



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Ακουστικοί αισθητήρες και επεξεργασία υποθαλάσσιων ακουστικών
σημάτων με μικροελεγκτή**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Α. Παληομήτρος

Επιβλέπων : Χριστοφόρου Ευάγγελος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ακουστικοί αισθητήρες και επεξεργασία υποθαλάσσιων ακουστικών
σημάτων με μικροελεγκτή**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Α. Παληομήτρος

Επιβλέπων : Χριστοφόρου Ευάγγελος

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Δεκεμβρίου 2019

.....
Ε. Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Τσαραμπάρης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2019

Ιωάννης Α. Παληομήτρος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιωάννης Α. Παληομήτρος, 2019.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτική ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην παρούσα Διπλωματική εξετάζεται η διαδικασία ακουστικού εντοπισμού με ηλεκτρονικά μέσα, διαφόρων τύπων υποθαλάσσιων αντικειμένων. Αρχικά, γίνεται μια θεωρητική ανάλυση της ακουστικής θεωρίας και περιγράφονται τα στοιχεία που θα βοηθήσουν στην υλοποίηση σεναρίων προσομοίωσης μέσω του προγράμματος Matlab.

Στη συνέχεια ακολουθεί το πειραματικό κομμάτι, το οποίο υλοποιείται με τη χρήση της εκπαιδευτικής πλατφόρμας Arduino και διάφορων αισθητήρων, προκειμένου να δημιουργηθεί μια ρεαλιστική θεώρηση του πειράματος.

Τέλος, γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων καθώς και μία συνολική αποτίμηση του συνολικού έργου της διπλωματικής εργασίας, δίνοντας έμφαση στις προοπτικές υλοποίησης και εξέλιξής της, τα επόμενα χρόνια.

Λέξεις Κλειδιά:

Ακουστικός αισθητήρας, ακουστικό σήμα, υδρόφωνο, μικροελεγκτής, προσομοίωση ακουστικού σήματος.

Abstract

The present thesis deals with the process of acoustic detection by electronic means of various types of undersea objects. Initially, a theoretical analysis of acoustic theory is carried out and the elements that will help to implement simulation scenarios through the Matlab program are described.

Following is the experimental part, implemented using the Arduino educational platform and various sensors, in order to create a realistic view of the experiment.

Finally, the results are analyzed as well as an overall assessment of the overall work of the thesis, with emphasis on the prospects for its implementation and development over the coming years.

Keywords:

Acoustic sensor, acoustic signal, hydrophone, microcontroller, acoustic signal simulation.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου, Μιχαέλα, για την στήριξη καθώς και την υπομονή της. Στη συνέχεια, τον καθηγητή, κ. Χριστοφόρου, για τις πολύτιμες συμβουλές του καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε για να ασχοληθώ με τη διπλωματική αυτή. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Θεοδώρου, τον επίκουρο καθηγητή κ. Τσαραμπάρη και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Σπύρο Αγγελόπουλο για τις συμβουλές και την καθοδήγησή τους, που με βοήθησαν στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Πρόλογος

Στην παρούσα Διπλωματική, πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια υλοποίησης ενός συστήματος εντοπισμού υποθαλάσσιων στόχων, με την χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών μέσων, και συγκεκριμένα με την πλατφόρμα Arduino σε συνδυασμό με διάφορους αισθητήρες. Ο κλάδος της ακουστικής, με την ευρύτερη έννοια, ξεπερνά μεν τα “στενά” όρια του κλάδου των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, παρουσιάζει δε μεγάλη σημασία ερευνητική και γεωπολιτική συνδυαζόμενη με αυτόν.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους υλοποιείται ο εντοπισμός υποθαλάσσιων στόχων από ενεργά και παθητικά συστήματα σόναρ (ηχοπλοήγησης). Από την άλλη μεριά, η εξεύρεση επιπρόσθετων τρόπων και μέσων εντοπισμού, αποτελεί σημείο ενδιαφέροντος, τόσο από επιστημονική όσο και από πρακτική άποψη.

Αφού αναλυθούν, στα πρώτα κεφάλαια, οι βασικές αρχές που διέπουν την υποβρύχια ακουστική, γίνονται στην συνέχεια προσομοιώσεις με το πρόγραμμα Matlab, καθώς και πειραματικές δοκιμές με Arduino και διάφορους αισθητήρες. Τέλος, προτείνονται πιθανοί μελλοντικοί τρόποι εξέλιξης των συστημάτων υποβρύχιου εντοπισμού.

Πίνακας περιεχομένων

A. Θεωρητικό Μέρος.....	1
1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Ιστορική Αναδρομή.....	1
1.2. Στοιχεία Ακουστικής Ωκεανογραφίας.....	2
.....	3
1.3. Μηχανισμοί ηλεκτροακουστικής μεταγωγής.....	3
1.4. Βασικά Ισοδύναμα Κυκλώματα, λειτουργία ως προβολείς, υδρόφωνα.....	5
2. Συστήματα Ανίχνευσης με ακουστικούς αισθητήρες.....	11
2.1. Υπάρχοντα συστήματα ανίχνευσης.....	11
2.2. Αναλώσιμα συστήματα σόναρ.....	12
2.3. Αιγαίο Πέλαγος και εντοπισμός υποθαλάσσιου θορύβου.....	14
3. Θόρυβος.....	17
3.1. Υποβρύχιος θόρυβος περιβάλλοντος.....	17
3.2. Πηγές Αυτοθορύβου Υποβρυχίων.....	18
3.3. Φάσμα εκπεμπόμενου θορύβου και σύγχρονα συστήματα.....	23
3.4. Σύνθεση ακουστικού αποτυπώματος.....	24
4. Ακουστική θεωρία και προσομοιώσεις μέσω Matlab.....	31
4.1. Ενεργητική και παθητική εξίσωση sonar.....	31
4.2. Γεωμετρική Ακουστική.....	38
4.3. Εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης μέσω γενικευμένης σταυρωτής συσχέτισης και DOA.....	41
4.4. Προσομοιώσεις με ενεργό και παθητικό σύστημα σόναρ.....	43
B. Πειραματικό Μέρος.....	51
5. Διάταξη εντοπισμού θαλάσσιων στόχων.....	51
5.1. Arduino sonar.....	51
5.2. Επεξήγηση της πειραματικής διάταξης.....	52
6. Διεξαγωγή Πειράματος.....	59
6.1. Αναλυτικά στοιχεία που αποτελούν τη διάταξη.....	59
.....	61
6.2. Διεξαγωγή μετρήσεων.....	62
6.3. Συμπεράσματα.....	73
6.4. Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες.....	73
7. Βιβλιογραφία.....	75
Γ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	77
Γ1. Κώδικας προσομοίωσης Arduino.....	77
Γ2. Κώδικας Arduino για σύνδεση αισθητήρα θερμότητας με το Arduino.....	79

A. Θεωρητικό Μέρος

1. Εισαγωγή

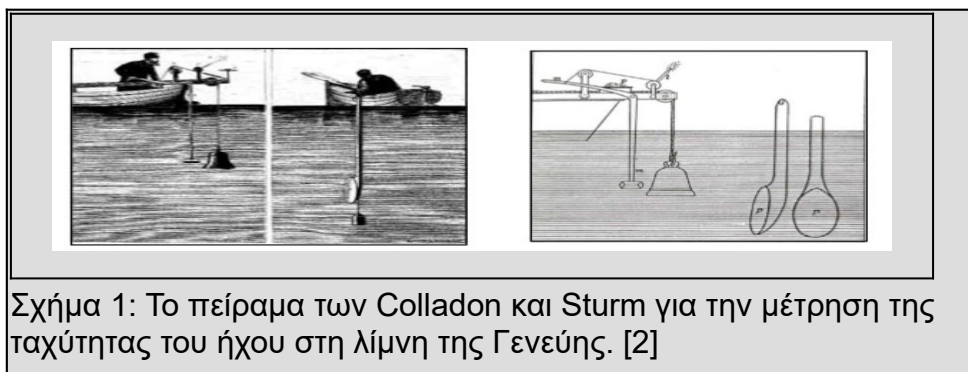
1.1. Ιστορική Αναδρομή

Το θαλάσσιο περιβάλλον αποτελείται από τη στήλη του θαλασσινού νερού και τον πυθμένα, ενώ σημαντικό στοιχείο είναι η διεπιφάνεια νερού-αέρα, που αποτελεί το άνω σύνορο του πεδίου ενδιαφέροντος της εργασίας. Οι βασικές παράμετροι ενδιαφέροντος για την ακουστική ωκεανογραφία είναι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό και τον πυθμένα, η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στον πυθμένα, η πυκνότητα των μέσων, η γεωμετρία των διαχωριστικών επιφανειών και η ανύψωση της επιφάνειας.

Οι πρώτες μετρήσεις της ταχύτητας του ήχου στο νερό έγιναν πιθανότατα από τους Colladon και Sturm στη λίμνη της Γενεύης το Νοέμβριο του 1826 (βλέπε σχήμα 1), με τη χρήση απλών ακουστικών κωνικού σχήματος, ενός κώδωνα για την παραγωγή του ήχου και των απαραίτητων χρονομέτρων και έδωσαν τιμή 1435 m/s πολύ κοντά στην πραγματική. Μία ημιεμπειρική σχέση που δίδει με σημαντική ακρίβεια την ταχύτητα του ήχου σε μέσο γεωγραφικό πλάτος είναι η σχέση (1.1).[1]

$$c = 1449,2 + 4,6 T - 0,055 T^2 + 0,00029 T^3 + (1,34 - 0,010 T)(S - 35) + 0,016 Z \quad (1.1)$$

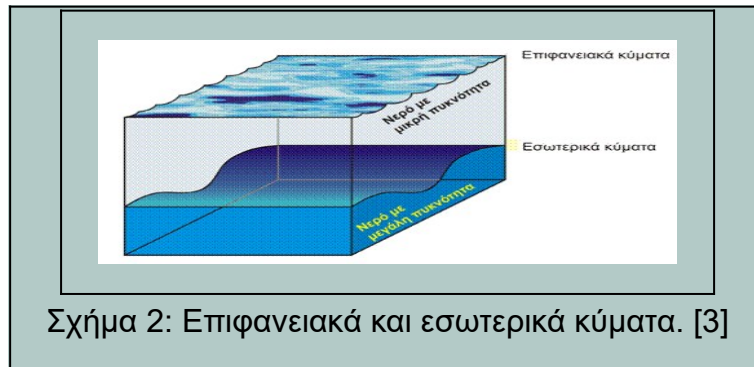
όπου T η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$), S η αλατότητα (σε μέρη επί τοις χιλίοις) και z το βάθος σε μέτρα (m)



1.2. Στοιχεία Ακουστικής Ωκεανογραφίας

Αν και για την υποβρύχια ακουστική, η επιφάνεια της θάλασσας αντιμετωπίζεται με απλουστευτικές παραδοχές, σε πολλές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στη μελέτη του θορύβου του περιβάλλοντος, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν πολλά από τα γεωμετρικά και κινητικά χαρακτηριστικά της που σχετίζονται με τα κύματα επιφανείας.[3]

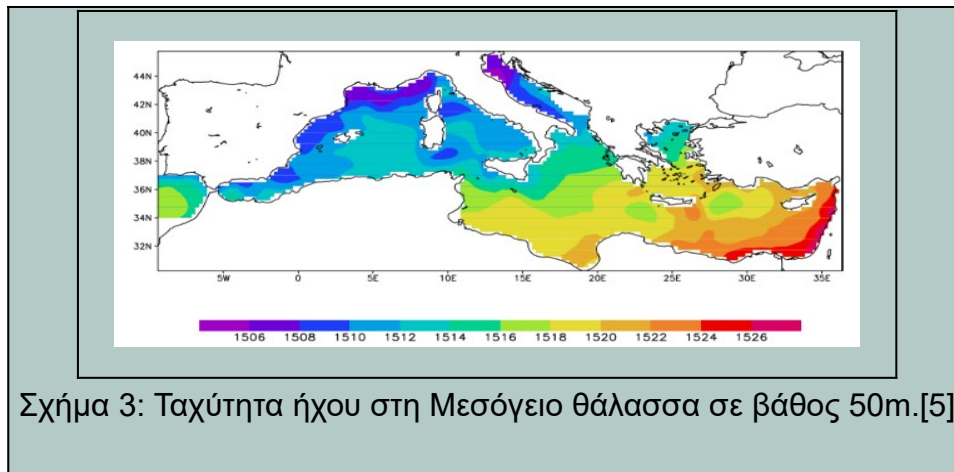
Τα πιο μικρά σε μέγεθος κύματα με μήκος κύματος που συνήθως δεν υπερβαίνει τα 2 εκατοστά εξαρτώνται από την επιφανειακή τάση στο σύνορο νερού-αέρα και ονομάζονται κύματα επιφανειακής τάσης (capillary waves). Τα κύματα βαρύτητας (gravity waves) που είναι εκείνα που παρατηρεί κανείς περισσότερο, σχετίζονται με την βαρύτητα που είναι η αιτία που τα διατηρεί μετά την δημιουργία τους (βλέπε σχήμα 2).



Ο πυθμένας της θάλασσας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο ως προς την συμπεριφορά του σαν ακουστικό μέσο και αφορά τη διάδοση των ακουστικών και διατμητικών κυμάτων σ' αυτόν. Γεωλογικά, η προέλευση του θαλασσινού βυθού είναι το εσωτερικό της γης και το μάγμα το οποίο ανέρχεται από το κέντρο της γης και δημιουργεί ανυψώσεις υλικών. Παράλληλα υπάρχουν καταβυθίσεις υλικών σε κοιλάδες και η όλη διαδικασία είναι αργή μεν σε απόλυτο χρόνο, γρήγορη δε στον γεωλογικό χρόνο καθώς η εξάπλωση των υλικών μπορεί να είναι μέχρι και 10 cm/έτος. Επίσης καθιζάνουν στον πυθμένα της θάλασσας υλικά βιολογικής προέλευσης (ζωικής ή φυτικής), ενώ υπάρχει και καθίζηση υλικών από την ξηρά.[4]

Η κατανομή της ηχητικής ταχύτητας στη Μεσόγειο αλλάζει με βάση τα κλιματολογικά δεδομένα για τη θερμοκρασία και την αλατότητα. Ο εποχιακός κύκλος της Μεσογείου δημιουργεί ένα ευρύ φάσμα χωρικών και χρονικών μεταβλητών, με τις σχετικές διαφορές

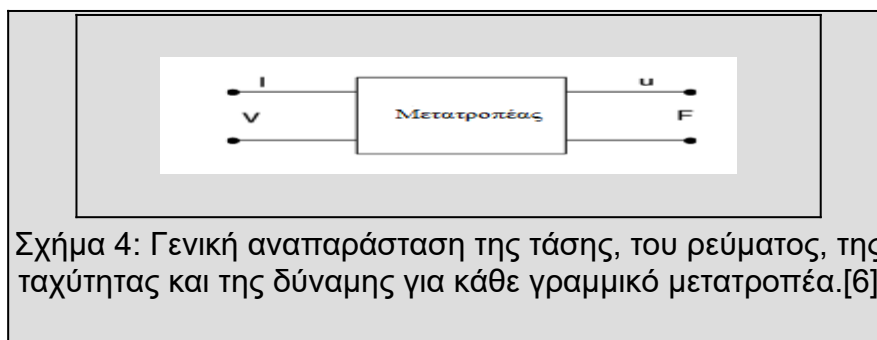
μεταξύ των δυτικών και ανατολικών λεκανών (βλέπε σχήμα 3).[5]



1.3. Μηχανισμοί ηλεκτροακουστικής μεταγωγής

Υπάρχουν έξι κύριοι τύποι ηλεκτροακουστικών μηχανισμών μεταγωγής [πιεζοηλεκτρικοί, ηλεκτροσυστολικοί, μαγνητοσυστολικοί, ηλεκτροστατικοί, μεταβαλλόμενης απροθυμίας (variable reluctance) και κινουμένου πηνίου] και όλοι έχουν χρησιμοποιηθεί ως υποβρύχιοι μεταλλάκτες ήχου. [6]

Οι πιεζοηλεκτρικοί, ηλεκτροσυστολικοί και μαγνητοσυστολικοί μηχανισμοί ονομάζονται μορφοτροπείς δύναμης του σώματος αφού οι ηλεκτρικές ή μαγνητικές δυνάμεις προέρχονται από όλο το ενεργητικό υλικό, ενώ οι ηλεκτροστατικοί, μεταβαλλόμενης απροθυμίας και κινουμένου πηνίου ονομάζονται μεταλλάκτες επιφανειακής δύναμης αφού οι δυνάμεις προέρχονται από επιφάνειες (βλέπε σχήμα 4).



Η λειτουργία ενός ηλεκτροακουστικού μορφοτροπέα βασίζεται στην ακτινοβολήση του ήχου σε ένα μέσο όπως ο αέρας ή το νερό ή στην ανίχνευση του ήχου που

ακτινοβολήθηκε στο μέσο. Οι αποκρίσεις του μορφοτροπέα είναι μέτρα της ικανότητας του να εκτελεί τις λειτουργίες αυτές. Ορίζονται ως η έξοδος του μετατροπέα ανά μονάδα εισόδου, συναρτήσει της συχνότητας, για συνθήκες σταθερής οδήγησης.

Οι μορφοτροπείς γενικά εκπέμπουν ήχο με κατευθυντικό τρόπο ο οποίος αλλάζει ως προς τη συχνότητα και την απόσταση από τον μορφοτροπέα. Σε μια δεδομένη συχνότητα, ορίζεται μια περιοχή πέρα από την οποία τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά γίνονται ανεξάρτητα από την απόσταση και η ηχητική πίεση γίνεται αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση.

Απαιτούνται μεγάλες σειρές μετατροπέων για την επίτευξη της κατευθυντικότητας που απαιτείται για τον ακριβή προσδιορισμό της κίνησης και την απόρριψη θορύβου και, σε ενεργές συστοιχίες, για την επίτευξη επαρκούς ισχύος για τον προσδιορισμό της εμβέλειας των απομακρυσμένων στόχων. Οι συστοιχίες αυτές, παρέχουν επίσης ευελιξία στη διαμόρφωση και τον έλεγχο ενεργών και παθητικών ακουστικών συστημάτων. Ο προσδιορισμός της εμβέλειας, γίνεται σε ενεργό σόναρ¹ (sound navigation and ranging (sonar)) με χρονισμό της επιστροφής μιας εκπνευόμενης ηχούς, ενώ σε παθητικό σόναρ είναι επίσης εφικτός με τριγωνισμό με δύο συστοιχίες ή με τη μέτρηση της καμπυλότητας του εμπρόσθιου κύματος με τρεις συστοιχίες, εάν υπάρχει επαρκής απόσταση μεταξύ των συστοιχιών.

Παραδείγματα συστοιχιών που χρησιμοποιούνται σε σόναρ: κυλινδρικές και σφαιρικές ενεργές συστοιχίες και μια συμπαγής παθητική συστοιχία. Οι ΗΠΑ έχουν εκατοντάδες συστοιχίες και ακόμα περισσότερους μεταγωγείς σε συστήματα ενεργού και παθητικού σόναρ και πολλά άλλα σε μικρότερα συστήματα για εξειδικευμένους σκοπούς. Οι ενεργές συστοιχίες για ανίχνευση μεσαίας εμβέλειας έχουν συνήθως εύρος ζώνης περίπου μιας οκτάβας και λειτουργούν στην περιοχή των 2-10 kHz, ενώ για εφαρμογές μικρότερης εμβέλειας, όπως ανίχνευση ναρκών ή τορπιλών, χρησιμοποιούνται συχνότητες χρήσης μέχρι 100kHz.

Ορισμένες παθητικές συστοιχίες σχεδιάζονται για την επιτήρηση σε σταθερές εγκαταστάσεις στον ωκεανό. Αυτό συνήθως έχει ένα πλεονέκτημα έναντι των συστοιχιών που τοποθετούνται σε ένα πλοίο, καθώς ο ίδιος ο θόρυβος του πλοίου έχει αφαιρεθεί. Εντούτοις, η ενεργή επιτήρηση μεγάλης εμβέλειας απαιτεί συνδυασμό χαμηλής συχνότητας και υψηλής ισχύος που δημιουργεί δύο σημαντικά προβλήματα σχεδίασης.

1. Ο ελληνικός όρος είναι ηχοπλοήγηση, αλλά στη συνέχεια θα χρησιμοποιείται ο όρος σόναρ.[7]

Το πρώτο αφορά τους μεμονωμένους εκπομπούς, επειδή πρέπει να λειτουργούν κοντά στον συντονισμό για να ακτινοβολούν σε υψηλή ισχύ, ενώ είναι μεγάλοι, βαρείς και δαπανηροί. Το δεύτερο πρόβλημα προκύπτει όταν οι εκπομποί είναι πλησίον της συστοιχίας, οπότε ο καθένας επηρεάζει όλους τους άλλους. Αυτές οι ακουστικές αλληλεπιδράσεις ή συζεύξεις περιπλέκουν την ανάλυση και το σχεδιασμό των συστοιχιών, αλλά είναι σημαντικές επειδή μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα. Για παράδειγμα, η σύζευξη μπορεί να μειώσει τη συνολική μηχανική αντίσταση ορισμένων μετατροπών, στο σημείο που η ταχύτητά τους γίνεται αρκετά υψηλή ώστε να προκαλέσει μηχανική βλάβη.

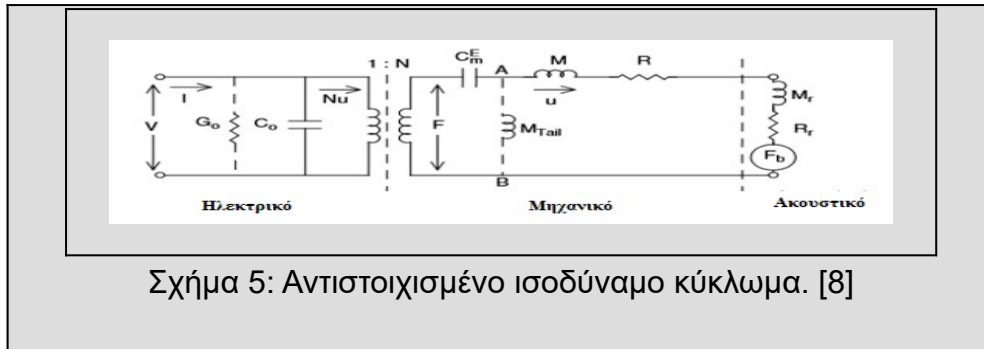
Τα χαρακτηριστικά όπως το πλάτος της δέσμης, που είναι ορισμένα για έναν μεμονωμένο μορφοτροπέα, μπορούν να αλλαχθούν για συστοιχίες ρυθμίζοντας τα σχετικά πλάτη και φάσεις των μεμονωμένων μορφοτροπών. Για παράδειγμα, τα πλάτη των μεμονωμένων μορφοτροπών μπορούν να ρυθμιστούν για να μειώσουν τους πλευρικούς λοβούς σε σχέση με τον κύριο λοβό (σκίαση) ή οι φάσεις μπορούν να ρυθμιστούν για να κατευθύνουν τη δέσμη. Τόσο οι ενεργές όσο και οι παθητικές συστοιχίες παρουσιάζουν επίσης το πρόβλημα των πτερυγίων, των λοβών κοντά στο υψηλότερο άκρο μιας ζώνης συχνοτήτων, όπου οι έξοδοι των μορφοτροπών μπορούν να συνδυαστούν για να σχηματίσουν λοβούς τόσο μεγάλους όσο ο κύριος λοβός σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις.

Η αύξηση του εύρους ζώνης των ενεργών συστοιχιών αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση επειδή το άκρο υψηλής συχνότητας περιορίζεται από το πλέγμα των λοβών, ενώ το άκρο χαμηλής συχνότητας περιορίζεται από τις ακουστικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μετατροπών. Στις ενσωματωμένες παθητικές συστοιχίες, η δυνατότητα διάκρισης έναντι του εσωτερικού θορύβου και του περιβαλλοντικού θορύβου είναι κρίσιμης σημασίας. Η θωράκιση και ο θόρυβος της κατασκευής που διεγείρονται από την ροή και το μηχανήμα είναι πιο σημαντικοί από τον θόρυβο της θάλασσας εκτός από την πολύ χαμηλή ταχύτητα. Οι ρυμουκούμενες παθητικές συστοιχίες μειώνουν τον θόρυβο του πλοίου, αλλά περιορίζονται από το δικό τους θόρυβο.

1.4. Βασικά Ισοδύναμα Κυκλώματα, λειτουργία ως προβολείς, υδρόφωνα

Τα ηλεκτρικά ισοδύναμα κυκλώματα είναι μια εναλλακτική αναπαράσταση μετατροπών που μπορούν να συνδυαστούν με κυκλώματα ενίσχυσης ισχύος και άλλα ηλεκτρικά κυκλώματα για μια πληρέστερη αναπαράσταση συστημάτων. Επιπλέον, παρέχουν μια οπτική εναλλακτική λύση σε μια αναλυτική αναπαράσταση των επιμέρους τμημάτων και

των διασυνδέσεων του μορφοτροπέα. Το απλούστερο ισοδύναμο κύκλωμα, χρησιμοποιεί ηλεκτρικά στοιχεία όπως επαγωγείς, αντιστάσεις και πυκνωτές για να αντιπροσωπεύουν τη μάζα, την αντίσταση και τη σταθερά ελατηρίου αντίστοιχα, καθώς και την τάση V και το ρεύμα I για να αντιπροσωπεύει τη δύναμη F και την ταχύτητα u (βλέπε σχήμα 5). [8]



Σχήμα 5: Αντιστοιχισμένο ισοδύναμο κύκλωμα. [8]

Τα ενεργά συστήματα σόναρ και ακουστικής επικοινωνίας βασίζονται σε ηλεκτροακουστικούς μορφοτροπέες οι οποίοι "προβάλλουν" ήχο, ο οποίος στη συνέχεια ανιχνεύεται από υδρόφωνα μέσω μιας απλής διαδρομής ή ανάκλασης από έναν στόχο. Ο προβολέας είναι σημαντικά μεγαλύτερος και πιο πολύπλοκος από το υδρόφωνο λόγω της ανάγκης να δημιουργηθεί υψηλή ακουστική ένταση. Λόγω της αμοιβαίας φύσης των μετατροπών, οι υποκείμενες έννοιες ισχύουν και για τα υδρόφωνα, αν και οι λεπτομέρειες ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά.

Οι ναυτικές εφαρμογές παρουσιάζουν τις κύριες ανάγκες για υποβρύχιους μεταλλάκτες ήχου και το κύριο κίνητρο για νέες εξελίξεις μετατροπών. Τα πλοία χρησιμοποιούν συστοιχίες συναρμολογημένες στο κύτος που περιέχουν εκατοντάδες προβολείς για σόναρ ενεργητικής αναζήτησης μέσης συχνότητας και σόναρ υψηλής συχνότητας. Παρόμοιες συστοιχίες τοποθετούνται επίσης σε συρόμενα σώματα. Άλλοι προβολείς χρησιμοποιούνται σε επιφανειακά πλοία για την υλοποίηση των ακουστικών επικοινωνιών και για τον ακουστικό προσδιορισμό του βάρους.

Τα υποβρύχια, που εξαρτώνται από τον υποβρύχιο ήχο περισσότερο από άλλα σκάφη, χρησιμοποιούν όλους τους παραπάνω τύπους σόναρ, αλλά χρειάζονται επίσης σόναρ για αποφυγή εμποδίων και πλοήγηση κάτω από πάγο. Οι υποβρύχιοι μορφοτροπέες πρέπει επίσης να είναι σε θέση να λειτουργούν σε ευρύ φάσμα υδροστατικής πίεσης. Η ευρεία χρήση ενεργού σόναρ παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πρόκληση στην ανάπτυξη μετατροπέα, λόγω της ανάγκης για υψηλή ισχύ σε χαμηλή συχνότητα. Τα υποβρύχια συστήματα

επικοινωνίας απαιτούν μετατροπείς εγκατεστημένους στο πλοίο, αλλά περιλαμβάνουν επίσης δίκτυα σταθερών μετατροπέων με ειδικές απαιτήσεις. Επιπλέον, υπάρχουν πολλές μη στρατιωτικές εφαρμογές για υποβρύχιους μορφοτροπείς ήχου, όπως η βαθυτυπία, η χαρτογράφηση πυθμένα, η ανίχνευση πυθμένα, η σεισμογραφία (βλέπε σχήμα 6).



Ανάλογα με το επίπεδο της πηγής, το εύρος ζώνης και τις απαιτήσεις του συστήματος, οι προβολείς μπορούν να πάρουν διάφορες γεωμετρικές και μηχανικές μορφές όπως σφαίρες, κυλίνδρους, δακτυλίους, πιστόλια. Τα κεραμικά πλαστικά είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα για τον υποβρύχιο ήχο, λόγω των πολλών γεωμετρικών σχημάτων στα οποία μπορούν να κατασκευαστούν, των εξαιρετικών ηλεκτρομηχανολογικών ιδιοτήτων τους, των χαμηλών ηλεκτρικών τους δυνάμεων και της δυνατότητάς τους να δημιουργούν υψηλές δυνάμεις.

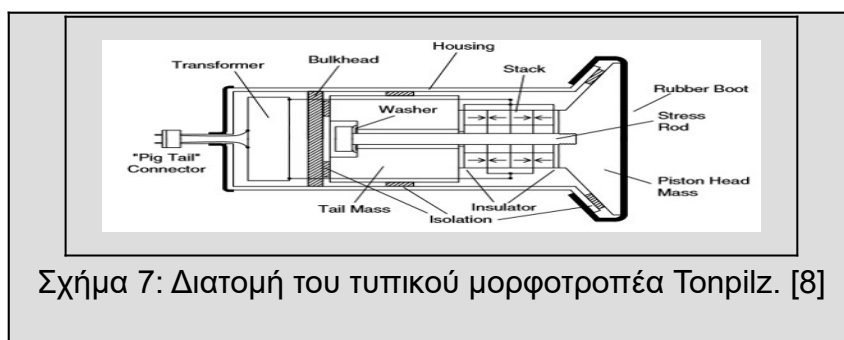
Η επιθυμητή απόδοση από έναν προβολέα είναι συνήθως υψηλή ισχύς ή ένταση, υψηλή απόδοση και ευρύ εύρος ζώνης, συνήθως με περιορισμούς ως προς το μέγεθος και το βάρος. Για την επίτευξη μεγαλύτερης έντασης και στενότερης ακουστικής δέσμης απαιτούνται συστοιχίες προβολέων. Οι προβολείς είναι στηλοειδείς στο σχήμα και έχουν μονή, διπλή ή τριπλή κατευθυντικότητα. Επίσης, έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν σχεδόν ομοιόμορφη κατεύθυνση και στις τρεις διαστάσεις, κάτι που συμβαίνει συχνά για μεταγωγείς μετατόπισης. Οι σφαιρικοί μορφοτροπείς είναι παντοδιαμορφωτικοί

για όλες τις συχνότητες, ενώ οι κυλινδρικοί μορφοτροπέες έχουν δύο διαστάσεων κατευθυντικότητα σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα, με κατεύθυνση σε οποιοδήποτε επίπεδο μέσω του άξονα. Ο κύλινδρος ή ο δακτύλιος είναι ένα κοινό πιεζοηλεκτρικό κεραμικό στοιχείο το οποίο, όταν έχει αξονική διάταξη και τοποθετείται μεταξύ δύο μαζών, σχηματίζει τον κοινό μορφοτροπέα εμβόλου Tonpilz. Ο μορφοτροπέας αυτός, προσεγγίζει ένα μονόδρομο μοτίβο δέσμης όταν το μέγεθος της μία μάζας είναι μεγαλύτερο από ενάμιση μήκος κύματος. Μεγάλες συστοιχίες μορφοτροπέων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουν μια περισσότερο κατευθυντική, μονόδρομη δέσμη.

Οι αισθητήρες επικοινωνίας είναι συνήθως παντοδιαμορφείς στο οριζόντιο επίπεδο, αλλά έχουν μειωμένη κατακόρυφη ακτινοβολία. Το βάθος λειτουργίας επηρεάζει την απόδοση ενός προβολέα, δεδομένου ότι τα υλικά ακουστικής απομόνωσης χάνουν γενικά τη συμπιεστότητα τους, λόγω της υψηλής υδροστατικής πίεσης που δέχονται. Η ακουστική απομόνωση είναι απαραίτητη για την αποφυγή των δονήσεων από την επικοινωνία με το περίβλημα του μετατροπέα.

Οι ιδιότητες του πιεζοηλεκτρικού κεραμικού μπορούν επίσης να αλλάξουν λόγω της υψηλής υδροστατικής πίεσης. Η λύση είναι η ελεύθερη ροή, όπου η υδροστατική πίεση είναι η ίδια στο εσωτερικό και στο εξωτερικό, αλλά το μοτίβο ακτινοβολίας του δεν είναι βολικό για τη διαμόρφωση συστοιχιών. Η συχνότητα λειτουργίας αναλόγως της εφαρμογής, είναι σημαντική για τον τύπο μετατροπέα που απαιτείται. Εάν ο μορφοτροπέας πρόκειται να λειτουργήσει σε χαμηλές συχνότητες, καμπτήρες ή μετασχηματιστές μετατόπισης, είναι οι πλέον κατάλληλοι.

Στο άλλο άκρο της μεγάλης συχνότητας λειτουργίας, οι μεταγωγείς πρέπει να τείνουν να είναι ελαφρώς διαφορετικοί από τον τύπο με κεραμικό μέταλλο. Ο πιο συνηθισμένος μετατροπέας για ζώνες μεσαίας συχνότητας είναι ο Tonpilz (βλέπε σχήμα 7).



Αυτοί είναι οι μετατροπέες που χρησιμοποιούνται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο για

μεγαλύτερη ευαισθησία στην κατεύθυνση της κίνησης. Η υψηλή ισχύς και η αποτελεσματικότητα αποτελούν σημαντικό παράγοντα για τον προβολέα, κάτι που είναι δύσκολο να επιτευχθεί εάν απαιτείται επίσης ευρυζωνική λειτουργία.

Η ανάγκη για υψηλότερη απόδοση έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη του μαγνητοσυστολικού υλικού Terfenol-D, του ηλεκτροσυστολικού υλικού PMN και του ηλεκτροσυστολικού υλικού PMN-PT. Οι απλοί κρύσταλλοι PMN-PT έχουν εμφανίσει εξαιρετικά υψηλές συντελεστές συζεύξεως υλικών.

Οι προβολείς υψηλής ισχύος λειτουργούν συχνά κοντά στον συντονισμό όπου η κίνηση εξόδου μεγιστοποιείται. Σε αυτή τη συχνότητα η μηχανική μάζα και η ευαισθησία στην περιοχή ισχύος ακυρώνονται και, εάν η μεταγωγή είναι επίσης ηλεκτρικά συντονισμένη, η ηλεκτρική αντίσταση εισόδου ισούται με την αντίσταση συντονισμού. Στις συχνότητες εκτός συντονισμού η αντίσταση αλλάζει, μειώνοντας τον συντελεστή ισχύος και αυξάνοντας το λόγο, τάσης προς ρεύμα, που απαιτείται για μια δεδομένη έξοδο ισχύος. Οι μορφοτροπείς με υψηλό συντελεστή σύζευξης απαιτούν μικρότερο όγκο κατασκευής και κατά συνέπεια μικρότερη ισχύ για μια δεδομένη έξοδο ισχύος.

Όλες οι εφαρμογές υποβρύχιων απαιτούν επίσης τη χρήση υδροφώνων. Στα περισσότερα ενεργά συστήματα σόναρ, οι ίδιοι μετατροπείς χρησιμεύουν τόσο για προβολείς όσο και για υδρόφωνα, αλλά υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά υδρόφωνα για λήψη, ενώ ως παθητικό σόναρ, χρησιμοποιούνται μόνο υδρόφωνα. Τα υδρόφωνα ανιχνεύουν τις μεταβολές πίεσης των ακουστικών σημάτων και του θορύβου στο νερό και παράγουν τάση εξόδου ανάλογη προς την πίεση.

Ο εσωτερικός θόρυβος που παράγεται από ένα υδρόφωνο μπορεί να συγκριθεί με τον θόρυβο της θάλασσας. Τα υδρόφωνα είναι συνήθως μικρότερα και απλούστερα από τους προβολείς, αλλά, δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ισχύει η αμοιβαιότητα, τα μοντέλα μετασχηματιστών και τα σχέδια προβολέα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για υδρόφωνα. Ο κοινώς χρησιμοποιούμενος σχεδιασμός του μετατροπέα Tonpilz είναι πολύ αποτελεσματικός ως προβολέας υψηλής ισχύος, αλλά συνήθως δεν είναι ο πλέον κατάλληλος σχεδιασμός για ένα μόνο υδρόφωνο ή για συστοιχίες υδροφώνων που προορίζονται μόνο για παθητικό σόναρ.

Όλοι οι μηχανισμοί μετατροπών θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως υδρόφωνα, αλλά τα πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών κεραμικών είναι τόσο μεγάλα που

κυριαρχούν στις εφαρμογές υδροφώνων.

Υπάρχουν υδρόφωνα που είναι ευαίσθητα στην πίεση και τη βάρθρωση της πίεσης (ή την ταχύτητα) καθώς και εκείνα που είναι ευαίσθητα στις κλίμακες δόνησης και μπορούν να διεγείρονται από το ακουστικό σήμα. Τα ευαίσθητα στην πίεση υδρόφωνα είναι τα πιο κοινά και λειτουργούν κανονικά κάτω από το συντονισμό, όπου η απόκριση τους είναι ανεξάρτητη από την συχνότητα. Σε γενικές γραμμές η ευαισθησία, εξαρτάται από την συχνότητα, την διεύθυνση του κύματος, τις ιδιότητες του δραστικού υλικού, όπως είναι η ακτινοβολία και η γεωμετρία του υδροφώνου.

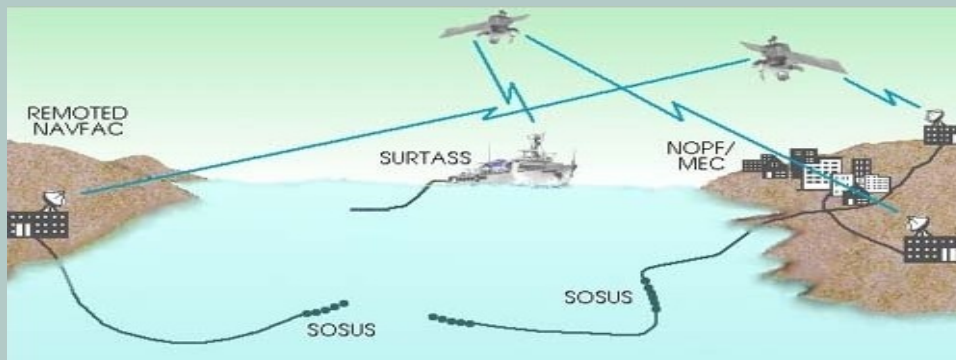
2. Συστήματα Ανίχνευσης με ακουστικούς αισθητήρες

2.1. Υπάρχοντα συστήματα ανίχνευσης

Η ιστορία του συστήματος ηχητικής παρακολούθησης (sound surveillance system (SOSUS)) ξεκίνησε το 1949, όταν το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ συγκρότησε την επιτροπή για τον υποθαλάσσιο πόλεμο (Undersea Warfare) για την έρευνα του ανθυποβρυχιακού πολέμου. Η επιτροπή ασχολήθηκε με την ανάπτυξη των συστημάτων αντιμετώπισης των σοβιετικών υποβρυχίων, που συνίστατο κυρίως σε μεγάλο στόλο υποβρυχίων ντίζελ. Αποφάσισαν να δημιουργήσουν ένα σύστημα παρακολούθησης του ήχου χαμηλής συχνότητας (Sound Fixing and Ranging channel (SOFAR)), χρησιμοποιώντας πολλαπλές θέσεις ακρόασης εξοπλισμένες με υδρόφωνα και μια μονάδα επεξεργασίας που θα μπορούσε να ανιχνεύσει υποβρύχιες θέσεις με τριγωνισμό σε εκατοντάδες μίλια.[10]

Τα ανωτέρω συστήματα, αποτελούνταν από πυκνές σειρές υδροφώνων συνδεδεμένες με υποβρύχια καλώδια σε εγκαταστάσεις στην ξηρά. Οι επιμέρους συστοιχίες εγκαταστάθηκαν κυρίως σε ηπειρωτικές πλαγιές και αποβάθρες, σε τοποθεσίες που βελτιστοποιήθηκαν για ακουστική διάδοση μεγάλης εμβέλειας. Ο συνδυασμός της θέσης στον ωκεανό και η ευαισθησία των συστοιχιών, επέτρεψαν στο σύστημα να ανιχνεύσει ακουστική ισχύ μικρότερη από ένα watt, σε εύρος αρκετών εκατοντάδων χιλιομέτρων.

Το ρυμουλκούμενο σύστημα συστοιχίας αισθητήρων παρακολούθησης (Surveillance Towed Array Sensor System (SURTASS)) αποτελεί στοιχείο του ολοκληρωμένου συστήματος υποθαλάσσιας επιτήρησης, το οποίο παρέχει εντοπισμό, παρακολούθηση και αναφορά υποβρυχίων σε μεγάλη απόσταση. [11] Το σύστημα αυτό, αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ως το μέσο που παρέχει ανίχνευση μεγάλου εύρους για πλατφόρμες τακτικών όπλων τόσο έναντι των υποβρυχίων που κινούνται με ντίζελ όσο και με πυρηνικά. Τα δεδομένα μεταδίδονται από το πλοίο στην ακτή για την περαιτέρω ακουστική επεξεργασία τους, μέσω δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας (βλέπε σχήμα 8).



Σχήμα 8: Αμερικάνικο υποβρύχιου σύστημα παρακολούθησης ήχου SOSUS. [10]

Και άλλες χώρες συνέχισαν, καθώς το ρωσικό υπουργείο άμυνας ξεκίνησε την εγκατάσταση ενός υποβρύχιου συστήματος υδροακουστικής παρακολούθησης ικανού να ανιχνεύει όλα τα πλοία, τα υποβρύχια, τα αεροσκάφη χαμηλού ύψους και τα ελικόπτερα σε μεγάλες περιοχές του ωκεανού.

Επίσης, η Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας λειτουργεί δύο υποβρύχιους αισθητήρες από το 2016 (Υποβρύχιο Σινικό Τείχος), που βρίσκονται στο Challenger Deep και στο νησί Υαρ της Μικρονησίας. Οι αισθητήρες έχουν ακουστική εμβέλεια για να ανιχνεύσουν την κίνηση στη ναυτική βάση Γκουάμ και σύμφωνα με πληροφορίες ενδέχεται να επιτρέψουν στην Κίνα να παρακολουθήσει τις κινήσεις του Πολεμικού Ναυτικού των Ηνωμένων Πολιτειών, συμπεριλαμβανομένων των υποβρυχίων του.

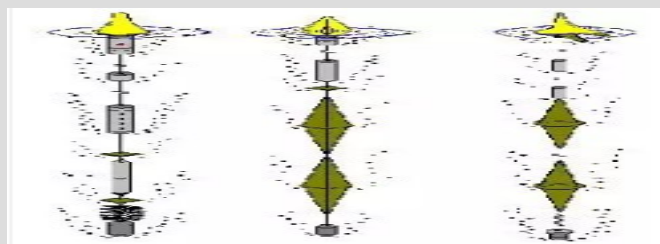
2.2. Αναλώσιμα συστήματα σόναρ

Τα πρώτα αναλώσιμα συστήματα σόναρ, εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου και είχαν διαφορετικό τρόπο λειτουργίας με τα σημερινά, καθώς δεν αναπτύσσονταν κατά την επαφή τους με το νερό αλλά ήταν ρυμουλκούμενα από πλοία. [18] Τα σημερινά αναλώσιμα συστήματα σόναρ τα οποία αποθηκεύονται και ρίπτονται στη θάλασσα, συνήθως με αεροπλάνο ή ελικόπτερο, είναι συσκευασμένα με τυποποιημένο τρόπο (βλέπε σχήμα 9), και μπορούν να είναι ενεργητικού και παθητικού τύπου. Ένα τέτοιο σύστημα ονομάζεται ηχοσημαντήρας, αναπτύσσεται κατά την επαφή του με το νερό και αποτελείται από δύο τμήματα.



Σχήμα 9: Ένα αεροσκάφος που πραγματοποιεί ρίψη ηχοσημαντήρων.
[13]

Τα πρώτο τμήμα είναι ο φουσκωτός πλωτήρας, ο οποίος παραμένει στην επιφάνεια για την επικοινωνία, μέσω ραδιοπομπού, με το αεροσκάφος/ελικόπτερο και το δεύτερο οι υποβρύχιοι παθητικοί/ενεργητικοί αισθητήρες με τον εξοπλισμός σταθεροποίησης, συνδεδεμένοι με συρματόσχοινο, οι οποίοι βυθίζονται κάτω από την επιφάνεια σε επιλεγμένο βάθος (βλέπε σχήμα 10).



Σχήμα 10: Στάδια ανάπτυξης ηχοσημαντήρα μετά την πρόσκρουση του νερού. [14]

Ένα τέτοιο αναλώσιμο σύστημα, μπορεί να μεταβιβάζει, μέσω VHF, τις ακουστικές πληροφορίες που συλλέγει, σε μία μονάδα λήψης σημάτων που βρίσκεται κάποια άλλη τοποθεσία, για περαιτέρω επεξεργασία. Οι ηχοσημαντήρες, έχουν την δυνατότητα ομαδοποιημένης ανάπτυξης, προκειμένου να επιτυγχάνουν καλύτερη κατευθυντικότητα και ποικιλία διαμορφώσεων. Διακρίνονται σε ενεργούς και παθητικούς, και αναλόγως των χαρακτηριστικών τους μπορούν να παρέχουν πολλαπλές δυνατότητες, κυρίως όταν είναι οργανωμένα σε πολυστατική διάταξη.

Μία τέτοια διάταξη σε πολυστατική λειτουργία, μπορεί να επιτευχθεί όταν συνδυάζεται αριθμός ενεργητικών και παθητικών ηχοσημαντήρων, τοποθετημένοι σε διαφορετικές θέσεις. Για παράδειγμα, οι ενεργοί ηχοσημαντήρες μπορούν να διαταχθούν σε απόσταση από την ακτή προκειμένου να μειωθούν οι ανακλάσεις, χωρίς αυτό να εμποδίζει την ανάπτυξη των παθητικών πλησίον αυτής. Στην περίπτωση αυτή, οι ενεργοί ηχοσημαντήρες πραγματοποιούν την εκπομπή και στη συνέχεια οι παθητικοί λαμβάνουν τα σήματα που ανακλώνται από κάποια θαλάσσια πηγή θορύβου. Επίσης μπορούν να συνεργαστούν και με άλλες, σταθερές και μη διατάξεις, εφόσον είναι διαθέσιμη η απαιτούμενη υποδομή κοινής επεξεργασίας.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της πολυστατικής διάταξης είναι η αυξημένη πιθανότητα εντοπισμού κάποιας υποθαλάσσιας πηγής θορύβου. Αυτό συμβαίνει κυρίως, λόγω του συνδυασμού των ενεργών με τους παθητικούς ηχοσημαντήρες, ώστε να καλύπτουν το μεγαλύτερο δυνατό εύρος της περιοχής ενδιαφέροντος, με την εμφάνιση του μικρότερου δυνατού αριθμού νεκρών ζωνών (shadow zones).[12]

2.3. Αιγαίο Πέλαγος και εντοπισμός υποθαλάσσιου θορύβου

Το Αιγαίο Πέλαγος, παρουσιάζει βάθος μεγαλύτερο των 200 μέτρων στο μεγαλύτερο ποσοστό του, εκτενείς περιοχές βάθους μεγαλύτερου των 750 μέτρων και υποθαλάσσιο ανάγλυφο με κατά τόπους μεγάλες κλίσεις και συχνές μεταβολές. Επίσης, χρήζουν ενδιαφέροντος κάποια επιπρόσθετα χαρακτηριστικά του, τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν στην προσπάθεια εντοπισμού υποθαλάσσιων πηγών θορύβου στην περιοχή αυτή. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι:

1. Η μεγάλη ακτογραμμή και κυρίως ο μεγάλος αριθμός νησιών, νησίδων, βραχονησίδων και βράχων, τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν υψηλό επίπεδο ανακλάσεων,

επηρεάζοντας έτσι την ομαλή διάδοση των ηχητικών κυμάτων.

2. Η έντονη επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας συντελεί στην ανάπτυξη, σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους εντός του έτους, ενός ισόθερμου στρώματος στην επιφάνεια της θάλασσας, εύρους λίγων μέτρων, καθώς και του θερμοκλινούς, εντός του οποίου παρατηρείται απότομη πτώση της θερμοκρασίας. Η ύπαρξη των διαφορετικών στρωμάτων συντελεί στη δημιουργία ενός μεταβαλλόμενου προφίλ για την ταχύτητα μετάδοσης του ήχου σε συνάρτηση με το βάθος, περιορίζοντας έτσι την κατακόρυφη διάδοση των ηχητικών σημάτων, συντελώντας έτσι στη δημιουργία πολλαπλών ηχητικών διαδρομών. Επίσης η χωρική μεταβολή της πυκνότητας του αλατιού, επηρεάζει αν και σε μικρότερο βαθμό, τη μεταβολή της ταχύτητας του ήχου στο νερό.

3. Ο μεγάλος βαθμός της ναυτιλιακής κίνησης σε συνδυασμό με τις παράκτιες δραστηριότητες δημιουργούν ένα υψηλό θόρυβο περιβάλλοντος ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες μέχρι και 500 Hz.

4. Η εμφάνιση έντονων καιρικών φαινομένων και ειδικότερα ανέμους υψηλής ταχύτητας, που προκαλούν περαιτέρω θόρυβο στις συχνότητες από 500 Hz έως 10 kHz. Επίσης δημιουργείται θόρυβος από τον κυματισμό και τη βροχή.

5. Η μη ομοιογενής σύσταση του πυθμένα καθώς και το πλήθος των ναυαγίων και άλλων αντικειμένων που επικάθονται σε αυτό, ευνοούν τη δημιουργία περιβάλλοντος πολλαπλών ανακλάσεων.

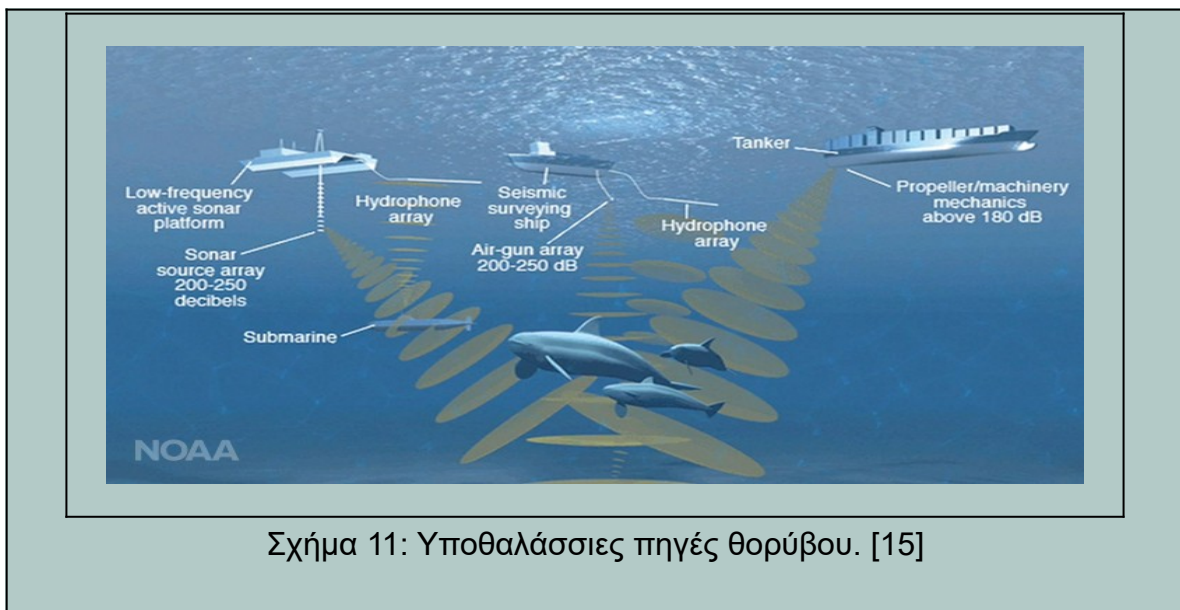
Συμπερασματικά, το Αιγαίο Πέλαγος αποτελεί ένα αντίξοο περιβάλλον από πλευράς ακουστικής, το οποίο δυσχεραίνει τον εντοπισμό υποθαλάσσιων πηγών θορύβου. Ωστόσο, μέσω της γνώσης όλων αυτών των παραγόντων που επηρεάζουν τον εντοπισμό σε συνδυασμό με την πολυστατική διάταξη, που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι δυνατόν να αυξηθούν σημαντικά οι πιθανότητες εντοπισμού υποθαλάσσιων πηγών θορύβου στην περιοχή αυτή.

3. Θόρυβος

3.1. Υποβρύχιος θόρυβος περιβάλλοντος

Τα θαλάσσια θηλαστικά, πολλά είδη ψαριών και ακόμη και ορισμένα ασπόνδυλα χρησιμοποιούν ήχους για την επικοινωνία τους, καθώς και για να αναζητήσουν θηράματα, να αποφύγουν τους θηρευτές και για την ναυσιπλοΐα τους.

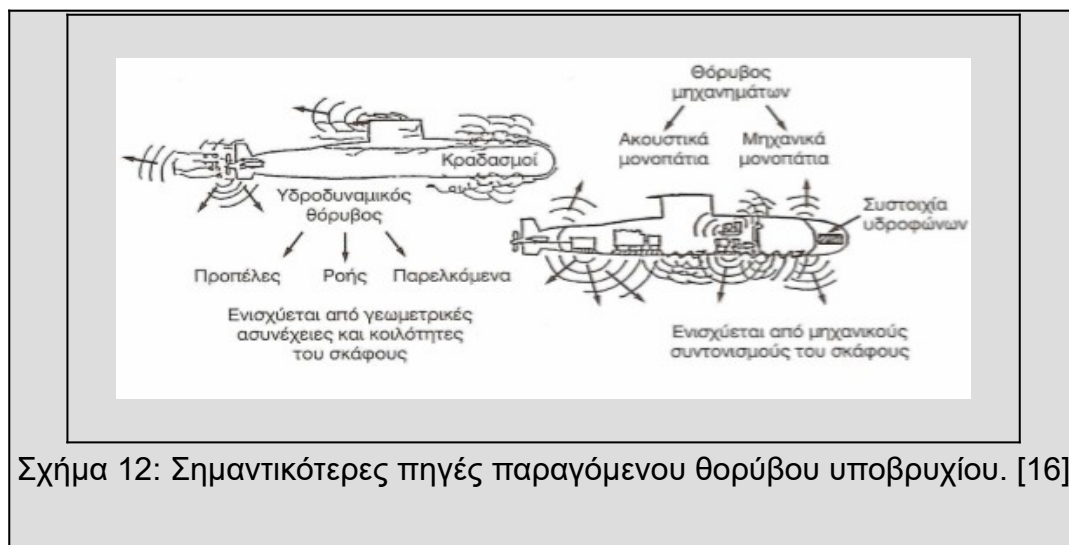
Πολλές από τις ανθρώπινες δραστηριότητες που πραγματοποιούνται στη θαλάσσια περιοχή OSPAR (σύμβαση Oslo/Paris για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος του Βορειοανατολικού Ατλαντικού) παράγουν ήχο και συμβάλλουν στο γενικό επίπεδο υποβάθρου του θορύβου στη θάλασσα. Οι ανθρωπογενείς πηγές ήχου κατηγοριοποιούνται ως περιστασιακές και συνεχείς (περιβάλλοντος). Οι περιστασιακές πηγές ήχου περιλαμβάνουν την κρουστική κίνηση που προκαλείται από παράκτιες και υπεράκτιες κατασκευές (πχ. Ανεμογεννήτριες), σεισμικές έρευνες (χρησιμοποιώντας αεροβόλα) για να επιθεωρήσουν υποθαλάσσια κοιτάσματα πετρελαίου και αερίου, εκρήξεις και ορισμένες πηγές σόναρ. Οι συνεχείς πηγές ήχου προέρχονται κυρίως από τη ναυτιλία και την αλιεία. Ο ήχος αναφέρεται ως «θόρυβος» μόνο όταν έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή (βλέπε σχήμα 11).



Ο υποβρύχιος ήχος από ανθρωπογενείς πηγές έχει τη δυνατότητα να αποκρύπτει βιολογικά σήματα και να προκαλεί αντιδράσεις συμπεριφοράς, τραυματισμούς και θνησιμότητα στα θαλάσσια ζώα.

3.2. Πηγές Αυτοθορύβου Υποβρυχίων

Επιλέχθηκε η ανάλυση του αυτοθορύβου των υποβρυχίων, ως χαρακτηριστικό παράδειγμα υποθαλάσσιας πηγής θορύβου, καθώς διαθέτουν πολλά μηχανολογικά και ηλεκτρολογικά συστήματα που παράγουν θόρυβο, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων σόναρ. Οι βασικές αρχές που διέπουν τον αυτοθόρυβο των υποβρυχίων, ισχύουν και για όλες τις θαλάσσιες και υποθαλάσσιες πηγές θορύβου. Ο αυτοθόρυβος (self noise (SN)), προκαλείται από όλα τα συστήματα που διαθέτει και παράγουν θόρυβο, καθώς και από το ίδιο σύστημα sonar είτε από την πλατφόρμα / φορέα αυτού (βλέπε σχήμα 12). Κάθε υποβρύχιο πλοίο παράγει το δικό του αυτοθόρυβο, ο οποίος χαρακτηρίζει τόσο την κλάση / τύπο που ανήκει, όσο και τη συγκεκριμένη ταυτότητα του και μετράται με τη βοήθεια υδροφώνων τοποθετημένων επί του σκάφους.[16]



Οι συνηθέστερες πηγές αυτοθορύβου, είναι οι ακόλουθες:

1. Αυτοθόρυβος μηχανημάτων, ο οποίος προέρχεται από την κύρια πρόωση όπως στρόβιλοι, μηχανές Diesel, κύριοι άξονες και μειωτήρες αλλά και από τα βοηθητικά μηχανήματα όπως γεννήτριες, αντλίες, ανεμιστήρες, εξαεριστήρες, συμπιεστές. Επομένως, ο θόρυβος αυτός παράγεται από μηχανήματα που περιλαμβάνουν τμήματα

ευρισκόμενα σε περιστροφική ή παλινδρομική κίνηση, αφού υπάρχουν σε αυτά πάντοτε κάποια μη ζυγοσταθμισμένα κινούμενα μέρη (βλέπε σχήμα 13).



Οι ανισορροπίες που οδηγούν στην παραγωγή μηχανικών κραδασμών και απαιτούν ζυγοστάθμιση, είναι τριών ειδών :

α) Δυναμική ανισορροπία (dynamic imbalance), η οποία παρατηρείται σε όλα τα περιστρεφόμενα μηχανήματα, αφού ποτέ δεν είναι δυνατόν να έχουμε τέλεια ζυγοσταθμισμένους περιστρεφόμενους άξονες και απόλυτα προσαρμοσμένους, στις βάσεις στήριξης αυτών.

β) Κρουστική ανισορροπία (impulse imbalance), που παρατηρείται σε όλες τις παλινδρομικές / εμβολοφόρες μηχανές (Diesel).

γ) Ηλεκτρική ανισορροπία (electrical imbalance), παρατηρείται σε μαγνητικά και ηλεκτρικά κυκλώματα. Ο θόρυβος αυτός ακολουθεί διάφορα μονοπάτια μετάδοσης και τελικά εκπέμπεται στο νερό από την γάστρα του υποβρυχίου.

Αυτή η κατηγορία αυτοθορύβου, αποτελεί την επικρατέστερη μορφή στις χαμηλές ταχύτητες πλου, στις οποίες ο θόρυβος περιβάλλοντος συνήθως είναι υψηλότερος του αυτοθορύβου, και έχει τη μορφή διακριτών συχνοτήτων και ευρέος φάσματος ταυτόχρονα.

2. Θόρυβος προπελών, οι οποίες αποτελούν μία από τις βασικότερες αιτίες θορύβου (υδροδυναμικός θόρυβος, σπηλαίωση), λόγω της μη ομοιόμορφης ροής του νερού στην περιοχή τους (βλέπε σχήμα 14). Βασική συνιστώσα είναι ο θόρυβος σπηλαίωσης

(cavitation noise), ο οποίος αποτελεί έντονο, συνεχόμενο θόρυβο ευρέος φάσματος, επεκτεινόμενο ανάλογα με τη σχεδίαση της προπέλας μέσα σε μια μεγάλη περιοχή συχνοτήτων από 10 – 50 Hz έως και 100 kHz.



Ο ανωτέρω θόρυβος, οφείλεται στο σχηματισμό φυσαλίδων ατμού και διαλυμένων αερίων, όχι λόγω μεταβολής θερμοκρασίας, αλλά λόγω της απότομης υποπίεσης (κάτω από τη μέγιστη τάση ατμών και νερού) που αναπτύσσεται σε ορισμένες περιοχές από τη γρήγορη περιστροφική κίνηση της προπέλας. Η υποπίεση αυτή, ουσιαστικά κατεβάζει το σημείο βρασμού του νερού στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, οπότε οι σχηματιζόμενες φυσαλίδες αποτελούν κατά κύριο λόγο υδρατμούς (το νερό εξαερώνεται σε όλη του τη μάζα με μεγάλη ταχύτητα). Όταν πάψει το αίτιο που τις δημιούργησε, οι φυσαλίδες αυτές σκάνε βίαια (συμπυκνώνονται με μεγάλη ταχύτητα σε χρόνο 3 msec), προκαλώντας εκκωφαντικό θόρυβο. Οι μεγαλύτερες φυσαλίδες, προκαλούν θόρυβο στις χαμηλές συχνότητες, ενώ οι μικρότερες στις υψηλές συχνότητες. Ο θόρυβος αυτός επικρατεί στις υψηλές ταχύτητες, και συγκεκριμένα πάνω από την λεγόμενη ταχύτητα σπηλαιώσης.

Η σπηλαιώση αυξάνει σημαντικά τους μηχανικούς κραδασμούς ολόκληρου του σκάφους, αφού το νερό που σχηματίζεται από την απότομη συμπύκνωση των υδρατμών προσκρούει στις μεταλλικές επιφάνειες που συναντά (και ταυτόχρονα τις διαβρώνει). Η διαμόρφωση του σχήματος της πρύμνης, καθώς και το διάστημα μεταξύ των άκρων των πτερυγίων και της γάστρας του υποβρυχίου αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες διέγερσης των τοιχωμάτων του υποβρυχίου. Η εμφάνιση της σπηλαιώσης, εξαρτάται εκτός

από την ταχύτητα, και από την υδροστατική πίεση, τη σχεδίαση και την κατάσταση των πτερυγίων.

Η σπηλαίωση διακρίνεται σε δυο βασικούς τύπους, τον tip vortex cavitation (εμφανίζεται στα άκρα των πτερυγίων όπου παρατηρείται η υψηλότερη ταχύτητα κίνησης) και στο σημαντικότερο τύπο sheet cavitation (οφείλεται στις ίδιες επιφάνειες των πτερυγίων). Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, αρχικά εμφανίζεται το πρώτο και στη συνέχεια το δεύτερο είδος σπηλαίωσης που είναι το σημαντικότερο αφού παράγει τον εντονότερο θόρυβο.

Γενικά, ο θόρυβος σπηλαίωσης λειτουργεί ως φέρον το οποίο διαμορφώνεται κατά πλάτος (blade beat noise) ανάλογα με τον αριθμό των προπελών, της ταχύτητας περιστροφής και του αριθμού των πτερυγίων της κάθε προπέλας. Κατά την αποδιαμόρφωση του θορύβου σπηλαίωσης, προκύπτουν χρήσιμα στοιχεία αναγνώρισης του τύπου και της ταχύτητας κίνησης του υποβρυχίου.

Οι προπέλες παράγουν επίσης και το γνωστό φαινόμενο συριγμού (singing propellers), σε μορφή μιας σειράς πολύ κοντινών μεταξύ τους διακριτών συχνοτήτων, με θεμελιώδη συχνότητα την τιμή της Propeller Shaft Rate (PSR).

Προέρχεται από τις έντονες μηχανικές ταλαντώσεις των πτερυγίων στις συχνότητες ιδιοσυντονισμού αυτών, όταν διεγερθούν είτε υδροδυναμικά (λόγω της μεταβαλλόμενης πίεσης), είτε από τον κύριο μειωτήρα μέσω του προωστηρίου άξονα. Το φαινόμενο εμφανίζεται εντονότερο σε συγκεκριμένες ταχύτητες περιστροφής της προπέλας (συνήθως πριν την εμφάνιση της σπηλαίωσης) και οι παραγόμενες συχνότητες κυμαίνονται στην περιοχή από 90 Hz έως 2 kHz, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου / προπέλας. Στους περισσότερους τύπους πλοίων, το φαινόμενο αυτό έχει περιστασιακή εμφάνιση και στα υδρόφωνα ακούγεται ως οξύς συριγμός.

Τέλος, σε ορισμένες περιπτώσεις (πχ πυρηνικά υποβρύχια και πολεμικά πλοία επιφανείας) εμφανίζεται το λεγόμενο φαινόμενο ράβδωσης (striation). Αυτό, παρατηρείται στα διαγράμματα χρόνου – συχνότητας (lofargram) κατά την διάρκεια της σπηλαίωσης, υπό τη μορφή κάποιας σειράς κεκλιμένων διακριτών γραμμών λίγο πάνω από τη θεμελιώδη συχνότητα περιστροφής των πτερυγίων BR (Blade Rate). Οι γραμμές αυτές, παρουσιάζουν κάποια κλίση προς ή από τη θεμελιώδη τιμή BR, ανάλογα με το εάν η πηγή πλησιάζει ή απομακρύνεται από τον αισθητήρα sonar (υδρόφωνα). Το φαινόμενο αυτό, πιθανόν οφείλεται στην πολλαπλή ηχητική διάδοση (multipath) ορισμένων συνιστωσών της παραγόμενης ακουστικής υπογραφής του στόχου.

3. Υδροδυναμικός θόρυβος (flow noise), ευρέος φάσματος, ο οποίος παράγεται από την σχετική κίνηση του νερού γύρω στην περιοχή του προβολέα, της συστοιχίας υδροφώνων, τη γάστρα του σκάφους ή την κατακόρυφη κίνηση των ηχοσημαντήρων μέσα στο νερό. Ο θόρυβος αυτός, έχει σχέση και με την παραγωγή του κύματος πλώρης και των απόνερων (wake). Αυξάνεται με την ταχύτητα του σκάφους και την ύπαρξη ρύπανσης στη γάστρα ιδιαίτερα στην περιοχή του θόλου του συστήματος σόναρ. Η τυρβώδης ροή του ύδατος (turbulent flow) προκαλεί επί πλέον ταλαντώσεις των εξωτερικών επιφανειών της γάστρας. Ο υδροδυναμικός θόρυβος μειώνεται με την καλύτερη σχεδίαση της γάστρας, έτσι ώστε αυτή να διαθέτει ομαλές γραμμές χωρίς απότομες μεταβολές κλίσης. Επίσης μειώνεται με την καλύτερη σχεδίαση της πλώρης, των πτερυγίων γάστρας και των διαφόρων εισαγωγών / εξαγωγών θαλάσσης.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των ελαστικών ή συνθετικών θόλων σόναρ έναντι των χαλύβδινων, είναι ο μειωμένος υδροδυναμικός θόρυβος που εμφανίζουν οι πρώτοι έναντι των δευτέρων.

Υδροδυναμικό θόρυβο παράγει ακόμη και η τυρβώδης ροή των ρευστών μέσα σε σωλήνες και αντλίες, η οποία εκτός από συνεχόμενο θόρυβο ευρέος φάσματος, μπορεί επίσης να οδηγήσει και στην παραγωγή συγκεκριμένων φασματικών γραμμών λόγω του συντονισμού δοκιμών τμημάτων της εγκατάστασης που τίθεται σε διέγερση.

4. Μεταβατικά σήματα (transients). Προέρχονται από αναπόφευκτες δραστηριότητες, όπως πχ χειρισμός πηδαλίων, κίνηση πτερυγίων stabilizers, άνοιγμα πωμάτων τορπιλοσωλήνων, λειτουργία κλαπέ αναπνευστήρα (snorket), εκβολές απορριμμάτων.

5. Λοιποί θόρυβοι, όπως μηχανικοί κραδασμοί, του καλωδίου ρυμούλκησης του θόλου VDS ή του towed array, θόρυβοι από δραστηριότητες του πληρώματος, οι οποίοι συνήθως δεν επηρεάζουν δραστικά την ακουστική υπογραφή ενός στόχου, καθώς και εσωτερικός αυτοθόρυβος ηλεκτρονικών κυκλωμάτων συστημάτων sonar. Συνήθως, ο θόρυβος αυτός βρίσκεται σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο από όλα τα υπόλοιπα είδη θορύβου (10-20 dB κάτω), και γι' αυτό δεν αποτελεί σοβαρό πρόβλημα στα συστήματα sonar. Ένας εξειδικευμένος τύπος θορύβου, αφορά σε προβλήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας ή γείωσης, και τα οποία ενδεχομένως είναι δυνατό κατά την λειτουργία της συσκευής sonar (ενεργητικής ή παθητικής), να εμφανίσουν μη υπαρκτούς στόχους.

3.3. Φάσμα εκπεμπόμενου θορύβου και σύγχρονα συστήματα

Ένα σύγχρονο συμβατικό υποβρύχιο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εκπέμπει θόρυβο ευρέως και στενού φάσματος κυρίως στην περιοχή συχνοτήτων μέχρι 1 kHz, με την ένταση του εκπεμπόμενου θορύβου (radiated noise) να είναι ανισομερής, τόσο ως προς τη συχνότητα όσο και ως προς την διεύθυνση. Το επίπεδο του θορύβου εξαρτάται κυρίως από την σχεδίαση του υποβρυχίου, την ταχύτητά του, το βάθος πλεύσης και την εκάστοτε κατάσταση λειτουργίας του (πχ. σε διαδικασία αναπνευστήρα) αλλά και από το επίπεδο συντήρησης και την γενικότερη καταπόνηση του σκάφους. [19]

Η εκπομπή ευρέος φάσματος προκύπτει κυρίως από την σπηλαιώση που προξενεί η γρήγορη περιστροφή της προπέλας και από τον υδροδυναμικό θόρυβο λόγω της κίνησης του υποβρυχίου. Σημειώνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις, η αύξηση της ταχύτητας δημιουργεί δυσανάλογα εντονότερα θόρυβο. Για παράδειγμα, ο υδροδυναμικός θόρυβος αυξάνεται ανάλογα της πέμπτης δύναμης της ταχύτητας πλεύσης του υποβρυχίου.

Οι εκπομπές στενού φάσματος προέρχονται από αιτίες όπως η περιστροφή της προπέλας, με διακριτές αιχμές σε πολύ χαμηλές συχνότητες που εξαρτώνται από τον αριθμό πτερυγίων της προπέλας και τον ρυθμό περιστροφής, το άνοιγμα της εξόδου ενός τορπιλοσωλήνα ή από την κίνηση των πτερυγίων πλοήγησης του υποβρυχίου και είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστικές κάθε σκάφους, αποτελώντας ουσιαστικά την ακουστική υπογραφή του. Γενικά, οι εκπομπές στενού φάσματος έχουν ιδιαίτερη σημασία καθώς επιτρέπουν την αναγνώριση και την ταυτοποίηση ενός στόχου αλλά και τον υπολογισμό της ταχύτητας του (εφόσον είναι γνωστός ο αριθμός των πτερυγίων της προπέλας και η σχέση μεταξύ ταχύτητας και ρυθμού περιστροφής) αρκετά συντομότερα από την ανάλυση Target Motion Analysis (TMA). Επίσης, η παρουσία και η γνώση τους επιτρέπει την αποτελεσματική απόρριψη του θορύβου εκτός του στενού φάσματος εκπομπής και κατά συνέπεια την αύξηση της ικανότητας αποκάλυψης του στόχου.

Η λειτουργία του πετρελαιοκινητήρα στη διαδικασία αναπνευστήρα δημιουργεί ένα ταυτόχρονο συνδυασμό διακριτών συχνοτήτων και θορύβου ευρέος φάσματος. Παρά τις σημαντικές προσπάθειες των τελευταίων ετών για τη μείωση του εκπεμπόμενου θορύβου με χρήση εξελιγμένων διατάξεων απόσβεσης και ενεργητικής καταστολής, η λειτουργία των κινητήρων Diesel εξακολουθεί και αποτελεί την εντονότερη πηγή εκπομπής θορύβου ενός συμβατικού υποβρυχίου. Πρακτικά, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του πετρελαιοκινητήρα η συνεισφορά των υπολοίπων πηγών (προπέλα, υδροδυναμική,

βοηθητικός εξοπλισμός) θεωρείται αμελητέα.

Σε αυτήν ακριβώς την παράμετρο βρίσκεται και η σημαντική υπεροχή των υποβρυχίων που είναι εξοπλισμένα με σύστημα αναερόβιας πρόωσης (Air-Independent Propulsion – AIP). Ένα υποβρύχιο εφοδιασμένο με σύστημα AIP, όταν κινείται με χρήση μόνο συσσωρευτών, εκπέμπει ακριβώς τον ίδιο θόρυβο με ένα ιδίου τύπου υποβρύχιο που δεν διαθέτει σύστημα αναερόβιας πρόωσης. Όμως, το υποβρύχιο AIP θα μπορεί να παραμείνει (στην περίπτωση AIP με κυψέλες καυσίμου PEM Fuel Cell) σχεδόν τετραπλάσιο χρόνο σε κατάδυση χωρίς ανάγκη μετάβασης σε περισκοπικό βάθος και εκτέλεσης αναπνευστήρα.

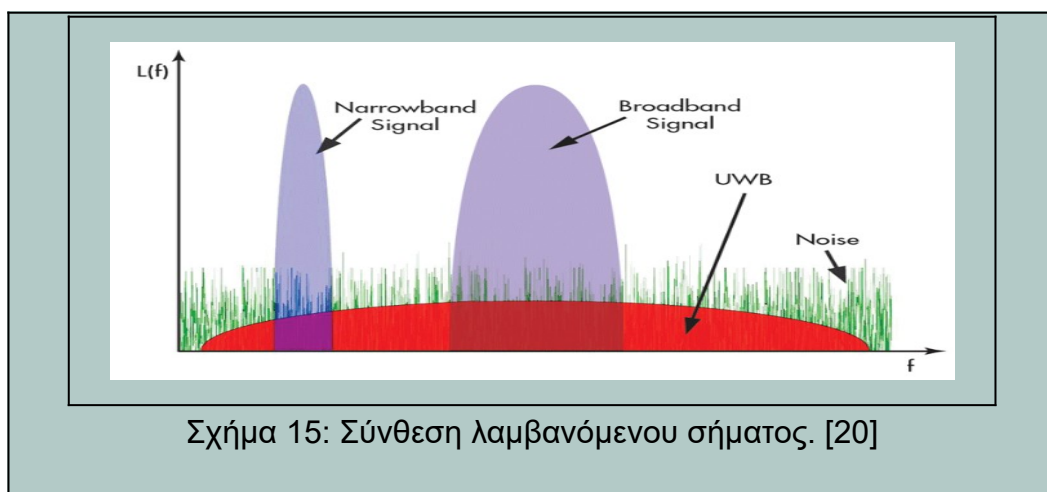
Σημειώνεται ότι ένα σύγχρονο συμβατικό υποβρύχιο χωρίς εξοπλισμό AIP, μπορεί να παραμείνει σε κατάδυση με τυπική επιχειρησιακή δράση, περίπου 48 ώρες χωρίς ανάγκη επαναφόρτισης των συσσωρευτών του. Ο ακριβής χρόνος εξαρτάται, εκτός από την ταχύτητα πλεύσης αλλά και τις μεταβολές βάθους, από την χρήση και την γενικότερη κατάσταση των συσσωρευτών. Για παράδειγμα, μία μικρής διάρκειας επιτάχυνση μπορεί να καταναλώσει μεγάλο ποσοστό της διαθέσιμης ενέργειας, ενώ η συνεχής πλεύση με ταχύτητα πχ. 20 κόμβων θα εξαντλήσει τους συσσωρευτές σε χρονικό διάστημα μικρότερο της μιας ώρας. Κανένας βέβαια κυβερνήτης υποβρυχίου δεν θα αφήσει, εφόσον έχει τη δυνατότητα, τη στάθμη ενέργειας των συσσωρευτών του σε επίπεδα κάτω του 50%. Συνήθως γίνεται ανάδυση σε περισκοπικό βάθος, έλεγχος με european stability mechanism (ESM) και διενέργεια αναπνευστήρα διάρκειας 10 – 15 λεπτών ανά 12 ώρες. Κατά τη διάρκεια της παραπάνω διαδικασίας, το υποβρύχιο είναι εξαιρετικά ευάλωτο αφού είναι σε μικρό βάθος και εκπέμπει υψηλής στάθμης θόρυβο, ενώ η έξοδος snorkel παρουσιάζει ηλεκτρομαγνητικό και θερμικό ίχνος. Παράλληλα, έχει δραστικά μειωμένη δυνατότητα εντοπισμού στόχων λόγω του υψηλού αυτοθορύβου. Είναι προφανές από τα παραπάνω, το καταλυτικό επιχειρησιακό πλεονέκτημα που προσδίδει ο τετραπλασιασμός του διαστήματος μεταξύ διενέργειας αναπνευστήρα.

3.4. Σύνθεση ακουστικού αποτυπώματος

Η λειτουργία ενός παθητικού σόναρ, αφορά την συλλογή ενός μεγάλου αριθμού ακουστικών σημάτων, τα περισσότερα εκ των οποίων είναι αδιάφορα, ενώ ένα περιορισμένο μέρος τους χαρακτηρίζονται ως ακουστικά σήματα ενδιαφέροντος. Τα

σήματα ενδιαφέροντος, τα οποία περιλαμβάνουν λίγες διακριτές συχνότητες των στόχων, βρίσκονται ενσωματωμένα σε ένα υπόβαθρο θορύβου. Ένα παθητικό σόναρ, προσπαθεί να ανιχνεύσει τα ενδιαφέροντα αυτά σήματα που βρίσκονται εντός του υποβάθρου, στα πλαίσια κάποιας δεδομένης χρονικής περιόδου. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, τα σήματα που λαμβάνει ένα σύστημα παθητικού σόναρ διακρίνονται σε (βλέπε σχήμα 15):

- Wideband-WB (ευρείας ζώνης), αποτελεί τον όλο θόρυβο μαζί με το σήμα ενδιαφέροντος (background noise και signal of interest).
- Broadband-BB (πλατιάς ζώνης), αποτελεί ένα μέρος του όλου θορύβου και περιλαμβάνει μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων (συνήθως μέχρι τα 3 kHz). Αυτός ο τύπος ενέργειας επεκτείνεται σε ένα μεγάλο μέρος του ανιχνεύσιμου φάσματος. Η ενέργεια αυτή που εκπέμπεται από ένα σκάφος είναι αποτέλεσμα της δράσης των προπελών και της ολικής κίνησης της γάστρας το νερό. Μεμονωμένα στοιχεία συχνότητας δεν είναι ευδιάκριτα και επομένως οι ενδείξεις για την ταξινόμηση του σκάφους δεν είναι παρούσες. Οι Broadband πηγές δημιουργούν μια ακουστική ενέργεια σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, παρόμοια με μια θερμική πηγή στην ηλεκτρο-οπτική. Ο θόρυβος από την προπέλα και τον άξονα είναι γενικά χαμηλός σε συχνότητες, δηλαδή κάτω από 1000 Hz. Μια Broadband υπογραφή μπορεί γενικά να αποτελείται από:
 - Υδραυλική αντήχηση (συντονισμό) (Hydraulic resonance)
 - Θόρυβο ροής (Flow noise)
 - Σπηλαίωση (Cavitation)
 - Κυματισμό πτερυγίων (Blade flutter)
 - Αντήχηση υφάλων (Hull resonance: swaths)



Σχήμα 15: Σύνθεση λαμβανόμενου σήματος. [20]

- Narrowband-NB (περιορισμένης ζώνης), αποτελεί ένα μικρό μήμα του όλου θορύβου, εντοπίζεται στο φάσμα κάτω από το 1 kHz, και περιλαμβάνει τα λεγόμενα σήματα "tonals" του στόχου. Αυτά είναι ισχυρές αιχμές θορύβων σε ασυνεχείς συχνότητες και είναι λίγο ή πολύ σταθερά στη συχνότητα και στο εύρος. Αυτά τα "χρήσιμα σήματα" (signals of interest) αναμιγνύονται διαρκώς με τα σήματα του περιβαλλοντικού θορύβου και του θορύβου της θαλάσσιας κυκλοφορίας που είναι άχρηστα για το χειριστή. Η ενέργεια αυτή αποτελείται από μεμονωμένες και συγκεκριμένες συχνότητες ("tonals"). Αυτές οι μεμονωμένες συχνότητες απεικονίζονται ως διακριτές γραμμές συχνοτήτων. Κάθε μία διακριτή συχνότητα μπορεί να πηγάζει από συγκεκριμένη πηγή του σκάφους. Τα μηχανήματα αυτά ή τα επιθέματα της γάστρας του, παράγουν ένα επαναλαμβανόμενο κύκλο ή μια δόνηση και έχουν μια NB φάσματος υπογραφή. Συμπερασματικά μια περιορισμένης ζώνης υπογραφή μπορεί να αποτελείται από:
 - Μηχανή πρόωσης
 - Κιβώτιο γκραναζιών (Gear box)
 - Άξονα προπέλας
 - Κατάσταση περρυγίων (Mechanical & Cavitation)
 - Βοηθητικά μηχανήματα (αντλίες, κινητήρες, συμπιεστές, ανεμιστήρες)
 - Θόρυβος ροής (SRC's)

- Transient. Η transient υπογραφή δεν είναι συνεχής αλλά είναι μια πολύ μικρή σε χρονική διάρκεια εκπεμπόμενη ενέργεια, που προέρχεται από μη περιοδικές και επαναλαμβανόμενες διεργασίες. Η διάρκειά τους μπορεί να κυμαίνεται από μερικά milliseconds έως και seconds. Είναι πολύ χαρακτηριστικά τα σήματα που εκπέμπονται και μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό της ηχητικής υπογραφής. Τα σημαντικότερα παραδείγματα των transients είναι:
 - Αντλίες
 - Πόρτα σωλήνων τορπιλών
 - Βολή τορπιλών
 - Απροσδιόριστα γεγονότα.

Ένας τρόπος λοιπόν για να εντοπιστεί ένα υποβρύχιο ή γενικότερα ένας στόχος, είναι να εντοπιστεί ο θόρυβος που εκπέμπει και στη συνέχεια να προσδιορισθεί με βάση μια

ενημερωμένη ηλεκτρονική βιβλιοθήκη. Η διαδικασία αυτή μπορεί να το ταυτοποιήσει ως προς το είδος του, τη θέση του, ακόμα και την ταχύτητά του.

Πίνακας 1: Ένα μοντέλο του φάσματος επιπέδου πηγής των υποβρυχίων. [21]

	SL component of the spectrum [relative to 1 Pa at 1 m]	Spectral strength of SL in a frequency band (1Hz) [relative to 1 Pa at 1m]
	5-200 Hz	1kHz
"Noisy" Submarine	140	120
"Quiet" Submarine	120	100
"Very quiet" Submarine	100	80

Γενικά για τα υποβρύχια, το φάσμα της υπογραφής τους αποτελείται από διακριτές συχνότητες με μέγιστο στην περιοχή 50-100 Hz. Σε συχνότητες μεγαλύτερες των 200 Hz το SL μειώνεται κατά 6 dB όταν η συχνότητα διπλασιάζεται. Αυτό σημαίνει ότι το SL είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της συχνότητας. Διακριτές γραμμές NB εντοπίζονται στην περιοχή συχνοτήτων από 0.1 έως 10 Hz που προκαλούνται από την περιστροφή των προπελών, αξονικών συστημάτων, πτερυγίων και άλλα. Αυτός ο θόρυβος είναι ο πιο δύσκολος να καταπιεστεί και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η απορρόφηση σε αυτές τις χαμηλές συχνότητες είναι ασθενής, καθιστά τον στόχο "εμφανή" σε απόσταση δεκάδων χιλιομέτρων. Η μέθοδος narrow-band φιλτραρίσματος του φάσματος είναι μια βασική αρχή για εντοπισμό σε μεγάλες αποστάσεις. Διακριτές γραμμές NB του φάσματος από μερικά Hz μέχρι μερικές εκατοντάδες Hertz και συνδέονται με δονήσεις του σκάφους και γεννήτριες. Η πιο χαρακτηριστική γραμμή του NB φάσματος είναι μια μέγιστη γραμμή μεταξύ 50 και 60 Hz που προκύπτει από τις ηλεκτρογεννήτριες. Το SL φάσμα της πρώτης γενιάς SSNs περιέχουν διακριτές γραμμές σε συχνότητες που είναι πολλαπλάσια των 50 και 60 Hz (αρμονικές των βασικών συχνοτήτων). Το φάσμα των τέταρτης γενιάς υποβρυχίων (κατασκευασμένων τέλη του 80) δεν περιέχουν γραμμές πέραν των 100 Hz, ειδικότερα για ταχύτητες μικρότερες των οχτώ κόμβων.

Οι ιδιαιτερότητες του φάσματος καθορίζονται από δύο παραμέτρους. Το SL στη συχνότητα του 1 kHz και των πιο διακριτών γραμμών συχνοτήτων στο εύρος των 5-200 Hz. Στον παραπάνω πίνακα, οι εκτιμήσεις αφορούν κίνηση με μικρές ταχύτητες (4 κόμβων) δηλαδή *ultraquiet*. Σε αυτή την περίπτωση οι βασικές πηγές θορύβου είναι οι προπέλες και οι γεννήτριες. Αυτή η ταχύτητα δεν χρησιμοποιείται γενικά εκτός από ειδικές περιπτώσεις. Η συνήθης ταχύτητα περιπόλου δεν υπερβαίνει το ανώφλι χαμηλού θορύβου το οποίο είναι περίπου οι 8 κόμβοι. Στους 15 κόμβους ο υδροδυναμικός θόρυβος υπερισχύει. Διπλασιασμός της ταχύτητας γενικά αυξάνει κατά 18 dB το SL. Ένας ακόμη παράγοντας που ενισχύει τον παραγόμενο από ένα υποβρύχιο θόρυβο, είναι η γήρανση του. Οι μηχανισμοί όταν φθείρονται παράγουν εντονότερο θόρυβο. Ένα πλεονέκτημα των υποβρυχίων *diesel* είναι ότι ενώ αυτά μπορούν να λειτουργήσουν με μπαταρίες, στα πυρηνοκίνητα ο αντιδραστήρας λειτουργεί αδιάλειπτα, οπότε ο παραγόμενος θόρυβος δεν μπορεί να καταπιεστεί. Επιπλέον το εκτόπισμα για τα πυρηνικά υποβρύχια υπερβαίνει συνήθως κατά πολύ το εκτόπισμα των *diesel*, και αυτό απαιτεί μεγαλύτερη δύναμη στην αναλογία βάρους. Από υπολογισμούς, σε μια «ήρεμη» κατάσταση η διαφορά στο επίπεδο θορύβου μεταξύ των στρατηγικών πυρηνικών υποβρυχίων και των υποβρυχίων *diesel*, που αναπτύχθηκαν συγχρόνως, είναι της τάξης των 10 dB.

Τα τελευταία χρόνια σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται απορροφητικά υλικά (αντικραδασμικά) για την ελαχιστοποίηση της μετάδοσης των ήχων. Έτσι ο εκπεμπόμενος θόρυβος έχει καταπιεστεί σημαντικά. Άλλος ένας θόρυβος όπως προαναφέρθηκε είναι ο υδροδυναμικός θόρυβος που προκαλείται από την ανώμαλη ροή θαλάσσιου νερού, πάνω από χαλαρά τμήματα της γάστρας ή σε κοιλότητες του σκάφους. Οι διακυμάνσεις πίεσης που συνδέονται με αυτή τη ροή μπορούν να είναι εκπεμπόμενες άμεσα ως ήχος αλλά μπορεί και έμμεσα, διεγείροντας ορισμένα μέρη του σκάφους σε δόνηση.

Ανακεφαλαιώνοντας, όλες οι παραπάνω πηγές θορύβου συμβάλλουν στην ακουστική υπογραφή του στόχου, παρέχοντας BB και NB ζώνες συχνοτήτων. Όπως πρωτοειπώθηκε ο εκπεμπόμενος θόρυβος του σκάφους αποτελείται και από Broadband θόρυβο και από διακριτές συχνότητες Narrowband. Και οι δύο μορφές θορύβου BB και NB αποτελούν θεμελιώδη στην παθητική ταξινόμηση μιας καταγραφής και ποικίλουν λόγω του περιβαλλοντικού θορύβου, των συνθηκών διάδοσης, της κατάστασης λειτουργίας του σκάφους, τον τύπο και το βάθος του. Η ισχύς του εκπεμπόμενου θορύβου που λαμβάνεται από το παθητικό σύστημα sonar εξαρτάται κυρίως από το ποσό απορρόφησης του ήχου κατά τη διάρκεια της μετάβασής του από το σκάφος προς το δέκτη. Το ποσό αυτό

εξαρτάται επίσης και από τη συχνότητα του εκπεμπόμενου θορύβου. Γενικά όσο υψηλότερη η συχνότητα τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό απορρόφησης. Αυτός είναι και ο λόγος που τα σήματα χαμηλής συχνότητας διαδίδονται πιο μακριά από τα σήματα υψηλότερης συχνότητας. Παρουσιάστηκαν λοιπόν οι βασικές αρχές σύμφωνα με τις οποίες επιχειρείται η ταυτοποίηση ενός υποθαλάσσιου θορύβου και που επικεντρώνονται οι προσπάθειες, δηλαδή κυρίως σε χαμηλές συχνότητες που δεν μπορούν να καταπιεστούν και προέρχονται από πηγές του σκάφους που δεν μπορούν να καταπιεστούν.

4. **Ακουστική θεωρία και προσομοιώσεις μέσω Matlab**

4.1. **Ενεργητική και παθητική εξίσωση sonar**

Τα συστήματα σόναρ έχουν πολλές ομοιότητες με τα ηλεκτροπτικά συστήματα. Η λειτουργία τους βασίζεται στη διάδοση των κυμάτων μεταξύ μιας υποθαλάσσιας πηγής θορύβου και ενός δέκτη. Τα συστήματα σόναρ διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε ενεργητικά και παθητικά.

Σε ένα παθητικό σύστημα σόναρ, η ενέργεια προέρχεται από έναν στόχο και διαδίδεται σε έναν δέκτη, ανάλογο με αυτόν παθητική υπέρυθη ανίχνευση. Σε ένα ενεργό σύστημα σόναρ, τα κύματα μεταδίδονται από έναν πομπό σε έναν στόχο και πίσω σε έναν δέκτη, ανάλογο με το ραντάρ παλμού-ηχώ. [22]

Τα συστήματα σόναρ διαφέρουν από τα ραντάρ και τα ηλεκτροπτικά συστήματα, επειδή η ενέργεια που παρατηρείται μεταφέρεται με μηχανικές δονήσεις που διαδίδονται σε νερό, στερεά, αέρια, ή το πλάσμα, σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που διαδίδονται στον αέρα. Στις στρατιωτικές εφαρμογές, τα συστήματα σόναρ χρησιμοποιούνται για ανίχνευση, ταξινόμηση, εντοπισμό και παρακολούθηση υποβρυχίων ή επιφανειακών επαφών, καθώς και για επικοινωνία, πλοήγηση, και τον εντοπισμό εμποδίων ή κινδύνων.

Η εξίσωση σόναρ χρησιμοποιείται στην υποβρύχια επεξεργασία σήματος για να συσχετίσει τη ληφθείσα ισχύ σήματος με την τροφοδοσία σήματος που μεταδίδεται για μετάδοση ήχου μονής ή διπλής κατεύθυνσης. Η εξίσωση υπολογίζει τον λαμβανόμενο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) από το μεταδιδόμενο επίπεδο σήματος, λαμβάνοντας υπόψη την απώλεια μετάδοσης, το επίπεδο θορύβου, την κατευθυντικότητα του αισθητήρα και την ένταση της υποθαλάσσιας πηγής θορύβου. Η εξίσωση σόναρ έχει διαφορετικές μορφές για το παθητικό και το ενεργό σόναρ.

Σε ένα παθητικό σύστημα, ο ήχος μεταδίδεται απευθείας από μια πηγή σε ένα δέκτη. Η παθητική εξίσωση είναι [25]

$$SNR = SL - TL - (NL - DI) \quad (4.1)$$

όπου SNR είναι η ληφθείσα αναλογία σήματος-θορύβου σε dB, επίπεδο πηγής (source level (SL)) είναι η αναλογία της μεταδιδόμενης έντασης από την πηγή ως προς μία ένταση αναφοράς, που μετατρέπεται σε dB:

$$SL = 10 \log(I_s / I_{ref}) \quad (4.2)$$

όπου I_s είναι η ένταση του μεταδιδόμενου σήματος που μετράται σε απόσταση 1m από την πηγή και όπου ένταση αναφοράς, I_{ref} , είναι η ένταση ενός ηχητικού κύματος που έχει μια ρίζα μέση τετράγωνη (RMS) πίεση 1 bar. Το επίπεδο προέλευσης μερικές φορές γράφεται σε dB//1 bar, αλλά στην πραγματικότητα αναφέρεται στην ένταση ενός σήματος 1 bar. Η σχέση μεταξύ έντασης και πίεσης είναι

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad (4.3)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού, (περίπου 1000 kg/m³), c είναι η ταχύτητα του ήχου (περίπου 1500 m/s) και p_{rms} είναι η RMS τιμή της πίεσης.

$$I_{ref} = 6,667 \times 10^{-19} \frac{W}{m^2} \quad (4.4)$$

όπου I_{ref} είναι η ένταση αναφοράς.

Μερικές φορές, είναι χρήσιμο να υπολογιστεί το επίπεδο πηγής από τη μεταδιδόμενη ενέργεια, P . Υποθέτοντας μια μη κατευθυντική (ισοτροπική) πηγή, η ένταση σε ένα μέτρο από την πηγή είναι

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (4.5)$$

όπου r είναι η πίεση.

Στη συνέχεια, το επίπεδο πηγής ως συνάρτηση της μεταδιδόμενης ενέργειας είναι

$$SL = 10 \log\left(\frac{I}{I_{ref}}\right) = 10 \log\left(\frac{P}{4\pi r^2 I_{ref}}\right) = 10 \log(P) - 10 \log(4\pi I_{ref}) = 10 \log(P) + 170.8 \quad (4.6)$$

Όταν το επίπεδο προέλευσης ορίζεται σε μια γιάρδα αντί για ένα μέτρο, η τελική σταθερά σε αυτή την εξίσωση είναι 171,5.

Όταν η πηγή είναι κατευθυντική, το επίπεδο προέλευσης γίνεται

$$SL = 10 \log\left(\frac{I}{I_{ref}}\right) = 10 \log(p) - 10 \log(4 \pi I_{ref}) = 10 \log(p) + 170.8 + DI_{src} \quad (4.7)$$

όπου το DI_{src} είναι η κατευθυντικότητα της πηγής. Η κατευθυντικότητα της πηγής δεν συμπεριλαμβάνεται ρητώς στην εξίσωση σόναρ.

Δείκτης κατευθυντικότητας δέκτη (DI)

Η εξίσωση σόναρ περιλαμβάνει τον δείκτη κατευθυντικότητας του δέκτη (DI).

Απώλεια μετάδοσης (TL)

Η απώλεια μετάδοσης είναι η εξασθένιση της έντασης του ήχου καθώς ο ήχος διαδίδεται μέσω του υποθαλάσσιου καναλιού. Η απώλεια μετάδοσης (TL) ορίζεται ως ο λόγος της έντασης του ήχου σε απόσταση 1m από την πηγή έως την ένταση του ήχου στην απόσταση R.

$$TL = 10 \log\left(\frac{I_s}{I(R)}\right) \quad (4.8)$$

όπου $I(R)$ είναι η τιμή της έντασης του ρεύματος σε απόσταση R από την πηγή.

Υπάρχουν δύο σημαντικές συνεισφορές στην απώλεια μετάδοσης. Η μεγαλύτερη συμβολή είναι η γεωμετρική εξάπλωση του ηχητικού κύματος. Η δεύτερη συμβολή είναι η απορρόφηση του ήχου καθώς διαδίδεται. Υπάρχουν αρκετοί μηχανισμοί απορρόφησης. Σε ένα άπειρο μέσο, το κύμα διευρύνεται σφαιρικά με απόσταση και η εξασθένιση ακολουθεί

ένα νόμο $\frac{1}{R^2}$, όπου R είναι η απόσταση διάδοσης. Ωστόσο, το κανάλι του ωκεανού έχει επιφάνεια και κάτω. Εξαιτίας αυτού, οι κυματομορφές επεκτείνονται κυλινδρικά όταν

απέχουν πολύ από την πηγή και ακολουθούν έναν νόμο $\frac{1}{R}$. Κοντά στην πηγή, οι ακτίνες κύματος εξακολουθούν να αναπτύσσονται σφαιρικά. Πρέπει να υπάρχει μια περιοχή μετάβασης όπου η εξάπλωση αλλάζει από σφαιρικό σε κυλινδρικό. Στην Εργαλειοθήκη του Συστήματος Φάσης Συστοιχιών (Phased Array System Toolbox™), η περιοχή μετάβασης θεωρείται ως ενιαία περιοχή και εξασφαλίζει ότι η απώλεια μετάδοσης είναι συνεχής σε αυτό το εύρος. Εδώ, το εύρος μετάβασης, R_{trans} , είναι το μισό του βάθους, D, του καναλιού. Η απώλεια γεωμετρικής μετάδοσης για περιοχές μικρότερες από το βάθος μετάδοσης είναι:

$$TL_{geom} = 20 \log(R) \quad (4.9)$$

Για περιοχές μεγαλύτερες από το βάθος μετάβασης, η απώλεια γεωμετρικής μετάδοσης είναι

$$TL_{geom} = 10 \log(R) + \log(R_{trans}) \quad (4.10)$$

όπου R_{trans} είναι το εύρος μετάβασης.

Στην Εργαλειοθήκη του Συστήματος Φάσης Συστοιχιών (Phased Array System Toolbox), το εύρος μετάβασης είναι το μισό του βάθους του καναλιού, $H/2$. Το μοντέλο απώλειας απορρόφησης έχει τρία συστατικά: ιξώδη απορρόφηση, διαδικασία χαλάρωσης βορικού οξέος και διαδικασία χαλάρωσης θειικού μαγνησίου. Όλα τα συστατικά απορρόφησης διαμορφώνονται με γραμμική εξάρτηση από την περιοχή, aR . Η απορρόφηση του ιξώδους περιγράφει την απώλεια έντασης λόγω της μοριακής κίνησης που μετατρέπεται σε θερμότητα. Η απορρόφηση ιξώδους εφαρμόζεται κυρίως σε υψηλότερες συχνότητες. Ο συντελεστής ιξώδους απορρόφησης είναι συνάρτηση της συχνότητας, f , θερμοκρασίας σε Κελσίου, T και βάθους, D :

$$a_{vis} = 4.9 \times 10^{-4} f^2 e^{-(T/27 + D/17)} \quad (4.11)$$

σε dB/km. Αυτός είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός απορρόφησης πάνω από 1MHz. Η απορρόφηση των ιξωμάτων αυξάνεται με τη θερμοκρασία και το βάθος.

Ο δεύτερος μηχανισμός απορρόφησης είναι η διαδικασία χαλάρωσης του βορικού οξέος. Η απορρόφηση εξαρτάται από τη συχνότητα σε kHz, f , την αλατότητα σε μέρη ανά χίλια (psu), S και τη θερμοκρασία σε °C T . Ο συντελεστής απορρόφησης

$$\alpha_B = 0.106 \frac{f_1 f^2}{(f_1^2 + f^2)} e^{\frac{-(pH-8)}{0.56}} \quad (4.12)$$

όπου

$$f_1 = 0.78 \sqrt{S/35} e^{T/26} \quad (4.13)$$

σε dB/km. f_1 είναι η συχνότητα χαλάρωσης του βορικού οξέος και είναι περίπου 1,1 kHz σε $T = 10$ °C και $S = 35$ psu.

Ο τρίτος μηχανισμός είναι η διαδικασία χαλάρωσης του θειικού μαγνησίου. Εδώ, ο

συντελεστής απορρόφησης είναι

$$\alpha_M = 0.52 \left(1 + \frac{T}{43} \right) \left(\frac{S}{35} \right) \frac{f_2 f^2}{(f_2^2 + f^2)} e^{-\left(\frac{D}{6}\right)} \quad (4.14)$$

όπου

$$f_2 = 42 e^{T/17} \quad (4.15)$$

σε dB/km. το f_2 είναι η συχνότητα χαλάρωσης θειικού μαγνησίου και είναι περίπου 75,6 kHz σε $T = 10^\circ \text{C}$ και $S = 35 \text{ psu}$.

Η συνολική απώλεια μετάδοσης που έχει διαμορφωθεί στην εργαλειοθήκη είναι όπου R είναι το εύρος σε km. Στην ομάδα εργαλείων συστήματος Phased Array, όλες οι παράμετροι των μοντέλων απορρόφησης είναι σταθερές σε $T = 10$, $S = 35$ και $\rho_H = 8$. Το μοντέλο εφαρμόζεται σε εύρος 2tl. Επειδή η TL είναι μια μονοτονικά αυξανόμενη συνάρτηση του R , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Newton - Raphson για να λυθεί το R από την άποψη του TL.

Το επίπεδο θορύβου (NL) είναι ο λόγος της έντασης θορύβου στον δέκτη με την ίδια ένταση αναφοράς που χρησιμοποιείται για το επίπεδο πηγής.



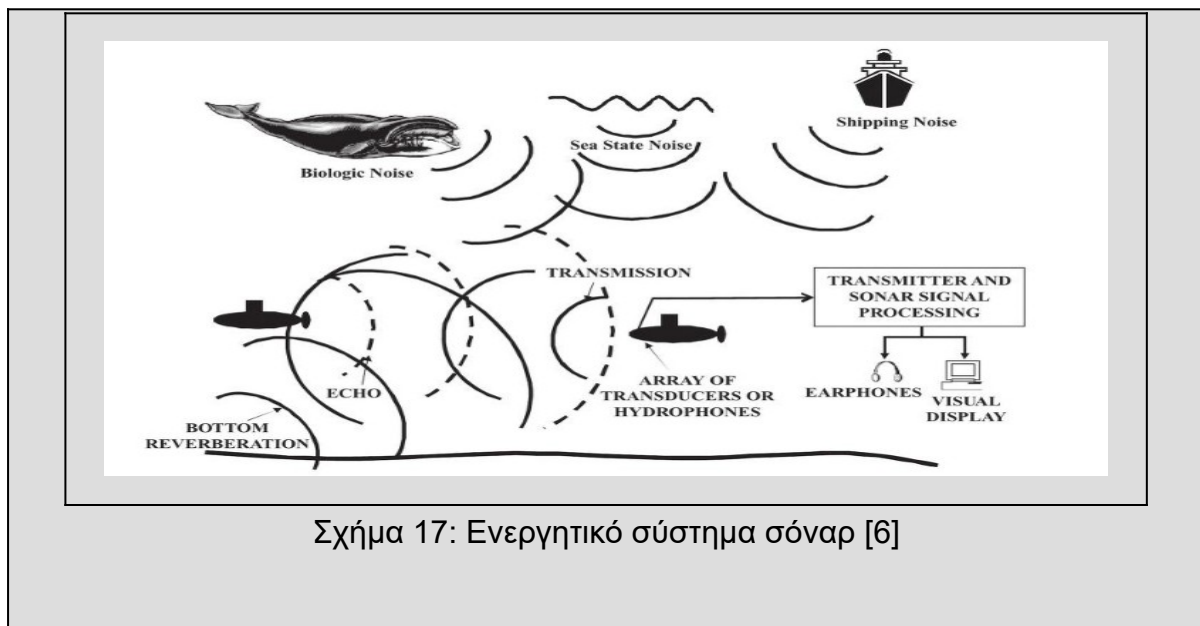
Σχήμα 16: Παθητικό σύστημα σόναρ [6]

Η ενεργητική εξίσωση σόναρ περιγράφει ένα σενάριο όπου ο ήχος μεταδίδεται από μια

πηγή, ανακλάται σε έναν στόχο και επιστρέφει σε ένα δέκτη. Όταν ο δέκτης είναι συνεχώς εγκατεστημένος με την πηγή, αυτό το σύστημα σόναρ ονομάζεται μονοστατικό. Τα συστήματα Phased Array System Toolbox διαθέτουν μονοστατικά συστήματα σόναρ. Η ενεργή εξίσωση σόναρ είναι:

$$SNR = SL - 2TL - (NL - DI) + TS \quad (4.16)$$

όπου $2TL$ είναι η αμφίδρομη απώλεια μετάδοσης (σε dB) και TS είναι η ένταση στόχος (σε dB). Η απώλεια μετάδοσης υπολογίζεται υπολογίζοντας τις απώλειες εξερχόμενης και εισερχόμενης μετάδοσης (σε dB) και την προσθήκη τους. Σε αυτήν την εργαλειοθήκη, η απώλεια μετάδοσης διπλής κατεύθυνσης είναι διπλάσια από την απλή απώλεια μετάδοσης.



Η δύναμη στόχου (TS) είναι το ανάλογο σόναρ της διατομής του ραντάρ. Η αντοχή στόχου είναι ο λόγος της έντασης ενός ανακλώμενου σήματος στο 1 m από ένα στόχο προς την ένταση προσπίπτουσας, μετατρεπόμενη σε dB. Χρησιμοποιώντας τη διατήρηση της ενέργειας, η ισχύς που προκαλείται σε έναν στόχο ισούται με την ανακλώμενη ισχύ. Η ισχύς προσπίπτουσας είναι η ένταση του συμβάντος σήματος πολλαπλασιασμένη επί μίας αποτελεσματικής περιοχής διατομής, σ . Η ανακλώμενη ισχύς είναι η ένταση του ανακλώμενου σήματος πολλαπλασιασμένη με την περιοχή μιας σφαίρας ακτίνας R

κεντραρισμένης στο στόχο. Ο λόγος της ανακλώμενης ισχύος προς την ισχύ προσπίπτουσας είναι

$$I_{inc} \sigma = I_{refr} 4 \pi R^2 \quad (4.17)$$

όπου I_{inc} η ένταση του προσπίπτοντος σήματος, I_{refr} η ένταση του ανακλώμενου σήματος, σ η αποτελεσματική περιοχή διατομής και R η ακτίνα της σφαίρας που είναι κεντραρισμένη στο στόχο.

και ο λόγος ρευμάτων είναι

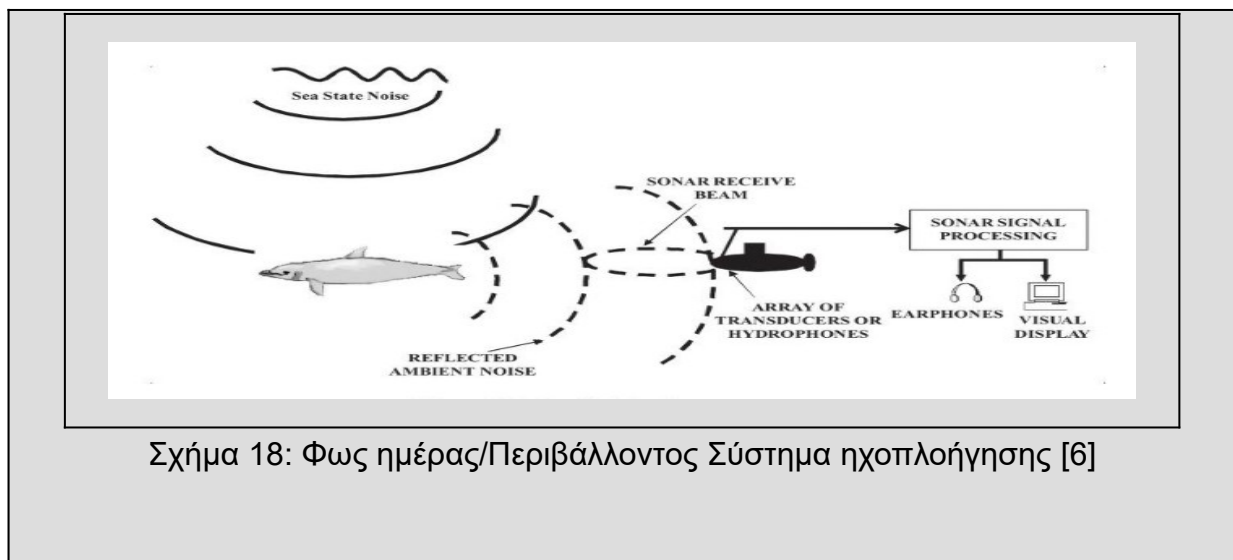
$$\frac{I_{refr}}{I_{inc}} = \frac{\sigma}{4\pi R^2} \quad (4.18)$$

$$TL = TL_{geom}(R) + (\alpha_{vis} + \alpha_B + \alpha_M) R \quad (4.19)$$

όπου οι μεταβλητές της συνάρτησης έχουν αναλυθεί παραπάνω.

Η ανακλώμενη ένταση αξιολογείται σε σφαίρα ακτίνας 1 m. Ο συντελεστής αντοχής στόχου (σ) αναφέρεται σε μια έκταση 1 m².

$$TS = 10 \log \left(\frac{I_{refl} 1 \text{ meter}}{I_{inc}} \right) = 10 \log \left(\frac{\sigma}{4\pi} \right) \quad (4.20)$$



Σχήμα 18: Φως ημέρας/Περιβάλλοντος Σύστημα ηχοπλοήγησης [6]

4.2. Γεωμετρική Ακουστική

Η γεωμετρική ακουστική χρησιμοποιεί την έννοια της ακουστικής ακτίνας, για τη μελέτη της ακουστικής διάδοσης στη θάλασσα και για τη μελέτη των προβλημάτων διάδοσης σε ένα ακουστικό μέσο. Τα προβλήματα ανάκλασης και διάθλασης, εντάσσονται μέσα στα γενικά πλαίσια της γεωμετρικής ακουστικής, σύμφωνα με την οποία παρακολουθείται η ηχητική ενέργεια σημείο προς σημείο καθώς αυτή διαδίδεται σε ένα μέσον και ανακλάται στις διαχωριστικές του επιφάνειες. Είναι μία μέθοδος που συνδυάζει παραστατικότητα και φυσική ερμηνεία σε αντίθεση με την κυματική θεωρία που δεν συνδέει άμεσα το αποτέλεσμα με γεωμετρικές έννοιες.

Ως ηχητική ακτίνα θα θεωρήσουμε την καμπύλη, σε κάθε σημείο της οποίας ο αριθμός κύματος είναι εφαπτόμενο διάνυσμα. Η ηχητική ακτίνα λοιπόν είναι κάθετη στο μέτωπο κύματος. Στην περίπτωση των επίπεδων κυμάτων, η διεύθυνση της ηχητικής ακτίνας ταυτίζεται με τη διεύθυνση του αριθμού κύματος για κάθε μέσον. Όταν λοιπόν ο αριθμός κύματος είναι σταθερός (σταθερή ταχύτητα διάδοσης του ήχου) η ηχητική ακτίνα είναι ευθεία. Όταν όμως η ταχύτητα μεταβάλλεται με την απόσταση, η μεταβολή του μέτρου του αριθμού κύματος σε συνδυασμό με το νόμο του Snell που επιβάλλει σταθερό οριζόντιο αριθμό κύματος, επιβάλλουν την αλλαγή στη διεύθυνση του διανύσματος του αριθμού κύματος και επομένως αλλαγή στη διεύθυνση της ηχητικής ακτίνας. Όταν οι μεταβολές του αριθμού κύματος είναι συνεχείς, το αποτέλεσμα για την ηχητική ακτίνα είναι μία ομαλή καμπύλη στο χώρο.

Βέβαια, θα πρέπει να τονιστεί ότι τα επίπεδα κύματα είναι μία απλούστευση της πραγματικής λύσης του προβλήματος ακουστικής διάδοσης στη θάλασσα. Η λύση της ακουστικής εξίσωσης για ένα δεδομένο πρόβλημα όπως αυτό περιγράφεται από τη γεωμετρία, τις παραμέτρους και τις οριακές συνθήκες, δεν δίδεται με τη μορφή επίπεδων ακουστικών κυμάτων και θα πρέπει να αναζητηθούν σε περισσότερο σύνθετες λύσεις της ακουστικής εξίσωσης. Η έννοια του επίπεδου κύματος ωστόσο παραμένει χρήσιμη και πολλές φορές γίνεται αναγωγή σ' αυτήν για να μελετηθούν πολύπλοκα προβλήματα ακουστικής διάδοσης με απλούς αλλά ταυτόχρονα εποπτικούς τρόπους.

Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου μεταβάλλεται περισσότερο με το βάθος και λιγότερο με την οριζόντια απόσταση στη θάλασσα. Αυτό σημαίνει ότι σε πολλά προβλήματα αρκεί να υπολογιστεί η διάδοση του ήχου στην θάλασσα όταν τα μεγέθη μεταβάλλονται μόνο με το

βάθος (οριζόντια στρωματοποιημένο μέσο) και όχι με την απόσταση.

Στο φαινόμενο της διάθλασης, η κλίση της ταχύτητας του ήχου μέσα στο νερό προκαλεί ένα φαινόμενο στο οποίο κάμπτονται οι ακτίνες του φωτός. Εάν χωριστεί το νερό σε πολλαπλά στρώματα παράλληλα προς την επιφάνεια, θα πρέπει να δημιουργηθούν διάφορα μέσα με διαφορετική ταχύτητα ήχου, δηλαδή διαφορετική ειδική χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση. Λαμβάνοντας υπόψη μια πηγή ηχητικής πίεσης σε υποβρύχια θέση και κάνοντας χρήση της νόμου του Snell, μπορούμε να δούμε το μονοπάτι που θα ακολουθήσει το κύμα. Ο νόμος του Snell μας λέει ότι ο ήχος στρέφεται προς το χαμηλότερο στρώμα ταχύτητας ήχου. Αν η γωνία του ηχητικού κύματος με το οριζόντιο επίπεδο είναι υπερβολικά υψηλή (μεγαλύτερη από θ_{max}), το κύμα τελικά θα χτυπήσει τον πυθμένα ή την επιφάνεια, διαφορετικά θα κάμπτεται συνεχώς προς την οριζόντια μέχρι να περάσει την κρίσιμη γωνία θ_c και στη συνέχεια θα αντανakλώνται πλήρως πίσω.

$$\theta_{max} = 2 \Delta \frac{c}{c_{max}} \quad (4.21)$$

όπου θ_{max} είναι η μέγιστη γωνία με το οριζόντιο επίπεδο και c_{max} είναι η μέγιστη ταχύτητα που βρίσκεται στο κανάλι SOFAR και $\Delta_{c/c_{max}}$ είναι η κλίση του λόγου των ταχυτήτων.

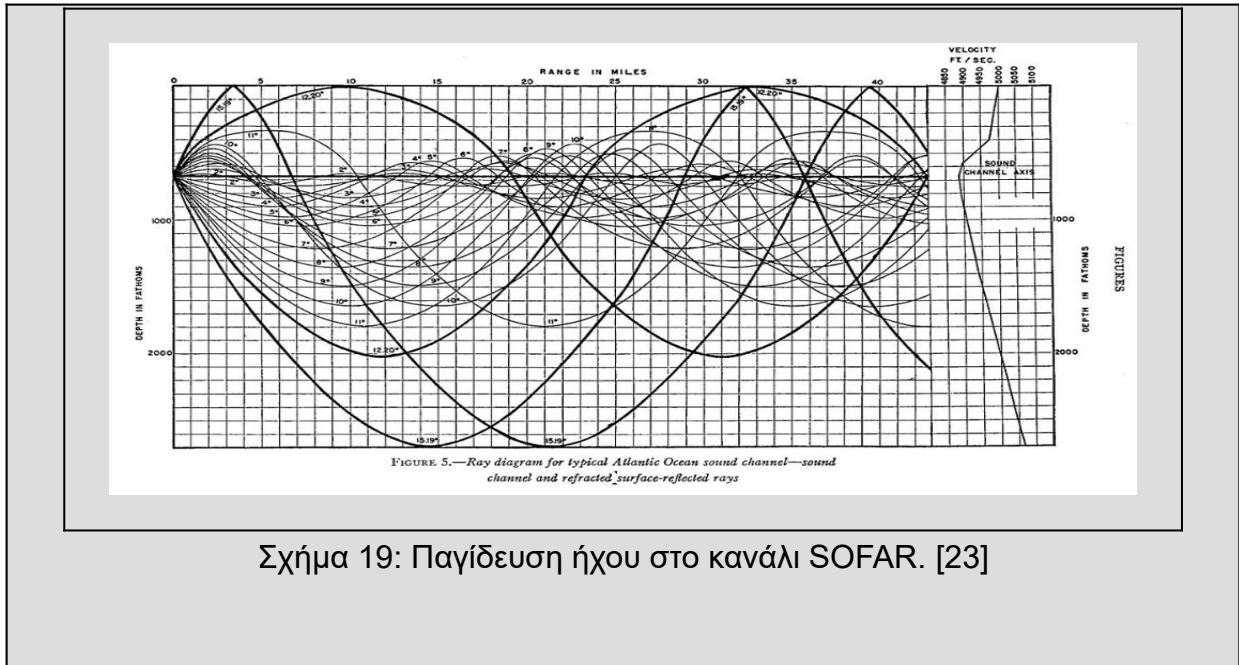
$$\sin(\theta_c) = \frac{c_1}{c_2} \quad (4.22)$$

όπου θ_c η κρίσιμη γωνία.

Αυτή η διαδικασία συμβαίνει επαναλαμβανόμενα, προκαλώντας παγίδευση του ήχου σε συγκεκριμένο εύρος βάθους, γνωστό ως κανάλι Sound Fixing and Ranging (SOFAR). Καθώς ο ήχος δεν μπορεί να φτάσει στον πυθμένα ούτε στην επιφάνεια, οι απώλειες είναι μικρές και δεν μεταδίδεται ήχος στον αέρα ούτε στον βυθό, βοηθώντας τον ήχο να διαδίδεται σε μεγάλες αποστάσεις. Έχουν εντοπιστεί σήματα σε εύρη που υπερβαίνουν τα 3000 χιλιόμετρα. Αυτό το κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτυχή επικοινωνία με ορισμένα είδη κητοειδών. Μπορούμε να δούμε ότι ο ήχος επικεντρώνεται σε ορισμένα βάθη και είναι πολύ λιγότερο εμφανής σε άλλες, προκαλώντας κάποιες περιοχές να είναι πιο θορυβώδεις από άλλες.

Επισημαίνεται, ότι εάν η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι πολύ χαμηλή, αυτό το φαινόμενο μπορεί να μην εμφανίζεται πλέον. Το κύμα θα αναπηδήσει στην επιφάνεια και θα ανακλάται όπως ακριβώς μπορούμε να δούμε στο γράφημα για γωνία 15.19° . Το ίδιο φαινόμενο συμβαίνει στο μεικτό στρώμα το οποίο είναι το στρώμα που επηρεάζεται από

την ανάδευση των κυμάτων, προκαλώντας την ταχύτητα του ήχου να εξαρτάται μόνο από την πίεση. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει σκιώδεις ζώνες. Εάν υπάρχει μια πηγή που βρίσκεται μεταξύ του άξονα καναλιού βαθιάς και της επιφάνειας, μόνο οι ακτίνες που σχηματίζουν γωνία μικρότερη από θ_0 με την οριζόντια θα παγιδευτούν.



Σχήμα 19: Παγίδευση ήχου στο κανάλι SOFAR. [23]

$$\theta_0 = \theta_{max} \left(\frac{z_s}{D_s} \right)^{1/2} \quad (4.23)$$

όπου z_s είναι το βάθος της πηγής και D_s είναι το βάθος του ηχητικού άξονα και θ_0 είναι η μικρότερη γωνία κάτω από την οποία οι ακτίνες θα παγιδευτούν και θ_{max} έχει αναλυθεί ανωτέρω.

Η αντανάκλαση συμβαίνει επίσης όταν το ηχητικό κύμα πλήξει ένα άλλο σώμα, όπως ο βυθός, η επιφάνεια, τα ζώα, τα πλοία και τα υποβρύχια.

$$R = \left(\frac{r_2}{r_1} - \frac{\cos(\theta_t)}{\cos(\theta_i)} \right) / \left(\frac{r_2}{r_1} + \frac{\cos(\theta_t)}{\cos(\theta_i)} \right) \quad (4.24)$$

όπου r_1 είναι η χαρακτηριστική ακουστική σύνθετη αντίσταση του νερού και r_2 είναι η χαρακτηριστική ακουστική αντίσταση του άλλου σώματος, θ_i είναι η γωνία προσβολής και θ_t είναι η γωνία του μεταδιδόμενου κύματος, που μπορεί να επιτευχθεί μέσω του νόμου Snell. Ο τύπος είναι για περίπτωση δύο διαστάσεων, αλλά μπορεί να αναχθεί σε

περίπτωση μίας διάστασης, θέτοντας $\theta_i = \theta_i = 0$.

4.3. Εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης μέσω γενικευμένης σταυρωτής συσχέτισης και DOA

Μέσω των προγραμμάτων Matlab και Simulink και της εργαλειοθήκης Phased Array System Toolbox™, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης της πηγής ενός σήματος ευρείας ζώνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η γενικευμένη διασταυρούμενη συσχέτιση (GCC) και ο τριγωνισμός. Η προσέγγιση αυτή αφορά σε περισσότερους από δύο αισθητήρες ή συστοιχίες αισθητήρων και σε δύο ή τρεις διαστάσεις.

Στο παρακάτω παράδειγμα, ο εντοπισμός προέλευσης αποτελείται από δύο βήματα, το πρώτο από τα οποία είναι η εκτίμηση DOA.

Για σήματα ευρείας ζώνης, πολλοί γνωστοί αλγόριθμοι εκτίμησης κατεύθυνσης άφιξης, όπως η μέθοδος Capon ή MUSIC, δεν μπορούν να εφαρμοστούν επειδή χρησιμοποιούν τη διαφορά φάσης μεταξύ των στοιχείων, καθιστώντας τα κατάλληλα μόνο για σήματα στενής ζώνης. Στην περίπτωση ευρείας ζώνης, αντί για πληροφορίες φάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διαφορά στο χρόνο άφιξης του σήματος μεταξύ των στοιχείων. Για να υπολογιστούν οι διαφορές του χρόνου άφιξης, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος γενικευμένης αλληλεπίδρασης με το μετασχηματισμό φάσης (GCC - PHAT). Από τις διαφορές στο χρόνο άφιξης, μπορεί να υπολογιστεί το DOA.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η θέση της πηγής με τριγωνισμό. Κατ' αρχάς, φέρονται ευθείες γραμμές από τις συστοιχίες κατά μήκος των διευθύνσεων άφιξης και στη συνέχεια, υπολογίζεται η διασταύρωση αυτών των δύο γραμμών. Αυτή είναι η θέση προέλευσης. Ο εντοπισμός προέλευσης απαιτεί γνώση της θέσης και του προσανατολισμού των αισθητήρων λήψης ή των συστοιχιών αισθητήρων.

Ο αλγόριθμος τριγωνισμού βασίζεται σε απλούς τριγωνομετρικούς τύπους. Ας υποθέσουμε ότι οι συστοιχίες αισθητήρων βρίσκονται στις συντεταγμένες 2-D (0,0) και (L, 0) και η άγνωστη θέση προέλευσης είναι (x, y). Από τη γνώση των θέσεων συστοιχιών αισθητήρων και από τις δύο κατευθύνσεις άφιξης στις συστοιχίες, θ_1 και θ_2 , μπορούν να υπολογιστούν οι συντεταγμένες (x,y) από

$$L = y \tan(\theta_1) + y \tan(\theta_2) \quad (4.25)$$

Όπου οι μεταβλητές έχουν αναλυθεί προηγουμένως και λύνοντας ως προς y προκύπτει:

$$y = \frac{L}{\tan(\theta_1) + \tan(\theta_2)} \quad (4.26)$$

και έπειτα ως προς x προκύπτει

$$x = y \tan(\theta_1) \quad (4.27)$$

Στο υπόλοιπο αυτού του παραδείγματος φαίνεται πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εργαλειοθήκη του Phased Array System Toolbox™ για να υπολογιστεί η θέση της πηγής.



Για τη γεωμετρία της πηγής και του αισθητήρα ορίστε δύο ULA τεσσάρων στοιχείων που ευθυγραμμίζονται κατά μήκος του άξονα x του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων και απέχουν 50 μέτρα μεταξύ τους. Το κέντρο φάσης της πρώτης συστοιχίας είναι $(0,0,0)$. Το κέντρο φάσης της δεύτερης συστοιχίας είναι $(50,0,0)$. Η πηγή βρίσκεται σε $(30,100)$ μέτρα. Όπως υποδεικνύεται στο σχήμα, η συστοιχία λήψης κερδίζει σημείο στην κατεύθυνση $+y$. Η πηγή μεταδίδεται στην κατεύθυνση y .

Αυτό το παράδειγμα έδειξε πώς εκτελείται ο εντοπισμός προέλευσης χρησιμοποιώντας τριγωνισμό. Συγκεκριμένα, το παράδειγμα έδειξε πώς να προσομοιώνονται, διαδίδονται και επεξεργάζονται τα σήματα ευρείας ζώνης. Ο αλγόριθμος GCC - PHAT χρησιμοποιείται για

την εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης ενός σήματος ευρείας ζώνης.

Το Multiple Signal Classification (MUSIC) είναι ένας αλγόριθμος εύρεσης κατεύθυνσης υψηλής ανάλυσης που βασίζεται στην αποσύνθεση ιδιοτιμών της μήτρας συνδιακύμανσης αισθητήρα που παρατηρείται σε μια συστοιχία.

4.4. Προσομοιώσεις με ενεργό και παθητικό σύστημα σόναρ

Στη συνέχεια, και πάλι μέσω των προγραμμάτων Matlab και Simulink και της εργαλειοθήκης Phased Array System Toolbox™ είναι δυνατή η προσομοίωση ενός ενεργού μονοστατικού σεναρίου σόναρ με τυχαίο αριθμό στόχων θα θεωρήσουμε ότι το σύστημα σόναρ αποτελείται από μια ισοτροπική συστοιχία προβολέα και ένα μεμονωμένο στοιχείο υδροφώνου. Η συστοιχία του προβολέα είναι σφαιρική σε σχήμα και τα διάσπαρτα σήματα λαμβάνονται από το υδρόφωνο. Τα ληφθέντα σήματα περιλαμβάνουν τόσο τις άμεσες όσο και τις πολλαπλών διαδρομών συνεισφορές.

Για το υποβρύχιο περιβάλλον υπάρχουν πολλές διαδρομές μετάδοσης μεταξύ της πηγής ήχου και του στόχου σε ένα ρηχό περιβάλλον νερού και υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ενός καναλιού πολλαπλής διαδρομής για κάθε στόχο. Το κανάλι πολλαπλής διαδρομής μεταδίδει τη κυματομορφή κατά μήκος των πολλαπλών διαδρομών. Αυτή η διαδικασία δύο βημάτων είναι ανάλογη με τη σχεδίαση ενός φίλτρου και τη χρήση των συντελεστών που προκύπτουν για το φιλτράρισμα ενός σήματος.

Το σενάριο μπορεί να έχει πολλαπλούς στόχους, από τους οποίους κάποιος θα είναι πιο μακρινοί και έστω θα έχουν μεγαλύτερη δύναμη στόχου, ενώ κάποιος άλλος θα είναι πιο κοντινοί, αλλά έχουν μικρότερη δύναμη στόχου. Όλοι οι στόχοι θεωρούμε ότι είναι ισοτροπικοί και σταθεροί σε σχέση με το σύστημα σόναρ. Οι θέσεις των στόχων, μαζί με τις ιδιότητες του καναλιού, καθορίζουν τα υποβρύχια μονοπάτια κατά μήκος των οποίων μεταδίδονται τα σήματα.

Στη συνέχεια, μπορούμε να σχεδιάσουμε τις διαδρομές μεταξύ του συστήματος σόναρ και κάθε στόχου, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η συντεταγμένη z καθορίζει το βάθος, με το μηδέν να αντιστοιχεί στην επάνω επιφάνεια του καναλιού και η απόσταση στο επίπεδο x - y σχεδιάζεται ως η περιοχή μεταξύ της πηγής και του στόχου.

Όσον αφορά τους πομπούς και τον δέκτη, μπορούμε να καθορίσουμε την μεταδιδόμενη κυματομορφή, την εμβέλεια του κάθε στόχου και το εύρος τους. Επίσης μπορούμε να καθορίσουμε τον ρυθμό δειγματοληψίας των καναλιών πολλαπλής διαδρομής και το

ποσοστό δείγματος της κυματομορφής το οποίο μεταδίδεται. Ο πομπός μπορεί να αποτελείται από μια συστοιχία ιστροπικών στοιχείων προβολέα (έστω ημισφαιρική ή οποιοδήποτε άλλου σχήματος). Ο δέκτης αποτελείται από ένα υδρόφωνο και έναν ενισχυτή. Το υδρόφωνο είναι ένα ενιαίο ιστροπικό στοιχείο και έχει ένα εύρος συχνοτήτων από 0 έως 30 kHz, το οποίο περιέχει τη συχνότητα λειτουργίας του καναλιού πολλαπλής διαδρομής, και μπορεί να καθορισθεί η ευαισθησία της τάσης του υδροφώνου ως 140 dB.

Για την ακτινοβολήση και συλλογή σε ένα ενεργό σύστημα σόναρ, ένα ακουστικό κύμα μεταδίδεται στον στόχο, στη συνέχεια διασκορπίζεται από αυτόν, και λαμβάνεται από ένα υδρόφωνο. Για την δημιουργία τους, χρησιμοποιείται ο εκπομπός, ο οποίος δημιουργεί τη χωρική εξάρτηση του πολλαπλασιαζόμενα κύματος λόγω της γεωμετρίας του πίνακα, και ομοίως, ο συλλέκτης, ο οποίος συνδυάζει τα διάσπαρτα σήματα που λαμβάνονται από το υδρόφωνο. Στη συνέχεια, μπορεί να μεταδοθεί η κυματομορφή (έστω ορθογώνια) σε επιθυμητά διαστήματα επανάληψης και να προσομοιωθεί το σήμα που λαμβάνεται στο υδρόφωνο για κάθε μετάδοση.

Για την προσομοίωση ενός παθητικού συστήματος σόναρ, χρειάζεται ένας σταθερός υποβρύχιος ηχοφάρος ο οποίος να ανιχνεύεται και να εντοπίζεται από μια παθητική συστοιχία (σταθερή ή συρόμενη) σε ένα κανάλι με ρηχά νερά. Ο ηχητικός φάρος θα μεταδίδει έναν παλμό με συγκεκριμένο ρυθμό και θα διαμορφώνεται ως ιστροπικός προβολέας. Το σύστημα εντοπισμού που περιλαμβάνει την παθητική συστοιχία (έστω κάτω από την επιφάνεια) διαμορφώνεται ως ομοιόμορφη γραμμική συστοιχία. Μόλις εντοπιστεί το εκπεμπόμενο σήμα από τον ακουστικό φάρο, χρησιμοποιείται ένας τρόπος κατεύθυνσης άφιξης προκειμένου να εντοπιστεί ο ηχοφάρος.

Χρειάζεται και πάλι ο ορισμός του υποβρύχιου καναλιού καθώς και η δημιουργία ενός καναλιού πολλαπλής διαδρομής ώστε να μεταδοθεί το σήμα μεταξύ του σηματοδότη και της παθητικής συστοιχίας. Στη συνέχεια μπορεί να εξετασθεί κάποιος αριθμός διαδρομών μετάδοσης, συμπεριλαμβανομένης της άμεσης διαδρομής, όπως και των αντανάκλασεων από τις επάνω και κάτω επιφάνειες. Για τον ορισμό του ακουστικού σηματοδότη και της παθητικής συστοιχίας, προσδιορίζεται αρχικά η κυματομορφή που εκπέμπεται από τον ακουστικό φάρο όπως και η θέση του.

Ο ηχητικός φάρος διαμορφώνεται ως ιστροπικός προβολέας και η ηχητική κυματομορφή του σηματοδότη θα ακτινοβολείται στο μακρινό πεδίο. Για την παθητική ρυμουλκούμενη συστοιχία χρησιμοποιείται ένας παθητικός συρόμενος πίνακας, ο οποίος θα ανιχνεύσει και

θα εντοπίσει την προέλευση της κυματομορφής. Η παθητική συστοιχία μπορεί να κινείται σε οποιοδήποτε κατεύθυνση ή να είναι ακίνητη, και ο άξονας πίνακα να είναι προσανατολισμένος παράλληλα προς την κατεύθυνση του ταξιδιού, ή σε οποιαδήποτε άλλη κατεύθυνση επιθυμούμε. Για τον δέκτη μπορούμε να επιλέξουμε ενίσχυση για κάθε στοιχείο υδροφώνου, όπως και στάθμη θορύβου.

Για την προσομοίωση του παθητικού συστήματος σόναρ ενεργοποιούμε τον ακουστικό πομπό, στέλνουμε τα ring και μετά την καθυστέρηση μετάδοσης τα ring εμφανίζονται ως κορυφές στα ληφθέντα σήματα του πίνακα. Τέλος σχεδιάζουμε τον τελευταίο παλμό που λάβαμε και λόγω των πολλαπλών διαδρομών μετάδοσης, κάθε ring είναι μια υπέρθεση πολλαπλών παλμών.

A' ΤΜΗΜΑ

- Τρία (3) Ενεργητικά συστήματα sonar E1,E2,E3 σε βάθος 30, 50, 70 m αντίστοιχα και σε απόσταση μεταξύ τους και δύο (2) παθητικά συστήματα σόναρ.
- Στόχοι Σ1, Σ2 σφαιρικοί προβολείς σε θέσεις 40, 70 ο ένας πιο ασθενής και ο άλλος πιο δυνατός αντίστοιχα.
- Το αποτέλεσμα θα είναι η σύνθεση τριών (3) ενεργητικών σόναρ και δύο (2) παθητικών σόναρ με δύο (2) στόχους, δηλαδή σύνολο πέντε (5) προσομοιώσεων.

B' ΤΜΗΜΑ

- Υλοποίηση ενεργού συστήματος σόναρ σε βαθιά νερά, και προσομοίωσή του με Bellhop

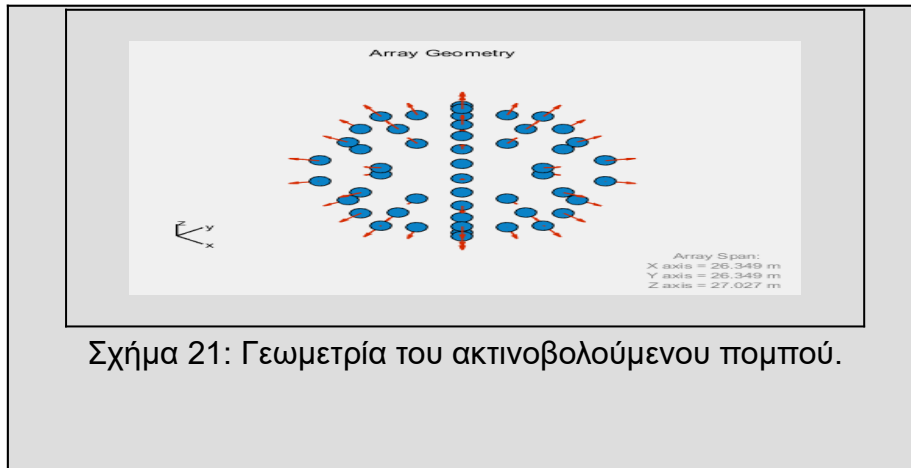
A' ΤΜΗΜΑ

1η περίπτωση - E1Σ1Σ2:

Στο πρώτη περίπτωση, το ενεργητικό σόναρ είναι σε βάθος 30m, βρίσκεται πιο μακριά από τους δύο στόχους, σε σχέση με τα δύο άλλα ενεργητικά σόναρ, με αποτέλεσμα να έχει περισσότερες διαδρομές διάδοσης (12) σε ένα κανάλι με μικρό σχετικά βάθος (100m) και μικρότερη ταχύτητα διάδοσης (1480 m/s) και σε μεγαλύτερη απόσταση από τους στόχους (200m).

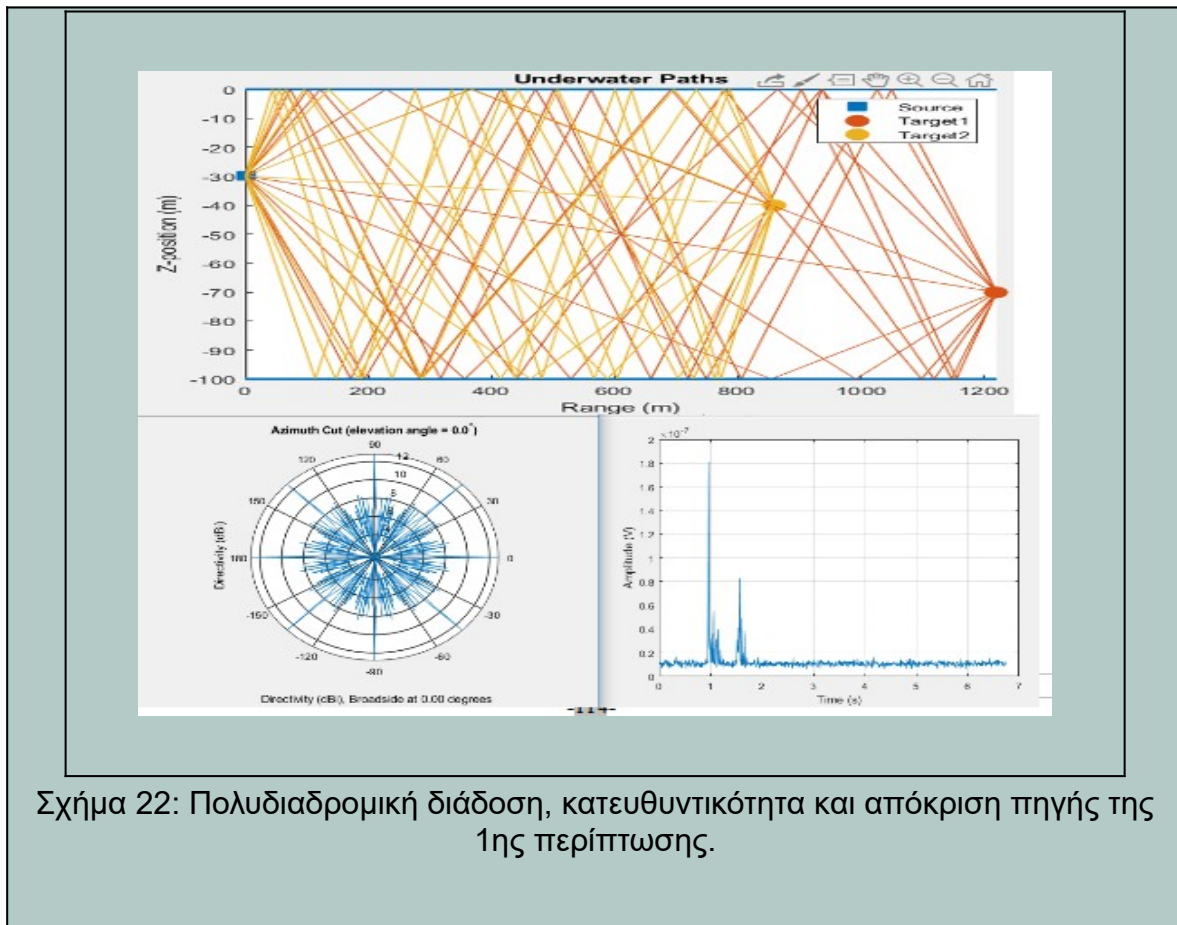
Στη συνέχεια και έπειτα από την χρήση των προγραμμάτων Matlab και Simulink και της εργαλειοθήκης Phased Array System Toolbox™, απεικονίζονται οι έξοδοι των προσομοιώσεων, όπως φαίνεται στα σχήματα από 22 έως 28.

Η γεωμετρία του ακτινοβολούμενου πομπού είναι η ημισφαιρική που φαίνεται παρακάτω (βλέπε σχήμα 22).



Σχήμα 21: Γεωμετρία του ακτινοβολούμενου πομπού.

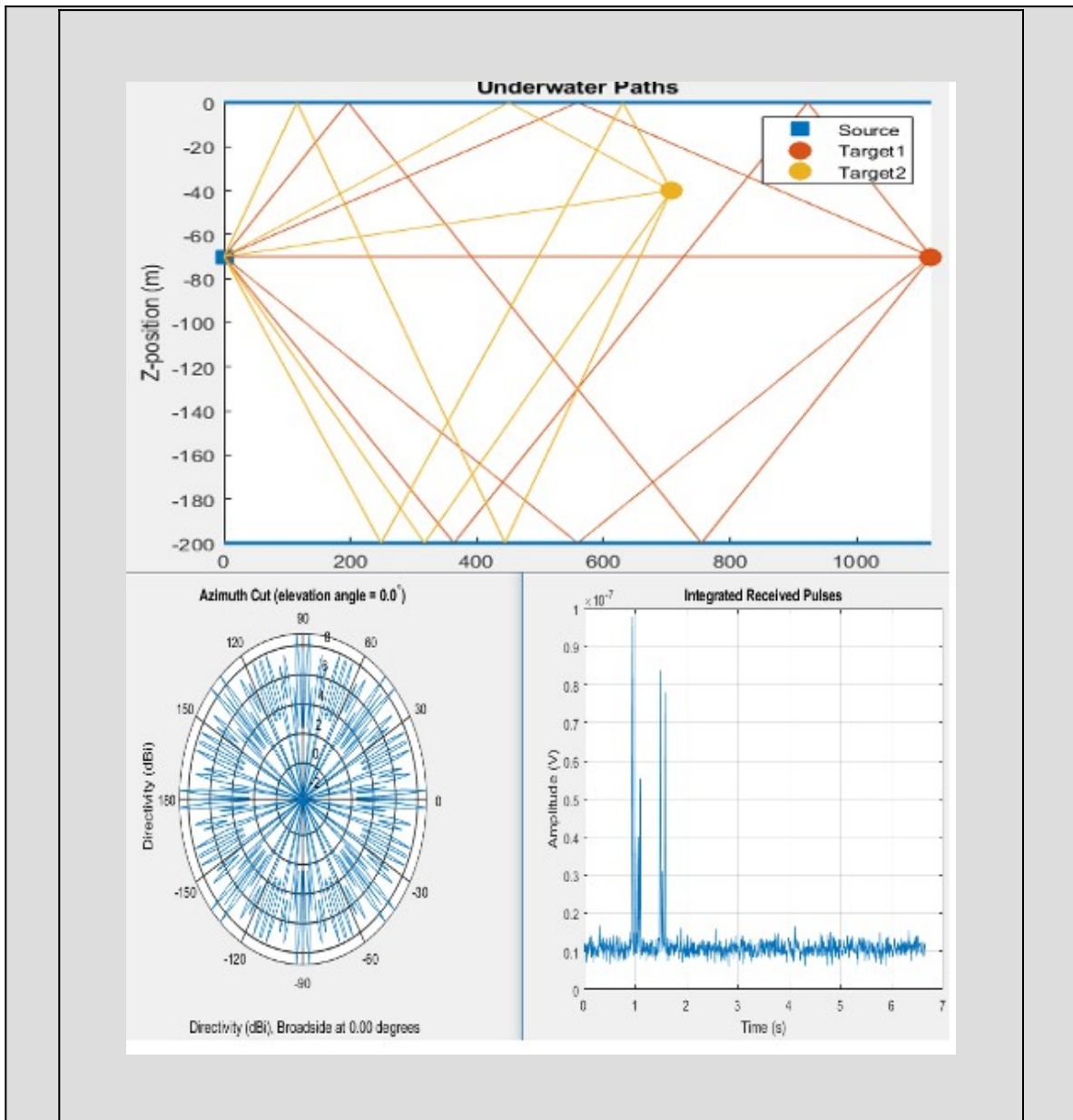
Τα αποτελέσματα για την περίπτωση αυτή, και φαίνονται παρακάτω (βλέπε σχήμα 23).



Σχήμα 22: Πολυδιαδρομική διάδοση, κατευθυντικότητα και απόκριση πηγής της 1ης περίπτωσης.

2η περίπτωση - Ε2Σ1Σ2:

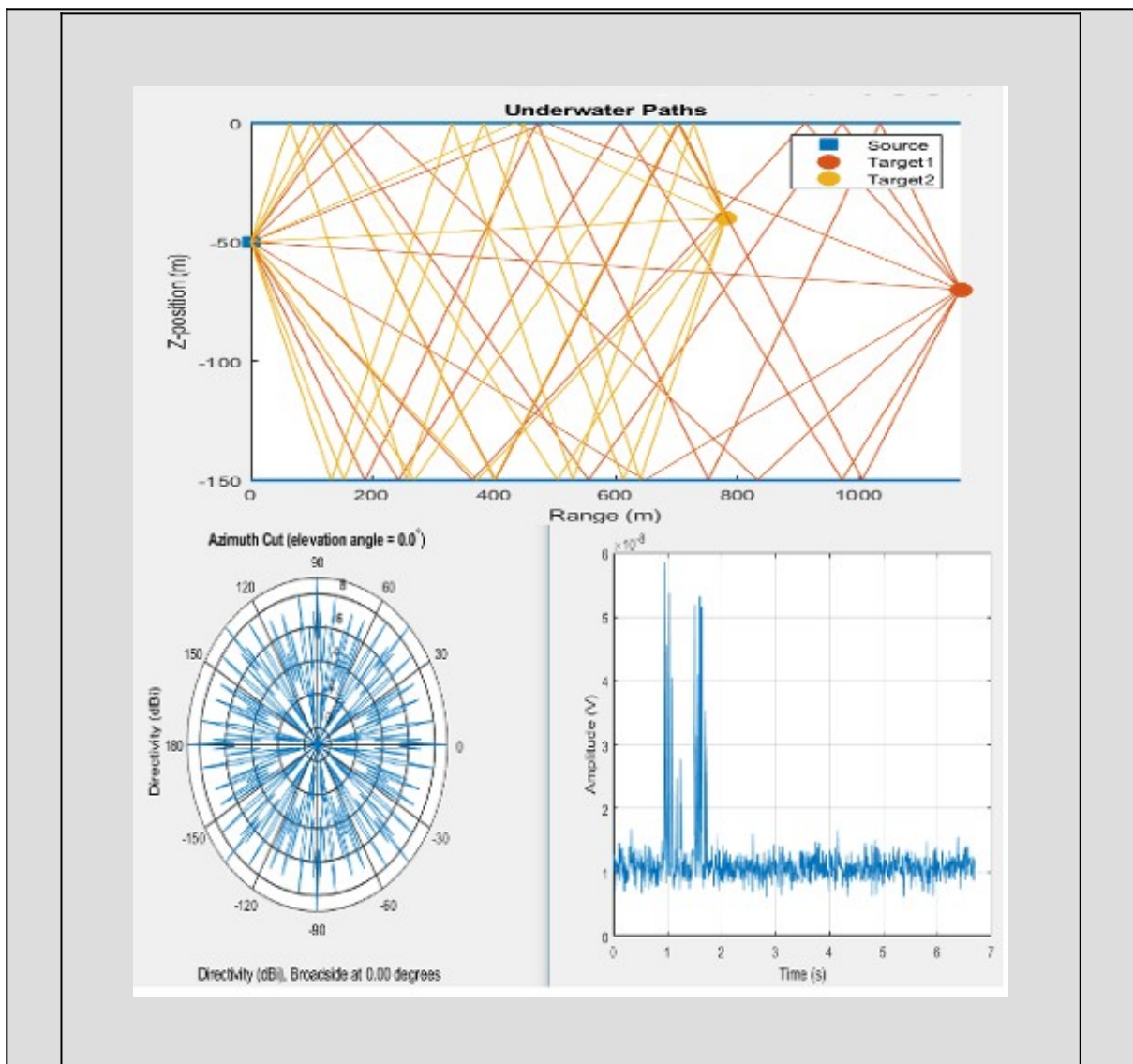
Στην δεύτερη περίπτωση, το ενεργητικό σόναρ είναι σε βάθος 50m, βρίσκεται πιο κοντά από τους δύο στόχους, σε σχέση με το πρώτο ενεργητικό σόναρ, με αποτέλεσμα να έχει λιγότερες διαδρομές διάδοσης (9) σε ένα κανάλι με μεγαλύτερο σχετικά βάθος (150m) και μεγαλύτερη (ελάχιστα) ταχύτητα διάδοσης (1490 m/s) και σε μικρότερη απόσταση από τους στόχους (150m).



Σχήμα 23: Πολυδιαδρομική διάδοση, κατευθυντικότητα και απόκριση πηγής της 2ης περίπτωσης.

3η περίπτωση - E31Σ2:

Στο τρίτη περίπτωση, το ενεργητικό σόναρ είναι σε βάθος 70m, βρίσκεται πιο κοντά από τους δύο στόχους, σε σχέση με τα δύο προηγούμενα ενεργητικά σόναρ, με αποτέλεσμα να έχει λιγότερες διαδρομές διάδοσης (5) σε ένα κανάλι με μεγαλύτερο σχετικά βάθος (200m) και μεγαλύτερη (ελάχιστα) ταχύτητα διάδοσης (1500 m/s) και σε μικρότερη απόσταση από τους στόχους (200m).



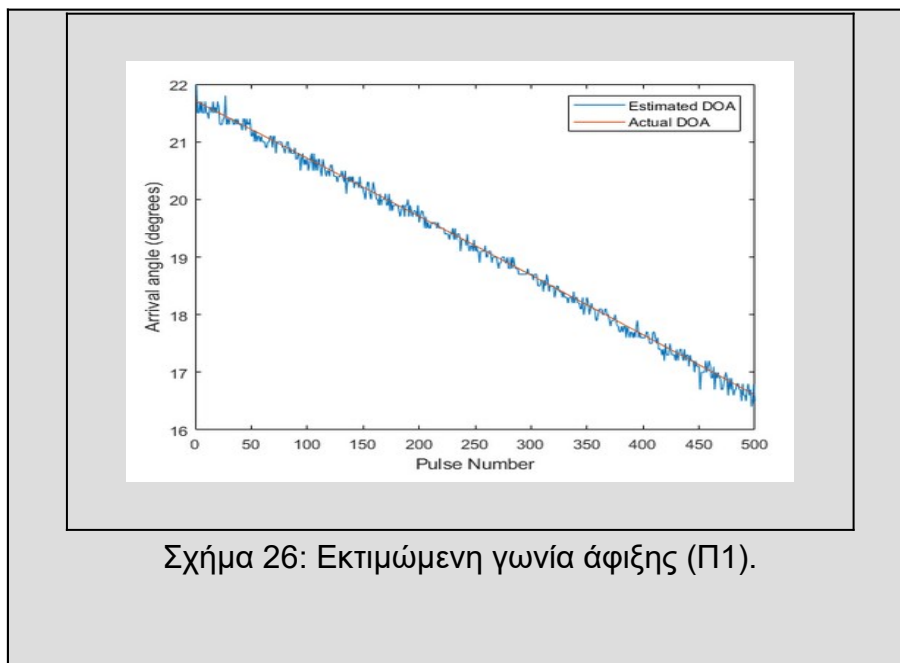
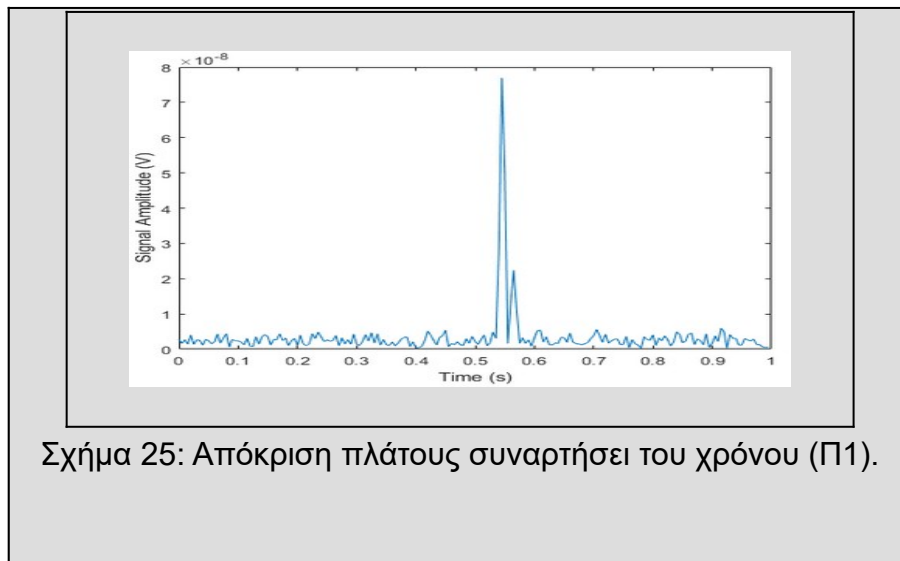
Σχήμα 24: Πολυδιαδρομική διάδοση, κατευθυντικότητα και απόκριση πηγής της 3ης περίπτωσης.

Β΄ ΤΜΗΜΑ

1η περίπτωση – Π1S1

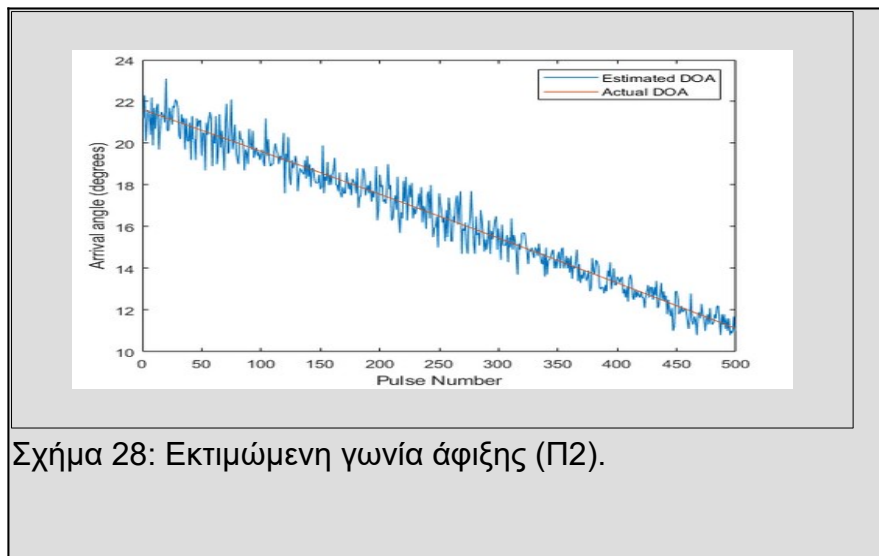
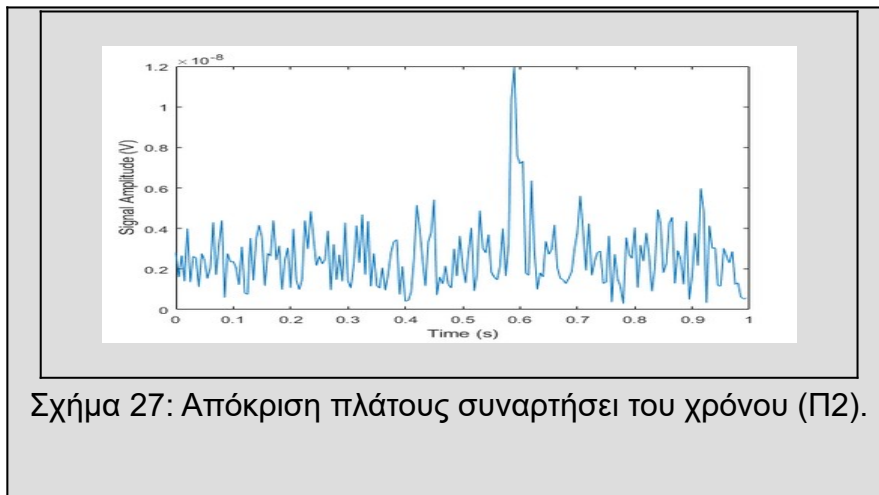
Στην περίπτωση αυτή έχουμε βάθος καναλιού 200m, ταχύτητα διάδοσης 1520 m/s και δέκα (10) μονοπάτια διάδοσης σε συχνότητα λειτουργίας 37,5kHz.

Ο στόχος βρίσκεται στον πυθμένα (1 μέτρο πιο πάνω) και η συρόμενη παθητική συστοιχία κινείται με 1m/s στην κατεύθυνση y.



2η περίπτωση - Π2S2

Στην περίπτωση αυτή έχουμε βάθος καναλιού 150m, ταχύτητα διάδοσης 1500 m/s και δώδεκα (12) μονοπάτια διάδοσης σε συχνότητα λειτουργίας 42 kHz. Ο στόχος βρίσκεται στον πυθμένα (1 μέτρο πιο πάνω) και η συρόμενη παθητική συστοιχία κινείται με ταχύτητα 2m/s στην κατεύθυνση γ.



B. Πειραματικό Μέρος

5. Διάταξη εντοπισμού θαλάσσιων στόχων

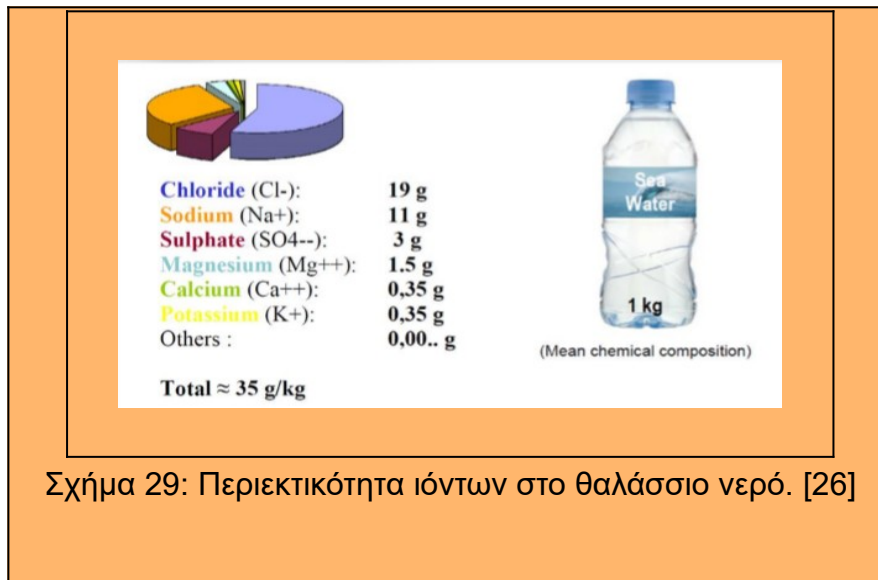
Στον παρόν κεφάλαιο θα ακολουθήσει η παρουσίαση της διάταξης εντοπισμού θαλάσσιων στόχων, οι δυνατότητές της καθώς και τα υποσυστήματα που την απαρτίζουν. Στη συνέχεια θα αναφερθούν τα προβλήματα τα οποία παρουσιάστηκαν και οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίστηκαν.

5.1. Arduino sonar

Το σόναρ, αποτελεί ουσιαστικά ένα υποθαλάσσιο ραντάρ, με κύρια διαφορά το μέσο μετάδοσης, που για την περίπτωση του σόναρ είναι το νερό, ενώ για την περίπτωση του ραντάρ είναι ο αέρας. Για τη δημιουργία ενός ενεργητικού σόναρ, θα πρέπει το ίδιο το σύστημα να εκπέμπει ένα υποθαλάσσιο σήμα, το οποίο να αντανakλά πάνω στον πιθανό στόχο και στη συνέχεια να επιστρέφει και να αναγνωρίζεται από αυτήν (τύπου echo-trig), ενώ για τη δημιουργία ενός παθητικού σόναρ, αρκεί μόνο η λήψη του σήματος – θορύβου από έναν υποθαλάσσιο δέκτη.

Για την υλοποίηση του πειράματος, έγινε η κατασκευή ενός συστήματος εντοπισμού της θέσης μιας υποθαλάσσιας πηγής θορύβου από δύο παθητικά σόναρ, τα οποία είναι τοποθετημένα σε συγκεκριμένες θέσεις. Το υποθαλάσσιο σύστημα, υλοποιήθηκε σε ένα πλαστικό κουτί χωρητικότητας 25 lt, στο οποίο τοποθετήθηκε αλάτι σε αναλογία 35psu, προκειμένου να προσομοιωθεί το θαλασσινό νερό (βλέπε σχήμα 33).

Παρουσιάστηκαν προβλήματα, λόγω της ιδιαιτερότητας των ρευστών έναντι του αέρα ως μέσο μετάδοσης σημάτων καθώς και δυσκολίες, λόγω μη ύπαρξης έτοιμων υδροφώνων – αισθητήρων, αλλά κατασκευής τους από άλλους αισθητήρες.



Σχήμα 29: Περιεκτικότητα ιόντων στο θαλάσσιο νερό. [26]

Τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκαν, είναι τα παρακάτω:

1. Arduino Uno R3 με μικροελεγκτή ATmega328
2. Breadboard με δοκιμαστικά καλώδια M-M, W-M
3. Βομβητής (Active Buzzer) (ηχοφάρος νούμερο 1)
4. Vibration Motor – 12mm (ηχοφάρος νούμερο 2)
5. Πυκνωτικό Μικρόφωνο x2 (παθητικό σόναρ)
6. Κουτιά για την τοποθέτηση των αισθητήρων
7. Κουτί για το νερό
8. Arduino IDE και Η/Υ για συλλογή και επεξεργασία αποτελεσμάτων

5.2. Επεξήγηση της πειραματικής διάταξης

Στη συνέχεια, αναλύονται τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης από 1 έως 5, ενώ τα υπόλοιπα όπως και αυτά θα φανούν και στις φωτογραφίες του επόμενου κεφαλαίου.

1. Arduino Uno R3

Το Arduino, είναι ένα εργαλείο το οποίο επιτρέπει την ανίχνευση και τον έλεγχο ενός

ολόκληρου φυσικού κόσμου και δεν περιορίζεται μόνο στον επιτραπέζιο υπολογιστή. Πρόκειται για μια φυσική πλατφόρμα υπολογιστή ανοικτού κώδικα (open source) η οποία βασίζεται σε μια απλή πλακέτα μικροελεγκτή και ένα περιβάλλον ανάπτυξης για τη σύνταξη λογισμικού.

Το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη διαδραστικών αντικειμένων, λαμβάνοντας εισόδους από διάφορους διακόπτες ή αισθητήρες για έλεγχο ποικίλων οργάνων, κινητήρων και άλλων φυσικών εξόδων. Τα έργα του Arduino μπορούν να είναι αυτόνομα ή μπορούν να επικοινωνούν με το λογισμικό που εκτελείται στον υπολογιστή μας (πχ. Flash, και MaxMSP).

Ένα Arduino αποτελείται από έναν μικροελεγκτή Atmel 8-bit AVR με συμπληρωματικά εξαρτήματα που διευκολύνουν τον προγραμματισμό και την ενσωμάτωση σε άλλα κυκλώματα. Μια σημαντική πτυχή του Arduino είναι οι συνηθισμένοι σύνδεσμοι του, οι οποίοι επιτρέπουν στους χρήστες να συνδέουν την πλακέτα με μια ποικιλία εναλλακτικών μονάδων προέκτασεων (add-on) γνωστές ως ασπίδες (shields). Ορισμένες ασπίδες επικοινωνούν απευθείας με το Arduino.

Το ενσωματωμένο περιβάλλον ανάπτυξης του Arduino (IDE) είναι μια εφαρμογή πολλαπλής πλατφόρμας γραμμένη σε Java. Έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιηθεί με την ίδια ευκολία τόσο από ανθρώπους με βασικές γνώσεις προγραμματισμού, όσο και από ανθρώπους που δεν είναι εξοικειωμένοι με την ανάπτυξη λογισμικού. Περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κώδικα με δυνατότητες όπως επισημάνσεις σύνταξης, αντιστοίχιση ανάρτησης και αυτόματη εσοχή και είναι επίσης ικανό να δημιουργεί και να ανεβάζει προγράμματα με ένα μόνο κλικ. Τα προγράμματα Arduino είναι γραμμένα σε γλώσσα C ή C++. Οι χρήστες χρειάζονται μόνο δύο λειτουργίες για να δημιουργήσουν ένα εκτελέσιμο πρόγραμμα:

- `setup()`: μια λειτουργία που εκτελείται μία φορά στην αρχή ενός προγράμματος που μπορεί να προετοιμάσει τις ρυθμίσεις.
- `loop()`: μια λειτουργία που καλείται επανειλημμένα μέχρι να σβήσει η πλακέτα.

Στη συνέχεια, φαίνονται οι προδιαγραφές του εργαλείου αυτού, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη ώστε το εργαλείο αυτό να λειτουργεί με τον προβλεπόμενο τρόπο (βλέπε Πίνακα 2).

Πίνακας 2: Προδιαγραφές.

Μικροεπεξεργαστής	ATmega328
Τάση Λειτουργίας	5V
Τάση Εισόδου (προτεινόμενη)	7-12V
Τάση Εισόδου (όρια)	6-20V
Ψηφιακές ακίδες E/E	14 (6 παρέχουν PWM έξοδο)
Ακίδες Αναλογικής Εισόδου	6
Σταθερό ρεύμα ανά ψηφίδα E/E	40 mA
Σταθερό ρεύμα για 3.3 volt ανά ψηφίδα	50 mA
Μνήμη flash	32 KB (ATmega328)
Μνήμη SRAM	2 KB (ATmega328)
Μνήμη EEPROM	1 KB (ATmega328)
Ταχύτητα ρολογιού	16 MHz
Μήκος	68.6 mm
Πλάτος	53.4 mm
Βάρος	25 g

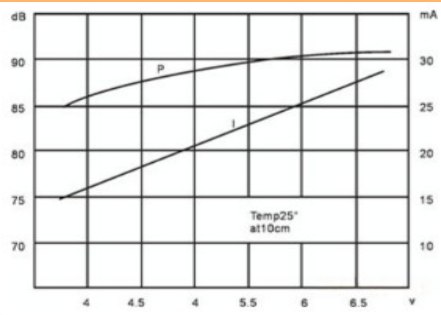
2. Χρησιμοποιήθηκε ένα (1) breadboard δοκιμής καθώς και διάφορα καλώδια M-M, M-W για την σύνδεση του μικροελεγκτή με τους αισθητήρες.

3. Ένας βομβητής (Active Buzzer TMB12A05), τοποθετήθηκε μέσα σε ένα μπουκάλι με έλαιο και στη συνέχεια εντός του νερού, προκειμένου να αποτελέσει, μαζί με το vibration motor, τους ακουστικούς φάρους (ακτινοβολητές) θορύβου της πειραματικής διάταξης.

Οι ηλεκτρονικοί βομβητές είναι τροφοδοτούμενοι από DC τάση και εξοπλισμένοι με ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε υπολογιστές, εκτυπωτές, φωτοαντιγραφικά μηχανήματα, συναγερμούς, ηλεκτρονικά παιχνίδια, ηλεκτρονικές συσκευές αυτοκινήτων, τηλέφωνα, χρονοδιακόπτες και άλλα ηλεκτρονικά προϊόντα για φωνητικές συσκευές. Οι βομβητές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ενεργοί και παθητικοί. Ένας ενεργός βομβητής έχει μια ενσωματωμένη ταλαντευόμενη πηγή, οπότε θα δημιουργήσει έναν ήχο όταν ηλεκτριστεί.

Στη συνέχεια, φαίνεται το φύλλο δεδομένων (datasheet), καθώς και η χαρακτηριστική κέρδους (dB) τάσης (V) και ρεύματος (mA) (βλέπε σχήμα 30).

型号 Type	TMB-12A01	TMB-12A03	TMB-12A05	TMB-12A12
额定电压(V) Rated Voltage	1.5	3	5	12
电压范围(V) Operation Voltage	1.2~2.5	2.5~4	4~7	8~15
额定电流(mA) Rated Current	≤20	≤35	≤30	≤20
声压电平(dB) Sound Output	≥80	≥82	≥85	≥85
谐振频率(Hz) Resonant Freq	2300±500	2300±500	2300±500	2300±500
工作温度(°C) Operating Temp	-20~+60	-20~+60	-20~+60	-20~+60
储存温度(°C) Storage Temp	-20~+70	-20~+70	-30~+85	-30~+85
重量(g) Weight	2	2	2	2



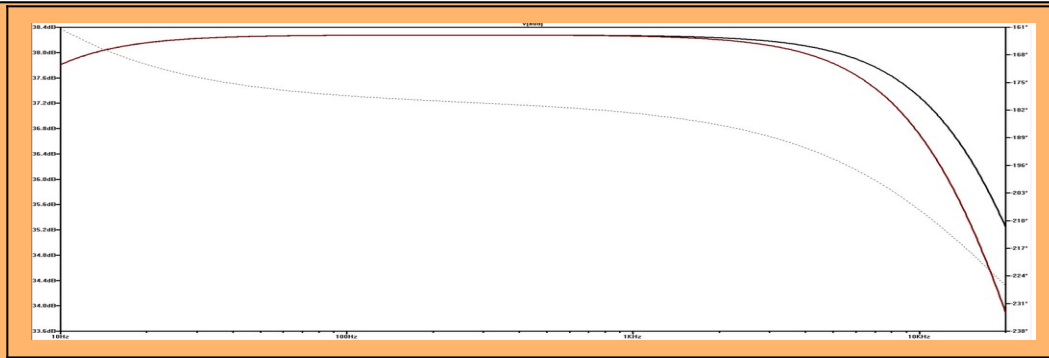
Σχήμα 30: Φύλλο δεδομένων και χαρακτηριστική εξίσωση τάσης και ρεύματος της οικογένειας ενεργητικού βομβητή (TMB12A05).

4. Vibration Micro Motor – 12mm

Αυτός ο κινητήρας δόνησης χωρίς άξονες είναι ιδανικός για ακουστικούς δείκτες. Όλα τα κινούμενα μέρη προστατεύονται μέσα σε περίβλημα. Με εύρος λειτουργίας 2-3,6V, αυτές οι μονάδες παρουσιάζουν τη μέγιστη δόνηση στα 3V. Μόλις συγκολληθεί σε ένα PCB η μονάδα δονείται μαλακά αλλά αισθητά. Αυτή η μονάδα υψηλής ποιότητας είναι εφοδιασμένη με συγκολλητική επένδυση και ενισχυμένα καλώδια σύνδεσης.

Πίνακας 3: Προδιαγραφές και χαρακτηριστικά.

Τάση (Εύρος)	3V
Τρέχουσα (στάση)	85mA
Ταχύτητα	12000RPM
Τύπος ηλεκτρομειωτήρα	Δονητική
Κωδικοποιητής	Όχι
Ονομαστική τάση	DC 3V
Ταχύτητα εξόδου	12000RPM
Υλικό	Μέταλλο, ηλεκτρονικά εξαρτήματα
Κύριο χρώμα	Ασήμι
Διάμετρος πλαισίου	12mm
Ύψος σώματος	3,4 mm
Μήκος καλωδίου	1cm
Βάρος	2g



Σχήμα 32: Διάγραμμα απόκρισης συχνότητας του μικροφώνου.

Στο προηγούμενο διάγραμμα, φαίνεται ότι λαμβάνεται από το μικρόφωνο, το ίδιο κέρδος σε όλο το φάσμα συχνοτήτων (100Hz-10KHz). Η είσοδος του ενισχυτή είναι πολωμένη στο $1/2 V_{CC}$. Η έξοδος από τον ακροδέκτη "AUD" είναι επίσης στο $1/2$ της τάσης τροφοδοσίας, έτσι ώστε να μπορεί να συνδεθεί απευθείας στο ADC του μικροελεγκτή. Σε ήσυχες συνθήκες, το ADC θα διαβάσει ιδανικά το $1/2$ της πλήρους κλίμακας ή το 512 σε μετατροπέα 10 bit.

6. Διεξαγωγή Πειράματος

Στον παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν αναλυτικά όλα τα πειραματικά δεδομένα, του προηγούμενου κεφαλαίου, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η σύνδεση των χρησιμοποιούμενων αισθητήριων οργάνων με το αντικείμενο της εργασίας. Τέλος, θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, μέσω της χρήσης των σχέσεων που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.

6.1. Αναλυτικά στοιχεία που αποτελούν τη διάταξη

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι αισθητήρες που θα προσομοιώσουν τη λειτουργία του ηχητικού φάρου, είναι ο ενεργός βομβητής (active buzzer) (βλέπε σχήμα 28) και ο δονητικός κινητήρας (vibration micro motor) (βλέπε σχήμα 29). Για να επιτευχθεί η τοποθέτησή και η παραμονή τους εντός του νερού, αλλά και η υλοποίηση του πειράματος με όσο το δυνατόν καλύτερες συνθήκες, επιλέχθηκε η τοποθέτησή τους σε μικρά μπουκάλια τα οποία γέμισαν με έλαιο. Αυτό έγινε, προκειμένου να μη φθείρονται οι αισθητήρες από το θαλασσινό νερό, αλλά και για να υπάρχει μετάδοση της ηχητικής πληροφορίας μέσω των ρευστών (έλαιο – νερό).



Σχήμα 33: Active Buzzer σε μπουκάλι με έλαιο



Σχήμα 34: Vibration micro motor σε μπουκάλι με έλαιο

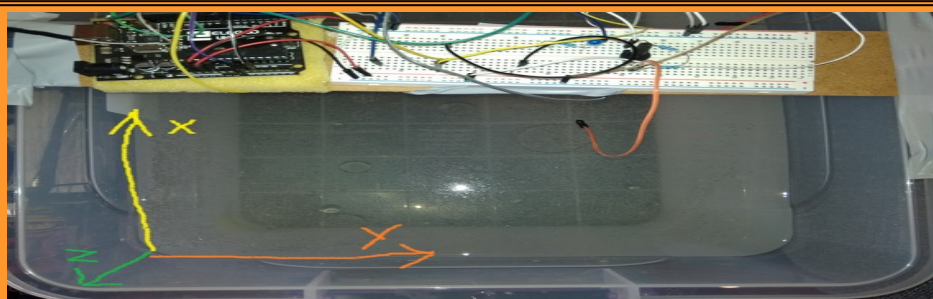
Όπως προαναφέρθηκε, η έξοδος ήχου του active buzzer είναι μεγαλύτερη από 85 dB, ενώ η ταχύτητα δόνησης στην έξοδο του vibration motor είναι 12000RPM. Οι δύο αυτές διατάξεις, θεωρείται ότι προσομοιώνουν κάποιο υποβρύχιο σύστημα εκπομπής θορύβου, κάτι που θα φανεί στη συνέχεια, όταν παρουσιασθούν τα αποτελέσματα από τους αισθητήρες.

Για την προσομοίωση των υδροφώνων, χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) μικρόφωνα (βλέπε σχήμα 30), τα οποία επίσης τοποθετήθηκαν εντός του νερού σε μικρά μπουκάλια με έλαιο, και βρίσκονται εντός του νερού σε συγκεκριμένες θέσεις, ώστε να πραγματοποιηθεί μέσω τριγωνισμού η ανίχνευση της υποθαλάσσιας πηγής θορύβου.



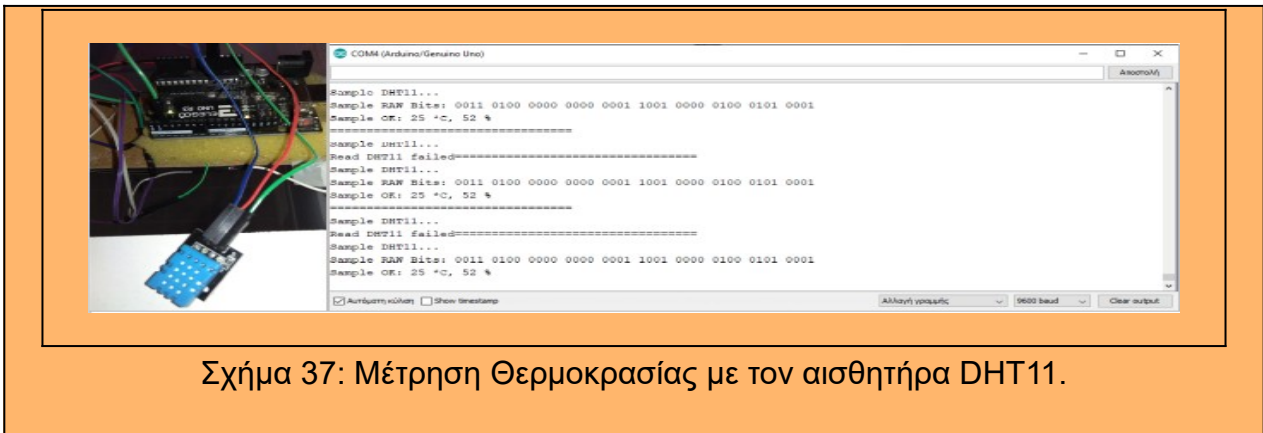
Σχήμα 35: Μικρόφωνο σε μπουκάλι με έλαιο

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ένα πλαστικό κουτί χωρητικότητας 25lt, το οποίο βαθμονομήθηκε (διαστάσεις 42x30x27 cm), και τοποθετήθηκαν σε αυτό 20,5 lt νερό και προστέθηκαν 500gr άλατος, σταδιακά, προκειμένου να εντοπισθούν οι διαφορές στην ταχύτητα του νερού (βλέπε σχήμα 37).

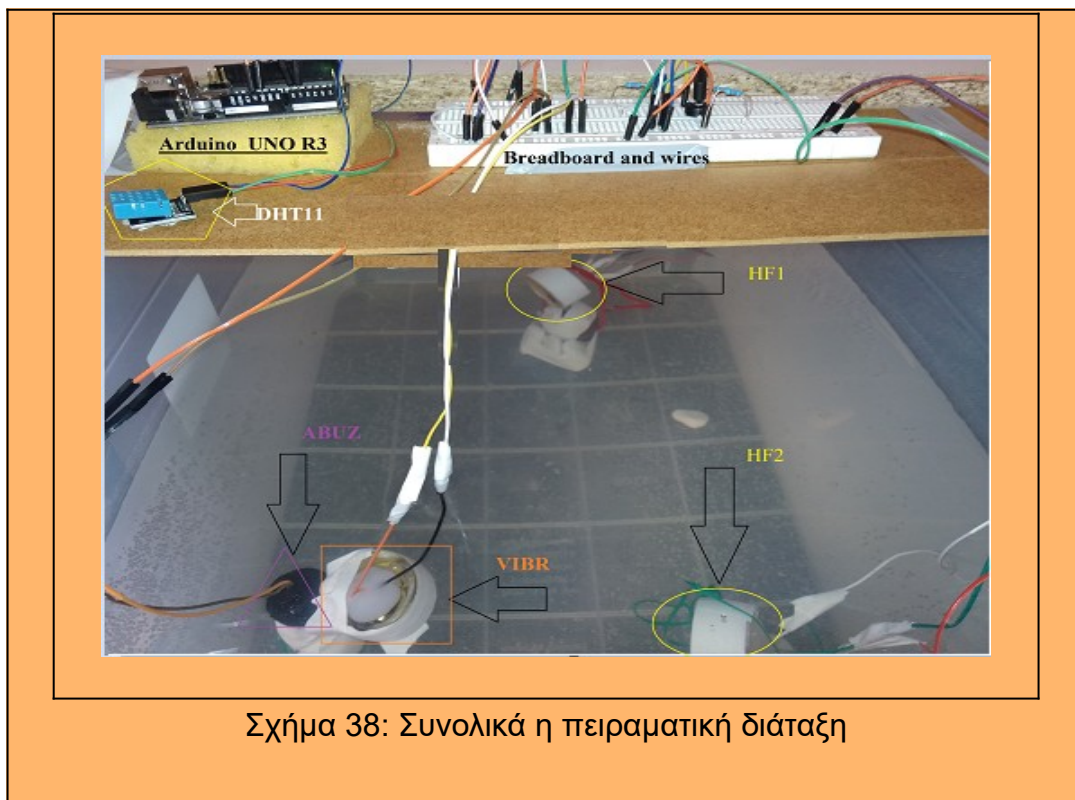


Σχήμα 36: Βαθμονομημένο κουτί με "θαλασσινό" νερό

Αρχικά, στο νερό βρίσκονται διαλυμένα 370 gr άλατος, σε 20,5 lt νερό. Η αλατότητα δηλαδή είναι, 18,05 psu, ενώ η μέση αλατότητα είναι 35 psu. Επίσης μετρήθηκε η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, με τον αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας, DHT11, και έγινε η παραδοχή ότι το πλαστικό κουτί με το νερό βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον του δωματίου (βλέπε σχήμα 38).



Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται ολόκληρη η πειραματική διάταξη (βλέπε σχήμα 39).



6.2. Διεξαγωγή μετρήσεων

1η σειρά μετρήσεων

Αρχικά, και όπως προαναφέρθηκε με την αλατότητα να είναι 18,05 psu, τοποθετήθηκαν οι πηγές θορύβου (active buzzer, vibration motor) και οι αισθητήρες εντοπισμού (δύο (2) μικρόφωνα) σε συγκεκριμένες θέσεις εντός του πλαστικού κουτιού με το “θαλασσινό νερό”.

Οι θέσεις αυτές φαίνονται παρακάτω με τις συντεταγμένες τους:

$$HF1 = (31,16,11) \text{ cm}$$

$$HF2 = (9,21,8) \text{ cm}$$

$$ABUZ = (11,5,8) \text{ cm}$$

$$VIBR = (11,8,9) \text{ cm}$$

Οι αποστάσεις των “υδροφώνων” από το buzzer και το vibration φαίνονται παρακάτω:

$$(HF1-ABUZ) = H1A = 23,02 \text{ cm}$$

$$(HF1-VIBR) = H1V = 21,63 \text{ cm}$$

$$(HF2 -ABUZ) = H2A = 16,12 \text{ cm}$$

$$(HF2 - VIBR) = H2V = 13,19 \text{ cm}$$

α) Αρχικά, δεν είναι ενεργοποιημένο ούτε ο βομβητής, ούτε ο κινητήρας δόνησης και τα αποτελέσματα έντασης που λαμβάνονται από τα δύο “υδρόφωνα” καθώς και η διαφορά τους φαίνονται παρακάτω:

Table 4: Τιμές υδροφώνων, μέγιστη, ελάχιστη και διαφορά τους χωρίς πηγές ήχου.

AVERAGE	333,16388	333,39465	-0,230769231	333,28094	333,49164	-0,210702341	333,36789	334,00334	-0,6354515
MAX	348	354	22	349	351	18	348	365	17
MIN	315	314	-16	317	316	-20	318	318	-20

Σε τρεις (3) μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και σε δείγμα τριακοσίων (300) τιμών, οι τιμές από τα δύο υδρόφωνα είναι σχεδόν ίδιες, κάτι αναμενόμενο. Επίσης από τη μέγιστη και ελάχιστη διαφορά τιμών από τα δύο υδρόφωνα, φαίνεται ότι η μέγιστη σε απόλυτη τιμή απόκλιση τιμών δεν ξεπερνά το 20, κάτι επίσης αναμενόμενο.

Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι παρακάτω 15 τιμές.

Πίνακας 5: Τιμές υδροφώνων, καθώς και η διαφορά τους χωρίς πηγές ήχου.

Acolumn	Bcolumn	HF1	HF2	dif_without_1st	HF1	HF2	dif_without_2nd	HF1	HF2	without_3rd
20:36:45	0	333	324	9	339	342	-3	329	335	-6
20:36:45	0	338	335	3	333	333	0	332	333	-1
20:36:46	1	316	327	-11	328	322	6	327	322	5
20:36:46	1	343	332	11	333	320	13	329	335	-6
20:36:46	1	330	341	-11	330	328	2	332	337	-5
20:36:46	1	326	328	-2	336	334	2	330	343	-13
20:36:46	1	324	325	-1	328	332	-4	329	334	-5
20:36:46	1	326	332	-6	331	327	4	318	332	-14
20:36:46	1	345	348	-3	332	340	-8	322	320	2
20:36:46	1	343	341	2	324	325	-1	332	335	-3
20:36:46	1	335	331	4	332	326	6	337	339	-2
20:36:46	1	334	334	0	338	338	0	341	345	-4
20:36:46	1	328	343	-15	336	339	-3	331	330	1
20:36:46	1	344	333	11	329	328	1	343	331	12

β) Στη συνέχεια ενεργοποιήθηκε μόνο ο ενεργητικός βομβητής, ενώ ο κινητήρας δόνησης είναι απενεργοποιημένος. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 6: Τιμές υδροφώνων, μέγιστη, ελάχιστη και διαφορά τους, με ενεργοποιημένο μόνο τον ενεργητικό βομβητή.

AVERAGE	331,48829	341,98662	-10,498328	316,94314	300,26756	16,675585	357,92977	314,12709	43,802676
MAX	667	668	667	667	668	667	668	669	667
MIN	0	0	-667	0	0	-667	0	0	-668

Επίσης, πραγματοποιήθηκαν τρεις (3) μετρήσεις, και σε δείγμα τριακοσίων επίσης τιμών, παρατηρείται ότι τα δύο υδρόφωνα παρουσιάζουν τις ίδιες μέγιστες και ελάχιστες τιμές. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται παρακάτω

Πίνακας 7: Τιμές υδροφώνων, καθώς και η διαφορά τους.

Acolumn	Bcolumn	HF1	HF2	AB_only	HF1	HF2	AB_only_2nd	HF1	HF2	AB_only_3rd
20:30:53	0	161	464	-303	559	172	387	256	589	-333
20:30:53	0	90	667	-577	345	143	202	501	128	373
20:30:53	0	667	41	626	172	593	-421	667	181	486
20:30:53	0	520	18	502	667	114	553	317	104	213
20:30:53	0	26	575	-549	556	98	458	132	293	-161
20:30:53	0	6	667	-661	667	39	628	351	92	259
20:30:53	0	665	0	665	58	0	58	109	147	-38
20:30:53	0	656	256	400	649	0	649	111	109	2
20:30:53	0	651	490	161	20	0	20	667	106	561
20:30:53	0	7	657	-650	2	666	-664	414	100	314
20:30:53	0	666	0	666	667	0	667	544	92	452
20:30:53	0	667	606	61	646	0	646	112	667	-555
20:30:53	0	649	0	649	648	122	526	665	83	582
20:30:53	0	7	0	7	3	0	3	668	334	334
20:30:53	0	76	0	76	658	584	74	41	625	-584
20:30:53	1	657	22	635	0	665	-665	667	24	643
20:30:54	1	1	655	-654	659	0	659	508	0	508
20:30:54	1	409	655	-246	0	667	-667	654	291	363
20:30:54	1	642	0	642	180	0	180	2	667	-665
20:30:54	1	652	661	-9	646	0	646	0	667	-667
20:30:54	1	16	667	-651	652	661	-9	56	0	56
20:30:54	1	1	666	-665	0	660	-660	11	0	11
20:30:54	1	665	654	11	516	0	516	0	667	-667
20:30:54	1	655	667	-12	667	0	667	667	0	667
20:30:54	1	13	625	-612	5	0	5	645	0	645
20:30:54	1	647	667	-20	18	0	18	641	668	-27
20:30:54	1	1	657	-656	657	373	284	35	0	35
20:30:54	1	0	667	-667	650	13	637	5	658	-653
20:30:54	1	213	0	213	0	667	-667	2	667	-665
20:30:54	1	646	1	645	638	667	-29	622	650	-28
20:30:54	1	13	0	13	19	0	19	2	668	-666
20:30:54	1	665	204	461	6	281	-275	2	0	2
20:30:54	1	17	665	-648	667	0	667	167	667	-500
20:30:54	1	8	667	-659	657	172	485	649	0	649
20:30:54	1	657	0	657	10	667	-657	658	534	124
20:30:54	1	650	187	463	6	666	-660	11	0	11
20:30:54	1	0	667	-667	662	0	662	655	417	238
20:30:54	1	0	658	-658	659	579	80	3	667	-664
20:30:54	1	637	667	-30	654	0	654	662	0	662

γ) Τέλος, ενεργοποιήθηκε μόνο ο κινητήρας δόνησης ενώ το active buzzer είναι απενεργοποιημένο. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 8: Τιμές υδροφώνων, μέγιστη, ελάχιστη και διαφορά τους, με ενεργοποιημένο μόνο τον κινητήρα δόνησης.

AVERAGE	345,79264	340,36455	5,4280936	346,91304	343,91304	3	356,52174	362,10702	-5,5852843
MAX	676	676	669	676	676	672	676	676	649
MIN	0	0	-674	0	0	-673	0	0	-673

Από τις παραπάνω σχέσεις για τον μέσο όρο, τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή, δεν προκύπτει κάτι διαφορετικό σε σχέση με προηγουμένως. Στη συνέχεια, φαίνονται ενδεικτικά και οι υπόλοιπες μετρήσεις.

Πίνακας 9: Τιμές υδροφώνων, καθώς και η διαφορά τους, με ενεργοποιημένο μόνο τον κινητήρα δόνησης.

Acolumn	Bcolumn	HF1	HF2	Vibr_1st	HF1	HF2	Vibr_2nd	HF1	HF2	Vibr_3rd
20:45:27	0	675	675	0	675	675	0	675	675	0
20:45:27	0	675	675	0	675	675	0	675	675	0
20:45:27	0	1	0	1	673	1	672	0	0	0
20:45:27	0	675	675	0	0	0	0	0	0	0
20:45:27	0	1	0	1	675	675	0	675	675	0
20:45:27	0	676	676	0	557	574	-17	615	655	-40
20:45:27	0	451	467	-16	8	11	-3	12	0	12
20:45:27	0	0	0	0	675	675	0	675	674	1
20:45:27	0	0	0	0	547	576	-29	537	587	-50
20:45:27	0	0	0	0	295	369	-74	394	410	-16
20:45:27	0	447	452	-5	675	675	0	675	675	0
20:45:27	0	375	383	-8	1	0	1	675	675	0
20:45:27	0	672	674	-2	387	409	-22	350	510	-160
20:45:27	0	675	675	0	1	0	1	3	0	3
20:45:27	0	501	516	-15	675	675	0	0	0	0
20:45:27	0	343	345	-2	0	17	-17	660	675	-15
20:45:27	0	0	0	0	509	520	-11	356	349	7
20:45:27	0	19	0	19	243	250	-7	0	0	0
20:45:27	0	2	0	2	672	674	-2	12	0	12
20:45:27	0	471	464	7	0	1	-1	675	675	0
20:45:27	0	457	483	-26	556	579	-23	354	359	-5
20:45:27	0	0	0	0	399	14	385	0	0	0
20:45:28	1	0	4	-4	1	24	-23	0	0	0
20:45:28	1	1	20	-19	0	673	-673	674	674	0
20:45:28	1	409	413	-4	385	383	2	414	401	13
20:45:28	1	346	338	8	1	0	1	0	0	0
20:45:28	1	0	0	0	620	674	-54	675	675	0
20:45:28	1	5	0	5	674	675	-1	0	0	0
20:45:28	1	675	675	0	348	345	3	520	527	-7

Αυτό που θα μπορούσε να παρατηρηθεί από τις μετρήσεις αυτές, είναι πως αρχικά τα δύο υδρόφωνα δίνουν τις ίδιες ακριβώς τιμές (675) ενώ στη συνέχεια εναλλάσσονται με θετικές και αρνητικές τιμές. Αυτό που συμπεραίνεται από το προηγούμενο είναι, ότι οι δονήσεις του κινητήρα μεταδίδονται ακριβώς με την ίδια ταχύτητα αρχικά, σχεδόν ακαριαία και στα δύο υδρόφωνα. Στη συνέχεια, λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων από τα τοιχώματα, παρουσιάζονται είτε θετικές είτε αρνητικές διαφορές τιμών, ανάμεσα στα δύο υδρόφωνα.

2η σειρά μετρήσεων

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν άλλα 130 gr άλατος φθάνοντας στο σύνολο τα 500gr, και με την αλατότητα τώρα να φθάνει τα 24,39 psu, παρουσιάζοντας αύξηση 35% σε σχέση με πριν.

Οι αποστάσεις των υδροφώνων παρέμειναν ίδιες, και κατά την επανάληψη των μετρήσεων θα δούμε πόσο μεταβάλλεται η σχέση (1.1), η οποία για λόγους ευκολίας φαίνεται παρακάτω.

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,010T)(S - 35) + 0,016Z \quad (6.1)$$

Για τη δεδομένη θερμοκρασία $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, έχουμε $z = 8\text{cm}$ για το buzzer και $z = 9\text{cm}$ για τον κινητήρα δόνησης.

Επομένως, και για τις δύο περιπτώσεις, η συνολική ταχύτητα του ήχου, γίνεται:

$$c = 1534,36 + 1,09 \times (s - 35) \quad (6.2)$$

Άρα, προκύπτει $s = 18,05$ psu $c = 1515,9$ m/s, ενώ για $s' = 24,39$ psu, προκύπτει $c' = 1522,8$ m/s.

Δηλαδή, για μια αύξηση της αλατότητας κατά 35%, προκύπτει αύξηση της ταχύτητας του ήχου κατά 0,0046%. Αυτή η αύξηση είναι πολύ μικρή, ωστόσο κατά τη δεύτερη σειρά μετρήσεων θα γίνει προσπάθεια καταγραφής της.

α) Αρχικά, όπως και προηγουμένως, δεν είναι ενεργοποιημένο ούτε ο βομβητής, ούτε ο κινητήρας δόνησης και τα αποτελέσματα έντασης που λαμβάνονται από τα δύο “υδρόφωνα” καθώς και η διαφορά τους φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 10: Τιμές υδροφώνων, μέγιστη, ελάχιστη και διαφορά τους, χωρίς πηγές ήχου.

AVERAGE	333,34114	333,72575	-0,3846153846	333,12375	333,29431	-0,1705686	332,69565	333,47157	-0,7759197
MAX	356	354	23	351	353	19	351	355	19
MIN	314	318	-24	315	316	-19	313	310	-24

Όπως παρατηρείται σε σχέση με πριν, δεν υπάρχει κάποια διαφορά στις τιμές, κάτι αναμενόμενο, ενώ δείγμα των αναλυτικών τιμών, φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 11: Τιμές υδροφώνων, καθώς και η διαφορά τους χωρίς πηγές ήχο.

Acolumn	Bcolumn	HF1	HF2	no_sources_1	HF1	HF2	no_sourc	HF1	HF2	no_sourc
				st			es_2nd			es_3rd
20:04:27	0	328	329	-1	340	342	-2	331	337	-6
20:04:27	0	338	337	1	325	333	-8	338	338	0
20:04:27	0	332	343	-11	330	339	-9	338	338	0
20:04:27	0	341	335	6	332	335	-3	334	336	-2
20:04:27	0	343	338	5	336	327	9	341	332	9
20:04:27	0	340	334	6	343	348	-5	327	336	-9
20:04:27	0	328	333	-5	328	329	-1	326	331	-5
20:04:27	0	343	343	0	321	335	-14	329	341	-12
20:04:27	0	331	335	-4	336	342	-6	319	329	-10
20:04:27	0	326	329	-3	333	335	-2	339	343	-4
20:04:27	0	325	322	3	327	337	-10	345	355	-10
20:04:27	0	333	345	-12	330	331	-1	339	330	9

β) Στη συνέχεια, ενεργοποιούμε μόνο τον βομβητή, με τον κινητήρα δόνησης να είναι απενεργοποιημένος.

Τα αποτελέσματα των τριών μετρήσεων, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

Πίνακας 12: Μετρήσεις με μόνο ενεργό τον βομβητή.

AVERAGE	358,08361	310,6388	47,444816	318,69565	326,94983	-8,2541806	318,69565	326,94983	-8,2541806
MAX	666	666	664	665	666	663	665	666	663
MIN	1	0	-665	1	0	-665	1	0	-665

Στη συνέχεια, φαίνονται και αναλυτικά οι μετρήσεις.

Πίνακας 13: Τιμές υδροφώνων, καθώς και η διαφορά τους μόνο με τον βομβητή.

Acolumn	Bcolumn	HF1	HF2	AB_only_1st		AB_only_3rd		AB_only_3rd		
				HF1	HF2	HF1	HF2	HF1	HF2	3rd
20:30:34	0	160	665	-505	153	666	-513	153	666	-513
20:30:34	0	665	52	613	77	48	29	77	48	29
20:30:34	0	57	28	29	64	665	-601	64	665	-601
20:30:34	0	32	129	-97	22	666	-644	22	666	-644
20:30:34	0	9	666	-657	488	0	488	488	0	488
20:30:34	0	664	665	-1	5	0	5	5	0	5
20:30:34	0	2	666	-664	665	665	0	665	665	0
20:30:34	0	117	0	117	662	665	-3	662	665	-3
20:30:34	0	2	666	-664	1	666	-665	1	666	-665
20:30:34	0	21	0	21	4	665	-661	4	665	-661
20:30:34	0	665	2	663	459	0	459	459	0	459
20:30:34	0	4	249	-245	1	666	-665	1	666	-665
20:30:34	0	665	2	663	4	665	-661	4	665	-661
20:30:34	0	665	301	364	474	1	473	474	1	473
20:30:34	1	664	3	661	26	0	26	26	0	26
20:30:35	1	665	538	127	4	665	-661	4	665	-661
20:30:35	1	665	2	663	459	1	458	459	1	458
20:30:35	1	4	662	-658	1	666	-665	1	666	-665
20:30:35	1	665	2	663	4	665	-661	4	665	-661
20:30:35	1	665	3	662	251	0	251	251	0	251
20:30:35	1	664	2	662	149	0	149	149	0	149
20:30:35	1	4	0	4	174	0	174	174	0	174
20:30:35	1	4	0	4	665	2	663	665	2	663
20:30:35	1	664	665	-1	665	2	663	665	2	663
20:30:35	1	1	665	-664	2	665	-663	2	665	-663
20:30:35	1	4	0	4	664	666	-2	664	666	-2
20:30:35	1	665	485	180	665	2	663	665	2	663
20:30:35	1	4	665	-661	665	3	662	665	3	662
20:30:35	1	665	1	664	664	2	662	664	2	662
20:30:35	1	1	666	-665	665	2	663	665	2	663
20:30:35	1	665	487	178	665	665	0	665	665	0
20:30:35	1	664	3	661	665	665	0	665	665	0
20:30:35	1	665	371	294	664	665	-1	664	665	-1
20:30:35	1	2	665	-663	665	2	663	665	2	663
20:30:35	1	5	0	5	2	665	-663	2	665	-663
20:30:35	1	664	665	-1	665	499	166	665	499	166
20:30:35	1	2	665	-663	1	665	-664	1	665	-664
20:30:35	1	4	0	4	145	0	145	145	0	145
20:30:35	1	4	0	4	286	665	-379	286	665	-379
20:30:36	2	4	0	4	32	0	32	32	0	32
20:30:36	2	665	489	176	4	663	-659	4	663	-659
20:30:36	2	2	665	-663	4	0	4	4	0	4
20:30:36	2	21	0	21	4	0	4	4	0	4
20:30:36	2	664	3	661	4	3	1	4	3	1
20:30:36	2	4	662	-658	3	664	-661	3	664	-661
20:30:36	2	1	665	-664	23	0	23	23	0	23
20:30:36	2	4	665	-661	665	155	510	665	155	510
20:30:36	2	594	2	592	1	666	-665	1	666	-665
20:30:36	2	665	2	663	4	5	-1	4	5	-1

γ) Τέλος, ενεργοποιείται μόνο ο κινητήρας δόνησης, ενώ το active buzzer παραμένει κλειστό. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 14: Μετρήσεις με μόνο ενεργό τον κινητήρα δόνησης

AVERAGE	378,24415	367,49498	10,749164	344,32441	342,0903	2,2341137	382,58194	384,92308	-2,3411371
MAX	673	674	667	673	674	669	673	674	672
MIN	0	0	-669	0	0	-671	0	0	-667

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα των μετρήσεων, φαίνονται παρακάτω:

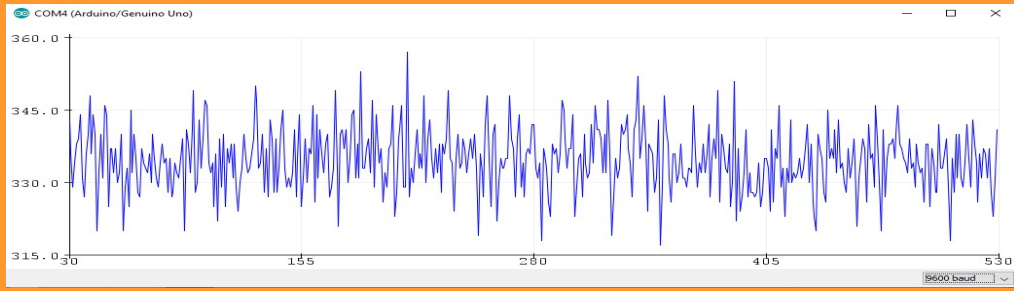
Πίνακας 15: Τιμές υδροφώνων, καθώς και η διαφορά τους μόνο με το vibration

20:49:11	0	673	673	0	672	673	-1	673	674	-1
20:49:11	0	673	673	0	672	673	-1	672	673	-1
20:49:11	0	673	673	0	673	673	0	672	673	-1
20:49:11	0	668	3	665	4	6	-2	4	2	2
20:49:11	0	4	3	1	1	2	-1	4	2	2
20:49:11	0	5	2	3	666	671	-5	672	673	-1
20:49:11	0	672	672	0	672	673	-1	672	673	-1
20:49:11	0	673	673	0	672	673	-1	672	673	-1
20:49:11	0	479	507	-28	4	2	2	4	17	-13
20:49:11	0	347	337	10	672	673	-1	672	673	-1
20:49:11	0	673	673	0	3	2	1	3	2	1
20:49:11	0	673	673	0	7	2	5	672	673	-1
20:49:11	0	345	342	3	672	673	-1	672	673	-1
20:49:11	0	334	336	-2	672	673	-1	672	673	-1
20:49:11	0	4	3	1	672	673	-1	4	3	1
20:49:11	0	7	3	4	672	672	0	47	3	44
20:49:11	0	4	2	2	609	673	-64	4	2	2
20:49:11	0	5	0	5	43	673	-630	4	2	2
20:49:11	0	470	492	-22	4	2	2	673	674	-1
20:49:11	0	269	308	-39	3	2	1	672	673	-1
20:49:11	0	87	3	84	32	3	29	4	2	2
20:49:11	0	460	124	336	447	496	-49	4	1	3
20:49:11	1	580	597	-17	376	367	9	3	2	1
20:49:12	1	328	329	-1	13	2	11	4	2	2
20:49:12	1	510	509	1	3	2	1	672	673	-1
20:49:12	1	671	672	-1	670	672	-2	672	672	0
20:49:12	1	672	673	-1	370	363	7	4	2	2
20:49:12	1	353	350	3	341	352	-11	25	671	-646
20:49:12	1	287	285	2	1	2	-1	3	2	1
20:49:12	1	672	673	-1	3	2	1	673	673	0
20:49:12	1	645	673	-28	672	673	-1	672	674	-2
20:49:12	1	77	3	74	392	402	-10	3	15	-12
20:49:12	1	421	423	-2	672	668	4	4	1	3
20:49:12	1	337	334	3	670	672	-2	4	2	2
20:49:12	1	444	444	0	3	2	1	672	673	-1
20:49:12	1	511	530	-19	671	672	-1	672	673	-1
20:49:12	1	381	394	-13	672	673	-1	672	673	-1
20:49:12	1	313	295	18	543	572	-29	4	2	2
20:49:12	1	4	2	2	4	2	2	4	2	2
20:49:12	1	18	239	-221	671	673	-2	672	672	0
20:49:12	1	3	2	1	3	0	3	672	673	-1
20:49:12	1	3	0	3	671	672	-1	672	673	-1
20:49:12	1	672	673	-1	481	485	-4	4	2	2
20:49:12	1	443	441	2	375	384	-9	670	672	-2
20:49:12	1	371	352	19	0	2	-2	3	2	1
20:49:12	1	28	3	25	3	2	1	671	672	-1
20:49:12	1	5	2	3	672	673	-1	673	674	-1
20:49:12	1	5	3	2	672	673	-1	672	673	-1
20:49:12	1	414	444	-30	461	450	11	672	673	-1

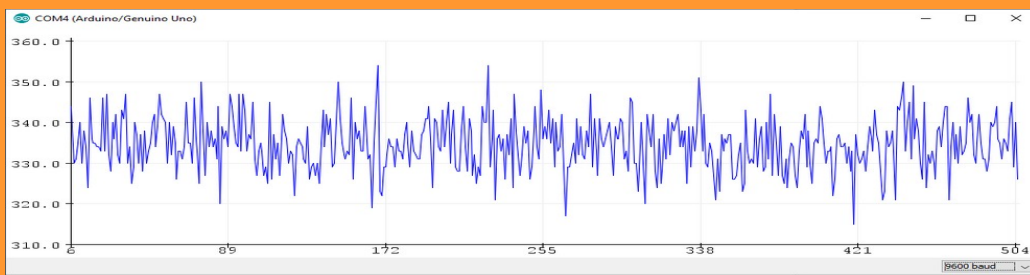
γ) Τοποθέτηση άλλων 217 gr αλατιού (σύνολο 717 = 35 psu).

Αρχικά, όπως και προηγουμένως, πραγματοποιούνται μετρήσεις χωρίς πηγές αλλά και με την κάθε πηγή ήχου ξεχωριστά και φαίνονται παρακάτω οι αποκρίσεις των δύο υδροφώνων, συναρτήσει του χρόνου.

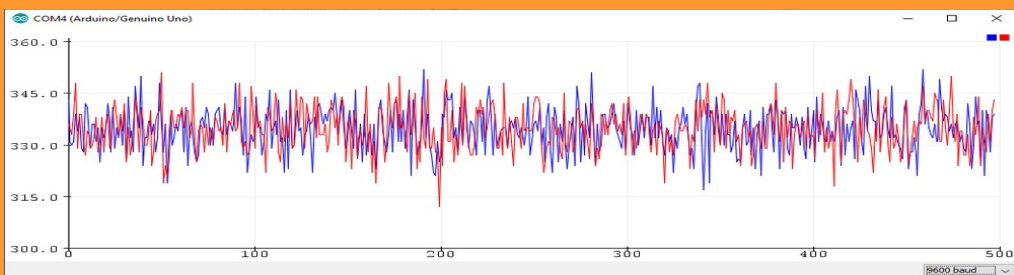
- Διαγράμματα αποκρίσεων των υδροφώνων HF1 και HF2, συναρτήσει του χρόνου, χωρίς ενεργοποιημένη πηγή.



Σχήμα 39: Διάγραμμα της απόκρισης του υδροφώνου 1 (HF1), χωρίς πηγή

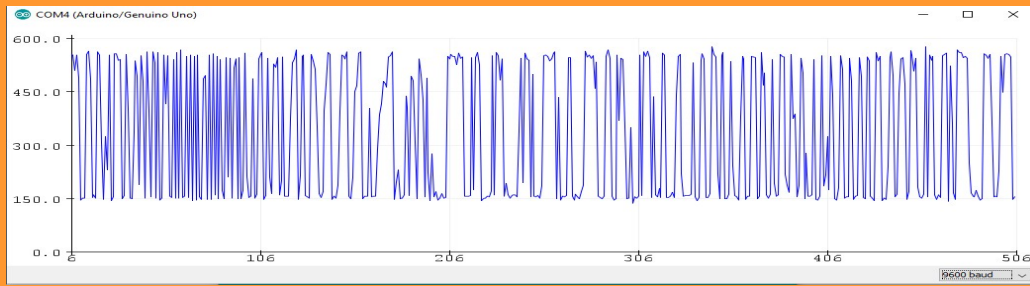


Σχήμα 40: Διάγραμμα της απόκρισης του υδροφώνου 2 (HF2), χωρίς πηγή

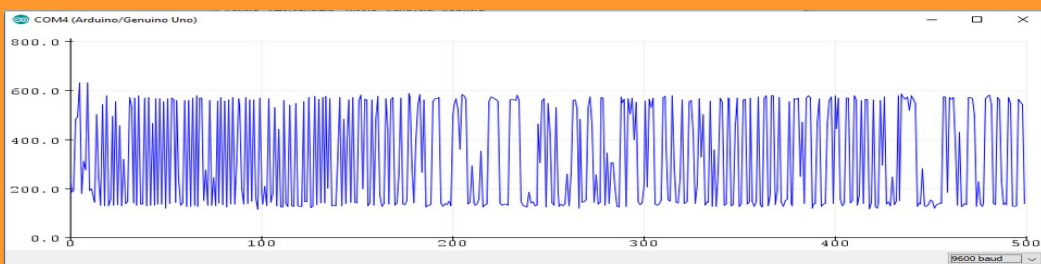


Σχήμα 41: Διάγραμμα της απόκρισης των δύο υδροφώνων (HF1, HF2), χωρίς πηγή

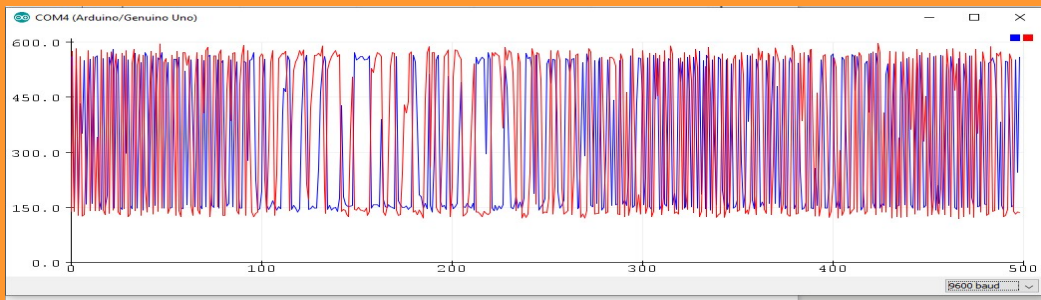
- Διαγράμματα αποκρίσεων των υδροφώνων HF1 και HF2, συναρτήσει του χρόνου, με το active buzzer ενεργοποιημένο.



Σχήμα 42: Διάγραμμα της απόκρισης του υδροφώνου 1 (HF1), με buzzer

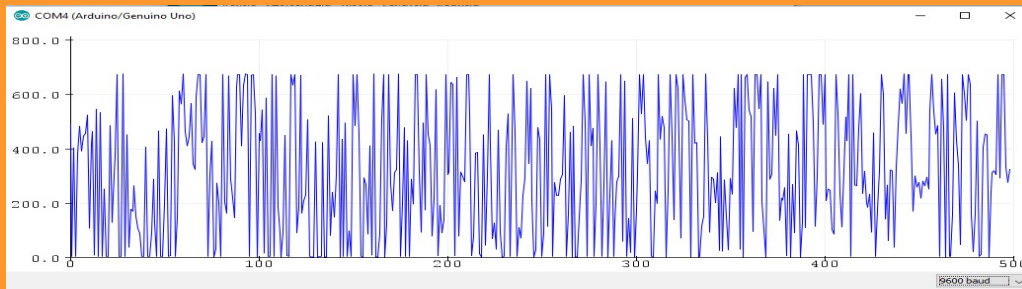


Σχήμα 43: Διάγραμμα της απόκρισης του υδροφώνου 2 (HF2), με buzzer

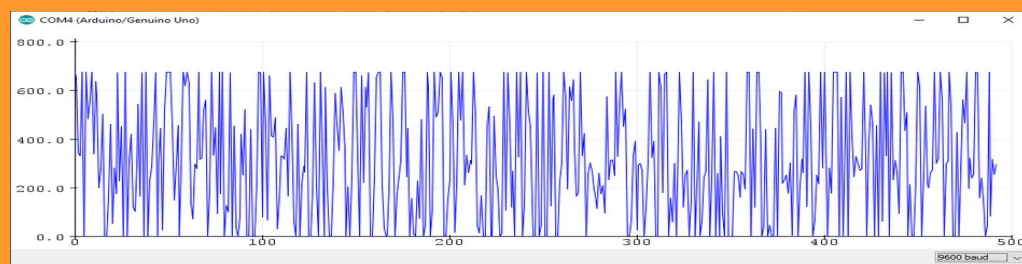


Σχήμα 44: Διάγραμμα της απόκρισης των δύο υδροφώνων (HF1, HF2), με buzzer

- Διαγράμματα αποκρίσεων των υδροφώνων HF1 και HF2, συναρτήσεσι του χρόνου, με τον κινητήρα δόνησης ενεργοποιημένο.



Σχήμα 45: Διάγραμμα της απόκρισης του υδροφώνου 1 (HF1), με κινητήρα δόνησης

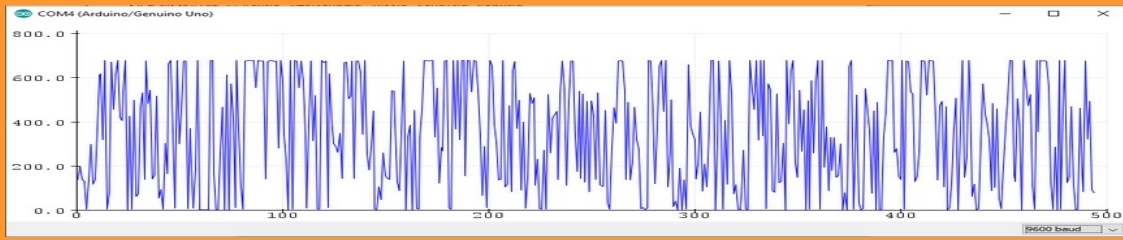


Σχήμα 46: Διάγραμμα της απόκρισης του υδροφώνου 2 (HF2), με κινητήρα δόνησης

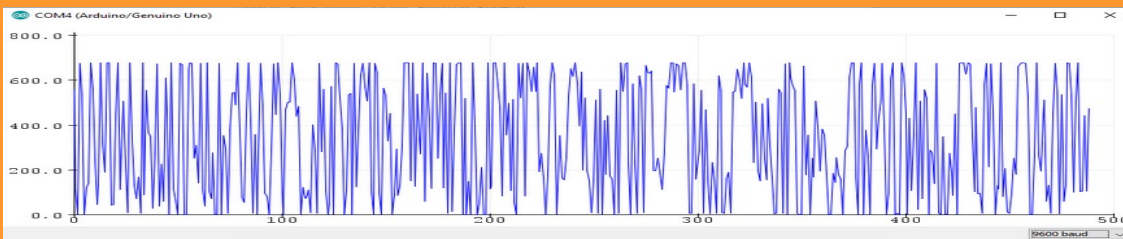


Σχήμα 47: Διάγραμμα της απόκρισης των δύο υδροφώνων (HF1, HF2), με κινητήρα δόνησης

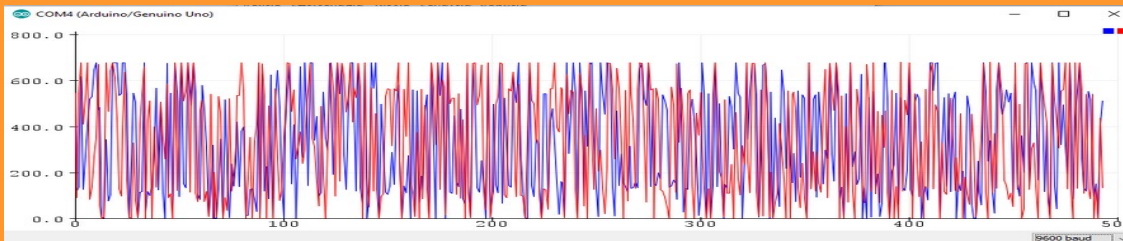
- Διαγράμματα αποκρίσεων των υδροφώνων HF1 και HF2, συναρτήσεϊ του χρόνου, με τις δύο πηγές ενεργοποιημένες.



Σχήμα 48: Διάγραμμα της απόκρισης του υδροφώνου 1 (HF1), με τις δύο πηγές



Σχήμα 49: Διάγραμμα της απόκρισης του υδροφώνου 2 (HF2), με τις δύο πηγές



Σχήμα 50: Διάγραμμα της απόκρισης των δύο υδροφώνων (HF1, HF2) με τις δύο πηγές

6.3. Συμπεράσματα

1. Όπως παρατηρείται από τις προηγούμενες μετρήσεις (β και γ), η χρονική διάρκεια εμφάνισης της μέγιστης τιμής, των υδροφώνων HF1 και HF2, δεν άλλαξε με την αύξηση της αλατότητας καθώς εμφανίζονται στο πρώτο χρονικό “παράθυρο”.
2. Είναι προφανής η εμφάνιση του φαινομένου της συμβολής κυμάτων, το οποίο γίνεται αντιληπτό από τη σχεδόν ταυτόχρονη διακύμανση των τιμών, και στα δύο υδρόφωνα, έπειτα από την εμφάνιση μιας μέγιστης τιμής.
3. Από την τελική απεικόνιση των κυματομορφών, είναι δυνατή η περαιτέρω σύγκρισή τους με άλλες, ήδη υπάρχουσες σε μία “τράπεζα υπογραφών”, προκειμένου να γίνει η ταυτοποίηση κάποιου επιθυμητού θορύβου.
4. Ο υπολογισμός, της κατεύθυνσης άφιξης και της απόστασης ενός σήματος, είναι δυνατόν να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας αισθητήρες μεγαλύτερης ακρίβειας, για τους οποίους θα είναι γνωστός ο προσανατολισμός και η ακριβής θέση τους.

6.4. Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την Ελλάδα παρουσιάζει το Αιγαίο Πέλαγος με το μεγάλο σύμπλεγμα των νησιών, νησίδων βραχονησίδων και βράχων, τόσο επιστημονικά όσο και γεωπολιτικά. Εκκινώντας από τα παραπάνω αποτελέσματα επόμενες εργασίες πάνω στο αντικείμενο μπορούν:

- Να επιχειρήσουν την δημιουργία ενός δικτύου υποθαλάσσιων αισθητήρων με μικροελεγκτή, μικρού κόστους, σε κάποια νήσο, νησίδα ή βραχονησίδα, το οποίο θα εντοπίζει υποθαλάσσιες πηγές θορύβου και θα μπορέσει να αποτελέσει συνεργαζόμενο με άλλα συστήματα, όπως σόναρ και ηχοσημαντήρων, ένα ευρύ πολυστατικό πλέγμα στο Αιγαίο Πέλαγος.
- Να χρησιμοποιήσουν ένα δίκτυο υποθαλάσσιων αισθητήρων με μικροελεγκτή, και σε συνδυασμό με την ευρεία ανάπτυξη του Internet Of Things, να γίνει το δίκτυο αυτό ευφυές και ενεργειακά πιο αποδοτικό.

7. Βιβλιογραφία

- [1] C. S. Clay and H. Medwin: Acoustical Oceanography: Principles and Applications, John Wiley & Sons, 1977.
- [2] J. D. Colladon, Souvenirs et Memoires, (Albert-Schuchardt, Geneva, 1893). NOAA Photo Library.
- [3] L. Brekhovskikh and Yu. Lysanov: Fundamentals of Ocean Acoustics, Springer Verlag 1982.
- [4] I. Tolstoy and C.S. Clay: Ocean Acoustics, Theory and Experiment in Underwater Sound, American Institute of Physics, 1987.
- [5] S. Salon, A. Crise, P. Picco, E. De Marinins, O. Gasparini, “Sound speed in the Mediterranean Sea: An analysis from a climatological data set”, Annales Geophysicae 21(3), March 2003.
- [6] R. P. Hodges, Underwater acoustics – Analysis, design and performance of sonar, 2010.
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrophone>
- [8] C. H. Sherman, J. L. Butler, “Transducers And Arrays for Underwater Sound”, Springer, 2006
- [9] <http://www.towedhydrophonearrays.com/>
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/SOSUS>
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Surveillance_Towed_Array_Sensor_System
- [12] <http://e-amyna.com/ανθυποβρυχιακές-επιχειρήσεις-στο-αι/>
- [13] <https://www.scienceabc.com/innovation/how-aircraft-find-submarines-underwater-sonobuoy-magnetic-anomaly-detector.html>
- [14] <https://el.wikipedia.org/wiki/Ηχοσημαντήρας>

- [15] <https://www.noaa.gov/explainers/soundcheck-ocean-noise>
- [16] Ν. Κωνσταντίνος, Ηλεκτρονικά Συστήματα Υποβρυχίου, ΤΕΙ Κρήτης, 2007.
- [17] <https://maritime.org/tech/power.htm>
- [18] <https://web.archive.org/web/20080205155941/http://www.dt.navy.mil/div/about/galleries/gallery4/095.html>
- [19] Δ. Παράσχος , “Σύγχρονοι μέθοδοι επεξεργασίας ακουστικών σημάτων στη θάλασσα από συστοιχίες υδροφώνων, μεταπτυχιακή διατριβή Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων και Πολυτεχνείου Κρήτης, 2017
- [20] <https://www.mwrf.com/systems/comparing-narrowband-and-wideband-channels>
- [21] <https://cibsmr.business.site/posts/6149962124621917767?hl=en>
- [22] M. A. Ainslie and J. G. McColm. "A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water." *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 103, Number 3, 1998, pp. 1671–1672.
- [23]https://en.wikibooks.org/wiki/Engineering_Acoustics/Basic_Concepts_of_Underwater_Acoustics
- [24]https://www.mathworks.com/help/phased/examples/source-localization-using-generalized-cross-correlation.html?searchHighlight=doa%20underwater&s_tid=doc_srchttitle
- [25] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed. Los Altos, CA: Peninsula Publishing, 1983.
- [26] <http://www.salinityremotesensing.ifremer.fr/seasurface-salinity/definitionand-unit>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Γ1. Κώδικας προσομοίωσης Arduino

```
#define vibOutPin 6

const int sampleWindow = 20; // Sample window width in mS 20mS = 50Hz)

unsigned int HF1;
unsigned int HF2;
unsigned char i;

int ledPin = 9;

int buzzer = 8;//the pin of the active buzzer

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Acolumn,Bcolumn,HF1,HF2,Vibr_only_");//
  Serial.println("RESETTIMER");
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  pinMode(buzzer,OUTPUT);//initialize the buzzer pin as an output
  pinMode(vibOutPin,OUTPUT);// define a pin as output
}

void loop()
{
```

```
unsigned long start= millis(); // Start of sample window

unsigned int signalMax = 0;

unsigned int signalMin = 1024;

// collect data for 20 milliseconds

while (millis() - start < sampleWindow)

{
digitalWrite(buzzer,HIGH);
digitalWrite(vibOutPin,HIGH);

HF1 = analogRead(0);
HF2 = analogRead(1);
}

int dif = HF1 - HF2;

Serial.print("DATA,TIME,TIMER,");

Serial.print(HF1);

Serial.print(",");

Serial.println(HF2);

Serial.print(",");

Serial.println(dif);
}
```

Γ2. Κώδικας Arduino για σύνδεση αισθητήρα θερμότητας με το Arduino

```
#include <SimpleDHT.h>

// for DHT11,

// VCC: 5V or 3V

// GND: GND

// DATA: 2

int pinDHT11 = 2;

SimpleDHT11 dht11;

void setup() {

  Serial.begin(9600);

}

void loop() {

  // start working...

  Serial.println("=====");

  Serial.println("Sample DHT11...");

  // read with raw sample data.

  byte temperature = 0;

  byte humidity = 0;

  byte data[40] = {0};

  if (dht11.read(pinDHT11, &temperature, &humidity, data)) {

    Serial.print("Read DHT11 failed");

    return;

  }
```

```
}
```

```
Serial.print("Sample RAW Bits: ");
```

```
for (int i = 0; i < 40; i++) {
```

```
Serial.print((int)data[i]);
```

```
if (i > 0 && ((i + 1) % 4) == 0) {
```

```
    Serial.print(' ');
```

```
}
```

```
}
```

```
Serial.println("");
```

```
Serial.print("Sample OK: ");
```

```
Serial.print((int)temperature); Serial.print(" *C, ");
```

```
Serial.print((int)humidity); Serial.println(" %");
```

```
// DHT11 sampling rate is 1HZ.
```

```
delay(1000);
```

```
}
```