

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΠΕΤΑΝΑΚΗΣ

ΑΜ: 3141

**ΧΑΝΙΑ ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 17/10/2008**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΝΤΩΝΙΔΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίαση και η κατασκευή ενός συστήματος μέτρησης απόστασης με χρήση υπερήχων. Το σύστημα μετρά με μεγάλη ακρίβεια το χρόνο πτήσης ενός παλμού υπερήχων από την στιγμή της εκπομπής μέχρι την στιγμή της λήψης της του ήχου μετά από ανάκλαση στο αντικείμενο μέτρησης.

Η εργασία έχει χωριστεί σε τέσσερα κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή και η περιγραφή του προβλήματος

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στη θεωρία υπέρηχων.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στη σχεδίαση κατασκευή και ανάλυση του κυκλώματος

Στο τέταρτο επίλογος συμπεράσματα και τρόποι βελτίωσης του κυκλώματος.

Λέξεις Κλειδιά

Μετρητής Απόστασης, Υπέρηχοι, Υπερηχητικοί Αισθητήρες, Ταχύτητα του Ήχου, Σύστημα Χρόνου Πτήσης (Time of Flight),

Ευχαριστίες.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με πίστεψαν και σε όσους με βοήθησαν στις δυσκολίες που συνάντησα.

Abstract

This thesis' purpose was the design and construction of an ultrasound distance measurement system. The system measures precisely the time that is elapsed between the moment an ultrasound pulse is emitted and the moment that the reflection of this pulse from an object returns to the device.

This work is divided into four chapters:

Chapter 1 contains an introduction and description of the problem.

Chapter 2 refers to the ultrasounds theory

Chapter 3 describes to the design, the construction and analysis of the circuit.

Chapter 4 draws conclusions and also suggests improvements to the circuit.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1 Ακριβώς ένα μέτρο**
- 1.2 Δυσκολίες στη μέτρηση**
- 1.3 Μέτρηση απόστασης**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΥΠΕΡΗΧΟΙ

- 2.1 Γενικά**
- 2.2 Διάδοση ήχων και υπέρηχων**
- 2.3 Φυσικές ιδιότητες ήχων και υπέρηχων**
- 2.4 ΑΝΑΚΛΑΣΗ- ΔΙΑΔΟΣΗ – ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΚΑΙ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ**
 - 2.4.1 Ορισμοί**
 - 2.4.2 Ένταση του ήχου**
 - 2.5 Δημιουργία και λήψη των υπέρηχων- μετατροπείς**
 - 2.5.1 Είδη υπερηχητικών μετατροπέων**
 - 2.5.2 Πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς**
 - 2.5.3 Κατασκευή Πιεζοηλεκτρικού Μετατροπέα**
 - 2.5.4 Διέγερση του μετατροπέα και χαρακτηριστικά της δέσμης**
 - 2.5.5 Υπολογισμός συντελεστών ανάκλασης και διάδοσης Κάθετη πρόσπτωση**
 - 2.5.6 Απορρόφηση από υλικά**
 - 2.6 Εξασθένηση υπέρηχων λόγω απορρόφησης από το εύρος δέσμης και μετεωρολογικών φαινομένων**
 - 2.6.1 Εξασθένηση υπέρηχων λόγω εύρους δέσμης**

2.6.2 Εξασθένηση υπερήχων λόγω μετεωρολογικών φαινομένων

2.7 ΕΚΠΟΜΠΗ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

2.8 Όρια Απόδοσης των Συστημάτων Μέτρησης Απόστασης.

2.8.1 Ακρίβεια Απόστασης

2.8.2 Μέγιστη Απόσταση Μέτρησης

2.8.3 Χρόνος Λήψης Μετρήσεων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

3.1 Γενικά

3.2 .1 ΤΑΛΑΝΤΩΤΗΣ

3.2.2 ΠΟΜΠΟΣ

3.2.3 ΔΕΚΤΗΣ

3.2.4 ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

4.1 ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Σχηματικό του πομπού, δέκτη υπέρηχων και απεικόνιση απόστασης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Data sheets ολοκληρωμένων

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Data sheets υπόλοιπων εξαρτημάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ακριβώς ένα μέτρο

Το μέτρο γεννήθηκε γύρω στο 1792. Τότε αποφασίστηκε να οριστεί αυτό το πρότυπο ως το ένα δεκάκις χιλιοστό του τετάρτου της περιφέρειας της γης. Η πρόταση θεωρητικά ήταν σωστή μα πρακτικά ανακριβής, διότι το μήκος της γήινης περιφέρειας δεν ήταν σταθερό.

Ένα άλλο πρότυπο προτάθηκε το 1799 αλλά γρήγορα ξεχάστηκε, τουλάχιστον από τα βιβλία της ιστορίας

Το επόμενο πρότυπο εμφανίστηκε κάπου 90 χρόνια αργότερα το 1899. ήταν κατασκευασμένο από μίγμα λευκόχρυσου και ιριδίου και εκτίθεται ακόμα στο μουσείο μέτρων και σταθμών των Σέρβων κοντά στο Παρίσι. Κατά τις διαδόσεις το πρότυπο αυτό ήταν βασισμένο στο ανάστημα του Ναπολέοντα Β΄ και καθώς η αίγλη του έπεφτε με της συνεχείς ήττες, το πρότυπο δεν μπορούσε να γίνει αποδεκτό. Έτσι λοιπόν όλος ο κόσμος συνέχισε να ψάχνει για ένα ακριβέστερο πρότυπο. Όπως βέβαια ξέρετε οι Άγγλοι χρειάστηκαν κάπου 300 χρόνια για να συνειδητοποιήσουν ότι μπορούν να υπάρχουν και άλλες μονάδες μέτρησης.

Στης αρχές του 20^{ου} αιώνα οι επιστήμονες άρχισαν να μελετούν τη δυνατότητα χρησιμοποιήσεις του μήκους κύματος του Φώτος για τον ορισμό του μέτρου. Συνακόλουθα, η λυχνία καδμίου έγινε το διεθνές πρότυπο για τη φασματοσκοπία το 1927. για τους μη ειδικούς θα πούμε ότι το αντικείμενο της φασματοσκοπίας είναι η μελέτη, μέτρηση και ανάλυση ακτινών ,φως και άλλων φαινομένων με οπτικά μέσα. Σαν μονάδα μήκους ελήφθη το Ανγκστρεμ ($1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$). Παρ' όλα αυτά και τούτος ο ορισμός του μέτρου ήταν ανεπαρκής για ορισμένες εφαρμογές αν και χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα σαν δευτερεύων ορισμός.

Ο σύγχρονος ορισμός του μέτρου καθιερώθηκε το 1960 με τη χρησιμοποίηση του μήκους κύματος λαμπάς αερίου Κρυπτού. Το μέτρο ορίστηκε ως 1650763.73 μήκη κύματος ακτινοβολίας μετρημένης σε συνθήκες κενού, που παράγεται από το ισότοπο Κρυπτόν 86 KV κατά τη μετάβαση ηλεκτρονίων από τη στοιβάδα $2p_{10}$ στην $5p_5$ (αποδιεγερση). Ο συντελεστής

πολλαπλασιασμού παρέμεινε γιατί οι επιστήμονες ήθελαν να συσχετίσουν τη νέα μονάδα προς την παλιά.

Ήδη όμως κυοφορείτε νέος τρόπος ορισμού της πρότυπης μονάδας με χρήση λείζερ αερίου (He-Ne) και έτσι σύντομα θα έχουμε ένα περισσότερο πολύπλοκο αποτέλεσμα. Είναι γεγονός πως στην εποχή μας χρειάζονται όλο και περισσότερο ακριβέστερα πρότυπα.

1.2 Δυσκολίες στη μέτρηση

Υπάρχουν σημεία όπου ο άνθρωπος δεν μπορεί να μέτρηση είτε για τη δεν μπορεί να έχει πρόσβαση είτε χρειάζεται μια συνεχή ένδειξη. Παράδειγμα η στάθμευση ενός αυτοκίνητου με ένα μετρητή απόστασης θα ήταν αρκετά ευκολότερη λόγω τις συνεχής ένδειξης της απόστασης από τα εμπόδια. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η μέτρηση ύψους μιας αίθουσας όπου είναι δύσκολο να φτάσει ο άνθρωπος χρειάζεται κάποιο να τον βοηθήσει και περισσότερο χρόνο (σκάλα).

Αυτοί οι λόγοι μας οδήγησαν στην δημιουργία μετρητών απόστασης για την κάλυψη διαφόρων αναγκών, κατά συνέπεια διευκόλυνση της καθημερινότητας μας και όχι μόνο.

1.3 Μέτρηση απόστασης

Υπάρχουν κύριος 3 κατηγορίες μέτρησης απόστασης

- α με μηχανικά μέσα
- β με οπτικά μέσα
- γ με ηλεκτρονικά μέσα

Η πρώτη κατηγορία αναφέρετε στον απλούστερο τρόπο μέτρησης γίνεται μέσω μιας βαθμολογημένης μηχανικής συσκευής (π.χ. χάρακας) δεν χρειάζεται κάποια ανάλυση.

Οπτικώς οι αποστάσεις μετρούνται με τη βοήθεια της τριγωνομετρίας

Τέλος η κατηγορία μετρήσεων με ηλεκτρονικούς τρόπους στην οποία ανήκει και η κατασκευή μας . σχεδόν όλες οι μέθοδοι βασίζονται σε κάποια μορφή ακτινοβολίας όπως τα ραδιοκύματα, το φως, ο ήχος ή η υπέρυθρη ακτινοβολία. Έχοντας δεδομένες τις ταχύτητες διάδοσης αυτόν τον ακτινοβολιών, η μέτρηση αποστάσεων είναι θέμα προορισμού του χρόνου μετάβασης του κύματος από ένα σημείο σε κάποιο άλλο. Η υπέρυθρη ακτινοβολία χρησιμοποιείτε κύρια για μεγάλες αποστάσεις (τάξης χιλιομέτρων)

αφού είναι σχετικά εύκολο να διαμορφωθεί. Για αποστάσεις άνω των 100 χιλιομέτρων χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικές διάταξης των οποίων όμως η αποτελεσματικότητα επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και η ορατότητα.

Στη ουσία οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται για μεγάλες αποστάσεις η κατασκευή μας είναι μέτρηση της τάξης μερικών μέτρων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το 1883 κατασκευάστηκε η πρώτη υπερηχητική σειράνα από τον Francis Galton

ΗΧΟΣ

Ανάλογα με την συχνότητα τους χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:
ΥΠΟΗΧΟΥΣ

Όταν το εύρος στις συχνότητας είναι κάτω από 16Hz όπου δεν είναι αντιληπτές από τον άνθρωπο.

ΗΧΟΙ.

Όταν το εύρος της συχνότητας είναι μεταξύ 16Hz και 20.000 Hz μιλάμε για ήχους που μπορούν να ακουστούν από τον άνθρωπο και λέγονται ακουστικές συχνότητες.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ.

Όταν το εύρος συχνότητας είναι πάνω από 20.000 Hz μιλάμε για υπέρηχους οι οποίοι δεν είναι αντιληπτοί από τον άνθρωπο άλλα σε σκύλους δελφίνια και άλλα ζώα.

Η χρησιμοποίηση των υπερήχων έχει πολλές εφαρμογές όπως ιατρική, τοπογραφία και άλλες πολλές.

Οι εφαρμογές αυτές στηρίζονται στις εξής ιδιότητές τον υπέρηχων:

1. Εκπέμπονται υπό μορφή δέσμης σε αντίθεση με τους ήχους χαμηλής συχνότητας που δεν έχουν την ιδιότητα αυτή.
2. Η υπερηχητική δέσμη υπακούει στους νόμους της ανάκλασης και διάθλασης.

Άρα βάση (του χρόνου πτήσης) χρόνου εκπομπής μέχρι λήψης μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση.

2.2 Διαδοση ήχων και υπέρηχων

Το κύμα διαδίδεται σαν μια διαταραχή των σωματιδίων του μέσου που συντηρεί τη διάδοση του κύματος. Το κύμα αυτό αποτελείται από συνεχή διαδοχή πυκνωμάτων και αραιωμάτων των σωματιδίων (μορίων) του υλικού στο οποίο διαδίδονται (σχήμα1).

Σχήμα 1 Μετατόπιση των σωματιδίων για ένα διαδιδόμενο υπερηχητικό κύμα

Τα σωματίδια του μέσου βρίσκονται αρχικά σε ηρεμία και βρίσκονται τοποθετημένα ομοιόμορφα εάν δεν υφίσταται κυματική διαταραχή. Εξαιτίας της παρουσίας υπερηχητικού κύματος τα σωματίδια θα ταλαντωθούν γύρω από τη μέση θέση τους. Η ταλάντωση πραγματοποιείται κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος, καθιστώντας το ένα διάμηκες κύμα (longitudinal wave). Δεν υφίστανται ουσιαστικά συνολική μετατόπιση των σωματιδίων και μεταφορά μάζας. Το υπερηχητικό κύμα επιδρά ως απλή διαταραχή στο μέσο.

Συγκεκριμένα, 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.

Το σπουδαιότερο μειονέκτημα των υπερήχων είναι η φτωχή διάδοσή τους διαμέσου αεριωδών στρωμάτων. Οι υπέρηχοι είναι αδύνατον να διέλθουν από τέτοια στρώματα όπως ο αέρας γιατί αποτελούνται από συνεχή διαδοχή πυκνωμάτων, αραιωμάτων των σωματιδίων (μορίων) και έτσι όργανα που περιέχουν αέρα δύσκολα εξετάζονται.

2.3 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΗΧΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Οι ήχοι και οι υπέρηχοι παράγονται από τις ταλαντώσεις των ηχογόνων πηγών. Η διάδοσή τους στα διάφορα σώματα γίνεται με διαμήκη κύματα τα

οποία διαδίδονται προς την ίδια κατεύθυνση που εκτελείται η ταλάντωση της ηχογόνου πηγής. Τα σωματίδια αυτά καθαυτά δεν μετακινούνται στο χώρο αλλά απλώς δονούνται προς τα εμπρός και πίσω.

ΚΥΚΛΟΣ. Ο συνδυασμός ενός πυκνώματος και ενός αραιώματος λέγεται κύκλος ηχητικού κύματος.(HERTZ) Είναι διεθνής μονάδα συχνότητας και σημαίνει ένα κύκλο ανά δευτερόλεπτο.

ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ. Μήκος κύματος είναι η απόσταση μεταξύ των αντιστοίχων σημείων δύο διαδοχικών πυκνωμάτων η αραιωμάτων.(σχήμα 1)

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ. Τα ηχητικά κύματα διαδίδονται δια μέσου των διαφόρων υλικών με ορισμένη ταχύτητα.

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ. Ο αριθμός των κύκλων που διέρχεται στη μονάδα του χρόνου αποτελεί την συχνότητα του ηχητικού κύματος.

Έτσι η ταχύτητα (U) ισούται με την συχνότητα (f) επί το μήκος κύματος (λ).

$$U = f \cdot \lambda$$

Από τον τύπο αυτό φαίνεται ότι η συχνότητα βρίσκεται σε αντίστροφη σχέση με το μήκος κύματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος. Η ταχύτητα που τα ηχητικά κύματα διαδίδονται εξαρτάται από την ελαστικότητα και την πυκνότητα του υλικού δια μέσου του οποίου διέρχονται.

Όπως προαναφέρθηκε, οι υπέρηχοι είναι μορφή ενέργειας η οποία συνίσταται από μηχανικές δονήσεις σωματιδίων. Οι δονήσεις αυτές συμβαίνουν στο χώρο αλλά έχουν σχέση και με το χρόνο.

2.4 ΑΝΑΚΛΑΣΗ – ΔΙΑΔΟΣΗ – ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΚΑΙ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

2.4.1 Ορισμοί

Όταν ένα υπερηχητικό κύμα πέσει επάνω 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 2 Ανάκλαση, απορρόφηση και διάδοση του υπερήχου

α) Συντελεστής ανάκλασης a_r

Δίνεται από το λόγο της ανακλώμενης από την επιφάνεια υπερηχητικής ενέργειας (W_r) προς την προσπίπτουσα (W_i) ενέργεια πάνω σε αυτήν:

$$a_r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{I_r}{I_i}$$

β) Συντελεστής διάδοσης τ

Δίνεται από το λόγο της ενέργειας που διαδίδεται από την επιφάνεια διαχωρισμού των δυο μέσων (W_τ), προς την προσπίπτουσα (W_i) ενέργεια πάνω σε αυτήν.

$$\tau = \frac{W_\tau}{W_i} = \frac{I_\tau}{I_i}$$

γ) Συντελεστής απορρόφησης α

Δίνεται από το λόγο της ενέργειας που απορροφάται (W_α) από μια επιφάνεια προς την προσπίπτουσα (W_i) ενέργεια πάνω σε αυτήν.

$$\alpha = \frac{W_\alpha}{W_i} = \frac{I_\alpha}{I_i}$$

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.

2.4.2 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

$$I = \frac{W}{s} = pu$$

Σχήμα 3 Ορισμός έντασης ήχου

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

$$I = \frac{p_{rms}^2(r)}{\rho c}$$

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.

2.5 Δημιουργία και λήψη των υπερήχων- μετατροπείς

Γενικά σαν μετατροπείς καλούμε τις συσκευές αυτές που μετασχηματίζουν μία μορφή ενέργειας σε κάποια άλλη. Ο μετατροπέας (transducer) αποτελεί ίσως το σημαντικότερο συστατικό σε ένα σύστημα υπερήχων. Η λειτουργία του έγκειται στο να μετατρέπει ηλεκτρικά σήματα σε κύματα πίεσης τα οποία διαδίδονται μέσα στο μέσο διάδοσης (δημιουργία υπερήχων) και να παράγει το ηλεκτρικό αντίστοιχο οποιασδήποτε λαμβανόμενης ακουστικής κυματομορφής (λήψη υπερήχων). Ένας καλά σχεδιασμένος μετατροπέας θα κάνει κάτι τέτοιο με υψηλή ακρίβεια και απόδοση μετατροπής, μικρή παραγωγή θορύβου ή άλλα παρενέργειες (artefacts). Επίσης, είναι σημαντικό για τον σχεδιασμό του μετατροπέα, να παρέχεται από τη διάταξη έλεγχος πάνω στην διακριτική ικανότητα (system resolution) και τη χωρική μεταβολή (βήμα, spatial variation) αυτής.

2.5.1 Είδη υπερηχητικών μετατροπέων

Τα είδη υπερηχητικών μετατροπέων 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)
5. Πιεζοηλεκτρικούς

Σχήμα 4 Πιεζοηλεκτρικός (αριστερά) και ηλεκτροστατικός (δεξιά) μετατροπέας

2.5.2 Πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς

Για την κατασκευή του ανιχνευτή μας επιλέξαμε, να χρησιμοποιήσουμε πιεζοηλεκτρικούς transducers. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε τις αρχές της λειτουργίας τους και γιατί προτιμήθηκαν από τα υπόλοιπα είδη. Τέλος, θα αναφερθούμε στα συγκεκριμένα μοντέλα που επιλέξαμε και τα χαρακτηριστικά τους.

Όπως είπαμε παραπάνω, η επιφάνεια του κρυστάλλου παραμορφώνεται όταν στα άκρα του εμφανίζεται τάση. Ας φανταστούμε λοιπόν αυτό το υλικό στερεωμένο σε ένα μεταλλικό κώνο ή ένα μεταλλικό διάφραγμα. Οι μεταβολές του μεγέθους του υλικού θα προκαλούν αλλαγές στην επιφάνεια του μετάλλου, και συγκεκριμένα ταλαντώσεις, οι οποίες μετακινώντας ποσότητες αέρα μεταφέρουν την ταλάντωση στον αέρα και άρα δημιουργούν ήχο.

Ανάλογα λειτουργεί και το μικρόφωνο. Καθώς ο ήχος χτυπά το μεταλλικό διάφραγμα αυτό κινείται ασκώντας πίεση στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου. Η πίεση αυτή προκαλεί μεταβολή όγκου στον κρύσταλλο και άρα προξενεί την εμφάνιση ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του κρυστάλλου, ανάλογη με τον ήχο.

Το συνηθέστερο σχέδιο τέτοιων transducers, περιλαμβάνει ένα κομμάτι από κεραμικό πιεζοηλεκτρικό υλικό, το οποίο είναι πακτωμένο σε έναν μεταλλικό δίσκο. Αυτό το υλικό είναι συνήθως κάποια συνθετική ένωση πχ τιτανίου-βαρίου, τιτανίου-ζirkονίου-μόλυβδου και άλλων. Ανάλογα με την σύνθεση και, κυρίως, με το σχήμα του διαφράγματος επιτυγχάνεται η επιθυμητή λειτουργία για κάθε περίπτωση και συγκεκριμένα η επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας. Έτσι λοιπόν, κάθε τέτοιος πομπός ή δέκτης έχει μια ονομαστική συχνότητα λειτουργίας στην οποία λειτουργεί με ακρίβεια η οποία είναι είτε στο ακουστικό πεδίο (ως 20kHz) , είτε στο πεδίο των υπερήχων (20-60kHz).

Σχήμα 5 Κεραμικοί πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς (πομπός και δέκτης)

Οι υπερηχητικοί μετατροπείς αυτού του είδους χωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Οι transducers ανοικτού τύπου (open type) έχουν το πιεζοηλεκτρικό υλικό ενωμένο με έναν μεταλλικό κώνο πίσω από μια προστατευτική επιφάνεια. Οι ανοικτού τύπου μετατροπείς παρέχουν υψηλή ευαισθησία, σχετικά μεγάλο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας, αντοχή σε υγρασία και θερμοκρασία και μικρό μέγεθος. Αυτοί είναι και οι πλέον συνηθισμένοι μαζί με τους κλειστού τύπου (enclosed type). Σε αυτούς το μεταλλικό διάφραγμα είναι στην εξωτερική επιφάνεια του μικροφώνου/ηχείου, ενώ από την μέσα πλευρά, κολλημένο

πίσω του είναι το πιεζοηλεκτρικό υλικό. Το εσωτερικό είναι τελείως σφραγισμένο με ρητίνη, καθιστώντας δυνατή την χρήση σε συνθήκες με πολλή σκόνη, ακόμη και υποβρυχίως. Με ειδικό σχεδιασμό του κώνου ώστε να μπορεί να δονείται με μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, κατασκευάζονται οι transducers ευρέως πεδίου (wide bandwidth type). Αυτοί μας δίνουν την ευχέρεια να μπορούν να χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που απαιτούν τη χρήση παραπάνω από μιας συχνότητας. Ακόμη υπάρχουν και οι μετατροπείς μετάβασης παλμού (pulse transit type) και ενσωματωμένου ταλαντωτή (built-in oscillator type) που όμως χρησιμεύουν σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές.

Σήμερα οι μετατροπείς αυτού του είδους δεν χρησιμοποιούνται σε τόσο μεγάλο βαθμό όσο στο παρελθόν και γι' αυτό έχουν αρχίσει να γίνονται σχετικά δυσεύρετοι. Παλαιότερα, χρησιμοποιούντο πολύ ευρέως σε τηλεχειριστήρια και συναγερμούς αυτοκινήτων, αλλά έδωσαν την θέση τους στις υπέρυθρες ή τα ραδιοκύματα. Ακόμη πάντως χρησιμοποιούνται κυρίως σαν ηχεία σε φτηνά συστήματα παραγωγής ήχου (υπολογιστές και φορητά ραδιόφωνα), είτε σαν μικρά ηχεία για υψηλές συχνότητες σε στερεοφωνικά συγκροτήματα (tweeters) σαν αισθητήρες σε εφαρμογές ελέγχου στάθμης υγρών ή σαν στοιχεία συστημάτων μετρήσεων κτλ.

Προκειμένου να επιλέξουμε έναν transducer για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, πρέπει να βασιστούμε στις αρχές της μετάδοσης του ήχου. Επειδή ο ήχος είναι ένα φαινόμενο που σχετίζεται με κύματα, η μετάδοση και η κατευθυντικότητα εξαρτώνται από το μήκος κύματος (λ). Λόγω του τρόπου λειτουργίας των μετατροπών, το διάγραμμα παρουσιάζει είτε την ευαισθησία (αν μιλάμε για δέκτη) είτε την ακτινοβολούμενη ισχύ (αν μιλάμε για πομπό)

Για τον κύριο λοβό ισχύει ότι το ήμισυ του ανοίγματος του δίνεται από την σχέση

$$\sin(\alpha/2) \approx \lambda/D = v/Df$$

όπου D είναι η διάμετρος του εύκαμπτου διαφράγματος, α είναι το άνοιγμα του κύριου λοβού, v είναι η ταχύτητα του ήχου (344 m/sec στον αέρα στους 20° C) και f η συχνότητα λειτουργίας του πομπού ή του δέκτη. Η σχέση αυτή ισχύει αν $\lambda < D$. Αν το $\lambda \geq D$, τότε το διάγραμμα ακτινοβολίας τείνει να γίνει σφαιρικό. Έτσι καταλαβαίνουμε ότι για να πετύχουμε υψηλή κατευθυντικότητα και στενό άνοιγμα (field-of-view), πρέπει να επιλέξουμε έναν transducer του οποίου το διάφραγμα θα είναι μεγάλο σε σχέση με το λ .

Για παράδειγμα, σε μια περίπτωση σαν αυτήν που θα χρησιμοποιήσουμε, ένας transducer με διάμετρο διαφράγματος 25mm σε συχνότητα 40 kHz, θα παράγει έναν κύριο λοβό ανοίγματος περίπου 40°. Αυτά είναι εύκολο να υπολογιστούν στην περίπτωση που έχουμε έναν αισθητήρα κλειστού τύπου. Στους αισθητήρες ανοικτού τύπου που δεν έχουμε ένα κυκλικό διάφραγμα αλλά έχουμε κώνο, ο λοβός εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής του κώνου, δηλαδή από το άνοιγμα και την διάμετρο της βάσης του. Οι παραπάνω υπολογισμοί δεν είναι εύκολοι, οπότε και βασιζόμαστε στα datasheets που παρέχει ο κατασκευαστής.

Παρακάτω θα παραθέσουμε κάποια από τα πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών transducers σε σχέση με τα συμβατικά ηχεία ή μικρόφωνα.

- Είναι φθινοί και γι' αυτό προτιμούνται συχνά σαν ηχεία σε συστήματα όπου δεν απαιτείται μεγάλη ποιότητα στον ήχο, όπως τα ηχεία των υπολογιστών, τα φορητά ραδιόφωνα, ακόμα και σαν beeper για ηλεκτρονικά ρολόγια χειρός.
- 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 transducer, θα αναγκαζόμασταν να χρησιμοποιήσουμε ογκωδέστερες λύσεις.
- Είναι ανθεκτικοί σε υπερφορτώσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να καταστρέψουν transducers άλλου είδους, όπως τα πηνία ενός συμβατικού ηχείου.
- Εμφανίζουν χωρητική συμπεριφορά, οπότε δεν είναι αναγκαία η χρήση ενός εξωτερικού κυκλώματος cross-over. Για να λειτουργήσουν πχ σαν tweeters, αρκεί να τοποθετηθούν παράλληλα με ένα συνηθισμένο ηχείο.

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η τελευταία παρατήρηση, μπορεί τελικά να δράσει και σαν μειονέκτημα. Η χωρητική συμπεριφορά, όπως θα δούμε παρακάτω, ενδέχεται να δημιουργήσει και προβλήματα στις μετρήσεις μας, καθώς ο δέκτης, δρώντας σαν πυκνωτής, παραμορφώνει τον εκπεμπόμενο παλμό.

2.5.3 Κατασκευή Πιεζοηλεκτρικού Μετατροπέα

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

Σχήμα 6 Πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας

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.

2.5.4 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 5

Σχήμα 7 Τυπική παράσταση δέσμης υπερήχων

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

$$z = D^2/4\lambda$$

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

$$z = r^2/\lambda$$

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:

$$\Theta_s = \arcsin\left(1.22 \frac{\lambda}{D}\right) \quad \text{για μετατροπέα με διάμετρο } D$$

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 6 Α). Η ανάλυση αυτή σχετίζεται με το χωρικό μήκος παλμού (SPL) σύμφωνα με την σχέση :

$$\text{Αξονική ανάλυση} = \text{χωρικό μήκος παλμού} / 2 = cT_{pulse} / 2$$

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 χωρίζει δύο στόχους, στο κάθετο επίπεδο απ' αυτό που διαδίδεται η δέσμη, ώστε αυτοί να γίνουν αντιληπτοί σαν δυο ξεχωριστά αντικείμενα (σχήμα 6 Β). 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 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 δυσχεραίνει

Σχήμα 8 Α) Πλευρική ανάλυση, Β) Αξονική ανάλυση.

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 7. Η εστίαση μπορεί να επιτευχθεί 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 9 Εστίαση δέσμης υπερήχων. Α) Εστίαση με κυρτό φακό όπου διακρίνεται το σημείο εστίασης. Β) Εστίαση όπου διακρίνεται η ζώνη εστίασης

2.5.5 Υπολογισμός συντελεστών ανάκλασης και διάδοσης Κάθετη πρόσπτωση

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

$$\alpha_r = \frac{(z_2 - z_1)^2}{(z_2 + z_1)^2}, \quad \tau = \frac{4z_1 z_2}{(z_2 + z_1)^2}$$

Σχήμα 10 Κάθετη πρόσπτωση

2.5.6 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 (a_s). 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.

2.6 Εξασθένηση υπερήχων λόγω απορρόφησης από το εύρος δέσμης και μετεωρολογικών φαινομένων

2.6.1 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:

$$I = \frac{w}{4\pi r^2}$$

Όπου w η ακουστική ισχύς της πηγής

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

$$I = \frac{Qw}{4\pi r^2}$$

Άρα μεγαλύτερη ένταση με κατευθυντική πηγή καλύτερη απόδοση για κύκλωμα μέτρησης απόστασης.

2.6.2 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 11 Σχηματισμός σκιάς που οφείλεται στην ταχύτητα του ανέμου

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.

2.7 ΕΚΠΟΜΠΗ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Η εκπομπή και η λήψη των υπερήχων 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 12 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο a) Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί αλλαγή των διαστάσεων του υλικού b) Εφαρμογή πίεσης στο υλικό δημιουργεί επιφανειακά φορτία

2.8 Όρια Απόδοσης των Συστημάτων Μέτρησης Απόστασης.

Τα χαρακτηριστικά απόδοσης των διαθέσιμων συστημάτων μέτρησης ποικίλλουν, όπως και οι απαιτήσεις των εφαρμογών για τις οποίες σχεδιάζονται. Στις ακόλουθες υποενότητες θα εξεταστούν οι επιδόσεις των πιο βασικών κατηγοριών των συστημάτων αυτών καθώς και θέματα που αφορούν τα όρια των αποδόσεών τους.

2.8.1 Ακρίβεια Απόστασης

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3, οι TOF και ενεργές triangulation τεχνικές διαφέρουν πάρα πολύ στο λάθος τους ως προς την μετρούμενη απόσταση. Τα διαθέσιμα σήμερα συστήματα βασισμένα ενεργό triangulation έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια μόνο για αποστάσεις μέτρησης μικρότερες του 1m.

Επίσης σε συστήματα ραντάρ οι παλμοί επιστροφής έχουν μεγαλύτερη διάρκεια από την διάρκεια εκπομπής T_{π} επειδή οι διάφοροι στόχοι πεπερασμένες και ποίκιλτες διαστάσεις έτσι η ακρίβεια μέτρησης της απόστασης σε συστήματα ραντάρ θα είναι της τάξης $\Delta R ; \frac{cT_{\pi}}{2}$

2.8.2 Μέγιστη Απόσταση Μέτρησης

Οποιοδήποτε σύστημα το οποίο βασίζεται στην εκπομπή κυμάτων για το υπολογισμό της απόστασης θα πρέπει να έχει και μια μέγιστη απόσταση που μπορεί να μετρήσει. Αυτό συμβαίνει γιατί η εκπεμπόμενη ενέργεια που διαδίδεται στο μέσο διάδοσης εξασθενεί, απορροφάται και σκεδάζεται και έτσι θα πρέπει η ενέργεια που επιστρέφει στον ανιχνευτή να υπερβαίνει ένα ορισμένο ελάχιστο ποσό κατωφλίου (κατώφλι θορύβου) για να μπορεί να ανιχνευτεί.

Η κλασική εξίσωση ραντάρ που εισάγεται παρακάτω δείχνει η ισχύς λήψης είναι αντίστροφα ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της απόστασης

$$P_{\lambda} = \frac{P_{\pi} G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}$$

Οπότε γνωρίζοντας ότι η μικρότερη ισχύς που μπορεί να ανιχνευθεί είναι $P_{\lambda} = P_{\min}$ η μέγιστη εμβέλεια R_{\max} του ραντάρ για ένα στόχο με ενεργό διατομή ραντάρ σ (m²) θα είναι

$$R_{\max} = \left(\frac{P_{\pi} G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\min}} \right)^{1/4}$$

Η εξίσωση βεβαίως αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση για την εμβέλεια του ραντάρ και ισχύει εξίσου και στο ραντάρ με ακτίνες laser, αφού το lidar αποτελεί μια έκδοση ραντάρ σε υψηλότερη συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Περίπου παρόμοια σχέση ισχύει για sonar και για τα ενεργά triangulation συστήματα.

2.8.3 Χρόνος Λήψης Μετρήσεων

Η ταχύτητα με την οποία ένας αισθητήρας μπορεί να πάρει μία μέτρηση έχει σημασία όταν το αντικείμενο αλλάζει θέση ή μορφή, ή και όταν η πυκνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι πολύ υψηλή. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που περιορίζουν τη ταχύτητα λήψης μετρήσεων όπως το χρονικό διάστημα που απαιτείται από τον μετατροπέα για να μετατρέψει σήμα επιστροφής, ο χρόνος οποιουδήποτε φιλτραρίσματος ή του υπολογισμού μέσου όρου ή ενίσχυσης που πρέπει να εκτελεσθούν για να πάρουμε το κατάλληλο σήμα, τα όρια ταχύτητας των μηχανικών μερών της συσκευής ανίχνευσης, η ταχύτητα του υπολογιστικού συστήματος κ.α.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3

3.1 Γενικά

Ο πομπό-δεκτής υπέρηχων που βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα λειτουργεί ως εξής:

Την στιγμή που εκπέμπονται οι παλμοί υπέρηχων αρχίζει η μέτρηση παλμών που στέλνει ο ταλαντωτής στον απαριθμητή, όταν ο παλμός υπέρηχων γυρίσει τότε σταματάει η μέτρηση. Με βάση το χρόνο που έκανε ο υπέρηχος να εκπεμφθεί, να ανακλαστεί ώστε να ληφθεί από το δεκτή μας και δεδομένου της ταχύτητας του ήχου στον αέρα δια δυο γιατί κάνει την ίδια απόσταση δυο φορές έχουν μετρηθεί οι παλμοί. Ύστερα ο απαριθμητής αναλαμβάνει να απεικονίσει την ένδειξη απόστασης με τα led με βάση τους παλμούς που μέτρησε ο απαριθμητής στην διάρκεια πτήσης του παλμού.

Σχήμα 13 Εδώ βλέπουμε την εικόνα του μετρητή απόστασης και το σχηματικό του.

Στο κύκλωμα που υλοποίησα υπάρχουν οι εξής βαθμίδες:
Βλέπε σχήμα 14

Σχήμα 14 βαθμίδες του μετρητή απόστασης με υπέρηχους

Ταλαντωτής
 Πομπός
 Δεκτής
 Απαριθμητής
 LCD απεικόνιση απόστασης σε cm.

Ακολουθεί μια περιγραφική αναφορά:

Ταλαντωτής: στέλνει τους παλμούς που χρειάζονται οι διάφορες βαθμίδες για την μέτρηση της απόστασης σε cm.

Ο πομπός: αφού λάβει ένα σήμα από τον ταλαντωτή και έχει κατάλληλη τάση στα άκρα του μετατροπέα εκπέμπει υπέρηχους συχνότητας 40.000 HZ.

Ο δεκτής: λαμβάνει τους ανακλώμενους παλμούς και τους ενισχύει με δυο ενισχυτές κοινού εκπομπού.

Ο απαριθμητής: μετράει τους παλμούς που του στέλνει ο ταλαντωτής για τον χρόνο που είναι σε πτήση οι παλμοί υπέρηχων. Κάθε παλμός αντιστοιχεί σε ένα εκατοστό.

LCD Απεικόνιση απόστασης σε εκατοστά. Με βάσει τους παλμούς που έχει μετρήσει ο BCD counter θα ανάψουν τα αντίστοιχα λαμπάκια ώστε να έχουμε την ένδειξη της απόστασης της συσκευής από την επιφάνεια ανάκλασης σε εκατοστά.

Ας αναλύσουμε λίγο περισσότερο την λειτουργία και πως εντέλει μετράει (δείχνει) την απόσταση.

3.2.1 ΤΑΛΑΝΤΩΤΗΣ

Το μόνο δεδομένο στην εξέταση της απόστασης είναι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου η οποία είναι 343,8 m/sec. Αυτό εκμεταλλευόμαστε αλλά το θέλουμε σε εκατοστά για περισσότερη ακρίβεια. Λοιπόν έτσι έχουμε 34380 cm/sec από αυτό εμείς θέλουμε την μισή συχνότητα γιατί ο υπέρηχος διανύει την απόσταση που θέλουμε να μετρήσουμε δυο φορές, γιατί την μια πάει μέχρι τον στόχο και την άλλη γυρίζει. Άρα καταλήγουμε ότι θέλουμε μια συχνότητα 17190hz δεξ εικόνα . Όπου αυτή η συχνότητα αντιστοιχεί σε ένα παλμό ανά εκατοστό.

Σχήμα 15 εικόνα παλμογράφου κάθε ένας παλμός αντιστοιχεί σε ένα εκατοστό

Την παραπάνω συχνότητα την πετυχαίνουμε με τα στοιχεία C8,P3,R18 και R17 γύρω από τα ποδαράκια 9,10,11 του IC3 βλέπε σχήμα 16. σε αυτό το ολοκληρωμένο τα ποδαράκια 8 και 12 πηγαίνουν στην γείωση ενώ το 16 στη τροφοδοσία του κυκλώματος 9Volt. Το ποδαράκι 3 δηλ η έξοδος Q14 βγάζει παλμούς περίπου 1HZ δεν μας ενδιαφέρει ακριβώς η τιμή αυτή.

Σχήμα 16 σχηματικό ταλαντωτή

Αυτή η τιμή κάνει τέσσερα πράγματα

Δίνει παλμό επανατοποθέτησης σε κάθε θετικό μέτωπο του παλμού στο latch του ολοκληρωμένου 4553 μέσω ενός μονοδονητή που αποτελείται από την πύλη NAND ποδαράκια 1,2,3 την R19 και το C9.

Ο παλμός 1 hz αναστρέφεται από την πύλη NAND N7 που λειτουργεί σαν αντίστροφες πύλη NOT. Μετά μέσω ενός μονοδονητή που αποτελείται από τα στοιχεία N8 ποδαράκια 5,6,4 την R20 και το C10 εφαρμόζεται στο reset του 4553. Κάνει reset στο ολοκληρωμένο 4553 ώστε να είναι μηδενιστούν οι παλμοί που έχει μετρήσει

Ακόμη αφού έχει αναστραφεί από το N7 ποδαράκια 8,9,10 και περάσει από έναν μονοδονητή που αποτελείται από τα στοιχεία N4, R11, C6 κάνει reset στο flip-flop ώστε να πάει το συμπλήρωμα της εξόδου σε λογική κατάσταση ένα. Αυτή είναι ένα για όλη την διάρκεια πτήσης του παλμού και εφαρμόζεται στην είσοδο της πύλης NAND με αποτέλεσμα να μετράει παλμούς 17190hz το ολοκληρωμένο 4553 στο clock input.

Ακόμη αφού έχει αναστραφεί από το N7 και περάσει από έναν μονοδονητή που αποτελείται από τα στοιχεία N4 ποδαράκια 1,2,3 την R11 και το C5 Διεγείρει τον ταλαντωτή ώστε να τροφοδοτήσει με τάση το μετατροπέα υπέρηχων ώστε να εκπεμφθούν παλμοί υπέρηχων.

3.2.2 ΠΟΜΠΟΣ

Ο πομπός αποτελείται από τα στοιχεία N1 ποδαράκια 8,9,10 την R9 το C3 και το P1 τα οποία λειτουργούν σαν ταλαντωτής διεγερόμενος και αποδιεγερόμενος από την N3 ποδαράκια 5,6,4. η συχνότητα του ταλαντωτή αυτού εξαρτάται από τον μετατροπέα που χρησιμοποιούμε και ρυθμίζεται από το P1 βλέπε σχήμα 17. Η συχνότητα του ταλαντωτή ρυθμίστηκε κοντά στα 40 kHz γιατί αυτή είναι η συχνότητα που λειτουργεί ο μετατροπέας άρα εκεί έχει και την βέλτιστη απόδοση. Οι πύλες N1 και N2 σχηματίζουν ένα κύκλωμα γέφυρας το οποίο είναι υπεύθυνο για να εφαρμοστεί μια εναλλασσόμενη τάση 18V από κορυφή σε κορυφή στα άκρα του US1 μετατροπέα. Ο μονοδονητής με αρνητικό μέτωπο παλμού από την αντιστροφή του 1HZ από το N7

επιτρέπει στον πομπό να εκπέμψει σήμα για χρόνο 0.3msec σε αυτό διάστημα εκπέμπει περίπου 9-12 παλμούς.

Σχήμα 17 απεικόνιση σχηματικού του πομπού

Η έξοδος του πομπού στέλνει 10 παλμούς

Δες παρακάτω σχήμα 18

Σχήμα 18 το σήμα που εκπέμπει ο πομπός υπερήχων

3.2.3 ΔΕΚΤΗΣ

Ο δεκτής αποτελείται από δυο διαδοχικά κυκλώματα κοινού εκπομπού έναν φωρατή και ένα flip-flop βλέπε σχήμα 19. Το κύκλωμα ενίσχυσης αποτελείται από τα BC459C, B459C, C6, R12, R13, C7, R14 και P2 όπου οι αντιστάσεις είναι αντιστάσεις πόλωσης και ο πυκνωτής είναι σύζευξης της πρώτης βαθμίδας ενίσχυσης με την δεύτερη το ποτενσιόμετρο ρυθμίζει την τάση που θα φτάσει στο φωρατή. Ο φωρατής αποτελείται από BC559C PNP C7, R15, R16 ο πυκνωτής είναι σύζευξης της δεύτερης βαθμίδας ενίσχυσης με την είσοδο του φωρατή οι αντιστάσεις είναι αντιστάσεις πόλωσης.

σχημα 19 σχηματικό του δεκτη

Μετά όταν έχουμε σήμα τότε η έξοδος του flip-flop Q συμπλήρωμα γίνεται μηδέν άρα η έξοδος της πύλης NAND είναι πάντα μηδέν και έτσι σταματάει ο απαριθμητής να μετράει παλμούς.

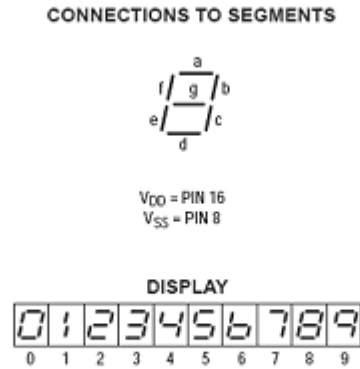
εικόνα 20 βλέπουμε την πύλη που σταματάει την μέτρηση παλμών

3.2.4 ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗΣ

Το κύκλωμα του απαριθμητή το βλέπουμε στο παράρτημα Α αποτελείται από δυο ολοκληρωμένα το 4553 και το 4543 τρεις αντιστάσεις 1KΩ τρία tranzistor BC557 PNP έναν πυκνωτή 1nF και επτά αντιστάσεις 220Ω. Για κάθε απεικόνιση ενός αριθμού έχουμε εφτά led κάθε παλμός που μετρήσαμε είναι

ένα εκατοστό. Άρα βλέπουμε τον παρακάτω πίνακα για να καταλάβουμε πως δουλεύει η αρίθμηση της απόστασης.

σχήμα 21 Βλέπουμε τον απαριθμητή



Ανάλογα με το ποιο transistor δουλεύει στέλνει στα εκατοστά, δεκάδες ή μέτρα.

Η απεικόνιση στα displays γίνεται με βάση τους παραπάνω πίνακες.

3.3 Έλεγχος λειτουργίας

Ακολουθούν μέτρησης που λήφθηκαν....

Ταινία Μέτρησης (cm)	Ενδειξη μετρητή απόστασης (cm)
50	50
60	60
70	70
80	81
90	90
100	100
110	111
120	121
130	130
140	140
150	151
160	160
170	170
180	180
190	190
200	200
220	220
230	230
240	240
250	251
260	264
270	274
280	281
300	300
310	310

Πίνακας 1

Παρατηρούμε ότι οι μέτρησης είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές.

Το μειονέκτημα της κατασκευής είναι ότι ελάχιστη δυνατή μέτρηση είναι τις τάξεις των 50 εκατοστών

Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι η απλότητα του κυκλώματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Αλλαγή του μετατροπέα στον πομπό και δεκτή υπέρηχων
Δημιουργία χοάνης μπροστά από τον μετατροπέα ώστε να λαμβάνει ποιο εύκολα τη διαταραχή σωματιδίων από την επιστροφή του ανακλώμενου υπέρηχου

Ποιο μικρομετρική μέτρηση (συντονισμός) ώστε να αντιστοιχεί συγκεκριμένος χρόνος πτήσης σε συγκεκριμένη απόσταση πχ μέτρηση σε χιλιοστά
Χρήση μικρότερου πυκνωτή C5 για να έχουμε τη δυνατότητα μέτρησης μικρότερης απόστασης

4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μια τέτοια κατασκευή μπορεί να έχει πολλές και σημαντικές (καθημερινές) χρήσεις πχ όταν παρκάρουμε το αυτοκίνητο μας να μας γράφει την απόσταση από τα άλλα αυτοκίνητα. Ακόμη μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε σε μετρήσεις απόστασης που δεν μπορούμε να φτάσουμε το ένα άκρο που έχει επιφάνεια ανάκλασης πχ ταβάνι σε ένα σπίτι, άρα δεν είναι και εύκολο να το μετρήσουμε.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook
John G, Webster
- [2] Εφαρμοσμένη Ακουστική Δημήτρης Σκαρλάτος
- [3] Οργανολογία και Τεχνικές – Βιοϊατρικές εφαρμογές
Διδώ Γιώβα
- [4] Ιατρικά Απεικονιστικά Συστήματα
Δημήτρης Κουτσούρης – Κωνσταντίνα Νικήτα
- [5] Γενική Ηλεκτρονική (Τόμος Β)
Κ.Α Καρύμπακας
- [6] Ηλεκτρονική
Malvino
- [7] Ψηφιακή Σχεδίαση
M. Morris Mano
- [8] Συστήματα Ραντάρ
N.K. Ουζούνογλου
- [9] Air Transmission Ultrasonic Sensor
NIPPON CERAMIC Co., Ltd.
- [10] Piezoelectric Ceramic Sensors (PIEZOTITE)
Murata Manufacturing Co., Ltd.
- [11] Choosing an Ultrasonic Sensor for Proximity or Distance
Measurement
- [12] Donald P. Massa, Massa Products Corp.
www.sensorsmag.com/articles/0399/0399_28/index.htm
- [13] Ultrasonic transducers
[www.ndt-
ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/index.thm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/index.thm)
- [14] Ultrasonic Range Meter
www.interq.or.jp/japan/se-inoue/e_pic6_6.htm

- [15] How to Use Intelligent LCDs
Julyan Ilett
www.epemag.com
- [16] Optical Tape Measure
<http://seniord.ee.iastate.edu/may0430/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Σχηματικό του πομπού, δέκτη υπέρηχων και απεικόνιση απόστασης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Data sheets ολοκληρωμένων

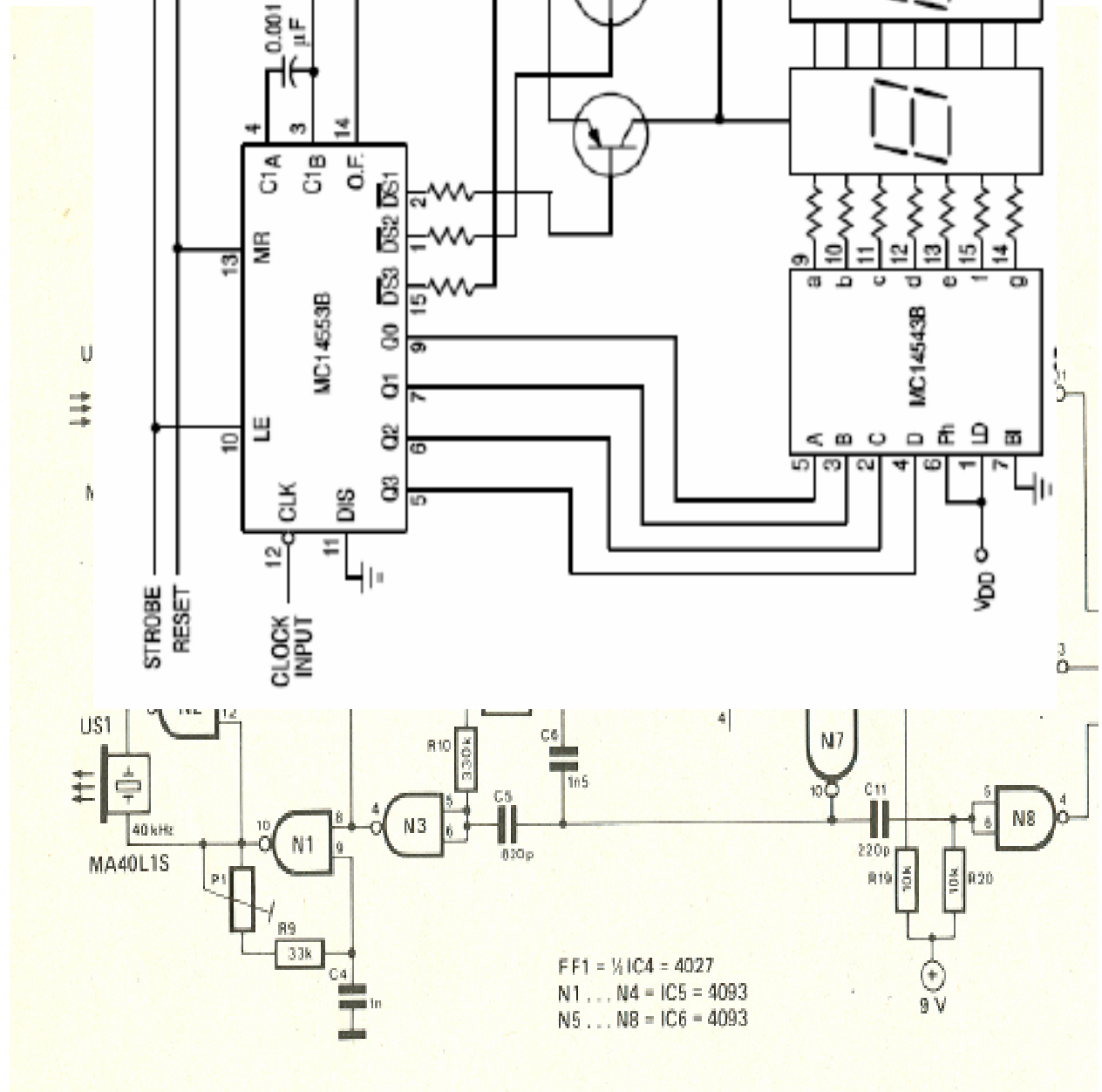
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Data sheets υπόλοιπων εξαρτημάτων

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Σχηματικό του πομπού, δέκτη υπέρηχων και απεικόνιση απόστασης.

Πομπός και δεκτής υπέρηχων

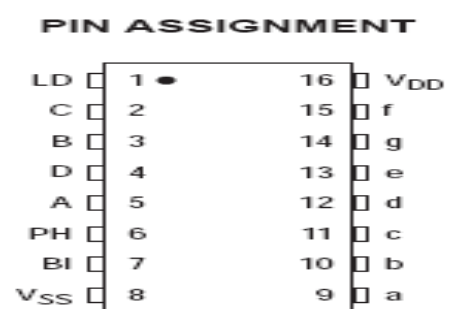


Απεικόνιση της απόστασης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Data sheets ολοκληρωμένων

Ολοκληρωμένο IC1



Ολοκληρωμένο IC2

Ολοκληρωμένο IC3

Ολοκληρωμένο IC4

Σ' αυτό χρησιμοποιούμε μόνο το μισό ολοκληρωμένο

Ολοκληρωμένα IC5 και IC6

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Data sheets υπόλοιπων εξαρτημάτων

BC549

BC559

BC557

