισχύος στο κεφάλαιο 3, η παραδοχή των (5.1) και (5.2) είναι συνηθισμένη στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα για τη μελέτη της απόλυτης μέσης ισχύος σαν συνάρτηση της απόστασης από τον πομπό.

Επίσης πρέπει να σημειώσουμε ότι, όπως έχουμε αναφέρει κατά τη μελέτη των στατιστικών ιδιοτήτων της μετρούμενης ισχύος στο κεφάλαιο 3, η τυπική απόκλιση σ στην πραγματικότητα δεν είναι σταθερή, αλλά συνήθως είναι μεγαλύτερη στις υποψήφιες θέσεις που βρίσκονται κοντά στα σημεία πρόσβασης. Έτσι, παρά το γεγονός ότι όταν μία υποψήφια θέση πλησιάζει κάποιο σημείο πρόσβασης, τότε το “δαχτυλικό αποτύπωμά” της τείνει να απομακρύνεται από τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των άλλων υποψήφιων θέσεων, στην πραγματικότητα η τυπική απόκλιση σ της μετρούμενης ισχύος είναι πιθανό να πάρει μεγαλύτερες τιμές, με αποτέλεσμα η πιθανότητα ορθής εκτίμησης να μην είναι σίγουρο ότι θα αυξηθεί. Συνεπώς, το συμπέρασμα της εξάρτησης της πιθανότητας από την απόσταση από τα σημεία πρόσβασης δεν είναι αρκετά ασφαλές αν δεν ισχύει η παραδοχή της σταθερής τυπικής απόκλισης.



ΣΧΗΜΑ 5.16: ΤΑ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΑ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΑ” ΣΤΟΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟ ΧΩΡΟ ΟΤΑΝ ΕΚΠΕΜΠΟΥΝ ΔΥΟ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ (ΣΠ12 ΚΑΙ ΣΠ16) ΣΤΗΝ ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΑΚΡΑΙΑ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.



ΣΧΗΜΑ 5.17: Η ΜΕΣΗ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: ΟΙ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ (4.10) ΓΙΑ $\sigma=2.13$ dBm, $\alpha=3.3$, $g=0.75$ m, ΚΑΙ ΓΙΑ ΕΚΠΙΟΜΠΗ ΤΩΝ ΣΠ12 ΚΑΙ ΣΠ16.

Συντεταγμένες πραγματικής θέσης	Πιθανότητα ορθής εκτίμησης υπολογισμένη μέσω του (4.10)
(0.5, 2)	0.9247
(0.5, 2.75)	0.9118
(0.5, 1.25)	0.9118
(0.5, 3.5)	0.8841
(0.5, 0.5)	0.8841
(1.25, 2)	0.6335
(1.25, 3.5)	0.6315
(1.25, 0.5)	0.6315
(1.25, 2.75)	0.6305
(1.25, 1.25)	0.6305
(2, 3.5)	0.3092
(2, 0.50)	0.3092
(2, 2.75)	0.2739
(2, 1.25)	0.2739
(2, 2)	0.2633
(3.5, 0.50)	0.1633
(3.5, 3.5)	0.1633
(2.75, 3.5)	0.1372
(2.75, 0.5)	0.1372
(2.75, 2.75)	0.0983
(2.75, 1.25)	0.0983
(2.75, 2)	0.0873
(3.5, 2.75)	0.0862
(3.5, 1.25)	0.0862
(3.5, 2)	0.0692

Αν δεχτούμε την εξάρτηση της πιθανότητας από την απόσταση από τα σημεία πρόσβασης, για το μοντελοποιημένο σύστημα που μελετάμε, μπορούμε να βελτιώσουμε την επίδοση του συστήματος. Για παράδειγμα, αν κάποια περιοχή του χώρου όπου εφαρμόζεται το σύστημα εντοπισμού υποφέρει από

έντονες διαλείψεις, και κατ' επέκταση οι τιμές της τυπικής απόκλισης σ στις υποψήφιες θέσεις της περιοχής αυτής είναι μεγάλες και οι πιθανότητες ορθής εκτίμησής τους είναι μικρές, τότε η τοποθέτηση σημείων πρόσβασης κοντά στην περιοχή αυτή θα συντελούσε στην αύξηση της πιθανότητας ορθής εκτίμησης των υποψήφιων θέσεών της.

5.6.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΔΙΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ

Τέλος, αναφέρουμε ότι όταν αλλάζουν οι θέσεις στις οποίες τοποθετείται ένας συγκεκριμένος σταθερός αριθμός από σημεία πρόσβασης, τότε είναι λογικό να αλλάζει η τιμή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης των υποψήφιων θέσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι, όταν αλλάζουν οι θέσεις εκπομπής των σημείων πρόσβασης, τότε είναι λογικό να αλλάζουν οι ιδιαίτερες χαρακτηριστικές αποστάσεις κάθε “δαχτυλικού αποτυπώματος” από τα άλλα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, με αποτέλεσμα να αλλάζουν οι πιθανότητες ορθής εκτίμησης. Έτσι, ο μελετητής του συστήματος έχει τη δυνατότητα να τοποθετεί ένα συγκεκριμένο αριθμό σημείων πρόσβασης με τέτοιο τρόπο που να του εξασφαλίζει επιθυμητές πιθανότητες ορθής εκτίμησης στις υποψήφιες θέσεις που επιθυμεί.

Η εξάρτηση της πιθανότητας ορθής εκτίμησης από τον τρόπο τοποθέτησης των σημείων πρόσβασης επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα του ΠΙΝΑΚΑ 5.6. Κατά τους υπολογισμούς του ΠΙΝΑΚΑ 5.6 θεωρήθηκε ότι δύο σημεία πρόσβασης τοποθετήθηκαν σε τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς θέσεων. Δηλαδή, στην πρώτη περίπτωση τα σημεία πρόσβασης τοποθετήθηκαν στις θέσεις (0,1) και (0,3), στη δεύτερη περίπτωση τα σημεία πρόσβασης τοποθετήθηκαν στις θέσεις (0,1) και (1,4), στη τρίτη περίπτωση τα σημεία πρόσβασης τοποθετήθηκαν στις θέσεις (0,1) και (4,3), ενώ στη τέταρτη περίπτωση τα σημεία πρόσβασης τοποθετήθηκαν στις θέσεις (4,1) και (4,3). Επίσης, θεωρήθηκε ότι η πραγματική θέση είναι η (2,2), ότι ισχύει $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm, $P_t = 15$ dBm, $\sigma = 2.13$ dBm, $\alpha = 3.3$, $g = 1$ m, και χρησιμοποιήθηκε ο (4.10).

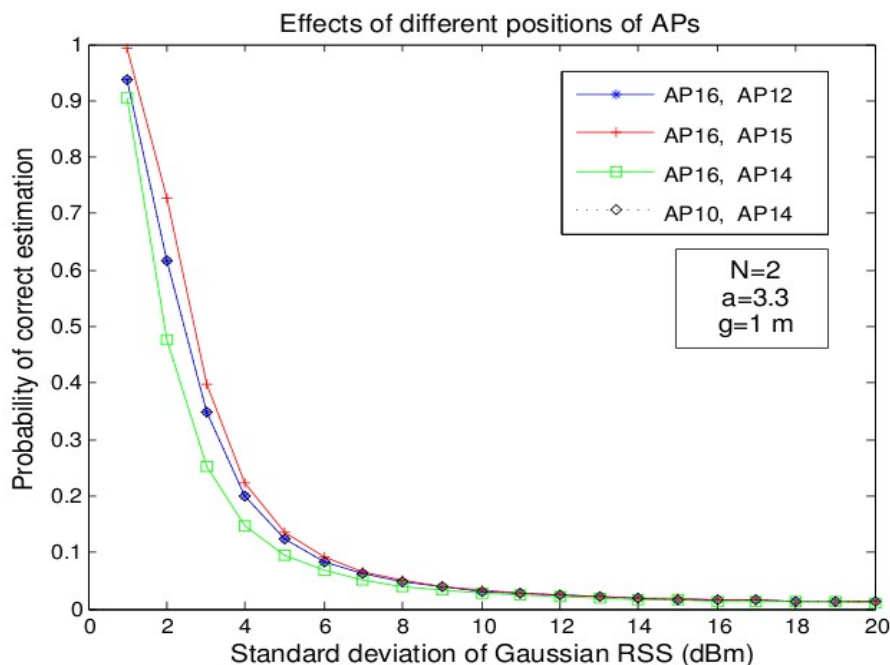
Παρατηρώντας τον ΠΙΝΑΚΑ 5.6 βλέπουμε ότι, πράγματι, η εκπομπή του ίδιου αριθμού ($N=2$) σημείων πρόσβασης από διαφορετικές θέσεις έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης.

Στην περίπτωση που τα σημεία πρόσβασης εκπέμπουν από τις θέσεις (0,1) και (0,3), είναι λογικό η πιθανότητα ορθής εκτίμησης να είναι ίση με την περίπτωση που εκπέμπουν στις θέσεις (4,1) και (4,3). Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η συμμετρία των σημείων πρόσβασης και των υποψήφιων

θέσεων είναι η ίδια, και στις δύο περιπτώσεις. Βέβαια, αν γίνονταν μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες διάδοσης, και δεν γινόταν χρήση των (5.1) και (5.2), τότε η χωρική συμμετρία δεν θα ήταν βέβαιο ότι θα εξασφάλιζε ίσες μετρήσεις “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” στις συμμετρικές θέσεις, και άρα δεν θα ήταν βέβαιο ότι θα υπολογίζονταν ίσες τιμές πιθανότητας ορθής εκτίμησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: ΤΙΜΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ (2,2) ΟΤΑΝ ΕΝΑΣ ΙΔΙΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΥΝ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ.

Σημεία πρόσβασης	Συντεταγμένες σημείων πρόσβασης	Πιθανότητα ορθής εκτίμησης της (2,2) (ΤΥΠΟΣ (4.10))
ΣΠ16, ΣΠ12	(0,1), (0,3)	0.5737
ΣΠ16, ΣΠ15	(0,1), (1,4)	0.6763
ΣΠ16, ΣΠ14	(0,1), (4,3)	0.4356
ΣΠ10, ΣΠ14	(4,1), (4,3)	0.5737



ΣΧΗΜΑ 5.18: Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ (2,2) ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ σ ΟΤΑΝ ΕΝΑΣ ΙΔΙΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΥΝ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ.

Επίσης, από το ΣΧΗΜΑ 5.18, το οποίο αντιστοιχεί στις περιπτώσεις του ΠΙΝΑΚΑ 5.6, παρατηρούμε ότι η αλλαγή στις θέσεις εκπομπής των σημείων πρόσβασης δεν μεταβάλλει τον τρόπο συμπεριφοράς της πιθανότητας ορθής εκτίμησης ως προς τη μεταβολή της τυπικής απόκλισης σ . Δηλαδή, οι καμπύλες της πιθανότητας ως προς την παράμετρο σ , σε όλες τις περιπτώσεις διαφορετικής τοποθέτησης του ίδιου αριθμού σημείων πρόσβασης, έχουν την ίδια μορφή με αυτήν που παρατηρήσαμε στην παράγραφο 5.3. Η παρατήρηση αυτή είναι λογική, και θα μπορούσε να επεκταθεί και για την περίπτωση που μελετώνται οι καμπύλες ως προς τις παραμέτρους N , a και g .

5.7 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΜΙΑΣ ΘΕΣΗΣ ΕΤΣΙ ΩΣΤΕ ΝΑ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ ΤΟΥ ΤΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”

5.7.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”

Ο αλγόριθμος του συστήματος εντοπισμού θέσης που μελετάμε αποφασίζει για μια θέση, συγκρίνοντας τις ευκλείδειες διανυσματικές αποστάσεις του λαμβανόμενου κατά το online στάδιο δειγματικού διανύσματος μετρήσεων από τα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, και θεωρώντας ως πραγματική θέση την υποψήφια θέση που αντιστοιχεί στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” με την ελάχιστη απόσταση. Επίσης, όπως έχουμε ήδη αναφέρει κατά την παρουσίαση της μοντελοποίησης του συστήματος, σε ένα σύστημα όπου υπάρχουν μόνο δύο υποψήφιες θέσεις, το κριτήριο για την ορθή εκτίμηση μιας θέσης είναι το εξής:

$$A \leq B ,$$

όπου A είναι το τετράγωνο της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης του δειγματικού διανύσματος *Sample* από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” R της πραγματικής θέσης, και όπου B είναι το τετράγωνο της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης του δειγματικού διανύσματος *Sample* από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” S της υποψήφιας θέσης που δεν είναι η πραγματική.

Όμως, πολλές φορές οι πραγματικές τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” διαφέρουν από αυτές που έχει καταγράψει το σύστημα στη βάση δεδομένων του. Ένας λόγος για τον οποίον θα μπορούσε να συμβεί αυτό είναι η μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά τη λειτουργία του συστήματος, με αποτέλεσμα τη μεταβολή ορισμένων τιμών μέσης ισχύος σε διάφορες υποψήφιες θέσεις του

συστήματος. Ένας άλλος λόγος θα ήταν ένας όχι πολύ πετυχημένος υπολογισμός των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” κατά το offline στάδιο, λόγω ανεπαρκούς συλλογής και διαχείρισης δειγματικών μετρήσεων, ή λόγω μη επιτυχημένης επιλογής ενός τυποποιημένου μοντέλου απωλειών διαδρομής, ή λόγω κακής προσαρμογής του μοντέλου απωλειών διαδρομής στις πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Επίσης, λόγω της παραδοχής του συστήματος ότι ένα αντικείμενο άγνωστης θέσης μπορεί να βρίσκεται μόνο σε κάποια υποψήφια θέση γνωστών συντεταγμένων, και όχι σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο του χώρου, θα περιμέναμε στην πραγματική θέση να αντιστοιχίζεται ένα από τα γνωστά “δαχτυλικά αποτυπώματα” που έχουν καταγραφεί στη βάση δεδομένων του συστήματος. Όμως, στην πραγματικότητα, η πραγματική θέση ενός αντικειμένου που θέλουμε να εντοπίσουμε είναι πολύ πιθανό να βρίσκεται σε ένα σημείο του χώρου το οποίο δεν συμπίπτει με μία γνωστή υποψήφια θέση, και έτσι η πραγματική θέση είναι πιθανό να αντιστοιχίζεται με μία νέα τιμή “δαχτυλικού αποτυπώματος”. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.4.2, μία πιθανή αιτία σφαλμάτων στις τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” είναι το γεγονός ότι δεν λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός του χρήστη της κινητής συσκευής άγνωστης θέσης.

Έστω ότι σε ένα απλοποιημένο σύστημα υπάρχουν δύο μόνο υποψήφιες θέσεις, οι οποίες έχουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” S_1 και S_2 . Όμως, έστω ότι γνωρίζουμε ότι στην πραγματικότητα οι τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” έχουν σφάλματα με μέτρα $|ΔS_1|$ και $|ΔS_2|$, αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι στην πραγματικότητα, οι τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” θα μπορούσαν να πάρουν όλες τις δυνατές τιμές του διανυσματικού χώρου οι οποίες απέχουν από τις αρχικές τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” ευκλείδειες διανυσματικές αποστάσεις ίσες με το μέτρο του σφάλματος. Για παράδειγμα, αν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” παρουσιάζονταν στον διδιάστατο διανυσματικό χώρο, τότε η πιθανή πραγματική τιμή του “δαχτυλικού αποτυπώματος” της υποψήφιας θέσης που αντιπροσωπεύεται από το S_1 θα μπορούσε να βρισκόταν σε ένα από τα σημεία ενός κύκλου με κέντρο το S_1 και ακτίνα ίση με $|ΔS_1|$. Ομοίως, η πιθανή πραγματική τιμή του “δαχτυλικού αποτυπώματος” της υποψήφιας θέσης που αντιπροσωπεύεται από το S_2 θα μπορούσε να βρισκόταν σε ένα από τα σημεία ενός κύκλου με κέντρο το S_2 και ακτίνα ίση με $|ΔS_2|$. Αν βρισκόμασταν στον τρισδιάστατο χώρο, τότε, σκεπτόμενοι με παρόμοιο τρόπο, τα πραγματικά “δαχτυλικά αποτυπώματα” θα μπορούσαν να είναι σημεία σφαιρών, με ίδιες ακτίνες και κέντρα με την προηγούμενη περίπτωση.

Στην περίπτωση που γνωρίζουμε ότι υπάρχουν σφάλματα στις τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, δεν είναι πλέον αξιόπιστο να συγκρίνονται οι αποστάσεις του *Sample* από τις

καταγεγραμμένες στη βάση δεδομένων τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, αλλά πρέπει να συγκρίνονται οι αποστάσεις του *Sample* από τις πραγματικές τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”. Αν ο αλγόριθμος δεν λαμβάνει υπόψη του τις πραγματικές τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, τότε είναι πιθανό η πιθανότητα ορθής εκτίμησης που υπολογίζεται να μην είναι αρκετά ακριβής. Επίσης, ιδιαίτερος σε περιπτώσεις που τα σφάλματα των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” είναι μεγάλα, ο αλγόριθμος εντοπισμού είναι πιθανό να βγάξει συχνά παραπλανητικά αποτελέσματα, κάνοντας λάθη στην εκτίμηση της θέσης.

5.7.2 ΕΝΑ ΝΕΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”

Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε έναν νέο τρόπο με τον οποίο ο αλγόριθμος επιλέγει μία υποψήφια θέση ως πραγματική, λαμβάνοντας υπόψη τα μέτρα των πιθανών σφαλμάτων. Έστω ότι το τετράγωνο της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης ενός δειγματικού διανύσματος μετρούμενων ισχύων *Sample* από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” S_1 συμβολίζεται με sd_1 , ενώ το τετράγωνο της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης του ίδιου δειγματικού διανύσματος μετρούμενων ισχύων *Sample* από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” S_2 συμβολίζεται με sd_2 . Όμως, λόγω του σφάλματος του S_1 , η πραγματική τιμή του τετραγώνου της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης του *Sample* από την πραγματική τιμή του “δαχτυλικού αποτυπώματος” S_1 συμβολίζεται με sd_1' , και υποθέτουμε ότι θα μπορούσε να πάρει μία τιμή από το διάστημα τιμών $[sd_1 - x_1, sd_1 + x_1]$, όπου x_1 η ακραία μεταβολή που μπορεί να έχει η sd_1 λόγω του $|ΔS_1|$. Ομοίως, η πραγματική τιμή του τετραγώνου της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης του *Sample* από την πραγματική τιμή του “δαχτυλικού αποτυπώματος” S_2 συμβολίζεται με sd_2' , και υποθέτουμε ότι θα μπορούσε να πάρει μία τιμή από το διάστημα τιμών $[sd_2 - x_2, sd_2 + x_2]$, όπου x_2 η ακραία μεταβολή που μπορεί να έχει η sd_2 λόγω του $|ΔS_2|$.

Ο σχεδιαστής του συστήματος δεν θα μπορούσε να γνωρίζει τις ακριβείς τιμές των sd_1' και sd_2' , επειδή δεν είναι σε θέση να γνωρίζει ακριβώς τις πραγματικές τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”. Γνωρίζοντας όμως τα μέτρα των σφαλμάτων τους, θα μπορούσε να εκτιμήσει τις ακραίες μεταβολές x_1 και x_2 . Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι οι τετραγωνικές αποστάσεις sd_1' και sd_2' εξακολουθούν να παίρνουν πιθανές τιμές από τα διαστήματα τιμών $[sd_1 - x_1, sd_1 + x_1]$ και

$[sd_2 - x_2, sd_2 + x_2]$, αντίστοιχα, για οποιοδήποτε δειγματικό διάνυσμα **Sample** του διανυσματικού χώρου.

Η λογική του αλγόριθμου εντοπισμού θέσης είναι η ίδια με την προηγούμενη περίπτωση. Δηλαδή, επιλέγει ως πραγματική την υποψήφια θέση στην οποία αντιστοιχεί το “δαχτυλικό αποτύπωμα” με την ελάχιστη απόσταση από το **Sample**. Όμως, ο νέος αλγόριθμος διαφέρει στο ότι δεν συγκρίνει τις τετραγωνικές αποστάσεις sd_1 και sd_2 για να αποφασίσει για μία θέση, αλλά συγκρίνει τις τετραγωνικές αποστάσεις sd_1' και sd_2' , οι οποίες όμως, για το ίδιο **Sample**, μπορεί να παίρνουν διάφορες τιμές, ανάλογα με τις θέσεις των πραγματικών “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” στον διανυσματικό χώρο. Αν κατά το online στάδιο το σύστημα λάβει ένα διάνυσμα **Sample**, τότε ο αλγόριθμος εντοπισμού συγκρίνει τις αποστάσεις του από διάφορους δυνατούς συνδυασμούς πραγματικών τιμών των δύο “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” που μπορούν να υπάρξουν.

Αρχικά ο αλγόριθμος συγκρίνει τις τετραγωνικές αποστάσεις στην οριακή περίπτωση που ισχύει $sd_1' = sd_1 - x_1$ και $sd_2' = sd_2 + x_2$, δηλαδή όταν η πραγματική τιμή του S_1 απέχει τη ελάχιστη πιθανή απόστασή της από το **Sample**, ενώ η πραγματική τιμή του S_2 απέχει τη μέγιστη πιθανή απόστασή της από το **Sample**. Ο συνδυασμός αυτός των πιθανών πραγματικών τιμών των sd_1' και sd_2' είναι ο ευνοϊκότερος που θα μπορούσε να υπάρξει για να επιλέξει ο αλγόριθμος ως πραγματική την υποψήφια θέση που αντιστοιχεί στο S_1 . Αν κατά τη σύγκριση του αλγόριθμου προκύψει ότι $sd_1 - x_1 > sd_2 + x_2$, τότε ο αλγόριθμος επιλέγει ως πραγματική την υποψήφια θέση που αντιστοιχεί στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” S_2 . Η επιλογή αυτή οφείλεται στο ότι ο συνδυασμός αυτός των πιθανών πραγματικών τιμών των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” είναι ακραίος, έτσι ώστε αν το **Sample** βρεθεί ότι είναι πλησιέστερο στην πραγματική τιμή του S_2 του συνδυασμού αυτού, τότε δεν μπορεί να υπάρξει άλλος συνδυασμός πιθανών πραγματικών τιμών των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, ο οποίος να αντιστρέφει αυτή την κατάσταση. Αντιθέτως, αν συγκρίναμε την απόσταση του **Sample** από έναν πιο ενδιάμεσο συνδυασμό πραγματικών πιθανών τιμών των S_1 και S_2 , και βρίσκαμε ότι το **Sample** είναι πλησιέστερο στην πραγματική τιμή του S_2 που υπαγορεύει ο συνδυασμός, τότε ο αλγόριθμος δεν θα θεωρούσε κατευθείαν την υποψήφια θέση που αντιστοιχεί στο S_2 ως πραγματική. Αυτό, γιατί ο αλγόριθμος δεν θα απέκλειε το ενδεχόμενο οι πραγματικές τιμές των S_1 και S_2 να είναι διαφορετικές από ότι στον συνδυασμό αυτόν, και έτσι δεν θα απέκλειε το ενδεχόμενο στην πραγματικότητα το **Sample** να πλησιάζει περισσότερο το πραγματικό “δαχτυλικό αποτύπωμα” της

υποψήφιας θέσης που αντιστοιχεί στην S_1 . Όμως, αν ακόμα και στον ευνοϊκότερο συνδυασμό, όπου ισχύει $sd_1' = sd_1 - x_1$ και $sd_2' = sd_2 + x_2$, το **Sample** εξακολουθεί να βρίσκεται πλησιέστερα στο πραγματικό “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποψήφιας θέσης που αντιστοιχεί στην S_2 , τότε, όπως αναφέραμε, δεν μπορεί να υπάρξει άλλος συνδυασμός πιθανών πραγματικών τιμών των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, ο οποίος να αντιστρέφει αυτή την κατάσταση, και έτσι ο αλγόριθμος υποχρεούται να επιλέξει ως πραγματική την υποψήφια θέση που αντιστοιχεί στο S_2 .

Δουλεύοντας κατά αντίστροφο τρόπο, και ακολουθώντας τους ίδιους συλλογισμούς, ο αλγόριθμος, εναλλακτικά, θα μπορούσε να συγκρίνει τις τετραγωνικές αποστάσεις στην οριακή περίπτωση που ισχύει $sd_1' = sd_1 + x_1$ και $sd_2' = sd_2 - x_2$, δηλαδή όταν η πραγματική τιμή του S_2 απέχει την ελάχιστη πιθανή απόστασή της από το **Sample**, ενώ η πραγματική τιμή του S_1 απέχει τη μέγιστη πιθανή απόστασή της από το **Sample**. Αν κατά τη σύγκριση του αλγόριθμου προκύψει ότι $sd_2 - x_2 > sd_1 + x_1$, τότε ο αλγόριθμος επιλέγει ως πραγματική υποψήφια θέση αυτή που αντιστοιχεί στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” S_1 .

Επομένως, ο αλγόριθμος εντοπισμού θέσης επιλέγει την υποψήφια θέση που αντιστοιχεί στο S_1 ως πραγματική, αν ισχύει:

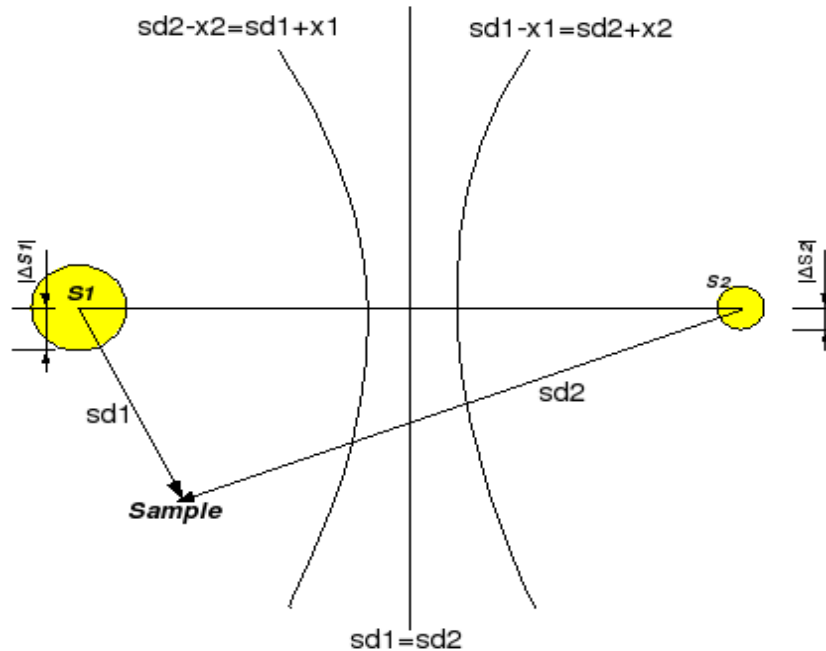
$$sd_1 - x_1 \leq sd_2 + x_2 \Rightarrow sd_1 - sd_2 \leq x, \text{ όπου } x = x_1 + x_2.$$

Επίσης, επιλέγει ως πραγματική την υποψήφια θέση που αντιστοιχεί στο S_2 , αν ισχύει:

$$sd_2 - x_2 \leq sd_1 + x_1 \Rightarrow sd_2 - sd_1 \leq x.$$

Έτσι, παρατηρούμε ότι το νέο κριτήριο του αλγόριθμου για την εκτίμηση μιας θέσης, είναι η σύγκριση της διαφοράς των τετραγωνικών αποστάσεων sd_1 και sd_2 από την τιμή της σταθεράς x . Επίσης, στο ΣΧΗΜΑ 5.19 απεικονίζεται η λειτουργία του αλγόριθμου εντοπισμού θέσης όταν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” S_1 και S_2 βρίσκονται στον διδιάστατο χώρο. Από την παρατήρηση του σχήματος προκύπτει ότι στον διανυσματικό χώρο υπάρχουν δύο οριακές καμπύλες, η $sd_1 - x_1 = sd_2 + x_2$ και η $sd_1 + x_1 = sd_2 - x_2$, το είδος των οποίων είναι υπερβολή [88]. Αν μελετούσαμε τη λειτουργία του αλγόριθμου με γραφικό τρόπο, τότε θα μπορούσαμε να πούμε ότι όταν ένα διάνυσμα **Sample** βρίσκεται αριστερά της καμπύλης: $sd_1 - x_1 = sd_2 + x_2$, ή πάνω σε αυτήν, τότε ο αλγόριθμος επιλέγει την υποψήφια θέση που αντιστοιχεί στο S_1 ως πραγματική, ενώ όταν ένα διάνυσμα **Sample** βρίσκεται δεξιά της καμπύλης: $sd_1 + x_1 = sd_2 - x_2$, ή πάνω σε αυτήν, τότε ο αλγόριθμος επιλέγει ως πραγματική

την υποψήφια θέση που αντιστοιχεί στο S_2 . Επίσης, παρατηρούμε ότι για το σύνολο των δειγματικών διανυσμάτων **Sample** που βρίσκονται ενδιάμεσα των δύο αυτών καμπυλών, ο αλγόριθμος θα μπορούσε να επιλέξει ως πραγματική οποιαδήποτε από τις δύο υποψήφιες θέσεις του απλοποιημένου συστήματος.



ΣΧΗΜΑ 5.19: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΟΤΑΝ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ ΤΟΥ ΤΑ ΜΕΤΡΑ ΤΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”.

Επομένως, λόγω του νέου τρόπου συμπεριφοράς του αλγόριθμου εντοπισμού θέσης, το κριτήριο ορθής εκτίμησης μιας θέσης δεν αντιπροσωπεύεται πλέον από τη σχέση: $A \leq B$, αλλά από τη σχέση: $A - B \leq x$. Η σχέση αυτή αποτελεί ένα ενδεχόμενο, η πιθανότητα του οποίου δίνει την πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης, όταν λαμβάνονται υπόψη τα μέτρα των σφαλμάτων των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, με τον τρόπο που εξηγήσαμε.

Το ενδεχόμενο αυτό αναλύεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 A - B \leq x &\Rightarrow \\
 \sum_{i=1}^N (\rho_i - r_i)^2 - \sum_{i=1}^N (\rho_i - s_i)^2 \leq x &\Rightarrow \\
 2 \sum_{i=1}^N \rho_i \beta_i + \sum_{i=1}^N \gamma_i - x \leq 0, & \quad (5.3)
 \end{aligned}$$

όπου: $\beta_i = s_i - r_i$ και $\gamma_i = r_i^2 - s_i^2$.

Η μεταβλητή $C_x = 2 \sum_{i=1}^N \rho_i \beta_i + \sum_{i=1}^N \gamma_i - x$ ακολουθεί κανονική κατανομή επειδή αποτελεί γραμμικό συνδυασμό των κανονικών μεταβλητών ρ_i . Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στο κεφάλαιο 4, οι κανονικές μεταβλητές ρ_i έχουν μέση τιμή r_i και τυπική απόκλιση σ . Από τις ιδιότητες της κανονικής κατανομής προκύπτει ότι η μέση τιμή της κανονικής κατανομής C_x είναι:

$$\mu_{C_x} = 2 \sum_{i=1}^N r_i \beta_i + \sum_{i=1}^N \gamma_i - x,$$

ενώ η τυπική της απόκλιση είναι:

$$\sigma_{C_x} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (2\beta_i \sigma)^2}.$$

Επομένως, εργαζόμενοι όπως στην απόδειξη του (4.8), καταλήγουμε στον εξής μαθηματικό τύπο, ο οποίος εκφράζει την πιθανότητα ορθής εκτίμησης μιας θέσης, σε ένα απλοποιημένο σύστημα δύο υπονηφίων θέσεων, όταν η σταθερά x αντιπροσωπεύει τα σφάλματα των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”:

$$Pr\{C_x \leq 0\} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(-\frac{\mu_{C_x}}{\sqrt{2}\sigma_{C_x}}\right). \quad (5.4)$$

5.7.3 ΠΙΘΑΝΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΑΠΟΦΑΣΗΣ

Η τιμή της σταθεράς x εκτιμάται από τον μελετητή του συστήματος. Ο μελετητής του συστήματος δεν

είναι σε θέση να γνωρίζει τις τιμές των σφαλμάτων στα υπολογισμένα “δαχτυλικά αποτυπώματα”. Αυτό όμως που θα ήταν εφικτό για τον μελετητή, είναι μία όσο το δυνατό καλύτερη πρόβλεψη των τιμών των μέτρων των σφαλμάτων, και κατ' επέκταση μία όσο το δυνατό πιο πετυχημένη επιλογή της σταθεράς x .

Όμως, αν η τιμή x που εκτιμάται από τον μελετητή του συστήματος διαφέρει από την πραγματική τιμή της, τότε η τιμή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης που υπολογίζεται από τον (5.4) θα διαφέρει από την πραγματική τιμή της, με αποτέλεσμα ο μελετητής να βγάζει λανθασμένα συμπεράσματα για την αξιοπιστία του συστήματος.

Επίσης, αν ο μελετητής του συστήματος γνωρίζει τις ακριβείς νέες τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, και όχι απλά τα μέτρα των τιμών των σφαλμάτων τους, τότε ο διανυσματικός χώρος χωρίζεται από μία μόνο οριακή καμπύλη. Όσο περισσότερο απέχει η καμπύλη αυτή από την αντίστοιχη οριακή καμπύλη απόφασης του αλγόριθμου που μελετήσαμε, τόσο περισσότερο απέχουν οι υπολογισμένες τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης των δύο περιπτώσεων, και συνεπώς μειώνεται η αξιοπιστία του συστήματος.

Γενικά, θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι όταν η τιμή $x=x_3$ που επιλέγουμε διαφέρει από την πραγματική τιμή $x=x_4$, τότε η αξιοπιστία της σχέσης (5.3) ως κριτήριο ορθότητας μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο ότι όταν το **Sample** βρεθεί μεταξύ των καμπυλών ($A-B=x_3$) και ($A-B=x_4$), τότε το κριτήριο ορθής εκτίμησης (5.3) για $x=x_3$ μπορεί να δίνει λανθασμένα αποτελέσματα, και έτσι παρουσιάζεται σφάλμα στον υπολογισμό της πιθανότητας ορθής εκτίμησης. Άλλωστε, και από τον (5.4), προκύπτει ότι η πιθανότητα ορθής εκτίμησης εξαρτάται από τη σταθερά x που επιλέγεται. Έτσι, αν ο μελετητής του συστήματος δεν εκτιμήσει επιτυχημένα τα σφάλματα των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, και συνεπώς δεν επιλέξει την κατάλληλη τιμή της x , τότε η τιμή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης που υπολογίζεται από τον (5.4) διαφέρει από την ορθή της τιμή. Επομένως, όσο πιο καλή εκτίμηση των σφαλμάτων των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” κάνει ο μελετητής του συστήματος, και όσο πιο πετυχημένη είναι η επιλογή της σταθεράς x , τόσο πιο αξιόπιστο είναι το κριτήριο ορθής εκτίμησης των θέσεων.

Επίσης, σύμφωνα με τη νέα συμπεριφορά του αλγόριθμου εντοπισμού που μελετήσαμε, υπάρχει μία περιοχή του διανυσματικού χώρου η οποία έχει ως οριακά σημεία αυτά για τα οποία ισχύουν $sd_1+x_1=sd_2-x_2$ και $sd_1-x_1=sd_2+x_2$. Αν το **Sample** βρεθεί μέσα στην περιοχή αυτή, τότε ο αλγόριθμος θα μπορούσε να επιλέξει οποιαδήποτε από τις δύο υποψήφιας θέσεις ως πραγματικές. Έτσι, υπάρχει ασάφεια σχετικά με τον αν η επιλογή της υποψήφιας θέσης ως πραγματική αντιστοιχεί

πράγματι σε πραγματική τιμή “δαχτυλικού αποτύπωματος” που είναι πλησιέστερο στο *Sample*. Επομένως, η πιθανότητα ορθής εκτίμησης που υπολογίζει ο (5.4) θα ήταν πιθανό να μην αντιπροσωπεύει την πραγματική πιθανότητα ορθής εκτίμησης του συστήματος.

Επίσης, όπως έχουμε πει, γίνεται η παραδοχή ότι η τιμή της x_1 που αντιστοιχεί σε μία υποψήφια θέση είναι σταθερή, ανεξαρτήτως της τιμής του *Sample* που συγκρίνεται με το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποψήφιας θέσης αυτής. Αυτή η παραδοχή είναι πιθανό να προσδίδει επιπρόσθετο σφάλμα στην πιθανότητα ορθής εκτίμησης που υπολογίζεται.

Όσες αναφορές σφαλμάτων της παραγράφου αυτής αναφέρονται στον διδιάστατο χώρο, θα μπορούσαν να γενικευτούν και σε διανυσματικούς χώρους μεγαλύτερων διαστάσεων.

5.7.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τις πιθανότητες ορθής εκτίμησης μιας θέσης, όπως προκύπτουν από την εφαρμογή του (5.4), για διάφορες τιμές της σταθεράς x . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.20, 5.21, 5.22 και 5.23.

Για την απόδοση των διαφόρων τιμών στη σταθερά x , υπολογίσαμε το μέσο όρο του A , υπολογίζοντας τη μέση τιμή των τετραγώνων των ευκλείδειων διανυσματικών αποστάσεων χιλίων τυχαίων δειγματικών διανυσμάτων μετρήσεων ισχύος από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης, η οποία υποθέσαμε ότι έχει συντεταγμένες (2,2). Τα τυχαία δειγματικά διανύσματα προέκυψαν από ειδική συνάρτηση του προγράμματος MATLAB, θεωρώντας ότι κάθε συνιστώσα ενός τυχαίου δειγματικού διανύσματος ακολουθεί κανονική κατανομή, με τυπική απόκλιση $\sigma = 2.13$ dBm, και ότι έχουν μέση τιμή ίση με το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης. Επίσης, θεωρήσαμε ότι ισχύουν $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm, $P_t = 15$ dBm, $\alpha = 3.3$ και $g = 1$ m, και από τον υπολογισμό του μέσου όρου η μέση τιμή του A προέκυψε ίση με: $A_m = 18.0904$ dBm².

Στη συνέχεια, οι διάφορες τιμές που αποδόθηκαν στη σταθερά x είναι οι εξής: $x = -\frac{1}{10} A_m$,

$$x = -\frac{1}{20} A_m, \quad x = -\frac{1}{50} A_m, \quad x = 0, \quad x = \frac{1}{50} A_m, \quad x = \frac{1}{20} A_m \quad \text{και} \quad x = \frac{1}{10} A_m.$$

Στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.20, 5.21, 5.22 και 5.23 απεικονίζονται οι τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης, όπως υπολογίζονται από τον (5.4), μέσω του προγράμματος MATLAB, για τις διάφορες τιμές της x

που αναφέραμε, θεωρώντας ότι ισχύουν $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm και $P_t = 15$ dBm, και για διάφορες τιμές των παραμέτρων σ , N , α και g , αντίστοιχα. Επίσης, για τους υπολογισμούς στο ΣΧΗΜΑ 5.20 θεωρήσαμε $\alpha=3.3$, $g=1$ m, και εκπομπή από τα ΣΠ1, ΣΠ2, ΣΠ3 και ΣΠ4, για το ΣΗΜΑ 5.21 θεωρήσαμε $\sigma=2.13$ dBm, $\alpha=3.3$ και $g=1$ m, για το ΣΧΗΜΑ 5.22 θεωρήσαμε $\sigma=2.13$ dBm, $g=1$ m, και εκπομπή από τα ΣΠ1, ΣΠ2, ΣΠ3 και ΣΠ4, ενώ για το ΣΧΗΜΑ 5.23 θεωρήσαμε $\sigma=2.13$ dBm, $\alpha=3.3$, και εκπομπή από τα ΣΠ1, ΣΠ2, ΣΠ3 και ΣΠ4.

Παρατηρώντας τα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.21, 5.22 και 5.23, επιβεβαιώνουμε ότι κάθε διαφορετική τιμή της σταθεράς x δίνει διαφορετικές τιμές στην πιθανότητα ορθής εκτίμησης, η οποία υπολογίζεται από τον (5.4). Όμως, όσο οι παράμετροι N , α ή g αυξάνονται, οι τιμές των πιθανοτήτων που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της x τείνουν να συγκλίνουν μεταξύ τους. Έτσι, για μεγάλες τιμές των N , α και g , αντίστοιχα, οι τιμές των πιθανοτήτων που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της x σχεδόν ταυτίζονται. Επίσης, στο ΣΧΗΜΑ 5.20 παρατηρούμε ότι, για όλες τις τιμές της τυπικής απόκλισης σ , οι τιμές των πιθανοτήτων που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της x διαφέρουν πολύ λίγο.

Επομένως, από τις παραπάνω παρατηρήσεις επαληθεύεται η άποψη που είχε αναφερθεί, ότι ο μελετητής του συστήματος αν δεν εκτιμήσει σωστά τα σφάλματα των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, και κατ’ επέκταση, αν δεν εκτιμήσει σωστά την αντίστοιχη σταθερά x , τότε οι πιθανότητες ορθής εκτίμησης που αναμένει είναι πιθανό να περιλαμβάνουν επιπρόσθετα σφάλματα, πέρα των αναμενόμενων σφαλμάτων λόγω μοντελοποίησης του συστήματος. Έτσι, ένα κριτήριο ορθής εκτίμησης που δεν προσεγγίζει με επιτυχία τη σταθερά x , είναι περισσότερο αναξιόπιστο.

Όμως, το συμπέρασμα, ότι όταν οι παράμετροι N , α ή g αυξάνονται, και ιδιαίτερα αν ξεπεράσουν κάποιες συγκεκριμένες τιμές, τότε οι διαφορετικές τιμές της σταθεράς x δεν επηρεάζουν σημαντικά την πιθανότητα ορθής εκτίμησης, είναι αρκετά σημαντικό. Αυτό, γιατί, για μεγαλύτερες τιμές των παραμέτρων αυτών, τα κριτήρια ορθής εκτίμησης τα οποία δεν εκτιμούν επιτυχώς τα σφάλματα των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, δεν επηρεάζουν αρνητικά τον υπολογισμό της πιθανότητας ορθής εκτίμησης. Έτσι, όταν οι τιμές των παραμέτρων είναι ευνοϊκές, ο μελετητής του συστήματος απαλλάσσεται από το επιπρόσθετο βάρος της ευθύνης για τη σωστή εκτίμηση των σφαλμάτων των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”. Επίσης, όταν οι τιμές των παραμέτρων είναι ευνοϊκές, ο μελετητής του συστήματος θα μπορούσε να αγνοεί τα σφάλματα των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, και έτσι να χρησιμοποιεί τον τύπο (4.8), ο οποίος θεωρεί ότι $x=0$.

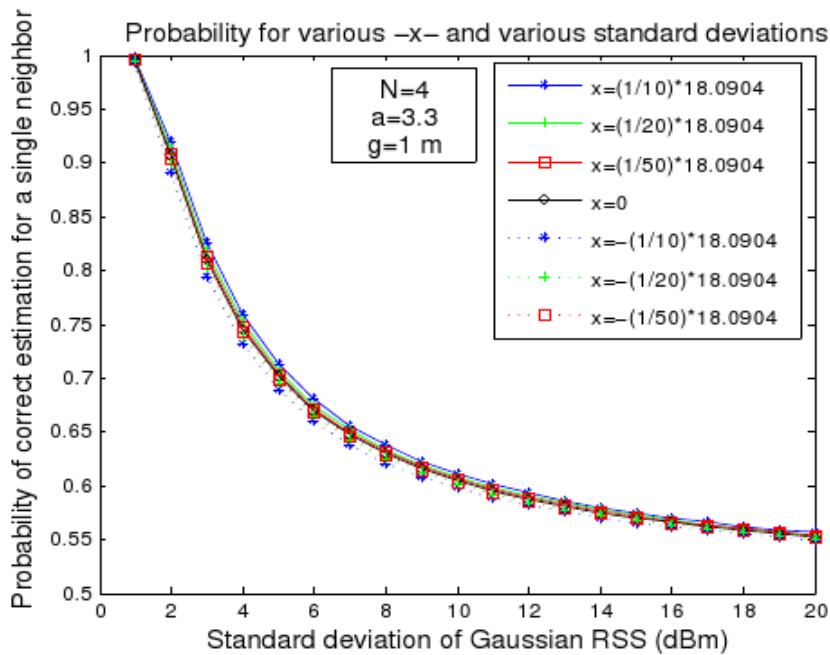
Μία πιθανή εξήγηση της σύγκλισης των πιθανοτήτων είναι η εξής. Όταν οι παράμετροι N , α ή g έχουν σχετικά μεγάλες τιμές, τότε τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” έχουν την τάση να διαχωρίζονται και

να απομακρύνονται μεταξύ τους. Επίσης, όπως περιγράψαμε προηγουμένως, αν ο μελετητής επιλέξει την τιμή $x=x_3$ αντί της σωστής τιμής που είναι $x=x_4$, τότε κοντά στην περιοχή των διανυσματικών τιμών όπου ισχύει: $A=B$, υπάρχουν σύνολα τιμών με ακραίες τιμές της μορφής $(A-B=x_3)$ και $(A-B=x_4)$, και όταν το **Sample** πάρει τιμές από τα σύνολα αυτά, τότε το κριτήριο ορθής εκτίμησης (5.3) είναι πιθανό να είναι λανθασμένο. Έτσι, αν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υποψήφιων θέσεων είναι περισσότερο απομακρυσμένα μεταξύ τους, τότε τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” απομακρύνονται από το κρίσιμο σύνολο που ευθύνεται για τα σφάλματα λόγω λανθασμένης εκτίμησης της x . Συνεπώς, τότε, μειώνεται η πιθανότητα ένα δειγματικό διάνυσμα τιμών **Sample** να πάρει τιμές από το κρίσιμο αυτό σύνολο τιμών, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι διαφορετικές τιμές της σταθεράς x να μην επηρεάζουν σημαντικά την τιμή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης.

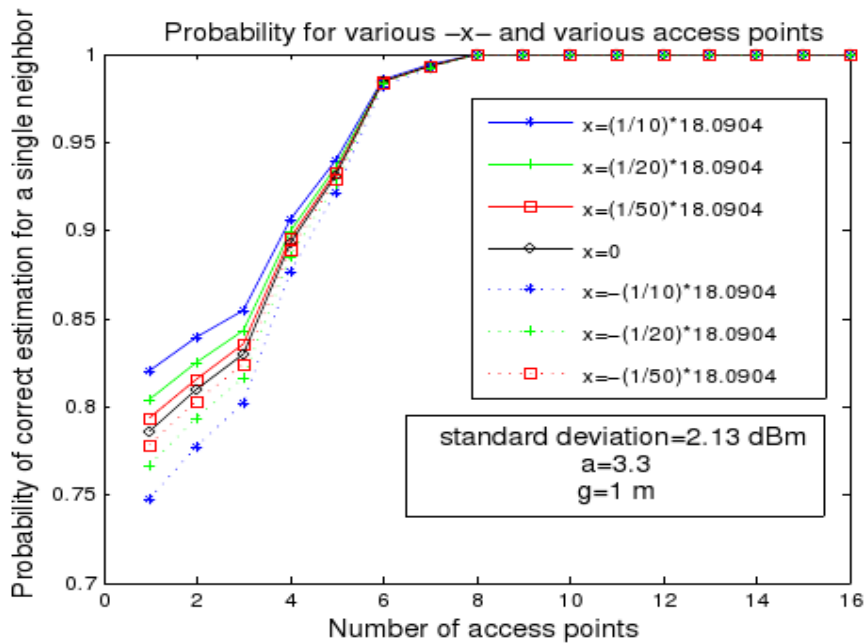
Επίσης, η σταθερότητα στις τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης, για όλες τις τιμές της σ , που παρατηρήσαμε στο ΣΧΗΜΑ 5.20, οφείλεται στο ότι οι συνθήκες που επικρατούσαν κατά τους υπολογισμούς ήταν τέτοιες, ώστε η πιθανότητα ένα δειγματικό διάνυσμα τιμών **Sample** να πάρει τιμές από το κρίσιμο σύνολο τιμών που αναφέραμε, ήταν μικρή.

Επιπλέον, αναφέρουμε ότι όταν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υποψήφιων θέσεων είναι αρκετά απομακρυσμένα μεταξύ τους, τότε απομακρύνονται από το σύνολο των **Sample** που περιβάλλεται από τις καμπύλες $sd_1+x_1=sd_2-x_2$ και $sd_1-x_1=sd_2+x_2$, το οποίο χαρακτηρίζεται από ασάφεια ως προς την αξιοπιστία της επιλογής των πραγματικών θέσεων, και έτσι η ακρίβεια του συστήματος βελτιώνεται.

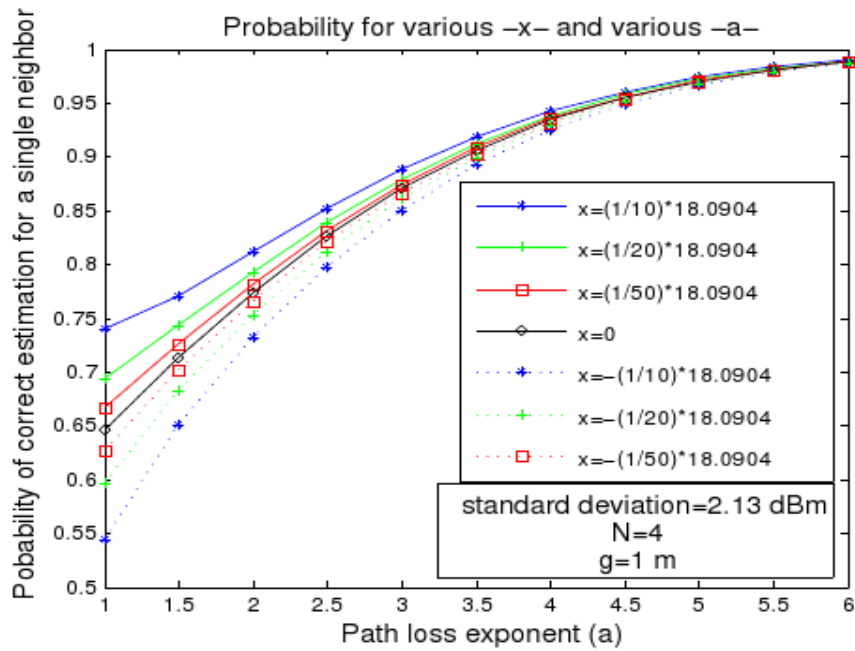
Τέλος, αναφέρουμε ότι όταν η σταθερά x έχει μεγάλη τιμή, τότε είναι λογικό η πιθανότητα ορθής εκτίμησης να διαφέρει αρκετά από τιμές πιθανοτήτων που αντιστοιχούν σε αρκετά μικρότερες τιμές της x , και είναι λογικό να αργεί πολύ να συγκλίνει με αυτές. Αυτό οφείλεται στο ότι, όταν η x είναι μεγάλη, τότε το κρίσιμο σύνολο τιμών των **Sample** είναι μεγάλο, και έτσι δεν είναι αρκετά απομακρυσμένο από τα “δαχτυλικά αποτυπώματα”. Συνεπώς, οι κατάλληλες παράμετροι του συστήματος χρειάζεται να μεταβληθούν αρκετά, έτσι ώστε τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” να απομακρυνθούν σημαντικά από το κρίσιμο σύνολο τιμών.



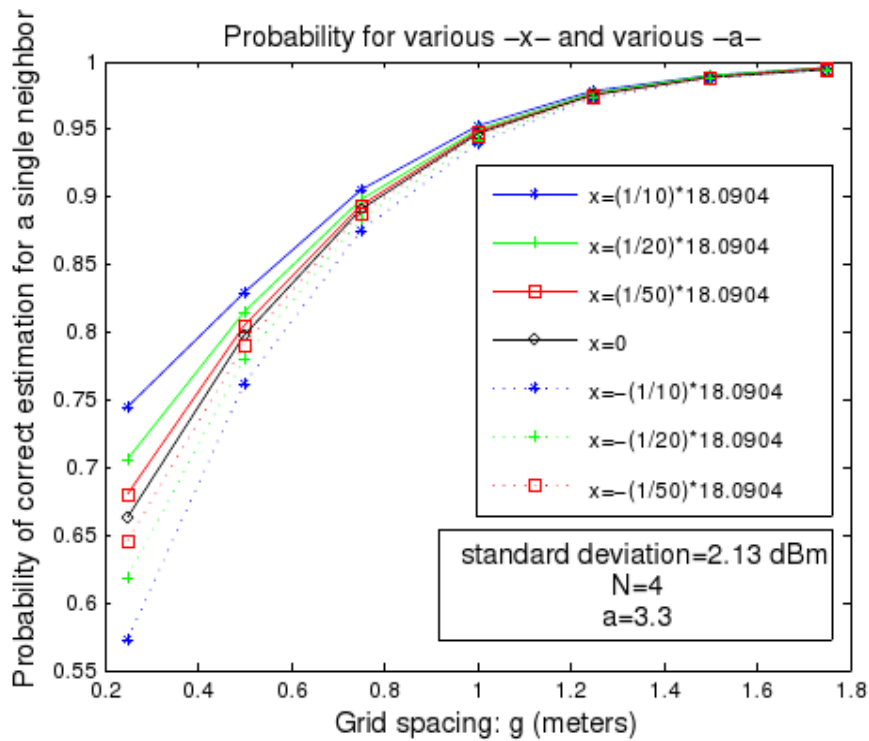
ΣΧΗΜΑ 5.20: Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΟΡΘΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ x ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ σ .



ΣΧΗΜΑ 5.21: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.20, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ N .



ΣΧΗΜΑ 5.22: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.20, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ α .



ΣΧΗΜΑ 5.23: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 5.20, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ g .

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΚΕΨΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο μοντελοποιημένο σύστημα εντοπισμού θέσης που μελετάμε, όσο πλησιέστερα είναι τα αποτελέσματα ενός αναλυτικού μαθηματικού τύπου στα απευθείας υπολογισμένα αποτελέσματα μέσω υπολογιστή, τόσο πιο αξιόπιστος είναι ο τύπος αυτός. Η εύρεση ενός αξιόπιστου, και όχι υπερβολικά πολύπλοκου, αναλυτικού μαθηματικού τύπου θα ήταν ιδιαίτερος χρήσιμη, γιατί θα προσέφερε ένα θεωρητικό και αναλυτικό μέσο εξαγωγής ποσοτικών πληροφοριών για το σύστημα, χωρίς την ανάγκη εξάρτησης από την πολυπλοκότητα του αλγόριθμου και από τις δυνατότητες επεξεργασίας του υπολογιστή. Από τη στιγμή που, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εύρεση της από κοινού συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των μεταβλητών C_k είναι πολύ δύσκολη και πολύπλοκη, θα μπορούσε να γίνει προσπάθεια εύρεσης εναλλακτικών αξιόπιστων αναλυτικών μαθηματικών τύπων, οι οποίοι θα είναι πιο αξιόπιστοι από τους (4.8) και (4.10).

Μία προσπάθεια σε αυτή την κατεύθυνση θα ήταν η τροποποίηση του τύπου (4.10), ο οποίος κάνει την παραδοχή της ανεξαρτησίας των μεταβλητών C_k , έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη κατά τις συγκρίσεις οι καταλληλότερες υποψήφιες θέσεις, και όχι όλες, με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων όσο το δυνατό πλησιέστερα σε αυτά της απευθείας προσομοίωσης στον υπολογιστή. Άλλωστε, οι παρατηρήσεις των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 5.11, 5.12 και 5.13 μας προϊδεάζουν ότι μία ενδιαμέση εφαρμογή του (4.10), η οποία δεν θα λάμβανε υπόψη ούτε μία μόνο υποψήφια θέση, όπως ο (4.8), ούτε όμως όλες, αλλά κάποιο ενδιαμέσο αριθμό τους, πιθανότατα θα έδινε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, αναλύονται αυτές οι σκέψεις σχετικά με τη βελτιστοποίηση του αναλυτικού μαθηματικού μοντέλου, και μελετάται κάτω από ποιες συνθήκες θα μπορούσε να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση αυτή.

6.2 ΜΕΛΕΤΗ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.10) ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ, ΟΤΑΝ ΑΥΤΕΣ ΕΠΙΛΕΓΟΝΤΑΙ ΜΕ ΣΕΙΡΑ ΑΥΞΟΥΣΑΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΤΟ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ” ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΣΗΣ

Ο αναλυτικός μαθηματικός τύπος (4.10): $Pr\{Correct\ Estimation\} = \prod_{j=1}^K Pr\{C_j \leq 0\}$ αποτελείται από

ένα γινόμενο K όρων: $Pr\{C_j \leq 0\} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(-\frac{\mu_{C_j}}{\sqrt{2}\sigma_{C_j}}\right)$. Κάθε ένας όρος $Pr\{C_j \leq 0\}$, για $j = 1, \dots, K$,

είναι ο (4.8), όταν αυτός συγκρίνει την απόσταση ενός δειγματικού διανύσματος τιμών από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης, με την απόσταση του δειγματικού διανύσματος τιμών από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της j -στής υποψήφιας θέσης, η οποία είναι διάφορη της πραγματικής. Ο τύπος (4.10), όπως έχει αναφερθεί, είναι προσεγγιστικός, επειδή θεωρεί ότι οι μεταβλητές C_j είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Επίσης, θεωρεί ότι γίνονται συγκρίσεις για τις αποστάσεις των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” όλων των υποψήφιων θέσεων του συστήματος εντοπισμού. Επομένως, στον (4.10), σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, ισχύει: $K=K_{max}$, όπου K_{max} είναι το σύνολο όλων των υποψήφιων θέσεων του συστήματος, πλην της υποψήφιας θέσης που θεωρείται ότι είναι η πραγματική. Όμως, ο (4.10) θα μπορούσε να εφαρμοστεί και όταν η τιμή της παραμέτρου K , η οποία εκφράζει τον αριθμό των διάφορων της πραγματικής υποψήφιων θέσεων που λαμβάνει υπόψη του ο (4.10) για τις συγκρίσεις, είναι μικρότερη από K_{max} . Στη συνέχεια, θα διερευνήσουμε πώς μεταβάλλεται η πιθανότητα που υπολογίζει ο (4.10) λόγω μεταβολής του αριθμού K των υποψήφιων θέσεων που λαμβάνει υπόψη του, όταν κάθε φορά ο αριθμός K αφορά τις K θέσεις με τα πλησιέστερα στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης “δαχτυλικά αποτυπώματα”.

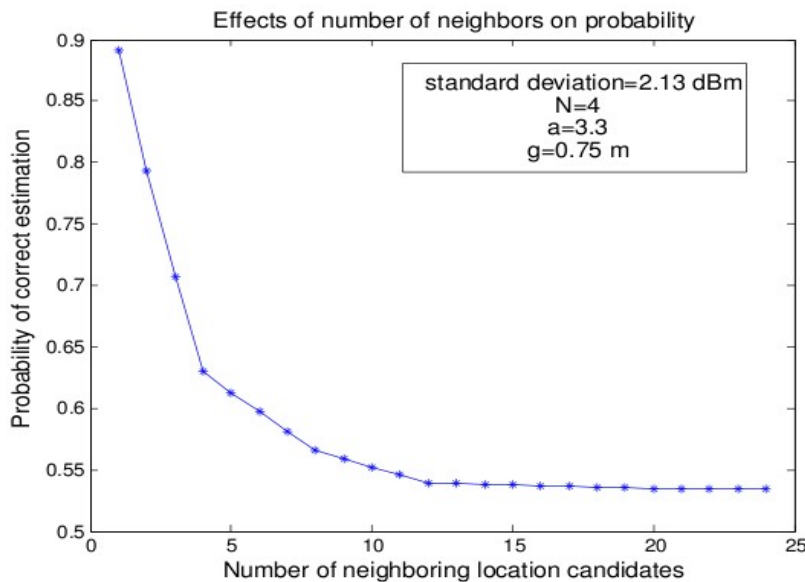
Στο σύστημα διαστάσεων 4 m x 4 m που μελετάμε, όταν το διάστημα πλέγματος είναι $g=0.75$ m, ισχύει $K_{max}=24$. Σε αυτή την περίπτωση, όταν ισχύουν $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm, $P_t = 15$ dBm, $\alpha=3.3$, οι συντεταγμένες της υποτιθέμενης πραγματικής θέσης είναι (2, 2), και εκπέμπουν τα ΣΠ1, ΣΠ2, ΣΠ3 και ΣΠ4, τότε η σειρά ταξινόμησης των 24 υποψήφιων θέσεων, σύμφωνα με την οποία μία υποψήφια θέση προηγείται πάντα μίας υποψήφιας θέσης της οποίας το “δαχτυλικό αποτύπωμα” απέχει από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης μεγαλύτερη απόσταση, παρουσιάζεται στον ΠΙΝΑΚΑ 6.1. Τα αποτελέσματα του ΠΙΝΑΚΑ 6.1 προήλθαν από προγραμματισμό σε περιβάλλον MATLAB ενός κατάλληλου αλγορίθμου. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, για κάθε μία από τις 24 υποψήφιες θέσεις, υπολογίστηκε το τετράγωνο $|S-R|^2$ της ευκλείδειας διανυσματικής απόστασης του “δαχτυλικού αποτυπώματός” της S από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” R της πραγματικής θέσης, και στη συνέχεια όλες οι αποστάσεις ταξινομήθηκαν με σειρά αύξουσα, από τη μικρότερη ως τη μεγαλύτερη απόσταση. Οι υποψήφιες θέσεις στις οποίες αντιστοιχούσαν ίσες αποστάσεις, ταξινομήθηκαν με τυχαία σειρά.

Αν ισχύουν οι ίδιες συνθήκες που ίσχυαν κατά το σχηματισμό του ΠΙΝΑΚΑ 6.1, και επιπλέον αν

ισχύει $\sigma=2.13$ dBm, τότε προκύπτει το ΣΧΗΜΑ 6.1. Το σχήμα αυτό παρουσιάζει τις τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης που υπολογίζει ο (4.10), όταν η παράμετρος του K αυξάνεται διαδοχικά κατά ένα, μέχρι να γίνει ίση με K_{max} . Επιπλέον, κάθε τιμή της παραμέτρου K αφορά τις πρώτες K υποψήφιες θέσεις που ορίζει η σειρά προτεραιότητας του ΠΙΝΑΚΑ 6.1. Για παράδειγμα, όταν ισχύει $K=3$, τότε οι μεταβλητές C_j του (4.10) αντιστοιχούν στις υποψήφιες θέσεις με συντεταγμένες (2, 1.25), (1.25, 2) και (2.75, 2), οι οποίες στον ΠΙΝΑΚΑ 6.1 έχουν προτεραιότητα 1, 2 και 3 αντίστοιχα.

Από το ΣΧΗΜΑ 6.1 παρατηρούμε ότι όταν η τιμή της παραμέτρου K ξεπεράσει την τιμή 4, τότε η πιθανότητα που υπολογίζει ο (4.10) μειώνεται λιγότερο απότομα, ενώ για τιμές της παραμέτρου K μεγαλύτερες ή ίσες του 12, η υπολογισμένη πιθανότητα σχεδόν σταθεροποιείται.

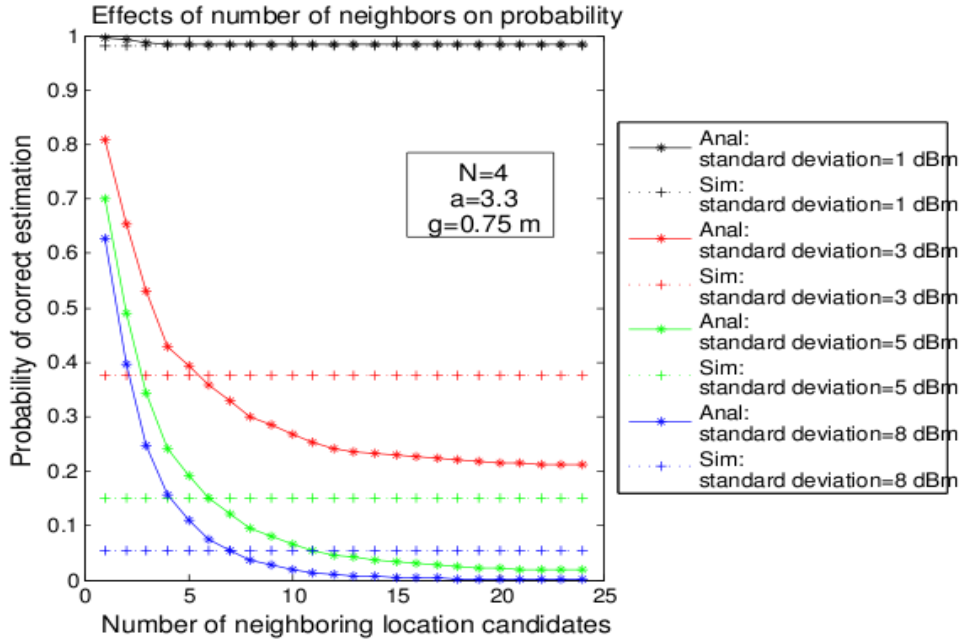
Επομένως, ο τύπος (4.10) φαίνεται ότι δεν χρειάζεται να λαμβάνει υπόψη του όλες τις υποψήφιες θέσεις του συστήματος, αλλά αρκεί να λαμβάνει υπόψη όσες χρειάζεται μέχρι η υπολογισμένη πιθανότητα να σταθεροποιηθεί. Όμως, η τιμή της παραμέτρου K που σταθεροποιεί την πιθανότητα που υπολογίζει ο (4.10), δεν σημαίνει ότι είναι και η τιμή κατά την οποία τα αποτελέσματα του (4.10) πλησιάζουν ικανοποιητικά τα αποτελέσματα των απευθείας υπολογισμών μέσω προσομοίωσης στον υπολογιστή.



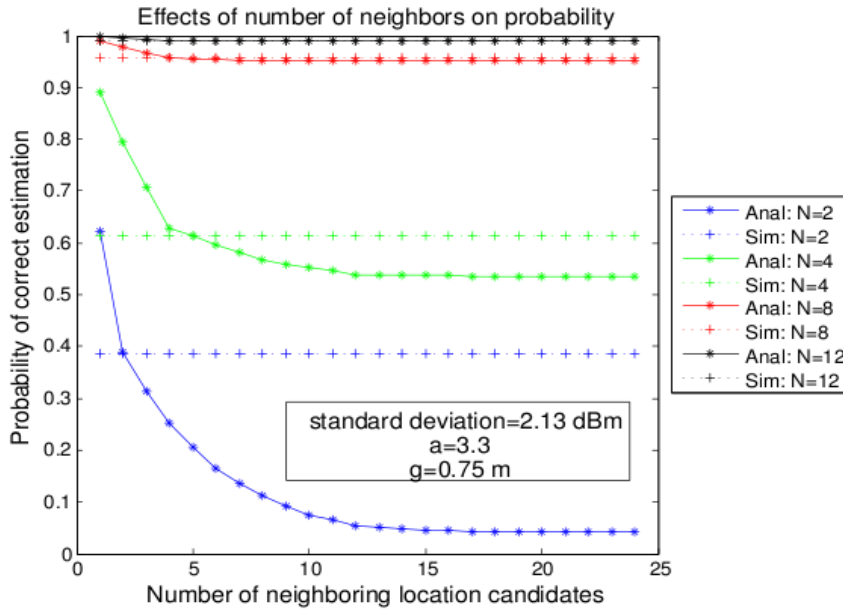
ΣΧΗΜΑ 6.1: Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ (4.10) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ. ΟΙ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ ΜΕ ΣΕΙΡΑ ΑΥΞΟΥΣΑΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΑΥΤΟ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΣΗΣ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΜΕ ΣΕΙΡΑ ΑΥΞΟΥΣΑΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΑΥΤΟ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΣΗΣ, ΟΤΑΝ ΙΣΧΥΕΙ $g=0.75 m$.

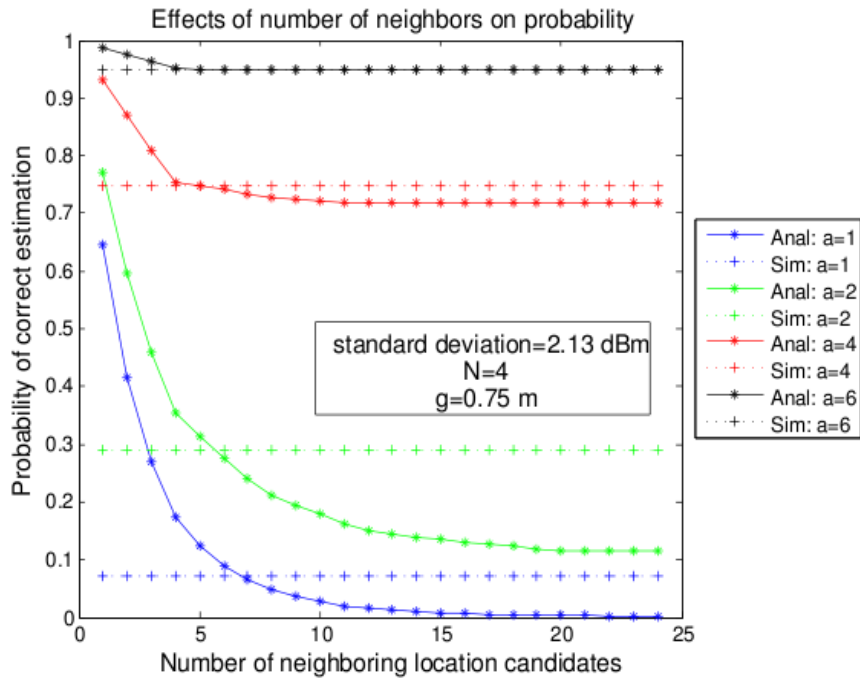
Συντεταγμένες υποψήφιας θέσης	$ S - R ^2$ (dBm^2)	Αύξουσα σειρά απόστασης από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της (2,2)
(2, 1.25)	27.4945	1
(2, 0.5)	92.6624	9
(1.25, 2)	27.4945	2
(1.25, 1.25)	67.9811	5
(1.25, 0.5)	170.7719	13
(0.5, 2)	92.6624	10
(0.5, 1.25)	170.7719	14
(0.5, 0.5)	479.5159	21
(2.75, 2)	27.4945	3
(2.75, 1.25)	67.9811	6
(2.75, 0.5)	170.7719	15
(3.5, 2)	92.6624	11
(3.5, 1.25)	170.7719	16
(3.5, 0.5)	479.5159	22
(2, 2.75)	27.4945	4
(2, 3.5)	92.6624	12
(2.75, 2.75)	67.9811	7
(2.75, 3.5)	170.7719	17
(3.5, 2.75)	170.7719	18
(3.5, 3.5)	479.5159	23
(1.25, 2.75)	67.9811	8
(1.25, 3.5)	170.7719	19
(0.5, 2.75)	170.7719	20
(0.5, 3.5)	479.5159	24



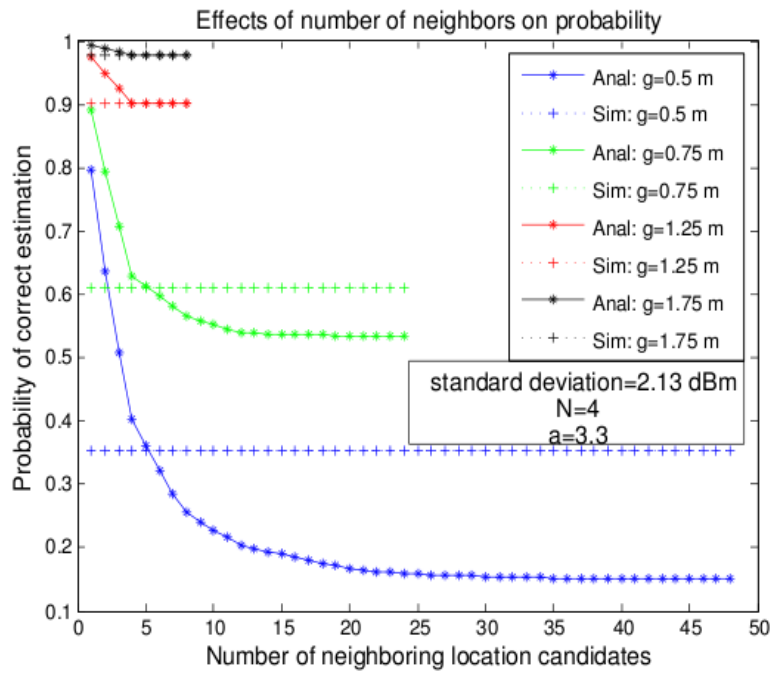
ΣΧΗΜΑ 6.2: Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΠΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΙ Ο (4.10) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ σ , ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ. ΟΙ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΥΠΟΨΗ ΜΕ ΣΕΙΡΑ ΑΥΞΟΥΣΑΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ” ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΑΥΤΟ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΣΗΣ.



ΣΧΗΜΑ 6.3: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.2, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ N .



ΣΧΗΜΑ 6.4: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.2, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ α .



ΣΧΗΜΑ 6.5: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.2, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ g .

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ K , ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ σ , N , α και g .

σ (dBm)	N	α	g (meters)	Βέλτιστο K
1	4	3.3	0.75	4
3	4	3.3	0.75	5
5	4	3.3	0.75	6
8	4	3.3	0.75	7
2.13	2	3.3	0.75	2
2.13	4	3.3	0.75	5
2.13	8	3.3	0.75	4
2.13	12	3.3	0.75	4
2.13	4	1	0.75	7
2.13	4	2	0.75	6
2.13	4	4	0.75	5
2.13	4	6	0.75	4
2.13	4	3.3	0.5	5
2.13	4	3.3	0.75	5
2.13	4	3.3	1.25	4
2.13	4	3.3	1.75	4

Στα επόμενα σχήματα, θα μελετηθεί για ποιες τιμές του K τα αποτελέσματα του (4.10) προσεγγίζουν τα απευθείας αποτελέσματα που προκύπτουν χωρίς τη μεσολάβηση κάποιου αναλυτικού τύπου, όταν οι τιμές K αφορούν υποψήφιες θέσεις που επιλέγονται με σειρά αύξουσας απόστασης των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” τους από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης.

Μία εξήγηση της παρατήρησης ότι από ένα σημείο και μετά, όσο και να αυξάνεται η παράμετρος K , η πιθανότητα που υπολογίζει ο (4.10) σχεδόν σταθεροποιείται, είναι η εξής. Όταν επιλέγονται συνεχώς όλο και περισσότερες υποψήφιες θέσεις για τις συγκρίσεις του (4.10), με σειρά αύξουσας απόστασης των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” τους από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης, τότε, από ένα σημείο και μετά, οι υποψήφιες θέσεις που επιλέγονται αρχίζουν να έχουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” αρκετά απομακρυσμένα από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποτιθέμενης πραγματικής θέσης. Έτσι, οι υποψήφιες θέσεις με αρκετά απομακρυσμένα “δαχτυλικά αποτυπώματα” έχουν πολύ μικρές πιθανότητες να θεωρηθούν εσφαλμένα ως οι πραγματικές, με αποτέλεσμα η

συμβολή τους στον αναλυτικό μαθηματικό υπολογισμό της πιθανότητας ορθής εκτίμησης μέσω του (4.10) να είναι σχεδόν ασήμαντη.

Στα ΣΧΗΜΑΤΑ 6.2, 6.3, 6.4 και 6.5, απεικονίζονται καμπύλες που εκφράζουν την πιθανότητα ορθής εκτίμησης που υπολογίζεται από τον (4.10), συναρτήσει του αριθμού K των διαφόρων της πραγματικής υποψήφιων θέσεων που λαμβάνει υπόψη του. Σε κάθε καμπύλη, οι υποψήφιες θέσεις επιλέγονται προοδευτικά με σειρά αύξουσας απόστασης των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” τους από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης, και συνεπώς κάθε τιμή K αφορά τις K υποψήφιες θέσεις με τις μικρότερες αποστάσεις των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” τους από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης. Κάθε καμπύλη της πιθανότητας του αναλυτικού (analytical) μαθηματικού τύπου (4.10) ως προς την παράμετρο K , συγκρίνεται με την τιμή της πιθανότητας ορθής εκτίμησης που προκύπτει από απευθείας προσομοίωση (simulation) στον υπολογιστή, η οποία αντιστοιχεί στις ίδιες ακριβώς τιμές των παραμέτρων $L(d_0)$, P_t , σ , N , α και g . Ο απευθείας υπολογισμός της πιθανότητας, χωρίς τη μεσολάβηση αναλυτικού τύπου, είναι ανεξάρτητος της παραμέτρου K του (4.10), και επομένως οι καμπύλες των απευθείας υπολογισμών μέσω υπολογιστή των πιθανοτήτων στα σχήματα αυτά είναι σταθερές.

Τα ΣΧΗΜΑΤΑ 6.2, 6.3, 6.4 και 6.5 συγκρίνουν διάφορες καμπύλες της πιθανότητας που υπολογίζει ο (4.10) με τις αντίστοιχες τιμές πιθανότητας που προκύπτουν από την απευθείας προσομοίωση, για $\sigma=1, 3, 5$ και 8 dBm, για $N=2, 4, 8$ και 12 , για $\alpha=1, 2, 4$ και 6 , και για $g=0.5, 0.75, 1.25$ και 1.75 m, αντίστοιχα. Όλοι οι υπολογισμοί των σχημάτων πραγματοποιήθηκαν μέσω αλγόριθμων σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, ενώ κατά τους υπολογισμούς ίσχυε $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm και $P_t = 15$ dBm. Επίσης, κατά τους υπολογισμούς, στο ΣΧΗΜΑ 6.2 ίσχυε $N=4$, $\alpha=3.3$ και $g=0.75$ m, στο ΣΧΗΜΑ 6.3 ίσχυε $\sigma=2.13$ dBm, $\alpha=3.3$ και $g=0.75$ m, στο ΣΧΗΜΑ 6.4 ίσχυε $\sigma=2.13$ dBm, $N=4$ και $g=0.75$ m, και στο ΣΧΗΜΑ 6.5 ίσχυε $\sigma=2.13$ dBm, $N=4$ και $\alpha=3.3$. Τα σημεία πρόσβασης επιλέγονταν με αύξουσα σειρά απόστασης, ακριβώς όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Από την προσεκτική μελέτη όλων των καμπύλων των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 6.2, 6.3, 6.4 και 6.5 προέκυψε ο ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2. Ο ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2 καταγράφει τις βέλτιστες τιμές της παραμέτρου K για όλους τους συνδυασμούς των παραμέτρων σ , N , α και g που εμφανίστηκαν στα ΣΧΗΜΑΤΑ 6.2, 6.3, 6.4 και 6.5. Σε κάθε συνδυασμό τιμών των παραμέτρων σ , N , α και g , η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου K αντιπροσωπεύει την τιμή K για την οποία η αντίστοιχη καμπύλη της πιθανότητας που προκύπτει από τον (4.10), και η αντίστοιχη τιμή της πιθανότητας που προκύπτει από απευθείας προσομοίωση στον υπολογιστή, συγκλίνουν περισσότερο από κάθε άλλη τιμή της παραμέτρου K . Σε περιπτώσεις όπου

διαδοχικές τιμές του K δίνουν την ίδια σύγκλιση, τότε στον πίνακα καταγράφηκε ως βέλτιστη η ελάχιστη από αυτές τιμή του K .

Από τον ΠΙΝΑΚΑ 6.2 παρατηρούμε ότι, αν και σε αρκετές περιπτώσεις οι παράμετροι σ , N , α ή g μεταβάλλονται έντονα, η βέλτιστες τιμές της παραμέτρου K συνήθως μεταβάλλονται σε ένα αρκετά περιορισμένο εύρος τιμών. Συγκεκριμένα, για τις συνολικές μεταβολές των παραμέτρων σ , N , α και g του πίνακα, οι βέλτιστες τιμές της παραμέτρου K κυμαίνονται κυρίως στο διάστημα από 4 ως 7. Μοναδική εξαίρεση φαίνεται να είναι η περίπτωση όπου, όταν ισχύουν $\sigma=2.13$ dBm, $\alpha=3.3$, $N=2$ και $g=0.75$ m, τότε η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου K καταγράφεται ίση με 2.

Όμως, στην περίπτωση που ισχύει $g=0.75$ m, το διάστημα μεταβολής των βέλτιστων τιμών K φαίνεται να είναι πολύ περιορισμένο σε σχέση με τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η παράμετρος K , η οποία είναι $K_{max}=24$. Αν και τα πειραματικά δεδομένα είναι περιορισμένα για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, η τελευταία διαπίστωση μας δίνει την υποψία πως, αν το διάστημα πλέγματος παίρνει μικρές τιμές, τότε, λόγω μεγάλης τιμής της K_{max} , για διάφορες μεταβολές των παραμέτρων σ , N και α , η βέλτιστη τιμή K μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά σταθερή. Αυτό, γιατί η πραγματική βέλτιστη τιμή δεν θα απέχει πολύ από τη σταθερά θεωρούμενη ως βέλτιστη τιμή της K , και συνεπώς η πιθανότητα που υπολογίζει ο (4.10) θα εξακολουθεί να συγκλίνει σε μεγάλο βαθμό με την πιθανότητα που προκύπτει από την απευθείας προσομοίωση στον υπολογιστή.

Όμως, από το ΣΧΗΜΑ 6.5 παρατηρούμε ότι, όταν οι τιμές της απόστασης πλέγματος είναι μεγάλες, τότε όταν μεταβάλλεται η τιμή της παραμέτρου K , οι μεταβολές της πιθανότητας που υπολογίζεται από τον (4.10) είναι σχετικά μικρές. Έτσι, το συμπέρασμα αυτό μας δίνει την υποψία ότι, ακόμα και στην περίπτωση που το διάστημα πλέγματος παίρνει μεγάλες τιμές, η βέλτιστη τιμή της K μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά σταθερή, για διάφορες μεταβολές των παραμέτρων σ , N και α . Αυτό οφείλεται στο ότι, όσο και να απέχει η πραγματική βέλτιστη τιμή από τη σταθερά θεωρούμενη ως βέλτιστη τιμή της K , η πιθανότητα που υπολογίζει ο (4.10) θα εξακολουθεί να συγκλίνει ικανοποιητικά με την πιθανότητα που προκύπτει από την απευθείας προσομοίωση στον υπολογιστή, αφού οι μεταβολές της πιθανότητας που υπολογίζει ο (4.10), λόγω μεταβολών της παραμέτρου K , δεν είναι πολύ μεγάλες.

Επίσης, από το ΣΧΗΜΑ 6.5 και από τον ΠΙΝΑΚΑ 6.2, είναι εμφανές ότι ακόμα και αν το διάστημα πλέγματος μεταβάλλεται σημαντικά, οι βέλτιστες τιμές K μεταβάλλονται πολύ λίγο. Επομένως, θα μπορούσαμε να υποπτευόμαστε ότι η προσεγγιστικά σταθερή βέλτιστη τιμή K , που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο μήκος διαστήματος πλέγματος, θα μπορούσε να θεωρηθεί προσεγγιστικά σταθερή και

για άλλες τιμές διαστήματος πλέγματος. Έτσι, αν επαληθευτεί με πλήρη επάρκεια δεδομένων το συμπέρασμα αυτό, τότε ο μελετητής θα έχει τη δυνατότητα να επιλέγει αρχικά μία κατάλληλη τιμή της παραμέτρου K ως βέλτιστη για τον τύπο (4.10), και στη συνέχεια να υπολογίζει τις πιθανότητες μέσω του (4.10), χρησιμοποιώντας πάντα την ίδια βέλτιστη τιμή K , για οποιεσδήποτε τιμές των παραμέτρων σ , N , α και g , παίρνοντας αποτελέσματα που συγκλίνουν ικανοποιητικά στις πιθανότητες που υπολογίζονται με απευθείας προσομοίωση στον υπολογιστή. Όμως, τονίζουμε ότι τα συμπεράσματα αυτά δεν έχουν αποδειχθεί με επάρκεια πειραματικών δεδομένων, και συνεπώς θα μπορούσαν να αμφισβητηθούν. Όμως, δίνουν μία καλή διαισθητική εικόνα του πώς θα μπορούσε ο προσεγγιστικός αναλυτικός μαθηματικός τύπος να γίνει πιο αξιόπιστος.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση που προκύπτει από τα ΣΧΗΜΑΤΑ 6.2, 6.3, 6.4 και 6.5 είναι ότι, όταν οι τιμές των παραμέτρων είναι ευνοϊκές για την αξιοπιστία του συστήματος, δηλαδή όταν οι παράμετρος σ παίρνει μικρές τιμές ή όταν οι παράμετροι N , α ή g παίρνουν μεγάλες τιμές, τότε η πιθανότητα που υπολογίζει ο (4.10) σταθεροποιείται πολύ πρόωρα, για μικρές τιμές της K . Επίσης, στις καμπύλες που αντιστοιχούν σε ευνοϊκές τιμές των παραμέτρων, οι μεταβολές τους, λόγω μεταβολής της παραμέτρου K , είναι σχετικά μικρές. Έτσι, στις περιπτώσεις αυτές, όπου οι μεταβολές της πιθανότητας είναι σχετικά μικρές, παρατηρείται ότι όταν ισχύει $K=1$, δηλαδή όταν εφαρμόζεται ο (4.8), αλλά και όταν ισχύει $K=K_{max}$, τότε η υπολογισμένη τιμή της πιθανότητας μέσω αναλυτικού μαθηματικού τύπου, και η υπολογισμένη πιθανότητα μέσω απευθείας προσομοίωσης στον υπολογιστή, τείνουν να συγκλίνουν. Και η παρατήρηση αυτή επαληθεύει τα προηγούμενα συμπεράσματά μας στην παράγραφο 5.4, σχετικά με την τάση για σύγκλιση όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για την αξιοπιστία του συστήματος.

Για να μπορέσουν να αιτιολογηθούν οι παραπάνω παρατηρήσεις, θα ήταν πιο βολικό να γίνουν πρώτα κάποιοι ορισμοί. Η πιθανότητα που υπολογίζει ο (4.10), αν θεωρηθεί συνάρτηση της παραμέτρου K , συμβολίζεται ως: $P(K)$. Η πιθανότητα που προκύπτει από απευθείας προσομοίωση στον υπολογιστή συμβολίζεται ως: $P_{correct}$. Επίσης, θα μπορούσαμε να ορίσουμε τη μεταβλητή: $\Delta 1 = P(K) - P(K_{max})$, που εκφράζει τη διαφορά στην πιθανότητα που υπολογίζει ο (4.10) όταν λαμβάνει υπόψη του K διάφορες της πραγματικής υποψήφιας θέσεις και όταν τις λαμβάνει υπόψη του όλες, και θα μπορούσαμε να ορίσουμε τη σταθερά: $\Delta 2 = P_{correct} - P(K_{max})$, που εκφράζει το σφάλμα της $P(K_{max})$ λόγω της παραδοχής της ανεξαρτησίας των μεταβλητών C_j .

Στην ιδανική περίπτωση, ο μελετητής του συστήματος θα ήθελε, όταν υπολογίζει την πιθανότητα ορθής εκτίμησης μέσω του (4.10), να ισχύει:

$$P(K) = P_{\text{correct}}.$$

Αναλύοντας τη σχέση αυτή, προκύπτει:

$$P(K) = P_{\text{correct}} \Rightarrow$$

$$P(K) - P(K_{\max}) = P_{\text{correct}} - P(K_{\max}) \Rightarrow$$

$$\Delta 1 = \Delta 2.$$

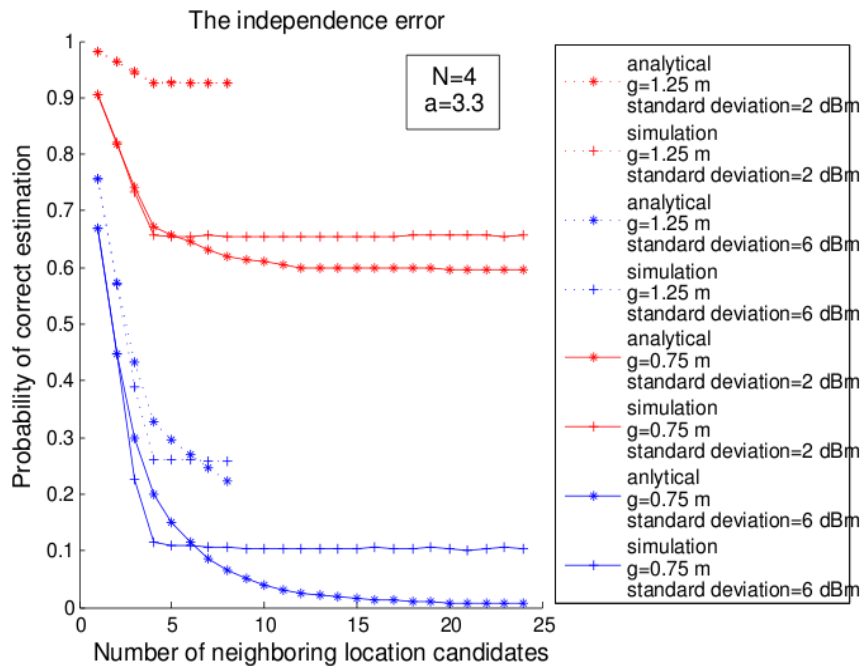
Επομένως, προκύπτει ότι για να προσεγγίζει ο τύπος (4.10) τις απευθείας υπολογισμένες πιθανότητες, θα πρέπει η μεταβλητή $\Delta 1$ να προσεγγίζει τη σταθερά $\Delta 2$.

Η μεταβλητή $\Delta 1$ μειώνεται καθώς η παράμετρος K αυξάνεται. Όμως, για σταθερή τιμή της παραμέτρου K , το μέγεθος της μεταβλητής $\Delta 1$ εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα. Δηλαδή, όταν η παράμετρος σ είναι μικρή, ή όταν οι παράμετροι N , α ή g είναι μεγάλες, τότε μειώνεται η πιθανότητα να πλησιάσει ένα δειγματικό διάνυσμα τιμών ισχύος το “δαχτυλικό αποτύπωμα” μιας υποψήφιας θέσης που δεν είναι η πραγματική, και συνεπώς αρκεί ένας μικρός αριθμός από γειτονικές υποψήφιες θέσεις να ληφθεί υπόψη για τις συγκρίσεις του (4.10). Έτσι, σε αυτές τις περιπτώσεις, όπως επιβεβαιώνεται και στα ΣΧΗΜΑΤΑ 6.2, 6.3, 6.4 και 6.5, η πιθανότητα που υπολογίζει ο (4.10) σταθεροποιείται γρήγορα, οι μεταβολές είναι σχετικά μικρές, και συνεπώς η μεταβλητή $\Delta 1$ παίρνει μικρές τιμές. Αντιθέτως, όταν η παράμετρος σ είναι μεγάλη, ή όταν οι παράμετροι N , α ή g είναι μικρές, αυξάνεται η πιθανότητα να πλησιάσει ένα δειγματικό διάνυσμα τιμών ισχύος το “δαχτυλικό αποτύπωμα” μιας υποψήφιας θέσης που δεν είναι η πραγματική, και έτσι ο (4.10) απαιτείται να λάβει υπόψη για τις συγκρίσεις του περισσότερες υποψήφιες θέσεις. Τότε, η μεταβλητή $\Delta 1$ παίρνει μεγάλες τιμές.

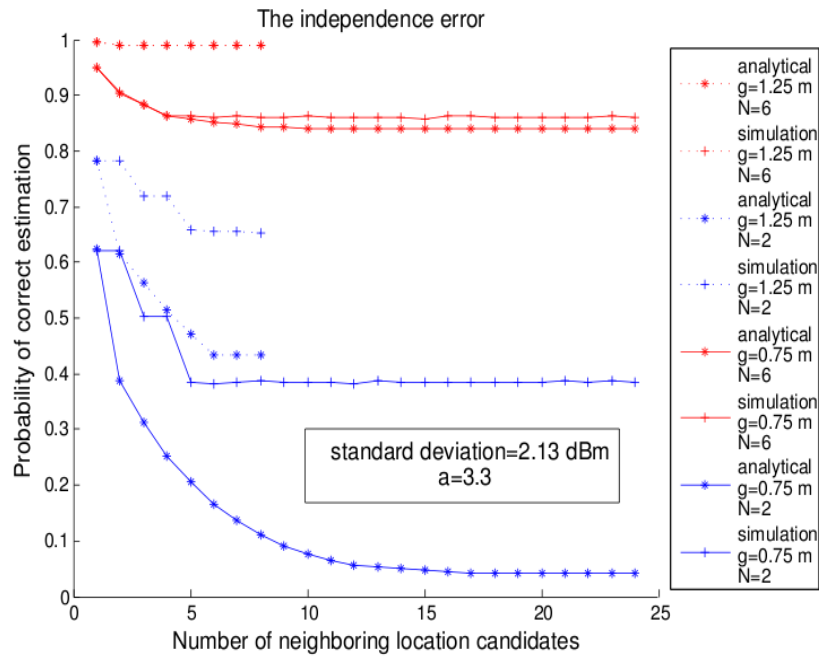
Η σταθερά $\Delta 2$ εκφράζει το σφάλμα του (4.10) λόγω της παραδοχής της ανεξαρτησίας των μεταβλητών C_j , όταν λαμβάνονται υπόψη όλες οι υποψήφιες θέσεις. Θα ήταν εξαιρετικά ενδιαφέρονσα η διερεύνηση των παραγόντων από τους οποίους εξαρτάται το σφάλμα λόγω παραδοχής ανεξαρτησίας των μεταβλητών C_j του (4.10), για διάφορες τιμές της παραμέτρου K . Κατ' επέκταση, τα συμπεράσματα από μία τέτοια μελέτη θα ήταν χρήσιμα και για τη διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη σταθερά $\Delta 2$, αφού αυτή αποτελεί υποπερίπτωση του σφάλματος λόγω παραδοχής ανεξαρτησίας, για $K = K_{\max}$.

Στα ΣΧΗΜΑΤΑ 6.6, 6.7 και 6.8 απεικονίζονται καμπύλες που εκφράζουν την πιθανότητα που υπολογίζει ο αναλυτικός (analytical) μαθηματικός τύπος (4.10) συναρτήσει του αριθμού K των διαφόρων της πραγματικής υποψήφιων θέσεων που λαμβάνει υπόψη. Σε κάθε καμπύλη του (4.10), και για τις ίδιες ακριβώς τιμές των παραμέτρων σ , N , α και g που την αντιπροσωπεύουν,

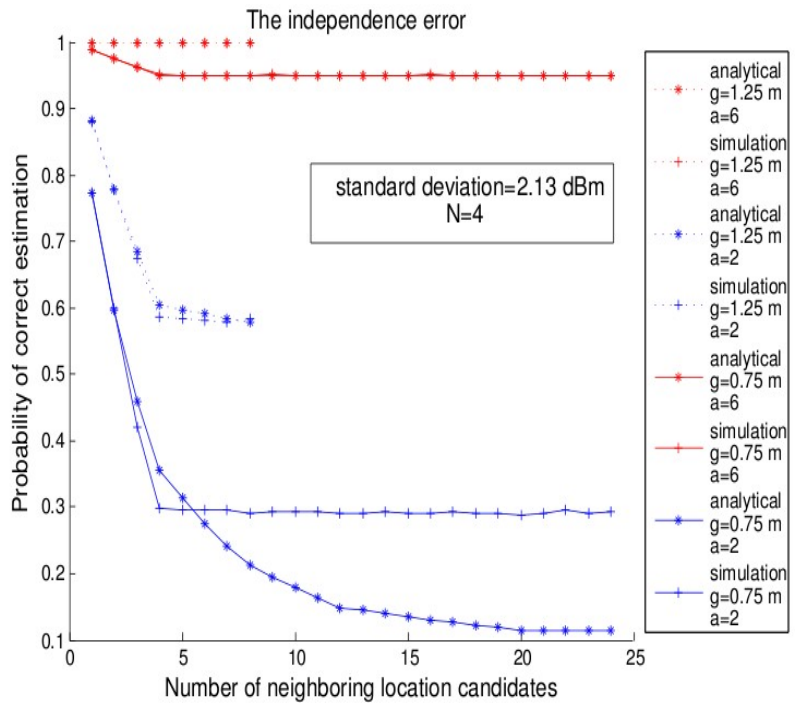
αντιστοιχίζεται μία καμπύλη που εκφράζει την πιθανότητα που υπολογίζεται λόγω απευθείας προσομοίωσης (simulation) στον υπολογιστή συναρτήσει της παραμέτρου K . Δηλαδή, σε κάθε καμπύλη που αφορά την απευθείας προσομοίωση, δεν λαμβάνονται υπόψη μόνο όλες οι υποψήφιες θέσεις, αλλά ο απευθείας υπολογισμός της πιθανότητας λαμβάνει υπόψη του για τις συγκρίσεις του κάθε φορά διαφορετικό αριθμό από υποψήφιες θέσεις. Έτσι, η πιθανότητα που προκύπτει από την απευθείας προσομοίωση στον υπολογιστή, παρουσιάζεται σαν συνάρτηση της παραμέτρου K . Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, οι τιμές K αφορούν υποψήφιες θέσεις που επιλέγονται με σειρά αύξουσας απόστασης των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” τους από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης. Η σύγκριση δύο καμπύλων που αντιστοιχούν στις ίδιες τιμές των παραμέτρων του συστήματος, οι οποίες είναι συναρτήσεις του K και εκφράζουν την τιμή της πιθανότητας που υπολογίζεται με και χωρίς τη χρήση αναλυτικού μαθηματικού τύπου, μας βοηθά να μελετήσουμε το σφάλμα λόγω παραδοχής ανεξαρτησίας των μεταβλητών C_j , και να διερευνήσουμε τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται.



ΣΧΗΜΑ 6.6: ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΤΟΥ (4.10) ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΠΑΡΑΔΟΧΗΣ ΤΗΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑΣ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ g ΚΑΙ σ .



ΣΧΗΜΑ 6.7: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.6, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ g ΚΑΙ N .



ΣΧΗΜΑ 6.8: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.6, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ g ΚΑΙ α

Όλοι οι υπολογισμοί των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 6.6, 6.7 και 6.8 προέκυψαν μέσω προγραμματισμού στο MATLAB, ενώ κατά τους υπολογισμούς ίσχυε $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm και $P_t = 15$ dBm. Επίσης, κατά τους υπολογισμούς, στο ΣΧΗΜΑ 6.6 ίσχυε $g=0.75$ m και $g=1.25$ m, $\sigma=2$ dBm και $\sigma=6$ dBm, $N=4$ και $\alpha=3.3$. Στο ΣΧΗΜΑ 6.7 ίσχυε $g=0.75$ m και $g=1.25$ m, $N=2$ και $N=6$, $\sigma=2.13$ dBm και $\alpha=3.3$. Επίσης, το ΣΧΗΜΑ 6.8 ίσχυε $g=0.75$ m και $g=1.25$ m, $\alpha=2$ και $\alpha=6$, $\sigma=2.13$ dBm και $N=4$. Τα σημεία πρόσβασης επιλέγονταν με αύξουσα σειρά, ακριβώς όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Από τα ΣΧΗΜΑΤΑ 6.6, 6.7 και 6.8 παρατηρούμε ότι, όποιες συνθήκες και να επικρατούν στο σύστημα, όταν ο αριθμός των γειτονικών υποψήφιων θέσεων που λαμβάνονται υπόψη είναι μικρός, τότε το σφάλμα λόγω της παραδοχής της ανεξαρτησίας του (4.10) είναι αισθητά μικρό. Όσο όμως αυξάνονται οι υποψήφιες θέσεις που λαμβάνονται υπόψη, τόσο το σφάλμα αρχίζει να αυξάνεται. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο ότι το σφάλμα λόγω ανεξαρτησίας δρα στο συνολικό σφάλμα του (4.10) προσθετικά, όσο αυξάνονται οι μεταβλητές C_j που λαμβάνονται υπόψη, οι οποίες λανθασμένα θεωρούνται ανεξάρτητες. Όμως, από ένα σημείο και μετά, όσο και να αυξάνεται η παράμετρος K , το σφάλμα του (4.10) παραμένει σχεδόν σταθερό. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται από το ότι, από ένα σημείο και μετά, οι υποψήφιες θέσεις που επιλέγονται αρχίζουν να έχουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” αρκετά απομακρυσμένα από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της υποτιθέμενης πραγματικής θέσης, με αποτέλεσμα να συμβάλλουν ελάχιστα στο σφάλμα λόγω παραδοχής ανεξαρτησίας του (4.10).

Επίσης, από τα ΣΧΗΜΑΤΑ 6.6, 6.7 και 6.8 παρατηρούμε ότι, αν η τιμή της παραμέτρου K είναι σταθερή, τότε, όταν μειώνεται η τιμή της παραμέτρου σ , ή όταν αυξάνεται η τιμή των παραμέτρων N , α ή g , το σφάλμα λόγω της παραδοχής της ανεξαρτησίας των μεταβλητών C_j μειώνεται. Επομένως, και η σταθερά $\Delta 2$ μειώνεται όταν μειώνεται η τιμή της παραμέτρου σ , ή όταν αυξάνεται η τιμή των παραμέτρων N , α ή g , και αντιστρόφως.

Επιπλέον, μία ακόμα ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι όταν το μήκος του διαστήματος πλέγματος είναι μεγάλο, τότε, λόγω της μικρής τιμής της K_{max} , το σφάλμα του (4.10), το οποίο αυξάνεται με την αύξηση της παραμέτρου K , δεν προλαβαίνει να αυξηθεί πολύ, και έτσι καταλήγει σε μικρότερες τιμές. Έτσι, από την παρατήρηση αυτή προκύπτει ότι, όταν η παράμετρος g έχει μεγάλη τιμή, τότε η σταθερά $\Delta 2$, η οποία αποτελεί μία οριακή περίπτωση του σφάλματος του (4.10) για $K = K_{max}$, παίρνει μικρά επίπεδα τιμών. Δηλαδή, αν το διάστημα πλέγματος έχει μεγάλο μήκος, τότε, ακόμα και αν η σταθερά $\Delta 2$ αυξάνεται λόγω αύξησης της σ , ή λόγω μείωσης της N ή της α , η τιμή της $\Delta 2$ εξακολουθεί να είναι σχετικά χαμηλή.

Στη συνέχεια, θα επιχειρήσουμε να εξηγήσουμε με μαθηματικό τρόπο την προηγούμενη παρατήρηση, σύμφωνα με την οποία όταν μεταβάλλονται οι παράμετροι σ , N , α ή g , τότε η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου K του (4.10) μεταβάλλεται συνήθως μέσα σε ένα περιορισμένο εύρος τιμών. Η τάση αυτή μπορεί να εξηγηθεί ως εξής. Έστω ότι η βέλτιστη τιμή K είναι γνωστή. Όταν η τιμή της παραμέτρου σ μειώνεται, ή αυξάνονται οι τιμές των παραμέτρων N , α ή g , τότε, όπως έχουμε πει, η μεταβλητή $\Delta 1$ μειώνεται. Έτσι, ακολούθως, θα περιμέναμε η παράμετρος K να απομακρυνθεί από τη βέλτιστη τιμή της, αφού δεν θα ισχύει πλέον $\Delta 1 = \Delta 2$. Όμως, όπως επίσης έχει αναφερθεί, παράλληλα με τη μεταβλητή $\Delta 1$, μειώνεται και η σταθερά $\Delta 2$. Επομένως, μετά από τη μεταβολή κάποιας παραμέτρου σ , N , α ή g , με τον τρόπο που εξετάζουμε, οι $\Delta 1$ και $\Delta 2$ εξακολουθούν να μη διαφέρουν πολύ. Επομένως, θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι ισχύει προσεγγιστικά: $\Delta 1 \approx \Delta 2$, και συνεπώς: $P(K) \approx P_{correct}$. Έτσι, αν ισχύει η σχέση αυτή, τότε μπορούμε να πούμε ότι η τιμή της παραμέτρου K δεν απέχει πολύ από τη βέλτιστη τιμή, μετά τη μεταβολή. Ομοίως, όταν η τιμή της παραμέτρου σ αυξάνεται, ή μειώνονται οι τιμές των παραμέτρων N , α ή g , τότε αυξάνεται και η $\Delta 1$ και η $\Delta 2$, με αποτέλεσμα, μετά τη μεταβολή, η τιμή της K να μην απέχει πολύ σημαντικά από τη βέλτιστη τιμή της.

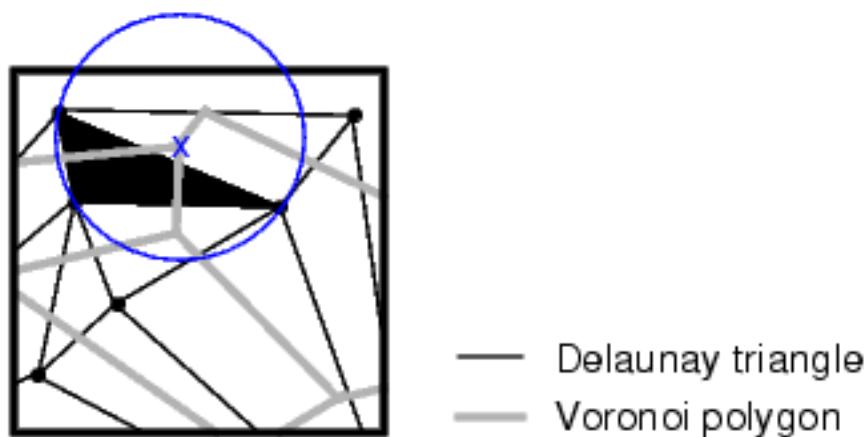
6.3 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ (4.10) ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΕΝΑΝ ΓΡΑΦΟ ΕΓΓΥΤΗΤΑΣ

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, όταν στον (4.10) λαμβάνονται υπόψη υποψήφιας θέσεις οι οποίες έχουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” που είναι αρκετά απομακρυσμένα από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης, τότε η τιμή της πιθανότητας που υπολογίζει μεταβάλλεται ελάχιστα. Επίσης, έχουμε παρατηρήσει ότι αν ο (4.10) δεν λάβει υπόψη όλες τις υποψήφιας θέσεις του συστήματος, αλλά χρησιμοποιήσει για τις συγκρίσεις του έναν κατάλληλο αριθμό από αυτές, τότε η υπολογισμένη πιθανότητα προσεγγίζει ικανοποιητικά την τιμή της πιθανότητας που υπολογίζεται μέσω απευθείας προσομοίωσης στον υπολογιστή. Επομένως, σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης, υπάρχουν κάποιες υποψήφιας θέσεις οι οποίες είναι σαφώς σημαντικότερες από τις άλλες για τις κατάλληλες συγκρίσεις του υπολογισμού της πιθανότητας ορθής εκτίμησης, αφού εξασφαλίζουν την επιθυμητή ακρίβεια. Μέχρι στιγμής, επιχειρήθηκε να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός υποψήφιας θέσεων, λαμβάνοντάς τις υπόψη διαδοχικά, με σειρά αύξουσας απόστασης των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” τους από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης. Στη συνέχεια, θα επιχειρήσουμε να εντοπίσουμε τις σημαντικότερες υποψήφιας θέσεις για τις απαραίτητες συγκρίσεις του υπολογισμού της πιθανότητας ορθής εκτίμησης, με έναν εναλλακτικό τρόπο, χρησιμοποιώντας έναν γράφο εγγύτητας (proximity

graph) [85].

Ένας γράφος εγγύτητας δρα σε ένα σύνολο σημείων του διανυσματικού χώρου, και έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει τα γειτονικά σημεία κάθε ενός σημείου του συνόλου, σύμφωνα με μία δική του λογική. Δηλαδή, κάθε γράφος εγγύτητας χρησιμοποιεί δικά του κριτήρια για να αποφασίσει αν δύο σημεία του διανυσματικού χώρου είναι γειτονικά, ή όχι. Τρία γνωστά είδη γράφων εγγύτητας είναι ο γράφος Delaunay, ο γράφος Gabriel, και ο γράφος σχετικής γειννίαςσης (Relative Neighborhood Graph: RNG) [85], [89]. Ένας γράφος εγγύτητας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στον N-διάστατο χώρο όπου ανήκουν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υποψήφιων θέσεων, με σκοπό να υποδείξει τα γειτονικά “δαχτυλικά αποτυπώματα” κάθε ενός “δαχτυλικού αποτυπώματος”, όπως αυτός κρίνει. Τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” που ο γράφος θεωρεί ότι είναι γειτονικά στο “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης, αναμένουμε να είναι τα σημαντικότερα για τον καθορισμό μιας αξιόπιστης τιμής της πιθανότητας ορθής εκτίμησης. Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιήσουμε τον γράφο Delaunay, θα λάβουμε υπόψη στον (4.10) μόνο τις γειτονικές υποψήφιες θέσεις που υποδεικνύει ο γράφος αυτός, και θα μελετήσουμε την αξιοπιστία των τιμών της πιθανότητας ορθής εκτίμησης που υπολογίζονται μέσω του τύπου.

Ο γράφος Delaunay μπορεί να σχηματιστεί με τη βοήθεια του διαγράμματος Voronoi. Στο ΣΧΗΜΑ 6.9 εξηγείται ο τρόπος σχηματισμού του γράφου Delaunay, όταν εκπέμπουν δύο σημεία πρόσβασης και συνεπώς ο διανυσματικός χώρος μελέτης είναι διδιάστατος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα αυτό, ο



ΣΧΗΜΑ 6.9: ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΓΡΑΦΟΥ DELAUNAY ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ VORONOI

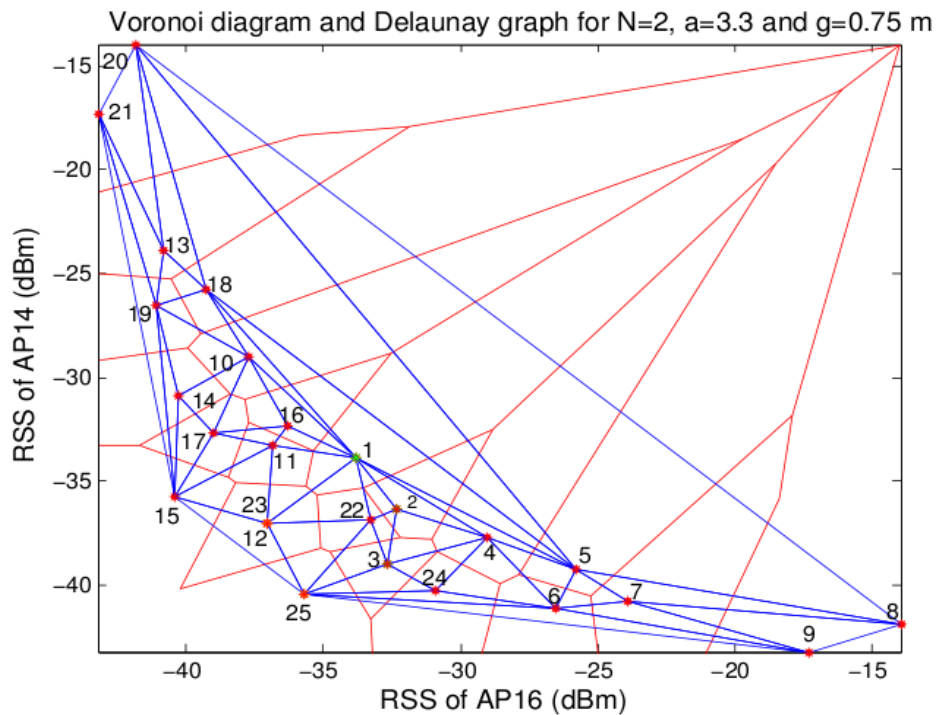
γράφος Delaunay χωρίζει τον διανυσματικό χώρο σε τρίγωνα, οι περιγεγραμμένοι κύκλοι των οποίων έχουν κέντρα τις κορυφές του διαγράμματος Voronoi. Οι κορυφές των τριγώνων είναι “δαχτυλικά αποτυπώματα” του διδιάστατου χώρου. Έτσι, δύο σημεία του διανυσματικού χώρου συνδέονται μεταξύ τους στον γράφο Delaunay, αν μοιράζονται το ίδιο σύνορο στο διάγραμμα Voronoi. Με παρόμοιο τρόπο, ο γράφος Delaunay θα μπορούσε να κατασκευαστεί με τη βοήθεια του διαγράμματος Voronoi, σε διανυσματικό χώρο οποιωνδήποτε διαστάσεων. Επίσης, δύο διανυσματικά σημεία που συνδέονται μεταξύ τους με κοινή ακμή του γράφου, θεωρούνται από τον γράφο ότι είναι γειτονικά. Έτσι, τα γειτονικά σημεία ενός διανυσματικού σημείου είναι όσα διανυσματικά σημεία συνδέονται μέσω ακμής με το διανυσματικό σημείο αυτό.

Στο σύστημα εντοπισμού θέσης που μελετάμε, χρησιμοποιήσαμε ειδική συνάρτηση του προγράμματος MATLAB, με σκοπό να εφαρμόσουμε τον γράφο Delaunay στα “δαχτυλικά αποτυπώματα”, και να ενημερωθούμε σχετικά με το ποια “δαχτυλικά αποτυπώματα” προκύπτουν από το γράφο ότι είναι γειτονικά του “δαχτυλικού αποτυπώματος” της υποτιθέμενης πραγματικής θέσης. Έτσι, θεωρώντας ότι ισχύει $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm, $P_t = 15$ dBm, $\alpha=3.3$, $g=0.75$ m, και θεωρώντας ότι εκπέμπουν τα σημεία πρόσβασης ΣΠ14 (AP14) και ΣΠ16 (AP16), προέκυψε το ΣΧΗΜΑ 6.10. Στο ΣΧΗΜΑ 6.10, τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υποψήφιων θέσεων του συστήματος συνδέονται μεταξύ τους μέσω του γράφου Delaunay. Επίσης, στο σχήμα αυτό απεικονίζεται και το διάγραμμα Voronoi. Σε κάθε “δαχτυλικό αποτύπωμα” του σχήματος αντιστοιχεί ένας αριθμός, ο οποίος αντιστοιχίζεται με τις συντεταγμένες μίας υποψήφιας θέσης. Όλες οι αντιστοιχίσεις των αριθμών των “δαχτυλικών αποτυπώματων” με τις αντίστοιχες συντεταγμένες των υποψήφιων θέσεων καταγράφονται στον ΠΙΝΑΚΑ 6.3.

Από το ΣΧΗΜΑ 6.10, και με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ 6.3, παρατηρούμε ότι, σύμφωνα με τον γράφο Delaunay, τα γειτονικά “δαχτυλικά αποτυπώματα” του “δαχτυλικού αποτυπώματος” που αντιστοιχεί στην υποψήφια θέση (2,2), είναι τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” που αντιστοιχούν στις υποψήφιες θέσεις με συντεταγμένες (2, 1.25), (1.25, 2), (1.25, 1.25), (2.75, 2), (2.75, 1.25), (2, 2.75), (2.75, 2.75), (1.25, 2.75) και (1.25, 3.5). Τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” των υποψήφιων αυτών θέσεων θεωρούνται από τον γράφο ότι είναι γειτονικά του “δαχτυλικού αποτυπώματος” της (2,2), επειδή κάθε ένα από αυτά συνδέεται μέσω ακμής του γράφου Delaunay με το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της (2,2).

Στη συνέχεια, θα επιχειρούμε να συμπεριλαμβάνουμε στον (4.10) μόνο όποιες υποψήφιες θέσεις θεωρούνται από τον γράφο Delaunay ότι έχουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” γειτονικά αυτού της πραγματικής θέσης. Δηλαδή, κάθε μεταβλητή C_j του (4.10) θα αντιστοιχεί σε σύγκριση της

απόστασης του δειγματικού διανύσματος τιμών από το “δαχτυλικό αποτύπωμα” της πραγματικής θέσης, με την απόσταση του δειγματικού διανύσματος τιμών από ένα “δαχτυλικό αποτύπωμα” που ο γράφος Delaunay το θεωρεί γειτονικό αυτού της πραγματικής θέσης.



ΣΧΗΜΑ 6.10: ΓΡΑΦΟΣ DELAUNAY ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ VORONOI ΟΤΑΝ ΙΣΧΥΟΥΝ $N=2$, $\alpha=3.3$ ΚΑΙ $g=0.75$ m.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3: ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΙΣ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΟΥΣ ΑΥΞΩΝΤΕΣ ΑΡΙΘΜΟΥΣ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.10.

Αύξων αριθμός υποψήφιας θέσης του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 6.10	Συντεταγμένες υποψήφιας θέσης
1	(2, 2)
2	(2, 1.25)
3	(2, 0.5)
4	(1.25, 2)
5	(1.25, 1.25)
6	(1.25, 0.50)
7	(0.5, 2)
8	(0.5, 1.25)
9	(0.5, 0.5)
10	(2.75, 2)
11	(2.75, 1.25)
12	(2.75, 0.5)
13	(3.5, 2)
14	(3.5, 1.25)
15	(3.5, 0.5)
16	(2, 2.75)
17	(2, 3.5)
18	(2.75, 2.75)
19	(2.75, 3.5)
20	(3.5, 2.75)
21	(3.5, 3.5)
22	(1.25, 2.75)
23	(1.25, 3.5)
24	(0.5, 2.75)
25	(0.5, 3.5)

Σε κάθε ένα από τα ΣΧΗΜΑΤΑ 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 και 6.18 συγκρίνονται οι τιμές της πιθανότητας ορθής εκτίμησης συναρτήσει της τυπικής απόκλισης σ , όταν αυτές υπολογίζονται

μέσω του τύπου (4.8), μέσω του τύπου (4.10), λαμβάνοντας υπόψη όλες τις υποψήφιες θέσεις, μέσω του τύπου (4.10), λαμβάνοντας υπόψη μόνο όσες υποψήφιες θέσεις ορίζει ο γράφος Delaunay ότι έχουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” γειτονικά σε αυτό της πραγματικής θέσης, και μέσω απευθείας προσομοίωσης (simulation) στον υπολογιστή. Επίσης, κατά τους υπολογισμούς, οι οποίοι εκτελέστηκαν στο πρόγραμμα MATLAB, θεωρήσαμε ότι ισχύει $d_0 = 1$ m, $L(d_0) = 37.3$ dBm, $P_t = 15$ dBm, ενώ η πραγματική θέση θεωρήσαμε ότι είναι η (2,2) και βρίσκεται στο κέντρο του τετραγωνικού πλέγματος. Σε κάθε σχήμα, ο συνδυασμός των τιμών των παραμέτρων N , α και g είναι διαφορετικός. Δηλαδή, η παράμετρος N μπορεί να είναι 2 ή 4, η παράμετρος α μπορεί να είναι 1 ή 3.3, και η παράμετρος g μπορεί να είναι 0.75 ή 1.25 m. Επιπλέον, όταν ισχύει $N=2$ εκπέμπουν τα σημεία πρόσβασης ΣΠ14 και ΣΠ16, ενώ όταν ισχύει $N=4$ εκπέμπουν τα σημεία πρόσβασης ΣΠ1, ΣΠ2, ΣΠ3 και ΣΠ4.

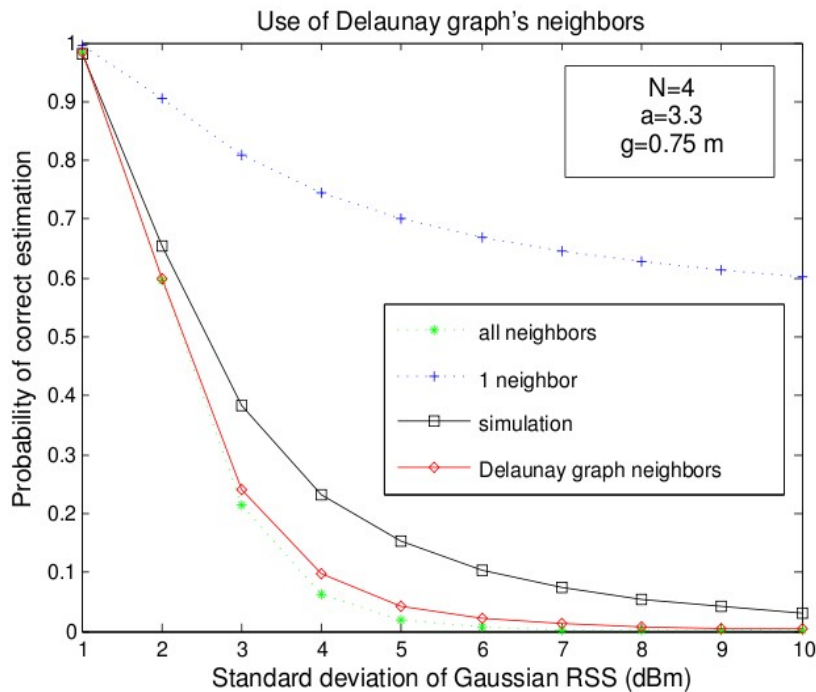
Από τα ΣΧΗΜΑΤΑ 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 και 6.18 παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο τύπος (4.10) που χρησιμοποιεί τις υποψήφιες θέσεις του γράφου Delaunay είναι σαφώς πιο αξιόπιστος από τον (4.8). Επίσης, παρατηρούμε ότι, σε αρκετές περιπτώσεις, οι τιμές των πιθανοτήτων του (4.10), όταν χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα του γράφου Delaunay, σχεδόν ταυτίζονται με τις τιμές των πιθανοτήτων του (4.10), όταν χρησιμοποιεί όλες τις υποψήφιες θέσεις. Όμως, υπάρχουν και περιπτώσεις όπου η χρησιμοποίηση των γειτόνων που υποδεικνύει ο γράφος Delaunay οδηγεί σε τιμές πιθανοτήτων πλησιέστερες στις τιμές που προκύπτουν μέσω απευθείας προσομοίωσης στον υπολογιστή. Έτσι, αν και τα πειραματικά αποτελέσματα είναι περιορισμένα για ασφαλές συμπέρασμα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι όταν ο (4.10) χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα του γράφου Delaunay, τότε είναι πιο αξιόπιστος από ότι όταν λαμβάνει υπόψη μόνο δύο θέσεις, ή από όταν λαμβάνει υπόψη όλες τις υποψήφιες θέσεις του συστήματος.

Όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι η βελτίωση που επιτυγχάνεται στον (4.10) λόγω του γράφου Delaunay δεν φαίνεται να είναι τόσο σημαντική όσο στην [85].

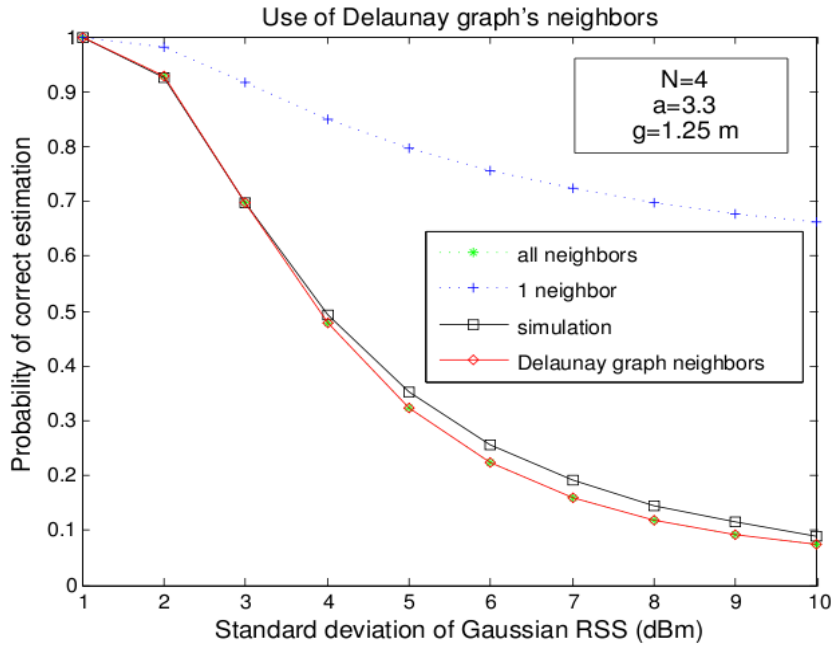
Η ενδεχόμενη βελτίωση λόγω του γράφου Delaunay οφείλεται στο ότι, οι υποψήφιες θέσεις που αγνοούνται κατά τους υπολογισμούς του (4.10) είναι πιθανό να απαλλάσσουν την τιμή της πιθανότητας που υπολογίζεται, από ένα μέρος του σφάλματος λόγω παραδοχής της ανεξαρτησίας των μεταβλητών C_j . Όταν η επιλογή των υποψήφιων θέσεων που υποδεικνύει ο γράφος Delaunay δεν δίνει κάποια αξιόλογη διαφορά από ότι αν επιλέγονται όλες οι υποψήφιες θέσεις, τότε αυτό σημαίνει ότι οι υποψήφιες θέσεις που αγνοεί ο γράφος Delaunay έχουν “δαχτυλικά αποτυπώματα” τόσο απομακρυσμένα από αυτό της πραγματικής θέσης, ώστε η επιρροή τους στο σφάλμα λόγω παραδοχής

ανεξαρτησίας να είναι ασήμαντη. Έτσι, εκφράζουμε τη σκέψη ότι η επιλογή ενός διαφορετικού γράφου εγγύτητας, ο οποίος θα αγνοούσε περισσότερες υποψήφιες θέσεις, ενδεχομένως θα απάλλαζε την υπολογισμένη πιθανότητα ορθής εκτίμησης από μεγαλύτερο ποσοστό του σφάλματος λόγω παραδοχής ανεξαρτησίας. Όμως, αν ο γράφος εγγύτητας αγνοούσε υποψήφιες θέσεις καθοριστικές για τον καθορισμό της τιμής της πιθανότητας ορθής εκτίμησης, τότε, παρά το γεγονός ότι το σφάλμα λόγω παραδοχής της ανεξαρτησίας θα μειωνόταν, η υπολογισμένη τιμή της πιθανότητας θα διέφερε σημαντικά από αυτήν της απευθείας προσομοίωσης.

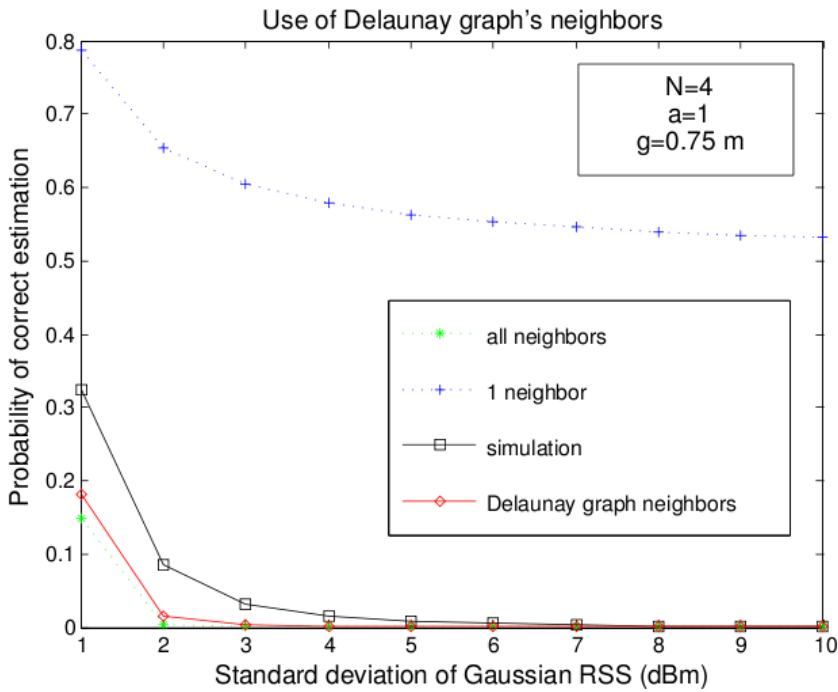
Τέλος, μετά από κατάλληλες προσομοιώσεις στο πρόγραμμα MATLAB, παρατηρήσαμε ότι η αλλαγή στις θέσεις εκπομπής του ίδιου αριθμού σημείων πρόσβασης, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τα αποτελέσματα που υπολογίζει ο (4.10) μέσω του γράφου Delaunay να πλησιάζουν πολύ περισσότερο τα απευθείας προσομοιωμένα αποτελέσματα.



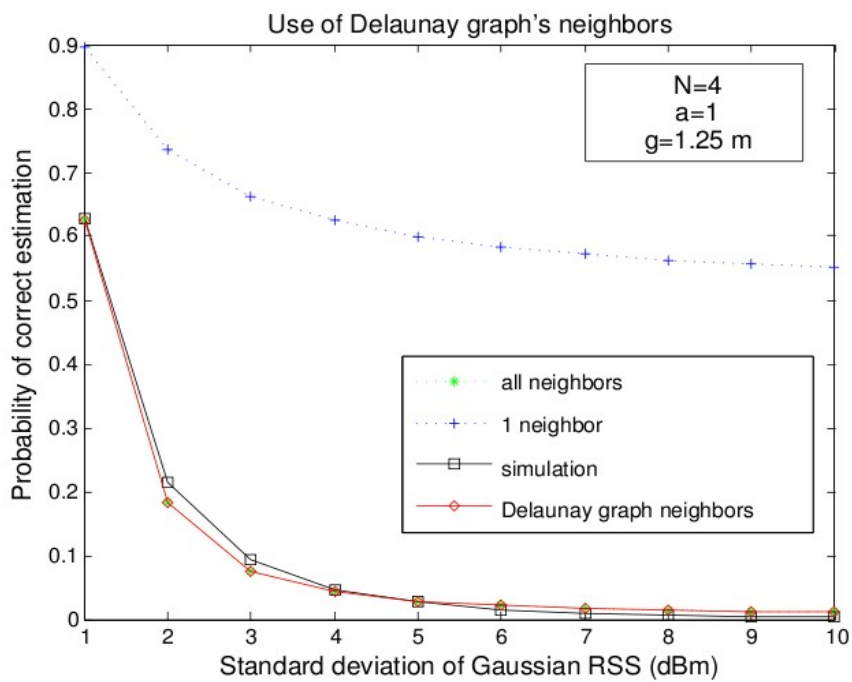
ΣΧΗΜΑ 6.11: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ (4.10) ΟΤΑΝ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΥΠΟΨΗ ΤΙΣ ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΥΠΟΔΕΙΚΝΥΕΙ Ο ΓΡΑΦΟΣ DELAUNAY, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ σ ΚΑΙ ΓΙΑ $N=4$, $\alpha=3.3$ ΚΑΙ $g=0.75$ m.



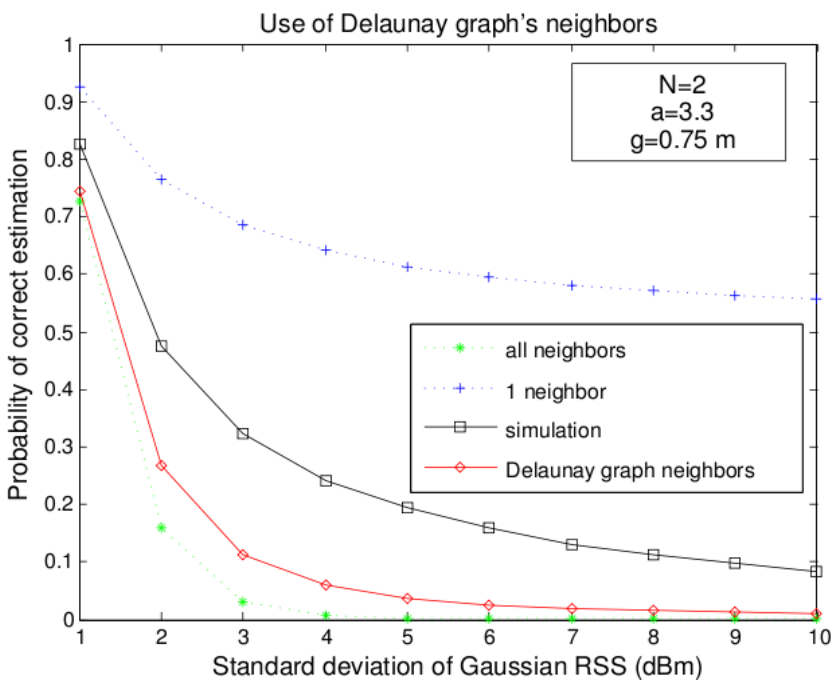
ΣΧΗΜΑ 6.12: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=4$, $\alpha=3.3$ ΚΑΙ $g=1.25$ m.



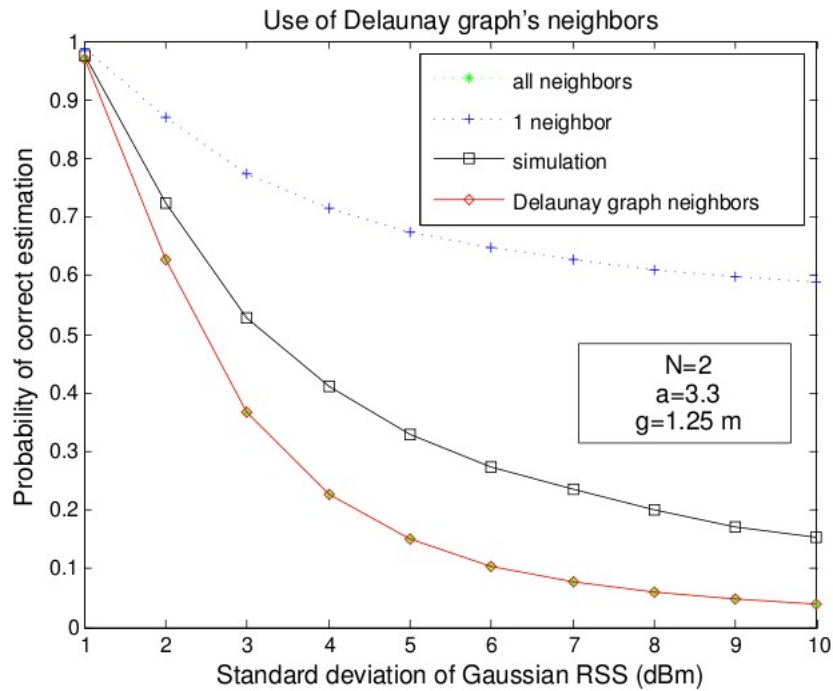
ΣΧΗΜΑ 6.13: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=4$, $\alpha=1$ ΚΑΙ $g=0.75$ m.



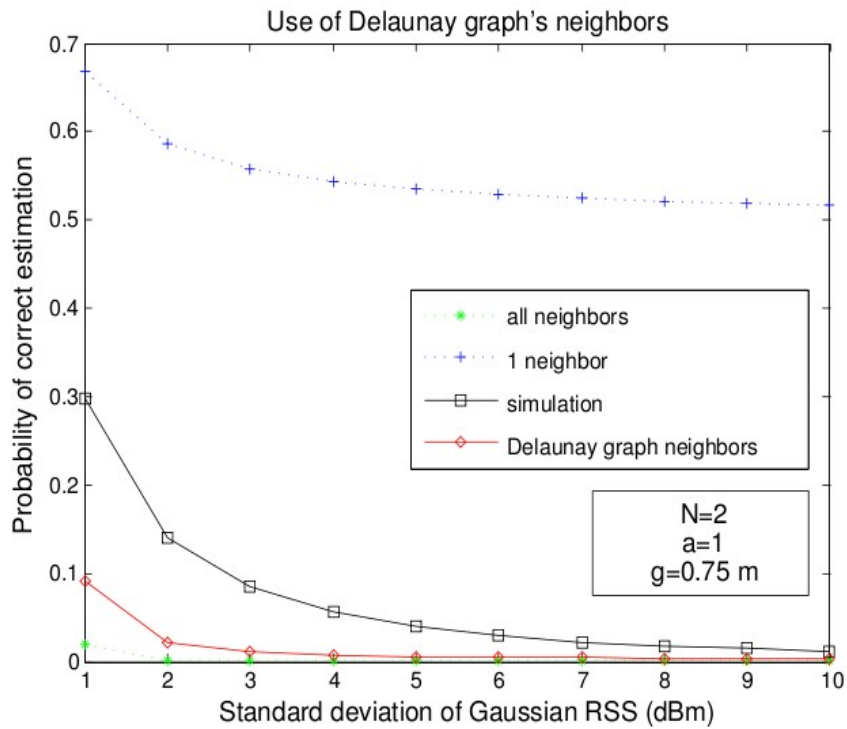
ΣΧΗΜΑ 6.14: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=4$, $\alpha=1$ ΚΑΙ $g=1.25$ m.



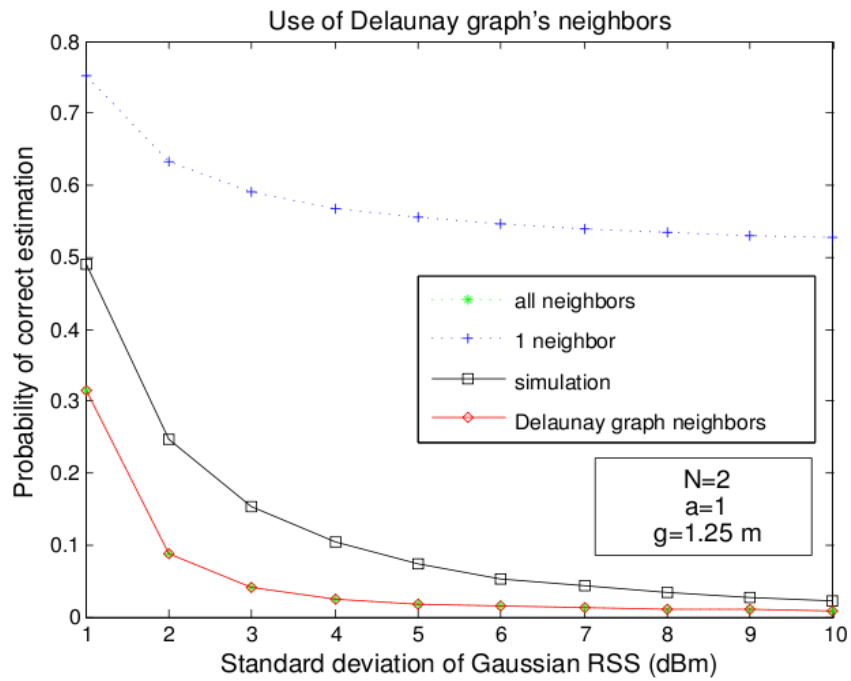
ΣΧΗΜΑ 6.15: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=2$, $\alpha=3.3$ ΚΑΙ $g=0.75$ m.



ΣΧΗΜΑ 6.16: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=2$, $\alpha=3.3$ ΚΑΙ $g=1.25$ m



ΣΧΗΜΑ 6.17: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=2$, $\alpha=1$ ΚΑΙ $g=0.75$ m.



ΣΧΗΜΑ 6.18: ΟΠΩΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 6.11, ΓΙΑ $N=2$, $\alpha=1$ ΚΑΙ $g=1.25$ m.

7 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιαστής ενός συστήματος εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου οφείλει να γνωρίζει εκ των προτέρων ποιες προδιαγραφές επιθυμεί να ικανοποιεί το σύστημα, αλλά και σε ποιους παράγοντες επίδοσης επιθυμεί να δίνει προτεραιότητα. Για παράδειγμα, μπορεί μία ρύθμιση ή μία απόφαση που συμβάλει στην βελτίωση της ακρίβειας του συστήματος, να επιβαρύνει ταυτόχρονα το σύστημα με επιπλέον πολυπλοκότητα και κόστος. Έτσι, ο σχεδιαστής πρέπει να γνωρίζει καλά σε ποιες συνθήκες εφαρμόζεται το σύστημα, για ποιους σκοπούς εφαρμόζεται, ποια πρέπει να είναι η επίδοσή του, αλλά παράλληλα, ο σχεδιαστής οφείλει να λαμβάνει υπόψη του και άλλους παράγοντες, όπως η πολυπλοκότητα και η ασφάλεια του συστήματος. Επομένως, πριν εφαρμοστεί το σύστημα στην πράξη, ο σχεδιαστής του συστήματος εντοπισμού είναι αναγκασμένος να απαντήσει σε ορισμένα κρίσιμα ερωτήματα που αφορούν τη σχεδίαση του συστήματος, αλλά και να πάρει ορισμένες κρίσιμες αποφάσεις που αφορούν τη λειτουργία του. Επίσης, αναφέρουμε ότι η μοντελοποίηση του συστήματος με τον τρόπο που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 4 αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο βοήθημα για τις αποφάσεις του σχεδιαστή. Στη συνέχεια, καταγράφονται μερικά βασικά θέματα σχεδίασης συστημάτων εντοπισμού που χρησιμοποιούν την τεχνική των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” και υποδομή ασύρματου τοπικού δικτύου.

7.2 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΘΕΜΑΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Παρακάτω καταγράφονται [66] μερικές απαραίτητες εκτιμήσεις που πρέπει να κάνει ο σχεδιαστής ενός συστήματος εντοπισμού που χρησιμοποιεί την τεχνική των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” και την υποδομή ασύρματου τοπικού δικτύου. Οι εκτιμήσεις αυτές πρέπει να προηγούνται της πραγματικής εφαρμογής του συστήματος. Έτσι, ο σχεδιαστής του συστήματος οφείλει να λαμβάνει υπόψη του τα εξής:

ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Ένα σημαντικό σημείο που προηγείται της σχεδίασης του συστήματος είναι ο σχεδιαστής να γνωρίζει καλά κάτω υπό ποιες συνθήκες θα εφαρμόζεται το σύστημα, και τι απαιτήσεις απόδοσης αναμένονται από αυτό. Για παράδειγμα, αν απαιτείται ο εντοπισμός σε μία μεγάλης έκτασης αστική περιοχή, ή αν απαιτείται ακρίβεια σε εσωτερικό χώρο εξαιρετικά μεγάλη, τότε είναι δύσκολο οι απαιτήσεις αυτές να

ικανοποιηθούν από ένα σύστημα εσωτερικού χώρου που βασίζεται στην τεχνική των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” [23]. Αν αρκεί όμως ακρίβεια μερικών μέτρων σε έναν εσωτερικό χώρο, τότε ένα σύστημα εσωτερικού χώρου που βασίζεται στην τεχνική των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” έχει τη δυνατότητα να ανταποκριθεί. Ένα άλλο παράδειγμα είναι το εξής. Αν σε μία εφαρμογή όπου θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα εντοπισμού θέσης, τα αντικείμενα που θα εντοπίζονται κινούνται συνεχώς, τότε πρέπει να δίνεται μεγάλη έμφαση στον χρόνο υπολογισμού του συστήματος για την εκτίμηση μιας θέσης. Έτσι, σε τέτοιες περιπτώσεις εφαρμογών, είναι καλό να επιλέγονται ή να σχεδιάζονται συστήματα εντοπισμού τα οποία να εκτιμούν μία θέση σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, ακόμα και αν χρειαστεί να θυσιάσουν μερικώς άλλες παραμέτρους, όπως την πιθανότητα ορθής εκτίμησης ή το κόστος.

ΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η έκταση της περιοχής στην οποία λειτουργεί το σύστημα εντοπισμού θέσης επηρεάζει διάφορους παράγοντες, όπως τον αριθμό των υποψήφιων θέσεων, τον αριθμό των σημείων πρόσβασης, και τη χρονική διάρκεια του offline σταδίου. Όμως, σε ορισμένες περιπτώσεις, η έκταση στην οποία θα μπορούσε να λειτουργήσει το σύστημα εντοπισμού εσωτερικού χώρου είναι περιορισμένη, λόγω πιθανής περιορισμένης εμβέλειας του ασύρματου δικτύου, ή λόγω άλλων παραγόντων, όπως δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες για τη διάδοση του σήματος.

ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Σε ορισμένες εφαρμογές, οι αποστάσεις που απαιτείται να έχουν οι υποψήφιες θέσεις του συστήματος εντοπισμού δεν χρειάζεται να είναι μικρές. Ένα παράδειγμα τέτοιων εφαρμογών είναι αν απαιτείται από το σύστημα να αποφασίζει σε ποιο γραφείο ενός ορόφου βρίσκεται ένα αντικείμενο, και όχι σε ποιες θέσεις ακριβώς μέσα στο γραφείο. Όμως, σε άλλες εφαρμογές, το σύστημα απαιτείται να δίνει πολύ πιο ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τις θέσεις των αντικειμένων. Σε κάθε περίπτωση, το σύστημα πρέπει να είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Επίσης, όπως προέκυψε και από τη μελέτη μέσω του μοντέλου στο κεφάλαιο 5, η μείωση των αποστάσεων του τετραγωνικού πλέγματος, με σκοπό να ικανοποιηθεί μία απαιτητική εφαρμογή,

μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της πιθανότητας ορθής εκτίμησης των θέσεων του συστήματος.

ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ

Ο αριθμός των υποψήφιων θέσεων που πρέπει να έχει ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου εξαρτάται από την έκταση του χώρου στην οποία πρόκειται να λειτουργήσει το σύστημα, αλλά και από το ακριβές σχέδιο του εσωτερικού χώρου, αφού είναι δυνατό να υπάρχουν εμπόδια που περιορίζουν την ύπαρξη υποψήφιων θέσεων. Επίσης, ο τρόπος με τον οποίον επιλέγονται οι υποψήφιες θέσεις μπορεί να υποδεικνύεται από την εφαρμογή, ή μπορεί να επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες διάδοσης των σημάτων. Όμως, ο αριθμός των υποψήφιων θέσεων εξαρτάται και από το συνδυασμό των απαιτήσεων σε ακρίβεια πληροφοριών και αξιοπιστία. Αυτό οφείλεται στο ότι, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ο σχεδιαστής του συστήματος οφείλει να ρυθμίσει το διάστημα του τετραγωνικού πλέγματος, έτσι ώστε να εξισορροπεί τις απαιτήσεις σε ακρίβεια πληροφοριών και αξιοπιστία. Και το μήκος του διαστήματος του πλέγματος επηρεάζει άμεσα τον συνολικό αριθμό των υποψήφιων θέσεων.

ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Στο κεφάλαιο 5 μελετήσαμε σε βάθος την επίδραση που έχει ο αριθμός των σημείων πρόσβασης στην αξιοπιστία του συστήματος. Παρατηρήσαμε ότι όταν ο αριθμός των σημείων πρόσβασης αυξάνεται, τότε αυξάνεται και η πιθανότητα ορθής εκτίμησης των θέσεων. Όμως, από έναν αριθμό και μετά, η αύξηση των σημείων πρόσβασης παύει να αυξάνει επιπρόσθετα την αξιοπιστία του συστήματος. Επίσης, παρατηρήσαμε ότι η μετακίνηση των σημείων πρόσβασης μεταβάλλει τις τιμές των πιθανοτήτων ορθής εκτίμησης στις διάφορες υποψήφιες θέσεις. Έτσι, ο σχεδιαστής του συστήματος θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει το μοντέλο που περιγράψαμε με σκοπό να αποφασίσει, με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν, ποιος αριθμός υποψήφιων θέσεων ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε ακρίβεια. Όμως, ο αριθμός των υποψήφιων θέσεων θα μπορούσε να περιοριστεί από διάφορους παράγοντες, όπως το χρηματικό κόστος, ή η πιθανότητα να υπάρχουν ήδη εγκατεστημένα σημεία πρόσβασης στον χώρο εφαρμογής του συστήματος.

Ο ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Είναι σημαντικό να είναι γνωστό στον σχεδιαστή αν το σύστημα εντοπισμού πρόκειται να χρησιμοποιείται από πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Αν συμβαίνει αυτό, τότε δημιουργείται συμφόρηση στο ασύρματο δίκτυο και επιβαρύνεται η λειτουργία του εξυπηρετητή (server). Έτσι, σε αυτές τις περιπτώσεις θα ήταν καλύτερο η ευθύνη της επεξεργασίας να μεταφέρεται από τον εξυπηρετητή στις ασύρματες κινητές συσκευές του συστήματος.

Ο ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΡΗΣΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Όπως εξηγήσαμε και στο κεφάλαιο 3, ο προσανατολισμός του χρήστη της κινητής ασύρματης συσκευής που πραγματοποιεί της μετρήσεις στο σύστημα εντοπισμού θέσης, επηρεάζει σημαντικά τις τιμές των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”, και συνεπώς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για να είναι το σύστημα αξιόπιστο. Όμως, όταν αγνοείται ο προσανατολισμός των χρηστών, μειώνεται η αξιοπιστία, αλλά παράλληλα μειώνονται οι εγγραφές δεδομένων στη βάση δεδομένων του συστήματος. Στην πράξη, σε ορισμένες περιπτώσεις αποφεύγεται να λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός των χρηστών. Επίσης, στο μοντελοποιημένο σύστημα [66] που μελετάμε γίνεται η παραδοχή ότι οι μεταβολές της ισχύος λόγω του προσανατολισμού εξουδετερώνονται κατά τον υπολογισμό των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων”.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

Ο σχεδιαστής του συστήματος θα μπορούσε να καταγράψει τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” του συστήματος στη βάση δεδομένων, πραγματοποιώντας έναν μεγάλο αριθμό μετρήσεων. Αυτή η διαδικασία όμως είναι πολύ επίμοχθη. Εναλλακτικά, ο σχεδιαστής θα μπορούσε να υπολογίσει τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της ισχύος, και εισάγοντας σε αυτό τις τιμές των κατάλληλων παραμέτρων που αντιστοιχούν στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ομοίως, ο σχεδιαστής θα μπορούσε να αποφύγει τις επίμοχθες και χρονοβόρες μετρήσεις της απόδοσης του συστήματος, αν μοντελοποιούσε το σύστημα, εισάγοντας σε αυτό κατάλληλες τιμές παραμέτρων που αφορούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Παραδείγματα τέτοιων παραμέτρων θα μπορούσαν να είναι ο εκθέτης απωλειών διαδρομής ή η τυπική απόκλιση της μετρούμενης ισχύος, που

αναφέραμε κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών προκύπτουν από μετρήσεις, ή είναι τυποποιημένες. Όμως, οι μαθηματικοί υπολογισμοί μειώνουν την αξιοπιστία του συστήματος.

Ο ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 3, ο αριθμός των δειγματικών μετρήσεων που χρειάζονται για τον σχηματισμό ενός “δαχτυλικού αποτυπώματος” ιδανικά θα επιθυμούσαμε να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερος, με δεδομένο βέβαια ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι ικανοποιητικά σταθερές. Επίσης, είδαμε ότι ο αριθμός των δειγμάτων που απαιτούνται εξαρτάται από παράγοντες, όπως από το αν το “δαχτυλικό αποτύπωμα” αντιπροσωπεύει ένα ιστόγραμμα ή μία μέση τιμή. Όμως, η συλλογή ενός μεγάλου αριθμού δειγμάτων θα μπορούσε να αυξήσει τη χρονική διάρκεια του offline σταδίου, και τις εγγραφές της βάσης δεδομένων. Ο σχεδιαστής είναι καλό να επιλέξει έναν αριθμό δειγμάτων που να έχει θετικές επιπτώσεις στην ακρίβεια του συστήματος, αλλά και στη γενικότερη πρακτική του λειτουργία. Επιπλέον, όταν τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” υπολογίζονται μέσω ενός μαθηματικού τύπου, τότε ο αριθμός των δειγμάτων είναι αδιάφορος.

Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΤΩΝ “ΔΑΧΤΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΩΝ”

Η συλλογή “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” είναι μία εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία. Ιδιαίτερα, αν η περιοχή λειτουργίας του συστήματος έχει μεγάλη έκταση, τότε και η χρονική διάρκεια των μετρήσεων είναι ανησυχητικά μεγάλη, αλλά και ο αριθμός των δεδομένων που καταγράφονται στη βάση δεδομένων αυξάνεται αισθητά. Αν όμως ο αριθμός των δειγμάτων δεν είναι αρκετός, και αν η διάρκεια των μετρήσεων είναι πολύ μικρή, τότε αυτό είναι αρνητικό για την αξιοπιστία του συστήματος. Και ιδιαίτερος αν η βάση δεδομένων καταγράφει ιστογράμματα, τότε η αξιοπιστία μειώνεται ακόμα περισσότερο. Επίσης, αν μία βάση δεδομένων έχει πολύ μικρό ελεύθερο χώρο, τότε ο σχεδιαστής του συστήματος περιορίζεται στο να επεκτείνει μελλοντικά το σύστημα, εισάγοντας στη βάση δεδομένων επιπρόσθετα “δαχτυλικά αποτυπώματα”. Επομένως, ο σχεδιαστής του συστήματος οφείλει να λάβει υπόψη του όλους αυτούς τους παράγοντες, και να βρει μία λύση που να εξισορροπεί τα πλεονεκτήματα

και τα μειονεκτήματα, και η οποία να ικανοποιεί όσο το δυνατό καλύτερα τις προδιαγραφές της εφαρμογής. Επίσης, όπως έχουμε πει, τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” θα μπορούσαν να υπολογιστούν πολύ πιο εύκολα με ένα μοντέλο απωλειών διαδρομής, αλλά με συνέπεια τη μείωση της ακρίβειας.

ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ONLINE ΣΤΑΔΙΟ

Σύμφωνα με το RADAR [22], αρκεί να συλλεχθούν 3 δειγματικά διανύσματα μετρήσεων ισχύος κατά το online στάδιο για να είναι η αξιοπιστία του συστήματος ικανοποιητική. Αν συλλεχθούν παραπάνω δειγματικά διανύσματα, η βελτίωση στην απόδοση δεν είναι αξιοσημείωτη. Στο μοντελοποιημένο σύστημα που μελετήσαμε στο κεφάλαιο 4, θεωρήσαμε ότι κατά το online στάδιο συλλέγεται μόνο ένα δειγματικό διάνυσμα μετρήσεων.

Η ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΙ ΤΑ ΣΗΜΑΤΑ

Στο σύστημα εντοπισμού θέσης που μοντελοποιήσαμε θεωρούμε ότι τα σημεία πρόσβασης εκπέμπουν τα σήματα και ότι αυτά λαμβάνονται από τον δέκτη άγνωστης θέσης. Αντιθέτως, στο RADAR [22] τα σημεία πρόσβασης είναι αυτά που λαμβάνουν σήματα. Όμως, για να μην υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις μετρήσεις σε αυτές τις δύο αντίθετες περιπτώσεις, θα πρέπει οι κάρτες δικτύου να είναι του ίδιου κατασκευαστή, και κυρίως, όπως είπαμε και στην παράγραφο 3.4.3, πρέπει να έχουν παρόμοιο εύρος πιθανών μετρούμενων τιμών και να δίνουν παρόμοιες τυπικές αποκλίσεις στην μετρούμενη ισχύ. Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, το είδος της εφαρμογής, αλλά και σε ποιους παράγοντες δίνεται προτεραιότητα, επιλέγεται και το αν οι μετρήσεις ισχύος θα γίνονται στα σημεία πρόσβασης ή στις συσκευές άγνωστης θέσης. Έτσι, αν στο δίκτυο υπάρχει μεγάλη συμφόρηση συσκευών άγνωστης θέσης, τότε τα σημεία πρόσβασης υποφέρουν από υπερφόρτωση, από αυξημένες απαιτήσεις για συγχρονισμό με τις κινητές συσκευές, και δίνουν καθυστερήσεις στη λειτουργία του δικτύου. Σε μία τέτοια περίπτωση, θα ήταν καλό η ευθύνη των μετρήσεων να μεταφερθεί από τα σημεία πρόσβασης στις συσκευές άγνωστης θέσης. Επίσης, αν οι μετρήσεις γίνονται από τη μεριά του δικτύου, μέσω των σημείων πρόσβασης, τότε υπάρχει ο κίνδυνος να παραβιαστεί η ασφάλεια και η μυστικότητα των χρηστών του συστήματος εντοπισμού. Έτσι, σε εφαρμογές που οφείλουν να είναι

ευαίσθητες σε τέτοια ζητήματα, οι μετρήσεις ισχύος γίνονται από τη μεριά των χρηστών. Επομένως, ο σχεδιαστής του συστήματος οφείλει να ενεργήσει ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, και ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου.

Η ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΟΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ

Ένας βασικός παράγοντας που κάνει τους σχεδιαστές να αποφεύγουν να γίνονται οι υπολογισμοί του αλγόριθμου εντοπισμού θέσης στις κινητές συσκευές, είναι τα περιορισμένα αποθέματα ισχύος των συσκευών αυτών. Έτσι, πολλές φορές προτιμάται οι υπολογισμοί να γίνονται στον κεντρικό εξυπηρετητή του συστήματος. Όμως, όταν ο αριθμός των χρηστών του συστήματος είναι μεγάλος, και υπάρχει μεγάλη συμφόρηση, τότε η ευθύνη για τους υπολογισμούς είναι πιθανό να χρειάζεται να μεταφερθεί από τον εξυπηρετητή στις κινητές συσκευές των χρηστών. Έτσι, ο σχεδιαστής του συστήματος πρέπει να λάβει υπόψη του τις περιπτώσεις αυτές, αλλά και το είδος της εφαρμογής, και να αποφασίσει.

7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ

Οι διάφοροι υποψήφιοι αλγόριθμοι του συστήματος συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς ακρίβεια, και ο σχεδιαστής έχει μία εικόνα σχετικά με την αξιοπιστία που αποκτά το σύστημα λόγω των αλγόριθμων αυτών. Συνήθως, η σύγκριση της ακρίβειας γίνεται μέσω της μέσης απόστασης σφάλματος και μέσω της κατανομής της απόστασης σφάλματος. Όμως, όπως είδαμε και στη παράγραφο 1.5, ο σχεδιαστής του συστήματος οφείλει να λάβει υπόψη του και άλλα μέτρα απόδοσης, όπως η πολυπλοκότητα, η ευρωστία, η εξελιξιμότητα και το κόστος του συστήματος.

Επίσης, ο σχεδιαστής δεν αρκεί να συγκρίνει τους υποψήφιους αλγόριθμους μόνο ως προς την ακρίβεια, αλλά θα έπρεπε να τους συγκρίνει και ως προς την υπολογιστική τους συμπεριφορά. Δηλαδή, ο σχεδιαστής οφείλει να γνωρίζει την υπολογιστική πολυπλοκότητα και την ταχύτητα με την οποία δίνουν αποτελέσματα οι αλγόριθμοι, όταν πραγματοποιούνται κάτω υπό τις ίδιες συνθήκες. Όμως, πρέπει να μελετάται προσεκτικά και η διαδικασία υπολογισμού των “δαχτυλικών αποτυπωμάτων” και οι απαιτήσεις σε μνήμη στη βάση δεδομένων, κατά το offline στάδιο, καθώς και ο χρόνος που απαιτείται για να ανατρέξει το σύστημα στη βάση δεδομένων.

Οι αλγόριθμοι, εκτός από την ακρίβεια, είναι δυνατό να επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο και τη λειτουργία του offline σταδίου. Για παράδειγμα, ένας αλγόριθμος του οποίου τα “δαχτυλικά αποτυπώματα” είναι ιστογράμματα καταγράφει πολύ περισσότερα δεδομένα στη βάση δεδομένων. Όμως, αν και οι απαιτήσεις σε μνήμη είναι μεγάλες, ένας τέτοιος αλγόριθμος προσδίδει στο σύστημα μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, αν ο σχεδιαστής δεν επιθυμεί τις αρνητικές συνέπειες της αυξημένης ζήτησης σε μνήμη, θα μπορούσε να επιλέξει έναν άλλον αλγόριθμο, θυσιάζοντας την ακρίβεια, ή θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει συσκευές με μεγαλύτερη χωρητικότητα μνήμης, ή καλύτερες ταχύτητες επεξεργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hui Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and Jing Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," *IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 37, no. 6, pp. 1067 – 1080, Nov. 2007.
- [2] A. Hatami and K. Pahlavan, "Hybrid TOA-RSS Based Localization Using Neural Networks," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '06)*, Nov. 27-Dec. 1, 2006, pp. 1-5.
- [3] K. Pahlavan, P. Krishnamurthy, and A. Beneat, "Wideband radio propagation modeling for indoor geolocation applications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 4, pp. 60 – 65, April 1998.
- [4] A.H. Sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, "Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 24 – 40, July 2005.
- [5] Xinrong Li, "An iterative NLOS mitigation algorithm for location estimation in sensor networks," available: http://www.ee.unt.edu/public/xinrong/Papers/XLI_IST06.pdf.
- [6] M. Kanaan and K. Pahlavan, "A comparison of wireless geolocation algorithms in the indoor environment," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC. 2004)*, March 21-25, 2004, vol. 1, pp. 177- 182.
- [7] Junyang Zhou and Joseph Kee-Yin Ng, "Providing location services within a radio cellular network using ellipse propagation model," in *Proc. 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2005)*, March 28-30, 2005, vol. 1, pp. 559- 564.
- [8] A. Teuber, B. Eissfeller, and T. Pany, "A Two-Stage Fuzzy Logic Approach for Wireless LAN Indoor Positioning," *IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium*, April 25-27, 2006, pp. 730- 738.
- [9] M. Kossel, H.R. Benedickter, R. Peter and W. Bachtold, "MICROWAVE BACKSCATTER MODULATION SYSTEMS," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest.*, June 11-16, 2000, vol. 3, pp. 1427-1430.
- [10] Ν. Κ. Ουζούνογλου, "ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ," (Β' Έκδοση), Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1994.
- [11] Tsung-Nan Lin and Po-Chiang Lin, "Performance Comparison of Indoor Positioning Techniques based on Location Fingerprinting in Wireless Networks," in *Proc. International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, June 13-16, 2005, vol. 2, pp. 1569- 1574.
- [12] A. Kushki, K.N. Plataniotis, A.N. Venetsanopoulos, and C. S. Regazzoni, "Radio Map Fusion for Indoor Positioning in Wireless Local Area Networks," in *Proc. 8th International Conference on Information Fusion*, July 25-28, 2005, vol. 2.

- [13] Xiaoyong Chai and Qiang Yang, "Reducing the Calibration Effort for Probabilistic Indoor Location Estimation," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, no. 6, pp. 649-662, June 2007.
- [14] R. Ganesh, S. L. Kota, K. Pahlavan, and R. Agusti, "Emerging location aware broadband wireless ad hoc networks," Springer, 2004, Chapter 11.
- [15] P. Kontkanen, P. Myllymäki, T. Roos, H. Tirri, K. Valtonen, and H. Wettig, "TOPICS IN PROBABILISTIC LOCATION ESTIMATION IN WIRELESS NETWORKS," 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2004), Barcelona, Spain, Sept 5-8, 2004, vol. 2, pp. 1052- 1056.
- [16] Emil M. Petriu, "Neural Networks : Basics," School of Information Technology and Engineering, University of Ottawa, available: <http://www.site.uottawa.ca/~petriu/teaching.html>.
- [17] D. A. Vaccari and E. Wojciecliowski, "Neural Networks as Function Approximators: Teaching a Neural Network to Multiply," (Neural Networks, 1994), in Proc. IEEE International Conference on IEEE World Congress on Computational Intelligence, Orlando, FL, USA, Jun 27-Jul 2, 1994, vol. 4, pp. 2217-2222.
- [18] Bing-Yu Sun and Moon-Chuen Lee, "SUPPORT VECTOR MACHINE FOR MULTIPLE FEATURE CLASSIFICATION," in Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo, July 9-12, 2006, pp. 501-504.
- [19] Zhi-li Wu, Chun-hung Li, Joseph Kee-Yin Ng, and Karl R.P.H. Leung, "Location Estimation via Support Vector Regression," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, no. 3, pp. 311-321, March 2007.
- [20] Y. Gwon, R. Jain, and T. Kawahara, "Robust Indoor Location Estimation of Stationary and Mobile Users," in Proc. IEEE INFOCOM 2004, March 7-11, vol. 2, pp. 1032- 1043.
- [21] C. Drane, M. Macnaughtan, and C. Scott, "Positioning GSM telephones," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 4, pp. 46-54, 59, Apr. 1998.
- [22] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," in Proc. IEEE INFOCOM 2000, Mar., vol. 2, pp. 775-784.
- [23] M. Brunato and R. Battiti, "Statistical learning theory for location fingerprinting in wireless lans," *Comput. Netw. ISDN Syst.*, vol. 47, no. 6, pp. 825-845, 2005, available: <http://dit.unitn.it/~brunato/>.
- [24] I.V. Tetko, D.J. Livingstone, and A.I. Luik, "Neural network studies. 1. Comparison of overfitting and overtraining," *Journal of Chemical Information & Computer Sciences*, vol. 35, no. 5, September 1995, pp. 826-833.
- [25] P. K. Engee, "The global positioning system: Signals, measurements and performance," *Int. J. Wireless Inf. Netw.*, vol. 1, no. 2, pp. 83-105, 1994.
- [26] J. Barnes, C. Rizos, J. Wang, D. Small, G. Voigt, and N. Gambale. (2003). *Locata: The positioning*

technology of the future? presented at 6th Int. Symp. Satellite Navig. Technol. Incl. Mobile Positioning Location Services, Melbourne, Australia [Online]. pp. 49–62. Available: <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/snap.htm>

[27] J. Hightower, R. Want, and G. Borriello, “SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength,” Univ. Washington, Seattle, Tech. Rep. UW CSE 2000–02-02, Feb. 2000.

[28] L. M. Ni, Y. Liu, Y. C. Lau, and A. P. Patil, “LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID,” *Wireless Netw.*, vol. 10, no. 6, pp. 701–710, Nov. 2004.

[29] J. J. Caffery and G. L. Stuber, “Overview of radiolocation in CDMA cellular system,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 4, pp. 38–45, Apr. 1998.

[30] V. Otsason, A. Varshavsky, A. LaMarca, and E. de Lara, “Accurate GSM indoor localization,” *UbiComp 2005, Lecture Notes Computer Science*, Springer-Verlag, vol. 3660, pp. 141–158, 2005.

[31] S. Gezici, Z. Tian, G. V. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor, and Z. Sahinoglu, “Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects for future sensor networks,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 70–84, Jul. 2005.

[32] R. J. Fontana, “Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 52, no. 9, pp. 2087–2104, Sep. 2004.

[33] R. J. Fontana, E. Richley, and J. Barney, “Commercialization of an ultra wideband precision asset location system,” in *Proc. IEEE Ultra Wideband Syst. Technol. Conf.*, Reston, VA, Nov. 2003, pp. 369–373. [Online]. Available: <http://www.multispectral.com>

[34] M. Vossiek, M. Wiebking, L. Gulden, P. Weighardt, and J. Hoffmann, “Wireless local positioning—Concepts, solutions, applications,” in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, Aug. 2003, pp. 219–224.

[35] D. Niculescu and B. Nath, “Ad Hoc Positioning System (APS) using AoA,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, San Francisco, CA, Apr. 2003, vol. 3, pp. 1734–1743.

[36] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, “Enhancements to the RADAR user location and tracking system,” Microsoft Corp., Tech. Rep. MSR-TR-2000–12, Feb. 2000.

[37] M. A. Youssef, A. Agrawala, and A. U. Shankar, “WLAN location determination via clustering and probability distributions,” in *Proc. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom’03)*, Mar. 23–26, 2003, pp. 143–150.

[38] M. Youssef and A. K. Agrawala, “Handling samples correlation in the Horus system,” *IEEE INFOCOM 2004*, Hong Kong, vol. 2, pp. 1023–1031, Mar. 2004.

[39] T. Roos, P. Myllymaki, H. Tirri, P. Misikangas, and J. Sievanan, “A probabilistic approach to WLAN user location estimation,” *Int. J. Wireless Inf. Netw.*, vol. 9, no. 3, pp. 155–164, Jul. 2002.

- [40] P. Castro, P. Chiu, T. Kremenek, and R. R. Muntz, "A probabilistic room location service for wireless networked environments," in Proc. 3rd Int. Conf. Ubiquitous Comput., Atlanta, GA, Sep. 2001, pp. 18–34.
- [41] R. Battiti, T. L. Nhat, and A. Villani, "Location aware computing: A neural network model for determining location in wireless LANs," Tech. Rep. DIT-02–0083, 2002.
- [42] A. M. Ladd, K. E. Bekris, G. Marceau, A. Rudys, L. E. Kavraki, and D. S. Wallach, "Using wireless ethernet for localization," in Proc. 2002 IEEE/RJS Int. Conf. Intell. Robots Syst., 2002, vol. 1, pp. 402–408.
- [43] A. M. Ladd, K. E. Bekris, A. Rudys, L. E. Kavraki, and D. S. Wallach, "On the feasibility of using wireless ethernet for indoor localization," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 20, no. 3, pp. 555–559, Jun. 2004.
- [44] S. Siddiqi, G. S. Sukhatme, and A. Howard, "Experiment in Monte-Carlo localization using WiFi signal strength," in Proc. Int. Conf. Adv. Robot., Coimbra, Portugal, 2003, pp. 210–223.
- [45] A. Haeberlen, E. Flannery, A. M. Ladd, A. Rudys, D. S. Wallach, and L. E. Kavraki, "Practical robust localization over large-scale 802.11 wireless networks," in Proc. 10th ACM Int. Conf. Mobile Comput. Netw., Philadelphia, PA, Sep. 26–Oct. 1, 2004, pp. 70–84.
- [46] A. Savvides, C. C. Han, and M. B. Srivastava, "Dynamic fine-grained localization in ad-hoc wireless sensor networks," in Proc. ACM Int. Conf. Mobile Comput. Netw., May 2001, pp. 166–179.
- [47] Z. Xiang, S. Song, J. Chen, H. Wang, J. Huang, and X. Gao, "A wireless LAN-based indoor positioning technology," IBM Journal of Research and Development, vol. 48, no. 5/6, pp. 617–626, Sept./Nov. 2004, [Online]. Available: <http://researchweb.watson.ibm.com/journal/rd/485/xiang.html>
- [48] AeroScout Company. [Online]. Available: <http://www.aeroscout.com/>
- [49] A. Kotanen, M. Hannikainen, H. Leppakoski, and T. D. Hamalainen, "Experiments on local positioning with Bluetooth," in Proc. IEEE Int. Conf. Inf. Technol.: Comput. Commun., Apr. 2003, pp. 297–303.
- [50] J. Werb and C. Lanzl, "Designing a position system finding things and people indoors," IEEE Spectr., vol. 35, no. 9, pp. 71–78, Sep. 1998.
- [51] HP SmartLOCUS. [Online]. Available: <http://www.rfidjournal.com/article/articleview/1211/1/50/>.
- [52] R. Want, A. Hopper, V. Falcao, J. Gibbons., "The Active Badge Location System," ACM Transactions on Information Systems, vol. 40, no. 1, pp. 91-102, January 1992
- [53] A. Schwaighofer, M. Grigoras, V. Tresp, and C. Hoffmann, "GPPS: A Gaussian process positioning system for cellular networks," in Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA: MIT Press, 2004.

- [54] H. Koshima and J. Hoshen, "Personal locator services emerge," *IEEE Spectr.*, vol. 37, no. 2, pp. 41–48, Feb. 2000.
- [55] A. Brooks, A. Makarenko, T. Kaupp, S. Williams, and H. Durrant-Whyte, "Implementation of an indoor active sensor network," in *Proc. 9th Int. Symp. Exp. Robot. 2004*, Singapore, Jun. 18–21, 2004, pp. 37–46.
- [56] ZigBeeTMAlliance. (2004, Dec.). Network specification version 1.0. Tech. Rep. 02130r10 [Online]. Available: <http://www.zigbee.org>
- [57] N. Patwari, A. O. Hero, M. Perkins, N. S. Correal, and R. J. O’Dea, "Relative location estimation in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 51, no. 8, pp. 2137–2148, Aug. 2003.
- [58] J. N. Ash and L. C. Potter, "Sensor network localization via received signal strength measurements with directional antennas," in *Proc. Allerton Conf. Commun., Control, Comput.*, Sep. 2004, pp. 1861–1870.
- [59] A. Harter and A. Hopper, "A Distributed Location System for the Active Office," *IEEE Network*, January 1994.
- [60] R. Azuma, "Tracking Requirements for Augmented Reality," *Communications of the ACM*, vol. 36, no. 7, pp. 50-51, July 1993.
- [61] S. Tekinay, "Wireless Geolocation Systems and Services," *Special Issue of the IEEE Communicarions Magazine*, April 1998.
- [62] T. D. Hodes, R. H. Katz, E. S. Schreiber, and L. Rowe, "Composable Ad Hoc Mobile Services for Universal Interaction," *MobiCom '97 Proceedings*, pp. 1- 12, September 1997.
- [63] T. W. Christ and P. A. Godwin, "A Prison Guard Duress Alarm Location System," *Proc. IEEE International Carnahan Conference on Security Technology*, October 1993.
- [64] S. Y. Seidel and T. S. Rapport, "914 MHz path loss prediction Model for Indoor Wireless Communications in Multi-floored buildings," *IEEE Trans. on Antennas & Propagation*, Feb. 1992.
- [65] Foley, van Dam, Feiner, and Hughes, "Computer Graphics Principles and Practice," 2nd Edition, Addison-Wesley, 1990.
- [66] K. Kaemarungsi, "DESIGN OF INDOOR POSITIONING SYSTEMS BASED ON LOCATION FINGERPRINTING TECHNIQUE," Ph.D. Dissertation, University of Pittsburgh, 2005, available: <http://etd.library.pitt.edu/ETD/available/etd-02232005-235903/unrestricted/dissertation28Feb05.pdf>
- [67] B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems: I. characterization," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, no. 7, pp. 90–100, July 1997.
- [68] Ι.Δ.Κανελλόπουλος, "ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΓΗΙΝΟ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ,” Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2006.

[69] Μ.Ε.Θεολόγου, “ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΩΠΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ,” Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2007.

[70] A. M. Ladd, K. E. Bekris, G. Marceau, A. Rudys, L. E. Kavraki, and D. S. Wallach, “Robotics-based location sensing using wireless ethernet,” in Proc. ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM’02), 2002, pp. 227–238.

[71] T. Cutler, “Wireless Ethernet and how to use it,” The Online Industrial Ethernet Book, Issue 5, 1999.

[72] H. Suzuki, “A Statistical Model for Urban Radio Propagation,” IEEE Transactions on Communications, vol. 25, no. 7, Jul 1977, pp. 673- 680.

[73] F. Vatalaro, “ Generalised Rice-lognormal channel model for wireless communications,” Electronics Letters, vol. 31, no. 22, pp. 1899-1900, 1995.

[74] J. Small, A. Smailagic, and D. P. Siewiorek, “Determining user location for context aware computing through the use of a wireless lan infrastructure,” Online, Dec. 2000, Available: <http://www-2.cs.cmu.edu/~aura/docdir/small00.pdf>

[75] J. Krumm, and E. Horvitz, “LOCADIO: Inferring motion and location from Wi-Fi signal strengths,” in Proc. ACM International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MOBIQUITOUS’04), Boston, MA, Aug. 2004.

[76] B. G. Tabachnick and L. S. Fidell, “Using multivariate statistics,” 3rd ed. NY: Harper Collins, Mar. 1996.

[77] Simon Haykin, “Συστήματα Επικοινωνίας,” Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1995, Μετάφραση: Ε. Δ. Συκάς, Μ. Ε. Θεολόγου.

[78] M. A. Youssef, “HORUS: A WLAN-based indoor location determination system,” Ph.D. dissertation, University of Maryland, College Park, MD, 2004.

[79] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy, “Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting,” in Proc. IEEE INFOCOM 2004, March 7-11, vol. 2, pp. 1012- 1022.

[80] G. M. Djuknic and R. E. Richton, “Geolocation and Assisted GPS,” IEEE Computer, vol. 2, pp. 123–125, Feb. 2001.

[81] Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης, “Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και Στατιστική,” Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1999 (3η έκδοση).

[82] Athanasios Papoulis, S. Unnikrishna Pillai, “Πιθανότητες Τυχαίες Μεταβλητές & Στοχαστικές Διαδικασίες,” Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2007 (4η έκδοση).

- [83] William E. Boyce, Richard C. DiPrima, “Στοιχειώδεις Διαφορικές Εξισώσεις και Προβλήματα Συνοριακών Τιμών,” Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1999.
- [84] Νικόλαος Ι. Θεοδώρου, “Ηλεκτρικές Μετρήσεις, Τεύχος 1: Κλασσικές Μετρήσεις,” Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2004.
- [85] N. Swangmuang and P. Krishnamurthy, “An effective location fingerprint model for wireless indoor localization,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 4, no. 6, December 2008, pp. 836-850.
- [86] G. J.M. Janssen and R. Prasad, “Propagation Measurements in an Indoor Radio Environment at 2.4 GHz, 4.75 GHz and 11.5 GHz,” in *Proc. IEEE VTC*, 1992, pp. 617–620.
- [87] T. S. Rappaport, “Wireless Communications: Principles and Practice,” Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 1996.
- [88] Ν. Καδιανάκης, Σ. Καρανάσιος, “Γραμμική Άλγεβρα Αναλυτική Γεωμετρία και Εφαρμογές,” Ε.Μ.Π., Έκδοση 2η, Αθήνα 2002.
- [89] A. Okabe, B. Boots, K. Sugihara, and S.N. Chiu, “Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams,” 2nd ed., Wiley, NYC, 2000, 671 pages.