



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μέθοδοι επεξεργασίας μη στάσιμων
μεταβατικών σημάτων για τον εντοπισμό
της θέσης επιφανειακών σεισμικών πηγών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννης Α. Θανασόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Αβαριτσιώτης

Αθήνα, Μάρτιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μέθοδοι επεξεργασίας μη στάσιμων μεταβατικών σημάτων για τον εντοπισμό της θέσης επιφανειακών σεισμικών πηγών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννης Α. Θανασόπουλος

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ιωάννης Αβαριτσιώτης

Μιχαήλ Θεολόγου

Μιλτιάδης Αναγνώστου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 31^η Μαρτίου 2011.

.....
Ιωάννης Αβαριτσιώτης
Καθηγητής ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ

.....
Μιλτιάδης Αναγνώστου
Καθηγητής ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ

.....
Πέτρος Μαραγκός
Καθηγητής ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ

.....
Κωνσταντίνος Παπαδουσεύς
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ

.....
Ευστάθιος Συκάς
Καθηγητής ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Σταμούλης
Καθηγητής ΤΜΗΥΤΔ ΠΘ

Αθήνα, Μάρτιος 2011

.....
Ιωάννης Α. Θανασόπουλος

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

Copyright © Ιωάννης Α. Θανασόπουλος 2011.

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.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής, σηματοδοτώντας το κλείσιμο ενός κύκλου που διαμόρφωσε όχι μόνο τις ικανότητες και τις γνώσεις μου ως μηχανικού, αλλά και σε μεγάλο βαθμό τον χαρακτήρα μου, μου δίνει το προνόμιο να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους ανθρώπους που συνέβαλαν και με στήριξαν στη μέχρι σήμερα πορεία μου.

Ιδιαίτερα θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αβαριτσιώτη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ ερευνητικά σε ένα θέμα που, παρέχοντας ένα γόνιμο και ενδιαφέρον επιστημονικά έδαφος, με ώθησε να διευρύνω τις θεωρητικές μου γνώσεις και να αναπτύξω τις δεξιότητές μου στην επίλυση επιστημονικών και πρακτικών προβλημάτων. Αν, σε κάποιο βαθμό, κατάφερα να σταθώ αντάξιος του τίτλου που μου δίνεται με την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής, το οφείλω κατά κύριο λόγο στην καθοδήγησή του και τη στήριξη που μου παρείχε αυτά τα χρόνια. Για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτωντάς μου καθήκοντα στο ερευνητικό και εκπαιδευτικό έργο του εργαστηρίου Αισθητήρων και Μικροηλεκτρονικής, νιώθω απεριόριστη τιμή και ευγνωμοσύνη.

Στους συναδέλφους μου, Δρ. Μαζαράκη Γιώργο και Δρ. Κόλλια Θανάση εκφράζω τις φιλικές μου ευχαριστίες για τη συνεργασία μας, για τη συνεχόμενη στήριξη που μου παρείχαν εντός και εκτός εργαστηρίου και για τις ιδέες που προέκυψαν από τις συζητήσεις μας, οι οποίες διαμόρφωσαν σημαντικά το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Απόστολο Ψαρρό για την ανεξάντλητη υπομονή του και τη σημαντική του συμβολή στην επίλυση των πρακτικών και τεχνικών προβλημάτων που προέκυψαν κατά το στήσιμο και το σχεδιασμό των πειραματικών μου διατάξεων.

Στους φίλους μου, Ροδιά, Γιώργο, Μαριάντζελα και Νίκο οφείλω τις ευχαριστίες μου για τους πιο ευχάριστους και γόνιμους αντιπερισπασμούς που μου προσέφεραν, για την αμέριστη συμπαράστασή τους και για τη συγκινητική υπομονή που έδειξαν και συνεχίζουν να δείχνουν απέναντι στα ελαττώματα του χαρακτήρα μου.

Στην οικογένειά μου, τους γονείς μου και την αδερφή μου, αφιερώνω αυτή την εργασία, μαζί με τα πιο ειλικρινή αισθήματα ευγνωμοσύνης, ελπίζοντας να αντισταθμίζω με αυτόν τον τρόπο την αδεξιότητά μου να εκφράζω καθημερινά πόσο τυχερός αισθάνομαι που είναι δίπλα μου.

Τέλος, σε όλα τα σχέδια που ποτέ δεν βγαίνουν ακριβώς όπως τα υπολογίζεις, στην καθυστερημένη αλληλογραφία, στις λάθος διεθύνσεις, στους ελαττωματικούς εξοπλισμούς, στα bugs που έλυσα και αυτά που δεν θα καταλάβω ποτέ από πού εμφανίστηκαν δηλώνω έτοιμος, αν και όχι αλώβητος, να τα αντιμετωπίσω για το υπόλοιπο της σταδιοδρομίας μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο του εντοπισμού της θέσης μιας πηγής σημάτων με τη χρήση μιας διάταξης αισθητήρων είναι ένα πεδίο με πολυάριθμες εφαρμογές που ποικίλουν, τόσο ανάλογα με το είδος του σήματος όσο και με τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τις συνθήκες της εφαρμογής. Οι συνθήκες αυτές συνήθως αφορούν το μέσο διάδοσης και τις υπολογιστικές δυνατότητες του συστήματος που πρόκειται να υλοποιηθεί. Οι ραγδαίες εξελίξεις στην τεχνολογία των μικροσυστημάτων, ανοίγουν ολοένα και περισσότερο το δρόμο για τη χρήση νέων αισθητήρων στη θέση των πιο κλασικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες σε ανάλογες εφαρμογές. Παράλληλα, η αναπτυσσόμενη τεχνολογία των δικτύων αισθητήρων έχει οδηγήσει σε αυξανόμενο ενδιαφέρον για εφαρμογές διάχυτου υπολογισμού, οι οποίες βασίζονται στη χρήση αλγορίθμων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας που εφαρμόζονται σε αυτόνομους κόμβους που επικοινωνούν μεταξύ τους.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στην ανίχνευση και τον εντοπισμό της πηγής κρουστικών σεισμικών σημάτων που διαδίδονται στην επιφάνεια σκεδαστικών υλικών μέσων με τη χρήση διατάξεων αισθητήρων επιτάχυνσης. Αρχικά, μελετώνται οι αρχές της διάδοσης των κρουστικών σημάτων σε στερεό μέσο, τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά. Με βάση τη στατιστική ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων επιβεβαιώνεται η επίδραση της σκέδασης κατά τη διάδοση, η οποία προκαλεί χαμηλή ετεροσυσχέτιση μεταξύ των σημάτων που καταγράφονται από κόμβους σε διαφορετικές θέσεις. Μια εκτενής ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας για το πρόβλημα του εντοπισμού της θέσης μιας πηγής σημάτων αποδεικνύει ότι το ζήτημα εξετάζεται κατά κύριο λόγο από τη σκοπιά της ακουστικής διάδοσης και πολύ λιγότερο από αυτή των σεισμικών σημάτων. Κατά συνέπεια, ο κύριος όγκος της βιβλιογραφίας χρησιμοποιεί μεθόδους οι οποίες είτε προϋποθέτουν σημαντική συσχέτιση μεταξύ των σημάτων, από την οποία υπολογίζονται οι διαφορές στον χρόνο άφιξης (Time Differences of Arrival, TDOA) είτε απαιτούν την εκ των προτέρων γνώση κάποιων χαρακτηριστικών παραμέτρων των σημάτων στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας προκειμένου να υπολογιστεί ο χρόνος άφιξης (Time of Arrival, TOA) του σήματος σε καθέναν από τους κόμβους της διάταξης. Στην παρούσα διατριβή, δεδομένου του προβλήματος της χαμηλής ετεροσυσχέτισης λόγω της σεισμικής διάδοσης, προτείνονται δύο μέθοδοι για την ακριβή εκτίμηση του TOA οι οποίες, σε αντίθεση με τις ήδη υπάρχουσες μεθόδους, δεν χρησιμοποιούν κάποιο γνωστό μοντέλο για τα διαδιδόμενα σήματα, αλλά εξάγουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά του σήματος σε πραγματικό χρόνο αναλύοντάς τα με τον μετασχηματισμό Wavelet.

Μια περιεκτική εισαγωγή στον μετασχηματισμό Wavelet αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα της πολυδιαχωριστικής ανάλυσης των σημάτων και αποδεικνύει την καταλληλότητα της μεθόδου για την εφαρμογή σε μεταβατικά μη στάσιμα σήματα, όπως αυτά που προκαλούνται από την κρουστική διέγερση κάποιου υλικού μέσου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα πλεονεκτήματα της μητρικής συνάρτησης Haar, η οποία αποτελεί την πλέον απλή συνάρτηση wavelet, άρα και την πλέον ενεργειακά οικονομική, ενώ παράλληλα η υψηλή διακριτική ικανότητα που προσφέρει στο πεδίο του χρόνου την καθιστά ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν τον εντοπισμό απότομων αλλαγών στην ενέργεια του σήματος.

Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων γίνεται με τη χρήση του διακριτού μετασχηματισμού wavelet προκειμένου να ανιχνευθούν τα σεισμικά γεγονότα σε θορυβώδες περιβάλλον. Αρχικά, οι προτεινόμενες μέθοδοι περιλαμβάνουν την

ανάλυση του σήματος στο wavelet πεδίο, από την οποία εξάγονται τα χαρακτηριστικά του στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας. Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, το καταγεγραμμένο σήμα κατηγοριοποιείται ως πραγματικό σεισμικό γεγονός ή απορρίπτεται ως τυχαία διακύμανση στο πλάτος, λόγω του θορύβου. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ανίχνευσης σεισμικών γεγονότων ελέγχεται ως προς την αποτελεσματικότητά του με εκτεταμένες πειραματικές μετρήσεις, ενώ με την βοήθεια προγράμματος προσομοίωσης που αναπτύχθηκε για τους σκοπούς της διατριβής υπολογίζεται η απόδοση κατά Bayes της μεθόδου για συγκεκριμένο σενάριο διεγέρσεων του σεισμικού μέσου προκαλούμενων από ανθρώπινο βηματισμό.

Ο ακριβής εντοπισμός του TOA γίνεται με την περαιτέρω ανάλυση των σεισμικών γεγονότων, χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές παραμέτρους που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα. Στο στάδιο αυτό, τα σήματα αναλύονται στην πρώτη μέθοδο με τον διακριτό μετασχηματισμό wavelet και στη δεύτερη με τον μετασχηματισμό wavelet packet, ο οποίος προσφέρει αυξημένη διακριτική ικανότητα στο πεδίο της συχνότητας με αυξημένο ενεργειακό κόστος. Οι δύο μέθοδοι συγκρίνονται ως προς την αποτελεσματικότητά τους με τη χρήση πειραματικών και προσομοιωμένων δεδομένων. Επιπλέον, τα TOA που υπολογίζονται σε κάθε περίπτωση εισάγονται σε αλγόριθμο υπερβολικού εντοπισμού της θέσης της πηγής. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την καταλληλότητα των προτεινόμενων μεθόδων για εφαρμογές εντοπισμού της θέσης επιφανειακών σεισμικών πηγών σε σκεδαστικό περιβάλλον όπου δεν είναι δυνατή η εκ των προτέρων γνώση για τα χαρακτηριστικά των σημάτων, ενώ η σύγκριση με τα αποτελέσματα άλλων τεχνικών επιβεβαιώνει τη χρησιμότητα και τα πλεονεκτήματα των προτεινόμενων μεθόδων.

Η διατριβή ολοκληρώνεται με τη μελέτη της επίδρασης που έχουν στα τελικά αποτελέσματα εντοπισμού συγκεκριμένοι παράγοντες που αφορούν τα χαρακτηριστικά της διάταξης αισθητήρων. Με τη βοήθεια κατάλληλα σχεδιασμένων προσομοιώσεων εξάγονται αποτελέσματα για συμμετρικές ή τυχαίες διατάξεις, για διαφορετικό πλήθος και για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των αισθητήρων.

Συνοπτικά, η καινοτομία και η προσφορά της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτυπώνεται στα εξής σημεία:

- Ανάπτυξη μεθόδου ανίχνευσης μεταβατικών σεισμικών γεγονότων σε θορυβώδες περιβάλλον με τη χρήση του διακριτού μετασχηματισμού wavelet.
- Ανάπτυξη μεθόδων βασιζόμενων στους μετασχηματισμούς wavelet και wavelet packet για τον ακριβή εντοπισμό του TOA σε σήματα με άγνωστα χαρακτηριστικά στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.
- Εντοπισμός της θέσης επιφανειακής σεισμικής πηγής σε σκεδαστικό περιβάλλον με μη συσχετιζόμενα σήματα, με τη χρήση ανεπιτήρητης διάταξης αισθητήρων εδάφους.
- Ανάλυση της τοπολογίας της διάταξης αισθητήρων με τη χρήση ειδικά σχεδιασμένου προγράμματος προσομοίωσης.

Λέξεις κλειδιά: Διατάξεις αισθητήρων, σεισμική διάδοση, πολυδιαχωριστική ανάλυση, διακριτός μετασχηματισμός wavelet, μετασχηματισμός wavelet packet, σεισμική ανίχνευση, TOA, εντοπισμός θέσης πηγής σημάτων, ανεπιτήρητα δίκτυα αισθητήρων εδάφους.

ABSTRACT

Source localization with the use of a sensor array is a field with numerous applications, which vary according to the signal's nature as well as to the limitations posed by each application's specifications. Those are usually defined by the nature of the propagation medium and the computational requirements of the system. Rapid developments in the field of microsystems allow all the more the use of novel sensor technologies instead of the classic elements which have been in use for decades. Concurrently, advances in the technology of sensor networks has significantly increased the industry's interest towards the concept of ubiquitous computing, which requires the development of new, low-energy consumption algorithms, suitable to implement on autonomous sensor nodes, able to communicate independently with each other.

The scope of the present thesis is focused on the detection of impulsive seismic events and the localization of their source, as the signals propagate in the surface of dispersive media, with the use of arrays of accelerometers. First, the theoretical background of seismic propagation is studied and its effect on the propagating signal is experimentally evaluated. The statistical analysis of experimental data corroborates the effect of dispersion on the signal during its propagation, which causes low cross-correlation between seismic events recorded from spatially separated sensor nodes. A thorough examination of the existing literature on the issue of source localization reveals that the problem is more often addressed from the scope of acoustic propagation and not as adequately for seismic signals. As a result, a great deal of research is focused on methods that either presume significant correlation between signals and utilize a cross-correlation function to estimate the differences in times of arrival (TDOA) between the nodes of the sensor array, or require some a priori knowledge of the signal's features in time and/or frequency domain in order to yield an estimation of the signal's time of arrival (TOA) at each separate node. In the present thesis, as low correlation has been proven to be a fact in experimental data due to the seismic propagation, a different approach is proposed. Two wavelet based methods are developed that, contrary to the existing techniques, do not require an explicit signal model nor do they rely on coherence between received signals at multiple sensors, but instead they extract the signal's features in the wavelet domain upon the signal's acquisition and based on them they accurately estimate the TOA.

A comprehensive introduction to the wavelet transform reveals the merits of multiresolution signal analysis and proves the method's superiority in dealing with transient nonstationary signals, such as those caused by the impulsive excitation of a solid medium. In particular, the advantages of the Haar mother wavelet are stressed for its suitability in detecting abrupt variations in a signal's energy due to its high resolution in time domain, while its simple mathematical expression makes it ideal for energy-aware applications.

The discrete wavelet transform (DWT) is used for the detection of seismic events in high-noise environment. First, both proposed methods incorporate analysis of the signal in order to extract some features in the wavelet domain which are then transformed in time and frequency domain features. Based on these features, the recorded signal is classified as an actual seismic event of interest or discarded as a spurious noise event. The performance of the detection algorithm is evaluated with extensive experimental tests as well as with simulated data. A specifically designed simulation program tests the algorithm's Bayesian performance in a scenario of

human footstep-induced impulsive excitations on the ground surface and demonstrates the method's suitability for applications of unattended ground sensor networks.

The accurate estimation of TOA is accomplished by further analyzing the recorded seismic event and using for this purpose the features extracted by the detection algorithm. At this stage, the signals are analyzed in the first proposed method with the discrete wavelet transform and in the second with the packet wavelet transform, which provides increased resolution in frequency domain at the expense of excess computational burden. The two methods are compared regarding their accuracy in TOA estimation using experimental and simulated data. Additionally, the estimated TOA are used as inputs in an algorithm for hyperbolic source localization and the methods' suitability for localization purposes is tested. The results prove the accuracy of the proposed methods and comparison to other techniques for TOA estimation show their advantages in applications of source localization in dispersive environments where a priori knowledge of the signal's features is not possible, as is the case with unattended ground sensor networks.

The thesis concludes with a study on the effect of specific parameters of a sensor array on the accuracy of source localization. With the use of a simulation program, designed for that purpose, several results are presented for varying topologies of sensor arrays, taking into account factors such as the number of deployed sensors, the distance between them and the symmetry of the array or the absence of it.

Conclusively, the novelty and contribution of the present thesis is summarized in the following points:

- Development of a discrete wavelet transform based method for transient seismic event detection in high noise environment.
- Development of methods for accurate TOA estimation with the use of the discrete and the wavelet packet transforms, for unknown signals.
- Source localization in dispersive environments with uncorrelated signals, with the use of an unattended ground sensor array.
- Analysis of the effect of an array's topology on the accuracy of localization with the use of a specifically designed simulation program.

Keywords: Sensor arrays, seismic propagation, multiresolution analysis, discrete wavelet transform, wavelet packet transform, seismic detection, TOA, source localization, unattended ground sensor networks.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ABSTRACT	viii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	x
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	xiv
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	xvii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2. ΣΚΟΠΟΙ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ.....	2
1.3. ΔΟΜΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΙΑΔΟΣΗ & ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ 7	
2.1. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	7
2.1.1. <i>Κύματα χώρου</i>	7
2.1.1.1. Κύματα P	7
2.1.1.2. Κύματα S.....	8
2.1.2. <i>Επιφανειακά κύματα</i>	8
2.1.2.1.Κύματα Rayleigh	9
2.1.2.2. Κύματα Love	10
2.2. ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	10
2.2.1. <i>Απόσβεση</i>	10
2.2.1.1. Γεωμετρική εξασθένιση	11
2.2.1.2. Απόσβεση υλικού	11
2.3. ΣΕΙΣΜΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	13
2.4. ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΝΑΛΥΣΗ & ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ	
ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ	19
3.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	19
3.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ.....	20
3.3. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΤΕΡΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗ.....	22

3.4. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΟΡΥΒΟΥ	25
3.4.1. Λευκός Θόρυβος	25
3.4.2. Έλεγχος αυτοσυσχέτισης	26
3.4.3. Έλεγχος κανονικής κατανομής.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕ WAVELETS	31
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ WAVELETS	31
4.1.1. Αναπαράσταση συνεχών συναρτήσεων στον wavelet χώρο	32
4.2. ΟΙ ΔΙΑΚΡΙΤΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ WAVELET ΚΑΙ WAVELET PACKET.....	34
4.2.1. Διακριτοποίηση των παραμέτρων διαστολής και μετατόπισης	34
4.2.2. Πολυδιαχωριστική ανάλυση	35
4.2.3. Αλγόριθμος διακριτού μετασχηματισμού wavelet	37
4.2.4. Αλγόριθμος διακριτού μετασχηματισμού πακέτων wavelet	39
4.3. ΤΟ WAVELET HAAR	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ	43
5.1. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ DWT ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ.....	43
5.1.1. Ανίχνευση πιθανών σεισμικών γεγονότων και υπολογισμός βέλτιστων παραμέτρων του DWT.....	44
5.1.2. Κατωφλίωση των συντελεστών wavelet.	46
5.1.3. Κατηγοριοποίηση ανιχνευμένου γεγονότος.....	49
5.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ.....	52
5.2.1. Πειραματικά αποτελέσματα	52
5.2.2. Αποτελέσματα προσομοιώσεων	53
5.3. ΥΠΟΘΕΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΒΗΜΑΤΙΣΜΟΥ	55
5.3.1. Θεωρία αποφάσεων του Bayes	55
5.3.2. Χαρακτηριστικά προσομοίωσης και αποτελέσματα	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	61
6.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	61
6.2. ΥΠΕΡΒΟΛΙΚΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΠΗΓΗΣ	62

6.2.1. Γενική περίπτωση	62
6.2.2. Διάδοση με άγνωστη ταχύτητα.....	65
6.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ.....	70
6.4. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ DWT ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΤΟΑ	73
6.5. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ WPT ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΤΟΑ	76
6.5.1. Επιλογή βέλτιστης βάσης και καταωφλίωση των συντελεστών	77
6.5.2. Μέθοδος εντοπισμού του ΤΟΑ	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	82
7.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	82
7.1.1. Κόμβοι αισθητήρων.....	83
7.1.2. Σύστημα καταγραφής σημάτων	84
7.1.3. Τοπολογία διάταξης	84
7.2. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.....	84
7.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΤΟΑ	86
7.3.1. Αποτελέσματα προσομοιώσεων	87
7.3.2. Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων.....	89
7.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ	93
7.4.1. Απόσταση μεταξύ αισθητήρων.....	94
7.4.2. Πλήθος αισθητήρων σε συμμετρικές τοπολογίες	97
7.4.3. Πλήθος αισθητήρων σε τυχαίες τοπολογίες	99
7.5. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	102
8.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	102
8.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	104
8.2.1. Εντοπισμός πολλαπλών πηγών	105
8.2.2. Ενεργειακή βελτιστοποίηση	106
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	108

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ 108

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ..... 108**

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Τα κύματα χώρου: Πρωτεύοντα (πάνω) και δευτερεύοντα (κάτω) .	8
Εικόνα 2 Μοντέλο διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.	9
Εικόνα 3 Μοντέλο διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων Love.	10
Εικόνα 4 Γεώφωνο.....	14
Εικόνα 5 Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο	15
Εικόνα 6 Μοντέλο λειτουργίας του χωρητικού επιταχυνσιομέτρου ADXL05	16
Εικόνα 7 Η κρουστική συνάρτηση και ο μετασχηματισμός της κατά Fourier	17
Εικόνα 8 Διάδοση και καταγραφή μιας κρουστικής σεισμικής διέγερσης	18
Εικόνα 9 Δύο καταγραφές μιας κρουστικής διέγερσης από τον ίδιο αισθητήρα. Πάνω: σε μαλακό χώμα. Κάτω: σε τοιμέντο	21
Εικόνα 10 Μια σεισμική διέγερση όπως καταγράφηκε από έξι αισθητήρες σε διαφορετικές θέσεις.....	23
Εικόνα 11 Φασματική πυκνότητα ισχύος για μια κρουστική διέγερση όπως καταγράφηκε από δύο αισθητήρες με διαφορετική απόσταση από την πηγή: (α) σε τοιμέντο (β) σε χώμα.....	24
Εικόνα 12 Καταγραφή 1024 δειγμάτων θορύβου	27
Εικόνα 13 (α) Αυτοσυσχέτιση για ένα τυχαίο παράθυρο θορύβου 256 σημείων (β) Μέσος όρος αυτοσυσχέτισης για 10 παράθυρα θορύβου 256 σημείων.	28
Εικόνα 14 Ιστόγραμμα των τιμών του πλάτους του καταγεγραμμένου θορύβου σε σχέση με την κανονική κατανομή με την ίδια μέση τιμή και τυπική απόκλιση.	29
Εικόνα 15 Μια ημιτονική συνάρτηση (αριστερά) και ένα κυματίδιο της οικογένειας Daubechies.....	32
Εικόνα 16 (α) Αλγόριθμος ανάλυσης ενός διακριτού σήματος $x(n)$ με τον DWT (β) Ανσύνθεση του σήματος από τους συντελεστές wavelet με τον αντίστροφο DWT.....	38
Εικόνα 17 Ανάλυση του σήματος $x(n)$ με τον WPT μέχρι την κλίμακα j	40
Εικόνα 18 Η συνάρτηση κλιμάκωσης και η μητρική συνάρτηση για το wavelet Haar, σε διαφορετικές κλίμακες και μετατοπίσεις.....	41

Εικόνα 19 Παράδειγμα καταγεγραμμένου σήματος από ένα κανάλι, όπου φαίνεται στην περιοχή A ο θόρυβος του περιβάλλοντος και στην περιοχή B ένα από τα τέσσερα καταγεγραμμένα σεισμικά γεγονότα.....	44
Εικόνα 20 Αποθορυβοποίηση ενός παραθύρου που περιέχει σεισμικό γεγονός με τρεις διαφορετικές μεθόδους.....	49
Εικόνα 21 Η διακύμανση των συντελεστών λεπτομέρειας σε κάθε κλίμακα για ένα σήμα με SNR 10dB (πάνω) και ένα με SNR 25dB (κάτω) σε σχέση με τις διακυμάνσεις του θορύβου. Η κεντρική κλίμακα, όπως καθορίστηκε αλγοριθμικά, υποδεικνύεται με τη σκιασμένη περιοχή.....	50
Εικόνα 22 ROC καμπύλες για την ανίχνευση σεισμικών γεγονότων με την μέθοδο του προσαρμοζόμενου κατωφλίου και του κατωφλίου S-median. Η ισχύς του θορύβου διατηρείται σταθερή στα 5 dB και μεταβάλλονται οι ρυθμιστικοί συντελεστές a και b	54
Εικόνα 23 Οι πιθανότητες εσφαλμένων ανιχνεύσεων ανθρώπινου βηματισμού για τις τρεις μεθόδους κατωφλίωσης των συντελεστών wavelet με την προτεινόμενη μέθοδο ανίχνευσης	58
Εικόνα 24 Υπερβολικός εντοπισμός της θέσης μιας πηγής σήματος από μια διάταξη τριών αισθητήρων. Η επίλυση του αλγεβρικού συστήματος δίνει περισσότερες από μια λύσεις και συνεπώς απαιτείται και τέταρτος αισθητήρας για την οριστική λύση.....	64
Εικόνα 25 Τα σφάλματα στις εκτιμήσεις των TDOA του παραδείγματος της Εικόνας 15 έχουν ως αποτέλεσμα η εκτιμώμενη θέση της πηγής να προκύπτει ως η σκιασμένη περιοχή αντί ενός μοναδικού σημείου.....	65
Εικόνα 26 Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό του TDOA με τη μέθοδο της γενικευμένης συσχέτισης.....	71
Εικόνα 27 Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης με προσαρμοζόμενο φίλτρο.....	72
Εικόνα 28 Η διαδικασία καθορισμού του TOA. Κάθε διάγραμμα δείχνει τους συντελεστές της αντίστοιχης κλίμακας μετά την εφαρμογή των κατωφλίων. Οι σκιασμένες περιοχές αντιστοιχούν στην περιοχή στην οποία αναζητείται κάθε φορά το TOA.....	74
Εικόνα 29 (α) Ένα παράδειγμα βέλτιστης αναπαράστασης ενός σεισμικού γεγονότος με τον WPT. Ο κόμβος (3,4) του δέντρου περιέχει τους συντελεστές με τη μέγιστη ενέργεια. Το τονισμένο μονοπάτι δείχνει τους κόμβους που	

χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του ΤΟΑ. (b) Το 256 δειγμάτων παράθυρο που αναλύεται στο (a).....	79
Εικόνα 30 Διαδικασία αναζήτησης του ΤΟΑ στο δέντρο της Εικόνας 23. Οι κάθετες γραμμές υποδεικνύουν το δείγμα άφιξης όπως ανιχνεύθηκε αλγοριθμικά σε κάθε πακέτο wavelet. Οι σκιασμένες περιοχές είναι τα διαστήματα αναζήτησης που καθορίζονται από τη θέση του $x_{o(i,j)}$ του προηγούμενου κλάδου και το σημείο x_o στον κόμβο (0,0) είναι το τελικό ΤΟΑ.	80
Εικόνα 31 (α) Ένας κόμβος αισθητήρα, στον οποίο σημειώνονται τα διάφορα στοιχεία που τον απαρτίζουν (β) Η πάκτωση του κόμβου στο έδαφος επιτυγχάνεται με ένα καρφί το οποίο βιδώνεται σε υpat μέχρι το κάτω μέρος του περιβλήματος να εφάπτεται με την επιφάνεια του εδάφους.....	83
Εικόνα 32 (α) Η διάταξη που υλοποιήθηκε για την καταγραφή των σημάτων. Κάθε κύκλος αντιστοιχεί στη θέση ενός κόμβου. Οι διακεκομμένες γραμμές r_i , $i=1,\dots,6$ δείχνουν την απόσταση κάθε αισθητήρα από την πηγή. (β) Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης. Οι κύκλοι αντιστοιχούν στις θέσεις των κόμβων.....	85
Εικόνα 33 RMS σφάλματα στον υπολογισμό της απόστασης της πηγής με τη χρήση των προτεινόμενων μεθόδων σε προσομοιωμένα δεδομένα.....	89
Εικόνα 34 RMS σφάλματα στον υπολογισμό της γωνίας άφιξης του σήματος με τη χρήση των προτεινόμενων μεθόδων σε προσομοιωμένα δεδομένα.	89
Εικόνα 35 Πειραματικά αποτελέσματα εντοπισμού θέσης για τη μέθοδο DWT με τις τρεις διαφορετικές μεθόδους κατωφλίωσης.	1
Εικόνα 36 Αποτελέσματα εντοπισμού της πηγής κρουστικών σεισμικών γεγονότων σε διαφορετικές θέσεις με τρεις μεθόδους: (i) WPT, (ii) DWT με προσαρμοζόμενη κατωφλίωση και (iii) απλό κατώφλι.....	92
Εικόνα 37 Εκτιμήσεις της θέσης στόχου που κινείται σε κυκλική τροχιά ακτίνας r γύρω από τη διάταξη αισθητήρων. Η ακτίνα της διάταξης παίρνει τις τιμές $\rho = 3, 5, 7m$	96
Εικόνα 38 Σφάλματα των εκτιμήσεων της απόστασης της πηγής συναρτήσει της γωνίας άφιξης για τρεις διαφορετικές, συμμετρικές τοπολογίες: (α) 5 αισθητήρες, (β) 6 αισθητήρες, (γ) 7 αισθητήρες	98
Εικόνα 39 Σφάλμα στην εκτίμηση της θέσης της πηγής συναρτήσει του πλήθους των αισθητήρων σε τυχαία τοπολογία	99

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Φυσικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την απόδοση των μεθόδων εντοπισμού θέσης	2
Πίνακας 2 Τιμές του συντελεστή εξασθένισης για διάφορες πηγές	11
Πίνακας 3 Τιμές απόσβεσης πλάτους σε σχέση με την απόσταση για διαφορετικούς τύπους εδάφους	12
Πίνακας 4 Μεταβολή στατιστικών χαρακτηριστικών των σημάτων σε σχέση με τον χρόνο.....	22
Πίνακας 5 Οι συντελεστές ετεροσυσχέτισης μεταξύ των σημάτων της Εικόνας 10.....	24
Πίνακας 6 Έλεγχος Kolmogorov-Smirnov του καταγεγραμμένου θορύβου για κανονική κατανομή	29
Πίνακας 7 Αποτελέσματα ανίχνευσης σεισμικών γεγονότων για τις υλοποιημένες μεθόδους κατωφλίωσης.	52
Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά ανθρώπινου βαδίσματος	57
Πίνακας 9 Αντιστοίχιση ανάμεσα στη διασπορά του προστιθέμενου θορύβου και το SNR σε κάθε κόμβο.....	88
Πίνακας 10 Τα σφάλματα των εκτιμήσεων των προτεινόμενων μεθόδων όπως προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις.....	93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η σχεδίαση συστημάτων για τον εντοπισμό της θέσης μιας πηγής σημάτων αποτελεί ειδικό αντικείμενο έρευνας που εντάσσεται στον τομέα της επεξεργασίας σήματος. Ο εντοπισμός της πηγής ενός σήματος είναι ένα πρόβλημα ιδιαίτερα διαδεδομένο σε εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας, GPS (Global positioning systems), radar και sonar [1]-[6]. Ωστόσο, οι σύγχρονες εξελίξεις στον τομέα των μικροσυστημάτων, και ιδιαίτερα η ανάπτυξη MEMS (Microelectromechanical Systems) αισθητήρων με χαρακτηριστικά που ανταγωνίζονται ή και ξεπερνούν αυτά των κλασσικών παθητικών στοιχείων, ανοίγει νέους δρόμους σε ποικίλες εφαρμογές που χρησιμοποιούν παθητικά αισθητήρια στοιχεία [7]-[9]. Ο ακουστικός εντοπισμός πηγής με τη χρήση μικροφώνων είναι ένα πεδίο βρίσκει ήδη εφαρμογές σε πολλούς και διαφορετικούς τομείς, όπως είναι η ρομποτική [10], η τηλεσυνδιάσκεψη [11]-[13] και η ανίχνευση και κατηγοριοποίηση κινούμενων οχημάτων και προσωπικού [14]-[18]. Ιδιαίτερα στην τελευταία περίπτωση το ολόένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για υλοποίηση ανεπιτήρητων δικτύων αισθητήρων εδάφους (Unattended Ground Sensor Networks, UGSN), σε συνδυασμό με την ανάπτυξη ιδιαίτερα ευαίσθητων σεισμικών μικροαισθητήρων, καθιστούν τον εντοπισμό επιφανειακών σεισμικών πηγών ένα σημαντικό πεδίο έρευνας [19]-[22].

Στην παρούσα διατριβή, εξετάζεται το πρόβλημα του εντοπισμού σεισμικών πηγών με τη χρήση μιας διάταξης αισθητήρων εδάφους. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην περίπτωση της διάδοσης των σημάτων σε σκεδαστικά περιβάλλοντα και προτείνονται μέθοδοι επεξεργασίας των σημάτων για την αντιμετώπιση των ιδιαίτερων προβλημάτων που ανακύπτουν από τη σεισμική διάδοση. Περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις που υλοποιήθηκαν προκειμένου να δοκιμαστούν οι προτεινόμενες μέθοδοι και να αναδειχθούν τα προβλήματα που θα πρέπει να λάβει υπόψη ο μηχανικός κατά τη σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος.

1.2. ΣΚΟΠΟΙ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Οι σεισμικές και οι ακουστικές πηγές σημάτων, αν και παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες, φέρουν επίσης σημαντικές διαφορές, γεγονός που καθιστά πολλές από τις μεθόδους επεξεργασίας ακουστικών σημάτων ανεφάρμοστες στην περίπτωση των σεισμικών.

Το κοινό χαρακτηριστικό ανάμεσα στα ακουστικά και τα σεισμικά σήματα που τα διαφοροποιεί σε σχέση με τα ραδιοσήματα είναι το μεγάλο εύρος ζώνης τους. Τα ραδιοσήματα στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν μικρό εύρος ζώνης, καθώς ο λόγος της μεγαλύτερης συχνότητας προς τη μικρότερη πλησιάζει τη μονάδα (πχ. ο λόγος για ένα ασύρματο LAN 802.11b ISM είναι $2.4835 \text{ GHz}/2\text{GHz} = 1.03$). Αντίθετα, στην περίπτωση των ακουστικών και σεισμικών σημάτων ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη συχνότητα μπορεί να φτάσει μέχρι 100 [23]. Οι μέθοδοι επεξεργασίας ευρυζωνικών σημάτων διαφέρουν πολύ από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για στενοζωνικά σήματα, οι οποίες δεν αποτελούν αντικείμενο αυτής της εργασίας.

Μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στα ακουστικά και τα σεισμικά σήματα είναι ότι στην πρώτη περίπτωση η ταχύτητα διάδοσης θεωρείται γνωστή, ενώ αντίθετα στα σεισμικά σήματα, η ταχύτητα διάδοσης διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του υλικού διάδοσης. Επιπλέον, η σεισμική διάδοση, ακόμα και στο κοντινό πεδίο προκαλεί σημαντική εξασθένιση στα σήματα, η οποία μάλιστα εξαρτάται από τη συχνότητα, με αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει σημαντικά αλλοιωμένο στους διαφορετικούς κόμβους της διάταξης. Στην ακουστική διάδοση, αντίθετα, στις περισσότερες περιπτώσεις,

Πίνακας 1 Φυσικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την απόδοση των μεθόδων εντοπισμού θέσης

Φυσικά χαρακτηριστικά

1. Είδος πηγής (ακουστική, σεισμική, RF)
 2. Στενοζωνικό ή ευρυζωνικό σήμα
 3. Μετρήσεις στο κοντινό ή το μακρινό πεδίο
 4. Γνωστή ή άγνωστη ταχύτητα διάδοσης
 5. Σκεδαστικό ή μη σκεδαστικό μέσο διάδοσης
 6. Μία ή πολλαπλές πηγές.
-

είναι ασφαλής η υπόθεση ότι το σήμα δεν έχει υποστεί σημαντική εξασθένιση και συνεπώς τα σήματα που φτάνουν σε διαφορετικούς κόμβους εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση μεταξύ τους.

Στον Πίνακα 1 συνοψίζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των πηγών και του τρόπου διάδοσης, τα οποία είναι έξω από τον έλεγχο του σχεδιαστή ενός συστήματος, ωστόσο καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την αποτελεσματικότητα των μεθόδων επεξεργασίας σήματος που θα εφαρμοστούν.

Η περίπτωση του σεισμικού εντοπισμού είναι ένα πεδίο που αρκετά συχνά ταυτίζεται με τον ακουστικό εντοπισμό, καθώς είναι λίγες οι εργασίες που εξετάζουν μεμονωμένα την περίπτωση της σεισμικής διάδοσης. Ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα στην περίπτωση του σεισμικού εντοπισμού είναι τα έντονα σκεδαστικά μέσα, τα οποία αλλοιώνουν τα σήματα καθώς διαδίδονται μακριά από την πηγή. Σκοπός της συγκεκριμένης διατριβής είναι να εξετάσει σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο τα ζητήματα που αφορούν τον εντοπισμό επιφανειακών σεισμικών πηγών. Συγκεκριμένα εξετάζονται κρουστικές διεγέρσεις, οι οποίες μοντελοποιούν κάποια από τα συχνότερα σεισμικά σήματα που απαντώνται σε εφαρμογές επίβλεψης χώρων, (ανθρώπινος βηματισμός, εκρήξεις κλπ). Στα ίδια πλαίσια, πρόκειται να προταθούν λύσεις σε προβλήματα που οι υπάρχουσες μέθοδοι δεν αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά καθώς δε λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες της σεισμικής διάδοσης, και να αποδειχθεί η καταλληλότητά τους με ειδικά σχεδιασμένα πειράματα και προσομοιώσεις.

1.3. ΔΟΜΗ

Η σύντομη αυτή εισαγωγή αποτελεί το πρώτο μέρος της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια περιγραφή του τρόπου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και των φυσικών νόμων που διέπουν το φαινόμενο. Περιγράφεται το φαινόμενο της απόσβεσης – γεωμετρικής και υλικού - ενός σεισμικού κύματος κατά τη διάδοσή του στο έδαφος και παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών απόσβεσης για διαφορετικά υλικά, όπως είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία. Επιπλέον παρουσιάζονται οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές καταγραφής

σεισμικών σημάτων, δίνοντας έμφαση σε εκείνα τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος, αναλόγως με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Τέλος, αναφέρεται εισαγωγικά η έννοια της σεισμικής κρουστικής διέγερσης, και περιγράφονται τα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου σήματος στα διάφορα στάδια, από την πηγή του μέχρι την ψηφιοποίηση και την καταγραφή του.

Το κεφάλαιο 3 επικεντρώνεται στην περιγραφή των σεισμικών σημάτων που θα αποτελέσουν το αντικείμενο της επεξεργασίας που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα, γίνεται μια προεπεξεργασία των κρουστικών σεισμικών σημάτων που καταγράφονται από τους αισθητήρες της πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε για τις ανάγκες της διατριβής, με σκοπό να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά εκείνα που πρόκειται να καθορίσουν την επιλογή των μεθόδων για την επεξεργασία τους για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής. Συγκεκριμένα, τα καταγεγραμμένα σεισμικά γεγονότα ελέγχονται ως προς τη στασιμότητά τους, τη χρονική τους διάρκεια και τη συσχέτιση μεταξύ των καταγραφών από διαφορετικούς κόμβους, ενώ ο καταγεγραμμένος θόρυβος ελέγχεται ως προς τη λευκότητα και την κανονικότητα της κατανομής του.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια σύντομη θεωρητική ανασκόπηση της χρήσης μεθόδων wavelet για την επεξεργασία σημάτων. Καθώς η μεταβατική φύση των σημάτων που αναλύονται στην διατριβή καθιστά τις κλασσικές φασματικές μεθόδους επεξεργασίας σήματος αναποτελεσματικές, οι μετασχηματισμοί wavelet αποδεικνύονται τα πιο κατάλληλα εργαλεία. Οι μέθοδοι που προτείνονται στα επόμενα κεφάλαια βασίζονται στις αρχές της πολυδιαχωριστικής ανάλυσης που επιτυγχάνεται με τα wavelets, οι οποίες παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό. Επιπλέον, παρουσιάζεται η συνάρτηση Haar, οι ιδιότητες της οποίας την καθιστούν ιδανικό wavelet για την ανίχνευση και την ανάλυση στον χρόνο μεταβατικών φαινομένων και η οποία αποτελεί το βασικό εργαλείο στις μεθόδους που προτείνονται στα επόμενα κεφάλαια.

Το κεφάλαιο 5 αποτελεί την πρώτη συμβολή της διατριβής στο γνωστικό αντικείμενο της επεξεργασίας επιφανειακών μικροσεισμικών σημάτων. Προτείνεται ένας αλγόριθμος για την ανίχνευση σεισμικών φαινομένων σε συνθήκες υψηλού θορύβου που ακολουθεί την κατανομή που προσδιορίστηκε

στο 3^ο κεφάλαιο. Η μέθοδος που προτείνεται βασίζεται στον διακριτό μετασχηματισμό wavelet που χρησιμοποιείται προκειμένου να εξαχθούν κάποια χαρακτηριστικά του καταγεγραμμένου σήματος και με βάση αυτά να γίνει κατηγοριοποίηση του σήματος σε σεισμικό γεγονός ή θόρυβο. Ο αλγόριθμος δοκιμάζεται στα δεδομένα που λαμβάνονται από την πειραματική διάταξη, ενώ η απόδοσή του ελέγχεται με κατάλληλα σχεδιασμένες προσομοιώσεις.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται αρχικά οι τεχνικές που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η μέθοδος του υπερβολικού εντοπισμού και μια παραλλαγή του για ταυτόχρονο καθορισμό της ταχύτητας διάδοσης. Ο υπερβολικός εντοπισμός χρησιμοποιεί τις διαφορές στους χρόνους άφιξης (TDOA) των σημάτων στους διάφορους κόμβους της διάταξης. Με βάση τα συμπεράσματα του κεφαλαίου 3 προκύπτει ότι οι διαδεδομένες τεχνικές καθορισμού των TDOA δεν είναι κατάλληλες για τα κρουστικά σήματα που διαδίδονται σε σεισμικό μέσο. Ως εκ τούτου, προτείνονται δύο μέθοδοι για τον εντοπισμό του χρόνου άφιξης του σήματος σε κάθε κόμβο. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί τον διακριτό μετασχηματισμό wavelet και η δεύτερη τον μετασχηματισμό πακέτων wavelet (WPT). Και στις δύο περιπτώσεις, η πληροφορία που παρέχουν οι απεικονίσεις του σήματος στο πεδίο wavelet και wavelet πακέτων αντίστοιχα, εξαρτάται ταυτόχρονα από τα χρονικά και τα φασματικά χαρακτηριστικά του και συνεπώς επιτρέπει τον ακριβή καθορισμό της χρονικής στιγμής που ξεκινά να ταλαντώνει ο αισθητήρας σε συνθήκες υψηλού θορύβου.

Στο 7^ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την καταγραφή των σεισμικών γεγονότων καθώς και το πρόγραμμα προσομοίωσης της σεισμικής διάδοσης που υλοποιήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας. Οι μέθοδοι που περιγράφονται στο κεφάλαιο 6 εφαρμόζονται σε πραγματικά και προσομοιωμένα δεδομένα και αναλύονται οι επιδόσεις τους, μετρώντας το σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης της πηγής μετά την εφαρμογή των εκτιμώμενων χρόνων άφιξης σε αλγόριθμο υπερβολικού εντοπισμού. Έπειτα, με κατάλληλα σχεδιασμένο λογισμικό προσομοίωσης εξετάζονται κάποιες παράμετροι της τοπολογίας των αισθητήρων και ο τρόπος που αυτές επηρεάζουν την απόδοση του

συστήματος εντοπισμού της θέσης της πηγής. Συγκεκριμένα, ελέγχονται διαφορετικές τοπολογίες προκειμένου να μοντελοποιηθούν οι επιδράσεις των ακόλουθων παραμέτρων:

- Απόσταση μεταξύ αισθητήρων.
- Συμμετρία τοπολογίας.
- Πλήθος αισθητήρων.

Τέλος, στο κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα αποτελέσματα και εξάγονται συμπεράσματα από αυτά ενώ προτείνονται κάποιες διαστάσεις του προβλήματος που εξετάστηκε, οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν το αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΙΑΔΟΣΗ & ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ

ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

2.1. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Με τον όρο σεισμικά κύματα συνηθίζουμε να εννοούμε τα ενεργειακά κύματα που διαδίδονται μέσα στον φλοιό της γης. Ωστόσο, ένας γενικότερος ορισμός, ο οποίος υιοθετείται και στην παρούσα διατριβή, περιλαμβάνει τα κύματα που διαδίδονται μέσα σε οποιοδήποτε ελαστικό μέσο και προκαλούνται από φυσικούς μηχανισμούς που ασκούν δυνάμεις πάνω στο σώμα.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες σεισμικών κυμάτων, ανάλογα με τον τρόπο διάδοσης στο μέσο, τα **κύματα χώρου** και τα **επιφανειακά κύματα**. Εκτός από αυτούς, υπάρχουν κι άλλοι τρόποι διάδοσης, οι οποίοι όμως έχουν δευτερεύουσα σημασία και ξεφεύγουν από το αντικείμενο αυτής της εργασίας.

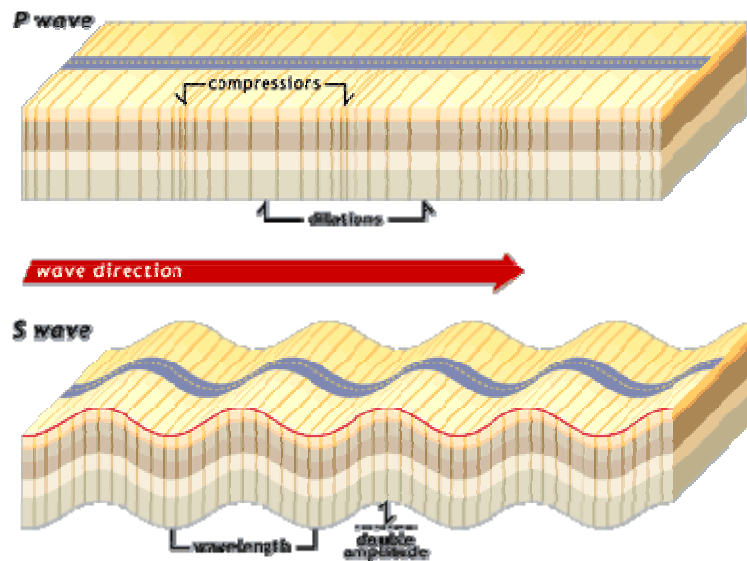
2.1.1. Κύματα χώρου

Τα κύματα χώρου διαδίδονται στο εσωτερικό του μέσου. Η διαδρομή που ακολουθούν κάμπτεται όταν αλλάζει η πυκνότητα και ο συντελεστής ελαστικότητας του μέσου. Με τη σειρά του, ο συντελεστής ελαστικότητας στο μέσο εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη σύνθεσή του υλικού. Το φαινόμενο αυτό είναι όμοιο με τη διάθλαση του φωτός.

Τα κύματα χώρου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα κύματα τύπου P και τα κύματα τύπου S (βλ. Εικόνα 1).

2.1.1.1. Κύματα P

Τα κύματα P, ή αλλιώς πρωτεύοντα κύματα (primary waves), είναι ο πιο ταχέως διαδιδόμενος τύπος κύματος χώρου. Σε ισοτροπικά και ομογενή στερεά μέσα η πόλωσή τους είναι επιμήκης, δηλαδή προκαλούν στα σωματίδια του μέσου ταλαντώσεις με κατεύθυνση παράλληλη προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα κύματα αυτά αντιστοιχούν στα γνωστά ηχητικά κύματα και οι τυπικές ταχύτητες διάδοσής τους είναι 330m/s στον αέρα, 1450m/s στο νερό και 5000m/s στο γρανίτη.



Εικόνα 1 Τα κύματα χώρου: Πρωτεύοντα (πάνω) και δευτερεύοντα (κάτω)

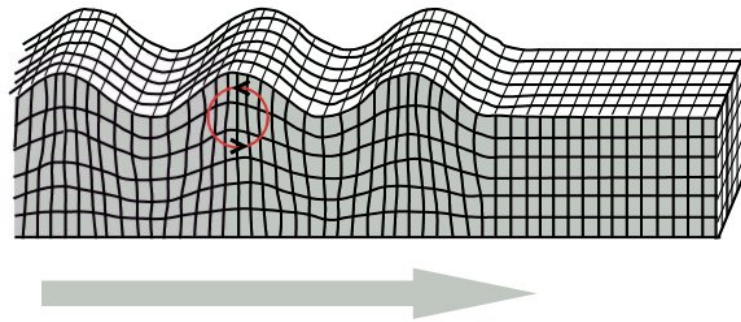
2.1.1.2. Κύματα S

Τα κύματα S, ή δευτερεύοντα κύματα (secondary waves) έχουν εγκάρσια πόλωση, δηλαδή προκαλούν στα σώματα του μέσου ταλαντώσεις με κάθετη κατεύθυνση στην κατεύθυνση διάδοσης. Η ταχύτητά τους είναι περίπου το 60% αυτής των πρωτεύοντων κυμάτων ενώ το πλάτος τους είναι πολύ μεγαλύτερο. Σε αντίθεση με τα πρωτεύοντα κύματα, τα κύματα S δεν διαδίδονται σε υγρά και αέρια μέσα λόγω της πολύ απότομης εξασθένησής τους.

2.1.2. Επιφανειακά κύματα

Ως επιφανειακά κύματα ορίζονται τα κύματα που μεταδίδονται στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικές πυκνότητες. Η διάδοσή τους είναι πιο αργή από αυτήν των κυμάτων χώρου, ενώ έχουν χαμηλότερη συχνότητα, μεγαλύτερο πλάτος και πιο αργή εξασθένηση. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών τους, στην περίπτωση των σεισμών τα επιφανειακά κύματα είναι υπεύθυνα για τις περισσότερες καταστροφές. Η μελέτη και καταγραφή των επιφανειακών κυμάτων γίνεται πολύ ευκολότερα από τα κύματα χώρου καθώς αρκεί η τοποθέτηση αισθητήρων στην επιφάνεια του σώματος. Για το λόγο αυτό, τα επιφανειακά κύματα αποτελούν ένα σημαντικό πεδίο έρευνας

Rayleigh Wave



Εικόνα 2 Μοντέλο διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.

τόσο στην επιστήμη της σεισμολογίας όσο και σε εφαρμογές που αφορούν την καταπόνηση υλικών.

Τα επιφανειακά κύματα διακρίνονται στα κύματα Rayleigh και τα κύματα Love. Τα κύματα Rayleigh είναι αυτά που μεταφέρουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας ενός σεισμικού κύματος.

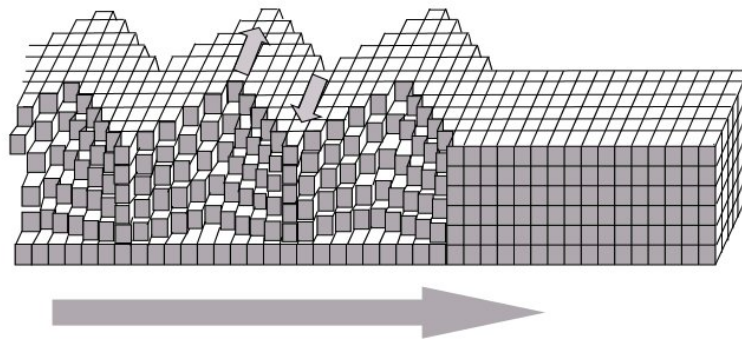
2.1.2.1.Κύματα Rayleigh

Τα κύματα Rayleigh είναι τα κύματα με τα οποία καταπιάνεται κατά κύριο λόγο αυτή η εργασία. Μπορούν να προκληθούν είτε από πηγές στο εσωτερικό του σώματος όταν τα κύματα φτάσουν στην επιφάνεια, είτε από κρουστικές δυνάμεις πάνω στην επιφάνεια του σώματος. Η ευκολία στην πρόκληση και την καταγραφή των κυμάτων Rayleigh, στην ελεύθερη επιφάνεια ενός σώματος και το γεγονός ότι μεταφέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας κατά την επιφανειακή διάδοση, τα καθιστούν δημοφιλή σε εφαρμογές ανίχνευσης ελαττωμάτων σε δομικά υλικά και μηχανικά εξαρτήματα [24], [25], καθώς και σε εφαρμογές επιτήρησης χώρων [26],[27].

Η ύπαρξη των κυμάτων Rayleigh προβλέφθηκε το 1885 από τον John William Strutt, λόρδο του Rayleigh, από τον οποίον έχουν λάβει την ονομασία τους. Η διάδοσή τους σε ιστροπικά μέσα γίνεται λόγω των ελλειπτικών κινήσεων των σωματιδίων που βρίσκονται στην επιφάνεια του μέσου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.

Σε ιδανικά, ομογενή και επίπεδα ελαστικά μέσα τα κύματα Rayleigh δεν εμφανίζουν διασπορά. Ωστόσο, αυτό αλλάζει όταν η πυκνότητα του υλικού μεταβάλλεται με το βάθος του. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η

Love Wave



Εικόνα 3 Μοντέλο διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων Love.

διάδοση στην επιφάνεια της γης: τα κύματα με μεγαλύτερη συχνότητα διαδίδονται με ταχύτητα μικρότερη απ' ό,τι αυτά με μικρότερη συχνότητα. Καθώς τα κύματα Rayleigh με τη μικρότερη συχνότητα έχουν μεγαλύτερο μήκος κύματος διεισδύουν βαθύτερα μέσα στο έδαφος απ' ό,τι τα υψίσυχνα. Έτσι, καθώς η ταχύτητα διάδοσης είναι μεγαλύτερη σε μεγαλύτερα βάθη, οι χαμηλές συχνότητες διαδίδονται πιο γρήγορα.

Οι νόμοι που διέπουν τη διάδοση και την εξασθένιση των κυμάτων Rayleigh μελετούνται αργότερα σε ξεχωριστή παράγραφο.

2.1.2.2. Κύματα Love

Τα κύματα Love, είναι οριζόντια πολωμένα κύματα που προκαλούνται από τις διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια ενός ελαστικού μέσου

Η κίνηση των σωματιδίων σε ένα κύμα Love σχηματίζει μια γραμμή κάθετη στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Το πλάτος της ταλάντωσης συνήθως φθίνει ακαριαία με το βάθος. Ωστόσο, κατά τη φορά διάδοσης του κύματος η απόσβεση του πλάτους είναι ανάλογη με $1/\sqrt{r}$, όπου r είναι η απόσταση από την πηγή.

2.2. ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

2.2.1. Απόσβεση

Τα χαρακτηριστικά του τρόπου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων εξαρτώνται από παράγοντες που περιλαμβάνουν τόσο τον τύπο του μέσου διάδοσης όσο και τα χαρακτηριστικά της πηγής.

Οι δονήσεις καθώς διαδίδονται σε οποιοδήποτε μέσο χάνουν μέρος της

ενέργειάς τους, με αποτέλεσμα το πλάτος τους να ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή. Η απόσβεση πλάτους των κυμάτων μπορεί να αποδοθεί σε δύο παράγοντες: τη γεωμετρική εξασθένιση και την απόσβεση λόγω του υλικού και περιγράφεται από την εξίσωση (1) [28]:

$$w_2 = w_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n e^{-a(r_2-r_1)} \quad (1)$$

όπου w_1 και w_2 είναι τα πλάτη των ταλαντώσεων σε αποστάσεις r_1 και r_2 από την πηγή αντίστοιχα, n είναι ο συντελεστής γεωμετρικής εξασθένισης και a είναι ο συντελεστής απόσβεσης του εδάφους.

2.2.1.1. Γεωμετρική εξασθένιση

Η γεωμετρική εξασθένιση οφείλεται στη διασπορά της ενέργειας καθώς το κύμα απομακρύνεται από την πηγή. Ο συντελεστής γεωμετρικής εξασθένισης μπορεί να καθοριστεί αναλυτικά λαμβάνοντας τον τύπο του κύματος, της πηγής και της θέσης. Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι συντελεστές γεωμετρικής εξασθένισης, όπως υπολογίστηκαν στην εργασία των Kim και Lee [28] για διαφορετικούς τύπους πηγής. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής εξασθένισης για τα επιφανειακά κύματα τύπου Rayleigh, η τιμή του n είναι $1/2$. Η γεωμετρική εξασθένιση συμβαίνει ακόμα και σε ένα ιδανικό ελαστικό μέσο.

Πίνακας 2 Τιμές του συντελεστή εξασθένισης για διάφορες πηγές

Φυσική πηγή	Τύπος πηγής	Είδος κύματος	Θέση ανίχνευσης	n
Χτύπημα αυτοκινήτου σε λακούβα	Σημείο	Rayleigh	Επιφάνεια	0,5
		Χώρου	Επιφάνεια	1
Τούνελ	Θαμμένη γραμμή	Χώρου	Εσωτερικό	0,5
Θαμμένη έκρηξη	Θαμμένο σημείο	Χώρου	Εσωτερικό	1

2.2.1.2. Απόσβεση υλικού

Όταν το μέσο διάδοσης δεν είναι ιδανικά ελαστικό η ενέργεια της ταλάντωσης ελαττώνεται λόγω τριβής μεταξύ των σωματιδίων του μέσου. Το είδος αυτό της απόσβεσης εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους αλλά και τη

συχνότητα της ταλάντωσης. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής απόσβεσης είναι συνάρτηση της συχνότητας του κύματος, και δίνεται από την εξίσωση (2) :

$$a = \frac{\pi \eta f}{c} \quad (2)$$

όπου η είναι ένας συντελεστής απωλειών, σταθερά που εξαρτάται από το έδαφος, f είναι η συχνότητα του κύματος και c είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

Από την εξίσωση (2) προκύπτει ότι η απόσβεση λόγω του εδάφους είναι μια γραμμική συνάρτηση της συχνότητας του κύματος [29]. Αυτό έχει ως συνέπεια το φασματικό περιεχόμενο της διέγερσης να μεταβάλλεται κατά τη διάδοση του κύματος, και συνεπώς το σήμα να φτάνει παραμορφωμένο σε αισθητήρες με διαφορετική απόσταση από την πηγή καθώς οι υψηλές συχνότητες θα αποσβαινούνται ταχύτερα από τις χαμηλές.

Από τις σχέσεις (1) και (2), χωρίς να λάβουμε υπόψη τη γεωμετρική εξασθένηση, προκύπτει η ακόλουθη σχέση που μας δίνει την απόσβεση σε dB:

$$A_d = -10 \log e^{-2\eta \pi f r / c} \quad (3)$$

$$A_d = 27,29 \frac{\eta f r}{c}$$

όπου r είναι η απόσταση από την πηγή.

Στον Πίνακα 3 παρατίθενται ενδεικτικά οι αποσβέσεις για διάφορους τύπους εδάφους, για διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή, όπως υπολογίζονται από τις σχέσεις (3). Οι υπολογισμοί έγιναν για συχνότητα $f=300\text{Hz}$.

Πίνακας 3 Τιμές απόσβεσης πλάτους σε σχέση με την απόσταση για διαφορετικούς τύπους εδάφους

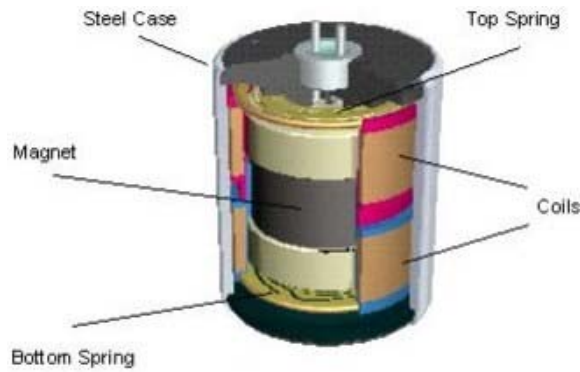
r (m)	3	5	8	15
Αργιλώδες χώμα (dB)	8,6	14,4	23	43,2
Μαλακό χώμα (dB)	9,3	15,4	24,7	46,3
Άμμος (dB)	5,8	9,6	15,4	28,8

Για τους υπολογισμούς θεωρήθηκε ότι η ταχύτητες διάδοσης στο αργιλώδες έδαφος είναι 1524m/s, στο μαλακό χώμα 853m/s και στην άμμο 457m/s ενώ οι συντελεστές απωλειών θεωρήθηκαν αντιστοίχως ίσοι με 0,5 0,3 και 0,1 [29].

2.3. ΣΕΙΣΜΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι δύο βασικές κατηγορίες αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή σεισμικών κυμάτων είναι τα γεώφωνα και τα επιταχυνσιόμετρα. Και στις δύο περιπτώσεις, η λειτουργία τους βασίζεται σε μια μάζα με τη δυνατότητα να μετατοπίζεται σε σχέση με το περίβλημα του αισθητήρα, όταν ασκείται κάποια επιτάχυνση σε αυτό. Η μάζα αυτή ονομάζεται σεισμική μάζα και στηρίζεται με κάποιο ελαστικό μέσο (πχ. ελατήριο) στο περίβλημα του αισθητήρα, ώστε να παραμένει σταθερή όταν δεν υπάρχει διέγερση και να αποσβαίνει την κίνηση της μάζας όταν η διέγερση σταματάει.

- **Γεώφωνα.** Τα γεώφωνα (βλ. Εικόνα 4) περιέχουν ένα πηνίο, τυλιγμένο γύρω από μια μαγνητική μάζα η οποία είναι ανηρτημένη από ένα ελατήριο. Η κίνηση του εδάφους, μεταφέρεται στο περίβλημα του γεωφώνου, το οποίο είναι πακτωμένο σε αυτό μέσω μιας ακίδας. Λόγω αδράνειας, η ανηρτημένη μάζα τείνει να διατηρήσει τη θέση της και έτσι επάγονται μικρά ρεύματα μέσα στο πηνίο καθώς αυτό μετακινείται εντός του μαγνητικού πεδίου. Η απόκριση των γεωφώνων είναι ανάλογη της ταχύτητας της κίνησης του εδάφους. Το συχνοτικό τους εύρος συνήθως περιορίζεται συνήθως σε χαμηλές ζώνες, με τυπικές τιμές από 1 μέχρι 300 Hz.
- **Επιταχυνσιόμετρα.** Τα επιταχυνσιόμετρα, όπως και τα γεώφωνα έχουν τη σεισμική τους μάζα στηριγμένη στο περίβλημά ανηρτημένη σε κάποιο ελαστικό μέσο. Σε αντίθεση με τα γεώφωνα που μετρούν την ταχύτητα της κίνησης του εδάφους, τα επιταχυνσιόμετρα μετρούν την επιτάχυνση, λόγω αδράνειας, της σεισμικής μάζας σε σχέση με το σταθερό περίβλημα το οποίο είναι πακτωμένο στη δονούμενη επιφάνεια.

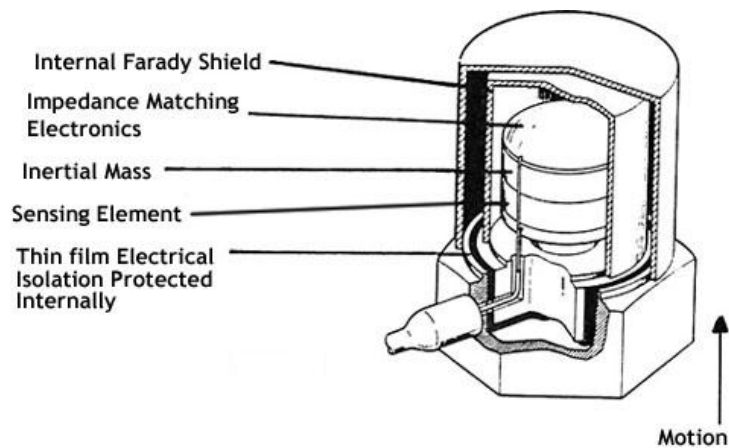


Εικόνα 4 Γεώφωνο

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι επιταχυνσιομέτρων, τα πιεζοηλεκτρικά και τα χωρητικά.

Τα *πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα* αποτελούνται από ένα τεμάχιο πιεζοηλεκτρικού υλικού, συνήθως ένα τεχνητά πολωμένο φερροηλεκτρικό κεραμικό, που παρουσιάζει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, την παραγωγή δηλαδή φορτίων σε κάθε μεταβολή των φυσικών του διαστάσεων. Όταν το υλικό αυτό υπόκειται σε τάσεις, είτε συνθλιπτικές ή εφελκτικές, παράγει ηλεκτρικό φορτίο στους πόλους του, που είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης σε αυτό δύναμης. Στα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα, η σεισμική μάζα στερεώνεται πάνω στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, ο οποίος είναι στερεωμένος πάνω στο σώμα του επιταχυνσιομέτρου, το οποίο και πακτώνεται στο έδαφος. Στην Εικόνα 5 φαίνεται τυπική διάταξη πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου, στο οποίο η κίνηση του εδάφους προκαλεί συνθλιπτικές και εφελκτικές τάσεις στο υλικό. Σε αντιστοιχία με το γεώφωνο, κίνηση του εδάφους προκαλεί κίνηση του επιταχυνσιομέτρου και λόγω αδρανείας, η σεισμική μάζα τείνει να διατηρήσει τη θέση της πιέζοντας ή τραβώντας τον κρύσταλλο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται φορτία στην έξοδο του αισθητήρα που είναι ανάλογα της επιτάχυνσης του εδάφους.

Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα διαθέτουν καλή ευαισθησία και το συχνοτικό τους εύρος είναι μεγαλύτερο από αυτό των γεωφώνων φτάνοντας συνήθως μέχρι και το 1kHz.

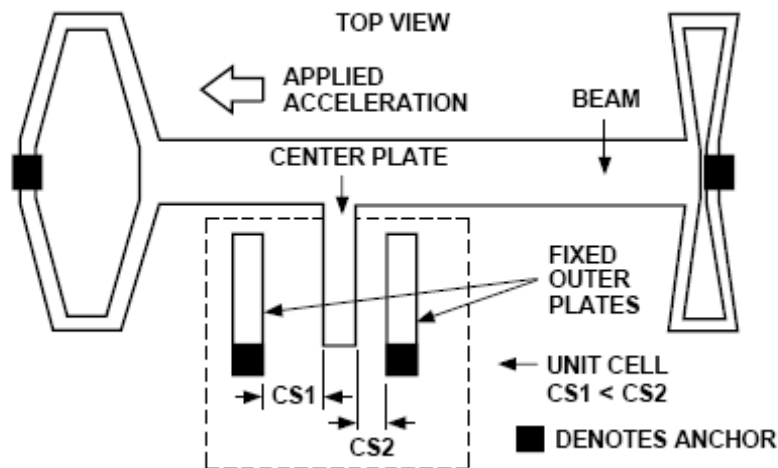


Εικόνα 5 Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο

Τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα αποτελούν μια ιδιαίτερα δημοφιλή επιλογή για την καταγραφή σεισμικών σημάτων, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια που οι εξελίξεις στον τομέα της κατασκευής μικρομηχανικών συστημάτων επιτρέπει το σχεδιασμό αισθητήρων με μεγάλη ευαισθησία και χαμηλή πυκνότητα θορύβου. Τα χωρητικά μικρομηχανικά επιταχυνσιόμετρα βασίζονται στη μεταβολή της χωρητικότητας σε σχέση με την επιτάχυνση που ασκείται σε μια δομή πυριτίου με σχήμα προβόλου, στην οποία στερεώνεται η σεισμική μάζα. Ένας δεύτερος πρόβολος, στηρίζεται στο περίβλημα του αισθητήρα και παραμένει ακίνητος, με αποτέλεσμα η χωρητικότητα ανάμεσα στους δύο προβόλους να μεταβάλλεται όταν η σεισμική μάζα μετατοπίζεται. Στην Εικόνα 6 φαίνεται η αρχή λειτουργίας ενός χωρητικού επιταχυνσιόμετρου, συγκεκριμένα για το μοντέλο ADXL05 της Analog Instruments [30].

Η επιλογή του καταλληλότερου τύπου αισθητήρα μπορεί να ληφθεί με βάση τα όσα αναφέρθηκαν, λαμβάνοντας υπόψη τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Χαρακτηριστικά αισθητήρα (ευαισθησία, συχνотικό εύρος, πυκνότητα θορύβου κτλ.)
- Μέγεθος
- Κόστος
- Ευκολία ρύθμισης σήματος

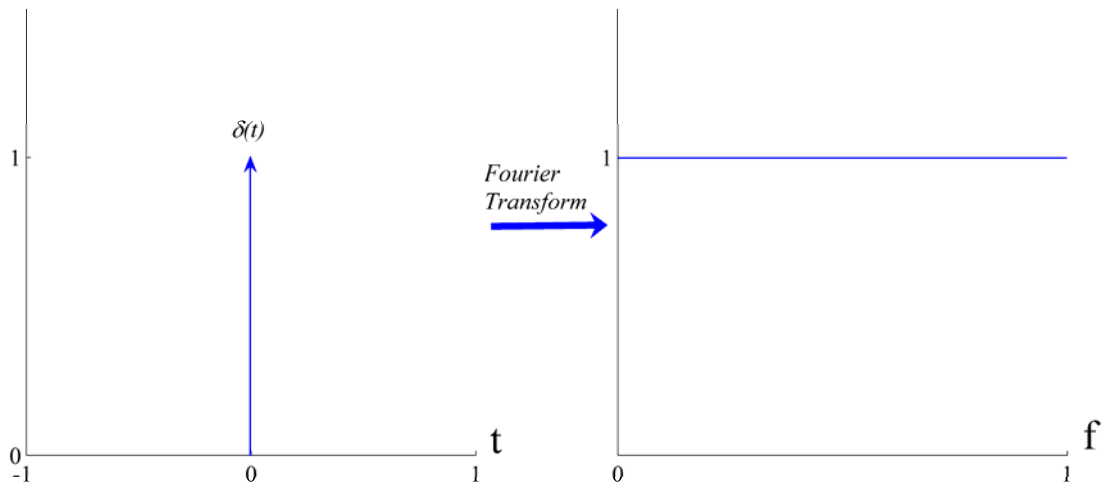


Εικόνα 6 Μοντέλο λειτουργίας του χωρητικού επιταχυνσιόμετρου ADXL05

Τα γεώφωνα, γενικά, υπερτερούν των λοιπών σεισμικών αισθητήρων σε ευαισθησία και διακριτική ικανότητα, ωστόσο το συχνοτικό τους εύρος είναι μικρό. Όπως και τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα, είναι αρκετά ογκώδη ενώ απαιτούν ξεχωριστό κύκλωμα ρύθμισης σήματος, κάτι που επιβαρύνει τόσο την ενεργειακή κατανάλωση όσο και το μέγεθος του κόμβου σε μια εφαρμογή δικτύου αισθητήρων. Τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα, από την άλλη, έχουν ιδιαίτερα μικρό μέγεθος και, καθώς υλοποιούνται ως ολοκληρωμένα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), δεν απαιτούν κάποιο ιδιαίτερο κύκλωμα ρύθμισης σήματος. Επιπλέον, στην αγορά υπάρχουν διαθέσιμοι χωρητικοί αισθητήρες με ικανοποιητική ευαισθησία και διακριτική ικανότητα σε κόστος αντίστοιχο με αυτό των γεωφώνων ή των πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιόμετρων. Συγκεκριμένα, για τα πειράματα που περιγράφονται στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες SiFlex 1500 [31], [32].

2.4. ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ

Στα κεφάλαια που ακολουθούν, αναλύονται σήματα κρουστικής φύσης. Στα πειράματα που περιγράφονται στην παρούσα διατριβή, οι σεισμικές διεγέρσεις προκαλούνται από το χτύπημα ενός σώματος που αφήνεται από συγκεκριμένο ύψος να πέσει στο έδαφος. Θεωρητικά, αυτού του είδους η διέγερση μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη συνάρτηση *Dirac* η οποία γίνεται



Εικόνα 7 Η κρουστική συνάρτηση και ο μετασχηματισμός της κατά Fourier

άπειρη τη χρονική στιγμή $t=0$ και μηδενίζεται οπουδήποτε αλλού:

$$\delta(t) = \begin{cases} +\infty & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

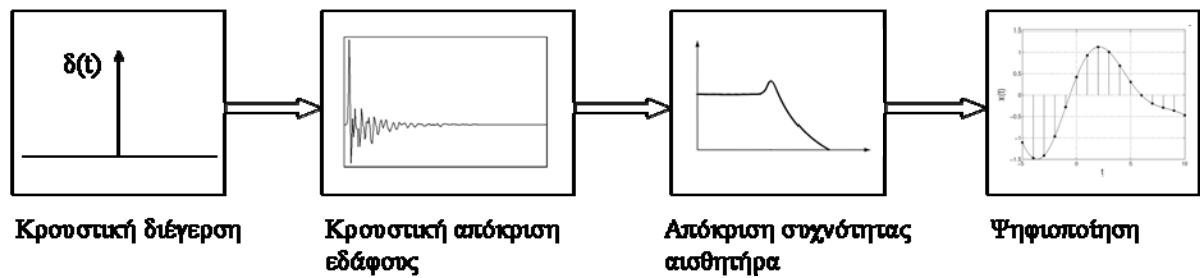
Τέτοιου είδους διεγέρσεις μπορεί να προκληθούν από ανθρώπινο βηματισμό, επιφανειακές εκρήξεις κλπ.

Το φάσμα της συνάρτησης *Dirac* υπολογίζεται με τον μετασχηματισμό *Fourier* και προκύπτει ίσο με τη μονάδα σε όλο το συχνοτικό εύρος:

$$\hat{\delta}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i x \omega} \delta(t) dt = 1 \quad (5)$$

Συνεπώς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, μια κρουστική πηγή προκαλεί ομοιόμορφη διέγερση του μέσου σε όλες τις συχνότητες.

Όπως κάθε υλικό μέσο, έτσι και το έδαφος, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του, έχει μια συγκεκριμένη κρουστική απόκριση η οποία μεταβάλλει το φάσμα της κρουστικής διέγερσης αναλόγως. Έτσι, το σήμα που φτάνει στον αισθητήρα, έχει συχνοτικό περιεχόμενο που εξαρτάται από τη σκληρότητα του εδάφους και την απόσταση από την πηγή. Επιπλέον, ο ίδιος ο αισθητήρας λειτουργεί ως φίλτρο που αποκόπτει κάποιες συχνότητες. Η σωστή επιλογή του αισθητήρα εξασφαλίζει ότι οι κυρίαρχες αρμονικές του σήματος είναι



Εικόνα 8 Διάδοση και καταγραφή μιας κρουστικής σεισμικής διέγερσης

μέσα στη γραμμική περιοχή του αισθητήρα. Τέλος, το σήμα ψηφιοποιείται με κατάλληλη συχνότητα δειγματοληψίας, η οποία, σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist – Shannon περί δειγματοληψίας, πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από τη συχνότητα της μέγιστης αρμονικής του σήματος.

Η διαδικασία διάδοσης και καταγραφής ενός σεισμικού σήματος κρουστικής φύσης φαίνεται στην Εικόνα 8.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ & ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ

ΣΗΜΑΤΩΝ

3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να περιγραφούν τα χαρακτηριστικά των κρουστικών σεισμικών σημάτων, τα οποία αποτελούν το αντικείμενο της διατριβής. Παρουσιάζονται τα πρώτα πειραματικά δεδομένα και τα ληφθέντα σήματα αναλύονται με σκοπό να αναδειχθούν οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά τους εκείνα που θα καθορίσουν τη μέθοδο της ανάλυσης για τον εντοπισμό της θέσης της σεισμικής πηγής.

Συγκεκριμένα, με βάση τις μετρήσεις σε δύο διαφορετικούς τύπους εδάφους, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα εξής χαρακτηριστικά των ληφθέντων σημάτων:

- **Μη στασιμότητα:** Ως στάσιμα σήματα ορίζονται τα σήματα που έχουν την ιδιότητα να διατηρούν αμετάβλητα τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά (μέση τιμή, τυπική απόκλιση). Τα σήματα που μελετούμε, προκαλούνται από μια κρουστική διέγερση του εδάφους που προκαλεί αποσβαινόμενη ταλάντωση της σεισμικής μάζας όταν το προκαλούμενο κύμα φτάσει στη θέση του αισθητήρα. Συνεπώς, τα υπό μελέτη σήματα είναι μη στάσιμα.
- **Χρονική διάρκεια:** Η χρονική διάρκεια των σημάτων εξαρτάται το πλάτος της διέγερσης, τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και τον τύπο του εδάφους. Στις παραγράφους που ακολουθούν, συγκρίνονται τα σήματα από δύο διαφορετικούς τύπους εδάφους.
- **Μετατόπιση φάσματος σε σχέση με την απόσταση:** Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε θεωρητικά η επίδραση της σεισμικής απόσβεσης στο φασματικό περιεχόμενο των σημάτων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για δύο διαφορετικούς τύπους εδάφους, όπου διερευνάται πόσο σημαντική είναι η μετατόπιση του φάσματος για τις κοντινές αποστάσεις

μεταξύ των αισθητήρων στη διάταξη που υλοποιήθηκε και πόσο αυτή αλλάζει ανάλογα με το έδαφος.

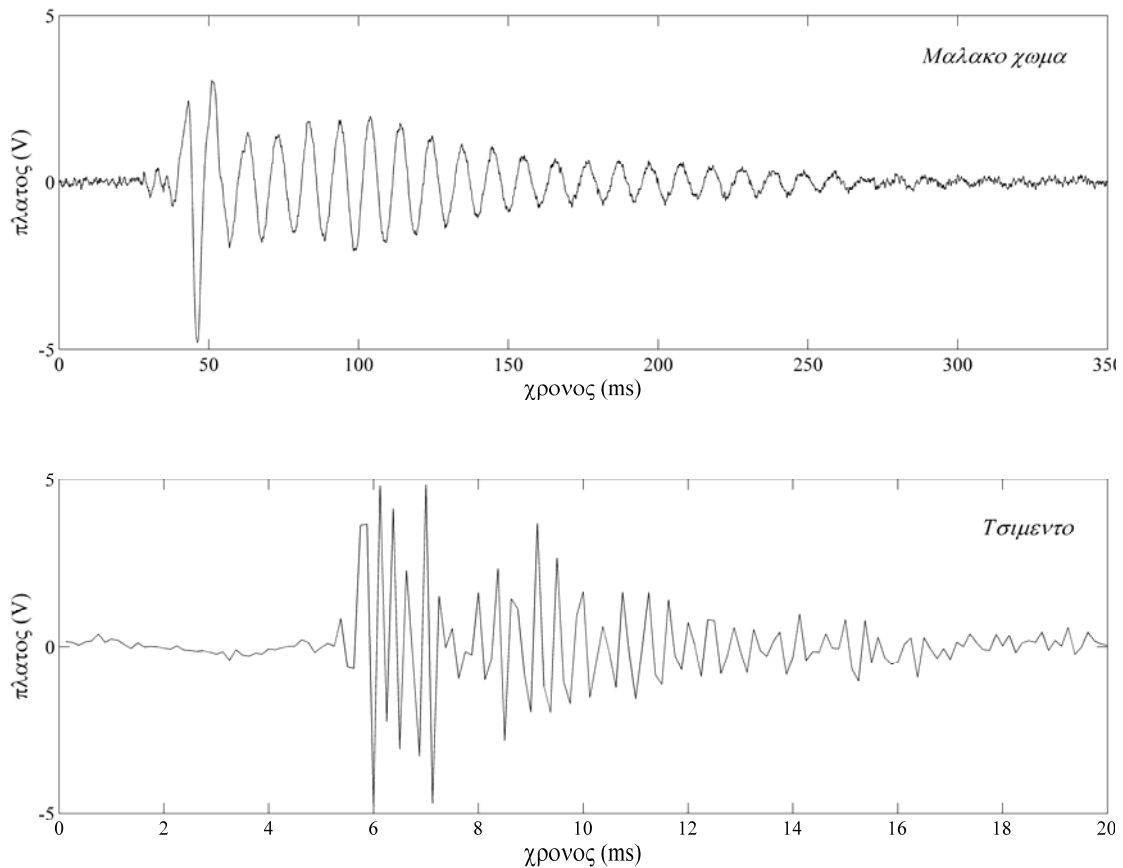
- **Ετεροσυσχέτιση:** Η παραμόρφωση στο φάσμα του σήματος καθώς αποσβαίνεται, επηρεάζει τον συντελεστή ετεροσυσχέτισης μεταξύ δύο καταγραφών του ίδιου σήματος από αισθητήρες με διαφορετική απόσταση από την πηγή.
- **Κατανομή θορύβου:** Ο θόρυβος που εισάγεται στα σήματα οφείλεται σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι ο ηλεκτρικός θόρυβος που οφείλεται στον ίδιο τον αισθητήρα και το ηλεκτρονικό κύκλωμα ρύθμισης σήματος. Ο δεύτερος, είναι ο θόρυβος του περιβάλλοντος και εξαρτάται από τις συνθήκες κατά τη διάρκεια του πειράματος, όπως ο άνεμος ή άλλες πηγές σεισμικών δονήσεων κοντά στη διάταξη. Από τα πειραματικά δεδομένα μελετούνται και αναλύονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά του θορύβου, ώστε να επιλεγεί στη συνέχεια η καταλληλότερη μέθοδος για την αποθορυβοποίηση του σήματος.

3.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Στην παράγραφο 2.5 περιγράφηκε η διαδικασία με την οποία μια κρουστική διέγερση δημιουργεί ένα σεισμικό κύμα, τα χαρακτηριστικά του οποίου εξαρτώνται από τις ιδιότητες του εδάφους, ενώ το σήμα που τελικά καταγράφεται επηρεάζεται επιπλέον από την απόσταση του αισθητήρα από την πηγή και από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του αισθητήρα. Στην Εικόνα 9 φαίνονται δύο τέτοιες καταγραφές από τον ίδιο αισθητήρα, για διαφορετικούς τύπους εδάφους. Και οι δύο καταγραφές έγιναν με συχνότητα δειγματοληψίας 8kHz.

Και στις δύο περιπτώσεις της Εικόνας 9 ο αισθητήρας καταγράφει μια αποσβενόμενη ταλάντωση της επιφάνειας του εδάφους στη θέση στην οποία είναι πακτωμένος.

Τα δύο σήματα διαφέρουν πολύ ως προς τη χρονική τους διάρκεια και ως προς την περίοδο της ταλάντωσής τους. Συγκεκριμένα, η χρονική διάρκεια από τη στιγμή της έναρξης της ταλάντωσης μέχρι την πλήρη απόσβεσή της στο μαλακό χώμα είναι της τάξης των εκατοντάδων ms, ενώ στο τσιμέντο



Εικόνα 9 Δύο καταγραφές μιας κρουστικής διέγερσης από τον ίδιο αισθητήρα. Πάνω: σε μαλακό χώμα. Κάτω: σε τσιμέντο

είναι σημαντικά μικρότερη, της τάξης των δεκάδων ms.

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό που έχει ιδιαίτερη σημασία για την επιλογή της μεθόδου επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων είναι η μη στασιμότητα. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 9 και στις δύο περιπτώσεις η τυπική απόκλιση των σημάτων μεταβάλλεται ραγδαία με την πάροδο του χρόνου, ωστόσο η μέση τιμή τους παραμένει σταθερή. Στον Πίνακα 4 τα σήματα της Εικόνας 9 χωρίζονται σε τέσσερα ίσα μέρη και για κάθε ένα από αυτά υπολογίζεται η μέση τιμή και η τυπική τους απόκλιση.

Ο Πίνακας 4 δείχνει ιδιαίτερα σημαντικές μεταβολές στην τυπική απόκλιση των σημάτων σε σχέση με το χρόνο ενώ η μέση τιμή κυμαίνεται κοντά στα 0V χωρίς να παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές.

Η μεταβολή της τυπικής απόκλισης σε τόσο μικρό αριθμό δειγμάτων καθιστά τα σήματα μη στάσιμα. Αυτό συνεπάγεται ότι οι κλασσικές μέθοδοι υπολογισμού της θέσης της πηγής που χρησιμοποιούνται ευρέως για σήματα όπως η ανθρώπινη ομιλία ή η ακουστική υπογραφή ενός κινούμενου οχήματος, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν στάσιμα, δεν εφαρμόζονται στην

Πίνακας 4 Μεταβολή στατιστικών χαρακτηριστικών των σημάτων σε σχέση με τον χρόνο

Μαλακό χώμα				
	<i>0-62,5ms</i>	<i>62,5-125ms</i>	<i>125-187,5ms</i>	<i>187,5-250ms</i>
<i>Μέση τιμή (V)</i>	-0,041	0,019	0,002	0,0125
<i>Τυπική απόκλιση (V)</i>	1,460	0,685	0,284	0,150
Τσιμέντο				
	<i>0-3,3ms</i>	<i>3,3-6,7ms</i>	<i>6,7-10ms</i>	<i>10-13,3ms</i>
<i>Μέση τιμή (V)</i>	0,039	0,047	0,050	0,013
<i>Τυπική απόκλιση (V)</i>	2,377	1,175	0,553	0,323

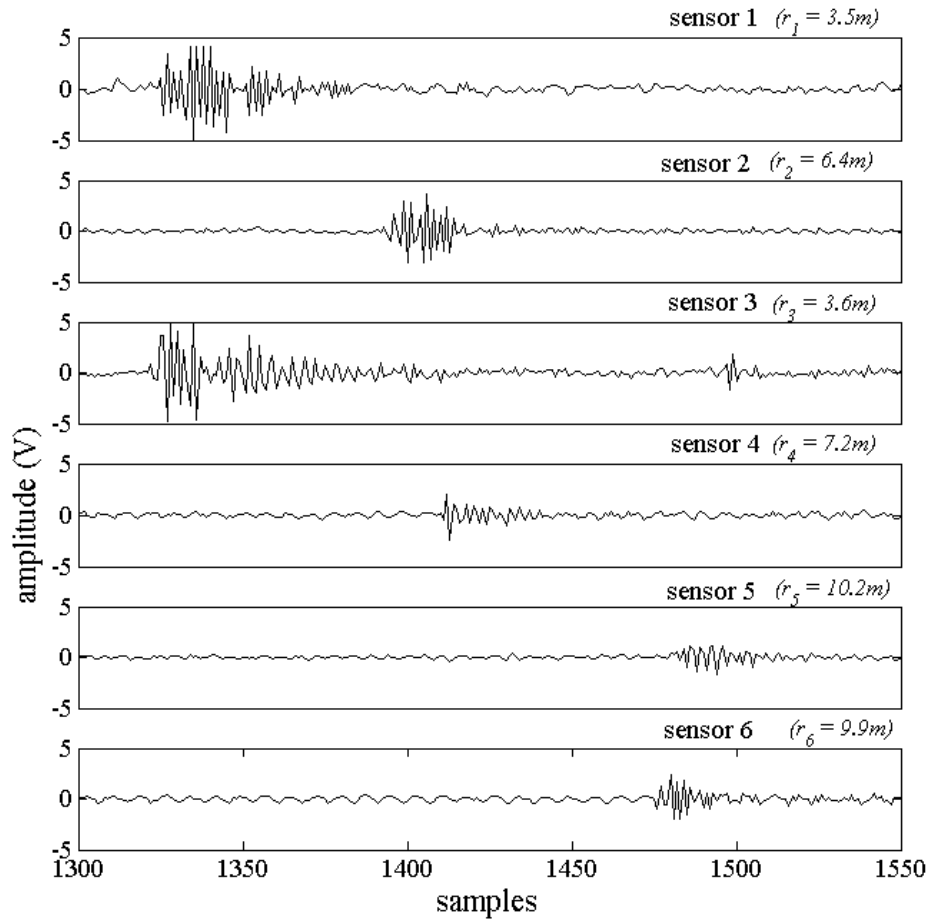
περίπτωση κρουστικών σεισμικών διεγέρσεων.

3.3. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΤΕΡΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗ

Όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η απόσβεση λόγω του υλικού του εδάφους εξαρτάται γραμμικά από τη συχνότητα του σήματος όπως φαίνεται και από τη σχέση (2). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όταν μια διέγερση καταγράφεται από δύο αισθητήρες που βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις μεταξύ τους, τα δύο σήματα που προκύπτουν να διαφέρουν ως προς τη μορφή και το συχνοτικό τους περιεχόμενο.

Στο πείραμα που περιγράφεται παρακάτω έχουν ληφθεί σήματα από έξι διαφορετικούς αισθητήρες που καταγράφουν την ίδια κρουστική διέγερση. Οι αισθητήρες είναι πακτωμένοι σε τσιμέντο στα σημεία με καρτεσιανές συντεταγμένες (0, 0)m, (0, 7)m, (6.66, 2.16)m, (4.12, -5.66)m, (-4.12, -5.66) and (-6.66, 2.16)m. Η σεισμική διέγερση γίνεται στο σημείο (1.48, 3.17). Για μια πιο αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης βλ. Κεφ. 5.

Στην Εικόνα 10 απεικονίζονται τα σήματα από καθέναν από τους αισθητήρες σε κοινή χρονική κλίμακα ώστε να φαίνεται η χρονική καθυστέρηση με την οποία φτάνει το σεισμικό κύμα σε κάθε αισθητήρα. Με r_i συμβολίζεται η απόσταση του αισθητήρα i από την πηγή. Παρατηρούμε ότι



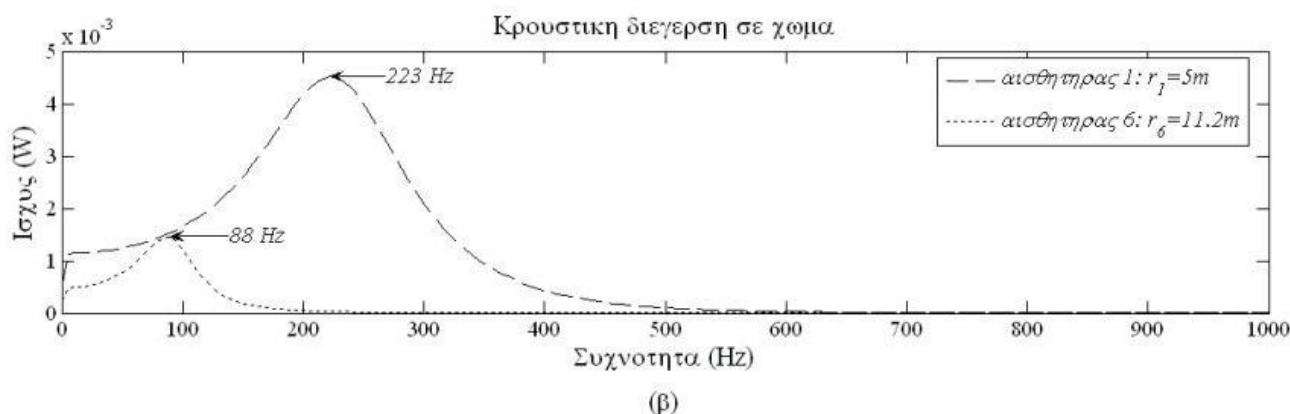
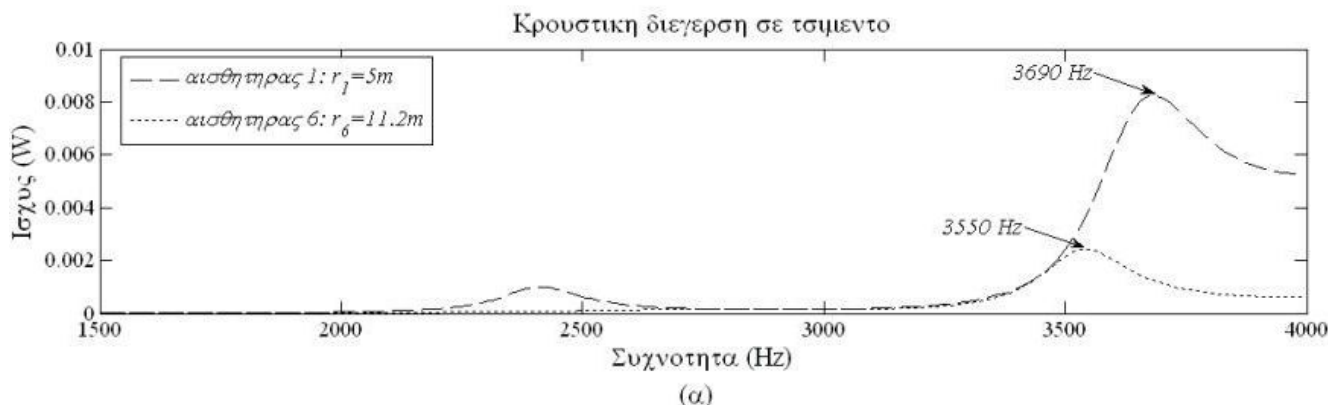
Εικόνα 10 Μια σεισμική διέγερση όπως καταγράφηκε από έξι αισθητήρες σε διαφορετικές θέσεις

τα σήματα στους αισθητήρες 1 και 3, οι οποίοι βρίσκονται σε σχεδόν ίση απόσταση από την πηγή, μορφολογικά παρουσιάζουν αρκετά σημαντικές ομοιότητες, η οποίες όμως εξαφανίζονται όσο η απόσταση από την πηγή αυξάνεται.

Το μέτρο το οποίο μας δείχνει τον βαθμό ομοιότητας μεταξύ δύο σημάτων είναι ο συντελεστής ετεροσυσχέτισης που υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$R(i, j) = \frac{Cov(i, j)}{\sqrt{Cov(i, i) \cdot Cov(j, j)}} \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (6)$$

Όπου με $Cov(i, j)$ συμβολίζεται ο πίνακας συνδιασποράς ανάμεσα στα σήματα i και j . Το αποτέλεσμα της εξίσωσης (6) για τα σήματα του παραδείγματος της Εικόνας 10 δίνεται στον Πίνακα 5.



Εικόνα 11 Φασματική πυκνότητα ισχύος για μια κρουστική διεγερση όπως καταγράφηκε από δύο αισθητήρες με διαφορετική απόσταση από την πηγή: (α) σε τσιμεντο (β) σε χώμα

Τέλος, στην Εικόνα 11(α) φαίνεται η φασματική πυκνότητα ισχύος για τα σήματα στους αισθητήρες 1 και 6 της Εικόνας 10. Το πείραμα έχει επαναληφθεί σε έδαφος με μαλακό χώμα και η φασματική πυκνότητα ισχύος για τους αντίστοιχους αισθητήρες φαίνεται στο γράφημα της Εικόνας 11(β).

Πίνακας 5 Οι συντελεστές ετεροσυσχέτισης μεταξύ των σημάτων της Εικόνας 10

	1	2	3	4	5	6
1	1	0.4942	0.6764	0.1535	0.0652	0.0931
2	0.4942	1	0.5276	0.1844	0.0094	0.1843
3	0.6764	0.5276	1	0.1244	0	0.0598
4	0.1535	0.1844	0.1244	1	0.0819	0.0478
5	0.0652	0.0094	0	0.0819	1	0.1301
6	0.0931	0.1843	0.0598	0.0478	0.1301	1

Και στις δύο περιπτώσεις διαπιστώνουμε την προβλεπόμενη από τη θεωρία μετατόπιση του φασματικού περιεχομένου των σημάτων προς τις χαμηλότερες συχνότητες καθώς το σήμα αποσβαίνεται με την απόσταση λόγω του υλικού του εδάφους. Επίσης παρατηρούμε σημαντική διαφοροποίηση της κυρίαρχης αρμονικής σε σχέση με τον τύπο του εδάφους, γεγονός που έχει να κάνει με την κρουστική απόκριση του μέσου διάδοσης σε κάθε περίπτωση.

3.4. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΟΡΥΒΟΥ

Η αφαίρεση του θορύβου από το σήμα είναι μια ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία σε οποιαδήποτε εφαρμογή επεξεργασίας σήματος καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις τελικές επιδόσεις του εκάστοτε συστήματος. Ανάλογα με το είδος του θορύβου και τα χαρακτηριστικά του σήματος, η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι τόσο απλή όσο η εφαρμογή ενός βαθυπερατού φίλτρου ή αρκετά πιο πολύπλοκη.

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε τα στατιστικά χαρακτηριστικά του λευκού θορύβου, που αποτελεί την πιο απλή περίπτωση τυχαίου θορύβου και, στη συνέχεια θα αναλύσουμε τον θόρυβο από τα καταγεγραμμένα σήματα ώστε να καθοριστούν τα στατιστικά του χαρακτηριστικά και, με βάση αυτά, να σχεδιαστεί μια αποδοτική στρατηγική αποθορυβοποίησης των σημάτων.

3.4.1. Λευκός Θόρυβος

Ως λευκός θόρυβος ορίζεται μια ακολουθία τυχαίων μη συσχετιζόμενων τιμών ή, εναλλακτικά ένα τυχαίο σήμα με σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος. Ένα σήμα για να έχει άπειρο εύρος ζώνης και σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος σε όλες τις συχνότητες, θα πρέπει να καταγράφεται με άπειρο ρυθμό δειγματοληψίας και για άπειρο χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό, ο πραγματικός λευκός θόρυβος υφίσταται μόνο σε θεωρητική βάση. Ωστόσο, σε πρακτικές εφαρμογές, ένα σήμα μπορεί να θεωρηθεί λευκός θόρυβος όταν έχει σταθερή φασματική πυκνότητα σε ένα προεπιλεγμένο εύρος συχνοτήτων. Συνεπώς, στην πράξη, εργαζόμαστε με ένα χρονικά πεπερασμένο κομμάτι λευκού θορύβου του οποίου το εύρος ζώνης περιορίζεται μέχρι το ήμισυ της συχνότητας δειγματοληψίας.

Ένα τυχαίο συνεχές σήμα, $w(t)$, για $t \in \mathbb{R}$, με βάση τους ορισμούς που

δόθηκαν στην αρχή της παραγράφου, είναι λευκός θόρυβος αν και μόνο αν η μέση τιμή και ο πίνακας αυτοσυσχέτισης ικανοποιούν τις συνθήκες:

$$\mu_w = E\{w(t)\} = 0 \quad (7)$$

$$R_{ww}(t_i, t_j) = E\{w(t_i)w(t_j)\} = \frac{N_0}{2} \delta(t_i - t_j) \quad (8)$$

δηλαδή, έχει μηδενική μέση τιμή και η αυτοσυσχέτιση είναι μια κρουστική συνάρτηση που μηδενίζεται για $t_i \neq t_j$.

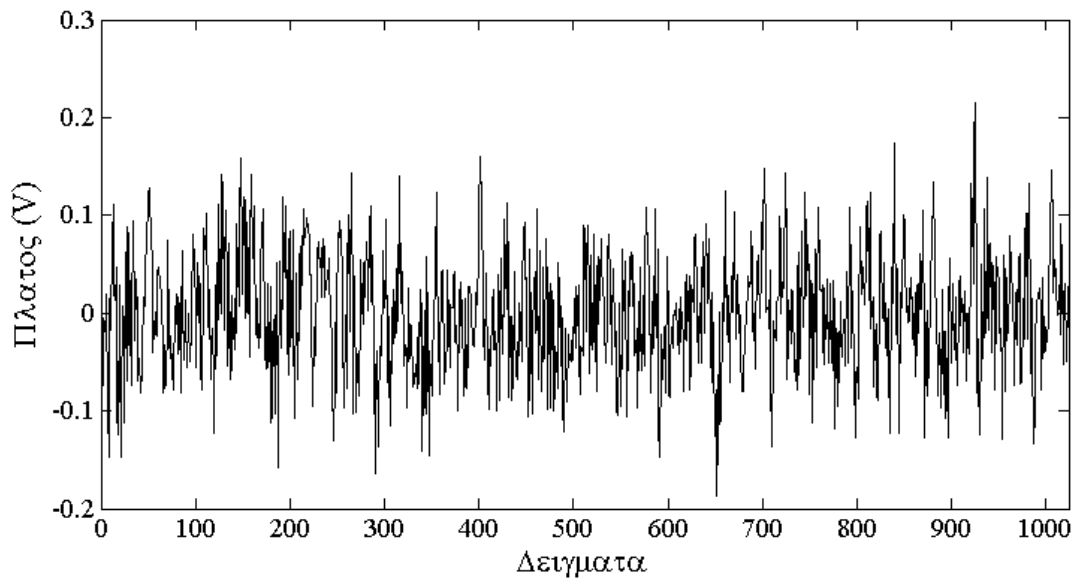
Συνεπώς, προκειμένου να ελεγχθεί αν μια ακολουθία δειγμάτων μπορεί να μοντελοποιηθεί σωστά ως λευκός θόρυβος θα πρέπει να υπολογιστεί η αυτοσυσχέτιση της και να εξακριβωθεί ότι τείνει προς την κρουστική συνάρτηση καθώς ο αριθμός των δειγμάτων τείνει προς το άπειρο. Αυτό σημαίνει ότι τα δείγματα της ακολουθίας είναι μη συσχετιζόμενα. Ισοδύναμα, μπορεί η ακολουθία να χωριστεί σε διαδοχικά τμήματα στο πεδίο του χρόνου, για κάθε τμήμα να υπολογιστεί ο FFT (*Fast Fourier Transform*) και να υπολογιστεί ο μέσος όρος των τετραγώνων των πλατών τους. Αν το φάσμα ισχύος που προκύπτει με αυτόν τον τρόπο είναι σταθερό τότε το σήμα μοντελοποιείται ικανοποιητικά ως λευκός θόρυβος.

3.4.2. Έλεγχος αυτοσυσχέτισης

Στην Εικόνα 12 φαίνεται μια καταγραφή 1024 δειγμάτων θορύβου με συχνότητα δειγματοληψίας 8 kHz. Η καταγραφή έχει γίνει από ένα κανάλι της διάταξης που περιγράφηκε στην ενότητα 3.3 κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Έγινε σε εξωτερικό χώρο, με τον αισθητήρα τοποθετημένο σε χώρο.

Η καταγραφή της Εικόνας 12 αποτελεί μια τυχαία επιλογή από το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων και η μορφή της είναι ενδεικτική του θορύβου που υπάρχει σε όλα τα κανάλια κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Προκειμένου να αποφασίσουμε αν ο θόρυβος που καταγράφεται είναι λευκός χωρίζουμε τον καταγεγραμμένο θόρυβο σε 10 παράθυρα των 128 δειγμάτων. Για κάθε παράθυρο υπολογίζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και, στη συνέχεια, η μέση τιμή της αυτοσυσχέτισης για κάθε τιμή υστέρησης.

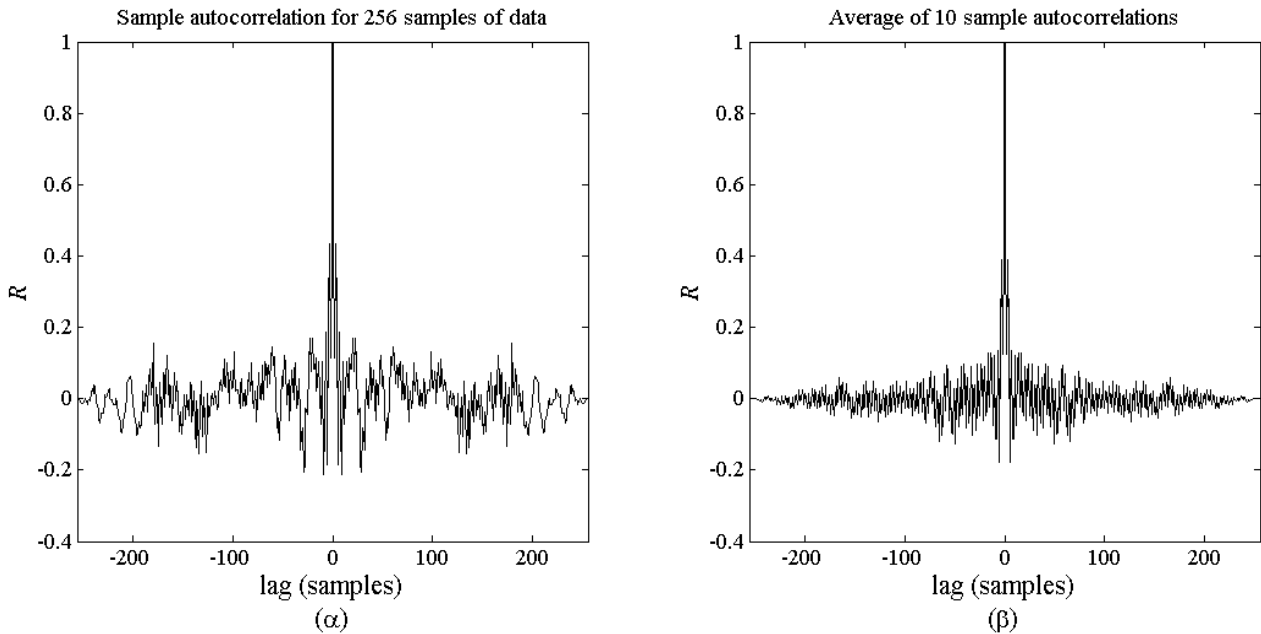


Εικόνα 12 Καταγραφή 1024 δειγμάτων θορύβου

Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 13.

Συγκρίνοντας τα δύο γραφήματα της Εικόνας 13, όπου στο (α) φαίνεται η αυτοσυσχέτιση για ένα τυχαίο παράθυρο θορύβου και στο (β) το αποτέλεσμα μετά τον υπολογισμό των μέσων τιμών για τα 10 παράθυρα, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνονται τα διαθέσιμα δείγματα, η διασπορά της αυτοσυσχέτισης ελαττώνεται σημαντικά για υστέρηση διάφορη του μηδενός. Για υστέρηση ίση με μηδέν η αυτοσυσχέτιση παίρνει την τιμή 1, που είναι η μεγαλύτερη τιμή που μπορεί να πάρει όταν τα συγκρινόμενα σήματα είναι πανομοιότυπα, ενώ για διαφορετικές τιμές υστέρησης η αυτοσυσχέτιση γίνεται στατιστικά ασήμαντη. Επιπλέον, αυξάνοντας τα διαθέσιμα δείγματα, η μορφή της αυτοσυσχέτισης τείνει προς αυτήν της κρουστικής συνάρτησης.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι τα δείγματα του θορύβου που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων δεν είναι συσχετιζόμενα. Επιπλέον, καθώς η μέση τιμή του θορύβου καθώς τα δείγματα αυξάνονται τείνει προς το μηδέν, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 12, ικανοποιούνται οι συνθήκες (7) και (8) και συνεπώς ο θόρυβος που καταγράφηκε είναι λευκός.



Εικόνα 13 (α) Αυτοσυσχέτιση για ένα τυχαίο παράθυρο θορύβου 256 σημείων (β) Μέσος όρος αυτοσυσχέτισης για 10 παράθυρα θορύβου 256 σημείων.

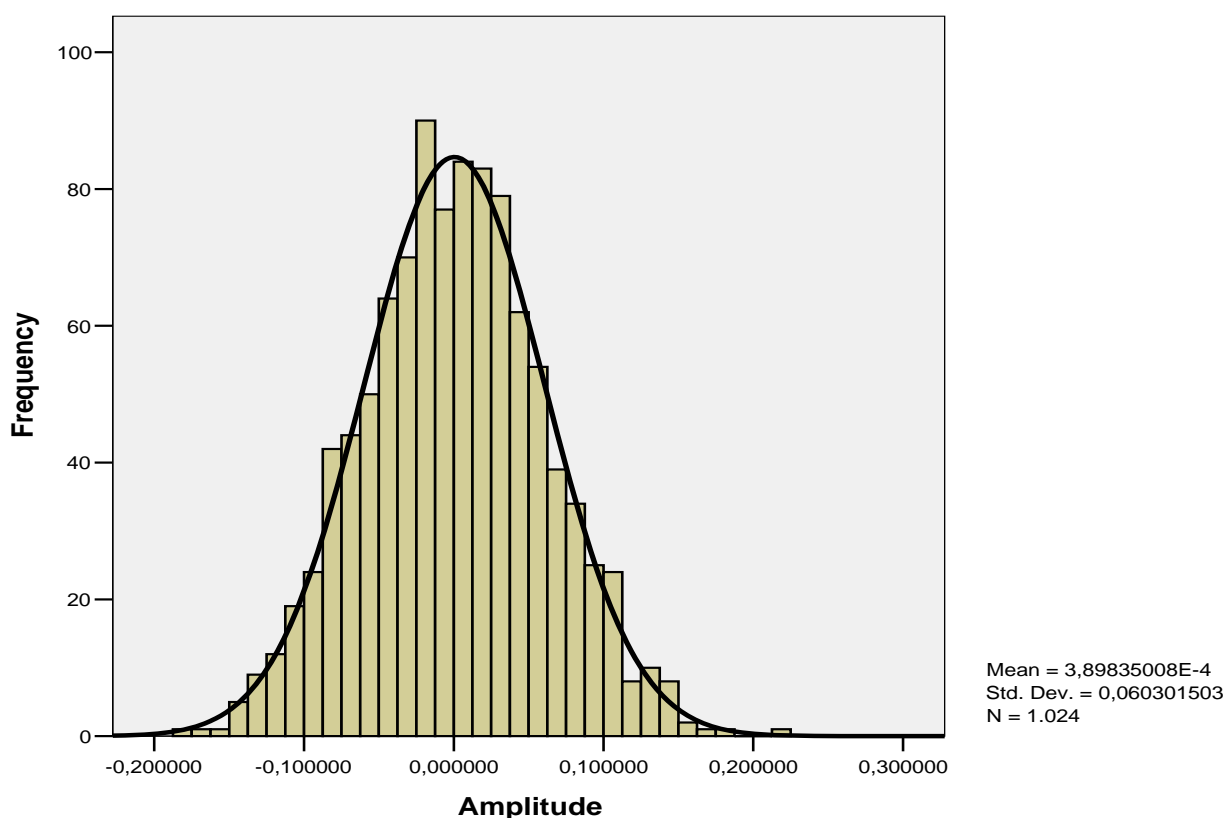
3.4.3. Έλεγχος κανονικής κατανομής

Η μη συσχέτιση των δειγμάτων στο πεδίο του χρόνου δεν θέτει περιορισμούς στις τιμές που μπορεί να πάρει ένα σήμα. Έτσι, οποιαδήποτε κατανομή τιμών είναι δυνατή σε ένα σήμα λευκού θορύβου, αρκεί να ικανοποιείται η συνθήκη της μηδενικής μέσης τιμής. Ωστόσο, είναι αρκετά συνηθισμένη η εσφαλμένη αντίληψη ότι ο λευκός θόρυβος έχει κανονική κατανομή, ενώ στην πραγματικότητα καμία από τις δύο ιδιότητες δεν συνεπάγεται την άλλη. Το μοντέλο του λευκού θορύβου με κανονική κατανομή όμως προσεγγίζει πολύ συχνά φαινόμενα που απαντώνται σε πραγματικές συνθήκες και γι' αυτόν το λόγο είναι αρκετά χρήσιμο να γνωρίζουμε αν ο θόρυβος που υπάρχει σε κάποιο έχει κανονική κατανομή.

Προκειμένου να εξακριβωθεί αν μια χρονοσειρά ακολουθεί κανονική κατανομή εφαρμόζεται ο έλεγχος Kolmogorov-Smirnov [33]. Η στατιστική συνάρτηση Kolmogorov-Smirnov, Z , ποσοτικοποιεί την απόσταση ανάμεσα στην εμπειρική συνάρτηση κατανομής του δείγματος, η οποία υπολογίζεται απευθείας από τα δεδομένα, και την αθροιστική συνάρτηση κατανομής της υπό εξέταση κατανομής, η οποία υπολογίζεται θεωρητικά. Η συνάρτηση Z υπολογίζεται από την απόλυτη τιμή της μέγιστης διαφοράς ανάμεσα στις δύο κατανομές.

Πίνακας 6 Έλεγχος Kolmogorov-Smirnov του καταγεγραμμένου θορύβου για κανονική κατανομή

		Πλάτος θορύβου
Πλήθος δειγμάτων		1024
Παράμετροι κανονικής κατανομής	Μέση τιμή	0,00039
	Τυπική απόκλιση	0,060
Ακρότατες διαφορές από τη θεωρητική κανονική κατανομή	Απόλυτη τιμή	0,013
	Θετική	0,013
	Αρνητική	-0,009
Kolmogorov-Smirnov Z		0,408
Ασυμπτωτική πιθανότητα		0,996



Εικόνα 14 Ιστόγραμμα των τιμών του πλάτους του καταγεγραμμένου θορύβου σε σχέση με την κανονική κατανομή με την ίδια μέση τιμή και τυπική απόκλιση.

Ο Πίνακας 6 δείχνει το αποτέλεσμα του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov για ένα τυχαία επιλεγμένο παράθυρο θορύβου 1024 δειγμάτων. Υπολογίστηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του δείγματος. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέγιστες διαφορές του πλάτους του δείγματος από τη θεωρητική κανονική κατανομή με μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίσες με αυτές του δείγματος και με βάση αυτές υπολογίστηκε το Z. Προκύπτει ότι η πιθανότητα της

στατιστικής συνάρτησης Z είναι 0.996 δηλαδή αρκετά μεγαλύτερη από 0.05 που σημαίνει ότι η κανονική κατανομή αποτελεί μια ακριβή προσέγγιση της κατανομής του δείγματος που ελέγχθηκε. Στην Εικόνα 14 φαίνεται το ιστόγραμμα των πλατών του θορύβου αντιπαραβαλλόμενο με την αντίστοιχη κανονική κατανομή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕ WAVELETS

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ WAVELETS

Ο όρος κύμα χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια ταλαντωμένη συνάρτηση του χρόνου ή του χώρου όπως, για παράδειγμα, ένα ημίτονο. Από την άποψη αυτή, η ανάλυση Fourier είναι μια κυματική ανάλυση, καθώς αναπτύσσει τα σήματα σε ένα άθροισμα ημιτονοειδών συναρτήσεων. Καθώς τα ημίτονα είναι περιοδικές συναρτήσεις, αναλλοίωτες στο πεδίο του χρόνου, η αναπαράσταση ενός σήματος με τον μετασχηματισμό Fourier δίνει διακριτική ικανότητα αποκλειστικά στο πεδίο της συχνότητας. Κάτι τέτοιο επιτρέπει αποτελεσματική ανάλυση σημάτων που εμφανίζουν περιοδικότητα ή στασιμότητα, ωστόσο στην περίπτωση των μεταβατικών, μη στάσιμων φαινομένων, ο μετασχηματισμός Fourier αποδεικνύεται ανεπαρκής.

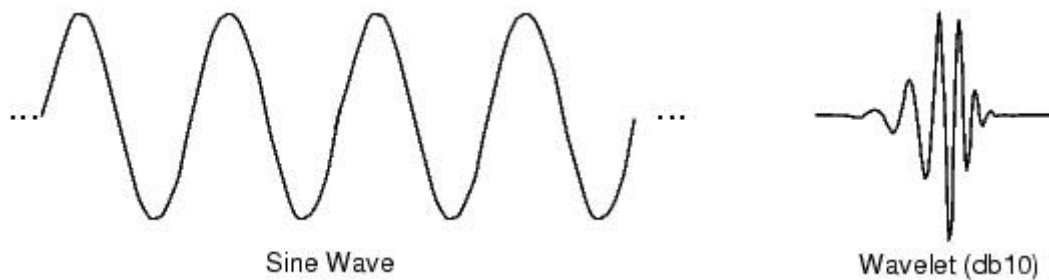
Η εισαγωγή των κυματιδίων (wavelets) [34], [35] για την επεξεργασία μεταβατικών φαινομένων αποτελεί μια καινοτομία στην επεξεργασία σήματος που έχει τις ρίζες της στην εργασία του Gabor [36] και θεμελιώθηκε 40 χρόνια αργότερα, από τον Morlet [37], [38] που χρησιμοποίησε wavelets για την ανάλυση σεισμικών σημάτων. Τα wavelets είναι συναρτήσεις που η μορφή τους θυμίζει σύντομες αποσβώμενες ταλαντώσεις, όπως φαίνεται στο παράδειγμα της Εικόνας 15. Αποτελούν, λοιπόν, σύντομα, εντοπισμένα στο πεδίο του χρόνου κύματα τα οποία, σε αντίθεση με τα ημίτονα του μετασχηματισμού Fourier, παρέχουν ανάλυση ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Οι πιο σημαντικές συνθήκες που πρέπει να ικανοποιεί μια συνάρτηση $\psi(t)$ προκειμένου να χαρακτηρίζεται ως wavelet είναι οι εξής:

- Ολοκληρωσιμότητα

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)| dt < \infty \quad \text{και} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (9)$$

- Μηδενική μέση τιμή:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (10)$$



Εικόνα 15 Μια ημιτονική συνάρτηση (αριστερά) και ένα κυματίδιο της οικογένειας Daubechies.

- Μοναδιαία ενέργεια:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1 \quad (11)$$

4.1.1. Αναπαράσταση συνεχών συναρτήσεων στον wavelet χώρο

Μια συνάρτηση που πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να αναπαρασταθεί ένα σήμα στον χώρο wavelet. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την $\psi(t)$ ως μητρική συνάρτηση από την οποία παράγονται μετατοπισμένες και διεσταλμένες εκδοχές της, με τον τρόπο που περιγράφεται από τη σχέση:

$$\psi_{\alpha,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \psi\left(\frac{t-b}{\alpha}\right) \quad (12)$$

Στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής α καλείται κλίμακα και είναι θετικός αριθμός που καθορίζει την διαστολή της μητρικής συνάρτησης, ενώ ο συντελεστής b είναι ένας πραγματικός αριθμός που αντιστοιχεί στην μετατόπιση της μητρικής συνάρτησης.

Οι μετατοπίσεις και διαστολές της συνάρτησης $\psi(t)$ ορίζουν μια ορθογωνική βάση στον χώρο $L^2(\mathbb{R})$ που είναι ο χώρος όλων των τετραγωνικά ολοκληρώσιμων συναρτήσεων. Αυτό σημαίνει ότι κάθε τετραγωνικά ολοκληρώσιμη συνάρτηση μπορεί να αναπαρασταθεί ως γραμμικός συνδυασμός των $\psi_{\alpha,b}(t)$. Έτσι, η προβολή μιας συνάρτησης $f(t)$ στον υποχώρο

που ορίζεται από την κλίμακα a δίνεται από την σχέση:

$$f_a(t) = \int_{\mathbb{R}} c_{\alpha,b} \cdot \psi_{\alpha,b}(t) db \quad (13)$$

όπου οι συντελεστές wavelet $c_{\alpha,b}$ υπολογίζονται:

$$c_{\alpha,b} = \langle f(t), \psi_{\alpha,b}(t) \rangle = \int_{\mathbb{R}} f(t) \cdot \overline{\psi_{\alpha,b}(t)} dt \quad (14)$$

όπου με $\langle \cdot, \cdot \rangle$ συμβολίζεται η πράξη του εσωτερικού γινομένου.

Με τον τρόπο που περιγράφηκε, ο μετασχηματισμός Wavelet επιτρέπει την ανάλυση ενός σήματος ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου, που αντιστοιχεί στις οριζόντιες μετατοπίσεις b της μητρικής συνάρτησης, και στο πεδίο της συχνότητας που αντιστοιχεί στην κλίμακα a . Έτσι, το σήμα αναλύεται σε διαφορετικές φασματικές συνιστώσες, τις κλίμακες, επιτρέποντας σε κάθε μία από αυτές να μελετηθεί και να υποστεί ξεχωριστή επεξεργασία.

Οι μέθοδοι ανάλυσης σημάτων στο πεδίο wavelet έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικά εργαλεία για την επεξεργασία μιας ευρείας κατηγορίας σημάτων όπου οι κλασσικές φασματικές αναλύσεις αποδεικνύονται ανεπαρκείς. Οι ιδιότητες που καθιστούν τους μετασχηματισμούς wavelet τόσο αποτελεσματικούς συνοψίζονται παρακάτω:

1. Το πλήθος των συντελεστών wavelet, $c_{\alpha,b}$ της σχέσης (14) ελαττώνεται σημαντικά σε σχέση με την κλίμακα a , όπως θα δούμε στις επόμενες παραγράφους. Η ιδιότητα αυτή κάνει την ανάλυση σημάτων με wavelets ιδιαίτερα αποδοτική και γι' αυτόν το λόγο, βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην συμπύεση, αποθορυβοποίηση και ανίχνευση σήματος και εικόνας.
2. Η ανάπτυξη ενός σήματος στον wavelet χώρο επιτρέπει ακριβή και εντοπισμένο διαχωρισμό των χαρακτηριστικών του σήματος. Σε αντίθεση με την ανάλυση Fourier, στην οποία τα χαρακτηριστικά ενός μεταβατικού φαινομένου χάνονται όταν δουλεύουμε με μεγάλα χρονικά παράθυρα, τα wavelets επιτρέπουν τον διαχωρισμό χαρακτηριστικών που αλληλεπικαλύπτονται είτε στο πεδίο της συχνότητας είτε στο πεδίο του

χρόνου.

3. Υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του σήματος που αναλύεται. Καθώς υπάρχουν πολλές διαθέσιμες συναρτήσεις wavelet, μπορεί να επιλεγεί αυτή που ταιριάζει καλύτερα στο υπό ανάλυση σήμα ή στις ανάγκες της εφαρμογής [39], [40].
4. Η υλοποίηση των διακριτών μετασχηματισμών wavelet, που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους, είναι εύκολη και αποδοτική σε ψηφιακά συστήματα, καθώς δεν απαιτούν ολοκληρώσεις και διαφορισμούς αλλά μόνο τις βασικές πράξεις του πολλαπλασιασμού και της πρόσθεσης.

4.2. ΟΙ ΔΙΑΚΡΙΤΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ WAVELET ΚΑΙ WAVELET PACKET

4.2.1. Διακριτοποίηση των παραμέτρων διαστολής και μετατόπισης

Η αναπαράσταση ενός σήματος στο wavelet πεδίο, όπως περιγράφεται από τις σχέσεις (13) και (14), είναι μια διαδικασία με εξαιρετικά μεγάλη πολυπλοκότητα. Αυτό οφείλεται στο άπειρο εύρος τιμών των παραμέτρων a και b και στον άπειρο αριθμό συντελεστών wavelet που προκύπτουν από αυτές.

Προκειμένου να γίνει πιο αποδοτική η αναπαράσταση ενός σήματος, αναζητείται κάποιο διακριτό υποσύνολο των τιμών των παραμέτρων a και b το οποίο να δίνει την δυνατότητα της ανασύνθεσης του αρχικού σήματος από τους αντίστοιχους συντελεστές wavelet. Έτσι, επιλέγονται για την παράμετρο a ακέραιες (θετικές και αρνητικές) δυνάμεις μιας αρχικής παραμέτρου $a_0 > 1$, δηλαδή $a = a_0^m$. Ακολουθώντας, η διακριτοποίηση της παραμέτρου b θα πρέπει να εξαρτάται από τις τιμές του m : όσο στενότερο είναι το wavelet (υψηλή συχνότητα) τόσο μικρότερο θα πρέπει να είναι το βήμα της μετατόπισης ώστε να καλυφθεί ολόκληρο το εύρος του χρόνου, ενώ όσο πλατύτερο είναι το wavelet (χαμηλή συχνότητα) τόσο μικρότερο το βήμα της μετατόπισης. Έτσι, καθώς το πλάτος της συνάρτησης $\psi(a_0^j t)$ είναι ανάλογο του a_0^j , επιλέγεται η διακριτοποίηση της παραμέτρου b να γίνει με βάση τη σχέση $b = k b_0 a_0^j$, όπου $b_0 > 0$ είναι η αρχική τιμή της μετατόπισης και $j \in \mathbb{Z}$. Εισάγοντας τις παραπάνω αλλαγές στην σχέση (12) παίρνουμε

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j}t - kb_0) \quad (15)$$

Η ανασύνθεση του σήματος $x(t)$ που αναλύεται με αυτόν τον τρόπο γίνεται από τον τύπο

$$x(t) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \langle x, \psi_{j,k} \rangle \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (16)$$

αρκεί να ικανοποιείται η προϋπόθεση ότι οι συναρτήσεις $\{\psi_{j,k}: j,k \in \mathbb{Z}^2\}$ σχηματίζουν ένα πλαίσιο Parseval του χώρου $L^2(\mathbb{R})$ [41].

Όπως και στην περίπτωση του συνεχούς μετασχηματισμού wavelet, έτσι και με την διακριτοποίηση που περιγράφεται παραπάνω, προκύπτει μια πλεονάζουσα αναπαράσταση του αρχικού σήματος. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα του μετασχηματισμού παραμένει αυξημένη καθώς ο υπολογισμός των συντελεστών wavelet εξακολουθεί να απαιτεί ολοκληρώσεις (βλ. σχέση (14)). Ο πλεονασμός αυτός μπορεί να εξαλειφθεί με την εισαγωγή μιας βοηθητικής συνάρτησης, της συνάρτησης κλιμάκωσης (scaling function), όπως περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

4.2.2. Πολυδιαχωριστική ανάλυση

Για κάποιες ειδικές περιπτώσεις των ψ , a_0 και b_0 , οι συναρτήσεις $\psi_{m,n}$ συνιστούν μια ορθοκανονική βάση του χώρου $L^2(\mathbb{R})$. Η συνηθέστερη επιλογή τιμών για τις παραμέτρους a_0 και b_0 είναι αντίστοιχα 2 και 1, και έτσι η διακριτοποίηση που επιτυγχάνεται στη σχέση (15) παίρνει την μορφή:

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (17)$$

Προκειμένου να περιγραφεί ο τρόπος που λειτουργεί η πολυδιαχωριστική ανάλυση (Multiresolution Analysis – MRA), ορίζεται στη συνέχεια μια νέα συνάρτηση, η συνάρτηση κλιμάκωσης $\varphi(t)$ από την οποία προκύπτει η μητρική συνάρτηση wavelet που περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Ένας υποχώρος V_0 του $L^2(\mathbb{R})$ καλύπτεται από μια οικογένεια συναρτήσεων κλιμάκωσης που προκύπτουν από την $\varphi(t)$ με οριζόντια

μετατόπιση κατά k :

$$V_0 = \overline{\text{Span}_k \{ \varphi_k(t) \}} \quad (18)$$

όπου η φ το σύμβολο της παύλας δηλώνει κλειστό χώρο. Η συνάρτηση $\varphi(t)$, δηλαδή, αποτελεί μια ορθοκανονική βάση για τον υποχώρο V_0 .

Το μέγεθος του υποχώρου που καλύπτεται με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αυξηθεί αν από την αρχική συνάρτηση κλιμάκωσης ορίσουμε μια οικογένεια συναρτήσεων που παράγονται από ταυτόχρονη μετατόπιση και διαστολή της, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k) \quad (19)$$

Έτσι, η επέκταση των συναρτήσεων $\varphi_{j,k}$ για $k \in \mathbb{Z}$ θα είναι:

$$V_j = \overline{\text{span}_k \{ \varphi_k(2^{-j}t) \}} = \overline{\text{span}_k \{ \varphi_{j,k}(t) \}} \quad (20)$$

Οι χώροι αυτοί έχουν την ιδιότητα [41]:

$$\{0\} \subset \dots \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset \dots \subset L^2\{\mathbb{R}\} \quad (21)$$

και συνεπώς, καθώς $\varphi \in V_0 \subset V_{-1}$ και η $\varphi_{-1,k}(t) = \sqrt{2} \varphi(2t-k)$ αποτελεί ορθοκανονική βάση του V_{-1} , θα υπάρχει $h_k = \sqrt{2} \langle \varphi, \varphi_{-1,k} \rangle$ τέτοιο ώστε:

$$\varphi_{-1,k} = \sum_k h_k \varphi(2t-k) \quad (22)$$

Η μητρική συνάρτηση wavelet προκύπτει από την συνάρτηση κλιμάκωσης με βάση τον τύπο [41]:

$$\psi(t) = \sum_k (-1)^k h_{-k+1} \varphi(2t - k) \quad (23)$$

Με αυτόν τον τρόπο, οι υποχώροι που κατασκευάζονται από τις συναρτήσεις $\psi_{j,k}$ είναι αντίστοιχα οι $W_1, W_0, W_{-1} \dots$ και αποτελούν ορθογώνιες διαφορές της ακολουθίας (21). Αυτό σημαίνει ότι ο υποχώρος W_j είναι το συμπλήρωμα του V_j μέσα στον χώρο V_{j-1} :

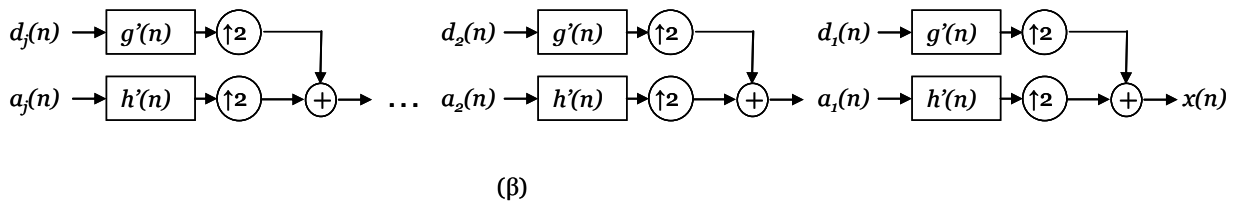
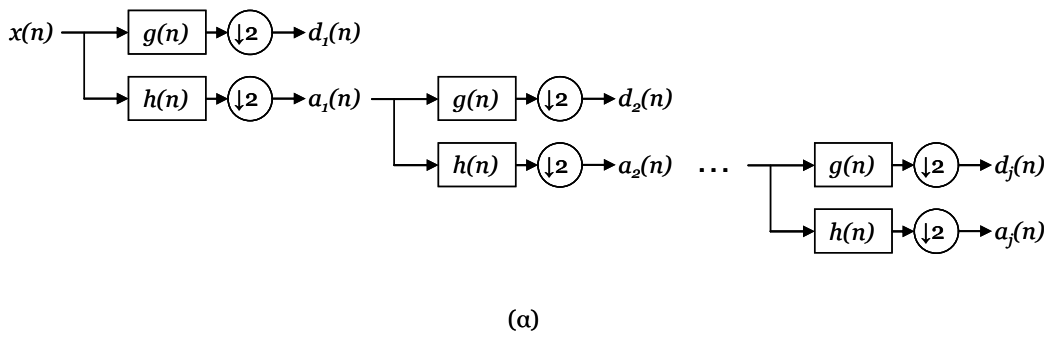
$$W_j = \overline{\text{span}_k \{ \psi_k(2^{-j}t) \}} = \overline{\text{span}_k \{ \psi_{j,k}(t) \}} \quad (24)$$

Σε αναλογία με το θεώρημα δειγματοληψίας των Shannon-Nyquist, ο χώρος V_j με απόσταση δειγματοληψίας 2^j καλύπτει περίπου τη συχνοτική ζώνη από 0 μέχρι 2^{j-1} . Ο συμπληρωματικός του χώρος, W_j θα καλύπτει το φάσμα $[2^{j-1}, 2^j]$. Η έννοια της πολυδιαχωριστικής ανάλυσης αφορά αυτόν ακριβώς τον διαχωρισμό του χώρου των συναρτήσεων $L^2(\mathbb{R})$ σε διαφορετικούς υποχώρους, κάθε ένας από τους οποίους καλύπτει διαφορετική συχνοτική ζώνη.

4.2.3. Αλγόριθμος διακριτού μετασχηματισμού wavelet

Από την περιγραφή της πολυδιαχωριστικής ανάλυσης που δόθηκε στην προηγούμενη παράγραφο προκύπτει ότι με την χρήση δύο συναρτήσεων, $\psi(t)$ και $\varphi(t)$ ένα σήμα μπορεί να αναλυθεί σε πολλές συνιστώσες, κάθε μία από τις οποίες καλύπτει διαφορετική συχνοτική ζώνη.

Ξεκινώντας από την διαπίστωση αυτή, ο Stephane Mallat [42] πρότεινε έναν αλγόριθμο υπολογισμού του διακριτού μετασχηματισμού wavelet (Discrete Wavelet Transform - DWT) που βασίζεται στην θεωρία των Quadrature Mirror Filters (QMF). Από τις σχέσεις (22) και (23) ορίζονται δύο φίλτρα πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (FIR). Το πρώτο φίλτρο, $h(n)$, αντιστοιχεί στην συνάρτηση κλιμάκωσης $\varphi(t)$ και είναι βαθυπερατό ενώ το δεύτερο, $g(n)$, αντιστοιχεί στην μητρική συνάρτηση $\psi(t)$ και είναι υψιπερατό. Έτσι, ένα διακριτό σήμα $x(n)$ μπορεί να αναλυθεί στους συντελεστές που προκύπτουν από την συνέλιξη του με καθένα από τα δύο φίλτρα. Η συνέλιξη με το φίλτρο $g(n)$ θα καλύπτει περίπου τη συχνοτική ζώνη $[0, f_s/2]$, όπου f_s είναι η συχνότητα δειγματοληψίας και οι συντελεστές που προκύπτουν



Εικόνα 16 (α) Αλγόριθμος ανάλυσης ενός διακριτού σήματος $x(n)$ με τον DWT (β) Ανσύνθεση του σήματος από τους συντελεστές wavelet με τον αντίστροφο DWT

καλούνται συντελεστές προσέγγισης (approximation coefficients). Αντίστοιχα, η συνέλιξη με το υψιπερατό φίλτρο $g(n)$ θα καλύπτει περίπου την συχνοτική ζώνη $[f_s/2, f_s]$ και οι συντελεστές που προκύπτουν καλούνται συντελεστές λεπτομέρειας (detail coefficients).

Σύμφωνα με το θεώρημα δειγματοληψίας, η διχοτόμηση του εύρους ζώνης του αρχικού σήματος συνεπάγεται ότι η απόσταση δειγματοληψίας μεταξύ των συντελεστών στις ομάδες λεπτομέρειας και προσέγγισης μπορεί να διπλασιαστεί. Έτσι, στο επόμενο βήμα του αλγορίθμου γίνεται υποδειγματοληψία των συντελεστών κι έτσι, το συνολικό πλήθος των συντελεστών που προέκυψαν από την ανάλυση του σήματος είναι ίσο με το αρχικό πλήθος δειγμάτων. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} a(n) &= (x * h)(n) \downarrow 2 \\ d(n) &= (x * g)(n) \downarrow 2 \end{aligned} \quad (25)$$

όπου $a(n)$, $d(n)$ είναι οι συντελεστές προσέγγισης και λεπτομέρειας αντίστοιχα, το σύμβολο $*$ δηλώνει την πράξη της συνέλιξης και το $\downarrow 2$ συμβολίζει την υποδειγματοληψία.

Λόγω της υποδειγματοληψίας, η διακριτική ικανότητα στο πεδίο του

χρόνου έχει υποδιπλασιαστεί, ωστόσο, κάθε ομάδα συντελεστών αντιστοιχεί στο μισό εύρος ζώνης του αρχικού σήματος, οπότε η διακριτική ικανότητα στο πεδίο της συχνότητας έχει διπλασιαστεί.

Η διαδικασία που περιγράφηκε μπορεί να επαναληφθεί μέχρι $\log_2 N$ φορές, όπου N το συνολικό μήκος του αρχικού σήματος, εφαρμόζοντας τα ίδια φίλτρα στους συντελεστές προσέγγισης. Το διάγραμμα της Εικόνας 16(α) περιγράφει την διαδικασία του DWT για τρία επίπεδα.

Το αρχικό σήμα μπορεί να ανασυσταθεί από τους συντελεστές wavelet, χωρίς απώλεια πληροφορίας, υλοποιώντας τον αντίστροφο DWT που περιλαμβάνει συνέλιξη με τα αντίστροφα φίλτρα, $g'(n), h'(n)$, και υπερδειγματοληψία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 16(β).

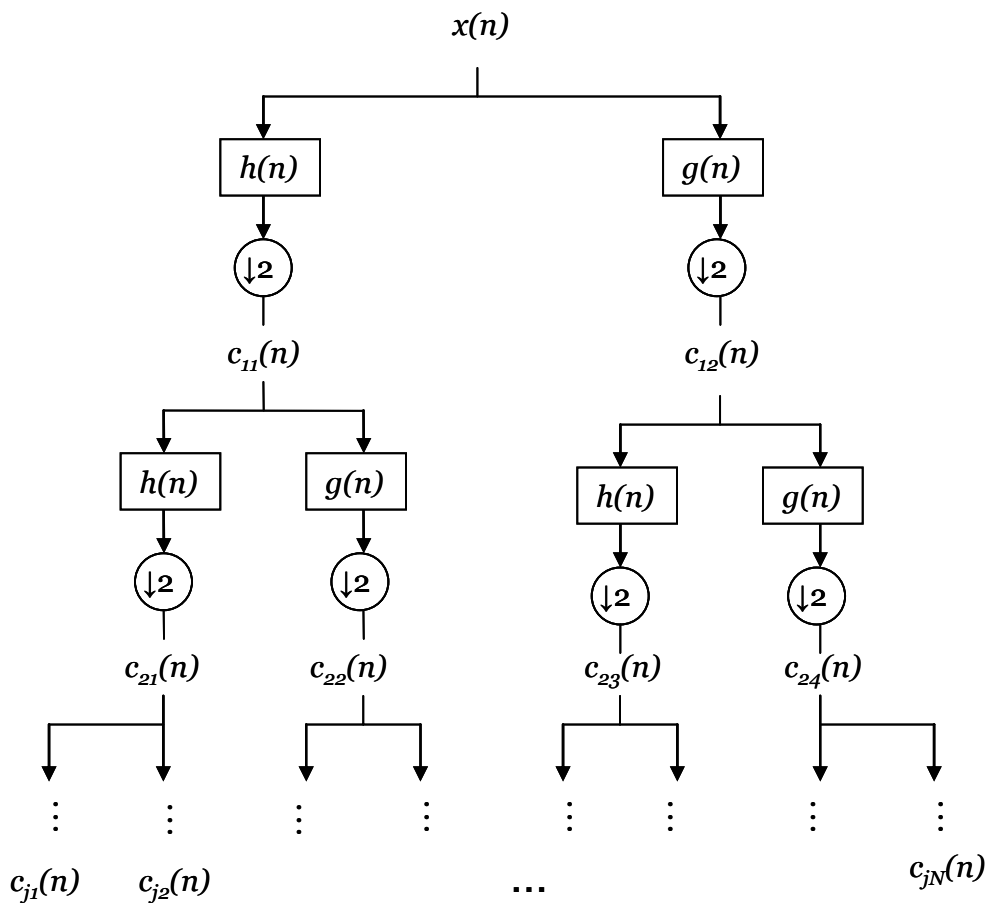
Εφαρμόζοντας τον DWT με τον αλγόριθμο που περιγράφηκε παίρνουμε μια ιδιαίτερα γρήγορη διαδικασία ανάλυσης των σημάτων. Συγκεκριμένα η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι της τάξης $O(N)$ δηλαδή σημαντικά χαμηλότερη από την πολυπλοκότητα $O(N \log_2 N)$ του FFT.

4.2.4. Αλγόριθμος διακριτού μετασχηματισμού πακέτων wavelet

Ο DWT, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο έχει το μειονέκτημα ότι η διακριτική του ικανότητα στο πεδίο της συχνότητας είναι λογαριθμικά κατανομημένη. Η ανάλυση των συντελεστών προσέγγισης με την εφαρμογή των ορθογώνιων φίλτρων καταλήγει να δίνει πλατύτερο εύρος ζώνης στις κλίμακες που αντιστοιχούν σε χαμηλότερες συχνότητες και στενότερο σε αυτές που αντιστοιχούν στις υψηλές συχνότητες.

Ο μετασχηματισμός πακέτων wavelet (Wavelet Packet Transform - WPT) αποτελεί μια γενίκευση του DWT από την άποψη ότι τα φίλτρα δεν εφαρμόζονται μόνο στους συντελεστές προσέγγισης αλλά και στους συντελεστές λεπτομέρειας. Η ανάλυση του σήματος με αυτόν τον τρόπο δίνει μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα στο πεδίο της συχνότητας. Στην Εικόνα 17 φαίνεται το πλήρες δυαδικό δέντρο που προκύπτει από την εφαρμογή του WPT σε ένα σήμα $x(n)$.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του μετασχηματισμού WPT είναι ότι, σε αντίθεση με τον DWT, παρέχει περισσότερες από μία βάσεις για την αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο wavelet. Κάθε υποσύνολο του δέντρου της Εικόνας 17



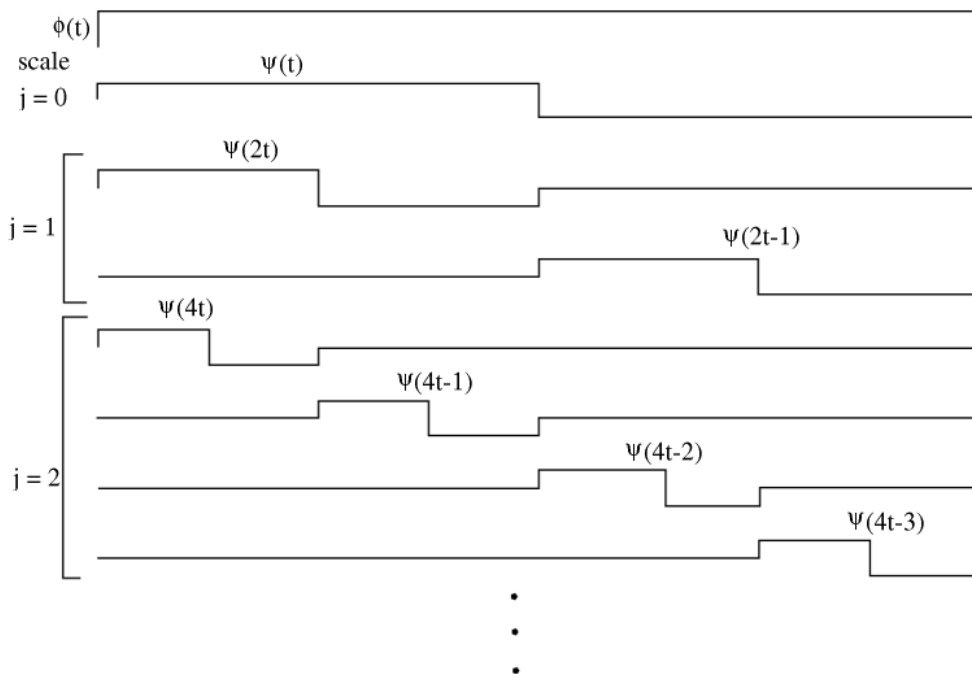
Εικόνα 17 Ανάλυση του σήματος $x(n)$ με τον WPT μέχρι την κλίμακα j

αποτελεί μια έγκυρη βάση για την αναπαράσταση του αρχικού σήματος $x(n)$. Έτσι, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, μπορεί κανείς να επιλέξει διαφορετικές συχνοτικές ζώνες να αναλύονται σε χαμηλότερες κλίμακες, δίνοντας μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα, ενώ άλλες να αναλύονται λιγότερο προκειμένου να αποφεύγονται περιττοί υπολογισμοί.

Η βελτιωμένη ανάλυση του σήματος με τον WPT καθιστά τον μετασχηματισμό αυτό ιδιαίτερα δημοφιλή σε εφαρμογές επεξεργασίας εικόνας, αποθρομβοποίησης και συμπίεσης σημάτων. Ωστόσο, η πολυπλοκότητά του είναι της τάξης $O(N \log_2 N)$, δηλαδή ανάλογη του FFT και αρκετά πιο μεγάλη από τον DWT.

4.3. TO WAVELET HAAR

Το 1909, ο Ούγγρος μαθηματικός Alfréd Haar πρότεινε μια σειρά συναρτήσεων προκειμένου να δώσει ένα παράδειγμα ορθοκανονικού



Εικόνα 18 Η συνάρτηση κλιμάκωσης και η μητρική συνάρτηση για το wavelet Haar, σε διαφορετικές κλίμακες και μετατοπίσεις

συστήματος για τον χώρο των τετραγωνικά ολοκληρώσιμων συναρτήσεων. Αν και ο όρος wavelet δεν χρησιμοποιήθηκε παρά πολύ αργότερα, σήμερα η συνάρτηση του Haar θεωρείται το πιο παλιό και το πιο απλό wavelet. Η απλότητα στην υλοποίηση και η εξαιρετική του τοπικότητα στο πεδίο του χρόνου το καθιστούν ένα πολύτιμο εργαλείο σε εφαρμογές ανίχνευσης μεταβατικών φαινομένων και ανωμαλιών σε σήματα, ειδικά σε περιπτώσεις που η υπολογιστική οικονομία αποτελεί σημαντική παράμετρο στον σχεδιασμό του συστήματος.

Η συνάρτηση κλιμάκωσης και η μητρική συνάρτηση για το wavelet Haar περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1 & t \in [0,1) \\ 0 & t \notin [0,1) \end{cases}$$

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & t \in [0,1/2) \\ -1 & t \in [1/2,1) \\ 0 & t \notin [0,1) \end{cases}$$

(26)

Οι παραπάνω συναρτήσεις για διαφορετικούς συντελεστές μετατόπισης και διαστολής, όπως δίνονται από την σχέση (17) δημιουργούν τις βάσεις για διαφορετικές κλίμακες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 18.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ

ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ

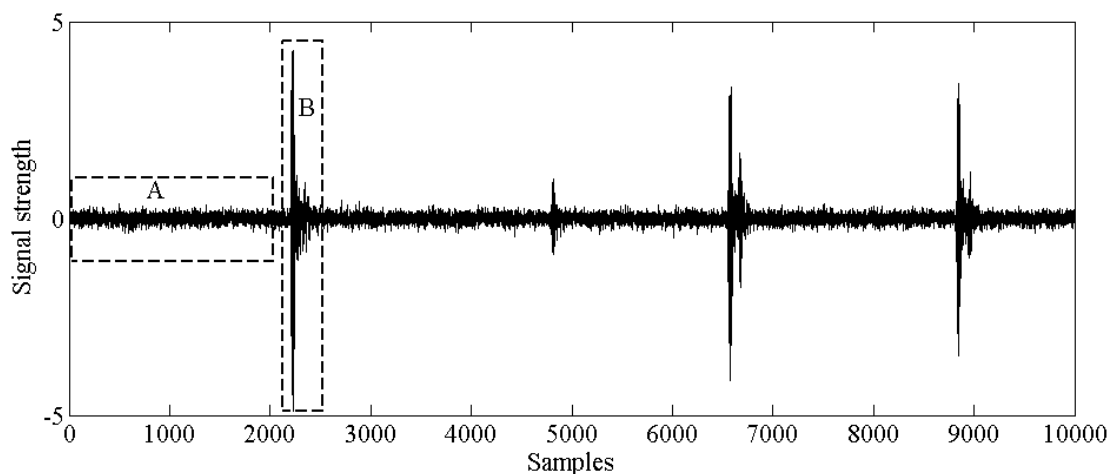
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια μέθοδος που χρησιμοποιεί τον διακριτό μετασχηματισμό wavelet για την ανίχνευση σεισμικών γεγονότων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί αναλυτικά στο 3^ο κεφάλαιο, η σεισμική διάδοση είναι ένα φαινόμενο του οποίου τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται σημαντικά σε σχέση με τη φύση του μέσου διάδοσης. Ο καθορισμός αυτών των χαρακτηριστικών απαιτεί εκτεταμένες in-situ μετρήσεις [43] και γι' αυτό το λόγο δεν ενδείκνυται για εφαρμογές ανεπιτήρητων δικτύων αισθητήρων. Η μέθοδος που προτείνεται έχει σχεδιαστεί ώστε να μην απαιτείται κάποια εκ των προτέρων γνώση για τα χρονικά και φασματικά χαρακτηριστικά των γεγονότων που πρόκειται να καταγραφούν. Τα πλεονεκτήματα του DWT χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των σημάτων που λαμβάνονται προκειμένου να γίνεται ασφαλής διαχωρισμός ανάμεσα στα σεισμικά γεγονότα και τον θόρυβο ακόμα και σε συνθήκες ιδιαίτερα χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου.

5.1. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ DWT ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ

Στην προτεινόμενη μέθοδο που περιγράφεται παρακάτω [44], το καταγεγραμμένο σήμα αναλύεται με τον DWT με τη χρήση της συνάρτησης Haar ως μητρικής συνάρτησης του μετασχηματισμού. Αρχικά, ο μετασχηματισμός χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του θορύβου από το σήμα. Για τη διαδικασία αυτή δοκιμάζονται τρεις μέθοδοι κατωφλίωσης των συντελεστών wavelet από τις οποίες οι δύο είναι προσαρμοζόμενες ανάλογα με την κλίμακα των συντελεστών ενώ η τρίτη χρησιμοποιεί ένα γενικευμένο κατώφλι. Έπειτα, το αποθορυβοποιημένο σήμα αναλύεται με βάση τα χαρακτηριστικά του στο wavelet πεδίο προκειμένου να ληφθεί αποφασιστεί αν πρόκειται για σεισμικό γεγονός ή θόρυβο.

Η μέθοδος που προτείνεται δεν απαιτεί κάποια εκ των προτέρων γνώση



Εικόνα 19 Παράδειγμα καταγεγραμμένου σήματος από ένα κανάλι, όπου φαίνεται στην περιοχή A ο θόρυβος του περιβάλλοντος και στην περιοχή B ένα από τα τέσσερα καταγεγραμμένα σεισμικά γεγονότα.

των χαρακτηριστικών του σήματος, καθώς από τα χαρακτηριστικά του στο πεδίο του χρόνου εξάγονται οι παράμετροι για τη βέλτιστη ανάλυσή του.

5.1.1. Ανίχνευση πιθανών σεισμικών γεγονότων και υπολογισμός βέλτιστων παραμέτρων του DWT

Στην πρώτη φάση του αλγορίθμου, καταγράφεται και αναλύεται ένα χρονικό παράθυρο N δειγμάτων που περιέχει μόνο θόρυβο, όπως αυτό που φαίνεται στην περιοχή A της Εικόνας 19. Αυτό το τμήμα χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η διασπορά σ^2 του θορύβου σε κάθε κανάλι. Ορίζεται μια τιμή κατώφλιου σύμφωνα με τη σχέση:

$$t_0 = \sigma \sqrt{2 \log N} \quad (27)$$

Στη συνέχεια το καταγεγραμμένο σήμα χωρίζεται σε χρονικά παράθυρα N δειγμάτων και κάθε δείγμα συγκρίνεται με την το κατώφλι t_0 . Αν κάποιο δείγμα ξεπερνά την τιμή αυτή, αυτό σημαίνει ότι έχει ανιχνευτεί ένα σεισμικό γεγονός σαν αυτό που φαίνεται στην περιοχή B της Εικόνας 19 ή ότι πρόκειται για εσφαλμένη ανίχνευση. Και στις δύο περιπτώσεις ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο βήμα όπου καθορίζονται η κεντρική συχνότητα, η συχνότητα περιβάλλουσας και η διάρκεια του γεγονότος και ελέγχεται το ενδεχόμενο

εσφαλμένης ανίχνευσης.

Όταν κάποιο σήμα φτάνει στην τοποθεσία του αισθητήρα, η σεισμική μάζα του τελευταίου αρχίζει μια αποσβενόμενη ταλάντωση, τα χαρακτηριστικά της οποίας εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους και από την απόκριση συχνότητας του αισθητήρα, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2. Για κρουστικά σήματα, και εφόσον ο αισθητήρας λειτουργεί στη γραμμική του περιοχή αναμένεται το φάσμα του σήματος να περιέχει μια κυρίαρχη αρμονική η οποία αντιστοιχεί στη συχνότητα ταλάντωσης του εδάφους. Προκειμένου να προσδιοριστεί αυτή η συχνότητα, την οποία καλούμε κεντρική συχνότητα, f_c , ο αλγόριθμος μετράει τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών μηδενισμών του σήματος και τα πλάτη των κορυφών ανάμεσά τους. Το γεγονός θεωρείται ότι έχει φτάσει στο τέλος του όταν τρεις διαδοχικές κορυφές δεν ξεπερνούν την τιμή κατωφλίου t_o οπότε ο αλγόριθμος αποφασίζει ότι το η ταλάντωση έχει αποσβεθεί σε επίπεδο χαμηλότερο του θορύβου. Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών μηδενισμών του σήματος αντιστοιχεί στο ήμισυ της περιόδου της ταλάντωσης του αισθητήρα. Συνεπώς η κεντρική συχνότητα υπολογίζεται ως η μέση τιμή του αντίστροφου των περιόδων από τη στιγμή της ανίχνευσης του γεγονότος μέχρι την απόσβεσή του:

$$f_c = \left(\frac{2}{Z-1} \sum_{i=2}^Z (z_i - z_{i-1}) \right)^{-1}, \quad (28)$$

όπου Z είναι ο συνολικός αριθμός των μηδενισμών που ανιχνεύθηκαν, και z_i η χρονική στιγμή που καταγράφηκε ο i -οστός μηδενισμός.

Δεδομένης της συνολικής διάρκειας του γεγονότος, ΔT_e , από τη στιγμή της αρχικής ανίχνευσης μέχρι την απόσβεσή του κάτω από το επίπεδο του θορύβου, μπορούμε να εκτιμήσουμε τη συχνότητα της περιβάλλουσας, f_e :

$$f_e = \frac{1}{2\Delta T_e} \quad (29)$$

Οι δύο συχνότητες που υπολογίζονται στις σχέσεις (28) και (29)

αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλίμακες στο wavelet πεδίο, οι οποίες υπολογίζονται από τη σχέση:

$$s_i = \log_2 \frac{f_s}{2f_i}, \quad (30)$$

όπου f_s είναι η συχνότητα δειγματοληψίας, το i αντιπροσωπεύει τους ενδείκτες c και e για την κεντρική κλίμακα και την κλίμακα περιβάλλουσας αντίστοιχα, και το s_i στρογγυλοποιείται στον κοντινότερο ακέραιο.

Καθώς η συχνότητα της περιβάλλουσας είναι η χαμηλότερη συχνότητα του εύρους ζώνης του σήματος, η κλίμακα s_e αντιστοιχεί στη χαμηλότερη κλίμακα που αναμένεται να περιέχει σχετική πληροφορία. Συνεπώς, για την αφαίρεση του θορύβου από το σήμα, η s_e καθορίζεται ως χαμηλότερη κλίμακα ανάλυσης του σήματος με τον DWT.

5.1.2. Κατωφλίωση των συντελεστών wavelet.

Το επόμενο βήμα για την κατάταξη του καταγεγραμμένου γεγονότος ως πραγματικού σεισμικού γεγονότος ή εσφαλμένης ανίχνευσης είναι η αφαίρεση του θορύβου. Έχοντας καθορίσει το χαμηλότερο επίπεδο στο οποίο θα πρέπει να αναλυθεί το σήμα, ο αλγόριθμος προχωρά στην ανάλυσή του με τη χρήση του DWT χρησιμοποιώντας ως μητρική συνάρτηση τη συνάρτηση Haar. Η αφαίρεση του θορύβου γίνεται με την εφαρμογή κατωφλίων σε όλους τους συντελεστές λεπτομέρειας και την ανασύνθεση του σήματος χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που προκύπτουν μετά την κατωφλίωση.

Για την επιλογή των κατάλληλων τιμών κατωφλίου έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι [45]. Γενικά, οι μέθοδοι χωρίζονται σε αυτές που η τιμή του κατωφλίου είναι διαφορετική για κάθε κλίμακα ανάλυσης [46] και σε αυτές που το ίδιο κατώφλι χρησιμοποιείται για όλες τις κλίμακες, όπως η μέθοδος VisuShrink η οποία προτείνεται στο [47].

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου έχει να κάνει με την εκάστοτε εφαρμογή. Στην περίπτωση της εκτίμησης του TOA πρέπει να λαμβάνονται υπόψη δύο βασικές απαιτήσεις. Η πρώτη είναι ότι το διάνυσμα του σήματος θα πρέπει να είναι αραιό. Ο ακριβής καθορισμός του χρόνου άφιξης

εξαρτάται σημαντικά από τον βαθμό εξάλειψης του θορύβου διαφορετικά αυξάνονται τα ποσοστά εσφαλμένων ανιχνεύσεων και η ανακρίβεια στον υπολογισμό. Επιπλέον, το ανακτηθέν σήμα θα πρέπει να διατηρεί τα φασματικά χαρακτηριστικά του αρχικού σήματος ώστε να αποφεύγεται η πιθανότητα να χάνονται οι αρχικές διακυμάνσεις που υποδηλώνουν την άφιξη του σήματος.

Στην περίπτωση του κοινού κατωφλίου για όλες τις κλίμακες, ενώ η αποθορυβοποίηση μπορεί να είναι ικανοποιητική, υπάρχει το μειονέκτημα ότι η τιμή του κατωφλίου δεν είναι βέλτιστη για κάθε κλίμακα, με αποτέλεσμα να υπάρχει ο κίνδυνος, μαζί με τον θόρυβο να χάνονται και κρίσιμες συνιστώσες του σήματος που τελικά επηρεάζουν την ακρίβεια εκτίμησης του ΤΟΑ.

Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα έχουν προταθεί τεχνικές προσαρμοζόμενων κατωφλίων ή υβριδικές οι οποίες βελτιστοποιούν από πλευράς μέσου τετραγωνικού σφάλματος την αποθορυβοποίηση αλλά το σήμα που προκύπτει δεν είναι τόσο αραιό όσο στην περίπτωση του κοινού κατωφλίου.

Παρακάτω περιγράφονται και υλοποιούνται τρεις διαφορετικές μέθοδοι κατωφλίωσης. Η επιδόσεις τους με βάση δύο κριτήρια. Το πρώτο αφορά την ικανότητα του αλγορίθμου να διαχωρίζει τα πραγματικά σεισμικά γεγονότα από τους τυχαίους σκανδαλισμούς που προκαλούν οι θορυβώδεις κορυφές που ξεπερνούν το προκαταρκτικό κατώφλι t_0 . Το δεύτερο κριτήριο είναι το ποσοστό σφαλμάτων στον υπολογισμό των χρόνων άφιξης και η επίδρασή τους στο τελικό αποτέλεσμα του εντοπισμού της πηγής.

- **Γενικευμένο κατώφλι.** Η πιο απλή και διαδεδομένη μέθοδος κατωφλίωσης των συντελεστών wavelet είναι η εφαρμογή ενός κοινού κατωφλίου σε όλες τις κλίμακες, η τιμή του οποίου δίνεται από τη σχέση (27).
- **Προσαρμοζόμενο κατώφλι.** Μια παραλλαγή του γενικευμένου κατωφλίου είναι η εφαρμογή του κατωφλίου της σχέσης (27) σε κάθε κλίμακα ανεξάρτητα, δεδομένου ότι είναι γνωστές οι διασπορές των συντελεστών σε κάθε κλίμακα. Τότε η σχέση που δίνει το κατώφλι για κάθε κλίμακα είναι:

$$t_k = a\sigma_k\sqrt{2\log(n_k)} \quad k=1,2,\dots,L \quad (31)$$

όπου σ_k και n_k είναι η τυπική απόκλιση και το πλήθος των συντελεστών wavelet στο επίπεδο k αντίστοιχα, και L είναι το χαμηλότερο επίπεδο ανάλυσης του σήματος με τον DWT. Επιπλέον, εισάγεται ένας ρυθμιστικός συντελεστής a η τιμή του οποίου επιλέγεται εμπειρικά.

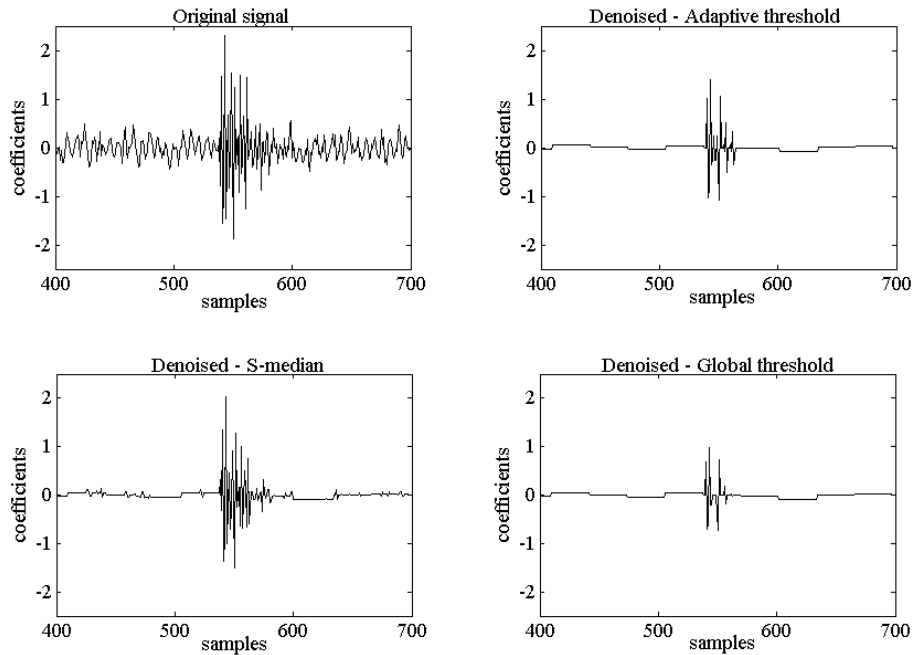
- **S-median.** Η συγκεκριμένη μέθοδος κατωφλίωσης έχει πρόσφατα προταθεί για αποθορυβοποίηση ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων [48]. Έχει το πλεονέκτημα ότι η αποθορυβοποιημένη ανασύνθεση του σήματος κρατώντας ταυτόχρονα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στο ελάχιστο. Η τιμή του κατωφλίου υπολογίζεται για κάθε επίπεδο σύμφωνα με τον τύπο:

$$t_k = \frac{\sigma_k\sqrt{2\log(n_k)}}{S_k + b} \quad k=1,2,\dots,L \quad (32)$$

όπου S_k είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από την κλίμακα και b είναι μια ρυθμιστική παράμετρος. Η τιμή της S_k ορίζεται από τη σχέση:

$$S_k = 2^{(L-k/L)} \quad (33)$$

Στην Εικόνα 20 δίνεται ένα παράδειγμα αποθορυβοποίησης του ίδιου σεισμικού γεγονότα για καθεμία από τις μεθόδους που περιγράφηκαν με τη χρήση της συνάρτησης Haar ως μητρικής συνάρτησης. Φαίνεται ότι η μέθοδος S-median δίνει την πιο πιστή στο αρχικό σήμα ανασύνθεση, ωστόσο τα μέρη του χρονικού παραθύρου που περιέχουν θόρυβο δεν έχουν εξαλειφθεί πλήρως και το τελικό διάνυσμα του σήματος δεν προκύπτει ικανοποιητικά αραιό. Από την άλλη, οι μέθοδοι του γενικού και του προσαρμοσμένου κατωφλίου δίνουν αποτελέσματα με πολύ μικρή διασπορά θορύβου όμως ταυτόχρονα ελαττώνουν τα πλάτη των συντελεστών που αντιστοιχούν στο σεισμικό γεγονός, κάτι που επίσης μπορεί να δώσει εσφαλμένη εκτίμηση του ΤΟΑ.

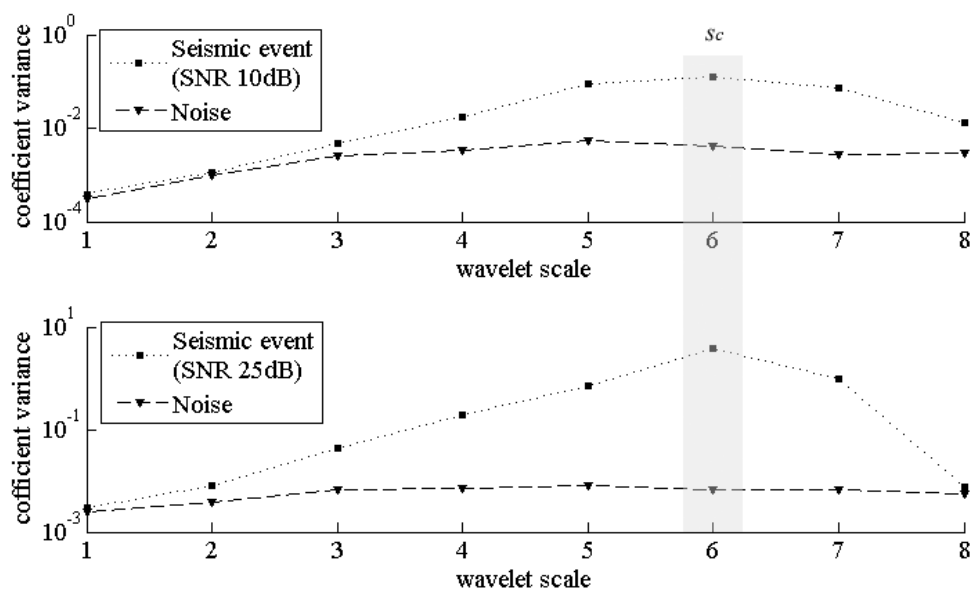


Εικόνα 20 Αποθορυβοποίηση ενός παραθύρου που περιέχει σεισμικό γεγονός με τρεις διαφορετικές μεθόδους.

5.1.3. Κατηγοριοποίηση ανιχνευμένου γεγονότος

Κάθε ένα από τα κατώφλια που περιγράφονται στις σχέσεις (27), (31), (32) προϋποθέτουν γνωστή τιμή για την τυπική απόκλιση του θορύβου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια επιτόπου καταγραφή από κάθε κανάλι του θορύβου του περιβάλλοντος, όπως αυτή που φαίνεται στην περιοχή A της Εικόνας 19. Το παράθυρο του θορύβου αναλύεται με τον DWT και τη συνάρτηση Haar, μέχρι την κλίμακα s_e που υπολογίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Για κάθε κλίμακα k υπολογίζεται η τυπική απόκλιση των συντελεστών wavelet σ_k . Οι τιμές των ρυθμιστικών συντελεστών επιλέγονται εμπειρικά, $a=1,4$ και $b=-0,5$, με κριτήριο να ελαχιστοποιείται το ποσοστό εσφαλμένων και αποτυχημένων ανιχνεύσεων στο διαθέσιμο σύνολο δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιείται η μέθοδος της μαλακής κατωφλίωσης [35].

Προκειμένου να κατηγοριοποιηθεί το καταγεγραμμένο γεγονός σε πραγματικό σεισμικό γεγονός ή εσφαλμένη ανίχνευση πρώτα αφαιρείται ο θόρυβος από το σήμα. Αυτό γίνεται ξεκινώντας από την πιο χαμηλή κλίμακα και θέτοντας το κατώφλι στους συντελεστές λεπτομέρειας. Χρησιμοποιώντας τους αποθορυβοποιημένους συντελεστές, εφαρμόζεται μία φορά ο



Εικόνα 21 Η διακύμανση των συντελεστών λεπτομέρειας σε κάθε κλίμακα για ένα σήμα με SNR 10dB (πάνω) και ένα με SNR 25dB (κάτω) σε σχέση με τις διακυμάνσεις του θορύβου. Η κεντρική κλίμακα, όπως καθορίστηκε αλγοριθμικά, υποδεικνύεται με τη σκιασμένη περιοχή.

αντίστροφος DWT. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να φτάσουμε την κλίμακα s_c . Η ζώνη συχνοτήτων που αντιστοιχεί σε αυτήν την κλίμακα περιέχει την κεντρική συχνότητα ταλάντωσης τους αισθητήρα, εφόσον το ανιχνευμένο γεγονός προκλήθηκε από κρουστική διέγερση του εδάφους. Γι' αυτόν το λόγο αναμένεται ότι η διακύμανση των συντελεστών του παραθύρου του γεγονότος σε αυτήν την κλίμακα θα απέχει πολύ από τη διακύμανση του καταγεγραμμένου θορύβου στην αντίστοιχη κλίμακα. Μια τέτοια σύγκριση φαίνεται στην Εικόνα 21 που δείχνει τις διακυμάνσεις σε όλες τις κλίμακες από την 1^η, που αντιστοιχεί στην πρώτη διχοτόμηση, μέχρι την 8^η για δύο σεισμικά γεγονότα με διαφορετικό σηματοθορυβικό λόγο (Signal to Noise Ratio, SNR) σε σύγκριση με την αντίστοιχη διακύμανση των συντελεστών του θορύβου.

Και στις δύο περιπτώσεις, η διακύμανση των συντελεστών μεγιστοποιείται στην κεντρική κλίμακα του σήματος, όταν υπάρχει σεισμικό γεγονός, καθιστώντας αυτή την κλίμακα ως την καταλληλότερη για να γίνει η διάκριση ανάμεσα στον θόρυβο και τα πραγματικά σεισμικά γεγονότα. Έτσι, προκειμένου να κατηγοριοποιηθεί το γεγονός ως πραγματικό σεισμικό γεγονός ή εσφαλμένη ανίχνευση, ο αλγόριθμος συγκρίνει τη διακύμανση των

συντελεστών της κεντρικής κλίμακας στο χρονικό διάστημα ΔT_e με τη διακύμανση των συντελεστών του θορύβου στην ίδια κλίμακα. Αν η πρώτη υπερβαίνει την τελευταία κατά μια συγκριτικό συντελεστή R , τότε καταχωρείται το γεγονός ως πραγματικό σεισμικό γεγονός. Στην αντίθετη περίπτωση, θεωρείται ότι έχουμε εσφαλμένη ανίχνευση και ο αλγόριθμος επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Η τιμή του συντελεστή R τέθηκε εμπειρικά ίση με 1,5.

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η διάρκεια ΔT_e του γεγονότος έχει υπολογιστεί απευθείας από το ανεπεξέργαστο σήμα. Ωστόσο, καθώς εφαρμόζεται ο DWT και το σήμα διχοτομείται, η κλίμακα του χρόνου μεταβάλλεται καθώς η ανάλυση ελαττώνεται κατά το ήμισυ σε κάθε. Έτσι, προκειμένου να αντιστοιχηθεί η χρονική περίοδος ΔT_e στην αντίστοιχη χρονική περίοδο για το επίπεδο k του μετασχηματισμού, υπολογίζεται η χρονική διάρκεια $\Delta T_{e,k}$ από τη σχέση:

$$\Delta T_{e,k} = 2^{-k} \Delta T_e \quad (34)$$

Συνοπτικά, ο αλγόριθμος για την ανίχνευση και κατηγοριοποίηση σεισμικών γεγονότων περιγράφεται από τα εξής βήματα:

1. Εκτίμηση της διάρκειας του γεγονότος, ΔT_e , χρησιμοποιώντας το προκαταρκτικό κατώφλι t_o .
2. Υπολογισμός της κεντρικής συχνότητας και της συχνότητας περιβάλλουσας και των αντίστοιχων κλιμάκων στο wavelet πεδίο, χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά του σήματος στο πεδίο του χρόνου.
3. Ανάλυση του χρονικού παραθύρου που περιέχει το ανιχνευθέν γεγονός με τον DWT, χρησιμοποιώντας ως μητρική συνάρτηση την Haar, μέχρι την κλίμακα s_e .
4. Εφαρμογή κατωφλίωσης, με την επιλεγμένη μέθοδο, στους συντελεστές λεπτομέρειας της χαμηλότερης κλίμακας και ανασύνθεση του σήματος κατά μία κλίμακα μέχρι να φτάσουμε την κεντρική κλίμακα s_c .
5. Σύγκριση της διακύμανσης των συντελεστών στην κεντρική κλίμακα κατά το χρονικό διάστημα $\Delta T_{e,k}$ με τη διακύμανση των συντελεστών

του θορύβου στην αντίστοιχη κλίμακα.

6. Απόφαση με τη χρήση του συγκριτικού συντελεστή R αν πρόκειται για πραγματικό σεισμικό γεγονός ή εσφαλμένη ανίχνευση.

5.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ

Υπάρχουν τέσσερεις πιθανές αποκρίσεις του αλγορίθμου εντοπισμού σεισμικών γεγονότων:

- **Ορθή ανίχνευση:** Ο αλγόριθμος αποφασίζει ότι υπάρχει σεισμικό γεγονός σε παράθυρο δεδομένων που πράγματι υφίσταται σεισμικό γεγονός. Οι αποφάσεις αυτές αναφέρονται στο εξής ως TP (True Positives).
- **Εσφαλμένη ανίχνευση:** Ο αλγόριθμος αποφασίζει ότι υπάρχει σεισμικό γεγονός σε παράθυρο δεδομένων που δεν υφίσταται σεισμικό γεγονός. Οι αποφάσεις αυτές αναφέρονται στο εξής ως FP (False Positives).
- **Ορθή απόρριψη:** Ο αλγόριθμος αποφασίζει ότι δεν υπάρχει σεισμικό γεγονός σε παράθυρο δεδομένων που πράγματι δεν υφίσταται σεισμικό γεγονός. Οι αποφάσεις αυτές αναφέρονται στο εξής ως TN (True Negatives).
- **Εσφαλμένη απόρριψη:** Ο αλγόριθμος αποφασίζει ότι δεν υπάρχει σεισμικό γεγονός σε παράθυρο δεδομένων που υφίσταται σεισμικό γεγονός. Οι αποφάσεις αυτές αναφέρονται στο εξής ως FN (False Negatives).

Πίνακας 7 Αποτελέσματα ανίχνευσης σεισμικών γεγονότων για τις υλοποιημένες μεθόδους κατώφλισης.

SNR (dB)	Προσαρμοζόμενο κατώφλι		S-median		Γενικευμένο κατώφλι	
	Εσφαλμένες απορρίψεις (%)	Εσφαλμένες ανιχνεύσεις (%)	Εσφαλμένες απορρίψεις (%)	Εσφαλμένες ανιχνεύσεις (%)	Εσφαλμένες απορρίψεις (%)	Εσφαλμένες ανιχνεύσεις (%)
0-6	47.7	18.2	47.6	26.2	51.2	20.9
6-10	4.2	18.8	6.4	21.0	8.9	17.8
10 και άνω	0	1.5	1.1	4.8	1.0	4.4

5.2.1. Πειραματικά αποτελέσματα

Το σύνολο των δεδομένων αποτελείται από 60 σεισμικά γεγονότα που

καταγράφηκαν από 6 αισθητήρες, δίνοντας συνολικά 360 καταγεγραμμένα γεγονότα με SNR που κυμαίνεται από 0 έως 31dB, για κάθε ένα ξεχωριστά. Το σύνολο των δεδομένων χωρίζεται σε 1440 παράθυρα των 256 δειγμάτων, από τα οποία τα 360 περιέχουν σεισμικά γεγονότα, και στο καθένα εφαρμόζεται ο αλγόριθμος ανίχνευσης της παραγράφου 5.1. Ελέγχεται ξεχωριστά καθεμία από τις τρεις προτεινόμενες μεθόδους κατωφλίωσης και τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 7.

Από τον Πίνακα 7 είναι σαφής η υπεροχή των δύο προσαρμοζόμενων μεθόδων κατωφλίωσης έναντι του γενικευμένου κατωφλίου. Επιπλέον, φαίνεται ότι το προσαρμοζόμενο κατώφλι υπερτερεί ελαφρώς του κατωφλίου S-median.

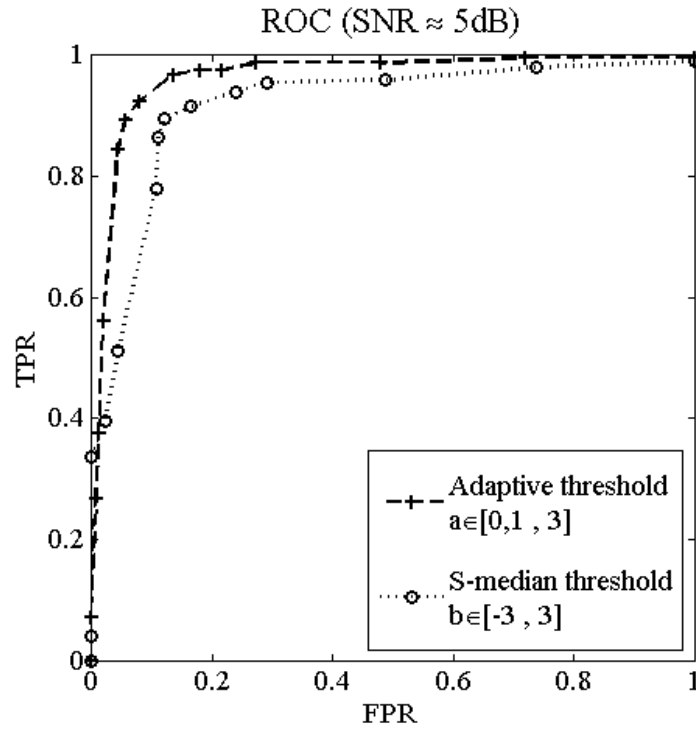
5.2.2. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Προκειμένου να προσδιοριστεί αναλυτικότερα η απόδοση του αλγορίθμου ανίχνευσης και κατηγοριοποίησης σεισμικών γεγονότων πραγματοποιήθηκε μια σειρά εκτελέσεων του αλγορίθμου σε προσομοιωμένα σήματα, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου του επιπέδου του θορύβου.

Σχεδιάστηκαν σήματα με μορφή αποσβενώμενης ταλάντωσης με βάση τη σχέση:

$$x(t) = \begin{cases} Ae^{-at} \sin(\omega t) & t \in \Delta T \\ 0 & t \notin \Delta T \end{cases} \quad (35)$$

όπου οι τιμές των συντελεστών A , a και ω επιλέχθηκαν ίσες με 5, 0.01 και 0.0897 αντίστοιχα προκειμένου να προσομοιώσουν τα χαρακτηριστικά των πραγματικών σημάτων που καταγράφηκαν σε μαλακό χώμα. Η παράμετρος ΔT αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα από την άφιξη μέχρι την απόσβεση του σήματος και ορίστηκε στα 500 δείγματα, ενώ η συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος τέθηκε ίση με 8 kHz. Στα σήματα που προκύπτουν προστίθεται λευκός θόρυβος με κανονική κατανομή η ισχύς του οποίου ρυθμίζεται κατά βούληση.



Εικόνα 22 ROC καμπύλες για την ανίχνευση σεισμικών γεγονότων με την μέθοδο του προσαρμοζόμενου κατωφλίου και του κατωφλίου S-median. Η ισχύς του θορύβου διατηρείται σταθερή στα 5 dB και μεταβάλλονται οι ρυθμιστικοί συντελεστές a και b

Με βάση τις τέσσερις πιθανές αποκρίσεις του αλγορίθμου που περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.2 ορίζονται τα ποσοστά των ορθών ανιχνεύσεων (True Positive Rate – TPR) και των εσφαλμένων ανιχνεύσεων (False Positive Rate – FPR) από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (36)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (37)$$

Διατηρώντας την ισχύ του θορύβου περίπου ίση με 5 dB παράγουμε 500 παράθυρα των 256 δειγμάτων από τα οποία τα 250 περιέχουν ένα προσομοιωμένο σεισμικό γεγονός και υπόλοιπα 250 περιέχουν μόνο θόρυβο. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης εκτελείται για καθένα από τα παραπάνω παράθυρα και συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα, τα οποία χωρίζονται σε TP , FN , FP , TN . Με την μέθοδο αυτή δοκιμάζεται η μέθοδος κατωφλίωσης των wavelet

συντελεστών με προσαρμοζόμενο κατώφλι και η μέθοδος κατωφλίωσης με το S-median κατώφλι. Επαναλαμβάνοντας τις προσομοιώσεις για διαφορετικές τιμές των ρυθμιστικών συντελεστών a και b των σχέσεων (31) και (32) αντίστοιχα, προκύπτει η ROC (*Receiver Operator Characteristic*) καμπύλη για κάθε μέθοδο κατωφλίωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 22.

Το εμβαδό της καμπύλης ROC χαρακτηρίζει την ικανότητα του αλγορίθμου ανίχνευσης να διαχωρίζει τα σεισμικά γεγονότα από τον θόρυβο. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 22 ο αλγόριθμος αποδίδει καλύτερα με την χρήση του προσαρμοζόμενου κατωφλίου, κάτι που επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις μας από τα πειραματικά αποτελέσματα. Επιπλέον, από τις εξαχθείσες ROC καμπύλες δίνεται η δυνατότητα να επιλεγούν οι βέλτιστες τιμές για τους ρυθμιστικούς συντελεστές a και b , που είναι αυτές που ελαχιστοποιούν την απόσταση της καμπύλης από το σημείο (0,1). Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 5.1.3 οι τιμές αυτές είναι 1,4 για τον συντελεστή a και -0.5 για τον συντελεστή b .

5.3. ΥΠΟΘΕΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΒΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

Η φύση των σημάτων που προκαλεί η διάδοση των δονήσεων από τον ανθρώπινο βηματισμό σε κάποιο έδαφος είναι, όπως έχει ήδη αναφερθεί κρουστική. Μια αρκετά δημοφιλής εφαρμογή στα δίκτυα αισθητήρων εδάφους είναι η ανίχνευση προσωπικού από τις σεισμικές διεγέρσεις που προκαλεί η κίνησή τους εντός της εμβέλειας του δικτύου [19], [20], [49], [50]. Στην ενότητα αυτή δοκιμάζεται η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου για ανίχνευση σεισμικών γεγονότων σε ένα σενάριο στο οποίο ο στόχος κινείται μέσα στην εμβέλεια ενός αισθητήρα.

5.3.1. Θεωρία αποφάσεων του Bayes

Η θεωρία αποφάσεων του Bayes είναι μια θεμελιώδης στατιστική προσέγγιση στο πρόβλημα της ταξινόμησης προτύπων. Θέτει το πρόβλημα της απόφασης ανάμεσα σε διαφορετικές κατηγορίες αντικειμένων με πιθανολογικούς όρους και προϋποθέτει ότι οι σχετικές πιθανότητες εμφάνισης των κατηγοριών είναι γνωστές.

Σε ένα απλό πρόβλημα απόφασης μεταξύ δύο κατηγοριών ω_1 και ω_2 ζητείται να ανατεθεί κάποια από τις τιμές αυτές στην μεταβλητή ω με βάση την εκτίμηση για την τιμή κάποιας τυχαίας μεταβλητής \mathbf{x} . Η τυχαία μεταβλητή \mathbf{x} αντιπροσωπεύει κάποιο χαρακτηριστικό που εξαρτάται από τη φύση της μεταβλητής ω , δηλαδή από την κατηγορία στην οποία ανήκει. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής \mathbf{x} είναι διαφορετική για κάθε κατηγορία του προβλήματός μας και συμβολίζεται ως $p(\mathbf{x}|\omega_j)$, $j=1,2$, δηλαδή ως η δεσμευμένη πιθανότητα της μεταβλητής \mathbf{x} δεδομένης της κλάσης ω_j της μεταβλητής ω .

Καθώς το πρόβλημα της ταξινόμησης της μεταβλητής ω αφορά την απόφαση που καλείται κάποιος να πάρει δεδομένης της μετρούμενης τιμής για την μεταβλητή \mathbf{x} , τότε το μέτρο της ορθότητας του συστήματος ταξινόμησης δίνεται από την τιμή της πιθανότητας $P(\omega_j|\mathbf{x})$, δηλαδή της δεσμευμένης πιθανότητας η μεταβλητή ω να παίρνει την τιμή ω_j για την δεδομένη τιμή της μεταβλητής \mathbf{x} . Σύμφωνα με το θεώρημα του Bayes η τιμή της πιθανότητας αυτής δίνεται από τη σχέση:

$$P(\omega_j|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}|\omega_j)P(\omega_j)}{p(\mathbf{x})} \quad j=1,2 \quad (38)$$

Στην παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται κεφαλαίο $P(\cdot)$ για να δηλώσει συνάρτηση πιθανότητας και μικρό $p(\cdot)$ για να δηλώσει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.

Η εξίσωση του Bayes δείχνει ότι παρατηρώντας την τιμή του \mathbf{x} μπορούμε να υπολογίσουμε την a posteriori πιθανότητα $P(\omega_j|\mathbf{x})$ από την a priori πιθανότητα $P(\omega_j)$.

Ένα σύστημα ταξινόμησης που χρησιμοποιεί την τιμή της εκτιμήτριας μεταβλητής \mathbf{x} προκειμένου να ταξινομήσει την μεταβλητή ω μπορεί να αποφασίσει ότι $\omega=\omega_1$ εφόσον $P(\omega_1|\mathbf{x}) > P(\omega_2|\mathbf{x})$. Ομοίως, στην περίπτωση που $P(\omega_1|\mathbf{x}) < P(\omega_2|\mathbf{x})$ η απόφαση θα είναι $\omega=\omega_2$. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η πιθανότητα σφάλματος, που δίνεται από την σχέση:

$$P(\text{error}|\mathbf{x}) = \min\{P(\omega_1|\mathbf{x}), P(\omega_2|\mathbf{x})\} \quad (39)$$

Ο κανόνας αυτός για την εκτίμηση του σφάλματος χρησιμοποιεί τις *a posteriori* πιθανότητες που δίνονται από την εξίσωση (38). Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται υπόψη η φύση του φαινομένου που μελετάται από την πιθανότητα $p(\mathbf{x}|\omega_j)$, και η συχνότητα εμφάνισης των φαινομένων ω_1 και ω_2 που είναι οι *a priori* πιθανότητες $P(\omega_j)$.

5.3.2. Χαρακτηριστικά προσομοίωσης και αποτελέσματα

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του ανθρώπινου βηματισμού προκειμένου να σχεδιαστεί ένα πρόγραμμα προσομοίωσης για τον έλεγχο της απόδοσης της προτεινόμενης μεθόδου ανίχνευσης και ταξινόμησης σεισμικών γεγονότων.

Στον Πίνακα 8 παρατίθενται επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά για τον ανθρώπινο βηματισμό, όπως προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις σε ενήλικο άτομο που βάδιζε με κανονικό ρυθμό σε οριζόντιο, επίπεδο έδαφος.

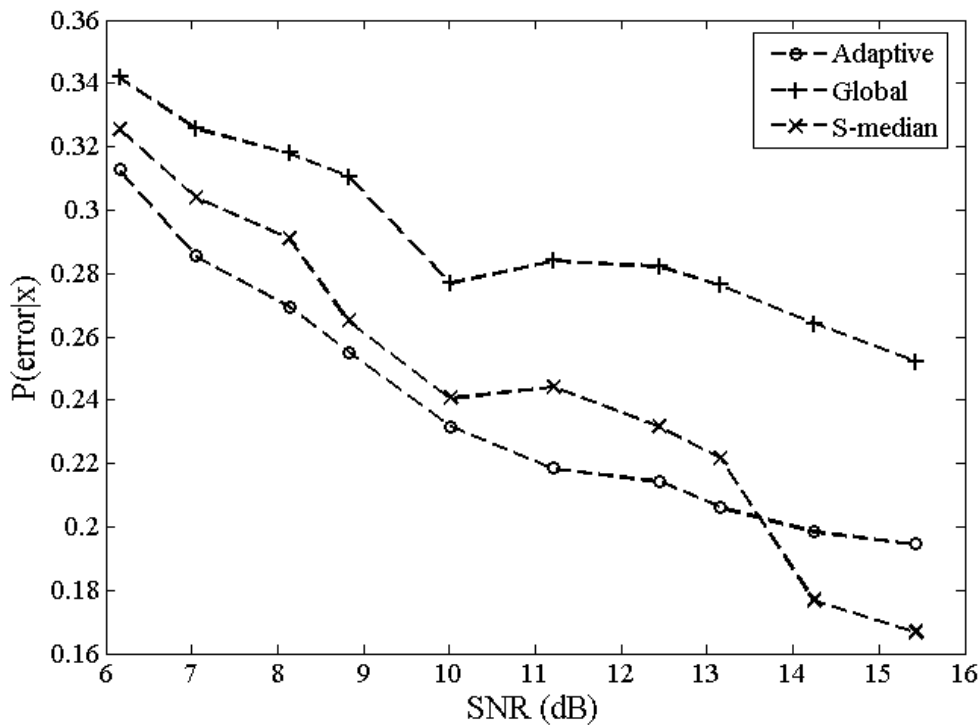
Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά ανθρώπινου βαδίσματος

Ρυθμός βαδίσματος	1,8 βήματα/s
Άνοιγμα βηματισμού	0,65 m/βήμα
Ταχύτητα βαδίσματος	1,17 m/s

Από τα στοιχεία του πίνακα 8, θεωρώντας ότι ο στόχος διανύει απόσταση 20m πριν βγει εκτός της εμβέλειας του αισθητήρα, προκύπτει ότι σε μια καταγραφή συνολικής διάρκειας περίπου 17 s θα έχουν καταγραφεί 30 σεισμικά γεγονότα. Όπως προκύπτει από τα καταγεγραμμένα σήματα σε μαλακό χώμα (βλ. Εικόνες 9 και 11), η συχνότητα ταλάντωσης του αισθητήρα είναι αρκετά χαμηλή, ώστε ο ρυθμός δειγματοληψίας των σημάτων να τεθεί στα 4 kHz. Έτσι, η καταγραφή κατά τη διάρκεια που ο στόχος βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια του αισθητήρα περιλαμβάνει $17 \times 4000 = 68000$ δείγματα.

Η προσομοίωση σχεδιάζεται ως εξής:

- Παράγονται 30 αποσβενώμενες ταλαντώσεις από τον τύπο (35) με



Εικόνα 23 Οι πιθανότητες εσφαλμένων ανιχνεύσεων ανθρώπινου βηματισμού για τις τρεις μεθόδους κατοφλίωσης των συντελεστών wavelet με την προτεινόμενη μέθοδο ανίχνευσης

τιμές για τα A , α , ω και ΔT επιλεγμένες ώστε η μορφή των σημάτων που προκύπτουν να προσομοιώνει τα καταγεγραμμένα σεισμικά γεγονότα σε μαλακό χώμα.

- Ανάμεσα σε κάθε ζεύγος σεισμικών γεγονότων παρεμβάλλονται μηδενικές τιμές, το πλήθος των οποίων υπολογίζεται από τον ρυθμό βαδίσματος του Πίνακα 8 για δεδομένη συχνότητα δειγματοληψίας 4 kHz.
- Στο σήμα που προκύπτει προστίθεται λευκός γκαουσιανός θόρυβος.
- Το σύνολο των δειγμάτων χωρίζεται σε 132 χρονικά παράθυρα των 512 δειγμάτων.

Αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα της ανίχνευσης του ανθρώπινου βηματισμού ως ένα πρόβλημα απόφασης ανάμεσα σε δύο καταστάσεις ω_1 και ω_2 , ύπαρξης και απουσίας σεισμικού γεγονότος αντίστοιχα, που λαμβάνεται με βάση το αποτέλεσμα x του αλγορίθμου ανίχνευσης που μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό, μπορούμε να αναλύσουμε την απόδοση του αλγορίθμου κατά Bayes, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.3.1. Για το σκοπό αυτό αρκεί να υπολογιστεί η πιθανότητα σφάλματος όπως δίνεται από την σχέση

(39).

Από την περιγραφή του προβλήματος που προηγήθηκε, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του ανθρώπινου βηματισμού, προκύπτει ότι στο σύνολο των 132 χρονικών παραθύρων, τα 30 από αυτά περιέχουν κάποιο σεισμικό γεγονός προκαλούμενο από την επαφή του ποδιού στο έδαφος. Έτσι, προκύπτουν οι a priori πιθανότητες:

$$P(\omega_1) = \frac{30}{132} = 0.227 \quad \text{και} \quad P(\omega_2) = \frac{102}{132} = 0.773$$

Οι πιθανότητες $p(\mathbf{x}|\omega_j)$ αντιπροσωπεύουν την κατανομή των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου έχοντας δεδομένη τη γνώση για την ύπαρξη ή μη σεισμικού γεγονότος. Για ευκολία, παρακάτω συμβολίζεται με $P(x|\omega_j)$ η πιθανότητα $P(\mathbf{x}=TRUE|\omega_j)$, δηλαδή η πιθανότητα να δώσει θετική απάντηση ο αλγόριθμος δεδομένης της ύπαρξης ή όχι σεισμικού γεγονότος στο χρονικό παράθυρο που εξετάζεται. Ανάλογα χρησιμοποιούνται οι συμβολισμοί $P(error|x)$ και $P(x)$. Προκειμένου να εκτιμηθούν οι τιμές τους, εκτελείται ο αλγόριθμος 100 φορές στο σύνολο των προσομοιωμένων δεδομένων για κάθε τιμή του προστιθέμενου θορύβου. Τα αποτελέσματα, όπως και στην παράγραφο 5.2.2 χωρίζονται σε TP , FN , FP , TN . Τελικά, οι τιμές των πιθανοτήτων υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} P(x|\omega_1) &= \frac{TP}{TP + FN} \\ P(x|\omega_2) &= \frac{FP}{TN + FP} \\ P(x) &= \frac{TP + FP}{TP + FN + FP + TN} \end{aligned} \quad (40)$$

Από τις τιμές που προκύπτουν για διαφορετικές τιμές του SNR προκύπτει το διάγραμμα σφάλματος της Εικόνας 23 που περιγράφει την απόδοση του αλγορίθμου ανίχνευσης στην περίπτωση που τα σεισμικά γεγονότα προκαλούνται από ανθρώπινο βηματισμό. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι συνεπή με τα πειραματικά δεδομένα, καθώς αποδεικνύουν την υπεροχή

των προσαρμοζόμενων μεθόδων σε σχέση με το γενικευμένο κατώφλι, ενώ φαίνεται, ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλού θορύβου, ότι το προσαρμοζόμενο κατώφλι αποδίδει καλύτερα σε σχέση με το κατώφλι S-median.

Μια δεύτερη παρατήρηση σε σχέση με τα αποτελέσματα της Εικόνας 23 είναι ότι τα σφάλματα στην ανίχνευση είναι αρκετά σημαντικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αναλύοντας κατά Bayes την απόδοση του αλγορίθμου, τα αποτελέσματα επηρεάζονται σημαντικά από την σπανιότητα του υπό ανίχνευση γεγονότος, που στην περίπτωση του ανθρώπινου βηματισμού είναι αρκετά μεγάλη, κρίνοντας από τις τιμές των πιθανοτήτων $P(\omega_1)$ και $P(\omega_2)$. Οι τιμές των σφαλμάτων ωστόσο, μπορούν να ελαττωθούν σημαντικά εφόσον υλοποιηθεί κάποια μέθοδος που θα προσαρμόζει τον ρυθμό δειγματοληψίας ώστε να είναι χαμηλότερος όταν δεν υπάρχει σκανδαλισμός του κατωφλίου της σχέσης (27) και θα αυξάνεται όταν ανιχνεύεται κάποιο πιθανό γεγονός, προκειμένου να αναλυθεί το σήμα με καλύτερη ακρίβεια. Μια τέτοια μέθοδος θα εξασφάλιζε μικρότερο αριθμό παραθύρων που δεν περιέχουν σεισμικά γεγονότα, αυξάνοντας την τιμή της πιθανότητας $P(\omega_1)$, ενώ παράλληλα θα εξασφάλιζε χαμηλή κατανάλωση στο σύστημα στις χρονικές περιόδους που δεν υπάρχει υποψία σεισμικού γεγονότος. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση που προηγήθηκε λαμβάνει υπόψη μόνο έναν αισθητήρα. Αντίθετα, σε συστήματα εντοπισμού θέσης της πηγής, όπως θα δείξουμε στα επόμενα κεφάλαια, είναι απαραίτητη η χρήση του ελάχιστου αριθμού 4 αισθητήρων ή 5 στην περίπτωση που η ταχύτητα διάδοσης είναι άγνωστη. Η ύπαρξη περισσότερων αισθητήρων στην περιοχή που κινείται ο στόχος εξασφαλίζει μικρότερες πιθανότητες σφαλμάτων στην ανίχνευση σεισμικών γεγονότων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

6.1. ΓΕΝΙΚΑ

Στη διεθνή βιβλιογραφία, είναι λίγες οι εργασίες που ασχολούνται με το πρόβλημα του καθορισμού του χρόνου άφιξης (Time of Arrival - TOA) του σήματος, κι αυτό γιατί οι περισσότερες εφαρμογές εντοπισμού θέσης της πηγής χρησιμοποιούν απευθείας εκτιμήσεις των διαφορών στους χρόνους άφιξης (Time Differences of Arrival – TDOA), οι οποίες, υπολογίζονται κατά κύριο λόγο απευθείας με τη χρήση μεθόδων ετεροσυσχέτισης και προσαρμοζόμενων φίλτρων.

Έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια ότι η φύση των μεταβατικών σεισμικών σημάτων καθιστά ακατάλληλες τις περισσότερες από τις μεθόδους που προτείνονται για απευθείας υπολογισμό των TDOA καθώς προϋποθέτουν υψηλή ετεροσυσχέτιση και αρκετή διάρκεια ώστε να συγκλίνουν στο σωστό αποτέλεσμα. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια ανασκόπηση των μεθόδων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για την εκτίμηση των TOA και TDOA και στη συνέχεια προτείνονται δύο μέθοδοι, βασιζόμενοι στον διακριτό μετασχηματισμό Wavelet (Discrete Wavelet Transform, DWT) και τον μετασχηματισμό Wavelet Packet (WPT) αντίστοιχα, για τον υπολογισμό του χρόνου άφιξης σε κάθε αισθητήρα ξεχωριστά.

Η ανάλυση των σημάτων με τους μετασχηματισμούς wavelet προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Κατ' αρχάς, η υπολογιστική πολυπλοκότητα των wavelet μεθόδων, και ιδιαίτερα του DWT, είναι αρκετά μικρότερη από τις μεθόδους που συνήθως χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των TDOA, καθιστώντας τα ένα πολύτιμο εργαλείο για χρήση σε εφαρμογές που η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικός παράγοντας. Επιπλέον, η χρήση του DWT, και ακόμα περισσότερο του WPT, δίνει μεγάλη διακριτική ικανότητα τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Ιδιαίτερα η χρήση της συνάρτησης Haar ως μητρικής συνάρτησης, η οποία παρουσιάζει

μεγάλη τοπικότητα στον χρόνο, είναι ιδανική για εφαρμογές εντοπισμού σύντομων μεταβατικών φαινομένων, όπως είναι τα σεισμικά σήματα κρουστικής φύσης [51]-[53].

Το κεφάλαιο είναι δομημένο ως εξής: Αρχικά, αναλύεται θεωρητικά η μέθοδος του υπερβολικού εντοπισμού της θέσης μιας πηγής σημάτων. Παρουσιάζεται αναλυτικά ένα παράδειγμα εντοπισμού με άγνωστη την ταχύτητα διάδοσης του σήματος, με τη χρήση σταθμισμένων ελάχιστων τετραγώνων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι διαθέσιμες στη διεθνή βιβλιογραφία μέθοδοι υπολογισμού του TDOA, και εξηγείται η ακαταλληλότητά τους για μη συσχετιζόμενα, μεταβατικά σήματα. Τέλος, προτείνονται δύο μέθοδοι ανίχνευσης σεισμικών γεγονότων και ελέγχονται οι επιδόσεις τους τόσο με πραγματικά πειραματικά δεδομένα όσο και με προσομοιώσεις στον υπολογιστή.

6.2. ΥΠΕΡΒΟΛΙΚΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΠΗΓΗΣ

6.2.1. Γενική περίπτωση

Ο υπερβολικός εντοπισμός της θέσης της πηγής ενός σήματος γίνεται από τις μετρούμενες διαφορές των χρόνων άφιξης σε M διαφορετικούς αισθητήρες. Η μέθοδος παίρνει το όνομά της από τον γεωμετρικό τόπο των σημείων που ορίζεται από τα TDOA ανάμεσα σε δύο κόμβους, ο οποίος είναι μια υπερβολική καμπύλη. Αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο εντοπισμού πηγής [54]-[59] καθώς, ακριβώς επειδή στηρίζεται στη διαφορά των χρόνων άφιξης του σήματος στους κόμβους, δεν απαιτεί εκ των προτέρων γνώση για τη στιγμή της εκπομπής του σήματος από την πηγή, όπως συμβαίνει με τις κυκλικές ή σφαιρικές εξισώσεις. Ωστόσο, υπάρχουν εργασίες που ξεκινώντας από τις κυκλικές εξισώσεις εισάγουν τις μετρήσεις των TDOA, κι έτσι ξεπερνούν το πρόβλημα του άγνωστου χρόνου εκπομπής [60]-[62].

Το διακριτό σήμα που λαμβάνεται από τον i -οστό αισθητήρα περιγράφεται από τη σχέση:

$$s_i(k) = s(k - D_i) + n_i(k) \quad i = 1, \dots, M \quad (41)$$

όπου s είναι το σήμα που εκπέμπει η πηγή, D_i και n_i είναι η χρονική καθυστέρηση και ο προστιθέμενος θόρυβος στον i -οστό αισθητήρα αντίστοιχα. Στην παραπάνω εξίσωση, για λόγους ευκολίας έχουν αγνοηθεί τα φαινόμενα απόσβεσης των σημάτων.

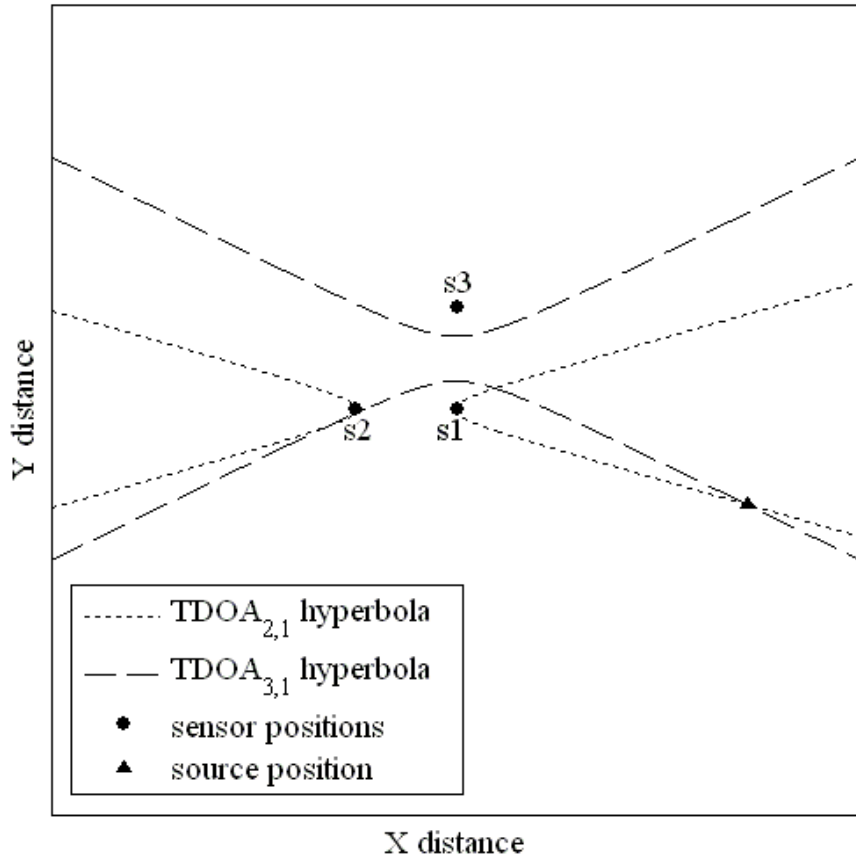
Έστω ότι οι συντεταγμένες κάθε αισθητήρα είναι οι γνωστές (x_i, y_i) και η θέση της πηγής έχει άγνωστες συντεταγμένες (x, y) . Θεωρώντας ως αισθητήρα αναφοράς τον πρώτο αισθητήρα που δέχεται το σήμα, συμβολίζουμε με $D_{i,1} = D_i - D_1$ τη διαφορά στους χρόνους άφιξης μεταξύ του i -οστού αισθητήρα και του πρώτου και με $r_{i,1}$ τη διαφορά στην απόσταση που διανύει το σήμα για να φτάσει από την πηγή σε κάθε έναν από τους αισθητήρες 1 και i . Τότε, παίρνουμε τη σχέση:

$$r_{i,1} = cD_{i,1} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad i = 2, 3, \dots, M \quad (42)$$

όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης του σήματος.

Στην περίπτωση που η ταχύτητα διάδοσης του σήματος είναι γνωστή, κάτι που ισχύει στις περιπτώσεις των ακουστικών σημάτων και των ραδιοσημάτων με μεγάλη ακρίβεια, τότε ο γεωμετρικός τόπος των σημείων (x, y) που ικανοποιούν τη σχέση (42) είναι μια υπερβολή. Το πρόβλημα του εντοπισμού της θέσης της πηγής, λοιπόν, ανάγεται στην αλγεβρική επίλυση του συστήματος που προκύπτει από τις εξισώσεις (42) για $i \geq 3$, δηλαδή στην εύρεση των σημείων τομής μεταξύ των υπερβολών που καθορίζονται από τις μετρηθείσες TDOA κάθε ζεύγους με αναφορά τον πρώτο αισθητήρα.

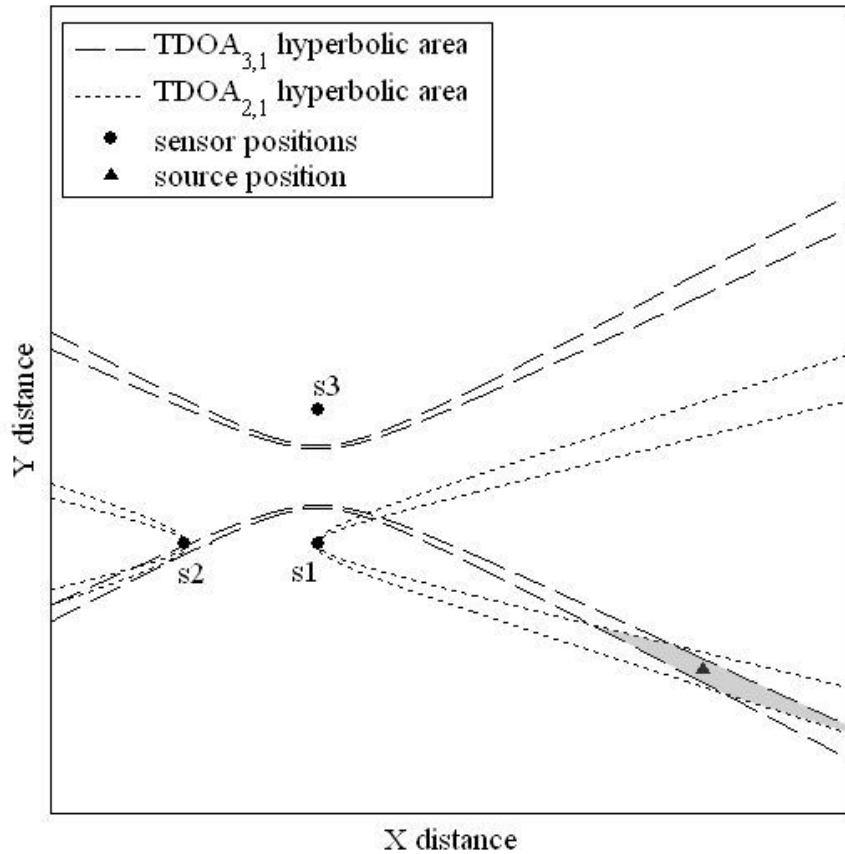
Στην Εικόνα 24 φαίνεται μια διάταξη τριών αισθητήρων και οι υπερβολές που καθορίζονται από τους χρόνους άφιξης σε κάθε αισθητήρα. Όπως φαίνεται, από τους τρεις αισθητήρες προκύπτουν δύο ζευγάρια, άρα δύο υπερβολικές καμπύλες που τέμνονται σε τέσσερα σημεία, ένα από τα οποία είναι η πραγματική θέση της πηγής. Επιπλέον, τα δύο σημεία που προκύπτουν στο αριστερό τμήμα της υπερβολής TDOA_{1,2} μπορούν να μη ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς, εφόσον η σειρά άφιξης των σημάτων σε κάθε αισθητήρα



Εικόνα 24 Υπερβολικός εντοπισμός της θέσης μιας πηγής σήματος από μια διάταξη τριών αισθητήρων. Η επίλυση του αλγεβρικού συστήματος δίνει περισσότερες από μια λύσεις και συνεπώς απαιτείται και τέταρτος αισθητήρας για την οριστική λύση.

είναι γνωστή. Προσθέτοντας αισθητήρες στη διάταξη είναι δυνατό να λάβουμε μία μοναδική λύση που δίνει τελικά τη θέση της πηγής.

Η προσθήκη εξισώσεων από επιπλέον αισθητήρες στο σύστημα (42) το καθιστά υπερκαθορισμένο. Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες, ο θόρυβος που εισάγεται στα καταγεγραμμένα σήματα επηρεάζει τον υπολογισμό των TDOA, με αποτέλεσμα η απλή αλγεβρική επίλυση του συστήματος (42) να μην αρκεί για τον εντοπισμό της πηγής. Αντί για μια υπερβολή, κάθε ζεύγος αισθητήρων, συνυπολογίζοντας το σφάλμα στους χρόνους άφιξης, δίνει μια υπερβολική περιοχή όπως φαίνεται στην Εικόνα 25. Συνεπώς αντί για ένα σημείο τομής προκύπτει μια περιοχή αβεβαιότητας με τις πιθανές συντεταγμένες της θέσης της πηγής, η οποία μπορεί να καθοριστεί με μεθόδους βέλτιστης προσαρμογής όπως είναι η μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων και η παραλλαγή της, ελάχιστων σταθμισμένων τετραγώνων.



Εικόνα 25 Τα σφάλματα στις εκτιμήσεις των TDOA του παραδείγματος της Εικόνας 15 έχουν ως αποτέλεσμα η εκτιμώμενη θέση της πηγής να προκύπτει ως η σκιασμένη περιοχή αντί ενός μοναδικού σημείου.

6.2.2. Διάδοση με άγνωστη ταχύτητα

Οι περισσότερες μέθοδοι υπερβολικού εντοπισμού που αναφέρονται στη βιβλιογραφία προϋποθέτουν ότι η ταχύτητα διάδοσης του σήματος είναι γνωστή. Αυτό ισχύει στις περισσότερες ακουστικές εφαρμογές, όμως στην περίπτωση της σεισμικής διάδοσης η διακύμανση της ταχύτητας σε σχέση με το υλικό είναι πολύ σημαντική με αποτέλεσμα όταν η σύσταση του εδάφους είναι άγνωστη, η ταχύτητα δεν μπορεί να προσδιοριστεί χωρίς να γίνουν *in situ* μετρήσεις. Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η μέθοδος του [57], η οποία χρησιμοποιεί τη μέθοδο των ελάχιστων σταθμισμένων τετραγώνων για την εκτίμηση της θέσης και της ταχύτητας διάδοσης.

Ξεκινώντας από το σύστημα εξισώσεων (42) με άγνωστες μεταβλητές τις συντεταγμένες της πηγής (x,y) και την ταχύτητα διάδοσης c , σκοπός μας είναι να μετασχηματίσουμε το σύστημα ώστε να γίνει γραμμικό. Για το σκοπό αυτό η σχέση (42) αναδιατάσσεται και υψώνεται στο τετράγωνο, ώστε τελικά

προκύπτει:

$$\begin{aligned} & 2(x_i - x_1)x + 2(y_i - y_1)y + 2D_{i,1}u + D_{i,1}^2v \\ & = x_i^2 - x_1^2 + y_i^2 - y_1^2 \quad i = 2, 3, \dots, M \end{aligned} \quad (43)$$

όπου $u = c\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}$ και $v = c^2$ είναι μεταβλητές που εισήχθησαν ώστε να γίνει το σύστημα γραμμικό.

Τώρα, η σχέση (43) μπορεί να γραφτεί σε μορφή εξίσωσης πινάκων:

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{b} \quad (44)$$

όπου:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) & D_{2,1}^2 & 2D_{2,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2(x_M - x_1) & 2(y_M - y_1) & D_{M,1}^2 & 2D_{M,1} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ v \\ u \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 \\ \vdots \\ x_M^2 - x_1^2 + y_M^2 - y_1^2 \end{bmatrix}$$

Η παρουσία του θορύβου $n_i(k)$ εισάγει κάποια σφάλματα στην εκτίμηση των TDOA τα οποία μπορούν να μοντελοποιηθούν ως εξής:

$$D_{i,1} = D_{i,1}^0 + q_{i,1} \quad (45)$$

όπου με $D_{i,1}^0$ συμβολίζεται η πραγματική τιμή του TDOA και το σφάλμα $q_{i,1}$ εξαρτάται από τα σήματα $s_i(k)$ και $s_1(k)$.

Από τη σχέση (44), η εκτίμηση με βάση τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων για το διάνυσμα $\boldsymbol{\theta}$ συμβολίζεται με $\hat{\boldsymbol{\theta}}_1$ και δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_1 = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (46)$$

όπου οι εκθέτες T και -1 δηλώνουν τις πράξεις της αντιμετάθεσης και της αντιστροφής αντίστοιχα.

Προκειμένου να γίνει μια πιο ακριβής εκτίμηση του διανύσματος $\boldsymbol{\theta}$, στα επόμενα βήματα χρησιμοποιείται η μέθοδος των σταθμισμένων ελάχιστων τετραγώνων και αξιοποιείται η σχέση που συνδέει τις άγνωστες μεταβλητές x , y , u και v . Η εκτίμηση του σφάλματος στην εξίσωση (44) δίνεται από το διάνυσμα $\boldsymbol{\varepsilon}$:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon} &= \mathbf{A}\boldsymbol{\theta} - \mathbf{b} \\ &\approx 2 \left[(u + vD_{2,1}^0) q_{2,1} \times (u + vD_{3,1}^0) q_{3,1} \cdots \right. \\ &\quad \left. \times (u + vD_{M,1}^0) q_{M,1} \right]^T \end{aligned} \quad (47)$$

Από την παραπάνω προσέγγιση του διανύσματος $\boldsymbol{\varepsilon}$ προκύπτει ο πίνακας συνδιακύμανσής του:

$$\boldsymbol{\Phi}_2 = E \{ \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}^T \} \approx 4 \mathbf{B}_2 \mathbf{Q} \mathbf{B}_2 \quad (48)$$

όπου με $E\{\}$ δηλώνεται η αναμενόμενη τιμή, $\mathbf{B}_2 = \text{diag}(u + vD_{2,1}^0, u + vD_{3,1}^0, \dots, \dots, u + vD_{M,1}^0)$ και \mathbf{Q} είναι ο πίνακας συνδιακύμανσης του $\{q_{i,i}\}$, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί από το φάσμα ισχύος των $s_i(k)$ και $n_i(k)$ [54], [64]. Για απλότητα, και εφόσον θεωρήσουμε ότι ο θόρυβος στα σήματα είναι λευκός, ο πίνακας \mathbf{Q} μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 2 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 2 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Από τη σχέση (47) προκύπτει η εκτίμηση των σταθμισμένων ελάχιστων

τετραγώνων [63]:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_2 = (\mathbf{A}^T \boldsymbol{\Phi}_2^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \boldsymbol{\Phi}_2^{-1} \mathbf{b} \quad (50)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο υπολογισμός του \mathbf{B}_2 , και κατά συνέπεια του $\boldsymbol{\Phi}_2$ απαιτεί τιμές για τα πραγματικά TDOA, τα οποία όμως είναι άγνωστα. Στην πράξη αντικαθιστούμε τα $D_{i,1}^0$ με τις εκτιμήσεις $D_{i,1}$ και υπολογίζουμε τα u και v από τις σχέσεις:

$$\hat{v} = \left(\frac{\mathbf{D}^T \mathbf{r}}{\mathbf{D}^T \mathbf{D}} \right)^2 \quad (51)$$

$$\hat{u} = \sqrt{\hat{v} \left(\left([\hat{\boldsymbol{\theta}}_1]_1 - x_1 \right)^2 + \left([\hat{\boldsymbol{\theta}}_1]_2 - y_1 \right)^2 \right)} \quad (52)$$

όπου $[\hat{\boldsymbol{\theta}}_1]_1$ και $[\hat{\boldsymbol{\theta}}_1]_2$ είναι το πρώτο και το δεύτερο στοιχείο του διανύσματος $\hat{\boldsymbol{\theta}}_1$ αντίστοιχα, τα οποία αποτελούν τις εκτιμήσεις για τα x και y από το πρώτο βήμα. Τα διανύσματα $\mathbf{D} = [D_{2,1} \ D_{3,1} \ \dots \ D_{M,1}]^T$ και $\mathbf{r} = [r_{2,1} \ r_{3,1} \ \dots \ r_{M,1}]^T$ είναι τα διανύσματα των διαφορών χρόνων άφιξης και αποστάσεων από την πηγή αντίστοιχα. Οι διαφορές των αποστάσεων από την πηγή υπολογίζονται ως $r_{i,1} = \sqrt{(x_i - [\hat{\boldsymbol{\theta}}_1]_1)^2 - (y_i - [\hat{\boldsymbol{\theta}}_1]_2)^2} - \sqrt{(x_1 - [\hat{\boldsymbol{\theta}}_1]_1)^2 - (y_1 - [\hat{\boldsymbol{\theta}}_1]_2)^2}$.

Στο τρίτο και τελευταίο βήμα αξιοποιείται η σχέση μεταξύ των x , y , u και v . Από το προηγούμενο βήμα, υπολογίζεται ο πίνακας συνδιακύμανσης για την εκτίμηση σταθμισμένων ελάχιστων τετραγώνων του $\hat{\boldsymbol{\theta}}_2$ είναι:

$$\text{cov}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_2) = (\mathbf{A}^T \boldsymbol{\Phi}_2^{-1} \mathbf{A})^{-1} \quad (53)$$

Η σχέση που συνδέει τις μεταβλητές x , y , u και v είναι:

$$u^2 = v((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2) \quad (54)$$

Αρχικά ορίζουμε τους πίνακες:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ [\hat{\boldsymbol{\theta}}_2]_3 & [\hat{\boldsymbol{\theta}}_2]_3 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{G} = \begin{bmatrix} (x-x_1)^2 \\ (y-y_1)^2 \\ v \end{bmatrix} \text{ και } \mathbf{p} = \begin{bmatrix} ([\hat{\boldsymbol{\theta}}_2]_1 - x_1)^2 \\ ([\hat{\boldsymbol{\theta}}_2]_2 - y_1)^2 \\ [\hat{\boldsymbol{\theta}}_2]_3 \\ [\hat{\boldsymbol{\theta}}_2]_4^2 \end{bmatrix}$$

Το διάνυσμα $\hat{\boldsymbol{\theta}}_2$ μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με το $\boldsymbol{\theta}$ ως εξής:

$$[\hat{\boldsymbol{\theta}}_2]_i = [\boldsymbol{\theta}]_i + e_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (55)$$

όπου το διάνυσμα $\{e_i\}$ περιέχει τα σφάλματα στις εκτιμήσεις της σχέσης (50).

Έτσι, έχουμε:

$$\mathbf{H}\mathcal{G} \approx \mathbf{p} \quad (56)$$

Όπως και στη σχέση (47), έτσι και τώρα, το σφάλμα της παραπάνω σχέσης εκφράζεται προσεγγιστικά ως:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\xi} &= \mathbf{p} - \mathbf{H}\mathcal{G} \\ &\approx [2(x-x_1)e_1, 2(y-y_1)e_1, e_3, 2ue_4 - re_3]^T \end{aligned} \quad (57)$$

όπου $r = (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2$.

Ο πίνακας συνδιακύμανσης για το $\boldsymbol{\xi}$ είναι:

$$\Phi_3 = E\{\boldsymbol{\xi}\boldsymbol{\xi}^T\} \approx \mathbf{B}_3 \text{cov}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_2)\mathbf{B}_3 + [\mathbf{0} \quad \mathbf{G}] \quad (58)$$

όπου $\mathbf{B}_3 = \text{diag}(2(x-x_1), 2(y-y_1), 1, 2u)$, \mathbf{o} είναι ένας 4×3 μηδενικός πίνακας και $\mathbf{G} = \left[-2r(x-x_1)E\{e_1e_3\}, -2r(y-y_1)E\{e_2e_3\}, -rE\{e_3^2\}, r^2E\{e_3^2\} - 4urE\{e_3e_4\} \right]^T$ με τις τιμές $E\{e_ie_j\}$ να αντιστοιχούν στα (i,j) στοιχεία του πίνακα $\text{cov}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_2)$, όπως δίνεται από σχέση (53). Οι τιμές για τα x , y και u εισάγονται από τις εκτιμήσεις της σχέσης (50). Η εκτίμηση σταθμισμένων ελάχιστων τετραγώνων για το διάνυσμα \mathcal{G} είναι:

$$\hat{\mathcal{G}} = (\mathbf{H}^T \boldsymbol{\Phi}_3^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \boldsymbol{\Phi}_3^{-1} \mathbf{p} \quad (59)$$

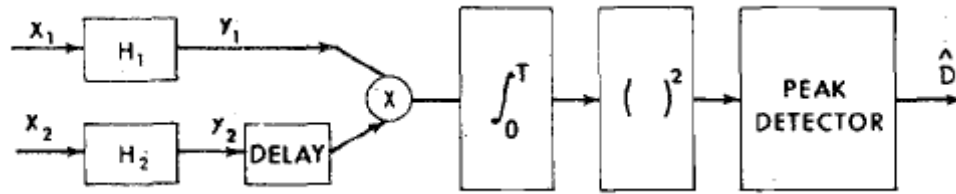
Οι τελικές εκτιμήσεις για τη θέση της πηγής και την ταχύτητα διάδοσης δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \pm \sqrt{[\hat{\mathcal{G}}]_1} + x_1, \\ \hat{y} &= \pm \sqrt{[\hat{\mathcal{G}}]_2} + y_1, \\ \hat{c} &= \sqrt{[\hat{\mathcal{G}}]_3} \end{aligned} \quad (60)$$

Από τις δύο πιθανές τιμές για τις συντεταγμένες της θέσης της πηγής επιλέγονται αυτές που απέχουν λιγότερο από την αρχική εκτίμηση της σχέσης (50).

6.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

Αναφέρθηκε νωρίτερα ότι οι αλγόριθμοι υπερβολικού εντοπισμού μιας πηγής σημάτων χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο τις εκτιμήσεις στις χρονικές καθυστερήσεις του σήματος ανάμεσα στους διαφορετικούς αισθητήρες της διάταξης. Στην παράγραφο αυτή, γίνεται μια επισκόπηση των λύσεων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για τις εκτιμήσεις των TDOA προκειμένου να διερευνηθεί ποιες, και σε ποιο βαθμό, από τις προτεινόμενες λύσεις αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά την περίπτωση των κρουστικών σεισμικών σημάτων.



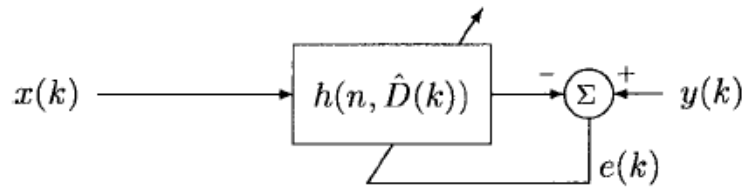
Εικόνα 26 Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό του TDOA με τη μέθοδο της γενικευμένης συσχέτισης.

Μια από τις παλαιότερες και πιο δημοφιλείς προτάσεις για τον απευθείας υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης μεταξύ των σημάτων είναι η μέθοδος της γενικευμένης συσχέτισης [65]-[67]. Η βασική ιδέα της μεθόδου περιγράφεται στην Εικόνα 26. Τα δύο σήματα που φτάνουν στους αισθητήρες, αρχικά υπόκεινται σε κάποιου είδους προεπεξεργασία με κατάλληλα φίλτρα. Στη συνέχεια, ένα από τα δύο σήματα μετατοπίζεται κατά συγκεκριμένο βήμα στο πεδίο του χρόνου και πολλαπλασιάζεται με το άλλο. Τα αποτελέσματα ολοκληρώνονται για ένα εύρος καθυστερήσεων και, τελικά TDOA αποφασίζεται ίσο με την καθυστέρηση που δίνει τη μέγιστη τιμή της συσχέτισης μεταξύ των δύο σημάτων.

Ανάλογα με την επιλογή των φίλτρων προεπεξεργασίας και, κυρίως, της μεθόδου υπολογισμού της συσχέτισης, τα αποτελέσματα διαφέρουν.

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι απαιτεί *a priori* γνώση του φάσματος του εκπεμπόμενου σήματος και του θορύβου. Επιπλέον, σε εφαρμογές που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στην εκτίμηση, καθώς η πραγματική χρονική καθυστέρηση δεν είναι ακέραιος αριθμός, χρειάζεται να εφαρμοστεί κάποια τεχνική παρεμβολής [68].

Μια διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα του υπολογισμού του TDOA είναι η παραμετρική [69], [70]. Σε αυτή τη μέθοδο η χρονική καθυστέρηση μοντελοποιείται σαν ένα φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (FIR) του οποίου οι συντελεστές είναι δείγματα της συνάρτησης *sinc*. Με αυτόν τον τρόπο, το πρόβλημα ανάγεται στον υπολογισμό των συντελεστών του φίλτρου. Όλοι οι υπολογισμοί γίνονται στο πεδίο του χρόνου κι έτσι αποφεύγονται οι δυσκολίες από τη μέθοδο της συσχέτισης που απαιτεί υπολογισμούς στο πεδίο της συχνότητας σε σήματα πεπερασμένου μήκους.



Εικόνα 27 Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης με προσαρμοζόμενο φίλτρο

Η τρίτη, ιδιαίτερα διαδεδομένη, τεχνική υπολογισμού της χρονικής καθυστέρησης βασίζεται σε προσαρμοζόμενα φίλτρα. Η διαδικασία φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 27, το οποίο είναι παρόμοιο με τα διαγράμματα των αλγορίθμων προσαρμοζόμενης αναγνώρισης συστημάτων [71]. Μια τυπική εκδοχή της χρήσης προσαρμοζόμενων φίλτρων είναι η τεχνική EATDE (Explicitly-Adaptive Time Delay Estimator) [72]. Σε αντίθεση με τις μεθόδους συσχέτισης δεν υπολογίζονται όλες οι τιμές της συσχέτισης προκειμένου να επιλεγεί η μέγιστη. Μοντελοποιώντας τη χρονική καθυστέρηση μέσω του προσαρμοζόμενου φίλτρου, παρόμοια με τις παραμετρικές μεθόδους, γίνεται μια αρχική εκτίμηση της χρονικής καθυστέρησης. Σε κάθε βήμα του αλγορίθμου χρησιμοποιείται το σφάλμα $e(k)$ του προηγούμενου βήματος προκειμένου να εκτιμηθεί με καλύτερη ακρίβεια η χρονική καθυστέρηση. Για τον υπολογισμό των σφαλμάτων χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελάχιστων μέσων τετραγώνων και βασίζεται, συνήθως, στην κλίση της συνάρτησης συσχέτισης μεταξύ των σημάτων. Η μέθοδος των προσαρμοζόμενων φίλτρων είναι η πλέον διαδεδομένη, και έχουν προταθεί πολυάριθμες παραλλαγές της κεντρικής ιδέας [73]- [86].

Οι περισσότερες από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν υποθέτουν στασιμότητα τόσο στο σήμα όσο και στον θόρυβο. Αυτό τις καθιστά μη εφαρμόσιμες στην περίπτωση των κρουστικών σεισμικών σημάτων. Το πρόβλημα της μη στασιμότητας όπως και η περίπτωση των μεταβατικών σημάτων αντιμετωπίζονται σε κάποιες από τις εργασίες [73], [75], [80], [81] με τη χρήση προσαρμοζόμενων φίλτρων. Ωστόσο, και σε αυτές τις μεθόδους παραμένει η προϋπόθεση της υψηλής συσχέτισης μεταξύ των σημάτων. Καθώς, όπως δείχτηκε στο κεφάλαιο 3, η διάδοση σε σεισμικό μέσο κρουστικών σημάτων με χαμηλή ενέργεια αλλοιώνει τη μορφή των σημάτων και οδηγεί σε χαμηλά ποσοστά συσχέτισης (βλ. Πίνακα 5), είναι προφανές ότι για την εκτίμηση των TDOA θα πρέπει να εφαρμοστεί κάποια διαφορετική

μέθοδος.

Η εκτίμηση του χρόνου άφιξης σε κάθε αισθητήρα αντί για τον απευθείας υπολογισμό των χρονικών καθυστερήσεων είναι μια ιδέα που έχει προταθεί για εφαρμογές εντοπισμού με sonar [87]. Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί ως προς τις υπολογιστικές της απαιτήσεις από τις συνηθισμένες μεθόδους υπολογισμού του TDOA, ενώ ταυτόχρονα δεν προϋποθέτει συσχέτιση μεταξύ των σημάτων και αποτελεί μια ιδέα που μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση των κρουστικών σεισμικών σημάτων. Από την άλλη, η ακρίβειά της στηρίζεται στην παραδοχή ότι το σήμα που λαμβάνεται, στο ξεκίνημά του έχει παραβολική μορφή, κάτι που δεν μπορεί να γενικευθεί σε άλλου είδους σήματα.

Στις επόμενες παραγράφους προτείνονται δύο μέθοδοι για εντοπισμό του TOA. Η πρώτη μέθοδος [44] χρησιμοποιεί τον διακριτό μετασχηματισμό Wavelet (DWT) και οι δεύτερη τον μετασχηματισμό wavelet πακέτων (WPT). Και στις δύο περιπτώσεις προηγείται αποθορυβοποίηση του καταγεγραμμένου σήματος με κατωφλίωση των wavelet συντελεστών, ενώ δεν απαιτείται εκ των προτέρων γνώση κάποιων χαρακτηριστικών των σημάτων καθώς αυτά προκύπτουν από την ανάλυσή τους στο πεδίο wavelet.

6.4.ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ DWT ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ TOA

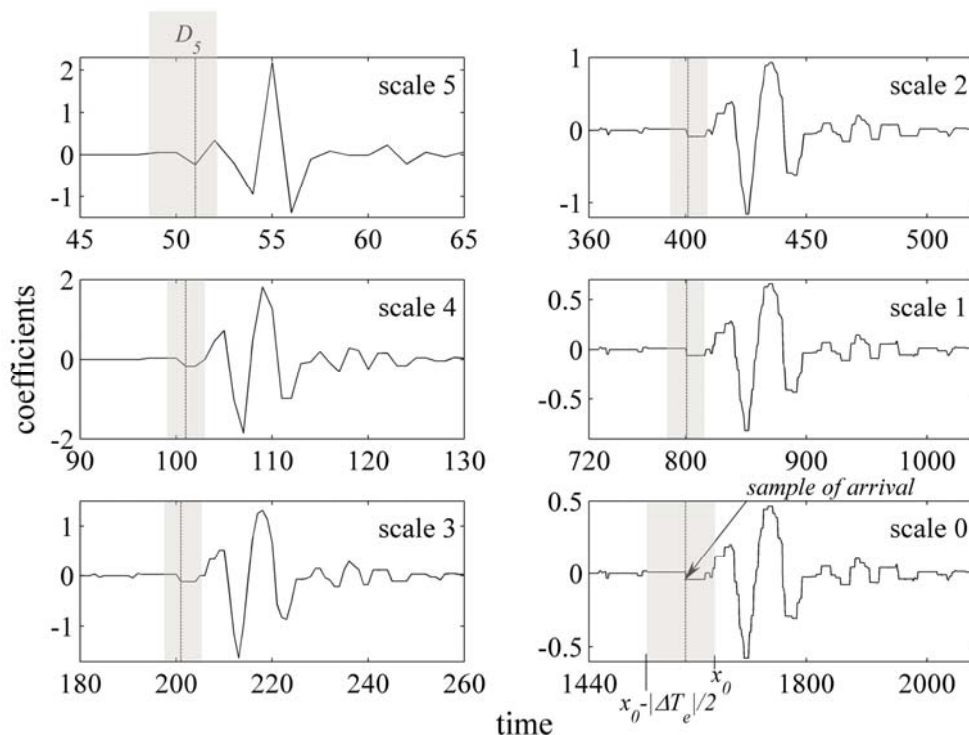
Ο ακριβής εντοπισμός του σημείο άφιξης του σήματος, έγκειται στον αλγοριθμικό προσδιορισμό της χρονικής στιγμής που το φάσμα του σήματος διαφοροποιείται από το φάσμα του θορύβου του περιβάλλοντος. Ο μετασχηματισμός wavelet αποτελεί το πλέον κατάλληλο εργαλείο για αυτήν την εφαρμογή, καθώς παρέχει ταυτόχρονα πληροφορία στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Ιδιαίτερα, η χρήση της συνάρτησης Haar, η οποία χάρη στον τοπικό χαρακτήρα της στο πεδίο του χρόνου, είναι ιδανική για την ανίχνευση απότομων και στιγμιαίων μεταβολών στην ενέργεια του σήματος.

Η κεντρική συχνότητα της ταλάντωσης του αισθητήρα από την άφιξη ενός σεισμικού γεγονότος μέχρι την απόσβεσή του, υπολογίστηκε στην ενότητα 5.1.1 από τη σχέση (28) με σκοπό να υλοποιηθεί μια αποτελεσματική μέθοδος διάκρισης ανάμεσα σε τυχαίους σκανδαλισμούς του κατωφλίου t_0 και πραγματικά σεισμικά γεγονότα. Είδαμε ότι η συχνότητα αυτή αντιστοιχεί σε

μια κλίμακα στο wavelet πεδίο, s_c , στην οποία αναμένεται μια απότομη αύξηση των πλατών των συντελεστών κατά την άφιξη του σεισμικού σήματος. Ο αλγόριθμος για τον καθορισμό του TOA εκμεταλλεύεται την αραιή κατανομή των αποθρουβοποιημένων συντελεστών και την απότομη μεταβολή στο πλάτος τους στην κεντρική κλίμακα προκειμένου να εκτιμήσει με ακρίβεια τη χρονική στιγμή της άφιξης.

Η άφιξη του σήματος έχει ήδη εκτιμηθεί προσεγγιστικά ως το σημείο x_0 κατά το οποίο το πλάτος του σήματος ξεπερνά το κατώφλι t_0 . Ωστόσο, η εκτίμηση αυτή είναι ανακριβής και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής. Έτσι, θεωρούμε το χρονικό διάστημα $\mathcal{D} = [x_0 - |\Delta T_e|/2, x_0]$, όπου $|\Delta T_e|$ είναι το πλήθος των δειγμάτων που περιέχονται μέσα στο ΔT_e , όπου, λόγω της κρουστικής φύσης της πηγής βρίσκεται το πραγματικό TOA. Το διάστημα \mathcal{D} μετασχηματίζεται σύμφωνα με τη σχέση (34) στο αντίστοιχο διάστημα \mathcal{D}_k της κλίμακας $k=s_c$.

Στο παράδειγμα της Εικόνας 28 η κεντρική κλίμακα είναι η $s_c=5$. Αρχικά,



Εικόνα 28 Η διαδικασία καθορισμού του TOA. Κάθε διάγραμμα δείχνει τους συντελεστές της αντίστοιχης κλίμακας μετά την εφαρμογή των κατωφλίων. Οι σκιασμένες περιοχές αντιστοιχούν στην περιοχή στην οποία αναζητείται κάθε φορά το TOA.

το σημείο x_0 εντοπίζεται στην κλίμακα 0 και υπολογίζεται το διάστημα \mathcal{D} . Ο αλγόριθμος συνεχίζει στην κλίμακα 5, όπου συγκρίνει τις απόλυτες τιμές των συντελεστών wavelet με το κατώφλι t_k της αντίστοιχης κλίμακας, το οποίο υπολογίζεται με κάποια από τις μεθόδους που περιγράφονται στην παράγραφο 5.1.2. Όταν εντοπιστεί το σημείο άφιξης, το οποίο στην Εικόνα 28 απεικονίζεται ως κάθετη γραμμή, το σήμα ανασυντίθεται με τον αντίστροφο DWT στην επόμενη κλίμακα.

Καθώς, σε κάθε βήμα, εφαρμόζεται ο αντίστροφος DWT, η ανάλυση στον χρόνο διπλασιάζεται και ταυτόχρονα το δiάνυσμα του σήματος γίνεται λιγότερο αραιό, καθώς αυξάνεται το εύρος ζώνης και αυτό επιτρέπει σε κατάλοιπα θορύβου να εμφανιστούν στο σήμα. Προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα εσφαλμένης εκτίμησης του σημείου άφιξης, το χρονικό παράθυρο \mathcal{D}_k ολισθαίνει ώστε το κέντρο του να βρεθεί ακριβώς στο σημείο άφιξης που εντοπίστηκε από το κατώφλι t_k . Στην Εικόνα 28 οι περιοχές αναζήτησης σε κάθε κλίμακα απεικονίζονται σκιασμένες.

Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι το σήμα να ανασυντεθεί στην κλίμακα 0, όπου έχουμε τη μεγαλύτερη ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. Το σημείο σε αυτήν την κλίμακα που έχει την πιο απότομη μεταβολή στο πλάτος των συντελεστών επιλέγεται ως η ακριβής χρονική στιγμή άφιξης του σήματος. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 28, το σημείο αυτό διαφέρει αρκετά από το σημείο x_0 το οποίο είχε επιλεγεί στην αρχή προσεγγιστικά ως η αρχή του σήματος.

Συνολτικά, τα βήματα του προτεινόμενου αλγορίθμου για τον εντοπισμό του ΤΟΑ περιγράφονται παρακάτω:

1. Καθορισμός ενός παραθύρου αναζήτησης \mathcal{D} προκειμένου να αποφευχθούν σφάλματα λόγω τυχαίων γεγονότων θορύβου. Το παράθυρο καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του σεισμικού γεγονότος που υπολογίστηκαν κατά την ανίχνευσή του (βλ. ενότητα 5.1).
2. Μετασχηματισμός του παραθύρου \mathcal{D} σε \mathcal{D}_k για κάθε κλίμακα k του μετασχηματισμού wavelet ώστε το μήκος του να ανταποκρίνεται στην υποδειγματοληψία σε κάθε κλίμακα του DWT.
3. Εντοπισμός του σημείου άφιξης του σήματος μέσα στο παράθυρο

\mathcal{D}_k , αρχίζοντας από τη χαμηλότερη κλίμακα $k=s_c$, με σύγκριση των απολύτων τιμών των συντελεστών wavelet με το αντίστοιχο κατώφλι t_k .

4. Ολίσθηση του χρονικού παραθύρου \mathcal{D}_k ώστε το κέντρο του να βρεθεί στο εντοπισμένο σημείο από το βήμα 3.
5. Ανασύνθεση του σήματος ένα επίπεδο πάνω και επανάληψη των βημάτων 3-5 μέχρι την κλίμακα $k=0$.

6.5. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ WPT ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΤΟΑ

Στην προηγούμενη ενότητα περιγράφηκε ο αλγόριθμος για την ανίχνευση και τον εντοπισμό του χρόνου άφιξης του σήματος με τη χρήση του DWT. Ο DWT, αν και αποτελεί μια ιδιαίτερα αποδοτική, από υπολογιστικής πλευράς, λύση, έχει περιορισμένη διακριτική ικανότητα στο πεδίο της συχνότητας. Για το λόγο αυτόν, στην παρούσα ενότητα προτείνεται μια εναλλακτική μέθοδος για τον υπολογισμό του ΤΟΑ που χρησιμοποιεί τον, αρκετά πιο απαιτητικό αλλά και ισχυρότερο, WPT.

Η μέθοδος που προτείνεται αφορά αποκλειστικά τον εντοπισμό του ΤΟΑ καθώς η διαδικασία της ανίχνευσης ενός σεισμικού γεγονότος έχει διατηρηθεί ίδια με αυτήν που περιγράφηκε στις παραγράφους 5.1.1, 5.1.2 και 5.1.3. Ο λόγος που επιλέγεται αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς όσο δεν υπάρχει εξακριβωμένο σεισμικό γεγονός η ανάλυση του σήματος με τον DWT αποτελεί την πιο αποδοτική λύση. Από τη στιγμή που ανιχνεύεται κάποιο σεισμικό γεγονός, εφαρμόζεται ο WPT αλγόριθμος που περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους, προκειμένου να εντοπιστεί το σημείο άφιξης του σήματος.

Σε αντίθεση με τον DWT που η ανάλυσή του στο πεδίο της συχνότητας είναι λογαριθμική, δηλαδή οι χαμηλότερες συχνότητες έχουν μικρό εύρος ζώνης και οι υψηλότερες μεγαλύτερο, ο WPT επιτρέπει να ρυθμιστεί η διακριτική ικανότητα τόσο στις υψηλές όσο και στις χαμηλές συχνότητες [88]. Αυτό το πλεονέκτημα του WPT προσφέρει όχι μόνο αποτελεσματικότερη αποθρομβοποίηση του σήματος αλλά επιτρέπει να εντοπιστεί η αρχή της ταλάντωσης του αισθητήρα εστιάζοντας με μεγάλη ακρίβεια σε μια μικρή

περιοχή συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα στην οποία αυτή πραγματοποιείται.

6.5.1. Επιλογή βέλτιστης βάσης και κατωφλίωση των συντελεστών

Αντίθετα με τον απλό μετασχηματισμό wavelet, στον WPT το σήμα που αναλύεται μπορεί να ανασυντεθεί από πολλές διαφορετικές βάσεις καθώς κάθε υποσύνολο του πλήρους δυαδικού δέντρου που σχηματίζεται κατά την ανάλυση του σήματος με τον WPT αποτελεί μια έγκυρη ορθοκανονική βάση. Η επιλογή της βέλτιστης βάσης γίνεται με την επιλογή ενός συνόλου πακέτων wavelet που δίνουν την πιο επιθυμητή αναπαράσταση του σήματος με βάση κάποια συνάρτηση κόστους. Υπάρχουν διάφορες συναρτήσεις κόστους, η πιο διαδεδομένη ωστόσο είναι η εντροπία του Shannon η οποία αποτελεί ένα μέτρο που δείχνει την ποσότητα της πληροφορίας που χάνεται σε κάθε αναπαράσταση του σήματος. Η συνάρτηση της εντροπίας Shannon δίνεται από τη σχέση [88]:

$$E(s) = -\sum_i s_i^2 \log(s_i^2) \quad (61)$$

όπου s είναι το σήμα και s_i είναι οι wavelet συντελεστές σε μια ορθοκανονική βάση.

Ο αλγόριθμος για την ανάλυση του σήματος στη βέλτιστη βάση, όπως περιγράφεται στο [88] αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Ανάλυση του σήματος $x(n)$, $n=1,2,\dots,N$ στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο με τον μετασχηματισμό WPT, χρησιμοποιώντας μια προεπιλεγμένη συνάρτηση wavelet.
2. Υπολογισμός της εντροπίας Shannon σε κάθε τερματικό κόμβο και τον προγονικό του.
3. Εφόσον $E(s) < E(s_a) + E(s_d)$, όπου s_a και s_d είναι οι συντελεστές προσέγγισης και λεπτομέρειας αντίστοιχα που προκύπτουν από τους συντελεστές s , ορίζεται ο προγονικός κόμβος ως τερματικός.
4. Επανάληψη από το βήμα β) μέχρι να ελαχιστοποιηθεί η εντροπία σε κάθε κλάδο του δέντρου.

Μετά την επιλογή της βέλτιστης αναπαράστασης για το παράθυρο που περιέχει το σεισμικό γεγονός, γίνεται η αποθορυβοποίηση του σήματος, εφαρμόζοντας κατάλληλο κατώφλι στους συντελεστές καθενός από τους τερματικούς κόμβους του δέντρου. Το κατώφλι υπολογίζεται από το αξίωμα SURE (Stein's Unbiased Risk Estimate), και η τιμή του στην περίπτωση των wavelet packet συντελεστών προκύπτει [89]:

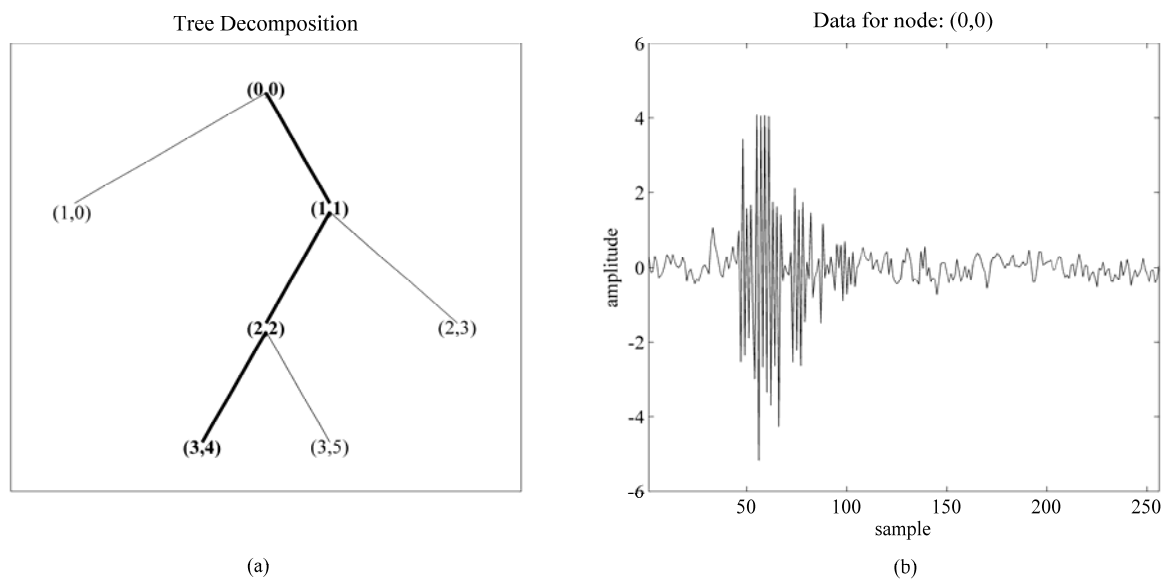
$$T = \sigma \sqrt{2 \ln(N \log_2(N))} \quad (62)$$

όπου σ είναι η τυπική απόκλιση του θορύβου και N είναι το πλήθος δειγμάτων που περιέχει το παράθυρο που αναλύεται.

6.5.2. Μέθοδος εντοπισμού του ΤΟΑ

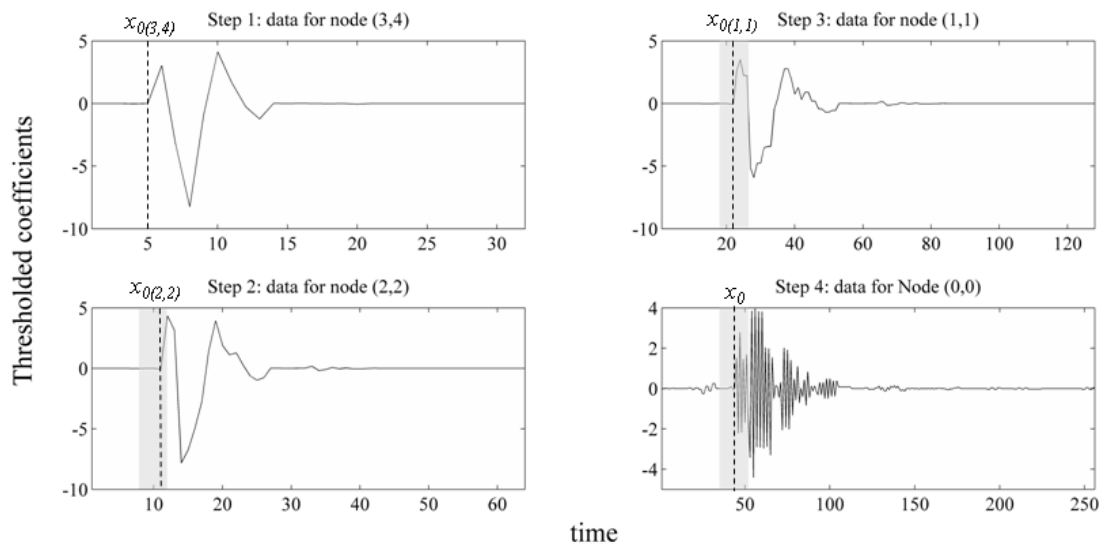
Σε ένα δέντρο βέλτιστης αναπαράστασης, όπως αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 29(a), κάθε τερματικός κόμβος αντιστοιχεί σε κάποια διαφορετική ζώνη συχνοτήτων. Η ταλάντωση του αισθητήρα λόγω κάποιου κρουστικού σεισμικού γεγονότος, όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 5.1.1, συνεπάγεται αυξημένη ενέργεια στο πακέτο των συντελεστών που αντιστοιχεί στη συχνότητα της ταλάντωσης. Η συχνότητα αυτή εντοπίζεται με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιώντας τον WPT σε σχέση με τον DWT, καθώς το εύρος ζώνης κάθε πακέτου σε κάποια κλίμακα j στον WPT είναι κατά 2^j φορές μικρότερο από το εύρος ζώνης της αντίστοιχης κλίμακας στον DWT, και κατά συνέπεια, η διακριτική ικανότητα στο πεδίο της συχνότητας, αντιστοιχεί μεγαλύτερη

Μετά την επιλογή της βέλτιστης βάσης για την αναπαράσταση του παραθύρου που περιέχει το σεισμικό γεγονός (βλ. Εικόνα 29 (b)) στο WP πεδίο προκύπτει ένα δέντρο αντίστοιχο με αυτό της Εικόνας 29 (a). Έπειτα, ο αλγόριθμος εφαρμόζει το κατώφλι της εξίσωσης (62) και χρησιμοποιώντας τους αποθορυβοποιημένους συντελεστές κάθε τερματικού κόμβου, εντοπίζει αυτόν με τη μεγαλύτερη ενέργεια. Στο παράδειγμα της Εικόνας 29 ο κόμβος με τη μεγαλύτερη ενέργεια είναι ο κόμβος (3,4). Το τονισμένο μονοπάτι δείχνει τους κόμβους που χρησιμοποιούνται για τον ακριβή εντοπισμό του χρόνου άφιξης του σήματος, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.



Εικόνα 29 (α) Ένα παράδειγμα βέλτιστης αναπαράστασης ενός σεισμικού γεγονότος με τον WPT. Ο κόμβος (3,4) του δέντρου περιέχει τους συντελεστές με τη μέγιστη ενέργεια. Το τονισμένο μονοπάτι δείχνει τους κόμβους που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του ΤΟΑ. (β) Το 256 δειγμάτων παράθυρο που αναλύεται στο (α).

Η Εικόνα 30 δείχνει τα διαδοχικά βήματα αναζήτησης του ΤΟΑ στους κόμβους που προκύπτουν από το πακέτο μέγιστης ενέργειας για το παράδειγμα της Εικόνας 29. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 30, η κατωφλίωση των συντελεστών wavelet έχει εξαλείψει τη διασπορά του θορύβου, με αποτέλεσμα το διάνυσμα των συντελεστών του κόμβου (3,4) να είναι αραιό και ο εντοπισμός του σημείου $x_{o(3,4)}$ γίνεται εξετάζοντας τις μεταβολές στα πλάτη των συντελεστών μέχρι να παρατηρηθεί υπέρβαση του κατωφλίου T . Στη συνέχεια, επιλέγεται ένα μικρό χρονικό περιθώριο γύρω από το σημείο $x_{o(3,4)}$, το $\Delta T_{(3,4)} = [x_{o(3,4)} - 1, x_{o(3,4)} + 1]$. Οι συντελεστές των κόμβων (3,4) και (3,5) χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση του κόμβου (2,2) με τον αντίστροφο WPT. Η διαδικασία του αντίστροφου WPT περιλαμβάνει υπερδειγματοληψία των αρχικών συντελεστών και για το λόγο αυτό το χρονικό διάστημα $\Delta T_{(3,4)}$ θα πρέπει να μετασχηματιστεί ώστε να γίνει $\Delta T_{(2,2)} = 2\Delta T_{(3,4)}$ και η διακριτική ικανότητα στον χρόνο διπλασιάζεται. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος αναζητά στο διάστημα $\Delta T_{(2,2)}$ το σημείο $x_{o(2,2)}$ ελέγχοντας τις μεταβολές στα πλάτη των συντελεστών. Όταν εντοπιστεί το σημείο αυτό, το χρονικό διάστημα $\Delta T_{(2,2)}$ μετατοπίζεται ώστε το $x_{o(2,2)}$ να έρθει στο κέντρο του. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τον κόμβο (0,0), όπου εντοπίζεται το x_o ως το σημείο άφιξης



Εικόνα 30 Διαδικασία αναζήτησης του ΤΟΑ στο δέντρο της Εικόνας 23. Οι κάθετες γραμμές υποδεικνύουν το δείγμα άφιξης όπως ανιχνεύθηκε αλγοριθμικά σε κάθε πακέτο wavelet. Οι σκιασμένες περιοχές είναι τα διαστήματα αναζήτησης που καθορίζονται από τη θέση του $x_{\theta(i,j)}$ του προηγούμενου κλάδου και το σημείο x_{θ} στον κόμβο (0,0) είναι το τελικό ΤΟΑ.

του σήματος.

Συνολτικά, τα βήματα που περιγράφουν την προτεινόμενη μέθοδο εντοπισμού του ΤΟΑ με τη χρήση του WPT δίνονται ακολούθως:

1. Επιλογή του πακέτου συντελεστών στο δέντρο βέλτιστης αναπαράστασης, για το οποίο μεγιστοποιείται η ενέργεια των αποθορυβοποιημένων συντελεστών.
2. Από την επιλογή του βήματος 1 καθορίζεται το μονοπάτι στο δέντρο για την ανασύνθεση του σήματος.
3. Αναζήτηση για συντελεστές που υπερβαίνουν την τιμή κατωφλίου T στο πακέτο συντελεστών που βρίσκεται στον τερματικό κόμβου του μονοπατιού.
4. Επιλογή στενού χρονικού παραθύρου ΔT γύρω από το εντοπισμένο σημείο του βήματος 3.
5. Ανασύνθεση του σήματος κατά ένα επίπεδο και επανάληψη των βημάτων 3, 4 στο χρονικό παράθυρο ΔT μέχρι τον κόμβο (0,0).

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 30, η αποθορυβοποίηση του σήματος με τη χρήση του WPT είναι αποτελεσματικότερη από την αντίστοιχη διαδικασία με τον DWT καθώς η διακύμανση του θορύβου είναι πολύ μικρότερη στα διαστήματα που δεν υπάρχει σεισμικό γεγονός. Αυτό, σε

συνδυασμό με την αναζήτηση που γίνεται σε κατάλληλα επιλεγμένο χρονικό διάστημα, επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό του σημείου άφιξης ακόμα και, όπως αποδεικνύεται στα αποτελέσματα του επόμενου κεφαλαίου, σε συνθήκες υψηλού θορύβου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

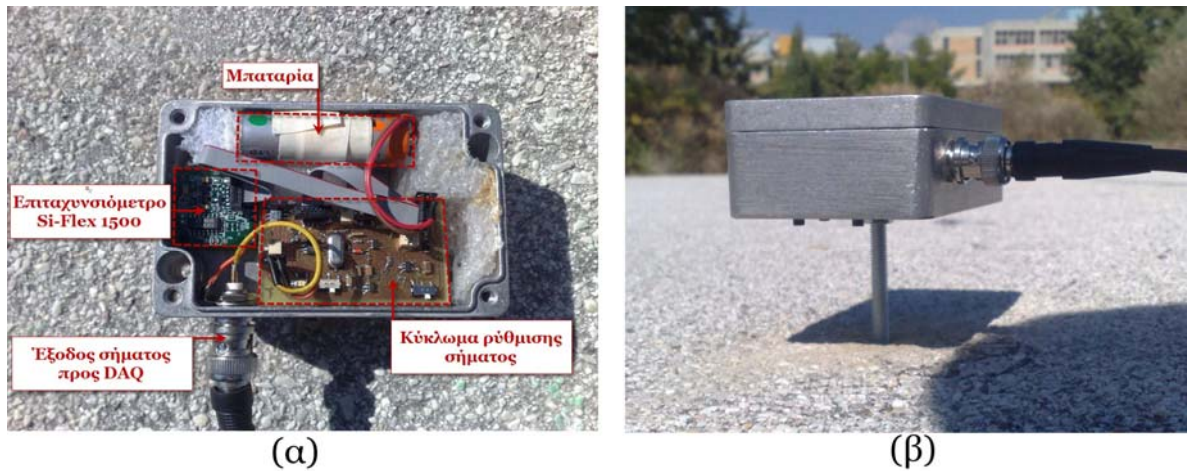
Οι επιδόσεις των μεθόδων που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 5 αναλύονται χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα από κρουστικές σεισμικές διεγέρσεις που καταγράφηκαν από μια διάταξη επιταχυνσιομέτρων. Επιπλέον, υλοποιείται πρόγραμμα προσομοίωσης της σεισμικής διάδοσης προκειμένου να δοκιμαστούν οι αλγόριθμοι σε ελεγχόμενες συνθήκες θορύβου.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διάταξη και τα στοιχεία που την απαρτίζουν καθώς και η διαδικασία των πειραμάτων, ενώ παρουσιάζεται το λογισμικό προσομοίωσης και οι δοκιμές που υλοποιούνται σε αυτό. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο από τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα όσο και από τις προσομοιώσεις και εξάγονται συμπεράσματα για τις προτεινόμενες μεθόδους.

7.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από έξι κόμβους αισθητήρων και μία κάρτα καταγραφής δεδομένων (DAQ) η οποία συνδέεται μέσω USB καναλιού σε φορητό υπολογιστή ο οποίος καταγράφει σε πραγματικό χρόνο τα σήματα με ρυθμό δειγματοληψίας 8 kHz σε κάθε κανάλι. Οι αισθητήρες πακτώνονται σταθερά σε σκληρό έδαφος (τσιμέντο) σε προεπιλεγμένα σημεία. Οι κρουστικές σεισμικές δονήσεις προκαλούνται σε διαφορετικά σημεία με γνωστές θέσεις γύρω από τη διάταξη των αισθητήρων. Σε κάθε σημείο καταγράφονται 10-15 σεισμικά γεγονότα που προκαλούνται με όμοιο τρόπο από μια ελαστική μάζα που αφήνεται να πέσει στο έδαφος από συγκεκριμένο ύψος.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται κάθε τμήμα της διάταξης αναλυτικά.



Εικόνα 31 (α) Ένας κόμβος αισθητήρα, στον οποίο σημειώνονται τα διάφορα στοιχεία που τον απαρτίζουν **(β)** Η πάκτωση του κόμβου στο έδαφος επιτυγχάνεται με ένα καρφί το οποίο βιδώνεται σε υψατ μέχρι το κάτω μέρος του περιβλήματος να εφάπτεται με την επιφάνεια του εδάφους.

7.1.1. Κόμβοι αισθητήρων

Κάθε κόμβος αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Ένα MEMS επιταχυνσιόμετρο τύπου Si-Flex 1500S [31], [32].
- Ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει τρία στάδια ρύθμισης των τάσεων τροφοδοσίας, μια γεννήτρια CMOS παλμών συχνότητας 4 MHz, που απαιτείται για τη λειτουργία του αισθητήρα και ένα στάδιο ενίσχυσης του σήματος με προσαρμοζόμενο κέρδος τάσης (βλ. Παράρτημα Β)
- Δύο μπαταρίες των 1,5 V.
- Ένα μεταλλικό περίβλημα στη βάση του οποίου υπάρχει ένα καρφί με σπειρώσεις ώστε να βιδώνεται στο έδαφος μέχρι η κάτω επιφάνεια του περιβλήματος να εφάπτεται στην επιφάνεια του εδάφους. Στα τοιχώματα του περιβλήματος έχει κολληθεί μονωτικό υλικό με σκοπό να κρατά τα διαφορετικά εξαρτήματα απομονωμένα ώστε ο αισθητήρας να επηρεάζεται αποκλειστικά από την ταλάντωση που μεταδίδεται στη σεισμική του μάζα μέσω της επαφής του με το έδαφος. Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο το εσωτερικό του κόμβου μονώνεται από εξωτερικές επιδράσεις που μπορεί να περιλαμβάνουν θόρυβο από τον άνεμο ή από ακουστικές πηγές στον περιβάλλοντα χώρο.

Στην Εικόνα 31 φαίνονται δύο φωτογραφίες ενός κόμβου, όπου

επισημαίνονται τα στοιχεία που περιγράφονται παραπάνω.

7.1.2. Σύστημα καταγραφής σημάτων

Το σύστημα καταγραφής δεδομένων αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

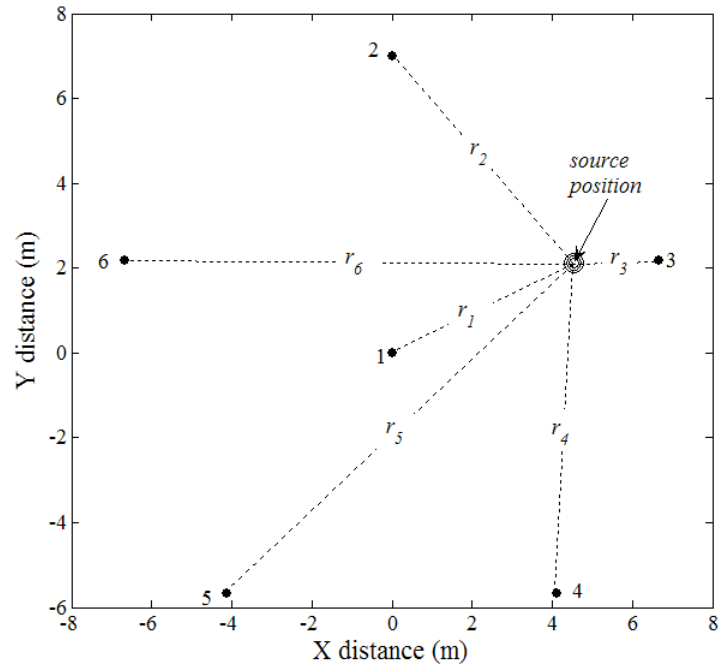
- Μια φορητή κάρτα DAQ τύπου USB-6009 [90].
- Ένα φορητό υπολογιστή.
- Λογισμικό για καταγραφή και αποθήκευση δεδομένων που υλοποιήθηκε στο γραφικό περιβάλλον προγραμματισμού LabVIEW.

7.1.3. Τοπολογία διάταξης

Για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων οι έξι κόμβοι τοποθετήθηκαν σε στις ακμές και τον κέντρο ενός κανονικού πενταγώνου με ακτίνα 7 m. Θέτοντας ως αρχή των αξόνων συντεταγμένων τον κόμβο που βρίσκεται στο κέντρο, προκύπτουν οι συντεταγμένες (0,0)m, (0, 7)m, (6.66, 2.16)m, (4.12, -5.66)m, (-4.12, -5.66) και (-6.66, 2.16)m. Η τοπολογία των κόμβων απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 26(α), όπου φαίνονται οι θέσεις των αισθητήρων και οι αντίστοιχες αποστάσεις από την πηγή ενός σεισμικού σήματος. Η αρίθμηση των κόμβων της Εικόνας 32(α) δεν αντιστοιχεί απαραίτητα στη σειρά με την οποία φτάνει το σήμα σε κάθε αισθητήρα. Στη φωτογραφία της Εικόνας 32(β) φαίνεται η υλοποιημένη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των σημάτων, ενώ ένα παράδειγμα καταγραφής από τη διάταξη αυτή έχει ήδη παρουσιαστεί στην Εικόνα 10.

7.2. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

Για τον έλεγχο της επίδοσης των αλγορίθμων υλοποιήθηκε πρόγραμμα προσομοίωσης της σεισμικής διάδοσης [91]. Σκοπός του είναι να δέχεται ως είσοδο ένα σήμα, τα χαρακτηριστικά του εδάφους (συντελεστής απόσβεσης, ταχύτητα διάδοσης) και τις θέσεις των αισθητήρων και της πηγής και να υπολογίζει τις μετατοπισμένες και εξασθενημένες μορφές του αρχικού σήματος, ώστε να προσομοιώνεται η μορφή του σήματος που θα φτάνει σε κάθε αισθητήρα.



(α)



(β)

Εικόνα 32 (α) Η διάταξη που υλοποιήθηκε για την καταγραφή των σημάτων. Κάθε κύκλος αντιστοιχεί στη θέση ενός κόμβου. Οι διακεκομμένες γραμμές r_i , $i=1,\dots,6$ δείχνουν την απόσταση κάθε αισθητήρα από την πηγή. (β) Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης. Οι κύκλοι αντιστοιχούν στις θέσεις των κόμβων.

Διαφοροποιώντας την εξίσωση (41) ώστε να λαμβάνεται υπόψη η εξασθένιση του πλάτους κατά τη διάδοση, με βάση τη σχέση (1), το σήμα που θα λαμβάνει κάθε αισθητήρας εκφράζεται ως:

$$s_i(k) = \left[\sqrt{\frac{r_1}{r_i}} e^{\alpha(r_i - r_1)} \right] s_1(k - D_{i,1}) + n_i(k) \quad i = 2, \dots, M \quad (63)$$

Στην παραπάνω σχέση θεωρούμε ότι το σήμα $s_i(k)$ με το οποίο τροφοδοτείται το πρόγραμμα προσομοίωσης είναι το σήμα που καταγράφει ο πρώτος αισθητήρας. Ο συντελεστής γεωμετρικής εξασθένισης έχει επιλεγεί ίσος με $1/2$, τιμή που αντιστοιχεί στη διάδοση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh. Η χρονική καθυστέρηση $D_{i,1}$ στον i -οστό αισθητήρα υπολογίζεται από τη σχέση (42).

Οι τιμές της ταχύτητας διάδοσης και του συντελεστή εξασθένισης διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με το έδαφος. Προκειμένου να επιλεγούν τιμές που ανταποκρίνονται σε αυτές των πραγματικών πειραμάτων έχουν εκτιμηθεί από τα πειραματικά δεδομένα οι τιμές $\alpha=0,015$ και $c=380\text{m/s}$.

Σε κάθε σήμα προστίθεται λευκός θόρυβος με κανονική κατανομή, η ισχύς του οποίου επιλέγεται ώστε το τελικό αποτέλεσμα να δίνει τον επιθυμητό σηματοθορυβικό λόγο, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SNR_{dB} = 20 \log \frac{\sigma_{\Delta T} - \sigma_n}{\sigma_n} \quad (64)$$

όπου $\sigma_{\Delta T}$ και σ_n είναι η τυπική απόκλιση για το διάστημα που διαρκεί το σεισμικό γεγονός και η τυπική απόκλιση για το παράθυρο του θορύβου αντίστοιχα.

Με τον τρόπο αυτό, εισάγοντας στο πρόγραμμα ένα σήμα παράγονται $M-1$ εξασθενημένες και μετατοπισμένες εκδοχές του. Αυτές, στη συνέχεια, μπορούν να τροφοδοτήσουν τους αλγορίθμους εντοπισμού του ΤΟΑ και της θέσης της πηγής και τα αποτελέσματα να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των σφαλμάτων.

7.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΤΟΑ

Η επίδοση των μεθόδων που προτάθηκαν στο κεφάλαιο 6 αναλύεται στην

παρούσα ενότητα με τη χρήση των πραγματικών δεδομένων που ελήφθησαν με τις πειραματικές μεθόδους που περιγράφηκαν ωρίτερα, και με κατάλληλα σχεδιασμένους ελέγχους προσομοίωσης.

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ανίχνευσης και κατηγοριοποίησης σεισμικών γεγονότων με τη χρήση του DWT αλγορίθμου έχει ήδη αναλυθεί στις παραγράφους 5.2. και 5.3. Μετά την ανίχνευση ενός σεισμικού γεγονότος, υλοποιούνται οι μέθοδοι DWT και WPT που προτείνονται για τον καθορισμό του TOA στις παραγράφους 6.4 και 6.5. Στην περίπτωση των πραγματικών δεδομένων, η εκτίμηση του σφάλματος στο TOA δεν είναι δυνατόν να γίνει άμεσα. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα της εκτίμησης του TOA εισάγονται στον αλγόριθμο υπερβολικού εντοπισμού που περιγράφηκε στην παράγραφο 6.2.2 και καταγράφονται τα σφάλματα στον εντοπισμό της θέσης, τα οποία οφείλονται στα σφάλματα στις εκτιμώμενες τιμές των TOA.

Εκτός από τα πειραματικά αποτελέσματα, εκτελούνται προσομοιώσεις, με το λογισμικό που περιγράφηκε στην παράγραφο 7.2 ώστε να εκτιμηθούν τα σφάλματα των προτεινόμενων μεθόδων σε συνθήκες ελεγχόμενου θορύβου.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτήν την παράγραφο αφορούν την αξιοπιστία των προτεινόμενων αλγορίθμων για τον καθορισμό του TOA σε εφαρμογές εντοπισμού πηγής. Παρουσιάζονται πρώτα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και στη συνέχεια τα αποτελέσματα του εντοπισμού πηγής που προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις.

7.3.1. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα που περιγράφηκε στην παράγραφο 7.2 προκειμένου να μοντελοποιηθεί η λειτουργία της τοπολογίας της πειραματικής διάταξης που φαίνεται στην Εικόνα 32. Έτσι, οι συντεταγμένες των αισθητήρων επιλέχθηκαν ίσες με $(0,0)m$, $(0,7)m$, $(6.66,2.16)m$, $(4.12,-5.66)m$, $(-4.12,-5.66)$ και $(-6.66,2.16)m$ και η θέση της πηγής ορίζεται στις πολικές συντεταγμένες $r=9m$, $\theta=85^\circ$.

Το πρόγραμμα τροφοδοτείται με ένα από τα καταγεγραμμένα σεισμικά γεγονότα που έχει επιλεγεί με κριτήριο το υψηλό SNR. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι χρονικές μετατοπίσεις και οι εξασθενήσεις που πρέπει να εφαρμοστούν στο αρχικό σήμα με δεδομένες τις συντεταγμένες των

αισθητήρων και της πηγής και προστίθεται. Το αποτέλεσμα των 6 σημάτων τροφοδοτείται στους δύο προτεινόμενους αλγορίθμους για καθορισμό του ΤΟΑ.

Η ακρίβεια στον καθορισμό του ΤΟΑ και κατ' επέκταση η καταλληλότητα των μεθόδων για εφαρμογές εντοπισμού της θέσης της πηγής καθορίζεται χρησιμοποιώντας τους υπολογισθέντες χρόνους άφιξης στον αλγόριθμο υπερβολικού εντοπισμού με άγνωστη ταχύτητα διάδοσης που προτείνεται στο [57]. Η καρτεσιανές συντεταγμένες της πηγής που προκύπτουν μετασχηματίζονται σε πολικές, με βάση τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2} \\ \arctan \frac{y}{x} \end{bmatrix} \quad (65)$$

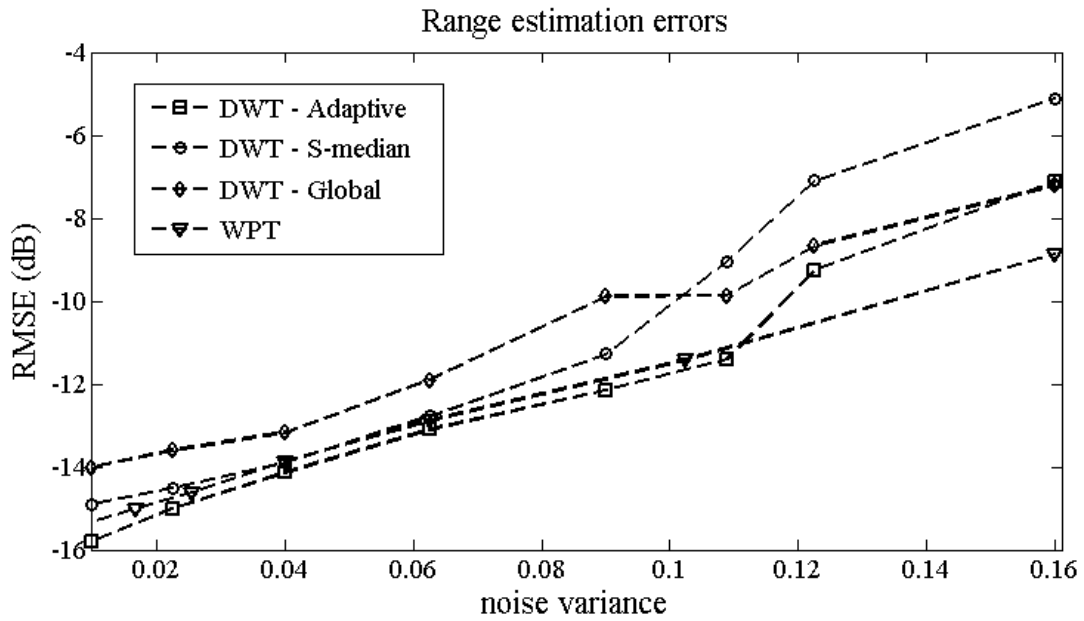
Κάθε προσομοίωση επαναλαμβάνεται 500 φορές και από τα αποτελέσματα της σχέσης (65) υπολογίζονται τα RMS (Rooted Mean Squared) σφάλματα σε σχέση με τις γνωστές πολικές συντεταγμένες της πηγής για διαφορετικές τιμές διασποράς του προστιθέμενου θορύβου.

Στην Εικόνα 33 παρουσιάζονται τα σφάλματα στις εκτιμήσεις της απόστασης της πηγής από το καθορισμένο σημείο (0,0) για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους κατωφλίωσης (adaptive, S-median, global) στον αλγόριθμο DWT καθώς και για την μέθοδο WPT. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις γωνίες άφιξης των σημάτων ως προς τον καθορισμένο άξονα x φαίνονται στην Εικόνα 34.

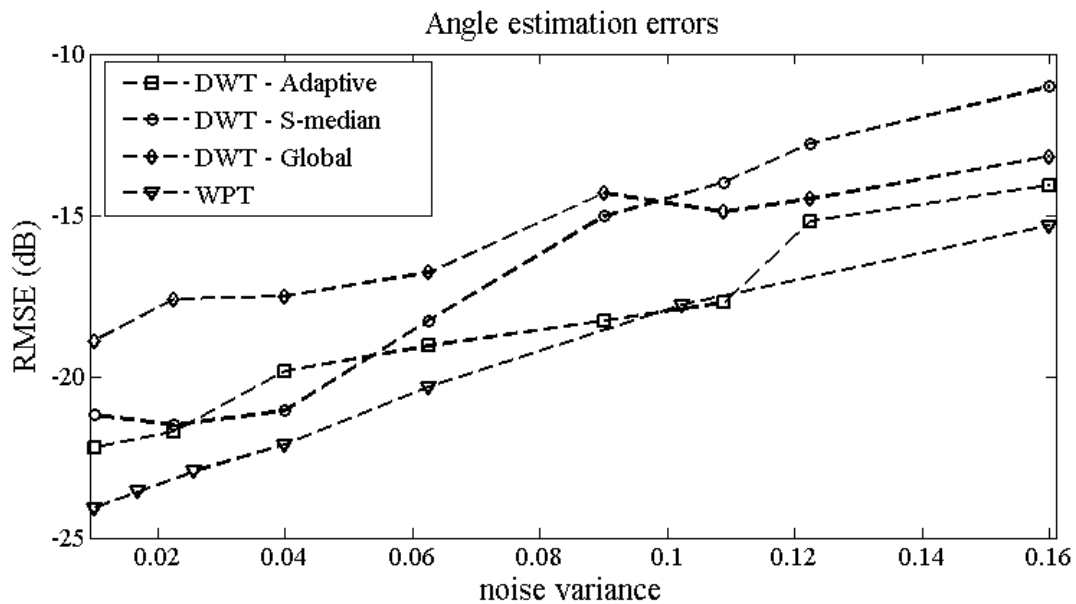
Στις Εικόνες 33 και 34, η τα σφάλματα δίνονται ως συνάρτηση της διασποράς του θορύβου που προστέθηκε στο σήμα. Επειδή τα πλάτη των σημάτων σε κάθε αισθητήρα είναι διαφορετικά, ο προστιθέμενος θόρυβος

Πίνακας 9 Αντιστοίχιση ανάμεσα στη διασπορά του προστιθέμενου θορύβου και το SNR σε κάθε κόμβο.

σ^2	SNR(dB)					
	1st sensor	2nd sensor	3rd sensor	4th sensor	5th sensor	6th sensor
0.0064	30.58	20.34	19.56	18.90	16.96	16.36
0.01	27.86	17.56	17.02	16.34	14.42	13.86
0.0169	26.08	15.34	14.96	14.26	12.02	11.82
0.0256	23.88	13.12	12.74	12.04	9.56	8.58
0.04	21.54	9.80	9.74	9.20	7.34	6.60
0.0625	19.00	7.80	7.64	7.46	4.13	3.44
0.1024	14.94	5.60	5.18	4.60	2.18	1.04
0.16	11.58	2.08	2.10	1.60	0.50	0.28



Εικόνα 33 RMS σφάλματα στον υπολογισμό της απόστασης της πηγής με τη χρήση των προτεινόμενων μεθόδων σε προσομοιωμένα δεδομένα.



Εικόνα 34 RMS σφάλματα στον υπολογισμό της γωνίας άφιξης του σήματος με τη χρήση των προτεινόμενων μεθόδων σε προσομοιωμένα δεδομένα.

αντιστοιχεί σε διαφορετικό SNR σε κάθε σήμα. Στον Πίνακα 9 δίνονται οι αντιστοιχίσεις των διασπορών με τα SNR που προκύπτουν σε κάθε αισθητήρα.

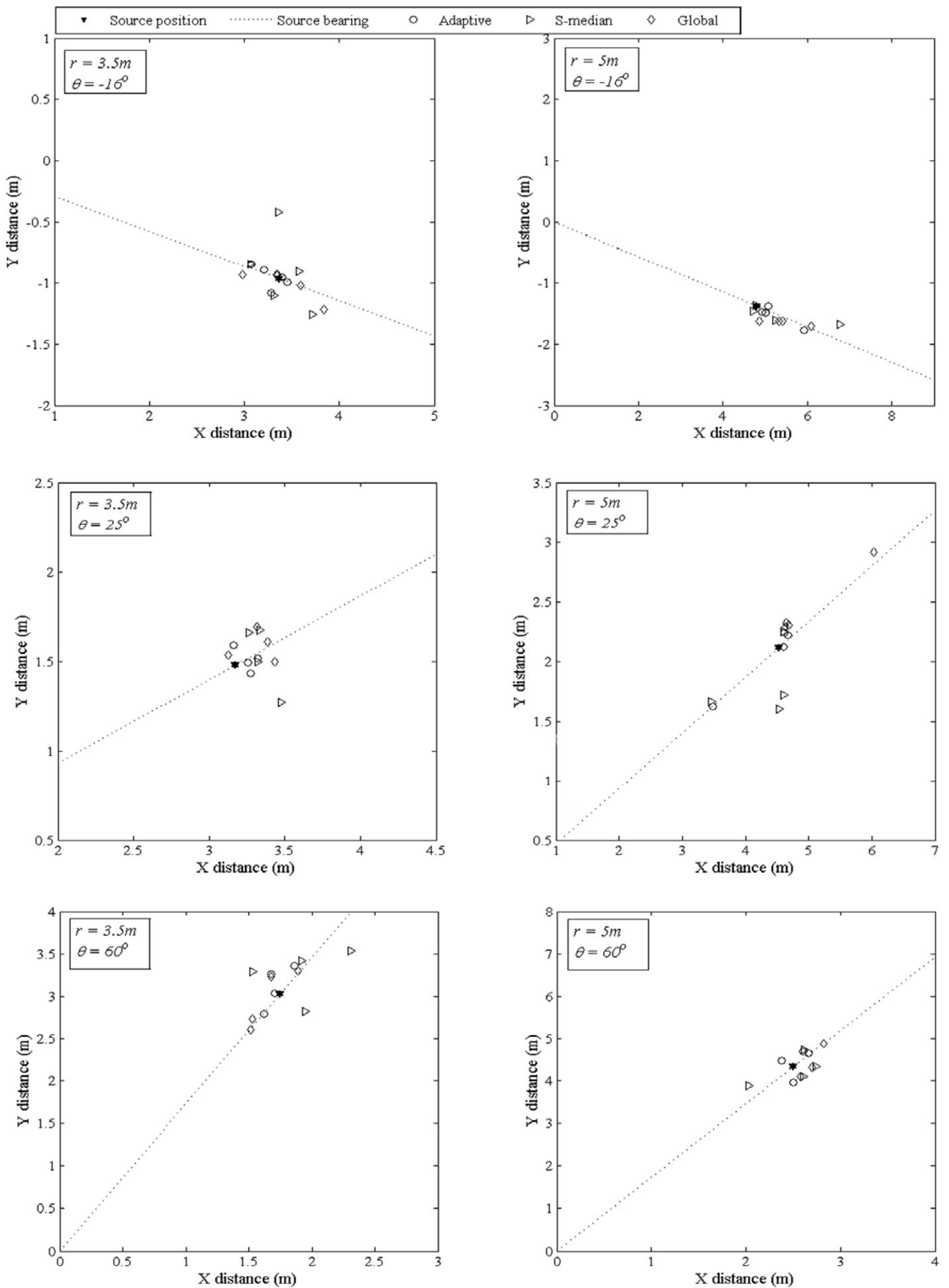
7.3.2. Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

Τα πειραματικά δεδομένα που καταγράφηκαν χρησιμοποιούνται στη

συνέχεια για τη δοκιμή των προτεινόμενων αλγορίθμων. Τα σεισμικά γεγονότα προκαλούνται σε γνωστές θέσεις όπως περιγράφεται στην παράγραφο 7.1. Στη συνέχεια, τα καταγεγραμμένα σήματα χωρίζονται σε παράθυρα των 256 δειγμάτων και εφαρμόζονται οι προτεινόμενες μέθοδοι για τον εντοπισμό των ΤΟΑ. Τα αποτελέσματα τροφοδοτούνται στον αλγόριθμο εντοπισμού θέσης που περιγράφεται στο [57] και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (βλ. Εικόνες 33, 34) φάνηκε ότι η μέθοδος εντοπισμού του ΤΟΑ με την χρήση του DWT αποδίδει καλύτερα όταν χρησιμοποιείται η προσαρμοζόμενη (adaptive) μέθοδος κατωφλίωσης των συντελεστών wavelet. Στην Εικόνα 35 συγκρίνονται τα αποτελέσματα του εντοπισμού για τμήμα των πειραματικών δεδομένων σε διαφορετικές θέσεις με τη χρήση της μεθόδου DWT για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους κατωφλίωσης. Από τα αποτελέσματα αυτά, καθώς και από αυτά του πίνακα 10, επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που δείχνουν υπεροχή του προσαρμοζόμενου κατωφλίου έναντι των άλλων δύο. Στην Εικόνα 36 συγκρίνονται οι αποδόσεις της DWT μεθόδου με αυτήν της WPT χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις για τέσσερις διαφορετικές θέσεις. Τα αποτελέσματα αυτά αντιπαραβάλλονται με τα αποτελέσματα εντοπισμού που προκύπτουν από μια απλή μέθοδο ανίχνευσης με κατώφλι. Συγκεκριμένα, για την απλή μέθοδο κατωφλίου, χρησιμοποιείται το κατώφλι SURE που υπολογίζεται στη σχέση (27). Ο υπολογισμός των ΤΟΑ σε αυτή την περίπτωση έχει γίνει χωρίς τη χρήση κάποιας από τις προτεινόμενες μεθόδους. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο αντιστοιχούν στον εντοπισμό της θέσης της σεισμικής πηγής που προκύπτει αν θεωρηθεί ότι η χρονική στιγμή άφιξης του σήματος είναι η χρονική στιγμή που το πλάτος του ξεπερνά την τιμή του κατωφλίου t_0 (βλ. χρονική στιγμή x_0 στην Εικόνα 28).

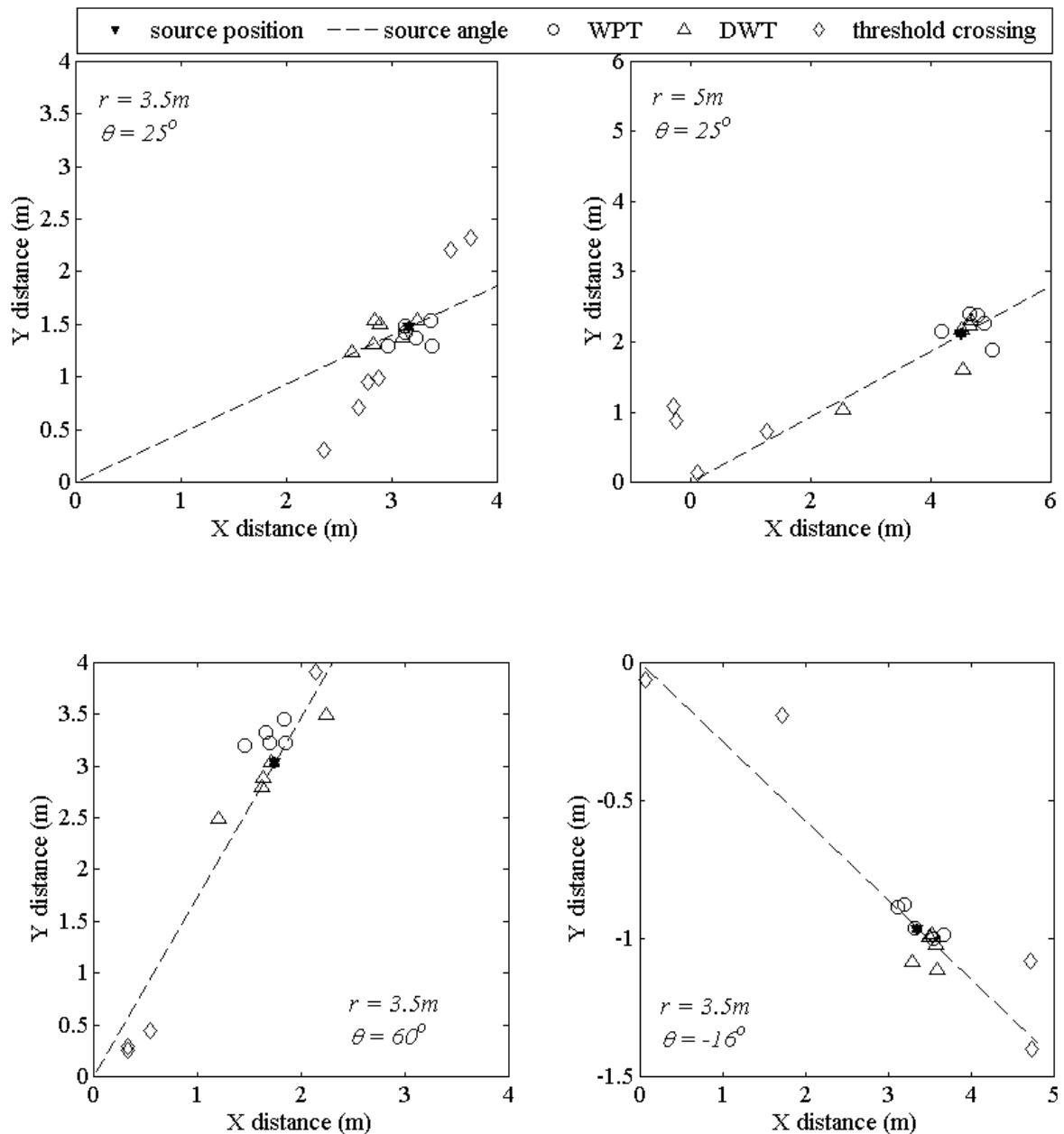
Είναι σαφές από τα αποτελέσματα της Εικόνας 36 ότι η ανάλυση του σήματος με της προτεινόμενες wavelet μεθόδους είναι απαραίτητη προκειμένου να εντοπιστεί με ακρίβεια η χρονική στιγμή άφιξης του σήματος στη θέση του αισθητήρα. Η στιγμή που το πλάτος του σήματος ξεπερνά το καθορισμένο κατώφλι απέχει σημαντικά από την πραγματική χρονική στιγμή άφιξης του σήματος, και επιπλέον εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σήματος και από το επίπεδο του θορύβου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι



Εικόνα 35 Πειραματικά αποτελέσματα εντοπισμού θέσης για τη μέθοδο DWT με τις τρεις διαφορετικές μεθόδους κατοφλίωσης.

διαφορές στους χρόνους άφιξης που προκύπτουν από αυτή τη μέθοδο να μην ανταποκρίνονται στις πραγματικές και τα αποτελέσματα στον υπερβολικό εντοπισμό της θέσης να απέχουν σημαντικά από τις πραγματικές θέσεις.

Αντίθετα, η ανάλυση του σήματος με τις προτεινόμενες μεθόδους και ο εντοπισμός του ΤΟΑ με την χρήση των μετασχηματισμών wavelet οδηγεί σε σημαντικά μικρότερα σφάλματα στον εντοπισμό της θέσης της πηγής.



Εικόνα 36 Αποτελέσματα εντοπισμού της πηγής κρουστικών σεισμικών γεγονότων σε διαφορετικές θέσεις με τρεις μεθόδους: (i) WPT, (ii) DWT με προσαρμοζόμενη κατώφλιωση και (iii) απλό κατώφλι.

Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται συνολικά τα σφάλματα στις εκτιμήσεις της απόστασης και της γωνίας της πηγής. Για τη μέθοδο DWT παρατίθενται αναλυτικά τα σφάλματα για κάθε μέθοδο κατωφλίωσης ξεχωριστά. Στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του πίνακα δεν συμπεριλαμβάνεται η μέθοδος εντοπισμού με το κατώφλι SURE καθώς τα αποτελέσματά της, όπως φαίνεται στην Εικόνα 35, είναι ανακόλουθα και ανακριβή.

Πίνακας 10 Τα σφάλματα των εκτιμήσεων των προτεινόμενων μεθόδων όπως προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις.

Θέση πηγής (πολικές συντεταγμένες)	<i>RMS σφάλματα εκτιμήσεων απόστασης (dB)</i>			
	Μέθοδος DWT			Μέθοδος WPT
	Προσαρμοζόμενο κατώφλι	S-median	Γενικευμένο κατώφλι	
(3.5m,25°)	-12	-11.5	-11.9	-24.4
(3.5m,-16°)	-14.3	-12.3	-13	-24.2
(5m,25°)	-9.29	-7.31	-6.9	-16.2
(5m,-16°)	-8.5	-5.2	-8.4	-5
	<i>RMS σφάλματα εκτιμήσεων γωνίας (dB)</i>			
	Μέθοδος DWT			Μέθοδος WPT
	Προσαρμοζόμενο κατώφλι	S-median	Γενικευμένο κατώφλι	
(3.5m,25°)	-14.3	-13.1	-14.7	-22.7
(3.5m,-16°)	-16.9	-11	-14.2	-30.4
(5m,25°)	-16.3	-15.2	-8.6	-24.4
(5m,-16°)	-11.3	-12	-11.7	-13.3

Όπως προκύπτει από την εφαρμογή των δύο προτεινόμενων μεθόδων στα πειραματικά αποτελέσματα, ο προσδιορισμός της γωνίας άφιξης του σήματος γίνεται σε όλες τις περιπτώσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια απ' ό τι η απόσταση της πηγής. Επιπλέον, το πλεονέκτημα του WPT στη διακριτική ικανότητα που προσφέρει στο πεδίο της συχνότητας επιτρέπει, στις περισσότερες των περιπτώσεων, σημαντικά βελτιωμένο εντοπισμό της θέσης της πηγής απ' ό τι ο DWT.

7.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ

Μέχρι τώρα, το θέμα του εντοπισμού της θέσης μιας επιφανειακής σεισμικής πηγής έχει μελετηθεί μόνο για την τοπολογία της Εικόνας 32 Προκειμένου να υπάρξει μια ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του προβλήματος είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η επίδραση παραμέτρων που αφορούν την

τοπολογία των αισθητήρων. Σε αυτή την ενότητα χρησιμοποιείται το λογισμικό προσομοίωσης της σεισμικής διάδοσης που περιγράφηκε νωρίτερα προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της τοπολογίας των αισθητήρων στα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα διερευνώνται οι παράμετροι:

- Απόσταση μεταξύ αισθητήρων
- Συμμετρική ή τυχαία κατανομή των αισθητήρων
- Πλήθος αισθητήρων

7.4.1. Απόσταση μεταξύ αισθητήρων

Η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων που καταγράφουν ένα σεισμικό γεγονός με σκοπό τον εντοπισμό της πηγής του είναι μια παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η επίδραση της απόστασης μεταξύ των αισθητήρων στα σφάλματα της εκτίμησης της θέσης οφείλεται στον τρόπο που επηρεάζει τις εκτιμήσεις στις διαφορές χρόνου άφιξης η οποία δίνεται από την σχέση $D_{i,j} = D_{i,j}^0 + q_{i,j}$ (βλ. εξίσωση 45). Οι πραγματικές τιμές των διαφορών στους χρόνους άφιξης $D_{i,j}^0$ μεταξύ των αισθητήρων i και j εξαρτώνται από την απόσταση μεταξύ των αισθητήρων σύμφωνα με τη σχέση:

$$D_{i,j}^0 = \frac{r_{i,j}}{c}$$

δηλαδή όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων τόσο μικρότερη είναι και η χρονική διαφορά στις αφίξεις των σημάτων.

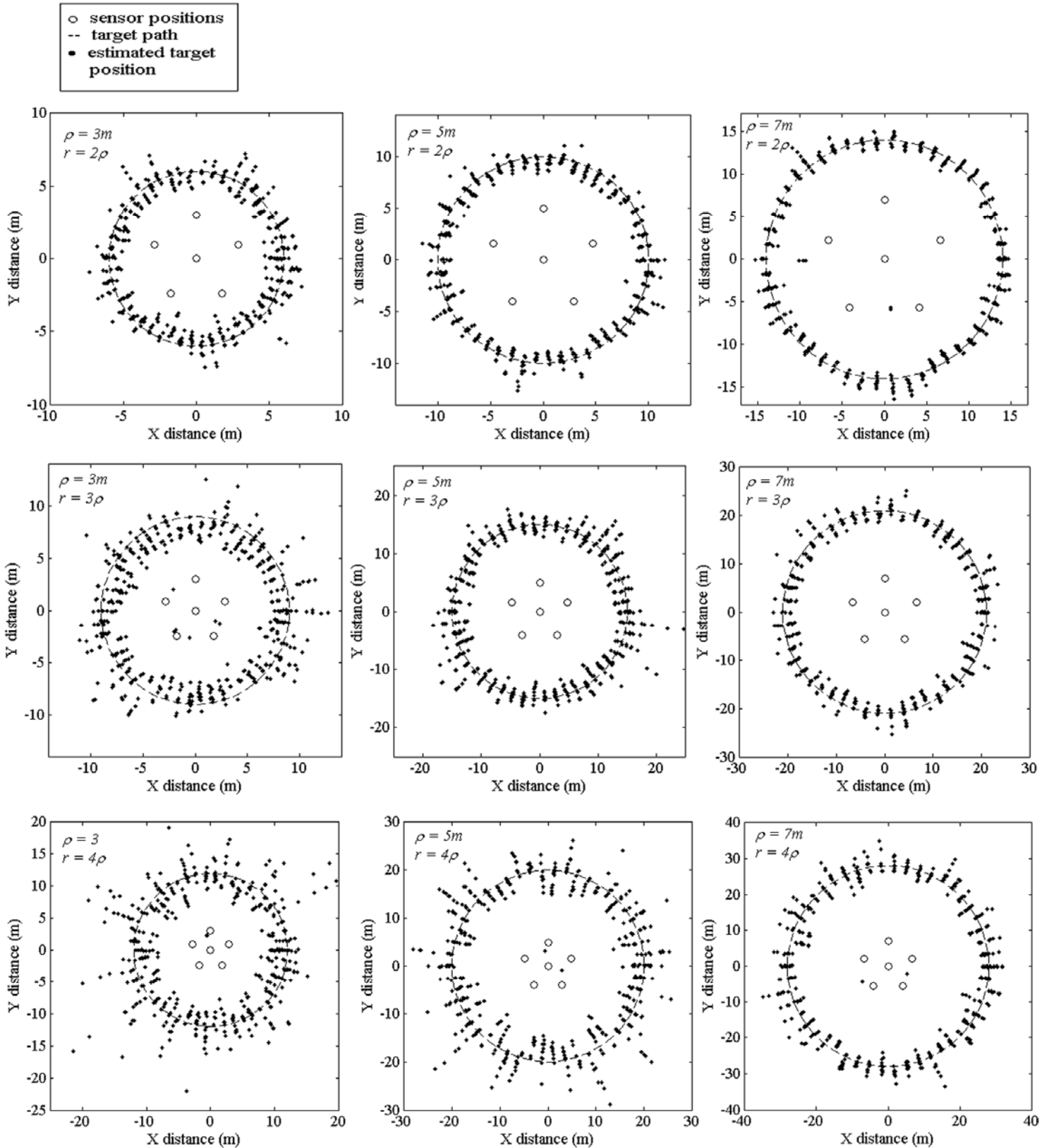
Καθώς η μεθοδολογία που προτάθηκε για την εκτίμηση των $D_{i,1}$ αναλύει το σήμα που φτάνει σε κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, είναι ασφαλές να θεωρήσουμε ότι τα σφάλματα $q_{i,1}$ εξαρτώνται αποκλειστικά από το επίπεδο θορύβου στους αισθητήρες i και 1. Διατηρώντας, λοιπόν, σταθερό το επίπεδο του θορύβου, από τη σχέση (45) προκύπτει ότι η επίδραση του σφάλματος στην τελική εκτίμηση $D_{i,j}$ γίνεται σημαντικότερη όταν η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων είναι μικρότερη.

Η επίδραση της απόστασης διερευνάται με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης σεισμικής διάδοσης. Διατηρείται η τοπολογία κανονικού πενταγώνου που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των μέχρι τώρα αποτελεσμάτων μεταβάλλοντας όμως την ακτίνα του πενταγώνου ώστε να

παίρνει τιμές $\rho = 3, 5$ και 7 m. Με αυτόν τον τρόπο οι αποστάσεις r_{1j} που χρησιμοποιούνται στον υπερβολικό εντοπισμό μεταβάλλονται το ίδιο για κάθε $j = 2, 3, \dots, 6$. Στο σενάριο που προσομοιώνεται ο στόχος κινείται σε κυκλική τροχιά ακτίνας r από την αρχή των αξόνων και ανιχνεύεται από τους 6 αισθητήρες. Οι προσομοιώσεις εκτελούνται 100 φορές για κάθε θέση της πηγής. Στα διαγράμματα της Εικόνας 36, οριζοντίως διατηρείται σταθερός ο λόγος r/ρ καθώς αυξάνεται η ακτίνα ρ . Συγκρίνοντας τη διασπορά των εκτιμώμενων θέσεων φαίνεται η επίδραση της απόστασης μεταξύ των αισθητήρων στα αποτελέσματα της εκτίμησης της θέσης. Σε όλες τις προσομοιώσεις το επίπεδο του προστιθέμενου θορύβου διατηρείται σταθερό.

Παρατηρώντας τα γραφήματα της Εικόνας 36 προκύπτει ότι η απόσταση των αισθητήρων στην τοπολογία, δεν επηρεάζει τη διακύμανση των εκτιμώμενων θέσεων της πηγής όταν ο λόγος r/ρ παραμένει σταθερός. Αυτό συνεπάγεται ότι η εμβέλεια μιας τοπολογίας αισθητήρων είναι ανάλογη της απόστασης μεταξύ των αισθητήρων σε αυτή, και συνεπώς, προκειμένου να αυξηθεί η εμβέλεια διατηρώντας σταθερό το επίπεδο σφαλμάτων στις εκτιμήσεις αρκεί να αυξηθεί η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων.

Ο φυσικός περιορισμός που τίθεται στον παραπάνω κανόνα οφείλεται στην πεπερασμένη ευαισθησία των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται. Καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων σε μια διάταξη, λόγω της σεισμικής απόσβεσης κατά τη διάδοση του σήματος, ελαττώνονται οι πιθανότητες να ανιχνευθεί κάποιο σεισμικό γεγονός από τον πιο απομακρυσμένο αισθητήρα.



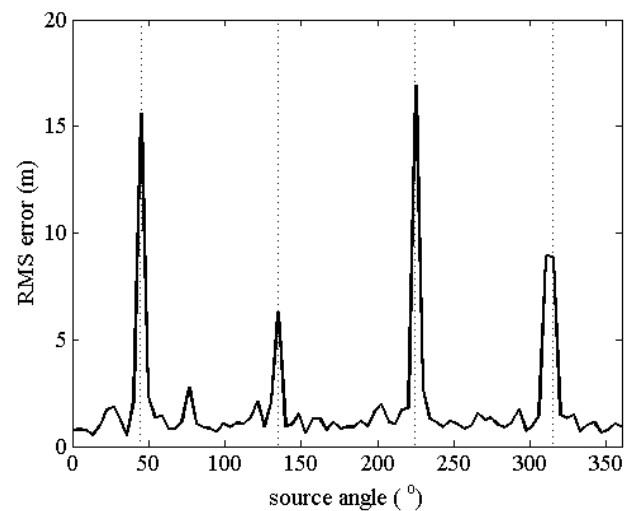
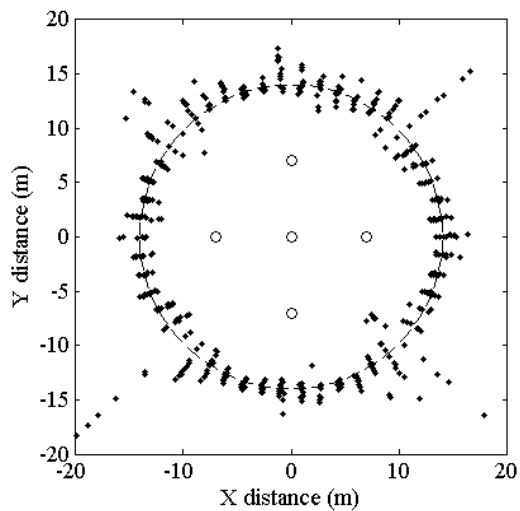
Εικόνα 37 Εκτιμήσεις της θέσης στόχου που κινείται σε κυκλική τροχιά ακτίνας r γύρω από τη διάταξη αισθητήρων. Η ακτίνα της διάταξης παίρνει τις τιμές $\rho = 3, 5, 7m$

7.4.2. Πλήθος αισθητήρων σε συμμετρικές τοπολογίες

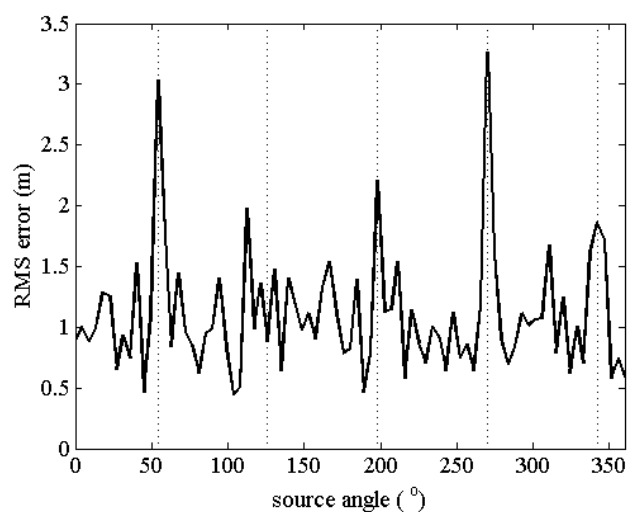
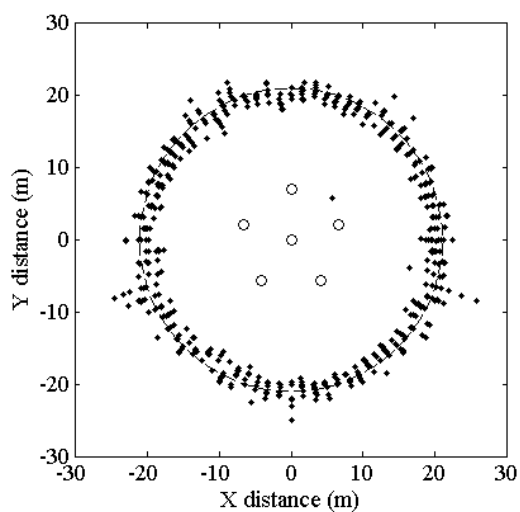
Η συμμετρία μιας τοπολογίας στην διάταξη των αισθητήρων που χρησιμοποιείται για τον υπερβολικό εντοπισμό της θέσης μιας πηγής μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να επιδράσει σημαντικά στις επιδόσεις του συστήματος.

Η επίδραση της συμμετρίας της διάταξης οφείλεται στη μορφή του πίνακα \mathbf{A} της εξίσωσης (44). Η τρίτη στήλη του πίνακα \mathbf{A} περιέχει τα στοιχεία $D_{i,1}^2$ και η τέταρτη τα στοιχεία $2D_{i,1}$. Οι τιμές στις διαφορές των χρόνων άφιξης είναι συνήθως τάξεις μεγέθους μικρότερες από τις τιμές των υπόλοιπων στοιχείων του πίνακα. Για συγκεκριμένες θέσεις της πηγής το σήμα φτάνει σχεδόν ταυτόχρονα σε δύο ή περισσότερους αισθητήρες, με αποτέλεσμα η τιμή στις διαφορές των χρόνων άφιξης να γίνεται ακόμα μικρότερη. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει την ευστάθεια της λύσης του γραμμικού συστήματος που δίνεται από τη σχέση (44), δηλαδή για πολύ μικρές μεταβολές στις τιμές του πίνακα \mathbf{A} προκύπτουν μεγάλες αποκλίσεις στην εκτίμηση του διανύσματος θ .

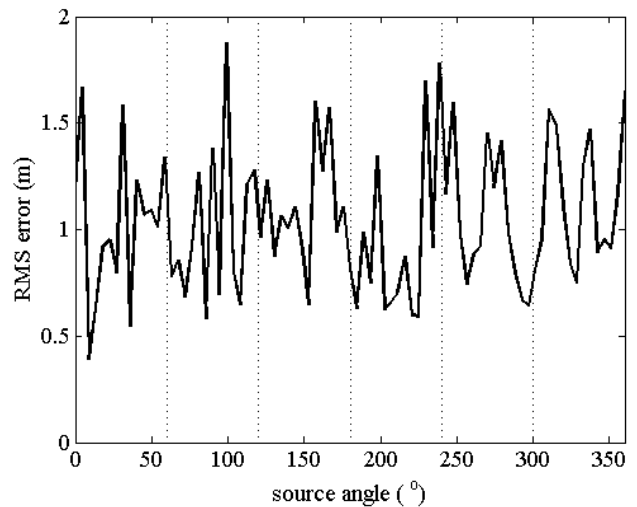
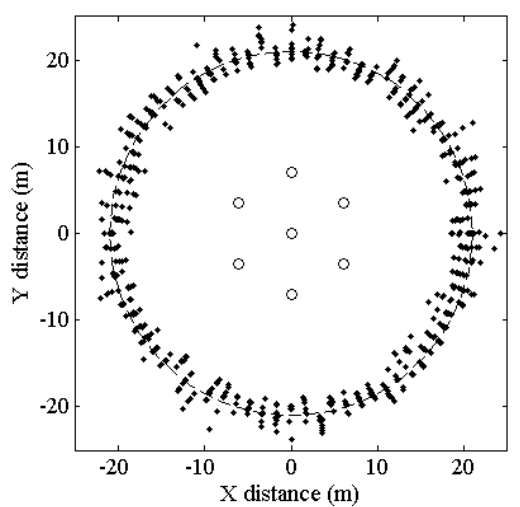
Στην Εικόνα 38 δίνονται τρεις συμμετρικές διατάξεις με 5, 6 και 7 αισθητήρες αντίστοιχα και τα αποτελέσματα της εκτίμησης της θέσης της πηγής μαζί με το διάγραμμα σφαλμάτων σε συνάρτηση με τη γωνία άφιξης του σήματος. Οι κάθετες διακεκομμένες γραμμές στα τελευταία υποδεικνύουν τις γωνίες στις οποίες οι διαφορές στους χρόνους άφιξης $D_{2,1}^0 = 0$, δηλαδή τις γωνίες στις οποίες το σήμα καταγράφεται για πρώτη φορά ταυτόχρονα από δύο αισθητήρες. Γίνεται αντιληπτό, ιδιαίτερα στα διαγράμματα (α) και (β) ότι στις γωνίες αυτές το σφάλμα στην εκτίμηση της απόστασης της πηγής είναι πολύ μεγαλύτερο από τις υπόλοιπες θέσεις. Ωστόσο, αυξάνοντας τον αριθμό των αισθητήρων το φαινόμενο μετριάζεται σημαντικά, όπως φαίνεται στα αποτελέσματα της τοπολογίας με τους 7 αισθητήρες (Εικόνα 37 (γ)).



(α)

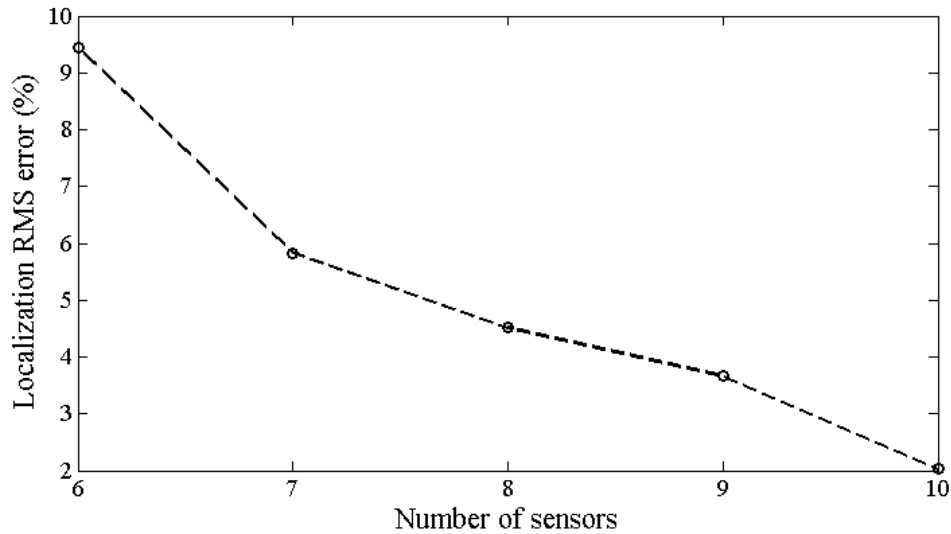


(β)



(γ)

Εικόνα 38 Σφάλματα των εκτιμήσεων της απόστασης της πηγής συναρτήσει της γωνίας άφιξης για τρεις διαφορετικές, συμμετρικές τοπολογίες: (α) 5 αισθητήρες, (β) 6 αισθητήρες, (γ) 7 αισθητήρες



Εικόνα 39 Σφάλμα στην εκτίμηση της θέσης της πηγής συναρτήσει του πλήθους των αισθητήρων σε τυχαία τοπολογία

7.4.3. Πλήθος αισθητήρων σε τυχαίες τοπολογίες

Όπως φάνηκε στην προηγούμενη παράγραφο, το πλήθος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της θέσης μιας πηγής σημάτων είναι μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος. Είναι αναμενόμενο ότι όσο περισσότεροι αισθητήρες ανιχνεύσουν ένα σεισμικό γεγονός τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ακρίβεια της εκτίμησης της θέσης της πηγής του. Στην παράγραφο αυτή διερευνάται ποσοτικά η επίδραση του αριθμού αισθητήρων μιας τυχαίας διάταξης στο τελικό αποτέλεσμα εντοπισμού.

Στο πρόγραμμα προσομοίωσης της σεισμικής διάδοσης, που χρησιμοποιήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, παράγονται τυχαίες διατάξεις n αισθητήρων μέσα σε κυκλική περιοχή με κέντρο το σημείο $(0,0)$ και ακτίνα 7 m. Έπειτα, εκτελούνται προσομοιώσεις για διαφορετικές θέσεις της πηγής πάνω σε κύκλο με κέντρο το $(0,0)$ και ακτίνα 17 m. Από το σύνολο των αποτελεσμάτων υπολογίζεται το RMS σφάλμα στις εκτιμήσεις της θέσης της πηγής, σε σχέση με την απόσταση του στόχου από την αρχή των αξόνων, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 39.

7.5. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό, μελετήθηκαν οι επιδόσεις των προτεινόμενων μεθόδων για τον εντοπισμό της θέσης μιας πηγής σεισμικών σημάτων με τη χρήση πειραματικών μετρήσεων και προσομοιώσεων. Επιπλέον, με τη χρήση

κατάλληλου λογισμικού προσομοίωσης της διάδοσης ενός σεισμικού σήματος εξετάστηκε η επίδραση της τοπολογίας της διάταξης των αισθητήρων στα αποτελέσματα του εντοπισμού της θέσης της πηγής.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα 7.3 αποδεικνύουν την καταλληλότητα των προτεινόμενων μεθόδων εκτίμησης του TOA για εφαρμογές εντοπισμού της θέσης της πηγής. Η σύγκριση των προτεινόμενων μεθόδων, τόσο με πειραματικά όσο και με προσομοιωμένα αποτελέσματα, αναδεικνύει την υπεροχή του WPT έναντι του DWT στην ακριβή εκτίμηση της άφιξης του σήματος. Η υπεροχή αυτή, ωστόσο, έχει το τίμημα της αυξημένης πολυπλοκότητας λόγω της χρήσης του απαιτητικότερου WPT. Η χρήση του DWT δοκιμάστηκε με τρεις διαφορετικές μεθόδους κατωφλίωσης. Από αυτές, τα πιο ακριβή αποτελέσματα τα δίνει η μέθοδος του προσαρμοζόμενου κατωφλίου.

Η ανάγκη για τον ακριβή εντοπισμό της χρονικής στιγμής άφιξης των σημάτων φαίνεται ξεκάθαρα στις Εικόνες 35 και 36. Εκεί τα αποτελέσματα των προτεινόμενων μεθόδων συγκρίνονται πειραματικά με τα αποτελέσματα του εντοπισμού που προκύπτουν από την χοντρική εκτίμηση του TOA με τη χρήση ενός απλού κατωφλίου. Είναι φανερό ότι στην τελευταία περίπτωση η ακρίβεια της εκτίμησης δεν επαρκεί για τον εντοπισμό θέσης της πηγής, σε αντίθεση με την ακρίβεια που δίνουν οι προτεινόμενες μέθοδοι.

Στην ενότητα 7.4 μελετήθηκε ο τρόπος επίδρασης κάποιων παραμέτρων της τοπολογίας της διάταξης των αισθητήρων στα αποτελέσματα του εντοπισμού θέσης. Αρχικά, ερευνήθηκε η επίδραση της απόστασης μεταξύ των αισθητήρων στα αποτελέσματα του εντοπισμού της θέσης.

Αποδείχθηκε ότι όταν η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων είναι μεγαλύτερη το σφάλμα στην εκτίμηση του χρόνου άφιξης επιδρά λιγότερο στο αποτέλεσμα του υπερβολικού εντοπισμού. Αυτό επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό της θέσης της πηγής σε μεγαλύτερη εμβέλεια. Ωστόσο, τα όρια στην ευαισθησία των αισθητήρων περιορίζουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των κόμβων, καθώς για μεγάλες αποστάσεις αυξάνεται η πιθανότητα να μη γίνει αντιληπτό ένα σεισμικό γεγονός από κάποιους αισθητήρες. Προκύπτει λοιπόν, ότι η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των αισθητήρων σε μια διάταξη είναι η μεγαλύτερη για την οποία ένα σεισμικό γεγονός, εντός της επιθυμητής εμβέλειας, γίνεται αντιληπτό από τον

μεγαλύτερο δυνατό αριθμό αισθητήρων.

Έπιπλέον, παρατηρήθηκε ότι ο υπερβολικός εντοπισμός, λόγω της μορφής των εξισώσεών του, παρουσιάζει κάποια αστάθεια σε συγκεκριμένες θέσεις της πηγής. Η αστάθεια αυτή στα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα αντιληπτή όταν οι αισθητήρες είναι συμμετρικά τοποθετημένοι και το σήμα φτάνει ταυτόχρονα στους δύο πρώτους αισθητήρες. Ωστόσο, αποδείχθηκε ότι όταν το πλήθος των αισθητήρων της διάταξης αυξάνεται, η επίδραση της συμμετρίας σχεδόν εξαλείφεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

8.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκαν μέθοδοι για τον εντοπισμό επιφανειακών σεισμικών πηγών. Δόθηκε έμφαση στην ειδική περίπτωση των κρουστικών πηγών που δίνουν μη στάσιμα σήματα σύντομης διάρκειας, τα οποία διαδίδονται σε σκεδαστικό μέσο που αλλοιώνει τα φασματικά χαρακτηριστικά τους. Οι ιδιαίτερες συνθήκες που αφορούν τα σήματα αυτά καθιστούν τους κλασικούς αλγορίθμους εντοπισμού αναποτελεσματικούς.

Οι προκαταρκτικές πειραματικές μετρήσεις του κεφαλαίου 3 αποδεικνύουν ότι η σεισμική διάδοση σε σκεδαστικά μέσα παράγει σήματα με χαμηλά ποσοστά συσχέτισης. Συνεπώς, η απευθείας εκτίμηση της διαφοράς στους χρόνους άφιξης με χρήση μεθόδων συσχέτισης καθίσταται αναποτελεσματική. Επιπλέον, από τις ίδιες μετρήσεις προκύπτει ότι τα φασματικά και χρονικά χαρακτηριστικά του διαδιδόμενου σήματος εξαρτώνται από το είδος του εδάφους. Καθώς σε εφαρμογές ανεπιτήρητων δικτύων αισθητήρων η λεπτομερής γνώση της σύστασης του εδάφους δεν είναι πάντα εφικτή, δεν μπορούμε να βασιστούμε στη χρήση κάποιου αναλυτικού μοντέλου του εκπεμπόμενου σήματος για την ακριβή εκτίμηση του χρόνου άφιξης.

Η πρώτη συμβολή της διατριβής αφορά την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για την ανίχνευση σεισμικών γεγονότων εντός της εμβέλειας της διάταξης αισθητήρων. Ο αλγόριθμος που προτείνεται χρησιμοποιεί τον διακριτό μετασχηματισμό wavelet με τη μητρική συνάρτηση Haar. Αποτελεί μια ελάχιστα απαιτητική διεργασία, κατά την οποία τα χρονικά χαρακτηριστικά ενός καταγεγραμμένου σήματος χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή χαρακτηριστικών στο πεδίο wavelet. Από αυτά τα χαρακτηριστικά, εξάγεται η ενεργειακή κατανομή του σήματος σε διαφορετικές κλίμακες wavelet και το σήμα κατηγοριοποιείται ως σεισμικό γεγονός ή τυχαίος θόρυβος. Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα της ενότητας 5.2, η ανίχνευση των σεισμικών γεγονότων με την προτεινόμενη μέθοδο γίνεται με χαμηλά ποσοστά

σφάλματος. Αποδεικνύεται ότι η επιλογή της μεθόδου με την οποία επιλέγονται τα κατώφλια για τους συντελεστές wavelet επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα της ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, στη ROC καμπύλη της Εικόνας 22, σε σεισμικά σήματα με SNR που δεν ξεπερνά τα 5 dB, τα ποσοστά ορθών ανιχνεύσεων αγγίζουν το 94% όταν οι εσφαλμένες ανιχνεύσεις είναι λιγότερο από 8%. Τα ποσοστά αυτά επιτυγχάνονται με τη χρήση του προτεινόμενου προσαρμοζόμενου κατωφλίου, το οποίο υπερτερεί σε σύγκριση με το S-median κατώφλι. Τα αντίστοιχα ποσοστά του τελευταίου είναι 92% ορθές ανιχνεύσεις για ποσοστό εσφαλμένων ανιχνεύσεων 16%. Το πλεονέκτημα της πρώτης μεθόδου αποδίδεται στο γεγονός ότι το προσαρμοσμένο κατώφλι (βλ. Εικόνα 20) επιτυγχάνει την αποτελεσματικότερη εξάλειψη της διασποράς του θορύβου στις περιοχές πριν την άφιξη του σεισμικού γεγονότος, ενώ παράλληλα διατηρεί το μεγαλύτερο ποσοστό των χρήσιμων συντελεστών wavelet.

Η δεύτερη συμβολή της διατριβής αφορά δύο αλγορίθμους για τον ακριβή καθορισμό του χρόνου άφιξης του σήματος οι οποίοι δεν απαιτούν εκ των προτέρων γνώση των χαρακτηριστικών του και η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από την συσχέτιση μεταξύ των σημάτων. Ο πρώτος χρησιμοποιεί τον οικονομικό σε υπολογισμούς DWT και ο δεύτερος τον απαιτητικότερο, αλλά πιο αποτελεσματικό WPT.

Χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό προσομοίωσης σεισμικής διάδοσης, ελέγχεται η απόδοση των μεθόδων εκτίμησης του TOA, εισάγοντας τις εκτιμήσεις των TOA στον αλγόριθμο υπερβολικού υπολογισμού πηγής. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνουν τις τιμές των σφαλμάτων στις εκτιμήσεις των πολικών συντεταγμένων της πηγής για διάφορες τιμές της διασποράς του θορύβου (βλ. Εικόνες 34, 35). Το πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η εκτίμηση της γωνίας άφιξης είναι πολύ πιο ακριβής στον υπερβολικό εντοπισμό από την απόσταση της πηγής. Σχετικά με τις μεθόδους εκτίμησης των TOA, προκύπτει ότι η χρήση του WPT υπερτερεί σημαντικά από αυτήν του DWT. Από τις τρεις μεθόδους κατωφλίωσης που δοκιμάστηκαν για τον DWT αλγόριθμο, σε υψηλά επίπεδα θορύβου το προσαρμοζόμενο κατώφλι αποδίδει καλύτερα ενώ σε συνθήκες χαμηλού θορύβου υπερτερεί ελαφρώς το S-median κατώφλι. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αν και ο WPT δίνει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα, είναι ταυτόχρονα πολύ πιο

ακριβός υπολογιστικά. Αυτό, σε πολλές εφαρμογές που το βάρος δίνεται στην υπολογιστική αποδοτικότητα των αλγορίθμων, τον καθιστά ακατάλληλο. Οι πειραματικές μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της απόδοσης των προτεινόμενων αλγορίθμων επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (βλ. Πίνακας 10, Εικόνες 35, 36). Η υπεροχή του WPT είναι σημαντική έναντι των μεθόδων που χρησιμοποιούν τον DWT. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των προτεινόμενων μεθόδων είναι ιδιαίτερα εμφανή στα πειραματικά αποτελέσματα της Εικόνας 36 όπου γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την εφαρμογή ενός απλού SURE κατωφλίου. Αποδεικνύεται ότι όταν δεν είναι δυνατή η χρήση αναλυτικών μοντέλων του εκπεμπόμενου σήματος, όπως έχει αποδειχθεί ότι είναι η περίπτωση των σημάτων που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή, ο εντοπισμός της χρονικής στιγμής άφιξης του σήματος δεν μπορεί να γίνει με απλές μεθόδους κατωφλίου, όπως έχει προταθεί για άλλου είδους σήματα [87]. Αντίθετα, με την εφαρμογή των προτεινόμενων μεθόδων, ο καθορισμός του TOA γίνεται με αρκετή ακρίβεια ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής, δίνοντας ικανοποιητικές εκτιμήσεις.

Συμπερασματικά, οι μέθοδοι που προτείνονται για τον καθορισμό του TOA των σημάτων αποδεικνύονται κατάλληλοι για εφαρμογές εντοπισμού πηγής επιφανειακών σεισμικών σημάτων. Τα πλεονεκτήματά τους έναντι των διαδεδομένων μεθόδων υπολογισμού του TDOA είναι η δυνατότητα να εφαρμόζονται σε μεταβατικά και μη στάσιμα σήματα, και, όπως απέδειξε η εφαρμογή τους σε πειραματικά δεδομένα, ότι οι επιδόσεις τους δεν επηρεάζονται από τη χαμηλή συσχέτιση μεταξύ των σημάτων που φτάνουν σε διαφορετικούς κόμβους.

8.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το θέμα του εντοπισμού της θέσης μιας πηγής σημάτων, δίνοντας έμφαση στην περίπτωση των σεισμικών, κρουστικών διεγέρσεων. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται από τις προτεινόμενες μεθόδους εντοπισμού του TOA αποδεικνύουν την καταλληλότητά τους για εφαρμογές σεισμικής ανίχνευσης, σε περιπτώσεις μη

στάσιμων μεταβατικών σημάτων που διαδίδονται σε σκεδαστικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα οι κλασικές μέθοδοι εκτίμησης του TDOA να μην εφαρμόζονται.

Το θέμα του σεισμικού εντοπισμού, ωστόσο, δεν έχει εξαντληθεί και παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι τομείς που απαιτούν αναλυτικότερη έρευνα και οι οποίοι προτείνονται για μελλοντική εργασία.

8.2.1. Εντοπισμός πολλαπλών πηγών

Ένα σημαντικό πρόβλημα στον εντοπισμό της θέσης με παθητικούς αισθητήρες αποτελεί η περίπτωση των πολλαπλών πηγών. Η μέθοδος MUSIC [92] αποτελεί μια κλασική λύση για τον διαχωρισμό των σημάτων που λαμβάνει ένας αισθητήρας από δύο ή περισσότερες πηγές και βασίζεται στην αναζήτηση διαφορετικών αρμονικών μέσα στο σήμα, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές πηγές. Πιο πρόσφατες μέθοδοι [93]-[95] που έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση του ίδιου προβλήματος παρουσιάζουν καλύτερες αποδόσεις ενώ σε μία περίπτωση [95] οι υπολογιστικές απαιτήσεις είναι σημαντικά ελαττωμένες.

Οι παραπάνω μέθοδοι αφορούν σήματα μεγάλης διάρκειας τα οποία επικαλύπτονται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, δεν υποθέτουν σκεδαστικό μέσο διάδοσης, με αποτέλεσμα να μη μπορούν να εφαρμοστούν. Ωστόσο, στις εργασίες [96], [97] προτείνεται μια μέθοδος που αφορά μεταβατικά φαινόμενα σε σκεδαστικό μέσο. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια βιβλιοθήκη παραμέτρων που περιγράφουν την συνάρτηση μεταφοράς του μέσου διάδοσης από την οποία επιλέγονται οι καταλληλότερες τιμές των παραμέτρων με έναν έλεγχο συσχέτισης. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η ανίχνευση σημάτων σε περιβάλλοντα που παραμορφώνουν σημαντικά το εκπεμπόμενο σήμα, ωστόσο η διαδικασία είναι ιδιαίτερα ενεργειακόβαρα και δεν υλοποιείται σε *ad hoc* εφαρμογές καθώς απαιτεί πολύπλοκους ελέγχους σε κάθε νέο περιβάλλον που πρόκειται να μετρηθεί.

Είναι σαφές από τα παραπάνω ότι η ανίχνευση και ο εντοπισμός πολλαπλών πηγών είναι ένα αρκετά σύνθετο και απαιτητικό πρόβλημα. Η διαθέσιμη βιβλιογραφία δεν εξετάζει την περίπτωση αυτή στο πλαίσιο των εφαρμογών σε δίκτυα αισθητήρων, των οποίων οι απαιτήσεις σε ενεργειακή κατανάλωση περιορίζουν αρκετά το είδος των αλγορίθμων που μπορούν να

υλοποιηθούν. Η ανάπτυξη, λοιπόν, μεθόδων διαχωρισμού των σημάτων από πολλαπλές πηγές με τη χρήση απλών μοντέλων για επί τόπου καθορισμό των απαραίτητων παραμέτρων είναι ένα ανοιχτό πεδίο με ιδιαίτερη βαρύτητα στις εφαρμογές *ad hoc* δικτύων αισθητήρων.

8.2.2. Ενεργειακή βελτιστοποίηση

Οι αλγόριθμοι που προτάθηκαν στην παρούσα διατριβή για την ανίχνευση σεισμικών γεγονότων και τον εντοπισμό της θέσης της πηγής τους έχουν σχεδιαστεί ώστε να ικανοποιούν τις ενεργειακές απαιτήσεις ενός αυτόνομου και ανεπιτήρητου συστήματος. Ωστόσο, η υλοποίηση ενός πραγματικού τέτοιου συστήματος απαιτεί έρευνα στις ανώτερες διαστρωματώσεις του δικτύου που ξεφεύγουν από το στόχο της παρούσας διατριβής.

Βασική προϋπόθεση και ουσιαστική ανάγκη της ύπαρξης ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων αποτελεί η ύπαρξη στοιχειώδους ασύρματης επικοινωνίας των κόμβων με κάποιον κεντρικό κόμβο ή και μεταξύ τους.

Σε ένα τυπικό WSN οι κόμβοι είναι διασκορπισμένοι σε μια περιοχή, πολλές φορές μεγαλύτερη από την εμβέλεια του πομποδέκτη κάθε κόμβου, και θα πρέπει να μεταδώσουν τις μετρήσεις ή τις αποφάσεις που θα έχουν λάβει σε έναν κεντρικό κόμβο – αποδέκτη (sink node) [98]. Δεδομένης της πυκνής εγκατάστασης των κόμβων, η μετάδοση της πληροφορίας μεταξύ τους μπορεί να γίνει με δύο κυρίως τρόπους: Α) Με ένα βήμα (single-hop), γεγονός που σημαίνει ότι η εκπομπή πιθανώς να πρέπει να γίνει με την μέγιστη δυνατή ισχύ, για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή εμβέλεια. Β) Με πολλαπλά βήματα (multi-hop), μέθοδος που αυξάνει κατά πολύ την συνολική κάλυψη του δικτύου, μειώνει την απαιτούμενη ενέργεια αλλά απαιτεί πιο εξειδικευμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας και ισχυρότερους κόμβους από πλευρά υλικού [99].

Από τη στιγμή που θα εγκατασταθεί ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων σε έναν χώρο, προβλέπεται να λειτουργήσει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, χωρίς την ανθρώπινη επίβλεψη. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να διαχειριστεί τους ενεργειακούς πόρους που διαθέτει, με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος ζωής του. Κύρια πηγή ενέργειας των κόμβων είναι οι μπαταρίες, οι οποίες συνήθως δεν είναι επαναφορτιζόμενες, αλλά έχουν προταθεί και μέθοδοι παραγωγής ενέργειας επάνω στον κόμβο και

αποθήκευσής της σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και υπέρ-πυκνωτές, με σκοπό την παράταση του χρόνου ζωής του [100]. Η ενεργειακή κατανάλωση είναι ο δείκτης εκείνος που θα καθορίσει την διάρκεια λειτουργίας του δικτύου.

Ο σχεδιασμός του δικτύου και των κόμβων που το αποτελούν θα πρέπει να είναι τέτοιος, που να ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας και κάθε υποσύστημα του κόμβου θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο με υλικό χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Ειδική μέριμνα θα πρέπει να ληφθεί και σε επίπεδο λογισμικού, αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος και πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Μόνο ένας καθολικός σχεδιασμός χαμηλής ενέργειας θα προσφέρει στο δίκτυο την αναμενόμενη απόδοση και διάρκεια ζωής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K. W. Chang, H. C. So, W.-K. Ma, Y. T. Chan, *A constrained least squares approach to mobile positioning: Algorithms and optimality*, EURASIP J. App. Signal Process. 20858 (2006), 1-23.
- [2] M. Palaniswami, B. Sundaram, Jayavardhana Rama G. L., A. Shilton, *Target localization using machine learning*, Informatics in Control, Automation and Robotics II 2 (2007), 27-33.
- [3] W. R. Hahn, *Optimum signal processing for passive sonar range and bearing estimation*, J. Acoust. Soc. Am. 58(1) (1975), 201-207.
- [4] A. Dersan, Y. Tanik, *Passive radar localization by time difference of arrival*, Proc. MILCOM 2 (2002), 1251-1257.
- [5] G. C. Carter, *Time delay estimation for passive sonar signal processing*, IEEE Trans. Acoust., Speech Signal Process. 29 (1981) 463-470.
- [6] Patrick R. Hirschler-Marchand, Gary F. Hatke, *Superresolution techniques in time of arrival estimation for precise geolocation*, 36th ASILOMAR Conference on Signals, Systems and Computers 2 (2002), 1272-1277.
- [7] D. P. Arnold, T. Nishida, L.N. Cattafesta, M. Sheplak, *A directional acoustic array using silicon micromachined piezoresistive microphones*, J. Acoust. Soc. Am. 113 (1) (2003), 289-298.
- [8] S. Horowitz, T. Nishida, L. Cattafesta, M. Sheplak, *Development of a micromachined piezoelectric microphone for aeroacoustics applications*, J. Acoust. Soc. Am. 122 (6) (2007), 3428-3436.
- [9] S. Choi, H. Lee, W. Moon, *A micromachined piezoelectric hydrophone with hydrostatically balanced air backing*, Sens. Actuator A-Phys. 158 (1) (2010), 60-71.
- [10] E. Mumolo, M. Nolich, G. Vercelli, *Algorithms for acoustic localization based on microphone array in service robotics*, Robot. Auton. Syst. 42 (2003), 69-88.
- [11] U. Klee, T. Gehrig, J. McDonough, *Kalman filters for time delay of arrival-based source localization*, EURASIP J. App. Signal Process. 12378 (2006), 1-15.

- [12] X. Xu, L.-H. He, D. Florencio, Y. Rui, *PASS: Peer-aware silence suppression for internet voice conferences*, IEEE Proc. ICME (2006), 2149-2152.
- [13] F. Ribeiro, D. Ba, C. Zhang, D. Florencio, *Turning enemies into friends: using reflections to improve source localization*, IEEE Proc. ICME (2010), 731-736.
- [14] P. Noll, *Microphone arrays in a sensing people project*, 5th International Workshop on Microphone Array Systems – Theory and Practice (2003).
- [15] V. Calloway, R. Hodges, S. Harman, A. Hume, D. Beale, *Vehicle tracking using a network of small acoustic arrays*, IEEE Proc. Aerospace Conf (2004).
- [16] Y. H. Hu, D. Li, *Energy based collaborative source location using acoustic microsensor arrays*, EURASIP J. App. Signal Process. (2003), 321-337.
- [17] G. Simon et al., *Sensor network-based countersniper system*, SenSys (2004).
- [18] D. Claveau, C. Wang, *A spatial variance approach to target tracking with sensor arrays*, IEEE ISCAS 5 (2005), 4759-4762.
- [19] V. W. Porto, L. J. Fogel and D. B. Fogel, *Using evolutionary computation for seismic signal detection: a homeland security application*, Proc. IEEE CIHSPS (Italy, Venice, 2004), pp. 62-66.
- [20] M. S. Richman, D. S. Deadrick, R.J. Nation and S. L. Whitney, *Personnel tracking using seismic sensors*, Proc. SPIE 4393, (2001), pp. 14-21.
- [21] J. Zhang, M. Walpola, D. Roeland, H. Zhu, K. Yen, *Self-organization of unattended wireless acoustic sensor networks for ground target tracking*, Pervasive and Mobile Computing 5 (2) (2009) 148-164.
- [22] G. Succi, D. Clapp, R. Gampert and G. Prado, *Footstep detection and tracking*, Proc. SPIE 4393 (2001), pp. 22-29.
- [23] J. C. Chen, K. Jao, R. E. Hudson, *Source Localization and Beamforming*, IEEE Signal Process. Mag. 2 (2002), 30-39.
- [24] S. W. Shin, C. B. Yun, J. S. Popovic and J. H. Kim, *Improved Rayleigh wave velocity measurement for nondestructive early-age concrete monitoring*, Res. Nondestruct. Eval. 18 (1) (2007), 45-68.
- [25] S.L. Gassman, R.J. Finno, *Impulse response evaluation of foundations*

- using multiple geophones, *J. Perform. Constr. Facil.* 13 (2) (1999), 82-89.
- [26] J. Z. Stafsudd, S. Agari, R. Hudson, K. Yao, E. Taciroglu, *Localization of short-range acoustic and seismic wideband sources: Algorithms and experiments*, *J. Sound Vibr.* 312 (2008), 74-93.
- [27] A. Pakhomov, A. Sicignano, M. Sandy, T. Goldburt, "Seismic Footstep Signal Characterization", *Proc. SPIE* 5071 (2003) 297-305.
- [28] D.-S. Kim, J.-S. Lee, *Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations*, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 19 (2000), 115-126.
- [29] T. G. Gutowski, C. L. Dym, *Propagation of ground vibration: A review*, *J. Sound Vibr.* 49 (2) (1976), 179-193.
- [30] ADXL05 Datasheet, Analog Instruments web site, <http://www.analog.com>.
- [31] K. E. Speller, D. Yu, *A low-noise MEMS accelerometer for unattended ground sensor applications*, *Proc. SPIE* 5417 (2004) 63-72.
- [32] MEMS accelerometer product information , Colibrys website <http://www.colibrys.com/e/page/184/>
- [33] E. L. Lehmann, J. P. Romano, *Testing Statistical Hypotheses*, 3rd ed. New York: Springer (2005), 441-442.
- [34] A. Jensen, A. La Cour-Harbo, *Ripples in mathematics: the discrete wavelet transform*, Springer-Verlag, New York (2001).
- [35] S. Mallat, *A wavelet tour of signal processing*, 2nd ed. Academic Press, London (1999).
- [36] D. Gabor, *Theory of Communication*, *J. Inst. Electr. Engineering*, 93 (1946), 429-457.
- [37] J. Morlet, G. Arens, E. Fourgeau, D. Giard, *Wave propagation and sampling theory – Part I: Complex signal and scattering in multilayered media*, *Geophysics* 47 (2) (1982), 203-221.
- [38] J. Morlet, G. Arens, E. Fourgeau, D. Giard, *Wave propagation and sampling theory – Part II: Sampling theory and complex waves*, *Geophysics* 47 (2) (1982), 222-236.
- [39] R.A. Gopinath, J.E. Odegard, C.S. Burrus, *Optimal wavelet representation of signals and the wavelet sampling theorem*, *IEEE Trans. Circuits Syst. II* 41 (4) (1994), 262-277.
- [40] A.H. Tewfik, D. Sinha, P. Jorgensen, *On the optimal choice of wavelet for*

- signal representation*, IEEE Trans. Inf. Theory 38 (2) (1992), 747-765.
- [41] I. Daubechies, *Ten lectures on wavelets*, 2nd Edition, Philadelphia: SIAM (1992).
- [42] S. Mallat, *A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation*, J. Trans. Pattern Anal. Mach. Intel. 11 (7) (1989), 674-693.
- [43] H. Amick, *A frequency-dependent soil propagation model*, Proc. SPIE 3786 (1999), 72-80.
- [44] I. Thanasopoulos, J. Avaritsiotis, *Wavelet Wavelet analysis of short range seismic signals for accurate time of arrival estimation in dispersive environments*, IET Sci. Meas. Technol. (2011), Accepted for publication.
- [45] I.M. Johnstone, B.W. Silverman, *Wavelet threshold estimators for data with correlated noise*, J. R. Statist. Soc. B, 59 (2) (1997), 319-351.
- [46] D. L. Donoho, I. M. Johnstone, *Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage*, Biometrika 81 (1994), 435-455.
- [47] D. L. Donoho, I. M. Johnstone, *Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage*, J. Amer. Statist. Assoc. 90 (1995), 1200-1224.
- [48] S. Poornachandra, *Wavelet-based denoising using subband dependent threshold for ECG signals*, Digit. Signal Process. 18 (2008) 49-55.
- [49] J. H. DiBiase, H. F. Silverman, M. S. Brandstein, in: *Microphone arrays, Signal Processing Techniques and Applications*, Ch. 8, Springer Verlag (2001)
- [50] A. Pakhomov, A. Sicignano, M. Sandy, T. Goldburt, *Current seismic sensor issues for defence and security applications*, Proc. SPIE 5403 (2004), 576-581.
- [51] J. F. Scholl, J. R. Agre, L. P. Clare, *Low power impulse signal classifier using the Haar wavelet transform*, Proc. SPIE 3577 (1999), 136.
- [52] M. H. Kahaei, M. Torbatian, J. Poshtan, *Detection of bearing faults using Haar wavelets*, IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci. E89-A (3) (2006), 757-763.
- [53] C. Capilla, *Application of the Haar wavelet transform to detect microseismic signal arrivals*, J. App. Geophys. 59 (2006), 36-46.
- [54] Y. T. Chan, K. C. Ho, *A simple and efficient estimator for hyperbolic*

- location*, IEEE Trans. Signal Process. 42 (8) (1994), 1905-1915.
- [55] G. Mao, B. Fidan, B. D.O. Anderson, *Wireless sensor network localization techniques*, Comput. Netw. 51 (2007), 2529-2553.
- [56] T. Korhonen, *Acoustic localization using reverberation with virtual microphones*, Proc. 11th IWAENC (2008).
- [57] J. Zheng, K. W.K. Lui, H. C. So, *Accurate three step algorithm for joint source position and propagation speed estimation*, Signal Process. 87 (2007), 3096-3100.
- [58] J. C. Chen, R. E. Hudson, K. Yao, *Maximum likelihood source localization and unknown sensor location estimation for wideband signals at near-field*, IEEE Trans. Signal Process. 50 (8) (2002), 1843-1854.
- [59] J. C. Chen et al., *Coherent acoustic array processing and localization on wireless sensor networks*, Proc. IEEE 91 (8) (2003), 1154-1162.
- [60] H.C. Schau, A.Z. Robinson, *Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time of arrival differences*, IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. 35 (8) (1987), 1223-1225.
- [61] A. Mahajan, M. Walworth, *3-D position sensing using the differences in time-of-flights from a wave source to various receivers*, IEEE Trans. Robot. Autom. 17 (1) (2001), 91-94.
- [62] A. Urruela, J. Sala, J. Riba, *Average performance analysis of circular and hyperbolic geolocation*, IEEE Trans. Veh. Technol. 55 (1) (2006), 52-66.
- [63] D. C. Montgomery, E. A. Peck, G. G. Vining, *Introduction to linear regression analysis*, 3rd ed. Wiley & Sons (2001), 193-200.
- [64] W. R. Hahn, S. A. Tretter, *Optimum processing for delay vector estimation in passive signal arrays*, IEEE Trans. Inform. Theory 19 (1973) 608-614.
- [65] C. H. Knapp, G. C. Carter, *The generalized correlation method for estimation of time delay*, Trans. Acoust., Speech Signal Process. 24 (4) (1976), 320-327.
- [66] H. Liu, Evangelos Miliotis, *Acoustic positioning using multiple microphone arrays*, J. Acoust. Soc. Am. 113 (1) (2005), 2772-2782.
- [67] J. Chen, J. Benesty, Y. Huang, *Robust time delay estimation exploiting*

- redundancy among multiple microphones*, *Speech Audio Process.* 11 (6) (2003) 549-557.
- [68] S. R. Dooley, A. K. Nandi, *Adaptive subsample time delay estimation using Lagrange interpolators*, *IEEE Signal Process. Lett.* 6 (3) (1999), 65-67.
- [69] Y. T. Chan, J. M. F. Riley, J. B. Plant, *A parameter estimation approach to time delay estimation and its use in signal detection*, *IEEE Trans. Acoust., Speech Signal Process.* 26 (1980), 8-16.
- [70] Y. T. Chan, J. M. F. Riley, J. B. Plant, *Modeling of time delay and its applications to estimation of nonstationary delays*, *IEEE Trans. Acoust., Speech Signal Process.* 29 (3) (1981), 577-581.
- [71] Simon Haykin, *Adaptive filter theory*, 2nd ed., Prentice Hall International (1991), 19-22.
- [72] H. C. So, P. C. Ching, Y. T. Chan, *A new algorithm for explicit adaptation of time delay*, *IEEE Trans. Signal Process.* 42 (1994) 1816-1820.
- [73] K. C. Ho, Y. T. Chan, P. C. Ching, *Adaptive time-delay estimation in non-stationary signal and/or noise power environments*, *IEEE Trans. Signal Process.* 41 (7) (1993), 2289-2299.
- [74] S.-J. Chern, S.-N. Lin, *An adaptive time delay estimation with direct computation formula*, *J. Acoust. Soc. Am.* 96 (2) (1994), 811-820.
- [75] H. Ijima, A. Oshumi, S. Yamaguchi, *Time delay estimation of signals in nonstationary random noise via stationarization and Wigner distribution-based approach*, *Proc. EUSIPCO* (2006).
- [76] J. Gamba, Y. Tsuda, T. Shimamura, *An adaptive Butler-Cantoni based delay estimation (ABCTDE) method – IIR whitening filtering approach*, *IEEE Proc. ISCAS* 3 (2004), 265-268.
- [77] J. Gamba, T. Shimamura, *Equalizer-aided time delay tracking based on L_1 -normed finite differences*, *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.* E88-A (4) (2005), 978-987
- [78] D.-H. Kim, Y. Park, *Explicitly-adaptive time delay estimation for wide band signals*, *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.* E88-A (11) (2005), 3214-3217.
- [79] Z. Liang, X. Ma, X. Dai, *Robust tracking of moving sound source using*

- multiple model Kalman filter*, Appl. Acoust 69 (2008), 1350-1355.
- [80] R.J. Barsanti, *Improved acoustic target tracking using wavelet based time differences of arrival*, Proc. IEEE SoutheastCon (2002), 451-456.
- [81] R.J. Barsanti, M. Tumala, *Wavelet-based time delay estimates for transient signals*, 7th ASILOMAR Conference on Signals, Systems and Computers 1 (2003), 1173-1177.
- [82] S. Q. Wu, H. C. So, P. C. Ching, *Improvement of TDOA measurement using wavelet denoising with a novel thresholding technique*, Proc. IEEE ICASSP 1 (1997), 539-542.
- [83] M. Omologo, P. Svaizer, *Acoustic event localization using a crosspower-spectrum phase based technique*, Proc. IEEE ICASP 3 (1994), 273-276.
- [84] A.N. Bishop, B. Fidan, K. Dogancay, B.D.O. Anderson, P.N. Pathirana, *Exploiting geometry for improved hybrid AOA/TDOA-based localization*, Signal Process. 88 (2008), 1775-1791.
- [85] D.-H. Kim, Y. Park, *Development of sound source localization system using explicit adaptive time delay estimation*, Proc. ICCAS (2002).
- [86] H.C. So, *Noisy input-output system identification approach for time delay estimation*, Signal Process. 82 (2002) 1471-1475.
- [87] W. G. McMullan, B. A. Delanghe, J. S. Bird, *A simple rising-edge detector for time-of-arrival estimation*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 45 (4) (1996), 823-827.
- [88] R. Coifman, M. V. Wickerhauser, *Entropy based algorithms for best basis selection*, IEEE Trans. Information Theory 38 (2) (1992) 713-718.
- [89] D. Donoho in: Y. Mayer and S. Roques (Editors), *Progression in wavelet analysis and applications*, Editions Frontiers, France (1993) 109-128.
- [90] National instruments web site, *User guide and specifications: NI-USB 6008/6009*, (2004), <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303l.pdf>, last accessed February 14 2011.
- [91] I. Thanasopoulos, J. Avaritsiotis, *Seismic detection and time of arrival estimation in noisy environments based on the Haar wavelet transform*, Proc. 5th IEEE SAM Workshop (2008) 433-436.
- [92] Y. D. Huang, M. Barkat, *Near-field multiple source localization by passive sensor array*, IEEE Trans. Antennas Propag. 39 (7) (1991), 968-975.

- [93] W. Zhi, M. Y. Chia, *Near-field source localization via symmetric subarrays*, IEEE Signal Process. Lett. 14(6) (2007), 409–412.
- [94] Y. Wu, L. Ma, C. Hou, G. Zhang, J. Li, *Subspace-based method for joint range and DOA estimation of multiple near-field sources*, Signal Process. 86 (2006), 2129–2133.
- [95] W. J. Zheng, X. L. Li, H. Zou, X. D. Zhang, *Near-field multiple source localization using joint diagonalization*, Signal Process. 89 (2009), 232–238.
- [96] Z. H. Michalopoulou, *Matched-impulse-response processing for shallow-water localization and geoacoustic inversion*, J. Acoust. Soc. Am., 108 (5) (2000), 2082-2090.
- [97] Z. H. Michalopoulou, *Active source detection in a dispersive multiple-reflection environment*, Proc. IEEE ICASSP 5 (1999) 2765-2768.
- [98] F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, *Wireless Sensor Networks: A Survey*, Comput. Netw. 38 (2002), 393-422.
- [99] F. Zhao, L. Guibas, *Wireless Sensor Networks, First Edition: An Information Processing Approach*, Morgan Kaufmann (2004).
- [100] D. Estrin, D. Culler, K. Pister, and G. Sukhatme, *Connecting the Physical World with Pervasive Networks*, IEEE Pervasive Comput. 1 (1) (2002), 59-69.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ

Συνάρτηση ανίχνευσης σεισμικών γεγονότων και εξαγωγής χαρακτηριστικών

```
% zeroCrossing
% Function inputs:
%   signal: signal vector
% Function outputs:
%   detectionLevel:  $s_c$  wavelet scale
%   decompositionLevel:  $s_e$  wavelet scale
%   signalFreq: seismic event's central frequency of oscillation
%   envelopeFreq: seismic event's envelope frequency
%   thresh: SURE threshold

function [detectionLevel decompositionLevel signalFreq envelopeFreq thresh] =
zeroCrossing(signal)

% Consider the first 1024 samples to be white noise
Fs = 8000;
N = length(signal);
noiseRange = 1024;
thresh = 2*std(signal(1:noiseRange))*sqrt(log(noiseRange));
detection = 0;
wname = 'haar';

detectionLevel = NaN;
decompositionLevel = NaN;
signalFreq = NaN;
envelopeFreq = NaN;

% Monitoring for detection, starting from sample 1025
i = 1025;
while ~detection&(i <= N)
    if abs(signal(i)) > thresh % One sample exceeds noise threshold
        if var(signal(i-40:i+40))>2*var(signal(1:noiseRange)) % Check variance in a
                                                                    % range of 80 samples
                                                                    % to exclude a false
                                                                    % alarm
                                detection = 1;
                                startPoint = i;
                            end
                        end
                    i = i+1;
end

% Start counting zero crossings
signalLost = 0;
j = 0;
noThreshCrosses = 0;
while (detection)&(~signalLost)&(i<N)
    zeroCross = 0;
    if signal(i)*signal(i+1) <= 0
        j = j+1;
        zeroCrosses(j) = i;
        zeroCross = 1;
    end
end
```

```

% Check if the threshold is crossed between two successive zero crossings
if (j > 1)&zeroCross
    if max(abs(signal(zeroCrosses(j-1):zeroCrosses(j)))) >= thresh
        noThreshCrosses = 0;
    else
        noThreshCrosses = noThreshCrosses+1;
    end
end
end
% If 4 successive zero crossings without a threshold crossing occur we consider
% the signal is lost.
if noThreshCrosses == 4
    signalLost = 1;
    endPoint = i;
end
i = i+1;
end

if detection
    for i=2:length(zeroCrosses)
        difZero(i-1) = zeroCrosses(i)-zeroCrosses(i-1);
    end
    meanHalfPeriod = mean(difZero);
    signalFreq = Fs/(2*meanHalfPeriod);
    envelopeFreq = Fs/(2*(endPoint-startPoint-2*mean(difZero)));

    signalFreqConverted = 0;
    envelopeFreqConverted = 0;
    scale = 1;
    prevFreq = scal2frq(2,wname,1/Fs);

    if Fs/2 - prevFreq < 0.1*Fs/2
        prevFreq = Fs/2;
    end

    while ~(signalFreqConverted&envelopeFreqConverted)
        scale = scale+1;
        currFreq = scal2frq(2^scale,wname,1/Fs);
        if ~signalFreqConverted
            if (signalFreq <= prevFreq)&(signalFreq >= currFreq)
                signalFreqConverted = 1;
                detectionLevel = scale-1;
            end
        end
        if ~envelopeFreqConverted
            if (envelopeFreq > currFreq)
                envelopeFreqConverted = 1;
                decompositionLevel = scale-1;
            end
        end
        prevFreq = currFreq;
    end
else
    detectionLevel = [];
    decompositionLevel = [];
    meanHalfPeriod = [];
end
end

```

Συνάρτηση υπολογισμού του TOA με τον DWT

```

% haarTOA
% Function inputs:
%     signal: signal vector
%     method: string 'Adaptive' or 'Smedian' or Global'
% Function outputs:
%     TOA: vector of TOA
%     synthSignal: signal synthesized by thresholded wavelet coefficients

function [TOA synthSignal] = haarTOA(signal,method)

Fs = 8000;           %Sampling Frequency
N = length(signal);
J = 10;             % Maximum level of wavelet decomposition
TOA = 0;
wname = 'haar';

[detectionLevel denoisingLevel signalFreq envelopeFreq thresh] =
zeroCrossing(signal);

if sum(isnan([detectionLevel denoisingLevel signalFreq envelopeFreq
             thresh])) == 0

    % Zero-pad the signal to so its length is a power of 2
    [signal N] = zeroPad(signal,N);

    % Split the signal in blocks of length 2^J
    [signalMatrix nBlocks] = power2Split(signal,N,J);

    % Decompose each block, using the 'wname' wavelet, down to
    % 'detectionLevel' levels, detect incoming signal, denoise each
    % level of detail coefficients and estimate the Time Of Arrival
    % from the denoised signal

    noDetections = 0;
    i = 1;

    for i = 1:
        [C(:,i),L] = wavedec(signalMatrix(:,i),denoisingLevel,wname);
        Coefs = C(:,i);
        CoefInd = L;
        detectionCoefs = Coefs(CoefInd(denoisingLevel-detectionLevel+2)+1
                               :CoefInd(denoisingLevel-detectionLevel+3));
        detection(i) = 0;
        if i == 1           % The first block contains only noise
            noiseCoefs = detectionCoefs;
            noiseVar = var(noiseCoefs);

            % Select set of thresholds according to selected method
            switch method
                case 'Adaptive'
                    a = 1.4; %tuning factor
                    for k = 1:denoisingLevel % Noise analysis and thresholds
                                                % estimation
                        thr(k) = a*std(Coefs(CoefInd(k+1)+1:CoefInd(k+2)))
                                *sqrt(2*log10(CoefInd(k+2)-CoefInd(k+1)));
                    end
                case 'Smedian'
                    b = -0.5; %tuning factor
                    for k = 1:denoisingLevel

```



```

        thr(k) = std(Coefs(CoefInd(k+1)+1:CoefInd(k+2)))
                *sqrt(2*log10(CoefInd(k+2)-CoefInd(k+1)))/
                (2^(k/denoisingLevel)+b);
    end
    case 'Global'
        thr = std(signalMatrix(:,1))*sqrt(2*log10(2^J))*
            ones(denoisingLevel,1);
    end
else
    detectionVar = var(detectionCoefs);
    if detectionVar > 1.5*noiseVar % Positive detection if incoming signal
        % variance at this level is 1.5 times
        % higher than noise energy
        detection(i) = 1;
        noDetections = noDetections+1;
        j = 1;
        while length(CoefInd)>2 % Repeat until L contains only two values
            levelCoefs = Coefs(CoefInd(2)+1:CoefInd(3));
            Coefs(CoefInd(2)+1:CoefInd(3)) = wthresh(Coefs(CoefInd(2)+1:
                CoefInd(3)),'s',thr(j));
            if j == denoisingLevel-detectionLevel+1
                foundEdge = 0;
                nCoef = length(levelCoefs);
                k = 1;
                threshold = thr(j);
                while (~foundEdge)&(k<=nCoef)
                    if abs(Coefs(k))>threshold
                        foundEdge = 1;
                        spanLength = 4;
                        detectionSpan = [2*(k-spanLength):2*k+1];
                        edgeLocSpan = length(detectionSpan);
                        k;
                    end
                    k = k+1;
                end
                k = 1;
            elseif j > denoisingLevel-detectionLevel+1
                foundEdge = 0;
                k = detectionSpan(1);
                threshold = thr(j);
                while (~foundEdge)&(k<=detectionSpan(edgeLocSpan))
                    if abs(Coefs(k))>threshold
                        foundEdge = 1;
                        detectionSpan = [2*(k-spanLength)-1:2*k+1];
                        edgeLocSpan = length(detectionSpan);
                        k;
                    end
                    k = k+1;
                end
                k = detectionSpan(1);
            end
            [Coefs CoefInd] = upwlev(Coefs,CoefInd,wname);
            j = j+1;
        end

        denSignal(:,noDetections) = Coefs;
        foundSOA = 0;
        threshStep = 0.001;
        j = 2;

        synthSignal = denSignal;

```

```

% Determine Sample Of Arrival
if detectionSpan(1)>0
    while (~foundSOA)&(j<edgeLocSpan)
        if abs(denSignal(detectionSpan(j),noDetections))>thresh
            foundSOA = 1;
            SOA(noDetections) = detectionSpan(j)-1;
            TOA(noDetections) = ((SOA(noDetections))+(i-1)*2^J)/Fs;
            figure
            hold all
            plot(signalMatrix(:,i));
            scatter(SOA(noDetections),0,'g*');
            plot(denSignal(:,noDetections),'r');
        end
        j = j+1;
    end
end
end
end
end
end
end
end
end

```

Συνάρτηση υπολογισμού TOA με τον WPT

```

% wpacketTOA
% Function inputs:
%     signal: signal vector
%     Fs: sampling frequency
% Function outputs:
%     TOA: estimates Time of Arrival
%     originalTree: complete tree of signal's decomposition

function [TOA originalTree] = wpacketTOA(signal,Fs)

N = length(signal);

[signal N] = zeroPad(signal,N); % Zero-pad the signal to so its length is a
                                % power of 2
J = 9; % Define deepest level of wavelet decomposition
SOA = 0;
TOA = 0;

[signalMatrix nBlocks] = power2Split(signal,N,J);

wname = 'haar'; % Set the mother wavelet function
entropyType = 'shannon'; % Set the method of entropy calculation
%noisy part = signalMatrix(:,1);
noisy part = signal(1:1024);

if (~strcmp(entropyType, 'shannon'))&(~strcmp(entropyType, 'log energy'))
    P = 5;
else
    P = [];
end

wpNoiseTree = wpdec(noisy part,J,wname,entropyType,P);
noisyNodes = allnodes(wpNoiseTree);
noisyNodesDePo = allnodes(wpNoiseTree,'deppos');

% Define thresholds as Tj=sigma*sqrt(2*log(N*log2(N)))/log(j^2+1)

```

```

ind = 1;
for i=noisyNodes'
    scale = noisyNodesDePo(ind,1);
    coeffs = wpcoef(wpNoiseTree,i);
    noCoef = length(coeffs);
    globalT = std(noisyPart)*sqrt(2*log(noCoef*log2(noCoef)));
    T = std(coeffs)*sqrt(2*log(noCoef*log2(noCoef)));
    noiseEnergies(ind,:) = [i,sum(coeffs.^2)/noCoef];
    if i==0
        thr(ind,:) = [i,globalT];
    else
        thr(ind,:) = [i,T/log(scale^2+1)];
    end
    ind = ind+1;
end

% Decompose signal at deepest scale and select a best basis representation
detection = 0;
i=2;
while (i<=nBlocks)&(~detection)
    energies = [];
    wpTree = wpdec(signalMatrix(:,i),J-1,wname,entropyType,P);
    wpTree = bestlevt(wpTree);
    wpTree = besttree(wpTree);
    originalTree = wpTree;
    [nt terminalNodes nodeInfo] = get(wpTree,'ntree','tn','allNI');
    [o depth] = get(nt);
    allNodeIndices = nodeInfo(:,1)';
    allNodeIndices = fliplr(allNodeIndices); % Flip the index array so that
                                           % terminal nodes appear first

    j = 1;
    % Calculate the coefficient energies of each wavelet packet
    for ind=allNodeIndices
        thresholdIndex = find(ind==thr(:,1));
        coeffs = wpcoef(wpTree,ind);
        energies(j) = sum(coeffs.^2)/length(coeffs);
        %coeffs = wthresh(coeffs,'s',thr(thresholdIndex,2));

        j = j+1;
    end
    % Find the packet with the maximum energy
    [maxEn maxEnPacketIndex] = max(energies);
    maxEnPacket = allNodeIndices(maxEnPacketIndex);

    if (maxEn>1.5*noiseEnergies(maxEnPacket+1,2))
        detection = 1;
        signalBlock = i;
    end

    i = i+1;
end

% Determine all parent nodes for the max energy packet
node = maxEnPacket
i=1;
while node~=0
    parentNodes(i) = wtreemgr('nodepar',wpTree,node);
    node = parentNodes(i);
    i = i+1;
end
searchNodes = [maxEnPacket,parentNodes]; % Define the nodes to look for TOA

```

```

% Algorithm for TOA estimation
i=1;
firstDetection = 0;

for ind=allNodeIndices
    thresholdIndex = find(ind==thr(:,1));
    coeffs = wpccoef(wpTree,ind);
    if ~isempty(find(terminalNodes == ind))
        coeffs = wthresh(coeffs,'s',thr(thresholdIndex,2));
        wpTree = write(wpTree,'cfs',ind,coeffs);
    end

% Estimate TOA
if ~isempty(find(searchNodes == ind))
    lvlLength = length(coeffs);
    ratio = 10;
    found = 0;
    for c=1:lvlLength % Calculate the cumulative energy of the
                    % coefficient packet
        cumEn(c) = sum(coeffs(1:c).^2);
    end
    if ~firstDetection
        [maxCoef indexMaxCoef] = max(abs(coeffs));
        SOA = indexMaxCoef;
        oversampleFactor = ceil(length(wpccoef(wpTree,wtreemgr(
            'nodepar',wpTree,ind)))/length(coeffs));
        locationArea = [oversampleFactor*SOA-10:oversampleFactor*SOA];
        firstDetection = 1;
        figure
        title(ind)
        hold on
        plot(coeffs)
        scatter(SOA,0,'x')
    else
        locAreaLength = length(locationArea);
        j = locationArea(1);
        while j<=1
            j = j+1;
        end
        while (~found)&(j<=locationArea(locAreaLength))
            if abs(coeffs(j+1))>=thr(thresholdIndex,2)% (cumEn(j+1)-cumEn(j)>
                ratio*(cumEn(j)-cumEn(j-1)))
                &(abs(coeffs(j+1))>=thr(thresholdIndex,2))
                found = 1;
                SOA = j;
                oversampleFactor = ceil(length(wpccoef(wpTree,wtreemgr(
                    'nodepar',wpTree,ind)))/length(coeffs));
                locationArea = [oversampleFactor*SOA-3:oversampleFactor*SOA+3];

                figure
                title(ind)
                hold on
                plot(coeffs)
                scatter(SOA,0,'x')
            elseif (j == locationArea(locAreaLength))&(~found)
                if ind ~=0
                    oversampleFactor = ceil(length(wpccoef(wpTree,wtreemgr(
                        'nodepar',wpTree,ind)))/length(coeffs));
                    SOA = oversampleFactor*SOA;
                    found = 1;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        figure
        title(ind)
        hold on
        plot(coeffs)
        scatter(SOA,0,'x')
    else
        SOA = 2*SOA;
        found = 1;
        figure
        title(ind)
        hold on
        plot(coeffs)
        scatter(SOA,0,'x')
    end
end
    end
    j = j+1;
end
end
end
end
if wtreemgr('isnode',wpTree,ind+1)
    if isequal(wtreemgr('nodepar',wpTree,ind),wtreemgr('nodepar',wpTree,ind+1))
        wpTree = wpjoin(wpTree,wtreemgr('nodepar',wpTree,ind));
    end
end
end
i=i+1;
end
end

TOA = (SOA+(signalBlock-1)*2^J)/Fs;
figure
hold on
plot(signalMatrix(:,signalBlock))
plot(coeffs,'r')
scatter(SOA,0,'gx')

```

Συνάρτηση υπολογισμού του TDOA με τον DWT

```

% haarTDOA
% Function inputs:
%   signals: NxM signal matrix (N: number of samples, M: number of sensors)
%   sensorPos: Mx2 matrix with sensor coordinates
%   method: string 'Adaptive' or 'Smedian' or 'Global'
%   Fs: sampling rate
% Function outputs:
%   tdvec: vector of TDOA
%   TOA: vector of TOA
%   sensorSequence: vector of sensors sorted from first receiving to last
%   sensorPositions: matrix with sensor coordinates sorted by sensorSequence
%   failed: 1 if missed detection, 0 otherwise
%   sensorFailed: # of sensor failed to detect

function [tdvec TOA sensorSequence sensorPositions failed sensorFailed] =
haarTDOA(signals, sensorPos, method,Fs)

[N,M] = size(signals);
failed =0;
tdvec = [];
sensorFailed = [];
for i = 1:M
    TOA(i) = haarTOA(signals(:,i),method);
    % TOA(i) = wpacketTOA(signals(:,i),Fs);

```

```

    if TOA(i) == 0
        failed = 1;
        sensorFailed = [sensorFailed,i];
    end
end

sensors = [1:M];

rearrangeMatrix = [TOA; sensors;sensorPos'];
rearrangeMatrix = sortByFirstRow(rearrangeMatrix);
sensorSequence = rearrangeMatrix(3,:);
sensorPositions = rearrangeMatrix(4:5,:);
TOA = rearrangeMatrix(1,:);

if ~failed
    tdvec = (TOA - TOA(1))';
else
    tdvec = 0;
end

```

Συνάρτηση εντοπισμού θέσης της πηγής

```

% source_location

% This function calculates the location of an unknown signal source and the
% propagation velocity of the signal, based on the measurements of TDOA
% from s sensors. The algorithm is described in detail in the paper by
% J. Zheng et al., "Accurate three step algorithm for joint source position and
% propagation speed estimation", Signal Process. 87 (2007), 3096-3100.

% Function inputs:
%   sensor_position: sensor coordinates sorted from first receiving to last
%   tdvec: matrix containing the TDOA, as given by function haarTDOA/wpTDOA
%   Fs: sampling frequency
% Function outputs:
%   ESTIMATOR: estimated Cartesian coordinates of signal's source
%   POLAR_ESTIMATOR: estimated Polar coordinates of signal's source

function [ESTIMATOR POLAR_ESTIMATOR] = source_location(sensor_position,tdvec,Fs)

s = length(sensor_position(:,1)); % Determine the number of samples N acquired from
    % s different sensors

% *****
% *** FIRST STEP OF LOCATION AND VELOCITY ESTIMATOR***
% *****

% Formulation of the matrices A and b

for i = 1:s-1
    A(i,:) = [2*(sensor_position(i+1,1)-sensor_position(1,1)),2*
        (sensor_position(i+1,2)-sensor_position(1,2)),tdvec(i+1)^2,
        -2*tdvec(i+1)];
    b(i) = (sensor_position(i+1,1)^2)-(sensor_position(1,1)^2)
        +(sensor_position(i+1,2)^2)-(sensor_position(1,2)^2);
end
b = b';

```

```

% First step location and velocity estimation: LS estimate of theta

THETA1 = (inv(A'*A)*A'*b); % THETA1 = [estimation of x position; estimation of y
%                                     position; v; u]
% where v = (propagation velocity)^2
%         u = (propagation velocity)*(distance between the
%                                     source and the first sensor)

% *****
% *** SECOND STEP OF LOCATION AND VELOCITY ESTIMATOR ***
% *****

D = tddvec(2:length(tddvec)); % The first element of tddvec is always 0 (the TDOA of
% sensor 1 from sensor 1). We exclude it in
% vector D, to simplify the calculations that follow
for i = 1:s-1
    d_est(i) = sqrt((sensor_position(i+1,1)-THETA1(1))^2+(sensor_position(i+1,2)-
    THETA1(2))^2) - sqrt((sensor_position(1,1)-THETA1(1))^2
    +(sensor_position(1,2)-THETA1(1))^2);
    % d_est is the range difference vector of each sensor with respect to
    % the first sensor, based on the estimation of the source position from
    % the first step of the algorithm.
end

d_est=d_est';
v_est = ((D'*d_est)./(D'*D)).^2; % v_est is a better estimation of the scalar v,
% taking into account the source position
% estimation calculated in the first step
u_est = sqrt(v_est*((THETA1(1)-sensor_position(1,1))^2+(THETA1(2)-
    sensor_position(1,2))^2)); % same as above

for i = 1:s-1
    B2form(i) = u_est + v_est.*D(i); % auxiliary vector to formulate the B2 matrix
end

B2 = diag(B2form);
Q = ones(s-1)+eye(s-1);
PHI2 = 4*B2*Q*B2;
THETA2 = inv(A'*inv(PHI2)*A)*A'*inv(PHI2)*b;

% *****
% *** THIRD STEP OF LOCATION AND VELOCITY ESTIMATOR***
% *****

H = [eye(3);THETA2(3),THETA2(3),0];
p = [(THETA2(1)-sensor_position(1,1))^2;(THETA2(2)-
    sensor_position(1,2))^2;THETA2(3);THETA2(4)];
CovTHETA2 = inv(A'*inv(PHI2)*A); % The covariance matrix of vector THETA2
B3 = diag([2*(THETA2(1)-sensor_position(1,1)),2*(THETA2(2)-
    sensor_position(1,2)),1,2*THETA2(4)]);
r = (THETA2(1)-sensor_position(1,1))^2+(THETA2(2)-sensor_position(1,2))^2;
G = [-2*r*(THETA2(1)-sensor_position(1,1))*CovTHETA2(1,3);-2*r*(THETA2(2)-
    sensor_position(1,2))*CovTHETA2(2,3);
    -r*CovTHETA2(3,3);(r^2)*CovTHETA2(3,3)
    -4*THETA2(4)*r*CovTHETA2(3,3)];
PHI3 = B3*CovTHETA2*B3+[zeros(4,3),G];
THETA = (inv(H'*inv(PHI3)*H)*H'*inv(PHI3)*p);

% Choose negative or positive value by checking which solution lies closer
% to the solution of the second step

```

```

if abs(sensor_position(1,1)+sqrt(THETA(1))-THETA2(1))
    <abs(sensor_position(1,1)-sqrt(THETA(1))-THETA2(1))
    ESTIMATOR(1,1) = (sensor_position(1,1)+sqrt(THETA(1)));
else
    ESTIMATOR(1,1) = (sensor_position(1,1)-sqrt(THETA(1)));
end

if abs(sensor_position(1,2)+sqrt(THETA(2))-THETA2(2))
    <abs(sensor_position(1,2)-sqrt(THETA(2))-THETA2(2))
    ESTIMATOR(2,1) = (sensor_position(1,2)+sqrt(THETA(2)));
else
    ESTIMATOR(2,1) = (sensor_position(1,2)-sqrt(THETA(2)));
end

ESTIMATOR(3,1) = sqrt(THETA(3));

if ESTIMATOR(1,1)*ESTIMATOR(2,1)>=0
    if ESTIMATOR(1,1)>=0
        POLAR_ESTIMATOR = [sqrt(ESTIMATOR(1,1)^2+ESTIMATOR(2,1)^2);
                            atan(abs(ESTIMATOR(2,1)/ESTIMATOR(1,1))*180/pi];
    else
        POLAR_ESTIMATOR = [sqrt(ESTIMATOR(1,1)^2+ESTIMATOR(2,1)^2);180 +
                            atan(abs(ESTIMATOR(2,1)/ESTIMATOR(1,1))*180/pi];
    end
else
    if ESTIMATOR(1,1)>=0
        POLAR_ESTIMATOR = [sqrt(ESTIMATOR(1,1)^2+ESTIMATOR(2,1)^2);-
                            atan(abs(ESTIMATOR(2,1)/ESTIMATOR(1,1))*180/pi];
    else
        POLAR_ESTIMATOR = [sqrt(ESTIMATOR(1,1)^2+ESTIMATOR(2,1)^2);180-
                            atan(abs(ESTIMATOR(2,1)/ESTIMATOR(1,1))*180/pi];
    end
end
end

```

Συνάρτηση προσομοίωσης σεισμικής διάδοσης

```

% simprofile
% Function inputs:
%     signal: signal vector to be used as a base for the simulated signal set
%     sensorPos: an Mx2 matrix containing M cartesian coordinates for M sensors
%     propVelocity: value for speed of propagation
%     attenuationFactor: value for attenuation coefficient
%     Fs: sampling frequency
%     method: 'random' for random or 'specif' for user specified source position
%     coordinates: source coordinates if method is 'specif'
% Function outputs:
%     SimSig: simulated signal set
%     DT: vector with time differences of arrival between each sensor and the
%         first
%     ampRatio: attenuation ratio between each sensor's signal amplitude and the
%         first's
%     sensorPos: sensors coordinates sorted from the first receiving to the last

function [SimSig DT ampRatio sourcePos sensorPos] =
simprofile(signal,sensorPos,propVelocity,attenuationFactor,Fs,method,coordinates)
% Create simulation profile based upon the sensors position and a random
% source position.

N = length(signal); % N is the number of samples of each signal
M = length(sensorPos(:,1)); % M is the number of sensors deployed

```



```

noisySamples = 1024;                                % First samples of white noise

if method == 'random'
    % Generate a random source position
    % *****
    s1 = rand(1);
    s2 = rand(1);
    if s1>=0.5
        signx = 1;
    else
        signx = -1;
    end

    if s2>=0.5
        signy = 1;
    else
        signy = -1;
    end
    sourcePos = [signx*(rand(1)*40+10),signy*(rand(1)*40+10)];
elseif method == 'specif'
    % Read given coordinates for source position
    sourcePos = coordinates;
end

% Calculation of the simulation's reference values
% *****

% Distances from sensors to source
for i=1:M
    R(i) = sqrt((sensorPos(i,1)-sourcePos(1))^2+(sensorPos(i,2)-sourcePos(2))^2);
    % Source to sensors distances
end
R=R';

% Sort the sensor indices by their distance from the source
rearrangeMatrix = [R,sensorPos]';
rearrangeMatrix = sortByFirstRow(rearrangeMatrix);
R = rearrangeMatrix(1,:)';
rearrangeMatrix(1,:) = [];
sensorPos = rearrangeMatrix';

% Calculate time delay and amplitude ratios, with respect to the
% appointed reference sensor
for i=1:M
    DT(i) = (R(i)-R(1))/propVelocity; % Time delays
    NShift(i) = round(DT(i)*Fs); % Number of samples each signal must be shifted
    ampRatio(i) = sqrt(R(1)/R(i))*exp(-attenuationFactor*(R(i)-R(1))); % Amplitude
    % ratios
end

% Reform the signal according to the simulation profile
% *****
SimSig = [signal(:,1), zeros(N,M-1)];
for i=2:M
    SimSig(:,i) = [ampRatio(i)*signal(1:NShift(i));ampRatio(i)*signal(1:N-
NShift(i))];
    % Compensate the reduction in amplitude of the noisy part by adding
    % noise appropriately
    SimSig(:,i) = (1/ampRatio(i))*(rand(N,1)-0.5)*std(SimSig(1:noisySamples,1))+
SimSig(:,i);
end

```

```

% Complete the sorting of signals, sensor positions and time delays
sortingMatrix = [DT;ampRatio;sensorPos';SimSig];
sortedMatrix = sortByFirstRow(sortingMatrix);
DT = (sortedMatrix(1,:))';
ampRatio = sortedMatrix(2,:);
sensorPos = (sortedMatrix(3:4,:))';
SimSig = sortedMatrix(5:N+4,:);

% Plot the results
figure;
hold on;
for i=1:M
    scatter(sensorPos(i,1),sensorPos(i,2),'ok');
end
scatter(sourcePos(1),sourcePos(2),'xb');

```

Βοηθητικές συναρτήσεις

```

% sortByFirstRow
% Takes as input an n by m data matrix and sorts it by its first row
function sorted = sortByFirstRow(data);

n = length(data(:,1));
[y index] = sort(data,2);

for i = 1:n
    sorted(i,:) = data(i,index(1,:));
end

% zeroPad
% Adds zeros to the end of the signal vector so it's length becomes a power the
% closest power of 2
function [s n] = zeroPad(signal,N)

if ~isinteger(log2(N))
    nPad = 2^ceil(log2(N))-N;
    zPad = zeros(nPad,1);
    s = [signal; zPad];
    n = length(s);
end

% power2Split
% Arranges a signal vector to a matrix with nBlocks columns and 2^J rows
function [signalMatrix nBlocks] = power2Split(signal,N,J)

SignalLength = N;
blockLength = 2^J;
nBlocks = SignalLength/blockLength;
first = 1;
last = blockLength;

for i = 1:nBlocks
    signalMatrix(:,i) = signal(first:last);
    first = last+1;
    last = last+blockLength;
end

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Για τις ανάγκες των πειραματικών μετρήσεων της παρούσας διατριβής σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε το ηλεκτρονικό κύκλωμα για τους κόμβους των αισθητήρων επιτάχυνσης. Στόχοι του κυκλώματος είναι η ενεργειακή αυτονομία του κόμβου, το μικρό μέγεθος και η επιτέλεση των βασικών διεργασιών ρύθμισης του σήματος που λαμβάνεται από τον αισθητήρα. Για τους λόγους αυτούς, το κύκλωμα τροφοδοτείται από δύο μπαταρίες των 1,5V και τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι surface mount components (SMC). Αναλυτικά τα μέρη του κυκλώματος είναι τα εξής:

- **Step-up Voltage Regulator**

Καθώς ο αισθητήρας Si-Flex 1500 απαιτεί διπλή τροφοδοσία $\pm 5V$, χρησιμοποιείται το στοιχείο MAX8569 προκειμένου να ληφθεί η θετική τροφοδοσία από την τάση των μπαταριών που είναι 3V.

- **Voltage inverter**

Η αρνητική τροφοδοσία του αισθητήρα λαμβάνεται από την έξοδο του στοιχείου MAX829 που επιτελεί αναστροφή της θετικής τάσης +5V που λαμβάνεται από το προηγούμενο κύκλωμα.

- **Step-down voltage regulator**

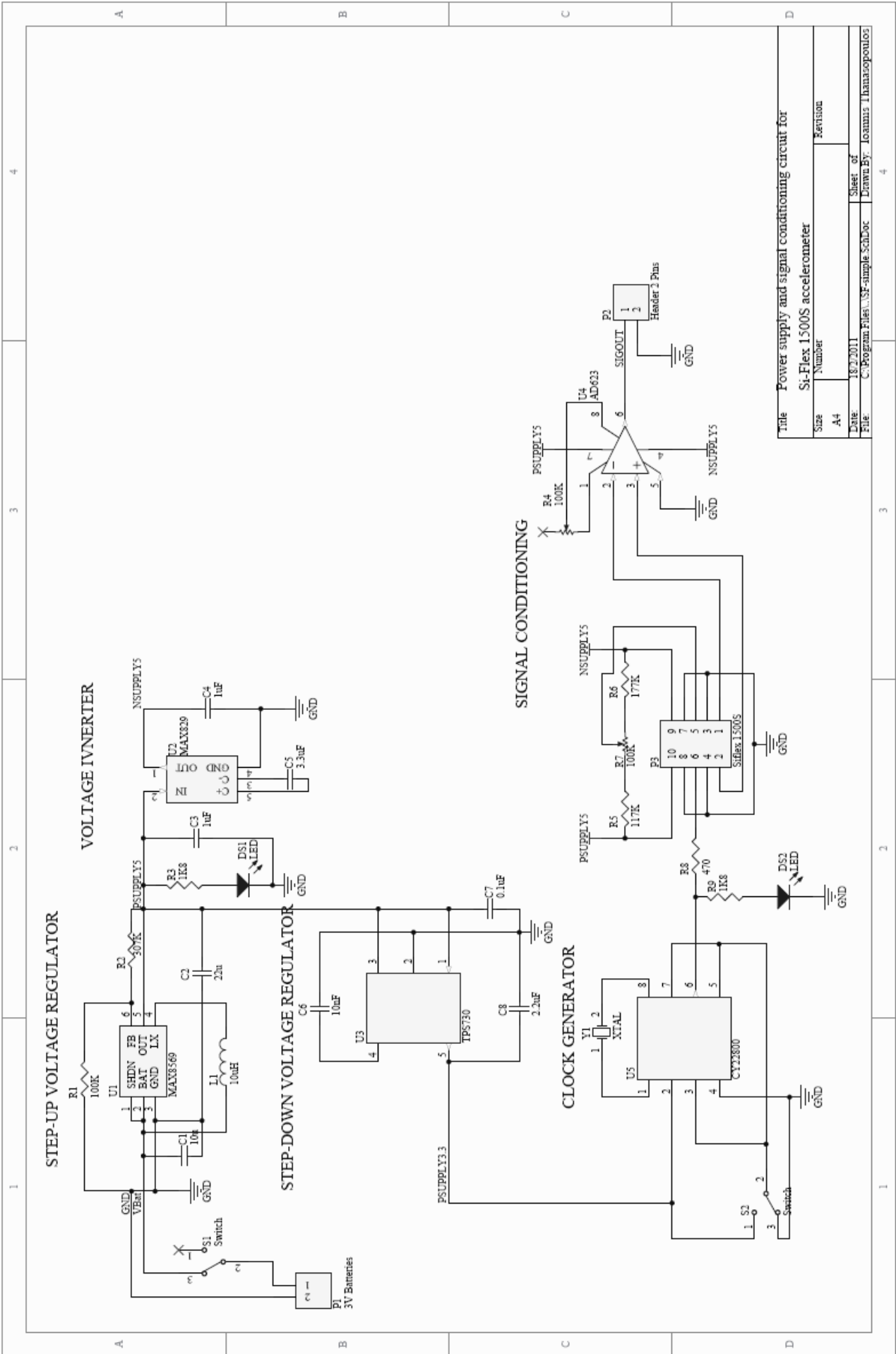
Η θετική τάση +5V μετασχηματίζεται από το στοιχείο TPS730 σε 3,3V προκειμένου να τροφοδοτηθεί το κύκλωμα του χρονιστή που απαιτείται για τη λειτουργία του αισθητήρα.

- **Κύκλωμα χρονισμού**

Απαρτίζεται από το προγραμματιζόμενο ρολόι CY22800 και έναν κρύσταλλο που ταλαντώνεται στη συχνότητα 9 MHz. Το ρολόι προγραμματίζεται ώστε να δίνει τετραγωνικό παλμό συχνότητας 4 MHz.

- **Κύκλωμα ρύθμισης σήματος**

Χρησιμοποιείται ο ολοκληρωμένος ενισχυτής AD623 για την ενίσχυση του σήματος με κέρδος που ρυθμίζεται από ποτενσιόμετρο. Ένα δεύτερο ποτενσιόμετρο συνδέεται κατάλληλα στον αισθητήρα προκειμένου να αντισταθμίζεται η DC συνιστώσα της εξόδου του.

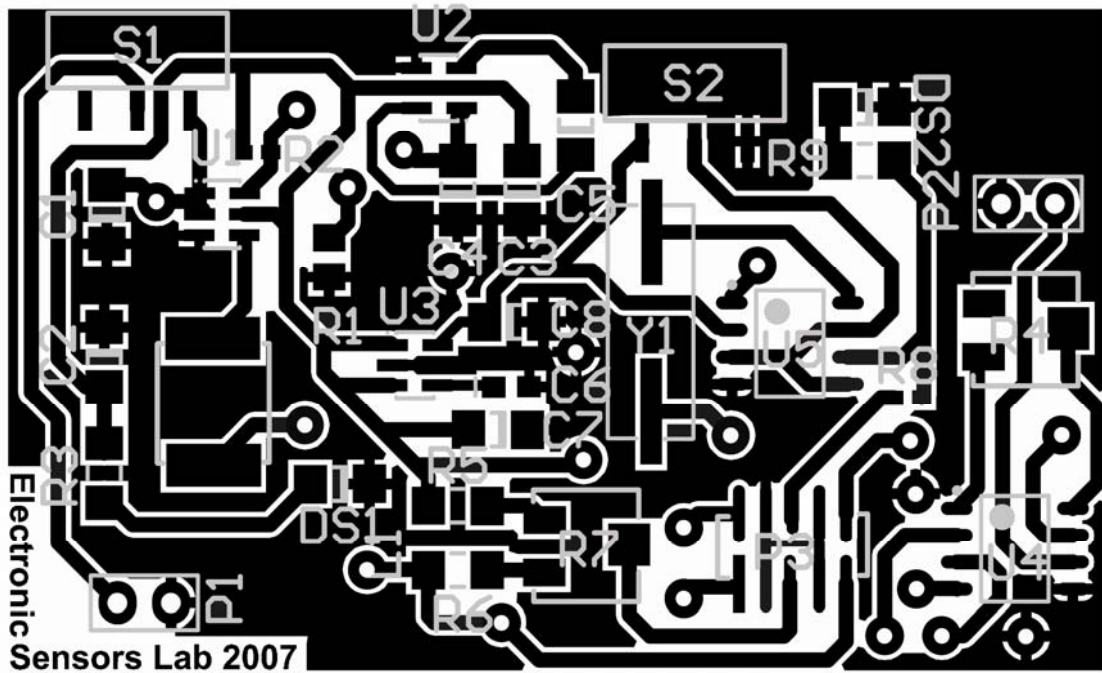


Title		Power supply and signal conditioning circuit for	
Size		Si-Flex 1500S accelerometer	
Number	A4	Sheet of	4
Date	18/2/2011	Drawn By	Iosannis Ilianasopoulos
File	C:\Program Files\USF-simple\SchDoc		

Σχηματικό του ηλεκτρονικού κυκλώματος του κόμβου αισθητήρα

ΜΑΣΚΑ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Top Layer



Bottom Layer

