

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ABSTRACT	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.1 Γενικά	2
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	2
1.3 Αντικείμενο	4
1.4 Δομή	5
2. ΦΙΛΤΡΑ	6
2.1 Αναλογικά Φίλτρα	6
2.2 Προδιαγραφές Ενισχυτών και θόρυβος	7
2.3 Σεισμικός Σκανδαλισμός	9
3. Αποθουροποίηση σεισμολογικών δεδομένων	16
3.1 Εισαγωγή	16
3.2 Μη παραμετρική ανέλιξη με χρήση κυματιδίων	17
3.3 Άμεσοι κυματιδιακοί κανόνες κατωφλίου	17
3.4 Άμεσοι κυματιδιακοί εκτιμητές κατωφλίου	20
3.4.1 Καθολικό Κατώφλι	21
3.4.2 Προσαρμοζόμενο Κατώφλι (Sureshrink)	21
3.4.3 Κατώφλι Διασταυρωμένης Επικύρωσης (CV)	22
3.4.5 Προσέγγιση «Ελέγχου Επαναλαμβανόμενης Υπόθεσης»	25
3.4.6 Κατώφλι Αμετάβλητης Ολίσθησης	26
3.7 Μέτρα απόδοσης	28
3.8 Παράδειγμα με συνθετικά δεδομένα	32
3.8.1 Περιγραφή των συνθετικών σημάτων	33
3.8.2 Η επίδραση του κανόνα κατωφλίου	35
3.8.3 Η επίδραση της βάσης DWT	38
3.8.4 Η εφαρμογή της Κυματιδιακής Αποθουροποίησης σε Παραδείγματα Σεισμολογικών Σημάτων	39
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	42
4.1 Εισαγωγή	42
4.2 Αξιολόγηση με πραγματικά δεδομένα	42
4.3 Τυπικά αποτελέσματα	44
4.4 Συγκεντρωτικά γραφήματα	49
5. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	51
6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	53

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.2 ο σεισμικός σκανδαλισμός.....	13
Σχήμα 3.1. Εκτίμηση συνάρτησης που χρησιμοποιεί κατώφλι.	18
Σχήμα 3.2. Συναρτήσεις Κατωφλίου ST και HT	19
Σχήμα 3.3. Καθολικό (άνω διάγραμμα) και κατά κλίμακα (κάτω διάγραμμα) κατώφλι επιπέδων για ένα σήμα που έχει αποσυντεθεί με κυματίδια	20
Σχήμα 3.4.α. Δύο παρόμοια σήματα όπου το κάτω είναι η δεξιά μετατοπισμένη εκδοχή του πάνω	27
Σχήμα 3.4β. το DWT του αρχικού σήματος (τα τέσσερα αριστερά διαγράμματα) και το DWT της μετατοπισμένης εκδοχής (τα τέσσερα δεξιά διαγράμματα) (Yip et.al., 2001).....	27
Σχήμα 3.6. Χρονικές διαφορές για την άφιξη του κύματος P ανάμεσα στο τεχνητό σήμα (έντονη μαύρη γραμμή), αποθορυβοποιημένο σήμα μετά το φιλτράρισμα με ένα Chebyshev τύπου I φίλτρο (λεπτή μαύρη διακεκομμένη γραμμή) και αποθορυβοποιημένο σήμα μετά το φιλτράρισμα μια κυματιδιακή μέθοδο (TI-H) (χοντρή γκρι διακεκομμένη γραμμή).	30
Σχήμα 3.7. Τοποθεσία χρησιμοποιώντας την κυκλική μέθοδο. Σταθμοί S1, S2, S3 καταγραφή ενός σεισμού (αριστερά). Το εκτιμώμενο επίκεντρο εντοπίζεται στο εσωτερικό της μαύρης κοινής περιοχής των τριών κύκλων (δεξιά)	31
Σχήμα 3.8. Γράφημα Travel time.....	31
Σχήμα 3.9. Διαφορά περιοχής επίκεντρου (τρίγωνο: σωστή τοποθεσία, τετράγωνο: λάθος τοποθεσία).	32
Σχήμα 3.10. Καθοριστικό μέγεθος χρησιμοποιώντας το μέγιστο πλήθος των S κυμάτων	32
Σχήμα 3.11. Σύνθετικό σεισμικό σήμα. Ο χρόνος άφιξης των P κυμάτων (στο δείγμα 315) όπως φαίνεται στην τονισμένη γραμμή.....	33
Σχήμα 3.12. Η μόλυνση του Σεισμικού σήματος με διαφορετικούς τύπους θορύβου. Το διάγραμμα <i>a</i> είναι ένας θόρυβος τύπου CL, το διάγραμμα <i>b</i> είναι ένας θόρυβος τύπου GN και το διάγραμμα <i>c</i> είναι ένας θόρυβος τύπου AQ (δείτε το κείμενο για λεπτομέρειες).	34
Σχήμα 3.8 Αξιολόγηση της απόδοσης της αποθορυβοποίησης χρησιμοποιώντας την βάση Haar για το GN3 (πάνω αριστερά), CL6 (κάτω αριστερά), AQ1(πάνω δεξιά) και AQ5 (κάτω δεξιά).....	36
Σχήμα 3.9 Αξιολόγηση της απόδοσης της αποθορυβοποίησης χρησιμοποιώντας την βάση D(4) για το GN3 (πάνω αριστερά), CL6 (κάτω αριστερά), AQ1(πάνω δεξιά) και AQ5 (κάτω δεξιά).....	36
Σχήμα 3.10 Αξιολόγηση της απόδοσης της αποθορυβοποίησης χρησιμοποιώντας την βάση D(6) για το GN3 (πάνω αριστερά), CL6 (κάτω αριστερά), AQ1(πάνω δεξιά) και AQ5 (κάτω δεξιά).....	37
Σχήμα 3.11 Αξιολόγηση της απόδοσης της αποθορυβοποίησης χρησιμοποιώντας την βάση C(6) για το GN3 (πάνω αριστερά), CL6 (κάτω αριστερά), AQ1(πάνω δεξιά) και AQ5 (κάτω δεξιά).....	37
Σχήμα 3.12 Αξιολόγηση της απόδοσης της αποθορυβοποίησης χρησιμοποιώντας την βάση LA(8) για το GN3 (πάνω αριστερά), CL6 (κάτω αριστερά), AQ1(πάνω δεξιά) και AQ5 (κάτω δεξιά).....	38
Σχήμα 4.1 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθορυβοποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4.....	44

Σχήμα 4.2 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθρορυβοποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4.....	45
Σχήμα 4.3 Σημεία σκανδαλισμού STA/LTA για κυματομορφή τύπου A	45
Σχήμα 4.4 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθρορυβοποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4.....	46
Σχήμα 4.5 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθρορυβοποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4.....	46
Σχήμα 4.6 Σημεία σκανδαλισμού STA/LTA για κυματομορφή τύπου B.....	47
Σχήμα 4.7 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθρορυβοποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4.....	47
Σχήμα 4.8 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθρορυβοποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4.....	48
Σχήμα 4.9 Σημεία σκανδαλισμού STA/LTA για κυματομορφή τύπου C.....	48
Σχήμα 4.10 Χρονικές διαφορές για την αυτόματη αναγνώριση των S κυμάτων για τις εξεταζόμενες τεχνικές αποθρορυβοποίησης	50
Σχήμα 4.11 Διαφορές απόστασης στον προσδιορισμό επικέντρου για τις εξεταζόμενες τεχνικές αποθρορυβοποίησης.....	50

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Επίδραση του DC και του φίλτρου STA, LTA και STA/LTA. Οι μονάδες των αριθμών είναι στις εκτιμήσεις	14
Πίνακας 3.1. Κατάλογος των σεισμικών σημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη προσομοίωσης.....	35
Πίνακας 3.2. Τα καλύτερα αριθμητικά κατώφλια βρέθηκαν στα όρια του MSE των αποθρομβοποιημένων σημάτων	38
Πίνακας 3.3. Το MSE των αποθρομβοποιημένων σημάτων, από τα ST & HT, με διαφορετική βάση DWT.....	39
Πίνακας 3.4. Τα ακρωνύμια για τις ομάδες των μεθόδων αποθρομβοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν.....	40
Πίνακας 3.5. Αποτελέσματα εξομοίωσης	40
Πίνακας 4.1. Ιδιότητες των χρησιμοποιημένων καταγραφών σεισμικών δεδομένων	43

ABSTRACT

Each measurement of natural size contains noise. This basic principle is in effect in all without exception the processes of measurement. The removal of noise is named denoising and it aims in the standardization of fluctuations in the prices of data so that are exported as much as possible more representative characteristics of size of signal. Each method of denoising tries to minimize the differences between the measuring and in the real signal. If the real signal is acquaintance denoising is a relatively easy process which can simplified with use of simple methods (eg the minimal square). When however the measuring signal is unknown denoising becomes one more complex process, the success of which depends to a great degree from the qualitative characteristics of signal as well as from the metres of estimate that we allocate so that we evaluate each method (eg is not successful to create a appreciable algorithm denoising if we have not attended to find the way of measurement exported from this, signal).

In the case of seismological signals the noise is presented with the form of covering of real seismogram value as a result the not explicit determination or estimate of basic characteristics of seismic waveform. This fact creates with his line problems in a line from processes of seismological treatment of signal as the recognition of P and S of waves, the precise determination of width etc.

Object of present work is the study of modern methods of denoising seismological data with use of non linear methods on use in automatic system of determination of epicentre.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Ως θόρυβος ορίζεται κάθε τιμή δεδομένων που δεν ανταποκρίνεται στα πραγματικά χαρακτηριστικά του σήματος που μετράται. Κάθε μέτρηση φυσικού μεγέθους περιέχει θόρυβο. Η βασική αυτή αρχή ισχύει σε όλες ανεξαιρέτως τις διαδικασίες μέτρησης. Η εξάλειψη του θορύβου ονομάζεται αποθορυβοποίηση και στοχεύει στην εξομάλυνση των διακυμάνσεων στις τιμές των δεδομένων προκειμένου να εξαχθούν όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά χαρακτηριστικά του μεγέθους του σήματος. Κάθε μέθοδος αποθορυβοποίησης προσπαθήσει να ελαχιστοποιήσει τις διαφορές ανάμεσα στο μετρούμενο και στο πραγματικό σήμα. Αν το πραγματικό σήμα είναι γνωστό η αποθορυβοποίηση είναι μία σχετικά εύκολη διαδικασία η οποία μπορεί απλοποιηθεί με χρήση απλών μεθόδων (π.χ των ελαχίστων τετραγώνων). Όταν όμως το μετρούμενο σήμα είναι άγνωστο η αποθορυβοποίηση γίνεται μια ποιο σύνθετη διαδικασία, η επιτυχία της οποίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του σήματος καθώς επίσης και από τα μέτρα εκτίμησης που διαθέτουμε προκειμένου να αξιολογήσουμε την εκάστοτε μέθοδο (π.χ. δεν είναι επιτυχές το να δημιουργήσουμε έναν αξιόλογο αλγόριθμο αποθορυβοποίησης αν δεν έχουμε φροντίσει να βρούμε τον τρόπο μέτρησης της εξαγόμενου από αυτόν, σήματος).

Στην περίπτωση των σεισμολογικών σημάτων ο θόρυβος εμφανίζεται με τη μορφή επικάλυψης της πραγματικής τιμής του σειсмоγράμματος με αποτέλεσμα τον μη σαφή προσδιορισμό ή εκτίμηση βασικών χαρακτηριστικών του σεισμικής κυματομορφής. Το γεγονός αυτό δημιουργεί με τη σειρά του προβλήματα σε μια σειρά από διαδικασίες σεισμολογικής επεξεργασίας σήματος όπως η αναγνώριση των P και S κυμάτων, ο ακριβής προσδιορισμός του πλάτους κ.λ.π.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη σύγχρονων μεθόδων αποθορυβοποίησης σεισμολογικών δεδομένων με χρήση μη γραμμικών μεθόδων για χρήση σε αυτόματο σύστημα προσδιορισμού του επίκεντρου.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η καταγραφή ενός σεισμού (σεισμόγραμμα) είναι συνήθως μία απεικόνιση δεδομένων που έχει χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) δημιουργώντας εγγενώς μία σειρά από προβλήματα που αφορούν τον προσδιορισμό συγκεκριμένων

χαρακτηριστικών του, όπως: χρόνοι άφιξης κυμάτων, πολικότητες, πλάτος. Προκειμένου να εξαλειφθούν τα προβλήματα αυτά, τα οποία οφείλονται στην ύπαρξη θορύβου, γίνεται χρήση φίλτρων. Τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα φίλτρα είναι τα μηδενικής φάσης ζωνοπερατά φίλτρα. Αυτού του τύπου τα φίλτρα έχουν το βασικό πλεονέκτημα τη μηδενικής παραμόρφωσης του εύρους φάσης. Το βασικό τους όμως μειονέκτημα είναι ότι δημιουργούν τεχνητές παραμορφώσεις πρό της αρίξεως μεταβατικών σημάτων τα οποία μπορούν να ταυτοποιηθούν λανθασμένα ως σεισμικά σήματα (Scherbaum, 1996)

Ένας εναλλακτικός τρόπος να φιλτραρίσματος των σειсмоγραμμάτων έχει προταθεί από τον Douglas (1997). Βασίζεται στην χρήση των βέλτιστων φίλτρων. Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο, γίνεται χρήση γραμμικών φίλτρων στα οποία γίνεται χρήση του κριτηρίου της βελτιστοποίησης εμπλέκοντας την ελαχιστοποίηση των μέσων διαφορών τετραγώνων μεταξύ του εξεταζόμενου και του αναμενόμενου σήματος. Αυτού του τύπου η προσέγγιση είναι γνωστή και ως φίλτρο Wiener και ο υπολογισμός της βασίζεται στην υπόθεση ότι το σήμα και ο θόρυβος είναι μεγέθη στάσιμα. Στην περίπτωση των σεισμικών σημάτων η υπόθεση αυτή δεν είναι αληθής.

Τα σεισμικά σήματα είναι μη στάσιμα σήματα και ως αποτέλεσμα οι ανεξάρτητες αναλύσεις που βασίζονται στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας, δεν είναι η ενδεικνυόμενη προσέγγιση. Σε αυτές τις περιπτώσεις η καταλληλότερη προσέγγιση ανάλυσης είναι αυτή που εμπλέκεται και στα δύο πεδία (χρόνου – συχνότητας). Ο Steeghs (1997) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ανάλυση των μη στάσιμων σημάτων (όπως τα σεισμικά) απαιτεί τη χρήση μικρότερου αριθμού τεχνικών επεξεργασίας οι οποίες όμως να αντικαθιστούν την έννοια της *καθολικής συχνότητας* (global frequency) με μία άλλη η οποία να χαρακτηρίζει τις *τοπικές συχνότητες* (local frequencies). Ένα παράδειγμα αυτής της αντιμετώπισης είναι *μετασχηματισμός Fourier βραχέως χρόνου* (Short Time Fourier Transform – STFT) (Gabor, 1946; Allen & Rabiner, 1977). Σε αυτή την περίπτωση, η επιλογή του χρονικού παραθύρου όπου θα εξετάζονται οι τοπικές συχνότητες είναι πολύ σημαντική και στην ουσία αποτελεί έναν καλά σχεδιασμένο συμβιβασμό μεταξύ δύο παραγόντων: της ανίχνευσης ταχέως εξελισσόμενων φαινομένων (π.χ. ασυνέχειες) που επιτυγχάνεται με τη χρήση «στενών» παραθύρων και της ανίχνευσης χαρακτηριστικών μεγάλης περιόδου («πλατιά» παράθυρα). Από τη στιγμή που το χρονικό παράθυρο θα επιλεγεί, το πλάτος του παραμένει σταθερό καθ'όλη τη διάρκεια της ανάλυσης οδηγώντας σε προκαθορισμένη χρονική αναλυτικότητα (και προφανώς σε συγκεκριμένη συχνοτική αναλυτικότητα)

Μία εναλλακτική μέθοδος που έχει προταθεί είναι ο *μετασχηματισμός κυματιδίων* (wavelet transform-WT). Στην περίπτωση αυτή, το σήμα αναλύεται υπό διαφορετικές *αναλύσεις ή κλίμακες*. Ο WT πραγματοποιείται διαμέσου μίας συνάρτησης βάσης, γνωστής και ως *μητρικό κυματίδιο*, η οποία υλοποιείται με ένα ζωνοπερατό φίλτρο. Η σύμπτυξη αυτή της συνάρτησης κυματιδίου (που αντιστοιχεί στις υψηλές συχνότητες) οδηγεί στην βέλτιστη χρονική αναλυτικότητα ενώ η επέκταση της ίδιας συνάρτησης (που αντιστοιχεί στις χαμηλές συχνότητες) οδηγεί στην βέλτιστη συχνοτική ανάλυση. Με τον τρόπο αυτό ο WT οδηγεί σε ένα μεταβλητό σχήμα ανάλυσης: χαμηλή χρονική ανάλυση στις χαμηλές συχνότητες και υψηλή χρονική ανάλυση στις υψηλές συχνότητες.

Η *αποθορυβοποίηση* είναι η διαδικασία επεξεργασίας σήματος κατά την οποία επιχειρείται να αφαιρεθεί το ανεπιθύμητο κομμάτι του σήματος (θόρυβος) ανεξάρτητα από τα ποια είναι τα φασματικά του χαρακτηριστικά. Δεν πρέπει να συνδέεται με την *εξομάλυνση* (smoothing) η οποία αποσκοπεί στην εξάλειψη των υψηλών συχνοτήτων του σήματος. Η αποθορυβοποίηση με χρήση κυματιδίων παρουσιάστηκε αρχικά από τον Donoho (1994, 1995a, 1995b, 1995c) ως μία διαδικασία σύμπτυξης (shrinkage) βάσει κάποιων επιλεγόμενων κατωφλίων (thresholding). Επιγραμματικά αποτελείται από τρία στάδια: 1) Μετασχηματισμός του εξεταζόμενου σήματος με χρήση συναρτήσεων κυματιδίων 2) Εφαρμογή μη γραμμικής σύμπτυξης στις συνιστώσες κυματιδίων και 3) γραμμικός ανάστροφος μετασχηματισμός κυματιδίων (που οδηγεί σε ανακατασκευή του επεξεργασμένου σήματος). Λόγω της μη γραμμικής μορφής της σύμπτυξης στο βήμα 2) η διαδικασία αυτή είναι εντελώς διαφορετική από τις συμβατικές γραμμικές μεθόδους αποθορυβοποίησης και επιπρόσθετα μπορεί να λογιστεί ως μη παραμετρική μέθοδος. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι έτσι ο αναλυτής απαλλάσσεται από την διαδικασία εύρεσης αρχικού μοντέλου του σήματος (προκειμένου να εφαρμόσει γραμμικές μεθόδους όπως παλινδρόμηση) (Gallant, 1997)

1.3 Αντικείμενο

Η παρούσα πτυχιακή εργασία στοχεύει στα παρακάτω

- Μελέτη της επίδρασης μη ορθών προσδιορισμών χρόνων άφιξης σεισμικών κυμάτων στον υπολογισμό του επικέντρου
- Μελέτη της απόδοσης γραμμικών συμβατικών φίλτρων και κυματιδιακών μεθόδων αποθορυβοποίησης σε συνθετική βάση σεισμολογικών δεδομένων

- Μελέτη της απόδοσης κυματιδιακών μεθόδων αποθορυβοποίησης για χρήση σε σύστημα αυτόματου προσδιορισμού επικέντρου

1.4 Δομή

Η παρούσα εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια εκ των οποίων το πρώτο αποτελεί την εισαγωγή. Τα υπόλοιπα κεφάλαια έχουν ως εξής:

- Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται οι συμβατικές και κλασσικές μέθοδοι φιλτραρίσματος και αποθορυβοποίησης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα συμβατικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται για τη σεισμολογική επεξεργασία σήματος, οι περιορισμοί τους και μερικές υλοποιήσεις αυτών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο κλασσικός αλγόριθμος αναγνώρισης των σεισμικών κυμάτων και γίνεται μελέτη της επιρροής του θορύβου σε αυτόν.
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μη γραμμικές μέθοδοι αποθορυβοποίησης που θα χρησιμοποιηθούν. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στις συναρτήσεις κυματιδίων. Αρχικά παρουσιάζονται οι συνήθεις μέθοδοι κυματιδιακής αποθορυβοποίησης και στη συνέχεια οι πιο σύνθετες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα μέτρα που θα χρησιμοποιηθούν και το κεφάλαιο κλείνει με μία εφαρμογή των προηγούμενων με συνιετικά δεδομένα (προκειμένου να εκτιμηθεί η επιτυχία των μεθόδων με γνωστά σήματα)
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμοζόμενων αλγορίθμων σε διάφορες κλάσεις σεισμολογικών δεδομένων (σε σχέση με το λόγο σήματος προς θόρυβο). Παρουσιάζονται ενδεικτικές καταγραφές και γίνεται η συγκεντρωτική ανάλυση των διαφορών που παρατηρούνται μεταξύ συμβατικών και κυματιδιακών μεθόδων αποθορυβοποίησης.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων
- Στο έκτο κεφάλαιο δίνονται κατευθύνσεις για μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας

2. ΦΙΛΤΡΑ

2.1 Αναλογικά Φίλτρα

Οι σύγχρονοι ενισχυτές είναι συνήθως συνδεδεμένοι με DC σύζευξη έτσι ώστε οποιαδήποτε DC μετατόπιση στην είσοδο θα εμφανιστεί επίσης στην έξοδο. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε DC μετατόπιση είτε στον ενισχυτή είτε τον αισθητήρα (μη παθητικοί αισθητήρες) θα παρουσιαστεί ενισχυμένη στην έξοδο. Αυτή μπορεί συνήθως να προσαρμοστεί σε στάθμη μηδέν και για τον αισθητήρα και για τον ενισχυτή. Σε μερικούς ενισχυτές, ένα υπερπερατό φίλτρο εγκαθίσταται έτσι η έξοδος δεν έχει κανένα συνεχές ρεύμα. Αυτό ήταν αρκετά κοινό στα προηγούμενα σχέδια για να εξασφαλίσει σταθερότητα και δεδομένου ότι οι χαμηλές συχνότητες δεν απαιτήθηκαν για πολλούς σταθμούς SP. Αυτό το φίλτρο θα μπορούσε να καλύψει τα σοβαρά προβλήματα με κάθε αισθητήρα ή ενισχυτή και να δώσει μια ανεπιτυχή μετατόπιση φάσης στις χαμηλότερες συχνότητες. Λόγω αυτών των προβλημάτων και μιας γενικότερης τάσης να αποκτηθούν οι συνιστώσες στις χαμηλές συχνότητες και δεδομένου ότι οι σύγχρονοι ενισχυτές είναι σταθερότεροι, τα υπερπερατά φίλτρα χρησιμοποιούνται σπάνια πια.

Τα χαμηλής διέλευσης φίλτρα είναι μέρος όλων των ενισχυτών. Για τους ενισχυτές που χρησιμοποιούνται με τα ψηφιακά συστήματα, πρέπει πάντα να υπάρχει επίσης ένα αντιπαραποιητικό φίλτρο για να αφαιρέσει τις ανεπιθύμητες υψηλότερες συχνότητες.

Σχετικά με την αναλογική καταγραφή, τα πρόσθετα χαμηλόπερατά και υπερπερατά φίλτρα μπορεί να είναι διαθέσιμα προκειμένου να καταγραφεί το σήμα με τον λιγότερο θόρυβο.

Τα αναλογικά φίλτρα είναι συνήθως τύπου Butterworth δεδομένου ότι αυτοί είναι εύκολο να κατασκευαστούν και να έχουν τα καλά χαρακτηριστικά. Ο αριθμός πόλων για το φίλτρο ποικίλλει και εξαρτάται από την εφαρμογή του. Ένα φίλτρο DC blocking χρειάζεται να έχει μόνο έναν πόλο, ενώ ένα αντιπαραποιητικό φίλτρο να έχει 8 πόλους. Το σήμα που διαμορφώνει τα φίλτρα έχει συνήθως 4 πόλους. Πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι ένα χαμηλής διέλευσης αναλογικό φίλτρο (π.χ. ένας τύπου Butterworth) προκαλεί σε μια ολίσθηση φάσης για τιμές λίγο κάτω από τη γωνιακή συχνότητα ακόμα κι αν η απόκριση ενίσχυσης είναι επίπεδη σε αυτήν την ζώνη.

Ένα παράδειγμα ενός μακριού επιζώντος ενισχυτή είναι το Sprengnether μονού τερματισμού AS110 που χρησιμοποιείται στα αναλογικά όργανα καταγραφής και τα αναλογικά συστήματα τηλεμετρίας:

Απολαβή Ενισχυτή: 60 – 120 dB με βήματα 6 dB

Σταθερό Φίλτρο: 0,15 – 30Hz

Μεταβλητά φίλτρα:

Low Pass: 5 και 10 Hz, 4 πόλοι

High Pass: 5 και 10 Hz, 4 πόλοι

Θόρυβος: 100 nV PP με τα φίλτρα 0.15–30 Hz και την εισαγόμενη σύνθετη αντίσταση 4 KΩ.

Μέγιστη τιμή εξόδου: 20 V p-p

Σύμφωνα με τα σύγχρονα πρότυπα, αυτός ο ενισχυτής έχει ένα λογικό επίπεδο χαμηλού θορύβου, εντούτοις το επιτυγχάνει εις βάρος της κατοχής ενός ζωνοπερατού φίλτρου. Ο ενισχυτής ρυθμίζει την απολαβή του στα βήματα 6 dB, ή έναν παράγοντα 2 μεταξύ κάθε ενός. Αυτό είναι χαρακτηριστικό για τους περισσότερους αναλογικούς ενισχυτές με τη μεταβλητή απολαβή. Μπορούμε επίσης να υπολογίσουμε τη θεωρητική δυναμική απόκριση. Εάν η απολαβή ορίζεται στα 60dB, η παραγωγή θορύβου θα είναι $1000 \cdot 100 \text{ nV} \cdot 100 = 0.1 \text{ mV}$ και η δυναμική περιοχή είναι $20/0.0001 = 200000$ ή 106 dB. Σε μία απολαβή 120 dB, η παραγωγή θορύβου είναι 60 dB υψηλότερα, αλλά η μέγιστη παραγωγή είναι η ίδια έτσι η δυναμική περιοχή είναι μόνο $106 - 60 \text{ dB} = 46 \text{ dB}$. Όπως θα δούμε, καμία από αυτές τις τιμές δεν είναι αρκετά καλή για τα ψηφιακά όργανα καταγραφής υψηλής δυναμικής περιοχής, αλλά είναι εντάξει για τα αναλογικά όργανα καταγραφής.

2.2 Προδιαγραφές Ενισχυτών και θόρυβος

Ο θόρυβος ενός προενισχυτή μετά από έναν αισθητήρα μπορεί να θέσει το όριο σε ολόκληρη την ευαισθησία. Μπορεί να οφείλεται στον εγγενή ή εσωτερικό θόρυβο των τμημάτων κυκλωμάτων - ουσιαστικά αναπόφευκτων, αν και μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με βάση ένα προσεκτικό σχέδιασμό του κυκλώματος. Επίσης μπορεί να οφείλεται και σε εξωτερικές πηγές, οι οποίες μπορούν γενικά να αποφευχθούν ή να ελαχιστοποιηθούν.

Ένας κανόνας του σχεδίου είναι ότι το εύρος ζώνης ενισχυτών του ενισχυτή δεν πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του σήματος, διότι ο θόρυβος αυξάνεται με το εύρος ζώνης. Για αυτόν τον λόγο ένα χαμηλής διέλευσης φίλτρο

συμπεριλαμβάνονται συχνά στον προενισχυτή με τη γωνιακή συχνότητα ελαφρώς επάνω από τη ζώνη ενδιαφέροντος.

Οι μονού τερματισμού ή κοινού κοινής φοράς ενισχυτές είναι γενικά λιγότερο θορυβώδεις από τους διαφορικούς, επειδή μια από τις εισόδους τους συμβάλλει λιγότερο στο θόρυβο (Rodgers, 1992). Παρόλα αυτά, οι περισσότεροι σεισμικοί προενισχυτές έχουν ένα διαφορετικό στάδιο εισόδου για να διευκολύνουν τη χρήση των μακρών καλωδίων και να ελαχιστοποιήσουν το θόρυβο επανάληψης από τις εξωτερικές πηγές. Σε αυτή την περίπτωση, το καλώδιο πρέπει να είναι ένας ισορροπημένος τύπος, όπως το συννεστραμμένο ζευγάρι με την εξωτερική θωράκιση. Μαγνητικά προκληθείσες διαταραχές από τους κοντινούς μετασχηματιστές ή τους αγωγούς κεντρικών αγωγών επίσης προκαλούν θόρυβο επανάληψης αιτίας. Ένα κατάλληλο προστατευτικό κάλυμμα του ίδιου του ενισχυτή και κρατώντας το μακριά από αυτές τις πηγές μπορεί να το αποφύγει.

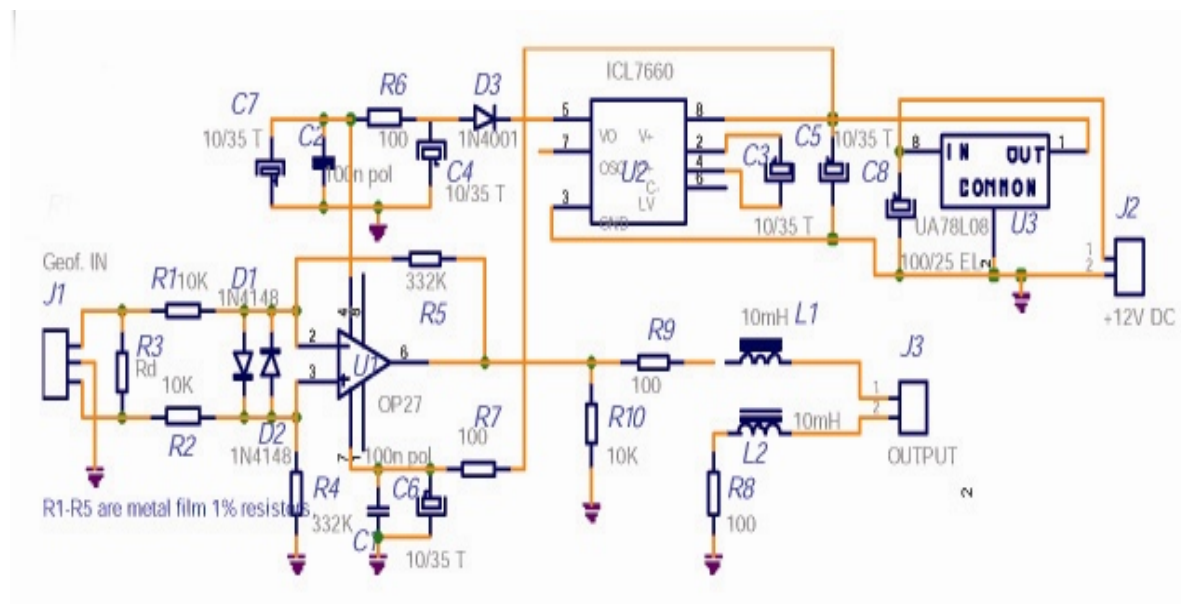
Η έξοδος των ενισχυτών είναι επίσης συχνά διαφορεική. Εάν αυτό είναι δυνατό, η καλύτερη επιλογή είναι να κρατηθεί ο προενισχυτής όσο το δυνατόν πιο κοντά στον αισθητήρα και να χρησιμοποιηθεί ένα καλώδιο καθ' όσον είναι απαραίτητο από τον ενισχυτή στο όργανο καταγραφής. Ένας τύπος συννεστραμμένου θωρακισμένου ζευγους όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται για τις τηλεφωνικές γραμμές ή το δίκτυο υπολογιστών μπορεί να κάνει την εργασία για τις αποστάσεις μέχρι 1km ή περισσότερα. Για τους διαφορικούς ενισχυτές, μια σημαντική παράμετρος είναι η Λόγος Απόρριψης Κοινού Σήματος (CMRR), η οποία δείχνει το μέρος ενός κοινού σήματος τρόπου που αναφέρεται στο έδαφος και το παρόν και στα δύο τερματικά εισόδου που θα ενισχυθούν μέχρι την έξοδο. Μια τιμή 100 DB είναι αποδεκτή.

Μια άλλη πηγή πιθανού εξωτερικού θορύβου προέρχεται από την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Ειδικότερα οι ρυθμιστές DC - DC έχουν συνήθως μια μη-αμελητέα υψηλής συχνότητας τάση κυματισμών στην έξοδο. Η απόρριψη του ενισχυτή σε αυτόν τον θόρυβο χαρακτηρίζεται από το PSRR (αναλογία απόρριψης παροχής ηλεκτρικής ισχύος).

Κλασικά, ένας ολοκληρωμένος ενισχυτής έχει διαφορετική είσοδο, την υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου και τη χαμηλή μετατόπιση στην είσοδο του. Στην περίπτωση των υψηλών σημάτων δυναμικής περιοχής όπως τα σεισμικά σήματα, ο ισοδύναμος θόρυβος εισόδου πρέπει να είναι πολύ χαμηλός. Αυτό το τελευταίο χαρακτηριστικό μπορεί να είναι σε σύγκριση με τα υπόλοιπα και ιδιαίτερα η σύνθετη αντίσταση εισόδου πρέπει να κρατηθεί όσο το δυνατόν χαμηλότερη, αλλά αρκετή ώστε να επιτρέψει την

απόσβεση του γεωφώνου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι διαφορικοί προενισχυτές είναι ελαφρώς θορυβωδέστεροι από single-ended. Και, λόγω του έμφυτου χαρακτήρα των αδρανών αισθητήρων, DC-συστατικό δεν είναι ποτέ μέρος του αληθινού σεισμικού σήματος και μπορεί να αφαιρεθεί κατόπιν εάν κάποιο όφσσετ είναι παρόν.

Τα πρόσφατα όργανα καταγραφής έχουν γενικά υψηλή ανάλυση, έτσι δεν απαιτούν το σήμα να ενισχύεται τόσο πολύ πριν από την είσοδο του. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ένας ενός σταδίου προενισχυτής είναι αρκετός για τους παθητικούς αισθητήρες με μια χαμηλού επιπέδου έξοδο, όπως αυτή που παρουσιάζεται παρακάτω:



2.3 Σεισμικός Σκανδαλισμός

Το μέγεθος των δεδομένων συνεχούς καταγραφής είναι πολύ μεγάλο και αν και η αποθήκευση στοιχείων είναι φτηνή και άφθονη, θέλουμε τουλάχιστον να ξέρουμε ποια τμήματα των συνεχόμενων καταγραφών περιέχουν τα πραγματικά γεγονότα ή εναλλακτικά ακριβώς να αποθηκεύουν το τμήμα των καταγραφών με τα πραγματικά γεγονότα. Προφανώς, στην τελευταία περίπτωση, η απαίτηση αποθήκευσης μειώνεται πολύ. Εκτιμώντας ότι ένας μήνας των συνεχών στοιχείων απαιτεί μερικά GB, τα χρονικά τμήματα πραγματικού ενδιαφέροντος μόνο να είναι μερικά MB. Εάν π.χ. ένας σταθμός 3 στοιχείων καταγράφει 10 γεγονότα/ημέρα που χρησιμοποιούν 24 bit ψηφιοποιητή σε ένα ποσοστό δειγμάτων 100 sps, τότε 30 ημέρες καταγραφής θα απαιτούσαν 10 γεγονότα * 30 ημέρες * 100 δείγματα * 3 ψηφιολέξεις * 3 κανάλια * 100 περίπου ίσο με 27 MB ή για μισό από αυτό εάν συμπιέζεται. Αυτό το ποσό μπορεί να περιληφθεί σε ένα μικρό τσιπ

λάμπης μη καταναλώνοντας σχεδόν καμία ενέργεια, έτσι προφανώς ελκύεται για να είναι σε θέση να αποθηκεύσει ακριβώς τα πραγματικά γεγονότα, ιδιαίτερα στα όργανα καταγραφής για τη χρήση πεδίου όπου το μέγεθος και η κατανάλωση ισχύος πρέπει να κρατηθούν μικρά. Για τα περισσότερα όργανα καταγραφής πεδίου που πωλήθηκαν μέχρι πολύ πρόσφατα, το μέγεθος μνήμης περιορίστηκε ώστε μόνο η προκαλούμενη καταγραφή ήταν εφικτή.

Ένας σκανδαλισμός είναι ένας αλγόριθμος που ελέγχει το σήμα για τις μεταβολές που θα μπορούσαν να δείξουν ένα γεγονός. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι σκανδαλισμού διαθέσιμοι, κάποιοι πολύ περίπλοκοι χρησιμοποιώντας αναγνώριση σχεδίων, φασματική ανάλυση κ.λπ. Χρησιμοποιούνται μερικές φορές στα σεισμικά όργανα καταγραφής δικτύων, αλλά σπάνια στους φορητούς κατανεμητές στοιχείων που υπάρχουν στην αγορά. Στα χέρια ενός ειδικού, μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά το γεγονός στην αναλογία ανιχνεύσεων/ λανθασμένων σκανδαλισμών, ιδιαίτερα για έναν δεδομένο τύπο σεισμικών γεγονότων. Εντούτοις, οι περίπλοκες ρυθμίσεις των λειτουργικών παραμέτρων στο πραγματικό σήμα και τους σεισμικούς όρους θορύβου, επί κάθε σεισμικού τύπου, που αυτές οι ωθήσεις απαιτούν, έχουν αποδειχθεί συχνά αδέξιες και υπαγόμενες στο λάθος. Ως εκ τούτου, για πρακτικούς λόγους, μόνο δύο τύποι χρησιμοποιούνται ευρέως, ο σκανδαλισμός επιπέδων και ο σκανδαλισμός STA/LTA (δείτε παρακάτω) και μόνο εκείνοι θα περιγραφούν εδώ.

Ο σκανδαλισμός επιπέδων ή κατώφλι εύρους προκαλεί απλά τις αναζητήσεις οποιουδήποτε εύρους που υπερβαίνει ένα προετοιμασμένο κατώφλι. Η καταγραφή αρχίζει όποτε αυτό το κατώφλι επιτυγχάνεται και σταματά όταν το επίπεδο είναι κάτω από το κατώφλι ή μετά από έναν δεδομένο χρόνο. Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται συχνά σε ισχυρά σεισμικά όργανα κινήσεων, όπου η υψηλή ευαισθησία δεν είναι ένα ζήτημα, και πού συνεπώς ο προκαλούμενος από τον άνθρωπο και φυσικός σεισμικός θόρυβος δεν είναι κρίσιμος. Αυτός ο τύπος σκανδαλισμού μπορεί να εφαρμοστεί στα πολύ απλά όργανα και πολλοί αναλογικοί-καταγραφείς επιταχυνσιογράφοι τον είχαν. Ο σκανδαλισμός επιπέδων τώρα κατά ένα μεγάλο μέρος αντικαθίσταται από τον σκανδαλισμό STA/LTA, δεδομένου ότι η δύναμη υπολογιστών δεν είναι πλέον πρόβλημα. Εντούτοις, πολλά όργανα κρατούν ακόμα την επιλογή επιπέδων για ιστορικούς λόγους.

Ο βραχυπρόθεσμος μέσος όρος - ο μακροπρόθεσμος μέσος σκανδαλισμός (STA/LTA) είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιημένος αλγόριθμος σκανδαλισμού. Ένα ενιαίο κανάλι του σεισμικού σήματος υποβάλλεται σε επεξεργασία χαρακτηριστικά ως εξής: το

σήμα είναι band-pass φιλτραρισμένο και το απόλυτο μέσο STA (βραχυπρόθεσμος μέσος όρος) καθορίζεται πέρα από το STA χρονικό παράθυρο. Χαρακτηριστικά, το STA χρονικό παράθυρο είναι 0.5 δευτερόλεπτα για μια σύντομη περίοδο καναλιού. Το ίδιο φιλτραρισμένο σήμα χρησιμοποιείται επίσης για να υπολογίσει το LTA (μακροπρόθεσμος μέσος όρος) πέρα από το LTA χρονικό παράθυρο, το οποίο είναι χαρακτηριστικά 50-500 s. Κατά συνέπεια, το LTA θα δώσει το μακροπρόθεσμο επίπεδο σημάτων υποβάθρου ενώ το STA θα αποκριθεί στις βραχυπρόθεσμες μεταβολές σημάτων. Η αναλογία μεταξύ STA και LTA ελέγχεται συνεχώς και μόλις υπερβεί ένα δεδομένο κατώφλι, το επίπεδο σκανδαλισμού, η έναρξη ενός γεγονότος δηλώνεται για εκείνο το ίχνος. Μόλις αρχίσει το γεγονός, το LTA είναι συνήθως παγωμένο, έτσι ώστε το επίπεδο αναφοράς δεν επηρεάζεται από το σήμα γεγονότος. Το τέλος του γεγονότος δηλώνεται όταν φθάνει η αναλογία STA/LTA στο επίπεδο de-σκανδαλισμού. Το επίπεδο σκανδαλισμού και αποσκανδαλισμού τα επίπεδα 4.0 και 2.0 αντίστοιχα είναι χαρακτηριστικές τιμές. Προκειμένου να αποκτηθεί το πλήρες γεγονός, η καταγραφή θα αρχίσει κάποιο χρόνο πριν από το χρόνο σκανδαλισμού. Αυτό καλείται χρόνος μνήμης προ-γεγονότος. Επιπλέον, για να αποφεύγει την αποκοπή του σήματος, η καταγραφή συνεχίζει κάποιο χρόνο μετά από να αποπροκαλέσει. Αυτή η περίοδος καλείται μνήμη μετα-γεγονότος. Ο μέγιστος χρόνος της καταγραφής συνήθως περιορίζεται μέχρι έναν μέγιστο χρόνο καταγραφής που θέτει και είναι επίσης μερικές φορές δυνατό να απορριφθούν οι ωθήσεις που διαρκούν λιγότερο από έναν ορισμένο χρόνο, ο ελάχιστος χρόνος σκανδαλισμού. Οι STA και LTA πρέπει να υπολογιστούν στα σήματα χωρίς ένα DC τμήμα προκειμένου να απεικονιστεί το πραγματικό σήμα. Το DC είναι κανονικά αφαιρούμενο με το φιλτράρισμα, το οποίο είναι επιθυμητό επίσης για άλλους λόγους (δείτε παρακάτω). Ο αλγόριθμος σκανδαλισμού STA/LTA είναι εξυπηρετεί ώστε να αντιμετωπίσει τις διακυμάνσεις του φυσικού σεισμικού θορύβου, οι οποίες είναι αργής φύσης. Είναι λιγότερο αποτελεσματικό στις καταστάσεις όπου ο προκαλούμενος από τον άνθρωπο ή φυσικός σεισμικός θόρυβος μιας έκρηξης ή ακιδωτής φύσης (π.χ. μπουρίνια αέρα) είναι παρών. Επί των τόπων με τον υψηλό, ανώμαλο σεισμικό θόρυβο, ο σκανδαλισμός STA/LTA συνήθως δεν λειτουργεί καλά, που σημαίνει ότι υπάρχουν πάρα πολλοί ψεύτικοι σκανδαλισμοί.

Πριν μιλήσουμε για τις παραμέτρους σκανδαλισμού λεπτομερώς, θα εξετάσουμε μια χαρακτηριστική εφαρμογή. Ο σκανδαλισμός τρέχει συνεχώς στον υπολογιστή έτσι οι τιμές STA και LTA υπολογίζονται τρέχοντας μέσους όρους:

$$\begin{aligned}
 STA_i &= STA_{i-1} + \frac{|x_i| - STA_{i-1}}{NSTA} \\
 LTA_i &= LTA_{i-1} + \frac{|x_i| - LTA_{i-1}}{NLTA} \\
 R_i &= \frac{STA_i}{LTA_i}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

όπου X_i είναι το σήμα (που φιλτράρεται ή αποφιλτράρεται) STA , ο βραχυπρόθεσμος μέσος όρος LTA , ο μακροπρόθεσμος μέσος όρος R , η STA - LTA αναλογία και το $NSTA$ και $NLTA$, ο αριθμός των σημείων στα STA και LTA παράθυρα, αντίστοιχα. Σε αυτήν την περίπτωση, το X είναι το αφιλτράριστο σήμα. Αυτή η εργασία εάν το σήμα δεν είχε κανένα DC τμήμα, αλλά εάν το X είχε ένα μεγάλο DC τμήμα, αυτό θα μεταφερθεί στους STA και LTA και θα είναι τόσο μεγάλοι που το R δεν φθάνει ποτέ την αναλογία σκανδαλισμού.

Υπάρχουν δύο κοινές παραλλαγές του αλγορίθμου ώθησης (2.1). Το πρώτο είναι να χρησιμοποιηθεί το τετράγωνο του X_i αντί της απόλυτης τιμής. Χρησιμοποιώντας το τετράγωνο του X_i , καθιστά τον σκανδαλισμό πίο ευαίσθητο στις μεταβολές. Το άλλο είναι ο σκανδαλισμός Allen (Allen, 1978) στον οποίο η απόλυτη τιμή X_i αντικαθίσταται από τη χαρακτηριστική λειτουργία c_i . Σε μια απλουστευμένη μορφή, το c_i υπολογίζεται όπως:

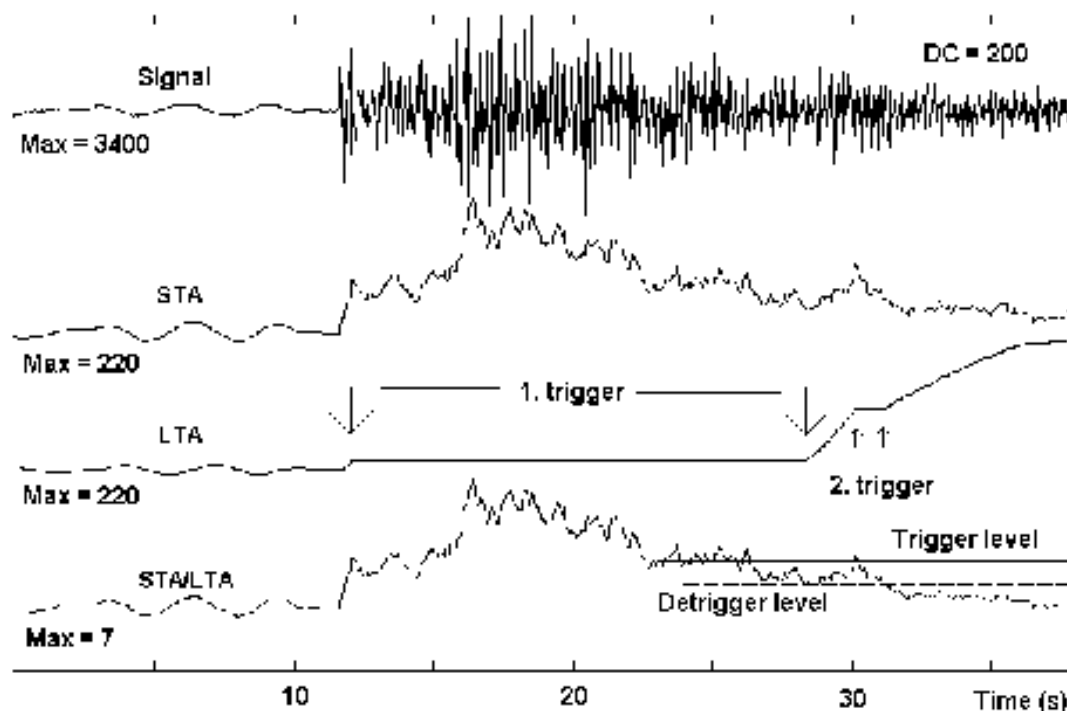
$$c_i = X_i^2 + k \cdot (X_i - X_{i-1})^2
 \tag{2.2}$$

όπου το k είναι μια σταθερά. Ο δεύτερος όρος είναι ανάλογος προς το τετράγωνο της πρώτης παραγώγου του σήματος. Η χαρακτηριστική λειτουργία είναι ευαίσθητη και στις παραλλαγές εύρους και στις αλλαγές συχνότητας.

Όλες οι ανωτέρω περιγεγραμμένες μέθοδοι σκανδαλισμού έχουν από κοινού not - looking - forward αλγορίθμους, δηλ., η παρούσα τιμή των παραμέτρων σκανδαλισμού εξαρτάται μόνο από τις παρούσες και προηγούμενες τιμές του σήματος. Αυτό τους καθιστά εύκολους στο να εφαρμόσουν με απλές επαναλαμβανόμενες, πραγματικού χρόνου διαδικασίες. Ένας ανθρώπινος αναλυτής αποδίδει με έναν αρκετά διαφορετικό τρόπο: Ανιχνεύει ένα γεγονός εξετάζοντας ολόκληρο το αρχείο και αξιολογεί τις

παρούσες και επόμενες τιμές παρελθόντος, του ίχνους (ή κάτι σαν το φάκελο από το) για να αποφασίσει την παρουσία ενός γεγονότος και χρόνου άφιξης του.

Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει ένα παράδειγμα για το πώς οι εργασίες αλγορίθμου STA/LTA για τα πρότυπα προκαλούν τη χρήση της απόλυτης τιμής.



Σχήμα 2.2 ο σεισμικός σκανδαλισμός. Το κορυφαίο ίχνος είναι το αρχικό σήμα το δεύτερο ίχνος, STA το τρίτο ίχνος LTA και το τελευταίο ίχνος η αναλογία STA/LTA. Το STA παράθυρο είναι 0.4 s και το LTA παράθυρο είναι 50s. Η αναλογία σκανδαλισμού είναι 3 και η αναλογία 2 αποσκανδαλισμού.

Το αρχικό σήμα είναι ένας μικρός σεισμός υψηλής συχνότητας με έναν σεισμικό παρασιτικό θόρυβο μικροϋπολογιστών μέσου επιπέδου, ο οποίος απεικονίζεται στις αργές μεταβολές STA και περισσότερο εξομαλύνεται στις LTA. Σε περίπου 12 s, η αναλογία περνάει το κατώφλι 3 (1. σκανδαλισμός). Αυτό αμέσως φτάνει κατωτέρω πάλι, αλλά δεδομένου ότι η αναλογία αποσκανδαλισμού είναι 2, ο σκανδαλισμός παραμένει ενεργοποιημένος. Στο παραπάνω παράδειγμα, ο LTA είναι παγωμένος μόλις δηλωθεί ένα γεγονός, το οποίο μπορεί να δει από το ομαλό LTA επίπεδο. Μερικά δευτερόλεπτα μετά από την αποπροκάλεση, η αναλογία περνάει από το επίπεδο σκανδαλισμού και παραμένει στην κατάσταση σκανδαλισμού για περίπου 1 s (2. σκανδαλισμός). Αυτό το σήμα έχει μια καλή αναλογία σήματος/διαταραχή, λοιπόν γιατί ο σκανδαλισμός έχει ενεργοποιηθεί πολύ περισσότερο; Ο πρώτος λόγος είναι απλά ότι το DC δεν έχει αφαιρεθεί πριν

υπολογιστούν οι STA και LTA. Δεδομένου ότι οι STA και LTA πριν το σκανδαλισμό είναι περίπου 220, το γεγονός αποσκανδαλισμού όταν STA είναι 440 και η μέγιστη αναλογία είναι 7 (σχήμα 2.2 και πίνακας 2.1). Το DC αυτού του σήματος είναι μόνο 200 σε σύγκριση με τη μέγιστη τιμή 3400, όμως εάν δεν αφαιρείται, θα έχει μια μεγάλη επιρροή στην απόδοση σκανδαλισμού.

	DC not removed	DC removed	Filtered 5 – 10 Hz
STA and LTA before trigger	220	40	3
Maximum STA	1500	1450	600
Maximum STA/LTA	7	36	200
Duration of trigger (s)	15	50	105

Πίνακας 2.1 Επίδραση του DC και του φίλτρου STA, LTA και STA/LTA. Οι μονάδες των αριθμών είναι στις εκτιμήσεις.

Όταν το DC αφαιρείται, ο αριθμός που αντιστοιχεί στο σχήμα 2.2 θα φανεί σχεδόν ο ίδιος, αλλά δεδομένου ότι οι STA θορύβου και LTA είναι μικρότεροι, λόγω της αφαίρεσης του DC, ο STA/LTA θα είναι πολύ υψηλότερος για το σήμα σεισμού και το γεγονός θα παραμείνει στην κατάσταση σκανδαλισμού για 50 s αντί 15 s (πίνακας 2.1). Η απόδοση μπορεί περαιτέρω να βελτιωθεί με το φιλτράρισμα. Το σήμα επιβάλλει έναν χαρακτηριστικό micro-seismic παρασιτικό θόρυβο, και αυτό δίνει την κύρια συμβολή στους STA και LTA πριν σκανδαλίσει. Με τη χρήση ενός band-pass φίλτρου από 5-10 Hz, η απόδοση βελτιώνεται περισσότερο (πίνακας 2.1) και ο σκανδαλισμός διαρκεί για 105 s.

Έτσι, το συμπέρασμα είναι ότι κάθε σκανδαλισμός πρέπει να έχει ένα ρυθμιζόμενο Band-Pass φίλτρο μπροστά από τον αλγόριθμο σκανδαλισμού, ο οποίος έχει και τη λειτουργία της αφαίρεσης του DC και να καταστήσει τον αλγόριθμο σκανδαλισμού ευαίσθητο στη ζώνη συχνότητας ενδιαφέροντος. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό με τα ευρέα σεισμόμετρα ζωνών, όπου τα μικρά σήματα σεισμού συχνά θάβονται σε κυρίαρχο 0.2-0.3 σεισμικό θόρυβο Hz και ένας σκανδαλισμός χωρίς ένα φίλτρο απλά δεν θα λειτουργούσε εκτός από τα μεγαλύτερα γεγονότα. Μερικά όργανα καταγραφής επιτρέπουν πολλές ρυθμίσεις σκανδαλισμού ώστε η διάφορη παράμετρος να θέτει για να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα.

Αυτό απαιτείται εάν π.χ. ένας σταθμός του ΒΒ πρέπει να σκανδαλίσει στους σεισμούς μικροϋπολογιστών, τα teleseismic Ρ-κύματα και τα κύματα επιφάνειας που κάθε ένα απαιτεί τα χωριστά φίλτρα, STA και LTA.

3. Αποθορυβοποίηση σεισμολογικών δεδομένων

3.1 Εισαγωγή

Κατά την διάρκεια της δημιουργίας ενός σεισμολογικού δικτύου η επιλογή των βέλτιστων σταθμών πεδίου είναι προβληματική. Δεν είναι ασυνήθιστο μία προεπιλεγμένη περιοχή σταθμού να παρουσιάζει κάποια ανεπιθύμητη διαταραχή στην καταγραφή σειсмоγραφήματος μετά την εγκατάσταση. Η κύρια διαταραχή που επηρεάζει την ποιότητα ενός σειсмоγραφήματος είναι ο περιβάλλον θόρυβος. Σ' αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιασθούν και θα συγκριθούν οι μέθοδοι για την απαλοιφή του θορύβου που βασίζονται σε συναρτήσεις κυματιδίων. Εκτός των δύο κύριων εφαρμογών που είναι απόλυτα σχετιζόμενες με την ποιότητα του σειсмоγραφήματος (P-wave detection and detection of microseismic signals) θα εξεταστούν πριν και μετά την εφαρμογή των κατάλληλων κυματικών απεικονίσεων αποθορυβοποίησης.

Για να αποκομίσουμε εκδηλώσεις χρόνων, επαρκής έκτασης ή άλλων χαρακτηριστικών από ένα σειсмоγράφημα, η συνηθισμένη διαδικασία αποθορυβοποίησης περιλαμβάνει την χρήση ενός pass-band φίλτρου. Αυτή η ομάδα φίλτρων είναι μηδενικής φάσης και είναι χρήσιμη σύμφωνα με τις ιδιότητες της φάσης αλλά η αποδοτικότητά τους μειώνεται όταν βρίσκονται παροδικά κοντά σε σεισμολογικά σήματα (Scherbaum, 1996). Μία εναλλακτική λύση είναι το Wiener φίλτρο το οποίο προτάθηκε από τον Douglas (1997). Αυτό το φίλτρο είναι ένα γραμμικό φίλτρο που επικεντρώνεται στην απαλοιφή των λαθών μέσου τετραγώνου ανάμεσα στο καταγεγραμμένο και αναμενόμενο σήμα. Το βασικό του μειονέκτημα είναι η προϋπόθεση ότι το σήμα και ο θόρυβος παραμένουν σταθερά. Αυτή η προϋπόθεση δεν ισχύει για σημαντικά σεισμικά σήματα των οποίων οι λύσεις αποθορυβοποίησης δεν προϋποθέτουν στασιμότητα σήματος. Οι λύσεις βασίζονται σε WT έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές σε προβλήματα αποθορυβοποίησης σε διάφορες περιοχές.

Εδώ θα παρουσιάσουμε πρόσφατα WT σχήματα αποθορυβοποίησης τα οποία θα εφαρμόζονται αργότερα σε σεισμικές ακολουθίες του Σεισμολογικού Δικτύου της Κρήτης. Τα περιεχόμενα αυτού του κεφαλαίου ξεκινούν με μελέτη των κανόνων κατωφλίου που συνεχίζεται με μελέτη κλασσικών κυματικών εκτιμήσεων. Μετά από αυτό, η Bayesian προσέγγιση στο κατώφλι κυματιδίων είναι επίσης υπό μελέτη και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη σύγκριση της τεχνικής αποθορυβοποίησης σημάτων προσομοίωσης.

3.2 Μη παραμετρική ανάλυση με χρήση κυματιδίων

Κάθε τύπος μέτρησης συνοδεύεται από θόρυβο. Η αποθορυβοποίηση είναι μια διαδικασία που στοχεύει στην εξομάλυνση των διακυμάνσεων στις τιμές των δεδομένων για να βγουν τουλάχιστον τα περισσότερα αντιπροσωπευτικά χαρακτηριστικά του μεγέθους του σήματος. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε τουλάχιστον ένα άγνωστο σήμα που αναπαριστάται από την $f(t_i)$ που υπολογίζεται ως:

$$y_i = f(t_i) + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.1)$$

όπου ε_i είναι ο τυχαίος θόρυβος με επίπεδο σ συνοδευόμενος από την μέτρηση.

Ο σκοπός κάθε μεθόδου αποθορυβοποίησης είναι να ελαχιστοποιήσει τις διαφορές ανάμεσα στο y_i και στο πραγματικό σήμα $f(t)$. Αν η $f(t)$ είναι γνωστή, τρέχοντας μια παραμετρική ανάλυση (π.χ. χρησιμοποιώντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων) η εκτίμηση της υποστροφής παραμέτρων μπορεί να επιτευχθεί. Όταν η υποκείμενη συνάρτηση $f(t)$ είναι άγνωστη (που είναι η περίπτωση στα σεισμικά σήματα) αυτή η διαδικασία ονομάζεται μη παραμετρική ανάλυση. Μία συνηθισμένη μη παραμετρική ανάλυση λύση είναι να εκφραστεί η άγνωστη συνάρτηση $f(t)$ ως σειρές Fourier και μετά να εκτιμηθούν οι συνιστώσες Fourier από τα μετρούμενα δεδομένα. Η επιτυχία με αυτή την προσέγγιση είναι υψηλά εξαρτώμενη από την προσέγγιση της βασικής συνάρτησης με τις σειρές Fourier. Μία βάση κατάλληλη μπορεί να είναι μία συνάρτηση η οποία έχει την ιδιότητα να προσεγγίζει ένα μεγάλο πακέτο από συναρτήσεις πιθανής απόκρισης χρησιμοποιώντας μόνο μερικούς όρους από τις επεκτάσεις Fourier. Σ' αυτό το σημείο είναι φανερό ότι τα κυματίδια μπορεί να είναι μία ομάδα από τις ζητούμενες συναρτήσεις βάσης αφού έχουν την ικανότητα να εκφράζουν μία ποικιλία συναρτήσεων με την χρήση ενός προκαθορισμένου πακέτου από τις βάσεις.

3.3 Άμεσοι κυματιδιακοί κανόνες κατώφλιου

Αφού δεν μπορούμε να κάνουμε εκ των προτέρων υποθέσεις για την συμπεριφορά σεισμολογικών δεδομένων είναι φανερό ότι οι σεισμικές μετρήσεις που έχουν αποθορυβοποιηθεί είναι ένα πρόβλημα μη παραμετρικής οπισθοδρόμησης. Μία αποτελεσματική προσέγγιση σε αυτού του τύπου τα προβλήματα ονομάζεται κυματιδιακό κατώφλι.

Εφαρμόζοντας τον WT στην εξίσωση 3.1 έχουμε

$$W_y = W_f + W_\varepsilon \quad (3.2)$$

Όσο το WT είναι ορθογώνιο, ο θόρυβος μετατρέπεται σε θόρυβο. Αν το $w_{j,k}$ είναι ο συντελεστής του κυματιδίου του W_f μπορούμε να γράψουμε

$$y_{j,k} = w_{j,k} + \sigma_{j,k} \quad (3.3)$$

Η συνάρτηση 3.3 δείχνει ότι οι συνιστώσες του κυματιδίου ενός σήματος με θόρυβο μπορεί να εκφραστούν ως αθόρυβοι συντελεστές συν το αθόρυβο.

Ο υπολογισμός απεικονίζεται σαν ένα κυματιδιακό κατώφλι που αποτελείται από τρία βασικά στάδια τα οποία επίσης περιγράφουν την εξίσωση 3.1:

1. Εφαρμογή του WT στα θορυβώδη στοιχεία προκειμένου να παραχθούν τα κυματίδια προσέγγισης και οι λεπτομέρειες τους (συντελεστές)
2. Με τη χρησιμοποίηση των κατώτατων ορίων, οι συντελεστές μειώνονται, ακυρώνοντας εκείνους που είναι κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο. Σε αυτή τη φάση οι συντελεστές θορύβου απαλείφονται.
3. Η άγνωστη συνάρτηση $f(t)$ υπολογίζεται μετά από το αντίστροφο WT των υπόλοιπων συντελεστών από το προηγούμενο στάδιο.

$$y \xrightarrow{WT} (c_{j_0,k}, d_{j,k}) \xrightarrow{THRESHOLDING} (c_{j_0,k}, \lambda \cdot (d_{j,k})) \xrightarrow{InverseWT} f$$

Σχήμα 3.1. Εκτίμηση συνάρτησης που χρησιμοποιεί κατώφλι.

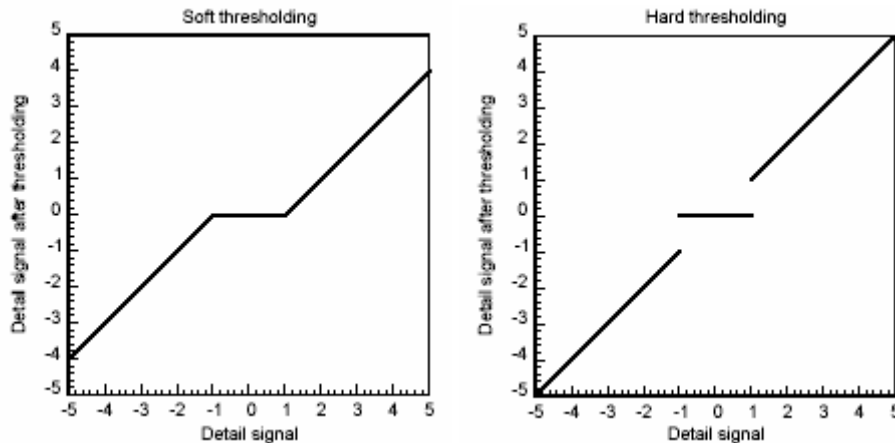
Όπως προαναφέρθηκε, οι συντελεστές λεπτομέρειας από το WT αντιπροσωπεύουν τις σχετικές αλλαγές του μετρημένου σήματος μέσω των κλιμάκων. Δεδομένου ότι ο θόρυβος είναι κυρίως διακυμάνσεις στο σήμα, αυτές θα απεικονιστούν με λεπτομέρειες στους συντελεστές μικρής κλίμακας (υψηλές συχνότητες). Για να μειωθεί ο θόρυβος, κάποιος μπορεί απλά να μειώσει ή να αποβάλει τους συντελεστές λεπτομέρειας των οποίων το μέγεθος είναι κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή κατώτατων ορίων. Αυτή η διαδικασία που βρίσκεται συνήθως στη βιβλιογραφία με το όνομα η συρρίκνωση κυματιδίων. Αυτή η ιδέα εισάγεται αρχικά από τον Donoho (1994,1995). Πρότεινε δύο προσεγγίσεις κατωφλίου : συναρτήσεις κατωφλίου ST (Soft Thresholding) και HT (Hard Thresholding). Το κριτήριο για αυτό το σχέδιο είναι να αντικατασταθούν οι συντελεστές λεπτομέρειας με μηδέν όποτε το μέγεθός του είναι μικρότερο από ένα προκαθορισμένο κατώτατο όριο λ . Η Συνάρτηση κατωφλίου(ST) ορίζεται ως:

$$d_{j,k}^S = \begin{cases} 0 & \text{if } |d_{j,k}| \leq \lambda \\ d_{j,k} - \lambda & \text{if } d_{j,k} > \lambda \\ d_{j,k} + \lambda & \text{if } d_{j,k} < -\lambda \end{cases} \quad (3.4)$$

Συνάρτηση κατωφλίου (HT) ορίζεται ως:

$$d_{j,k}^H = \begin{cases} 0 & \text{if } |d_{j,k}| \leq \lambda \\ d_{j,k} & \text{if } |d_{j,k}| > \lambda \end{cases} \quad (3.5)$$

Το ST είναι μια συνεχής συνάρτηση και ενεργεί κάτω από το πλαίσιο του κανόνα «προστασίας» ή «θανάτωσης» δεδομένου ότι η HT είναι μια ασυνεχής συνάρτηση όπου ενεργεί σύμφωνα με «συρρίκνωση» (από το ποσό λ) ή «θανάτωσης» τον κανόνα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1



Σχήμα 3.2. Συναρτήσεις Κατωφλίου ST και HT

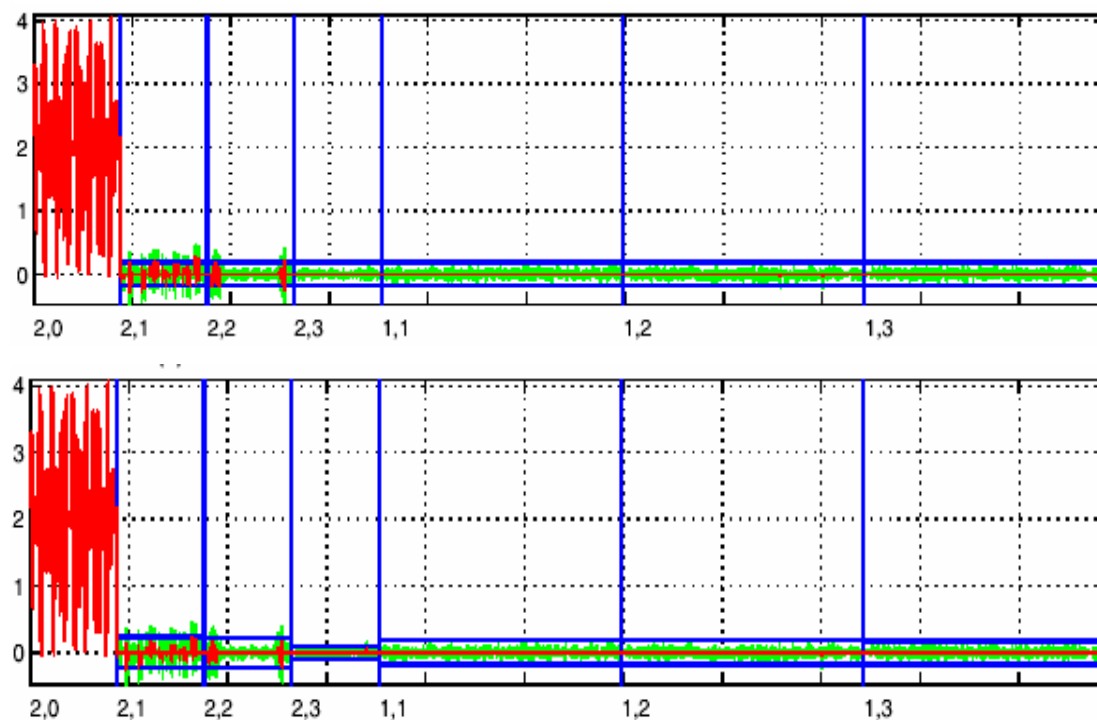
Η συνάρτηση κατωφλίου HT προτιμάται για τις εφαρμογές όπου το σήμα περιέχει τις αιχμές και τις ασυνέχειες δεδομένου ότι η ST προτιμάται για τα σήματα όπου η ομαλότητα του υπολογιζόμενου είναι το κύριο αντικείμενο. Η HT (λόγω της ασυνέχειάς της) θα μπορούσε να είναι πολύ ευαίσθητη στις μικρές αλλαγές των δεδομένων (Bruce & Gao, 1996). Επίσης οι απλές τιμές της HT παράγουν μεγάλη διαφορά στην κατ' εκτίμηση συνάρτηση. Προκειμένου να διορθωθούν τα ανωτέρω μειονεκτήματα προτείνονται μερικές λύσεις όπως το σταθερό κατώφλι (Bruce & Gao 1997) και μη αρνητικό garrotte κατώφλι (Gao, 1998). Αν και ξεπερνιούνται τα μειονεκτήματα της HT και της ST η παραγωγή σε δευτεροβάθμιες σύνθετες απαιτήσεις ενεργούν ανασταλτικά στην κατ' εκτίμηση συνάρτηση. Μια αρκετά καλή λύση είναι το ομαλά κομμένο κατώφλι απόλυτης απόκλισης (SCAD) που προτείνεται από τους Antoniadis & Fan (2001) που το όρισαν ως:

$$d_{j,k}^{SCAD} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k}) \max(0, |d_{j,k}| - \lambda) & \text{if } |d_{j,k}| \leq 2\lambda \\ \frac{(\alpha-1)d_{j,k} - \alpha\lambda \text{sign}(d_{j,k})}{\alpha-2} & \text{if } 2\lambda < |d_{j,k}| \leq \alpha\lambda \\ d_{j,k} & \text{if } |d_{j,k}| > \alpha\lambda \end{cases} \quad (3.6)$$

όπου το α προτείνεται να έχει τιμή κοντά στο 3.7. Στη μελέτη μας (μετά από πειράματα) πήραμε τα καλύτερα αποτελέσματα με μέσο όρο $\alpha=3.8$. Οι κανόνες SCAD δρουν κάτω από το πλαίσιο «προστασίας», «συρρίκνωσης» ή «θανάτωσης». Είναι μια τμηματική γραμμική συναρτηση και δεν δημιουργεί την υπερβολική απόκλιση όταν οι συνιστώσες του κυματιδίου είναι μεγάλες. Αυτό είναι ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό για τα πρώτα δευτερόλεπτα των σεισμικών καταγραφών όπου το εύρος αυξάνεται μονοτονικά.

3.4 Άμεσοι κυματιδιακοί εκτιμητές κατώφλιου

Το κατώφλι λ μπορεί να επιλεγεί χρησιμοποιώντας ποικίλες μεθόδους σύμφωνα με τις δεδομένες καταστάσεις. Μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: καθολικό κατώφλι και κατά κλίμακα κατώφλι. Το καθολικό κατώφλι σημαίνει ότι μια συγκεκριμένη τιμή λ εφαρμόζεται σε όλους στους συντελεστές $d_{j,k}$ ($j=j_0, \dots, j-1$ for $k=1, 2, \dots, 2^{j-1}$). Το κατά κλίμακα κατώφλι σημαίνει ότι μια ενδεχομένως διαφορετική τιμή λ θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε κάθε κλίμακα j . Μια χαρακτηριστική απεικόνιση και των δύο κατηγοριών φαίνεται στο σχήμα 3.3



Σχήμα 3.3. Καθολικό (άνω διάγραμμα) και κατά κλίμακα (κάτω διάγραμμα) κατώφλι επιπέδων για ένα σήμα που έχει αποσυντεθεί με κυματίδια

Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν την εκτίμηση του επιπέδου θορύβου σ . Μια κλασσική λύση στην εκτίμηση σ είναι να υπολογιστεί η τυπική απόκλιση μεταξύ των

τιμών του y_i έτσι ώστε η εκτίμηση να πραγματοποιηθεί στο πεδίο του χρόνου. Αυτό είναι αποδεκτό μόνο όταν είναι η υποκείμενη συνάρτηση $f(t_i)$ είναι χωρίς ασυνέχειες. Μια εναλλακτική επιτυχής προσέγγιση είναι να υπολογιστεί το σ στο πεδίο κυματιδίων (Donoho & Johnstone, 1994). Εδώ, το σ υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες του κυματιδίου του τελευταίου επιπέδου (του λεπτομερέστερου) επειδή αυτό είναι το επίπεδο που περιέχει τον περισσότερο θόρυβο από το σήμα. Η τιμή του δίνεται από:

$$\sigma = \frac{MAD(d_{j-1,k})}{0.6745} \quad (3.7)$$

όπου το MAD είναι η Μέση Απόλυτη Απόκλιση των τιμών του πλάτους απ'όλες τις συνιστώσες στ λεπτόμερέστερ επίπεδο. Ο παράγοντας 0.6745 κανονικοποιεί το σ προκειμένου να είναι κατάλληλος εκτιμητής.

3.4.1 Καθολικό Κατώφλι

Ο Donoho & Johnstone (1994) πρότειναν έναν minimax εκτιμητή για το f στην Εξίσωση 3.1 βασισμένο στις συναρτήσεις ST και HT καθώς επίσης και σε μια παράμετρο λ_n που λήφθηκε μέσω της ελαχιστοποίησης ενός θεωρητικού ανώτερου ορίου. Ορίζεται ως:

$$\lambda_U = \sigma \sqrt{2 \log n} \quad (3.8)$$

όπου σ μπορεί να ληφθεί όπως περιγράφηκε νωρίτερα και το n είναι ο αριθμός δειγμάτων.

Αυτό το κατώφλι καλείται καθολικό και τα κύρια πλεονεκτήματά του είναι ότι εξασφαλίζει σε κάθε δείγμα του WT στο οποίο η υποκείμενη συνάρτηση είναι μηδέν θα υπολογιστεί ως μηδέν (Antoniadis et.al, 2001). Επίσης, δεν εξαρτάται από την κλίμακα του κυματιδίου. Το κύριο μειονέκτημά του είναι ότι οδηγεί στις εκτιμήσεις που υποτιμούν την υποκείμενη συνάρτηση, δεδομένου ότι έχει την τάση να εξαλείφεται σε πολλές συνιστώσες ειδικά στις μικρότερες κλίμακες

3.4.2 Προσαρμοζόμενο Κατώφλι (Sureshrink)

Αυτό το σχήμα προτείνεται επίσης από τους Donoho & Johnstone (1995) και χρησιμοποιεί τις συνιστώσες του κυματιδίου σε κάθε επίπεδο j προκειμένου να επιλεγεί μια τιμή για το κατώφλι λ_S . Το αντικειμενικό κριτήριο κινδύνου του Stein (1981), (SURE) υιοθετείται προκειμένου να αποκτηθεί μια αντικειμενική εκτίμηση του I^2 κινδύνου.

Εάν στο επίπεδο j έχουμε n_j συντελεστές τότε το κατώφλι Sureshrink ορίζεται ως:

$$\lambda_S = \arg \min_{0 \leq t \leq \sqrt{2 \log(n_j)}} SURE(y_j, t) \quad (3.9)$$

Όπου

$$SURE(y_j, t) = n_j - 2 \sum_{k=1}^{n_j} I\{|y_{j,k}| \leq t \sigma_j\} + \sum_{k=1}^{n_j} \left\{ \frac{y_{j,k}}{\sigma_j} \wedge t \right\}^2 \quad (3.10)$$

Το μόνο μειονέκτημα του Sureshrink είναι ότι όταν οι συνιστώσες κυματιδίων χαρακτηρίζονται από αξιολογική διασπορά, ο θόρυβος που συνεισφέρουν οι πολλές συνιστώσες όταν το σήμα είναι μηδέν, υπερκεράζει την πληροφορία που συνεισφέρουν οι λίγες συνιστώσες εκεί όπου το σήμα δεν είναι μηδέν. Για να ξεπεραστεί αυτή η πρόσθετη περίπτωση προτείνεται (Donoho & Johnstone, 1995) μία υβριδική συνάρτηση Sureshrink (HS) που ορίζεται ως:

$$\lambda_j^{HS} = \begin{cases} \lambda_j^U & \text{if } \sum_{k=0}^{2^j-1} \hat{d}_{jk}^2 \leq \hat{\sigma}^2 2^{j/2} (2^{j/2} + j^{3/2}) \\ \lambda_j^S & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.11)$$

Η βασική ιδέα της HS είναι ότι εάν το σύνολο των συνιστωσών του κυματιδίου που υπάρχουν είναι διεσπαρμένες τότε η HS αντικαθίσταται από το Καθολικό Κατώφλι· διαφορετικά το κριτήριο SURE χρησιμοποιείται για να επιλέξει την τιμή λ .

3.4.3 Κατώφλι Διασταυρωμένης Επικύρωσης (CV)

Το κατώφλι Διασταυρωμένης Επικύρωσης είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί το προβλεπόμενο λάθος ενός συγκεκριμένου μοντέλου στα δεδομένα. Το λάθος πρόβλεψης μετρά την επιτυχία ταύτισης όταν προβλέπει ένα μελλοντικό δείγμα. Χρησιμοποιώντας όρους απόκλισης το λάθος πρόβλεψης ορίζεται ως:

$$P_{err} = E(y' - y'')^2 \quad (3.12)$$

Όπου y' είναι το μελλοντικό δείγμα και y'' είναι πρόβλεψη χρησιμοποιώντας ένα καθορισμένο μοντέλο. Μία προφανής λύση είναι να χρησιμοποιηθεί το μέσο τετραγωνικό λάθος (MSE) των υπολοίπων σαν μία εκτίμηση του P_{err} . Στην πράξη αποδεικνύεται ότι είναι μία πολύ αισιόδοξη προσδοκία επειδή χρησιμοποιούνται τα ίδια δεδομένα για την προσαρμογή και αξιολόγηση του μοντέλου απόκλισης, έτσι οδηγούμαστε σε μια υποεκτίμηση του P_{err} . Το CV χρησιμοποιεί ένα μέρος από τα δείγματα των δεδομένων για να εκτιμηθεί το μοντέλο απόκλισης ενώ τα εναπομένοντα δεδομένα χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί αν το υπολογιζόμενο μοντέλο είναι επαρκές. Ένας κλασικός αλγόριθμος για το CV παρουσιάστηκε από τους Efron & Tibshirani (1993):

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε n δείγματα δεδομένων (y_1, y_2, \dots, y_n) . Για κάθε y_i :

- Προσαρμογή του μοντέλου και έπειτα κατάργηση αυτού του δείγματος
- Υπολογισμός της προβλεπόμενης τιμής του δείγματος of i -th, \hat{y}_i
- Υπολογισμός $CV = n^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ σαν μία εκτίμηση του P_{err} .

Βασισμένος σε αυτή την ιδέα ο Nason (1994) πρότεινε ότι προκείμενου να δέχεται απευθείας το DWT, το αρχικό δεδομένο πρέπει πρώτα να χωριστεί σε δύο υποσύνολα ίδιου μεγέθους: το ένα να περιέχει τα ομαλώς κατανεμημένα δείγματα, και το άλλο, τα μη ομαλώς κατανεμημένα. Τα μη ομαλώς κατανεμημένα δείγματα χρησιμοποιούνται για προβλεφθούν τα ομαλώς κατανεμημένα και αντίστροφα. Πιο συγκεκριμένα, ο σκοπός είναι να υπολογιστεί το λ ελαχιστοποιώντας το λάθος του μέσου ολοκληρωμένου τετραγώνικο λάθος (MISE) ανάμεσα στο λ και την υποκείμενη συνάρτηση f , η οποία ορίζεται ως:

$$M(\lambda) = E \int \left[\hat{f}_\lambda(x) - f(x) \right]^2 dx \quad (3.13)$$

όπου το \hat{f}_λ είναι οι κυματιδιακοί εκτιμητές κατώφλιου της f στο μοντέλο όπως ορίζεται στην Εξίσωση 3.12, αν χρησιμοποιήσουμε το κατώφλι λ . Ο Εκτιμητής $M(\lambda)$ χρησιμοποιείται διότι η συνάρτηση f είναι άγνωστη. Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται είναι:

- Τα δείγματα y_i μαζί με τα μη ομαλώς κατανεμημένα είναι της μορφής αφαιρούμενων δεδομένων. Τα ομαλώς κατανεμημένα $m-1$ δείγματα επαναπροσδιορίζονται από $j=1$ σε 2^{m-1}
- Από τα επαναπροσδιοριζόμενα y_i μία εκτιμώμενη συνάρτηση \hat{f}_i^E υπολογίζεται
- Από τα μη ομαλώς αφαιρούμενα δεδομένα, μία παραποιημένη έκδοση αυτών υπολογίζεται ως:

$$\overline{y}_i^O = \begin{cases} \frac{y_{2j-1} + y_{2j+1}}{2} & \text{for } j = 1, \dots, \frac{n}{2} - 1 \\ \frac{y_1 + y_{n-1}}{2} & \text{for } j = \frac{n}{2} \end{cases} \quad (3.14)$$

- Αντικαθιστώντας στο προηγούμενο για \hat{f}_i^O και \overline{y}_i^E αντίστοιχα
- Μία εκτίμηση του $M(\lambda)$ υπολογίζεται ως:

$$M(\lambda) = \sum_{\xi} \left[\left(\hat{f}_{t,j}^E - \overline{y}_i^O \right)^2 + \left(\hat{f}_{t,j}^O - \overline{y}_i^E \right)^2 \right] \quad (3.15)$$

Το $M(\lambda)$ υπολογίζεται με την χρήση των $n/2$ δειγμάτων και επομένως χρειάζεται μία διόρθωση στο μέγεθος του δείγματος. Ο Nason (1995) χρησιμοποίησε μία ευριστική μέθοδο για να εκτιμήσει την απόρριψη λύσεων που δεν ικανοποιούν το κριτήριο του κατωφλίου διασταύρωσης ως:

$$\lambda_{CV} = \frac{\lambda_{\min}}{\sqrt{1 - \frac{\log 2}{\log n}}} \quad (3.16)$$

όπου $\lambda_{\min} = \arg \min_{\lambda \geq 0} M(\lambda)$

3.4.4 Πρόσέγγιση «Ελέγχου Πολλαπλής Υποθεσης»

Η ιδέα ότι το κυματιδιακό κατώφλι μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα πρόβλημα Πολλαπλής Υπόθεσης προτάθηκε από τους Abramovich & Benjamini (1995, 1996). Για κάθε ένα έλεγχο της κυματικής συνιστώσας d_{jk} εκτελείται η ακόλουθη υπόθεση:

$$H_0: d_{jk} = 0 \text{ against } H_1: d_{jk} \neq 0.$$

Αν το H_0 απορρίπτεται, το d_{jk} παραμένει αλλιώς απορρίπτεται.

Έστω ότι το D είναι ο αριθμός των συνιστωσών d_{jk} που διατηρούνται στο πρότυπο. Από εκείνα τα D , P παραμένουν σωστά και το $G=D-R$ λανθασμένα διατηρούνται. Σε αυτήν την περίπτωση το λάθος είναι $s=G/D$. Το λανθασμένο ποσοστό ανακαλύψεων (FDR) του d_{jk} αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη ποσότητα από τις εσφαλμένες συνιστώσες ανάμεσα στις τελικές που διατηρούνται αυτό ορίζεται ως the expectation (E) of s . Προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη πιθανή μεγιστοποίηση των d_{jk} συνιστωσών που θα διατηρήσουν στο πρότυπο σύμφωνα με τον κανόνα $Es < \alpha$, οι Abramovich & Benjamini (1995, 1996) πρότειναν τον ακόλουθο αλγόριθμο:

- Θέτουμε το $j_0=0$. Για κάθε $d_{jk} \{j=0,1,\dots,J-1; k=0,1,\dots,2^{j-1}\}$ υπολογίζουμε την 2—sided τιμή p_{jk} (για $H_0: d_{jk}=0$)

$$p_{jk} = 2 \left(1 - \Theta \left(\frac{|d_{jk}|}{\sigma} \right) \right)$$

όπου Θ είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής μιας συγκεκριμένης κανονικής τυχαίας μεταβλητής.

- Ταξινομούμε τις τιμές p_{jk} σύμφωνα με το μέγεθος τους (κάθε p_{jk} αντιστοιχεί σε ένα d_{jk})
- Βρίσκουμε ότι το $m = \max\left\{i : p_i < \left(\frac{i}{m}\right)a\right\}$. ($0.01 < a < 0.05$) Γι'αυτό το m

υπολογίζεται

$$\lambda_{FDR} = \sigma \cdot \Theta^{-1}\left(1 - \frac{P_m}{2}\right) \quad (3.17)$$

- Χρησιμοποιούμε την τιμή του κατώφλιου λ_{FDR} και εφαρμόζουμε το soft ή hard κατώφλι στο d_{jk}

3.4.5 Προσέγγιση «Ελέγχου Επαναλαμβανόμενης Υπόθεσης»

Το λ_{FDR} που αναφέραμε στην παράγραφο 3.4.4 είναι ένα γενικό κατώφλι που προέρχεται από μια υπόθεση που εξετάζει την επιδίωξη να περιλάβει όσα περισσότερα d_{jk} είναι δυνατό. Δεδομένου ότι αυτή η προσέγγιση δεν είναι επιτυχής με τα σήματα με την υποκείμενη συνάρτηση να καλύπτει λίγα χαρακτηριστικά γνωρίσματα από το θόρυβο, οι Odgen & Parzen (1996) προτείνουν μια εναλλακτική προσέγγιση ελέγχου υπόθεσης: τα d_{jk} θα συμπεριλαμβάνεται μόνο όταν υπάρχει δυνατή ένδειξη ότι απαιτούνται για την αναδημιουργία και το υπολογισμένο κατώφλι θα εξαρτάται από το επίπεδο. Έστω ότι X_1, X_2, \dots, X_s ($i=1, 2, \dots, s$) είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν το d_{jk} στο επίπεδο $j=j_0, \dots, J-1$ with $c=2^j$. Επίσης έστω ότι το Ξ_s αναπαριστά ένα γεμάτο υποσύνολο των δεικτών $\{1, 2, \dots, s\}$. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις η προσέγγιση «ελέγχου πολλαπλής υπόθεσης» μπορεί να εκφραστεί ως:

$$H_0 : \mu_i = 0, i \in \Xi_s \text{ αντιθέτως } H_1 : \mu_i \neq 0, \forall i \in \Xi_s, \mu_i = 0, \forall i \notin \Xi_s \quad (3.18)$$

όπου $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_s\}$ είναι το μέσο διάνυσμα.

Αν ο αριθμός των στοιχείων του Ξ_s είναι γνωστός, και ίσος με l , τότε η εξέταση της πρότυπης πιθανής αναλογίας θα είναι το άθροισμα των τετραγώνων του l μεγαλύτερα του X_i στοιχεία. Στην πράξη, το l είναι συνήθως άγνωστο έτσι μια προσέγγιση ελέγχου επαναλαμβανόμενης για το Ξ_s χρησιμοποιεί μόνο ένα στοιχείο που προτάθηκε από τους Odgen & Parzen (1996). Χρησιμοποιώντας αυτή την προσέγγιση οι κατάλληλες στατιστικές ελέγχου είναι οι μεγαλύτερες των διαμορφωμένων X_i στοιχείων. Το κρίσιμο σημείο a για αυτήν την κατανομή υπολογίζεται έπειτα ως:

$$x_s^a = \left\{ \Theta^{-1} \left(\frac{(1-\alpha)^{1/s} + 1}{2} \right) \right\}^2 \quad (3.19)$$

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- i. Έλεγχος $X_i^2 > x_s^a$
- ii. Αν το βήμα i) είναι ψευδές τότε δεν είναι καλή ένδειξη ότι υπάρχει σημαντικό σήμα μεταξύ των κυματιδιακών συνιστωσών. Το κατώφλι λ_{Rj} (στο παρών επίπεδο j) λαμβάνει την τιμή απόλυτου μεγαλύτερου υπόλοιπου X_i
- iii. Αν το βήμα i) είναι αληθές αυτό είναι μια ένδειξη ότι υπάρχει σημαντικό σήμα μεταξύ των κυματιδιακών συνιστωσών. Αφαιρώντας το μεγαλύτερο X_i , θέτει το $s=s-1$ και επιστρέφει στο βήμα i)

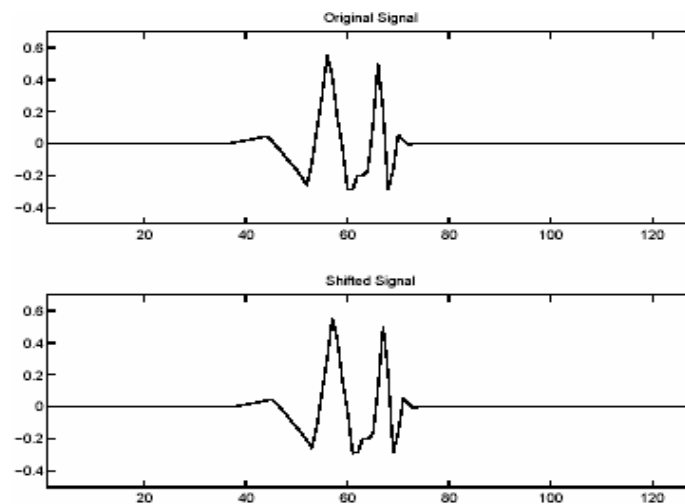
Ο παραπάνω αλγόριθμος μπορεί να ερμηνευτεί σαν ένας κανόνας ST χρησιμοποιώντας κατώφλι εξαρτώμενου επιπέδου και ονομάζεται *thrsda*. Το κρίσιμο σημείο είναι μία τιμή του a . Μια μικρή τιμή θα οδηγούσε σε ένα μικρό αριθμό των κυματιδιακών συνιστωσών συμπεριλαμβανομένου στην αναπαράσταση δημιουργώντας μια ομαλότερη εκτίμηση. Από την άλλη, μεγάλες τιμές δημιουργούν λιγότερο ομαλή εκτίμηση έως ότου ο αριθμός των περιλαμβανομένων κυματιδιακών συνιστωσών να είναι υψηλότερος. Σε αυτή τη μελέτη το $\alpha=0.06$.

3.4.6 Κατώφλι Αμετάβλητης Ολίσθησης

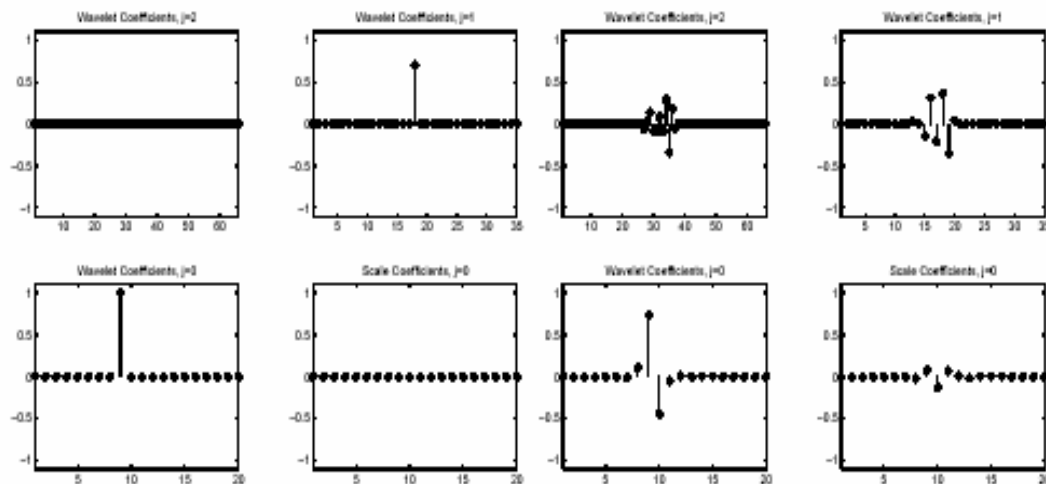
Το κυματιδιακό κατώφλι χρησιμοποιώντας DWT μερικές φορές κυριαρχείται από τεχνητά φαινόμενα διαφόρων ειδών. Αυτά τα αντικείμενα είναι προφανέστερα κοντά σε ασυνέχειες όπου εκτίθενται όπως τα ψευδό-Gibbs φαινόμενα, ως υπέρ ή υπό ύψωση σε συγκεκριμένες κλίμακες. Προκειμένου να βελτιωθεί η καταστολή αυτών των αντικειμένων οι Coifman & Donoho (1995) πρότειναν το κυματιδιακό κατώφλι αμετάβλητης ολίσθησης. Η βασική ιδέα είναι να διορθωθούν μη ευθυγραμμίσεις (ολισθήσεις) ανάμεσα σε σημαντικά χαρακτηριστικά της υποκείμενης συνάρτησης και χαρακτηριστικά της κυματιδιακής βάσης. Αυτή η ιδέα εφαρμόζεται βάζοντας μια σειρά ολισθήσεων και έπειτα με τον υπολογισμό του μέσου όρου.

Η έλλειψη σταθερότητας της μετατόπισης δεν είναι απαραίτητως ένα πρόβλημα για πολλές εφαρμογές αλλά η αποθορυβοποίηση δεν είναι μία από αυτές. Το πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι το DWT ενός σήματος X_i και το DWT μιας μετατοπισμένης εκδοχής του X_{i+n} είναι διαφορετικά. Είναι διαφορετικά όχι κάτω από

πλαίσιο της ομοιότητας των συνιστωσών αλλά κάτω από το πλαίσιο της *συνοχής*. Η συνοχή του σήματος είναι ένα μέτρο για το πώς παρουσιάζεται η συμπίεση του σήματος. Η απεικόνιση της συμπίεσης είναι αυτή που απαιτεί μερικές συνιστώσες για να περιγραφεί το σήμα. Διαφορά στην συνοχή σημαίνει ότι DWT του X_i χρειάζεται διαφορετικό αριθμό συνιστωσών από το DWT του X_{i+1} για να απεικονιστεί συμπιεσμένο. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παριστάνεται στο Σχήμα 3.4α και β



Σχήμα 3.4α. Δύο παρόμοια σήματα όπου το κάτω είναι η δεξιά μετατοπισμένη εκδοχή του πάνω



Σχήμα 3.4β. το DWT του αρχικού σήματος (τα τέσσερα αριστερά διαγράμματα) και το DWT της μετατοπισμένης εκδοχής (τα τέσσερα δεξιά διαγράμματα) (Yip et.al., 2001)

Ο λευκός θόρυβος είναι, γενικά, μη συνεκτικός. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει απεικόνιση σε ποιον λευκό θόρυβο μπορεί να συμπιεστεί συγκεκριμένα. Βασιζόμενοι σε αυτή την παρατήρηση, μπορούμε να πούμε ότι μια επιτυχημένη προσέγγιση αποθορυβοποίησης είναι αυτή που διατηρεί το συνεκτικό κομμάτι και απορρίπτει το μη

συνεκτικό κομμάτι ενός δείγματος σήματος. Για περιοδικά σήματα οι μετασχηματισμοί Fourier παρέχουν αρκετά σαφείς απεικονίσεις συμπίεσης. Για μη περιοδικά σήματα και ακόμα περισσότερο για μη στάσιμα σήματα, η FT υστερεί. Εδώ είναι όπου έρχεται το DWT για να συμπληρώσει αυτό το κενό αλλά χωρίς να είναι το απόλυτο εργαλείο. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.4α και β η συνοχή του DWT από ένα σήμα εξαρτάται απόλυτα από την χρονική ολίσθηση του σήματος. Με άλλα λόγια υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ότι η εκδοχή ενός σήματος με χρονική ολίσθηση να είναι πιο συνεκτική (σε σχέση με την απεικόνιση του DWT) από το αρχικό σήμα. Είναι επόμενο λοιπόν, να υποθέσουμε η διαδικασία αποθορυβοποίησης μπορεί να βελτιωθεί εάν βρεθεί μία εκδοχή του σήματος με τη βέλτιστη μετατόπιση που να παρουσιάζει την πιο συνεκτική απεικόνιση, διότι γίνεται αποθορυβοποίηση του συνεκτικού σήματος και μετά αποσυμπιέζεται αυτό. Οι αλγόριθμοι που μπορούν να βρουν αυτή την βέλτιστη μετατόπιση είναι πολλοί και δεν υπάρχει ένας γενικός συμπίεστης που μπορεί να εφαρμοστεί παντού.

Η πρόταση των Coifman & Donoho (1995) είναι βασισμένη στην αποθορυβοποίηση όλων των πιθανών μετατοπίσεων και μετά υπολογίζουν τον μέσο όρο. Έστω ότι το S_h απεικονίζει τον χειριστή συμπίεσης. Για ένα σήμα $f(k) \{k=1,2,\dots,n\}$ $S_h f(k)=f(k+h \text{ mod } n)$. Το αποθορυβοποιημένο σήμα \hat{f} χρησιμοποιώντας το αμετάβλητο κυματιδιακό κατώφλι μετάφρασης λ_{Γ} που ορίζεται ως:

$$\hat{f} = \frac{1}{n} \sum_{h=0}^{n-1} (S_h^{-1} \cdot W_f^{-1}) \lambda_{\Gamma} (W_f S_h) f \quad (3.20)$$

όπου το W_f και το W_f^{-1} είναι το αποσυμπιεσμένο DWT και το αντίστροφο του DWT της f αντίστοιχα.

3.7 Μέτρα απόδοσης

Για να μετρηθεί η απόδοση των διαφόρων μεθόδων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, τα ακόλουθα κριτήρια χρησιμοποιήθηκαν (όπου οι $f(t_i)$ και $g(t_i)$ απεικονίζουν το θορυβώδες και αποθορυβοποιημένο πειραματικό στοιχείων αντίστοιχα):

- Αναλογία Σήματος Προς Θορύβου για συνθετικό σήμα (SNR_{SYN}).

$$SNR_{SYN} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N |f(t_i)|^2}{\sum_{i=1}^N |f(t_i) - g(t_i)|^2} \right) [db] \quad (3.34)$$

- Μέσο Τετραγωνικό Λάθος (MSE)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f(t_i) - g(t_i)|^2 \quad (3.35)$$

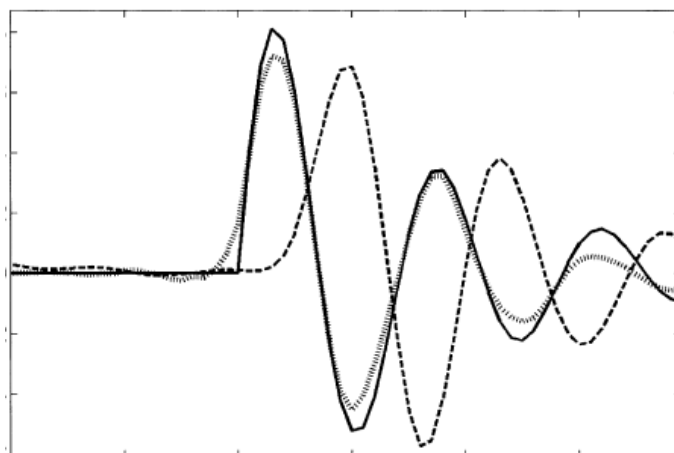
Τα παραπάνω μέτρα χρησιμοποιούνται ευρέως στις μελέτες αποθορυβοποίησης και η πληροφορία που παράγεται μπορεί να χαρακτηριστεί ως “ποσοτική” αφού παρέχουν τις αριθμητικές αποδείξεις για την απόδοση της μεθόδου αποθορυβοποίησης. Η “ποσοτική” προσέγγιση απαιτεί μέτρα τα οποία μπορούν να εξετάσουν την επιτυχία κάποιας μεθόδου ανάλογα με την ικανότητα της να διατηρεί την μορφή του σεισμικού σήματος. Πιο συγκεκριμένα, αυτό είναι πολύ ενδιαφέρον να διατηρεί τη μορφή P σεισμικής φάσης στην άφιξη της (P άφιξη) εφόσον αυτό είναι το κλειδί για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την τοποθεσία ενός σεισμού, π.χ. τις συντεταγμένες του επίκεντρου και το χρόνο προέλευσης του σεισμικού γεγονότος μαζί με την λειτουργία του σεισμολογικού δικτύου, συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και δομή της γης. Για αυτό το λόγο, τρία ακόμα μέτρα απόδοσης θα χρησιμοποιηθούν:

- *Καθυστέρηση του κύματος P - Δt_p* ανάμεσα σε αποθορυβοποιημένο και αρχικό σήμα
- *Συμμετρικό Οπτικό Μέτρο λάθους (SE_2)*. Στοχεύει στην μέτρηση της απόστασης των γραφημάτων με ένα γραφικό τρόπο. Προτάθηκε από τους Marron & Tsybakon (1995). Αρχικά το “ασυμμετρικό οπτικό λάθος” ορίζεται ως:

$$VE_2(g, f) = \left(\int_a^b d((t, f(t)), G_g) \right)$$

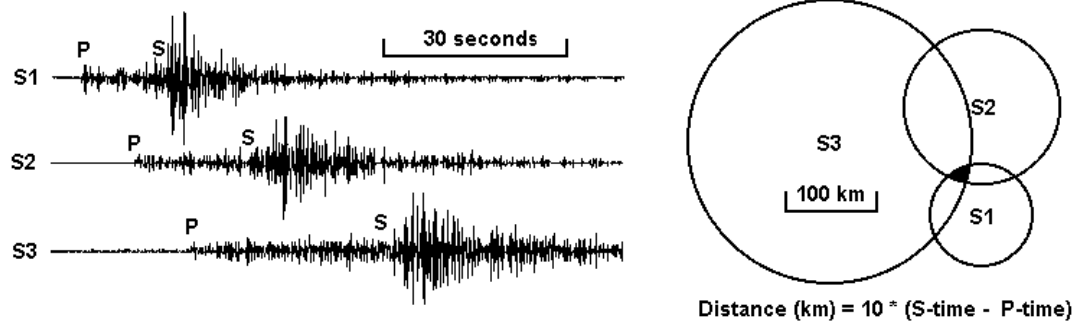
- *Διαφορά εύρους κυμάτων S - ΔA_s* . Αυτό είναι σημαντικό αφού το πλήθος των κυμάτων S χρησιμοποιείται υπολογισμούς μεγέθους (π.χ. τοπικό μέγεθος M_L).

Είναι γνωστό ότι τα συμβατικά φίλτρα παρουσιάζουν κάποια καθυστέρηση στο αποτέλεσμα του σήματος στις λανθασμένες χρονικές αφίξεις (Scherbaum, 1996). Γενικά, οι μέθοδοι αποθορυβοποίησης κυματιδίων βελτιώνουν αυτό το μειονέκτημα και όπως φαίνεται από τον Πίνακα 3.9 υπάρχουν μικρές διαφορές ανάμεσα τους. Μια εικόνα αυτής της περίπτωσης φαίνεται στο Σχήμα 3.13, όπου τρία αποθορυβοποιημένα σήματα επικαλύπτονται στο αρχικό έτσι ώστε να βγει μια απεικόνιση των διαφορών t_p .

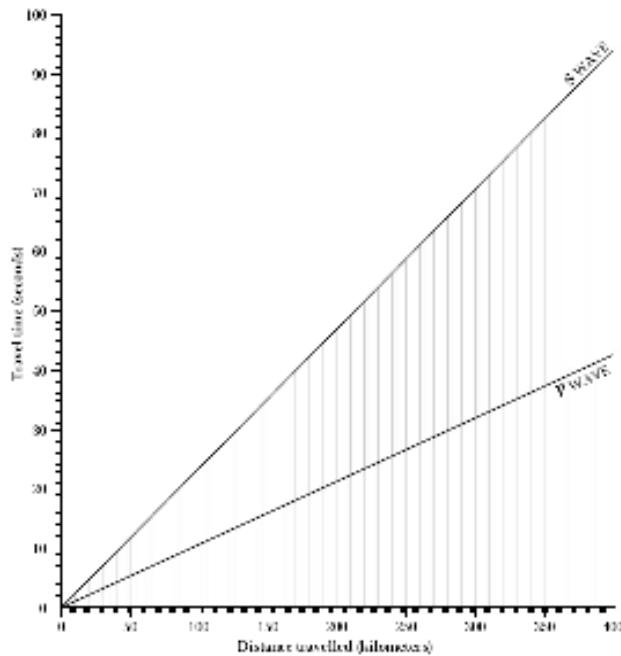


Σχήμα 3.6. Χρονικές διαφορές για την άφιξη του κύματος P ανάμεσα στο τεχνητό σήμα (έντονη μαύρη γραμμή), αποθρομβωποιημένο σήμα μετά το φιλτράρισμα με ένα Chebyshev τύπου I φίλτρο (λεπτή μαύρη διακεκομμένη γραμμή) και αποθρομβωποιημένο σήμα μετά το φιλτράρισμα μια κυματιδιακή μέθοδο (TI-H) (χοντρή γκρι διακεκομμένη γραμμή).

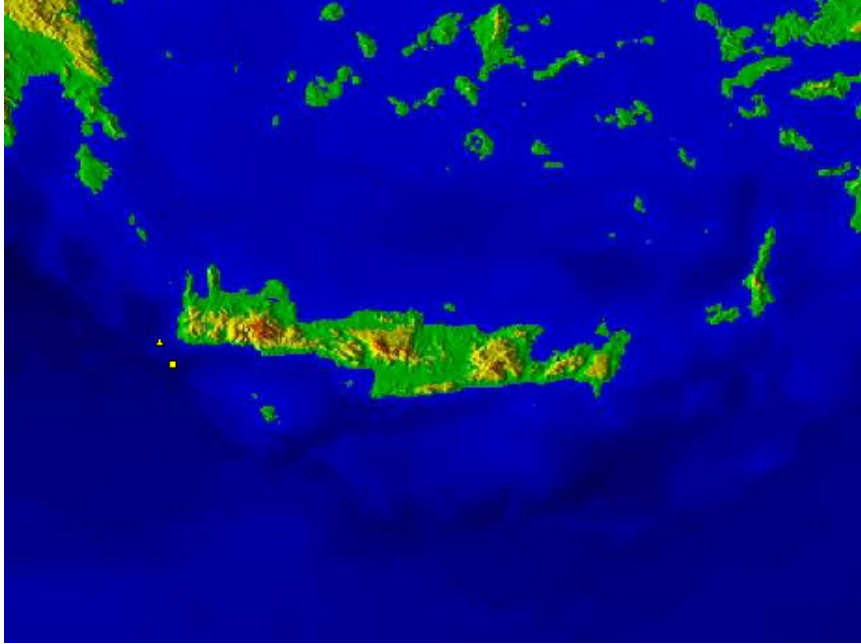
Αυτή η χρονική διαφορά μπορεί να δημιουργήσει ένα σημαντικό λάθος στην εκτίμηση της περιοχής του σεισμού. Στην πλειονότητα των σημερινών σεισμικών δικτύων η τοποθεσία εκτιμάται χρησιμοποιώντας την κυκλική μέθοδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Η απόσταση του συμβάντος για κάθε σταθμό υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας με 10 την διαφορά μεταξύ των αφίξεων του κύματος S και του κύματος P και έπειτα αντιστοιχίζοντας αυτή την χρονική διαφορά της απόσταση με την χρήση γραφημάτων travel-time, όπως αυτό στο Σχήμα 3.8. Είναι περισσότερο από προφανές ότι οι χρονικές διαφορές που παράγονται από το φιλτράρισμα μπορούν να αλλάξουν την εκτίμηση του επίκεντρου πάνω κάτω με κάποια χιλιόμετρα. Ένα κλασικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι η διαφορά στην περιοχή που δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τα σειсмоγραφήματα (από τους 3 σταθμούς) στο Σχήμα 3.6. Αυτή η περίπτωση παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.9 όπου η εκτιμώμενη περιοχή από τις καταγραφές των τριών σταθμών οι οποίες φιλτράρονται με το φίλτρο Chebyshev τύπου I που χαρακτηρίζεται σημαντικά από την σωστή τοποθεσία (όπως αυτή η γνωστοποίηση από άλλα σεισμολογικά δίκτυα, EMSC και AUTH).



Σχήμα 3.7. Τοποθεσία χρησιμοποιώντας την κυκλική μέθοδο. Σταθμοί S1, S2, S3 καταγραφή ενός σεισμού (αριστερά). Το εκτιμώμενο επίκεντρο εντοπίζεται στο εσωτερικό της μαύρης κοινής περιοχής των τριών κύκλων (δεξιά)

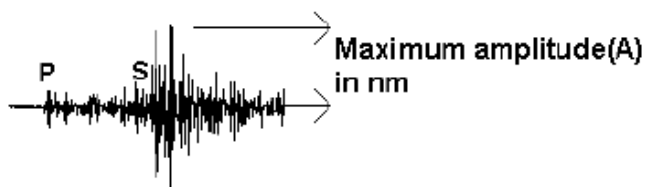


Σχήμα 3.8. Γράφημα Travel time



Σχήμα 3.9. Διαφορά περιοχής επίκεντρου (τρίγωνο: σωστή τοποθεσία, τετράγωνο: λάθος τοποθεσία).

Είναι επίσης σημαντικό το μέγεθος της διαφοράς που πιθανόν μπορεί να παραχθεί φιλτράροντας επειδή το μέγιστο μέγεθος σε ένα σεισμόγραμμα χρησιμοποιείται την εκτίμηση του μεγέθους του σεισμού και συγκεκριμένα στο τοπικό μέγεθος Ρίχτερ (Lee & Wallace, 1995) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10



$$\text{Magnitude} = \log(A) + 2.8 \log(\text{distance}) - 5.9$$

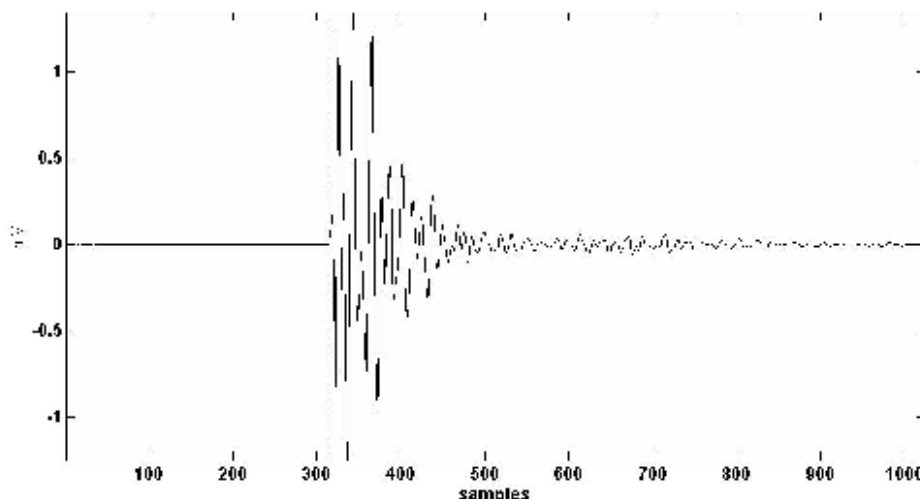
Σχήμα 3.10. Καθοριστικό μέγεθος χρησιμοποιώντας το μέγιστο πλήθος των S κυμάτων

3.8 Παράδειγμα με συνθετικά δεδομένα

Σε αυτό το κεφάλαιο όλες οι εξεταζόμενες μέθοδοι θα τεθούν σε μια ομάδα γνωστών σεισμολογικών σημάτων τα οποία είναι αλλοιωμένα από τεχνητό θόρυβο. Αυτή η σύγκριση θα δείξει την εκτέλεση της κάθε μεθόδου και παράλληλα θα μας οδηγήσει στην βελτιστοποίηση για μερικές κρίσιμες παραμέτρους για κάθε μέθοδο όταν απαιτείται.

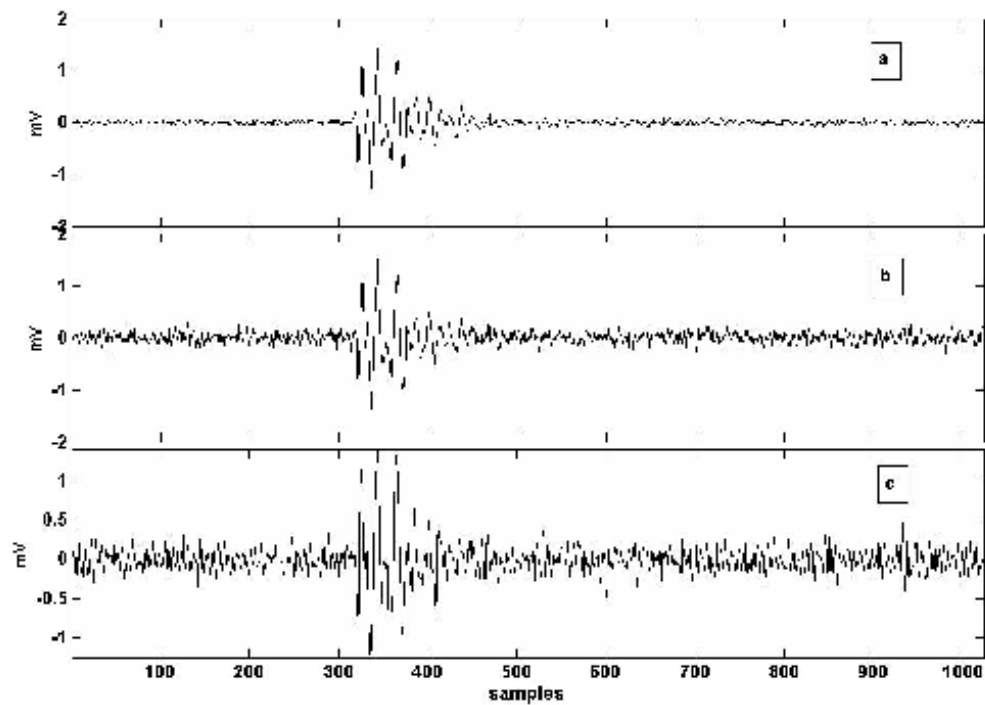
3.8.1 Περιγραφή των συνθετικών σημάτων

Το αρχικό σήμα (Σχήμα 3.11) είναι ένα σειсмоγράφημα που ακολουθεί την κλασσική συμπεριφορά των καταγεγραμμένων σειсмоγραφημάτων στο Σεισμολογικό Δίκτυο της Κρήτης (SNC από εδώ και πέρα).



Σχήμα 3.11. Σύνθετικό σεισμικό σήμα. Ο χρόνος άφιξης των P κυμάτων (στο δείγμα 315) όπως φαίνεται στην τονισμένη γραμμή.

Προκειμένου να ερευνηθεί η ισχύς των προτεινόμενων τεχνικών η σεισμική καταγραφή στο Σχήμα 3.11 μολύνεται τυχαία με διαφορετικούς τύπους θορύβου: α) Γκαουσιανός λευκός θόρυβος, β) έγχρωμος θόρυβος γ) περιβαλλοντικός θόρυβος που καταγράφεται από τους σεισμικούς σταθμούς του SNC. Η μόλυνση εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας διαφορετικών επιπέδων SNR (από -10 db έως $+30$ db). Το SNR του αρχικού σήματος προσδιορίζεται ανάμεσα σε τμήμα πριν το συμβάν (0-300 δείγματα) και μετά το συμβάν (300-600δείγματα). Κάθε σήμα κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας την διάταξη XXn όπου το XX δηλώνει την φύση του προστιθέμενου θορύβου (GN: Γκαουσιανός άσπρος, CL: έγχρωμος θόρυβος, AQ: θόρυβος χωρίς αιχμές, AS: πραγματικός θόρυβος με αιχμές) και το n προσδιορίζει των αύξοντα αριθμό. Τα Σχήματα 3.12a, 3.12b και 3.12 d παρουσιάζουν τρία τυπικά μολυσμένα σήματα θορύβου και ο Πίνακας 3.1 συνοψίζει τον κατάλογο των σημάτων που θα χρησιμοποιηθούν.



Σχήμα 3.12. Η μόλυνση του Σεισμικού σήματος με διαφορετικούς τύπους θορύβου. Το διάγραμμα *a* είναι ένας θόρυβος τύπου CL, το διάγραμμα *b* είναι ένας θόρυβος τύπου GN και το διάγραμμα *c* είναι ένας θόρυβος τύπου AQ (δείτε το κείμενο για λεπτομέρειες).

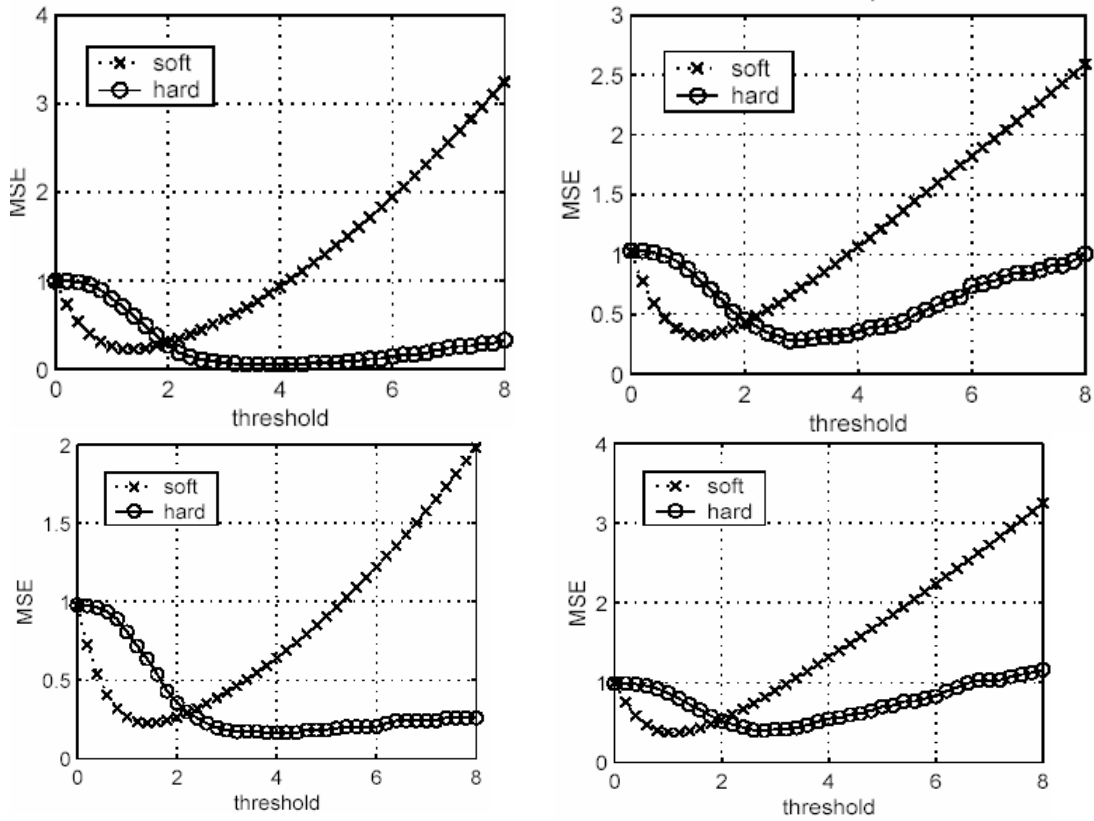
Πίνακας 3.1. Κατάλογος των σεισμικών σημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη προσομοίωσης

	Type of noise	SNR (db)	Acronym
1	Θόρυβος περιβάλλοντος με αιχμές	-10	AS1
2	Εγχρωμος	-9	CL1
3	Θόρυβος περιβάλλοντος χωρίς αιχμές	-8	AQ1
4	λευκός Γκαουσιανός	-7	GN1
5	Θόρυβος περιβάλλοντος με αιχμές	-6	AS2
6	Εγχρωμος	-5	CL2
7	Θόρυβος περιβάλλοντος χωρίς αιχμές	-4	AQ2
8	λευκός Γκαουσιανός	-3	GN2
9	Θόρυβος περιβάλλοντος με αιχμές	-2	AS3
10	Εγχρωμος	-1	CL3
11	Θόρυβος περιβάλλοντος χωρίς αιχμές	0	AQ3
12	λευκός Γκαουσιανός	1	GN3
13	Θόρυβος περιβάλλοντος με αιχμές	2	AS4
14	Εγχρωμος	3	CL4
15	Θόρυβος περιβάλλοντος χωρίς αιχμές	4	AQ4
16	λευκός Γκαουσιανός	5	GN4
17	Θόρυβος περιβάλλοντος με αιχμές	6	AS5
18	Εγχρωμος	7	CL5
19	Θόρυβος περιβάλλοντος χωρίς αιχμές	8	AQ5
20	λευκός Γκαουσιανός	9	GN5
21	Θόρυβος περιβάλλοντος με αιχμές	10	AS6
22	Εγχρωμος	12	CL6
23	Θόρυβος περιβάλλοντος χωρίς αιχμές	14	AQ6
24	λευκός Γκαουσιανός	16	GN6
25	Θόρυβος περιβάλλοντος με αιχμές	18	AS7
26	Εγχρωμος	20	CL7
27	Θόρυβος περιβάλλοντος χωρίς αιχμές	24	AQ7
28	λευκός Γκαουσιανός	28	GN7

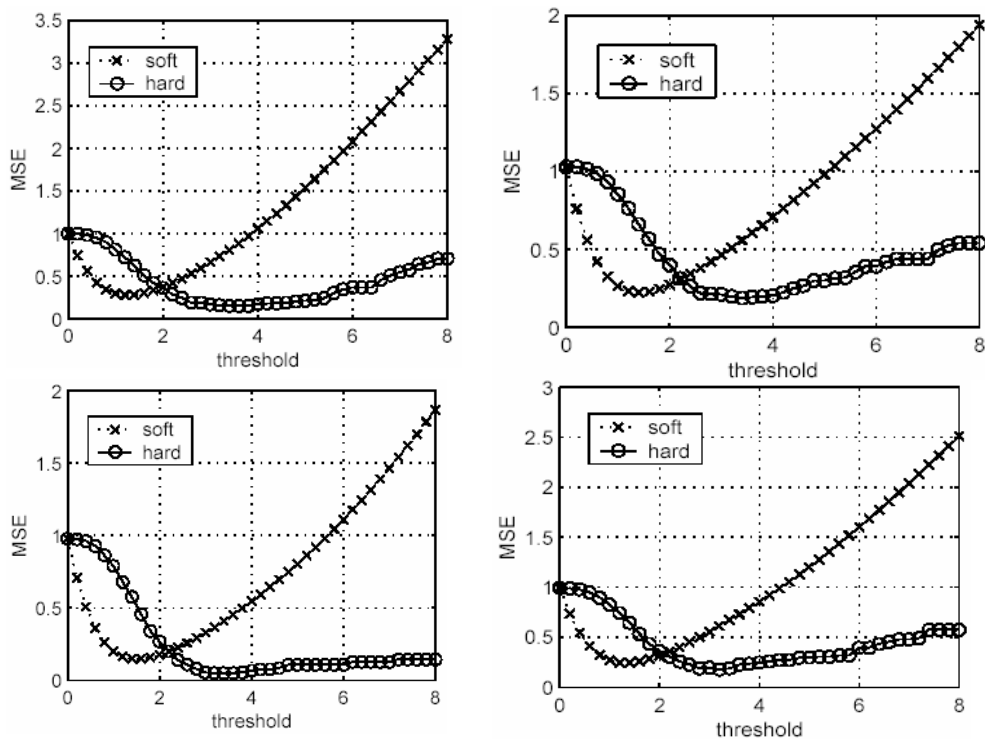
3.8.2 Η επίδραση του κανόνα κατωφλίου

Στην παράγραφο 3.3 πραγματεύονται τρεις κανόνες κατωφλίου: ST, HT και SCAD. Σε αυτή την υποενότητα η εκτέλεση της κυματιδιακής αποθορυβοποίησης σε εκτιμήσεις της τιμής κατωφλίου θα αξιολογηθεί. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές των ST και HT θα εξεταστούν σύμφωνα με το MSE έτσι ώστε να αξιολογήσουν την απόδοση στα διαφορετικά κατώφλια.

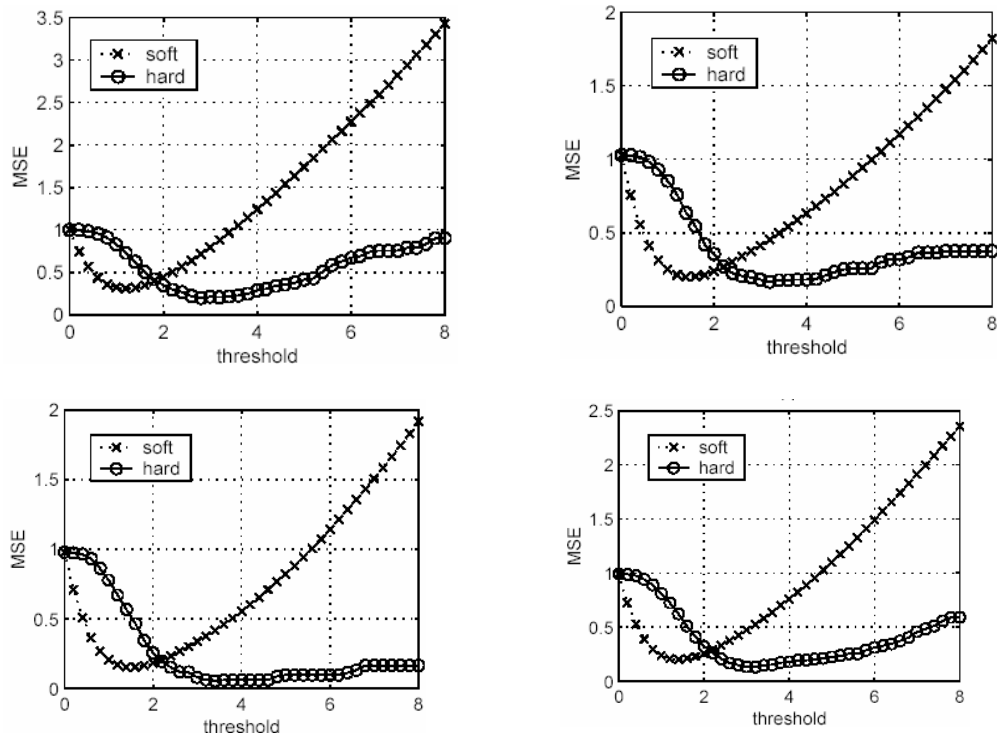
Θα εξεταστούν οι κανόνες των ST και HT με τιμές από 0 έως 8. Το SCAD δεν συμπεριλαμβάνεται διότι στην πράξη χρησιμοποιείται περισσότερο ως ένας εκτιμητής κατωφλίου παρά σαν κανόνας κατωφλίου. Η αποθορυβοποίηση εκτελείται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη βάση: Haar, D(4), D(6), C(6) και LA(8). Τα σήματα με θόρυβο είναι: AQ1, GN3, AQ5 και CL6. Τα αποτελέσματα της τιμής κατωφλίου έναντι του MSE φαίνονται στα Σχήματα 3.8 μέχρι και 3.12.



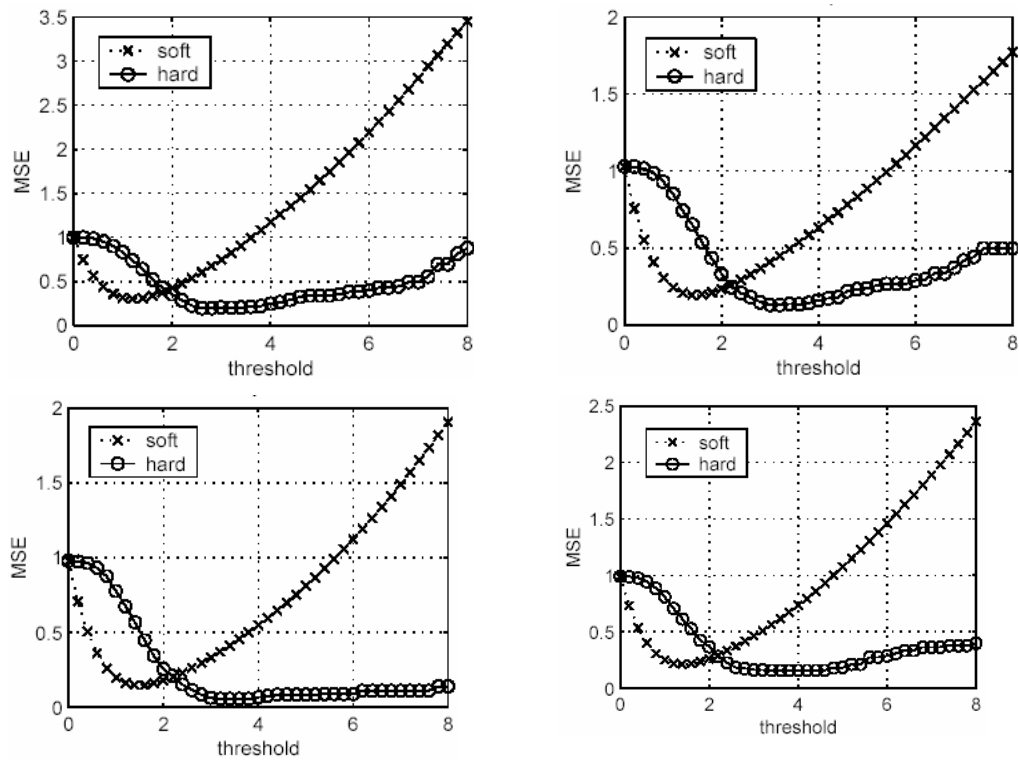
Σχήμα 3.8 Αξιολόγηση της απόδοσης της αποθρομβοποίησης χρησιμοποιώντας την βάση Haar για το GN3 (πάνω αριστερά), CL6 (κάτω αριστερά), AQ1(πάνω δεξιά) και AQ5 (κάτω δεξιά) (Ηλιούρις, 2008)



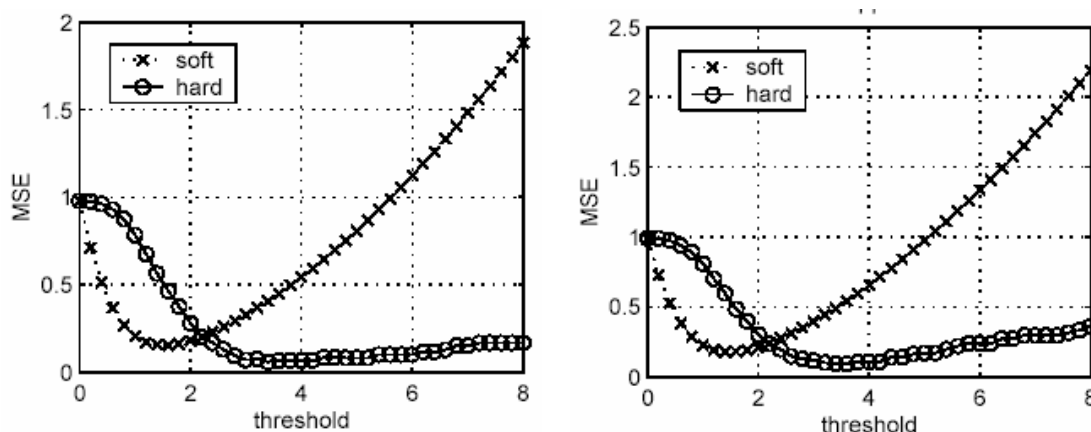
Σχήμα 3.9 Αξιολόγηση της απόδοσης της αποθρομβοποίησης χρησιμοποιώντας την βάση D(4) για το GN3(πάνω αριστερά),CL6 (κάτω αριστερά),AQ1(πάνω δεξιά) και AQ5(κάτω δεξιά) (Ηλιούρις, 2008)



Σχήμα 3.10 Αξιολόγηση της απόδοσης της αποθρομβοποίησης χρησιμοποιώντας την βάση D(6) για το GN3 (πάνω αριστερά), CL6 (κάτω αριστερά), AQ1(πάνω δεξιά) και AQ5 (κάτω δεξιά) (Ηλιούρις, 2008)



Σχήμα 3.11 Αξιολόγηση της απόδοσης της αποθρομβοποίησης χρησιμοποιώντας την βάση C(6) για το GN3 (πάνω αριστερά), CL6 (κάτω αριστερά), AQ1(πάνω δεξιά) και AQ5 (κάτω δεξιά) (Ηλιούρις, 2008)



Σχήμα 3.12 Αξιολόγηση της απόδοσης της αποθορυβοποίησης χρησιμοποιώντας την βάση LA(8) για το GN3 (πάνω αριστερά), CL6 (κάτω αριστερά), AQ1(πάνω δεξιά) και AQ5 (κάτω δεξιά) (Ηλιούπης, 2008)

Σε κάθε περίπτωση το MSE ανάμεσα στο αρχικό και το αποθορυβοποιημένο σήμα υπολογίζεται και τα αποτελέσματα βρίσκονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.2

Πίνακας 3.2. Τα καλύτερα αριθμητικά κατώφλια βρέθηκαν στα όρια του MSE των αποθορυβοποιημένων σημάτων

<i>Basis</i>	Signal AQ1		Signal AQ5		Signal GN3		Signal CL3	
	<i>Hard</i>	<i>Soft</i>	<i>Hard</i>	<i>Soft</i>	<i>Hard</i>	<i>Soft</i>	<i>Hard</i>	<i>Soft</i>
Haar	3.8	1.4	2.8	1.2	3.4	1.4	2.8	1.2
D(4)	3.4	1.6	3.2	1.4	3.4	1.2	3.4	1.4
D(6)	3.4	1.6	3.2	1.4	2.8	1.2	3.2	1.4
C(6)	3.2	1.4	3.4	1.4	2.6	1.2	3.2	1.4
LA(8)	3.4	1.6	3.4	1.4	2.8	1.2	3.1	1.4

3.8.3 Η επίδραση της βάσης DWT

Μια άλλη επιλογή που επηρεάζει συνολικά την επίδοση της αποθορυβοποίησης, εκτός του κατωφλίου, είναι η επιλογή της βάσης DWT που χρησιμοποιείται για την αποσύνθεση των σημάτων. Σε αυτό το σημείο η επίδραση της βάσης DWT θα εκτιμηθεί.

Οι ρυθμίσεις που θα χρησιμοποιηθούν για αυτή την προσομοίωση είναι:

- Τα αρχικά και με θόρυβο σήματα είναι τα ίδια όπως στην παράγραφο 3.8.2
- Σε κάθε διαδικασία αποθορυβοποίησης, θα χρησιμοποιηθεί το καλύτερο κατώφλι (όπως λαμβάνεται μέσα στην παράγραφο 3.8.1) .
- Η αξιολόγηση θα μετρηθεί στα όρια του MSE

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3

Πίνακας 3.3. Το MSE των αποθρομβοποιημένων σημάτων, από τα ST & HT, με διαφορετική βάση DWT.

<i>Basis</i>	Σήμα RQ1		Σήμα RQ5		Σήμα GN3		Σήμα CL3	
	<i>Hard</i>	<i>Soft</i>	<i>Hard</i>	<i>Soft</i>	<i>Hard</i>	<i>Soft</i>	<i>Hard</i>	<i>Soft</i>
Haar	0.163	0.2263	0.4014	0.3732	0.0587	0.2264	0.2761	0.3215
D(4)	0.0472	0.1482	0.1771	0.2438	0.1557	0.2785	0.1878	0.2250
D(6)	0.0518	0.1527	0.1328	0.2001	0.1897	0.2471	0.1875	0.2081
C(6)	0.05541	0.1475	0.1559	0.2118	0.1987	0.3021	0.1987	0.2878
LA(8)	0.05146	0.1430	0.09931	0.1228	0.1554	0.2417	0.1331	0.1839

Η απάντηση στην προφανή ερώτηση “γιατί μία βάση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλα;” είναι ότι ο θόρυβος εμφανίζεται σε συνιστώσες DWT μικρών κλιμάκων και το μέγεθος είναι ο χαρακτηριστικός παράγοντας. Επομένως, είναι φανερό ότι όσο πιο συμπυκνωμένη είναι η ενέργεια του σήματος σε μικρό κομμάτι των συνιστωσών DWT, τόσο πιο εύκολα θα αναγνωριστεί το σήμα και τα στοιχεία του θορύβου. Σε περιπτώσεις όπου οι συνιστώσες του DWT του σήματος είναι μικρές και ευρέως αναπτυγμένες, αυτές οι συνιστώσες συνδυάζονται με αυτές του θορύβου και τη φτωχή εκτέλεση επίδοσης των σχεδίων αποθρομβοποίησης κυματιδίων. Άρα η καλύτερη βάση όπως ερμηνεύεται από τον Πίνακα 3.3 δίνει τις αντίστοιχες κατηγορίες τους των σημάτων με την περισσότερη συγκεντρωμένη ενέργεια DWTs.

3.8.4 Η εφαρμογή της Κυματιδιακής Αποθρομβοποίησης σε Παραδείγματα Σεισμολογικών Σημάτων

Τα σήματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 θα αποθρομβοποιηθούν χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που περιγράφηκαν νωρίτερα. Για την ευκολία της αναφοράς αυτές οι μέθοδοι θα εμφανίζονται στον Πίνακα 3.4 μαζί με τον κανόνα κατωφλίου. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 3.5

Πίνακας 3.4. Τα ακρωνύμια για τις ομάδες των μεθόδων αποθουροποίησης που χρησιμοποιήθηκαν.

A/A	Ακρωνύμιο	Τύπος εκτιμητή	Κανόνας Κατωφλίου
1	SCAD	SCAD	-
2	SURE	Sure (Classical)	-
3	HYBSURE	Sure (Hybrid)	-
4	CV-H	Cross Validation	Hard
5	CV-S	Cross Validation	Soft
6	MINS	Minimax	Soft
7	MINH	Minimax	Hard
8	TI-H	Translation Invariant	Hard
9	TI-S	Translation Invariant	Soft
10	THRSDA	Hypothesis testing	Soft
11	FDR_H	False Discovery Rate	Hard
12	FDR_S	False Discovery Rate	Soft

Πίνακας 3.5. Αποτελέσματα εξομοίωσης

	Index	NL-DTWT	BL-A	BL-T	NBL	FDR-H	FDR-S	BHT
1	RS1	-2.5	-2.85	-3.72	-3.98	-2.82	-3.27	-4.10
2	CL1	5.47	5.83	6.45	6.78	5.72	5.80	6.98
3	RQ1	25.81	27.14	29.96	32.32	27.04	28.24	32.12
4	GN1	8.79	9.28	10.22	12.01	9.38	10.53	11.98
5	RS2	6.78	6.89	7.41	6.54	6.58	6.76	7.07
6	CL2	8.39	8.98	12.39	11.76	9.27	10.92	11.98
7	RQ2	9.3	9.37	10.05	10.65	9.15	9.20	11.93
8	GN2	6.18	6.06	6.34	7.20	6.47	6.58	8.01
9	RS3	6.21	6.48	7.57	6.99	6.28	6.95	7.40
10	CL3	14.55	15.12	15.17	15.60	14.26	13.86	15.97
11	RQ3	18.49	18.29	20.44	20.40	18.27	19.44	20.91
12	GN3	16.54	15.93	17.89	18.43	16.87	18.16	19.02
13	RS4	9.51	9.81	10.76	11.08	10.07	9.91	11.51
14	CL4	24.56	25.05	24.46	26.00	24.17	23.55	22.45
15	RQ4	11.56	12.08	13.65	13.45	11.77	12.88	13.65
16	GN4	28.98	26.89	28.52	28.04	29.01	27.91	29.02
17	RS5	11.35	12.54	13.48	13.56	11.92	11.52	14.50
18	CL5	13.99	14.20	14.55	13.55	14.32	12.70	16.42
19	RQ5	12.98	13.39	14.67	13.86	13.51	13.44	14.98
20	GN5	12.89	12.58	12.16	13.51	13.07	11.82	14.01
21	RS6	16.85	16.63	17.84	17.02	17.09	15.01	18.99
22	CL6	17.54	18.50	21.26	18.99	18.74	18.29	19.85
23	RQ6	38.15	32.77	38.16	41.00	35.27	32.13	43.09
24	GN6	18.85	17.77	20.84	19.93	19.29	19.12	22.95
25	RS7	22.15	23.36	24.43	24.00	23.27	20.59	25.01

26	CL7	37.89	38.71	39.87	40.23	38.61	34.11	40.34
27	RQ7	29.87	29.97	30.79	32.98	30.55	27.42	34.56
28	GN7	20.14	20.71	21.61	25.67	21.50	21.57	22.49
29	RS8	38.78	37.70	42.38	41.01	39.56	35.98	40.01
30	CL8	41.56	41.49	48.73	44.00	42.89	41.75	45.06
31	RQ8	40.25	41.05	47.43	44.34	43.35	43.20	44.96
32	GN8	45.68	42.91	44.36	48.08	45.41	41.84	49.88
33	RS9	34.25	34.37	34.38	33.56	34.70	29.54	33.80
34	CL9	38.14	38.07	44.45	40.02	39.42	37.05	39.97
35	RQ9	32.54	32.18	31.90	33.67	33.67	29.38	34.01

Από τα πιο πάνω αποτελέσματα είναι προφανές ότι δεν υπάρχει προσέγγιση κυματιδιακής αποθορυβοποίησης που να “τα κάνει όλα”. Παρόλο που κάποιες από αυτές έχουν μια υψηλή επίδοση στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν γίνεται *a-priori*.

Αντίθετα, μπορούμε να δικαιολογήσουμε ως ανεπιτυχές την μέθοδο της Διασταυρωμένης Επικύρωσης (Cross Validation) (οι εκδόσεις soft και hard) και τις minimax και SCAD οι οποίες όπως είναι, δεν πρόκειται να βελτιώσουν την ποιότητα, ειδικά στις περιόδους των P – κυμάτων SNR και MSE.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα που πήραμε από προηγούμενο κεφάλαιο, οι προσεγγίσεις των προαναφερθέντων φίλτρων εφαρμόστηκαν σε ένα σύνολο από πραγματικές σεισμικές καταγραφές που αποκτήθηκαν από το SNC. Αυτές οι καταγραφές αντιστοιχούν στα γεγονότα με διάφορα μεγέθη και επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικά για το συγκεκριμένο σεισμολογικό δίκτυο και ταξινομήθηκαν σε πέντε κατηγορίες όπως θα παρουσιαστεί αργότερα. Η απόδοση θα μετρηθεί με την χρήση τεσσάρων από τα πέντε ανωτέρω μέτρα. Η απόδοση θα μετρηθεί με τη χρησιμοποίηση τεσσάρων από πέντε ανωτέρω μέτρα. Το MSE απορρίπτεται επειδή, στην περίπτωση των καταγραμμένων δεδομένων, το πραγματικό αποθρουβοποιημένο δεδομένο είναι άγνωστο.

4.2 Αξιολόγηση με πραγματικά δεδομένα

Μια βάση δεδομένων 600 επιλεγμένων γεγονότων (από τις 01/01/2006 έως τις 30/06/2008) χρησιμοποιήθηκαν για αυτήν την μελέτη. Τα γεγονότα επιλέγονται προκειμένου να εκπληρωθούν δύο βασικά κριτήρια:

- α) Τα αντίστοιχα γεγονότα πρέπει να ανιχνευθούν επίσης από ένα άλλο έγκυρο Σεισμολογικό Ινστιτούτο.
- β) Οι καταγραφές πρέπει να παρουσιάζουν τις εμφανής διαφορές στην ποιότητά τους.

Η αναγκαιότητα της κατάστασης α) βασίζεται στο γεγονός ότι χρειαζόμαστε έγκυρη χρονική εκτίμηση για τις αφίξεις των κυμάτων P έτσι ώστε να υπολογιστεί η διαφορετικότητα της τιμής στον υπολογισμό του ΔT_p .

Αυτός ο υπολογισμός που εκτελείται με τη χρήση του HYPO2000 (<http://earthquake.usgs.gov/research/software/index.php#Hypo>) λογισμικό (Klein, 2000) και μια αντίστροφη προσέγγιση όπως θα παρουσιαστεί αργότερα. Ο όρος β) εξασφαλίζει ότι η ανάλυση θα καλύψει την πλειοψηφία των χαρακτηριστικών καταγραφών που συλλέγει και αναλύει το SNC.

Η βάση δεδομένων καταγραφών αποτελείται από πέντε ομάδες πραγματικών σεισμικών δεδομένων, που βαθμολογούνται από το A στο D σε σχέση με την ποιότητά τους που εκφράζεται από το SNR όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1

Πίνακας 4.1. Ιδιότητες των χρησιμοποιημένων καταγραφών σεισμικών δεδομένων.

Κατηγορία	SNR	Παρατηρήσεις
A	>30	Πολύ καλή ποιότητα. Ο αναλυτής μπορεί σαφώς να προσδιορίσει τις αφίξεις των P κυμάτων
B	(10,30)	Καλή ποιότητα. Ο αναλυτής χρειάζεται ένα φίλτρο προκειμένου να προσδιοριστούν οι αφίξεις των P κυμάτων.
C	(3,10)	Μέτριας - κακής ποιότητας. Το εύρος του σεισμικού γεγονότος είναι συγκρίσιμο με το εύρος θορύβου. Ο αναλυτής χρειάζεται ένα φίλτρο προκειμένου να προσδιοριστούν οι αφίξεις των P κυμάτων

Κάθε καταγραφή που εξετάζεται με καθεμία από τις μεθόδους αποθορυβοποίησης που παραμένουν (όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4). Τα αποτελέσματα από τις αντιπροσωπευτικές καταγραφές που ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες (όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1) για καθεμία από τις μεθόδους αποθορυβοποίησης παρουσιάζονται παρακάτω. Για κάθε μέθοδο μια συνδυασμένη γραφική απεικόνιση μεταξύ της χαρακτηριστικής καταγραφής της κατηγορίας και η καταγραφή παρουσιάζεται. Επιπλέον για τις καλύτερες δύο μεθόδους (για κάθε κατηγορία) οι λεπτομερείς συνδυασμένες γραφικές απεικονίσεις γύρω από το χρόνο άφιξης του P επίσης παρουσιάζονται. Στις τελευταίες γραφικές απεικονίσεις οι χρόνοι ώθησης από έναν ανιχνευτή STA/LTA απεικονίζονται επίσης προκειμένου να υπάρξει η δυνατότητα να συγκριθεί η βελτίωση ακρίβειας στην άφιξη των P-κυμάτων πριν και μετά από την εφαρμογή αποθορυβοποίησης.

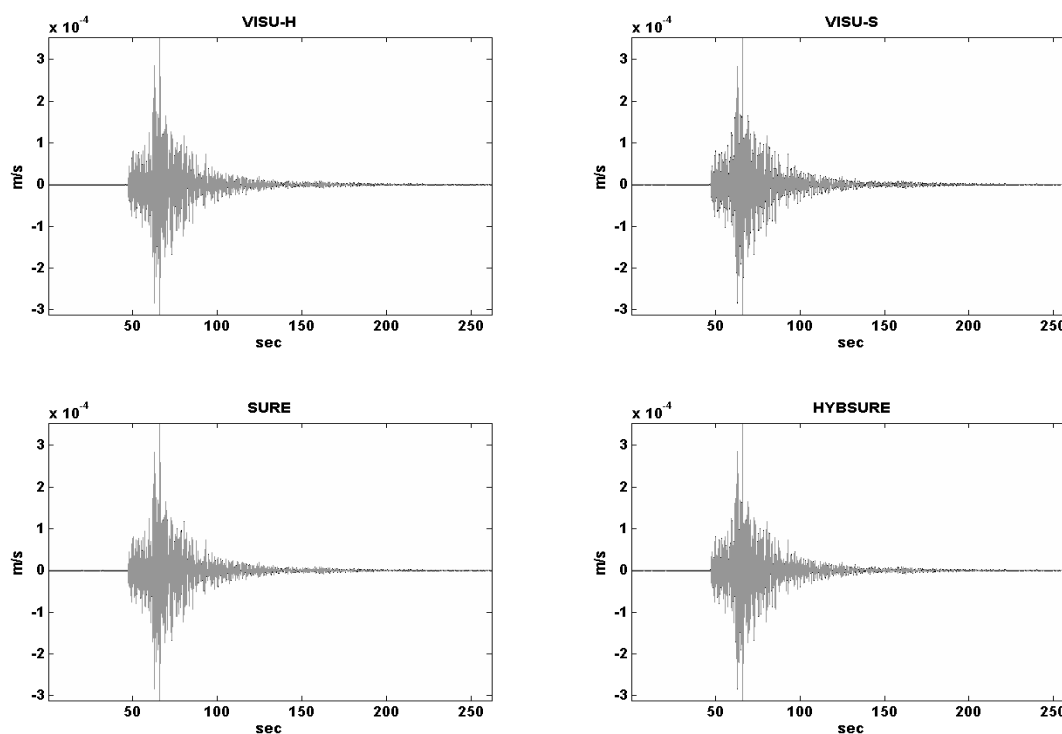
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η παρακάτω:

- Εντοπισμός των σεισμικών γεγονότων
- Απόρριψη όσων γεγονότων δεν έχουν καταγραφεί ή αναφερθεί και από άλλα σεισμολογικά ινστιτούτα
- Εξαγωγή των κυματομορφών από όλους τους σταθμούς και κατάταξη τους σε μία από τις κατηγορίες A, B, C
- Παραγωγή αποθορυβοποιημένων σημάτων με όλες τις εναπομείνουσες μεθόδους του Πίνακα 3.4 και με τρία συμβατικά φίλτρα (ζωνοπερατό Butterworth, ζωνοπερατό Chebychev και διέλευσης υψηλών Chebychev)
- Εκτέλεση STA/LTA σε όλες τις αποθορυβοποιημένες κυματομορφές και εντοπισμός άφιξης P-κυμάτων.
- Συλλογή χρόνων άφιξης S-κυμάτων από τις ανακοινώσεις των σεισμολογικών ινστιτούτων

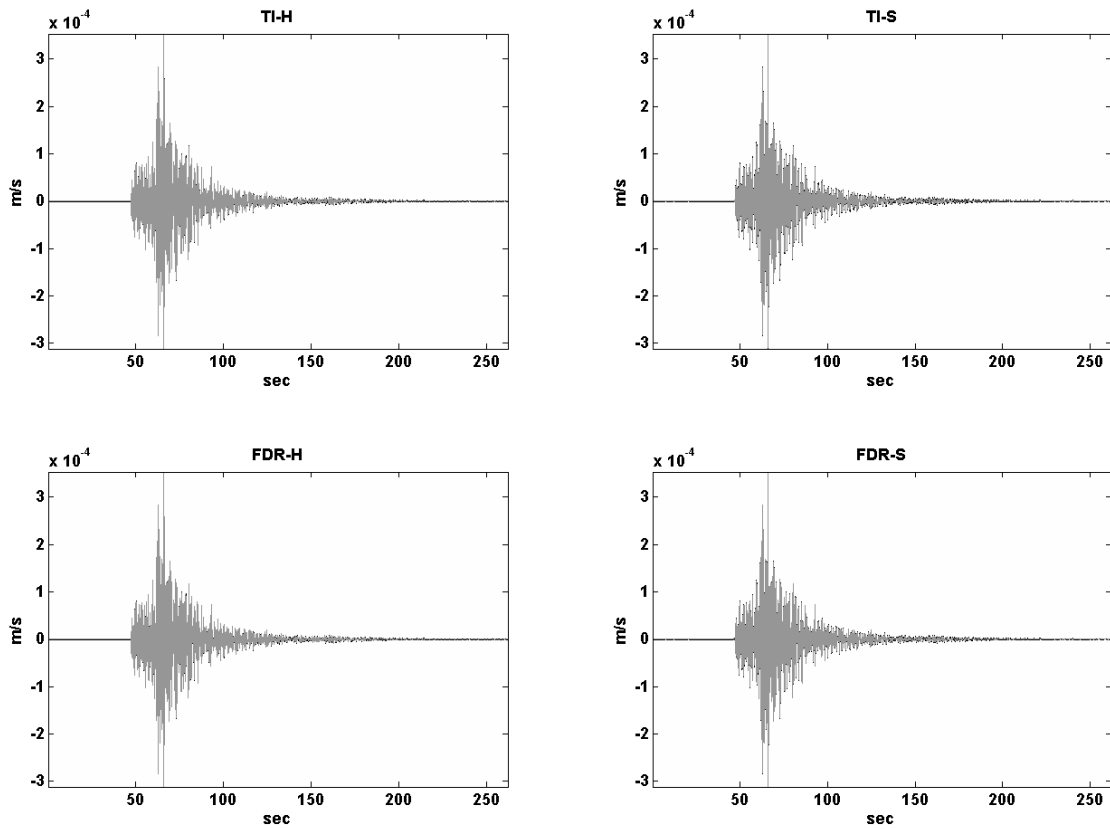
- Υπολογισμός διαφορών χρόνων άφιξης P κυμάτων με ανακοινωμένους χρόνους P κυμάτων
 - Υπολογισμός επικέντρου χρησιμοποιώντας του χρόνους άφιξης των αποθρορυβοποιημένων κυματομορφών και τους ανακοινωμένους χρόνους S κυμάτων (κυματομορφές μίας μεθόδου κάθε φορά)
 - Υπολογισμός διαφορών απόστασης μεταξύ ανακοινωμένου επικέντρου και υπολογιζόμενου από τις αποθρορυβοποιημένες κυματομορφές
- Όλες οι παραπάνω διαδικασίες υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον Matlab 7.

4.3 Τυπικά αποτελέσματα

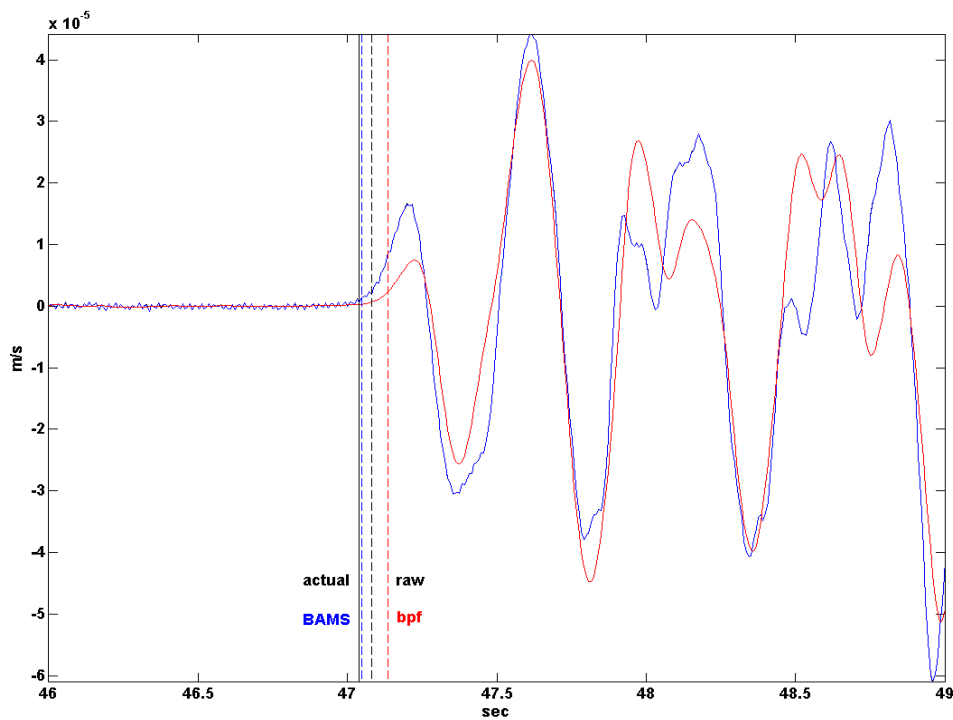
Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστούν τυπικά αποτελέσματα σεισμικών κυματομορφών όλων των κατηγοριών για όλες τις μεθόδους. Επιπρόσθετα για επιλεγμένες από αυτές θα παρουσιαστούν σε μεγέθυνση οι χρονικές διαφορές μεταξύ διαφορετικών μεθόδων αποθρορυβοποίησης, συμβατικών φίλτρων και πραγματικού χρόνου άφιξης.



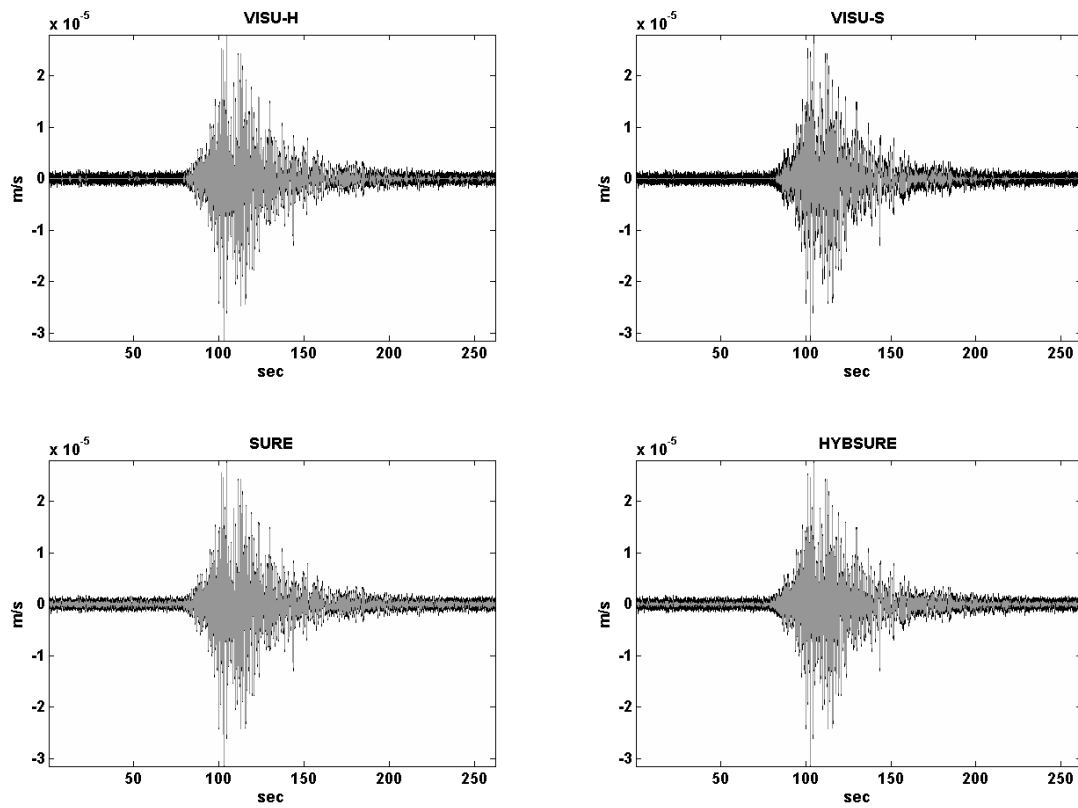
Σχήμα 4.1 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθρορυβοποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4



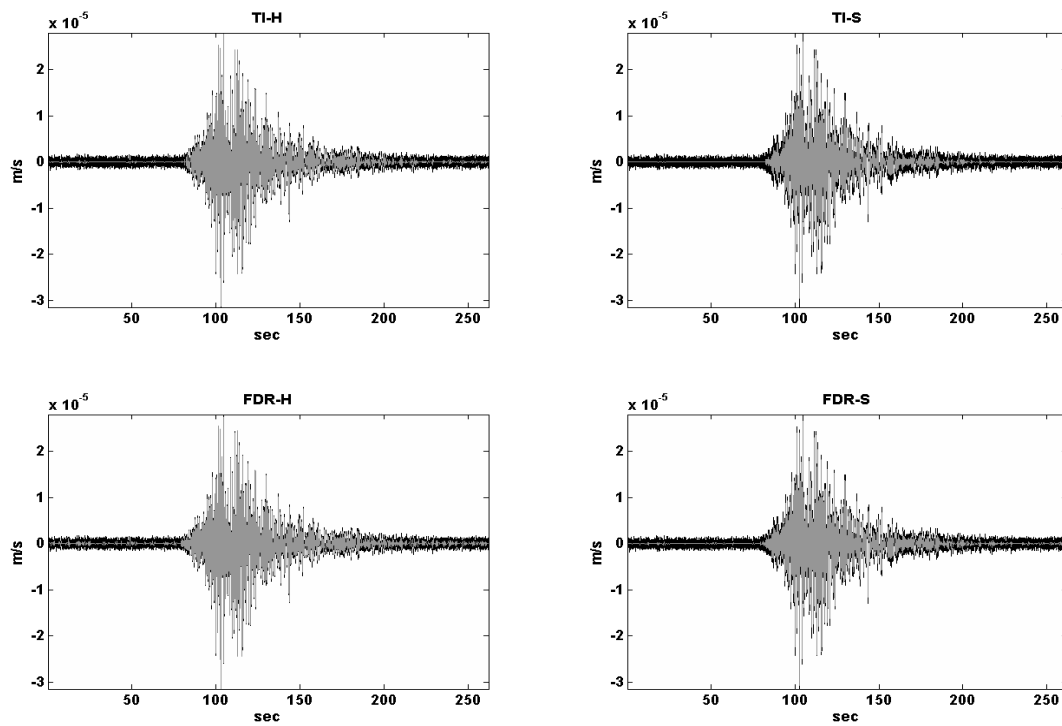
Σχήμα 4.2 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθορυβοποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4



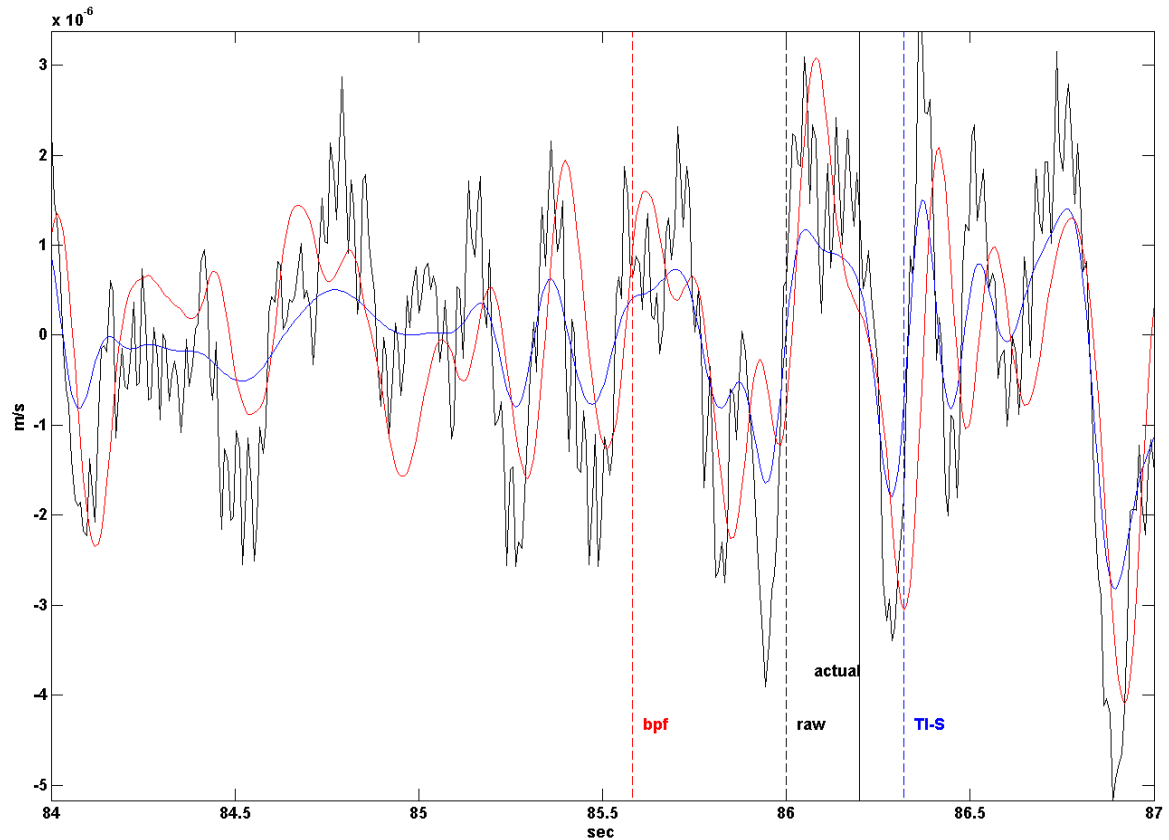
Σχήμα 4.3 Σημεία σκανδαλισμού STA/LTA για κυματομορφή τύπου Α (Ηλιούρις, 2008)



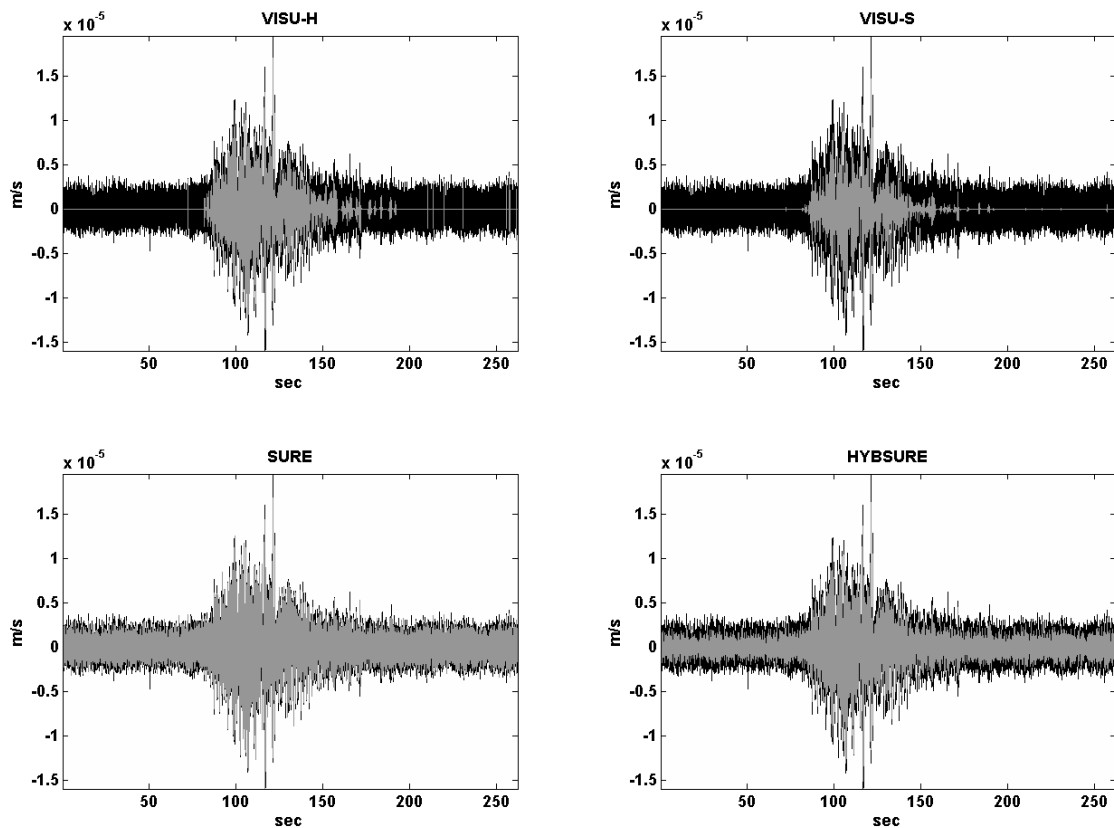
Σχήμα 4.4 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθορυβοποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4



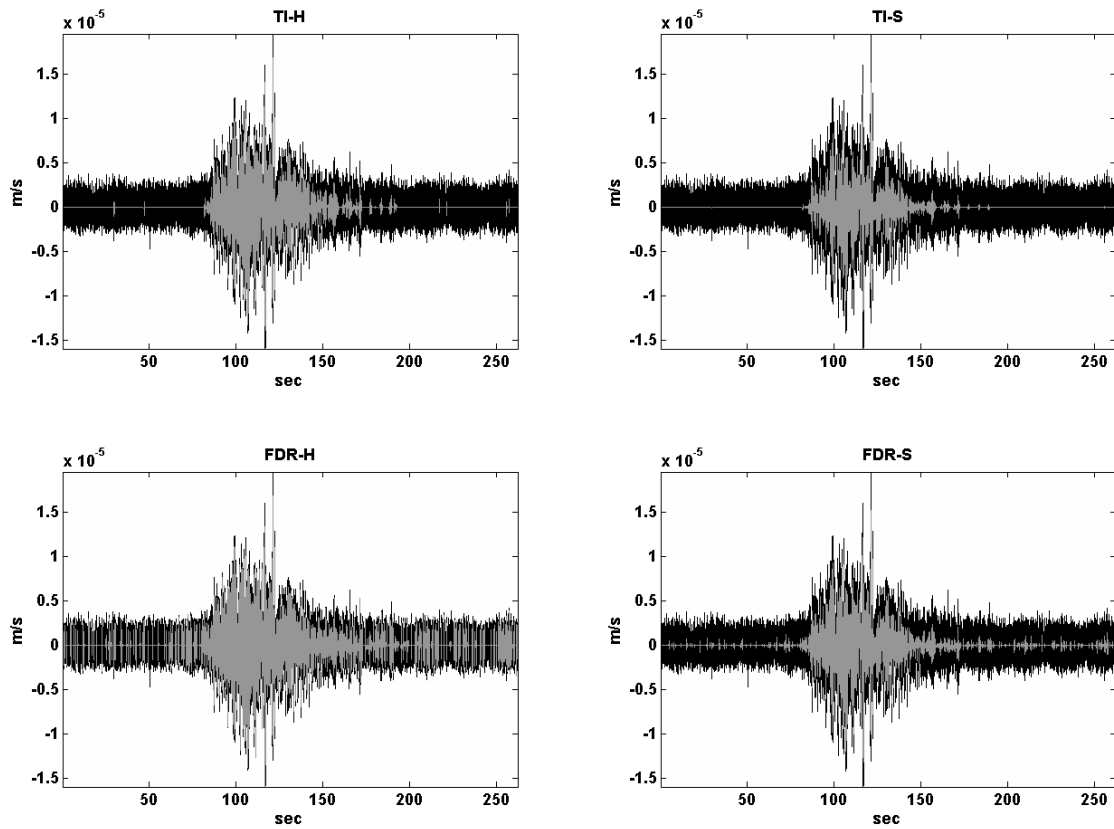
Σχήμα 4.5 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθορυβοποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4



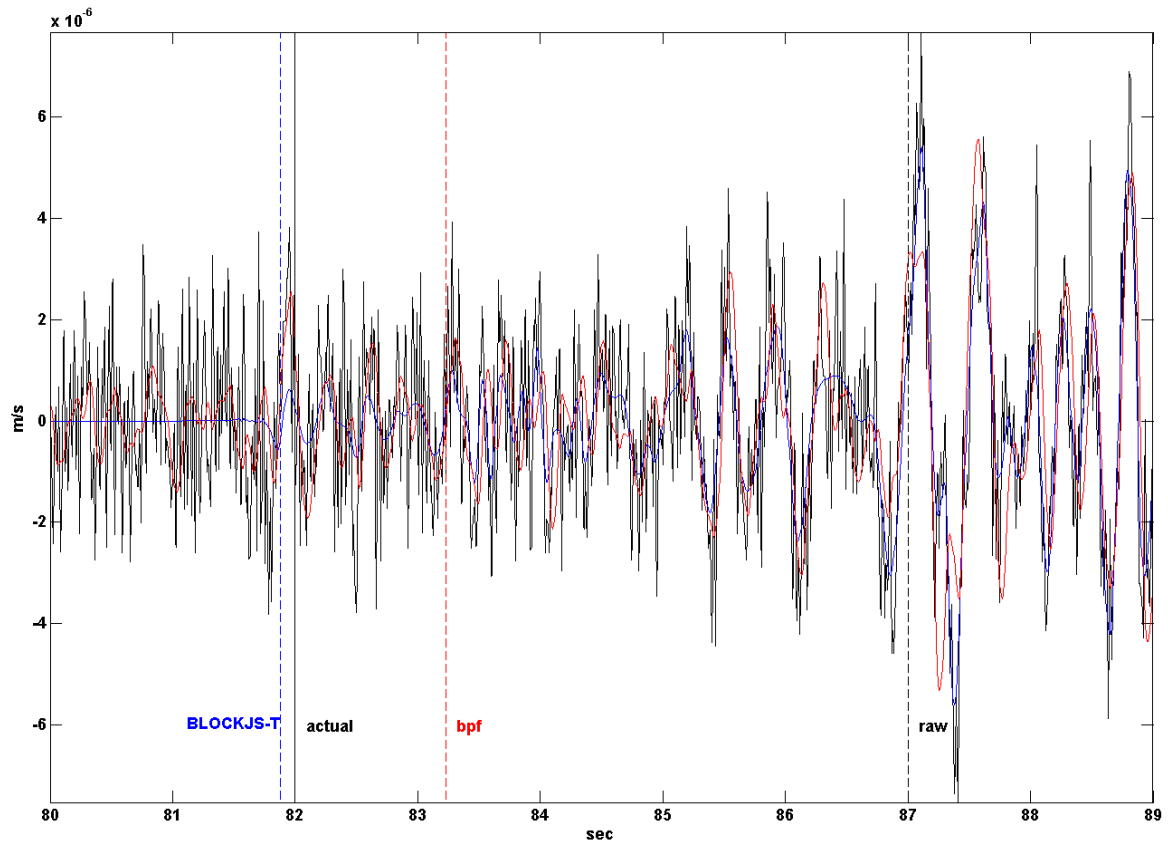
Σχήμα 4.6 Σημεία σκανδαλισμού STA/LTA για κυματομορφή τύπου Β (Ηλιούρις, 2008)



Σχήμα 4.7 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθρομβωποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4



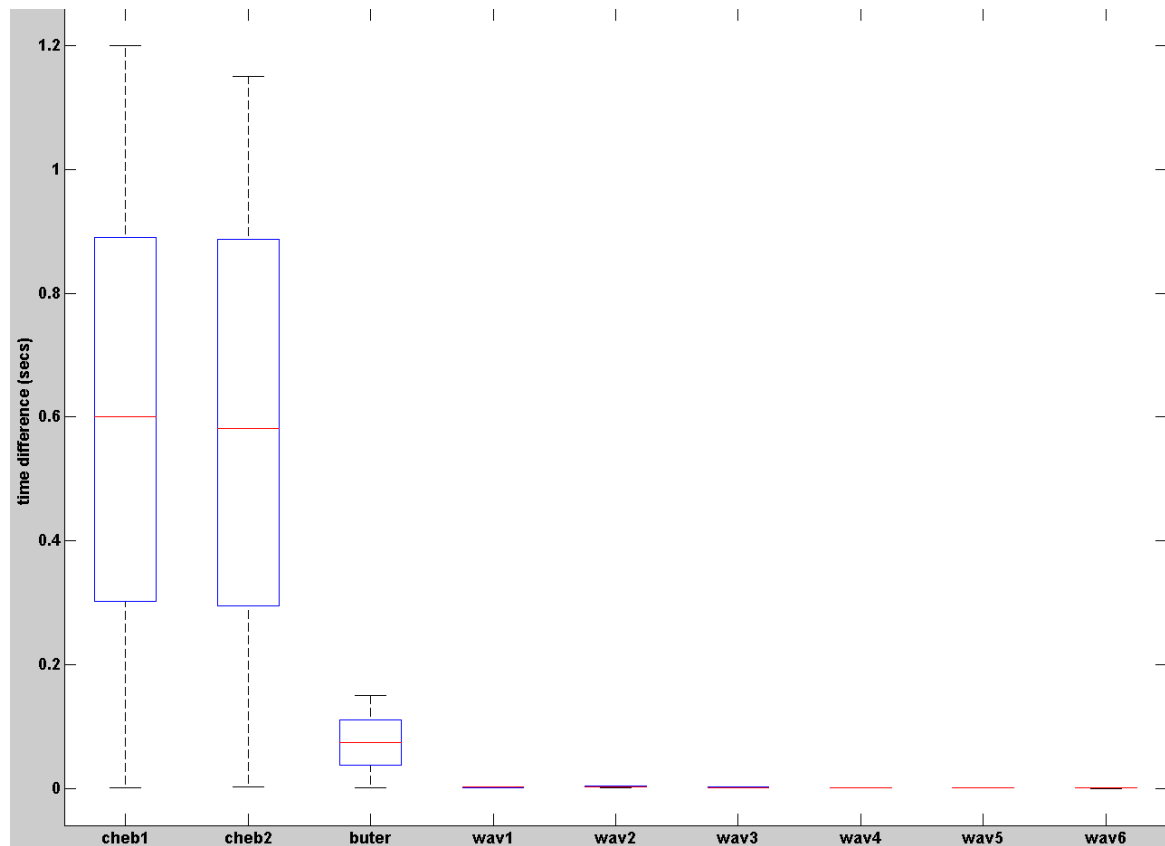
Σχήμα 4.8 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθορυβοποιημένη (γκρι) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις του Πιν.3.4

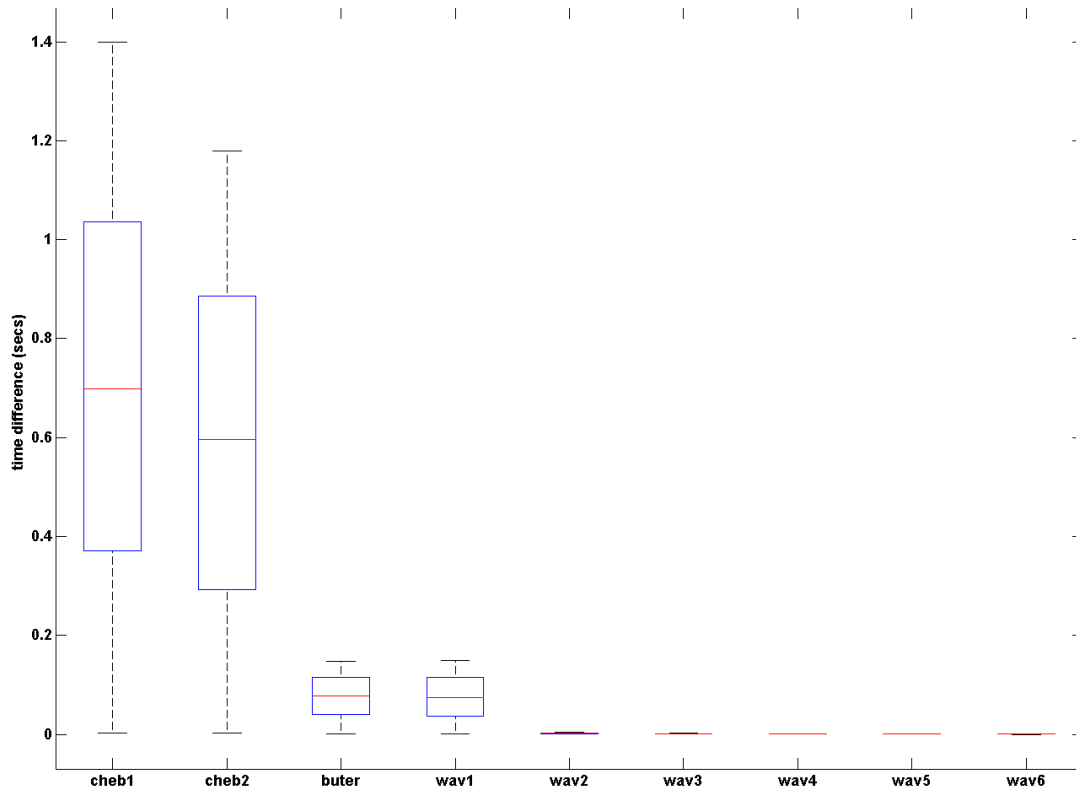


Σχήμα 4.9 Σημεία σκανδαλισμού STA/LTA για κυματομορφή τύπου C (Ηλιούρης, 2008)

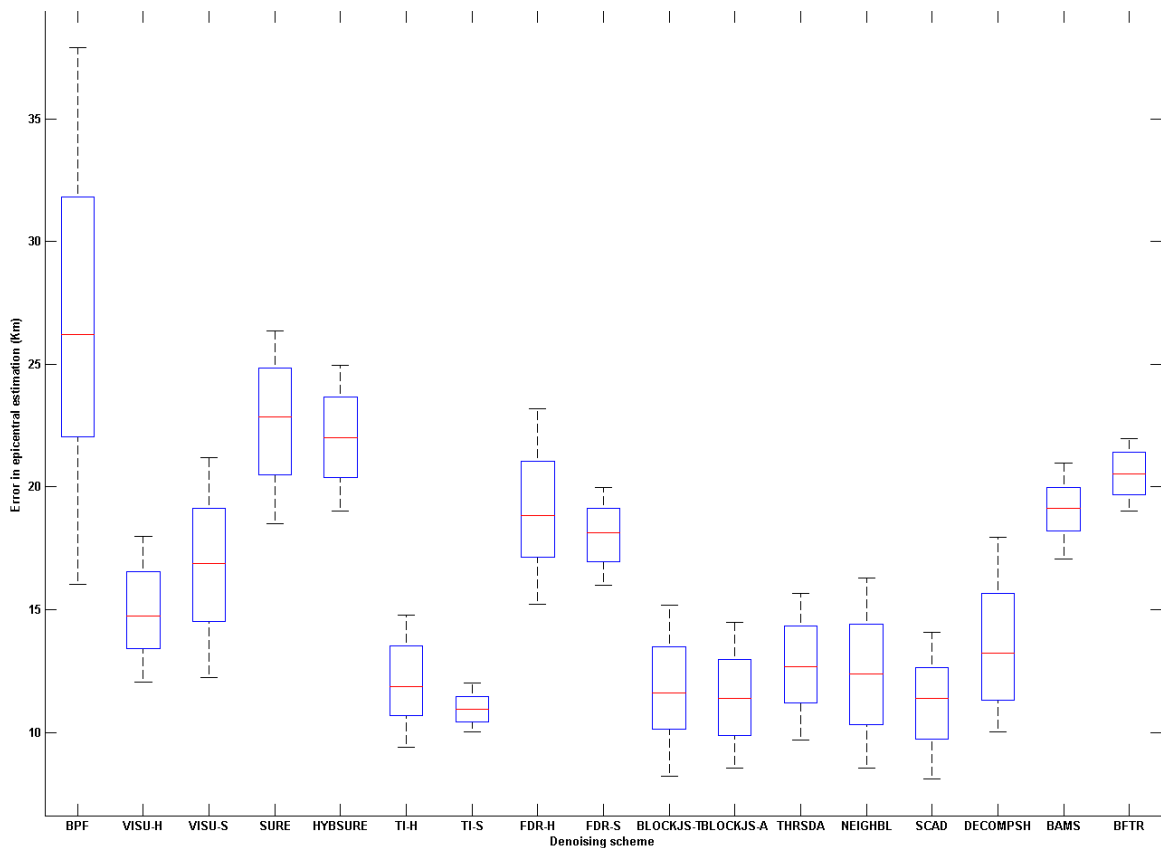
4.4 Συγκεντρωτικά γραφήματα

Με βάση τις χρονικές διαφορές που προέκυψαν από όλες τις κυματομορφές κατασκευάστηκαν τα συγκεντρωτικά γραφήματα τύπου *box*. Σε αυτά απεικονίζουμε τις χρονικές διαφορές που προκύπτουν για κάθε μία από τις κυματιδιακές μεθόδους αποθρομβοποίησης συν τις τρεις μεθόδους συμβατικού φιλτραρίσματος τόσο για τα P όσο και για τα S κύματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά γραφήματα για τις διαφορές απόστασης στον προσδιορισμό του επικέντρου όπως αυτές προκύπτουν με χρήση συγκεκριμένου συνόλου αποθρομβοποιημένων κυματομορφών ανά σεισμικό γεγονός, προκειμένου να εκτιμηθεί το μέγεθος του λάθους.





Σχήμα 4.10 Χρονικές διαφορές για την αυτόματη αναγνώριση των S κυμάτων για τις εξεταζόμενες τεχνικές αποθορυβοποίησης



Σχήμα 4.11 Διαφορές απόστασης στον προσδιορισμό επικέντρου για τις εξεταζόμενες τεχνικές αποθορυβοποίησης

5. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη των κυματιδιακών μεθόδων αποθορυβοποίησης για χρήση σε σύστημα αυτόματης αναγνώρισης σεισμού και αυτόματου προσδιορισμού επικέντρου. Για το λόγο αυτό μελετήθηκαν οι αποδόσεις της κάθε μεθόδου αποθορυβοποίησης όχι με τα συμβατικά μέτρα απόδοσης (π.χ. MSE) αλλά σε σχέση με το τελικό αποτέλεσμα που επιθυμούμε να επιτύχουμε. Αυτό είναι η εύρεση της βέλτιστης μεθόδου αποθορυβοποίησης. Οι δείκτες απόδοσης που λαμβάνουμε κυρίως υπόψη είναι ποιοτικοί και όχι ποσοτικοί. Συγκεκριμένα δεν μετρούμε την απόδοση της κάθε μεθόδου σε κάθε στάδιο χρησιμοποιώντας συνήθεις νόρμες ή μέτρα αλλά εξετάζουμε την βελτίωση που επιφέρει η κάθε μέθοδος στο τελικό αποτέλεσμα που είναι το επίκεντρο του σεισμού. Αυτό λοιπόν που αναδεικνύει ποιοτικά την κάθε μέθοδο είναι το κατά πόσο η εφαρμογή της βελτιώνει το λάθος μεταξύ του ανακοινωμένου επικέντρου και αυτού που προσδιορίζεται από το αυτόματο σύστημα (με χρήση των εξεταζόμενων μεθόδων).

Με βάση τα ανωτέρω μπορούμε να προβούμε σε μία σειρά από αξιολογήσεις για τις εξεταζόμενες μεθόδους, όπως παρακάτω:

- Κάθε μέθοδος αποθορυβοποίησης που βασίζεται σε συναρτήσεις κυματιδίων είναι ανώτερη από τις συμβατικές μεθόδους. Το γεγονός αυτό είναι οριακά εμφανές στην κατηγορία A και ιδιαίτερα εμφανές στις κατηγορίες B, C και D. Στην κατηγορία A αν και δεν υπάρχει ιδιαίτερη οπτική ένδειξη βελτίωσης στις κυματομορφές, η βελτίωση αυτή αρχίζει και γίνεται αντιληπτή στην ανίχνευση του P κύματος. Το γενικό αυτό συμπέρασμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό και αποδεικνύει αρχικά την εγκυρότητα της επιλογής των συναρτήσεων κυματιδίων ως το ιδανικό εργαλείο για την επεξεργασία μη στασιμων σημάτων
- Η βελτίωση που επιφέρουν οι κυματιδιακές μέθοδοι μεγιστοποιείται στις περιπτώσεις με χαμηλό SNR. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αντιμετώπιση του θορύβου από τις συναρτήσεις κυματιδίων (δεν προυποθέτουν αρχικό μοντέλο). Η ιδιαίτερα σημαντική αυτή διαπίστωση διευκολύνει την εφαρμογή των μεθόδων αυτών διότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων (και ιδιαίτερα στην ανίχνευση της μικροσεισμικότητας) ο θόρυβος είναι παρόν και είναι ιδιαίτερα υψηλής στάθμης. Επιπρόσθετα, από τις κυματομορφές στο Κεφ.3 παρατηρούμε ότι οι εξεταζόμενες μέθοδοι δεν παράγουν εξαιρετικά αποτελέσματα μόνο σε περιπτώσεις

συνεκτικού θορύβου αλλά και στις περιπτώσεις τυχαίων κυματομορφών βραχείας περιόδου (spikes).

- Η ανίχνευση των P και S κυμάτων δεν απαιτεί μελέτη επί του αλγορίθμου STA/LTA. Ενώ για τα συμβατικά φίλτρα προηγήθηκε βελτιστοποίηση παραμέτρων για τις περιπτώσεις των κυματιδιακών μεθόδων δεν προηγήθηκε κάτι τέτοιο. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν STA:1sec, LTA:20secs, trigger:1.5, dettrigger:0.8. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι απαλλάσσει το αναλυτή, κατά την αρχική εγκατάσταση, από την διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων του STA/LTA δίχως να χάνει σε αποτελεσματικότητα
- Δεν υπάρχει κυματιδιακή μέθοδος αποθορυβοποίησης ιδανική για όλες τις περιπτώσεις. Κάθε μέθοδος συμπεριφέρεται βέλτιστα σε κάποια κλάση σημάτων. Αυτό μπορεί να μας οδηγήσει στο σχεδιασμό υβριδικών συστημάτων που θα στοχεύουν σε συγκεκριμένες κλάσεις.

6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία μία σειρά από προτάσεις για μελλοντική επέκταση των συμπερασμάτων μπορεί να γίνει:

- Δημιουργία υβριδικού συστήματος αναγνώρισης ποιότητας σήματος για εφαρμογή της κατάλληλης μεθόδου αποθορυβοποίησης.
- Μελέτη των ιδίων μεθόδων για χρήση σε χειροκίνητα συστήματα σεισμολογικής ανάλυσης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Allen, J., and L. Rabiner (1977). A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis, *Proc. IEEE* 65, 1558–1564.

Abramovich, F. & Benjamini, Y. (1995). Thresholding of wavelet coefficients as multiple hypotheses testing procedure. In *Wavelets and Statistics*, Antoniadis, A. & Oppenheim, G. (Eds.), *Lecture Notes in Statistics* 103, pp. 5–14, New York: Springer-Verlag.

Abramovich, F. & Benjamini, Y. (1996). Adaptive thresholding of wavelet coefficients. *Comput. Statist. Data Anal.*, 22, 351–361.

Abramovich, F., Sapatinas, T. & Silverman, B.W. (1998). Wavelet thresholding via a Bayesian approach. *J. R. Statist. Soc. B*, 60, 725–749.

Antoniadis, A. & Fan, J. (2001) Regularization of wavelets approximations (with discussion). *J. Am. Statist. Ass.*, 96

Antoniadis, A., (2000), *Wavelet Estimators in Nonparametric Regression*, Technical report, IMAG-LMC, Grenoble, France

Bruce A.G. and Gao H.Y (1996). *Applied Wavelet Analysis with S-Plus*. New York, Springer

Coifman R. and Donoho D.L. (1995). Translation Invariant De-Noising. In *Wavelets and Statistics (Lecture Notes in Statistics, Vol 103)* edited by Antoniadis A and Openheim G, New York, Springer-Verlag, 125-50

Donoho, D. (1995). De-noising by soft-thresholding, *IEEE Trans. Inform. Theory* 41, 613–627.

Donoho, D., and I. M. Johnstone (1994). Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage, *Biometrika* 81, 425–455.

Douglas, A. (1997). Bandpass filtering to reduce noise on seismograms: is there a better way? *Bull. Seism. Soc. Am.* 87, 770–777.

Donoho, D. L. & Johnstone, I. M. (1994) Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage, *Biometrika*, 81, pp. 425± 455.

David L. Donoho and Iain M. Johnstone., Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage. *Journal of the American Statistical Association*, 90(432):1200–1224, December 1995.

David L. Donoho, Iain M. Johnstone, Gerard Kerkyacharian, and Dominique Picard., Wavelet shrinkage: Asymptopia? with discussion. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 57(2):301–369, 1995.

Efron, B., Tibshirani, R., (1993), an introduction to the bootstrap, Chapman & Hall / CRC, Florida, US

Galiana-Merino, J. J., J. Rosa-Herranz, J. Giner, S. Molina, and F. Botella (2003). De-noising of short period seismograms by wavelet packet transform, *Bull. Seism. Soc. Am.* 93, no.6, 2554–2562.

Gabor, D. (1946). Theory of communication, *J. IEE* 93, 429–441.

Gallant, R., *Nonlinear Statistical Models*. JohnWiley & Sons, Inc., NewYork, NY, 1987.

Hloupis, G, 2008, Seismological Data Acquisition and Signal processing using wavelets, PhD Thesis, Brunel University, UK

Klein, F. W. (2002). User's guide to HYPO-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes, U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 02-171,123

Odgen, T., Parzen, O. (1996). Change-point approach to data analytic thresholding. *Statist.Comput.* 6, 93-99.

Pazos, A., Gonzalez, M.J., Alguacil, G., (2003) Non-linear filter, using the wavelet transform, applied to seismological records, *Journal of Seismology* 7: 413–429.

Rodgers, P.W. (1992) a. Frequency limits for seismometers as determined from signal-to-noise ratios. Part 1. The electromagnetic seismometer. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 1071-1098.

Scherbaum, F. (1996). *Of Poles and Zeros: Fundamentals of Digital Seismology*, Kluwer, Hingham, Massachusetts.

Steeghs, P. (1997). Local power spectra and seismic interpretation, *Ph.D. Thesis*, Delft University of Technology, The Netherlands.