

Πίνακας Περιεχομενων

Πίνακας σχημάτων – διαγραμμάτων	3	
Πίνακες	7	
Περίληψη	8	
Abstract	9	
1	Εισαγωγή – Περιγραφή Εργασίας	10
2	Στοιχεία Αισθητήρων Σεισμολογικών Οργάνων	12
2.1	Εισαγωγή	12
2.2	Αισθητήρας	15
2.3	Το πρότυπο σεισμόμετρο αδράνειας	19
2.4	Απόκριση συχνότητας σεισμομέτρων	22
2.5	Μετατροπéας ταχύτητας	26
2.6	Καμπύλες απόκρισης οργάνων (διαφορετική παρουσίαση)	29
2.7	Σταθερά απόσβεσης	32
2.8	Κατασκευή των σεισμικών αισθητήρων	35
2.8.1	Μικρής περιόδου αισθητήρας Wood Anderson	36
2.8.2	Μεγάλης περιόδου αισθητήρες	37
2.8.3	Εκκρεμές Garden-gate	38
2.8.4	Ανάστροφο Εκκρεμές	40
2.8.5	LaCoste	41
2.9	Παράμετροι σεισμικών αισθητήρων	42
2.9.1	Η αποκριση συχνότητας	42
2.9.2	Ευαισθησία	43
2.9.3	Δυναμική περιοχή αισθητήρων	45
2.9.4	Γραμμικότητα αισθητήρων	46
2.9.5	Διαγώνια ευαισθησία αισθητήρων	46
2.9.6	Κέρδος και έξοδος αισθητήρων	47
2.10	Περίληψη κεφαλαίου	47
3	Στοιχεία σεισμολογικών ψηφιοποιητών	48
3.1	Εισαγωγή	48
3.2	Ο βασικός μετατροπέας: Flash ADC	49
3.3	Βασικά χαρακτηριστικά ADC	50

3.4	ADC τύπου «ραμπας»	52
3.5	Η ανάγκη για υψηλότερη δυναμική περιοχή	53
3.5.1	ADC έως 16bit	53
3.5.2	Βελτίωση της δυναμικής περιοχής με υπερδειγματοληψια	54
3.6	Σιγμα – Δελτα (ΣΔ) μετατροπέας	56
3.7	Περίληψη κεφαλαίου	59
4.	Κατασκευή σειсмоγράφου μίας συνιστώσας	60
4.1	Εισαγωγή	60
4.2	Σεισμομετρο μίας συνιστώσας	60
4.2.1	Βασική λειτουργία	60
4.2.2	Σύστημα Μαγνήτη – πηνίου	62
4.3	ADC	64
4.4	Ανάρτηση – Απόσβεση	65
4.5	Βελτιώσεις – αλλαγές	67
4.5.1	Αλλαγή πεταλοειδούς μαγνήτη	68
4.5.2	Αλλαγή πηνίου με αισθητήρα Hall	69
4.5.3	Αλλαγή τρόπου απόσβεσης	72
4.6	Περίληψη κεφαλαίου	74
5.	Μετρήσεις – Αποτελεσματα	74
5.1	Εισαγωγή	74
5.2	Μετρήσεις	74
5.2.1	Ρύθμιση ελατηρίου αναρτησης	74
5.2.2	Ρυθμιση ορθης λειτουργίας ADC	76
5.2.3	Ρυθμιση λογισμικου καταγραφής	77
5.2.4	Ρύθμιση απόσβεσης	80
5.3	Αποτελέσματα	83
5.3.1	Καταγραφές	83
5.3.2	Προσδιορισμός επικέντρου σεισμού	85
5.4	Περίληψη	87
6.	Συμπεράσματα – Μελλοντικές Βελτιώσεις	88
6.1.	Συμπεράσματα	88
6.2	Μελλοντικές Βελτιώσεις	89
	Βιβλιογραφία	90

Πίνακας Σχημάτων – Διαγραμμάτων

Σχήμα 2.1. Το ανώτερο ίχνος εμφανίζει αρχικά ψηφιακά καταγραμμένο σήμα από ένα σεισμό μεγέθους 3 που καταγράφεται σε μια απόσταση 120 χλμ.

Σχήμα 2.2. Ταχύτητα και μετατόπιση

Σχήμα 2.3 Αρχή λειτουργίας αδρανούς σεισμόμετρου. Η απόσβεση της κίνησης μπορεί να είναι μηχανική, αλλά είναι συνήθως ηλεκτρομαγνητική.

Σχήμα 2.4 Επιταχυνσιόμετρο βασισμένο στην αρχή δυναμικής ισοροπίας

Σχήμα 2.5 Απλό σεισμόμετρο που θα ανιχνεύσει την κάθετη επίγεια κίνηση.

Σχήμα 2.6 Μετατόπιση φάσης μεταξύ της εδαφικής κίνησης (ωt) και της κίνησης σεισμόμετρου ($\omega t - \pi/2$) στη συχνότητα συντονισμού.

Σχήμα 2.7 Απόκριση πλάτους εύρους και φάσης ενός μηχανικού σεισμόμετρου 1HZ

Σχήμα 2.8 Απόκριση πλάτους και φάσης για ένα σεισμόμετρο με μια φυσική συχνότητα 1 Hz. Οι καμπύλες για το διάφορα επίπεδα απόσβεσης h (0.25 – 4) εμφανίζονται

Σχήμα 2.9 Μοντέλο ενός ηλεκτρομαγνητικού αισθητήρα.

Σχήμα 2.10 Απόκριση συχνότητας (σχηματικά) ενός μηχανικού αισθητήρα 1Hz (κορυφή), ενός μηχανικού αισθητήρα 1Hz με έναν μετατροπέα ταχύτητας (μέση) και ενός επιταχυνσιομέτρου (100 Hz) (κατώ).

Σχήμα 2.11. Σήμα από ένα μέγεθος 3 σεισμού που καταγράφεται με ένα σεισμόμετρο 1Hz.

Σχήμα 2.12 Επίδραση της απόσβεσης στο σήμα

Σχήμα 2.13 Κάθετο σεισμόμετρο μάζας-ελατηρίων όπου η οριζόντια κίνηση έχει περιοριστεί από μια οριζόντια αρθρωμένη ράβδο

Σχήμα 2.14 Μικρής περιόδου αισθητήρας Αντερσον

Σχήμα 2.15 Αρχή του εκκρεμούς garden-gate.

Σχήμα 2.16. Χαρακτηριστικό οριζόντιο σεισμόμετρο μακράς περιόδου κατασκευασμένο από τον Sprengnether

Σχήμα 2.17 Το σεισμόμετρο αναστροφού εκκρεμούς (Borman, 2002).

Σχήμα 2.18 Η αρχή λειτουργίας της ανάρτησης LaCoste

Σχήμα 2.19 Ευαισθησία οργάνων διάφορων σεισμόμετρων Geotech που κυμαίνεται από τη μικρή χρονική περίοδο 13s ως την πολύ ευρεία ζώνη 54000s.

σχήμα 2.20. Εξαρτώμενη δυναμική περιοχή συχνότητας λόγω μηχανικών ή ηλεκτρονικών περιορισμών.

Σχήμα 3.1 Η μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Τα βέλη δίδουν τις χρονικές στιγμές που δειγματοληπτείται το αναλογικό σήμα.

Σχήμα 3.2. Το Flash ADC. V_{in} είναι η αναλογική τάση που θα ψηφιοποιηθεί, V_{ref} είναι η τάση αναφοράς, R είναι αντιστάσεις ίδιας τιμής, L1 ..L3 είναι συγκριτές τάσης, B1 – B0 είναι τα bit εξόδου (2bit).

Σχήμα 3.3 Ramp ADC

Σχήμα 3.4 Αυξηση δυναμικής περιοχής με παρουσία θορύβου

Σχήμα 3.5 Αφιλτράριστη (ανω) και φιλτραρισμένη (κατω) καταγραφή σεισμικού θορύβου. Η καταγραφή έγινε με ADC 16bit, 50HZ sampling rate

Σχήμα 3.5 ΣΔ μετατροπείας ADC

Σχήμα 4.1 Σχεδιάγραμμα προτύπου εκπαιδευτικού σεισμομέτρου (διαστάσεις σε ίντσες)

Σχήμα 4.2 Τα κατασκευασμένα πηνία προς δοκιμή

Σχήμα 4.3 Εξοδος σήματος από πηνίο αισθητήρα για 1500 (ανω), 2500 (μέση) και 4000 σπείρες)

Σχήμα 4.4 Πεταλοειδής μαγνήτης αισθητήρα, τύπου Alnico

Σχήμα 4.5 ADC της εταιρείας DataQ, που χρησιμοποιήθηκε

Σχήμα 4.6 Απόσβεση με υγρό

Σχήμα 4.7 NIB μαγνήτες. Το βέλος δίδει τη φορά των μαγνητικών γραμμών

Σχήμα 4.8. Οψη μαγνητικού συμπλέγματος αντικατάστασης πεταλοειδούς μαγνήτη

Σχήμα 4.9. Αισθητήρας Hall

Σχήμα 4.10. Δομικό διάγραμμα χρησιμοποιούμενου αισθητήρα Hall

Σχήμα 4.11. Ο χρησιμοποιούμενος αισθητήρας Hall

Σχήμα 4.12. Οψη προτεινόμενου συμπλέγματος αισθητήρα-μαγνήτη (μαύρο: βάση)

Σχήμα 4.13 Τα υλικά του συστήματος ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης

Σχήμα 4.14 Το σύστημα μαγνητικής απόσβεσης τοποθετημένο στο πρωτότυπο

Σχήμα 5.1 Μοντέλο λειτουργίας του υπο κατασκευή σεισμογράφου.

Σχήμα 5.2 Φόρμα σχεδιασμού προγράμματος ρύθμισης ADC

Σχήμα 5.3 Φόρμα εκτέλεσης προγράμματος ρύθμισης ADC.

Σχήμα 5.4 Οθόνη εισαγωγής σειριακής πόρτας ADC

Σχήμα 5.5 Οθόνη εισαγωγής γεωγραφικών στοιχείων εγκατάστασης

Σχήμα 5.6 Οθόνη εισαγωγής ρυθμίσεων καταγραφών

Σχήμα 5.7 Οθόνη εισαγωγής ρυθμίσεων φίλτρων (χαμηλών: δεξιά – υψηλών: αριστερά)

Σχήμα 5.8 Καταγραφή ταλάντωσης δίχως απόσβεση

Σχήμα 5.9 Πλάτη σήματος που χρησιμοποιούνται για το υπολογισμό λόγου απόσβεσης.

Σχήμα 5.10 Σήμα υπό συντελεστή απόσβεσης 0.10

Σχήμα 5.11 Σήμα υπό συντελεστή απόσβεσης 0.51

Σχήμα 5.12 Σήμα υπό συντελεστή απόσβεσης 0.72

Σχήμα 5.13 Σεισμός μεγέθους 5 και επικεντρικής απόστασης 145χλμ

Σχήμα 5.14 Σεισμός μεγέθους 5.4 και επικεντρικής απόστασης 87χλμ

Σχήμα 5.15 Σεισμός μεγέθους 5.1 και επικεντρικής απόστασης 256χλμ

Σχήμα 5.16 Τυπική διάταξη αυτόματης αναγνώρισης διαφόρων τύπων κυμάτων σε σειсмоγράφημα

Σχήμα 5.17 Αυτόματης αναγνώρισης P και S κυμάτων για το σεισμό στο σχ.5.14

Σχήμα 5.18 Καμπύλες χρόνου διάδρομής

Σχήμα 5.19 Απλουστευμένες καμπύλες χρόνου διάδρομής

Πίνακες

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικές συχνότητες που παράγονται από τις διαφορετικές σεισμικές πηγές

Πίνακας 3.1. Είσοδος και εξόδος σε flash ADC

Πίνακας 3.3 Είσοδος και εξόδος σε ένα ΣΔ ADC. Συντομώσεις όπως στον πίν.3.2

Πίνακας 3.2 Είσοδος και εξόδος σε ένα τυπικό ADC. I: α/α κύκλου, Diff.inp: διαφορά μεταξύ εισόδου-εξόδου, Sum: αθροισμα της Diff.inp και του προηγούμενου ψηφιοποιημένου σήματος, DAC out: εξόδος από μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αφορά την μελέτη και κατασκευή εκπαιδευτικού σειсмоγράφου μίας συνιστώσας. Ο σκοπός της είναι, μέσα από την μελέτη των θεωρητικών αρχών που διέπουν το βασικότερο όργανο της σεισμολογίας αλλά και από την επίλυση των προβλημάτων που προκύπτουν κατά την κατασκευή, να αποδειχθεί το εφικτό της ευκολίας κατασκευής. Η αρχική προσέγγιση στην κατασκευή του σεισμομέτρου ήταν το να υλοποιήσουμε ένα ήδη γνωστό σχέδιο αφ' ενός για να εξοικιωθούμε με τις απαραίτητες κατασκευαστικές λεπτομέρειες και αφετέρου για να αξιολογήσουμε τις ανάγκες που προκύπτουν σε ένα τέτοιο εγχείρημα. Η εμπειρία που αποκτήθηκε από αυτό το στάδιο, βοήθησε ώστε στη συνέχεια να προταθεί, σχεδιαστεί και υλοποιηθεί μία βελτιωμένη έκδοση του αρχικού σεισμογράφου.

Abstract

The current dissertation is about the study and development of an education, on component seismograph. The main objective is, through the study of basic principles that govern the most basic seismological instrument and through the successful solutions to practical problems, to prove the easiness of development. The initial approach was to build an already known version of one component seismograph in order to be familiar with the development details and to justify the requirements needed for such a project. The experience that we gained from this stage help us for the next next stage where we propose, design and develop an improved version of the initial prototype seismograph

1. Εισαγωγή – Περιγραφή Εργασίας

Μέτρηση είναι η δημιουργία μίας αντιστοιχίας μεταξύ του φυσικού μεγέθους που θέλουμε να αναλύσουμε και σε ένα άλλο μέγεθος που είναι αμεσα προσπελάσιμο στο σύστημα μέτρησης. Στο παρελθόν πολλές προσπάθειες μετρησης έχουν επιτευχθεί με χρήση και διαδικασίες από τη μηχανική ή την οπτική. Σήμερα, η πλειονότητα των μετρητικών συστημάτων στηρίζεται στην επεξεργασία ηλεκτρικών σημάτων. Το ηλεκτρικό σήμα μπορεί να δημιουργηθεί είτε άμεσα (πιεζοηλεκτρικό, θερμοηλεκτρικό κ.λ.π) είτε έμμεσα (με μεταβολή καποιου ενδιάμεσου μεγέθους που αισθητηρίου, π.χ. αγωγιμότητα, αντίσταση κ.λ.π). Η επεξεργασία του σήματος αυτού πραγματοποιείται στη συνέχεια με χρήση ηλεκτρονικών διατάξεων.

Η σεισμολογία, ως μια νέα επιστήμη, έχει αναπτυχθεί κυρίως τον τελευταίο αιώνα. Η συμβολή των οργάνων μέτρησης στην εξέλιξη της είναι από αναμφισβήτητα σημαντική έως κρίσιμη. Θεωρητικές προσεγγίσεις επαληθεύτηκαν με χρήση σεισμολογικών οργάνων. Αν και η εξέλιξη της επιστήμης αυτής είναι ραγδαία εντούτοις το βασικό όργανο που χρησιμοποιείται από την αρχή της μέχρι και σήμερα, δεν έχει υποστεί ιδιαίτερα μεγάλες αλλαγές. Το όργανο αυτό είναι ο σειсмоγράφος ή αλλιώς το σύστημα μέτρησης σεισμομέτρου-καταγραφέα. Η βασική αρχή λειτουργίας του η οποία και παραμένει σε εφαρμογή μέχρι σήμερα είναι πολύ απλή: μία κινούμενη μάζα χρησιμοποιείται για να περιγράψει την εδαφική κίνηση. Στο άκρο της μάζας αυτής έχει προσαρμοστεί ένα σύστημα καταγραφής που απεικονίζει τη μορφή της κίνησης που καταγράφει η μάζα. Αν και το αρχικό σύστημα ήταν ένα απλό εκκρεμές με μία γραφίδα στην άκρη σήμερα έχουμε σειсмоγράφους υψηλής τεχνολογίας με δυνατότητες που συναντούμε σε αυτόνομα μετρητικά συστήματα. Εντούτοις η αρχή λειτουργίας παραμένει ή ίδια: μία κινούμενη μάζα χρησιμοποιείται για να περιγράψει την εδαφική κίνηση

Ενας σειсмоγράφος αποτελείται από τρία κύρια μέρη: το σεισμόμετρο, το σύστημα απόσβεσης και το καταγραφικό. Το σεισμόμετρο είναι το μηχανικό υποσύστημα που φέρει την κινούμενη μάζα στην οποία επιτρέπει να κινηθεί κατά έναν, δύο ή τους τρεις άξονες. Στην περίπτωση του άνω των ενός αξόνων υπάρχουν αντίστοιχες κινούμενες μάζες. Το υποσύστημα απόσβεσης είναι το ηλεκτρικο/μηχανικό υποσύστημα που πραγματοποιεί την απόσβεση της ταλάντωσης της κινούμενης μάζας προκειμένου να μπορεί μεν να ακολουθήσει την εδαφική κίνηση αλλά να μην συμπεριφέρεται ως σύστημα ελεύθερης ταλάντωσης. Η τιμή της

απόσβεσης είναι ιδιαίτερα κρίσιμη και μοναδική για κάθε σύστημα, πολλές φορές δε αποτελεί και ιδιαίτερο αντικείμενο μελέτης. Το σύστημα καταγραφής είναι υπεύθυνο για τη συλλογή του ηλεκτρικού σήματος που απεικονίζει την κίνηση της κινούμενης μάζας και τη μεταφορά για περαιτέρω επεξεργασία σε αναλογικό ή ψηφιακό επίπεδο.

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη και κατασκευή ενός σεισμογράφου για εκπαιδευτική χρήση. Με τον όρο εκπαιδευτική χρήση εννοούμε ότι έπρεπε να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Ευκολία κατασκευής
- Ευκολία συναρμολόγησης
- Χαμηλό κόστος
- Υλικά άμεσα διαθέσιμα
- Συνοδευτικό λογισμικό δωρεάν – ελεύθερο
- Δυνατότητες πειραματισμού και παραμετροποίησης από άτομα χωρίς καμμία εξοικίωση με την επιστήμη της σεισμολογίας
- Άμεση και εύκολη εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων (επικεντρο, μέγεθος) σεισμικού γεγονότος

Η κατασκευή που επιλέξαμε ήταν ένα σεισμόμετρο μίας συνιστώσας (κατακόρυφης) τύπου εκκρεμούς. Η αρχική ιδέα και υλοποίηση ανήκει στην Αμερικανική Γεωλογική Εταιρεία (USGS) της οποίας το εκπαιδευτικό σεισμόμετρο AS-1 αρχικά υλοποιήσαμε. Αν και υπερκαλυπτόντουσαν οι παραπάνω προϋποθέσεις, αντιμετωπίσαμε πρόβλημα ως προς την ευκολία εύρεσης των ιδίων υλικών στην ελληνική αγορά. Για το λόγο αυτό, αφού κατασκευάσαμε ένα πρωτότυπο, στη συνέχεια το τροποποιήσαμε με χρήση υλικών που πολύ εύκολα μπορούν να βρεθούν στην ελληνική αγορά. Τέλος προτείναμε και πραγματοποιήσαμε βελτιώσεις του αρχικού σχεδίου με σκοπό τη χρήση πιο βελτιωμένων μεθόδων σε κρίσιμα σημεία του σεισμογράφου (απόσβεση, αισθητήρας)

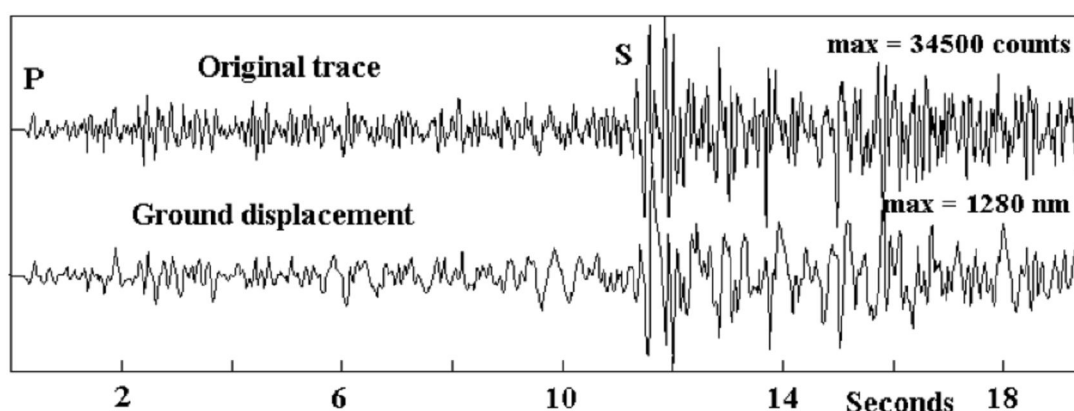
Μετα το πέρας της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποδεικνύεται ότι η κατασκευή σεισμογράφου μίας συνιστώσας για εκπαιδευτική χρήση είναι εφικτή και με κόστος ιδιαίτερα χαμηλό. Τα εκπαιδευτικά οφέλη που αποκομίζονται είναι ιδιαίτερα υψηλά λόγω του ότι είναι μια ιδιαίτερα εύκολη κατασκευή που μπορεί να προσφερθεί σε σχολεία, να αναπτύξει το ενδιαφέρον των παιδιών για το συγκεκριμένο θέμα δίχως να απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις από τους διδάσκοντες.

2 Στοιχεία Αισθητήρων Σεισμολογικών Οργάνων

2.1 Εισαγωγή

Η σεισμολογία θα ήταν μια διαφορετική επιστήμη χωρίς τα όργανα. Οι πραγματικές μεγάλες πρόοδοι στη σεισμολογία συνέβησαν περίπου το 1900 και μετά και οφείλονταν κυρίως στην πρόοδο κατασκευής πύο ευαίσθητων σειсмоγράφων και την επινόηση συστημάτων συγχρονισμού, έτσι ώστε οι σεισμοί να μπορούν να εντοπιστούν. Αργότερα, η σημασία της ακριβούς μέτρησης της αληθινής επίγειας κίνησης έγινε εμφανής για τη μελέτη της σεισμικής μείωσης κυμάτων, και η κλίμακα μεγέθους Richter εξαρτάται από να είναι σε θέση να υπολογιστεί η επίγεια μετατόπιση από καταγραμμένο σειсмоγράφο. (Σχήμα 2.1)

Η δυνατότητα να βρίσκεται η ακριβής θέση σεισμού και να υπολογίζεται το μέγεθος του, μας φέρνει αμέσως σε δύο βασικές προϋπόθεσεις της ενοργάνης μέτρησης: κράτηση του ακριβούς χρόνου και καθορισμός της εξαρτώμενης σχέσης συχνότητας μεταξύ της μέτρησης και της πραγματικής επίγειας κίνησης.



Σχήμα 2.1. Το ανώ ίχνος εμφανίζει αρχικά ψηφιακά καταγραμμένο σήμα από ένα σεισμό μεγεθους 3 που καταγράφεται σε μια απόσταση 120 χλμ. Το μέγιστο εύρος είναι ακριβώς ένας αριθμός (αποκαλούμενες αριθμήσεις). Το κατώτατο ίχνος εμφανίζει το σήμα που μετατρέπεται στην αληθινή επίγεια μετατόπιση από το οποίο το μέγεθος μπορεί να υπολογιστεί. Η απόσταση στο σεισμό είναι ανάλογη προς τη χρονική διαφορά άφιξης μεταξύ του S-κύματος και του P-κύματος, έτσι η κατοχή 3 σταθμών το καθιστά πιθανό να εντοπίσει το σεισμό. Το σεισμόμετρο είναι ένας 1 αισθητήρας Hz με έξοδο ταχύτητας (Haskov, 2002)

Οι σεισμολόγοι τείνουν να πέρνουν τα στοιχεία τους για δεδομένα,ελπίζοντας ότι τα «μαύρα κιβώτια» των σειсмоγράφων και το λογισμικό επεξεργασίας θα φροντίσουν όλα τα δυσάρεστα προβλήματα και θα δώσουν ακριβώς τη σωστή επίγεια κίνηση (σχήμα 2.1), σαν την οδήγηση ενός αυτοκινήτου χωρίς να ανησυχείς πάρα

πολύ για το πώς λειτουργεί. Αλλά τα αυτοκίνητα σταματούν ή δυσλειτουργούν, έτσι και οι σειсмоγράφοι, έτσι μια βασική κατανόηση της σεισμικής ενοργάνωσης είναι ουσιαστική, ακόμη και για το σεισμολόγο που δεν πρόκειται ποτέ να γυρίσει ένα εξόγκωμα σε ένα όργανο. Όπως να πάρει μερικά στοιχεία με λίγες σταθερές από τα όργανα και να προσπαθήσει να υπολογιστεί πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί η αληθινή επίγεια κίνηση.

Η οργανολογία είναι όχι μόνο ένα θέμα για τους σεισμολόγους, δεδομένου ότι ο περισσότερος εξοπλισμός είναι στην πραγματικότητα εγκατεστημένος και διατηρημένος από τους μη-σεισμολόγους, έτσι αυτή η ομάδα επαγγελματιών έχει ακριβώς την ίδια ανάγκη τις πληροφορίες για την οργανολογία. Έχουν υπάρξει πολυάριθμες δημοσιεύσεις για θέματα οργανολογίας στη σεισμολογία, με πολύ ιδιαίτερη έμφαση σε ιδιαίτερα θέματα, αλλά λίγα γενικά εγχειρίδια. Μια γενική επισκόπηση έγινε από τον Lee και τον Stewart (1981), η οποία, στην οργανολογική πλευρά, εξέτασε κυρίως μικροσεισμικά δίκτυα. Το παλαιό εγχειρίδιο της σεισμολογικής πρακτικής παρατηρητήριων (MSOP) (Wilmore, 1979) εξέτασε όλους τους κλασσικούς αναλογικούς σειсмоγράφους, αλλά είναι εν μέρει ξεπερασμένο τώρα. Το νέο εγχειρίδιο της σεισμολογικής πρακτικής παρατηρητήριων (NMSOP, Borman, 2002)) είναι το πιο ενημερωμένο βιβλίο στα σεισμικά όργανα.

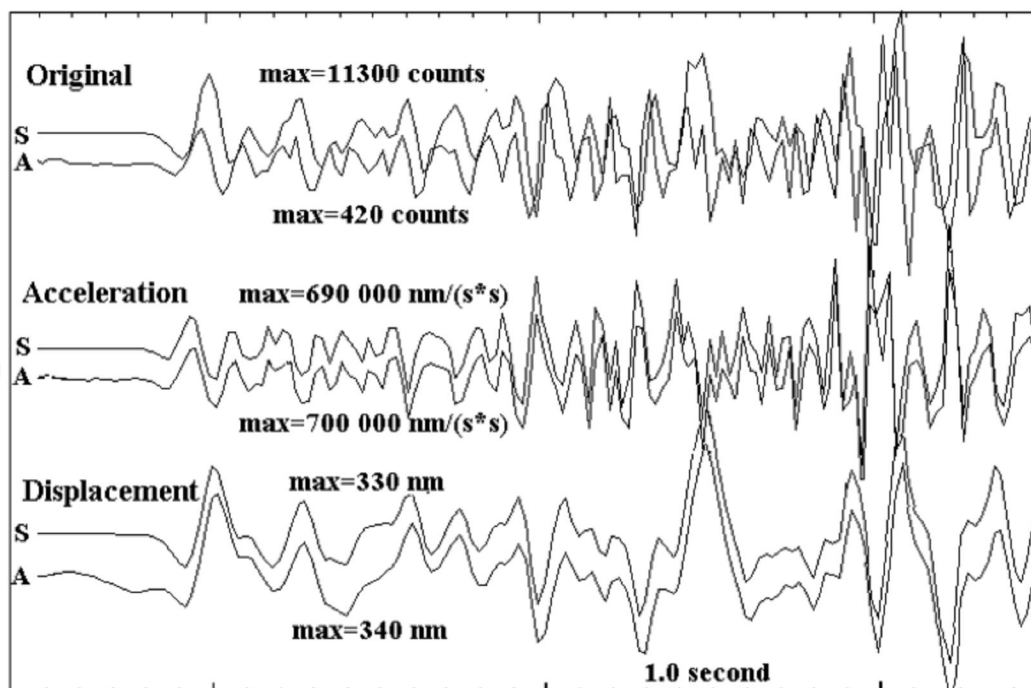
Ποια είναι τα βασικά θέματα της οργανικής σεισμολογίας; Όλα ξεκίνησαν για να μπορεί να μετρηθεί η επίγεια κίνηση, και αυτό είναι το σημαντικότερο θέμα. Κατόπιν ακολουθεί η καταγραφή και η μετάδοση σε μια κεντρική περιοχή. Μιλάμε συνήθως για την επίγεια μετατόπιση (που μετριέται συνήθως σε m) δεδομένου ότι αυτό είναι που επιθυμούν οι σεισμολόγοι να χρησιμοποιήσουν. Όπως ένα ρήγμα έχει μια μετατόπιση 2 m κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, μπορούμε να μιλήσουμε για μια επίγεια μετατόπιση 2 m, αν και κανονικά μετράμε τις πολύ μικρότερες κινήσεις. Αφ' ετέρου, οι μηχανικοί, φαίνονται να σκέφτονται ότι η επιτάχυνση (m/s^2) είναι η φυσικότερη μονάδα, δεδομένου ότι συσχετίζεται άμεσα με τη δύναμη και η μέγιστη επίγεια ταχύτητα είναι ένα συχνά αναφερόμενο μέτρο. Η σειρά των ευρών είναι πολύ μεγάλη. Ο φυσικός παρασιτικός θόρυβος, συχνότητα ιδιαίτερα εξαρτώμενη, θέτει το όριο για τα μικρότερα εύρη που μπορούμε να μετρήσουμε, το οποίο είναι χαρακτηριστικά μετατόπιση από 1nm σε 1 Hz, ενώ η μεγαλύτερη μετατόπιση είναι της τάξεως του 1m. Αυτή είναι μια δυναμική περιοχή 10^9 . Η ζώνη των συχνοτήτων που ενδιαφερόμαστε, επίσης έχει μεγάλο εύρος, από 10^{-5} έως 1000 Hz (πίνακας 2.1). Η πρόκληση είναι επομένως να κατασκευαστούν σεισμικά όργανα, και αισθητήρες

και όργανα καταγραφής, τα οποία καλύπτουν τουλάχιστον ένα μέρος αυτής της μεγάλης συχνότητας και της δυναμικής περιοχής.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικές συχνότητες που παράγονται από τις διαφορετικές σεισμικές πηγές

<i>Συχνότητα(Hz)</i>	<i>Τύποι μετρήσεων</i>
0.00001-0.0001	Γήινες παλίρροιες
0.0001-0.001	Γήινες ελεύθερες ταλαντώσεις, σεισμοί
0.001-0.01	Κύματα επιφάνειας, σεισμοί
0.01-0.1	Κύματα επιφάνειας, κύματα P και του S, σεισμοί με $M > 6$
0.1-10	Κύματα P και του S, σεισμοί με $M > 2$
10-1000	Κύματα P και του S, σεισμοί, $M < 2$

Παλιότερα, το αναλογικό όργανο συνήθως κατέγραφε έναν τύπο επίγειας κίνησης όπως την ταχύτητα. Παραδοσιακά, οι σεισμολόγοι προτιμούν την αδύνατη μετατόπιση ή την ταχύτητα κινήσεων καταγραφής, για την εύκολη ερμηνεία των σεισμικών φάσεων, ενώ οι μηχανικοί χρησιμοποιούν την ισχυρή ταχύτητα κινήσεων, της οποίας οι τιμές κορυφής συσχετίζονται άμεσα με το σεισμικό φορτίο δομών, σήμερα κάνει λιγότερο διαφορά, δεδομένου ότι λόγω της πρόοδου στα συστήματα αισθητήρων και καταγραφής, τα αδύνατα όργανα κινήσεων μπορούν να μετρήσουν τις μάλλον ισχυρές κινήσεις και οι ισχυροί αισθητήρες κινήσεων είναι σχεδόν ίδιοι ως ευαίσθητοι με τους αδύνατους αισθητήρες κινήσεων. Η ψηφιακή καταγραφή επιπλέον το καθιστά εύκολο να μετατρέψει από την επιτάχυνση στην ταχύτητα κ.λπ., και να δει την ταχύτητα και τη μετατόπιση (σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2. Ταχύτητα και μετατόπιση. Ο σειсмоγράφος στο σχήμα είναι τα πρώτα-πρώτα δευτερόλεπτα του Ρ-κύματος του σήματος στο σχήμα 1.1. Στην περιοχή υπάρχει επίσης εγκατεστημένο επιταχύνσιόμετρο (A) δίπλα στο σεισμόμετρο (S). Τα κορυφαία ίχνη εμφανίζουν τα αρχικά αρχεία στις μετρήσεις. Το σήμα από το σεισμόμετρο είναι παρόμοιο με το σήμα των επιταχυμέτρων, αλλά της υψηλότερης συχνότητας και των ευρών είναι διαφορετικός. Τα μέσα ίχνη εμφανίζουν δύο σήματα που μετατρέπονται σε ταχύτητες και τα κατώτατα ίχνη, που μετατρέπονται σε μετατόπιση (ζώνη συχνότητας 1-20 Hz). (Haskon, 2002)

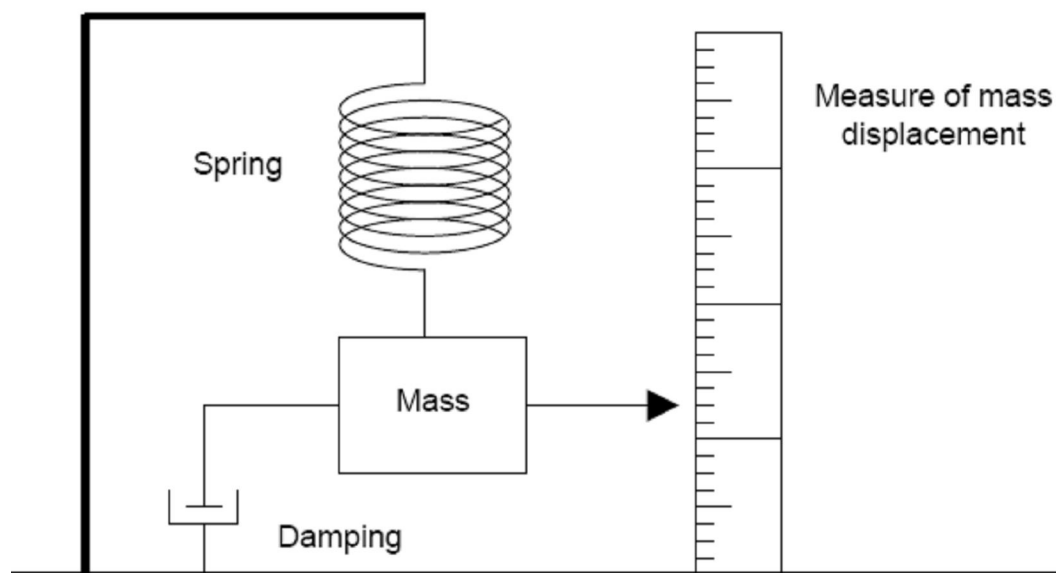
2.2 Αισθητήρας

Δεδομένου ότι οι μετρήσεις γίνονται σε ένα κινούμενο πλαίσιο αναφοράς (επιφάνεια της γής), σχεδόν όλοι οι σεισμικοί αισθητήρες είναι βασισμένοι στην αδράνεια μιας ανασταλμένης μάζας, η οποία θα τείνει να παραμείνει στάσιμη σε αποκριση στην εξωτερική κίνηση. Η σχετική κίνηση μεταξύ της ανασταλμένης μάζας και του εδάφους θα είναι έπειτα μια λειτουργία της κίνησης του εδάφους (σχήμα 2.3). Το ταλαντευμένο σύστημα θα έχει μια συχνότητα συντονισμού f_0 (Εξ.2.1)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m} \quad (\text{Εξίσωση 2.1})$$

όπου το k είναι η σταθερά ελαστικότητας και το m η μάζα.

Εάν η συχνότητα επίγειων μετατοπίσεων είναι κοντά στη συχνότητα συντονισμού, παίρνουμε μια μεγαλύτερη σχετική κίνηση (ανάλογα με την απόσβεση) ενώ κάτω από τη συχνότητα συντονισμού, η σχετική μετατόπιση, μειώνεται



Σχήμα 2.3 Αρχή λειτουργίας αδρανούς σεισμόμετρου. Η απόσβεση της κίνησης μπορεί να είναι μηχανική, αλλά είναι συνήθως ηλεκτρομαγνητική. (Haskov, 2002)

Ο αισθητήρας κινείται με το έδαφος και δεν υπάρχει καμμία αδιατάρακτη σταθερά σε αναφορά διαθέσιμη. Έτσι η μετατόπιση ή η ταχύτητα δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Σύμφωνα με την αρχή αδράνειας, μπορούμε μόνο να παρατηρήσουμε την κίνηση εάν έχει μια μη μηδενική ταχύτητα. Έτσι εάν βάζουμε έναν σεισμικό αισθητήρα σε ένα τρένο, μπορούμε μόνο να μετρήσουμε πότε το τρένο επιταχύνει ή φρενάρει. Οι σεισμολόγοι θέλουν να μετρήσουν τη μετατόπιση, αλλά αυτό δεν είναι δυνατό να γίνει άμεσα. Πρέπει να μετρηθεί η επίγεια ταχύτητα και να την ολοκληρώσουμε δύο φορές. Έτσι η μετατόπιση στις πολύ χαμηλές συχνότητες παράγει τις πολύ χαμηλές επιταχύνσεις, λόγω της σχέσης (Εξ.2.2)

$$\ddot{u} \propto f^2 u \quad (\text{Εξίσωση 2.2})$$

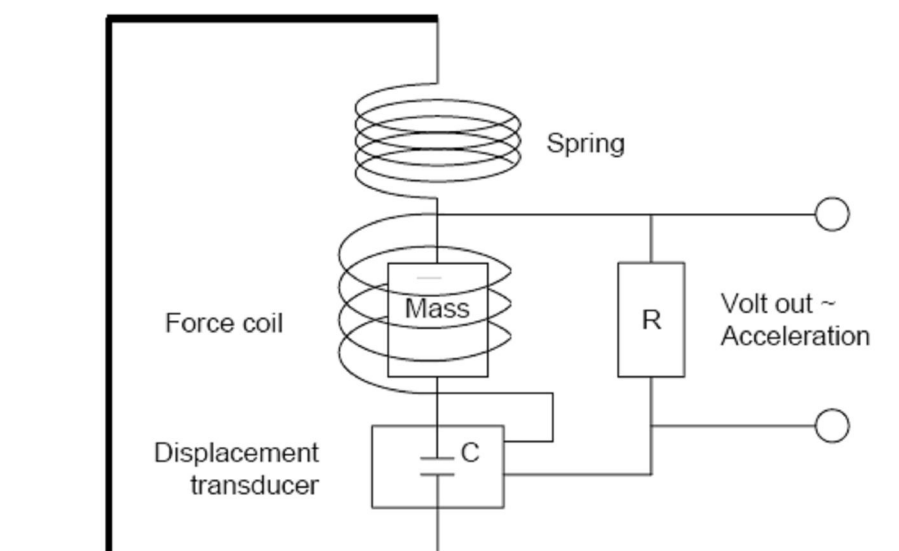
όπου το u είναι η επίγεια μετατόπιση και το f η συχνότητα.

Είναι επομένως κατανοητό γιατί είναι τόσο δύσκολο να παραχθούν τα σεισμόμετρα που είναι ευαίσθητα στην κίνηση χαμηλής συχνότητας. Έτσι, ενώ είναι αρκετά απλό να γίνει ένας αισθητήρας που καταγράφει εξίσου καλά ένα δεδομένο

επίπεδο ταχύτητας σε όλες τις συχνότητες, ακόμη και το συνεχές ρεύμα, αυτό είναι δυσκολότερο να μετρηθεί τις αργές μετατοπίσεις. Ένα μεγάλο μέρος των προόδων τα τελευταία χρόνια στα σεισμικά όργανα είναι η δυνατότητα να χτιστούν οι αισθητήρες με μια καλύτερη ευαισθησία χαμηλής συχνότητας.

Νωρίτερα αναφέρθηκε ότι οι αισθητήρες ευαίσθητοι στη χαμηλή συχνότητα έγιναν με τα περίπλοκα μηχανικά συστήματα, τα οποία από όλα τα είδη των τεχνασμάτων ήταν σε θέση να έχουν μια χαμηλή συχνότητα συντονισμού. Δεν ήταν εντούτοις δυνατό να κατασταθούν οι αισθητήρες με μια σταθερή συχνότητα συντονισμού πολύ χαμηλότεροι από 0,03 Hz. Σήμερα, οι καθαρώς μηχανικοί αισθητήρες κατασκευάζονται μόνο για να έχουν τις κατώτερες συχνότητες συντονισμού σε περίπου 1,0 Hz (κοντοί αισθητήρες περιόδου), ενώ οι αισθητήρες που μπορούν να μετρήσουν τις χαμηλότερες συχνότητες βασίζονται στην αρχή ισορροπίας δύναμης (FBA) να μετρήσουν την ταχύτητα άμεσα.

Η μετατόπιση μαζας των αισθητήρων είναι γραμμικά ανάλογη προς την εξωτερική ταχύτητα, ακόμη και σε μη μηδενική συχνότητα δεδομένου ότι αυτό αντιστοιχεί ακριβώς σε μια μόνιμη αλλαγή στην εξωτερική δύναμη. Αυτή η γραμμικότητα δεν ισχύει για τις συχνότητες επάνω από το μέτρο ελαστικότητας μαζικής απόσβεσης συντονισμού και της μαζικής μετατόπισης συχνότητας, όπου η μαζική μετατόπιση θα μειώσει την ταχύτητα ανάλογα με το τετράγωνο της. Το πρόβλημα είναι τώρα πώς μπορεί κάποιος να μετρήσει αυτήν την μαζική μετατόπιση, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες, όπου η επιταχυνση είναι μικρή. Ο δημοφιλής μετατροπέας ταχύτητας (δίνει έξω μια τάση ανάλογη προς τη μαζική ταχύτητα σχετικά με το πλαίσιο) δεν είναι μια καλή επιλογή δεδομένου ότι η ταχύτητα μειώνεται αναλογα με τη συχνότητα και είναι μηδέν σε μη μηδενική συχνότητα, έτσι ακόμα κι αν υπάρχει μια μόνιμη ταχύτητα, δεν μπορούμε να την μετρήσουμε. Οι ειδικοί μετατροπείς μαζικών μετατοπίσεων έχουν εισαχθεί, αλλά είναι δύσκολο ή και αδύνατο, να καθορίσουν ακριβώς για μεγάλη δυναμική περιοχή που χρειαζόμαστε στη σεισμολογία. Εντούτοις, για μια μικρή μετατόπιση, μπορούν να γίνουν πολύ ευαίσθητοι και ακριβείς. Αυτό χρησιμοποιείται στην αποκαλούμενη αρχή δυναμικής ισορροπίας (σχήματος 2.4).



Σχήμα 2.4 Επιταχυνσιόμετρο βασισμένο στην αρχή δυναμικής ισοροπίας. Ο μετατροπέας μετατοπίσεων χρησιμοποιεί κανονικά έναν πυκνωτή C, ο οποίος έχει την ικανότητα να ποικίλλει με τη μετατόπιση της μάζας. Μια συνεχή μετατόπιση, αναλόγη προς την έξοδο μετατροπέων, θα αναγκάσει τη μάζα για να παραμείνει στάσιμη σχετικά με το πλαίσιο. (Haskov, 2002)

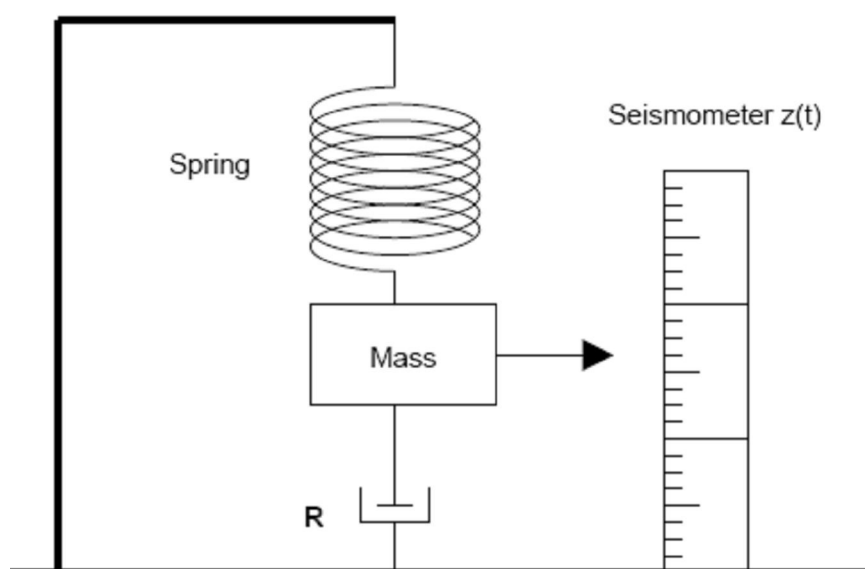
Το επιταχυνσιόμετρο δυναμικής ισοροπίας (FBA) έχει ένα πηνίο ανατροφοδότησης, το οποίο μπορεί να ασκήσει δύναμη ίση και αντίθετη από τη δύναμη αδράνειας λόγω της μεγαλύτερης επιτάχυνσης που θέλουμε να μετρήσουμε. Ο μετατροπέας μετατοπίσεων στέλνει ένα ρεύμα μέσω αυτού του πηνίου δύναμης μέσω ενός αντιστάτη R σε ένα αρνητικό σύστημα ανατροφοδότησης. Η πολικότητα του ρεύματος είναι τέτοια που αντιτάσσει οποιαδήποτε κίνηση της μάζας, και θα προσπαθήσει να αποτρέψει τη μάζα από την κίνηση σε σχέση με το ακίνητο πλαίσιο. Μια μικρή μόνιμη επιτάχυνση στη μάζα θα οδηγήσει σε ένα μικρό μόνιμο ρεύμα επομένως σε μία μεγάλη επιτάχυνση θα χρειαστεί ένα μεγάλο ρεύμα. Το ρεύμα είναι στην πραγματικότητα γραμμικά ανάλογο προς την εδαφική επιτάχυνση, έτσι ένα άμεσο μέτρο της επιτάχυνσης δίνεται από την τάση στα άκρα της αντιστάσης. Το FBA είναι η καρδιά σχεδόν όλων των οργάνων καταγραφής ισχυρής εδαφικής κίνησης και των αισθητήρων που καταγράφουν σε μια μεγάλη ζώνη συχνότητας (όπως 0,01 έως 50 Hz). Με τη σύνδεση ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, είτε στο σύστημα ανατροφοδότησης είτε μετά από τον αισθητήρα μπορεί να δώσει ως έξοδο

μια τάση γραμμικά ανάλογη προς την ταχύτητα. Εντούτοις, λόγω κατασκευαστικών 40περιορισμών πρέπει να υπάρξει ένα κατω όριο συχνότητας (η ταχύτητα είναι μηδέν σε μηδενική συχνότητα) Αυτήν την περίοδο, οι καλύτεροι αισθητήρες ευρείας ζώνης έχουν ένα όριο περίπου 0.0025 Hz, πολύ χαμηλότερο από ήταν πάντα δυνατό με τους καθαρώς μηχανικούς αισθητήρες. Η FBA αρχή έχει επίσης το πλεονέκτημα στους γραμμικούς αισθητήρες, με μια υψηλή δυναμική περιοχή, δεδομένου ότι η μάζα σχεδόν δεν κινείται. Αυτήν την περίοδο, οι καλύτεροι αισθητήρες έχουν μια δυναμική περιοχή $10^6 - 10^8$.

Συνοψίζοντας, οι μηχανικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται περισσότερο εάν η φυσική συχνότητα είναι επάνω από 1 Hz, ενώ οι FBA αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τα επιταχύμετρα και για τους αισθητήρες ευρείας ζώνης. Αυτό σημαίνει ότι πολλοί αισθητήρες είναι τώρα «μαύρα κουτιά» από ιδιαίτερα σύνθετα μηχανικά και ηλεκτρονικά συστατικά των οποίων ο χρήστης μπορεί να κάνει πολύ λίγα πράγματα.

2.3 Το πρότυπο σεισμόμετρο αδράνειας

Δεδομένου ότι οι μετρήσεις γίνονται σε ένα κινούμενο πλαίσιο αναφοράς (επιφάνεια της γής), σχεδόν όλοι οι σεισμικοί αισθητήρες είναι βασισμένοι στην αδράνεια μιας αναρτημένης μάζας, η οποία τείνει να παραμείνει στάσιμη σε διέγερση στην εξωτερική κίνηση. Η σχετική κίνηση μεταξύ της αναρτημένης μάζας και του εδάφους θα είναι μία συνάρτηση της κίνησης του εδάφους.

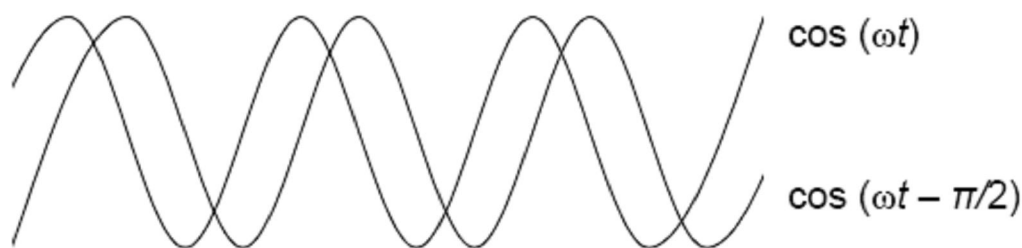


Σχήμα 2.5 Απλό σεισμόμετρο που θα ανιχνεύσει την κάθετη επίγεια κίνηση.

Το σχήμα 2.5 απεικονίζει ένα απλό σεισμόμετρο το οποίο δύναται να ανιχνεύσει κάθετη εδαφική κίνηση. Αποτελείται από μια μάζα που αναρτάται από ένα ελατήριο. Η κίνηση της μάζας αποσβέννεται χρησιμοποιώντας ένα σταθερό σημείο έτσι ώστε η μάζα δεν θα ταλαντευθεί υπερβολικά κοντά στη συχνότητα συντονισμού του συστήματος. Ένα υποδεκάμετρο επικολλιέται στην πλευρά για να μετρήσει την κίνηση της μάζας σχετικά με το έδαφος. Εάν το σύστημα είναι σε ηρεμία, σε ξαφνική (υψηλής συχνότητα) ώθηση στην πρώτη ταλάντευση ενός Ρ-κύματος, κάποιος θα ανέμενε ότι η μάζα θα παρέμενε αρχικά στάσιμη ενώ το έδαφος θα μετακινούνταν προς τα άνω. Κατά συνέπεια η μετατόπιση του εδάφους μπορεί να ληφθεί άμεσα ως σχετική μετατόπιση μεταξύ της μάζας και της γης όπως διαβάζεται στο υποδεκάμετρο. Επειδή όμως το έδαφος κινείται παλμικά, οι μαζικές κινήσεις σχετικά με το πλαίσιο αναφοράς, που αντιπροσωπεύεται από το υποδεκάμετρο, υπάρχει μια μετατόπιση φάσης κατά π στο μέτρο της επίγειας μετατόπισης. Το εύρος της μέτρησης θα ήταν επίσης το εύρος της κίνησης του εδάφους και το σεισμόμετρο θα είχε κέρδος 1. Το σεισμόμετρο μετρά έτσι τη σχετική μετατόπιση άμεσα στις υψηλές συχνότητες και μπορούμε να πούμε ότι η συνάρτηση απόκρισης σεισμομέτρων (κίνηση της μάζας σχετικά με τη γήινη κίνηση) είναι επίπεδη στις υψηλές συχνότητες. Η μετατόπιση φάσης είναι επίσης π σε αυτήν την περίπτωση.

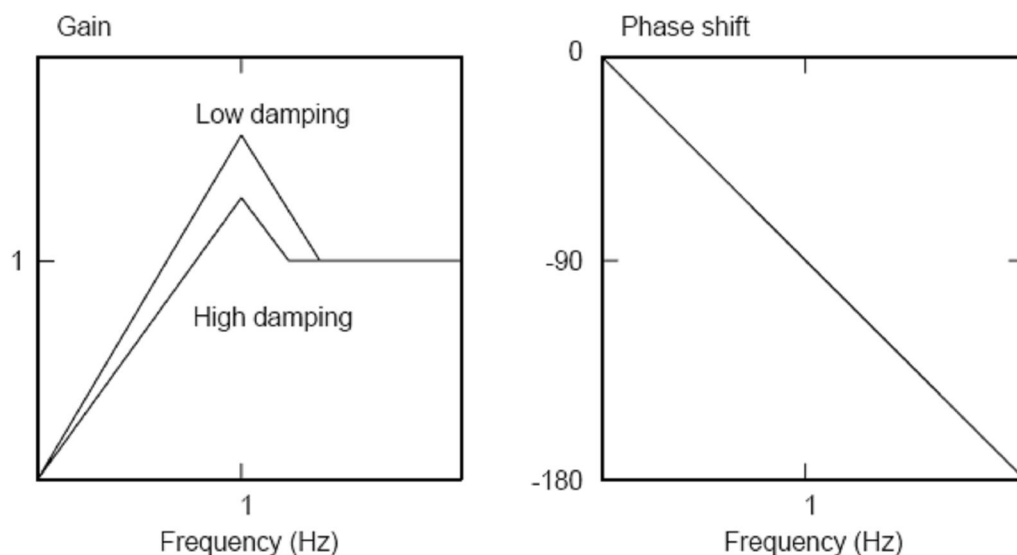
Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο με τις πολύ χαμηλές συχνότητες; Με το έδαφος που κινείται πολύ αργά, η μάζα θα είχε χρόνο να ακολουθηθεί η επίγεια κίνηση, με άλλα λόγια, θα απεικονιζόταν με λίγη σχετική κίνηση και λιγότερη μετατόπιση φάσης. Κατά συνέπεια το κέρδος θα ήταν χαμηλό.

Τέλος, τι θα συνέβαινε στη συχνότητα συντονισμού; Εάν η απόσβεση είναι χαμηλή, η μάζα θα μπορούσε να πάρει μια νέα ώθηση στον ακριβή σωστό χρόνο, όπως την ώθηση μιας ταλάντευσης στο σωστό χρόνο, έτσι η μάζα θα κινείτο με ένα μεγαλύτερο και μεγαλύτερο εύρος κατά συνέπεια το κέρδος θα ήταν μεγαλύτερο από 1. Για να συμβεί αυτό, η ώθηση από τη γη πρέπει να εμφανιστεί όταν είναι η μάζα σε μια ακραία θέση (κορυφή ή κατώτατο σημείο) και πρέπει να υπάρξει μια μετατόπιση φάσης $-\pi/2$ (σχήμα 2.6)



Σχήμα 2.6 Μετατόπιση φάσης μεταξύ της εδαφικής κίνησης (ωt) και της κίνησης σεισμομέτρου ($\omega t - \pi/2$) στη συχνότητα συντονισμού. (Haskov, 2002)

Το πρόσημο είναι αρνητικό δεδομένου ότι το μέγιστο εύρος της μαζικής μετακίνησης θα καθυστερήσει σχετικά με την εδαφική κίνηση. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η απόκριση πλάτους και φάσης σεισμομέτρου με συνχόντητα συντονισμού 1HZ



Σχήμα 2.7 Απόκριση πλάτους εύρους και φάσης ενός μηχανικού σεισμομέτρου 1HZ (Haskov, 2002)

Η σύμβαση που χρησιμοποιείται στα πραγματικά σεισμόμετρα είναι ότι μια ανοδική εδαφική κίνηση δίνει ένα θετικό σήμα έτσι η κλίμακα μέτρησης θα πρέπει να αναστραφεί για τις υψηλές συχνότητες. Το σχήμα 2.7 δεν είναι φυσικά μια ακριβής αντιπροσώπευση, αλλά εμφανίζει, σε σύγκριση με τον ακριβή αριθμό ότι είναι δυνατό να αποκτηθεί μια αρκετά καλή ιδέα της αποκρισης συχνότητας ενός

μηχανικού σεισμομέτρου χωρίς χρησιμοποίηση οποιωνδήποτε μαθηματικών. Παρακάτω, η ακριβής σχέση θα παραχθεί.

2.4 Απόκριση συχνότητας σεισμομέτρων

Θεωρούμε $u(t)$ είναι η κάθετη εδαφική κίνηση και το $z(t)$ η μετατόπιση της μάζας σχετικά με τη γη (και τα δύο θετικά προς τα πάνω). Υπάρχουν δύο πραγματικές δυνάμεις που ενεργούν στη μάζα m : Η δύναμη του παραμορφωμένου ελατηρίου και η δύναμη της απόσβεσης.

Δύναμη ελατηρίου: $-kz$, αρνητικό δεδομένου το ελατήριο αντιτάσσει τη μαζική μετατόπιση, k είναι η σταθερά ελαστικότητας. Ο συντονισμός της γωνιακής συχνότητας του μαζικού ελαστικού συστήματος είναι $\omega_0 = k/m$ όπου $\omega_0 = 2\pi/T_0$ και T_0 είναι η αντίστοιχη φυσική περίοδος.

Δύναμη απόσβεσης: $-d\dot{z}$ όπου το d είναι η σταθερά τριβής. Κατά συνέπεια η δύναμη απόσβεσης είναι ανάλογη προς τους μαζικούς χρόνους η ταχύτητα και είναι αρνητική δεδομένου ότι αντιτάσσει επίσης την κίνηση.

Η επιτάχυνση της μάζας σχετικά με ένα αδρανές πλαίσιο αναφοράς, θα είναι το άθροισμα της επιτάχυνσης \ddot{z} σε σχέση με το πλαίσιο (ή το έδαφος) και της επίγειας ταχύτητας \ddot{u} .

Δεδομένου ότι το ποσό των δυνάμεων πρέπει να είναι ίσο με τους μαζικούς χρόνους της επιτάχυνσης, έχουμε:

$$-kz - d\dot{z} = m\ddot{z} + m\ddot{u} \quad (\text{Εξίσωση 2.3})$$

Για πρακτικούς λόγους, είναι κατάλληλο να χρησιμοποιείται ω_0 και η σταθερά απόσβεσης σεισμομέτρου, $h = d/2m\omega_0$ αντί για d και k , αφού και οι αυτές παραμετροί συσχετίζονται άμεσα με τις μετρήσιμες ποσότητες. Η εξ.2.3 μπορεί έπειτα να γραφτεί:

$$\ddot{z} + 2h\omega_0\dot{z} + \omega_0^2 z = -\ddot{u} \quad (\text{Εξίσωση 2.4})$$

Η εξίσωση δείχνει ότι η επιτάχυνση της γης μπορεί να ληφθεί με τη μέτρηση της σχετικής μετατόπισης της μάζας, του z , και των χρονικών παραγώγων του.

Εάν η συχνότητα είναι υψηλή, η επιτάχυνση θα είναι υψηλή έναντι στην ταχύτητα και τη μετατόπιση και ο όρος z θα επικρατήσει. Η εξίσωση μπορεί έπειτα να γραφτεί :

$$\ddot{z} = -\ddot{u} \quad (\text{Εξίσωση 2.5})$$

Αυτό δείχνει ότι η κίνηση της μάζας είναι σχεδόν η ίδια με την κίνηση της γης με ανάστροφο πρόσημο ή με μια μετατόπιση φάσης. Εάν η συχνότητα είναι χαμηλή, ο z όρος θα επικρατήσει και η εξίσωση μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$\omega_0^2 z = -\ddot{u} \quad (\text{Εξίσωση 2.6})$$

Επομένως, για τις μικρές συχνότητες, η σχετική μετατόπιση της μάζας είναι άμεσα ανάλογη προς το αντίθετο της εδαφικής επιτάχυνσης και η ευαισθησία του αισθητήρα στην χαμηλής συχνότητας εδαφική επιτάχυνση είναι αντιστρόφως ανάλογος προς την το τετράγωνο της φυσικής συχνότητας του αισθητήρα. Μπορούμε απλά να πούμε ότι το σεισμόμετρο λειτουργεί ως μία απλή κλίμακα ελατηρίου. Αυτή είναι επίσης η αρχή πίσω από το μετρητή βαρύτητας. Στην ποιοτική αξιολόγηση ανωτέρω, φάνηκε ότι δεν υπήρξε καμία μετατόπιση φάσης, οπότε πώς μπορεί το αρνητικό πρόσημο να εξηγηθεί; Αυτό οφείλεται απλά στη μετατόπιση φάσης μεταξύ της μετατόπισης και της επιτάχυνσης. Εάν η μετατόπιση γράφεται ως $u(t) = \cos(\omega t)$, κατόπιν με τη διπλή διαφορισή, η ταχύτητα λαμβάνεται ως $\dot{u}(t) = -\omega \sin(\omega t) = -\omega^2 u(t)$. Το γεγονός ότι το σεισμόμετρο μετρά την επιτάχυνση γραμμικά στις χαμηλές συχνότητες χρησιμοποιείται για την κατασκευή των επιταχυνσιομέτρων.

Εάν η απόσβεση είναι πολύ υψηλή, η εξ.2.4 γίνεται

$$2h\omega_0 \dot{z} = -\ddot{u} \quad (\text{Εξίσωση 2.7})$$

και η επιτάχυνση του σεισμομέτρου είναι ανάλογη προς την εδαφική επιτάχυνση, ή, ε ολοκληρώνοντας μία φορά, η μετατόπιση του σεισμομέτρου είναι ανάλογη προς την εδαφική ταχύτητα. Αυτή η ιδιότητα χρησιμοποιείται επίσης στις ειδικές εφαρμογές ενεργών σεισμόμετρων.

Σε γενική περίπτωση, δεν υπάρχει καμία απλή σχέση μεταξύ της κίνησης αισθητήρων και της επίγειας κίνησης και η εξίσωση (2.2) θα πρέπει να λυθεί έτσι ώστε τα σήματα εισόδου και εξόδου να μπορούν να είναι ανάλογα. Ιδανικά, θα επιθυμούσαμε να ξέρουμε το σήμα εξόδου να είναι για οποιοδήποτε αυθαίρετο σήμα εισόδου, εντούτοις αυτό δεν είναι τόσο εύκολο να λυθεί άμεσα. Δεδομένου ότι ένα αυθαίρετο σήμα μπορεί να περιγραφεί με υπέρθεση των αρμονικών (οι σειρές Fourier), ο απλούστερος τρόπος να λυθεί η εξ.2.4 είναι να υποτεθεί μια είσοδος μιας αρμονικής εδαφικής κίνησης και να λύσει την εξίσωση στο πεδίο των συχνότητων. Θεωρώντας εδαφική κίνηση της μορφής:

$$u(t) = U(\omega)e^{i\omega t} \quad (\text{Εξίσωση 2.8})$$

όπου $U(\omega)$ είναι το σύνθετο πλάτος και το ω είναι η γωνιακή συχνότητα. Σημειώστε ότι, με την επιφύλαξη τυχόν διαφορετικής ρύθμισης, επισημαίνουμε τη γωνιακή συχνότητα όταν αναφέρουμε συχνότητα. Η εξ.2.8 γράφεται με σύνθετη μορφή για την απλότητα της επίλυσης των εξισώσεων και το πραγματικό μέρος αντιπροσωπεύει την πραγματική εδαφική κίνηση. Δεδομένου ότι ένα σεισμόμετρο υποτίθεται ότι αντιπροσώπευσε ένα γραμμικό σύστημα, η κίνηση σεισμομέτρων είναι επίσης μια αρμονική κίνηση με την ίδια συχνότητα και το εύρος είναι $Z(\omega)$

$$z(t) = Z(\omega)e^{i\omega t} \quad (\text{Εξίσωση 2.9})$$

Εν συνεχεία έχουμε

$$\begin{aligned} \ddot{u} &= -\omega^2 U(\omega)e^{i\omega t} \\ \dot{z} &= i\omega Z(\omega)e^{i\omega t} \\ \ddot{z} &= -\omega^2 Z(\omega)e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (\text{Εξίσωση 2.10})$$

Παρεμβάλλοντας στην εξ.2.4 και διαιρώντας με τον κοινό παράγοντα $e^{j\omega t}$ μπορούμε να υπολογίσουμε τη σχέση μεταξύ της εξόδου και της εισόδου $T(\omega)=Z(\omega)/U(\omega)$ ως η αποκαλούμενη συνάρτηση απόκριση συχνότητας μετατόπισης

$$T_d(\omega) = \frac{Z(\omega)}{U(\omega)} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} = \frac{\omega^2((\omega_0^2 - \omega^2) - 2ih\omega\omega_0)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\omega_0^2 h^2} \quad (\text{Εξίσωση 2.11})$$

Από την ανωτέρω έκφραση, $Ad(\omega)$ είναι το πλάτος της απόκρισης μετατόπισης και $\Phi d(\omega)$ η φάση αυτού

Η $Td(\omega)$ μπορεί να γραφτεί με πολική μορφή όπως

$$T_d(\omega) = A_d(\omega)e^{j\Phi_d(\omega)} \quad (\text{Εξίσωση 2.12})$$

Από την εξ.2.10, μπορούμε πάλι να δούμε τι συμβαίνει στις ακραίες περιπτώσεις. Για τις υψηλές συχνότητες, παίρνουμε

$$A_d(\omega) \rightarrow 1 \quad (\text{Εξίσωση 2.13})$$

Αυτό είναι ένα σταθερό κέρδος με τιμή 1 και ο αισθητήρας συμπεριφέρεται ως καθαρός αισθητήρας μετατοπίσεων. Για τις χαμηλές συχνότητες, ισχύει

$$A_d(\omega) \rightarrow \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \quad (2.14)$$

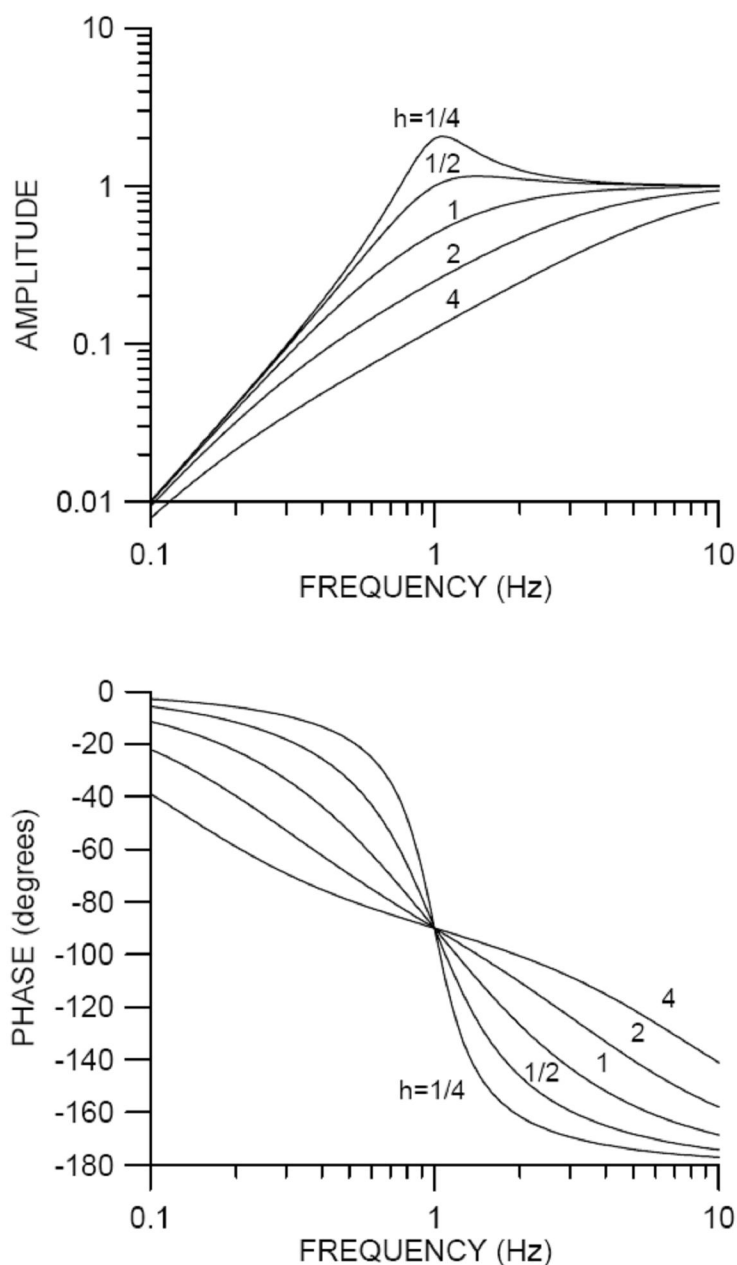
Για υψηλή απόσβεση

$$A_d(\omega) \approx \frac{\omega}{2h\omega_0} \quad (2.15)$$

και έχουμε έναν καθαρό αισθητήρα ταχύτητας, εντούτοις το κέρδος είναι χαμηλό δεδομένου ότι το h είναι υψηλό.

Το σχήμα 2.8 απεικονίζει την απόκριση συχνότητας και φάσης ενός αισθητήρα με μια φυσική περίοδο 1 s και απόσβεσης από 0,25 έως 4. Όπως μπορούμε να δούμε, μια χαμηλή απόσβεση οδηγεί σε μια αιχμή στη απόκριση που εμφανίζονται εάν $h < 1$. Εάν $h = 1$, η μάζα σεισμομέτρων θα επιστρέψει στη θέση ηρεμίας στο λιγότερο πιθανό χρόνο χωρίς υπερύψωση, η δε καμπύλη απόκρισης δεν έχει καμία αιχμή και το σεισμόμετρο λέγεται ότι είναι αυστηρά μετριασμένο. Από τη μορφή της καμπύλης και την εξ.2.10 μπορούμε να δούμε ότι το σεισμόμετρο μπορεί να θεωρηθεί ως υπερπερατό φίλτρο για την εδαφική κίνηση. Τα σεισμόμετρα αποδίδουν βέλτιστα στην απόσβεση κοντά σε κρίσιμο σημείο. Η πιο κοινή τιμή που χρησιμοποιείται είναι $h = 0.707$. Γιατί ακριβώς αυτή η τιμή και όχι 0,6 ή 0,8; Στην πράξη δεν κάνει πολλή διαφορά, αλλά η τιμή 0.707 είναι μια κατάλληλη τιμή για να χρησιμοποιήσει πότε περιγράφουμε τη λειτουργία αποκρίσης εύρους. Αντικαθιστώντας $h = 0.707$ στην εξ.2.10, η τιμή για $A_d(\omega_0) = 0.707$. Αυτή είναι η τιμή που χρησιμοποιείται για να καθορίσει τη γωνιακή συχνότητα ενός φίλτρου ή του σημείου -3 dB. Έτσι χρησιμοποιώντας $h = 0.707$ σημαίνει ότι μπορούμε να περιγράψουμε την απόκριση του σεισμομέτρου ως υπερπερατό φίλτρο δεύτερης τάξης (πραγματικά όπως ένα φίλτρο Butterworth) με μια γωνιακή συχνότητα γωνιών ω_0 .

Όταν η απόσβεση αυξάνεται επάνω από 1, η ευαισθησία μειώνεται, όπως περιγράφεται στην εξ.2.10 και η απόκριση προσεγγίζει αυτής του αισθητήρα ταχύτητας. Από το σχήμα 2.8, βλέπουμε αυτό για $h = 4$, η απόκριση προσεγγίζει μια ευθεία γραμμή που δείχνει μια καθαρή απόκριση ταχύτητας.



Σχήμα 2.8 Απόκριση πλάτους και φάσης για ένα σεισμόμετρο με μια φυσική συχνότητα 1 Hz. Οι καμπύλες για το διάφορα επίπεδα απόσβεσης h (0.25 – 4) εμφανίζονται (Haskon, 2002)

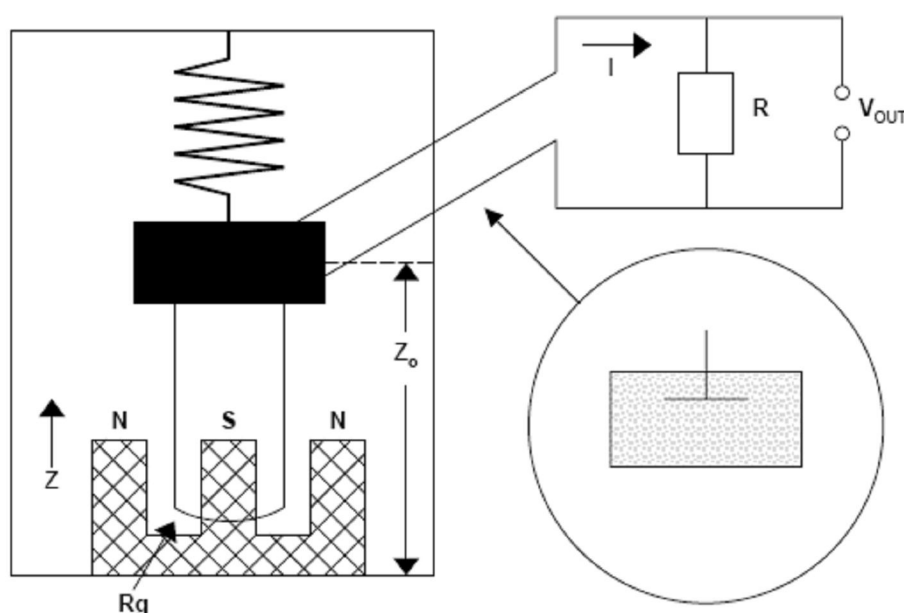
2.5 Μετατροπείας ταχύτητας

Σχεδόν όλα τα παραδοσιακά σεισμόμετρα χρησιμοποιούν έναν μετατροπέα ταχύτητας για να μετρήσουν την κίνηση της μάζας. Η αρχή είναι να υπάρξει ένα κινούμενο πηνίο μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί από την κατοχή ενός σταθερού πηνίου και ενός μαγνήτη που κινείται με τη μάζα ή έναν σταθερό μαγνήτη και τις κινήσεις πηνίων με τη μάζα. Η έξοδος από το πηνίο είναι

ανάλογη προς την ταχύτητα της μάζας σχετικά με το πλαίσιο και επομένως καλούμε αυτό το είδος ηλεκτρομαγνητικού σεισμομέτρου μετατροπέα ταχύτητας. Δύο νέες σταθερές παρουσιάζονται στο σύστημα:

Σταθερά γεννήτριας G : Αυτή η σταθερά αφορά την ταχύτητα του εδάφους την έξοδο από το πηνίο. Έχει μια μονάδα των χαρακτηριστικών τιμών V/ms^{-1} , και έχει εύρος 30 έως $500 V/ms^{-1}$.

Αντίσταση R_g πηνίων γεννητριας: Η αντίσταση του πηνίου γεννητριών (αποκαλούμενο και πηνίο σημάτων) σε Ohm



Σχήμα 2.9 Μοντέλο ενός ηλεκτρομαγνητικού αισθητήρα. Η αντίσταση πηνίων είναι R_g , ο αντιστάτης απόσβεσης είναι R και η έξοδος τάσης είναι V_{out} . Η απόσβεση τύπου αμορτισέρ έχει αντικατασταθεί από την απόσβεση από το πηνίο που κινείται στο μαγνητικό πεδίο (Haskov, 2002)

Το πηνίο σημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως αποσβεστήρας με έναν πολύ απλό τρόπο: με τη φόρτωση του πηνίου σημάτων με έναν αντιστάτη. Όταν το ρεύμα παράγεται από το πηνίο σημάτων, θα αντιτάξει στη μαζική κίνηση με μια ανάλογη μαγνητική δύναμη.

Η συνάρτηση απόκρισης συχνότητας για το μετατροπέα ταχύτητας είναι διαφορετική από,τι για το μηχανικό αισθητήρα. Στην εξ.2.8, $Z(\omega)$ ήταν το

παρατηρηθέν σήμα εξόδου. Με το μετατροπέα ταχύτητας, το παρατηρηθέν σήμα εξόδου είναι μια τάση ανάλογη προς τη μαζική ταχύτητα $Z(\omega) = i\omega Z(\omega)$ και G αντί $Z(\omega)$. Έτσι η απόκριση μετατόπισης για τον αισθητήρα ταχύτητας είναι

$$T_d^v(\omega) = \frac{\dot{Z}(\omega)}{U(\omega)} G = \frac{i\omega\omega^2 G}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} = \frac{i\omega^3 G}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad (\text{Εξίσωση 2.16})$$

η μόνη διαφορά έναντι στο μηχανικό αισθητήρα είναι οι παράγοντες G και i . Για την καμπύλη αποκρίσης (2,24), η μονάδα είναι $(\text{ms}^{-1}/\text{m})(\text{V}/\text{ms}^{-1})=\text{V}/\text{m}$

Στην πράξη η έξοδος αισθητήρων συνδέεται πάντα με έναν εξωτερικό αντιστάτη (για τον έλεγχο απόσβεσης και επειδή οι ενισχυτές έχουν μια πεπερασμένη σύνθετη αντίσταση εισόδου). Αυτό διαμορφώνει έναν διαιρέτη τάσης. Κατά συνέπεια η σταθερά γεννήτριας υπό φορτίο γίνεται

$$G_s = G \cdot \frac{R_s}{R_s + R_g} \quad (\text{Εξίσωση 2.17})$$

και αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθεί στην εξ.2.16 αντί του G

2.5.1 Σύμβαση πολικότητας

Η σύμβαση είναι ότι μια επίγεια κίνηση επάνω, ο Βορράς ή η ανατολή πρέπει να δώσουν ένα θετικό σήμα από το σεισμόμετρο. Όπως αναφέρεται στην εισαγωγή, το μηχανικό σεισμόμετρο αναστρέφει το σήμα, έτσι προκειμένου να αποκτηθεί ένα θετικό σήμα, ένας παράγοντας -1 πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Τυπικά, ο μετατροπέας ταχύτητας αναστρέφει επίσης το σήμα, δεδομένου ότι ο παρών που παράγεται θα αντιτάξει την κίνηση της μάζας και το G χρησιμοποιείται μερικές φορές με ένα αρνητικό πρόσημο. Τα καλώδια και τα σεισμόμετρα παράγονται με αυτή τη σύμβαση πολικότητας κρατά. σημαίνει ότι η τελική μορφή της απόκρισης συχνότητας, για να χρησιμοποιήσει στην πράξη, είναι η εξ.2.17 πολλαπλασιασμένη με -1 και η απόκριση μετατοπίσεων γίνεται

$$T_d^v(\omega) = \frac{-i\omega^3 G}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad (\text{Εξίσωση 2.18})$$

Το πρόσημο του μείον είναι μερικές φορές επίσης ξεχασμένο, το οποίο προκαλεί μια λανθασμένη μετατόπιση φάσης.

2.6 Καμπύλες απόκρισης οργάνων (διαφορετική παρουσίαση)

Συνήθως, η πρότυπη καμπύλη κέρδους μετατοπίσεων εμφανίζεται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Μερικές φορές θέλουμε επίσης να ξέρουμε πως οι λειτουργίες της επιτάχυνσης και ταχύτητας μοιάζουν και με το μηχανικό σεισμόμετρο και με το σεισμόμετρο ταχύτητας. Υπενθυμίζουμε ότι η συνάρτηση απόκρισης ήταν

$$T_d(\omega) = \frac{Z(\omega)}{U(\omega)} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad (\text{Εξίσωση 2.19})$$

Εάν αντικαθιστάμε τώρα $U(\omega)$ με $\dot{U}(\omega) = i\omega U(\omega)$ η η συνάρτηση απόκρισης ταχύτητας γίνεται

$$T_v(\omega) = \frac{Z(\omega)}{\dot{U}(\omega)} = \frac{-i\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad (\text{Εξίσωση 2.20})$$

Ενώ για την επιτάχυνση θα έχουμε

$$T_a(\omega) = \frac{Z(\omega)}{\ddot{U}(\omega)} = \frac{-1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad (\text{Εξίσωση 2.20})$$

Ομοίως παίρνουμε για τις συναρτήσεις απόκρισης του αισθητήρα ταχύτητας, για την ταχύτητα

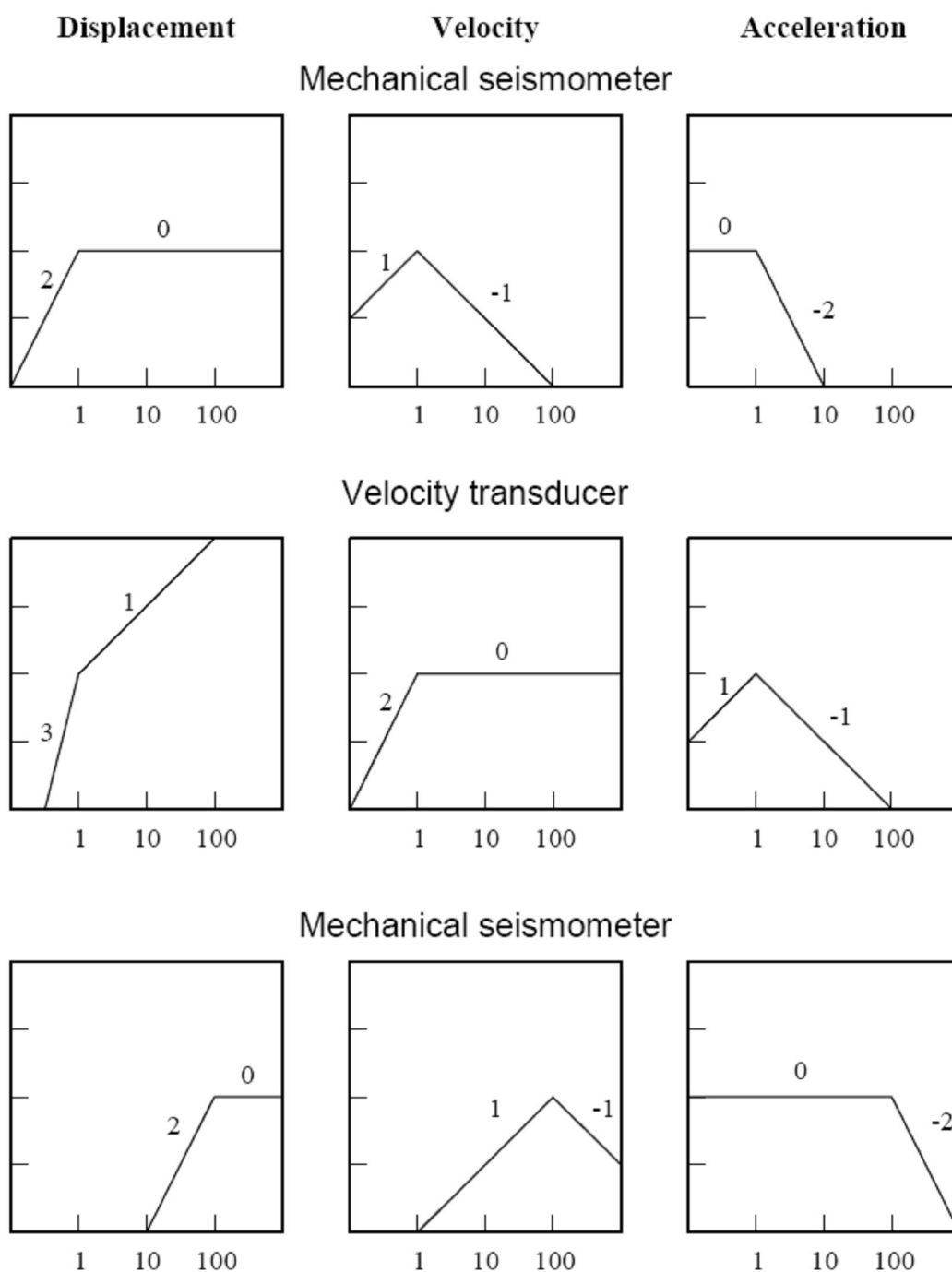
$$T_v^v(\omega) = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad (\text{Εξίσωση 2.21})$$

και για την επιτάχυνση

$$T_a^v(\omega) = \frac{-i\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad (\text{Εξίσωση 2.22})$$

Εάν ο αισθητήρας είναι ένα επιταχύνσιόμετρο, οι καμπύλες απόκρισης είναι οι ίδιες όπως για τον αισθητήρα ταχύτητας που πολλαπλασιάζεται με το $i\omega$ όπως τον αισθητήρα ταχύτητας η καμπύλη ήταν ακριβώς όπως η μηχανική καμπύλη αισθητήρων που πολλαπλασιάστηκε με το $i\omega$.

Είναι έτσι εύκολο να γίνει μετατροπή από έναν τύπο καμπύλης σε άλλο δεδομένου ότι το μόνο που χρειάζεται είναι ένας πολλαπλασιασμός ή διαίρεση με ω (ή $i\omega$ για τη σύνθετη απόκριση). Μπορεί να είναι λίγο δύσκολο να θυμόμαστε ποιο είναι ποιο, το σχήμα 2.10 δίνει σε μια σχηματική επισκόπηση των διαφορετικών αντιπροσωπεύσεων των πρότυπων αισθητήρων.



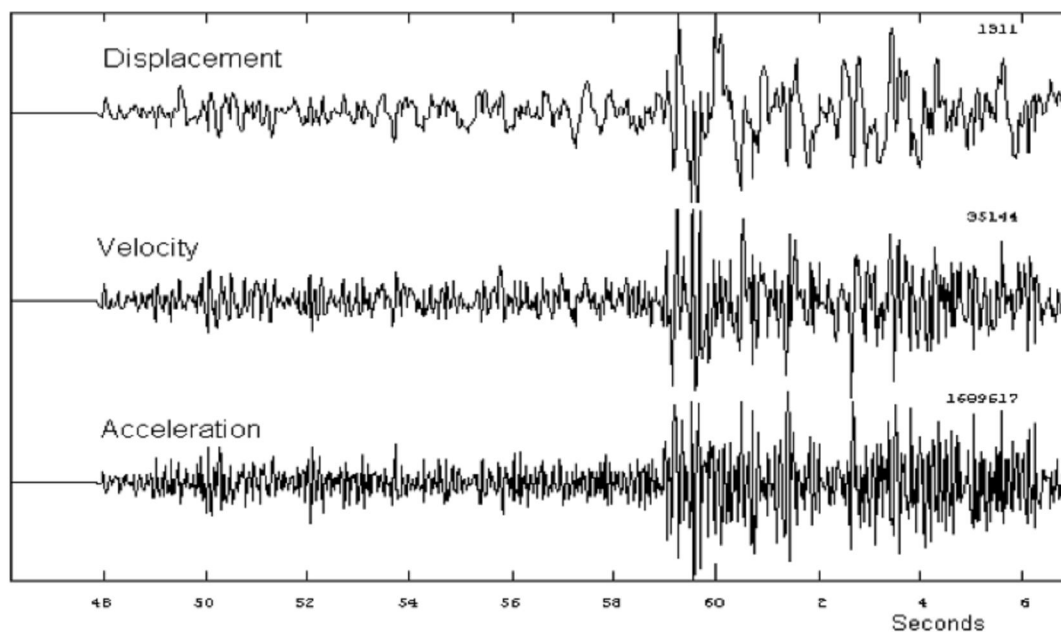
Σχήμα 2.10 Αποκριση συχνότητας (σχηματικά) ενός μηχανικού αισθητήρα 1Hz (κορυφή), ενός μηχανικού αισθητήρα 1Hz με έναν μετατροπέα ταχύτητας (μέση) και ενός επιταχυνσιόμετρου (100 Hz) (κατώ). Από το αριστερό στο δεξιό, οι αριθμοί εμφανίζουν έξοδο αισθητήρων για τη μετατόπιση, την ταχύτητα και της επιτάχυνσης αντίστοιχα. Οι άξονες είναι λογαριθμικοί και οι οριζόντιοι άξονες εμφανίζουν συχνότητα στο Hz. (Haskon, 2002)

Κανένας από τους αισθητήρες δεν είναι γραμμικός. Ο μηχανικός αισθητήρας έχει μια επίπεδη αποκριση μετατοπίσεων επάνω από ω_0 , αλλά λίγα τέτοια όργανα

χρησιμοποιούνται, ο διασημότερος είναι πιθανώς το σεισμόμετρο Wood-Anderson. Ο αισθητήρας ταχύτητας έχει μια επίπεδη αποκρίση για τις συχνότητες επάνω από ω_0 έτσι με την κατασκευή ενός αισθητήρα ευρείας ζώνης συχνοτήτων με τη συχνότητα γωνιών π.χ. σε 0,01 Hz, έχουμε έναν αισθητήρα με μια ευρεία ζώνη συχνότητας γραμμική στην ταχύτητα. Εντούτοις, ο αισθητήρας χρησιμοποιείται ακόμα για να μετρήσει τα σήματα στις συχνότητες κατωτέρω του ω_0 χωρίς ιδιαίτερη παραμόρφωση σε μια περιορισμένη ζώνη συχνότητας.

Το επιταχύνσιόμετρο είναι το πιο διαδεδομένο όργανο ευρείας ζώνης δεδομένου ότι έχει ένα επίπεδο αποκρίσης για την ταχύτητα σε ολόκληρη τη σεισμική ζώνη συχνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται μόνο εάν κατασκευάσουμε επιταχύνσιόμετρο με ω_0 μεγαλύτερο από τη μεγαλύτερη συχνότητα ενδιαφέροντος. Σημειώστε ότι η μορφή της αποκρίσης επιταχυνσιομέτρων είναι η ίδια όπως για το μηχανικό σεισμόμετρο, μόνο το ω_0 έχει αλλάξει. Οπότε για ποιον λόγο απαιτούνται αισθητήρες ταχύτητας ευρείας ζώνης; Η απάντηση είναι ότι το επιταχύνσιόμετρο είναι αναίσθητο στη μετατόπιση στις χαμηλές συχνότητες και πάρα πολύ ευαίσθητο στις υψηλές συχνότητες έτσι για ένα πολύ ευαίσθητο επιταχύνσιόμετρο, είναι δύσκολο να καλυφθεί ολόκληρη η σειρά.

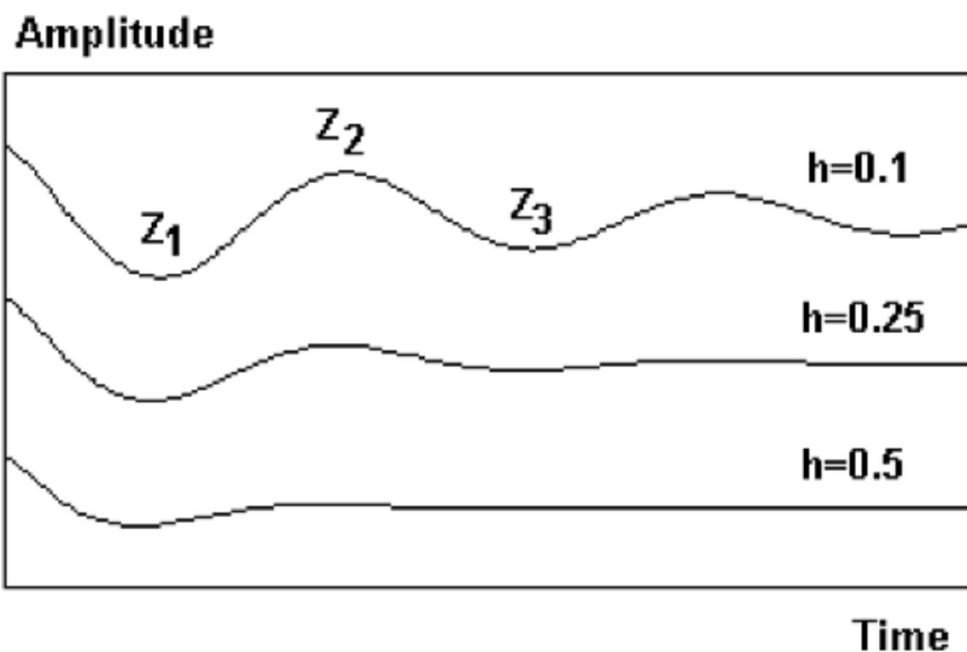
Ένας σεισμικός αισθητήρας μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως φίλτρο, όπως στην ταχύτητα ο αισθητήρας είναι ένα υπερπερατό φίλτρο δεύτερης τάξης, για την επιτάχυνση είναι ένα ζωνοπερατό φίλτρο πρώτης τάξης. Θεωρώντας τους αισθητήρες ως φίλτρα, μπορούμε επίσης να δούμε γιατί οι διαφορετικοί αισθητήρες θα κάνουν το ίδιο σεισμικό σήμα να εμφανιστεί διαφορετικό. Στα παραδείγματα ανωτέρω, ένα σήμα μετατοπίσεων στη ζώνη 1-10 Hz συχνότητας θα καταγραφεί ανενόχλητο με το μηχανικό αισθητήρα, θα ενισχυθεί αναλόγως προς τη συχνότητα για το μετατροπέα ταχύτητας και ενισχυμένο ανάλογα προς το τετράγωνο της συχνότητας για το επιταχύνσιόμετρο. Έτσι το σήμα θα εμφανιστεί με περισσότερη υψηλή συχνότητα στο επιταχύνσιόμετρο από,τι στο μηχανικό σεισμόμετρο. Αυτό δεν είναι παράλογο δεδομένου ότι ο μηχανικός αισθητήρας καταγράφει την καθαρή μετατόπιση και την καθαρή επιτάχυνση και πρέπει να διαφορисуμε δύο φορές για να μεταβούμε από τη μετατόπιση στην επιτάχυνση. Το σχήμα 2.11 εμφανίζει ένα παράδειγμα του ίδιου σήματος με τη μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση



Σχήμα 2.11. Σήμα από ένα μέγεθος 3 σεισμο που καταγράφεται με ένα σεισμόμετρο 1Hz. Τα 3 ίχνη εμφανίζουν τη μετατόπιση, την ταχύτητα και επιτάχυνση αντίστοιχα στη ζώνη 0.3-20 Hz συχνότητας. Οι αριθμοί πάνω από τα ίχνη στη δεξιά πλευρά είναι το μέγιστο εύρος στο nm, nm/s και το nm/s^2 αντίστοιχα.

2.7 Σταθερά απόσβεσης

Η σταθερά απόσβεσης είναι προφανώς μια πολύ σημαντική παράμετρος για έναν παραδοσιακό σεισμικό αισθητήρα και θα κοιτάξουμε λίγο στον τρόπο με τον οποίο η σταθερά απόσβεσης έχει επιπτώσεις στο σήμα και πώς να μετρήσει τη σταθερά απόσβεσης. Εάν δώσουμε στη μάζα μια αρχική μετατόπιση z_0 , θα ταλαντευθεί για πάντα εάν η απόσβεση είναι μηδέν (μη πιθανό στην πράξη), βαθμιαία στάση που ταλαντεύεται με μια χαμηλές απόσβεση και ακριβώς όχι μια ταλάντευση (καμία υπερανυψώση) εάν η απόσβεση είναι ένα (σχήμα 2.12). Έτσι υπάρχει προφανώς μια σχέση μεταξύ του ποσού πέρα από την ταλάντευση και την απόσβεση.



Σχήμα 2.12 Επίδραση της απόσβεσης στο σήμα. Στον αισθητήρα έχει δοθεί κάποια αρχική θετική μετατόπιση και έχει αφεθεί έπειτα να ταλαντευθεί ελεύθερα. Η σταθερά απόσβεσης είναι h . Οι ακραίες τιμές εύρους είναι z_1 , z_2 και z_3 . (Haskov, 2002)

Η εξ.2.1 μπορεί να λυθεί για μια αρχική σταθερή μετατόπιση z_0 και οι $h < 1$, (χωρίς την εξωτερική δύναμη)(Scherbaum, 1996)

$$z(t) = \frac{z_0}{\cos \Phi} e^{-h\omega_1 t} \cos(\omega_1 t - \Phi) \quad (\text{Εξίσωση 2.23})$$

Όπου το $\Phi = \arcsin(h)$ είναι η μετατόπιση φάσης και ω_1 είναι η φαινόμενη συχνότητα του αποσβενυμένου συστήματος:

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 (1 - h^2)} \quad (\text{Εξίσωση 2.24})$$

Για έναν ηλεκτρομαγνητικό μετατροπέα ταχύτητας, η έξοδος τάσης θα είναι $V(t) = G_e z(t)$, όπου η G_e είναι η σταθερά γεννητριας υπό φορτίο. Με τη διαφοροποίηση της εξίσωσης του $z(t)$ και τη χρησιμοποίηση του τύπου του ημιτόνου και το άθροισμα των γωνιών και της τιμής του Φ , η έξοδος τάσης μπορεί να αποδειχθεί για να είναι (McArthur, 1985):

$$V(t) = \frac{G_e z_0 k}{\omega_1 m} e^{-h\omega_1 t} \sin(\omega_1 t) \quad (\text{Εξίσωση 2.25})$$

όπου το k είναι η σταθερά ελατηρίου και το m η μάζα σεισμομέτρου. Ένα αποσβενυμένο σύστημα θα ταλαντευθεί με μια χαμηλότερη συχνότητα από το

σύστημα, έτσι κατά μέτρηση της ελεύθερης περιόδου ενός σεισμομέτρου, αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη. Από την εξ.2.25, βλέπουμε ότι το αποσβενυόμενο σύστημα θα ταλαντευθεί με μια συχνότητα ω_1 και με ένα εύρος που αποσυντίθενται εκθετικά και όσο υψηλότερη την απόσβεση, τόσο γρηγορότερη η ταλάντευση θα σταματήσει. Από την εξ.2.25, μπορεί να αποδειχθεί ότι η αναλογία εύρους δύο διαδοχικών ακραίων τιμών z_1/z_2 μπορεί να γραφτεί ως

$$\ln(z_1 / z_2) = \frac{\pi h}{\sqrt{1-h^2}} \quad (\text{Εξίσωση 2.26})$$

Κατά συνέπεια η πραγματική απόσβεση ενός δεδομένου σεισμομέτρου μπορεί να μετρηθεί με τη μέτρηση των ευρών δύο διαδοχικών ακραίων τιμών. Εάν το εύρος αλλάζει πολύ λίγο, η αναλογία μεταξύ του άκρου 1 και ακραίο n+1 (θετικό ή αρνητικό εύρος) θα ήταν

$$\ln(z_1 / z_n) = \frac{\pi h}{\sqrt{1-h^2}} n \quad (\text{Εξίσωση 2.27})$$

Η απόσβεση αποτελείται από δύο μέρη, τη μηχανική απόσβεση λόγω τριβής h_m (επίσης αποκαλούμενης απόσβεση ανοικτών κυκλωμάτων) και την απόσβεση λόγω ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του πηνίου h_e . Έτσι $h=h_m + h_e$. Τη μηχανική απόσβεση δεν μπορεί να αλλάξει και οι τιμές της κυμαίνονται από 0.01 έως 0.3 ενώ η ηλεκτρική απόσβεση μπορεί να ρυθμιστεί με το μέγεθος του εξωτερικού αντιστάτη για να λάβει μια επιθυμητή συνολική απόσβεση. Η ηλεκτρική απόσβεση μπορεί να υπολογιστεί ως

$$h_e = \frac{G^2}{2M\omega_0 R_T} \quad (\text{Εξίσωση 2.28})$$

όπου το m είναι η μάζα σεισμομέτρων και R_T είναι η συνολική αντίσταση του πηνίου γεννητριών και του εξωτερικού αντιστάτη απόσβεσης. Οι προδιαγραφές σεισμομέτρων δίνουν συχνά την αντίσταση CDR (κρίσιμης απόσβεσης), η οποία είναι η συνολική αντίσταση $CDR = R_T$ που απαιτείται για να πάρει μια απόσβεση τιμή 1. Εάν ξέρουμε την ηλεκτρική απόσβεση h_{el} για μια τιμή R_T και έχοντας R_{T1} , την

απαιτούμενη αντίσταση και R_{T2} για μια άλλη αντίσταση για ηλεκτρική απόσβεση h_{e2} μπορεί να υπολογιστεί ως

$$R_{T2} = R_{T1} \frac{h_{e1}}{h_{e2}} \quad (\text{Εξίσωση 2.29})$$

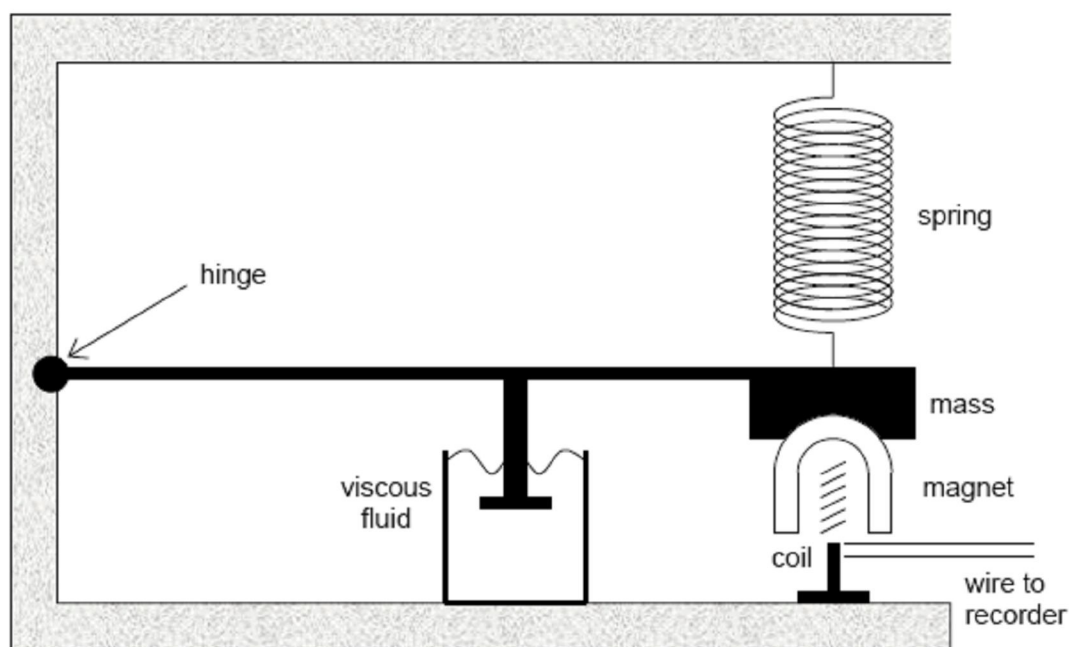
Εάν η μηχανική απόσβεση είναι χαμηλή, η εξ.2.29) μπορεί να γραφτεί από την άποψη CDR ως

$$R_{T2} = CDR / h_{e2} \quad (\text{Εξίσωση 2.30})$$

και έτσι η απαιτούμενη συνολική αντίσταση για οποιαδήποτε απαραίτητη απόσβεση μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από την CDR.

2.8 Κατασκευή των σεισμικών αισθητήρων

Το σύστημα ελατηρίων-μάζας του κάθετου σεισμομέτρου χρησιμεύει ως ένα πολύ χρήσιμο μαθηματικό μοντέλο για την κατανόηση των βασικών αρχών σεισμομετρίας. Εντούτοις, στο πρακτικό σχέδιο, το σύστημα είναι πάρα πολύ απλό δεδομένου ότι η μάζα μπορεί να κινηθεί σε όλες τις κατευθύνσεις καθώς επίσης και να περιστραφεί. Τόσο σχεδόν όλα τα σεισμόμετρα έχουν κάποια μηχανική συσκευή, η οποία θα περιορίσει την κίνηση σε διεύθυνση. Το σχήμα 2.13 επιδεικνύει πώς αυτό μπορεί να γίνει σε γενικές γραμμές για ένα κάθετο σεισμόμετρο.



Σχήμα 2.13 Κάθετο σεισμόμετρο μάζας-ελατηρίων όπου η οριζόντια κίνηση έχει περιοριστεί από μια οριζόντια αρθρωμένη ράβδο. (Shearer, 1999).

Αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε λόγω μάζας, είναι ο αισθητήρας που περιορίζει την κίνηση κάθετα. Η μάζα όχι μόνο κινείται στη z-κατεύθυνση αλλά σε μια κυκλική κίνηση με την εφαπτομένη προς την κάθετη κατεύθυνση. Εντούτοις, για τις μικρές κινήσεις η κίνηση είναι αρκετά γραμμική. Η ανωτέρω ρύθμιση εκκρεμών είναι σε γενικές γραμμές ο πιο κοινός τρόπος να περιοριστεί η κίνηση και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τα οριζόντια σεισμόμετρα. Τα εκκρεμή είναι επίσης ευαίσθητα στη γωνιακή κίνηση στα σεισμικά κύματα, η οποία είναι κανονικά τόσο μικρή που δεν έχει καμία πρακτική σημασία.

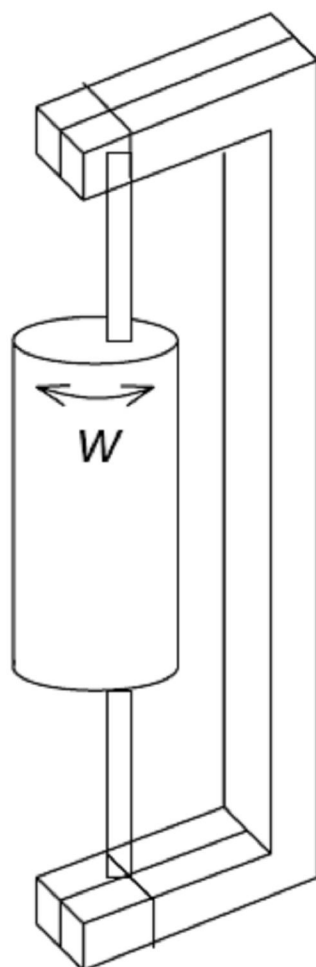
Το απλούστερο εκκρεμές είναι μια μάζα που αναστέλλεται με μια σύρμα. Για μια μικρή μάζα m μεγέθους έναντι στο μήκος L του σύρματος, η φυσική συχνότητα είναι.

$$\omega_0 = \sqrt{g/L} \quad (\text{Εξίσωση 2.31})$$

όπου το g είναι η σταθερά βαρύτητας. Για τις μικρές μεταφραστικές επίγειες κινήσεις, η εξίσωση της κίνησης είναι ίδια με την εξ.2.1 με το z να αντικαθίσταται με τη γωνία της περιστροφής. Σημειώστε ότι ω_0 είναι ανεξάρτητο από τη μάζα.

2.8.1 Μικρής περιόδου αισθητήρας Wood Anderson

Αυτό το όργανο αναπτύχθηκε περίπου το 1925 και έχει διαδραματίσει έναν βασικό ρόλο στον καθορισμό της κλίμακας μεγέθους Richter, η βάση όλων των κλιμάκων μεγέθους χρησιμοποιούμενων σήμερα. Αυτό το εκκρεμές όργανο αποτελείται από έναν κύλινδρο μετάλλων (σχήμα 2.14) που συνδέεται συμπαγώς με ένα κάθετο καλώδιο αναστολής. Ο κύλινδρος θα περιστραφεί γύρω από το καλώδιο και ένας καθρέφτης, που συνδέεται με τη μάζα, χρησιμοποιείται για τη φωτογραφική καταγραφή της μετατόπισης. Πολύ λίγα σειсмоγράφοι που καταγράφουν τη μετατόπιση. Η περίοδος είναι 0.8 sec και το ονομαστικό κέρδος ήταν 2800. Αργότερα έχει καθοριστεί ότι το κέρδος στην πραγματικότητα ήταν μόνο το 2050 (Hutton και Boore, 1987), το οποίο είναι σημαντικό δεδομένου ότι, οι τοπικές κλίμακες μεγέθους που γίνονται σήμερα πρέπει να αναφερθούν στο κέρδος ξύλινου σειсмоγράφου του Αντερσον. Μερικά όργανα είναι ακόμα σε λειτουργία.



Σχήμα 2.14 Μικρής περιόδου αισθητήρας Αντερσον Η μάζα (μερικά γραμμάρια) αναρτάται σε ένα τεντωμένο καλώδιο και μπορεί να περιστραφεί ελαφρώς. Το ύψος του οργάνου είναι 36cm. (Beth, 1979)

2.8.2 Μεγάλης περιόδου αισθητήρες

Προκειμένου να ληφθεί η υψηλή ευαισθησία στα σεισμικά κύματα χαμηλής συχνότητας, χρειαζόμαστε μια χαμηλή φυσική συχνότητα. Με έναν πρότυπο αισθητήρα μαζών όπου

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (\text{Εξίσωση 2.32})$$

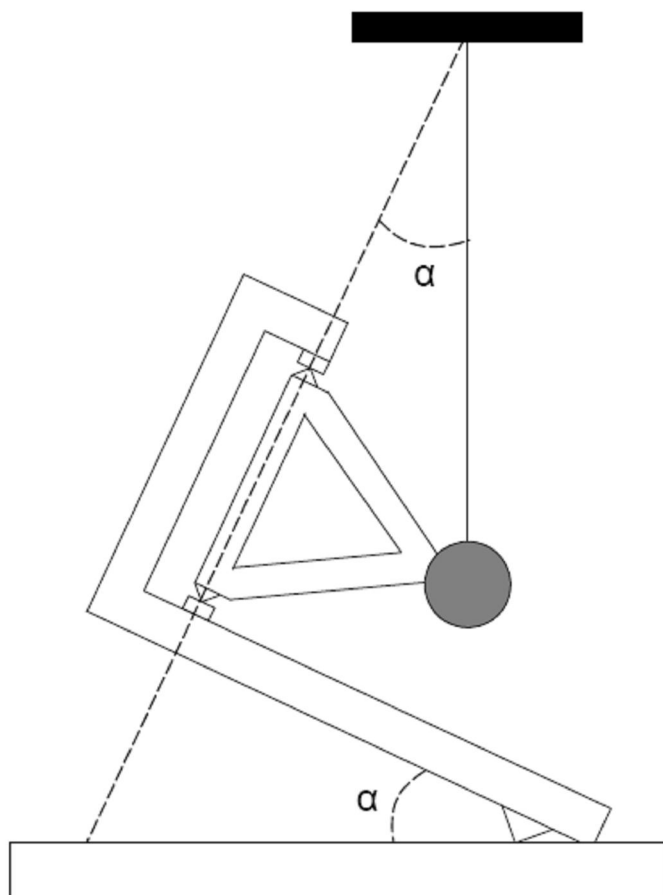
μια μεγάλη μάζα που συνδυάζεται με ένα μαλακό ελατήριο θα δώσει μια χαμηλή συχνότητα, αλλά αυτή η ρύθμιση περιορίζεται από τις μηχανικές ιδιότητες. Για το εκκρεμές απαιτείται περίοδος 20s και μήκος 100m, τιμές που δεν είναι ρεαλιστικές. Εάν η βαρύτητα ήταν μικρότερη, η φυσική συχνότητα θα ήταν μικρότερη και ίδιο πράγμα θα γινόταν εάν το k ήταν μικρότερο. Οι λύσεις είναι να χρησιμοποιηθούν οι

αστατικές αναστολές όπου η αποκαθιστώσα δύναμη είναι πολύ μικρή και, θεωρητικά, οποιαδήποτε φυσική συχνότητα μπορεί να ληφθεί.

2.8.3 Εκκρεμές Garden-gate

Η απλούστερη αστατική αναστολή για τα οριζόντια σεισμόμετρα είναι το εκκρεμές garden-gate (σχήμα 2.12). Η μάζα κινείται σε ένα σχεδόν οριζόντιο επίπεδο γύρω από έναν σχεδόν κάθετο άξονα. Η αποκαθιστώσα δύναμη είναι τώρα $g \cdot \sin(\alpha)$ όπου α είναι η γωνία μεταξύ της κατακορύφου και του άξονα περιστροφής έτσι η φυσική συχνότητα γίνεται

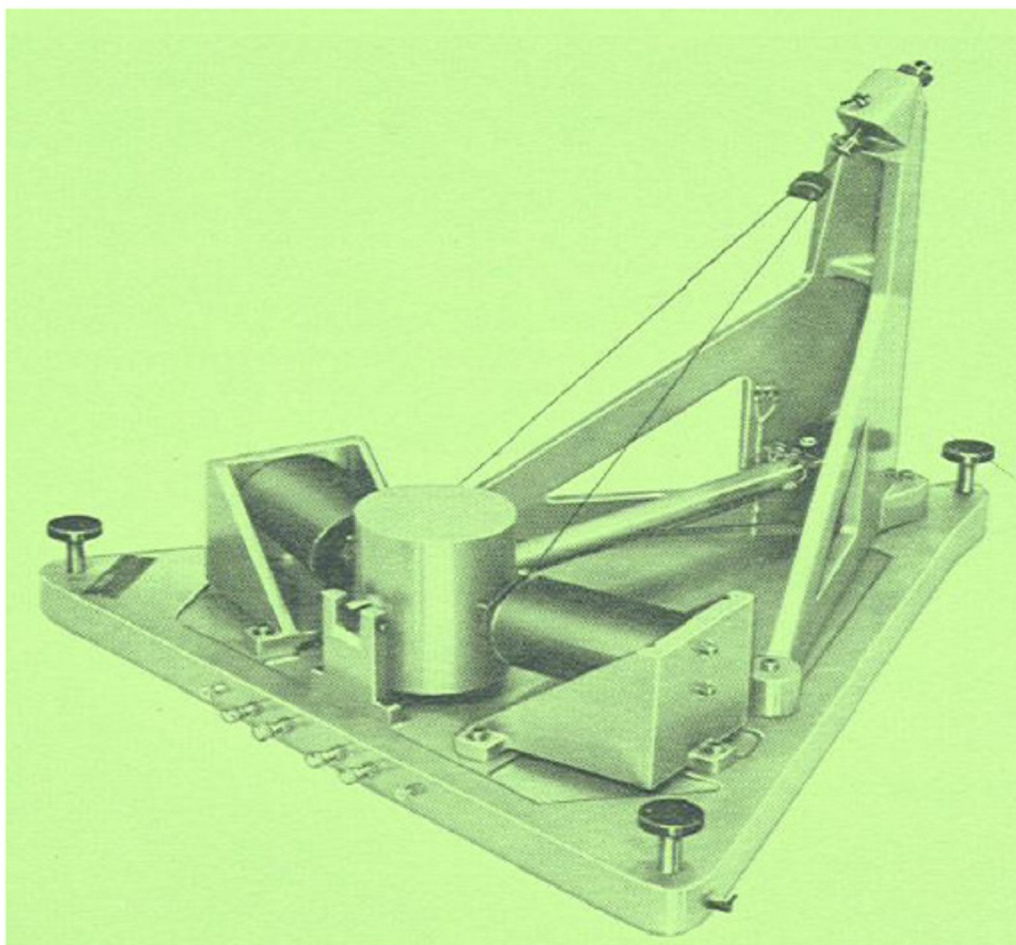
$$\omega_0 = \sqrt{g \sin(\alpha) / L} \quad (\text{Εξίσωση 2.33})$$



Σχήμα 2.15 Αρχή του εκκρεμούς garden-gate. Η γωνία κλίσης είναι υπερβάλλουσα. Το σχήμα μας δείχνει επίσης πόσο σημαντικό είναι για ένα εκκρεμές με σύρμα να έχει την ίδια φυσική συχνότητα. (Bornann, 2002).

Προκειμένου να λάβουμε μια φυσική συχνότητα 0.05 Hz με ένα μήκος εκκρεμούς 20cm θα απαιτηθεί μια κλίση 0,1 μοιρών. Αυτό είναι για τη χαμηλότερη

περίοδο που έχει ληφθεί στην πράξη με αυτά τα όργανα. Μικρότερη γωνία καθιστά το όργανο πολύ ευαίσθητο στις μικρές αλλαγές κλίσης. Αυτός ο τύπος οργάνου ήταν ένα από τα πιο πρόωρα σχέδια αλλά σήμερα δεν χρησιμοποιείται. Το σχήμα 2.16 εμφανίζει την μετεξέλιξη αυτού



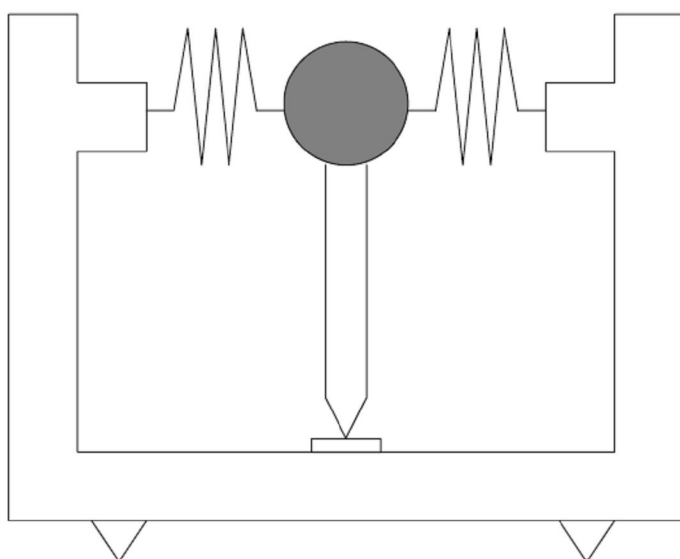
Σχήμα 2.16. Χαρακτηριστικό οριζόντιο σεισμόμετρο μακράς περιόδου κατασκευασμένο από τον Sprengnether. Οι δύο μαύροι κύλινδροι που βλέπουμε σε κάθε πλευρά είναι οι μαγνήτες και τα πηνία κινούνται μέσα με τη μάζα στο κέντρο. Η οριζόντιωση γίνεται με τις 3 βίδες στις γωνίες του πιάτου βάσεων. Μόλις γίνει η οριζόντιωση (μπροστινές βίδες), η πίσω βίδα χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την περίοδο. Φωτογραφία από Sprengnether.

Αυτό το μακρύ οριζόντιο σεισμόμετρο περιόδου (S-5007-H) χρησιμοποιήθηκε χαρακτηριστικά στο σύστημα WWSSN. Η περίοδος θεωρήθηκε ότι είναι διευθετήσιμη από 6 έως 60 s, αλλά στην πράξη είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί μια περίοδος μακρύτερα από 30s. Η σταθερά γεννητριας είναι 89 V/ms^{-1} . Το όργανο απαιτεί ένα πολύ σταθερό περιβάλλον θερμοκρασίας και αρκετό χώρο σε σχέση με ένα όργανο ευρείας περιόδου ίδια ζώνη συχνότητας. Αρκετοί από αυτά τα όργανα είναι ακόμα σε χρήση.

Οι αισθητήρες μακράς περιόδου LP έχουν μια μέγιστη κίνηση 10 mm με μια γραμμικότητα 5%. Θεωρώντας ότι η μικρότερη μετατόπιση που μπορούν να μετρήσουν είναι τουλάχιστον 1nm, μια κατά προσέγγιση εκτίμηση της δυναμικής περιοχής είναι $10\text{mm}/10^{-6}\text{ mm.} = 10^7$ ή 140db, για έναν τέτοιο παλαιό αισθητήρα. Αυτό μπορεί μόνο να επιτευχθεί με την ψηφιακή καταγραφή ενώ η παλαιά αναλογική καταγραφή έχει μια δυναμική περιοχή ίσως 50db . Κατά συνέπεια εάν συνδέονται με σύγχρονο ψηφιοποιητή, μπορούν να κάνουν έναν καλό σύστημα ευρείας ζώνης

2.8.4 Ανάστροφο Εκκρεμές

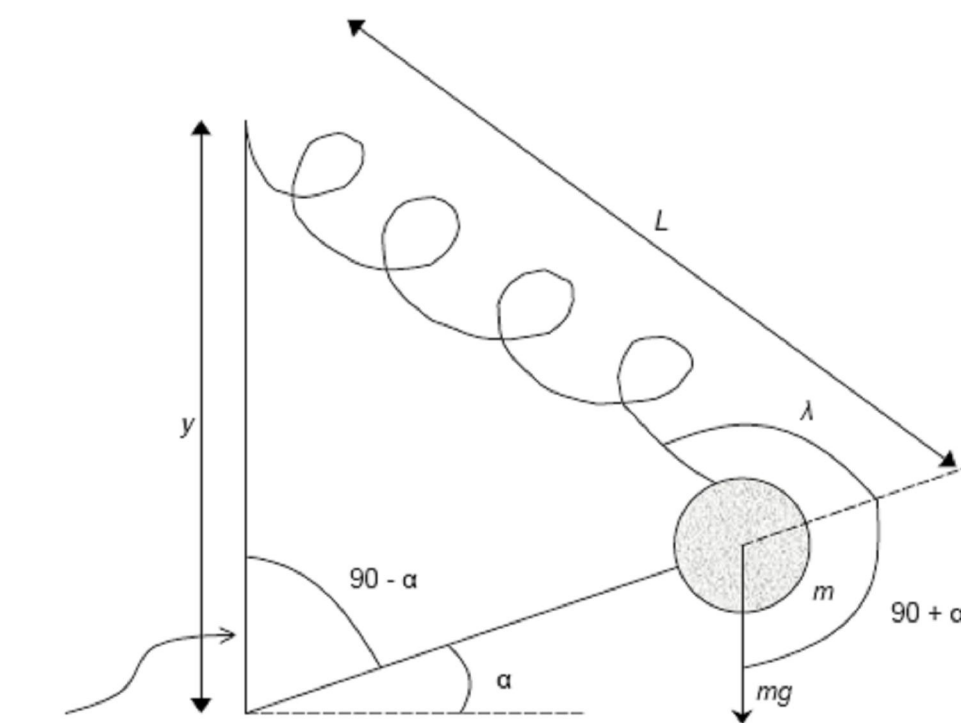
Το ανάστροφο εκκρεμές (σχήμα 2.17) ήταν επίσης ένα πρόωρο σχέδιο. Η μάζα πραγματοποιεί αιωρήσεις γύρω από το κάτω άκρο της και στηρίζεται στα πλάγια σε ελατήρια, στα οποία δημιουργούνται δυνάμεις επαναφοράς κατά την αιώρησή της. Η περίοδος καθορίζεται από το εκκρεμές (μάζα, κλπ.) καθώς και από τη θέση των ελατηρίων και τις σταθερές τους. Επομένως, με τη μεταβολή των παραμέτρων αυτών μπορούμε να πετύχουμε την επιθυμητή περίοδο. Το ανάστροφο εκκρεμές χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή σεισμογράφων ορισμένων τύπων, όπως είναι οι οριζόντιοι σεισμογράφοι τύπου Wiechert. Το διασημότερο παράδειγμα εκκρεμούς Wiechert που κατασκευάστηκε περίπου το 1905, είχε μάζα 1 τόνου, έκανε μια ελεύθερη περίοδο 10s και μια μηχανική ενίσχυση 240, η οποία είναι χαμηλή από τα πρότυπα εκκρεμή. Διάφορα όργανα είναι ακόμα σε λειτουργία και είναι πιθανώς ο σεισμογράφος, ο οποίος είχε την πιο μακροχρόνια συνεχή λειτουργική ιστορία.



Σχήμα 2.17 Το σεισμόμετρο αναστροφου εκκρεμούς.(Borman, 2002).

2.8.5 LaCoste

Η αστατική γεωμετρία της ελαστικότητας για τα κάθετα σεισμόμετρα εφευρέθηκε από τον LaCoste (1934). Η αρχή του αισθητήρα εμφανίζεται στο σχήμα 2.18. Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί ένα «ελατήριο μηδενικού μήκους» το οποίο είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η δύναμη $F=kL$ (όπου το L είναι το συνολικό μήκος του ελατηρίου). Τα κανονικά ελατήρια που χρησιμοποιούνται στα σεισμόμετρα δεν συμπεριφέρονται όπως αυτά του «μηδενικού μήκους» διότι $F=k*\Delta L$ (όπου ΔL είναι η αλλαγή στο μήκος σε σχέση με το μήκος ηρεμίας του ελατηρίου). Εντούτοις, είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα ελατήριο «μηδενικού μήκους» με π.χ. το στρίψιμο του καλωδίου όπως τυλίγεται σε ένα ελατήριο. Ο απώτερος σκοπός είναι να υπάρξει μια μάζα σε μια ακτίνα και στηριζόμενη στο ελατήριο έτσι ώστε η μάζα να είναι ελεύθερη να περιστραφεί γύρω από το χαμηλότερο (αριστερό) σημείο στήριξης.



Σχήμα 2.18 Η αρχή λειτουργίας της ανάρτησης LaCoste. Η μάζα m κρέμεται σε μια άρθρωση, η οποία έχει μια γωνία α με τον οριζόντιο και αναστελλεται από ένα ελατήριο μήκους L . (Haskov, 2002)

Αυτό το σύστημα μπορεί να κατασκευαστεί για να έχει μια άπειρη περίοδο, το οποίο σημαίνει ότι η δύναμη επαναφοράς πρέπει να είναι μηδέν σε οποιαδήποτε θέση της μάζας. Αυτό σημαίνει ότι εάν η μάζα είναι στην ισορροπία σε μια γωνία θα είναι

επίσης στην ισορροπία σε μια άλλη γωνία, η οποία είναι παρόμοια με αυτό που λήφθηκε για το οριζόντιο σεισμόμετρο garden-gate.

Η δύναμη F_g βαρύτητας που ενεργεί στη μάζα στην κατεύθυνση της περιστροφής μπορεί να γραφτεί ως

$$F_g = mg \cos(\alpha) \quad (\text{Εξίσωση 2.34})$$

ενώ το ελατήριο που αποκαθιστά τη δύναμη F_s που ενεργεί στην αντίθετη κατεύθυνση είναι

$$F_s = kL \cos(\lambda) \quad (\text{Εξίσωση 2.35})$$

Για να αντικαταστήσουμε το λ με α μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το νόμο των ημιτόνων

$$\frac{L}{\sin(90 - \alpha)} = \frac{y}{\sin(90 - \lambda)} \quad (\text{Εξίσωση 2.36})$$

Εξίσωνοντας τα F_s και F_g και τις εκφράσεις για $\cos(\lambda)$ παίρνουμε

$$ky = mg \quad \text{ή} \quad y = mg/k \quad (\text{Εξίσωση 2.37})$$

Όσο ισχύει η εξ.2.37, η δύναμη επαναφοράς είναι μηδέν ανεξάρτητα από τη γωνία. Όμως, όπως συνέβη και με το σεισμόμετρο garden-gate, στην πράξη δεν μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για περιόδους μεγαλύτερες των 30s.

2.9 Παράμετροι σεισμικών αισθητήρων

Οι πιο κοινοί σεισμικοί αισθητήρες έχουν περιγραφεί μέχρι τώρα. Η αγορά έχει μια μεγάλη σειρά αισθητήρων με μια σειρά προδιαγραφών και τιμών και μπορεί μερικές φορές να είναι δύσκολο να γίνει η καλύτερη επιλογή, ιδιαίτερα δεδομένου ότι ο αισθητήρας μπόρεσε να είναι το ακριβότερο μέρος ενός σεισμικού σταθμού. Η βασική επιλογή θα εξαρτηθεί φυσικά από αυτό που ο αισθητήρας πρόκειται να καταγράψει, σημαίνοντας στις περισσότερες περιπτώσεις τη ζώνη συχνότητας. Εντούτοις, εκτός από τη ζώνη συχνότητας αισθητήρων, υπάρχουν πολλές άλλες παράμετροι περιγράφοντας έναν αισθητήρα και σε αυτό το τμήμα θα εξετάσουμε το δυαδικό ψηφίο σε εκείνες τις παραμέτρους.

2.9.1 Η αποκριση συχνότητας

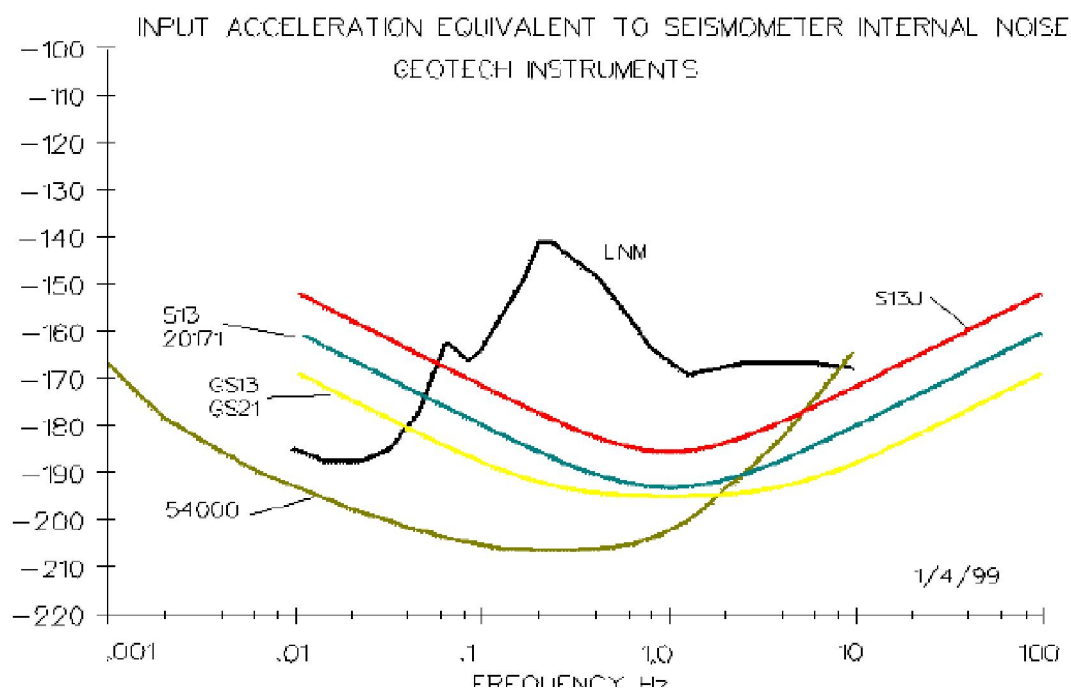
Οι περισσότεροι αισθητήρες σχεδιάζονται για να έχουν μια επίπεδη αποκριση ταχύτητας ή επιτάχυνσης μέσα σε μια δεδομένη ζώνη συχνότητας ακόμη και για τους ενεργούς αισθητήρες. Η αποκριση συχνότητας στο χαμηλό όριο μπορεί να περιγραφεί

με τη συνηθισμένη λειτουργία αποκρίσης σεισμομέτρων. Το βασικό ζητούμενο είναι ότι η δυναμική περιοχή και η ευαισθησία να μην είναι εξαρτώμενα από τη συχνότητα έτσι ώστε ο αισθητήρας να έχει τις καλύτερες προδιαγραφές σε μια στενότερη ζώνη συχνότητας.

2.9.2 Ευαισθησία

Ο όρος ευαισθησία μπορεί να γίνει κατανοητός με δύο τρόπους. Σε μερικές περιπτώσεις, η ευαισθησία δίνεται ως κέρδος του οργάνου όπως π.χ. 1000 V/ms^{-1} . Εντούτοις, αυτός ο αριθμός δεν μας λέει τίποτα το σημαντικό για το μικρότερο γήινο σήμα που μπορούμε να καταγράψουμε. Από εδώ και στο εξής με τον όρο ευαισθησία σεισμομέτρου θα εννοούμε την ιδιότητα εκείνη που μας αποδίδει ως έκφραση την τιμή του μικρότερου σήμα που μπορεί να καταγραφεί. Αυτό περιορίζεται σήμερα από το θόρυβο που παράγεται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα (στον αισθητήρα ή το όργανο καταγραφής), ενώ παλαιότερα, το κέρδος στους ενισχυτές ήταν ο περιοριστικός παράγοντας. Έτσι ένα σεισμόμετρο με την υψηλή σταθερά γεννήτρια θα σήμαινε επίσης πιο ευαίσθητο σειсмоγράφο.

Ιδανικά, ένας αισθητήρας πρέπει να είναι σε θέση να καταγράψει την εδαφική κίνηση στη βασική ζώνη συχνότητάς του με άλλα λόγια, ο θόρυβος πρέπει να είναι χαμηλότερος από ένα αποδεκτό κατώφλι. Το κατώφλι αυτό ονομάζεται NLNM (New Low Noise model). Αυτό είναι μόνο η περίπτωση με τους πολύ καλύτερους αισθητήρες, εντούτοις πολλοί κοινοί αισθητήρες, ιδιαίτερα παθητικοί, παίρνουν τιμές κάτω από το NLNM σε κάποιο μέρος της ζώνης συχνότητάς τους. Ο καλύτερος τρόπος καθορισμού της ευαισθησίας είναι να δίδεται με τον αισθητήρα, η φασματική καμπύλη ισοδύναμου θόρυβου. Το σχήμα 2.19 εμφανίζει ένα παράδειγμα του επιπέδου θορύβου αισθητήρων.



Σχήμα 2.19 Ευαισθησία οργάνων διάφορων σεισμομέτρων Geotech που κυμαίνεται από τη μικρή χρονική περίοδο 13s ως την πολύ ευρεία ζώνη 54000s. Οι καμπύλες εμφανίζουν επιτάχυνση εισόδου ισοδύναμη με τον εσωτερικό θόρυβο αισθητήρων. (Haskon, 2002)

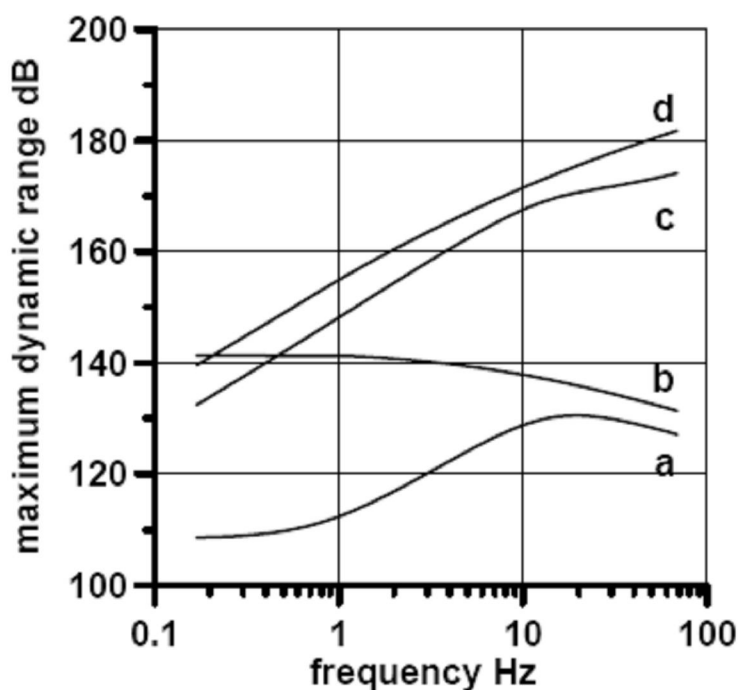
Σε πολλές περιπτώσεις η ισοδύναμη καμπύλη θορύβου δεν είναι διαθέσιμη και δίνονται άλλες παράμετροι. Αυτές θα μπορούσαν να είναι η ηλεκτρονική έξοδος θορύβου ή η ισοδύναμη εδαφική κίνηση.

Μερικοί παθητικοί αισθητήρες μπορούν να παρασχεθούν με διαφορετικά πηνία σημάτων. Ιδανικά, όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά γεννητριας, τόσο καλύτερη η ευαισθησία. Εντούτοις, για ένα δεδομένο μηχανικό σχέδιο, το διαθέσιμο διάστημα για το πηνίο καθορίζεται, και ένας μεγαλύτερος αριθμός στροφών περισσότερου μήκους - πρέπει να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας έναν μικρότερο πάχος καλωδίων περιέλιξης. Αυτό αυξάνει την αντίσταση καθλως επίσης και τον ενδογενή θόρυβο (θόρυβος Johnson και η επιρροή του παρόντος θορύβου από τον ενισχυτή). Οι Reidesel et.al (1990) έχουν δείξει ότι για έναν δεδομένο τύπο μεγέθους και καλωδίων πηνίων, η αντίσταση πηνίων είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο του τμήματος καλωδίων, ενώ η σταθερά γεννητριών είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τμήμα αυτό. Κατά συνέπεια, η σταθερά γεννητριών αυξάνεται ως τετραγωνική ρίζα της αντίστασης πηνίων. Εάν ένα όργανο καταγραφής ή ένας προενισχυτής με το χαμηλό παρόντα θόρυβο χρησιμοποιείται, μια μεγαλύτερη αντίσταση πηνίων μπορεί

να είναι ευνοϊκή, αλλά όχι στην περίπτωση ενός ενισχυτή με το θόρυβο χαμηλής τάσης και κάπως μεγαλύτερο ενδογενή θόρυβο.

2.9.3 Δυναμική περιοχή αισθητήρων

Η δυναμική περιοχή είναι η αναλογία μεταξύ του μεγαλύτερου και μικρότερου σήματος που ο αισθητήρας μπορεί να καταγράψει. Ιδανικά αυτό πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 200db, αλλά δεδομένου ότι κανένα σεισμικό όργανο καταγραφής (που διαβάζεται ψηφιακά) δεν μπορεί να χειριστεί περισσότερα από 155db και τα περισσότερα είναι κάτω από 130db, δεν υπάρχει προφανώς κανένα σημείο ακόμη και να προσπαθήσει. Τι θα έπρεπε να αναμείνουμε; Εάν χρησιμοποιούμε έναν πρότυπο αισθητήρα 1Hz, αυτός μπορεί εύκολα να καταγράψει μια μετατόπιση 0.1nm σε 1Hz. Υποθέτοντας μια σταθερά γεννήτριας 300V/ms^{-1} , αυτό θα έδινε μια έξοδο $0.1 * 2 * \pi * 300\text{nV} = 188\text{nV}$, το οποίο είναι μία τιμή που πολύ εύκολα μπορούν να διαχειριστούν οι μοντέρνοι ψηφιοποιητές. Μηχανικά, το μεγαλύτερο πλάτος θα μπορούσε να καταγραφεί είναι περίπου 10mm συνεπώς ο αισθητήρας θα έπρεπε να έχει μία δυναμική περιοχή $10\text{mm}/0.1\text{nm} = 10^8 = 160\text{db}$. Αυτός ο αριθμός θα ήταν εξαρτώμενος από τη συχνότητα δεδομένου ότι η αποκρίση μετατόπισης των αισθητήρων είναι εξαρτώμενη από τη συχνότητα (σχήμα 2.20). Στα 0.1Hz, μια 1000 φορές μεγαλύτερη μετατόπιση απαιτείται για να παραγάγει την ίδια έξοδο τάσης (188 nV), έτσι η δυναμική περιοχή θα ήταν 1000 φορές μικρότερη (ψηφιακά), ενώ σε 10Hz, μόνο ένα 1/10 της μετατόπισης απαιτείται για να παραγάγει την ίδια έξοδο τάσης έτσι η δυναμική περιοχή θα ήταν 10 φορές μεγαλύτερη. Οι καλύτεροι ενεργοί αισθητήρες έχουν τη δυναμική περιοχή >150db, ενώ η πλειοψηφία τέτοιων αισθητήρων βρίσκεται στη σειρά 120-140db. Οι τιμές αυτές της δυναμικής περιοχής προσαρμόζονται πολύ καλά στη δυναμική περιοχή ενός τυπικού ψηφιοποιητή 24bit.



σχήμα 2.20. Εξαρτώμενη δυναμική περιοχή συχνότητας λόγω μηχανικών ή ηλεκτρονικών περιορισμούς. Για τους μηχανικούς περιορισμούς, η δυναμική περιοχή υπολογίζεται από την αναλογία της εξόδου για τη μηχανικά μεγαλύτερη κίνηση και το θόρυβο εισόδου του ενισχυτή. Για τον ηλεκτρονικό περιορισμό, η δυναμική περιοχή υπολογίζεται ως αναλογία της μεγαλύτερης ηλεκτρικής εξόδου του ενισχυτή και της ηλεκτρικής εξόδου θορύβου του ενισχυτή. (Haskov, 2002)

2.9.4 Γραμμικότητα αισθητήρων

Ιδανικά θα επιθυμούσαμε τον αισθητήρα για να συμπεριφέρεται ως γραμμικό σύστημα έτσι ώστε εάν π.χ. σε διπλή είσοδος, η έξοδος να διπλασιαστεί επίσης. Αυτό είναι όπου οι παθητικοί αισθητήρες έχουν μια αδυναμία δεδομένου ότι είναι δύσκολο να γίνουν τα ελατήρια που συμπεριφέρονται γραμμικά. Οι ενεργοί αισθητήρες είναι πιο γραμμικοί από τους ενεργητικούς αισθητήρες δεδομένου ότι η μάζα κινείται μετά βίας. Ένας καλός αισθητήρας πρέπει να έχει μια γραμμικότητα καλύτερα από 1 %. Γραμμικότητας προσδιορίζεται όχι πάντα έτσι είναι δύσκολο να συγκριθούν οι αισθητήρες.

2.9.5 Διαγώνια ευαισθησία αισθητήρων

Όταν 3 αισθητήρες επικολλιούνται μαζί, θα υπάρξει συχνά κάποια ενδοπαραμόρφωση (διαγώνια), που σημαίνει ότι π.χ. ένα μεγάλο εύρος στη Z-

κατεύθυνση, θα δώσει επίσης ένα μικρό σήμα στις οριζόντιες συνιστώσες. Η διαγώνια ευαισθησία άξονα πρέπει να είναι χαρακτηριστικά λιγότερο από 2 %.

2.9.6 Κέρδος και έξοδος αισθητήρων

Το κέρδος δίνεται με τη σταθερά γεννητριών. Για τους αισθητήρες ταχύτητας δίνεται σε V/ms^{-1} , ενώ για τα επιταχύνσιόμετρα, δίνεται παραδοσιακά σε V/g . Παλαιότερα, ένα υψηλό κέρδος ήταν ένα πλεονέκτημα, αυτό δεν είναι πλέον τόσο σημαντικό, δεδομένου ότι τα όργανα καταγραφής έχουν συνήθως ικανοποιητική ευαισθησία. Αυτό που είναι σημαντικότερο είναι ότι η μέγιστη έξοδος έχει προσαρμοζόμενο κατώφλι ευαισθησίας έτσι ώστε να βρίσκεται σε συμφωνία με την δυναμική περιοχή του αισθητήρα που χρησιμοποιείται.

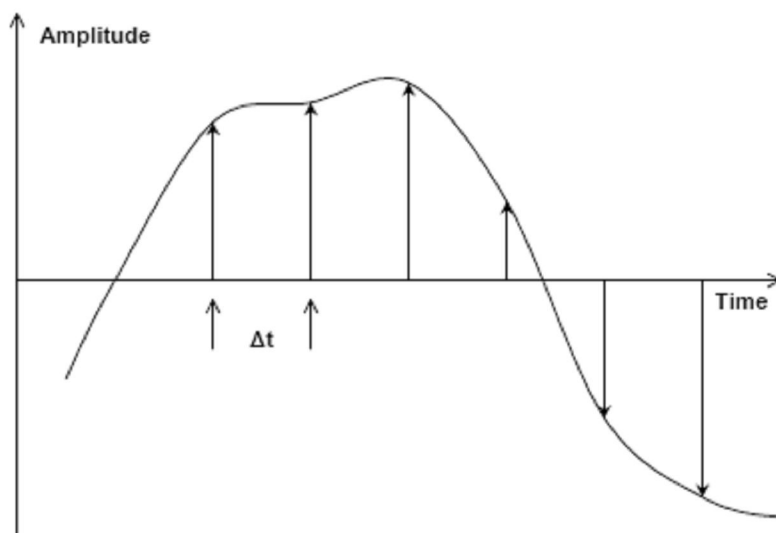
2.10 Περίληψη κεφαλαίου

Στον κεφαλαίο αυτό παρουσιάστηκαν οι βασικές θεωρητικές που διέπουν τη λειτουργία των σεισμικών αισθητήρων. Ειδικότερα, πέρα από την παρουσίαση της απλής αρχής λειτουργίας των, παρουσιάστηκαν οι εξισώσεις που το περιγράφουν, διερευνήθηκαν ως προς τις τυπικές τιμές λειτουργίας και εξάχθηκαν οι βασικές σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία τους σε πραγματικές συνθήκες. Επιπρόσθετα αναφέρθηκαν βασικοί τύποι αισθητήρων και παρουσιάστηκαν οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις ιδιότητες ενός τέτοιου αισθητήρα

3 Στοιχεία σεισμολογικών ψηφιοποιητών

3.1 Εισαγωγή

Οι αισθητήρες που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, τελικά, παράγουν μία αναλογική τάση η οποία απεικονίζει την μετρούμενη εδαφική ποσότητα (ταχύτητα, επιτάχυνση κ.λ.π). Η χρησιμότητα αυτής της πληροφορίας ολοκληρώνεται αν μπορέσουμε να την επεξεργαστούμε στα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα, που ως γνωστόν είναι ψηφιακές συσκευές. Είναι λοιπόν κατι παραπάνω από απαραίτητο να γίνει μετατροπή του αναλογικού σήματος εξόδου του σεισμομέτρου, σε ψηφιακό, με χρήση κατάλληλων συσκευών που ονομάζονται μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό (ADC). Η διαδικασία μετατροπής περιλαμβάνει δύο βήματα, αρχικά το σήμα δειγματοληπτείται σε διακριτούς χρόνους και στη συνέχεια σε κάθε δείγμα αντιστοιχίζεται αριθμός (σχήμα 3.1) Η διαδικασία αυτή εισάγει κάποια λάθη και περιορίζει έτσι το πλήθος της πληροφορίας που μπορούμε να απεικονίσουμε. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πληροφορία μεταξύ δύο διαδοχικών διακριτών τιμών χάνεται.



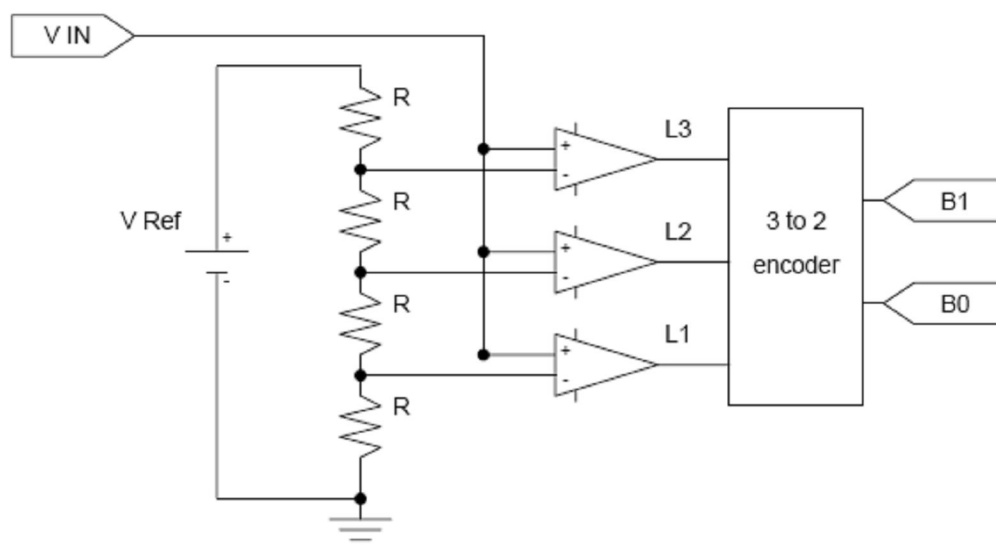
Σχήμα 3.1 Η μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Τα βέλη δίδουν τις χρονικές στιγμές που δειγματοληπτείται το αναλογικό σήμα.

Τα λάθη που δημιουργούνται ονομάζονται *λάθη κβαντισμού* και επιφέρουν αλλοιώσεις τόσο στο πλάτος όσο και στη συχνότητα του δειγματοληπτούμενου σήματος. Προφανώς η καλύτερη ADC μετατροπή είναι αυτή που ελαχιστοποιεί αυτά τα λάθη.

Για να γίνει κατανοητό πώς αντιστοιχίζεται ένα αναλογικό σήμα σε έναν αριθμό, έχουμε το παρακάτω παράδειγμα: ένας μετατροπέας ADC θα δώσει στην έξοδο έναν δυαδικό αριθμό που θα αντιπροσωπεύει μία τάση εισόδου. Στους Η/Υ, οι αριθμοί απεκονίζονται από λέξεις των 2bytes ή των 4bytes. Αυτό το μήκος των λέξεων μας δίνει 2^{16} ή 2^{32} πιθανές διαφορετικές τιμές. Επειδή όμως οι αριθμοί έχουν και πρόσημο (αρα δεσμευουμε ένα Bit για αυτό) οι πιθανές διαφορετικές τιμές θα είναι 2^{15} ή 2^{31} αντίστοιχα. Για σεισμολογικές εφαρμογές, τα καλύτερα ADC σήμερα δίδουν μία ανάλυση $0,1\mu\text{V}$.

3.2 Ο βασικός μετατροπέας: Flash ADC

Ο απλούστερος και βασικότερος ADC είναι το flash ADC (σχήμα 3.2)



Σχήμα 3.2. Το Flash ADC. V_{in} είναι η αναλογική τάση που θα ψηφιοποιηθεί, V_{ref} είναι η τάση αναφοράς, R είναι αντιστάσεις ίδιας τιμής, $L1 \dots L3$ είναι συγκριτές τάσης, $B1 - B0$ είναι τα bit εξόδου (2bit).

Η τάση αναφοράς δημιουργεί, διαμέσου των διαιρετών τάσης, τρεις τάσεις αναφοράς, οι οποίες είναι εισοδοι στην ανεστραμμένη είσοδο του κάθε συγκριτή. Αν η τάση εισόδου είναι μηδέν τότε όλοι οι συγκριτές είναι off και δίδουν μηδεν στην έξοδο τους. Αν η τάση εισόδου αυξηθεί σε $V_{ref} / 4$, τότε ο πρώτος συγκριτής τίθεται σε κατάσταση On. Αν συνεχίσει να αυξάνεται (με το ίδιο βήμα) η V_{in} τότε και οι υπόλοιποι συγκριτές θα τεθούν σε κατάσταση on. Οι πιθανές καταστάσεις των συγκριτών καθώς και τα bit εξόδου δίδονται στον πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1. Εισοδος και εξοδος σε flash ADC

V input	V center	V input to ADC	ADC out	Output code
-3/8 to -1/8	-0.25	0.00 to 0.25	0	11 (-1)
-1/8 to +1/8	0	0.25 to 0.5	1	00 (0)
+1/8 to +3/8	0.25	0.5 to 0.75	2	01 (1)
+3/8 to +5/8	0.5	0.75 to 1	3	10 (2)

Οι μετατροπείς ADC μπορούν να γίνουν πολύ ακριβοί σε κόστος αν απαιτείται υψηλή ανάλυση καθ' ότι χρειάζεται ένας συγκριτής για κάθε διακριτή τιμή. Για τον λόγο αυτό δεν χρησιμοποιούνται στις σεισμολογικές εφαρμογές και η παρουσίαση τους εδώ έχει τον σκοπό της επίδειξης της βασικής λειτουργίας μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.

3.3 Βασικά χαρακτηριστικά ADC

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των ADC μετατροπέων

- *Resolution (ανάλυση).*

Είναι το ελάχιστο βήμα τάσης το οποίο μπορεί να αναλυθεί Στο προηγούμενο παράδειγμα η ανάλυση ήταν 0.25V που αντιστοιχεί σε μία αλλαγή στο *λιγοτερο σημαντικό ψηφίο* LSB. Για έναν πολύ καλο ADC η τιμή αυτή δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.1i V. Δεν είναι όμως σπάνια η περίπτωση που ο ενδογενής θόρυβος των ADC είναι μεγαλύτερος από ένα ψηφίο. Π.χ. ADC με ανάλυση 0.1i V παρουσιάζει ενδογενή θόρυβο της τάξης 0.25μV. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αναλογικά σήματα σταθμής χαμηλότερης των 0.25μV δεν μπορούν να μετατραπού σε ψηφιακά, με αξιοπιστία. Έτσι η πραγματική ανάλυση του συγκεκριμένου ADC είναι μικρότερη από την ονομαστική

- *Απολαβή (gain)*

Δηλώνει την ευαισθησία εκφρασμένη σε counts/V. Είναι δυνατόν να υπολογιστεί από την ανάλυση. Π.χ. αν η ανάλυση είναι 10μV τότε η απολαβή θα είναι $1\text{count}/10\text{i V} = 1\text{count}/10^{-5}\text{V} = 10^5\text{counts/V}$

- *Ρυθμός δειγματοληψίας (sampling rate)*

Ο αριθμός των δειγμάτων που λαμβανονται ανα δευτερόλεπτο. Τυπικές τιμές στα σεισμολογικά όργανα είναι απο 1 έως 200Hz. Οσο αυξάνεται ο ρυθμός δειγματοληψίας τόσο μειώνονται οι επιδόσεις του ADC.

- *Μέγιστη είσοδος ή πλήρης κλίμακα (FS).*

Η μέγιστη είσοδος για έναν ADC. Αν εφαρμοστεί στην είσοδο αναλογικό σήμα μεγαλύτερης στάθμης η έξοδος θα παραμείνει αμετάβλητη. Τυπικές τιμές είναι $\pm 1V$ έως $\pm 30V$.

- *Δυναμική περιοχή (dynamic range)*

Ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής που μπορεί ο ADC να δώσει. Για το ανωτέρω ADC η δυναμική περιοχή είναι $4/1=4$ ή σε db, $20\log(4)=12db$. Αυτή η παραδοχή πιθανόν να δημιουργήσει κάποια σύγχυση εφόσον το σήμα εισόδου μπορεί να έχει τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές αρα θα λειτουργεί σε διπολική μορφή. Συνεπώς η δυναμική περιοχή στην πράξη είναι η μιση από αυτή που υπολογίστηκε πριν. Σημειώνουμε ότι ως ελάχιστη τιμή πρέπει να λαμβάνουμε την τιμή της ανάλυσης μόνο αν η σταθμη ενδογενους θορύβου είναι χαμηλότερη από αυτή (οπως έχει εξηγηθεί προηγουμενως).

- *Επίπεδο θορύβου*

Μετράται σε counts και μας δείχνει την τιμή που παράγει το ADC (λανθασμενα) όταν η είσοδος είναι μηδεν. Τα σημερινα συστήματα 24bit έχουν επίπεδο θορύβου όχι μεγαλύτερο από 2 counts

- *Λάθος μετατόπισης (offset error)*

Είναι το λάθος που οφείλεται στην υπέρθεση μιας dc τάσης στην τάση εισόδου του ADC

- *Χρόνος μετατροπής (conversion time)*

Είναι ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί μία μετατροπή. Συνήθως εκφράζεται από τη συχνότητα δειγματοληψίας. Λόγω του πεπερασμένου χρόνου που απαιτεί μία μετατροπή πολλοι ADC περιλαμβάνουν ένα κύκλωμα *συγκράτησης* το οποίο συγκρατεί το δείγμα του αναλογικού σήματος μέχρι να ολοκληρωθεί η μετατροπή. Αυτό το στάδιο δεν είναι απαραίτητο στους μετατροπείς Σ-Δ (που θα αναφερθούν παρακάτω)

- *Παραδιαφωνία (cross-talk)*

Αν ένας μετατροπές έχει παραπάνω από ένα κανάλια εισόδουμ ένα αναλογικό σήμα που μετατρέπεται στο ενα κανάλι μπορεί να επηρεασει το σήμα που μεταατρέπεται στο αλλο κανάλι. Στη θεωρία, αυτο δεν συμβαίνει, αλλά στην πράξηείναι ένα υπαρκτο φαινόμενο, ιδιαίτερα σε ισχυρά σήματα εισόδου. Η παράμετρος αυτή μετράται σε db, που μας δείνχει ποσο το ένα κανάλι επρρεάζεται

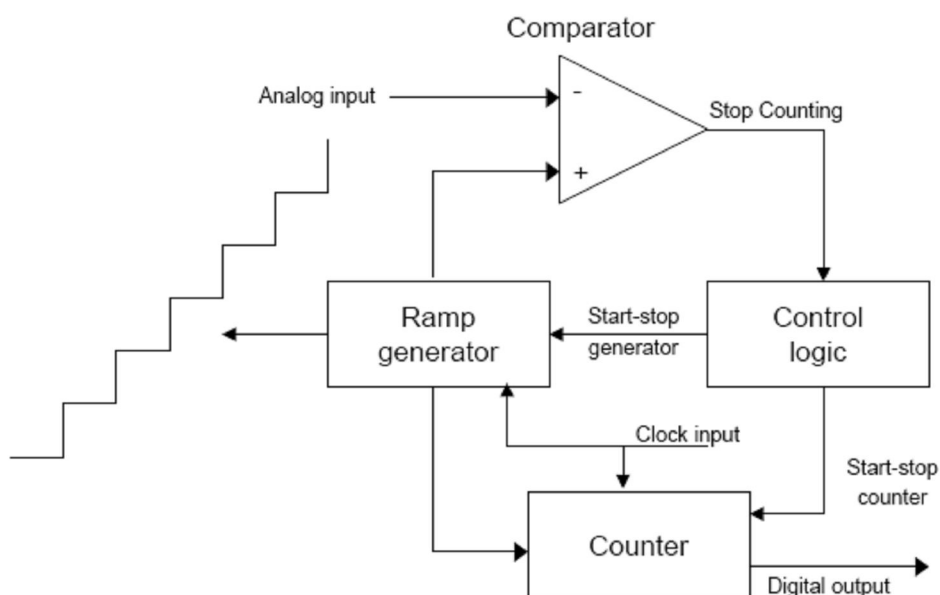
από το άλλο. Μια τυπική τιμή είναι τα 80db ή 10000. Αυτό σημαίνει ότι αν στο ένα κανάλι υπάρχει σήμα με μέγιστο $\pm 2^{23}$ counts, στο δεύτερο κανάλι θα εμφανιστεί (λόγω παραδιαφωνίας) ένα σήμα $\pm 2^{23}$ counts/10000 = 839 counts το οποίο δεν είναι καθόλου αμελητέα ποσότητα. Η λύση είναι να χρησιμοποιούμε ADC με ένα μόνο κανάλι. Έτσι, αν χρειάζονται τρία κανάλια εισόδου, να χρησιμοποιούνται τρία ADC.

- *Μετατόπιση (offset)*

Αν η είσοδος είναι μηδέν, η μετατόπιση της DC συνιστώσας πρέπει να είναι μηδέν. Στην πράξη όμως δεν συμβαίνει αυτό λόγω των ανοχών που υπάρχουν στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Τα σημερινά ADC έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίσουν την μετατόπιση με μεταβολή της τάσης αναφοράς. Η μετατόπιση περιορίζει την δυναμική περιοχή του ADC πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το μέγιστο ένα σήμα θα φθάσει στη μέγιστη τιμή για χαμηλότερη τιμή εισόδου. Η μετατόπιση επηρεάζεται άμεσα από τη θερμοκρασία καθότι οι ανοχές των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενες.. Τυπικές τιμές είναι $1\text{ mV}/^\circ\text{C}$.

3.4 ADC τύπου «ραμπας»

Το flash ADC που είδαμε προηγούμενως αποτελεί την απλούστερη μορφή ADC. Στην πράξη σήμερα συναντούμε άλλους τύπους ADC, όπως το ramp ADC. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζουμε ένα απλοποιημένο διάγραμμα αυτού.



Σχήμα 3.3 Ramp ADC

Η διαδικασία μετατροπής του αναλογικού σήματος είναι η εξής : αρχικά στέλνεται ένα σήμα στη γεννήτρια ράμπας (ramp generator) η γεννήτρια παράγει ένα σήμα τύπου ράμπας ξεκινώντας από τάση μηδεν (όπως φαίνεται στα αριστερά του σχήματος 3.3). Το σήμα αυτό εισέρχεται στον συγκριτή (comparator) και εκεί συγκρίνεται με το αναλόγικό σήμα εισόδου. Για κάποια τιμή, το σήμα ράμπας είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το αναλογικό σήμα εισόδου οπότε η έξοδος του συγκριτή γίνεται 1. Καθ'ολη τη διάρκεια της σύγκρισης ο μετρητής (counter) μετρούσε τα βήματα που έκανε το σήμα ράμπας και έτσι, τη στιγμή που ο συγκριτής γίνεται 1, ένα σήμα στέλνεται στον μετρητή να σταματήσει. Η έξοδος του μετρητή εκείνη τη χρονική στιγμή είναι η ψηφιακή τιμή που αντιστοιχεί στο σήμα εισόδου. Μετά από αυτό, ο μετρητής μηδενίζεται και ξαναρχίζει η διαδικασία για το επόμενο δείγμα.

Ο ADC ράμπας είναι γενικά αργός και γίνεται πιο αργός αν απαιτείται υψηλή ανάλυση διότι τα βήματα της τάσης ράμπας αυξάνονται επίσης. Μία βελτίωση που μπορεί να επέλθει είναι η μετατροπή του κυκλώματος της γεννήτριας με ένα κύκλωμα που ονομάζεται «επιτυχούς προσέγγισης» Με το κύκλωμα αυτό δεν συγκρίνονται όλες οι τιμές του σήματος ράμπας διαδοχικά, αλλά μόνο μερικές ενδεικτικές (1/2, 1/4, 1/8, 1/16 κ.λπ) και αφού βρεθεί το διάστημα που βρίσκεται το σήμα εισόδου τότε προβαίνει σε ποιο λεπτομερείς προσεγγίσεις. Τυπική εφαρμογή αυτών των ADC γίνεται στα ψηφιακά πολύμετρα όπου περιλαμβάνουν φθηνούς 12bit μετατροπείς (για το λόγο αυτό οι κλίμακες είναι από 0 έως 2000 και όχι μέχρι 10000, διότι $2^{12}=2048$)

3.5 Η ανάγκη για υψηλότερη δυναμική περιοχή

3.5.1 ADC έως 16bit

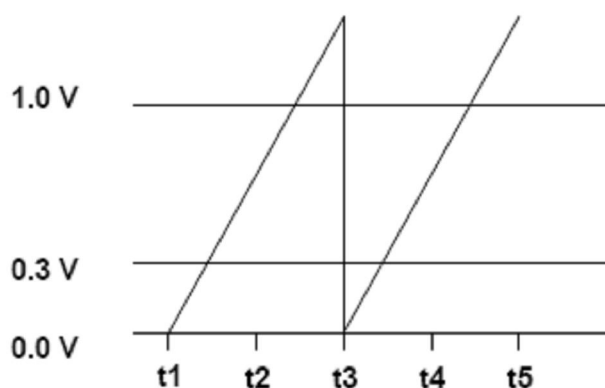
Στα ADC που είδαμε μέχρι τώρα η δυναμική περιοχή περιοριζόταν στα 16bit. Η τιμή αυτή δεν είναι καθόλου αποδεκτή για σεισμολογικές καταγραφές. Π.χ. για ένα σεισμολογικό δίκτυο που καταγράφει τοπικούς σεισμούς, ένας σεισμός με μέγεθος 2 σε απόσταση 100km θα καταγραφεί με 200counts. Για το ίδιο δίκτυο και για την ίδια απόσταση ο μεγαλύτερος σεισμός για έναν 16bit ADC θα ήταν 164 φορές μεγαλύτερος (32768 / 200). Γνωρίζοντας ότι το μέγεθος αυξάνεται με το λογάριθμο του πλάτους, το μέγιστο πλάτος που θα μπορούσε να καταγραφεί θα ήταν $2.0 + \log(164) = 4.2$. Αντίστοιχοι υπολογισμοί για 12bit ADC μας δίνουν ότι ο μέγιστος σεισμός που θα μπορούσε να καταγραφεί θα ήταν μεγέθους 3.0. Προφανώς

και οι δύο αυτές περιπτώσεις αποδεικνύουν την ανεπαρκεία της δυναμικής περιοχής των ADC που εξετάσαμε μέχρι τώρα (έως 16bit).

3.5.2 Βελτίωση της δυναμικής περιοχής με υπερδειματοληψία

Η μέθοδος της υπερδειματοληψίας για τη βελτίωση της δυναμικής περιοχής ενός ADC συνίσταται στην δειματοληψία του σήματος με ρυθμό υψηλότερο από αυτόν που απαιτείται, φιλτράρισμα υψηλών συχνοτήτων και επαναδειματοληψία σε χαμηλότερη συχνότητα. Ποιοτικά, αυτό που συμβαίνει είναι ότι τα λάθη κβαντισμού των ανεξάρτητων δειγμάτων στο υπερδειματοληπτούμενο σήμα εξομαλύνονται με τα λάθη των γειτονικών δειγμάτων λόγω της χρήσης του φίλτρου.

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η λειτουργία ακολουθεί ένα παραδειγμα. Το σχήμα 3.4 αναφέρεται σε ένα ADC του οποίου το πρώτο επίπεδο είναι στα 0.0V και το δεύτερο επίπεδο στα 1.1V.



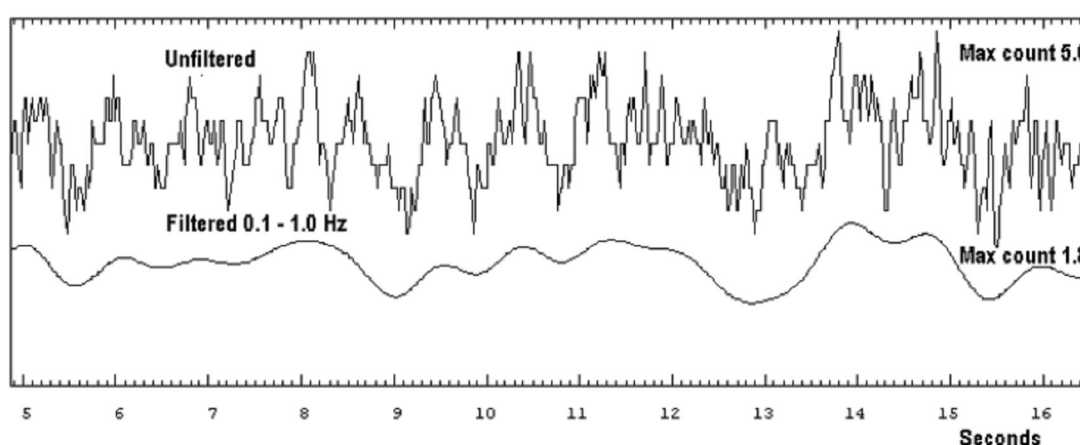
Σχήμα 3.4 Αυξηση δυναμικής περιοχής με παρουσία θορύβου

Το αναλογικό σήμα δειματοληπτείται τις χρονικές στιγμές $t1$ και $t2$. Αν το σήμα εισόδου είναι ένα DC με τιμή 0.3V τότε η έξοδος του ADC θα είναι πάντα μηδεν. Αν όμως το σήμα εισόδου είναι πριονωτής μορφής τότε θα έχουμε μια διαφορετική κατάσταση: Το πριονωτό σήμα θα υπερτεθεί στην DC συνιστώσα και ενώ για τις χρονικές στιγμές $t1$, $t2$ θα δίδει έξοδο μηδέν, την χρονική στιγμή $t3$ η έξοδος θα είναι 1. Η εξομάλυνση με το φίλτρο (για τις χρονικές στιγμές $t1$, $t2$, $t3$) μας δίδει σαν τελικό αποτέλεσμα 0.33counts, μία τιμή η οποία είναι σαφώς πιο κοντά στο πραγματικό σήμα εισόδου αρα έχουμε καλύτερη προσέγγιση του αναλογικού σήματος εισόδου. Τελικά αυτό που καταφέρνει η προσέγγιση αυτή είναι ότι αντι για ένα λάθος $\pm 0.5V$ έχουμε τελικά ένα λάθος $\pm 0.5V / \sqrt{3} = \pm 0,29V$ αρα αυξήθηκε η δυναμική περιοχή κατά $\sqrt{3}$ φορές. Η τετραγωνική ρίζα προκύπτει από την υπόθεση

ότι το λάθος στην εξομαλυνση μειώνεται ανάλογα με τη τετραγωνική ρίζα του αριθμού των δειγμάτων που εξομαλύνονται (εδώ 3).

Επιπρόσθετα, αν επιθυμούμε περαιτέρω βελτίωση, μπορούμε να κάνουμε μία εκτίμησ της στάθμης του σήματος, ακόμα και αν έχει τιμές χαμηλότερες του LSB. Η τιμή 0.33 θα είναι ότι καλύτερο μπορούμε να πετύχουμε σε αυτή την περίπτωση. Αν συνεχιζόταν η εξομάλυνση θα είχαμε κάποια βελτίωση αλλά όχι δραματική, π.χ. αν μεταξύ των $t1$ και $t2$ δειγματοληπτούσαμε 10 δείγματα, τότε η εξομάλυνση θα μας έδινε τιμή 0.30 και το λάθος θα ήταν $\pm 0.5V / \sqrt{10} = \pm 0,16 \text{ counts}$.

Ως ολοκληρωμένο παράδειγμα μπορούμε να δούμε την ψηφιακή καταγραφή σεισμικού θορύβου, στο σχήμα 3.5

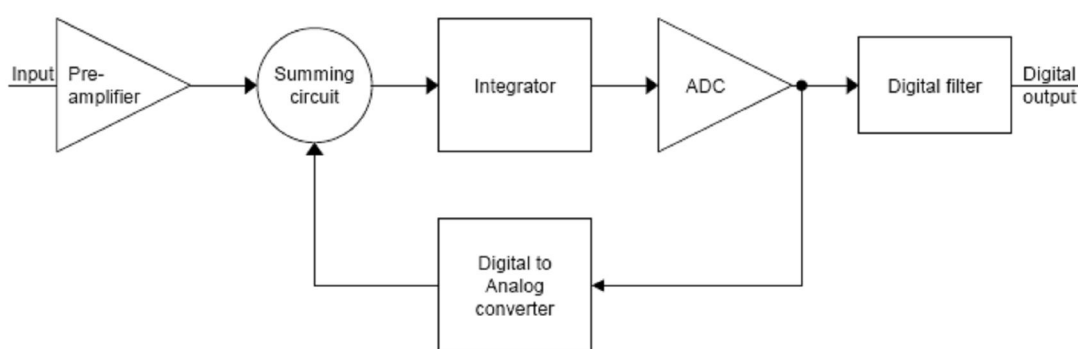


Σχήμα 3.5 Αφιλτράριστη (ανω) και φιλτραρισμένη (κατω) καταγραφή σεισμικού θορύβου. Η καταγραφή έγινε με ADC 16bit, 50HZ sampling rate

Η ανω κυματομορφή απεικονίζει την αφιλτράριστη καταγραφή η οποία έχει μέγιστο πλάτος ίσο με 5 counts. Επίσης είναι ευδιακριτό ένα χαμηλής συχνότητας σήμα που έχει υπερτεθεί και στην ουσία διαμορφώνει τον καταγραφόμενο σεισμικό θόρυβο. Η κάτω κυματομορφή (που προκύπτει μετά το φιλτράρισμα) μας παρουσιάζει το χαμηλής συχνότητας σήμα με μεγάλη ακρίβεια (έχει περίοδο γύρω στα 3s). Τώρα το μέγιστο πλάτος έχει μειωθεί στα 1.8counts και η ανάλυση είναι προφανώς καλύτερη. Με βάση τους θεωρητικούς υπολογισμούς που προαναφέραμε η αναμενόμενη βελτιστοποίηση θα ήταν της τάξης του $1/\sqrt{50} = 0,14 \text{ counts}$, για το φιλτραρισμένο σήμα κάτω του 1HZ' γεγονός που δεν φαίνεται απίθανο με βας τα όσα απεικονίζονται στο σχήμα 3.5. Το παράδειγμα αυτό είναι μία χαρακτηριστική περίπτωση αύξησης της δυναμικής περιοχής (κάτω του 1HZ) με χρήση υπερδειγματολήψιας για έναν μετατροπέα ADC 16bit.

3.6 Σιγμα – Δελτα (ΣΔ) μετατροπέας

Όλα οι μετατροπείς ADC που είδαμε μέχρι τώρα, ψηφιοποιούν το σήμα σε βήματα, έτσι ακόμα και σε υψηλότερη ανάλυση, θα υπάρχει ένα άθος κβαντισμού. Η βασική ιδέα πίσω από έναν μετατροπέα ΣΔ είναι να ψηφιοποιήσει το αναλογικό σήμα σε χαμηλή ανάλυση (προκειμένου να λάβει μία προσέγγιση του αναλογικού σήματος), να προσθέσει το λάθος κβαντισμού στο αρχικό σήμα, να προχωρήσει σε νέα προσέγγιση, να ξαναλάβει το νέο λάθος κβαντισμού, να το ξαναπροσθέσει κ.ο.κ. Η διαδικασία συνεχίζεται επί μακρόν και η πραγματική τιμή του αναλογικού σήματος λαμβάνεται από το μέσο όρο όλων των προηγηθέντων προσεγγίσεων. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να επιτευχθεί υψηλή ανάλυση (σε σχέση με τα συμβατικούς ADC) με μία τεχνική η οποία έχει τις ρίζες της στην υπερδειγματοληψία που αναφέρθηκε προηγουμένως. Επιπροσθετα, επειδή κάνουμε αρχικά προσέγγιση του σήματος δεν χρειάζεται παρά ο εσωτερικός μετατροπέας να έχει ανάλυση 1bit. Το πλήρες δομικό διάγραμμα ενός ΣΔ απεικονίζεται στο σχήμα 3.6



Σχήμα 3.5 ΣΔ μετατροπέας ADC

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η λειτουργία του ΣΔ, θα αναφερουμε ένα παράδειγμα. Θεωρούμε ότι έχουμε έναν ADC με ± 10 επίπεδα τάσης, τα οποία αντιστοιχούν σε $\pm 1V$. Αυτό το ADC είναι λίγο διαφορετικό από τα προηγούμενα παραδείγματα όπου η περιοχή 0-0.09V αντιστοιχούσε σε 1count, από -0.1 έως -0.01 σε -1count κ.ο.κ. Αυτό γίνεται διότι θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε 1bit ADC, ο οποίος έχει τα επίπεδα -1 και 1 για τα αρνητικά και τα θετικά σήματα, αντίστοιχα. Αν εφαρμοστεί λοιπόν, μία DC τάση 0.52V τα διαδοχικά βήματα προσέγγισης που θα κάνει ο ΣΔ φαίνονται στον πίνακα 3.2

Πίνακας 3.2 Είσοδος και εξόδος σε ένα τυπικό ADC. I: α/α κύκλου, Diff.inp: διαφορά μεταξύ εισόδου-εξόδου, Sum: αθροισμα της Diff.inp και του προηγούμενου ψηφιοποιημένου σήματος, DAC out: εξόδος από μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό

I	Diff inp.	Sum	DAC out	Average	
0	0.5200	0.5200	0.6000		
1	-0.0800	0.4400	0.5000	0.5000	
2	0.0200	0.4600	0.5000	0.5000	
3	0.0200	0.4800	0.5000	0.5000	
4	0.0200	0.5000	0.6000	0.5250	
5	-0.0800	0.4200	0.5000	0.5200	exact value
6	0.0200	0.4400	0.5000	0.5167	
7	0.0200	0.4600	0.5000	0.5143	
8	0.0200	0.4800	0.5000	0.5125	
9	0.0200	0.5000	0.6000	0.5222	
10	-0.0800	0.4200	0.5000	0.5200	exact value
11	0.0200	0.4400	0.5000	0.5182	
12	0.0200	0.4600	0.5000	0.5167	
13	0.0200	0.4800	0.5000	0.5154	
14	0.0200	0.5000	0.6000	0.5214	
15	-0.0800	0.4200	0.5000	0.5200	exact value
16	0.0200	0.4400	0.5000	0.5187	
.....					
519	0.0200	0.5005	0.6000	0.5200	
520	-0.0800	0.4205	0.5000	0.5200	
521	0.0200	0.4405	0.5000	0.5200	
522	0.0200	0.4605	0.5000	0.5199	

Στον πρώτο κύκλο (0), θεωρούμε ότι το DAC είναι σβηστό οπότε η τιμή 0.52 αποδίδεται από το DAC ως 0.6V, η οποία χρησιμοποιείται σαν είσοδο για τον κύκλο (1). Εδώ η τιμή 0.6V αφαιρείται από την τάση εισόδου και το λαθος κβαντισμού που προκύπτει, προστίθεται στην προηγούμενη προσέγγιση. Εφόσον το σφάλμα κβαντισμού είναι αρνητικό η νέα διορθωμένη τιμή θα είναι μικρότερη (0.44V). Η ψηφιοποίηση αυτής της τιμής μα δίδει 5 που αντιστοιχεί σε 0.5V, το οποίο είναι και η πρώτη πραγματική προσέγγιση για την τιμή του αναλογικού σήματος. Το νέο λαθος κβαντισμού είναι τώρα 0.02V. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και παρατηρούμε ότι η ακριβής τιμή του αναλογικού σήματος εισόδου βρίσκεται μετά από 5 κύκλους. Οσο αφήνουμε τον ADC να συνεχίζει αυτή η τιμή (0.52V) θα ευρίσκεται μετά από 5 κύκλους. Για το λόγο αυτο η διαδοχή των 5 κύκλων ονομάζεται *κυκλος εργασίας (duty cycle)*.

Η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια με την υπερδειγματοληψία. Συνεχίζοντας να ολοκληρώνουμε το σφάλμα κβαντισμού θα οδηγηθούμε σε ένα φαινόμενο που

απεικονίζεται στον σχημα 3.4, όπου μετράμε πόσες τιμές εξόδου του ADC είναι ανω ή κάτω από μία συγκεκριμένη τιμή. Η λήψη λοιπόν του μέσου όρου, ελαττώνει το σφάλμα κβαντισμού όπως και η υπερδειγματοληψία. Στο παραπάνω παράδειγμα μια ακρίβεια της τάξης του 0.001 απαιτεί 520 δείγματα ενώ μια ακρίβεια της τάξης του 0.0001 απαιτεί 5000 δείγματα. Στην πράξη όμως δεν γίνεται να εφαρμοστεί αυτό. Για το λόγο αυτό μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα ADC χαμηλότερης ανάλυσης και να χρησιμοποιήσουμε όσο το δυνατόν περισσότερη υπερδειγματοληψία. Προφανώς θα χρειαζόμαστε περισσότερα δείγματα αν η ανάλυση του ADC μειώνεται. Έτσι για ένα ADC με ± 2 επίπεδα, η ακρίβεια 0.0001 θα επιτευχθεί μετά από 16000 δείγματα και έναν κύκλο εργασίας με τιμή 25. Αυτό όμως δεν διαφέρει και πολύ από ένα ADC των ± 10 επιπέδων. Το πραγματικό κέρδος το έχουμε αν χρησιμοποιήσουμε το απλούστερο ADC του 1bit (που στην ουσία είναι ένας απλός συγκριτής τάσης που εξετάζει αν η τάση είναι θετικότερη ή αρνητικότερη από την είσοδο του). Αυτή η διάταξη μπορεί να γίνει πολύ γρήγορη και ακριβής ανα αναλογιστούμε ότι μια συνεχή τάση (ευθεία γραμμή) μπορεί να ανιχνευθεί με 2 μόνο δείγματα (2 σημεία = 1 ευθεία γραμμή). Μια τέτοια διάταξη για ακρίβεις της τάξης του 0.001 και 0.0001 θα χρειαζόταν 10000 και 95000 δείγματα αντίστοιχα με κύκλο εργασίας 25. Στον πίνακα 3.3 απεικονίζεται η αλληλουχία των κύκλων για σήμα 0.52V (όπως στον πίνακα 3.2) αλλά αυτή τη φορά με χρήση ΣΔ δηλαδή με τη χρήση 1bit ADC

Πίνακας 3.3 Είσοδος και εξόδος σε ένα ΣΔ ADC. Συντομύσεις όπως στον πίν.3.2

I	Diff inp.	Sum	DAC out	Average
0	0.5200	0.5200	1.0000	
1	-0.4800	0.0400	1.0000	1.0000
2	-0.4800	-0.4400	-1.0000	0.0000
3	1.5200	1.0800	1.0000	0.3333
4	-0.4800	0.6000	1.0000	0.5000
5	-0.4800	0.1200	1.0000	0.6000
6	-0.4800	-0.3600	-1.0000	0.3333
7	1.5200	1.1600	1.0000	0.4286
8	-0.4800	0.6800	1.0000	0.5000
9	-0.4800	0.2000	1.0000	0.5556
10	-0.4800	-0.2800	-1.0000	0.4000
11	1.5200	1.2400	1.0000	0.4545
12	-0.4800	0.7600	1.0000	0.5000
13	-0.4800	0.2800	1.0000	0.5385
14	-0.4800	-0.2000	-1.0000	0.4286
15	1.5200	1.3200	1.0000	0.4667
16	-0.4800	0.8400	1.0000	0.5000
17	-0.4800	0.3600	1.0000	0.5294
18	-0.4800	-0.1200	-1.0000	0.4444
19	1.5200	1.4000	1.0000	0.4737
20	-0.4800	0.9200	1.0000	0.5000
21	-0.4800	0.4400	1.0000	0.5238
22	-0.4800	-0.0400	-1.0000	0.4545
23	1.5200	1.4800	1.0000	0.4783
24	-0.4800	1.0000	1.0000	0.5000
25	-0.4800	0.5200	1.0000	0.5200
26	-0.4800	0.0400	1.0000	0.5385
27	-0.4800	-0.4400	-1.0000	0.4815

3.7 Περίληψη κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε το δεύτερο θεμελιώδες κομμάτι ενός σύγχρονου σειсмоγράφου: ο μετατροπές αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Μετά την παρουσίαση της αναγκαιότητας της χρήσης ADC στου σημερινούς σειсмоγραφους, οι βασικές αρχες του αναφέρθηκαν. Στη συνέχεια τυπικοί ADC μετατροπείς παρουσιάστηκαν, προκειμένου να καταλήψουμε στο γιατί σήμερα έχει επικρατήσει για τις εφαρμογές υψηλής ανάλυσης να χρησιμοποιείται ο ΣΔADC ενώ για τις εφαρμογές απλών μετρήσεων ο ramp ADC

4. Κατασκευή σειсмоγράφου μίας συνιστώσας

4.1 Εισαγωγή

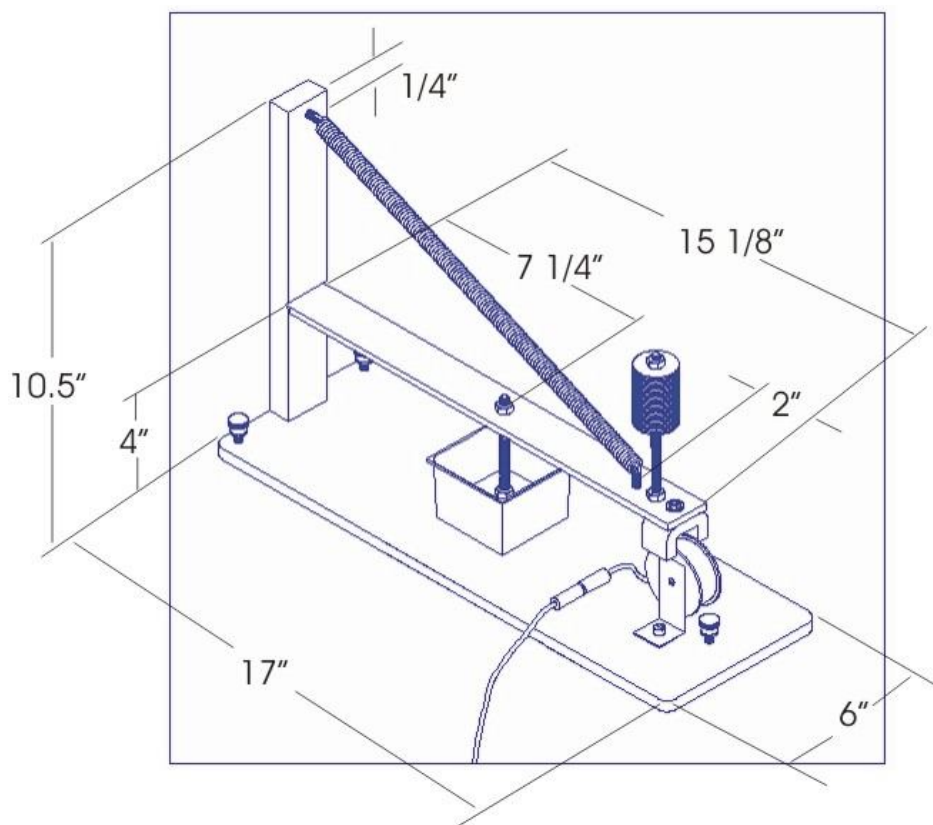
Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας αφορά την κατασκευή ενός σειсмоγραφου, χαμηλού κόστους, μία συνιστώσας (κάθετης) καθώς επίσης και της ανάπτυξη του απαραίτητου λογισμικού για την καταγραφή, απεικόνιση, απηθήκευση και προβολή στο Internet, των σειсмоγραμμάτων αυτού. Ειδικότερα, στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε την κατασκευή του σειсмоγραφου, δηλαδή το σεισμόμετρο και τον καταγραφέα καθώς επίσης και το λογισμικό που αναπτύχθηκε ή ρυθμίστηκε για να ικανοποιήσει τις ανάγκες που προαναφέρθηκαν.

Σχετικά με τον σειсмоγράφο θα παρουσιάσουμε το αρχικό σχέδιο, όπως προτάθηκε και έχει δοκιμαστεί από την Αμερικάνική Γεωλογική Εταιρεία (US.G.S), τις μετατροπές που επιφέραμε καθώς και τις βασικές λειτουργίες αυτών. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είτε έτοιμο, είτε αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής προκειμένου να συμβάλει στον έλεγχο και τη συλλογή των δεδομένων, στην αποθήκευση, στην επεξεργασία καθώς επίσης και στην προβολή των καταγραφών σε ιστοσελίδα.

4.2 Σεισομετρο μίας συνιστώσας

4.2.1 Βασική λειτουργία

Η αρχική ιδέα για τη δημιουργία εκπαιδευτικού σειсмоγράφου ανήκει στην USGS και στον εκπαιδευτικό σειсмоγράφο που έχει κατασκευάσει. Σκοπός μας δεν ήταν η απλή αντιγραφή της ιδέας αλλά η κατασκευή ενός πρωτοτύπου με βάση τη σκέψη ότι η κατασκευή αυτή θα ήταν χαμηλότερου κόστους, θα χρησιμοποιεί όσο το δυνατόν κοινά υλικά και θα δύναται να αναπαράχθει μαζικά (για εκπαιδευτική χρήση). Το βασικό σχέδιο του σειсмоγράφου απεικονίζεται στο σχήμα 4.1



Σχήμα 4.1 Σχεδιάγραμμα πρωτότυπου εκπαιδευτικού σεισμομέτρου (διαστάσεις σε ίντσες) (<http://jclahr.com/science/psn/as1/>)

Από το σχεδιάγραμμα είναι ευκολο να γίνει κατανοητό ότι πρόκειται για έναν σεισμόμετρο τύπου εκκρεμούς. Η οριζόντια μεταλλική λαμα αναρτάται από ένα ελατήριο στη μία ακρη ενώ στην άλλη είναι σταθερά πακτωμένη σε άρθρωση προκειμένου να μην είναι δυνατή καμμία άλλη κίνηση της εκτός της καθετης. Στην πλευρά της λάμας που υπάρχει η ανάρτηση του ελατηρίου συνυπάρχουν ακόμη δύο σημαντικά εξαρτήματα: το αντίβαρο και ο αισθητήρας.

Η προσθαφαίρεση βάρους στο αντίβαρο εξυπηρετεί δύο σκοπούς: αφ' ενός φέρνει τη λάμα σε κατάσταση ισορροπίας (δηλαδή εντελώς παράλληλη με το φυσικό έδαφος) και αφ' ετέρου μεταβάλλει το συντελεστή απόσβεσης (λεπτομέρειες παρακάτω).

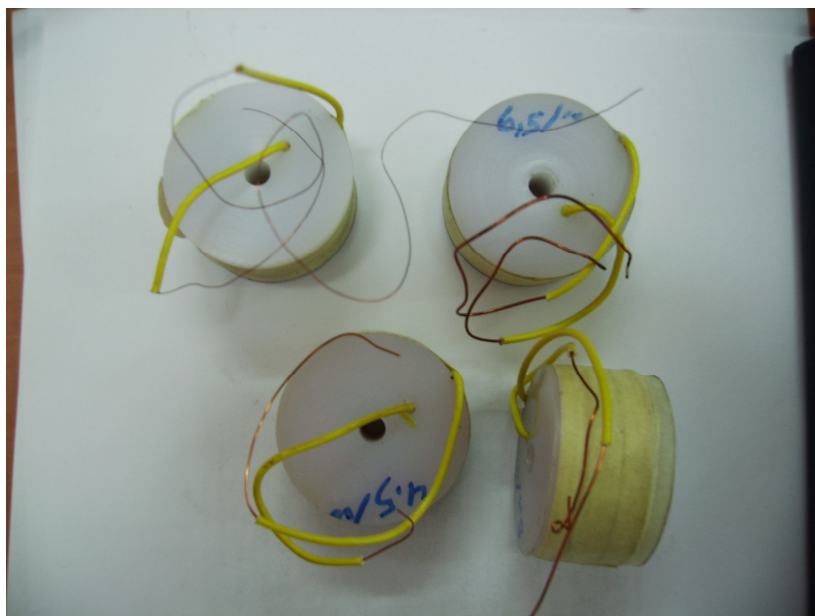
Ο αισθητήρας αποτελείται από το συγκρότημα μαγνήτη – πηνίου. Ο πεταλοειδής μαγνήτης είναι μόνιμα στερεωμένος στην άκρη της λάμας και άρα κινείται μαζί με αυτή. Το πηνίο από την άλλη πλευρά είναι μόνιμα στερεωμένο στη βάση του συστήματος. Αυτό που αναμένουμε είναι ότι με την παραμικρή δόνηση η λάμα θα αρχίσει να ταλαντεύεται. Ο μαγνήτης που θα ταλαντώνεται και αυτός στο

ρυθμό της λάμας, στην ουσία θα εκτελεί μία καθετη κίνηση όπου θα απομακρύνεται και θα πλησιάζει το πηνίο, αντίστοιχα. Στη ουσία με την κίνηση αυτή, το πηνίο θα εισέρχεται διαδοχικά στο μαγνητικό πεδίο του πεταλοειδούς μαγνήτη. Είναι λοιπόν αναμενόμενο στα άκρα του πηνίου να δημιουργείται εναλλασόμενη τάση, ανάλογη της μετατόπισης της λάμας και συνεπώς ανάλογη της διέγερσης που την προκάλεσε.

Η τάση αυτή στη συνέχεια θα πρέπει να μεταφραστεί σε ψηφιακό σήμα προκειμένου να γίνει δυνατή η επεξεργασία της από Η/Υ. Την αποστολή αυτή επιτελεί ο διασυνδεδεμένος ADC με το ενσωματωμένο φίλτρο.

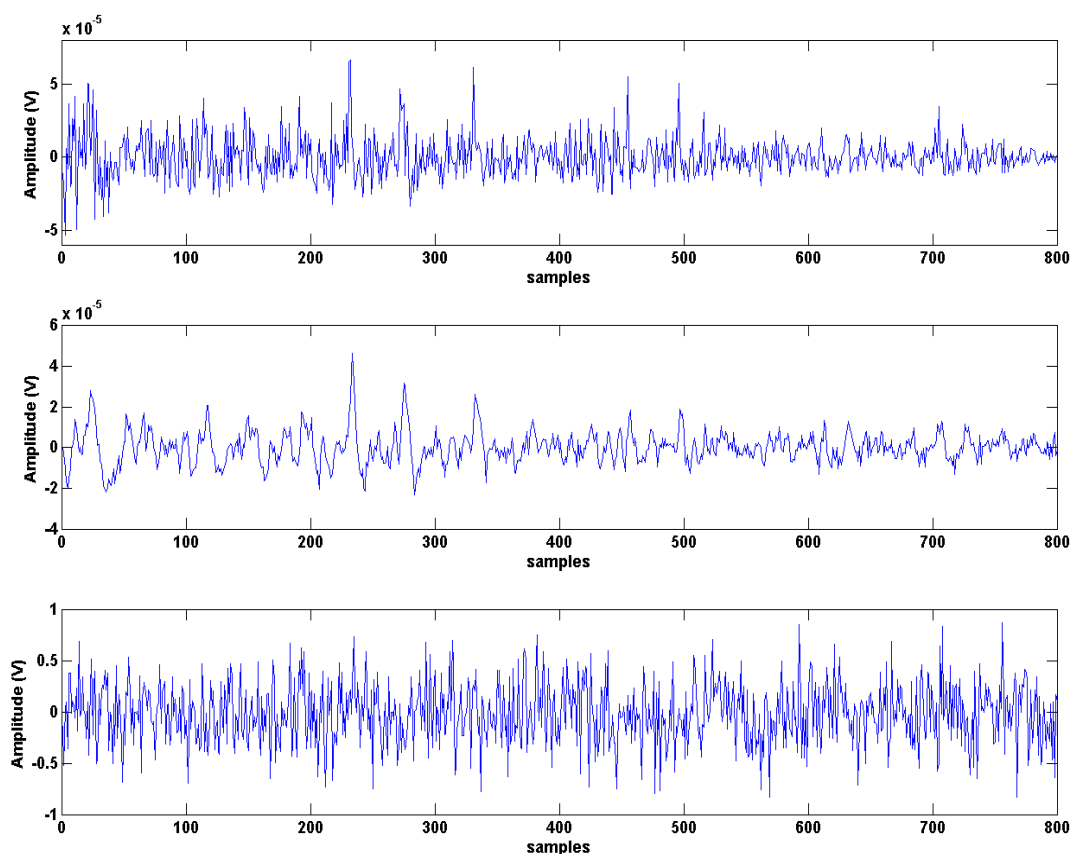
4.2.2 Σύστημα Μαγνήτη - πηνίου

Η αρχική σχεδίαση και το αντίστοιχο πρωτότυπο περιλαμβάνουν ένα πεταλοειδή μαγνήτη και ένα πηνίο. Το πρώτο βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε ήταν η προσαρμογή αντίστασης μεταξύ πηνίου και ADC. Αυτό συνέβη διότι το αρχικό σχέδιο βασιζόταν σε ADC που είχε κατασκευστεί ειδικά για την εφαρμογή και το κόστος του οποίου ήταν εκτός των αρχικών μας προβλέψεων. Έτσι αφού επιλέξαμε το καλύτερο ADC για το κόστος που είχαμε προϋπολογίσει (λεπτομέρειες στην παρ. 4.2) έπρεπε να προσαρμόσουμε το πηνίο στις παραμέτρους φορτίου και κέρδους. Συγκεκριμένα αφενός η αντίσταση φορτίου που έπρεπε να πετύχουμε ήταν δεδομένη (~500Ω) και αφετέρου θα επιλεξουμε ένα πηνίο με δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό κατασκευάσαμε τρία διαφορετικά πηνία με σύρμα διαμέτρου 0.3mm και αριθμό σπειρών 1500, 2500 και 4000 αντίστοιχα (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2 Τα κατασκευασμένα πηνία προς δοκιμή

Οι δοκιμές που πραγματοποιήσαμε αφορούσαν την μέτρηση της εξόδου του κάθε πηνίου (εφαρμοζόμενο βεβαια στη τελική του θέση) καθώς επίσης και της ποιότητας του εξερχόμενου σήματος. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο σχήμα 4.3



Σχήμα 4.3 Εξοδος σήματος από πηνίο αισθητήρα για 1500 (ανω), 2500 (μέση) και 4000 σπείρες)

Παρατηρούμε ότι για 1500 σπείρες το σήμα είναι ιδιαίτερα ασθενές. Οι επιλογές μας ήταν λοιπόν μεταξύ 2500 και 4000 σπειρών. Όπως ήταν φυσικό, το πηνίο των 4000 σπειρών δίδει μεγαλύτερο πλάτος στην έξοδο. Όμως δεν επιλέξαμε αυτό διότι η καθαρότητα του σήματος δεν ήταν η προσδοκώμενη. Το πιο καθαρό σήμα λάβαμε με το πηνίο των 2500 σπειρών το οποίο όμως ήταν το πιο ασθενές από τα υπόλοιπα δύο. Αποφασίσαμε όμως ότι σημαντικότερη παράμετρος ήταν η καθαρότητα του σήματος παρά το πλάτος του. Ούτως ή άλλως ο μετατροπέας που επιλέξαμε περιλαμβάνει ενισχυτή X100 οπότε μπορούσαμε να φέρουμε το σήμα στα επιθυμητά επίπεδα πλάτους.

Ο μαγνητης που χρησιμοποιήθηκε αρχικά, ήταν ο προτεινόμενος, πεταλοειδής τύπου Alnico (Aluminum-Nicel-Cobalt), όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.4



Σχήμα 4.4 Πεταλοειδής μαγνήτης αισθητήρα, τύπου Alnico

4.3 ADC

Ο μετατροπέας ADC που προτείνεται στο αρχικό σχέδιο απαιτεί ανάλυση τουλάχιστον 10bit. Ξεκινώντας από αυτή την παράμετρο ερευνήσαμε την αγορά προκειμένου να καταλήξουμε στη βέλτιστη λύση από πλευράς κόστους/απόδοσης. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη συχνότητα δειγματολήψιας που απαιτήσαμε να είναι τουλάχιστον 250HZ. Ο λόγος ήταν ότι το σεισμολογικό δίκτυο του Εργαστηρίου Γεωφυσικής & Σεισμολογίας του ΤΕΙ Κρήτης δειγματοληπτεί με 125HZ. Προκειμένου αν διατηρήσουμε μια συμβατότητα των καταγραφών του εκπαιδευτικού σειсмоγράφου και των κυματομορφών του σεισμολογικού δικτύου θα έπρεπε να έχουμε έναν ADC με συχνότητα τουλάχιστον 125HZ. Σκεπτόμενοι όμως και το ενδεχόμενο να προβούμε στο μέλλον σε υπεδειγματοληψία του σήματος απαιτήσαμε τουλάχιστον 200HZ. Επίπρόσθετες λειτουργίες που επιθυμούσαμε ήταν η διασύνδεση του με εύκολο τρόπο δηλαδή να μην απαιτούνται drivers για εγκατάσταση και η μεταφορά των δεδομένων να γίνεται ακόμα και από παλαιούς H/Y (οπότε θα πρέπει να διαθέτει παράλληλη ή σειριακή διασύνδεση). Ακόμη δεν επιθυμούσαμε να περιέχει αναξάρτη πηγή τάσης αλλά να τροφοδοτείται από την σειριακή ή την παράλληλη πόρτα αρα να πρόκειται για συσκευή χαμηλής κατανάλωσης. Επίσης η στάθμη του σήματος εισόδου που θα δέχεται να είναι διπολική (αρνητικό – θετικό) και τουλάχιστον 5V (10V πλήρους κλιμακας).Επιπρόσθετες απαιτήσεις επιθυμητές αλλά όχι αναγκαιες ήταν η ύπαξη βιβλιοθηκών για τις δημοφιλείς γλώσσες προγραμματισμού και η ύπαρξη ψηφιακών εισόδων για απομακρυσμένο ελεγχο (εκκίνηση – σταματημα) της δειγματοληψίας.

Η επιλογή μας ήταν το DI-194RS της εταιρείας DataQ (<http://www.dataq.com/products/startkit/di194rs.htm>) που απεικονίζεται στο σχήμα 4.5



Σχήμα 4.5 ADC της εταιρείας DataQ, που χρησιμοποιήθηκε

Συνδυάζει όλες τις παραπάνω απαιτήσεις και επιπρόσθετα διαθέτει μια πλούσια βιβλιοθήκη για χρήση από γλώσσες προγραμματισμού (Visual Basic 6, .NET, C++, Pascal) και από πακέτα επεξεργασίας (Excel, Matlab, Origin). Ιδιαίτερο ρόλο στην επιλογή έπαιξε επίσης και η συμβατότητα του με το software επεξεργασίας Amaseis (που θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο) το οποίο είναι μια ικανοποιητικότερη λύση για χρήση με τον εκπαιδευτικό σειсмоγράφο για όποιον δεν επιθυμεί να προγραμματίσει καθόλου και απλά θέλει μία λύση plug-n-play.

4.4 Ανάρτηση - Απόσβεση

Όπως έχει προαναφερθεί, το σεισμόμετρο μας είναι τύπου εκκρεμούς. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να υπάρχει πρόνοια για απόσβεση των ταλαντώσεων. Επιγραμματικά, τρεις τρόποι χρησιμοποιούνται στην πράξη

- i. Απόσβεση με υγρό. Η συσκευή απόσβεσης με υγρό αποτελείται από δοχείο με παχύρρευστο υγρό (λάδι, γλυκερίνη, κλπ), μέσα στο οποίο μπορούν να κινούνται μια ή περισσότερες πλάκες που συνδέονται με μοχλό με το εκκρεμές του σεισομέτρου. Οι πλάκες μπορούν να βυθίζονται περισσότερο ή λιγότερο μέσα στο υγρό, ώστε ο συντελεστής απόσβεσης να ρυθμίζεται κατά βούληση. Η απόσβεση με υγρό παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας επηρεάζουν την πυκνότητα και το ιξώδες και γι' αυτό

προκαλούν απρόβλεπτες και ανεπιθύμητες μεταβολές του συντελεστή απόσβεσης.

- ii. Απόσβεση με αέρα. Έμβολο μπορεί, με κατάλληλη εξάρτηση, να κινείται μέσα σε κύλινδρο, που τα δύο άκρα του κλείνονται με πλάκες και η εσωτερική του διάμετρος είναι λίγο μεγαλύτερη από τη διάμετρο του εμβόλου. Το ένα άκρο του εμβόλου συνδέεται με τη μάζα του εκκρεμούς. Κατά την ταλάντωση του εμβόλου παράγονται συμπίεση και αραιώση του αέρα, μέσα στους αεροθαλάμους που βρίσκονται από το ένα και το άλλο μέρος του εμβόλου με συνέπεια την εξάσκηση στο έμβολο δύναμης αντίστασης, της οποίας η φορά είναι αντίθετη της φοράς της ταχύτητας του εμβόλου και το μέτρο της ανάλογο, κατά προσέγγιση, προς το μέτρο της ταχύτητας και ανεξάρτητο του πλάτους της ταλάντωσης.
- iii. Μαγνητική απόσβεση. Το εκκρεμές του σεισμομέτρου συνδέεται με χάλκινη πλάκα, η οποία μπορεί να ταλαντώνεται μεταξύ των πόλων πεταλοειδούς μαγνήτη. Κατά την κίνηση της πλάκας δημιουργούνται σ' αυτήν ρεύματα Foucault. Συνέπεια αυτού είναι η εξάσκηση πάνω στην πλάκα δύναμης που έχει φορά αντίθετη της φοράς της ταχύτητας με την οποία κινείται αυτή και μέτρο ανάλογο του \dot{x} του της ταχύτητας. Με μεταβολή του τμήματος της επιφάνειας της πλάκας από όπου περνάν οι μαγνητικές γραμμές, ρυθμίζεται κατά βούληση ο συντελεστής απόσβεσης.

Το πρωτότυπο σχέδιο του σεισμομέτρου πρότεινε απόσβεση με υγρό και συγκεκριμένα με λάδι μηχανής, με τον τρόπο τον οποίο φαίνεται στο σχήμα 4.6



Σχήμα 4.6 Απόσβεση με υγρό

Μετά από τις απαραίτητες δοκιμές καταλήξαμε ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα δίδεται με ορυκτέλαιο αυτοκινήτου τύπου SAE 10W/40, για ποσότητα 150ml. Ο δακτύλιος που δρα ως την άκρη του εμβόλου είναι διαμέτρου 8cm

4.5 Βελτιώσεις – αλλαγές

Με βάση τις οδηγίες που δόθηκαν κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο και ελέγχθηκε η καλή λειτουργία του. Μέρος όμως της παρούσας πτυχιακής εργασίας αφορά και παροτεινόμενες βελτιώσεις στο αρχικό σχέδιο. Οι βελτιώσεις που σχεδιάστηκαν και δοκιμάστηκαν αφορούν τρία σημεία :

- i. Αλλαγή του πεταλοειδούς μαγνήτη με ισχυρότερο
- ii. Αλλαγή του πηνίου με αισθητήρα Hall
- iii. Αλλαγή του τρόπου απόσβεσης

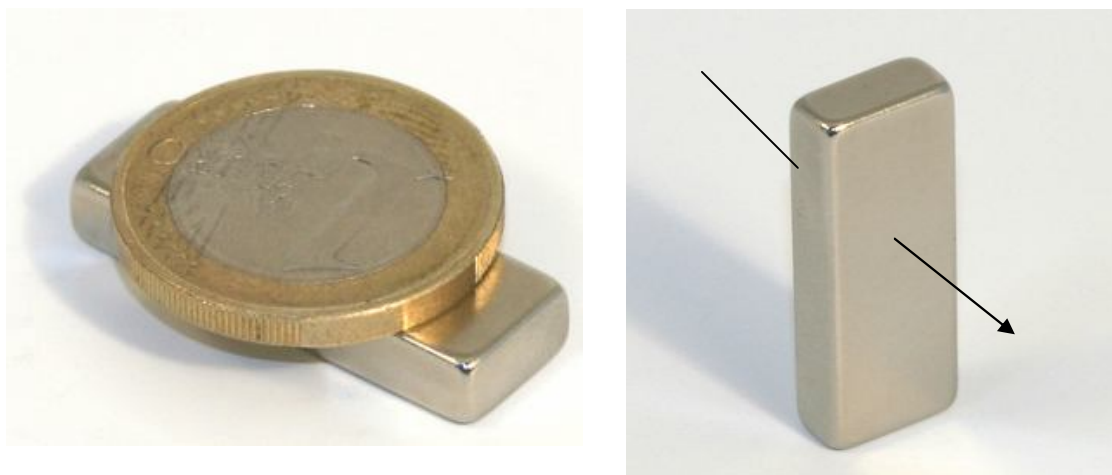
Προτού παρουσιάσουμε τις βελτιώσεις και αλλαγές που πραγματοποιήσαμε επισημαίνουμε ότι όλες οι αλλαγές πραγματοποιήθηκαν επί ενός τελικού προϊόντος.

Αυτό κρίθηκε απολύτως αναγκάσιο διότι η μεταβολές που προτείνουμε επηρεάζουν τη γεωμετρία και το βάρος συγκεκριμένων μερών του σεισμομέτρου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των φυσικών χαρακτηριστικών αυτού με συνέπεια τη μεταβολή κρισιμων παραμέτρων που επηρεάζουν τα κινούμενα συστήματα αυτού π.χ. συχνότητα συντονισμού, σταθερά απόσβεσης κ.λ.π. Έτσι οι αλλαγές πραγματοποιήθηκαν όλες μαζί και μετά από αυτές επανυπολογίσταν όλες οι τιμές που απαιτούσαν ρυθμίσεις προκειμένου η συμπεριφορά του σεισμομέτρου να συνάδει με τα αρχικές προδιαφράφες ή/και να τις υπερκαλύπτει.

4.5.1 Αλλαγή πεταλοειδούς μαγνήτη.

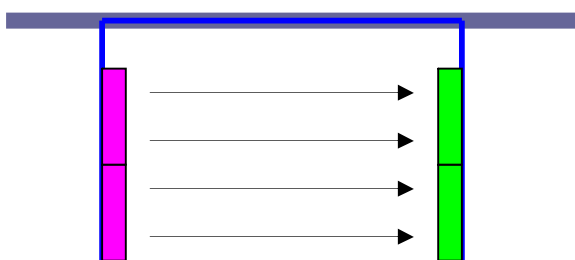
Ο μαγνήτης που χρησιμοποιήθηκε (σχήμα 4.4) ήταν ικανοποιητικός αλλά για μικρές δονήσεις ο θόρυβος που συνέλλεγε το πηνίο μείωνε την ποιότητα του σήματος. Αύξηση της μαγνητικής του επαγωγής σήμαινε και μεγαλύτερο μέγεθος μαγνήτη, γεγονός που ήταν απαγορευτικό. Αυτό που χρειαζόμασταν ήταν ένας ισχυρότερος μαγνήτης ίσου ή μικρότερου μεγέθους από τον πεταλοειδή προκειμένου να παράγεται στην έξοδο ένα ισχυρότερο σήμα. Αυτό θα μας βοηθούσε ιδιαίτερα στην περίπτωση ασθενών δονήσεων όπου το σήμα εξόδου «μολυνόταν» από το θόρυβο με αποτέλεσμα να μην είναι πολύ εύκολη η διαχειρισή του στη συνέχεια. Μετα από ενδελεχή αναζήτηση καταλήξαμε σε χρήση μαγνητων τύπου Neodymium (NIB) που αποτελούν ότι πιο ισχυρό υπάρχει σε σχέση με μέγεθος τους ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Οι μαγνήτες αυτοί είναι πολύ ισχυροί σε σχέση με τη συνολική τους μάζα αλλά έχουν το μειονέκτημα ότι είναι ευθραστοί. Όπως και τα υπόλοιπα γνωστά σιδηρομαγνητικά υλικά, οι μαγνήτες NIB χάνουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες από μία θερμοκρασία και άνω, γνωστή και ως θερμοκρασία Curie. Οι περισσότεροι NIB είναι ανισοτροπικοί που σημαίνει ότι μπορούν να μαγνητιστούν μόνο κατά τη μία διεύθυνση. Κατά την κατασκευή τους, πεδία μεταξύ 30-40 kOe απαιτούνται για τον κορεσμό του υλικού ενώ η ισχύς απομαγνητίζουσα ισχύς είναι της τάξης 20kOe. Οι NIB μαγνήτες χαρακτηρίζονται από έναν βαθμό ο οποίος χαρακτηρίζει το πόσο ισχυροί είναι. Αυτός κυμαίνεται από N24 (ο ασθενέστερος) μέχρι N55. Θεωρητικά οι NIB μαγνήτες μπρούν να φθασουνε μέχρι N64. Ο αριθμός μετά το N αντιπροσωπεύει το γινόμενο της μαγνητικής ενέργειας σε megagauss-oersteds (MGOe) ($1 \text{ MG}\cdot\text{Oe} = 7,958\cdot 10^3 \text{ T}\cdot\text{A/m} = 7,958 \text{ kJ/m}^3$). Ένας π.χ. N48 έχει παραμένον μαγνητικό πεδίο 1.38Tesla και H (πυκνότητα μαγνητικού πεδίου) 13,800 (ή αλλιώς 1.098MA/m).

Η επιλογή μας ήταν NIB μαγνήτες N42, με διαστάσεις 30mmX 10mmX5mm. Δεν επιλέξαμε έναν μόνο μαγνήτη για κάθε πόλο αλλά προτιμήσαμε να δημιουργήσουμε μαγνητικό πεδίο με συστοιχία μαγνητών προκειμένου να έχουμε τη δυνατότητα ρύθμισης αυτού. Οι μαγνήτες που χρησιμοποιήσαμε απεικονίζονται στο σχήμα 4.7, μαζί με τη διεύθυνση μαγνήτισης



Σχήμα 4.7 NIB μαγνήτες. Το βέλος δίδει τη φορά των μαγνητικών γραμμών

Η διάταξη των μαγνητών που αντικατέστησε τον πεταλοειδή μαγνήτη απεικονίζεται στο σχήμα 4.8



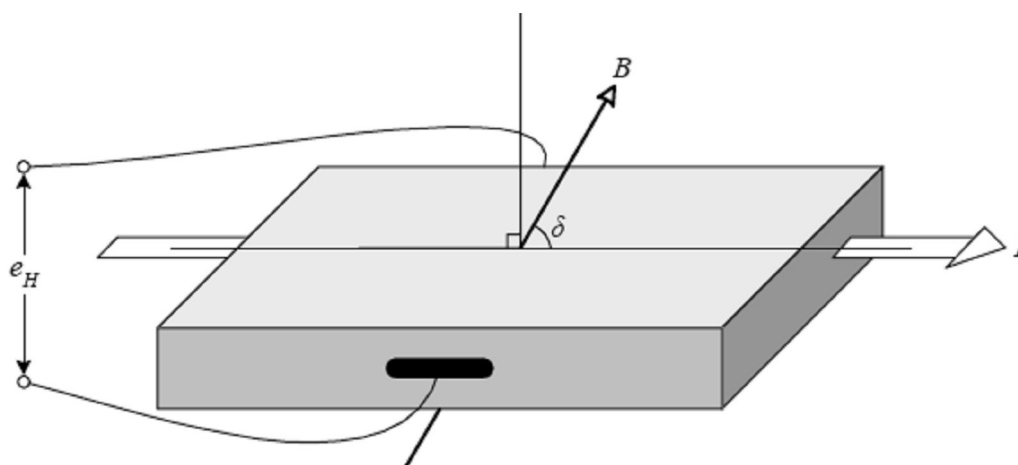
Σχήμα 4.8. Οψη μαγνητικού συμπλέγματος αντικατάστασης πεταλοειδούς μαγνήτη (Γκρί: μεταλλική λάμα, Μπλέ: αλουμινένιο πλαίσιο στήριξης, κοκκινο-πρασινό: μαγνητικοί πόλοι, βέλη: απεικόνιση μαγνητικού πεδίου)

4.5.2 Αλλαγή πηνίου με αισθητήρα Hall

Η χρήση του πηνίου στον αισθητήρα αποτελούσε έναν συμβιβασμό κόστους και απόδοσης προκειμένου να παράγεται η εναλλασόμενη τάση που απεικόνιζε τις

κινήσεις της μεταλλικής λάμας. Ο συμβιβασμός αυτό εγκείται στο γεγονός ότι ήταν γνωστό στους σχεδιαστές του πρωτότυπου συστήματος ότι η χρήση πηνίου δεν ήταν η καλύτερη επιλογή λόγω κυρίως των ανεπιθύμητων δευτερευόντων επαγωγικών φαινομένων που δύναται να λάβουν χώρα σε αυτά. Όμως από την άλλη πλευρά το χαμηλό τους κόστος αποτελεί ένα ισχυρότατο κίνητρο για την επιλογή τους (αφού βεβαία βρεθεί ο κατάλληλος αριθμός σπειρών). Η δική μας προταση ήταν η αντικατάσταση του πηνίου με έναν αισθητήρα Hall προκειμένου να έχουμε απ'ευθείας μία εξοδό τάσης αναλογής του μαγνητικού πεδίου όπου αυτός θα εκινείτο.

Επιγραμματικά, η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων αυτών είναι η παρακάτω. Όταν ένα τεμάχιο υλικού από ημιαγωγό ή μέταλλο διαρρέετε από ρεύμα με ένταση I και βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου με μαγνητική επαγωγή B , η οποία σχηματίζει γωνία δ ως προς το ρεύμα, αναπτύσσεται στις κάθετες πλευρές του υλικού ως προς τα I και B μια ηλεκτρεγερτική δύναμη e_H (Σχ. 4.9). Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο Hall. Η e_H ονομάζεται τάση Hall και ορίζεται από τη σχέση $e_H = K_H I B \sin \delta$ όπου K_H είναι η σταθερά Hall

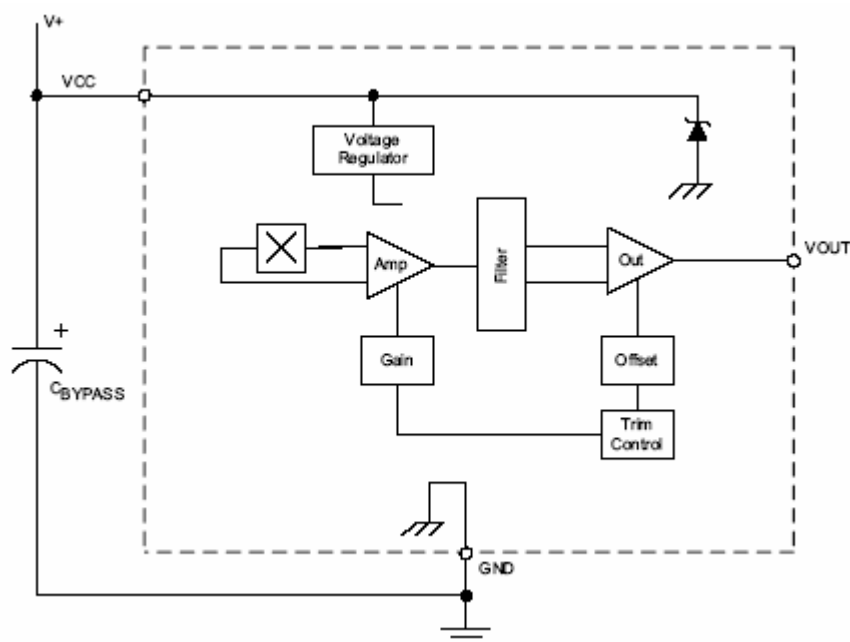


Σχήμα 4.9. Αισθητήρας Hall (Κιοσκερίδης, 2008)

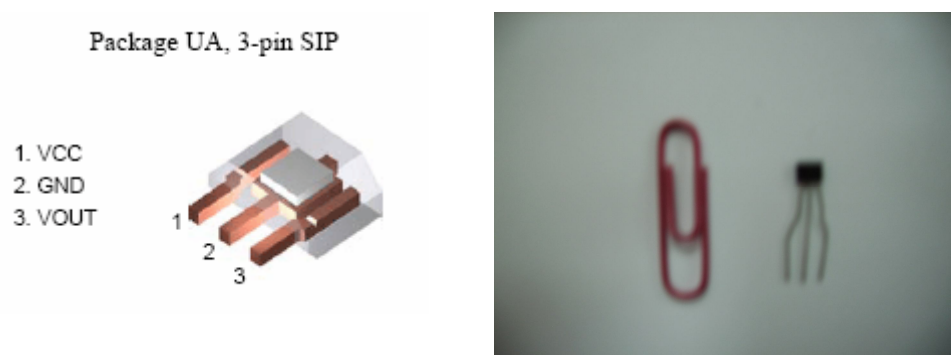
Η ανάπτυξη της τάσης Hall οφείλεται στις δυνάμεις Laplace που ασκούνται από το μαγνητικό πεδίο στα φορτισμένα σωματίδια που διαρρέουν το υλικό. Η δύναμη Laplace που αναπτύσσεται σ' ένα ηλεκτρικό φορτίο q , όταν κινείται με ταχύτητα v εντός μαγνητικού πεδίου με επαγωγή B , δίνεται από τη σχέση $F = qvB \sin a$ όπου, a είναι η γωνία που σχηματίζουν τα ανύσματα της ταχύτητας και της μαγνητικής επαγωγής, επομένως $a = \delta$. Η τάση Hall ακολουθεί τη διεύθυνση της δύναμης Laplace, η οποία είναι κάθετη προς τη διεύθυνση του φορτίου (ρεύματος) και του μαγνητικού πεδίου. Όταν το ρεύμα και η μαγνητική επαγωγή έχουν

ημιτονοειδή μεταβολή με την ίδια συχνότητα και διαφορά φάσης φ , η μέση τιμή της τάσης *Hall* προκύπτει από τη σχέση $E_H = K_H I B \cos \varphi$, όπου, *I* και *B* είναι οι ενδεικνύμενες (rms) τιμές των αντίστοιχων μεγεθών. Έχει βέβαια θεωρηθεί ότι η γωνία δ είναι 90° , δηλαδή το μαγνητικό πεδίο προσπίπτει κάθετα στο υλικό. Με τα αισθητήρια τύπου *Hall* είναι δυνατή η μέτρηση του ρεύματος *I*, της μαγνητικής επαγωγής *B*, αλλά και της ισχύος.

Το αισθητήριο *Hall* που χρησιμοποιήσαμε είναι ένας συνεχούς χρόνου, γραμμικός αισθητήρας *Hall*. Τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι η έξοδος χαμηλού θορύβου, η ταχύτατη απόκριση, λειτουργία από 4.5 έως 6.0 V, Solid-state. Η ανάλυση του είναι 2.5mV/G τιμή ιδιαίτερα ικανοποιητική για τα επίπεδα ειδόδου του ADC. Το δομικό του διάγραμμα απεικονίζεται στο σχήμα 4.10, ενώ ο αισθητήρας απεικονίζεται στο σχήμα 4.11



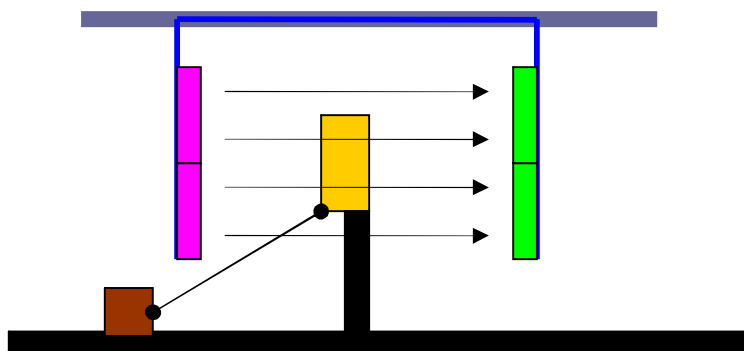
Σχήμα 4.10. Δομικό διάγραμμα χρησιμοποιούμενου αισθητήρα *Hall*



Σχήμα 4.11. Ο χρησιμοποιούμενος αισθητήρας *Hall*

Παρατηρούμε ότι για να λειτουργήσει ο αισθητήρας χρειάζεται μόνο την εφαρμογή της τάσης τροφοδοσίας και ενός πυκνωτή παράκαμψης (ο οποίος δεν είναι απαραίτητος για μικρά μήκη θωρακισμένων καλωδίων, όπως αυτά που χρησιμοποιήσαμε εμείς).

Η τελική μορφή του προτεινόμενου συστήματος μαγνητη αισθητήρα Hall απεικονίζεται στο σχήμα 4.12.



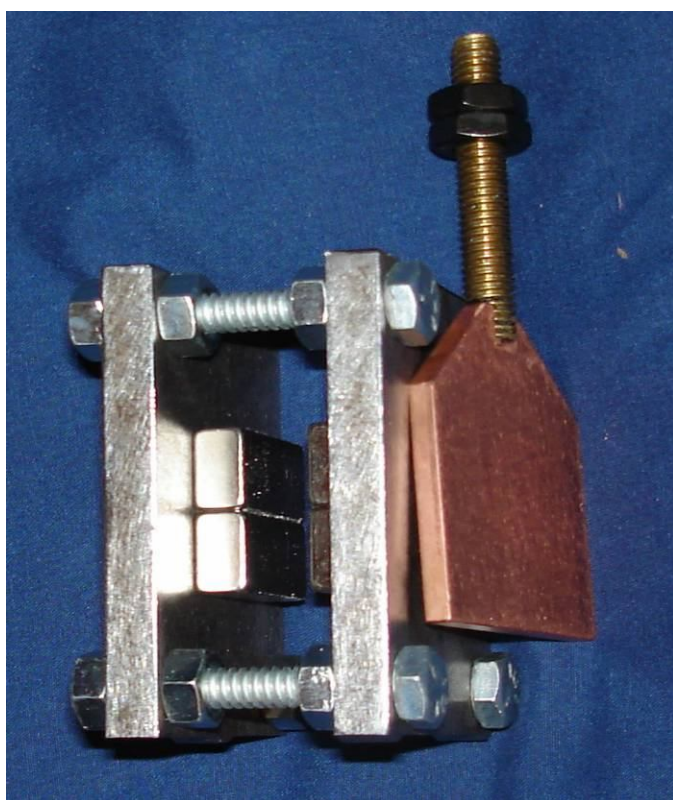
Σχήμα 4.12. Όψη προτεινόμενου συμπλέγματος αισθητήρα-μαγνητη (μαύρο: βάση στήριξης, κίτρινο: Hall sensor, καφέ: ADC, υπόμνημα επίσης στο σχ.4.8)

4.5.3 Αλλαγή τρόπου απόσβεσης

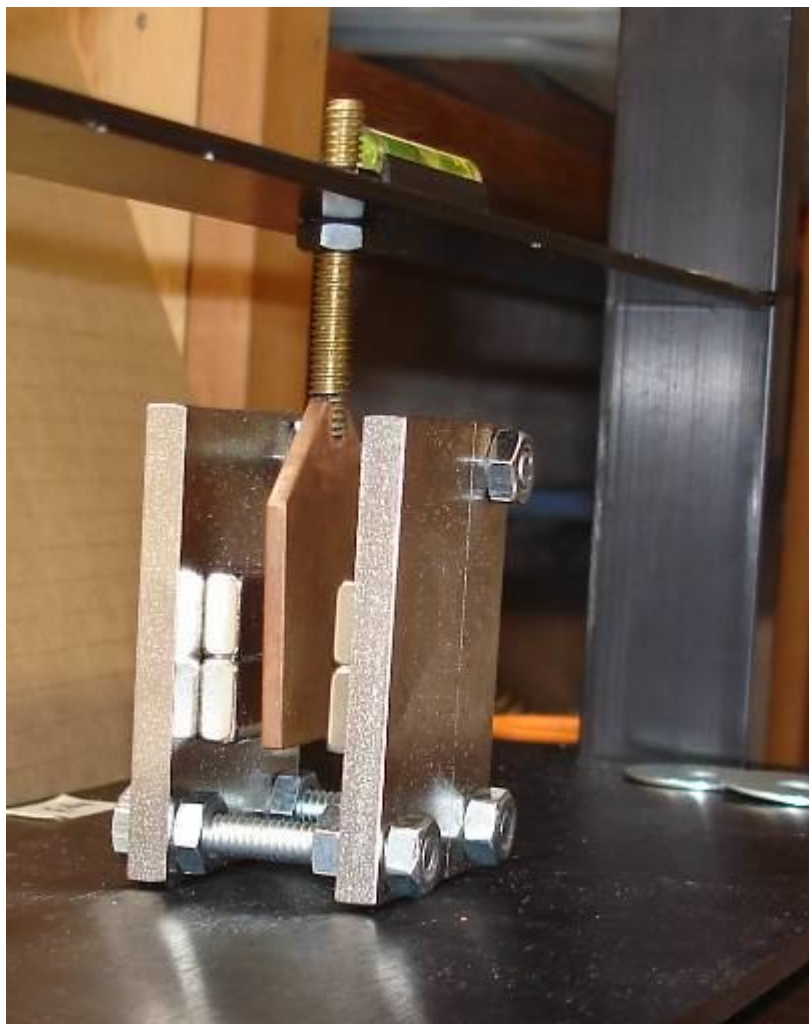
Η απόσβεση με λάδι που χρησιμοποιήθηκε στο πρωτότυπο σχέδιο δεν αποτελεί την ιδανικότερη μορφή απόσβεσης. Είναι σχετικά δύσκολο να ρυθμιστεί, είναι πολύ ευκολο να ρυπάνει τον περιβαλλόντα χώρο, σε υψηλές συχνότητες αποσβένει ανομοιόμορφα και το σημαντικότερο είναι θερμοκρασιακά μεταβαλλόμενη. Το τελευταίο στην πράξη σημαίνει ότι το λάδι μηχανής που χρησιμοποιήσαμε αρχικά, δεν θα παρουσιάζει το ίδιο ιξώδες καθ'ολη την διάρκεια λειτουργίας του σεισμομέτρου καταστρέφοντας με αυτόν τον τρόπο οποιαδήποτε μικρορύθμιση πραγματοποιήσαμε για την απόσβεση. Με δεδομένη την επιτυχή χρήση των μαγνητών NIB (όπως παρουσιάστηκαν στο 4.5.2) αποφασίσαμε να επεκτείνουμε τη χρήση τους και στο σύστημα της απόσβεσης. Συγκεκριμένα επιλέξαμε να κατασκευάσουμε ένα σύστημα ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης βασισμένο στο (<http://jclahr.com/science/psn/chapman/as1%20damping/index.html>) σχέδιο. Τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης είναι ότι έχει χαμηλό

κόστος, δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, έχει γραμμική απόκριση, είναι καθαρή λύση και είναι πολύ εύκολο να ρυθμιστεί.

Τα υλικά που χρειαστήκαμε (εκτός από τους προαναφερθέντες μαγνήτες) ήταν ένα κομμάτι χαλκού, δύο κομμάτια μετάλλου και τρεις βίδες αυξομειώσης διακένου. Η βασική ιδέα είναι ότι η χάλκινη πλάκα θα ακολουθεί τις κινήσεις της λάμας και εισέρχεται-εξέρχεται στο μαγνητικό πεδίο που έχουν δημιουργήσει οι μαγνήτες. Όπως έχει προαναφερθεί, τα ρευματά Foucault που θα δημιουργούνται θα δρουν επιβραδυντικά στην κίνηση και άρα θα δημιουργούν συνθήκες απόσβεσης. Τα υλικά της κατασκευής απεικονίζονται στο σχήμα 4.13 ενώ η τοποθέτησή τους στο σχήμα 4.14



Σχήμα 4.13 Τα υλικά του συστήματος ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης



Σχήμα 4.14 Το σύστημα μαγνητικής απόσβεσης τοποθετημένο στο πρωτότυπο

4.6 Περίληψη κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες του εκπαιδευτικού σειсмоγράφου, Συγκεκριμένα αναφέρθηκαν τα βασικά στοιχεία του πρωτότυπου σειсмоγράφου και στη συνέχεια αναπτύχθηκαν οι προτεινόμενες βελτιώσεις από εμάς. Οι βελτιώσεις αυτές έχουν ενσωματωθεί στην τελική μορφή του εκπαιδευτικού σειсмоγράφου και η συνεχής του λειτουργία αποδεικνύει το ορθόν της επιλογής τους. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δώσουμε στο γεγονός ότι οι προτεινόμενες βελτιώσεις όχι μόνο δεν αυξάνουν το κόστος αλλά ταυτόχρονα (περα από τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά που προσδίδουν) προσφέρουν και ένα νέο επίπεδο ευκολίας χρήσης και συμφωνίας με πιο μοντέρνες τεχνολογίες.

5. Μετρήσεις – Αποτελεσματα

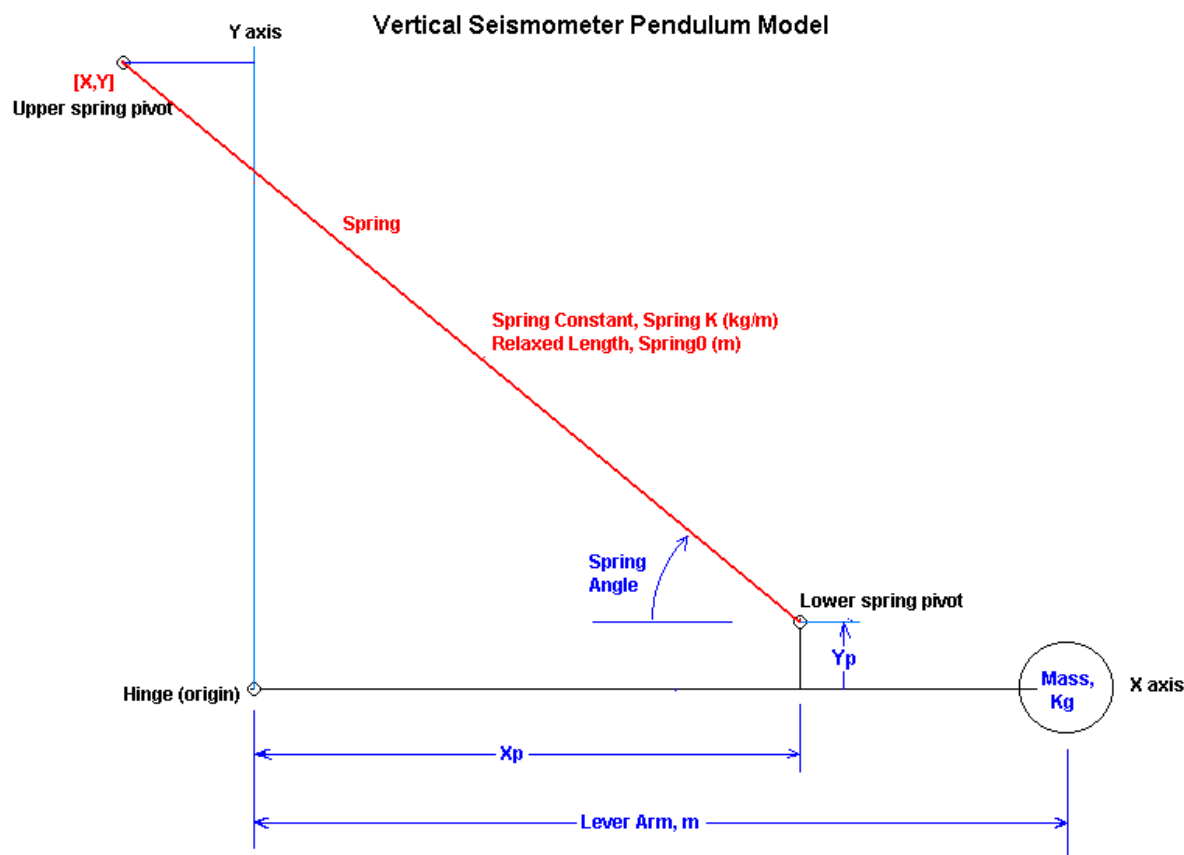
5.1 Εισαγωγή

Μετά το πέρας του κατασκευαστικού σκέλους του σεισμογράφου το επόμενο σκέλος είναι όλες εκείνες οι ενέργειες που αφορούν το λογισμικό και οι οποίες είναι απαραίτητες για την επιτυχή έκβαση του όλου εγχειρήματος. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τη χρήση και ρύθμιση όλων των απαραίτητων μονάδων λογισμικού καθώς επίσης και τις μετρήσεις που λήφθηκαν προκειμένου να τεθεί σε λειτουργική κατάσταση ο εκπαιδευτικός σεισμογράφος.

5.2 Μετρήσεις

5.2.1 Ρύθμιση ελατηρίου ανάρτησης

Η ρύθμιση του ελατηρίου ανάρτησης αποτελεί ένα βασικό σημείο της επιτυχίας του όλου εγχειρήματος. Οι κατασκευαστικές παράμετροι του ελατηρίου εξάγονται με βάση μια σειρά σχέσεων. Οι σχέσεις αυτές πρέπει να ικανοποιούν το μοντέλο που απεικονίζεται στο σχήμα 5.1

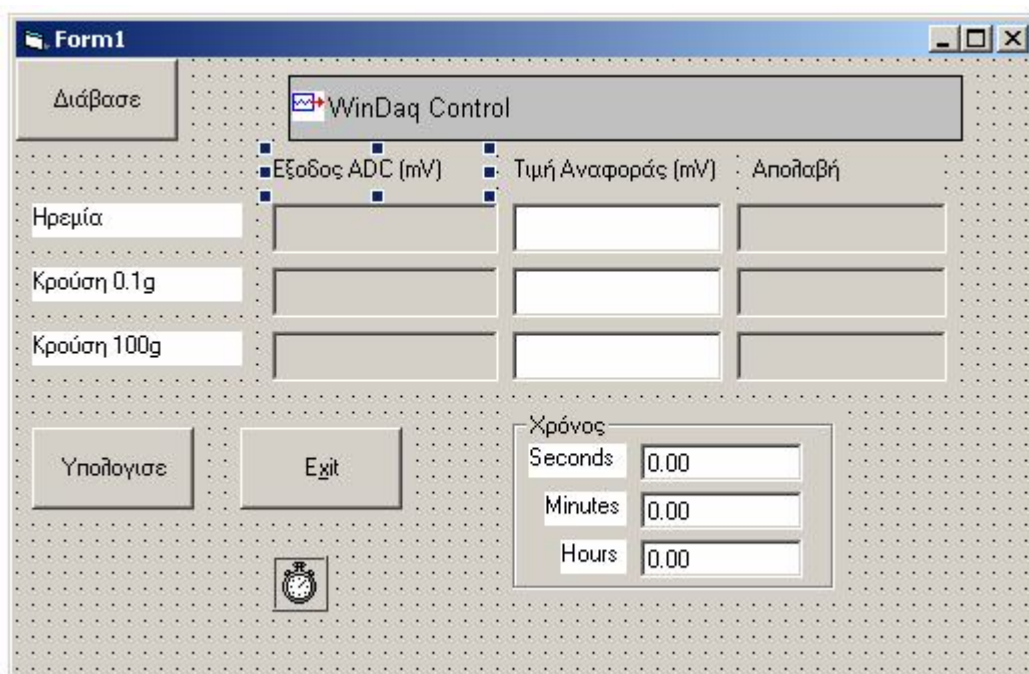


Σχήμα 5.1 Μοντέλο λειτουργίας του υπο κατασκευή σεισμογράφου.

Με γνωστές τις παραμέτρους που απεικονίζονται με γαλάζιο στο σχήμα 5.1, ο χρήστης χρησιμοποιώντας το αρχείο as1.xls (που βρίσκεται στο συνοδευτικό cd) μπορεί να υπολογίσει το απαιτούμενο μήκος ελατηρίου.

5.2.2 Ρύθμιση ορθης λειτουργίας ADC

Η ρύθμιση του ADC συνίσταται στην εύρεση της κατάλληλης τιμής ενίσχυσης προκειμένου να μην έχουμε ασθενες σήμα που δεν θα καταγραφόταν ή πολυ ενισχυμένο σήμα που θα δημιουργούσε το φαινόμενο του ψαλιδισμού (clipping). Για τις ανάγκες της ρύθμισης κατασκευάσαμε ένα πρωτότυπο πρόγραμμα ρυθμίσεως με τη βοήθεια του οποίου μπορέσαμε να διαβάσουμε απ' ευθείας τις τιμές από το ADC και να βρεθεί η βέλτιστη απολαβή δίχως να λαμβάνουμε μια ολοκληρη σειρά μετρήσεων. Αυτό κατέστη δυνατό με χρήση των παρεχόμενων βιβλιοθηκών του ADC και με τη χρήση της γλώσσας Visual Basic 6. Το user interface του προγράμματος και η αντίστοιχη φόρμα απεικονίζεται στα σχήματα 5.2 και 5.3



Σχήμα 5.2 Φόρμα σχεδιασμού προγράμματος ρύθμισης ADC

	Εξοδος ADC (mV)	Τιμή Αναφοράς (mV)	Απολαβή
Ηρεμία			
Κρούση 0.1g			
Κρούση 100g			

Χρόνος
 Seconds
 Minutes
 Hours

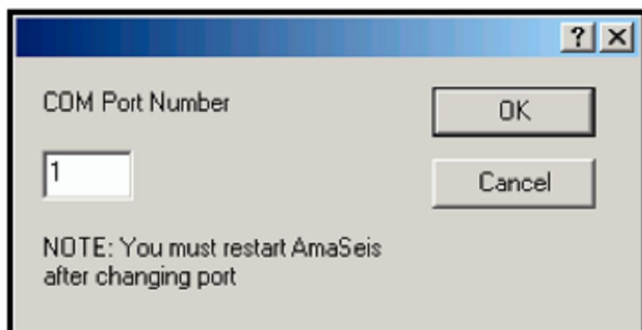
Σχήμα 5.3 Φόρμα εκτέλεσης προγράμματος ρύθμισης ADC.

Το πρόγραμμα λειτουργεί ως εξής: Πατώντας το κουμπί *Εκκίνηση* διαβάζεται η τιμή εξόδου του ADC. Ταυτόχρονα έχουμε συνδέσει και ένα σεισμόμετρο υψηλής ποιότητας, του οποίου το σήμα μετράμε με παλμογράφο. Οι τιμές του ADC διαβάζονται αυτόματα και καταχωρούνται στη στήλη *Εξοδος ADC (mV)* αυτόματα, ενώ με το χέρι καταχωρούνται οι τιμές του σεισμομέτρου από τον παλμογράφο στη στήλη *Τιμή αναφοράς (mV)*. Στη συνέχεια, με το πάτημα του κουμπιού *Υπολόγισε* βρίσκεται ο ιδανικός συντελεστής απολαβής από τις τρεις μετρήσεις.

5.2.3 Ρύθμιση λογισμικού καταγραφής

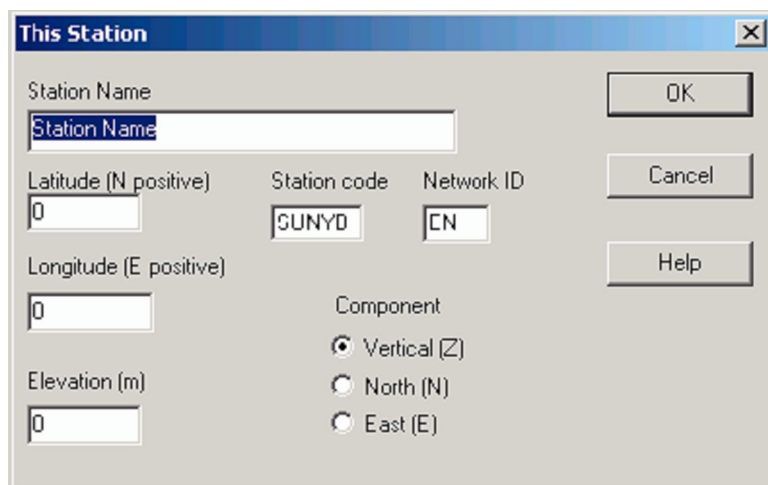
Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την καταγραφή των σεισμογραμμάτων είναι το Amaseis (<http://www.geol.binghamton.edu/faculty/jones/AmaSeis.html>) το οποίο είναι freeware. Το λογισμικό αυτό αποτελεί το κεντρικό κομμάτι της επεξεργασίας των σεισμογραμμάτων. Η εγκατάσταση του είναι απλούστατη και οι παράμετροι που πρέπει να ρυθμίσουμε είναι:

Επιλογή σειριακής πόρτας. Ανάλογα με το που έχουμε συνδέσει ADC επιλέγουμε και την αντίστοιχη σειριακή πόρτα (COM1, COM2 κ.ο.κ) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4



Σχήμα 5.4 Οθόνη εισαγωγής σειριακής πόρτας ADC

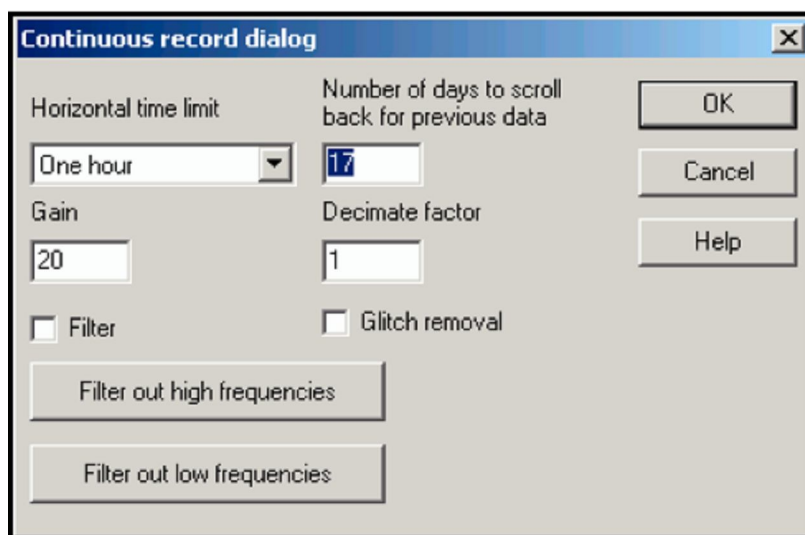
Γεωγραφικά στοιχεία εγκατάστασης. Εισάγουμε το όνομα του σημείου εγκατάστασης (station name), Το γεωγ. μήκος και πλάτος (Latitude – Longitude) και τον κωδικό του σταθμού (προσέχουμε να μην είναι αυθαίρετη επιλογή και επιλέγουμε έναν μη υπαρκτό από τη βάση δεδομένων FDSN www.fdsn.org). Τέλος επιλέγουμε την κατακόρυφη συνιστώσα (Vertical) αφού τετοιου τύπου είναι ο εκπαιδευτικός σειсмоγράφος. Η αντίστοιχη οθόνη απεικονίζεται στο σχήμα 5.5



Σχήμα 5.5 Οθόνη εισαγωγής γεωγραφικών στοιχείων εγκατάστασης

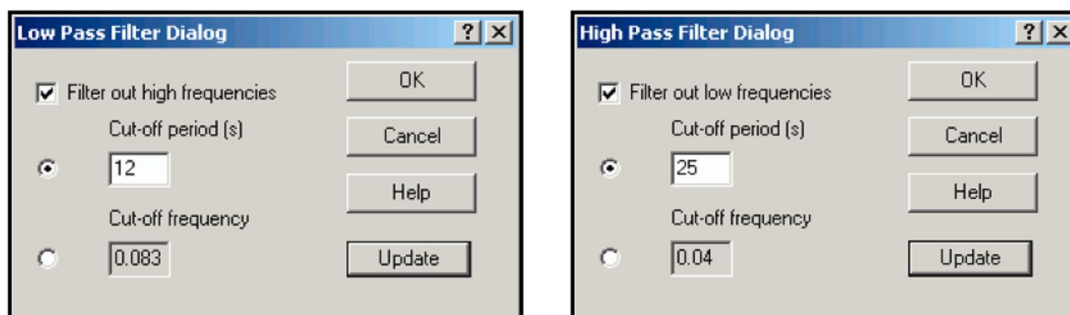
Ρυθμίσεις καταγραφών. Εδώ εισάγονται οι παράμετροι για την απεικόνιση και αποθήκευση των καταγραφών. Αρχικά εισάγουμε το πόσο χρόνο θέλουμε να απεικονίσει η κυματομορφή στην οθόνη. Για την περίπτωση μας επιλέγουμε 1 ώρα (horizontal time limit). Στη συνέχεια επιλέγουμε για πόσο χρονικό διάστημα μπορούμε να έχουμε αποθηκεύσει κυματομορφές ώστε να μπορούμε να τις ανακτήσουμε (Number of days to scroll back for previous data). Ακολουθεί η απολαβή του ADC όπου εισάγουμε την τιμή που υπολογίσαμε στην παράγραφο 5.2.2 (Gain). Ο συντελεστής αποκοπής επηρεάζει μόνο την εμφάνιση της κυματομορφής

και όχι τις πραγματικές τιμές (decimate factor). Ορίζεται μεγαλύτερος του 1 μόνο αν ο H/Y που έχουμε εγκαταστήσει το Amaseis είναι περιορισμένων δυνατοτήτων ή με πολύ παλιά κάρτα οθόνης. Η επιλογή glitch removal αφορά την αποφυγή ή όχι της ολίσθησης της DC συνιστώσας (με άλλα λόγια γίνεται ένα offset removal) ενώ η επιλογή filter εφορά το αν θα φιλτραρεται ή όχι η κυματομορφή. Ολα τα παραπάνω απεικονίζονται στο σχήμα 5.6



Σχήμα 5.6 Οθόνη εισαγωγής ρυθμίσεων καταγραφών

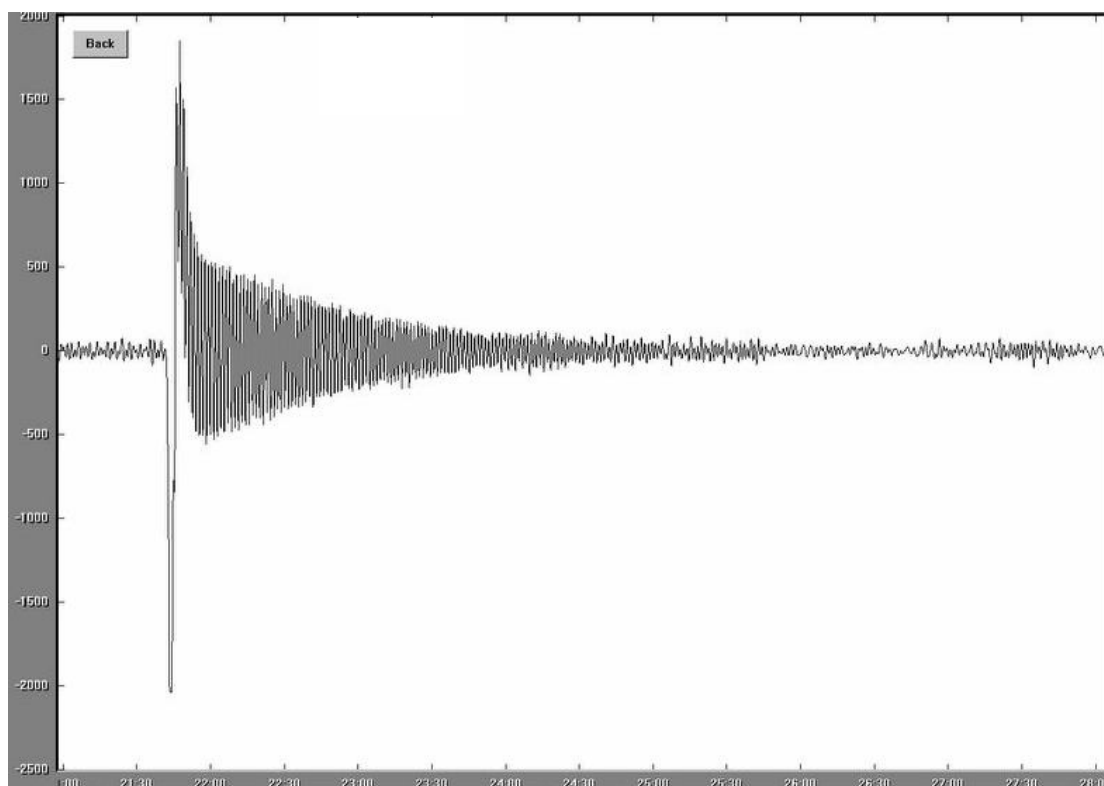
Ρυθμίσεις φίλτρων. Σε περίπτωση που επιλέξουμε το filter στην προηγούμενη παράγραφο, έχουμε τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε τις παράμετρως των φίλτρων. Ειδικότερα έχουμε τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε και να εφαρμόσουμε φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων και φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων. Η εφαρμογή τους μπορεί να γίνει ξεχωριστά ή και τα δύο μαζί. Αυτό το οποίο ρυθμίζουμε είναι η συχνότητα αποκοπής (cut off frequency) με την επιλογή filter out high (low) frequencies. Εχουμε επίσης τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε την περίοδο αποκοπής (cut off period) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7



Σχήμα 5.7 Οθόνη εισαγωγής ρυθμίσεων φίλτρων (χαμηλών: δεξιά – υψηλών: αριστερά)

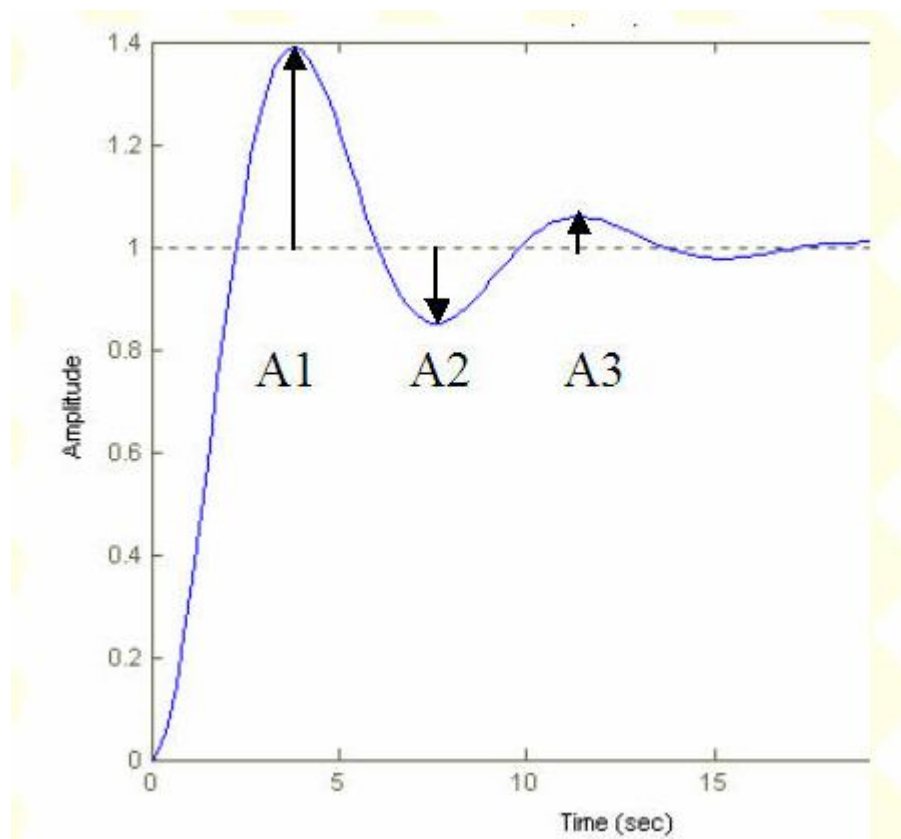
5.2.4 Ρύθμιση απόσβεσης

Η διαδικασία ρύθμισης της απόσβεσης είναι κοινή τόσο για την απόσβεση με υγρό όσο και για την ηλεκτρομαγνητική απόσβεσης. Η σημασία της απόσβεσης έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2 και για να έχουμε γμιά άποψη του τι θα συμβεί ανα δεν υπάρχει απόσβεση, παρουσιάζουμε το σχήμα 5.8, όπου βλέπουμε ότι η ταλάντωση συνεχίζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα



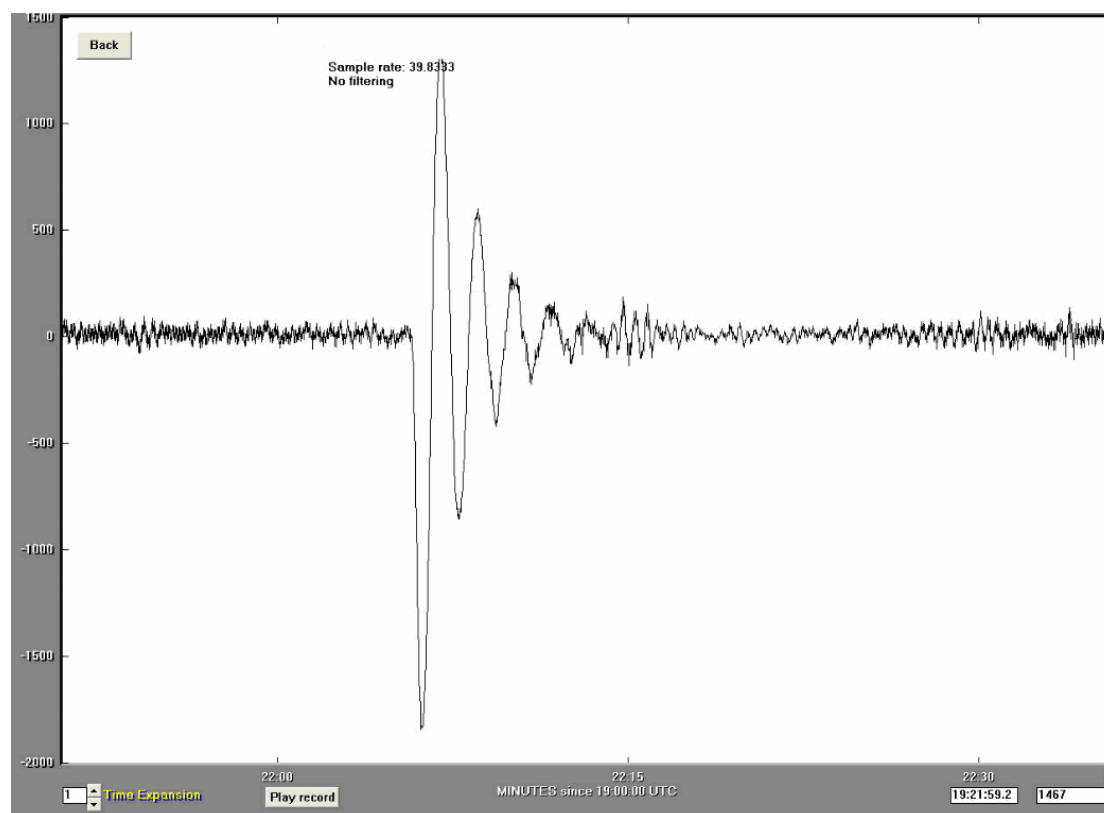
Σχήμα 5.8 Καταγραφή ταλάντωσης δίχως απόσβεση

Προκειμένου να βρούμε τη βέλτιστη απόσβεση εφαρμόσαμε την εξής διαδικασία: διπλώσαμε σε σχήμα Λ ένα κομματι χαρτί Α4 διαστάσεων 5Χ10εκ. Στη συνέχεια από ύψος 5εκ. Αφήναμε το χαρτί σε ελεύθερη πτώση έτσι ώστε να προσγειωθεί στο άκρη της κινούμενης λάμας ακριβώς απάνω από το σύμπλεγμα των μαγνητών. Καταγράψαμε την ταλάντωση κα μεταβάλλαμε το διάστημα μεταξύ των πλακών του συστήματος ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης μέχρις ότου πετύχουμε έναν συντελεστή απόσβεσης γύρω μεταξύ 0.7 και 0.8. Αυτό μεταφράζεται σε λόγο $A1/A2$ μεταξύ 22 και 35 όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9

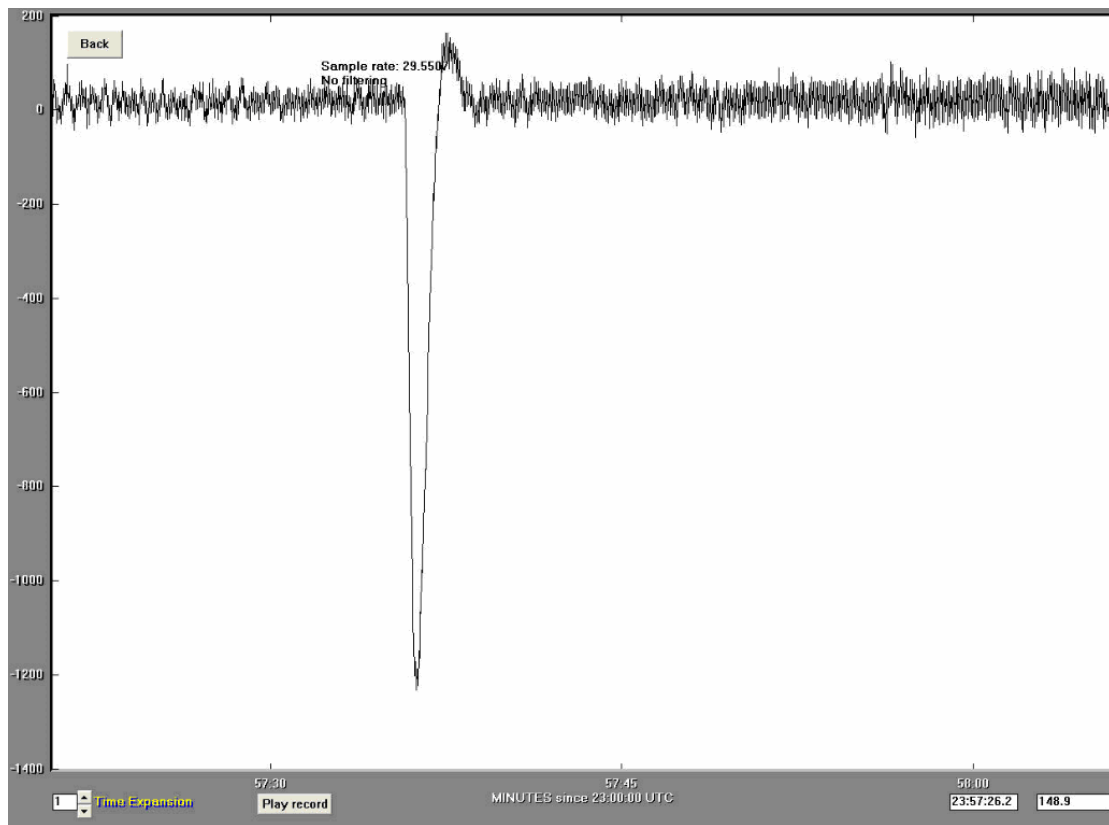


Σχήμα 5.9 Πλάτη σήματος που χρησιμοποιούνται για το υπολογισμό λόγου απόσβεσης.

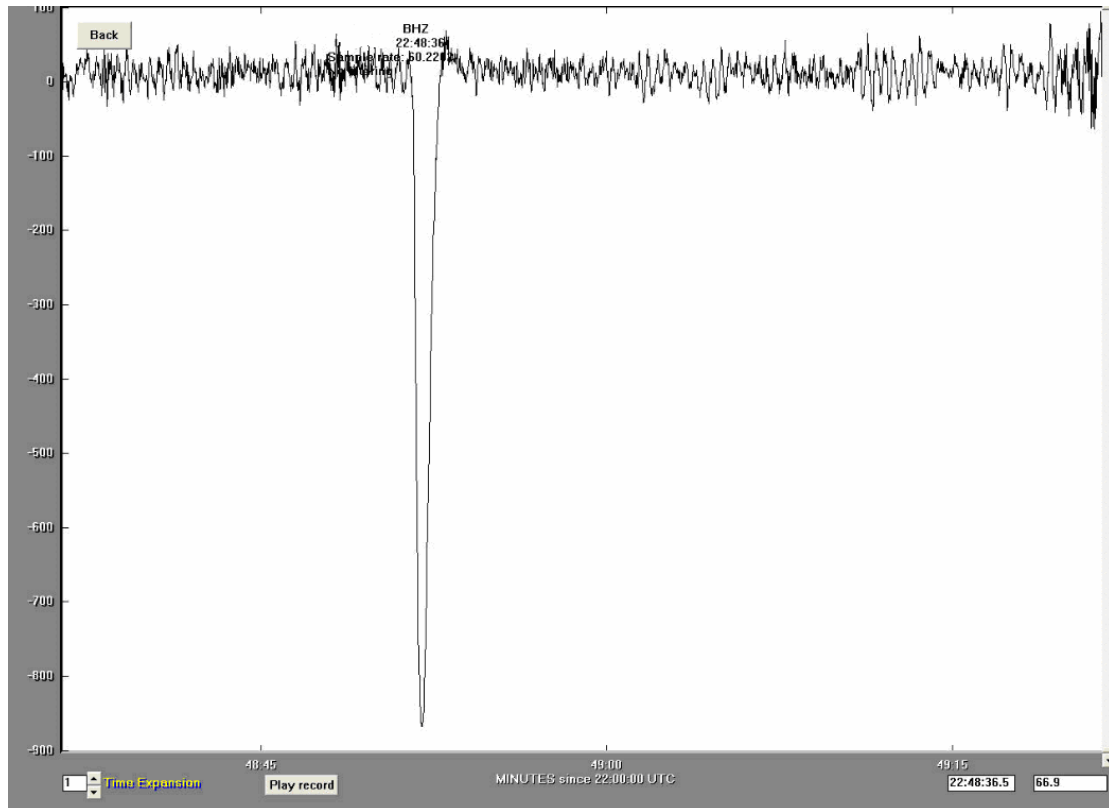
Οι τιμές (και οι αντίστοιχες κυματομορφές) που λάβαμε για διαφορες τιμές του λόγου απόσβεσης απεικονίζονται στα σχήματα 5.10 έως 5.12



Σχήμα 5.10 Σήμα υπό συντελεστή απόσβεσης 0.10



Σχήμα 5.11 Σήμα υπό συντελεστή απόσβεσης 0.51



Σχήμα 5.12 Σήμα υπό συντελεστή απόσβεσης 0.72

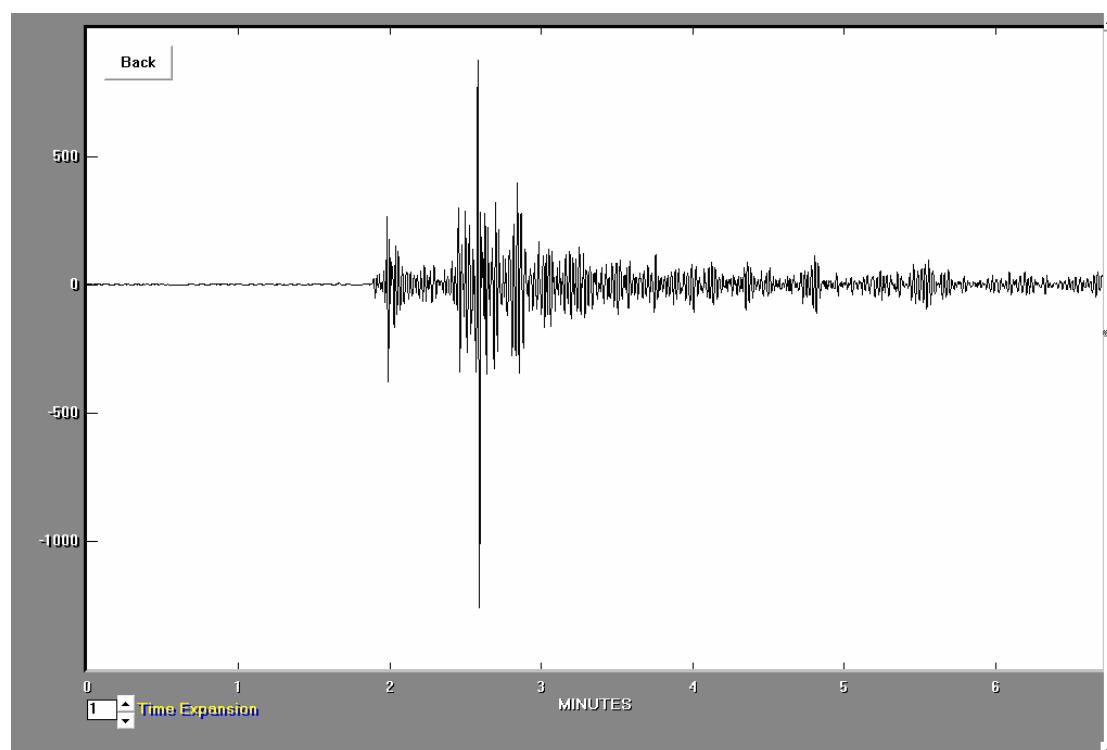
Η τιμή 0.72 ήταν η καλύτερη που πετύχαμε και αυτή ορίστηκε ως η σταθερά απόσβεσης για το συγκεκριμένο σύστημα. Η απόσταση μεταξύ των παραλληλων πλακών που αντιστοιχούσε σε αυτή την απόσβεση ήταν 34mm

5.3 Αποτελέσματα

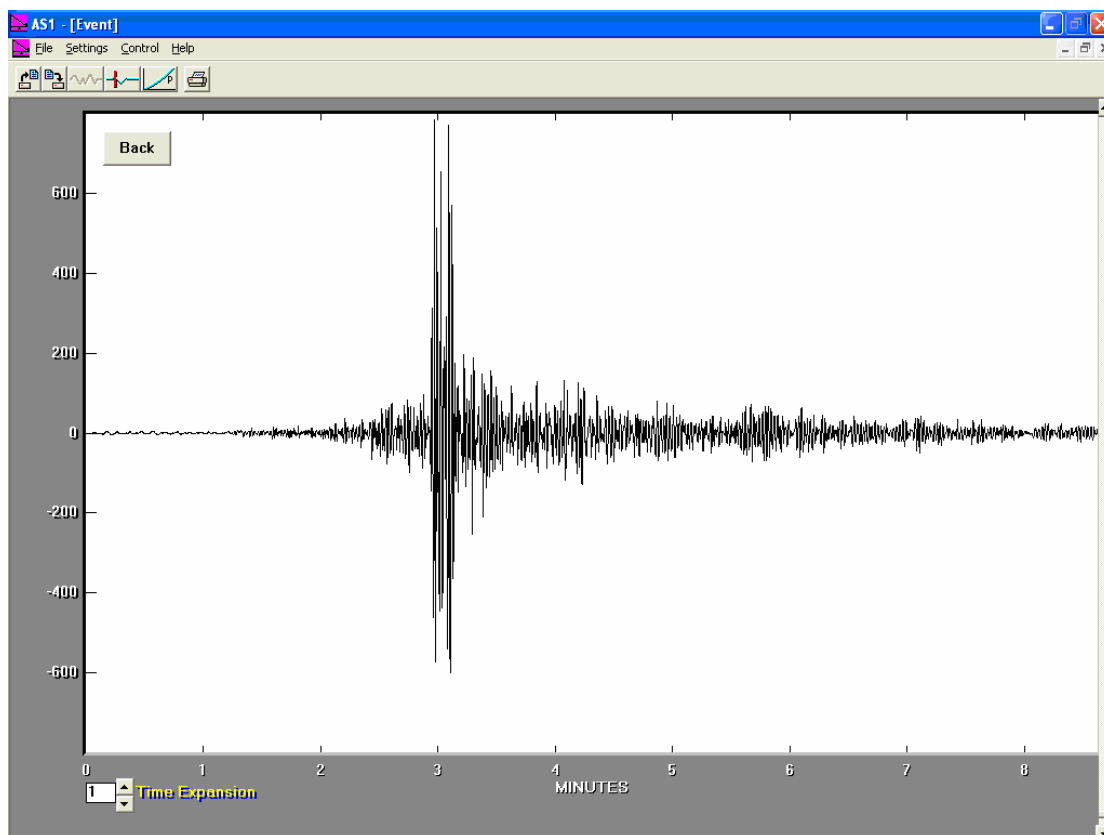
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζουμε τις βασικές διαδικασίες λειτουργίας και αποτελέσματα από πραγματικούς σεισμούς όπως καταγράφηκαν από το εκπαιδευτικό σεισμόμετρο. Επιπρόσθετα, επιχειρούμε μία πρώτη προσέγγιση για τον προσδιορισμό του επικέντρου με βάση τις προσεγγιστικές σχέσεις που αναφέρθηκαν νωρίτερα.

5.3.1 Καταγραφές

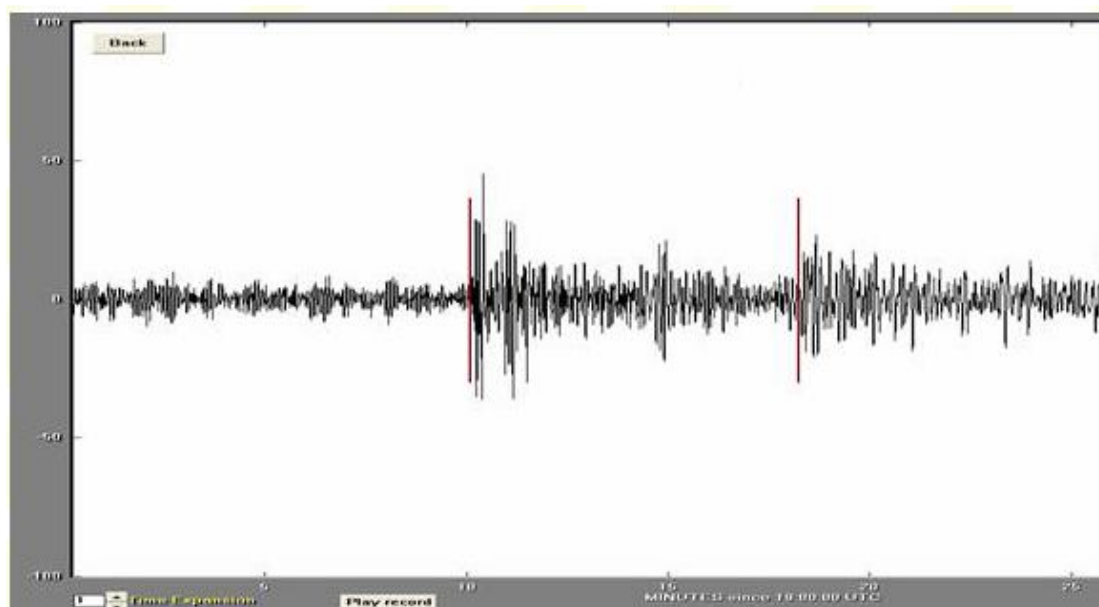
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζουμε καταγραφές για τρεις διαφορετικούς σεισμούς που καταγράφηκαν από το εκπαιδευτικό σειсмоγράφο



Σχήμα 5.13 Σεισμός μεγέθους 5 και επικεντρικής απόστασης 145χλμ



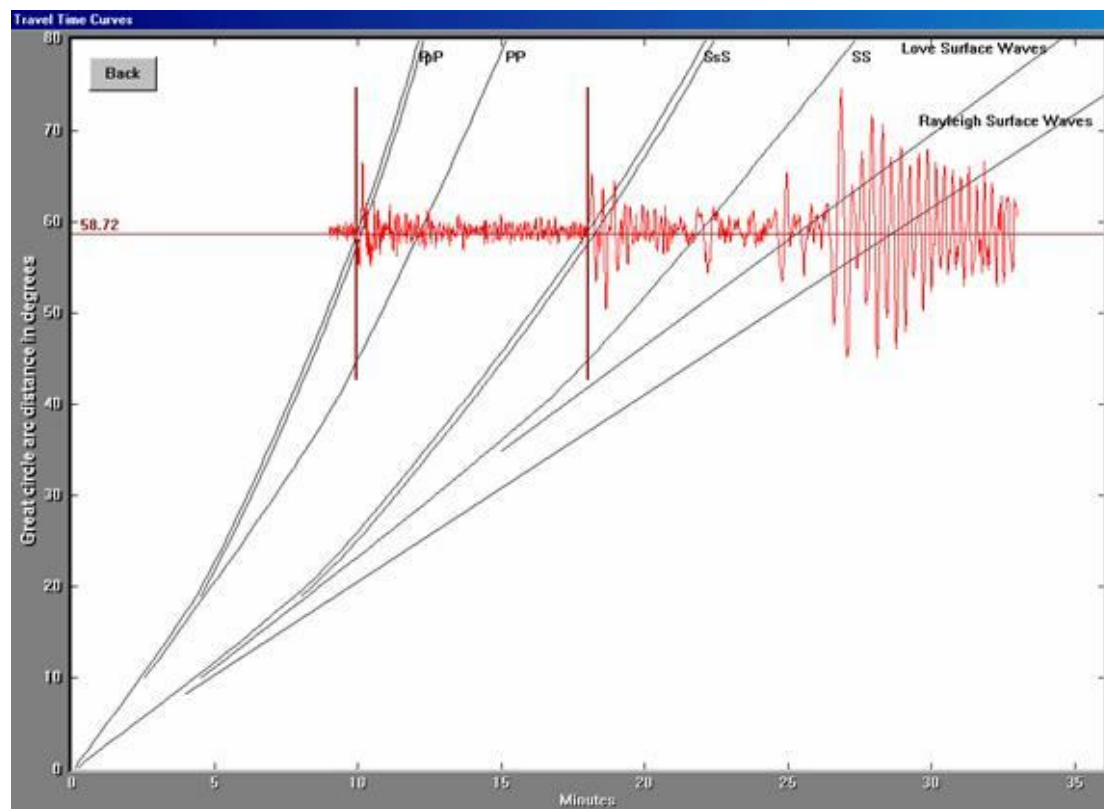
Σχήμα 5.14 Σεισμός μεγέθους 5.4 και επικεντρικής απόστασης 87χλμ



Σχήμα 5.15 Σεισμός μεγέθους 5.1 και επικεντρικής απόστασης 256χλμ

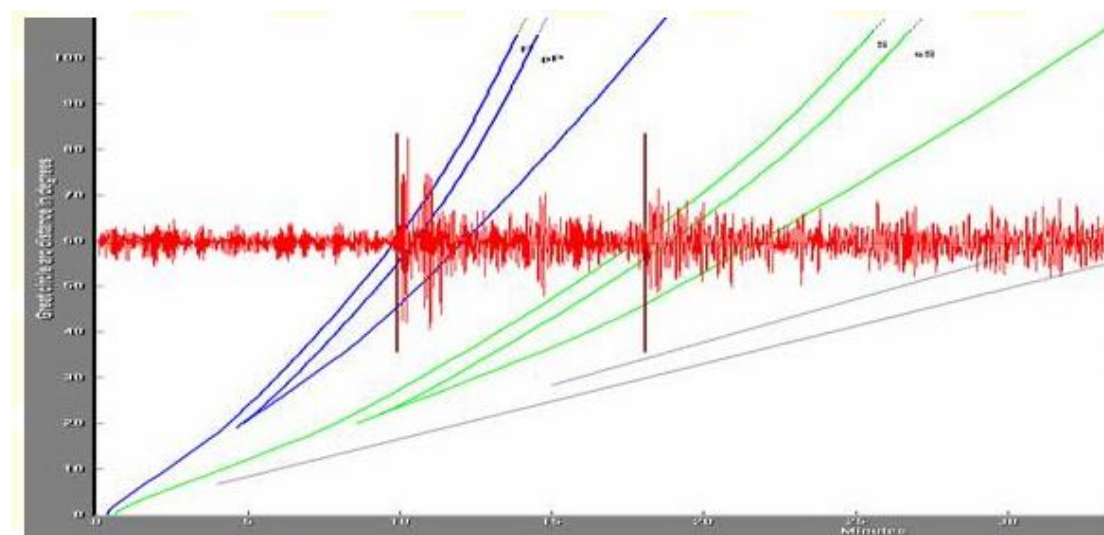
5.3.2 Προσδιορισμός επικέντρου σεισμού

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός του επικέντρου, γίνεται χρήση της αυτόματης ανίχνευσης των P και S κυμάτων. Σε μια τέτοια περίπτωση τα αποτελέσματα της αυτόματης αναγνώρισης θα είναι όπως στο σχήμα 5.16



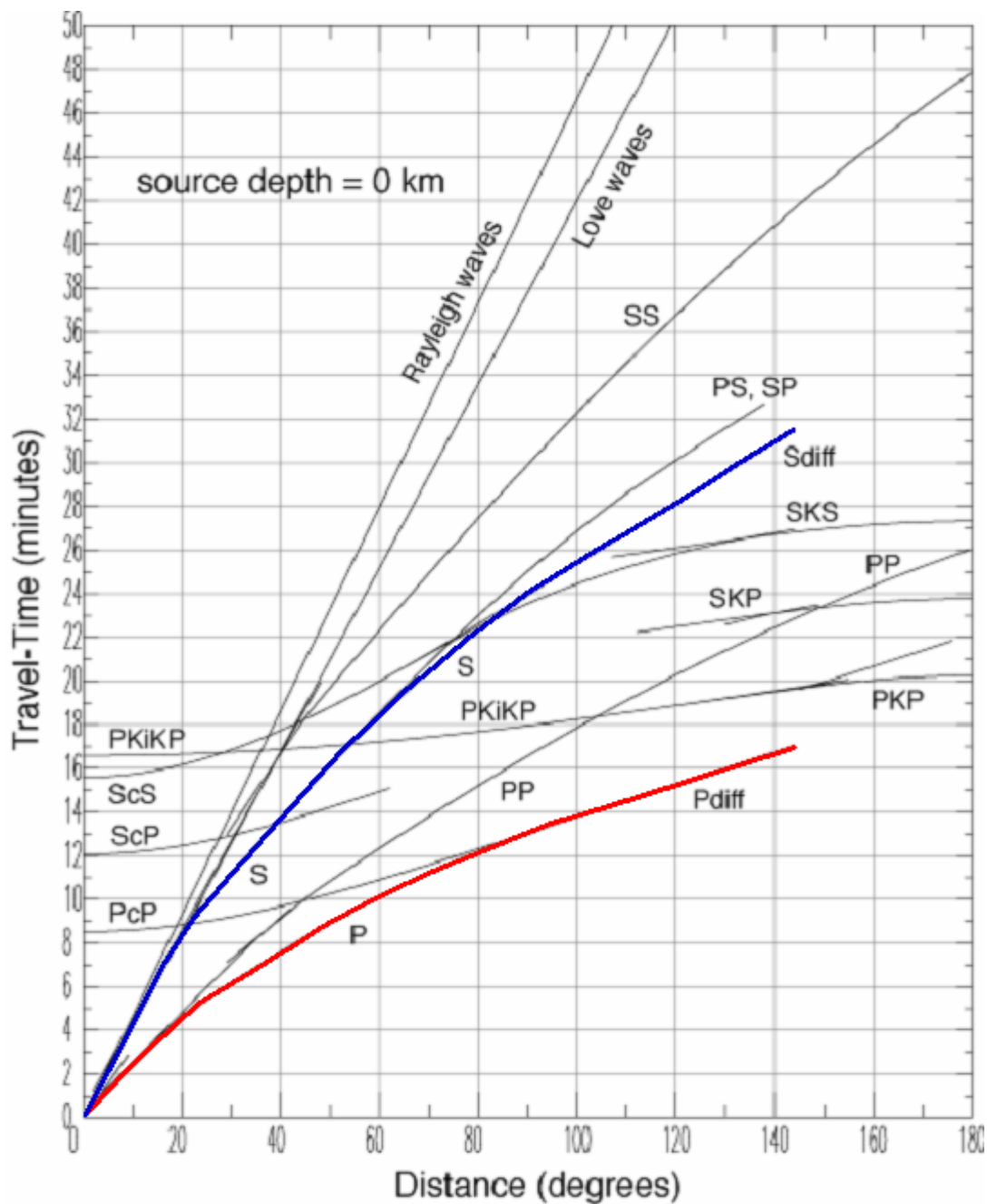
Σχήμα 5.16 Τυπική διάταξη αυτόματης αναγνώρισης διαφόρων τύπων κυμάτων σε σειсмоγράφημα

Για τον σεισμό του σχήματος 5.15, η αυτόματη ανίχνευση P και S κυμάτων μα έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα (σχήμα 5.17)

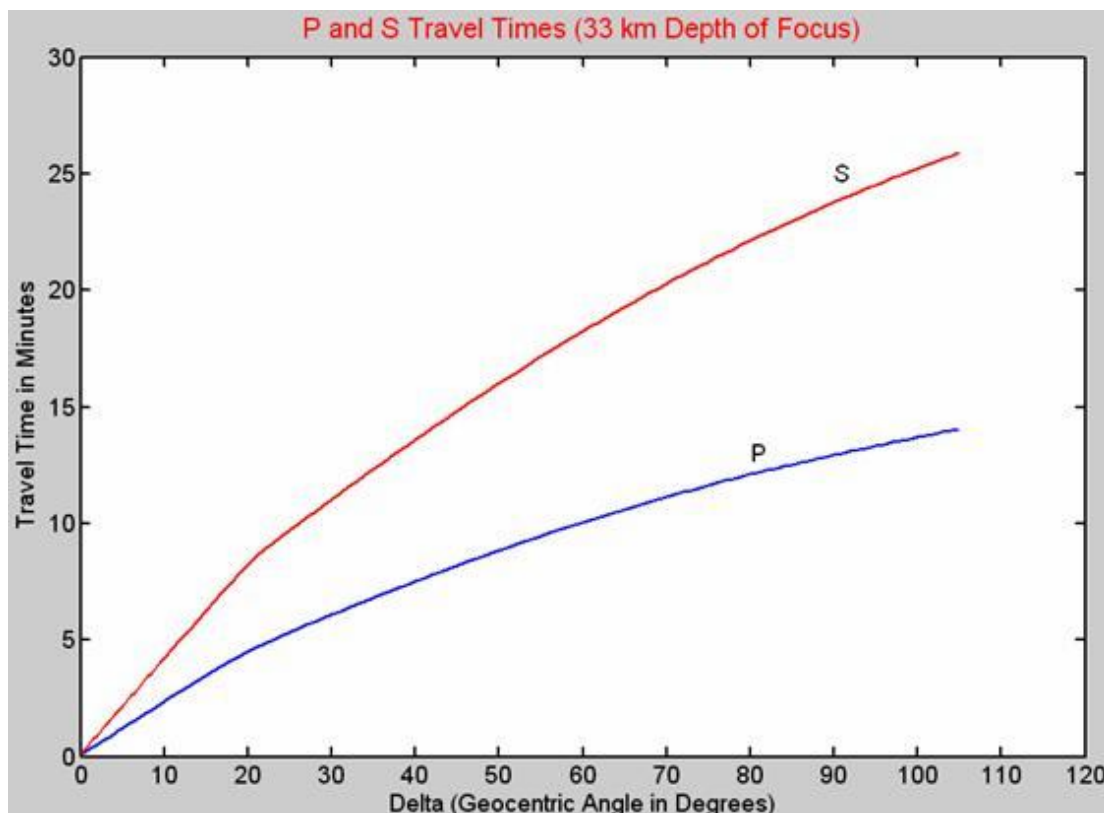


Σχήμα 5.17 Αυτόματης αναγνώρισης P και S κυμάτων για το σεισμό στο σχ.5.14

Με χρήση των καμπυλών χρόνου διαδρομής μπορούμε να υπολογίσουμε το επικέντρο του σεισμού από την καταγραφή του εκαπιδευτικού σειсмоγραφου. Τυπικές καμπύλες χρόνου απεικονίζονται στο σχήμα 5.18 ενώ μια απλουστευμένη μορφή της, στο σχήμα 5.19



Σχήμα 5.18 Καμπύλες χρόνου διάδρομής



Σχήμα 5.19 Απλουστευμένες καμπύλες χρόνου διάδρομής

5.4 Περίληψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα πρακτικά θέματα που αφορούν την ορθή και βέλτιστη λειτουργία του εκπαιδευτικού σεισμομέτρου. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν οι τρόποι αρχικής ρύθμισης των βασικών παραμέτρων του σειсмоγράφου δηλαδή η ρύθμιση του ADC, ο υπολογισμός του μήκους του ελατηρίου, η ρύθμιση της απόσβεσης και του λογισμικού καταγραφής. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τυπικά δείγματα καταγραφών που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Παρά την απλότητα της κατασκευής τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για εκπαιδευτική χρήση, ο παρόν σεισμογράφος μπορεί να προσφέρει ικανοποιητικότερες απεικονίσεις του κατακόρυφου σεισμικού κύματος που καταγράφει.

6. Συμπεράσματα – Μελλοντικές Βελτιώσεις

6.1. Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε ως σκοπό της κατασκευή σειсмоγράφου μίας συνιστώσας για εκπαιδευτική χρήση. Ξεκινώντας από τις βασικές αρχές που διέπουν την οργανολογία της σεισμολογικής επιστήμης, παρουσιάσαμε οτιδήποτε εμπλέκεται ή αφορά τα τμήματα του προς κατασκευή, σειсмоγράφου. Η παρουσίαση μας δεν περιορίστηκε μόνο στις ιστορικές αναφορές αλλά προσπαθήσαμε να καλύψουμε και τις σύγχρονες τάσεις και πρακτικές προκειμένου να υπάρχει και ένα μέτρο σύγκρισης του τι θα κατασκευάζαμε και σε τι βαθμό απέχει από τα state-of-the-art αντίστοιχα όργανα.

Η αρχική μας προσέγγιση στην κατασκευή του σεισμομέτρου ήταν με το να υλοποιήσουμε ένα ήδη γνωστό σχέδιο αφ' ενός για να εξοικωθούμε με τις απαραίτητες κατασκευαστικές λεπτομέρειες και αφετέρου για να αξιολογήσουμε τις ανάγκες που προκύπτουν σε ένα τέτοι εγχείρημα. Η εμπειρία που αποκτήθηκε από αυτό το στάδιο, βοήθησε ώστε στη συνέχεια να προταθεί, σχεδιαστεί και υλοποιηθεί μία βελτιωμένη έκδοση του αρχικού σεισμομέτρου, η οποία στόχευσε σε τρία σημαντικά σημεία:

- στην αλλαγή του ηλεκτρονικού μέρους του σεισμογράφου ώστε να είναι συμβατός και υλοποιήσιμος με βάση τα δεδομένα της ελληνικής αγοράς αναταλλακτικών
- στην μετατροπή του αισθητήρα με χρήση ισχυρότερων και αποδοτικότερων μαγνητών καθώς και την αντικατάσταση του πηνιού με αισθητήρα hall
- στην αναβάθμιση του συστήματος απόσβεσης με αντικατάσταση της χρήσης υγρού με χρήση ηλεκτομαγνητικής απόσβεσης
- στη συγγραφή και χρήση ελεύθερου λογισμικού για την καταγραφή, αποθήκευση, επεξεργασία και διάχυση των καταγεγραμμένων σεισμογραμμάτων

Μετα το πέρας της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποδεικνύεται ότι η κατασκευή σεισμογράφου μίας συνιστώσας για εκπαιδευτική χρήση είναι εφικτή και με κόστος ιδιαίτερα χαμηλό. Με δεδομένη τη χρήση συνηθών υλικών του εμπορίου και με χρόνο εγκατάστασης που κυμαίνεται μεταξύ λίγων ωρών, τα εκπαιδευτικά οφέλη που αποκομίζονται είναι ιδιαίτερα υψηλά

6.2 Μελλοντικές Βελτιώσεις

Οι μελλοντικές βελτιώσεις της παρούσας εργασίας αφορούν κυρίως τον τρόπο χρήσης του σε μαζικό επίπεδο καθώς επίσης και την αυτοματοποίηση της λειτουργίας του. Συγκεκριμένα, αντικείμενο μελλοντικών βελτιώσεων θα μπορούσε να ήταν η:

- i. Δημιουργία εκπαιδευτικών ασκήσεων για διάφορες βαθμίδες (δημοτικό, γυμνάσιο, λύκειο)
- ii. Εγκατάσταση σε διάφορα σχολεία και δημοσίευση των καταγραφών σε ιστοσελίδα σε πραγματικό χρόνο
- iii. Δημιουργία ιστοσελίδας συλλογής και απεικόνισης δεδομένων και σεισμικών γεγονότων για όλες τις εγκαταστάσεις
- iv. Δημιουργία λογισμικού αυτοματοποιημένων σεισμολογικών διαδικασιών (ανίχνευση φάσης, υπολογισμός φάσματος κ.λ.π) για χρήση σε εργαστήριο (π.χ. μετρολογίας) με τη βοήθεια λογισμικών που ήδη διδάσκονται (matlab, origin, Visual Basic)
- v. Αναμόρφωση του ADC προκειμένου να μπορεί να λαμβάνει αυτόματα βάση χρόνου από δέκτη GPS

Βιβλιογραφία

- Κιοσκερίδης, (2008), «Σημειώσεις ηλεκτρονικών μετρήσεων», ΤΕΙ Θεσ/κης
- Bath, M. (1979). *Introduction to seismology*. Birkhauser Verlag, 415 pp
- Bormann, P. (editor) (2002). *New manual of seismological observatory practice (NMSOP)*, GeoForschungsZentrum Potsdam.
- Haskov, J., Alguacil, GT., 2002, “Instrumentation in Earthquake Seismology”, Springer
- Hutton, L. K. and D. Boore (1987). The Ml scale in Southern California. *Bull. Seism. Soc.Am.* 77 2074-2094.
- LaCoste, L. J. B. (1934). A new type long period seismograph, *Physics*, 5, 178-180.
- Lay, T and T. C. Wallace (1995). *Modern global seismology*, Academic Press, 521 pp.
- Lee, W. H. K. and S. W. Stewart (1981). *Principles and applications of microearthquake networks*, Academic Press.
- Lee, W. H. K. (1989). *Toolbox for seismic data acquisition, processing and analysis. IASPEI software library, Vol. 1*. Published by IASPEI in collaboration with Seismological Society of America.
- Lee, Y.W. (1967). *Statistical Theory of Communication*. John Wiley & Sons, New York, 507 pp.
- Riedesel, M., R. D. Moore and J. A. Orcutt (1990). Limits of sensitivity of inertial seismometers with velocity transducers and electronic amplifiers. *Bull. Seism. Soc. Am.* 80, 1725-1752.
- Rodgers, P.W. (1992) a. Frequency limits for seismometers as determined from signal-to-noise ratios. Part 1. The electromagnetic seismometer. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 1071-1098.
- Shearer, P. M. (1999). *Introduction to seismology*. Cambridge University Press.
- Scherbaum, F. (1996). *Of poles and zeros, fundamentals of digital seismology*. Kluwer Academic Publishers.
- Wilmore, P. L. editor (1979). *Manual of seismological observatory practice*, Report SE-20, World Data Center A for Solid Earth Geophysics, US Dep. of Commerce, NOAA.
- Wielandt, E. (2001). Seismic sensors and their calibrations. In NMSOP

<http://jclahr.com/science/psn/as1/> (τελευταία πρόσβαση στις 12/12/2008)

<http://www.dataq.com/products/startkit/di194rs.htm> (τελευταία πρόσβαση στις 12/12/2008)