

ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ

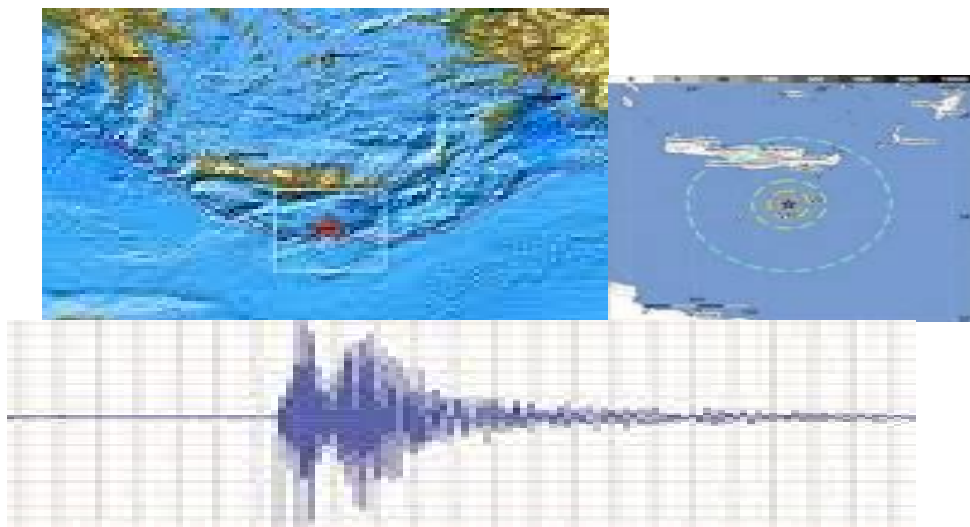
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Συγκριτική μελέτη μη αυτοματοποιημένων γραμμικών και μη γραμμικών μεθόδων αποθρομβοποίησης με εφαρμογή σε σεισμικές καταγραφές.



ΚΑΣΤΑΝΑ ΘΩΜΑΗ (Α.Μ 490)

ΣΧΟΙΝΟΧΩΡΙΤΗ ΣΟΦΙΑ (Α.Μ 548)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ - ABSTRACT.....	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Γενικά.....	7
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	8
1.3 Αντικείμενο.....	10
1.4 Δομή.....	10
2.ΦΙΛΤΡΑ.....	12
2.1 Αναλογικά Φίλτρα.....	12
2.2 Προδιαγραφές Ενισχυτών και θόρυβος.....	14
2.3 Σεισμικός Σκανδαλισμός.....	16
3. ΑΠΟΘΟΥΡΥΒΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	23
3.1 Εισαγωγή.....	23
3.2 Βασικές αρχές διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων- Εφαρμογή σε σεισμικό σήμα.....	24
3.3 Κυματιδιακοί κανόνες κατωφλίου.....	27
3.4 Μη παραμετρική ανέλιξη με χρήση κυματιδίων	27
3.5 Άμεσοι κυματιδιακοί εκτιμητές κατωφλίου.....	31
3.5.1 Καθολικό Κατώφλι.....	32
3.5.2 Προσαρμοζόμενο Κατώφλι (Sureshrink).....	32
3.5.3 Κατώφλι Διασταυρωμένης Επικύρωσης (CV).....	33
3.5.4. Προσέγγιση "Ελέγχου Πολλαπλής Υπόθεσης	36
3.5.5 Προσέγγιση «Ελέγχου Επαναλαμβανόμενης Υπόθεσης»	37
3.5.6 Κατώφλι Αμετάβλητης Ολίσθησης.....	388
3.6 Μέτρα απόδοσης.....	41

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	46
4.1 Δεδομένα.....	46
4.2 Μεθοδολογία.....	47
4.3 Αποτελέσματα.....	64
5. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	71
6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	73
Βιβλιογραφία.....	74
Παράρτημα 1. Σεισμικά γεγονότα που χρησιμοποιήθηκαν.....	76
Παράρτημα 2. Χρονοδιαφορές και SNR για κάθε κατηγορία κυματομορφών.....	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.2 Ο σεισμικός σκανδαλισμός.....	20
Σχήμα 3.1. Εκτίμηση συνάρτησης που χρησιμοποιεί κατώφλι.	28
Σχήμα 3.2. Συναρτήσεις Κατωφλίου ST και HT	30
Σχήμα 3.3. Καθολικό και κατά κλίμακα κατώφλι επιπέδων για ένα σήμα που έχει αποσυντεθεί με κυματίδια.....	31
Σχήμα 3.4.α. Δύο παρόμοια σήματα όπου το κάτω είναι η δεξιά μετατοπισμένη εκδοχή του πάνω.....	39
Σχήμα 3.4.β. το DWT του αρχικού σήματος και το DWT της μετατοπισμένης εκδοχής..	39
Σχήμα 3.6. Χρονικές διαφορές για την άφιξη του κύματος P ανάμεσα στο τεχνητό σήμα αποθορυβοποιημένο σήμα μετά το φιλτράρισμα με ένα Chebyshev τύπου I φίλτρο και αποθορυβοποιημένο σήμα μετά το φιλτράρισμα μια κυματιδιακή μέθοδο.....	42
Σχήμα 3.7. Τοποθεσία χρησιμοποιώντας την κυκλική μέθοδο.	43
Σχήμα 3.8. Γράφημα Travel time.....	44
Σχήμα 3.9. Διαφορά περιοχής επίκεντρου.....	45
Σχήμα 3.10. Καθοριστικό μέγεθος ϵ το μέγιστο πλήθος των S κυμάτων	45
Σχήμα 4.1 Αφιλτράριστο σεισμόγραμμα κατηγορίας A.....	58
Σχήμα 4.2 Φιλτραρισμένο σεισμόγραμμα κατηγορίας A.....	59
Σχήμα 4.3 Αφιλτράριστο σεισμόγραμμα κατηγορίας B.....	60
Σχήμα 4.4 Φιλτραρισμένο σεισμόγραμμα κατηγορίας B.....	61
Σχήμα 4.5 Αφιλτράριστο σεισμόγραμμα κατηγορίας C.....	62
Σχήμα 4.6 Φιλτραρισμένο σεισμόγραμμα κατηγορίας C.....	63
Σχήμα 4.7 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή και αποθορυβοποιημένη για σήματα κατηγορίας A	64
Σχήμα 4.8 Σημεία σκανδαλισμού STA/LTA για κυματομορφή τύπου A.....	65
Σχήμα 4.9 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή και αποθορυβοποιημένη για σήματα κατηγορίας B	65
Σχήμα 4.10 Σημεία σκανδαλισμού STA/LTA για κυματομορφή τύπου B.....	66

Σχήμα 4.11 Χρονοδιαφορές μεταξύ φιλτραρισμένων κυματομορφών με γραμμικά φίλτρα και των ιδίων, φιλτραρισμένων με κυματιδικά φίλτρα για σειсмоγράμματα με διαφορετικό SNR που ανήκουν στην κατηγορία Α.....	67
Σχήμα 4.12 Χρονοδιαφορές μεταξύ φιλτραρισμένων κυματομορφών με γραμμικά φίλτρα και των ιδίων, φιλτραρισμένων με κυματιδικά φίλτρα για σειсмоγράμματα με διαφορετικό SNR που ανήκουν στην κατηγορία Β.....	68
Σχήμα 4.13 Χρονοδιαφορές μεταξύ φιλτραρισμένων κυματομορφών με γραμμικά φίλτρα και των ιδίων, φιλτραρισμένων με κυματιδικά φίλτρα για σειсмоγράμματα με διαφορετικό SNR που ανήκουν στην κατηγορία C.....	69
Σχήμα 4.14 Συγκεντρωτικό διάγραμμα χρονοδιαφορών και για τους τρεις τύπους σειсмоγραμμάτων.....	70

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Επίδραση του DC και του φίλτρου STA, LTA και STA/LTA. Οι μονάδες των αριθμών είναι στις εκτιμήσεις	21
Πίνακας 4.1. Ιδιότητες των χρησιμοποιημένων καταγραφών σεισμικών δεδομένων	46
Παράρτημα 1. Σεισμικά γεγονότα που χρησιμοποιήθηκαν	77
Παράρτημα 2. Χρονοδιαφορές και SNR για κάθε κατηγορία κυματομορφών	84

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξη των μεθόδων για την ανίχνευση σεισμικών γεγονότων, που χαρακτηρίζονται από μέτριο θόρυβο υπήρξε προτεραιότητα για τη ψηφιακή σεισμολογία. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι το γεγονός ότι ο αριθμός των ψηφιακών σεισμικών σταθμών αυξάνεται συνεχώς και ο όγκος των εισερχόμενων δεδομένων στην πραγματικότητα είναι τεράστιος. Το φιλτράρισμα, ως διαδικασία απαντάται συχνά στη σεισμολογία καθότι οι σεισμικές καταγραφές σπάνια θα είναι χωρίς θόρυβο. Έτσι απαιτείται, σχεδόν πάντα, ένα φιλτράρισμα προκειμένου να «καθαρίσει» το σήμα ή τουλάχιστον να αναδειχθούν τα σημαντικά χαρακτηριστικά του. Τα φίλτρα που συνήθως χρησιμοποιούνται ανήκουν στις κλασσικές οικογένειες γραμμικών φίλτρων (Butterworth, Bessel, Chebychev κ.λ.π) και τα οποία είναι πλέον γνωστό ότι προκαλούν κάποια παραμόρφωση του σήματος. Αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση βελτίωση της ποιότητας του φιλτραρίσματος σειсмоγραμμάτων με χρήση φίλτρων στηριζόμενων σε συναρτήσεις κυματιδίων (wavelets).

ABSTRACT

Last 3 decades, there was an increase in the development of methods that detect seismic events that characterized from medium noise. This was due to the huge increase of the digital seismological stations that were installed around the world. Filtering, as a procedure, used very often in seismology because the seismic recordings (in the vast majority of cases) include noise. For this, a filtering is required in order to derive the important characteristics from the signal. Filter that usually used are the Butterworth, Bessel and Chebychev which is known that produce some distortion to the filtered signal. The purpose of this study is to examine the filtering quality improvement by using wavelet based filters.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τις τρεις τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξη των μεθόδων για την ανίχνευση σεισμικών γεγονότων, που χαρακτηρίζονται από μέτριο θόρυβο υπήρξε προτεραιότητα της κατεύθυνσης για τη ψηφιακή σεισμολογία. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι το γεγονός ότι ο αριθμός των ψηφιακών σεισμικών σταθμών αυξάνεται συνεχώς και ο όγκος των εισερχόμενων δεδομένων στην πραγματικότητα είναι τεράστιος.

Σήμερα, η δομή των μεθόδων για την αυτόματη ανίχνευση των σεισμών κατάγεται από την θεωρητική εργασία του Freiberger (1963), ο οποίος χρησιμοποίησε το φίλτρο Neumann-Pearson και μέσο όρο σήματος (ίχνη) για να κατορθώσει τον καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Η πρώτη πρακτική εφαρμογή της προσέγγισης του Freiberger είναι ένας ανιχνευτής, βασισμένος στην ανάλυση πλήθους από σύντομες και μακροπρόθεσμες χρονικές στιγμές. Ένα επίτευγμα αυτής της μεθόδου είναι ο ανιχνευτής Z. Η αξία του κατωφλίου του ανιχνευτή Z προσαρμόζεται καλύτερα στις καθημερινές και εποχιακές παραλλαγές, του επιπέδου του σεισμικού θορύβου. Μια διαφορετική μέθοδος εντοπισμού χρησιμοποιεί τα (STA/LTA), που είναι ένας ανιχνευτής βασισμένος στον μετασχηματισμό του Walsh. Μια άλλη προσέγγιση προτάθηκε από τον Stewart (1977), ο οποίος προσάρμοσε το περιεχόμενο σήμα για να αποκτήσει ένα οπτικό μετανιχνεύσιμο κριτήριο, από το μέσο της παρουσίας ενός αυθαίρετου λειτουργικού χαρακτηριστικού (ποικίλοι τύποι λειτουργικών χαρακτηριστικών συζητήθηκαν). Αυτό μείωσε τον αριθμό των εσφαλμένων απαντήσεων οφειλόμενα σε μια ισχυρή λογική.

Οι μέθοδοι που προαναφέρθηκαν απαιτούν ένα μικρό όγκο υπολογισμών που είναι μια ένα προσόν υπέρ της χρησιμοποίησής τους σε σύστημα πραγματικού χρόνου. Τα βασικά μειονεκτήματα αυτών των μεθόδων ανίχνευσης είναι στο ανεφάρμοστο τους κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος και στην αγνόηση της συχνότητας συντονισμού ενός σήματος. Διαφορετικές προσεγγίσεις χρησιμοποιήθηκαν στη μέθοδο που βασίζεται στη τεχνική της αναγνώρισης προτύπων (PR). Οι PR μέθοδοι βασίζονται στην αναπαράσταση ενός σειсмоγράμματος υπό μορφή ενός γραφικού προτύπου και στην ακόλουθη παραδοχή. Ο Joswig (1990) προτείνει ένα

ανιχνευτή που χρησιμοποιεί sonograms για την κατασκευή γραφικών προτύπων στη βάση ενός σεισμού, εξομαλύνοντας το εύρος του θορύβου.

Ωστόσο, όταν συζητάμε για επεξεργασία σεισμολογικού σήματος σε μη πραγματικό χρόνο, τότε οι ανωτέρω περιορισμοί μπορούν να διαφοροποιηθούν. Στην περίπτωση αυτή εκείνο που ενδιαφέρει είναι η ακρίβεια και η ελάχιστη παραμόρφωση του σήματος (αν πρόκειται να υποστεί κάποια επεξεργασία). Η επεξεργασία του φιλτραρίσματος είναι μία πολύ συχνή διαδικασία στη σεισμολογία καθότι οι σεισμικές καταγραφές σπάνια θα είναι χωρίς θόρυβο. Έτσι απαιτείται, σχεδόν πάντα, ένα φιλτράρισμα προκειμένου να «καθαρίσει» το σήμα ή τουλάχιστον να αναδειχθούν τα σημαντικά χαρακτηριστικά του. Τα φίλτρα που συνήθως χρησιμοποιούνται ανήκουν στις κλασσικές οικογένειες γραμμικών φίλτρων (Butterworth, Bessel, Chebychev κ.λ.π) και τα οποία είναι πλέον γνωστό ότι προκαλούν κάποια παραμόρφωση του σήματος (Scherbaum, 1996). Αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η βελτίωση της ποιότητας του φιλτραρίσματος σειсмоγραμμάτων με χρήση φίλτρων στηριζόμενων σε συναρτήσεις κυματιδίων (wavelets).

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 προ της αφίξεως 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 στον υπολογισμό των χρονικών διαφορών που προκύπτουν κατά τον προσδιορισμό των P-κυμάτων ενός σεισμού όταν η προς επεξεργασία κυματομορφή φιλτράρεται με συμβατικά φίλτρα και μη γραμμικά φίλτρα

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 κλασικές 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. 4
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος εργασίας και τα αποτελέσματα που ελήφθησαν
- 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 υπερατά 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 υπερατά 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 χαμηλοπερατά και υπερατά 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 σχεδιασμό 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.

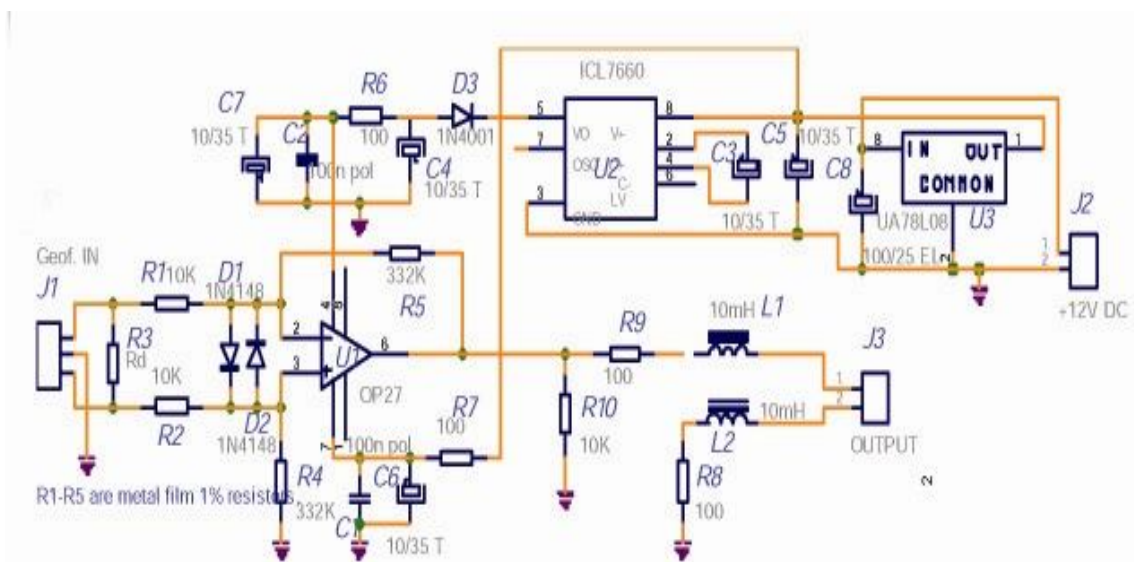
Οι μονού τερματισμού ή κοινού κοινής φοράς ενισχυτές είναι γενικά λιγότερο θορυβώδεις από τους διαφορικούς, επειδή μια από τις εισόδους τους συμβάλλει λιγότερο στο θόρυβο (Rodgers, 1992). Παρόλα αυτά, οι περισσότεροι σεισμικοί προενισχυτές έχουν ένα διαφορετικό στάδιο εισόδου για να διευκολύνουν τη χρήση των μακριών 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 συνεστραμμένο 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' όσο είναι απαραίτητο από τον ενισχυτή στο όργανο καταγραφής. Ένας τύπος συνεστραμμένου θωρακισμένου ζεύγους 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 διαφορική 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 σύγκρουση 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-στατικό 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 $10 \text{ γεγονότα} * 30 \text{ ημέρες} * 100 \text{ δείγματα} * 3 \text{ ψηφιολέξεις} * 3 \text{ κανάλια} * 100 \text{ περίπου ίσο με } 27 \text{ MB}$ ή για μισό από αυτό εάν συμπιέζεται. Αυτό το ποσό μπορεί να περιληφθεί σε ένα μικρό τσιπ λάμψης 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 γεγονός. 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 μετά-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.

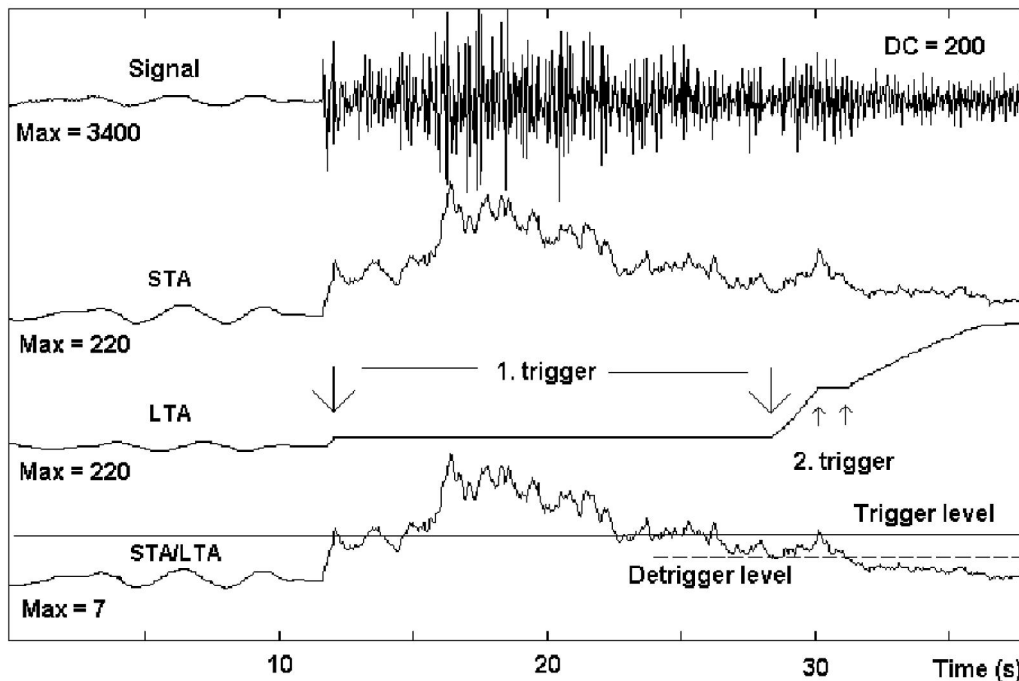
Υπάρχουν δύο κοινές παραλλαγές του αλγορίθμου ώθησης (2.1). Το πρώτο είναι να χρησιμοποιηθεί το τετράγωνο του X_i αντί της απόλυτης τιμής. Χρησιμοποιώντας το τετράγωνο του X_i , καθιστά τον σκανδαλισμό πιο ευαίσθητο στις μεταβολές. Το άλλο είναι ο σκανδαλισμός Allen (Allen, 1978) στον οποίο η απόλυτη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

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

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 (. σκανδαλισμός 2). 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 BB πρέπει να σκανδαλίσει στους σεισμούς μικροϋπολογιστών, τα teleseismic P-κύματα και τα κύματα επιφάνειας που κάθε ένα απαιτεί τα χωριστά φίλτρα, STA και LTA.

3. ΑΠΟΘΟΥΒΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ

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.

Αρχικά θα δοθούν μερικές βασικές αρχές των συναρτήσεων κυματιδίων. Στη συνέχεια 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 καταωφλίου 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 Βασικές αρχές διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων – Εφαρμογή σε σεισμικό σήμα

Οι παραδοσιακές μέθοδοι ανάλυσης και επεξεργασίας σημάτων στο πεδίο της συχνότητας οδηγούν στη χρήση του μετασχηματισμού fourier, για τον οποίο όμως η ύπαρξη στατικών χαρακτηριστικών δευτέρας τάξης είναι απαραίτητη. Η αναγκαιότητα όμως ανάλυσης σημάτων με μη στατικά χαρακτηριστικά οδηγεί στη χρήση παραλλαγών της ανάλυσης fourier (short-time fourier) ή και χρήσης νέων τεχνικών (κατανομές Wigner-Ville, μέθοδος Choi-Williams, μετασχηματισμός wavelet)

Όπως είναι γνωστό, σε κάθε ανάλυση ή απεικόνιση, η επιλογή του πυρήνα ή των συναρτήσεων βάσης καθορίζουν την υφή και την φύση της πληροφορίας που μπορούμε να εξάγουμε ή να απεικονίσουμε για την συγκεκριμένη διεργασία. Η διαπίστωση αυτή μας οδηγεί στα εξής ερωτήματα : (α) Τι είδους πληροφορία μπορούμε να εξάγουμε χρησιμοποιώντας συναρτήσεις κυματιδίων & (β) πως μπορούμε να λάβουμε μια απεικόνιση ή περιγραφή των χαρακτηριστικών της διεργασίας χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις κυματιδίων ?.

Η απάντηση στο (α) στηρίζεται στην σημαντικότερη ιδιότητα που έχουν οι προαναφερόμενες συναρτήσεις και λέγεται «εντοπισμός χρόνου-συχνότητας». Το πλεονέκτημα της χρήσης κυματιδίων στην ανάλυση σήματος, έγκειται στο γεγονός ότι τα κυματίδια ως πυρήνας ανάλυσης, δίδει τη δυνατότητα να μελετήσουμε χαρακτηριστικά του σήματος τοπικά με αναλυτικότητα προσαρμοσμένη στην τοπικότητα που εξετάζουμε (π.χ. ευρεία χαρακτηριστικά εξετάζονται σε μεγάλες κλίμακες ενώ πιο λεπτομερή χαρακτηριστικά εξετάζονται σε μικρές κλίμακες). Η ιδιότητα αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε μη-στατικά σήματα, σε έχοντα τοπικές ταλαντώσεις μικρής περιόδου, σε σήματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά σε διαφορετικές κλίμακες. Για το λόγο αυτό οι συναρτήσεις κυματιδίων είναι κατάλληλες για ανάλυση στο πεδίο χρόνου-συχνότητας ή χρόνου-κλίμακας.

Η απάντηση στο (β) λαμβάνεται αν θεωρήσουμε τα κυματίδια ως τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία μιας αποδόμησης του σήματος (σε αντιστοιχία με τα ημίτονα – συνημίτονα μιας αποδόμησης κατά Fourier). Έτσι, η απεικόνιση ενός σήματος πραγματοποιείται με τη χρήση από μια σειρά από διασταλμένες (ή συσταλμένες) εκδόσεις του μητρικού κυματιδίου, πολλαπλασιαζόμενο εκάστοτε μία κατάλληλη συνιστώσα.

Ο μετασχηματισμός fourier μιας συνάρτησης $f(t)$ ως γνωστόν, είναι:

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

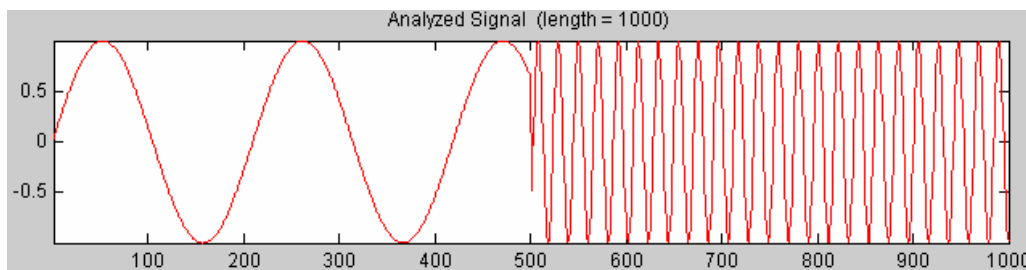
ενώ η αρχική συνάρτηση μπορεί να ανακτηθεί από τη μετασχηματισμένη ως εξής :

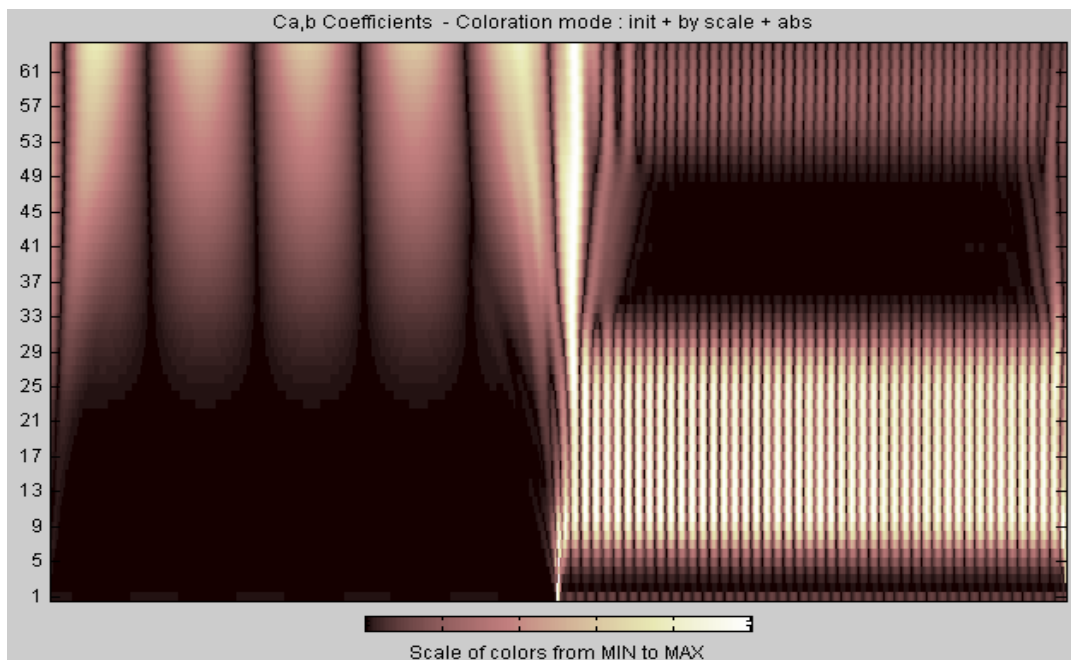
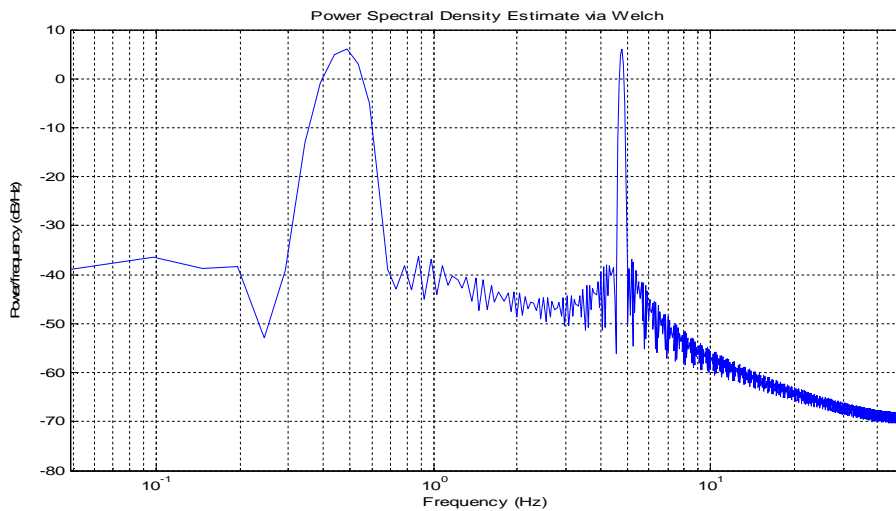
$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

όπου ω : γωνιακή συχνότητα της περιοδικής συνάρτησης $e^{-i\omega t}$

Με την παραπάνω απεικόνιση η $f(t)$ απεικονίζεται ως «σταθμικό άθροισμα» απλών συναρτήσεων της μορφής $e^{-i\omega t}$ όπου το σταθμικός βάρους για κάθε συγκεκριμένη συχνότητα ω δίνεται από την $\hat{f}(\omega)$.

Παρόλο που η ανάλυση fourier μας δίνει χρήσιμες πληροφορίες για τη φύση ενός σήματος, συνήθως δεν είναι επαρκής για να χαρακτηρίσει σήματα των οποίων το συχνοτικό περιεχόμενο μεταβάλλεται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα έχουμε στο παρακάτω σχήμα





Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει παραστατικά την εγγενή αδυναμία του μετασχηματισμού Fourier να προσφέρει χρονική πληροφορία για τις συχνότητες που έχει εντοπίσει, παρόλο που μας δίνει την πληροφορία ότι υπάρχουν δύο διακριτές συχνότητες δεν μας δίνει την χρονική τους πληροφορία (πόση διάρκεια έχουν, αν συνυπάρχουν στο σήμα). Δεν έχουμε λοιπόν τη δυνατότητα να διαχωρίσουμε την αρχή και το τέλος κάθε συχνοτικής συνιστώσας εντός του προς εξέταση σήματος

3.3 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.

3.4 Κυματιδιακοί κανόνες κατοφλίου

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 Wf 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

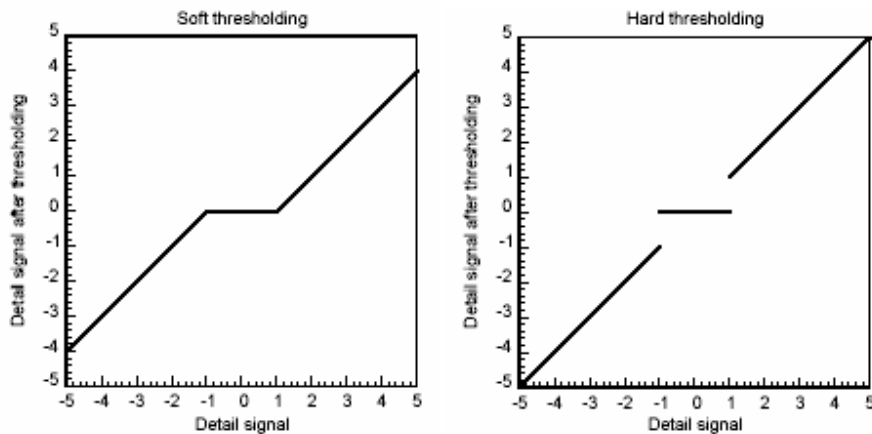
μικρής κλίμακας (υψηλές συχνότητες). Για να μειωθεί ο θόρυβος, κάποιος μπορεί απλά να μειώσει ή να αποβάλει τους συντελεστές λεπτομέρειας των οποίων το μέγεθος είναι κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή κατώτατων ορίων. Αυτή η διαδικασία που βρίσκεται συνήθως στη βιβλιογραφία με το όνομα η συρρίκνωση κυματιδίων. 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 ασυνεχειάς 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:

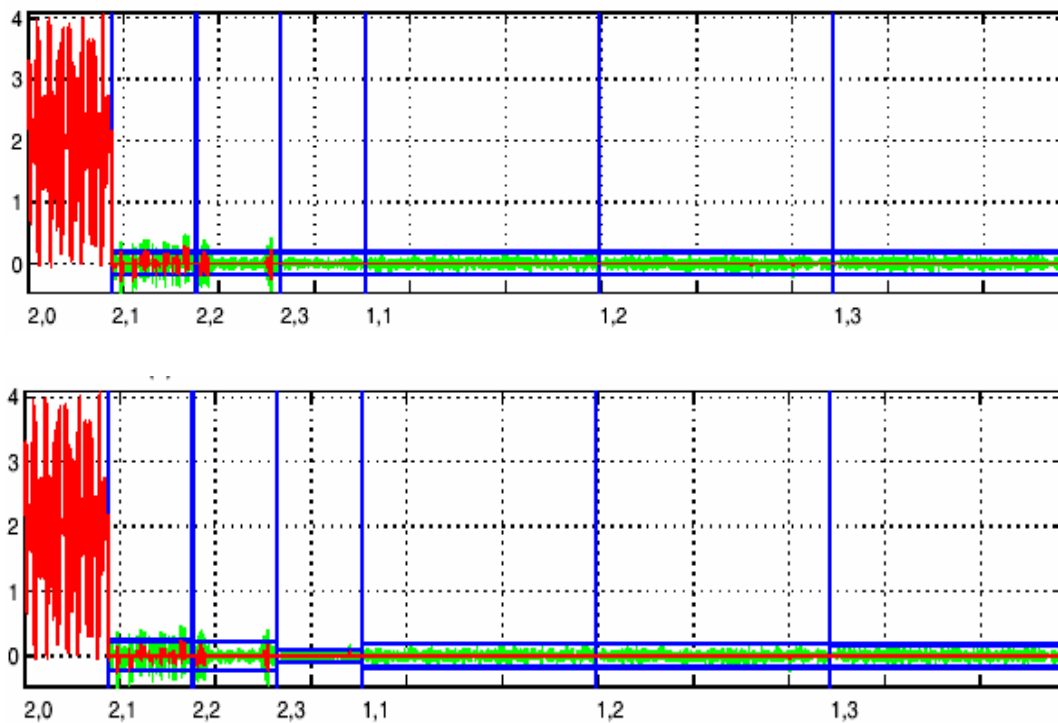
$$d_{j,k}^{SCAD} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k}) \max(0, |d_{j,k}| - \lambda) & \text{if } |d_{j,k}| \leq 2\lambda \\ \frac{(\alpha-1)d_{j,k} - \alpha\lambda \text{sign}(d_{j,k})}{\alpha-2} & \text{if } 2\lambda < |d_{j,k}| \leq \alpha\lambda \\ d_{j,k} & \text{if } |d_{j,k}| > \alpha\lambda \end{cases}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

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 συνάρτηση 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.

3.5 Άμεσοι κυματιδιακοί εκτιμητές κατώφλιου

Το κατώφλι λ μπορεί να επιλεχτεί 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 κλασική 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 στο λεπτομερέστερο επίπεδο. Ο παράγοντας 0.6745 κανονικοποιεί το σ προκειμένου να είναι κατάλληλος εκτιμητής.

3.5.1 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

3.5.2 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 l^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

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

Το μόνο μειονέκτημα του Sureshrink είναι ότι όταν οι συνιστώσες κυματιδίων χαρακτηρίζονται από αξιοσημείωτη 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:

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

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 .

3.5.3 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 προκειμένου 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 τετραγωνικό 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 κατωφλίου 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 κατανομημένα είναι της μορφής αφαιρούμενων δεδομένων. Τα ομαλώς κατανομημένα $m-1$ δείγματα επαναπροσδιορίζονται από $j=1$ σε 2^{m-1}
- Από τα επαναπροσδιοριζόμενα y_i μία εκτιμώμενη συνάρτηση \hat{f}_t^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}_t^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 $\lambda_{\min} = \arg \min_{\lambda \geq 0} M(\lambda)$

3.5.4 Προσέγγιση «Ελέγχου Πολλαπλής Υπόθεσης»

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 διατηρηθούν 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 $m = \max \left\{ i : p_i < \left(\frac{i}{m} \right) \alpha \right\}$. ($0.01 < \alpha < 0.05$) 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}

3.5.5 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 $\hat{i} = \{\hat{i}_1, \hat{i}_2, \dots, \hat{i}_s\}$ 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 α για αυτήν την κατανομή υπολογίζεται έπειτα ως:

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

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)

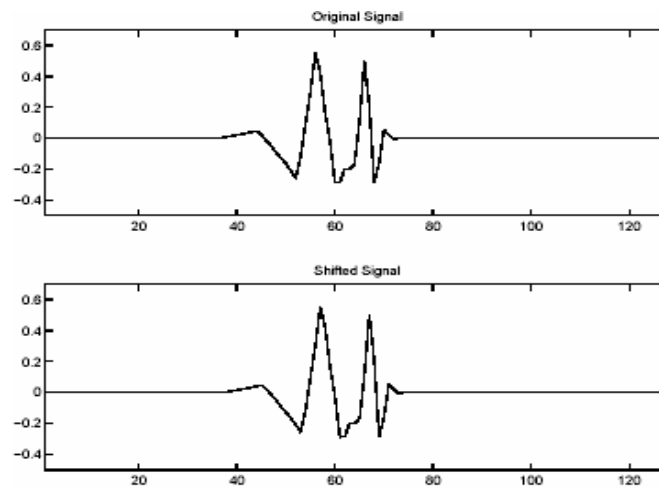
Ο παραπάνω αλγόριθμος μπορεί να ερμηνευτεί σαν ένας κανόνας ST χρησιμοποιώντας κατώφλι εξαρτώμενου επιπέδου και ονομάζεται *thrsda*. Το κρίσιμο σημείο είναι μία τιμή του α . Μια μικρή τιμή θα οδηγούσε σε ένα μικρό αριθμό των κυματιδιακών συνιστωσών συμπεριλαμβανομένου στην αναπαράσταση δημιουργώντας 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 $\alpha=0.06$.

3.5.6 Κατώφλι Αμετάβλητης Ολίσθησης

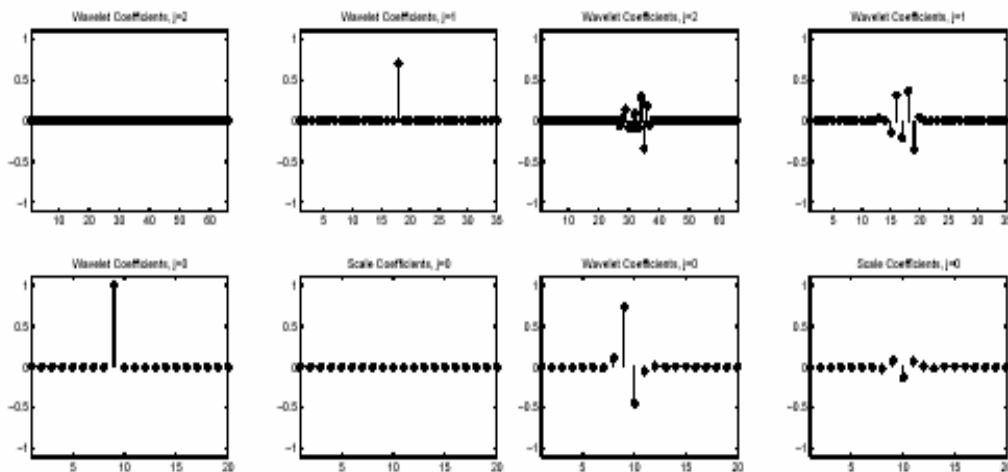
Το κυματιδιακό κατώφλι χρησιμοποιώντας DWT μερικές φορές κυριαρχείται από τεχνητά φαινόμενα διαφόρων ειδών. Αυτά τα αντικείμενα είναι προφανέστερα κοντά σε ασυνέχειες όπου εκτίθενται όπως τα ψευδό-Gibbs φαινόμενα, ως υπέρ ή υπό ύψωση σε συγκεκριμένες κλίμακες. Προκειμένου να βελτιωθεί η καταστολή αυτών 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 αποθρονοποίηση 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 συμπίεσμένο. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παριστάνεται στο Σχήμα 3.4α και β



Σχήμα 3.4.α. 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 έκδοση 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 συμπεστής 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 $f(k) \{k=1,2,\dots,n\}$ $S_{hf}(k)=f(k+h \bmod n)$. Το αποθορυβοποιημένο σήμα \hat{f} χρησιμοποιώντας το αμετάβλητο κυματιδιακό κατώφλι μετάφρασης λ_{Π} που ορίζεται ως:

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

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

3.6 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)

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

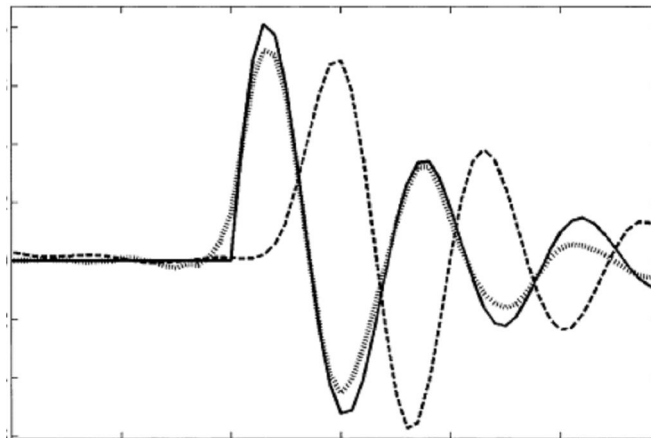
Τα παραπάνω μέτρα χρησιμοποιούνται ευρέως στις μελέτες αποθορυβοποίησης και η πληροφορία που παράγεται μπορεί να χαρακτηριστεί ως “ποσοτική” αφού παρέχουν τις αριθμητικές αποδείξεις για την απόδοση της μεθόδου αποθορυβοποίησης. Η “ποσοτική” προσέγγιση απαιτεί μέτρα τα οποία μπορούν να εξετάσουν την επιτυχία 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 & Tsybakov (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).

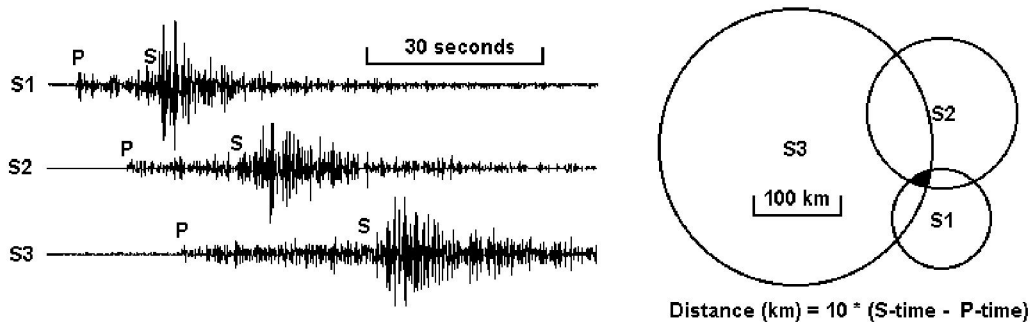
Είναι γνωστό ότι τα συμβατικά φίλτρα παρουσιάζουν κάποια καθυστέρηση στο αποτέλεσμα του σήματος στις λανθασμένες χρονικές αφίξεις (Scherbaum, 1996). Γενικά, οι μέθοδοι αποθορυβοποίησης κυματιδίων βελτιώνουν αυτό το μειονέκτημα και όπως φαίνεται από τον Πίνακα 3.9 υπάρχουν μικρές διαφορές ανάμεσα τους. 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 .



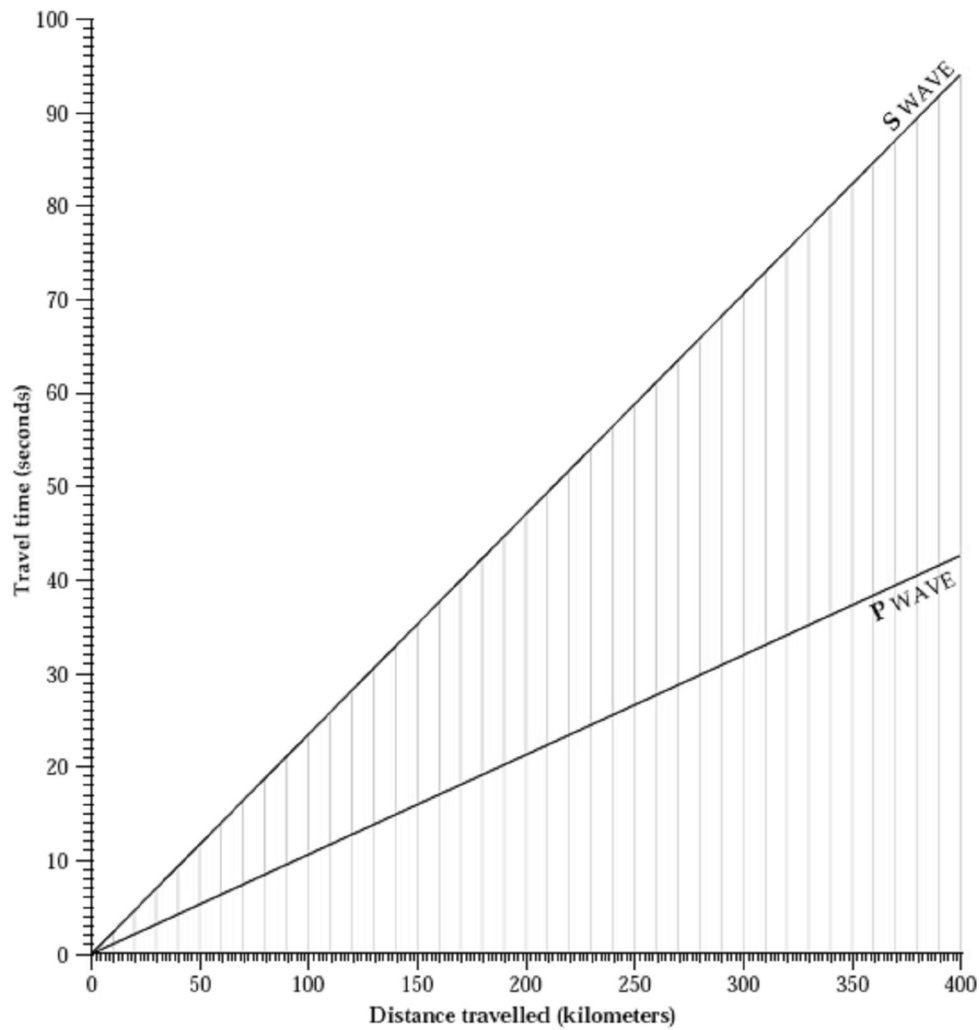
Σχήμα 3.6. Χρονικές διαφορές για την άφιξη του κύματος P ανάμεσα στο τεχνητό σήμα (έντονη μαύρη γραμμή), αποθορυβοποιημένο σήμα μετά το φιλτράρισμα με ένα Chebyshev τύπου I φίλτρο (λεπτή μαύρη διακεκομμένη γραμμή) και αποθορυβοποιημένο σήμα μετά το φιλτράρισμα μια κυματιδιακή μέθοδο (TI-H) (χοντρή γκρι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

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

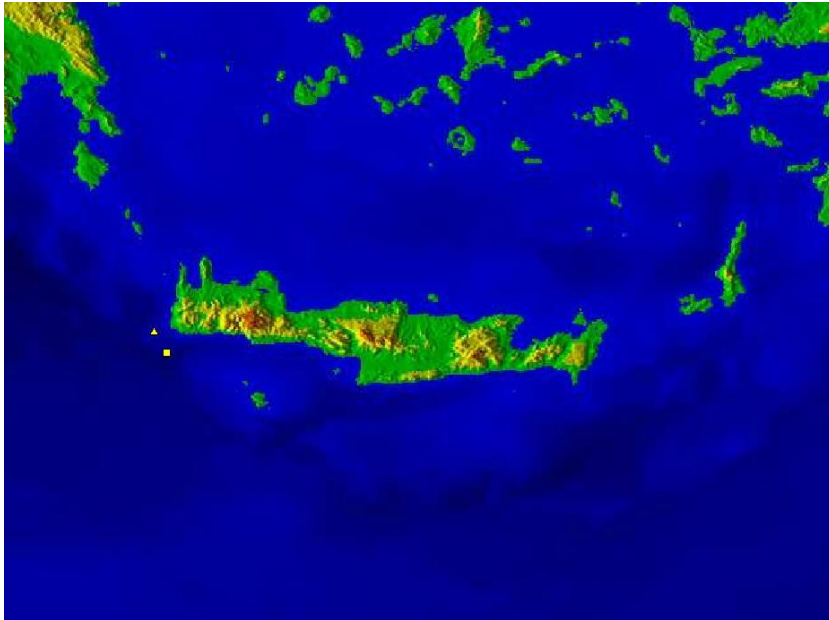
των αφίξεων του κύματος S και του κύματος P και έπειτα αντιστοιχίζοντας αυτή την χρονική διαφορά της απόσταση με την χρήση γραφημάτων travel-time, όπως αυτό στο Σχήμα 3.8. Είναι περισσότερο από προφανές ότι οι χρονικές διαφορές που παράγονται από το φιλτράρισμα μπορούν να αλλάξουν την εκτίμηση του επίκεντρου 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)

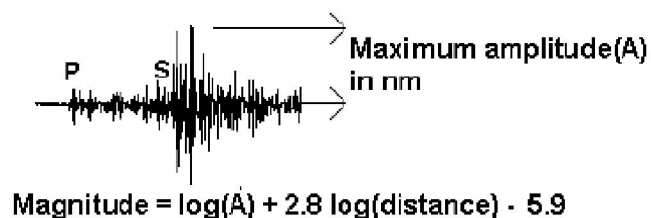


Σχήμα 3.8. Γράφημα Travel time



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



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

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Δεδομένα

Μια βάση δεδομένων 267 επιλεγμένων γεγονότων (από τις 1/10/2007 έως τις 30/8/2008) χρησιμοποιήθηκαν για αυτήν την μελέτη (Παράρτημα 1). 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 εμφανείς 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 .

Η βάση δεδομένων καταγραφών αποτελείται από τρεις ομάδες πραγματικών σεισμικών δεδομένων, που βαθμολογούνται από το A έως C 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 (db)	Παρατηρήσεις
A	>10	Πολύ καλή ποιότητα. Ο αναλυτής μπορεί σαφώς να προσδιορίσει τις αφίξεις των P κυμάτων
B	(3,10)	Μέτριας 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
c	(0,3)	Φτωχή ποιότητα. Δεν υπάρχει καμία ένδειξη του σεισμικού γεγονότος. Ο αναλυτής μπορεί μετά βίας να ανιχνεύσει την άφιξη των P κυμάτων μετά από το εκτενές φιλτράρισμα.

4.2 Μεθοδολογία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η παρακάτω:

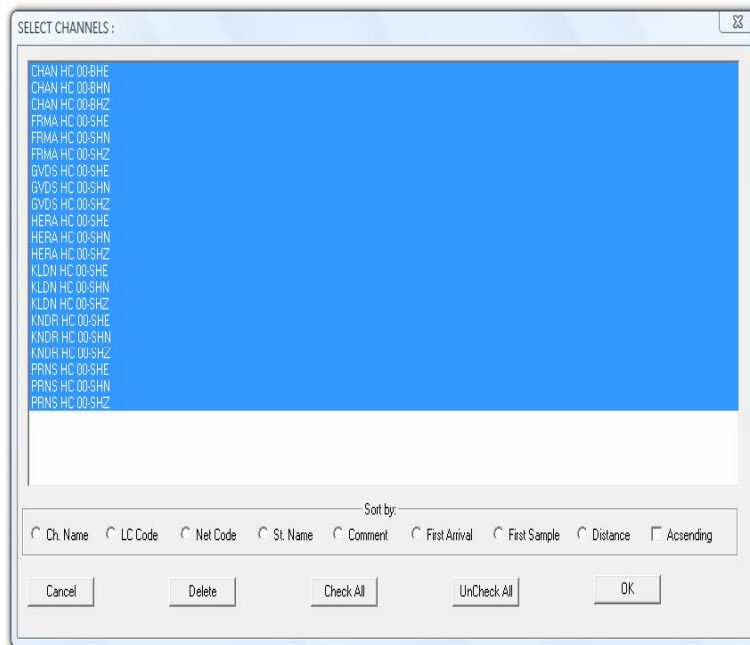
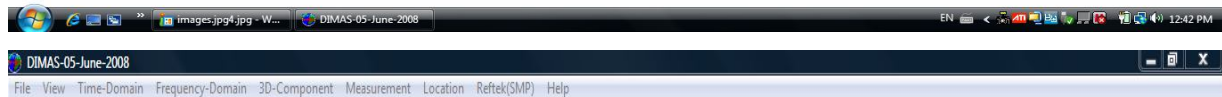
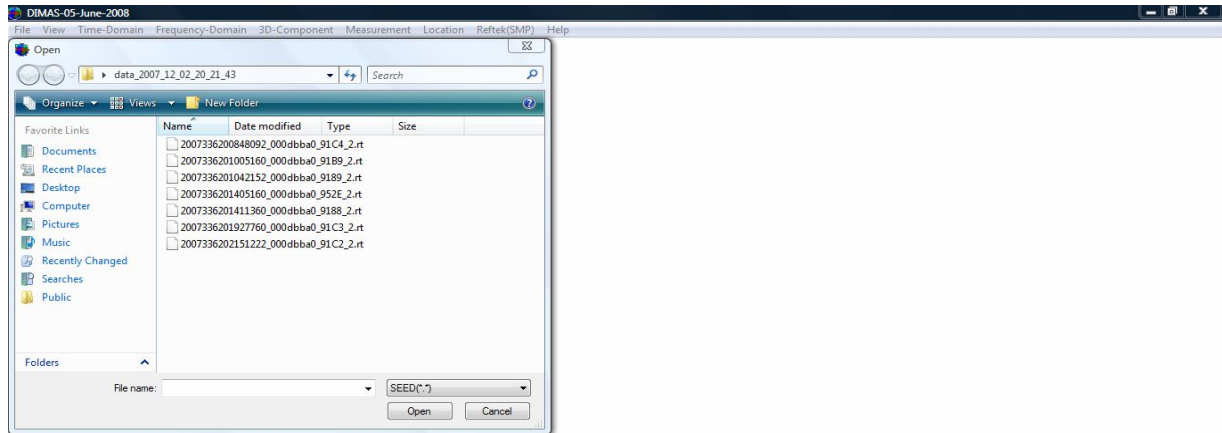
- Εντοπισμός των σεισμικών γεγονότων
- Απόρριψη όσων γεγονότων δεν έχουν καταγραφεί ή αναφερθεί και από άλλα σεισμολογικά ινστιτούτα
- Εξαγωγή των κυματομορφών από όλους τους σταθμούς και κατάταξη τους σε μία από τις κατηγορίες A, B, C
- Παραγωγή αποθρομβοποιημένων σημάτων με συμβατικά φίλτρα (ζωνοπερατό Butterworth, ζωνοπερατό Chebychev και διέλευσης υψηλών Chebychev)
- Εντοπισμός άφιξης P-κυμάτων.
- Φιλτράρισμα με φίλτρων κυματιδίων
- Υπολογισμός διαφορών χρόνων άφιξης P κυμάτων

Όλες οι παραπάνω διαδικασίες υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον Matlab 7 και με το software Dimas.

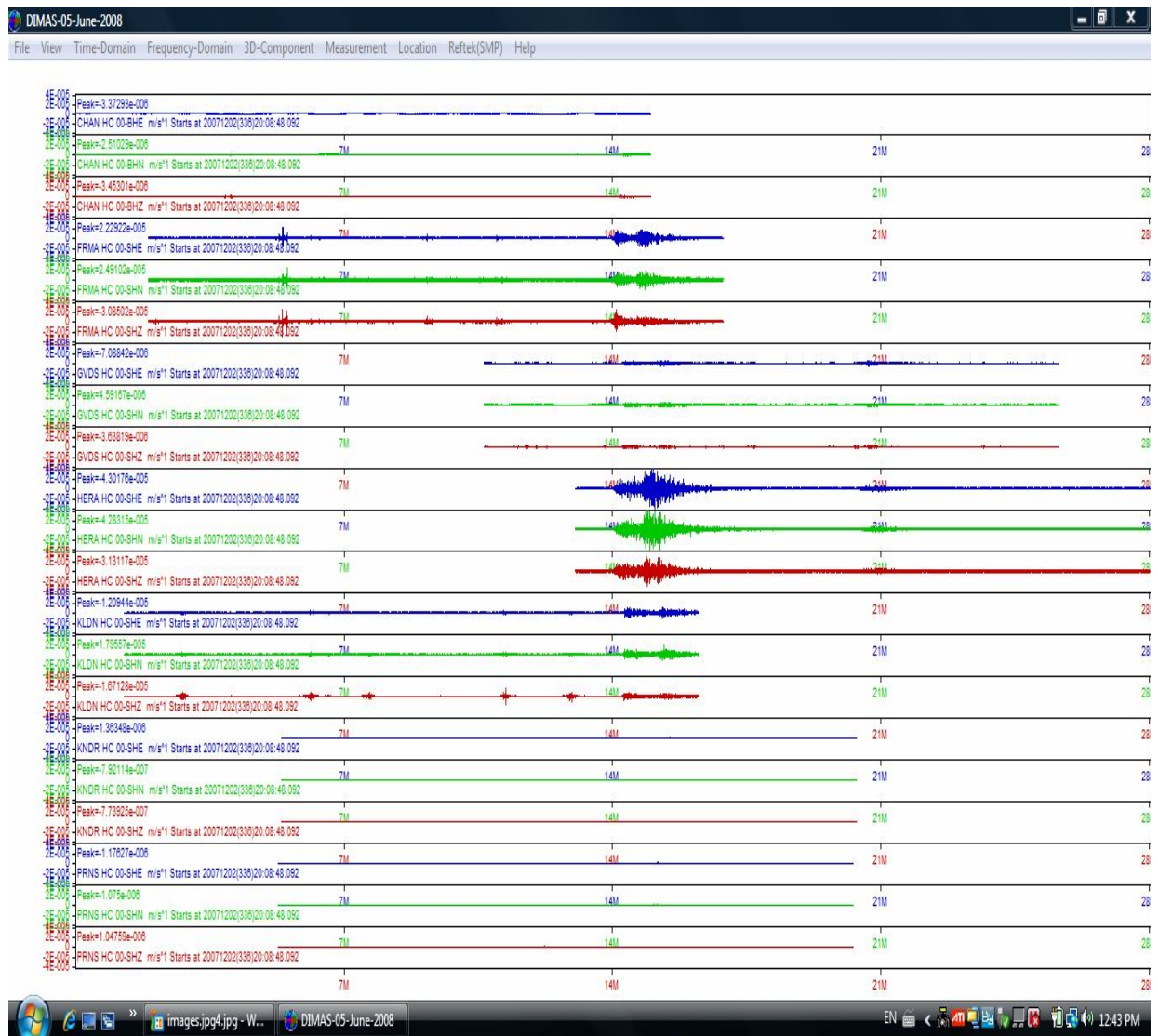
Σημειώνουμε ότι ήταν απαραίτητη η μετατροπή δεδομένων από το format που χρησιμοποιούν οι σεισμολογικοί σταθμοί σε ASCII και στη συνέχεια εισαγωγή του σε περιβάλλον matlab.

Τα παραπάνω βήματα παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αρχικά τα δεδομένα φορτώθηκαν στο πρόγραμμα Dimas, με μορφή reftek αρχείων.

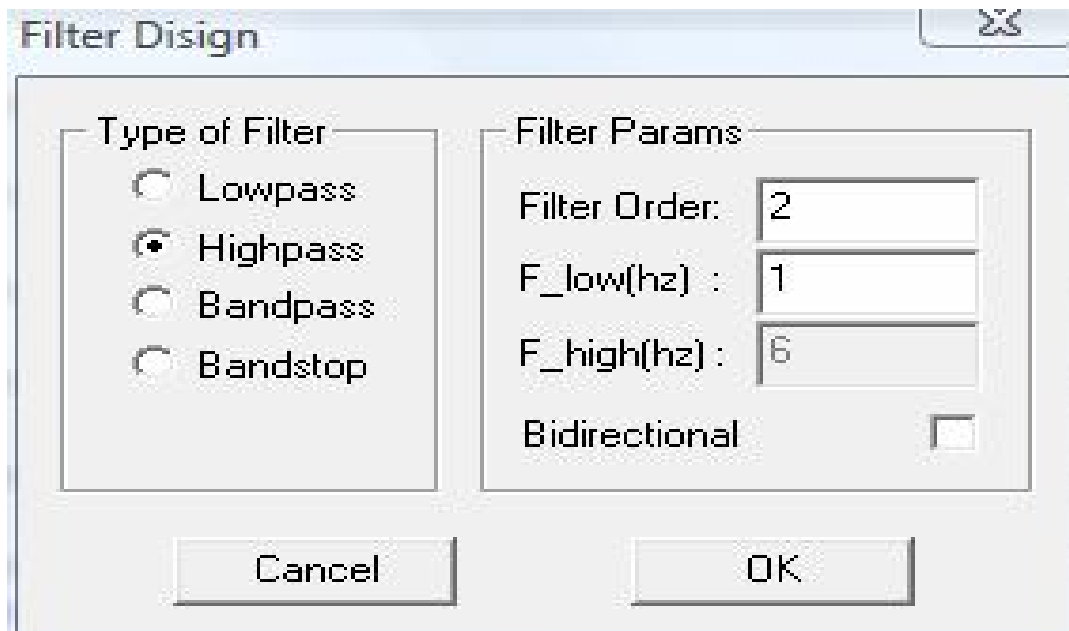


- Αποθηκεύτηκαν αφιλτράριστα σε αρχείο μορφής .asc (File-Save Data), με την ίδια ακριβώς ονομασία

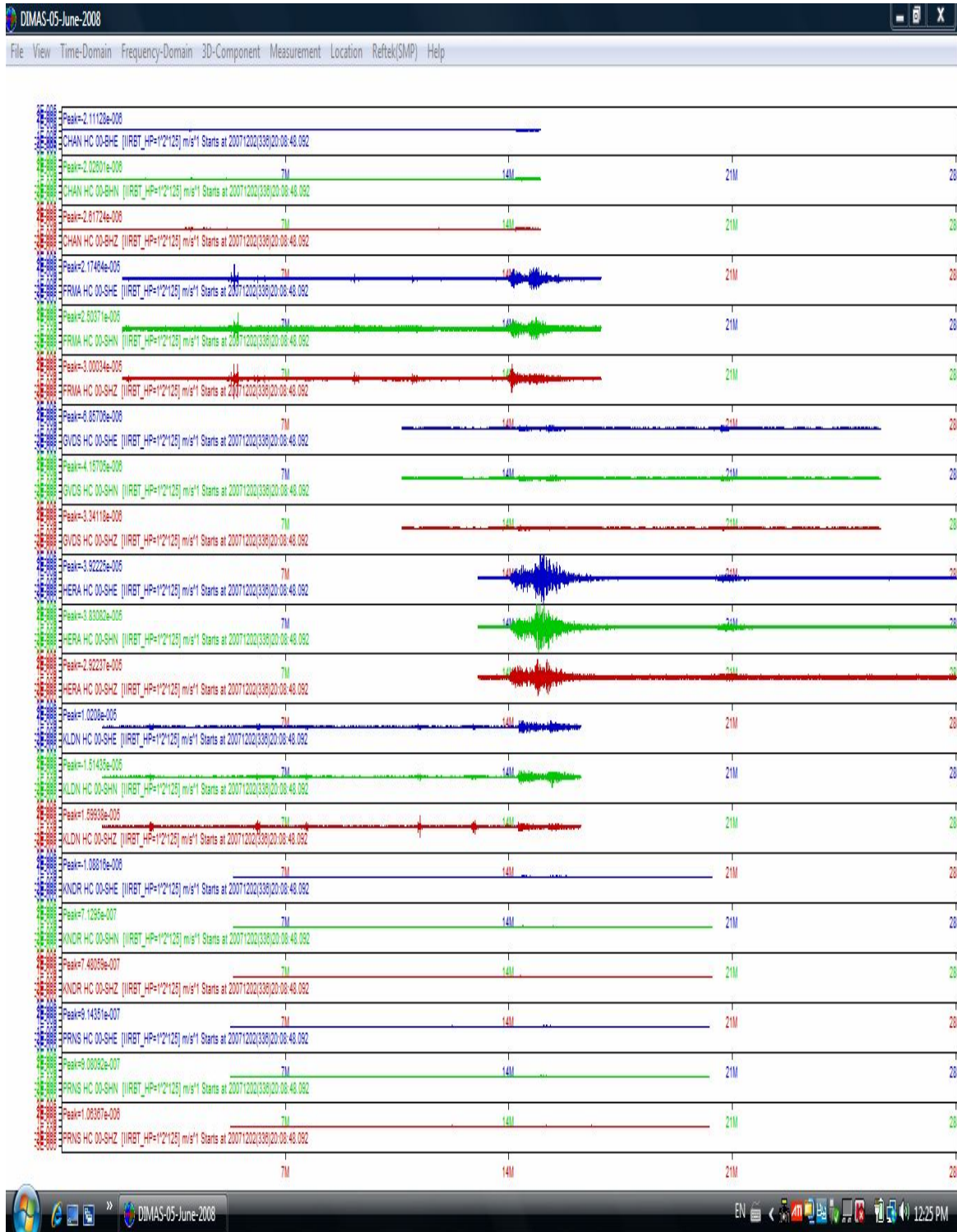


- Έπειτα αφαιρέσαμε την μέση τιμή (Time Domain-Mean Removal).

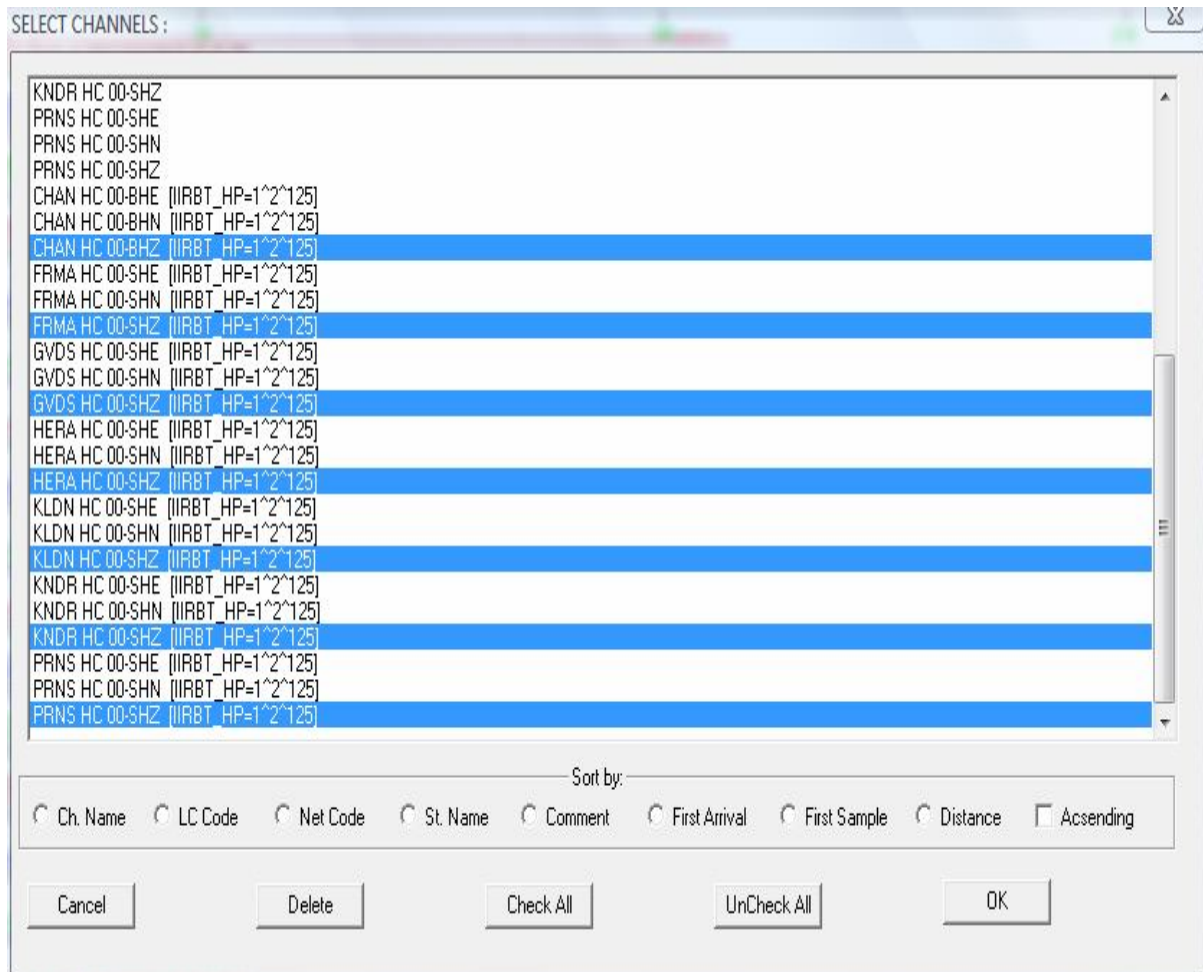
- Στην συνέχεια εφαρμόσαμε φίλτρο IIR Butterworth Highpass με παράμετρο $F_{low}(hz)$ την τιμή της μονάδας(1).



➤ Τα δεδομένα μετά το φιλτράρισμα παρατηρούμε ότι έχουν καθαρίσει αρκετά..

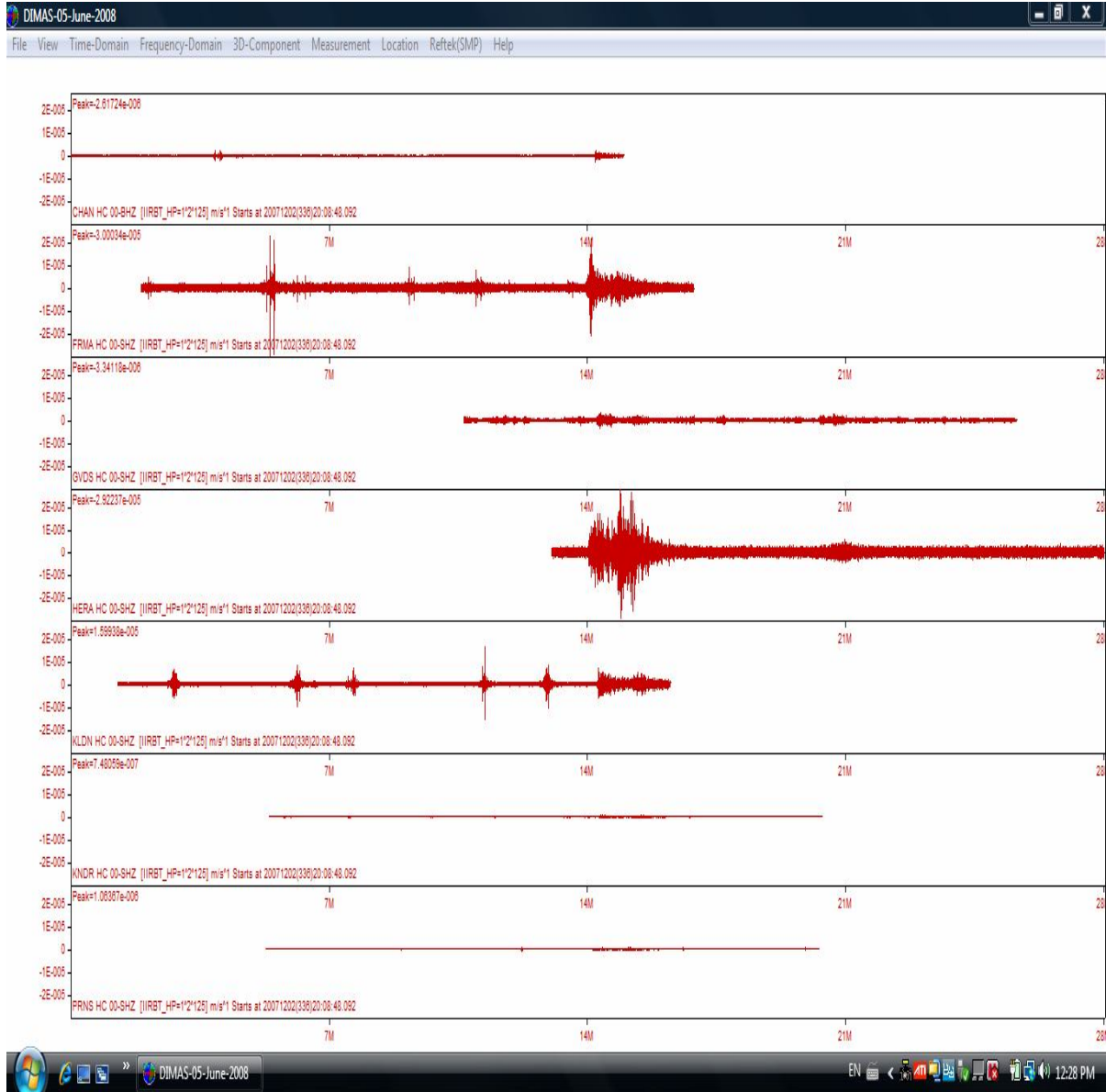


- Μετά από το φιλτράρισμα των δεδομένων επιλέγουμε την Z συνιστώσα για όλους τους σταθμούς που έχει καταγραφεί ο σεισμός.

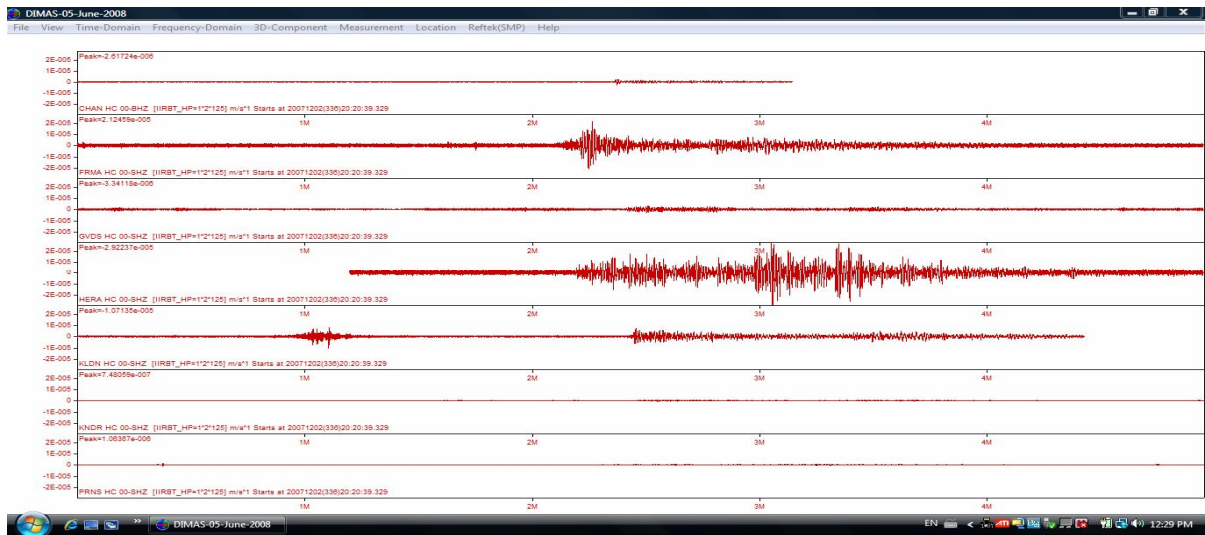


- Αφού απομονώσουμε όλες τις Z συνιστώσες δουλεύουμε πάνω στο αρχείο , επιλέγοντας τους χρόνους άφιξης των P κυμάτων. Δίνονται αναλυτικά τα στάδια επεξεργασίας με εικόνες για την διαδικασία που ακολουθήσαμε.(View-Select Channels).

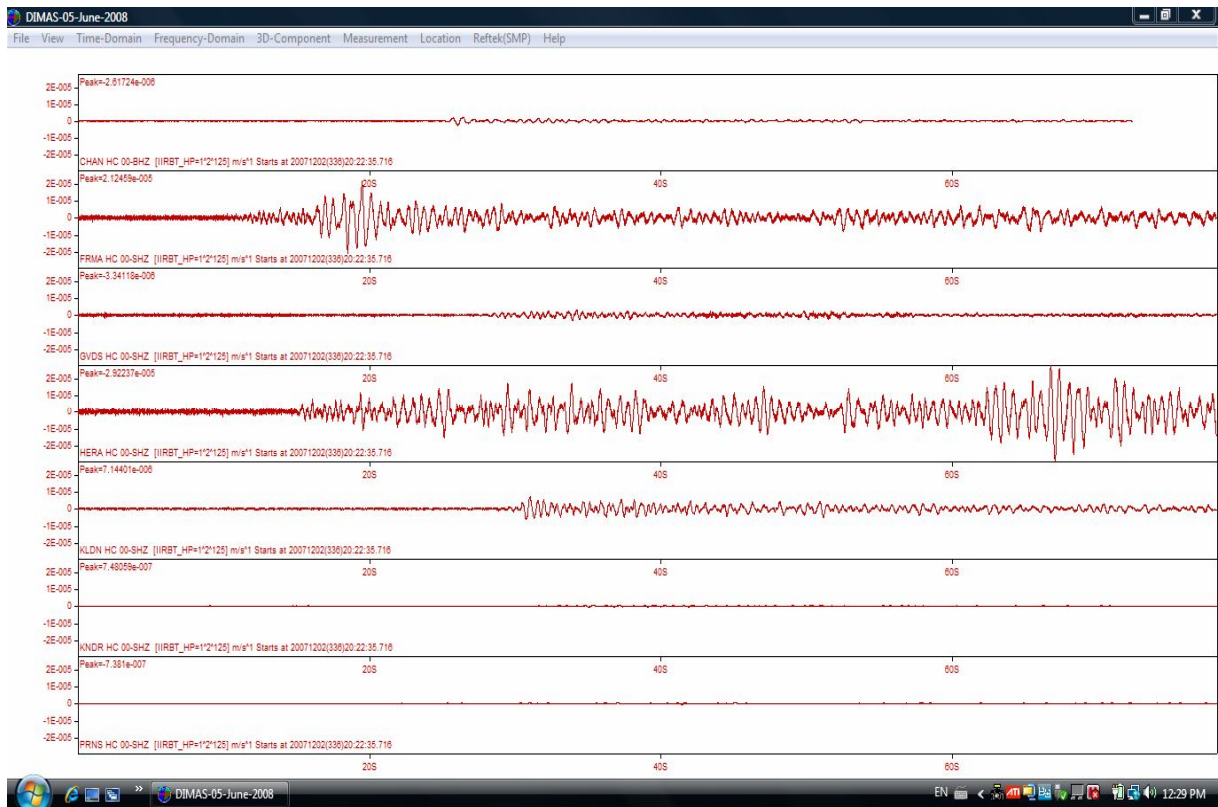
- Μόλις επιλέξουμε όλες τις Z συνιστώσες τα δεδομένα εμφανίζονται με την παρακάτω μορφή..



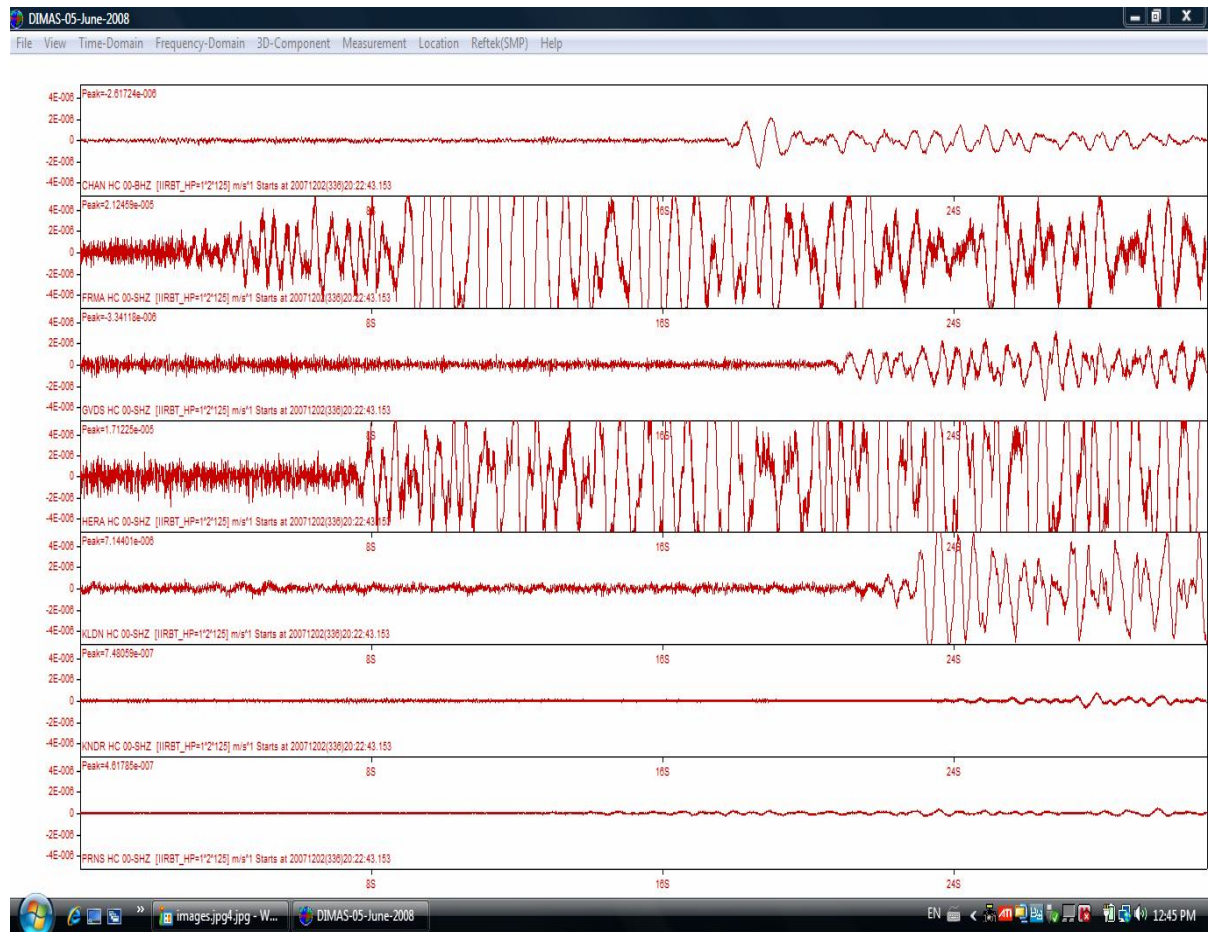
➤ Κάνουμε zoom, ώστε να έχουμε καλή εικόνα για το χρόνο άφιξης..



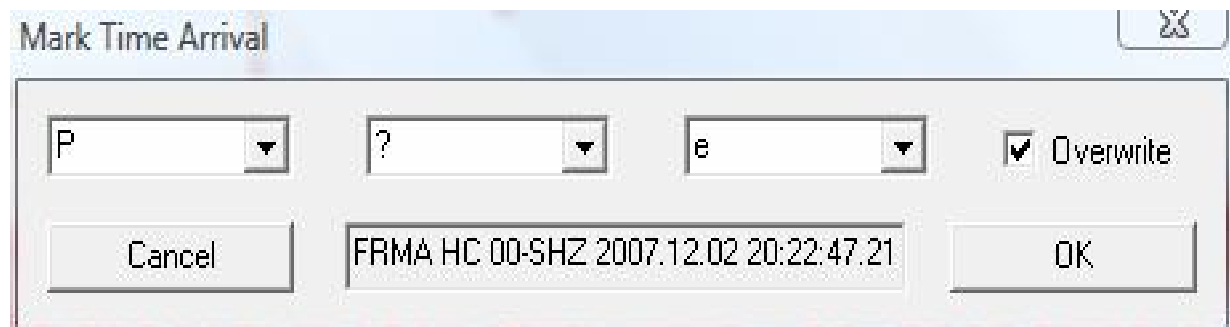
Και δεύτερο zoom, αν κρίνουμε ότι χρειάζεται μέχρι να φτάσουμε στο επιθυμητό σημείο.



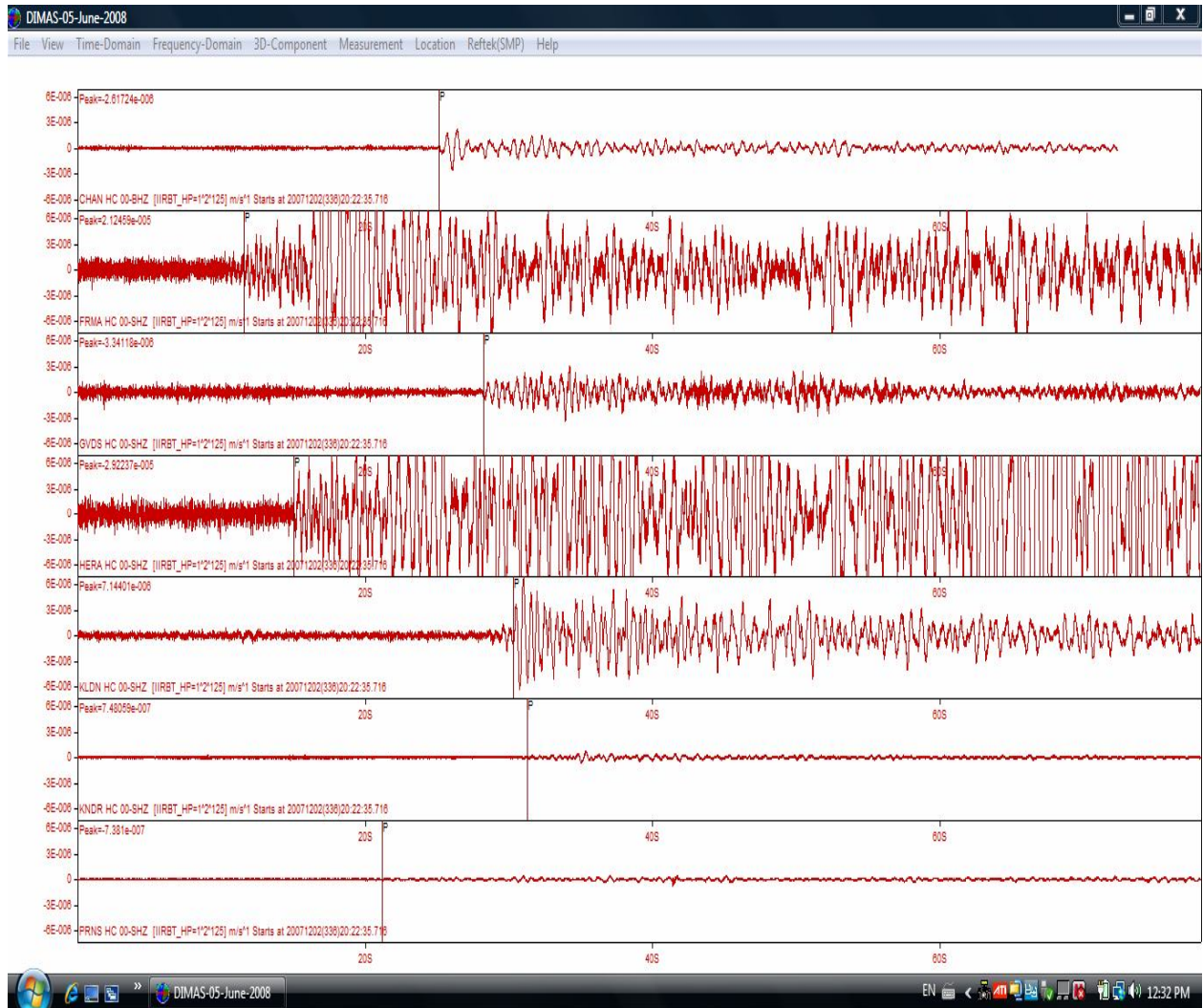
Εδώ είναι η τελική φάση όπου έχουμε καθαρή εικόνα και ξεκινάμε το μαρκάρισμα.



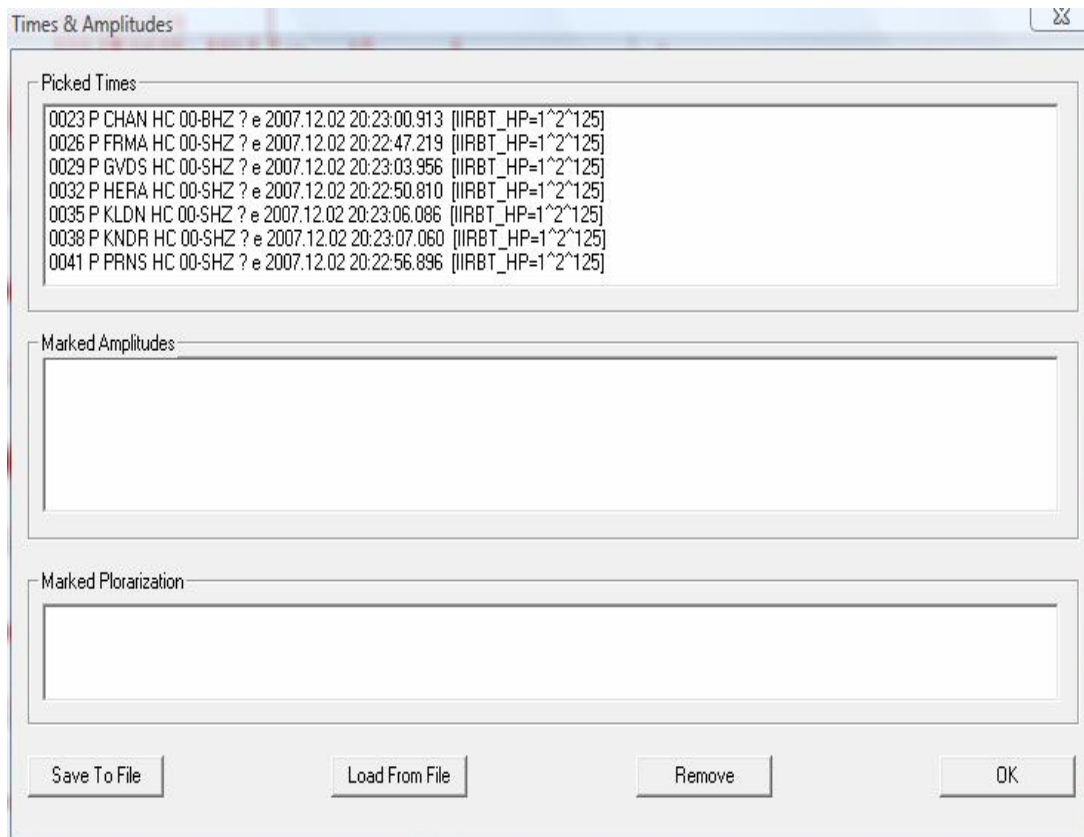
- Επιλέγουμε το σημείο που προσδιορίζει την χρονική άφιξη των κυμάτων P για κάθε σταθμό ξεχωριστά. (Measurement-Pick Time)



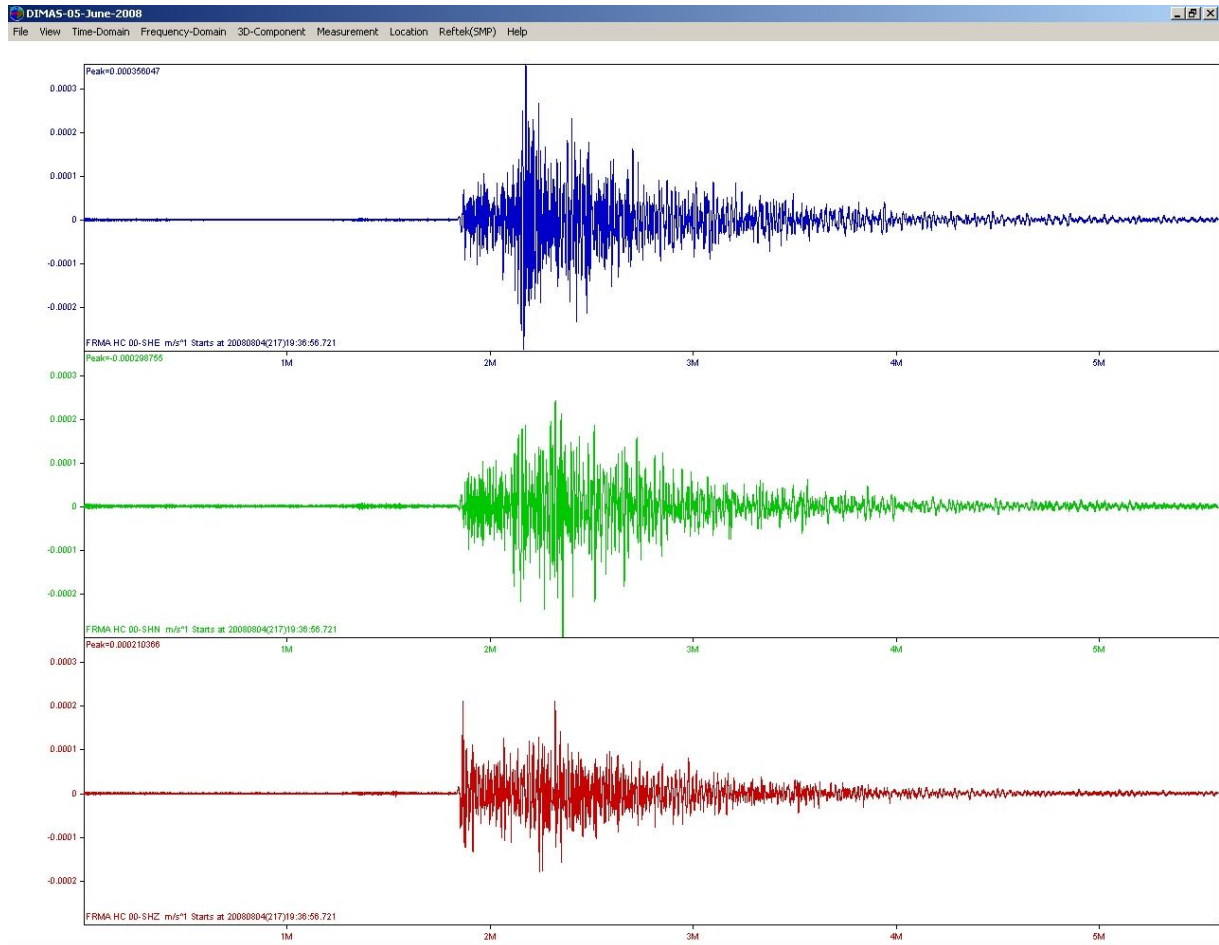
Έτσι καταλήγουμε στο μαρκάρισμα των περισσότερων ή και όλων των σταθμών που μπορούμε να διακρίνουμε τον σεισμό.



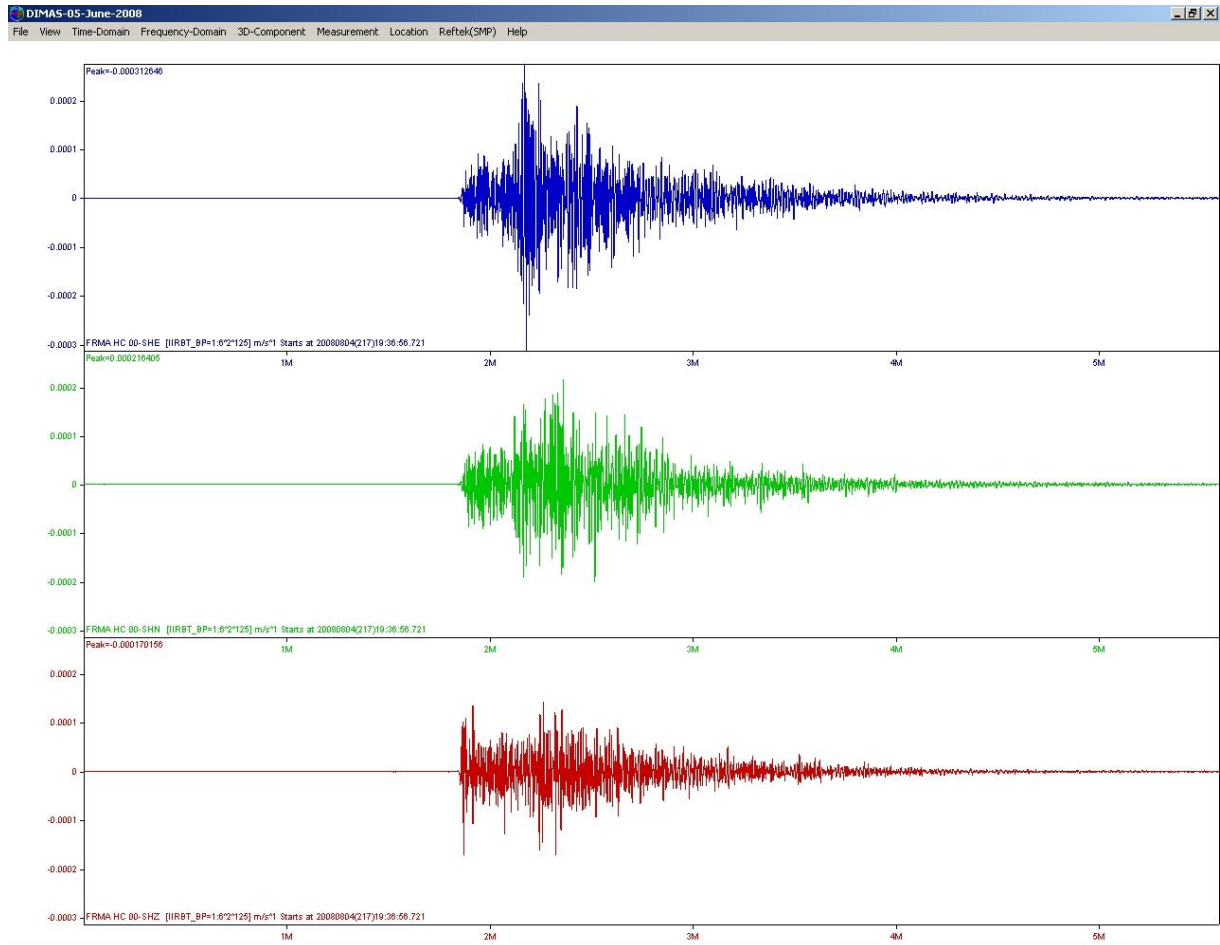
- Τέλος εμφανίζονται συγκεντρωτικά, όλοι οι σταθμοί που μαρκάραμε σε μία λίστα την οποία και αποθηκεύουμε σε αρχείο τύπου .pks με το ίδιο ακριβώς όνομα.



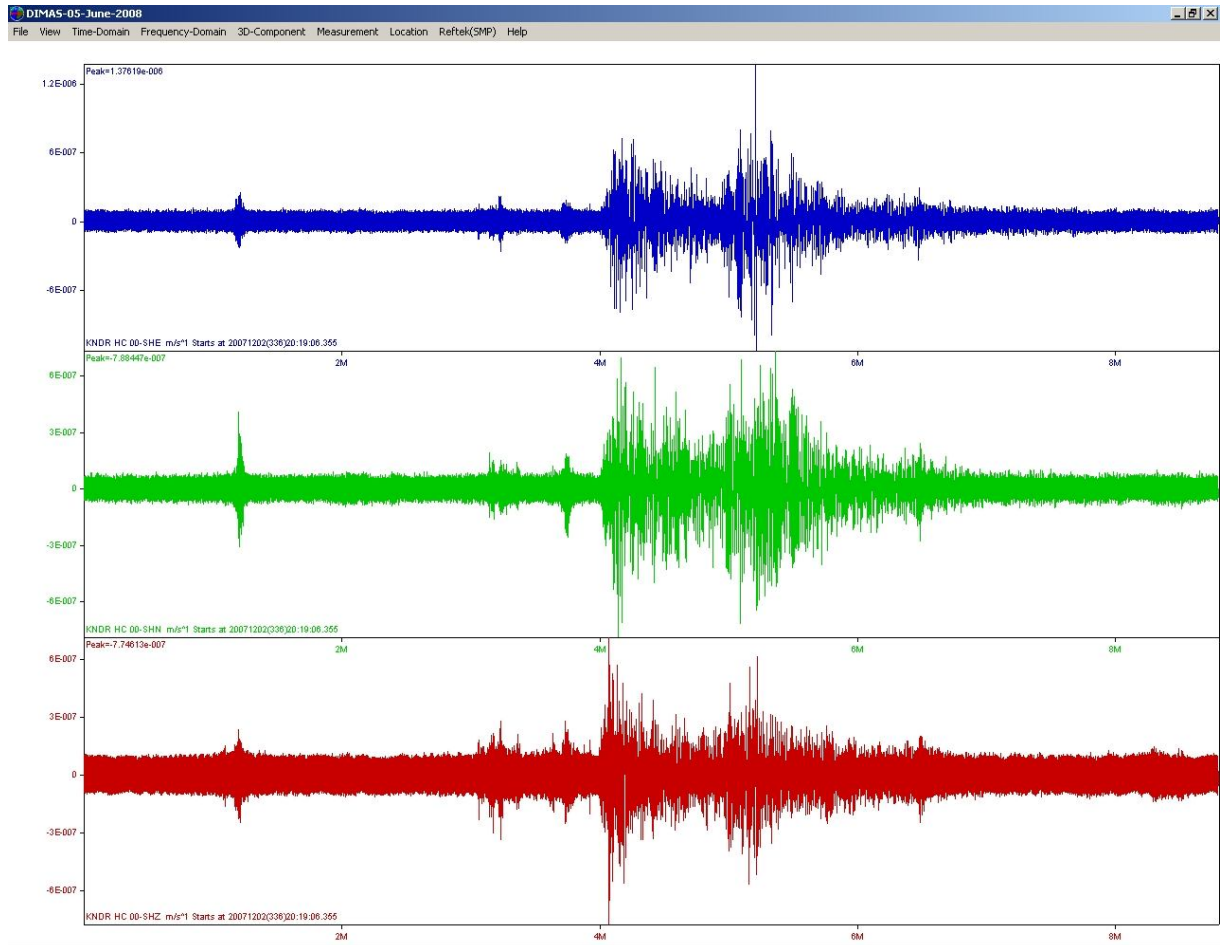
Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί τη γενικευμένη διαδικασία. Υπήρχαν όμως περιπτώσεις όπου και μετά το φιλτράρισμα δεν ήταν δυνατή η ακριβής ανίχνευση λόγω του υψηλού παραμένουτος θορύβου. Για να γίνει κατανοητή η διαφοροποίηση της ποιότητας του σειсмоγράμματος, για την κάθε μία κατηγορία, παρουσιάζουμε στη συνέχεια τρεις χαρακτηριστικές καταγραφές (μία από κάθε κατηγορία και το αποτέλεσμα του φιλτραρίσματος κάθε μίας από αυτής)



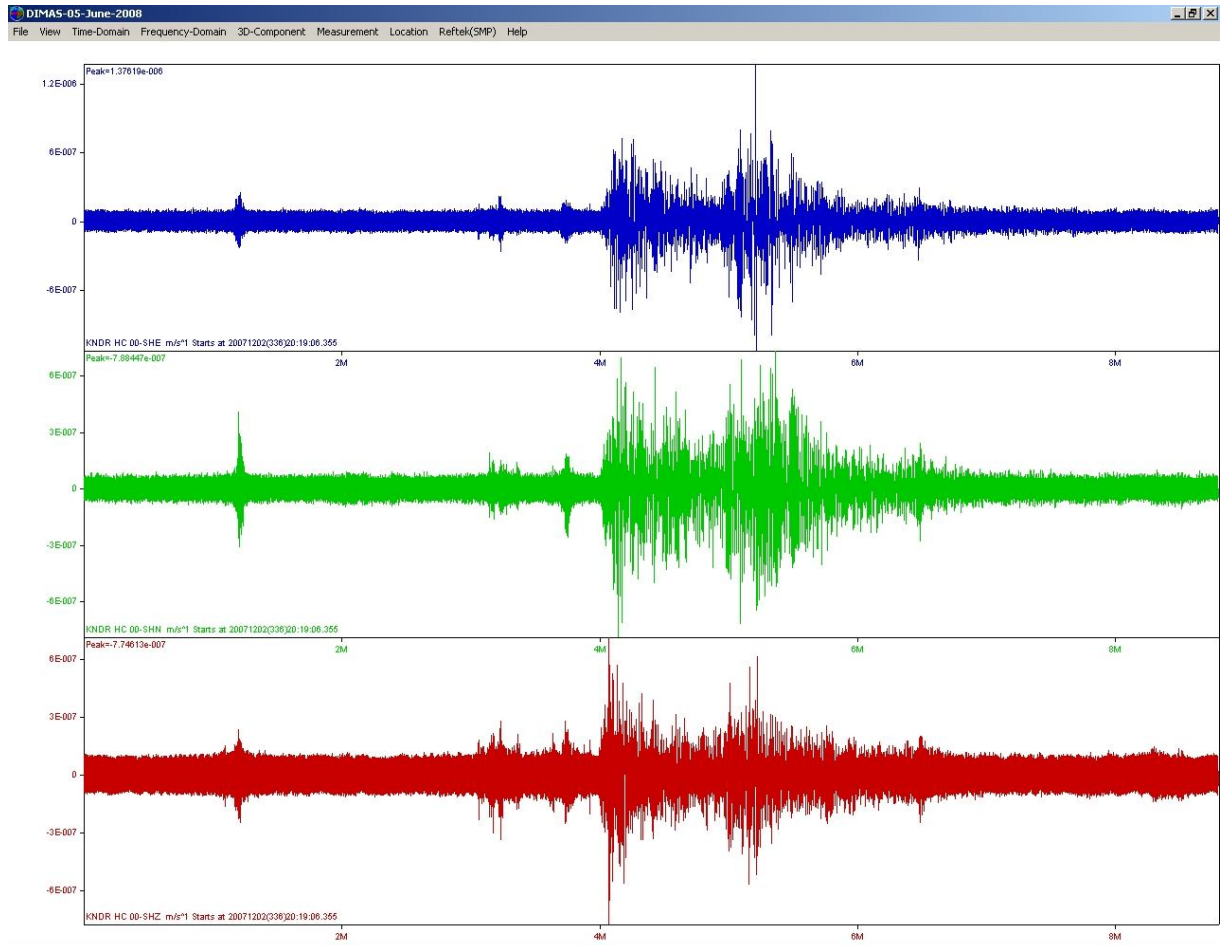
Σχήμα 4.1 Αφιλτράριστο σεισμόγραμμα κατηγορίας A



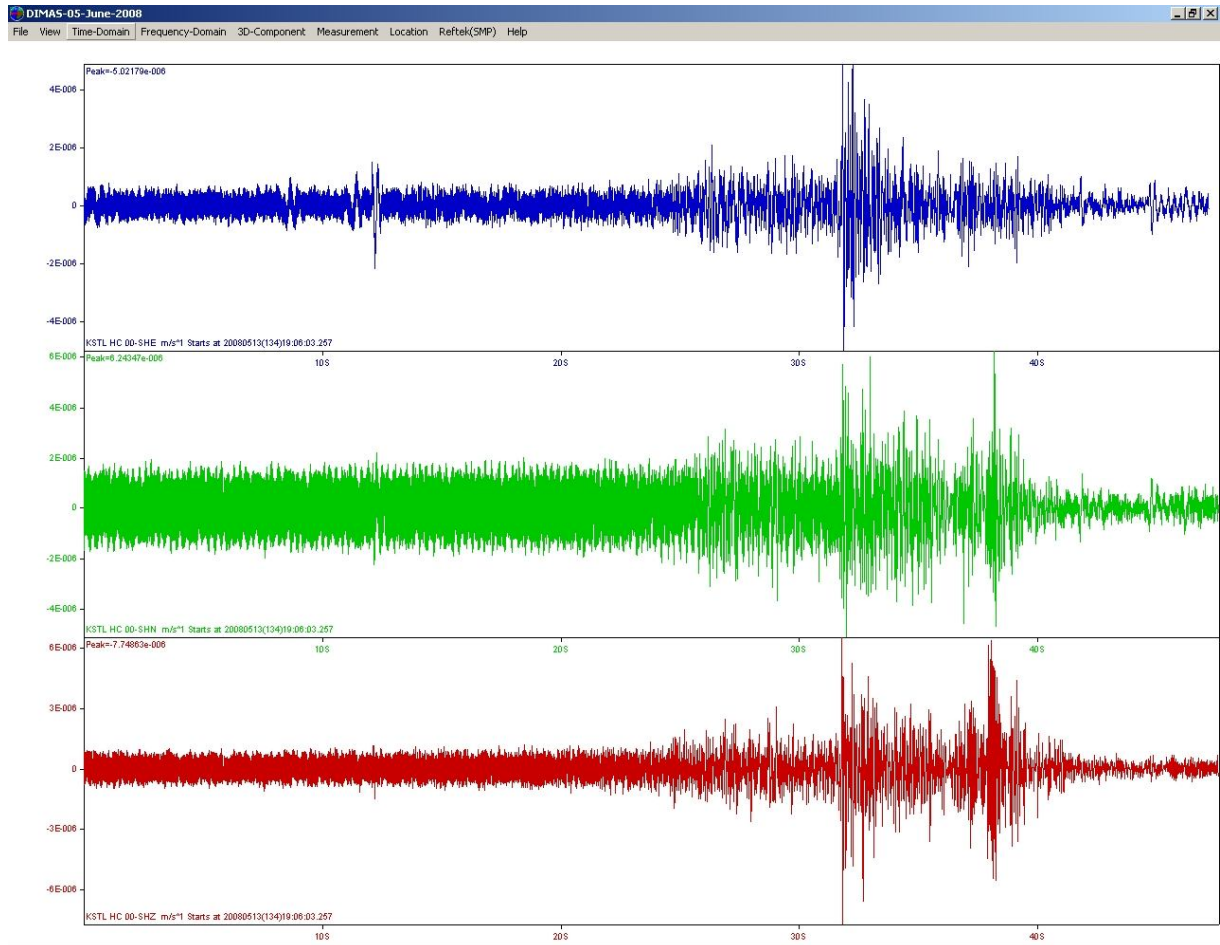
Σχήμα 4.2 Φιλτραρισμένο σεισμόγραμμα κατηγορίας A



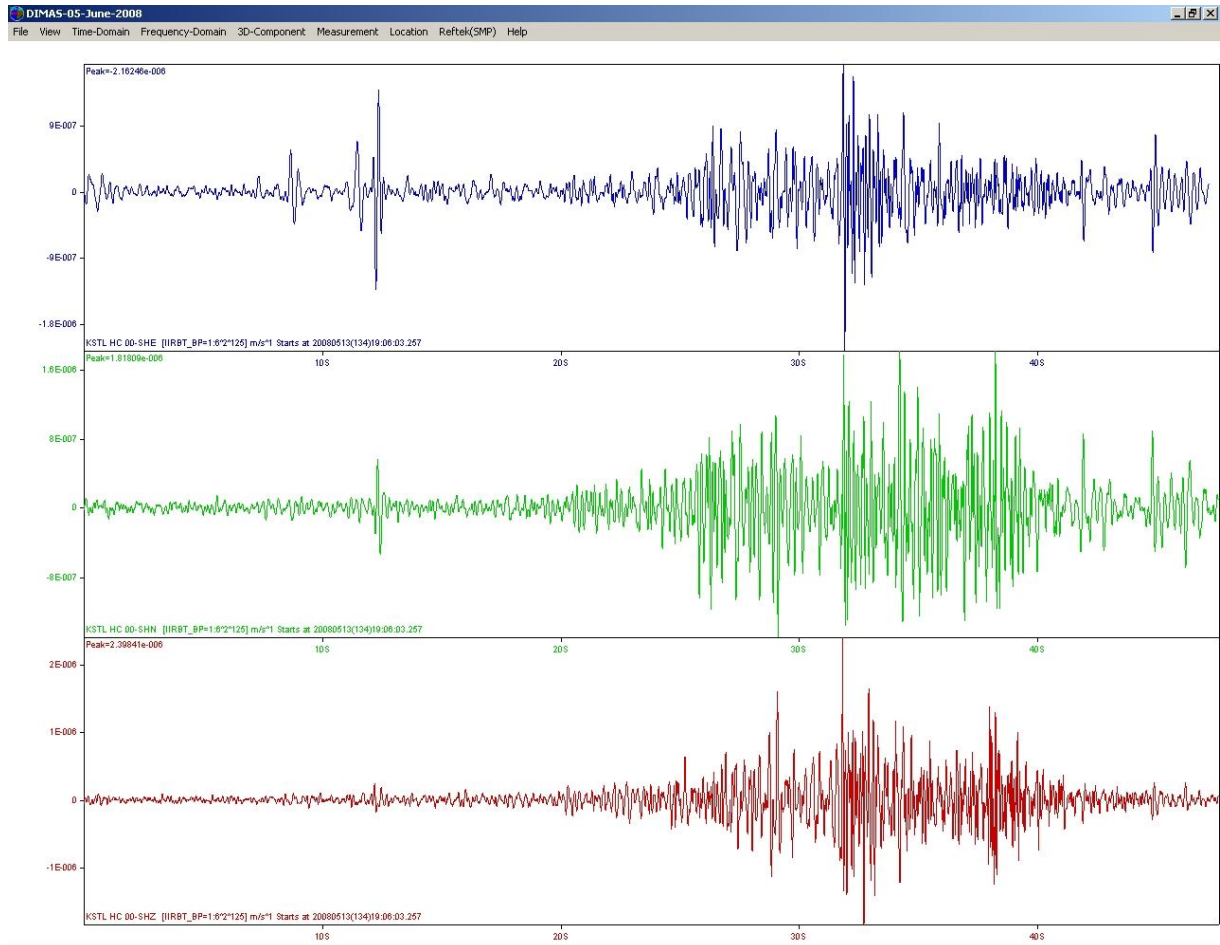
Σχήμα 4.3 Αφιλτράριστο σεισμόγραμμα κατηγορίας Β



Σχήμα 4.4 Φιλτραρισμένο σεισμόγραμμα κατηγορίας Β



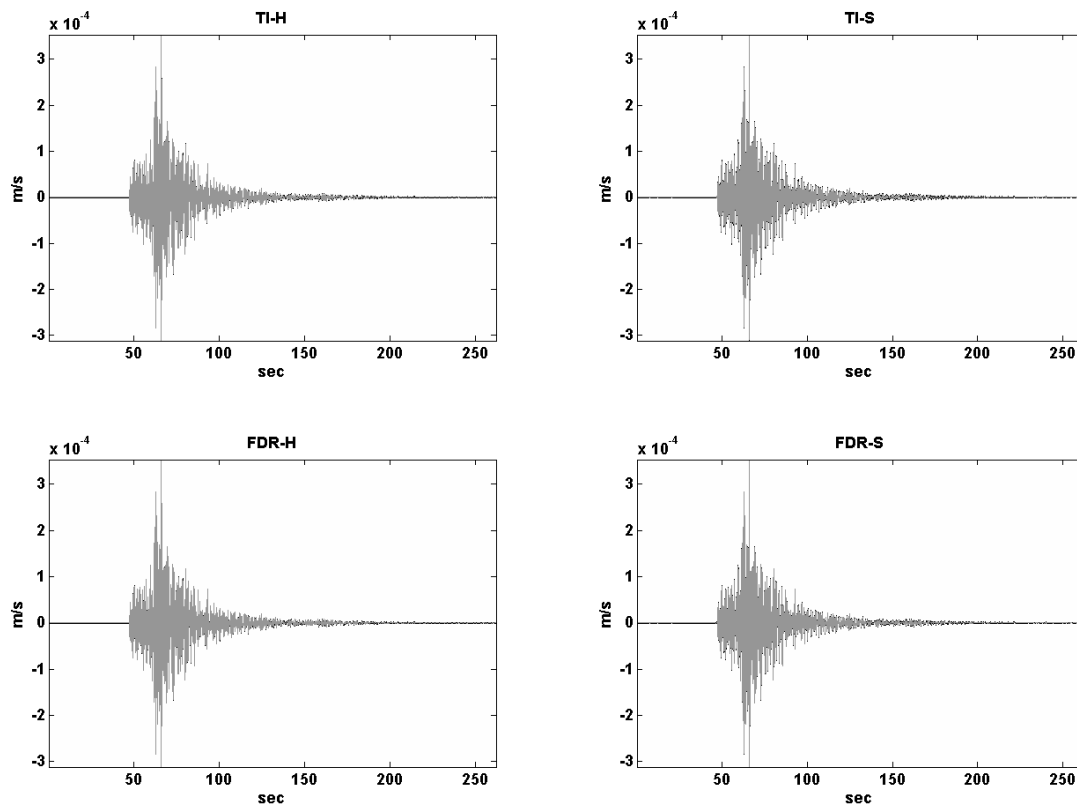
Σχήμα 4.5 Αφιλτράριστο σεισμόγραμμα κατηγορίας C



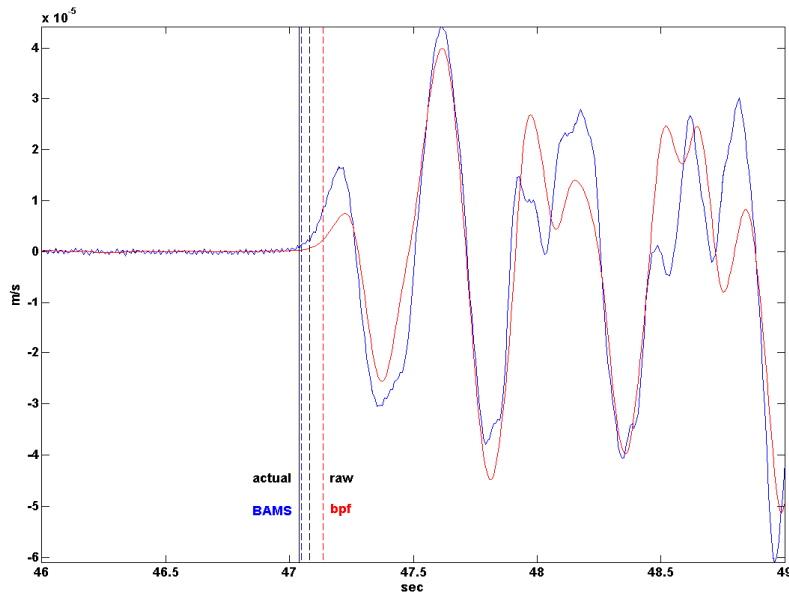
Σχήμα 4.6 Φιλτραρισμένο σεισμόγραμμα κατηγορίας C

4.3 Αποτελέσματα

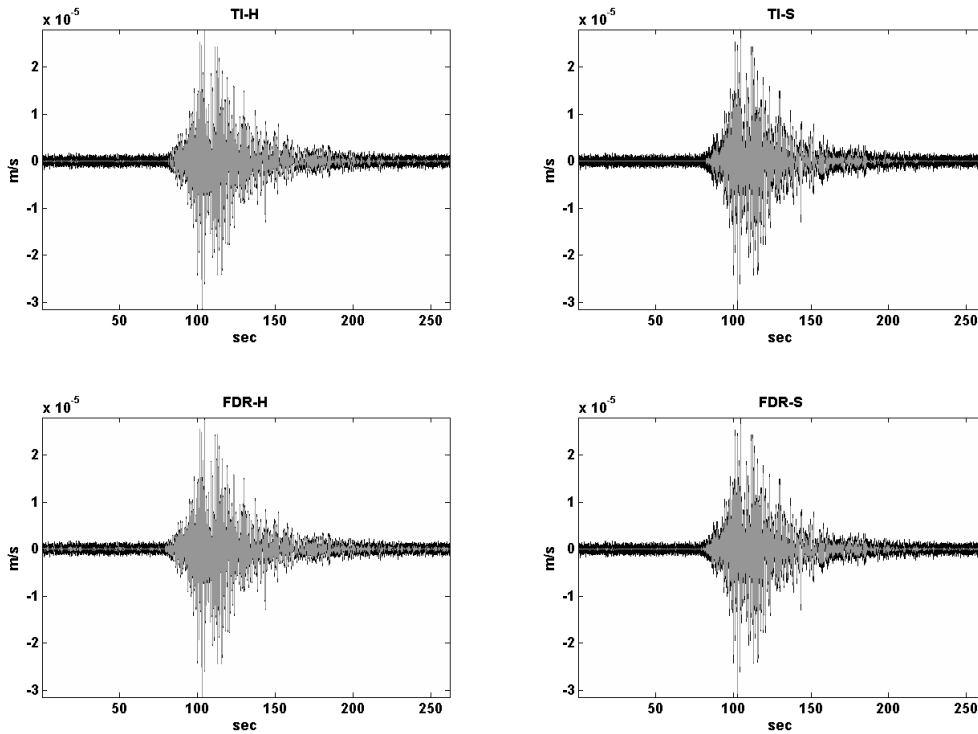
Οι κυματομορφές εισήχθησαν στο περιβάλλον matlab όπου πραγματοποιήθηκε φιλτράρισμα με το βέλτιστο (κατά περίπτωση) φίλτρο κυματιδίων (όπως παρουσιάστηκαν στο κεφ. 3). Στη συνέχεια επί του φιλτραρισμένου σήματος εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος STA/LTA προκειμένου να ανιχνευθεί η χρονική στιγμή του Ρ-κύματος. Τυπικές κυματομορφές απεικονίζονται παρακάτω



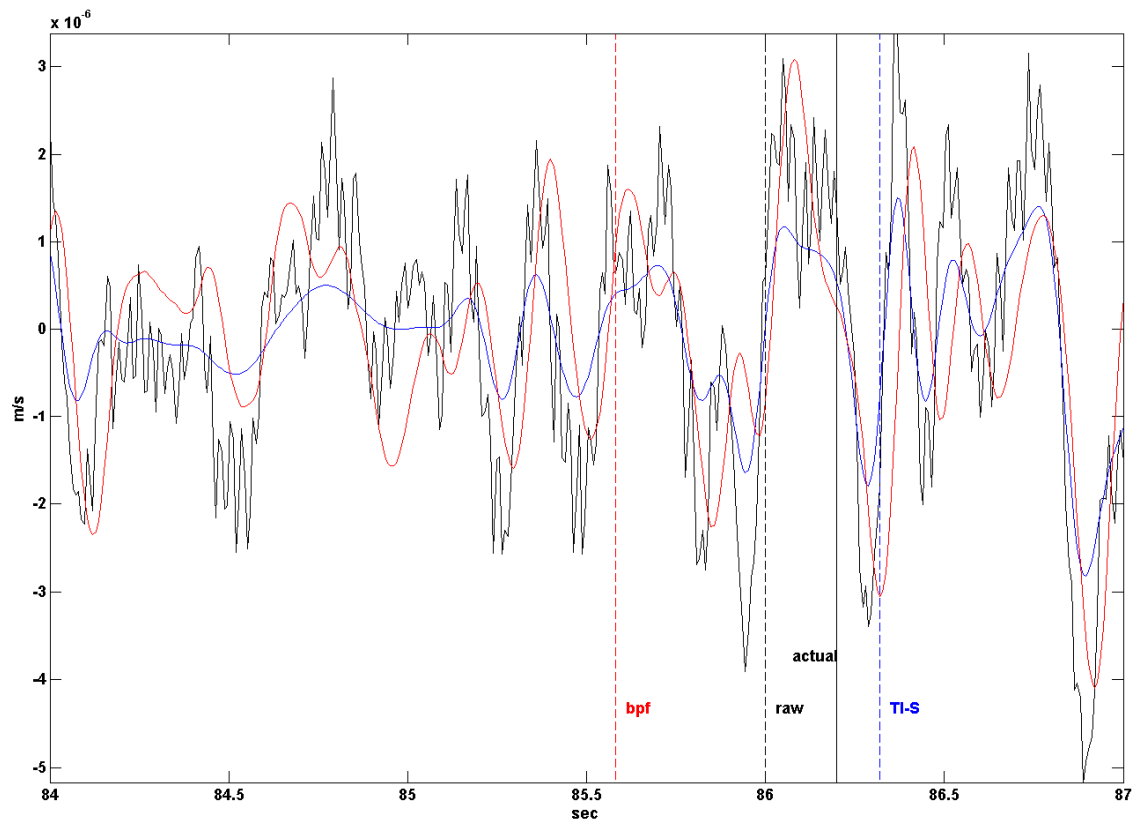
Σχήμα 4.7 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθρομβοποιημένη (γκρι) για σήματα κατηγορίας A (Ηλιούρης, 2008)



Σχήμα 4.8 Σημεία σκανδαλισμού STALTA για κυματομορφή τύπου Α



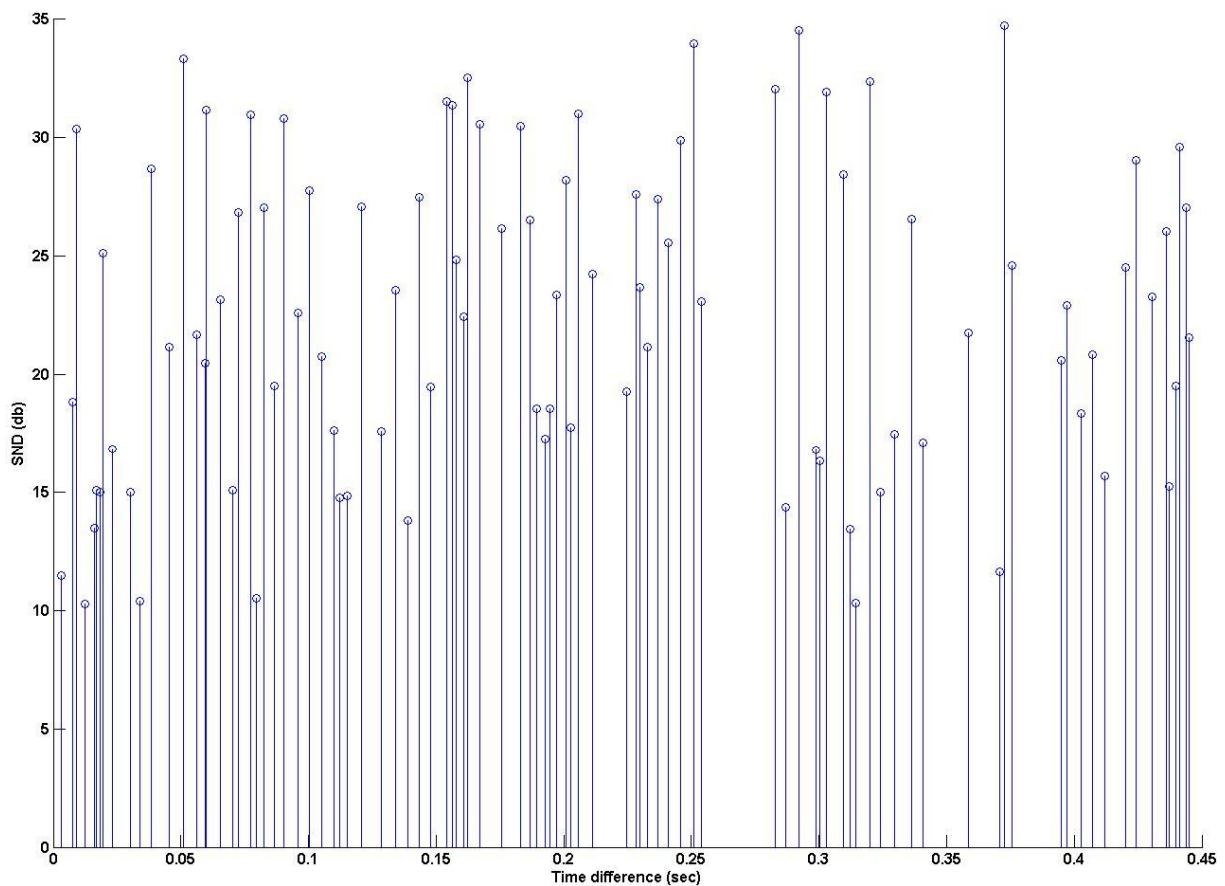
Σχήμα 4.9 Ανεπεξέργαστη κυματομορφή (μαύρη) και αποθρομβοποιημένη (γκρι) για σήματα κατηγορίας Β (Ηλιούρις, 2008)



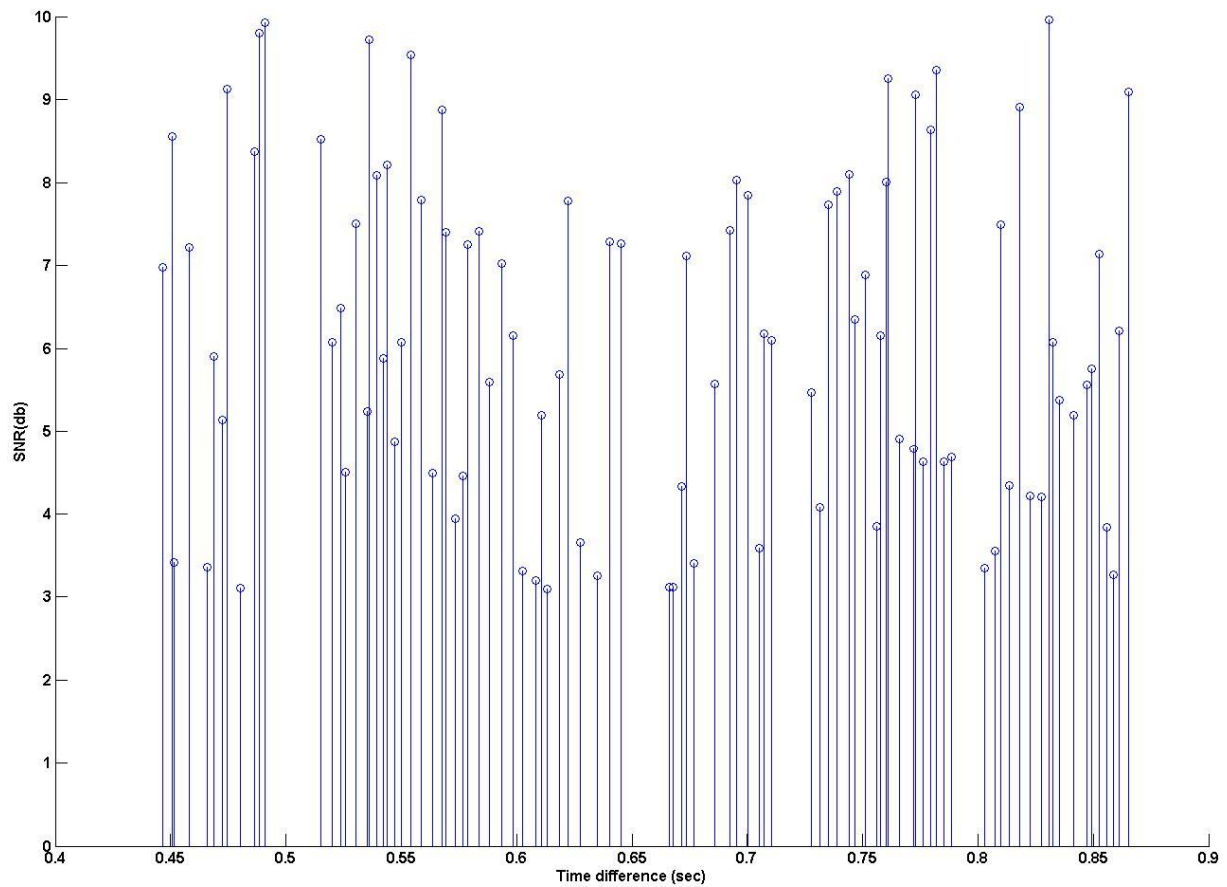
Σχήμα 4.10 Σημεία σκανδαλισμού STA/LTA για κυματομορφή τύπου B

Για κάθε μία από τις κυματομορφές, αφού υπολογίστηκε ο χρόνος άφιξης, στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι διαφορές αυτού από τον χρόνο που υπολογίστηκε με την manual διαδικασία. Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε και ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) για κάθε μία από τις αρχικές κυματομορφές (πριν το οποιοδήποτε φιλτράρισμα). Για κάθε μία από τις κατηγορίες, τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών φαίνονται στους πίνακες που υπάρχουν στο Παράρτημα Β.

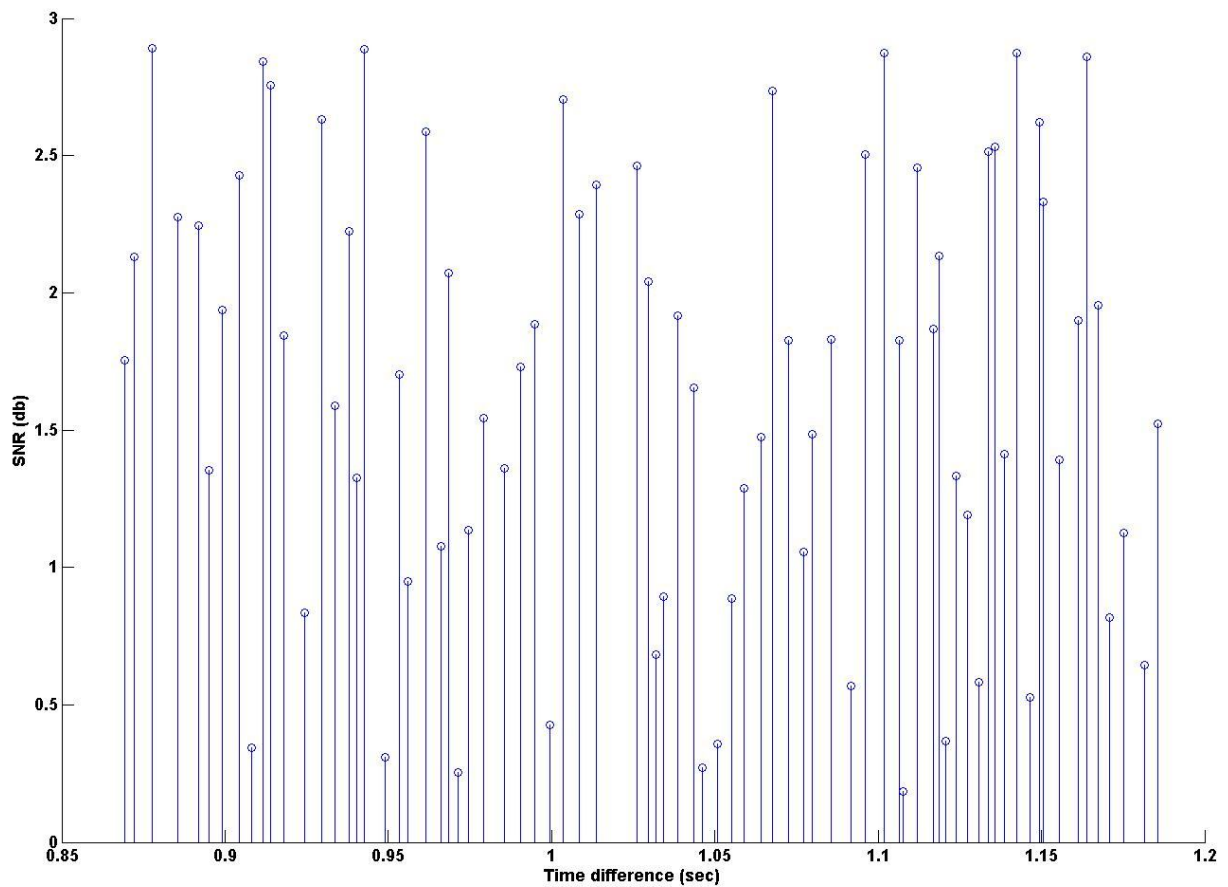
Με βάση τα δεδομένα που υπάρχουν στους προαναφερόμενους πίνακες μπορούμε να κατασκευάσουμε τις γραφικές παραστάσεις SNR(db) – Δt (sec), που παρουσιάζονται παρακάτω



Σχήμα 4.11 Χρονοδιαφορές μεταξύ φιλτραρισμένων κυματομορφών με γραμμικά φίλτρα και των ιδίων, φιλτραρισμένων με κυματιδικά φίλτρα για σειсмоγράμματα με διαφορετικό SNR που ανήκουν στην κατηγορία A

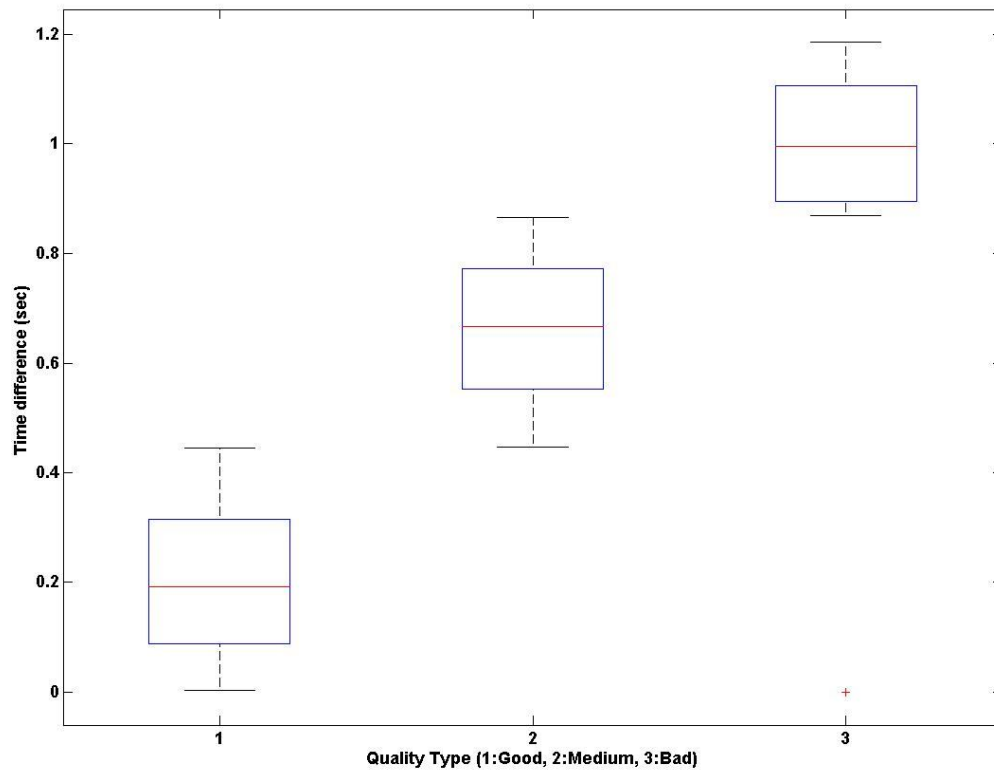


Σχήμα 4.12 Χρονοδιαφορές μεταξύ φιλτραρισμένων κυματομορφών με γραμμικά φίλτρα και των ιδίων, φιλτραρισμένων με κυματιδικά φίλτρα για σειсмоγράμματα με διαφορετικό SNR που ανήκουν στην κατηγορία B



Σχήμα 4.13 Χρονοδιαφορές μεταξύ φιλτραρισμένων κυματομορφών με γραμμικά φίλτρα και των ιδίων, φιλτραρισμένων με κυματιδικά φίλτρα για σειсмоγράμματα με διαφορετικό SNR που ανήκουν στην κατηγορία C

Ενώ σε συγκεντρωτική μορφή τα ανωτέρω δεδομένα απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 4.14 Συγκεντρωτικό διάγραμμα χρονοδιαφορών και για τους τρεις τύπους σειсмоγραμμάτων

5. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη γραμμικών και μη γραμμικών μεθόδων αποθρομβοποίησης με εφαρμογή στα σεισμολογικά σήματα. 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 σε σχέση με τον προσδιορισμό της άφιξης του Ρ-κύματος. Αυτό λοιπόν που αναδεικνύει ποιοτικά την κάθε μέθοδο είναι το κατά πόσο η εφαρμογή της βελτιώνει το λάθος μεταξύ του προσδιοριζόμενου από τον αναλυτή χρόνου και αυτού που προσδιορίζεται από το αυτόματο σύστημα (με χρήση των εξεταζόμενων μεθόδων). Για το λόγο αυτό η αξιολόγηση μας γίνεται με βάση τις χρονοδιαφορές μεταξύ χρόνου που προσδιορίζει ο αναλυτής και του χρόνου που εκτιμά ένα αυτόματο σύστημα το οποίο δέχεται στην είσοδο του φιλτραρισμένη κυματομορφή με χρήση κυματιδιακών φίλτρων

Στα αποτελέσματα που λάβαμε στο κεφ. 4, η πρώτη γενικευμένη παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι υπάρχει σύνδεση μεταξύ του SNR και της μετρούμενης χρονοδιαφοράς. Ειδικότερα η χρονοδιαφορά αυτή κυμαίνεται 0.005 έως 0.45sec για σήματα κατηγορίας Α, από 0.44 έως 0.84 για σήματα κατηγορίας Β και από 0.85 έως 1.1.7 για σήματα κατηγορίας C. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι όσο αυξάνει ο SNR τόσο μειώνεται και η διαφορά χρόνου μεταξύ αυτού που δίδει ο αναλυτής και αυτού που μπορεί να παράγει ένα αυτόματο σύστημα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δώσουμε και στο γεγονός ότι στα σήματα κατηγορίας C (όπου ο αναλυτής έχει κάποια ασάφεια) οι μη γραμμικές μέθοδοι φιλτραρίσματος είναι αρκετά σαφείς και έχουν μικρότερα περιθώρια λάθους. Πιο συγκεκριμένα, από το τελευταίο σχήμα του κεφ.4 γίνεται κατανοητό ότι με τις κυματιδιακές μεθόδους φιλτραρίσματος η τυπική απόκλιση είναι σχεδόν ίδια και στις τρεις περιπτώσεις σημάτων. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι οι μέθοδοι αυτοί είναι ιδιαίτερα συμπαγείς και εξαρτώνται πολύ λιγότερο (σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους φιλτραρίσματος) από το SNR του σήματος

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

- Κάθε μέθοδος αποθρομβοποίησης που βασίζεται σε συναρτήσεις κυματιδίων είναι ανώτερη από τις συμβατικές μεθόδους. Το γεγονός αυτό είναι οριακά εμφανές στην κατηγορία Α και ιδιαίτερα εμφανές στις κατηγορίες Β και C. 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

- 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.
- Η ανίχνευση των P 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.

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.
- Επέκταση της μελέτης και για την ανίχνευση των S-κυμάτων

Βιβλιογραφία

- 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
- Freiberger, W.F., 1963. An approximate method in signal detection. *Quarterly Applied Mathematics* 20, 373–378.
- Gabor, D. (1946). Theory of communication, *J. IEE* 93, 429–441.
- Gallant, R, *Nonlinear Statistical Models*. JohnWiley & Sons, Inc., NewYork, NY, 1987.

Gao, Y., (1998), Wavelet Shrinkage Denoising using non-negative Garrotte, *Journa of Computona and Graphical Statistics*, vol 7 , num 4, pp 469 - 488

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

Joswig (1990), Pattern Recognition for Earthquake detection, *Bulletin of the Seismological Society of America*; February 1990; v. 80; no. 1; p. 170-186

J. S. Marron and A. B. Tsybakov (1995), Visual Error Criteria for qualitative smoothing, *Journal of the American Statistical Association*, 90, 499-507.

Nason, G.P. (1994). Wavelet regression by cross-validation. Technical Report 447, Department of Statistics, Standord University, USA.

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

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.

Stein(1981), Estimation of Mean and Multivariate Normal distribution, *Annals of Statistics*, vol 9, 6, pp 1135-1151

Stewart, S.W., 1977. Real time detection and location of local seismic events in central California. *Bulletin of Seismological Society of America* 67, 433–452.

Παράρτημα 1 – Σεισμικά γεγονότα που χρησιμοποιήθηκαν

Α/Α	ΕΤΟΣ	ΜΗΝΑΣ	ΗΜΕΡΑ	ΩΡΑ	ΣΤΑΘΜΟΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ
1	2008	01	01	09-52-14	8
2	2008	01	03	02-27-50	7
3	2008	01	04	18-17-58	8
4	2008	01	06	05-14-17	8
5	2008	01	06	17-49-35	8
6	2008	01	06	09-03-30	8
7	2008	01	06	23-06-00	7
8	2008	01	06	23-21-04	8
9	2008	01	07	00-55-59	8
10	2008	01	08	23-23-08	9
11	2008	01	09	11-00-38	9
12	2008	01	09	17-26-46	9
13	2008	01	10	05-56-02	9
14	2008	01	10	22-06-02	9
15	2008	01	11	12-54-28	9
16	2008	01	11	12-56-22	9
17	2008	01	15	23-42-47	9
18	2008	01	18	02-22-42	9
19	2008	01	18	07-58-12	9
20	2008	01	19	04-33-26	9
21	2008	01	19	23-11-52	9
22	2008	01	21	22-13-47	9
23	2008	01	21	23-41-14	9
24	2008	01	23	21-53-18	9
25	2008	01	24	02-22-05	9
26	2008	01	30	14-42-31	10
27	2008	01	30	20-10-15	10
28	2008	02	04	20-25-13	10
29	2008	02	04	22-15-33	10
30	2008	02	0606	01-38-10	10
31	2008	02	07	20-46-46	10
32	2008	02	07	00-22-01	10
33	2008	02	07	03-16-39	10
34	2008	02	09	14-40-17	10
35	2008	02	10	18-23-27	10
36	2008	02	10	00-20-22	10
37	2008	02	16	03-21-19	10

38	2008	02	20	10-31-26	10
39	2008	02	20	18-26-41	7
40	2008	02	20	19-14-43	7
41	2008	02	20	19-40-30	7
42	2008	02	20	21-15-23	7
43	2008	02	21	00-31-10	7
44	2008	02	21	00-45-25	7
45	2008	02	21	00-56-05	7
46	2008	02	21	01-59-24	7
47	2008	02	21	02-36-16	7
48	2008	02	21	04-33-51	7
49	2008	02	21	14-35-01	7
50	2008	02	21	18-49-05	7
51	2008	02	21	20-58-50	7
52	2008	02	22	01-38-40	7
53	2008	02	22	02-05-13	7
54	2008	02	22	04-32-33	7
55	2008	02	22	04-57-42	6
56	2008	02	22	11-37-19	7
57	2008	02	22	21-51-03	7
58	2008	02	24	02-44-54	7
59	2008	02	24	03-32-12	7
60	2008	02	24	10-54-11	7
61	2008	02	24	13-04-07	7
62	2008	02	26	00-43-37	7
63	2008	02	26	10-46-11	7
64	2008	02	26	11-12-28	7
65	2008	02	26	14-54-06	7
66	2008	02	26	16-10-35	7
67	2008	02	27	23-33-56	7
68	2008	02	27	07-12-15	7
69	2008	02	27	09-02-29	7
70	2008	02	28	18-52-37	7
71	2008	02	28	02-50-42	7
72	2008	02	28	04-54-32	7
73	2008	02	28	05-05-25	7
74	2008	02	28	07-53-19	7
75	2008	02	28	23-32-55	7
76	2008	02	29	01-42-02	7
77	2008	02	29	02-49-51	7

78	2008	02	29	19-36-41	7
79	2008	04	01	06-17-52	10
80	2008	04	01	06-48-26	9
81	2008	04	01	08-41-16	9
82	2008	04	01	12-33-39	9
83	2008	04	01	20-04-47	9
84	2008	04	02	03-59-04	10
85	2008	04	02	07-22-47	10
86	2008	04	02	09-00-23	10
87	2008	04	02	14-58-45	10
88	2008	04	03	03-19-36	10
89	2008	04	03	14-08-35	10
90	2008	04	04	11-31-46	10
91	2008	04	04	23-39-57	10
92	2008	04	05	08-36-17	10
93	2008	04	05	23-11-31	10
94	2008	04	06	02-36-29	10
95	2008	04	07	23-01-01	10
96	2008	04	08	01-13-49	10
97	2008	04	08	01-58-22	9
98	2008	04	08	14-15-59	9
99	2008	04	09	13-05-34	9
100	2008	04	09	15-07-12	9
101	2008	04	10	23-05-47	9
102	2008	04	10	23-14-52	9
103	2008	04	11	00-32-43	9
104	2008	04	11	08-01-32	9
105	2008	04	12	00-49-22	9
106	2008	04	12	07-58-31	9
107	2008	04	12	20-17-42	9
108	2008	04	13	03-54-52	7
109	2008	04	13	10-56-40	7
110	2008	04	13	23-10-18	7
111	2008	05	14	02-41-22	9
112	2008	06	14	03-22-48	9
113	2008	07	14	14-56-02	9
114	2008	08	15	05-27-50	9
115	2008	09	15	06-47-29	9
116	2008	10	15	18-16-35	9
117	2008	11	16	20-23-35	9

118	2008	12	17	03-25-24	9
119	2008	13	18	22-26-11	9
120	2008	14	19	13-23-20	9
121	2008	15	19	21-13-39	9
122	2008	16	20	03-39-42	9
123	2008	17	22	15-59-13	9
124	2008	18	22	17-53-40	9
125	2008	19	23	14-45-23	9
126	2008	20	24	12-26-11	9
127	2008	21	25	04-48-40	9
128	2008	22	25	11-29-57	9
129	2008	23	26	23-46-16	9
130	2008	24	28	02-17-51	9
131	2008	25	28	18-52-57	9
132	2008	26	28	18-55-52	8
133	2008	04	29	02-57-11	8
134	2008	04	29	23-53-58	9
135	2008	04	30	15-12-31	9
136	2008	05	12	01-16-17	8
137	2008	05	12	06-37-58	8
138	2008	05	12	13-25-36	8
139	2008	05	12	14-49-09	8
140	2008	05	15	16-08-07	8
141	2008	05	16	22-56-05	8
142	2008	05	16	23-36-38	8
143	2008	05	17	07-05-14	8
144	2008	05	18	10-28-15	9
145	2008	05	18	15-21-14	9
146	2008	05	20	06-00-07	10
147	2008	05	20	13-56-35	9
148	2008	05	20	16-04-07	10
149	2008	05	20	18-16-56	10
150	2008	05	20	19-22-14	10
151	2008	05	21	04-49-53	10
152	2008	05	21	13-37-30	10
153	2008	05	21	18-26-03	10
154	2008	05	22	09-41-55	10
155	2008	05	23	01-20-39	10
156	2008	05	27	09-59-05	10
157	2008	05	27	19-22-33	10

158	2008	05	27	20-11-26	10
159	2008	05	27	23-26-08	10
160	2008	05	28	00-43-17	10
161	2008	05	28	09-16-11	10
162	2008	05	28	16-05-42	10
163	2008	05	28	22-35-50	10
164	2008	05	29	20-51-35	10
165	2008	05	30	03-20-58	10
166	2008	05	30	03-49-49	10
167	2008	05	30	05-39-49	10
168	2008	05	30	09-19-40	10
169	2008	05	30	10-46-07	10
170	2008	05	30	19-57-38	10
171	2008	05	31	22-06-08	10
172	2008	05	31	01-49-18	10
173	2008	05	31	05-06-56	10
174	2008	05	31	09-01-50	10
175	2008	07	03	07-43-56	9
176	2008	07	03	12-30-09	9
177	2008	07	03	17-37-17	9
178	2008	07	03	20-18-53	9
179	2008	07	03	23-31-28	9
180	2008	07	04	09-18-22	9
181	2008	07	04	22-15-26	9
182	2008	07	04	22-35-51	9
183	2008	07	05	02-22-46	9
184	2008	07	05	02-32-09	9
185	2008	07	05	02-41-36	9
186	2008	07	05	10-34-05	9
187	2008	07	06	09-19-38	9
188	2008	07	07	18-40-35	9
189	2008	07	11	21-45-18	9
190	2008	07	15	03-26-34	9
191	2008	07	25	19-24-26	10
192	2008	07	26	03-21	10
193	2008	07	28	13-56-12	8
194	2008	07	28	17-37-02	8
195	2008	07	30	05-02	6
196	2008	07	30	15-21	7
197	2008	07	31	08-38	7

198	2008	08	01	22-44	6
199	2008	08	02	05-20	6
200	2008	08	02	05-59	6
201	2008	08	02	07-13	6
202	2008	08	02	14-51	6
203	2008	08	04	19-38	7
204	2008	08	05	06-58-42	7
205	2008	08	05	13-05-44	8
206	2008	08	06	05-22-52	6
207	2008	08	07	22-21-55	8
208	2008	08	19	14-43-16	9
209	2008	08	19	14-44	9
210	2007	11	02	05-20-44	7
211	2007	11	02	12-50-40	9
212	2007	11	02	13-12-05	9
213	2007	11	03	10-24-56	9
214	2007	11	04	00-54-30	9
215	2007	11	04	13-27-39	9
216	2007	11	04	20-56-20	9
217	2007	11	05	11-43-54	9
218	2007	11	07	16-21-19	9
219	2007	11	02	20-21-43	7
220	2007	11	02	21-32-29	7
221	2007	12	03	00-19-58	7
222	2007	12	03	00-28-22	7
223	2007	12	03	17-03-49	7
224	2007	12	03	17-40-54	7
225	2007	12	04	13-20-45	7
226	2007	12	07	00-59-25	6
227	2007	12	07	05-01-43	6
228	2007	12	07	12-57-31	6
229	2007	12	08	02-01-45	6
230	2007	12	08	14-38-57	7
231	2007	12	08	15-45-41	7
232	2007	12	09	07-47-26	7
233	2007	12	09	09-53-40	7
234	2007	12	09	15-46-22	7
235	2007	12	09	20-29-44	7
236	2007	12	10	03-34-04	7
237	2007	12	10	07-01-53	7

238	2007	12	10	17-06-24	7
239	2007	12	14	00-33-17	8
240	2007	12	14	06-59-00	8
241	2007	12	14	08-20-23	6
242	2007	12	14	11-41-18	8
243	2007	12	17	02-25-51	7
244	2007	12	17	02-46-50	7
245	2007	12	17	11-12-10	8
246	2007	12	17	14-16-11	7
247	2007	12	17	21-43-01	8
248	2007	12	17	22-29-59	6
249	2007	12	17	23-50-37	6
250	2007	12	18	08-28-28	6
251	2007	12	18	14-45-44	7
252	2007	12	19	02-50-49	7
253	2007	12	19	18-21-30	6
254	2007	12	19	18-24-25	6
255	2007	12	23	00-57-17	8
256	2007	12	23	07-31-36	8
257	2007	12	23	12-04-55	8
258	2007	12	24	08-53-56	8
259	2007	12	24	18-07-57	8
260	2007	12	25	10-32-38	8
261	2007	12	26	12-43-12	8
262	2007	12	26	13-21-20	8
263	2007	12	26	18-02-32	8
264	2007	12	26	21-05-28	8
265	2007	12	26	33-48-49	8
266	2007	12	30	01-03-49	8
267	2007	12	30	06-42-41	7

Παράρτημα 2 – Χρονοδιαφορές και SNR για κάθε κατηγορία κυματομορφών

Κατηγορία Α		Κατηγορία Β		Κατηγορία Γ	
Δt (sec)	SNR (db)	Δt (sec)	SNR (db)	Δt (sec)	SNR (db)
0.003266	11.447	0.44674	6.975	0.869197	1.756
0.007469	18.822	0.450749	8.56	0.872194	2.133
0.009248	30.329	0.451672	3.414	0.877609	2.891
0.012392	10.246	0.458289	7.22	0.88538	2.277
0.01617	13.472	0.466091	3.351	0.891907	2.246
0.016944	15.069	0.468824	5.908	0.895037	1.352
0.018449	14.968	0.472622	5.135	0.899107	1.94
0.019418	25.095	0.47465	9.121	0.904373	2.429
0.023215	16.804	0.480057	3.105	0.908104	0.343
0.030248	14.97	0.486582	8.376	0.911583	2.842
0.034024	10.381	0.488645	9.796	0.914071	2.757
0.038322	28.67	0.491113	9.931	0.918118	1.846
0.045505	21.127	0.515139	8.522	0.924383	0.835
0.051072	33.296	0.520155	6.071	0.929586	2.633
0.056186	21.65	0.52387	6.488	0.93366	1.589
0.059369	20.466	0.525988	4.497	0.937876	2.225
0.060069	31.156	0.530311	7.505	0.940461	1.324
0.065365	23.129	0.535215	5.24	0.942779	2.888
0.070126	15.066	0.536106	9.721	0.948895	0.309
0.072488	26.804	0.539219	8.087	0.953387	1.705
0.077334	30.953	0.542205	5.884	0.955881	0.947
0.079538	10.491	0.543787	8.212	0.961492	2.588
0.082386	27.032	0.546976	4.875	0.966128	1.074
0.086751	19.487	0.549963	6.079	0.968326	2.073
0.090184	30.795	0.554041	9.534	0.971362	0.255
0.096046	22.57	0.558571	7.784	0.974666	1.134
0.100419	27.737	0.563658	4.488	0.979079	1.545
0.105016	20.722	0.567656	8.875	0.985685	1.36
0.11015	17.615	0.569293	7.402	0.990618	1.731
0.112313	14.741	0.573431	3.936	0.994729	1.888
0.115247	14.835	0.576805	4.45	0.999464	0.428
0.120938	27.056	0.578692	7.25	1.003454	2.705
0.128655	17.569	0.583513	7.409	1.008475	2.288
0.13407	23.542	0.58842	5.593	1.013607	2.395
0.138793	13.771	0.593455	7.026	1.026026	2.464
0.143543	27.448	0.598287	6.16	1.029529	2.043

0.147749	19.459	0.602573	3.307	1.031999	0.682
0.154094	31.501	0.608266	3.19	1.034153	0.892
0.156409	31.342	0.610779	5.189	1.038612	1.916
0.157828	24.839	0.613062	3.09	1.043502	1.657
0.16076	22.414	0.618697	5.688	1.046071	0.272
0.162258	32.495	0.622448	7.782	1.050862	0.358
0.167268	30.541	0.627659	3.649	1.055296	0.887
0.175521	26.123	0.634947	3.247	1.058825	1.286
0.183241	30.45	0.64021	7.287	1.06402	1.475
0.186887	26.506	0.645127	7.26	1.067755	2.736
0.189256	18.549	0.666274	3.11	1.072683	1.829
0.192685	17.243	0.667969	3.114	1.077203	1.054
0.19444	18.53	0.671374	4.33	1.079795	1.487
0.197253	23.352	0.67345	7.109	1.08563	1.832
0.200795	28.178	0.677003	3.403	1.091764	0.568
0.202894	17.732	0.685998	5.573	1.095904	2.506
0.205663	30.963	0.692521	7.42	1.101951	2.873
0.211314	24.202	0.695311	8.024	1.106615	1.827
0.224453	19.26	0.700386	7.849	1.10776	0.183
0.228258	27.569	0.705255	3.588	1.111979	2.455
0.229882	23.664	0.707273	6.18	1.116784	1.869
0.232664	21.122	0.710593	6.093	1.118658	2.135
0.236766	27.364	0.727592	5.473	1.120776	0.367
0.240812	25.533	0.731686	4.075	1.123828	1.332
0.245848	29.871	0.735207	7.73	1.127378	1.189
0.250898	33.922	0.739062	7.895	1.130773	0.582
0.253948	23.065	0.744106	8.093	1.133695	2.516
0.283057	32.004	0.746662	6.349	1.135819	2.532
0.286845	14.324	0.751099	6.884	1.13859	1.41
0.291996	34.494	0.75592	3.847	1.142332	2.875
0.29882	16.786	0.75794	6.155	1.146595	0.526
0.300314	16.308	0.760244	8.011	1.149466	2.623
0.303005	31.894	0.760966	9.25	1.150557	2.332
0.309646	28.433	0.7661	4.911	1.155501	1.388
0.312246	13.413	0.771963	4.783	1.161161	1.9
0.314565	10.293	0.773147	9.06	1.163767	2.86
0.319897	32.348	0.776244	4.626	1.167438	1.956
0.324222	14.978	0.779394	8.634	1.170941	0.817
0.329643	17.468	0.781915	9.359	1.175084	1.123
0.336348	26.536	0.785085	4.623	1.181445	0.644

0.340786	17.11	0.788412	4.675	1.185768	1.523
0.358462	21.731	0.80274	3.348		
0.370784	11.619	0.80738	3.548		
0.372503	34.709	0.810058	7.486		
0.37566	24.57	0.813595	4.336		
0.394799	20.587	0.818282	8.907		
0.397202	22.888	0.822684	4.217		
0.402744	18.349	0.827589	4.195		
0.407032	20.823	0.830943	9.961		
0.411932	15.648	0.832597	6.078		
0.420298	24.495	0.835153	5.38		
0.424362	29.009	0.841588	5.199		
0.430428	23.246	0.847372	5.555		
0.436219	26.013	0.849456	5.753		
0.437141	15.226	0.85252	7.141		
0.439779	19.495	0.856008	3.838		
0.441401	29.583	0.858825	3.266		
0.443777	27.021	0.861336	6.21		
0.445113	21.527	0.865132	9.089		