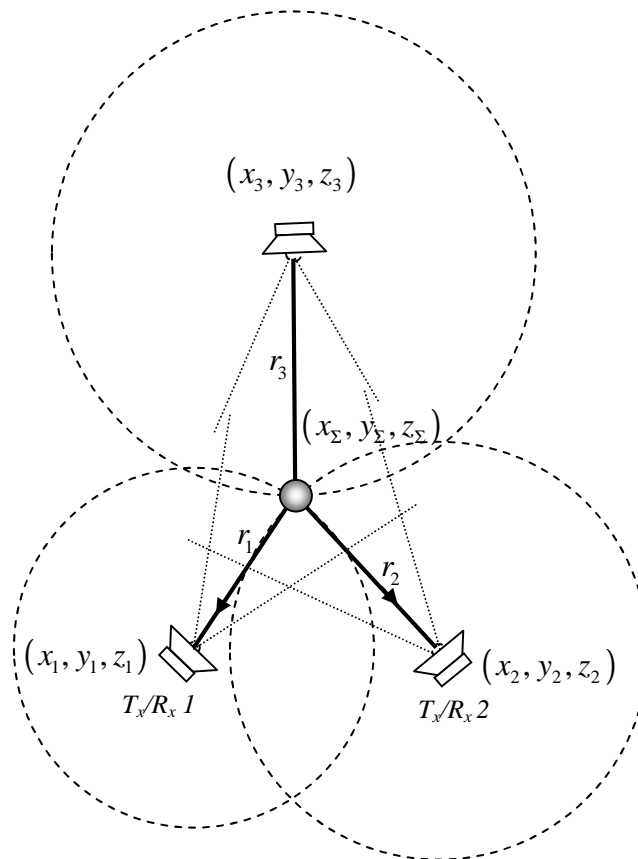


ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΣΤΕ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
Πτυχιακή εργασία

Μέτρηση Φυσικών Μεγεθών Με Χρήση Υπερήχων



Σπουδαστές:
Ζαβιτσάνος Ζώης
Τζιτζιλώνης Σπυρίδων

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΜΒΥΣΑΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2012

Εισαγωγή

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με τη διάδοση του ήχου στα υλικά μέσα είτε πρόκειται για αέρια, είτε για υγρά είτε στερεά. Η διάδοση του ήχου στα υλικά σώματα εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού μέσου όπως η πυκνότητα του, το μέτρο της ελαστικότητας ή ακαμψίας του κλπ.

Παράλληλα ο ήχος ως κύμα φέρει όλα τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, και παρατηρούνται κατά τη διάδοσή του φαινόμενα όπως η ανάκλαση και η διάθλαση.

Στην εργασία αυτή μελετούμε αρχικά σε θεωρητικό επίπεδο τη σχέση που υπάρχει μεταξύ των φυσικών σταθερών που χαρακτηρίζουν τα υλικά σώματα, και των φαινομένων που παρατηρούνται κατά τη διάδοση του ήχου σε αυτά. Με τον τρόπο αυτό μας δίνεται η δυνατότητα να υπολογίσουμε την τιμή κάποιων από αυτές τις φυσικές σταθερές.

Στη συνέχεια προτείνουμε κάποιες εφαρμογές που μπορούν να υλοποιηθούν στους εργαστηριακούς χώρους του τμήματος και να πραγματοποιηθούν ως πειραματικές διαδικασίες στα εργαστήρια της φυσικής, της αντοχής υλικών και της δυναμικής ρευστών.

Τέλος γίνεται μια αναφορά στα συγκριτικά πλεονεκτήματα της χρήσης υπερήχων έναντι άλλων μεθόδων καθώς επίσης και στα πιθανά προβλήματα και δυσκολίες που πιθανά θα αντιμετωπίσουμε από τη χρήση αυτών.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	1
1.1 Εισαγωγή σε βασικά στοιχεία της θεωρίας των υπερήχων	1
1.2 Βασικές αρχές διάδοσης υπερήχων	4
1.3 Η ταχύτητα του ήχου	5
1.4 Ακουστική εμπέδηση και Ένταση του ήχου	6
1.4.1 Ακουστική εμπέδηση	6
1.4.2 Ένταση του ήχου	7
1.5 Ανάκλαση – διάδοση – απορρόφηση και εξασθένηση υπέρηχων	8
1.5.1 Ορισμοί	8
1.5.2 Υπολογισμός συντελεστών ανάκλασης και διάδοσης	9
1.5.3 Απορρόφηση από υλικά	10
1.5.4 Εξασθένηση υπερήχων λόγω απορρόφησης από το μέσο διάδοσης, εύρους δέσμης και μετεωρολογικών φαινομένων	11
1.6 Εκπομπή και λήψη υπέρηχων	14
1.6.1 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	14
1.6.2 Πιεζοηλεκτρικοί υπερηχητικοί αισθητήρες	15
1.6.3 Άλλα είδη υπερηχητικών μετατροπέων	17
1.6.4 Κατασκευή Πιεζοηλεκτρικού Μετατροπέα	18
1.6.5 Διέγερση του μετατροπέα και χαρακτηριστικά της δέσμης	19
1.7 Εφαρμογές υπερήχων	22
Κεφάλαιο 2	23
2.1 Μέτρηση απόστασης	23
2.1.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ	23
2.1.2 Το φαινόμενο της αντήχησης.	24
2.2 Επιλογή ενός υπερηχητικού αισθητήρα για μέτρηση απόστασης	28
2.2.1 Ταχύτητα του ήχου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία	29
2.2.3 Εξασθένηση του ήχου σε συνάρτηση με την συχνότητα λειτουργίας και την υγρασία	29
2.2.4 Παρουσία θορύβου περιβάλλοντος	31
2.2.5 Ισχύς της πίεσης σε συνάρτηση με την συχνότητα και την απόσταση από τον πομπό	31
2.2.6 Ισχύς της πίεσης επιστροφής λόγω ανάκλασης από το στόχο – Επίπεδα ηχούς.	32
2.2.7 Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των υπερηχητικών μετατροπέων.	35

2.3 Προσδιορισμός θέσης	36
2.3.1 Τριγωνομετρικός υπολογισμός (Triangulation)	36
Κεφάλαιο 3	44
3. Μετάδοση Ηχητικού Κύματος	44
3.1 Εισαγωγή	44
3.2 Ηχητικά κύματα σε μη-πιεζοηλεκτρικά υλικά. Μονοδιάστατη θεωρία.	45
3.2.1 Τάση	46
3.2.2 Μετατόπιση και Παραμόρφωση	47
3.2.3 Νόμος Hooke, θεωρία της ελαστικότητας	48
3.2.4 Εξισώσεις κίνησης	48
3.2.5 Διατήρηση της μάζας	48
3.2.6 Η εξίσωση κύματος και ο ορισμός της σταθεράς μετάδοσης	49
3.2.7 Ενέργεια	50
3.2.8 Το θεώρημα του Poynting	51
3.2.9 Απώλειες	52
3.3 Μετάδοση του κύματος στο υλικό	54
3.3.1 Σχέσεις ανάμεσα στους υπερήχους και τις ιδιότητες ενός υλικού	58
3.3.2 Μέτρο ελαστικότητας	58
3.3.3 Λόγος Poisson	61
3.3.4 Συντελεστής λ'	61
3.3.5 Θερμοκρασιακό μοντέλο "Debye"	62
3.3.6 Ισόθερμο μέτρο ελαστικότητας	63
Κεφάλαιο 4	65
4. Υπέρηχοι Doppler	65
4.1 Φαινόμενο Doppler.	65
4.1.1 Κινούμενος δέκτης	65
4.1.2 Κινούμενη πηγή	67
4.2 Ανάκλαση από κινούμενο στόχο	69
4.3 Μέτρηση ροής υγρών	70
4.3.1 Μετρητές παροχής χρόνου μετάβασης.	71
Κεφάλαιο 5	74
5. Εφαρμογές υπερήχων	74
5.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός	74
5.2 Εφαρμογές για το εργαστήριο φυσικής	77

5.2.1 Μέτρηση στιγμιαίας και μέσης ταχύτητας.	77
5.2.2 Μέτρηση στιγμιαίας ταχύτητας εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο Doppler.	81
5.3 Εφαρμογές για το εργαστήριο μηχανικής.	84
5.3.1 Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας E , του διατμητικού συντελεστή ελαστικότητας G , του λόγου <i>Poisson</i> , καθώς και την ταυτοποίηση του υλικού κατασκευής ενός μεταλλικού δοκιμίου.	84
5.3.1 Εντοπισμός ατελειών σε υλικό	89
5.4 Εφαρμογές για το εργαστήριο μηχανικής ρευστών.	92
5.4.1 Μέτρηση παροχής και ταχύτητας ροής ρευστού	92
Κεφάλαιο 6	95
6.1 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι: γενικές αρχές, έννοιες & εφαρμογές	95
6.2 Η χρήση των υπερήχων στους ΜΚΕ	98
6.3 Υλικό Σύζευξης (COUPLANT).	100
6.4 Πλεονεκτήματα πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων	101
6.5 Ακρίβεια των μετρήσεων και περιορισμοί.	102

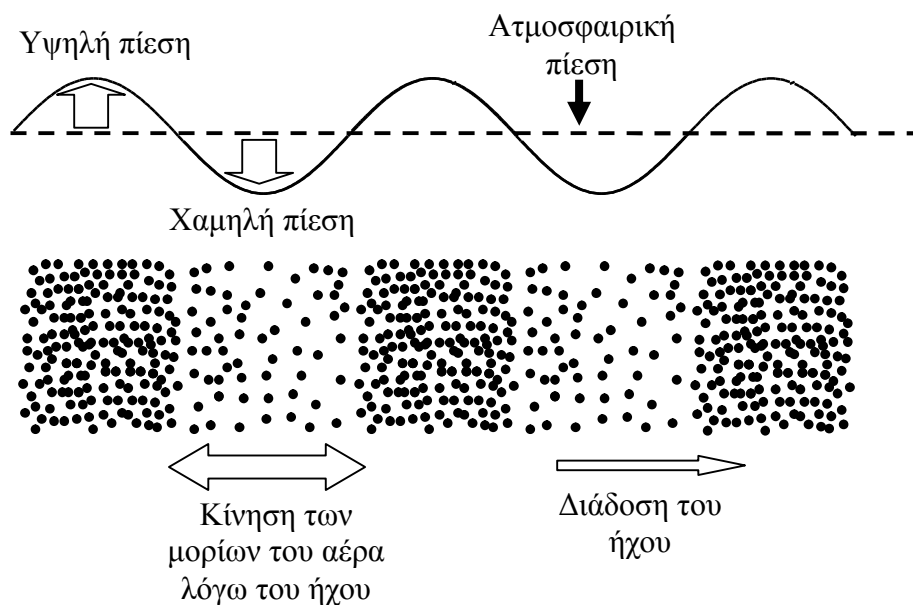
Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή σε βασικά στοιχεία της θεωρίας των υπερήχων

Τα ηχητικά κύματα ως υλικά κύματα σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά απαιτούν την ύπαρξη ελαστικού μέσου για τη διάδοσή τους. Είναι συνήθως διαμήκη κύματα αφού η ταλάντωση των σωματιδίων του μέσου (π.χ. τα μόρια ενός αερίου) γύρω από τη θέση ισορροπίας τους πραγματοποιείται κατά τη διεύθυνση της διάδοσής τους. Ο ήχος μπορεί να διαδοθεί σε αέρια, υγρά και στερεά μέσα (στα τελευταία και μόνο μπορεί να είναι και εγκάρσιο κύμα).

Το κύμα διαδίδεται σαν μια διαταραχή των σωματιδίων του μέσου η οποία συντηρεί τη διάδοση του κύματος (εξαναγκασμένη ταλάντωση). Η διάδοση ενός ηχητικού κύματος αναπαρίσταται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Μετατόπιση των σωματιδίων για ένα διαδιδόμενο ηχητικό κύμα [13].

Τα σωματίδια του μέσου αρχικά βρίσκονται σε ηρεμία και είναι ομοιόμορφα τοποθετημένα όταν δεν υφίσταται κάποια κυματική διαταραχή. Λόγω της παρουσίας ηχητικού κύματος τα σωματίδια θα ταλαντωθούν γύρω από τη μέση θέση τους. Η

ταλάντωση αυτή πραγματοποιείται κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος, καθιστώντας το ένα διάμηκες κύμα (longitudinal wave). Θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι ουσιαστικά δεν υφίστανται συνολική μετατόπιση (net displacement) των σωματιδίων και μεταφορά μάζας. Το ηχητικό κύμα επιδρά ως απλή διαταραχή στο μέσο.

Η απόσταση που διανύεται από τα σωματίδια κατά την διάδοση του ήχου καλείται «σωματιδιακή» μετατόπιση και συνήθως είναι της τάξης του 1 nm. Συνεπώς, η ταχύτητα των σωματιδίων που ταλαντώνονται καλείται «σωματιδιακή ταχύτητα». Θα πρέπει να τονιστεί ότι, η ταχύτητα αυτή διαφέρει από τον ρυθμό διάδοσης της ενέργειας σ' ένα μέσο, η οποία στην πραγματικότητα ορίζεται σαν «φασική ταχύτητα» και η οποία παίρνει αρκετά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την «σωματιδιακή ταχύτητα». Τελικά, παρά το γεγονός ότι τα σωματίδια κινούνται μερικά nm, η διαταραχή που προκαλούν μεταδίδεται σε άλλα σωματίδια του μέσου σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση.

Η ταχύτητα διάδοσης αυτής της διαταραχής εξαρτάται από το μέσο και δίνεται από τη σχέση:

$$c = \sqrt{\frac{1}{r_0 \cdot k}} \quad (1.1)$$

όπου r_0 είναι η μέση πυκνότητα και k είναι η αδιαβατική συμπιεστότητα (adiabatic compressibility). Υποθέτοντας ότι δεν υφίστανται καθαρή μεταφορά ενέργειας από το κύμα στο μέσο. Η συμπιεστότητα εκφράζεται σε m^2 / N και είναι περίπου $457 \cdot 10^{-12} m^2 / N$ στο νερό, καθιστώντας την ταχύτητα του ήχου ίση με 1480 m/s.

Η παραπάνω έκφραση, προϋποθέτει επίσης ότι η διαταραχή της πίεσης που προκαλείται από το κύμα είναι μικρή, συγκρινόμενη με την πίεση σε ισορροπία (equilibrium pressure), με αποτέλεσμα η διάδοση να είναι γραμμική. Η υπόθεση αυτή υφίσταται πραγματικά για τις περισσότερες περιπτώσεις των ιατρικών υπερήχων.

Το μήκος κύματος λ είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών χαμηλών ή υψηλών μετώπων πίεσης του ηχητικού κύματος (στο διάστημα της οποίας επιτυγχάνεται ένας κύκλος). Η περίοδος T είναι ο χρόνος στον οποίο επιτυγχάνεται αυτός ο κύκλος. Το μήκος κύματος συνδέεται με την συχνότητα και την ταχύτητα σύμφωνα με τη σχέση:

$$c = I \cdot f \quad \text{ή} \quad c = \frac{I}{T} \quad (1.2)$$

όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου.

Τα ηχητικά κύματα κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τη συχνότητά τους f σε τρεις περιοχές:

την *υποηχητική* $f < 20\text{Hz}$, τέτοιοι ήχοι παράγονται στην φύση από μηχανικά επιφανειακά κύματα ή από σεισμικά κύματα.

την *ακουστική* $20\text{Hz} < f < 20\text{kHz}$, που αποτελεί ουσιαστικά το εύρος των αντιληπτών από το ανθρώπινο αυτί ηχητικών συχνοτήτων.

την *υπερηχητική* περιοχή $20\text{kHz} < f < \infty 3\text{GHz}$, ήχοι οι οποίοι στη φύση παράγονται και γίνονται αντιληπτοί από κάποια ζώα όπως τα δελφίνια και οι νυχτερίδες.

Υπέρηχος λοιπόν είναι μια μηχανική ταλάντωση/δόνηση της ύλης με συχνότητα πάνω από το ακουστικό όριο (audible range 20 kHz).

Στην ανάλυση που ακολουθεί για την περιγραφή των ηχητικών κυμάτων χρησιμοποιούμε την ακουστική πίεση (p). Με τον όρο ακουστική πίεση εννοούμε τη δημιουργούμενη υπερπίεση ή υποπίεση (σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση) που δημιουργεί το υπερηχητικό κύμα, κατά τη διάδοση του. Σε αντίθεση με την ακουστική πίεση με τον όρο στατική πίεση (P) εννοούμε την στατική πίεση του μέσου διάδοσης, που για την περίπτωση διάδοσης του ήχου στον αέρα είναι η ατμοσφαιρική πίεση.

Άλλες ποσότητες που χρησιμοποιούμε είναι :

- Το μήκος κύματος (I) που είναι η απόσταση μεταξύ δύο μέγιστων η ελαχίστων μετώπων πίεσης,
- Τον γωνιακό ή κυκλικό κυματάριθμο (k) που ισούται με $2\pi / I$
- Την συχνότητα τον ήχου (f) που είναι η συχνότητα ταλάντωσης των σωματιδίων του ελαστικού μέσου λόγω της διάδοσης του υπερηχητικού κύματος,
- Την ταχύτητα των σωματιδίων (u) που είναι η ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου διάδοσης.
- Την ταχύτητα του ήχου (c) που είναι η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής (ταχύτητα του κύματος) στο υλικό μέσο.

1.2 Βασικές αρχές διάδοσης υπερήχων

Ένα κύμα που διαδίδεται μόνο κατά μια διεύθυνση π.χ. τη διεύθυνση του άξονα x θεωρείται επίπεδο. Επίπεδο μπορεί να θεωρηθεί ένα κύμα όταν αυτό παράγεται από πηγή της οποίας η επιφάνεια εκπομπής είναι ένα επίπεδο για μικρές αποστάσεις, ή πρακτικά από μια σημειακή πηγή που βρίσκεται σε πολύ μεγάλη (άπειρη θεωρητικά) απόσταση, όπου οι σφαιρικές επιφάνειες εκφυλίζονται σε επίπεδες. Αποδεικνύεται ότι για επίπεδα κύματα που διαδίδονται σε μέσο χωρίς απώλειες η πίεση του ήχου ικανοποιεί τη σχέση

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (1.3)$$

Η λύση της μονοδιάστατης κυματικής εξίσωσης έχει τη μορφή:

$$p(t) = p_0 e^{i(\omega t \pm kx)} \quad (1.4)$$

Η παραπάνω λύση παριστά δύο κύματα που διαδίδονται σε αντίθετες διευθύνσεις: κατά τη διεύθυνση $+x$ και τη διεύθυνση $-x$.

Αν μας ενδιαφέρει μόνο η διεύθυνση $+x$ τότε η λύση παίρνει τη μορφή:

$$p(t) = p_0 e^{i(\omega t - kx)} \quad (1.5)$$

Λόγω του ότι οποιαδήποτε παρατηρήσιμη ποσότητα είναι πάντα πραγματική, το πραγματικό μέρος της παραπάνω λύσης μπορεί να γραφεί με την μορφή:

$$p(t) = p_0 \cos(\omega t - kx) \quad (1.6)$$

Στην παραπάνω σχέση το k είναι ο κυματάριθμος, λ το μήκος κύματος και ω η κυκλική συχνότητα. Τα μεγέθη αυτά συνδέονται με τις γνωστές σχέσεις:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi f = \frac{\omega}{c} \quad (1.7)$$

Ένας άλλος τύπος κύματος που παίζει σημαντικό ρόλο στην ακουστική των υπερήχων είναι το σφαιρικό κύμα το οποίο σε ένα πολικό σύστημα συντεταγμένων ορίζεται από την σχέση

$$p(r, t) = \frac{P_0}{r} \cos(\omega t - kr) \quad (1.8)$$

1.3 Η ταχύτητα του ήχου

Η ταχύτητα του ήχου που εξαρτάται από το μέσο διάδοσης για την περίπτωση διαμηκών κυμάτων που διαδίδονται σε αέρια δίνεται από τη σχέση:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M_r}} \quad (1.9)$$

Όπου c , η ταχύτητα του ήχου

T , η απόλυτη θερμοκρασία του αερίου,

R , σταθερά ($R = 8,317 \text{ J} \cdot \text{mole}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

γ , ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων υπό σταθερά πίεση και υπό σταθερό όγκο (για τον αέρα η τιμή $\gamma = 1,4$ είναι ικανοποιητική),

M_r , το μοριακό βάρος του μέσου διάδοσης (για τον αέρα η τιμή 29 είναι ικανοποιητική),

ρ , η πυκνότητα του μέσου διάδοσης

B , το μέτρο συμπιεστότητας των ρευστών.

Η παραπάνω σχέση για τον αέρα στη θερμοκρασία των 0°C δίνει ταχύτητα του ήχου:

$$c = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 8317 \cdot 273,15}{29}} = 331 \text{ m/s}$$

Στην περίπτωση που υπάρχει υγρασία τα μόρια των υδρατμών μεταβάλλουν το μέσο μοριακό βάρος του αέρα και συνεπώς μεταβάλλουν και την ταχύτητα του ήχου. Στην περίπτωση παρουσίας υγρασίας στην ατμόσφαιρα αποδεικνύεται ότι η ταχύτητα του ήχου δίδεται από τη σχέση:

$$c_w = \sqrt{1 - \frac{P_a}{P_0} \left(\frac{g_w}{g_a} - \frac{5}{8} \right)} \quad (1.10)$$

Όπου c_w , η ταχύτητα του ήχου σε υγρό περιβάλλον,

P_a , η μερική πίεση των ατμών

P_0 , η ατμοσφαιρική πίεση

g_a , g_w , ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων για τον αέρα και το νερό

Προσεγγιστικά για την ταχύτητα του ήχου σε οποιαδήποτε θερμοκρασία με ικανοποιητική προσέγγιση μπορούμε να γράψουμε:

$$c = 331 + 0,6q$$

Όπου q η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου

Επίσης όταν απαιτείται προσεγγιστικός προσδιορισμός της ταχύτητας του ήχου σε μία θερμοκρασία (T) μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση

$$c = 343,2 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (1.11)$$

Όπου T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin και $T_0 = 293,5 K$.

1.4 Ακουστική εμπέδηση και Ένταση του ήχου

1.4.1 Ακουστική εμπέδηση

Σε κάθε σύστημα ως εμπέδηση ορίζεται το πηλίκο της διέγερσης που εφαρμόζεται σ' αυτό, προς το αποτέλεσμα της διέγερσης. Στα ηλεκτρικά κυκλώματα p ως εμπέδηση ορίζεται το πηλίκο της τάσης που εφαρμόζεται σε ένα στοιχείο (διέγερση) προς την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το στοιχείο (αποτέλεσμα). Σε ένα ακουστικό σύστημα, το ρόλο της διέγερσης τον παίζει η ακουστική πίεση, ενώ το αποτέλεσμα είναι η κίνηση των μορίων του μέσου διάδοσης. Για τον ήχο συνεπώς μπορούμε να δώσουμε τον παρακάτω ορισμό:

Ακουστική εμπέδηση ενός μέσου ονομάζεται ο λόγος της ακουστικής πίεσης προς την ταχύτητα των σωματιδίων ή πιο απλά η ακουστική εμπέδηση δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \frac{p(r,t)}{u(r,t)} \quad (1.12)$$

Όπου p η πίεση και u η ταχύτητα των σωματιδίων. Μονάδα μέτρησης είναι το Rayl (προς τιμή του Rayleigh).

$$1 \text{ Rayl} = 1 \text{ kg sec}^{-1} \text{m}^{-2} \text{ (Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}\text{)}$$

Η ακουστική εμπέδηση στην περίπτωση των επίπεδων κυμάτων είναι πραγματικός αριθμός ενώ στην περίπτωση σφαιρικών, στάσιμων και γενικά κυμάτων που αποκλίνουν είναι μιγαδικός αριθμός.

Για τα επίπεδα κύματα λοιπόν αποδεικνύεται ότι η ακουστική εμπέδηση δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \rho c \quad (1.13)$$

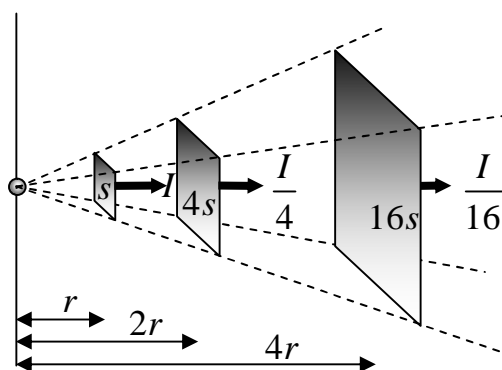
Η σχέση αυτή ονομάζεται χαρακτηριστική εμπέδηση ή απλά ακουστική αντίσταση του μέσου διάδοσης. Για τον αέρα σε συνθήκες δωματίου ($P=1 \text{ atm}$, $\theta=22^\circ\text{C}$) προκύπτει ότι $Z = rc = 1,21 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot 343 \text{m} / \text{s} = 415 \text{ Rayls}$

1.4.2 Ένταση του ήχου

Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο μέγεθος στην ακουστική είναι η ένταση του ήχου. Η ένταση είναι διανυσματικό μέγεθος και εκφράζει τη ροή της ηχητικής ενέργειας. Ως διανυσματικό μέγεθος παρουσιάζει όμως δυσκολία στη μέτρηση του διότι ο πλήρης καθορισμός ενός διανύσματος απαιτεί εκτός του μέτρου, τη γνώση της διεύθυνσης και φοράς.

Ηχητική ένταση σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου και προς μια καθορισμένη διεύθυνση είναι το πηλίκο της μέσης ηχητικής ισχύος που διαπερνά κάθετα μία στοιχειώδη επιφάνεια δια του εμβαδού της επιφάνειας. Μονάδα μέτρησης της έντασης είναι το W/m^2

$$I = \frac{W}{s} = pu \quad (1.14)$$



Σχήμα 1.2 Ορισμός έντασης ήχου [23]

Το μέτρο της έντασης του ήχου σε κάποιο σημείο όταν είναι γνωστή η πίεση υπολογίζεται από την σχέση:

$$I = \frac{p_{rms}^2(r)}{rc} \quad (1.15)$$

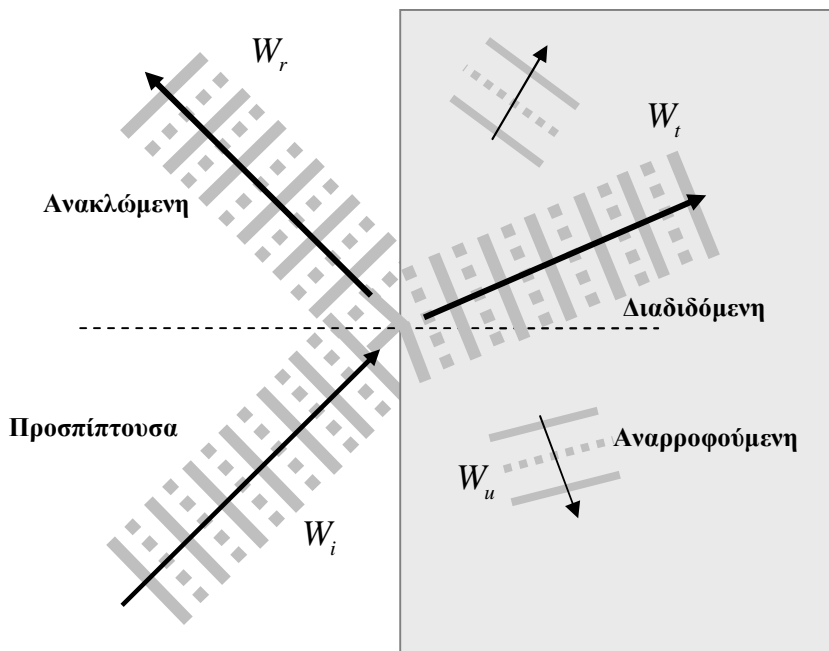
Ο τύπος αυτός ισχύει τόσο για επίπεδα ηχητικά κύματα όσο και για σφαιρικά κύματα (σε μεγάλη απόσταση r από την πηγή) και μόνο στην περίπτωση που έχουμε ελεύθερη διάδοση του ήχου.

1.5 Ανάκλαση – διάδοση – απορρόφηση και εξασθένηση υπέρηχων

1.5.1 Ορισμοί

Όταν ένα υπερηχητικό κύμα πέσει επάνω σε ένα τοίχο ή γενικά σε κάποια επιφάνεια διαχωρισμού δύο μέσων, ένα μέρος από την ενέργεια που μεταφέρει ανακλάται, ενώ ένα άλλο μέρος απορροφάται ή διαδίδεται μέσω του τοίχου από την άλλη πλευρά.

Για τη μελέτη της ανάκλασης και της διάδοσης του υπερήχου ορίζονται οι παρακάτω συντελεστές:



Σχήμα 1.3 Ανάκλαση, απορρόφηση και διάδοση του υπερήχου [23]

α) Συντελεστής ανάκλασης a_r

Αντιπροσωπεύει το λόγο της ανακλώμενης από την επιφάνεια υπερηχητικής ενέργειας (W_r) προς την προσπίπτουσα (W_i):

$$a_r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{I_r}{I_i} \quad (1.16)$$

β) Συντελεστής διάδοσης t

Αντιπροσωπεύει το λόγο της ενέργειας που διαδίδεται από την επιφάνεια διαχωρισμού των δυο μέσων (W_t), προς την προσπίπτουσα (W_i).

$$t = \frac{W_t}{W_i} = \frac{I_t}{I_i} \quad (1.17)$$

γ) Συντελεστής απορρόφησης a

Αντιπροσωπεύει το λόγο της ενέργειας που απορροφάται (W_a) από μια επιφάνεια προς την προσπίπτουσα (W_i)

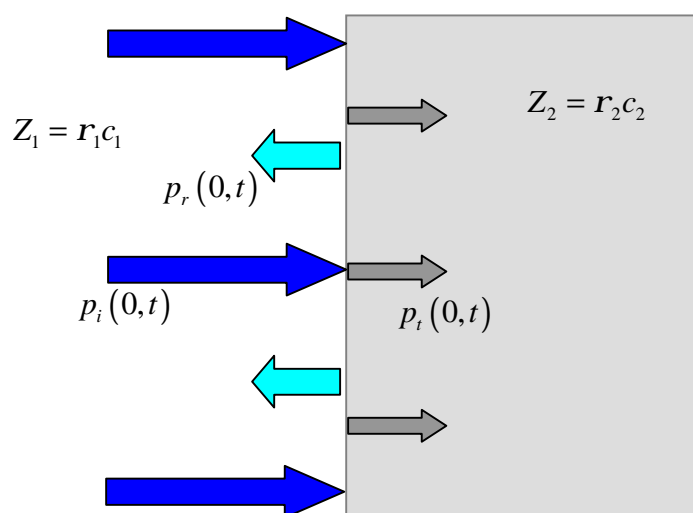
$$a = \frac{W_a}{W_i} = \frac{I_a}{I_i} \quad (1.18)$$

1.5.2 Υπολογισμός συντελεστών ανάκλασης και διάδοσης

Κάθετη πρόσπτωση

Έστω ότι έχουμε μια επιφάνεια διαχωρισμού δυο μέσων του μέσου 1, με ακουστική εμπέδηση Z_1 και του μέσου 2 με ακουστική εμπέδηση Z_2 . Επάνω στην επιφάνεια διαχωρισμού των δύο μέσων, από το μέσο 1 προσπίπτει κάθετα ένα υπερηχητικό κύμα, μέρος του οποίου ανακλάται στο μέσο 1 και μέρος διαδίδεται στο μέσο 2. Η γωνία ανάκλασης και διάδοσης σύμφωνα με την κυματική θεωρία για κάθετη πρόσπτωση θα είναι 90° . Αποδεικνύεται ότι για τον συντελεστή ανάκλασης και τον συντελεστή διάδοσης θα ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις

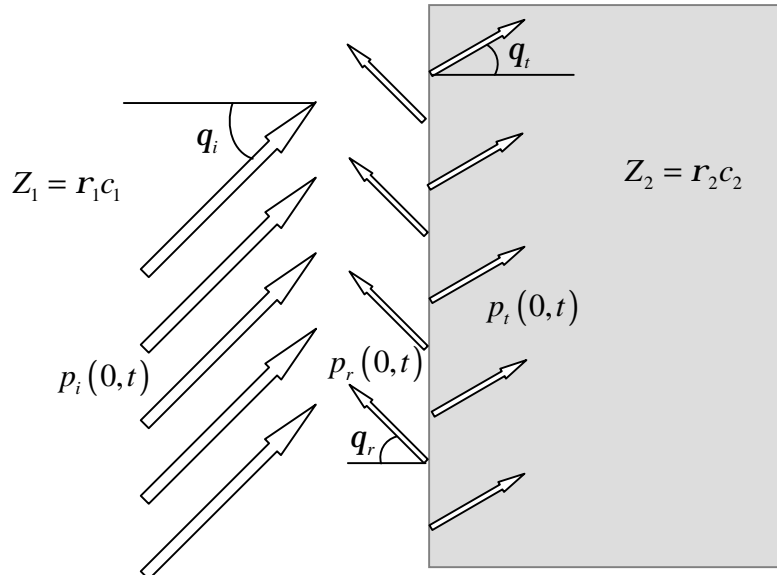
$$a_r = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}, \quad t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (1.19)$$



Σχήμα 1.4 Κάθετη πρόσπτωση [3]

Πλάγια πρόσπτωση

Στην περίπτωση που το προσπίπτον κύμα σχηματίζει γωνία q_i με την κάθετο στην επιφάνεια διαχωρισμού των δύο μέσων, τότε σύμφωνα με τους νόμους της ανάκλασης και διάδοσης των κυμάτων, το μεν διαδιδόμενο θα σχηματίζει με την κάθετο στην επιφάνεια γωνία q_t (γωνία διάθλασης) το δε ανακλώμενο γωνία ανάκλασης q_r ίση με την γωνία πρόσπτωσης.



Σχήμα 1.5 Πλάγια πρόσπτωση [3]

Για την γωνία διάθλασης ισχύει ο νόμος του Snell που δίδεται από την σχέση

$$\sin q_i = \sin q_t \frac{c_2}{c_1} \quad (1.20)$$

Για τους συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης αποδεικνύεται ότι ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις

$$a_r = \frac{(z_2 \cos q_i - z_1 \cos q_t)^2}{(z_2 \cos q_i + z_1 \cos q_t)^2} \quad (1.21)$$

$$t = \frac{4z_1 z_2 \cos q_i \cos q_t}{(z_2 \cos q_i + z_1 \cos q_t)^2} \quad (1.22)$$

1.5.3 Απορρόφηση από υλικά

Η απορρόφηση των υπερήχων από διάφορα υλικά οφείλεται κυρίως σε δύο φαινόμενα:

- α.** Καθώς το υπερηχητικό κύμα εισχωρεί στο υλικό που είναι συνήθως πορώδες, το μέσο διάδοσης (συνήθως ο αέρας) κατά την εκτέλεση των

ταλαντώσεων λόγω τριβών με το υλικό χάνει ενέργεια. Έχουμε δηλαδή μετατροπή ηχητικής ενέργειας σε θερμική.

β. Το υπερηχητικό κύμα διεγείρει προς ταλάντωση (και συνεπώς προσφέρει ενέργεια) τα μόρια του απορροφητικού υλικού, οπότε η ενέργεια του υπερηχητικού κύματος μειώνεται.

Ο συντελεστής απορρόφησης που εκφράζει την απορρόφηση, εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η γωνία πρόσπτωσης είναι άγνωστη ή μπορεί να μεταβάλλεται. Για το λόγο αυτό στην πράξη χρησιμοποιείται ο συντελεστής απορρόφησης κατά Sabine (as). Ο συντελεστής αυτός συνήθως δίδεται στη βιβλιογραφία.

Ως απορρόφηση μιας επιφάνειας (A) ορίζουμε το γινόμενο του εμβαδού της επιφάνειας επί τον συντελεστή απορρόφησης της $A = s \cdot a$.

Την απορρόφηση των επιφανειών τη μετράμε σε Sabine. Μια επιφάνεια με εμβαδόν $1m^2$ έχει απορροφητική ικανότητα 1 Sabine αν ο συντελεστής απορρόφησης είναι 1.

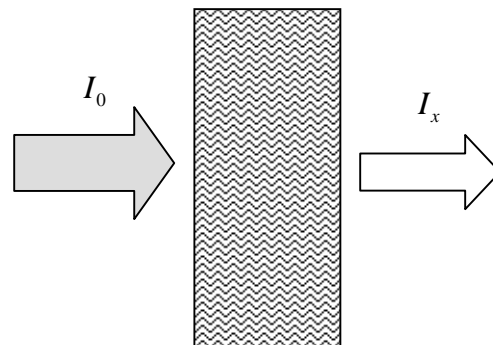
Τα απορροφητικά υλικά μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα πορώδη, τα απορροφητικά τύπου μεμβράνης και οι συντονιστές.

1.5.4 Εξασθένηση υπερήχων λόγω απορρόφησης από το μέσο διάδοσης, εύρους δέσμης και μετεωρολογικών φαινομένων

Εξασθένηση λόγω απορρόφησης από το μέσο διάδοσης

Εξασθένηση του υπερήχου ονομάζουμε την απώλεια της ηχητικής ενέργειας του υπερήχου όταν αυτός διαδίδεται σε κάποιο μέσο. Η εξασθένηση αυτή οφείλεται σε δύο κυρίως μηχανισμούς :

- α.** Εξασθένηση λόγω κλασικής απορρόφησης.
- β.** Εξασθένηση λόγω του φαινομένου της θερμικής μοριακής αποκατάστασης.



Σχήμα 1.6 Εξασθένηση τον ήχου από το μέσο διάδοσης [3]

Η κυματική εξίσωση στην περίπτωση διάδοσης σε μέσο που προκαλεί απώλειες καταλήγει στην παρακάτω μορφή (εξίσωση Helmholtz):

$$(\nabla^2 + k^2)p = 0 \quad (1.23)$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής στην περίπτωση επιπέδων κυμάτων που διαδίδονται κατά την διεύθυνση των x δίδεται από τη σχέση:

$$p = p_o e^{-\alpha x} e^{i(\omega t - kx)} \quad (1.24)$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι το πλάτος στα επίπεδα κύματα δεν είναι σταθερό ανεξάρτητα από την απόσταση, αλλά μειώνεται εκθετικά με αυτήν.

Αν πάρουμε τις rms τιμές της πίεσης της παραπάνω εξίσωσης έχουμε:

$$p_{rms,x}^2 = p_{rms,o}^2 e^{-2\alpha x} \quad (1.25)$$

Οπότε για την ένταση που είναι ανάλογη με το τετράγωνο της rms πίεσης, μπορούμε να γράψουμε:

$$I_x = I_o e^{-2\alpha x} \quad (1.26)$$

Όπου:

I_x , η ένταση του υπερήχου μετά την διέλευση του από στρώμα πάχους x

I_o , η ένταση του υπερήχου στην είσοδο του στρώματος

α , συντελεστής που ονομάζεται συντελεστής απορρόφησης του υλικού.

Η παραπάνω σχέση αν χρησιμοποιήσουμε την κλίμακα των dB μπορεί να γραφεί:

$$\Delta L_f = 10 \log e^{-2\alpha x} = 8.7 \alpha x = mx \quad (1.27)$$

Ο συντελεστής απορρόφησης $m = 8.7\alpha$ που έχει διαστάσεις dB/m μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$m = a_c + a_m \quad (1.28)$$

όταν $\frac{a}{k} \ll 1$

όπου a_c ο κλασικός συντελεστής απορρόφησης (classical absorption coefficient) a_m ο συντελεστής απορρόφησης που οφείλεται στη μοριακή θερμική αποκατάσταση και k ο κυματάριθμος.

Εξασθένηση υπερήχων λόγω εύρους δέσμης

Η ένταση μίας ηχητικής δέσμης που διαδίδεται σε ελεύθερο χώρο μειώνεται λόγω της γωνίας απόκλισης της δέσμης δηλαδή το σχέδιο της δέσμης (beam pattern) γίνεται ευρύτερο και η ηχητική ενέργεια κατανέμεται σε μια μεγαλύτερη περιοχή με αποτέλεσμα την μείωση της έντασης της δέσμης.

Η ένταση του ήχου σε ελεύθερη διάδοση είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης για σφαιρικά κύματα. Στην περίπτωση σφαιρικής διάδοσης από ισότροπη πηγή σύμφωνα με τον ορισμό της έντασης μπορούμε να γράψουμε:

$$I = \frac{w}{4\pi r^2} \quad (1.29)$$

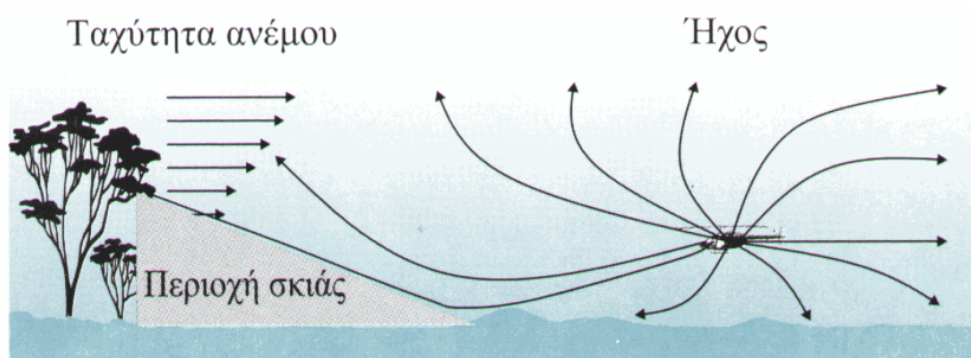
Όπου w η ακουστική ισχύς της πηγής.

Ενώ στην περίπτωση που η πηγή δεν είναι ισότροπη αλλά έχει κατευθυντικότητα Q τότε η σχέση γίνεται

$$I = \frac{Qw}{4\pi r^2} \quad (1.30)$$

Εξασθένηση υπερήχων λόγω μετεωρολογικών φαινομένων

Από μετρήσεις που έγιναν βρέθηκε ότι η επίδραση της βροχής, ομίχλης και άλλων μετεωρολογικών φαινομένων είναι αμελητέα. Η μόνη σοβαρή επίδραση στην διάδοση των υπερήχων είναι η ταχύτητα του ανέμου καθώς και θερμοκρασιακές αναστροφές.



Σχήμα 1.7 Σχηματισμός σκιάς που οφείλεται στην ταχύτητα του ανέμου [13]

Όταν φυσά άνεμος λόγω τριβών με το έδαφος τα κατώτερα στρώματα έχουν μικρότερη ταχύτητα από τα ανώτερα με αποτέλεσμα η ταχύτητα του ανέμου να μεταβάλλεται με το ύψος. Η ταχύτητα του ανέμου στα διάφορα αέρια στρώματα συντίθεται διανυσματικά με τη ταχύτητα των υπερήχων με αποτέλεσμα την μεταβολή της ταχύτητας του ήχου με το ύψος οπότε εμφανίζεται το φαινόμενο της διάθλασης.

Το φαινόμενο αυτό είναι υπεύθυνο για την κάμψη των ηχητικών κυμάτων προς τα επάνω ή προς τα κάτω ανάλογα με την διαφοροποίηση της ταχύτητας οπότε εμφανίζονται ζώνες σκιάς.

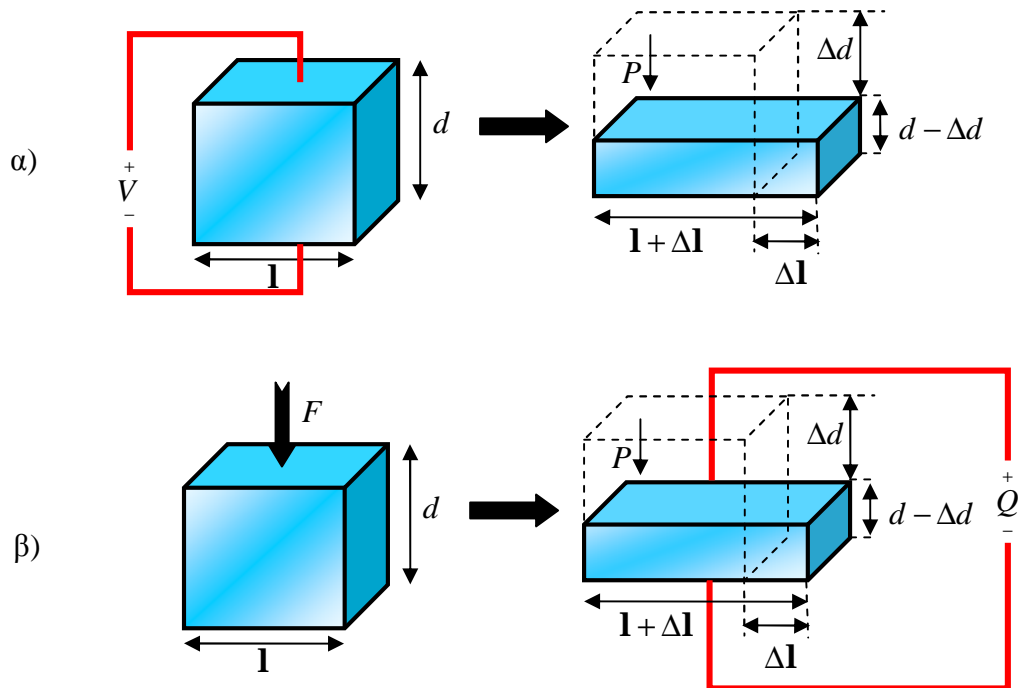
1.6 Εκπομπή και λήψη υπέρηχων

1.6.1 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Η εκπομπή και η λήψη των υπέρηχων στηρίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα από ειδικούς κρυστάλλους. Η πιεζοηλεκτρική ιδιότητα οφείλεται στην μετατόπιση και σχετική αναδιάταξη φορτίων που προκαλείται στην δομή των κρυστάλλων με την εφαρμογή μηχανικής πίεσης.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τους Jacques και Pierre Curie το 1880. Διαπίστωσαν ότι εάν ορισμένα κρύσταλλα υποβληθούν σε μηχανική πίεση, πολώνονται ηλεκτρικά και ο βαθμός πόλωσης ήταν ανάλογος με την εφαρμοσμένη πίεση. Επίσης παρατήρησαν ότι τα ίδια υλικά παραμορφώνονται όταν εκτίθενται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό έχει γίνει γνωστό ως αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται σε ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, τα πολωμένα μόρια θα ευθυγραμμιστούν με το ηλεκτρικό πεδίο. Αυτή η ευθυγράμμιση των μορίων θα αναγκάσει το υλικό να αλλάξει τις διαστάσεις του. Επίσης όταν ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό αλλάζει τις διαστάσεις λόγω μιας εξωτερικής μηχανικής δύναμης τότε αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναδιάταξη των φορτίων του κρυστάλλου και την εμφάνιση θετικών και αρνητικών φορτίων στις επιφάνειες του κρυστάλλου



Σχήμα 1.8 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο α) Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί αλλαγή των διαστάσεων του υλικού β) Εφαρμογή πίεσης στο υλικό δημιουργεί επιφανειακά φορτία [41]

1.6.2 Πιεζοηλεκτρικοί υπερηχητικοί αισθητήρες

Ο μετατροπέας (transducer) αποτελεί ίσως το σημαντικότερο στοιχείο σε ένα σύστημα υπερήχων. Η λειτουργία του έγκειται στο να μετατρέπει ηλεκτρικά σήματα σε κύματα πίεσης τα οποία διαδίδονται μέσα στο μέσο διάδοσης (εκπομπή υπερήχων) και να παράγει το ηλεκτρικό αντίστοιχο οποιασδήποτε λαμβανόμενης ακουστικής κυματομορφής (λήψη υπερήχων).

Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος τοποθετείται ανάμεσα σε δύο λεπτά επίπεδα ηλεκτρόδια. Η εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού σε αυτά προκαλεί τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου εντάσεως E και τη μεταβολή του πάχους z του κρυστάλλου:

$$\frac{dz}{z} = C_c E \quad (1.31)$$

Όπου C_c η αντίστροφη πιεζοηλεκτρική σταθερά.

Η εφαρμογή μηχανικής πίεσης (στη συγκεκριμένη περίπτωση υπερηχητικής πίεσης p) στον κρύσταλλο δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο εντάσεως E

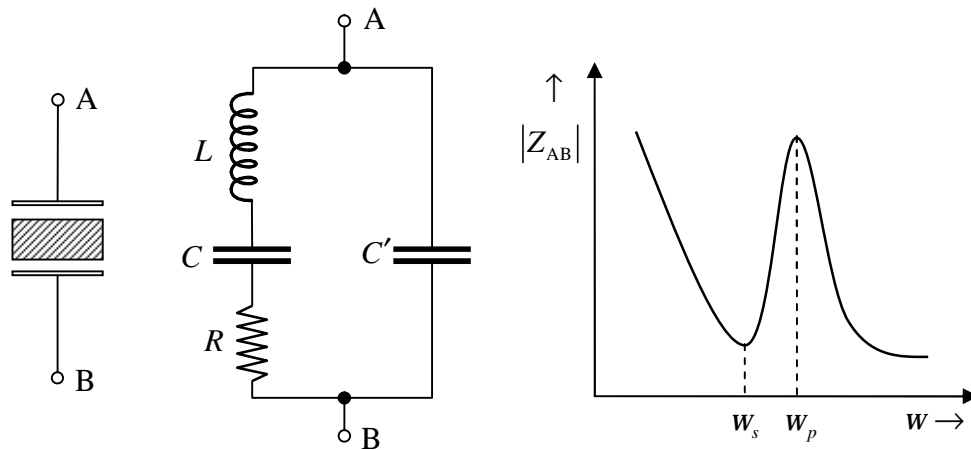
$$E = C_d \cdot p \quad (1.32)$$

Όπου C_d είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά.

Το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο πιεζοηλεκτρικό υλικό σήμερα είναι το PZT (lead - zirconate - titanate) λόγω της υψηλής απόδοσης ηλεκτρομηχανικής μετατροπής, των μικρών εγγενών απωλειών και των καλών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του, που προέρχονται από την υψηλή διηλεκτρική σταθερά του. Το PZT έχει μεγάλη μηχανική αντοχή, μπορεί να λάβει διάφορα σχήματα και μεγέθη, μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 100°C και είναι σταθερό για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι ιδιότητες του μπορούν να ρυθμιστούν με την τροποποίηση της αναλογίας zirconium / titanium και την προσθήκη μικρής ποσότητας άλλων ουσιών π.χ. lanthanum. Τα μειονεκτήματα του είναι η μεγάλη ακουστική εμπέδηση (30 MRayls) σε σύγκριση μ' εκείνη του αέρα (415 Rayls) και η ύπαρξη δευτερογενών λοβών. Η χρήση στρωμάτων ακουστικής σύζευξης (acoustic matching layers) μπορούν να μειώσουν την επίδραση των παραπάνω φαινομένων.

Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το BPT (barium lead titanate), το BPZ (barium lead zirconate), το PVDF (polyvinylidene difluoride) και το PMN (lead magnesium niobate).

Τα προαναφερθέντα υλικά παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με την συχνότητα και την εφαρμοζόμενη σε αυτά πίεση. Για την ακρίβεια υπάρχει περιοχή συχνοτήτων όπου η απόκριση στην πίεση είναι σχεδόν γραμμική. Όταν πλησιάζουμε τις συχνότητες μηχανικού συντονισμού υπάρχει πολύ οξύς συντονισμός του κρυστάλλου και η απόκριση είναι μία πολύ οξεία καμπύλη (σχήμα 1.9). Στην γραμμική περιοχή χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες πίεσης και σπανίως για μετατόπιση. Στην περιοχή συντονισμού χρησιμοποιούνται ως ταλαντωτές σε ηλεκτρονικά κυκλώματα και ως αισθητήρες (δέκτες ή πομποί) για υπερήχους. Το αντίστοιχο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα για την περιοχή συντονισμού παρουσιάζεται παρακάτω



Σχήμα 1.9 Το ηλεκτρικό ισοδύναμο πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου [13]

Όπου

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.33)$$

και

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC_{ol}}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C'}} \quad (1.34)$$

Για συντονισμό σε συχνότητες της τάξης μερικών kHz οι τιμές της αυτεπαγωγής είναι της τάξης του Henry, οι τιμές των πυκνωτών της τάξης των pF και η αντίσταση είναι μερικά Ohm. Εδώ παρουσιάζεται το φαινόμενο να δημιουργείται μια τεράστια αυτεπαγωγή σε πολύ μικρού μεγέθους υλικό. Κρύσταλλοι με συχνότητα συντονισμού 32KHz έχουν μέγεθος μερικά χιλιοστά, είναι οι κρύσταλλοι που χρησιμοποιούνται στα ρολόγια χειρός. Για την κατασκευή αντίστοιχης αυτεπαγωγής με πηνίο με πυρήνα από φερρίτη θα χρειαζόμασταν κύβο με διαστάσεις της τάξεως των μερικών εκατοστών.

1.6.3 Άλλα είδη υπερηχητικών μετατροπέων

Έκτος από τους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς άλλοι είδη ultrasonic transducers είναι:

1. Μηχανικός
2. Ηλεκτρομαγνητικός
3. Magnetostrictive

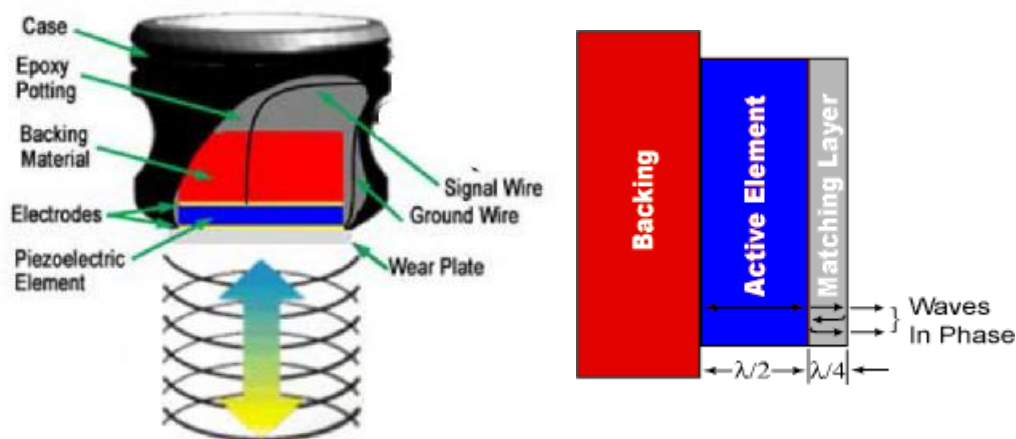
4. Ηλεκτροστατικός (Ουσιαστικά είναι ένας πυκνωτής με τη μία πλάκα σταθερή και την άλλη ελεύθερη ώστε να μπορεί να ταλαντώνεται)



Σχήμα 1.10 Πιεζοηλεκτρικός (αριστερά) και ηλεκτροστατικός (δεξιά) μετατροπέας [Δ5]

1.6.4 Κατασκευή Πιεζοηλεκτρικού Μετατροπέα

Ένας μετατροπέας καλής ποιότητας θα πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά σχεδίασης όπως εικονίζονται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 1.11 Πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας [Δ5]

Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο κόβεται στο 1/2 του επιθυμητού μήκους κύματος. Η μία πλευρά του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου επικολλάται σ' ένα υλικό γνωστό ως backing material, με σκοπό την απόσβεση των ταλαντώσεων του στοιχείου για τη βελτίωση του εύρους συχνοτήτων (bandwidth) και τη μείωση της οπίσθιας διάδοσης του κύματος και των ανακλάσεων του από εσωτερικές δομές. Η πλευρά του στοιχείου προς το μέσο διάδοσης μπορεί καλύπτεται από ένα ή περισσότερα matching layers,

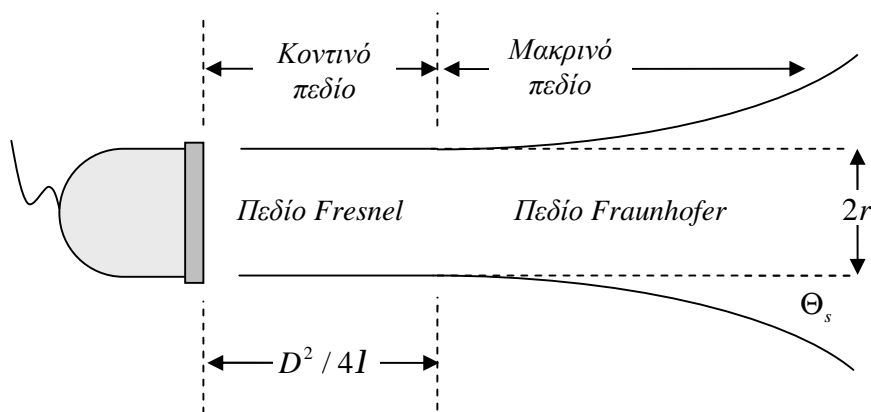
με σκοπό τη σύζευξη των εμπεδήσεων του κρυστάλλου και του μέσου διάδοσης με σκοπό τη μείωση της απώλειας ηχητικής ενέργειας στη διαχωριστική τους επιφάνεια. Το πάχος του matching layer θα πρέπει να είναι το 1/4 του μήκος κύματος εκπομπής. Τέλος η μηχανική κατασκευή περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η περιοχή επιφάνειας ακτινοβολίας, η μηχανική απόσβεση, το προστατευτικό περίβλημα, τον τύπος των συνδετήρων και άλλες μεταβλητές της φυσικής κατασκευής.

1.6.5 Διέγερση του μετατροπέα και χαρακτηριστικά της δέσμης

Η διέγερση του μετατροπέα πραγματοποιείται από έναν παλμό τάσης ο οποίος επιτυγχάνεται είτε εκφορτίζοντας έναν πυκνωτή διαμέσου του κρυστάλλου είτε χρησιμοποιώντας έναν τετραγωνικό παλμό μικρής διάρκειας. Το πλάτος ενός τέτοιου παλμού κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες Volt έως μερικά δέκατα του Volt.

Ο διεγερμένος κρύσταλλος ωθείται σε ταλάντωση με αποτέλεσμα να παράγεται ένα φθίνον υπερηχητικό κύμα το οποίο και καλείται παλμικό κύμα. Ο βασικός στόχος είναι να επιτευχθεί όσο το δυνατό μικρότερο χωρικό μήκος του παλμού (spatial pulse length, SPL) δηλαδή παλμός μικρής χρονικής διάρκειας. Το εύρος του παλμού ισούται με το γινόμενο του μήκους κύματος επί των αριθμό των κύκλων.

Η μορφή του πεδίου που δημιουργεί θεωρητικά μια ιδανική δέσμη, απεικονίζεται γραφικά στο σχήμα 1.12



Σχήμα 1.12 Τυπική παράσταση δέσμης υπερήχων [13]

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, το κοντινό πεδίο ή πεδίο Fresnel εκτείνεται σε απόσταση που ορίζεται από την σχέση :

$$z = D^2 / 4l \quad (1.35)$$

Όπου D η διάμετρος του μετατροπέα ή εάν ο μετατροπέας είναι κυκλικός με ακτίνα r, η σχέση γίνεται:

$$z = r^2 / I \quad (1.36)$$

Στο πεδίο αυτό φαινόμενα περίθλασης λόγω πεπερασμένων διαστάσεων του κρυστάλλου δημιουργούν φαινόμενα χωρικής συμβολής με αποτέλεσμα η ένταση να μεταβάλλεται ακανόνιστα.

Στο μακρινό πεδίο ή πεδίο Fraunhofer ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος μπορεί να θεωρηθεί σημειακή πηγή η ένταση της οποίας είναι χωρικά ομοιόμορφη. Το πεδίο Fraunhofer αποκλίνει συναρτήσει της απόστασης με μία γωνία απόκλισης. Η γωνία απόκλισης δίνεται από την σχέση:

$$\Theta_s = \arcsin\left(1.22 \frac{I}{D}\right) \quad (1.37)$$

για μετατροπέα με διάμετρο D.

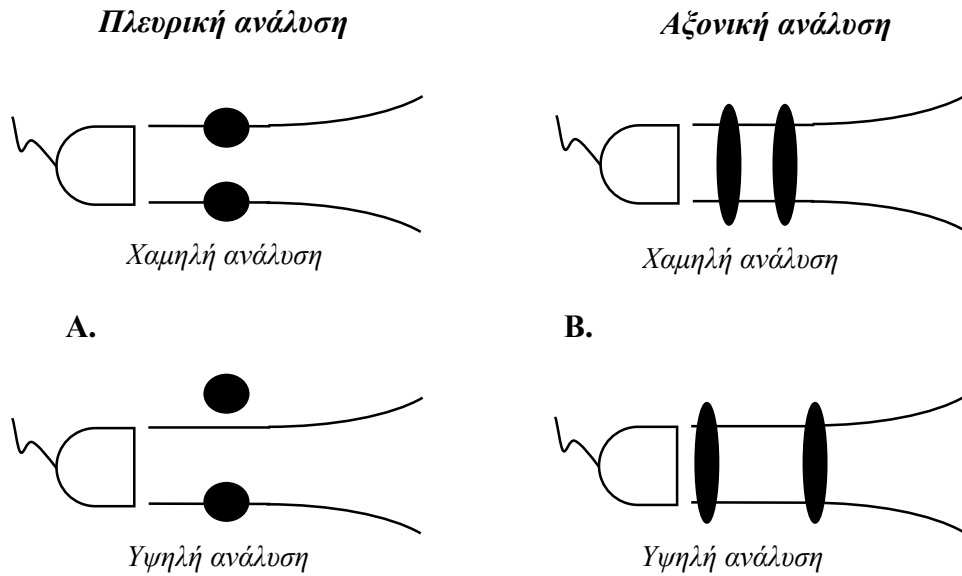
Υπάρχουν δύο είδη ανάλυσης, που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της δέσμης των υπερήχων. Το πρώτο είδος είναι η λεγόμενη αξονική ανάλυση (axial resolution). Η ανάλυση αυτή αντιπροσωπεύει την ελάχιστη απόσταση σε μήκος που χωρίζει δύο διαφορετικούς στόχους έτσι ώστε αυτοί να γίνονται αντιληπτοί σαν δυο ξεχωριστά αντικείμενα και όχι σαν ένα (σχήμα 1.13 A). Η ανάλυση αυτή σχετίζεται με το χωρικό μήκος παλμού (SPL) σύμφωνα με την σχέση :

$$\text{Αξονική ανάλυση} = \text{χωρικό μήκος παλμού} / 2 = cT_{\text{pulse}} / 2 \quad (1.38)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι δύο αντικείμενα θα εκληφθούν σαν ξεχωριστοί στόχοι μόνο εάν η απόσταση που τα χωρίζει είναι μεγαλύτερη ή ίση του ενός δευτέρου του χωρικού μήκους του παλμού (SPL). Για να επιτύχουμε καλύτερες αξονικές αναλύσεις θα πρέπει το χωρικό μήκος του παλμού να είναι όσο το δυνατό μικρότερο γεγονός που οδηγεί σε δύο περιπτώσεις: (α) τη μείωση του μήκους κύματος λ ή (β) τη μείωση του αριθμού των κύκλων

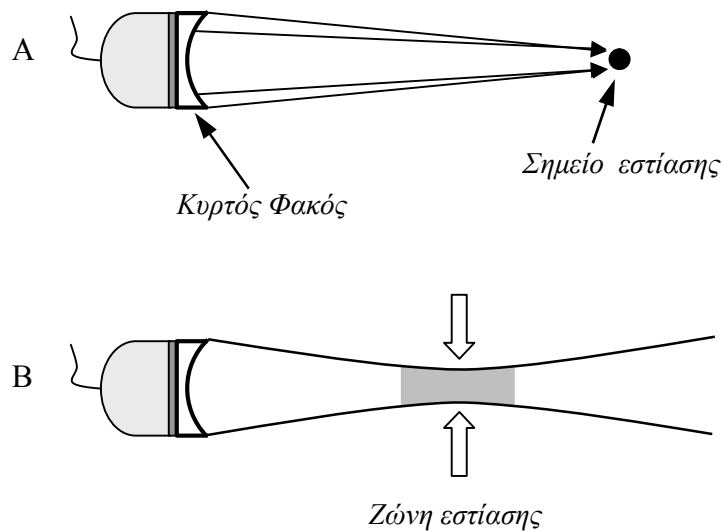
Το δεύτερο είδος ανάλυσης είναι η λεγόμενη πλευρική ή αζιμουθιακή ανάλυση. Αυτή αναφέρεται στην ελάχιστη απόσταση που πρέπει να χωρίζει δύο στόχους, στο κάθετο επίπεδο απ' αυτό που διαδίδεται η δέσμη, ώστε αυτοί να γίνουν αντιληπτοί σαν δυο ξεχωριστά αντικείμενα (σχήμα 1.13 B). Με άλλα λόγια αντιπροσωπεύει την ελάχιστη απόσταση που χωρίζει δύο αντικείμενα την στιγμή που το ένα είναι εντός δέσμης και το άλλο εκτός αυτής. Από την περιγραφή αυτή μπορούμε ήδη να διαπιστώσουμε ότι η ανάλυση αυτή υπολείπεται σε ακρίβεια της αξονικής και εξαρτάται από την διάμετρο

της δέσμης. Μάλιστα όσο η δέσμη αποκλίνει σε συνάρτηση με την απόσταση τόσο ο διαχωρισμός των στόχων δυσχεραίνεται.



Σχήμα 1.13 A) Πλευρική ανάλυση, B) Αξονική ανάλυση. [13]

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του μετατροπέα το οποίο αξίζει ιδιαίτερη αναφορά είναι η εστίαση. Μέσω της εστίασης μπορούμε να βελτιώσουμε την ικανότητα πλευρικής ανάλυσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.14. Η εστίαση μπορεί να επιτευχθεί με ακουστικούς φακούς, με τρόπο αντίστοιχο με τους οπτικούς φακούς ή με κυρτά σχηματισμένους κρυστάλλους. Η εστίαση πραγματοποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε σχηματίζεται μία ζώνη εστίασης παρά ένα σημείο εστίασης.



Σχήμα 1.14 Εστίαση δέσμης υπερήχων. Α) Εστίαση με κυρτό φακό όπου διακρίνεται το σημείο εστίασης. Β) Εστίαση όπου διακρίνεται η ζώνη εστίασης
[13]

1.7 Εφαρμογές υπερήχων

Οι υπέρηχοι τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής στη μέτρηση φυσικών μεγεθών. Αν θέλουμε να κατηγοριοποιήσουμε τις εφαρμογές αυτές με βάση τις φυσικές ιδιότητες των υπερήχων τότε προκύπτουν οι εξής βασικές κατηγορίες:

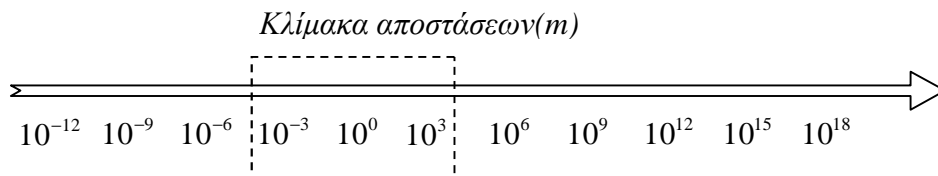
- Μετρήσεις μεγεθών βασισμένες στην ανάκλαση των υπερήχων
 - Προσδιορισμός απόστασης αντικειμένων.
 - Προσδιορισμός θέσεως αντικειμένου.
 - Προσδιορισμός σχήματος και όγκου αντικειμένου και εσωτερικού όγκου κοιλότητων.
- Μετρήσεις βασισμένες στην ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων στα υλικά σώματα.
 - Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας υλικού
 - Προσδιορισμός πυκνότητας υλικού
- Μετρήσεις βασισμένες στο φαινόμενο Doppler
 - Προσδιορισμός της ταχύτητας υλικού σώματος.
 - Προσδιορισμός της ταχύτητας ροής ρευστών.

Κεφάλαιο 2

2.1 Μέτρηση απόστασης

2.1.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Τα εργαλεία και οι τεχνικές μέτρησης απόστασης είναι ενδεχομένως μια από τις παλαιότερες και συνεχιζόμενες εφευρετικές αναζητήσεις της επιστήμης. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η τεράστια σειρά των αποστάσεων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για μέτρηση από την επιστήμη και η εφαρμοσμένη μηχανική.



Σχήμα 2.1 Η κλίμακα των μετρούμενων αποστάσεων

Οι χρήση υπερήχων αναφέρεται στην μέτρηση ενός σχετικά μικρού τμήματος της παραπάνω κλίμακας (από εκατοστόμετρα μέχρι χιλιόμετρα). Ακόμη και μέσα σε αυτό το περιορισμένο τμήμα, είναι πολύ δύσκολο κανείς να απαριθμήσει όλες τις μεθόδους μέτρησης απόστασης που έχουν επινοηθεί.

Η μέτρηση απόστασης, γενικά ασχολείται για τον καθορισμό του μήκους μιας γραμμής που ενώνει δύο σημεία στο τρισδιάστατο χώρο. Ανάλογα με το σκοπό που γίνεται η μέτρηση αυτή τα διάφορα συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

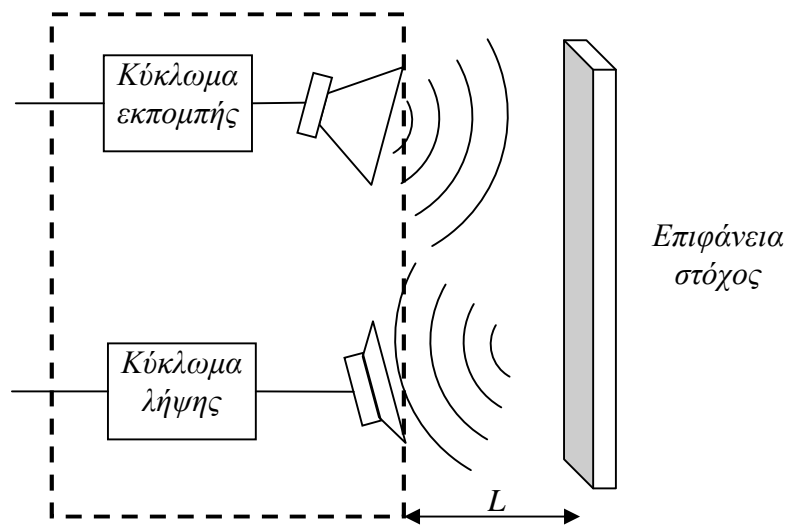
“Ranging Systems”: αναφέρεται στα συστήματα που εκτελούν τις απλές μετρήσεις αισθητήρα από το στόχο

“Range-Imaging Systems”: είναι συστήματα που συλλέγουν πολλές μετρήσεις αποστάσεων στο χώρο και τις καταγράφουν σε πίνακες με στόχο την σχεδίαση του χώρου.

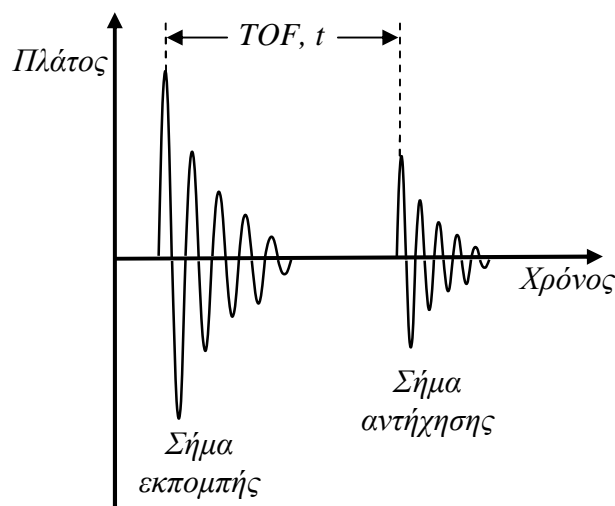
“Position Tracking Systems”: είναι συστήματα που καταγράφουν τη χρονική ιστορία της μέτρησης απόστασης σε έναν ή περισσότερους στόχους με στόχο τον υπολογισμό ταχύτητας κ.τ.λ

2.1.2 Το φαινόμενο της αντήχησης.

Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως Sonar (Sound Navigation And Ranging). Είναι μία pulse-echo τεχνική χρησιμοποιώντας ήχο και είναι ανάλογη με την τεχνική που εφαρμόζεται στο radar με τη διαφορά ότι στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η τεχνική Sonar χρησιμοποιεί ήχο στις συχνότητες περίπου 100Hz έως 1MHz, και η επέκταση της ορολογίας αφορά οποιοδήποτε μέσον διάδοσης και όχι μόνο το νερό. Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής αυτής απεικονίζεται στα σχήματα 2.2α και 2.2β



2.2.α



2.2.β

Σχήμα 2.2: Η αρχή λειτουργίας sonar σχηματικά

Ένας παλμός υπερήχων εκπέμπεται και ανιχνεύεται η αντήχηση (σχήμα 2.2.α). Επίσης προσδιορίζεται ο χρόνος πτήσης (time of flight) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.β.

Υπολογισμός Αποστάσεων με Sonar

Το σήμα ανακλάται σε κάποιο εμπόδιο, επιστρέφει πίσω, οπότε και ανιχνεύεται από κάποια διάταξη δέκτη.

Η απόσταση του αντικειμένου υπολογίζεται ως $D/2$, όπου:

$$D = u \cdot t \quad (2.1)$$

D : το συνολικό μήκος διαδρομής

u : η ταχύτητα διάδοσης του ήχου ($340m/s$ στον αέρα)

t : ο συνολικός χρόνος από την εκπομπή μέχρι τη λήψη.

Στην πράξη, τα αισθητήρια υπερήχων παρουσιάζουν αρκετά προβλήματα και περιορισμούς:

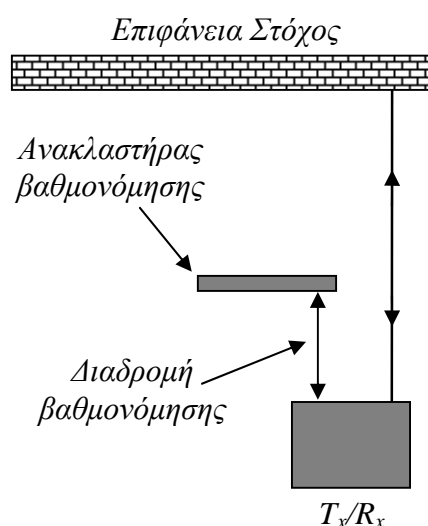
1. Κωνικού σχήματος δέσμη του σήματος μέτρησης, με σημαντικό γωνιακό εύρος ($10-30^\circ$)
2. Προβλήματα ανακλάσεων σε κοινές επιφάνειες
3. Σχετικά αργή ταχύτητα διάδοσης π.χ. απαιτούνται 200 ms για τη διάσχιση 60 (=2x30) μέτρων

Παρόλα αυτά, η χρήση τους σε εφαρμογές αυτοκινούμενων ρομπότ είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, καθώς σε συνδυασμό χαρακτηρίζονται από

1. χαμηλό κόστος
2. ακρίβεια
3. απλή χρήση, ιδιαίτερα σε σχέση με τις διατιθέμενες ολοκληρωμένες μονάδες
4. μικρό μέγεθος
5. αξιόπιστη λειτουργία

Για να υπολογίσουμε την απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και της ανακλώμενης επιφάνειας (επιφάνεια στόχος όπως αναφέρεται στο σχήμα) θα πρέπει να γνωρίζουμε την ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων στο μέσον αυτό.

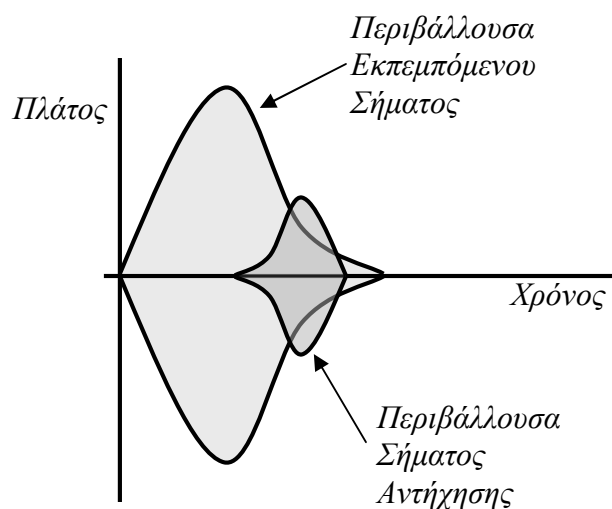
Υπάρχουν τρεις τρόποι να το πετύχουμε. Ο πρώτος είναι να θεωρήσουμε ότι η ταχύτητα του ήχου u_{hcou} έχει πάντα την ίδια τιμή, οπότε η σχέση (2.1) δίνει τη τιμή της απόστασης D . Ο δεύτερος είναι παρόμοιος με τον πρώτο, αλλά επιπρόσθετα προσδιορίζεται η θερμοκρασία του μέσου με κάποιο τρόπο και η τιμή της χρησιμοποιείται για την αυτόματη αντιστάθμιση της επίδρασής της στην τιμή της ταχύτητας διάδοσης του ήχου u_{hcou} . Τέλος στον τρίτο τρόπο χρησιμοποιείται μόνιμα και μέσα στο χώρο της μέτρησης μία διαδρομή βαθμονόμησης. Κατ' αυτόν τον τρόπο βαθμονομούμε το σύστημα δραστικά καθορίζοντας την ταχύτητα u_{hcou} συνεχώς. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3. Υπολογισμός της ταχύτητα ήχου [32]

Γενικά στις εφαρμογές χρησιμοποιείται για απλότητα ο ίδιος αισθητήρας και για την εκπομπή και τη λήψη ενός σήματος. Φυσικά η διάταξη αυτή έχει και ένα μειονέκτημα, ότι δηλαδή ο αισθητήρας μπορεί ακόμη να ταλαντώνεται για αρκετό χρόνο μετά την εκπομπή, ακόμη και τη στιγμή που θα έπρεπε να δράσει σαν δέκτης. Αν η διαδρομή του σήματος υπερήχων είναι μικρή υπάρχει πάντα η πιθανότητα το λαμβανόμενο σήμα της αντήχησης να ενωθεί με το τελευταίο τμήμα του σήματος εκπομπής και να καταστεί πολύ δύσκολος ο διαχωρισμός του, όπως ακριβώς φαίνεται στο σχήμα 2.4. Εξ' αιτίας αυτού του φαινομένου, υπάρχει μια ελάχιστη διαδρομή μήκους κάτω από την οποία είναι αδύνατο να ανιχνευθεί το σήμα της αντήχησης.

Δηλαδή κάθε αισθητήρας έχει μια νεκρή ζώνη. Η αντίστοιχη ορολογία που χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία είναι dead band ή blind space ή blocking time ή blanking time.



Σχήμα 2.4. Παράδειγμα επικάλυψης σημάτων εκπομπής και λήψης [32]

Είναι ευνόητο ότι η νεκρή αυτή ζώνη μπορεί να ελαττωθεί χρησιμοποιώντας ξεχωριστούς αισθητήρες για εκπομπή και λήψη και κατ' αυτόν τον τρόπο ο δέκτης είναι έτοιμος να ανιχνεύσει το σήμα της αντήχησης μόλις φτάσει στον δέκτη, θεωρώντας επίσης ότι υπάρχει κατάλληλη τοποθέτηση αυτών των αισθητήρων έτσι ώστε να μην υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ πομπού και δέκτη. Τοποθετώντας ξεχωριστούς πομπούς και δέκτες μπορεί επίσης να βελτιστοποιηθεί η σχεδίαση. Για παράδειγμα ο πομπός μπορεί να είναι ισχύος για να μπορεί να εκπέμψει σήματα σε μεγάλη απόσταση, και ο δέκτης να έχει μεγάλη ευαισθησία, ώστε να λαμβάνει πολύ ασθενή σήματα. Αυτά τα πλεονεκτήματα είναι πολύ χρήσιμα στην πράξη αφού συνήθως οι απαιτήσεις συνήθως συγκρούονται.

Η ελάχιστη κλίμακα μέτρησης ενός αισθητήρα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον τόσο μεγάλη όσο η νεκρή του ζώνη, και στην πράξη θα πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερη για να υπάρχει η ευχέρεια προσθήκης και της διαδρομής βαθμονόμησης, αν υπάρχει πρόθεση χρησιμοποίησής της.

Η διακριτική ικανότητα ενός τέτοιου μετρητικού συστήματος (όσον αφορά τους αισθητήρες) εξαρτάται κατά πολύ από την συχνότητα λειτουργίας των αισθητήρων. Έτσι η επιλογή μιας μεγάλης συχνότητας προσφέρει μεγάλη διακριτική ικανότητα, όμως η απόσβεση είναι μεγάλη και

αναγκαστικά μειώνεται κατά πολύ η κλίμακα δράσης του συστήματος. Για να πετύχουμε αποστάσεις της κλίμακας των 60m εντός του αέρα, απαιτούνται συχνότητες χαμηλές, γύρω στα 8KHz. Οι μεγαλύτερες συχνότητες όπως 215KHz χρησιμοποιούνται όταν η μεγάλη κλίμακα δράσης δεν είναι μέσα στις προδιαγραφές της εφαρμογής. Οι συχνότητες αυτές έχουν το πλεονέκτημα των μικρότερων μηκών κύματος με επακόλουθο την αυξημένη διακριτική ικανότητα.

Δύο σημαντικά μειονεκτήματα τέτοιων συστημάτων sonar τα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν σε κάθε σχεδίαση είναι:

1. Τα διακοπτόμενα ή τελειώς χαμένα σήματα αντήχησης, δηλαδή υπάρχει η πιθανότητα να μην μπορεί να ανιχνεύεται πάντοτε από τον δέκτη το σήμα αντήχησης. Τέτοιο παράδειγμα είναι η περίπτωση κακής εκτίμησης της κλίμακας λειτουργίας του συστήματος όπου η απόσβεση του σήματος υπερήχων να είναι μεγάλη και να βρίσκεται στα όρια της ευαισθησίας του δέκτη.
2. Τα “ψευδή” σήματα. Αυτά μπορεί να προέρχονται είτε από εκπομπή ακουστικών σημάτων από διάφορες παλλόμενες (συνήθως λόγω τριβής) επιφάνειες, όπως π.χ. από δισκόφρενα αυτοκινήτων κατά την πέδηση, είτε από “ψευδείς” αντηχήσεις που δημιουργήθηκαν από δευτερογενείς επιφάνειες.

Η τεχνική sonar χρησιμοποιείται κατά κόρον στα αέρια όπως για την ανίχνευση της επιφάνειας κάποιου υγρού ή κάποιου στερεού αντικειμένου. Επίσης χρησιμοποιούνται για την μέτρηση απόστασης ή μετατόπισης.

2.2 Επιλογή ενός υπερηχητικού αισθητήρα για μέτρηση απόστασης

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι η καλύτερη κατανόηση του τρόπου που επηρεάζεται το σύστημα μέτρησης απόστασης από το περιβάλλον, τον υπερηχητικό αισθητήρα και το είδος του στόχου.

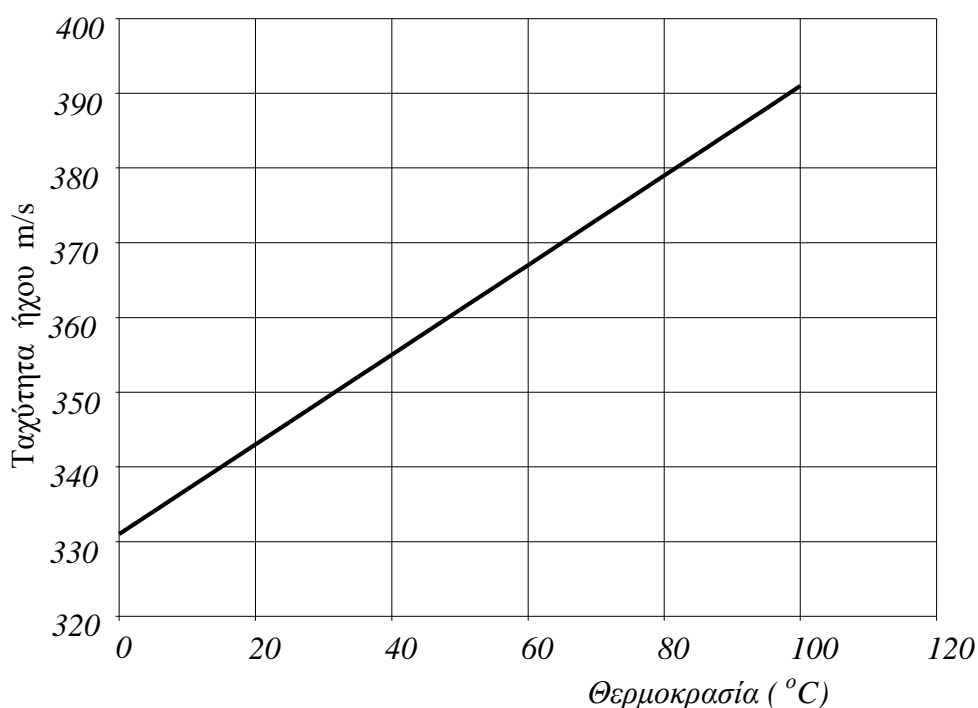
Συγκεκριμένα, θα αναλυθούν τα ακόλουθα:

1. Η ταχύτητα του ήχου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία
2. Η εξασθένηση του ήχου σε συνάρτηση με την συχνότητα λειτουργίας και την υγρασία
3. Η παρουσία θορύβου περιβάλλοντος
4. Η ισχύς της πίεσης σε συνάρτηση με την συχνότητα και την απόσταση από τον πομπό
5. Η ισχύς της πίεσης επιστροφής λόγω ανάκλασης από το στόχο – Επίπεδα ηχούς
6. Τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των υπερηχητικών μετατροπέων

2.2.1 Ταχύτητα του ήχου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία

Σε ένα echo ranging σύστημα, μετριέται ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της εκπομπής και λήψης του υπερηχητικού κύματος . Η απόσταση από το στόχο υπολογίζεται έπειτα χρησιμοποιώντας την ταχύτητα του ήχου στο μέσο μετάδοσης, το οποίο είναι συνήθως αέρας. Η ακρίβεια της μέτρησης της απόστασης των στόχων είναι ανάλογη προς την ακρίβεια της ταχύτητας του ήχου που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό. Η πραγματική ταχύτητα του ήχου είναι συνάρτηση της σύστασης και της θερμοκρασίας του μέσου όπως άλλωστε είχε αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Προσεγγιστικά για την ταχύτητα του ήχου σε οποιαδήποτε θερμοκρασία δίνεται από την σχέση:

$$u_{hcou} = 331 + 0,6 \cdot q \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.5 Ταχύτητα του ήχου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία

2.2.3 Εξασθένηση του ήχου σε συνάρτηση με την συχνότητα λειτουργίας και την υγρασία

Τα υπερηχητικά κύματα εξασθενούν λόγω απορρόφησης από το μέσο διάδοσης. Ξέροντας την απορρόφηση μπορούμε να καθορίσουμε τη μέγιστη εμβέλεια του συστήματος . Η εξασθένηση του ήχου αυξάνεται με τη συχνότητα, και για δεδομένη

συχνότητα η εξασθένηση των υπερηχητικών κυμάτων εξαρτάται από την υγρασία. Η ποσότητα της υγρασίας που προκαλεί τη μέγιστη εξασθένηση δεν είναι η ίδια για όλες τις συχνότητες . Παραδείγματος χάριν, πάνω από 125 kHz, η μέγιστη εξασθένηση εμφανίζεται στα 100% RH ενώ στα 40 kHz, η μέγιστη εξασθένηση εμφανίζεται 50% σχετικής υγρασίας (RH – Relative Humidity).

$$\text{Όπου } RH = \frac{ugrasia_{\text{ΑΠΟΛΥΤΗ}} (gr / m^3)}{ugrasia_{\text{ΚΟΡΕΣΜΟΥ}} (gr / m^3)}$$

Μια καλή εκτίμηση για τη μέγιστη εξασθένηση στον αέρα στη θερμοκρασία δωματίου σε όλες τις υγρασίες για τις συχνότητες μέχρι 50 kHz δίνεται από:

$$a(f) = 0.0328f \quad (2.3)$$

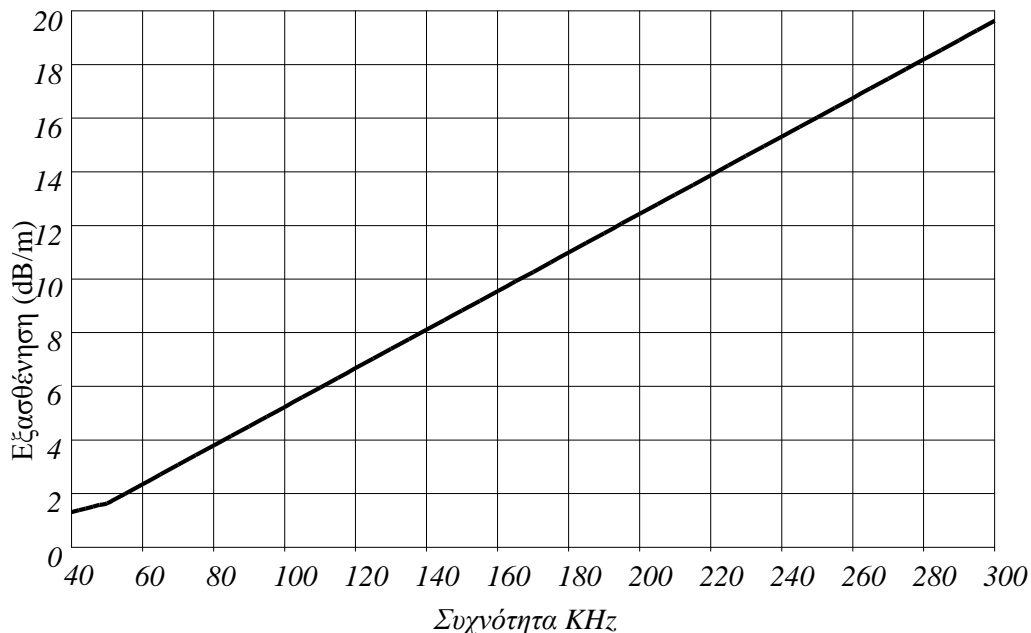
Όπου: $a(f)$ η εξασθένηση σε dB/m και

f η συχνότητα του
ήχου σε kHz

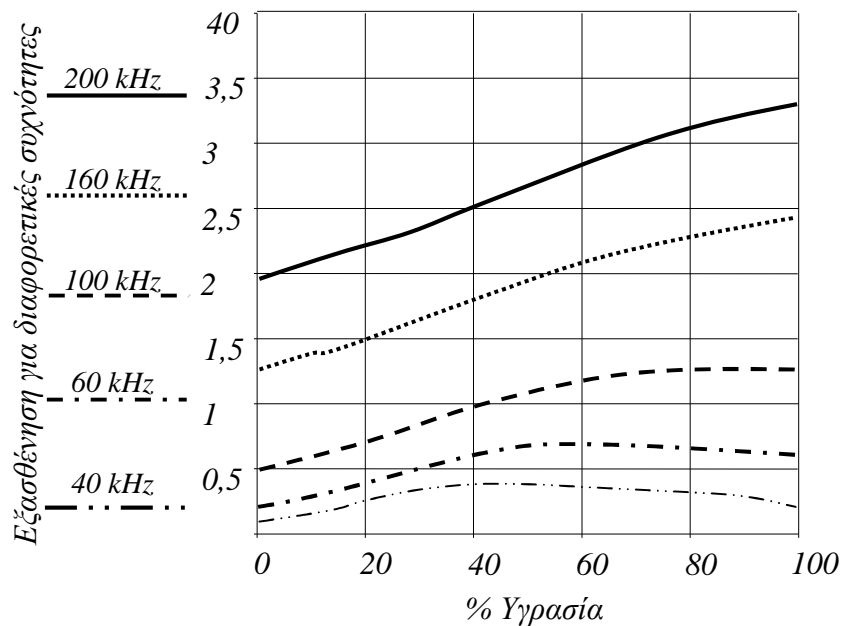
Μεταξύ 50 kHz και 300 kHz, η μέγιστη μείωση σε όλες τις υγρασίες είναι:

$$a(f) = 0.072f - 1.97 \quad (2.4)$$

Το σχήμα 2.6 και το σχήμα 2.7 δείχνουν την εξασθένηση του ήχου σε συνάρτηση με τη συχνότητα και την υγρασία.



Σχήμα 2.6 Η εξασθένηση του ήχου στον αέρα στη θερμοκρασία δωματίου σε όλες τις υγρασίες για συχνότητες από 40 kHz έως και 300 kHz.



Σχήμα 2.7 Η εξασθένηση του ήχου στον αέρα σε θερμοκρασία δωματίου σε συνάρτηση με την υγρασία για συχνότητες από 40 kHz έως 200 kHz.

2.2.4 Παρουσία θορύβου περιβάλλοντος

Η ισχύς του υπερηχητικού θορύβου στο περιβάλλον μικραίνει καθώς η συχνότητα αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει διότι ο θόρυβος που παράγεται μειώνεται πολύ καθώς ταξιδεύει μέσω του αέρα και επίσης επειδή παράγεται λιγότερος θόρυβος στις υψηλότερες συχνότητες στο περιβάλλον.

2.2.5 Ισχύς της πίεσης σε συνάρτηση με την συχνότητα και την απόσταση από τον πομπό

Στην ακουστική, οι ηχητικές πιέσεις εκφράζονται σε decibels. Η ηχητική πίεση μετριέται συνήθως σε μPa σε μια απόσταση αναφοράς, R_0 από τον αισθητήρα, συνήθως 30 cm. Το επίπεδο ηχητικής πίεσης (SPL) στο R_0 μετατρέπεται έπειτα σε dB

$$SPL(R_o) = 20 \log(p) \quad (2.5)$$

όπου p η ηχητική πίεση σε μPa στην απόσταση R_o .

Λόγω απορρόφησης από το μέσο διάδοσης (αέρας) και μείωσης της έντασης με την απόσταση (σφαιρικά κύματα) το επίπεδο της ηχητικής πίεσης (SPL) σε απόσταση R από την πηγή δίνεται από την παρακάτω σχέση

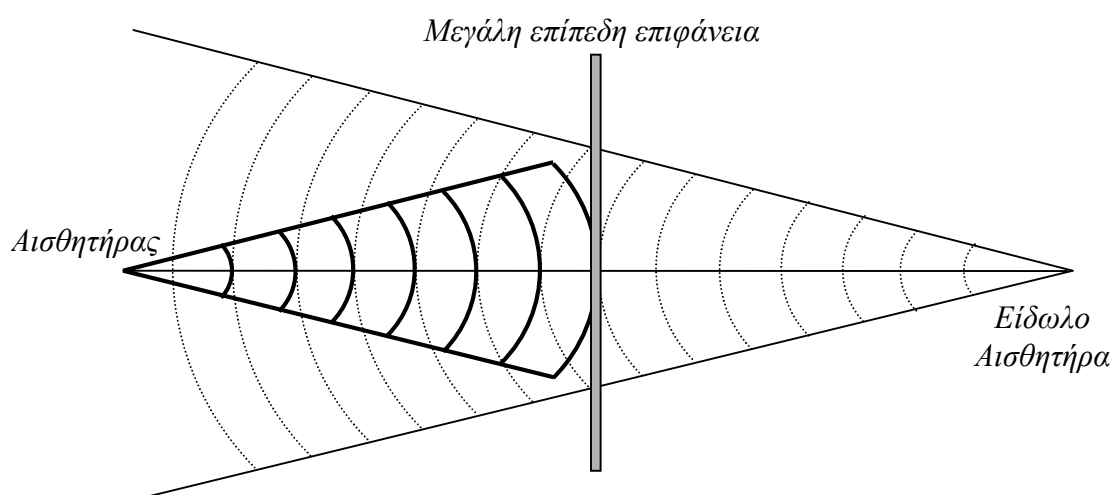
$$SPL(R) = SPL(R_o) - 20 \log\left(\frac{R}{R_o}\right) - a(f)R \quad (2.6)$$

2.2.6 Ισχύς της πίεσης επιστροφής λόγω ανάκλασης από το στόχο – Επίπεδα ηχούς. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω η ισχύς της πίεσης που επιστρέφει από τον στόχο (echo level) θα είναι :

$$EL = SPL(R_o) - 40 \log\left(\frac{R}{R_o}\right) - 2a(f)R \quad (2.7)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η απόσταση διάδοσης είναι $2R$.

Ο τύπος αυτός ισχύει στην περίπτωση που ο στόχος-σκεδαστής είναι μια μεγάλη επίπεδη επιφάνεια η οποία ανακλά ολόκληρη την υπερηχητική δέσμη (σχήμα 2.8)



Σχήμα 2.8 Ανάκλαση υπερηχητικής δέσμης από μεγάλη επίπεδη επιφάνεια. [32]

Στην περίπτωση όπου ο στόχος σκεδάζει την υπερηχητική δέσμη τότε μόνο ένα μέρος της θα φτάσει στο δέκτη. Η ιδιότητα του στόχου να αντανακλά ένα ποσοστό της

ηχητικής ακτινοβολίας περιγράφεται από το όρο TS (target strength) ή αλλιώς ενεργός διατομή στόχου.

Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα θεωρητικά TS μερικών απλών σχημάτων.

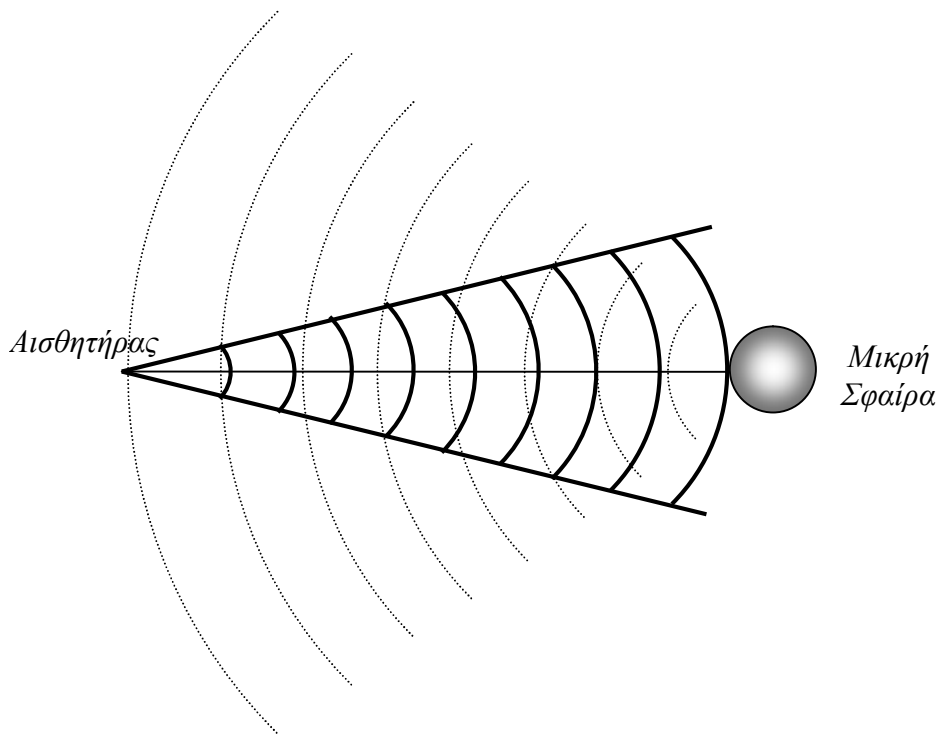
Θεωρητική ενεργός διατομή απλών σχημάτων				
d : απόσταση βαθμονόμησης, $k = \frac{2p}{l}$: κυματικός αριθμός				
D : Η απόσταση του στόχου				
Σχήμα	t $TS = 10 \log t$	Χαρακτηριστικά σχήματος	Διεύθυνση Προσπίπτουσας ως προς την επιφάνεια του αντικειμένου	Περιορισμοί (Συνθήκες)
Σφαίρα	$\frac{R^2}{4}$	R : Η ακτίνα της σφαίρας	Οποιαδήποτε	$k \cdot R > 1$ $D > R$
Κύλινδρος πολύ μεγάλου μήκους	$\frac{R \cdot D}{2}$	R : Η ακτίνα του κυλίνδρου	Κάθετα στον άξονα του κυλίνδρου	$k \cdot R > 1$ $D > R$
Κύλινδρος μικρού μήκους	$\frac{R \cdot L^2}{2l}$	R : Η ακτίνα του κυλίνδρου L : το μήκος του κυλίνδρου	Κάθετα στον άξονα του κυλίνδρου	$k \cdot R > 1$ $D > \frac{L^2}{2}$
Ελαφρώς κυρτή επιφάνεια	$\frac{S}{16p}$	S : ολικό εμβαδό φαινόμενης εκ του πομπού επιφάνειας	Ισότροπα προς κάθε διεύθυνση	$D > l$ από οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας
Ελλειψοειδές	$\left(\frac{b \cdot c}{2a}\right)^2$	a, b, c : οι άξονες με κύριο άξονα τον a	Κάθετα στον κύριο άξονα	$ka, kb, kc > 1$ $D > a, b, c$

Πίνακας 2.1 Ενεργός διατομή απλών σχημάτων

Στην περίπτωση στόχων-σκεδαστών που σκεδάζουν μέρος της ηχητικής ενέργειας το echo level δίνεται από τον τύπο

$$EL = SPL(R_o) - 40 \log\left(\frac{R}{R_o}\right) - 2a(f)R + TS \quad (2.8)$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ανάκλαση της ηχητικής δέσμης από μία μικρή σφαίρα.



Σχήμα 2.9 Ανάκλαση υπερηχητικής δέσμης από μικρή σφαίρα. [32]

Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι αποστάσεις στις οποίες η λαμβανόμενη ισχύς ενός υπερηχητικού δέκτη από διάφορους στόχους φτάνει το 1μPa για διαφορετικές τιμές συχνοτήτων λειτουργίας. Η τιμή 1μPa είναι τυπική τιμή κατωφλίου για τους περισσότερους αισθητήρες που υπάρχουν στο εμπόριο.

Συχνότητα	Στόχος Μεγάλη επίπεδη επιφάνεια	Στόχος Σφαίρα ακτίνας 15,24 cm	Διαφορά απόστασης για την σφαίρα (ποσοστιαία διαφορά)
200 kHz	1,58 m	1,06 m	0,52 m (33%)
160 kHz	1,98 m	1,22 m	0,76 m (38%)
100 kHz	3,20 m	1,71 m	1,49 m (47%)
63 kHz	5,54 m	2,38 m	3,16 m (57%)
40 kHz	9,20 m	3,05 m	6,15 m (67%)

Πίνακας 2.2: Αποστάσεις διαφορετικών στόχων για λαμβανομένη ισχύς υπερηχητικού δέκτη στα 1μPa για διαφορετικές τιμές συχνοτήτων λειτουργίας

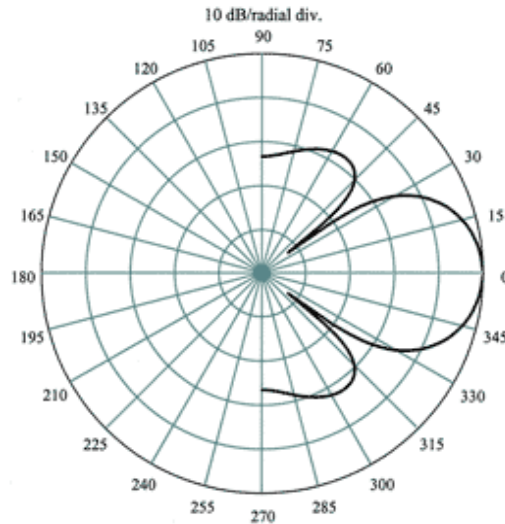
2.2.7 Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των υπερηχητικών μετατροπέων.

Οι υπερηχητικοί μετατροπείς μπορούν να σχεδιαστούν κατάλληλα ώστε να έχουν διαγράμματα ακτινοβολίας που κυμαίνονται από σχεδόν ομοιοκατευθυντικά έως και εξαιρετικά κατευθυντικά (πολύ στενή δέσμη ακτινοβολίας).

Όπως είχαμε αναφέρει το εύρος του λοβού ακτινοβολίας εξαρτάται από το λόγο D/λ. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος D/λ τόσο πιο στενή είναι η δέσμη ακτινοβολίας του μετατροπέα.

Σε συστήματα μέτρησης απόστασης είναι επιθυμητό η υπερηχητική δέσμη να είναι στενή δηλαδή η διάμετρος D του μετατροπέα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με το μήκος κύματος λ.

Στο επόμενο σχήμα δίνεται το τυπικό διάγραμμα ακτινοβολίας ενός μετατροπέα με D/λ=2 ο οποίος παρουσιάζει γωνιακό εύρος περίπου $\Delta\theta\approx 70^\circ$ και άνοιγμα μισής ισχύος $\Delta 3dB\approx 30^\circ$



Σχήμα 2.10 Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας κυκλικού μετατροπέα
(Diameter/Wavelength = 2) [35]

2.3 Προσδιορισμός θέσης

Αναφερόμενοι στον όρο της θέσης ενός αντικειμένου θα πρέπει να την διαχωρίσουμε από την έννοια της απόστασης. Προσδιορισμός της θέσης ενός αντικειμένου σημαίνει προσδιορισμό των συντεταγμένων του ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς είτε στο επίπεδο είτε στο χώρο. Προφανώς η γνώση της ακριβούς θέσεως συνεπάγεται την γνώση της απόστασης του, ο προσδιορισμός της όμως είναι πιο σύνθετος και δεν μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση ενός μόνο πομποδέκτη.

Οι τρεις κυριότερες τεχνικές για τον προσδιορισμό θέσης ενός αντικειμένου είναι:

1. Τριγωνομετρικός υπολογισμός (triangulation)
2. Ανάλυση σκηνών (scene analysis)
3. Εγγύτητα (proximity)

Τα συστήματα εντοπισμού θέσης μπορεί να υλοποιούν τις παραπάνω τεχνικές ξεχωριστά ή σε συνδυασμό. Επί της παρούσης θα ασχοληθούμε μόνο με την πρώτη εξ' αυτών.

2.3.1 Τριγωνομετρικός υπολογισμός (Triangulation)

Η τριγωνομετρία ήταν γνωστή από την αρχαιότητα. Η τριγωνομέτρηση είναι μία μέθοδος που βασίζεται στην ιδέα ότι εάν κάποιος γνωρίζει το μήκος μιας πλευράς

ενός τριγώνου και δύο από τις γωνίες του, το μήκος των άλλων πλευρών μπορεί να υπολογιστεί. Η γνωστή πλευρά καλείται βάση.

Ο υπολογισμός της θέσης ενός αντικειμένου με τη μέθοδο του τριγωνομετρικού υπολογισμού γίνεται χρησιμοποιώντας τις γεωμετρικές ιδιότητες των τριγώνων.

Ο τριγωνομετρικός υπολογισμός διακρίνεται σε δύο υποκατηγορίες:

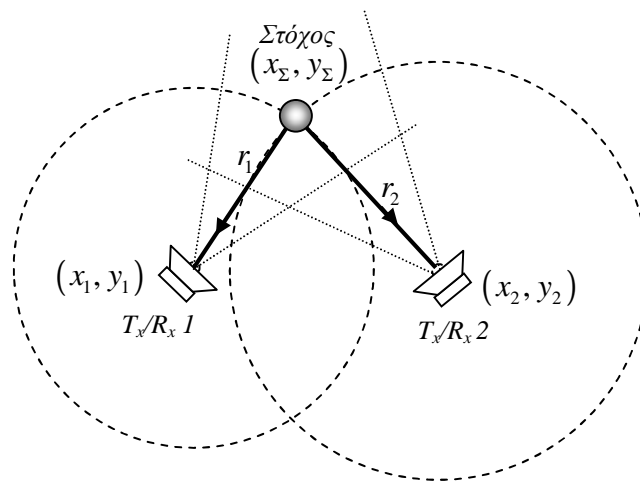
- Μέτρηση αποστάσεων (Lateration)
- Μέτρηση των γωνιών (Angulation)

Μέτρηση αποστάσεων (Lateration)

Στην μέθοδο αυτή γίνονται μετρήσεις της απόστασης του αντικειμένου από σημεία αναφοράς με γνωστή θέση (Σχήμα 2.11). Στον δισδιάστατο χώρο απαιτούνται δύο σημεία και στον τρισδιάστατο τουλάχιστον τρία σημεία αναφοράς (Σχήμα 2.12).

Η μέτρηση της απόστασης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας διάφορες προσεγγίσεις, όπως χρόνος διάδοσης (time-of-flight) ραδιοκυμάτων ή υπερήχων, εξασθένηση σήματος (attenuation).

Τα συστήματα εντοπισμού GPS και Active Bat χρησιμοποιούν την μέθοδο αυτή.



Σχήμα 2.11 Μέτρηση των αποστάσεων (Lateration) στο δισδιάστατο χώρο [9]

Οι συντεταγμένες θέσεως του στόχου $(x_Σ, y_Σ)$ προκύπτουν ως λύση του παρακάτω συστήματος εξισώσεων:

$$\begin{aligned}(x_Σ - x_1)^2 + (y_Σ - y_1)^2 &= r_1^2 \\(x_Σ - x_2)^2 + (y_Σ - y_2)^2 &= r_2^2\end{aligned}\tag{2.9}$$

Η λύση του παραπάνω συστήματος είναι:

$$\begin{aligned}
y_{\Sigma} &= y_1 - \frac{1}{c^2} \left(bd \pm |a| \sqrt{r_1^2 c^2 - d^2} \right) \\
x_{\Sigma} &= x_1 \pm \sqrt{r_1^2 - (y_{\Sigma} - y_1)^2}
\end{aligned}
\tag{2.10}$$

Όπου:

$$a = x_1 - x_2$$

$$b = y_1 - y_2$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$d = \frac{r_2^2 - r_1^2 - c^2}{2}$$

Στην περίπτωση που θεωρήσουμε ως ορθοκανονικό σύστημα με αρχή ένα από τους δύο αισθητήρες τότε οι παραπάνω σχέσεις απλοποιούνται και έχουμε:

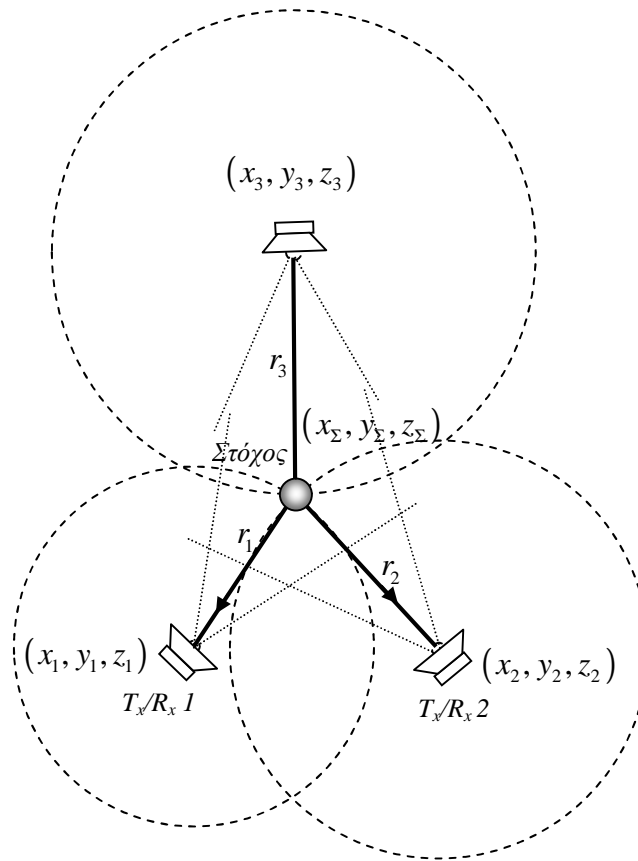
$$\begin{aligned}
y_{\Sigma} &= y - \frac{1}{c^2} \left(yd \pm |x| \sqrt{r_1^2 c^2 - d^2} \right) \\
x_{\Sigma} &= \pm \sqrt{r_1^2 - y_{\Sigma}^2}
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

Όπου:

(x, y) η θέση στο επίπεδο του δεύτερου αισθητήρα

$$c = \sqrt{x^2 + b^2}$$

$$d = \frac{r_2^2 - r_1^2 - c^2}{2}$$



Σχήμα 2.12. Μέτρηση των αποστάσεων (Lateration) στο τρισδιάστατο χώρο. [9]

Οι συντεταγμένες θέσεως του στόχου $(x_Σ, y_Σ, z_Σ)$ προκύπτουν από τον υπολογισμό ενός σημείου στον χώρο έχοντας ως δεδομένα τρεις αποστάσεις από αντίστοιχα σημεία αναφοράς. Τα παρακάτω αναφέρονται σε συστήματα τοπολογίας 3-3, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την απλούστερη τοπολογία 1-3, όπου οι τρεις πομποί ταυτίζονται. Η λύση εξάγεται εξισώνοντας τα x, y, z των εξισώσεων των τριών σφαιρών και λύνοντας το σύστημα που δημιουργείται. Χάριν απλούστευσης των πράξεων, θεωρούμε σε καρτεσιανές συντεταγμένες και τα τρία σημεία αναφοράς πάνω στο επίπεδο $z=0$: το πρώτο σημείο αναφοράς στην αρχή των αξόνων $(0,0,0)$, το δεύτερο πάνω στον άξονα x $(d,0,0)$, και το τρίτο στο $(i,j,0)$. Η παρακάτω επίλυση βέβαια μπορεί να γίνει για οποιαδήποτε τριάδα σημείων καθώς αυτά θα ορίζουν ένα δικό τους επίπεδο, κατ'αντιστοιχία με το $z=0$, και να ανάγουμε στην συνέχεια στο καρτεσιανό σύστημα.

Έτσι έχουμε τις εξισώσεις (αν r_1, r_2, r_3 οι αποστάσεις και άρα οι ακτίνες των τριών σφαιρών)

$$r_1^2 = x_Σ^2 + y_Σ^2 + z_Σ^2 \quad (2.12)$$

$$r_2^2 = (x_\Sigma - d)^2 + y_\Sigma^2 + z_\Sigma^2 \quad (2.13)$$

$$r_3^2 = (x_\Sigma - i)^2 + (y_\Sigma - j)^2 + z_\Sigma^2 \quad (2.14)$$

Λύνοντας τις δυο πρώτες ως προς x_Σ και εξισώνοντας, έχουμε

$$x_\Sigma = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad (2.15)$$

Αντικαθιστώντας στην πρώτη βρίσκουμε την εξίσωση του κύκλου που ορίζουν οι δυο πρώτες σφαίρες

$$y_\Sigma^2 + z_\Sigma^2 = r_1^2 - \frac{(r_1^2 - r_2^2 + d^2)^2}{4d^2} \quad (2.16)$$

Από την (1) έχουμε:

$$r_1^2 = x_\Sigma^2 + y_\Sigma^2 + z_\Sigma^2 \Rightarrow r_1^2 - x_\Sigma^2 = y_\Sigma^2 + z_\Sigma^2$$

Αντικαθιστώντας στην (2.15)

$$r_1^2 - x_\Sigma^2 = r_1^2 - \frac{(r_1^2 - r_2^2 + d^2)^2}{4d^2} \Rightarrow$$

$$y_\Sigma = \frac{r_1^2 - r_3^2 + (x_\Sigma - i)^2}{2j} + \frac{j}{2} = \frac{r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j} x_\Sigma \quad (2.17)$$

Και τελικά μέσω της πρώτης, εύκολα το z υπολογίζεται μέσω της

$$z_\Sigma = \pm \sqrt{r_1^2 - x_\Sigma^2 - y_\Sigma^2} \quad (2.18)$$

Υπολογίσαμε λοιπόν τη λύση για τις συντεταγμένες του ζητούμενου σημείου. Το σημείο στο οποίο πρέπει να δώσουμε προσοχή είναι η έκφραση για το z . Αφού εκφράζεται σαν τετραγωνική ρίζα, μπορεί το πρόβλημα να έχει καμία, μία ή δυο λύσεις ανάλογα με την υπόριζη ποσότητα. Το πρόβλημα γίνεται κατανοητό αν φανταστούμε σχηματικά τον κύκλο που δημιουργείται από την τομή των δύο πρώτων σφαιρών και την τομή αυτού του κύκλου με την τρίτη σφαίρα. Αν η τρίτη σφαίρα δεν τέμνει τον κύκλο, το z ισούται με την ρίζα αρνητικού αριθμού – δεν υπάρχει πραγματική λύση. Αν τον ακουμπάει μόνο σε ένα σημείο, τότε $z = 0$ και τέλος αν ο κύκλος τέμνει την σφαίρα σε δύο σημεία, το z ισούται με συν ή μείον την τετραγωνική ρίζα ενός θετικού αριθμού.

Αν ισχύει η πρώτη περίπτωση, δεν έχουμε δηλαδή πραγματική λύση, μάλλον σημαίνει ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα στις μετρήσεις. Η πλησιέστερη λύση σε αυτήν την περίπτωση θα είναι μηδέν. Αν πάλι προκύπτουν δυο διαφορετικά z , είναι ανάγκη

να χρησιμοποιηθεί κάποια τεχνική ώστε να γίνεται απόρριψη του σημείου που δεν με ενδιαφέρει και να κρατήσω την πραγματική τιμή του z .

Μια λύση είναι η χρήση μιας τέταρτης μέτρησης, η οποία θα εξαλείψει κάθε αμφιβολία και ταυτόχρονα θα μειώσει περισσότερο τα τυχόν σφάλματα του συστήματος, με τίμημα όμως την περαιτέρω περιπλοκοποίηση του.

Προτιμότερη λοιπόν είναι η με κάποιο λογικό επιχείρημα απόρριψη του ενός σημείου. Η απόρριψη μπορεί να γίνεται με την βοήθεια ενός προβλεπτικού αλγόριθμου, ο οποίος βάσει των προηγούμενων μετρήσεων θα βρίσκει ποια εκ των δυο θέσεων είναι αυτή η οποία είναι πιθανότερη.

Οι παραπάνω εκφράσεις για τα x, y, z συνιστούν ένα **μη γραμμικό σύστημα** τριών αγνώστων με τρεις εξισώσεις.

Η επίλυση του μαθηματικού προβλήματος πρέπει να γίνεται σε πραγματικό χρόνο μέσω του υπολογιστή. Λόγω του θορύβου στις μετρήσεις, η απευθείας λύση δεν θα μας δίνει πάντα ορθά αποτελέσματα. Μια επαναληπτική μέθοδος, θα βοηθούσε στο να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα αφού, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των προηγούμενων μετρήσεων θα είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τιμές κοντά στις μετρούμενες και έτσι να απορρίπτουμε ή να βελτιώνουμε τα σφάλματα.

Παρακάτω θα αναφέρουμε αλγορίθμους οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την επίλυση του σύνθετου αυτού προβλήματος. Οι αλγόριθμοι αυτοί διακρίνονται σε αλγορίθμους χωρίς μνήμη και σε αλγορίθμους με μνήμη. Οι πρώτοι πραγματοποιούν εκτίμηση της θέσης κάνοντας χρήση μόνον των τρεχόντων μετρήσεων. Οι δεύτεροι που ονομάζονται και δυναμικοί, χρησιμοποιούν εκτιμήσεις από παρελθούσες μετρήσεις μαζί με τις τρέχοντες μετρήσεις, και άρα δίνουν ακριβέστερες εκτιμήσεις.

Οι δυναμικοί αλγόριθμοι λόγω των καλύτερων αποτελεσμάτων που δίνουν γενικά προτιμούνται περισσότερο, αν και απαιτούν μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ. Από την άλλη, οι αλγόριθμοι χωρίς μνήμη προτιμούνται σε περιπτώσεις που η κίνηση είναι πιο αργή ή περίεργη, καθώς και όταν ο ρυθμός με τον οποίο λαμβάνονται μετρήσεις με μικρό ρυθμό.

Συνηθέστερες λύσεις με αλγορίθμους χωρίς μνήμη είναι, πέρα από την αλγεβρική επίλυση, η λύση μέσω σειρών Taylor και η μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας. Από τους δυναμικούς αλγορίθμους, προτιμάται η λύση με την χρήση φίλτρων Kalman.

Μέτρηση των γωνιών (Angulation):

Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με τη μέθοδο μέτρησης των αποστάσεων.

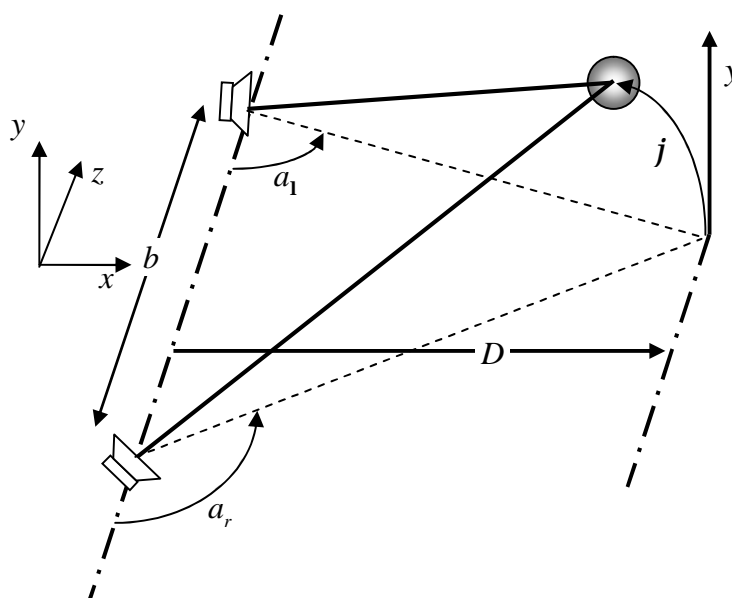
Για τον προσδιορισμό της θέσης χρησιμοποιείται η απόσταση μεταξύ των σημείων αναφοράς, καθώς και οι γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ των σημείων αναφοράς και του αντικειμένου.

Για το δισδιάστατο χώρο απαιτούνται δύο μετρήσεις γωνιών και μία μέτρηση απόστασης μεταξύ των δύο σημείων αναφοράς.

Για το τρισδιάστατο χώρο απαιτούνται τρεις μετρήσεις γωνιών και οι τρεις αποστάσεις μεταξύ των σημείων αναφοράς.

Στο σχήμα 2.13 οι δυο πλευρές του τριγώνου εκτείνονται από κορυφές της βάσης στο σημείο που βρίσκεται ο στόχος. Εάν οι γωνίες που διαμορφώνονται μεταξύ αυτών των γραμμών και της γραμμής της βάσης μπορούν να καθοριστούν, η απόσταση υπολογίζεται με το παρακάτω τύπο:

$$D = b \frac{\sin a_1 \sin a_r}{\sin (a_r - a_1)} \quad (2.19)$$

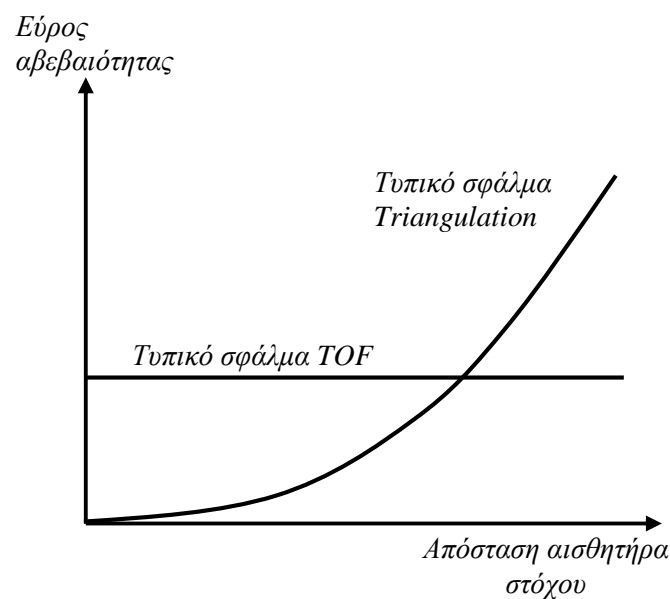


Σχήμα 2.13 Γεωμετρία της μεθόδου τριγωνομέτρησης για υπολογισμό της απόστασης απομακρυσμένου στόχου [10]

Η κλασική παθητική τεχνική τηλεμέτρησης βασισμένη στον ανωτέρω τύπο. Ένας παρατηρητής χρησιμοποιεί ένα όργανο ακριβείας (για μέτρηση γωνίας) και σημαδεύει έναν στόχο από δύο θέσεις που χωρίζονται από μια γνωστή γραμμή βάσης. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός της απόστασης από το άνθρωπο (όραση) βασίζεται εν μέρη στην τεχνική της τριγωνομέτρησης.

Οι ενεργητικές τεχνικές τριγωνομέτρησης χρησιμοποιούν μια πηγή φωτός, συχνά λέιζερ, για να δημιουργήσουν την μια πλευρά του τριγώνου, και τον άξονα εξέτασης οπτικών μέσων ανίχνευσης του φωτός για να δημιουργηθεί η δεύτερη πλευρά. Ο χωρισμός μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή είναι η βασική γραμμή.

Η ακρίβεια της μέτρησης απόστασης που βασίζεται στην τριγωνομέτρηση μικραίνει με το τετράγωνο την απόστασης του στόχου από το όργανο. Στο σχήμα 2.14 παρουσιάζεται η αβεβαιότητα (το λάθος στην μέτρηση) ανάλογα με την μετρούμενη απόσταση για τις τεχνικές του χρόνου πτήσης (time of flight) και της τριγωνομέτρησης (triangulation)



Σχήμα 2.14 Το λάθος στην μέτρηση απόστασης των μεθόδων του χρόνου πτήσης (time of flight) και της τριγωνομέτρησης (triangulation) το οποίο οφείλεται στις αρχές λειτουργίας της κάθε μεθόδου [10]

Κεφάλαιο 3

3. Μετάδοση Ηχητικού Κύματος

3.1 Εισαγωγή

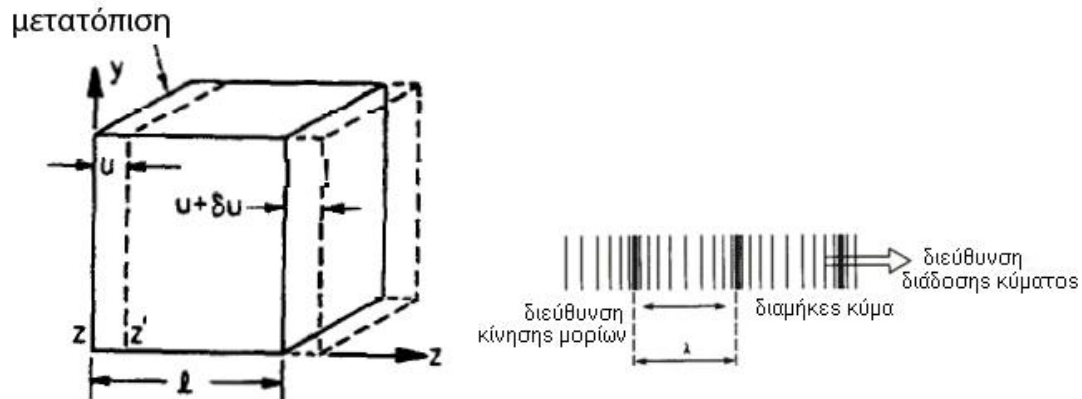
Σε αυτό το κεφάλαιο θα καλυφθεί η θεωρία μετάδοσης των ηχητικών κυμάτων στα στερεά και τα ρευστά. Θέλει να γνωρίζει κανείς τι είδους κύματα μπορούν να μεταδοθούν σε διαφόρων ειδών υλικά, τον τρόπο με τον οποίο αυτά ανακλώνται και μεταφέρονται μεταξύ διαφορετικών υλικών, τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται/ενεργοποιούνται, και τις σχέσεις που συνδέουν τις ιδιότητές τους με την μάζα, την πυκνότητα, και την σκληρότητα των μέσων που μεταδίδονται.

Ενδιαφέρουν επίσης οι ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων, οι οποίοι είναι και οι αποδοτικότεροι, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται περισσότερο από ανάλογες εφαρμογές που χρειάζεται η μετατροπή της ηλεκτρικής, σε μηχανική ενέργεια. Έτσι θα πρέπει να βρεθούν τρόποι ώστε να έχει καλύτερη απόδοση η μετατροπή αυτή, να «αποκωδικοποιηθεί» η ηλεκτρική τους αντίσταση σε μια σχέση συχνότητας, και να κατανοηθούν τα χαρακτηριστικά των αποκρίσεων των παλμών τους. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να γίνει γνωστό το πώς μεταδίδονται τα ηχητικά κύματα σε ένα υλικό.

Στην πραγματικότητα, η επεξεργασία ενός ηχητικού κύματος που αναπτύσσεται μέσα σε ένα υλικό είναι πολύπλοκη για το λόγο ότι τα υλικά δεν είναι πάντα ισότροπα. Έτσι, οι παράμετροι ενός κύματος πρέπει να εκφραστούν ποσοτικά με σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων. Για να απλοποιηθούν τα αποτελέσματα, θα θεωρηθεί ότι τα κύματα που εξετάζονται είναι αμιγώς διαμήκη, ή εγκάρσια (διατμητικά), και ότι όλα τα φυσικά χαρακτηριστικά τους (μετατοπίσεις μορίων, ταχύτητες μορίων, τάσεις, παραμορφώσεις, ελαστικότητα, πιεζοηλεκτρικές συζεύξεις) μπορούν να εκφραστούν μονοδιάστατα. Επιπλέον, θα πρέπει να περιοριστεί η ανάλυση στο επίπεδο. Τα αποτελέσματα θα είναι ανάλογα μιας ολοκληρωμένης ανάπτυξης σε ισότροπα υλικά, και ισχύουν ακόμη και όταν η μετάδοση του κύματος εφαρμόζεται σε κρυσταλλικά υλικά, όταν οι ελαστικές σταθερές και τα φυσικά χαρακτηριστικά τους έχουν οριστεί σωστά.

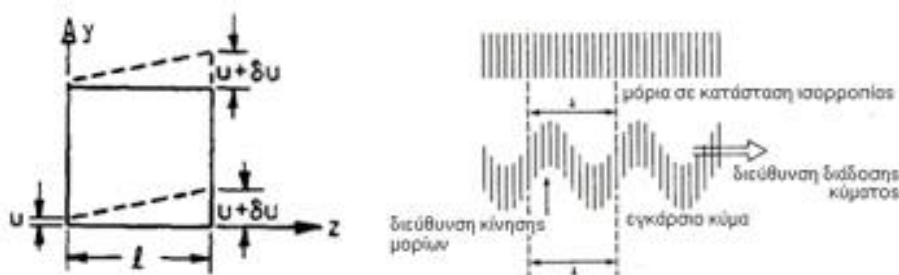
3.2 Ηχητικά κύματα σε μη-πιεζοηλεκτρικά υλικά. Μονοδιάστατη θεωρία.

Αρχικά θα ορισθούν οι δύο βασικοί τύποι κυμάτων οι οποίοι είναι σημαντικοί για την ηχητική μετάδοση. Το πρώτο είναι το διαμήκες κύμα, στο οποίο η κίνηση των μορίων στο υλικό εμφανίζεται μόνο κατά μήκος της μετάδοσης. Έτσι, όταν εφαρμόζεται μια δύναμη στο υλικό, αυτό εφελκύεται (ή θλίβεται) κατά μήκος μόνο του άξονά z , όπως δείχνει το σχήμα 3.1:



Σχήμα 3.1: Αξονική (z) επιμήκυνση θετική παραμόρφωση και πλευρικές συρρικνώσεις (x και y) αρνητικές παραμορφώσεις ως αποτέλεσμα της εφαρμογής εφελκυστικής τάσης. Οι συνεχείς γραμμές αναπαριστούν τις διαστάσεις πριν την εφαρμογή τάσης ενώ οι διακεκομμένες μετά.[13]

Ο δεύτερος τύπος κύματος είναι τα εγκάρσια (διατμητικά), στα οποία η κίνηση των μορίων στο υλικό είναι κάθετη στην διάδοση του κύματος, όπως στο σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2 Διατμητική παραμόρφωση ως αποτέλεσμα της εφαρμογής διατμητικής τάσης. Οι συνεχείς γραμμές αναπαριστούν τις διαστάσεις πριν την εφαρμογή τάσης ενώ οι διακεκομμένες μετά. [13]

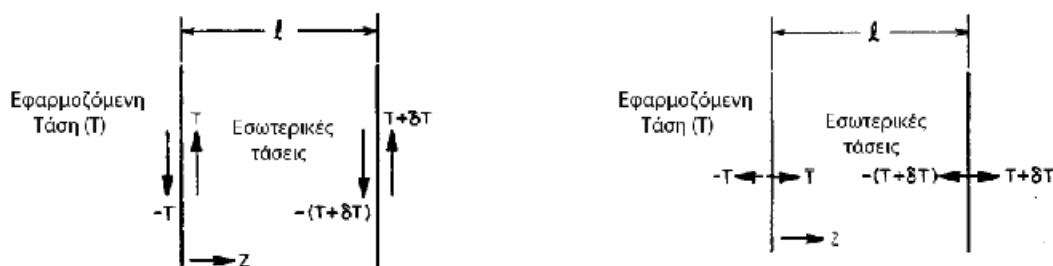
Τα εγκάρσια κύματα είναι ταυτισμένα με την κάμψη και τον λυγισμό των υλικών. Όπως φαίνεται στο σχ. 3.2, δεν υπάρχει αλλαγή στην πυκνότητα, ή στον όγκο του υλικού στο οποίο αναπτύσσεται ένα εγκάρσιο κύμα.

Γενικά, τα ηχητικά κύματα που αναπτύσσονται σε ένα στερεό μέσο μπορούν να συνδυάσουν και τις δύο μορφές κυμάτων που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Εντούτοις, σε ένα κρυστάλλινο υλικό με ανισότροπες ελαστικές σταθερές, η διεύθυνση της μετάδοσης μπορεί να επιλεγεί κατά μήκος ενός απ' τους κύριους άξονές του. Σε αυτή την περίπτωση, η ανάπτυξη μπορεί να είναι αποκλειστικά διαμήκη, ή εγκάρσια κύματα. Στους αισθητήρες, στις μικροκυματικές γραμμές καθυστέρησης, τους ενισχυτές, και σε όλες τις άλλες συσκευές υπερήχων, η μετάδοση επιλέγεται να γίνεται κατά μήκος ενός απ' τους κύριους άξονες του υλικού.

Θα ορισθεί η βασική εξίσωση για την μετάδοση των διαμήκων κυμάτων. Τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι παρόμοια με αυτά για την μετάδοση των διατμητικών. Μια πολυπλοκότερη προσέγγιση θα χρειαστεί όταν η μετάδοση γίνει υπό γωνία σε σχέση με έναν απ' τους κύριους άξονες του υλικού. Για το λόγο αυτό η μελέτη θα περιορισθεί στην μονοδιάστατη μορφή μετάδοσης των κυμάτων.

3.2.1 Τάση

Ο λόγος της δύναμης προς την επιφάνεια που εφαρμόζεται αυτή σε ένα υλικό, ονομάζεται τάση. Η δύναμη όταν εφαρμοστεί στο υλικό, το εφελκύει (ή το συνθλίβει). Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζεται ένα δοκίμιο πάχους I που υπόκειται σε εφελκυσμό, και ένα που υπόκειται σε διάτμηση:



Σχήμα 3.3 Δοκίμιο πάχους I που υπόκειται σε εφελκυσμό (αριστερά) , και σε διάτμηση (δεξιά) [13]

Η τάση $T(z)$ ορίζεται ως η δύναμη ανά μονάδα επιφανείας σε μόρια αριστερά του άξονα z . Να σημειωθεί ότι η διαμήκης τάση λαμβάνεται θετική όταν η δύναμη

ασκείται στην δεξιά πλευρά της πλάκας (θετικά του z), ενώ η δύναμη που ασκείται αριστερά της πλάκας είναι $-T$ (αριστερά του z). Αν η τάση είναι θετική στα θετικά των x και y διευθύνσεων, τότε αναφέρεται κανείς επίσης για διατμητικές τάσεις. Η καθαρή διαφορά ανάμεσα στην τάση που ασκείται εξωτερικά σε κάθε πλευρά της πλάκας είναι:

$$\mathbf{1} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.1)$$

3.2.2 Μετατόπιση και Παραμόρφωση

Ας υποθεθεί ότι στην μονοδιάστατη περίπτωση, το υλικό μετατοπίζεται κατά τον άξονα z λόγω διαμήκους τάσης σε μια νέα θέση $z' = z + u$ όπως στο σχήμα 3.1. Η παράμετρος u ονομάζεται μετατόπιση και γενικά είναι συνάρτηση του z . Μια άλλη δεδομένη στιγμή στο υλικό η μετατόπιση είναι $u + du$. Αυτό που ενδιαφέρει είναι η μετατόπιση των μορίων του υλικού συναρτήσει του u . Αρχικά, χρησιμοποιείται η σχέση του Taylor για να αποδειχθεί ότι όταν η αλλαγή κατά u σε ένα μήκος $\mathbf{1}$ είναι du , όπου:

$$du = \frac{\partial u}{\partial z} \mathbf{1} = S \mathbf{1} \quad (3.2)$$

Η κλασματική παραμόρφωση του υλικού θα είναι:

$$S = \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.3)$$

Η παράμετρος S ονομάζεται παραμόρφωση.

Μπορεί επίσης να εξεταστεί η περίπτωση της εγκάρσιας κίνησης όπου το υλικό μετατοπίζεται κατά τη διεύθυνση y από ένα κύμα που μεταδίδεται στην διεύθυνση z . Τότε, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2, ένα μόριο στη θέση $a_z(z)$ μετατοπίζεται κατά: $a_z z + a_y u$, όπου a_z, a_y μοναδιαία διανύσματα κατά z, y αντίστοιχα. Έτσι, όπως προηγουμένως, ορίζεται ως διατμητική παραμόρφωση η:

$$S = \frac{du}{\mathbf{1}} = \frac{du}{dz} \quad (3.4)$$

Εδώ η μόνη διαφορά είναι στην y διεύθυνση. Στο σχήμα 3.2 φαίνεται ξεκάθαρα ότι η επιφάνεια του υλικού δεν επιδέχεται καμία αλλαγή καθώς η εγκάρσια κίνηση το παραμορφώνει. Στην διαμήκη κίνηση όμως, υπάρχει αλλαγή στον όγκο κατά duA ,

όπου A η επιφάνεια του υλικού κατά xy . Επομένως η στοιχειώδης αλλαγή του όγκου είναι:

$$\frac{du}{l} = S \quad (3.5)$$

3.2.3 Νόμος Hooke, θεωρία της ελαστικότητας

Ο νόμος του Hooke υποστηρίζει ότι για μικρές τάσεις που ασκούνται σε μια διεύθυνση, αυτές είναι ανάλογες της παραμόρφωσης:

$$T = cS \quad (3.6)$$

όπου c μια ελαστική σταθερά του υλικού. Οι παράμετροι T, c εκφράζουν τα χαρακτηριστικά του συστήματος, μπορούν όμως να εκφραστούν και με μία παράμετρο σε μονοδιάστατη διαμήκη ή εγκάρσια μετάδοση κυμάτων. Επειδή είναι ευκολότερο να υποβληθεί σε κάμψη παρά σε εφέλκυσμό ένα υλικό, η διατμητική ελαστική σταθερά είναι συνήθως μικρότερη από την διαμήκη.

3.2.4 Εξισώσεις κίνησης

Θα εξεταστεί τώρα η εξίσωση κίνησης ενός σημείου στο υλικό όπου μια τάση μικρής διάρκειας εφαρμόζεται σε αυτό. Σύμφωνα με τον 2ο νόμο του Newton, η συνισταμένη δύναμη ανά μονάδα επιφανείας κατά dz , που εφαρμόζεται σ' αυτό θα ισούται με:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = r_{m_0} \frac{d^2 u}{dt^2} = r_{m_0} \frac{du}{dt} \quad (3.7)$$

Όπου u η ταχύτητα του υλικού σημείου και r_{m_0} η πυκνότητα του.

3.2.5 Διατήρηση της μάζας

Η ταχύτητα των μορίων του υλικού ισούται με $u = \frac{du}{dt}$, έτσι ώστε σε ένα μικρό μήκος

l - μονοδιάστατα – η αλλαγή της ταχύτητας θα είναι:

$$du = \frac{\partial u}{\partial z} l \quad (3.8)$$

και με βάση την (3.2) θα γίνει:

$$du = \frac{\partial}{\partial t} du = \mathbf{1} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3.9)$$

Συνδυάζοντας τις (3.8) και (3.9), δίνει:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.10)$$

Η σχέση (3.10) δείχνει έναν εναλλακτικό τρόπο γραφής της εξίσωσης διατήρησης της μάζας σε υλικό για τα διαμήκη κύματα. Η ίδια εξίσωση ισχύει και για τα διατμητικά κύματα. Ας υποθεθεί ότι $r_m = r_{m_0} + r_{m_1}$, όπου r_{m_0} αναφέρεται στην αδιατάραχτη μάζα ενώ η r_{m_1} η πυκνότητα που έχει διαταραχτεί.

Εάν γραφτεί η σχέση διατήρησης της μάζας ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial z} r_m u + \frac{\partial r_m}{\partial t} = 0 \quad (3.11)$$

Γνωρίζοντας ότι u , r_{m_1} είναι πρώτης τάξης «διαταραχές» τότε:

$$r_{m_0} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial r_{m_1}}{\partial t} = 0 \quad (3.12)$$

Όπου:

$$r_m = r_{m_0} + r_{m_1} = \frac{r_{m_0}}{1+S} \approx \frac{r_{m_0}}{1-S}$$

Και κατά συνέπεια:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{r_{m_1}}{r_{m_0}} \right) = \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3.13)$$

3.2.6 Η εξίσωση κύματος και ο ορισμός της σταθεράς μετάδοσης

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις (3.2), (3.5), και (3.10), και σε συνδυασμό με την σχέση $u = \frac{\partial u}{\partial t}$, να πάρει κανείς μια εξίσωση μετάδοσης ηχητικού κύματος - μικρού σήματος - στο υλικό:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = r_{m_0} \frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = \frac{r_{m_0}}{c} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad (3.14)$$

Όπου c μια ελαστική σταθερά.

Οι λύσεις της εξίσωσης αυτής για την τάση θα είναι της μορφής $F\left(t \pm \frac{z}{u_a}\right)$, για

κύματα συχνότητας ω , με όλες τις τιμές της να κυμαίνονται ως $e^{i\omega t}$, οι λύσεις θα είναι

της μορφής $e^{i(w \pm b_a z)}$, με το θετικό πρόσημο να αντιστοιχεί σε κύματα που εξελίσσονται μπροστά, ενώ το αρνητικό τα κύματα επιστροφής. Ο όρος b_a ισούται με:

$$b_a = w \sqrt{\left(\frac{r_{m_0}}{c}\right)} = \frac{w}{u_a} \quad (3.15)$$

και $u_a = \sqrt{\left(c / r_{m_0}\right)} \lim_{x \rightarrow \infty}$ είναι η ταχύτητα του ακουστικού κύματος. Τα πρόσημα στην σχέση αυτή δείχνουν την φορά των κυμάτων. Η παράμετρος b_a ονομάζεται σταθερά διάδοσης του ηχητικού κύματος.

Όταν ένα κύμα εξελίσσεται μπροστά, έχουμε:

$$u = -u_a S = -\frac{u_a}{c} T \quad (3.16)$$

Το μέγεθος της παραμόρφωσης S αποτελεί επίσης την αναλογία της ταχύτητας των μορίων του υλικού, προς την ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων που μεταδίδονται σε αυτό.

Ένα ρευστό όπως το νερό για παράδειγμα, είναι σχετικά εύκολο να συμπιεστεί και έχει σχετικά χαμηλή πυκνότητα (1000 kg/m^3). Η ελαστική του σταθερά είναι $2,25 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, επομένως η ταχύτητα του ακουστικού κύματος στο νερό θα είναι $1,5 \text{ km/s}$. Το ζαφείρι έχει πυκνότητα μάζας ίση με 3990 kg/m^3 , όμως είναι άκαμπτο υλικό με μια ιδιαίτερα μεγάλη σταθερά ελαστικότητας $4,92 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$. Έτσι, θα έχει μια μεγάλη ταχύτητα διάδοσης ακουστικού κύματος της τάξεως των $12,9 \text{ km/s}$. Ως γνωστόν, στα αέρια λόγω μεγάλης συμπιεστότητας η ταχύτητα ενός κύματος θα είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τις παραπάνω τιμές, όπως π.χ στον ατμοσφαιρικό αέρα που ισούται περίπου με 330 m/s .

Τέλος να σημειωθεί ότι τα ρευστά γενικώς δεν μπορούν να παραλάβουν διατμητικές τάσεις, και για το λόγο αυτό είναι αδύνατον να υπάρξει μετάδοση εγκάρσιων κυμάτων σε αυτά.

3.2.7 Ενέργεια

Η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια ανά μονάδα όγκου στο υλικό είναι το άθροισμα δύο στοιχείων:

της δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου λόγω της δύναμης που εφαρμόζεται για να μετατοπίσει το υλικό:

$$W_c = \frac{1}{2}TS$$

και της κινητικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου του υλικού λόγω της κίνησής του

$$W_u = \frac{1}{2}r_{m_0}u^2$$

Σε ένα εξελισσόμενο κύμα αυτές οι ενέργειες ποικίλουν κατά $e^{i\omega t}$, ακολουθώντας την αναλογία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, και μέση δυναμική ενέργεια ανά μονάδα όγκου είναι:

$$W_c = \frac{1}{4}\text{Re}(TS^*) = \frac{1}{4}\text{Re}(cSS^*) \quad (3.17)$$

Όπου ο συμβολισμός (*) αφορά το διαδιδόμενο προς την αρνητική διεύθυνση κύμα.

Η μέση κινητική ενέργεια ανά μονάδα όγκου είναι:

$$W_u = \frac{1}{4}\text{Re}(r_{m_0}uu^*) \quad (3.18)$$

Απ' τις σχέσεις (3.13), (3.14), (3.15), (3.16), προκύπτει ότι $W_c = W_u$, και ότι η ολική ενέργεια ανά μονάδα όγκου σε ένα ακουστικό κύμα είναι:

$$W = \frac{1}{4}\text{Re}(r_{m_0}uu^* + TS^*) = \frac{1}{2}\text{Re}(TS^*) \quad (3.19)$$

Παρόμοια, η ροή δύναμης ανά μονάδα επιφανείας στο ακουστικό κύμα μπορεί να οριστεί ως το γινόμενο της δύναμης ανά μονάδα επιφανείας $-T$ που εφαρμόζεται απ' το υλικό στα αριστερά του z , επί την ταχύτητα του υλικού (η μέση τιμή του $-uT$ κατά τη διάρκεια ενός RF κύκλου). Έτσι, η πολύπλοκη σχέση που περιγράφει την ροή δύναμης σε μια επιφάνεια A μπορεί να γραφτεί:

$$P = -\frac{1}{2}(u^*T)A \quad (3.20)$$

Για ένα κύμα που διαδίδεται σε ένα ιδανικό μέσο (χωρίς απώλειες), οι μεταβλητές u και A είναι σε «φάση», άρα το A είναι πραγματικό, και:

$$P = u_a W_a A = -\frac{1}{2}(u^*T)A \quad (3.21)$$

Όπου W_a το έργο ανά μονάδα επιφάνειας

3.2.8 Το θεώρημα του Poynting

Η ισχύς και η ενέργεια σε ένα ακουστικό κύμα υπακούουν σε νόμους παρόμοιους με εκείνους της θεωρίας του Poynting για τον ηλεκτρομαγνητισμό. Για να αποδειχθεί αυτό, γράφεται η σχέση (3.5) με τη μορφή:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = i\omega r_{m_0} \mathbf{u} \quad (3.22)$$

Και η εξίσωση 3.11 με τη μορφή:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = i\omega S = \frac{i\omega T}{c} \quad (3.23)$$

Πολλαπλασιάζοντας την (3.22) με \mathbf{u}^* , την (3.23) με T , και προσθέτοντας τα αποτελέσματα, έχουμε:

$$-2 \frac{\partial}{\partial z} \text{Re}(P) = A \frac{\partial}{\partial z} \text{Re}(T\mathbf{u}^*) = (i\omega p_{m_0} \mathbf{u}\mathbf{u}^* - i\omega TS^*) A \quad (3.24)$$

όπου ο συμβολισμός (*) αφορά το διαδιδόμενο προς την αρνητική διεύθυνση κύμα. Αντικαθιστώντας το $T = cS$, και υποθέτοντας ότι το c είναι πραγματικός αριθμός, καταλήγουμε στην σχέση:

$$-2 \frac{\partial}{\partial z} \text{Re}(P) = A \frac{\partial}{\partial z} \text{Re}(T\mathbf{u}^*) = (i\omega p_{m_0} \mathbf{u}\mathbf{u}^* - i\omega cSS^*) A \quad (3.25)$$

Και οι δύο όροι στο δεξιό μέρος της τελευταίας εξίσωσης είναι φανταστικοί, άρα:

$$\frac{\partial}{\partial z} \text{Re}(P) = 0 \quad (3.26)$$

Η σχέση αυτή είναι ανάλογη με το θεώρημα του Poynting στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία, και μας δείχνει ότι ο όρος $\text{Re}(P)$ είναι σταθερός, δηλαδή η ισχύς στο ακουστικό κύμα είναι συντηρητική. Για ένα κύμα που διαδίδεται σε ένα υλικό, η μέση αποθηκευμένη κινητική ενέργεια ανά μονάδα όγκου ισούται με την μέση δυναμική ενέργεια, δηλαδή:

$$r_{m_0} \mathbf{u}\mathbf{u}^* = cSS^* \quad (3.27)$$

3.2.9 Απώλειες

Οι δυνάμεις ιξώδους ανάμεσα στα γειτονικά μόρια με διαφορετικές ταχύτητες, είναι η κύρια αιτία εξασθένησης του ακουστικού κύματος στα στερεά και στα υγρά. Αυτές είναι οι επιπλέον τάσεις T_n στα μόρια του υλικού στο οποίο διαδίδεται το ηχητικό κύμα, και είναι της μορφής:

$$T_n = n \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = n \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3.28)$$

όπου n ο συντελεστής ιξώδους. Συνδέοντας την παραπάνω σχέση με τις (3.4) και (3.8), η συνολική τάση είναι:

$$T = cS + n \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3.29)$$

Η εξίσωση κίνησης έχει την ίδια μορφή σε ένα μέσο χωρίς απώλειες:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = r_{m_0} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.30)$$

Όπως στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία, η μείωση λόγω απωλειών μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Poynting. Ακολουθώντας το αποτέλεσμα των (3.25) και (3.26), και υποθέτοντας ότι όλες οι ποσότητες ποικίλουν κατά $e^{i\omega t}$, το θεώρημα Poynting στην πολύπλοκη μορφή έχει τώρα έναν επιπλέον όρο συνδεδεμένο με το ιξώδες:

$$\frac{\partial}{\partial z} \text{Re}(P_a) = -\frac{1}{2} n \omega^2 S S^* A \quad (3.31)$$

όπου A η επιφάνεια της δέσμης. Κατά συνέπεια το ιξώδες εισάγει έναν όρο απωλειών. Αν θεωρηθεί αυτός ο όρος μικρός σε μέγεθος, απ' την (3.19) και την (3.21) εξάγεται:

$$\frac{1}{2} c S S^* \approx W_a \approx \frac{P_a}{u_a A} \quad (3.32)$$

Με αντικατάσταση στην (3.31), και γράφοντας τον όρο $\text{Re}(P_a)$ ως P_a , φαίνεται ότι:

$$\frac{1}{P_a} \frac{\partial P_a}{\partial z} \approx \frac{-n \omega^2}{u_a c} = \frac{-n \omega^2}{u_a^3 r_{m_0}} \quad (3.33)$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής δίνει $P = P_0 e^{-2az}$, όπου a είναι η σταθερά απωλειών του κύματος, και P_0 σταθερό. Η τιμή της a προσδιορίζεται από την σχέση:

$$a = \frac{n \omega^2}{2 u_a^3 r_{m_0}} \quad (3.34)$$

Παρατηρώντας την σχέση (3.34) συμπεραίνει κανείς ότι οι απώλειες ενός κύματος είναι ανάλογες του τετραγώνου της συχνότητας, και αντιστρόφως ανάλογες του κύβου της ταχύτητας. Καθώς τα διαμητρικά κύματα έχουν ως συνήθως ταχύτητες της τάξεως του μισού μεγέθους απ' ότι τα διαμήκη στο ίδιο υλικό, οι απώλειες ενός διαμητρικού κύματος θα είναι αρκετά μεγαλύτερες απ' ότι στα διαμήκη ανά μονάδα μήκους, αν και αυτό πρακτικά δεν ισχύει πάντοτε. Για παράδειγμα, ένα κύμα συχνότητας 1MHz σε νερό θερμοκρασίας 20°C, οι απώλειες είναι περίπου 0,22dB/m.

Ενώ ένα κύμα υψηλής συχνότητας, 1GHz, θα έχει στις ίδιες συνθήκες και στο ίδιο μέσο απώλειες $2,2 \cdot 10^5 \text{dB/m}$. Επομένως, ένα κύμα χαμηλής συχνότητας μπορεί να διαδοθεί εύκολα σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ αντίθετα ένα μεγάλης συχνότητας κύμα μπορεί να διαδοθεί μόνο σε κλίμακες του μικρού (μm).

Υπάρχουν και πολλές άλλες πηγές απωλειών σε ένα υλικό, όπως π.χ. οι θερμικές. Όταν ένα υλικό συμπιέζεται αδιαβατικά, η θερμοκρασία του αυξάνεται, ενώ όταν εκτονώνεται, η θερμοκρασία του μειώνεται. Απ' τη στιγμή που οι θερμικές απώλειες κάνουν την διαδικασία αυτή μη-αδιαβατική η οποία συντελεί στην απώλεια ενέργειας, έχουν μεγάλες τιμές στα μέταλλα απ' ότι στους μονωτές. Οι απώλειες λόγω θερμότητας είναι επίσης ανάλογες του τετραγώνου της συχνότητας. Επιπλέον, απώλειες μπορεί να εμφανιστούν λόγω διασποράς των διαδιδόμενων κυμάτων εξ' αιτίας κατασκευαστικών ατελειών σε ένα υλικό.

Για τους λόγους αυτούς, υψηλής ποιότητας μονοκρυσταλλικά υλικά έχουν μικρότερες απώλειες στα ηχητικά κύματα σε μεγάλες συχνότητες απ' ότι τα ίδια υλικά σε πολυκρυσταλλική μορφή. Οι απώλειες σε συνήθη υλικά ποικίλει. Ένα σκληρό, υψηλής ποιότητας μονοκρυσταλλικό υλικό όπως το ζαφείρι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ακουστικές γραμμές καθυστέρησης σε συχνότητες έως 10GHz. Η απώλεια στην συχνότητα αυτή μπορεί να φτάσει τα υψηλά μεγέθη της τάξεως των 40dB/cm. Όμως, το μήκος κύματος σε αυτή τη συχνότητα είναι της τάξεως του ενός μm . Άρα, η απώλεια ανά μήκος κύματος είναι $4 \cdot 10^{-3} \text{dB}$, τιμή αρκετά μικρή. Αντιθέτως, υλικά με μεγάλο ιξώδες όπως το λάστιχο, έχουν μεγάλες απώλειες σε συχνότητες μεγαλύτερες των μερικών KHz, γι' αυτό και βρίσκουν εφαρμογές σε ηχομονώσεις.

3.3 Μετάδοση του κύματος στο υλικό

Οι τεχνικές μετρήσεων σε υλικά με τη βοήθεια των υπερήχων βασίζονται σε χρονικά μεταβαλλόμενες παραμορφώσεις ή δονήσεις μέσα στο υλικό. Όλα τα υλικά αποτελούνται από άτομα, τα οποία μπορούν να υποβληθούν σε μία παλμική κίνηση γύρω από τις θέσεις ισορροπίας τους.

Υπάρχουν πολλά είδη παλμικών κινήσεων στα άτομα του υλικού, όμως οι περισσότερες είναι άσχετες με τις εφαρμογές των υπερήχων. Αυτές που μελετώνται κυρίως είναι οι ομοιόμορφες κινήσεις των ατόμων που σκοπό έχουν να παράγουν ένα μηχανικό κύμα. Όταν ένα υλικό δεν καταπονείται σε εφελκυσμό ή θλίψη πέραν του ορίου ελαστικότητάς του, τα μόριά του εκτελούν επιμέρους ελαστικές ταλαντώσεις.

Όταν τα μόρια του υλικού μετατοπίζονται από τις θέσεις ισορροπίας τους, προκύπτουν εσωτερικές δυνάμεις αποκατάστασης. Αυτές οι δυνάμεις σε συνδυασμό με την αδράνεια των μορίων, οδηγούν σε ταλαντώσεις των μορίων του υλικού.

Στα στερεά, τα ηχητικά κύματα μπορούν να διαδοθούν με τέσσερις διαφορετικές μορφές οι οποίες βασίζονται στον τρόπο ταλάντωσης των μορίων τους. Οι μορφές αυτές είναι:

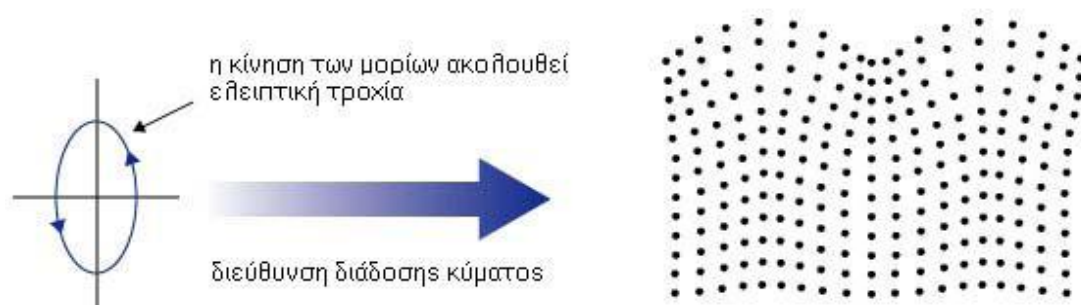
- διαμήκη κύματα
- εγκάρσια κύματα
- κύματα επιφανείας
- κύματα που εμφανίζονται σε μικρού πάχους υλικά (extensional waves)

Τα διαμήκη και τα εγκάρσια κύματα είναι αυτά που χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές υπερήχων και εκτενής αναφορά σε αυτά έχει γίνει στο πρώτο κεφάλαιο.

Στα διαμήκη κύματα, η διεύθυνση της διάδοσής τους συμπίπτει με τη διεύθυνση της ταλάντωσης. Από τη στιγμή που εφελκυστικές και θλιπτικές δυνάμεις είναι ενεργές σε αυτού του είδους τα κύματα, συναντώνται και ως κύματα πίεσης, λόγω της διακύμανσης της πυκνότητάς τους κατά την διάδοσή τους. Τα κύματα πίεσης μπορούν να δημιουργηθούν σε ρευστά, αλλά και σε στερεά διότι η ενέργεια μεταφέρεται διαμέσου της δομής των ατόμων από μία σειρά κινήσεων συσπείρωσης και εκτόνωσης.

Στα εγκάρσια κύματα, η διεύθυνση διάδοσής τους είναι κάθετη στην διεύθυνση της ταλάντωσης. Τα κύματα αυτά, απαιτούν ένα στερεάς μορφής υλικό για την σωστή διάδοσή τους. Συγκρίνοντάς τα με τα διαμήκη κύματα, τα εγκάρσια είναι κατά κανόνα ασθενέστερα. Στην πραγματικότητα τα εγκάρσια κύματα παράγονται στα υλικά χρησιμοποιώντας ενέργεια από τα διαμήκη.

Τα κύματα επιφανείας εμφανίζονται στην επιφάνεια των σχετικά μεγάλης πυκνότητας στερεών υλικών, διεισδύοντας στο βάθος ενός μήκους κύματος. Εδώ, η κίνηση των μορίων έχει μια ελλειπτική τροχιά όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4:

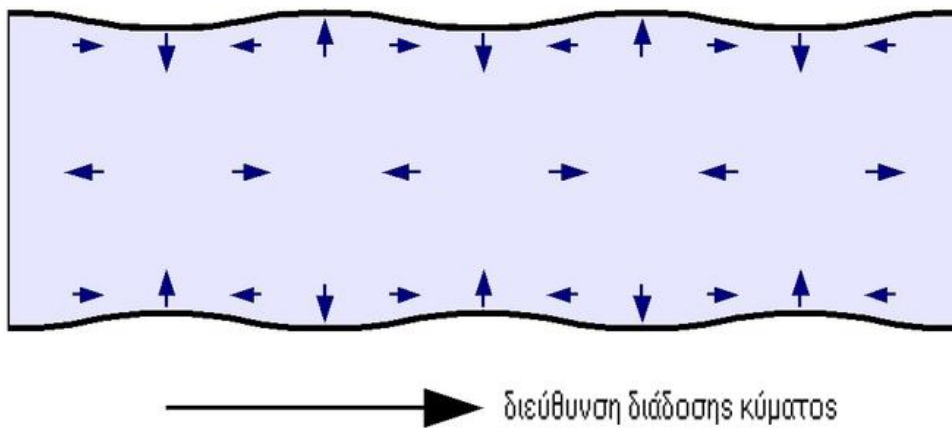


Σχήμα 3.4 Η κίνηση των μορίων της επιφάνειας λόγω των ελλειπτικών κυμάτων.
[19]

Τα κύματα επιφανείας είναι χρήσιμα επειδή είναι πολύ ευαίσθητα στις κατασκευαστικές ατέλειες του υλικού. Έχουν τη δυνατότητα να “ακολουθούν” την επιφάνεια του υλικού γύρω από τις καμπύλες του. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν πληροφορίες για το εξεταζόμενο υλικό σε σημεία όπου οι άλλες μορφές κυμάτων δεν είναι δυνατόν να διαδοθούν.

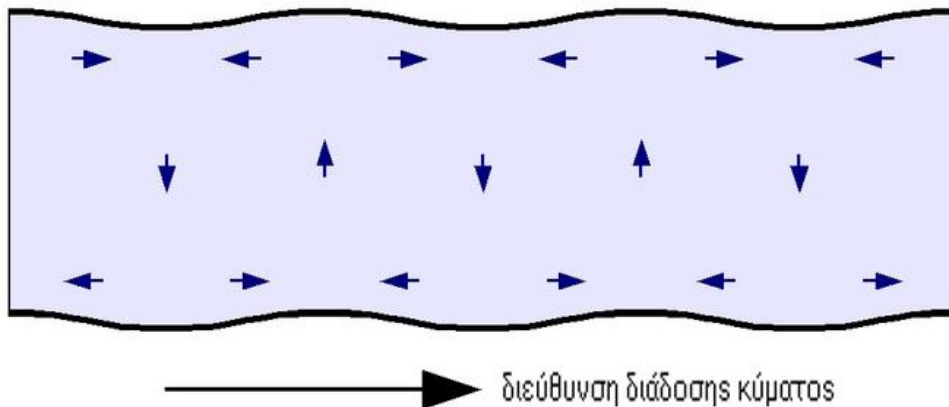
Τα “κύματα εκτόνωσης” μπορούν να υπάρξουν μόνο σε λεπτόπαχα μέταλλα. Είναι πολύπλοκα δονούμενα κύματα τα οποία εξελίσσονται σε όλο το πάχος του υλικού. Η διάδοση των κυμάτων αυτών εξαρτάται από την πυκνότητα, και από τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού. Επηρεάζονται επίσης πολύ από την συχνότητα της εφαρμογής και το πάχος του υλικού.

Εδώ υπάρχουν πολλά είδη δονήσεων των μορίων του υλικού, όμως δύο είναι οι πιο σημαντικές: Οι συμμετρικές, και οι ασύμμετρες δονήσεις. Οι σύνθετες αυτές κινήσεις των μορίων είναι παρόμοιες με τις ελλειπτικές τροχιές των κυμάτων επιφανείας. Τα συμμετρικά κύματα αυτής της μορφής, τα λεγόμενα κύματα “εκτόνωσης”, αναπτύσσονται όπως και το όνομά τους συμμετρικά στο μέσο επίπεδο της επιφάνειας του υλικού. Η μορφή των κυμάτων αυτών φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.5 Κύματα εκτόνωσης που αναπτύσσονται συμμετρικά στο μέσο επίπεδο της επιφάνειας του υλικού.[19]

Η ασύμμετρη μορφή εμφανίζεται συχνά και ως “καμπτικό” κύμα επειδή ένα μεγάλο μέρος μετακινείται προς μία κάθετη κατεύθυνση στην επιφάνεια του υλικού, και ένα μικρό μέρος εμφανίζεται προς μία κατεύθυνση παράλληλη στο υλικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σώμα του υλικού να κάμπτεται καθώς οι επιφάνειες του κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση - σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6 Κύματα εκτόνωσης που αναπτύσσονται ασύμμετρα, καμπτικά κύματα στο επίπεδο της επιφάνειας του υλικού.[19]

Τελειώνοντας, υπάρχει και μια άλλη μορφή κύματος επιφανείας, το οποίο αναπτύσσεται παράλληλα με την επιφάνεια του υλικού, και κάθετα στην κατεύθυνση του κύματος.

3.3.1 Σχέσεις ανάμεσα στους υπερήχους και τις ιδιότητες ενός υλικού

Ως γνωστόν, ο ήχος μεταφέρεται με διαφορετικές ταχύτητες σε διαφορετικά υλικά. Αυτό γιατί η μάζα των ατόμων των μορίων του υλικού, καθώς και οι ελαστικές ιδιότητές τους, είναι διαφορετικές ανά υλικό. Μια γενική σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα του ήχου σε ένα υλικό, της πυκνότητας, και της ελαστικότητας αυτού, δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$u = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad \text{ή} \quad u = \sqrt{\frac{C_{is}}{\rho}} \quad (3.35)$$

όπου v : η ταχύτητα του ήχου,

B ή C_{is} : ελαστική σταθερά,

ρ : η πυκνότητα του υλικού.

Η σχέση αυτή μπορεί να πάρει διάφορες μορφές ανάλογα με τη μορφή του ηχητικού κύματος (εγκάρσιο ή διαμήκες), και ανάλογα με το ποιές ελαστικές σταθερές χρησιμοποιούνται. Οι τυπικές σταθερές που εξετάζονται σε ένα στερεό είναι:

- Μέτρο ελαστικότητας
- Λόγος Poisson
- Συντελεστής λ' (lame constant)
- Θερμοκρασιακό μοντέλο Debye
- Ισόθερμο μέτρο ελαστικότητας

3.3.2 Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας περιγράφει την ακαμψία ενός υλικού. Αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους συντελεστές στην μηχανική. Δυνάμει της συμμετρίας, η σχέση των υπερηχητικών ταχυτήτων βρίσκεται για τα ισότροπα ομοιογενή υλικά από μία απλοποίηση των 36 πιθανών ελαστικών σταθερών που παράγονται για τα ανισότροπα υλικά. Οι τύποι για τα υλικά αυτά παρουσιάζονται παρακάτω.

Η διαμήκης ταχύτητα δίδεται από τη σχέση:

$$C_0 = \sqrt{\frac{Y_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3.36)$$

Όπου C_0 η ταχύτητα του ήχου στο υλικό, Y_0 ο συντελεστής ακαμψίας του υλικού και ν ο λόγος του Poisson.

Σε ένα στοιχειώδες τμήμα, στο οποίο η διαμήκης ταχύτητα του ήχου είναι C_L , ο συντελεστής ακαμψίας Y_L στη διεύθυνση της C_L ενός τέτοιου στοιχειώδους τμήματος θα είναι μεγαλύτερος από το μέτρο ελαστικότητας.

$$C_L = \sqrt{Y_L} dr = \sqrt{\frac{E}{r(1-b)}} \quad (3.37)$$

όπου ο τύπος για το μέτρο ελαστικότητας E λαμβάνεται υπόψη για τον περιορισμό των δυνάμεων του

$$C_L = \frac{E}{Y_L} = 1-b, \text{ και } b = \frac{2\nu^2}{1-\nu}$$

με τον περιορισμό $b=1$ όταν $\nu=0,5$. Ο συντελεστής ακαμψίας είναι ένας σύνθετος αριθμός που επηρεάζεται από απώλειες. Όταν οι απώλειες είναι μικρές, αυτές δεν λαμβάνονται υπ' όψη:

$$C_L = \sqrt{(K + (4/3)G) / r} \quad (3.38)$$

όπου K σταθερός συντελεστής, G ο διατμητικός συντελεστής ελαστικότητας. Έτσι:

$$C_L = \sqrt{(E / r) [(1-\nu) / (1+\nu)(1-2\nu)]} \quad (3.39)$$

Η διάδοση του υπερηχητικού κύματος δια μήκους μιας μπάρας θα αναγκάσει τις πλευρικές διαστάσεις να αλλάξουν δυναμικά, όσον αφορά την θέση του κύματος πίεσης. Για ένα υλικό με άπειρη πλευρική διάσταση περιορίζει τις πλευρικές άκρες του διαμήκους κύματος πίεσης. Στις παραπάνω σχέσεις, το ν εκφράζει τον λόγο Poisson. Όταν το $\nu=1/2$ το C_L είναι απροσδιόριστο.

Εντούτοις, το μέτρο ελαστικότητας E είναι ίσο με:

$$E = 3K(1-2\nu) \quad (3.40)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (3.40) στην (3.39), προκύπτει μία σχέση που θα ισχύει για τα ιδανικά ρευστά:

$$\frac{3(1-2\nu)(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = 1 \quad (3.41)$$

Επιλύοντας την (3.41), έχουμε: $\nu=1/2$. Επομένως, το υλικό καλύπτει την απαίτηση του ρευστού, και η αντικατάσταση για την ταχύτητα μπορεί να ολοκληρωθεί για τα ιδανικά ρευστά:

$$C_F = \left(\frac{K}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.42)$$

Η σχέση αυτή περιγράφει την ταχύτητα του ήχου μέσα στα υγρά και τα αέρια. Η εγκάρσια ταχύτητα βρίσκεται στα υλικά που μπορούν να υποστούν διατμητικές τάσεις, όπως τα περισσότερα στερεά. Η εγκάρσια ταχύτητα του ήχου δίδεται από τη σχέση:

$$C_S = \left(\frac{G}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.43)$$

Τώρα, είναι δυνατόν υπό όρους να συνδυαστεί η (3.42) με την (3.43) και σε συνδυασμό με την (3.36) να δώσουν:

$$C_L = \sqrt{\frac{r \left(C_F - \frac{4}{3} C_S^2 \right)}{r}} = \sqrt{C_F - \frac{4}{3} C_S^2} \quad (3.44)$$

Η προϋπόθεση για την ορθότητα της σχέσης (3.42) θα παραβιαστεί εάν η προϋπόθεση για την σχέση (3.43) ισχύει. Δηλαδή ένα υλικό δεν μπορεί να είναι ιδανικό ρευστό, και να μπορεί να υποστεί διατμητικές τάσεις.

Υπάρχει μια άλλη διαμήκης ηχητική ταχύτητα που λαμβάνει μέρος σε υλικά ικανά να υποστούν διατμητικές τάσεις. Μικρού πάχους υλικά όπως ράβδοι, μπάρες, καλώδια που υποβάλλονται σε κύματα συμπίεσης με μήκος κύματος 5 φορές μεγαλύτερο από τη διατομή τους, επιτρέπουν στο κύμα να διαδοθεί με μειωμένη ταχύτητα συγκρινόμενο με το κοινό δείγμα διαμήκους κύματος. Η ταχύτητα C_0 συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας με την ακόλουθη σχέση:

$$C_0 = \left(\frac{E}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.45)$$

η οποία έχει υπολογιστεί από τις C_L και C_S ή από ειδικά σχεδιασμένα δείγματα και αισθητήρες. Επιλύοντας την σχέση (3.43) ως προς τον διατμητικό συντελεστή ελαστικότητας G , έχουμε:

$$G = C_S^2 r \quad (3.46)$$

Από την (3.17) και την (3.5) παίρνουμε:

$$C_L = \sqrt{\frac{\left(K + \frac{4}{3} C_S^2 r \right)}{r}}$$

Και επιλύοντας ως προς K , έχουμε:

$$K = r \left(C_L^2 - \frac{4}{3} C_S^2 \right) \quad (3.47)$$

Η σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας και του διατμητικού συντελεστή G είναι:

$$E = \frac{9KG}{G+3K} \quad (3.48)$$

Με αντικατάσταση του K και του G από τις (3.47) και (3.46) αντίστοιχα, στην σχέση (3.48), το μέτρο ελαστικότητας γίνεται:

$$E = \frac{rC_S^2(3C_L^2 - 4C_S^2)}{C_L^2 - C_S^2} \quad (3.49)$$

και με αντικατάσταση της παραπάνω σχέσης στην (3.45) η C_0 γίνεται:

$$C_0 = \sqrt{\frac{C_S^2(3C_L^2 - 4C_S^2)}{C_L^2 - C_S^2}} \quad (3.50)$$

Η εξάρτηση της C_0 από την εγκάρσια είναι προφανής και ισχύει με την έννοια ότι τα υλικά που δεν μπορούν να υποστηρίξουν διατμητικές τάσεις, όπως π.χ τα ρευστά με μηδενικό ιξώδες, δεν μπορούν επίσης να διαδώσουν μια τέτοιου είδους ταχύτητα.

Η ταχύτητα αυτή είναι δυνατόν να παρομοιαστεί με ένα κύμα πίεσης το οποίο διαδίδεται κατά μήκος του άξονα της ράβδου.

3.3.3 Λόγος Poisson

Είναι γνωστό ότι οι ελαστικές σταθερές συσχετίζονται μεταξύ τους. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί ο λόγος Poisson. Ο λόγος αυτός είναι επίσης μια σχέση της αναλογίας των διαμήκων και εγκάρσιων ταχυτήτων:

$$\nu = \frac{1 - 2 \left(\frac{C_S}{C_L} \right)^2}{2 - 2 \left(\frac{C_S}{C_L} \right)^2} \quad (3.51)$$

3.3.4 Συντελεστής λ'

Υπάρχουν 2 ελαστικές σταθερές οι οποίες υπολογίζονται με τους υπέρηχους. Η μία σταθερά έχει δοθεί ως ο διατμητικός συντελεστής ελαστικότητας G . Η άλλη μερικές φορές εμφανίζεται ως συντελεστής λ' (Lame). Ο συντελεστής λ' είναι καθοριστικός παράγοντας για την διαμήκη και την εγκάρσια ταχύτητα:

$$C_L^2 = \left(\frac{I' + 2G}{r} \right) \quad (3.52)$$

επιλύοντας ως προς λ' , έχουμε:

$$I' = r(C_L^2 - 2C_S^2) \quad (3.53)$$

Ο συντελεστής λ' είναι ενδιαφέρων σε εφαρμογές με πλαστικά υλικά. Καθώς ο λόγος Poisson αυξάνει, ο συντελεστής λ' θα πλησιάσει τον κοινό συντελεστή K . Ο διατμητικός συντελεστής G θα εξαφανιστεί καθώς το ιξώδες του ρευστού πλησιάσει το μηδέν. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί από την σχέση που μας δίνει τον συντελεστή K :

$$K = I' + \frac{2m}{3}$$

όπου, η εγκάρσια πλησιάζει το μηδέν για τα ρευστά, και ταυτόχρονα ο λόγος Poisson πλησιάζει την τιμή 0,5. Η συμπιεστή ταχύτητα για τα ρευστά είναι ανάλογη προς το συντελεστή K που παρουσιάζεται στην σχέση (3.40).

3.3.5 Θερμοκρασιακό μοντέλο “Debye”

Το θερμοκρασιακό μοντέλο Debye αναπτύχθηκε από τον Peter Debye το 1912, και περιγράφει την μεγαλύτερη θερμοκρασία που μπορεί να αποκτήσει ένα υλικό, όταν τα μόρια του εκτελούν αρμονική ταλάντωση. Οι μηχανισμοί θερμικών απωλειών μπορούν να περιγραφούν μέσα απ' αυτό το μοντέλο. Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει του διατμητικού συντελεστή ελαστικότητας G , και της διαμήκου ταχύτητας C_0 .

Υπολογίζεται αρχικά η μέση ενσωματωμένη ταχύτητα C_M για ισότροπα υλικά, βάσει των ταχυτήτων C_S, C_L :

$$C_M = \left(\frac{3(C_S C_L)^3}{2C_L^3 + C_S^3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.54)$$

Από την ακόλουθη σχέση, παίρνουμε την “Debye” θερμοκρασία θ :

$$\theta = \frac{h}{k} \left(\frac{3PrN}{4p\bar{M}} \right)^{\frac{1}{3}} C_M \quad (\text{K}) \quad (3.55)$$

όπου:

h : σταθερά Plank,

k : σταθερά Boltzmann,

$$\frac{h}{k} = 47,992 \text{ (K} \cdot \text{s} \cdot 10^{-12} \text{)}$$

P: αριθμός ατόμων ανά molecule,

N: αριθμός Avogadro,

\bar{M} : μέσο ατομικό βάρος.

3.3.6 Ισόθερμο μέτρο ελαστικότητας

Οι μετρήσεις σε υλικά με τη μέθοδο των υπερήχων, δεν αφήνουν μεγάλα περιθώρια για θερμικές απώλειες. Έτσι, το μέτρο ελαστικότητας, όπως υπολογίζεται από τις υπερηχητικές ταχύτητες, είναι στην ουσία το αδιαβατικό μέτρο ελαστικότητας, το οποίο είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ισόθερμο. Η σχέση που συνδέει το αδιαβατικό και το ισόθερμο μέτρο είναι:

$$\frac{E_A}{E_I} = 1 + a^2 T \frac{E_A}{r C_p}$$

$$E_A = \frac{E_I r C_p}{r C_p - E_I a^2 T} \quad (3.56)$$

όπου:

E_A : αδιαβατικό μέτρο ελαστικότητας

E_I : ισόθερμο μέτρο ελαστικότητας

a : συντελεστής θερμικών απωλειών

C_p : ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση

ρ : πυκνότητα

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται οι σχέσεις μεταξύ των σταθερών:

	Σταθερά Lame μ	Σταθερά Lame λ	Μέτρο ελαστικότητας E	Λόγος Poisson ν	Συντελεστής συμπίεστότητας K
λ, μ			$\frac{m(3l + 2m)}{l + m}$	$\frac{l}{2(l + m)}$	$\frac{3l + 2m}{3}$
λ, E		-----		-----	-----
λ, ν		$\frac{l(1 - 2\nu)}{2\nu}$	$\frac{l(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{\nu}$		$\frac{l(1 + \nu)}{3\nu}$
λ, K		$\frac{2(K - l)}{2}$	$\frac{9K(K - l)}{3K - l}$	$\frac{l}{3K - l}$	
μ, E	$\frac{m(2m - E)}{E - 3m}$			$\frac{E - 2m}{2m}$	$\frac{mE}{3(3m - E)}$
μ, ν	$\frac{2m\nu}{1 - 2\nu}$		$2m(1 + \nu)$		$\frac{2m(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$
μ, K	$\frac{3K - 2m}{3}$		$\frac{9Km}{3K + m}$	$\frac{3K - 2m}{2(3K + m)}$	
E, ν	$\frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$\frac{E}{2(1 + \nu)}$			$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$
E, K	$\frac{3K(3K - E)}{9K - E}$	$\frac{3EK}{9K - E}$		$\frac{3K - E}{6K}$	
ν, K	$\frac{3K\nu}{1 + \nu}$	$\frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$	$3K(1 - 2\nu)$		

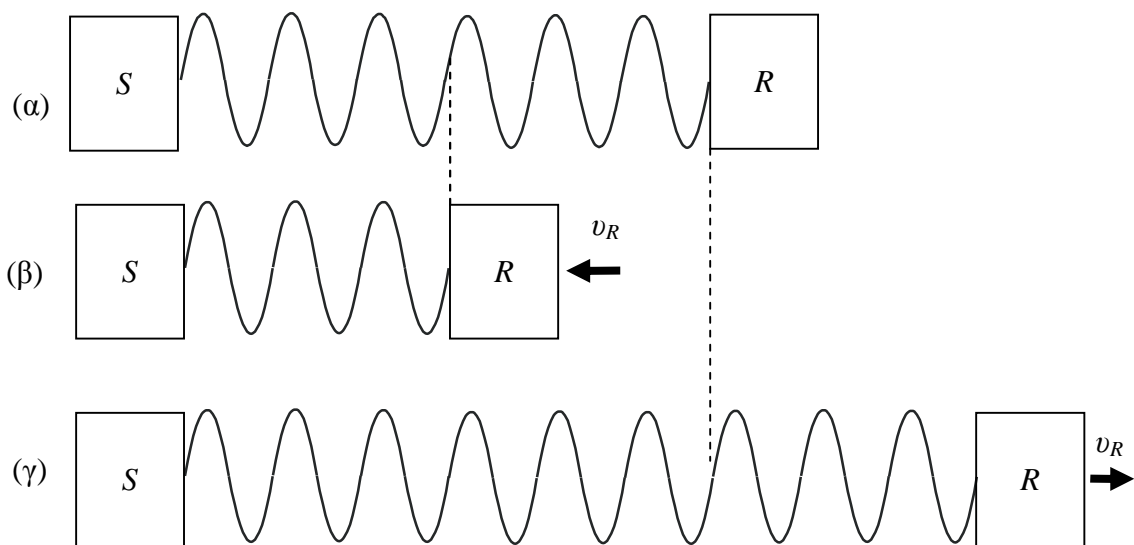
Κεφάλαιο 4

4. Υπέρηχοι Doppler

4.1 Φαινόμενο Doppler.

Οι υπέρηχοι Doppler αποτελούν μία εξειδικευμένη εφαρμογή των υπέρηχων, για τον υπολογισμό της ταχύτητας της αιματικής ροής και την απεικόνισή της σε πραγματικό χρόνο. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο φαινόμενο Doppler, που πρώτος παρατήρησε ο Johann Doppler, σύμφωνα με το οποίο «όταν πηγή ήχου και παρατηρητής βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους, τότε η συχνότητα του ήχου που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής δεν είναι η ίδια με αυτήν που εκπέμπει η πηγή». Ειδικότερα, ο παρατηρητής ακούει ήχο με συχνότητα μεγαλύτερη από τη συχνότητα της πηγής όταν η μεταξύ τους απόσταση μειώνεται και με συχνότητα μικρότερη από τη συχνότητα της πηγής όταν η απόστασή τους μεγαλώνει. Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο παράγεται αυτή η μετατόπιση της συχνότητας (Doppler Shift) θα δούμε πως υπολογίζεται η συχνότητα που επιστρέφει στον ηχοβολέα (πηγή του ήχου) θεωρώντας δύο ξεχωριστά θεωρητικά μοντέλα : α) κινούμενου δέκτη και β) κινούμενης πηγής.

4.1.1 Κινούμενος δέκτης



Σχήμα 4.1 Το φαινόμενο Doppler εξαιτίας κινούμενου παρατηρητή.

Πηγή S είναι ακίνητη και εκπέμπει ήχο συχνότητας f_s , που διαδίδεται με ταχύτητα c στο μέσο διάδοσης. Από τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής έχουμε:

$$c = I_s f_s \Rightarrow f_s = \frac{c}{I_s} \quad (4.1)$$

Αν ο δέκτης R ο οποίος παίζει το ρόλο του παρατηρητή παραμένει ακίνητος (σχήμα 4.1α), τότε ούτε η ταχύτητα του κύματος (ταχύτητα ήχου) αλλά ούτε και το μήκος κύματος αντιλαμβάνονται διαφορετικά από τον παρατηρητή. Συνεπώς αν f_R η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής, θα είναι:

$$f_s = f_R$$

Αν ο δέκτης κινείται προς την πηγή με ταχύτητα u_R (σχήμα 4.1β), τότε φτάνουν σε αυτόν περισσότερα μέγιστα του ήχου στη μονάδα του χρόνου, από όσα παράγει η πηγή στον ίδιο χρόνο με αποτέλεσμα η συχνότητα που αυτός αντιλαμβάνεται να είναι μεγαλύτερη από αυτή της πηγής κατά $\frac{u_R}{I_s}$:

$$f_R = f_s + \frac{u_R}{I_s} \Rightarrow f_R = f_s + \frac{u_R}{c} f_s \Rightarrow f_R = \frac{c + u_R}{c} f_s \quad (4.2)$$

Ως μετατόπιση Doppler f_D ορίζουμε τη διαφορά μεταξύ της συχνότητας f_R που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής (δέκτης) και της διαδιδόμενης συχνότητας f_s που εκπέμπει η πηγή, δίνοντας την τυπική εξίσωση Doppler:

$$f_D = f_R - f_s = \frac{u_R}{c} f_s \quad (4.3)$$

Στην περίπτωση που ο παρατηρητής κινείται μακριά από την πηγή με ταχύτητα u_R , τότε η συχνότητα που αντιλαμβάνεται θα είναι μικρότερη από αυτή της πηγής κατά $\frac{u_R}{I_s}$:

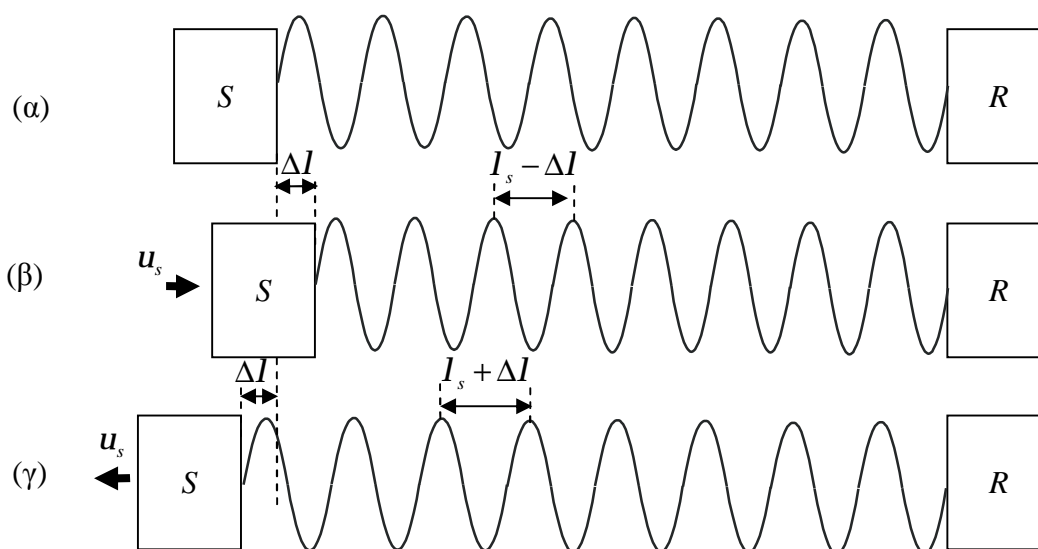
$$f_R = f_s - \frac{u_R}{I_s} \Rightarrow f_R = f_s - \frac{u_R}{c} f_s \Rightarrow f_R = \frac{c - u_R}{c} f_s \quad (4.4)$$

και η μετατόπιση Doppler θα είναι:

$$f_D = f_R - f_s = -\frac{u_R}{c} f_s, \text{ με αρνητικό πρόσημο.} \quad (4.5)$$

4.1.2 Κινούμενη πηγή

Στην περίπτωση που η πηγή κινείται με ταχύτητα u_s και εκπέμπει ήχο συχνότητας f_s , με τον δέκτη να παραμένει ακίνητος, τότε το φαινόμενο Doppler μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα με έναν ελαφρώς διαφορετικό τρόπο, μελετώντας τον τρόπο που αυτή η κίνηση επηρεάζει την απόσταση μεταξύ των μεγίστων στο διαδιδόμενο κύμα.



Σχήμα 4.2: Το φαινόμενο Doppler εξαιτίας κινούμενης πηγής.

Το πρώτο σχήμα 4.2α δείχνει ότι όταν η πηγή παραμένει ακίνητη τότε η απόσταση δύο διαδοχικών κορυφών ισούται εξ ορισμού με το υπερηχητικό μήκος κύματος l_s , συνεπώς και πάλι η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο δέκτης θα είναι ίση με τη συχνότητα της πηγής.

$$f_s = f_R$$

Όταν η πηγή κινείται προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος (σχήμα 4.2β), τότε οι διαδοχικές κορυφές θα «πυκνώσουν» κατά μία ποσότητα Δl , με αποτέλεσμα ο ακίνητος δέκτης να αντιλαμβάνεται συχνότητα μεγαλύτερη από αυτή που εκπέμπει η πηγή. Αν u_s η ταχύτητα με την οποία η πηγή κινείται προς το μέρος του δέκτη τότε

σε χρονικό διάστημα $\Delta t = \frac{1}{f_s}$ θα έχει μετακινηθεί κατά απόσταση:

$$\Delta l = u_s \frac{1}{f_s}$$

Το μήκος κύματος I_R που τελικά αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής ισούται με :

$$I_R = I_s - \Delta I \Rightarrow I_R = \frac{c}{f_s} - \frac{u}{f_s} \Rightarrow \frac{c}{f_R} = \frac{c}{f_s} - \frac{u}{f_s} \Rightarrow$$

$$f_R = \frac{c}{c - u_s} f_s \quad (4.6)$$

Διαιρώντας αριθμητή και παρονομαστή του κλάσματος με c παίρνουμε :

$$f_R = \frac{1}{1 - \frac{u_s}{c}} f_s$$

Συνήθως η ταχύτητα u_s είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα διάδοσης του ήχου ο λόγος $\frac{u_s}{c}$ τείνει πρακτικά στο μηδέν. Αυτή είναι μια προσέγγιση η οποία έχει ιδιαίτερη αξία κυρίως σε μετρήσεις που αφορούν τη ροή ρευστών όπου η ταχύτητα διάδοσης στο μέσο είναι πολλαπλάσια αυτής στον αέρα και οι συνήθεις ταχύτητες ροής πολύ μικρές συγκριτικά με αυτή.

Η προσέγγιση αυτή μας δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε μόνο τους 2 πρώτους του αναπτύγματος $\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + \dots$

Για να εξαχθεί η τελική εξίσωση Doppler:

$$f_R = f_s + \frac{u_s}{c} f_s \quad (4.7)$$

Και η μετατόπιση Doppler:

$$f_D = f_R - f_s = \frac{u_s}{c} f_s \quad (4.8)$$

Αντίστοιχα, αν η πηγή κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση, όπως δείχνει το σχήμα 4.5γ, τότε οι κορυφές «αραιώνουν» και η συχνότητα που φτάνει στον δέκτη φαίνεται να έχει μειωθεί. Τότε σε χρονικό διάστημα $\Delta t = \frac{1}{f_s}$ θα έχει μετακινηθεί κατά απόσταση:

$$\Delta l = u_s \frac{1}{f_s}$$

Το μήκος κύματος I_R που τελικά αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής ισούται με :

$$I_R = I_s + \Delta I \Rightarrow I_R = \frac{c}{f_s} + \frac{u}{f_s} \Rightarrow \frac{c}{f_R} = \frac{c}{f_s} + \frac{u}{f_s} \Rightarrow$$

$$f_R = \frac{c}{c + \mathbf{u}_s} f_s \quad (4.9)$$

Και σύμφωνα με τον παραπάνω συλλογισμό έχουμε τελικά:

Για την εξίσωση Doppler:

$$f_R = f_s - \frac{\mathbf{u}_s}{c} f_s \quad (4.10)$$

Και την μετατόπιση Doppler:

$$f_D = f_R - f_s = -\frac{\mathbf{u}_s}{c} f_s \quad (4.11)$$

4.2 Ανάκλαση από κινούμενο στόχο

Αν συνδυάσουμε τις παραπάνω επιμέρους περιπτώσεις, εξάγεται η μαθηματική έκφραση που μας επιτρέπει να υπολογίζουμε πως μεταβάλλεται η ανακλώμενη από κινούμενο στόχο ηχώ, σε σχέση με την αρχική συχνότητα. Αν f'_R η συχνότητα που επιστρέφει τελικά στον δέκτη, από την εξίσωση (4.7), έχουμε :

$$f'_R = f_R + \frac{\mathbf{u}_s}{c} f_R \Rightarrow f'_R = f_s + \frac{\mathbf{u}_R}{c} f_s + \frac{\mathbf{u}_s}{c} \left(f_s + \frac{\mathbf{u}_R}{c} f_s \right) \Rightarrow$$

$$f'_R = f_s + \frac{\mathbf{u}_R}{c} f_s + \frac{\mathbf{u}_s}{c} f_s + \frac{\mathbf{u}_s \mathbf{u}_R}{c^2} f_s$$

Τον ρόλο της κινούμενη πηγής στην περίπτωση αυτή τον έχει ο ίδιος ο στόχος ο οποίος εκπέμπει εξ' ανακλάσεως με συχνότητα f_R . Προφανώς $|\mathbf{u}_s| = |\mathbf{u}_R| = u$ και η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$f'_R = f_s + \frac{2u}{c} f_s + \left(\frac{u}{c} \right)^2 f_s \quad (4.12)$$

Στην συνήθη περίπτωση κατά την οποία η ταχύτητα u είναι κατά πολύ μικρότερη της ταχύτητας διάδοσης c ο όρος $\left(\frac{u}{c} \right)^2 f_s$ μπορεί να παραλειφθεί:

$$f'_R = f_s + \frac{2u}{c} f_s \quad (4.13)$$

Άρα η μετατόπιση Doppler από την ανάκλαση του υπέρηχου (προφανώς οι ίδιες σχέσεις ισχύουν και στην περίπτωση ακουστών ήχων) στον κινούμενο στόχο είναι :

$$f_D = \frac{2u}{c} f_s \quad (4.14)$$

Η παραπάνω σχέση όμως καλύπτει μόνο την περίπτωση κατά την οποία οι διευθύνσεις των αξόνων της δέσμης του υπέρηχου και η ταχύτητα του κινούμενου στόχου είναι παράλληλες.

Για να μπορεί να εφαρμοστεί ο παραπάνω τύπος σε κάθε περίπτωση, πρέπει να πολλαπλασιαστεί το δεξί του μέλος με το συνημίτονο της γωνίας θ , που ορίζουν οι άξονες της υπερηχητικής δέσμης και η ταχύτητα του στόχου.

$$f_D = \frac{2u \cos \theta}{c} f_s \quad (4.15)$$

Εκτός της δυνατότητας χρήσης των υπερήχων στη μέτρηση ταχύτητας κινούμενων στόχων μας παρέχεται και η δυνατότητα χρήσης αυτών για μετρήσεις στην ροή ρευστών αφού και στην περίπτωση αυτή έχουμε μόρια εν κινήσει.

4.3 Μέτρηση ροής υγρών

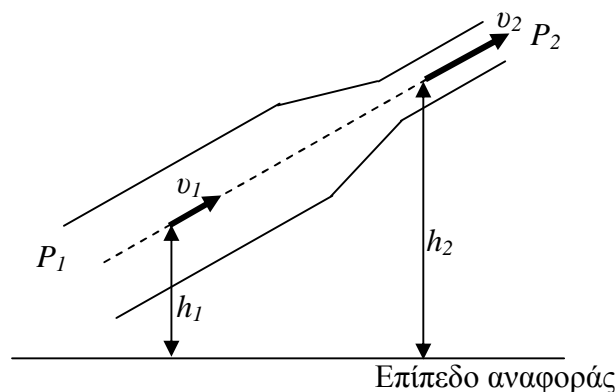
Η βασική εξίσωση της υδροδυναμικής (Bernoulli) σε μια ρευματική γραμμή μόνιμης ροής ενός ασυμπίεστου ρευστού χωρίς τριβές είναι:

$$P + rgh + \frac{1}{2} ru^2 = \text{σταθ} \quad (4.16)$$

όπου P η πίεση, r η πυκνότητα, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, h το ύψος που βρίσκεται το ρευστό σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς και u η ταχύτητα σ' ένα σημείο του ρευστού.

Για την περίπτωση σωλήνα με κλίση η εξίσωση Bernoulli γράφεται :

$$P_1 + rgh_1 + \frac{1}{2} ru_1^2 = P_2 + rgh_2 + \frac{1}{2} ru_2^2 \quad (4.17)$$



Σχήμα 4.3 Αγωγός διαφορετικής διατομής με κλίση. [22]

Μια άλλη σημαντική εξίσωση είναι η εξίσωση συνέχειας. Για ροή ασυμπίεστου ρευστού με ομοιόμορφη ταχύτητα ισχύει η εξίσωση:

$$S_1 u_1 = S_2 u_2 \quad (4.18)$$

όπου S_1, S_2 οι διατομές του αγωγού.

Τέλος η παροχή του ρευστού δίνεται:

$$Q = Su \quad (4.19)$$

Για την μέτρηση της ροής διάφορα είδη μετρητών που βασίζουν τη λειτουργία τους σε διαφορετικές αρχές που διέπουν τις ιδιότητες των ρευστών. Τα κυριότερα είδη μετρητών είναι:

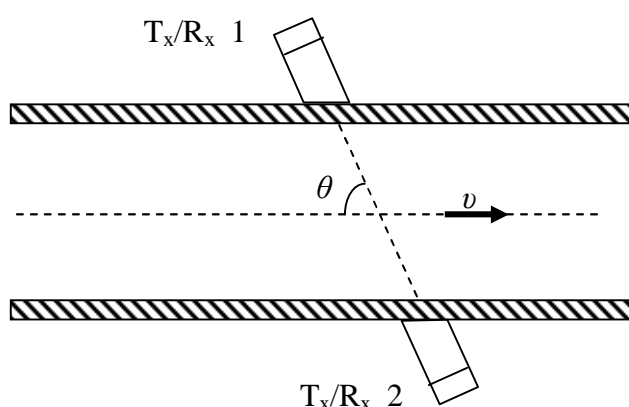
- Μετρητές παροχής διαφορικού τύπου
- Ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς παροχής
- Μετρητές παροχής με υπερήχους

Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει η τελευταία εξ' αυτών κατηγορία, οι μετρητές παροχής με υπερήχους οι οποίοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη τεχνική, στους:

- Μετρητές παροχής χρόνου μετάβασης
- Μετρητές παροχής Doppler

4.3.1 Μετρητές παροχής χρόνου μετάβασης.

Η αρχή λειτουργίας αυτών των μετρητών φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα :



Σχήμα 4.4 Αρχή λειτουργίας μετρητού παροχής χρόνου μετάβασης. [22]

Δύο αισθητήρες υπερήχων εκπέμπουν και λαμβάνουν υπό γωνία σε σχέση με την διεύθυνση ροής. Ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσουν οι υπέρηχοι από τον

αισθητήρα 1 στον 2 είναι t_{12} , ενώ ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσουν οι υπέρηχοι από τον αισθητήρα 2 στον 1 είναι t_{21} . Είναι:

$$t_{12} = \frac{d}{(c + u \cos q) \cdot \sin q} \quad (4.20\alpha)$$

Και

$$t_{21} = \frac{d}{(c - u \cos q) \cdot \sin q} \quad (4.20\beta)$$

Όπου u η ταχύτητα ροής, c η ταχύτητα του ήχου στο ρευστό του αγωγού και d η διάμετρος του αγωγού. Θεωρώντας ότι η ταχύτητα c είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την u θα είναι $c^2 \pm u^2 \cos^2 q \approx c^2$. Αν Δt η διαφορά των χρόνων t_{12} και t_{21} θα έχουμε:

$$\Delta t = t_{21} - t_{12} = \frac{2d \cdot u \cdot \cos q}{\sin q \cdot c^2} \quad (4.21)$$

Από την (4.21) εύκολα προκύπτει η (μέση) ταχύτητα ροής:

$$u = \frac{\sin q \cdot c^2 \cdot \Delta t}{2d \cdot \cos q} \Rightarrow u = \frac{c^2 \cdot \Delta t}{2d} \tan q \quad (4.22)$$

Καθώς και παροχή $Q = v \cdot S$ λαμβάνοντας υπ' όψιν τις (4.18) και (4.19)

$$\Delta t = \frac{2d \cdot u \cdot \cos q}{\sin q \cdot c^2} \Rightarrow \Delta t = \frac{2d \cdot \cos q}{\sin q \cdot S \cdot c^2} Q \Rightarrow Q = \frac{S \cdot c^2 \cdot \Delta t}{2d} \tan q \quad (4.23)$$

Όπου S η διατομή του αγωγού.

Επειδή η μέτρηση της παροχής επηρεάζεται από την ταχύτητα του ήχου, συχνά για την μέτρηση χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\frac{\Delta t}{t_{21} t_{12}} = \frac{\sin 2q}{d} u = \frac{\sin 2q}{Sd} Q \quad (4.24)$$

Η κατανομή ταχυτήτων επηρεάζει πολύ την μέτρηση γιατί η ταχύτητα “ u ” που μετριέται από τον μετρητή είναι η μέση τιμή της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής διάδοσης του ήχου μεταξύ των δύο αισθητήρων. Η μέση αυτή ταχύτητα μπορεί να μην συμπίπτει με την μέση ταχύτητα ροής αν η ροή είναι για παράδειγμα στροβιλώδης.

Για τη μέτρηση της ποσότητας $\frac{\Delta t}{t_{21} t_{12}}$ χρησιμοποιούνται δύο αισθητήρες που

λειτουργούν σαν πομποί και δέκτες. Οι μετρητές αυτοί έχουν συνήθως ακρίβεια

περίπου 1% της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας για αγωγούς με κατάλληλη διάμετρο.

Κεφάλαιο 5

5. Εφαρμογές υπερήχων

5.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Όπως έχει ήδη ειπωθεί οι υπέρηχοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό πλήθους φυσικών μεγεθών. Δεδομένων των αρχών που μπορούν να υλοποιηθούν οι υπολογισμοί αυτοί μπορούν να πραγματοποιηθούν αρκετές εργαστηριακές εφαρμογές – ασκήσεις στα εργαστήρια της σχολής, κυρίως στα εργαστήρια της φυσικής, της μηχανικής και των ρευστών.

Για την υλοποίηση των εφαρμογών αυτών ο απαιτούμενος εργαστηριακός εξοπλισμός δεν διαφέρει από εφαρμογή σε εφαρμογή. Οι μόνες διαφορές εντοπίζονται μόνο στην χρήση και το είδος των υπερηχητικών μετατροπέων. Οι συσκευές που θα απαιτηθούν για την υλοποίηση των διατάξεων είναι:

1. Γεννήτρια συχνοτήτων για την τροφοδοσία των υπερηχητικών μετατροπέων. Λόγω της διαφορετικής φύσης των εφαρμογών που μπορούν να πραγματοποιηθούν η συχνότητα εκπομπής των μετατροπέων ποικίλει από μερικά kHz έως και MHz, ενώ παράλληλα ενδέχεται να χρειαστεί, είτε συνεχές ημιτονικό σήμα, είτε ημιτονικοί παλμοί. Επίσης η ισχύς που κάθε φορά απαιτείται είναι διαφορετική ανάλογα από τις απώλειες που ενδέχεται να υπάρχουν.

Μια καλή επιλογή είναι η γεννήτρια συχνοτήτων ATAS η οποία έχει δημιουργηθεί με σκοπό την χρήση της σε εργαστήρια για την υλοποίηση εργαστηριακών ασκήσεων και χρησιμοποιείτε κατά κόρον για το σκοπό αυτό.

Έχει τη δυνατότητα παραγωγής ημιτονικών και τετραγωνικών σημάτων έως και 10MHz με μέγιστη τάση εξόδου 20V και κατά ανώτατο όριο ισχύς εξόδου στα 30 W.

Η τιμή στην οποία διατίθεται είναι **1.574,40 €**



Μια δεύτερη εναλλακτική λύση είναι η Arbitrary, DDS generator 20Mhz η οποία παρέχει επιπλέον την δυνατότητα παραγωγής και παλμών, με μέγιστη ισχύ εξόδου τα 10 W και τιμή διάθεσης **639,84 €**



2. Συχνόμετρο ή παλμογράφος

Ο υπερηχητικός αισθητήρας σε κάθε περίπτωση συνδέεται σε ένα συχνόμετρο ή ένα παλμογράφο ώστε να καταστεί δυνατή η μέτρηση της λαμβανομένης συχνότητας.

Οι δυνατότητες των συχομέτρων είναι σχετικά περιορισμένες και αρκούνται μόνο στην καταγραφή της μετρούμενης συχνότητας χωρίς να δίνουν δυνατότητες απεικόνισης κυματομορφών για περαιτέρω ανάλυση και μελέτη, όμως αποτελούν την πιο φθηνή λύση.

Μια καλή επιλογή είναι ο μετρητής συχνοτήτων MFJ-888X, ο οποίος διαθέτει μεγάλο εύρος συχνοτήτων, καλύπτοντας από τα 10Hz έως και τα 3GHz . Η μετρήσεις γίνονται μέσω BNC κονέκτορα και η τιμή του είναι σχετικά χαμηλή, στα **244 €**



Όσον αφορά τη χρήση παλμογράφου η οποία και προτείνεται, ένας καλός ψηφιακός παλμογράφος μέσης τιμής είναι ο DS-203 της PINTEK ο οποίος έχει και δυνατότητες αναλογικών μετρήσεων με χαρακτηριστικά:

- ο Αναλογική μέτρηση 40 MHz
- ο Ψηφιακή μέτρηση 20 MHz
- ο Ευαισθησία 1mV/DIV
- ο Εξασθενητή με 10 βήματα
- ο Ανάλυση 5,8 nS
- ο Ψηφιακή δειγματοληψία: 20 MSPS
- ο Ενσωματωμένη μνήμη 2*2048*8 bit
- ο Κλίμακα sweep: 0,1 μ S - 0,5 S /DIV, 21 βήματα

και τιμή **1.653,78 €**



Μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση με πολλές δυνατότητες η οποία προσφέρει την δυνατότητα συνεχούς καταγραφής των μετρήσεων, είναι η χρήση εξωτερικής κάρτας παλμογράφου για υπολογιστή η οποία συνδέεται μέσω USB θύρας. Ενδεικτικά έχουμε την κάρτα της PROTEK με τιμή **255 €** συμπεριλαμβανομένου και του λογισμικού που τη συνοδεύει και χαρακτηριστικά:



- ο Dual Channel
- ο 100 Msps per Channel, 30MHz Bandwidth
- ο Parallel Port PC Connection
- ο Auto Calibration
- ο Auto Setup
- ο 50MHz FFT Spectrum Analyzer
- ο Requirements IBM compatible PC(Pentium) 32M RAM/100MB of free hard disk space, Windows
- ο PC Connection : Parallel
- ο Power : DC $\pm 8V$
- ο Channel : 2Channel
- ο Impedance : 1M Ω 25pF
- ο Coupling : AC/DC/GND
- ο Bandwidth : DC~30MHz -3dB
- ο Resolution : 8Bit
- ο Voltage Range : 50mV~5V, 1,2,5 7Steps
- ο Display area : 8x10div
- ο Accuracy : $\pm 3\%$ (Gain), $\pm 0.01\%$ (Time)
- ο Time Base Range : 50ns~320s
- ο Input Range : $\pm 50V$
- ο Max. Input : $\pm 100VDC$ Continuous $\pm 250V(DC+AC)$ Transient
- ο X-Y : $\pm 3\%$
- ο Auto Setup : DC~30MHz, Frequency Counter
- ο Sample Clock Rate : 1Hz ~ 100MHz
- ο EXT Trigger Input : TTL only
- ο Trigger Type : \pm Slope
- ο TV - V/H : Yes

- o Trigger Level : $\pm 3\text{div}$ (DC only)
- o Trigger Type : Analog
- o Trigger Source : CH1, CH2, EXT
- o Mag (Time) : OK
- o Offset Range : $\pm 4\text{div}$
- o Memory Depth : 32KB/CH
- o Max Sampling Rate : 100MSPS/CH, Dual 100MSPS
- o Auto Calibration : OK
- o Trace Display : Point/Line
- o Grid : On/Off
- o Vertical Mode : CH1, CH2, Dual , ADD
- o Horizontal Mode : AUTO, NORM, SINGLE
- o Single : DC ~ 30MHz

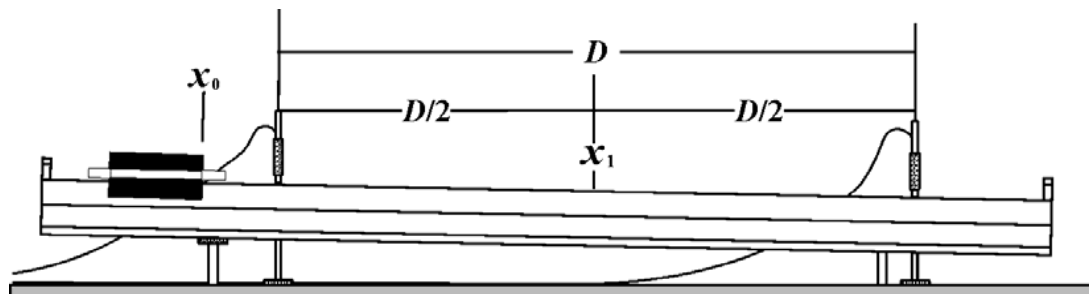
3. Υπερηχητικοί μετατροπείς των οποίων το εύρος ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή και ξεκινά από μερικά KHz έως και MHz ανάλογα την εφαρμογή και κόστος από μερικά ευρώ στις χαμηλές συχνότητες έως και εκατοντάδες ευρώ στις υψηλές. Το είδος των υπερηχητικών μετατοπέων θα παρουσιάζεται σε κάθε εφαρμογή χωριστά.

5.2 Εφαρμογές για το εργαστήριο φυσικής

5.2.1 Μέτρηση στιγμιαίας και μέσης ταχύτητας.

Πειραματική διάταξη

Χρησιμοποιούμε συσκευή αμελητέας τριβής, η οποία αποτελείται από έναν διάδρομο, πάνω στον οποίο μπορούν να κινούνται, πρακτικά χωρίς τριβές, ειδικά κατασκευασμένα αμαξίδια.

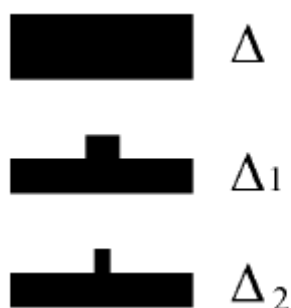


Σχήμα 5.1 Η πειραματική διάταξη της εφαρμογής αποτελούμενη από ένα διάδρομο, ένα αμαξίδιο και δύο ορθοστάτες των οποίων η απόσταση αλλάζει. [26]

Αυτό προσφέρει την ευκαιρία να μελετήσει κανείς πολλά κινηματικά και δυναμικά μεγέθη. Ουσιαστικά αυτό που περιγράφεται δεν είναι παρά η γνωστή εργαστηριακή άσκηση μέτρησης ταχύτητας με φωτοπύλες η οποία θα υλοποιηθεί με υπερηχητικούς μετατροπείς.

Στην τροχιά υπάρχει τοποθετημένη μετροταινία, με την οποία μετρούμε τις αποστάσεις. Η συσκευή με την βοήθεια δύο στηριγμάτων είναι τοποθετημένη σε έδρα (Σχήμα 1). Το ένα στήριγμα παραμένει σταθερό, ενώ το άλλο με την βοήθεια ειδικών μπλοκ μετάλλου μπορεί να ανεβάσει το άκρο της συσκευής αμελητέας τριβής σε επιθυμητό μετρήσιμο ύψος.

Επάνω στην συσκευή τοποθετείται το αμαξίδιο, στο οποίο υπάρχει το αντίστοιχο διάφραγμα. Τα διαφράγματα έχουν διαφορετικά μήκη (Σχήμα 2).



Σχήμα 5.2 Διαφορετικοί τύποι διαφραγμάτων που τοποθετούνται πάνω στα αμαξίδια ως ανακλαστικές επιφάνειες. [26]

Τέλος, στην διάταξη τοποθετούνται οι υπερηχητικοί μετατροπείς, οι οποίοι αναρτώνται πάνω στους ορθοστάτες που αποτελούν μέρος της πειραματικής διάταξης.

Στον εξοπλισμό συμπεριλαμβάνονται μία γεννήτρια συχνοτήτων/παλμών και ένας παλμογράφος.

Τοποθετούμε τους υπερηχητικούς μετατροπείς σε συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους και καταγράφουμε τις χρονικές στιγμές διέλευσης από τα σημεία που βρίσκονται οι μετατροπείς. Γνωρίζοντας ουσιαστικά με τον τρόπο αυτό το χρόνο Δt που απαιτήθηκε για να διανυθεί η απόσταση μεταξύ αυτών, συνεπώς είναι εφικτός ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας.

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί συνεχής δέσμη υπέρηχων αφού μετρήσεις με χρήση υπερηχητικών παλμών είναι ανέφικτο να πραγματοποιηθούν, και θα μπορούσαν να υλοποιηθούν με δύο διαφορετικές τεχνικές.

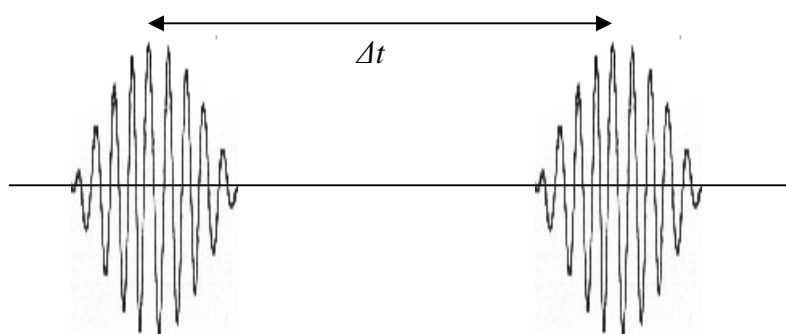
1. Στην πρώτη περίπτωση θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν δύο αισθητήρες που μπορούν ταυτόχρονα να λειτουργήσουν ως δέκτες και πομποί.

Ενδεικτικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες Olympus σειράς Vxxx, επειδή το κόστος αυτών είναι σχετικά υψηλό (στα 50kHz τιμή τους ανέρχεται στα 250 €) , μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες όπως οι BCS-S04 και AL388-03 ή άλλοι απλοί αισθητήρες εμπορίου με μέσο κόστος περίπου 10€

Τροφοδοτούμε του πομπούς μέσω της γεννήτριας συχνοτήτων και συνδέουμε τις εξόδους των ανιχνευτών στον παλμογράφο. Όταν το αμαξίδιο περάσει μπροστά από τον αισθητήρα θα έχουμε ανάκλαση του σήματος κάτι το οποίο θα εμφανιστεί ως βραχύς παλμός στον παλμογράφο. Λόγω της ύπαρξης δύο αισθητήρων θα έχουμε στον παλμογράφο δύο τέτοιες κυματομορφές σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Από τη διαφορά χρόνου που αυτές θα εμφανιστούν ουσιαστικά έχουμε τον ζητούμενο χρόνο Δt .

Δεν απαιτείται για τη διεξαγωγή του πειράματος ιδιαίτερη εστίαση της υπερηχητικής δέσμης αφού μπορεί να μετρηθεί η διαφορά χρόνου από τα μέγιστα των καταγεγραμμένων παλμών, αυτά εμφανίζονται όταν το αμαξίδιο περνά ακριβώς μπροστά από τον αισθητήρα.

Στην περίπτωση που θέλουμε να μειώσουμε την διασπορά της υπερηχητικής δέσμης μπορούμε να τοποθετήσουμε μπροστά από τον αισθητήρα διάφραγμα με στενή σχισμή από ηχοαπορροφητικό υλικό.



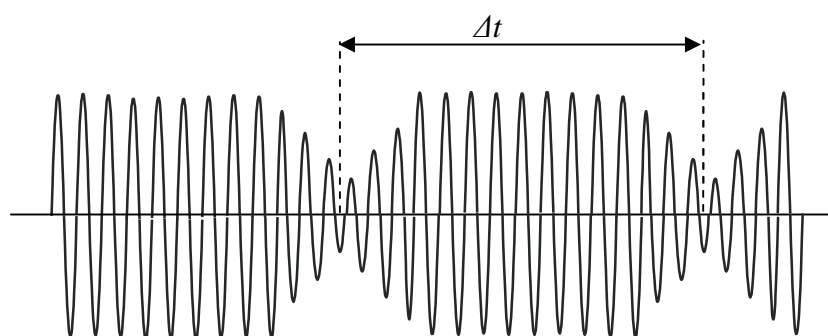
Σχήμα 5.3 Οι δύο παλμοί από ανάκλαση όπως αυτοί θα εμφανιστούν στην οθόνη του παλμογράφου

Λόγω του γεγονότος ότι ο χώρος του εργαστηρίου είναι περιορισμένος θα έχουμε συνεχή ανάκλαση υπερήχων από περιβάλλοντα αντικείμενα και κυρίως των τοίχων του εργαστηρίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο αισθητήρας να λαμβάνει συνεχώς

ανακλώμενα σήματα. Για να περιοριστεί το φαινόμενο αυτό και να είναι εφικτή η μέτρηση θα πρέπει στην διάταξη, ακριβώς απέναντι από του αισθητήρες να τοποθετηθεί υλικό μεγάλης ηχοαπορροφητικότητας.

2. Στην δεύτερη περίπτωση μπορούν χρησιμοποιηθούν δύο ανεξάρτητα ζεύγη αισθητήρων. Δύο πομποί και δύο δέκτες οι οποίοι τοποθετούνται ανά ζεύγος εκατέρωθεν της τροχιάς. Η υπερηχητική δέσμη και εδώ είναι συνεχής, και η συνδεσμολογία των οργάνων η ίδια. Εδώ όμως αυτό που θα εμφανιστεί στον παλμογράφο δεν είναι δυο ανιχνευμένοι παλμοί αλλά δύο ελάχιστα.

Από τη διαφορά χρόνου που αυτά θα εμφανιστούν ουσιαστικά έχουμε τον ζητούμενο χρόνο Δt .



Σχήμα 5.4 Τα δύο ελάχιστα από ανάκλαση όπως αυτά θα εμφανιστούν στην οθόνη του παλμογράφου.

Για τις μετρήσεις αυτών των διατάξεων δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός όσον αφορά τη χρησιμοποιούμενη συχνότητα της ηχητικής δέσμης. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε και ακουστικές ακόμα συχνότητες, αυτό είναι όμως ίσως ενοχλητικό. Προτεινόμενες συχνότητες για την υλοποίηση του πειράματος είναι της τάξεως των 40kHz – 50Khz, και αυτό γιατί:

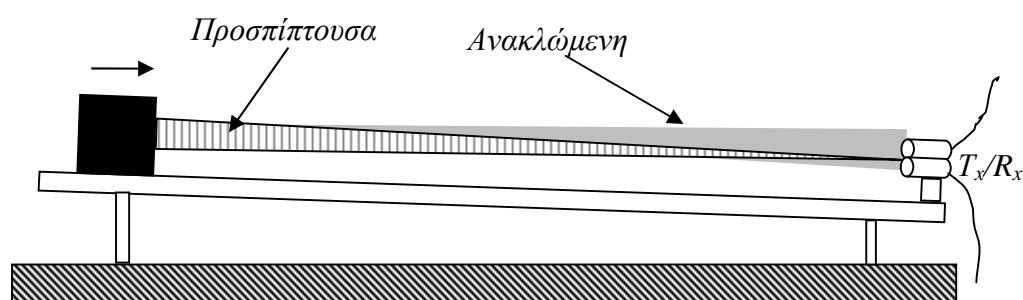
- Είναι συχνότητες εφικτές από ήδη υπάρχουσες γεννήτριες συχνοτήτων στα εργαστήρια.
- Οι αισθητήρες αυτής της κατηγορίας είναι ιδιαίτερα χαμηλού κόστους.
- Υπάρχει αφθονία χαμηλού κόστους ηχοαπορροφητικών υλικών για αυτό το εύρος συχνοτήτων.
- Βρίσκονται στη μέση περίπου του εύρους των χρονικών κλιμάκων των περισσότερων παλμογράφων.

Η διάταξη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό της στιγμιαίας ταχύτητας. Γνωρίζοντας το μήκος l του διαφράγματος και μετρώντας την χρονική διάρκεια Δt του παλμού (ή τη χρονική διάρκεια του παρατηρούμενου ελάχιστου) μπορούμε να υπολογίσουμε την στιγμιαία ταχύτητα του αμαξιδίου.

5.2.2 Μέτρηση στιγμιαίας ταχύτητας εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο Doppler.

Πειραματική διάταξη

Χρησιμοποιούμε συσκευή αμελητέας τριβής, η οποία αποτελείται από έναν διάδρομο, πάνω στον οποίο μπορούν να κινούνται, πρακτικά χωρίς τριβές, ειδικά κατασκευασμένα αμαξίδια παρόμοια με αυτή της εφαρμογής 1 .



Σχήμα 5.5 Η πειραματική διάταξη της εφαρμογής αποτελούμενη από ένα διάδρομο, ένα αμαξίδιο και ένα αισθητήρα στο τέλος του διαδρόμου.

Ο αισθητήρας τοποθετείται ακριβώς απέναντι από το κινούμενο αμαξίδιο και στοχεύει ακριβώς πάνω του. Ο πομπός του αισθητήρα συνδέεται με γεννήτρια συχνοτήτων και η έξοδος του ανιχνευτή στον παλμογράφο.

Το πείραμα μπορεί να υλοποιηθεί είτε με εκπομπή συνεχούς υπερηχητικής δέσμης είτε με εκπομπή υπερηχητικών παλμών ανά τακτά διαστήματα. Αν και θεωρητικά δεν υπάρχει περιορισμός στην επιλογή της συχνότητας του υπερήχου, πρακτικά η προς μέτρηση ταχύτητα επιβάλλει κάποιους.

Για παράδειγμα αν η συχνότητα του ήχου είναι 10kHz (ακουστική συχνότητα) και η μετρούμενη ταχύτητα της τάξεως των 10cm/s τότε η μετατόπιση Doppler που εμφανίζεται στη μετρούμενη συχνότητα $f_D = 2,92Hz$, η οποία είναι σχετικά μικρή και ενδεχομένως είναι δύσκολο αν κάποιος χρησιμοποιεί αναλογικό παλμογράφο να την εντοπίσει στην μετρούμενη εξ' ανακλάσεως δέσμη. Αυτό σημαίνει ότι όσον αφορά τον αισθητήρα (δέκτη) θα πρέπει συνδεθεί με παλμογράφο ή συχνόμετρο υψηλής ακρίβειας και διακριτικής ικανότητας.

Για τη υλοποίηση του πειράματος

1. Στη γεννήτρια συχνοτήτων επιλέγουμε συχνότητα 40-100 kHz (χαρακτηριστικά παλμού: ημιτονικός, ισχύος 5 – 10 W ανάλογα τον αισθητήρα που έχουμε επιλέξει).
2. Τοποθετήστε το αμαξίδιο στην αρχή του διαδρόμου.
3. Ενεργοποιούμε καταγραφική συσκευή παλμογράφο ή συχνόμετρο.
4. Θέτουμε το αμαξίδιο σε κίνηση.

Από την μετρούμενη συχνότητα μέσω του αισθητήρα δέκτη μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του αμαξιδίου από τη σχέση $f'_R = f_s + \frac{2u}{c} f_s$ όπου f'_R ή μετρούμενη εξ' ανακλάσεως στο κινούμενο αμαξίδιο συχνότητα, f_s η συχνότητα του πομπού, c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα και u η ταχύτητα του αμαξιδίου.

Μια ακόμα πιο ενδιαφέρουσα προσέγγιση του προβλήματος προκύπτει αν χρησιμοποιώντας την παραπάνω διάταξη αντιμετωπίσουμε την εκπεμπόμενη και τη ληφθείσα συχνότητα ως διακρότημα, γνωστό και ως ηχητικό διακρότημα λόγω φαινομένου Doppler – Fizeau [27].

Όπως είναι γνωστό, απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία διακροτημάτων σε κάποια περιοχή M του χώρου από την υπέρθεση δύο αρμονικών ηχητικών κυμάτων 1 και 2 είναι αυτά να έχουν περίπου ίσες τιμές συχνότητας $f_1 \approx f_2$. Στο συγκεκριμένο πείραμα, τα δύο ηχητικά κύματα δημιουργούνται ως εξής: Το πρώτο κύμα δημιουργείται από ακίνητη πηγή συχνότητας f_s . Το δεύτερο ηχητικό κύμα παράγεται από πηγή (αμαξίδιο) που απομακρύνεται ή πλησιάζει με ταχύτητα. Συνεπώς λόγω του φαινομένου Doppler- Fizeau, έχουμε από τη δεύτερη αυτή κινούμενη πηγή ήχο συχνότητας:

$$f_2 = \frac{c+u}{c} f_s \quad (5.1)$$

Έτσι, η μετατόπιση της συχνότητας της δεύτερης πηγής λόγω του φαινομένου Doppler είναι :

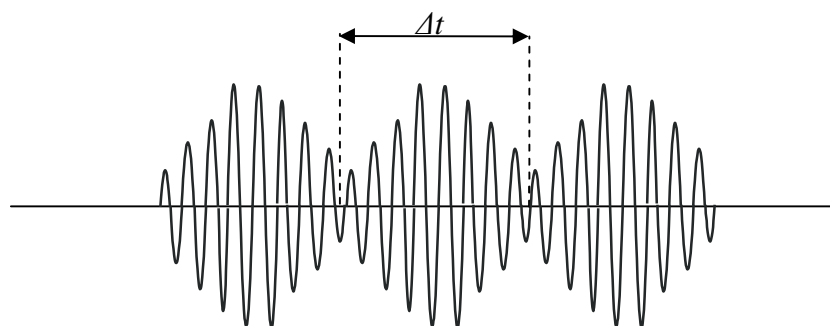
$$f_D = \frac{u}{c} f_s \quad (5.2)$$

Συνεπώς, ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται ταυτόχρονα δύο ηχητικά κύματα, ένα συχνότητας f_1 και ένα δεύτερο λίγο μικρότερης συχνότητας f_2 . Άρα, ο ήχος είναι διακροτήμα συχνότητας:

$$f_{beat} = f_1 - f_2 = \frac{u}{c} f_s \quad (5.3)$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η συχνότητα του παρατηρούμενου διακροτήματος ισούται με τη μετατόπιση της συχνότητας της δεύτερης πηγής λόγω του φαινομένου Doppler.

Η πειραματική διάταξη δεν αλλάζει στην περίπτωση αυτή απλά στέλνουμε στον παλμογράφο και το σήμα του πομπού ώστε να έχουμε δύο μετρούμενες συχνότητες. Στην οθόνη του παλμογράφου θα εμφανιστεί μια κυματομορφή διακροτήματος (σχήμα 6). Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών μηδενισμών του πλάτους είναι η περίοδος του διακροτήματος $T_{beat} = \Delta t$.



Σχήμα 5.6 Η μορφή του διακροτήματος λόγω φαινομένου Doppler, όπως θα εμφανιζόταν στον παλμογράφο

Γνωρίζοντας την περίοδο του διακροτήματος έχουμε:

$$f_{beat} = \frac{1}{T_{beat}} \quad (5.4)$$

Το πείραμα μπορεί να επαναληφθεί για διαφορετικές τιμές της συχνότητας f_s και να δημιουργηθεί ένα πίνακα όπως φαίνεται παρακάτω:

f_s (kHz)	u (m/s)	f_D (Hz)	f_{beat} (Hz)

Αναπαριστούμε γραφικά τα μεγέθη $f_{beat} = f(f_s)$ γνωρίζοντας ότι η σχέση που τα συνδέει είναι: $f_{beat} = \frac{u}{c} f_s$, και από την κλίση της γραφικής παράστασης υπολογίζουμε την ταχύτητα u του αμαξιδίου.

5.3 Εφαρμογές για το εργαστήριο μηχανικής.

5.3.1 Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας E , του διατμητικού συντελεστή ελαστικότητας G , του λόγου *Poisson*, καθώς και την ταυτοποίηση του υλικού κατασκευής ενός μετάλλου

Το μέτρο ελαστικότητας E ενός φορτιζόμενου υλικού ορίζεται ως ο λόγος της τάσης (δύναμη ανά μονάδα επιφανείας) προς την αντίστοιχη παραμόρφωση.

Ο διατμητικός συντελεστής ελαστικότητας είναι παρόμοιος με την αναλογία πίεσης – παραμόρφωσης σε υλικό που υποβάλλεται σε διατμητική τάση η οποία προκαλεί διατμητική παραμόρφωση.

Ο λόγος *Poisson* είναι η αναλογία της διατμητικής προς την αντίστοιχη εγκάρσια παραμόρφωση σε ένα υλικό που καταπονείται κατά μήκος του άξονά του.

Αυτές οι βασικές σχέσεις, οι οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον σε πολλές κατασκευαστικές και ερευνητικές εφαρμογές, μπορούν να υπολογιστούν γρήγορα, εύκολα και με ακρίβεια με τους υπερήχους.

Για τον υπολογισμό των βασικών αυτών μεγεθών απαιτείται, όπως προκύπτει από την ο υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης του ήχου (κεφάλαιο 4).

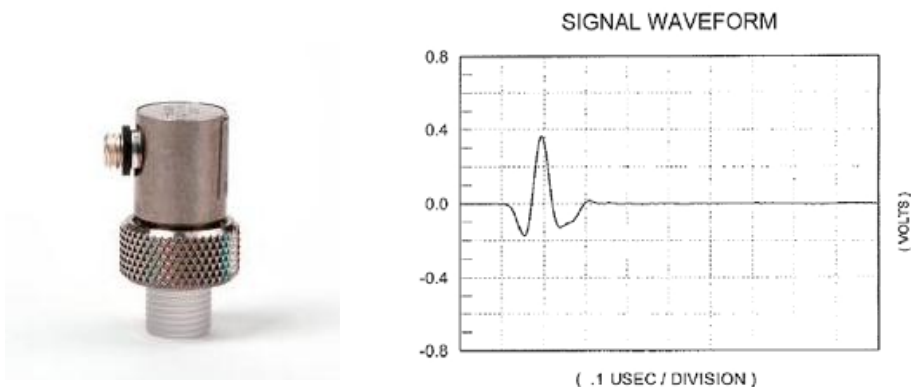
Η ταχύτητα του υπέρηχου μπορεί να μετρηθεί εύκολα χρησιμοποιώντας τις λεγόμενες “pulse-echo” τεχνικές. Η τεχνική που περιγράφεται στη συνέχεια ισχύει μονάχα για τα υλικά όπου η ταχύτητα δεν αλλάζει με την συχνότητα. Αυτό περιλαμβάνει τα περισσότερα υλικά όπως μέταλλα, κεραμικά, και γυαλί εφόσον η διατομή του δεν πλησιάζει τη συχνότητα του μήκους κύματος της δοκιμής. Υλικά όπως τα πλαστικά και άλλα σύνθετα είναι κατά κύριο λόγο ανισότροπα, δηλαδή η ταχύτητα του ήχου μεταβάλλεται με την θέση, όμως, χρήσιμες πληροφορίες είναι δυνατόν να αντληθούν

απ' αυτά μέσω μιας τέτοιας τεχνικής με υπέρηχους, εφόσον η φύση της διασποράς του υλικού μπορεί να αναγνωριστεί όταν ερμηνευτούν τα αποτελέσματα.

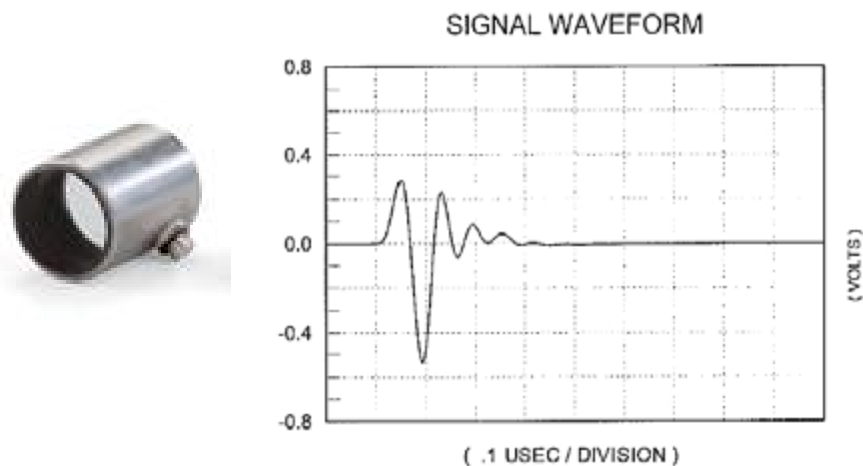
Εξοπλισμός

Ο απαραίτητος για την μέτρηση της ταχύτητας, πειραματικός εξοπλισμός περιγράφεται παρακάτω περιλαμβάνει μια γεννήτρια παλμών, ένα παλμογράφο, και δύο αισθητήρες υπερήχων κατάλληλοι για την μέτρηση διάδοσης της ταχύτητας του υπέρηχου κατά μήκος, και εγκάρσια.

Μπορούν εδώ να χρησιμοποιηθούν ενδεικτικά οι αισθητήρες της Olympus, και συγκεκριμένα για την μέτρηση στον εγκάρσιο άξονα το μοντέλο V202 στα 10MHz, και για μετρήσεις διατμητικά, το μοντέλο V221 στα 10 MHz επίσης, με κόστος στα 420 € Παρακάτω (σχήμα 7) φαίνονται οι συγκεκριμένοι αισθητήρες, καθώς και η κυματομορφή βαθμονόμησής τους:



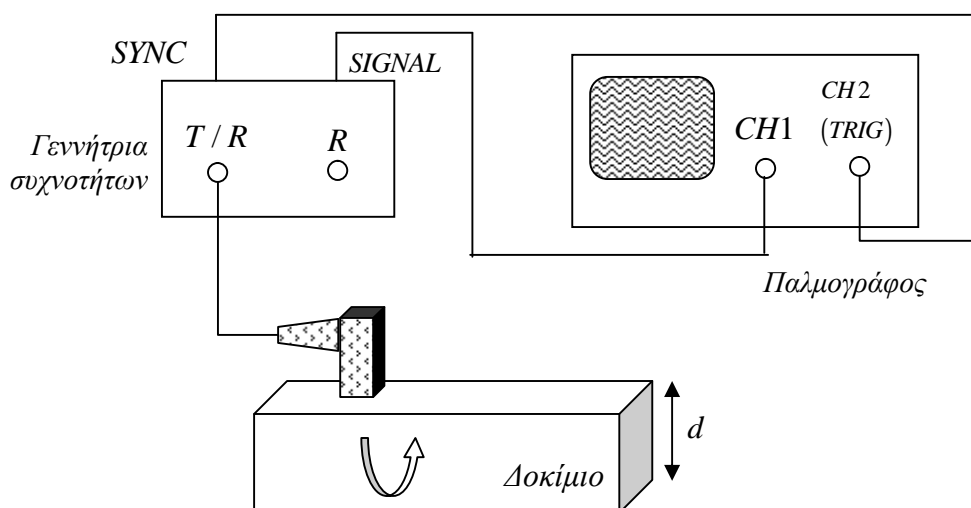
Σχήμα 5.7.1: V202-PR



Σχήμα 5.7.2: V221-PR

Οι αισθητήρες αυτοί λειτουργούν και ως πομποί του υπέρηχου, αλλά και ως δέκτες. Ο παλμογράφος θα εμφανίσει ένα γράφημα τάσης-χρόνου, απ' όπου θα υπολογισθεί η χρονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών. Αυτός ο χρόνος Δt είναι ο χρόνος που χρειάστηκε ο υπέρηχος να διανύσει το προς έλεγχο υλικό και να επιστρέψει πίσω στον αισθητήρα.

Σχηματικά, η διάταξη του πειράματος έχει ως εξής:



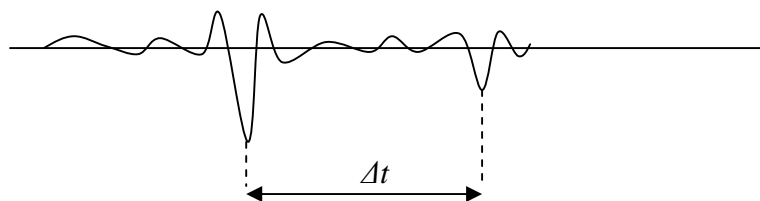
Σχήμα 5.8 Η πειραματική διάταξη της εφαρμογής, όπου διακρίνονται όλες οι συσκευές που απαιτούνται καθώς και το ως προς μελέτη δοκίμιο.

Το ομοαξονικό καλώδιο χαμηλών απωλειών του αισθητήρα συνδέεται στην θύρα “T/R” της γεννήτριας παλμών. Τα αρχικά T/R σημαίνουν “Transmit/Receive” και αυτό γιατί ο συγκεκριμένος αισθητήρας χρησιμοποιείται και ως δέκτης του παλμού που εξέπεμψε. Για άλλου τύπου μέτρησεις με διαφορετικό δέκτη, αυτός θα συνδέονταν στην θύρα “R” ή “Receive”.

Να σημειωθεί εδώ ότι το υλικό που θα εξεταστεί, για να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα, πρέπει να έχει διαστάσεις τουλάχιστον μεγαλύτερες από 5 φορές από το μήκος κύματος, ώστε ο παλμός να προλάβει να διασχίσει το υλικό και να εξέλθει ανακλώμενος από αυτό (επιπλέον θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν και η χρονική διάρκεια του παλμού ισοδυναμεί με ένα μήκος κύματος). Επίσης, ο αισθητήρας για να έχει ηχητική συνέχεια με το υλικό, χρησιμοποιούμε κατάλληλο gel ανάμεσα στην επιφάνεια του υλικού και εκείνη του αισθητήρα, απαραίτητο πάντα για τέτοιες μετρήσεις.

Μετρήσεις – Υπολογισμοί

Αρχικά τοποθετούμε τον εγκάρσιο αισθητήρα, και ρυθμίζουμε τη γεννήτρια στις προβλεπόμενες τιμές λειτουργίας του, όπως συχνότητα εκπομπής, απόσβεση, attenuation, gain, κτλ. Τοποθετούμε το gel επαφής, και ενεργοποιούμε τον παλμογράφο, απ' τον οποίο λαμβάνουμε για λεπτό δοκίμιο αλουμινίου πάχους 1,27mm (η επιλογή έγινε θεωρητικά και δίνει καλά αποτελέσματα) κυματομορφή όπως αυτή του σχήματος:



Σχήμα 5.9 Η εικόνα που θα διαμορφωθεί στον παλμογράφο από το εκπεμπόμενο και το ανακλώμενο σήμα.

Ο

χρόνος που χρειάζεται να μετρηθεί είναι όπως το Δt μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών. Η τιμή αυτή για την διαμήκη ταχύτητα είναι ίση με $\Delta t = 412 \text{ nsec}$. Οπότε:

Ταχύτητα = Πάχος δοκιμίου / (1/2) χρόνος διέλευσης

$$C_L = \frac{1,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{\frac{412 \cdot 10^{-9}}{2} \text{ sec}} = 6 \cdot 10^3 \text{ m/s} \quad (5.5)$$

Αντικαθιστώντας τον V202 με τον V221 αισθητήρα με σκοπό την μέτρηση του χρόνου διέλευσης του υπέρηχου διατμητικά στο υλικό, μετά από επαναρρύθμιση της γεννήτριας λαμβάνουμε στον παλμογράφο κυματομορφή ανάλογη αυτής του σχήματος 5.9. Ο μετρούμενος χρόνος Δt είναι μεγαλύτερος, κάτι που είναι θεωρητικά αναμενόμενο, και ίσος με $\Delta t = 830 \text{ nsec}$. Η εγκάρσια ταχύτητα είναι :

$$C_s = \frac{1,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{\frac{830 \cdot 10^{-9}}{2} \text{ sec}} = 3,06 \cdot 10^3 \text{ m/s} \quad (5.6)$$

Χρησιμοποιώντας έτοιμο πίνακα με μετρημένες τιμές ταχύτητας διέλευσης του υπέρηχου μέσα σε μέταλλα, προσδιορίζουμε την φύση του υλικού που στη συγκεκριμένη περίπτωση επαληθεύεται ότι είναι αλουμίνιο

Material	Ultrasonic Velocity				
	Longitudinal		Transverse (Shear)		Impedance Z
	in / us	mm / us	in / us	mm / us	
METALS					
Aluminum 1100-0	0.25	6.23	0.12	3.07	17.1
Aluminum 2024-T4	0.25	6.38	0.12	3.15	17.6
Aluminum 6061-T6	0.25	6.3	0.12	3.15	17
Beryllium	0.51	12.88	0.35	8.89	23.5
Brass (70% Cu - 30% Zn)	0.17	4.37	0.08	2.11	37.1
Bronze (Phosphor 5%)	0.14	3.53	0.09	2.24	31.3
Copper (CP)	0.19	4.75	0.09	2.34	42.5
Gold	0.13	3.25	0.05	1.19	62.6
Hastelloy C	0.23	5.84	0.11	2.9	52.2
Hastelloy X	0.23	5.79	0.11	2.74	47.7
Inconel (Wrought)	0.31	7.82	0.12	3.02	64.5
Iron (Cast), Various Alloys	0.138-	3.505-	0.087-	2.210-	24.3-
Lead (94Pb-6Sb)	0.09	2.16	0.03	0.81	23.5
Magnesium, Various Alloys	0.215-	5.461-	0.119-	3.023-	9.24-
Monel	0.21	5.36	0.11	2.72	47.2
Nickel (CP)	0.22	5.64	0.12	2.97	50
Silver (0.99 Fine)	0.14	3.61	0.06	1.6	37.8
Steel 1020	0.23	5.89	0.13	3.25	45.4
Steel 4340	0.23	5.84	0.13	3.25	45.6
Steel, CRES 300 Series	0.221-	5.613-	0.120-	3.048-	44.6-
Steel, CRES 400 Series	0.212-	5.385-	0.118-	2.997-	41.3-
Titanium, 6Al-4V	0.24	6.17	0.13	3.3	27.3
Zircaloy	0.19	4.72	0.09	2.36	44.2
Zirconium	0.18	4.65	0.09	2.26	30.1

Πίνακας 1. Μετρημένες τιμές ταχύτητας διάλωσης του υπερήχου μέσα σε μέταλλα όπως αυτές εμφανίζονται στην βιβλιογραφία. [37]

Για να υπολογιστεί ο λόγος Poisson, που θα χρειαστεί για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας στην συνέχεια, εισάγονται οι τιμές C_L , C_S στον ακόλουθο τύπο:

$$\nu = \frac{1 - 2 \left(\frac{C_S}{C_L} \right)^2}{2 - 2 \left(\frac{C_S}{C_L} \right)^2} \quad (5.7)$$

και αντικαθιστώντας τις τιμές υπολογίζεται: $\nu = 0,323$

Το Μέτρο Ελαστικότητας E δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E = \frac{C_L^2 r (1 + \nu) (1 - 2\nu)}{1 - \nu} \text{ N / m}^2 \quad (5.8)$$

όπου ρ η πυκνότητα του υλικού, που στην περίπτωση του αλουμινίου που εξετάζεται είναι ίση με 2.768Kg/m^3 , και ν ο λόγος Poisson.

Αντικαθιστώντας τις τιμές στην παραπάνω σχέση, υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας του υλικού:

$$E = \frac{(6 \cdot 10^3)^2 (m/s) \cdot 2968 (kg/m^3) \cdot 1,323 \cdot 0,354}{0,677} = 6,89 \cdot 10^{10} N/m^2 \text{ ή } 68,9 \text{GPa}$$

Ο διατμητικός συντελεστής ελαστικότητας G δίδεται από τη σχέση:

$$G = C_s^2 r \quad (5.9)$$

και αντικαθιστώντας έχουμε:

$$G = (3,06 \cdot 10^3)^2 (m/s) \cdot 2768 (kg/m^3) = 26 \text{GPa}$$

5.3.1 Εντοπισμός ατελειών σε υλικό

Ο ΜΚΕ (Μη Καταστροφικός Ελέγχος) με υπερήχους βασίζεται στη διαταραχή του εκπεμπόμενου στο υλικό κύματος λόγω της ύπαρξης ατελειών. Τα κύματα των ήχων και υπερήχων διαδίδονται μέσα στα υλικά, υφίστανται απόσβεση και ανακλώνται, διαθλώνται ή σκεδάζονται όταν συναντούν εμπόδια ή ασυνέχειες, ανάλογα με τη συχνότητά τους. Έτσι το ηχητικό κύμα που φτάνει στο δέκτη και ακολούθως μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, έχει σχετικά χαμηλότερη ένταση. Στην ιδιότητα αυτή τη χρησιμοποιούμε για να εντοπίσουμε τυχόν ατέλειες στο εσωτερικό ενός σώματος χωρίς να το τεμαχίσουμε.

- ο Τεχνικές Ανάκλασης
- ο Τεχνικές Περίθλασης (Time of Flight Diffraction ultrasonics – TOFD)
- ο Συστοιχίες Τάσης Υπερήχων (Phased Array ultrasonics)
- ο Περιστρεφόμενα συστήματα (Internal Rotary Inspection System - IRIS)
- ο Μέθοδοι υπερήχων με Laser (Laser ultrasonics LUT)
- ο Καθοδηγούμενα κύματα υπερήχων (Guided ultrasonic waves)
- ο Τεχνικές NEWS (Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy)
- ο Μέθοδος Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission, AE)

Για τον εντοπισμό εσωτερικών και επιφανειακών ατελειών χρησιμοποιείται η Ακουστική Εκπομπή (AE) περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση των ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό με απότομη απελευθέρωση ενέργειας. Όταν μια δομή υποβάλλεται σε ένα εξωτερικό

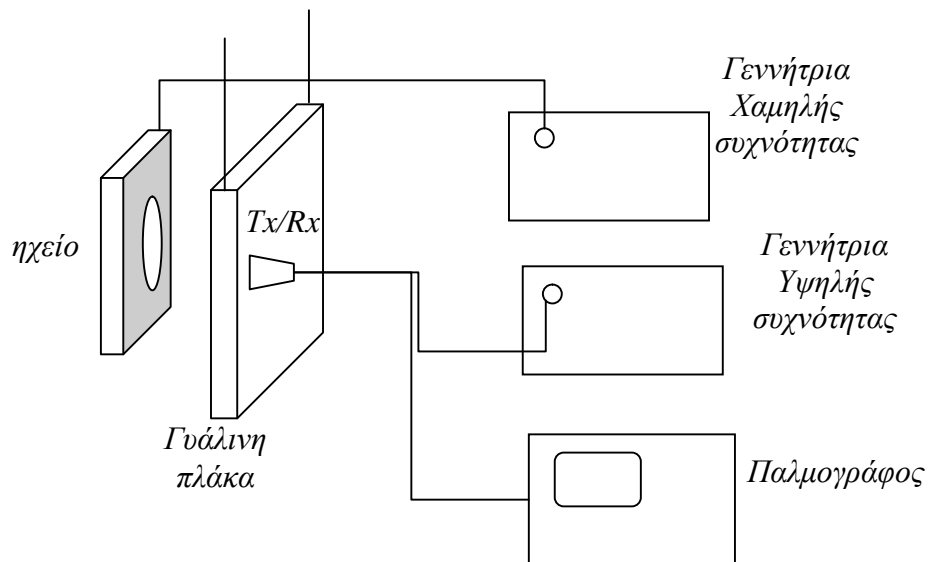
ερέθισμα (ή αλλαγή σε πίεση, φόρτιση ή θερμοκρασία), τότε πραγματοποιείται έκκλιση ενέργειας, υπό μορφή κυμάτων πίεσης, τα οποία διαδίδονται στην επιφάνεια και καταγράφονται από αισθητήρες. Η Ακουστική Εκπομπή, ως μέθοδος ΜΚΕ (Μη Καταστροφικού Ελέγχου) βασίζεται στη μετατροπή των ελαστικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα με τη χρήση κατάλληλων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων που διεγείρονται σε συχνότητες υπερήχων από 25 ως 1200 kHz. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια της υπό εξέταση κατασκευής και το ηλεκτρικό σήμα που λαμβάνεται ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία.

Πειραματική διάταξη.

Για την υλοποίηση του πειράματος θα χρησιμοποιήσουμε γυάλινη ορθογώνια πλάκα διαστάσεων χωρίς ατέλειες, αναρτάται με νήματα από τις δύο άκρες του, έτσι ώστε να θεωρείται ελεύθερη χωρίς να προστίθενται απώλειες λόγω στήριξης. Η επιλογή του **γυαλιού**, ως υλικό προς εξέταση, έγινε για το λόγο ότι παρουσιάζει μηδαμινές απώλειες σε σχέση με άλλα υλικά. Το ίδιο βέβαια θα μπορούσε να ισχυριστεί κάποιος για το μέταλλο, δυστυχώς όμως στα πλαίσια του εργαστηρίου και βάσει του εξοπλισμού που διαθέτουμε δεν είναι εφικτή η δημιουργία εσωτερικών ατελειών σε μεταλλικές κατασκευές, σε κλίμακα μερικών χιλιοστών. Επιπλέον το γυαλί, έχει οπτική διαφάνεια, εμφανίζει μεγάλη αντοχή και μπορεί να υποστεί μεγάλες καταπονήσεις.

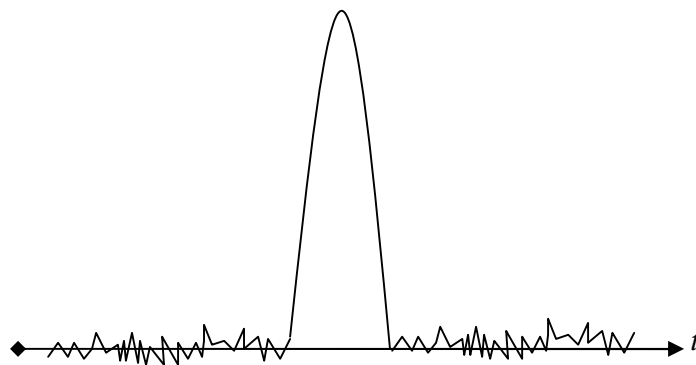
Πέρα από τη χρήση ενός υπερηχητικού μετατροπέα θα χρειαστεί η πλάκα να είναι σε μόνιμη διέγερση από χαμηλή συχνότητα συνήθως ακουστική (πηγή διέγερσης ταλάντωσης χαμηλής συχνότητας).

Ως πηγή διέγερσης ταλάντωσης χαμηλής συχνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα απλό ηχείο, για μηδενικές απώλειες, τοποθετημένο σε μικρή απόσταση από την πλάκα. Το ηχείο είναι συνδεδεμένο με τη γεννήτρια συχνοτήτων και εκπέμπει συνεχές ημιτονοειδές σήμα χαμηλής συχνότητας 50Hz - 300Hz. Ως πηγή υπερήχων χρησιμοποιείται πομπός υπερήχων, συνδεδεμένος με τη γεννήτρια σε συχνότητα της τάξεως των εκατοντάδων kHz. Μια καλή επιλογή είναι τα 300kHz – 500 kHz και το εκπεμπόμενο σήμα είναι υπερηχητικός παλμός .



Σχήμα 5.10 Η πειραματική διάταξη της εφαρμογής, όπου διακρίνονται όλες οι συσκευές που απαιτούνται καθώς και γυάλινη πλάκα που χρησιμοποιείται με τον αισθητήρα πάνω σε αυτή.

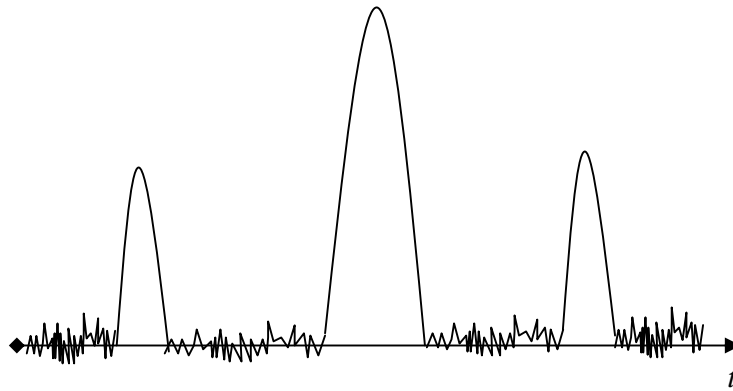
Αρχικά τοποθετούμε την γυάλινη πλάκα δοκίμιο χωρίς ρωγμές και στον παλμογράφο βλέπουμε μια κυματομορφή της μορφής του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα 5.11 Εφαρμογή υπερήχου 300kHz και χαμηλής συχνότητας ταλάντωσης 100 Hz σε γυάλινη πλάκα χωρίς ρωγμή

Στη συνέχεια η γυάλινη πλάκα θερμαίνεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο και έπειτα ψύχεται απότομα. Αυτή η διαδικασία προκαλεί ρωγμές, το μέγεθος και το πλήθος των οποίων δε μπορούμε να γνωρίζουμε εκ των προτέρων.

Επαναλαμβάνουμε το πείραμα και η κυματομορφή που λαμβάνουμε είναι της μορφής:



Σχήμα 5.12 Εφαρμογή υπερήχου 300kHz και χαμηλής συχνότητας ταλάντωσης 100 Hz σε γυάλινη πλάκα με ρωγμή

Αν αυτή είναι η παρατηρούμενη κυματομορφή για κάποια συχνότητα διέγερσης ταλάντωσης αν αυτή αυξηθεί τότε θα αυξηθεί και το πλήθος των παράπλευρων κορυφών.

Με τον τρόπο αυτό διαπιστώνεται η ύπαρξη της ρωγμής εντός του υλικού, για την οποία με περαιτέρω επεξεργασία και επανάληψη του πειράματος για διαφορετικές συχνότητες διέγερσης μας δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού της ακριβούς θέσεως και μεγέθους στο υπό εξέταση δοκίμιο.

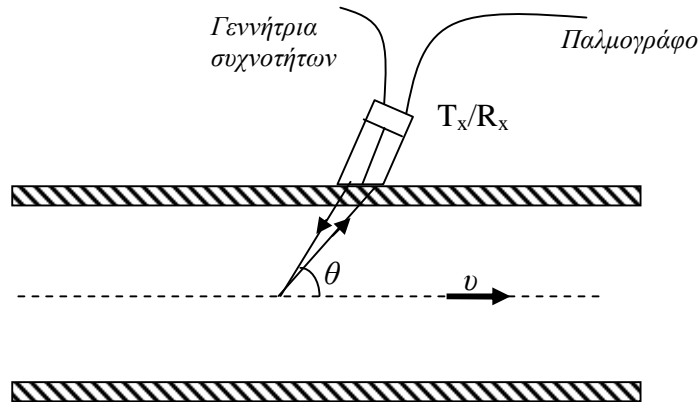
5.4 Εφαρμογές για το εργαστήριο μηχανικής ρευστών.

5.4.1 Μέτρηση παροχής και ταχύτητας ροής ρευστού

Η αρχή λειτουργία τους φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα που αποτελεί και την εργαστηριακή διάταξη. Ο υπερηχητικός μετατροπέας μπορεί να είναι σχεδόν οποιουδήποτε τύπου αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν συχνότητες από μερικά kHz έως και MHz.

Για την υλοποίηση της εφαρμογής μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αισθητήρες αντίστοιχους με αυτούς της εφαρμογής 5.3.1 στα 10 MHz. Ο αισθητήρας τοποθετείται στον αγωγό και για να αποφύγουμε απώλειες ισχύος λόγω ανάκλασης της υπερηχητικής δέσμης κατά την προσαρμογή του σε αυτόν χρησιμοποιούμε, ειδικό gel προσαρμογής.

Η υπερηχητική δέσμη βάλλεται υπό γωνία θ ως προς τον άξονα του αγωγού και συνεπώς ως προς την ταχύτητα ροής u .



Σχήμα 5.12 Εφαρμογή υπερήχου για μέτρηση ροής ρευστού εντός μεταλλικού ή μη αγωγού. [Δ5]

Για να χρησιμοποιηθεί η παραπάνω διάταξη πρέπει να υπάρχουν μέσα στη ροή σωματίδια επάνω στα οποία θα ανακλαστούν οι υπέρηχοι. Το σήμα που εκπέμπεται είναι ημιτονοειδές με συχνότητα f_s . Το σήμα που λαμβάνεται από τον μετατροπέα θα έχει συχνότητα f_R η οποία λόγω του φαινομένου Doppler συνδέεται με την f_s μέσω σχέσης (βλέπε κεφ. 4):

$$f_D = \frac{2u \cos \theta}{c} f_s \quad (5.10)$$

όπου

$$f_D = f_R - f_s \quad (5.11)$$

c η ταχύτητα του ήχου στο ρευστό.

Αν για παράδειγμα η ταχύτητα του ήχου στο ρευστό είναι $c = 1500 \text{ m/s}$, η διάμετρος του αγωγού $d = 5 \text{ cm}$, η γωνία εκπομπής/λήψης $\theta = 20^\circ$, $f_s = 1000 \text{ kHz}$ η εκπεμπόμενη συχνότητα και $f_R = 1002,5 \text{ kHz}$ η συχνότητα που επιστρέφει στον δέκτη τότε:

$$f_D = f_R - f_s \Rightarrow f_D = 2,5 \text{ kHz}$$

$$u = \frac{c \cdot f_D}{2 \cos \theta \cdot f_s} = \frac{1500 \cdot 2,5 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,939 \cdot 10^6} = 1,9 \text{ m/s} \text{ η ταχύτητα ροής}$$

Και η αντίστοιχη παροχή

$$Q = u \cdot S \Rightarrow Q = u \cdot \left(\rho \frac{d^2}{4} \right) = 3,731 \text{ L/s}$$

Επειδή η κατανομή των στοιχείων ανάκλασης επιδρά στην ακρίβεια της μέτρησης, η ακρίβεια μετρητών παροχής Doppler είναι συνήθως μικρή. Χρησιμοποιούνται όμως

στην ιατρική με μεγάλη επιτυχία σε μετρήσεις ροής σωματικών υγρών κυρίως αίματος με μεγάλες ακρίβειες αφού στην περίπτωση αυτή έχουμε μεγάλο πλήθος στοιχείων ανάκλασης, σταθερής κατανομής (ερυθρά κύτταρα) .

Πλεονεκτήματα των μετρητών ροής υπερήχων Doppler

Τα ροόμετρα Doppler μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν τα άλλα ροόμετρα δεν λειτουργούν. Αυτό θα μπορούσε να είναι σε υγρά απόβλητα (βρώμικα ρευστά), αεριούχα υγρά ή υγρά με κάποια μικρή ή μεγάλη ποσότητα σε αιωρούμενα στερεά.

Τα πλεονεκτήματα μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Εμποδίζει την ροή λιγότερο
- Μπορεί να εγκατασταθεί έξω από τις σωληνώσεις
- Η πτώση πίεσης είναι ίση με το ισοδύναμο μήκος ενός ευθύγραμμου σωλήνα
- Χαμηλή ροή αποκοπής
- Δεν υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης
- Ακρίβεια περίπου 1% του ρυθμού ροής
- Σχετική χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

Περιορισμοί των μετρητών ροής υπερήχων Doppler

Στα Doppler ροόμετρα η απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού, όπως η ηχητική αγωγιμότητα, η πυκνότητα των σωματιδίων, και το είδος ροής, δηλαδή αν έχουμε στρωτή ή τυρβώδη ροή.

Πιθανή ανομοιομορφία στην κατανομή των σωματιδίων στην διατομή της ροής εντός του σωλήνα μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένο υπολογισμό της μέσης ταχύτητας. Η ακρίβεια του ροόμετρου είναι ευαίσθητη σε μεταβολές της ταχύτητας καθώς και την κατανομή των ακουστικών ανακλαστών (σωματίδια) στο τμήμα μετρήσεων.

Σε αντίθεση με άλλα ακουστικά ροόμετρα, οι μετρητές Doppler επηρεάζονται από αλλαγές στην ταχύτητα του ήχου του υγρού. Ως αποτέλεσμα, ο μετρητής να είναι επίσης ευαίσθητος σε αλλαγές στην πυκνότητα και τη θερμοκρασία. Τα προβλήματα αυτά καθιστούν ακατάλληλα Doppler ροόμετρα για υψηλής ακρίβειας μετρήσεις.

Κεφάλαιο 6

Με την πρόοδο της τεχνολογίας τα ηλεκτρονικά συστήματα συλλογής μετρητικών δεδομένων γίνονται ολοένα μικρότερα σε όγκο, λιγότερο απαιτητικά σε παροχή ισχύος και πιο γρήγορα στην λειτουργία τους. Οι αισθητήρες υπερήχων που χρησιμοποιήθηκαν στην περιγραφή των εφαρμογών της παρούσης εργασίας έχουν μικρό μέγεθος, εύκολη εγκατάσταση και χαμηλό κόστος αγοράς. Στο κεφάλαιο αυτό θα συζητήσουμε για την αξία των υπερήχων ως μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου, τα πλεονεκτήματα από τη χρήση αυτών αλλά και του περιορισμούς που υπάρχουν.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων είναι η μεγάλη *ευαισθησία* τους καθώς και η καλή *απόδοση* μετατροπής ενέργειας που οφείλεται στην φύση και τα χαρακτηριστικά του υλικού και όχι σε τεχνικές βασιζόμενες σε εκλεπτυσμένες ηλεκτρονικές διατάξεις. Παράλληλα, το χαμηλό *κόστος* ,που είναι πάντα ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, ολοκληρώνει τα πλεονεκτήματα χρήσης πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Από την άλλη μεριά, το μόνο μειονέκτημα που εμφανίζουν οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες, που περιορίζει την ακρίβεια του, είναι η επαφή με το δείγμα και η απαραίτητη χρήση *υλικών σύζευξης* κυρίως για τις εφαρμογές αμέσου επαφής.

6.1 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι: γενικές αρχές, έννοιες & εφαρμογές

Ο γενικός όρος Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι (ΜΚΕ) χρησιμοποιείτε για να προσδιορίσει όλες εκείνες τις μεθόδους επιθεώρησης που επιτρέπουν την αξιολόγηση των συγκολλήσεων και των σχετικών υλικών, χωρίς αυτές να καταστρέφονται. Τα βασικά στοιχεία τα οποία είναι κοινά σε όλες τις μεθόδους ΜΚΕ περιλαμβάνουν :

- Μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας
- Ένα δείγμα ελέγχου το οποίο, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη πηγή ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί θα δείξει τις πιθανές ασυνέχειες που υπάρχουν.
- Έναν ανιχνευτή (δηλαδή μια συσκευή) ικανό να μετρήσει τις διαφορές που θα εμφανιστούν από την πηγή της ενέργειας ή την κατανομή αυτής εντός του προς εξέταση δείγματος.

- Μια τεχνική με την βοήθεια της οποίας θα γίνεται καταγραφή και θα αναδεικνύονται οι πληροφορίες που λήφθηκαν από τον ανιχνευτή. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που πάρθηκαν.

Οι πιο συχνές μέθοδοι ΜΚΕ που συναντούνται σήμερα στην βιομηχανία είναι οι ακόλουθες :

- Οπτική επιθεώρηση
- Ραδιογραφία (ακτίνες Χ, ακτίνες γ, δέσμη νετρονίων)
- Υπέρηχοι
- Μέθοδος μαγνητικών σωματιδίων
- Μέθοδος διεισδυτικών υγρών
- Μέθοδος ρεύματος αυτεπαγωγής
- Μέθοδος Ακουστικών εκπομπών
- Προσδιορισμός φερρίτη

Οι ΜΚΕ δεν δημιουργήθηκαν με σκοπό να αντικαταστήσουν τις Καταστροφικές Μεθόδους Ελέγχου. Αρκετές φορές οι Καταστροφικοί Έλεγχοι χρησιμοποιούνται σαν συμπλήρωμα των ΜΚΕ και κάθε μέθοδος ελέγχου μπορεί να συμπληρώσει κάποια άλλη. Εξάλλου δεν είναι ασύνηθες τα κριτήρια αποδοχής ή απόρριψης για μια μέθοδο ΜΚΕ να αναπτύχθηκαν από έρευνες που σχετίζονται με τα αποτελέσματα Καταστροφικών Ελέγχων.

Κάθε μέθοδος ΜΚΕ έχει διαφορετικό βαθμό ακριβείας που όμως ποτέ δεν φτάνει την απόλυτη ακρίβεια ενός Καταστροφικού Ελέγχου. Όμως, οι ΜΚΕ είναι πολύ οικονομικότερες από τον καταστροφικό έλεγχο καθώς αφήνουν την κατασκευή άθικτη και διαθέσιμη για περαιτέρω έλεγχο ή λειτουργία. Καταστροφικοί και Μη έλεγχοι εφαρμόζονται σε συνδυασμό κατά τον έλεγχο της αξιοπιστίας μιας μεθόδου, οπότε τυχαία δείγματα ή δοκίμια ελέγχονται πρώτα με ΜΚΕ και στη συνέχεια με ΚΕ ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους και να οριστεί ή να ρυθμιστεί καλύτερα η ακρίβεια της μεθόδου.

Πολλές κατασκευές, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρειάζονται περιοδικούς Μη-Καταστροφικούς Ελέγχους ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν θα

γίνονταν αντιληπτές με τις απλές καθημερινές μεθόδους. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι:

- ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών
- οι υπόγειες σωληνώσεις
- οι κατασκευές από σκυρόδεμα και στον οπλισμό τους
- τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων
- τα συρματόσχοινα γεφυρών

Οι εφαρμογές των ΜΚΕ, σήμερα, καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού:

- στην αυτοκινητοβιομηχανία (μηχανή, πλαίσιο)
- στην αεροδιαστημική (Πλάισια αεροπλάνων & διαστημοπλοίων, πύραυλοι, κινητήρες)
- στις κατασκευές (κτίρια, γέφυρες)
- στη βιομηχανία (μηχανικά εξαρτήματα, καλούπια, πρέσες)
- σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ρεύματος, ορυχεία (πιεστικά δοχεία, δεξαμενές, λέβητες, εναλλάκτες, τουρμπίνες, σωληνώσεις, συγκολλήσεις)
- στο σιδηρόδρομο (σιδηροτροχιές, τροχοί και άξονες)
- σε αγωγούς αερίου και πετρελαιοαγωγούς
- στα πάρκα αναψυχής (παιχνίδια και τραίνα μεγάλης ταχύτητας)
- στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, ακτινογραφίες, καρδιογραφήματα, εγκεφαλογραφήματα, κλπ.)

6.2 Η χρήση των υπερήχων στους ΜΚΕ

Στους υπερήχους εξ' αιτίας της υψηλής τους συχνότητας, μπορεί να επιτευχθεί εύκολα μεγάλη κατευθυντικότητα και έτσι μεγάλη συγκέντρωση ισχύος. Το 99% των εφαρμογών υπερήχων στηρίζονται σε αυτή την κατευθυντικότητα και στις περισσότερες περιπτώσεις αρκεί η μέτρηση της καθυστέρησης και της παραμόρφωσης ενός κύματος υπερήχων για να δώσει πολλές πληροφορίες για την διαδρομή την οποία διένυσε.

Πρόκειται ίσως για την δημοφιλέστερη μέθοδο Μη-καταστροφικού ελέγχου υλικών, που βασίζεται στους νόμους της διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων. Και αυτό διότι πρόκειται για μέθοδο που είναι απλή, εύκολα εφαρμόσιμη με την χρήση φορητών και λιγότερο ακριβών συσκευών ελέγχου, ενώ είναι απόλυτα ασφαλής και ακίνδυνη για τον άνθρωπο.

Τα κύματα που χρησιμοποιούνται για έναν υπερηχητικό έλεγχο είναι ηχητικά κύματα, συχνότητας συνήθως μεγαλύτερης από 500 KHz. Αυτά διοχετεύονται στο εσωτερικό του εξεταζόμενου υλικού και με την επεξεργασία του σήματος εξόδου μπορούμε να καταλήξουμε σε χρήσιμα συμπεράσματα. Σήμερα, η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ορισμένων από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (μέτρο ελαστικότητας E, λόγος του Poisson ν , μέτρο διάτμησης G, αντοχή σ , κ.ά.), χωρίς να απαιτείται η κατασκευή και η θραύση ειδικών δοκιμών, ενώ ακόμα μετράται με ικανοποιητική ακρίβεια το πάχος των κατασκευών. Η τελευταία εφαρμογή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μέτρηση πάχους κατασκευών μεγάλων διαστάσεων, όπως σε πλοία, σωλήνες, κλπ. Χρησιμοποιείται, ακόμη, για τον έλεγχο και τον προσδιορισμό της ποιότητας των συγκολλήσεων και επιπλέον αποτελεί μια μη συμβατική μέθοδο κατεργασίας, αφαίρεσης και κοπής μετάλλων.

Η μέθοδος προϋποθέτει την ύπαρξη μιας τουλάχιστον προσβάσιμης επιφάνειας του ελεγχόμενου υλικού. Οι επιφάνειες που ελέγχονται με υπερήχους, πρέπει να είναι απαλλαγμένες από ακαθαρσίες, σκουριές κλπ. Ανάμεσα στην επιφάνεια ελέγχου και την κεφαλή υπερήχων τοποθετείται ειδικό υγρό που επιτρέπει την διείσδυση των υπερηχητικών κυμάτων στο υλικό, καθώς εξαφανίζει το ενδιάμεσο στρώμα αέρα που θα ήταν εμπόδιο για την διέλευση του υπερήχου.

Οι διατάξεις μετρήσεων με υπερήχους, οι οποίες φυσικά ανήκουν στις μη-καταστρεπτικές μεθόδους μετρήσεων, έχουν πολλές εφαρμογές, όπως:

- Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας εγκαταστάσεων & κατασκευών

- Έλεγχοι πιεστικών δοχείων, σφαιρικών ή κυλινδρικών δεξαμενών
- Έλεγχοι πυθμένα δεξαμενών
- Αξιολογήσεις γήρανσης σε αεροσκάφη
- Έλεγχοι διαρροών σε υπέργειες & υπόγειες σωληνώσεις (αερίου, ατμού υψηλής πίεσης)
- Δοκιμές μερικής αποφόρτισης μετασχηματιστών
- Έλεγχοι σε προηγμένα υλικά, κεραμικά & σύνθετα
- Εντοπισμός διάβρωσης
- Ποιοτικοί έλεγχοι παραγωγικής διαδικασίας

Τα πλεονεκτήματα των μετρήσεων με υπερήχους είναι πολλά. Κυριότερα απ' αυτά είναι:

- Ταχύτητα μέτρησης με άμεσα αποτελέσματα
- Μεγάλη ακρίβεια μέτρησης
- Το υπό εξέταση αντικείμενο μπορεί να βρίσκεται σε λειτουργία
- Δεν απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία της επιφάνειας
- Δυνατότητα μέτρησης χωρίς την απομάκρυνση της βαφής
- Μετρήσεις σε δυσπρόσιτες περιοχές με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων
- Μετρήσεις σε διαβρωμένες επιφάνειες χωρίς την ανάγκη τροχίσματος της Επιφάνειας (με χρήση κατάλληλων αισθητήρων τύπου «ακίδας»)
- Μετρήσεις υπό συνθήκες μεγάλων θερμοκρασιών
- Μειωμένο κόστος

Στον παρακάτω πίνακα που αναφέρει επιγραμματικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε είδους αισθητήρα που χρησιμοποιείται σε μετρητικές διατάξεις.

Είδος αισθητήρων	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μηχανικοί	Γρήγορη απόκριση	Περιορισμοί κίνησης
Βαρομετρικοί/Αδρανειακοί	Υψηλή ακρίβεια Γρήγορη απόκριση	Ολίσθηση Αδυναμία συνεχούς χρήσης

Μαγνητικοί	Γρήγορη απόκριση Υψηλή ακρίβεια	Χαμηλή εμβέλεια Επηρεάζεται από μέταλλα Υψηλό κόστος
Ραδιοκύματα	Γρήγορη απόκριση Υψηλή ακρίβεια	Υψηλό κόστος Φράσσεται από μάζες
Οπτικοί	Μεγάλη εμβέλεια Μεγάλη ευχρηστία	Υψηλό κόστος
Ακουστικοί	Υψηλή ακρίβεια Γρήγορη απόκριση Χαμηλό κόστος	Φράσσεται από μάζες Σφάλματα από ανακλάσεις

6.3 Υλικό Σύζευξης (COUPLANT).

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η διάδοση του υπερήχου από τον μετατροπέα στο εξεταζόμενο δοκίμιο, πρέπει να παρεμβληθεί ένα υλικό σύζευξης (couplant) για τους εξής λόγους:

1. Ο κυριότερος λόγος είναι η απομάκρυνση του *αέρα* (ακόμα και σε μορφή μικρών φυσαλίδων), ο οποίος έχει χαμηλή ακουστική αντίσταση.
2. Το υλικό σύζευξης πρέπει να “γεμίζει” όλες τις επιφανειακές ανωμαλίες ή τραχύτητες και έτσι να επιτρέπει το ομαλό “γλίστρημα” της κεφαλής πάνω στο δοκίμιο, όταν χρησιμοποιούμε μετατροπείς επαφής, και επιπλέον να μην προκαλείται γρήγορα *φθορά* στην κεφαλή.

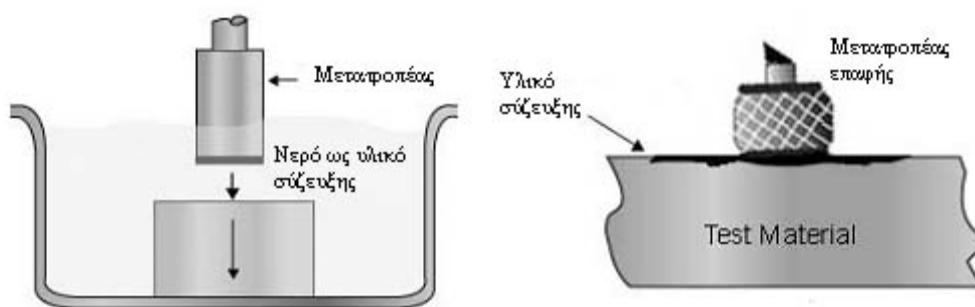
Οι κυριότερες ιδιότητες ενός καλού υλικού σύζευξης είναι οι εξής :

- Ακουστική αντίσταση ενδιάμεση εκείνης της κεφαλής και του δοκιμίου (και μάλλον πιο κοντά προς το δοκίμιο).
- Εύκολη εφαρμογή του πάνω στο δοκίμιο, χωρίς να φεύγει (ή να “τρέχει”) πολύ εύκολα, αλλά επιπλέον να είναι σχετικά εύκολη η απομάκρυνση του.
- Να μην είναι διαβρωτικό.
- Να μην είναι τοξικό ή επικίνδυνο για την υγεία γενικά.

- Να διαβρέχει καλά όλες τις επιφάνειες (του δοκιμίου και της κεφαλής) και να μην επιτρέπει την δημιουργία ακόμα και πολύ μικρών φυσαλίδων.

Στην μέθοδο με βύθιση (immersion method) χρησιμοποιείται **νερό** σαν μέσο σύζευξης, (ενδεχόμενα με διαβρεχτικό παράγοντα και αντιδιαβρωτικό)

Στην μέθοδο με επαφή χρησιμοποιείται λάδι, λίπος, γλυκερίνη, νερό μαζί με διαβρεχτικό παράγοντα. Χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά στην επιλογή των οποίων μεγάλο ρόλο παίζει η κατάσταση της επιφάνειας του δοκιμίου. Όσο πιο ανώμαλη ή τραχιά είναι η επιφάνεια του δοκιμίου, τόσο πιο παχύρρευστο (ή μεγαλύτερου ιξώδους) πρέπει να είναι το υλικό σύζευξης. Υλικό σύζευξης μπορεί να υπάρχει και σε μορφή γέλης (gel) ή πάστας, για πολύ τραχιές επιφάνειες ή ακόμα και λεπτό φύλλο ελαστικού.



Σχήμα 6.1 Απεικόνιση χρήσης υλικού σύζευξης για την μέθοδο με επαφή στα αριστερά και για την μέθοδο βύθισης στα δεξιά.

Οποιοδήποτε και αν είναι το υλικό σύζευξης κατά την μέθοδο με επαφή, το στρώμα του υλικού σύζευξης πρέπει να είναι λεπτό και ομοιόμορφου πάχους, για να αποφεύγεται απώλεια ηχητικής ενέργεια ή παραμόρφωση του σήματος και δημιουργία “μη σχετικών” ενδείξεων.

6.4 Πλεονεκτήματα πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων

Παρακάτω θα παραθέσουμε κάποια από τα πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων

- Είναι φθηνοί σε σύγκριση με άλλου είδους αισθητήρες
- Δεν περιέχουν πηνία οπότε δεν υπάρχει ηλεκτρική επαγωγή που πρέπει να υπερνικηθεί με την εισαγωγή ρεύματος μεγαλύτερης έντασης. Έτσι

είναι εύκολο να περάσουμε ηλεκτρική ενέργεια υψηλής συχνότητας, αφού ούτως ή άλλως οι εφαρμογές για τις οποίες χρησιμοποιούνται είναι σχετικά χαμηλής ισχύος.

- Είναι μικροί στο μέγεθος αλλά αρκετά ισχυροί σαν πομποί ή δέκτες. Για τα χαρακτηριστικά τα οποία ζητάμε, αν κάναμε χρήση άλλου είδους μετατροπέα, θα αναγκαζόμασταν να χρησιμοποιήσουμε πιο ογκώδης λύσεις.
- Είναι ανθεκτικοί σε υπερφορτώσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να καταστρέψουν μετατροπείς άλλου είδους.
- Η μέθοδος των υπερήχων δεν επηρεάζει τις ιδιότητες των υλικών και είναι απολύτως ακίνδυνη για την υγεία του ανθρώπου.

6.5 Ακρίβεια των μετρήσεων και περιορισμοί.

Η ακρίβεια των συστημάτων με υπερήχους κυμαίνεται γύρω στο 1% της τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Η ακρίβεια του συστήματος επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες:

1. Στις περισσότερες εφαρμογές των συστημάτων υπερήχων η συνολική απόδοση αυτών εξαρτάται κατά πολύ από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των αισθητήρων, κυρίως από τη συχνотική απόκριση, το εύρος ζώνης και την ευαισθησία τους. Η ακουστική απόκριση τέτοιων διατάξεων εξαρτάται δραστικά από τα χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων οδήγησης, τα οποία παρέχουν την ηλεκτρική σύνδεση του αισθητήρα προς το ηλεκτρονικό σύστημα. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία εισόδου ή εξόδου του συστήματος επιδρούν πάνω στο πλάτος και τη μορφή των λαμβανομένων ή εκπεμπόμενων αντίστοιχα παλμών, οδηγώντας μας κατ' αυτόν τον τρόπο σε μία κατάσταση όπου για κάθε εφαρμογή θα πρέπει να γίνεται διαφορετική προσέγγιση και ανάλυση που έχει σαν αποτέλεσμα την ανάγκη σχεδίασης κατάλληλων κυκλωμάτων οδήγησης για κάθε περίπτωση
2. Η αβεβαιότητα σε μία μέτρηση εξαρτάται από το εύρος του παλμού αποστολής. Ο παλμός αποστολής κατά τη διάδοσή του μπορεί να παραμορφωθεί πολύ μέχρι να επιστρέψει στο σύστημα.
3. Τη χρήση ξεχωριστών αισθητήρων για αποστολή και λήψη υπερήχων έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ακρίβειας στις μετρήσεις πολύ μικρών αποστάσεων 30-40cm λόγω της τριγωνομετρίας.

4. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες λόγω μεγάλου λοβού εκπομπής και λήψης υπερήχων, έχουν ως αποτέλεσμα το σύστημα να λαμβάνει ηχώ από διάφορα αντικείμενα στο περιβάλλον τα οποία όμως δεν είναι στόχοι.
5. Η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να επηρεάσει σε κάποιες περιπτώσεις την ακρίβεια των μετρήσεων αφού αλλάζει την ταχύτητα του ήχου (φαινόμενα διάθλασης).
6. Οι απώλειες ισχύος της ηχητικής δέσμης είτε λόγω ανακλάσεων είτε λόγω απορρόφησης.

Βιβλιογραφία

1. John G, *“The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook”*, Webster
2. Φυσική: *“Εισαγωγή στη Μηχανική.”*, Θ. Καρακώστας & Δ.Σ. Κυριάκος, (1998) Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη.
3. Δημήτρης Σκαρλάτος, *“Εφαρμοσμένη Ακουστική”*, Πανεπιστήμιο Πατρών
4. Ν.Κ. Ουζούνογλου, *“Συστήματα Ραντάρ”*
5. *“Ultrasonic location of a moving target”*, Holzeder Andreas.
6. *“Ultrasonic measurment methods”*, Nthurston A. Pierce.
7. *“Ultrasonic measurments and technologies”*, Figura Stefan kocisizdenko.
8. *“Ultrasonic positioning system”*, Sabir Shrestha Samuel Kusi, Deep Shrestha.
9. *“Triangulation based Fusion of Ultrasonic Sensor Data”*, O. Wijk, P. Jensfelt, H.I Christensen, S Automatic ControlKungliga Tekniska Hogskolan.
10. *“A Computational Geometry Method for DTOA Triangulation”*, Xiaochun Xu, Computer and Information Science and Engineering Department University of Florida.
11. *“Αισθητήρες κίνησης και μετατόπισης”*, Τριτσώνης Αντώνιος, πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, τμήμα ηλεκτρονικής.
12. *“Μελέτη και κατασκευή συσκευής υπερήχων για μέτρηση ελαστικών ιδιοτήτων αμόρφων μετάλλων και ημιαγωγών συναρτήσει της θερμοκρασίας από $-200^{\circ}C$ έως $+200^{\circ}C$.”*, Κωβαίος Γιάννης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Γενικό τμήμα, Πάτρα 2003.
13. William D. Callister, *“Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών”*, Εκδόσεις Τζίολα, 2004.
14. Μ.Κ. Κωτούζας, *“Υπέρηχοι”*, Κέντρο Τεχνολογίας και Ποιοτικού Ελέγχου, Βόλος 2000.
15. *“Textbook of diagnostic ultrasonography”*, Hagen-Ansert SL, Mosby, St. Louis, 1983.

16. *“Diagnostic ultrasound : principles, instrumentation, and exercises”*, Kremkau FW , Grune & Stratton, Orlando, 1984, p. 5
17. Χρ. Σπανός, Μ. Σπιθάκης, Κ. Τρεζός, *“Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών”*. Πρακτικά – διδακτικά εγχειρίδια.
18. ΤΕΕ, *“Αντισεισμική θωράκιση υφιστάμενων κατασκευών”*, ομάδα εργασίας Π-3
19. *“Τεχνικά υλικά”* τόμοι 1 - 3, Αμ. Γ. Κορωνάιος καθηγητής Ε.Μ.Π., Γ. Ι. Πουλάκος αν. καθηγητής Ε.Μ.Π.
20. Μ. Alonso, Ε Finn, *“Θεμελιώδης Πανεπιστημιακή Φυσική”* Τόμος ΙΙ (Απόδοση στα Ελληνικά της σειράς University Physics, Fields and Waves).
21. *“Σημειώσεις Εργαστηρίου Κυμάτων & Οπτικής”*, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων – Τμήμα Φυσικής, 2012
22. *“Σημειώσεις για το μάθημα τεχνολογία μετρήσεων”*, Χατζηευφραιμίδης Αντώνης, ΤΕΙ Χαλκίδας Τμήμα Ηλεκτρολογίας
23. *“Φυσική”*, D. Halliday & R. Resnick, *Τόμοι Α & Β* (1976).
24. *“Μαθήματα Οπτικής”*, Γ. Ασημέλλης, Σύγχρονη Γνώση (2008).
25. *“Optics”*, E. Hecht, Addison-Wesley, MA, Second Edition (1987).
26. *“Εργαστηριακά Πειράματα Φυσικής 3”*, Α Χριστοδουλλίδης, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (2005).
27. *“Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρισμού & Μαγνητισμού”*, Κ. Γ. Ιωαννίδης, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο (2001).
28. *“Acoustics & Fluids”*, A. M. Portis & H. D Young, McGraw-Hill Co., New York (1971).
29. *“Τεχνολογία Αισθητήρων και Μικροσυστημάτων”* Ιωάννης Αβαριτσιώτης (2003), Σημειώσεις Μαθήματος, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005
30. Χρυσουλάκης Γιάννης Δ., *“Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών”*, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996.
31. *“The measurement instrumentation and sensors handbook”*, Beeser John G.

32. *"The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook"*, John G Webster.
33. *"Ultrasonic Localization Methods for Accurate Positioning"*, A.R. Jimenez F. Seco.
34. *"Ultrasonic location of a moving target"*, Holzeder Andreas.
35. *"Ultrasonic measurment methods"*, Nthurston A. Pierce.
36. *"Ultrasonic measurments and technologies"*, Figura Stefan kocisizdenko.
37. A. Korotkov, A. Sutin, 1994, *"Modulation of ultrasound by vibrations in metal constructions with cracks"*
38. D.M Donskoy, A. Sutin, 1998, *"Vibro-acoustic modulation nondestructive evaluation technique"*
39. A. Ekimov, I. Didenkulov, V. Kazakov, 1999, *"Modulation of torsional waves in a rod with a crack"*
40. P.A Johnson, 1999, *"NonDestructive testing of materials by nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS)"*
41. *"Piezoelectric Ceramic Sensors (PIEZOTITE)"*, Murata Manufacturing Co., Ltd.
42. *"Air Transmission Ultrasonic Sensor"* NIPPON CERAMIC Co., Ltd.
43. Kyung-Young Jhang, 2009, *"Nonlinear Ultrasonic Techniques for Nondestructive Assessment of Micro Damage in Material: A Review"*
44. Ζαχαρίας Κ., *"Μη γραμμικές ακουστικές τεχνικές διάγνωσης: Θεωρία και εφαρμογές"* (2010)
45. K. Zacharias, E. Douka, L. J. Hadjileontiadis, A. Trochidis, 2008, *"Non-linear vibration technique for crack detection in beam structures using frequency mixing"*
46. *"Εισαγωγή στις μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου"* , Θεόδωρος Τσαγκάρης, Τεχνικό γραφείο Βρεσκοσις.
47. *"Μη καταστροφικοί έλεγχοι υλικών – Η μέθοδος των υπερήχων"*, Ιωάννης Πρασιανάκης , Καθηγητής Ε.Μ.Π."

Διαδίκτυο:

- Δ1. www.faqs.org/faqs/physics-faq/acoustics/
- Δ2. <http://www.texnikanea.gr/>
- Δ3. <http://www.wikipedia.org/>
- Δ4. <http://www.tm.teiher.gr/portal/DesktopDefault.aspx>
- Δ5. www.ndt-ed.com
- Δ6. www.ob-ultrasound.net
- Δ7. www.industrial-needs.com
- Δ8. www.c-science.com
- Δ9. www.ase.uc.edu