



Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακή Ειδίκευση Καθηγητών Φυσικών Επιστημών

Διπλωματική Εργασία

Παραγωγή, διάδοση επιδράσεις, χρήσεις και διατάξεις
ανίχνευσης υποθαλάσσιων κυμάτων. Ακουστικοί αισθητήρες
και επεξεργασία υποθαλάσσιων ακουστικών σημάτων

Νικόλαος Παπαδόπουλος

Επιβλέπων καθηγητής: Τσιριγώτης Απόστολος

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2021

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίας στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Παραγωγή, διάδοση επιδράσεις, χρήσεις και διατάξεις
ανίχνευσης υποθαλάσσιων κυμάτων. Ακουστικοί αισθητήρες
και επεξεργασία υποθαλάσσιων ακουστικών σημάτων

Νικόλαος Παπαδόπουλος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Τσιριγώτης Απόστολος

Λεϊσος Αντώνιος

Συνεργαζόμενο Εκπαιδευτικό Προσωπικό
του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου

Αναπληρωτής Καθηγητής και Διευθυντής του
Εργαστηρίου Φυσικής της Σχολής Θετικών
Επιστημών και Τεχνολογίας του Ελληνικού
Ανοικτού Πανεπιστημίου

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2021

Θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Τσιριγώτη Απόστολο για την καθοδήγηση κατά την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας καθώς επίσης και τον συν – επιβλέποντα καθηγητή κ. Λέϊσο Αντώνιο για την αποδοχή της συν – επίβλεψη της εργασίας στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, Μεταπτυχιακή Ειδίκευση Καθηγητών Φυσικών Επιστημών. Επίσης, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την κατανόηση και τη στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

*Την εργασία αυτή την αφιερώνω
στα παιδιά μου, Σοφία και Αλέξανδρο*

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αναπτύσσει την θεωρία του ήχου, την επεξεργασία του ακουστικού κύματος, καθώς και τις εφαρμογές που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο των sonar. Η εργασία αποτελείται από δύο ενότητες. Στη πρώτη ενότητα γίνεται η παρουσίαση των χαρακτηριστικών που διέπουν τον ήχο, των τρόπων διάδοσης του στο νερό, με την παράθεση του αντίστοιχου επιστημονικού υποβάθρου και παραδειγμάτων κατά περίπτωση. Επιπλέον παρουσιάζεται η εξέλιξη των συστημάτων sonar καθώς και των ακουστικών αισθητήρων (ενεργητικών και παθητικών), ενώ αναλύεται η ψηφική επεξεργασία των ακουστικών κυμάτων. Στη δεύτερη ενότητα γίνεται μία προσπάθεια μεταφοράς της επιστημονικής γνώσης στην εκπαιδευτική διαδικασία, μέσω της σχεδίασης δύο διδακτικών σεναρίων για μαθητές Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης.

Λέξεις – Κλειδιά

Ήχος – Διάδοση του Ήχου - Ακουστικοί αισθητήρες – Sonar - Επεξεργασία ακουστικών σημάτων

Sources, propagation, effects, uses and detection devices of
underwater acoustic sounds. Acoustic sensors and signal processing
of underwater acoustic signals

Nikolaos Papadopoulos

Abstract

This Diploma Thesis presents the theory of sound, the processing of the acoustic wave, as well as the applications that take place in the field of sonar. The work consists of two parts. In the first part, are presented the characteristics that govern sound, the ways of its propagation in water, by listing the corresponding scientific background and examples where appropriate. In addition, is presented the evolution of sonar systems and auditory sensors (active and passive), while the digit processing of acoustic waves is analyzed. In the second part, is made an attempt to transfer scientific knowledge to the educational process, through the design of two teaching scenarios for secondary school students.

Keywords

Sound – Sound Propagation – Acoustic sensors – Sonar – Processing of acoustic signals

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract.....	4
Περιεχόμενα	5
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων.....	8
Κατάλογος Πινάκων.....	9
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	10
ΜΕΡΟΣ Α'	12
1. Διάδοση του ήχου στη θάλασσα.....	12
1.1 Η φύση του ήχου – τύποι κυμάτων	12
1.2 Οι μονάδες του ήχου.....	13
1.3 Ακουστική (ηχητική) πίεση και ένταση – Ειδική ακουστική αντίσταση (εμπέδηση)... ..	19
1.4 Επίπεδο ακουστικής / ηχητικής πίεσης SPL (Sound Pressure Level) – Επίπεδο ηχητικής έντασης IL (Intensity Level)	20
1.5 Ταχύτητα διάδοσης του ήχου	22
1.6 Κυματική εξίσωση.....	25
1.7 Απώλειες ηχητικής διάδοσης (transmission / propagation loss)	27
1.7.1 Γεωμετρικές απώλειες (geometrical / spreading loss).....	28
1.7.2 Απώλειες απορρόφησης (Absorption Loss)	29
1.7.3 Απώλειες σκέδασης (scattering loss).....	31
1.7.4 Απώλειες διαφυγής (leakage loss).....	34
1.8 Συντελεστής ανάκλασης (reflection coefficient).....	35
1.9 Φαινόμενο Doppler	37
1.10 Απώλειες βυθού.....	38
1.11 Διάθλαση (refraction) - Νόμος του Snell	40
1.12 Το προφίλ ταχύτητας του ήχου SVP (Sound Velocity Profile).....	41
1.13 Ηχητικοί διάυλοι διάδοσης.....	43
1.13.1 Επιφανειακός ηχητικός διάυλος (surface duct ή mixed layer)	43
1.13.2 Αξιόπιστος ηχητικός διάυλος RAP (Reliable Acoustic Path)	44
1.13.3 Ζώνη σύγκλισης CZ (convergence zone).....	45
1.13.4 Ανάκλαση στο βυθό BB (bottom bounce) – Ηχητική διάδοση σε ρηγά και βαθιά ύδατα	47
2. Θόρυβος (Background noise)	49
2.1 Γενικά	49
2.2 Θόρυβος περιβάλλοντος (Ambient Noise)	50
2.3 Μοντέλα υπολογισμού θορύβου περιβάλλοντος.....	52
2.4 Αυτοθόρυβος (Self Noise).....	54
2.4.1 Ηλεκτρικός θόρυβος (Electrical Noise).....	54
2.4.2 Θόρυβος Μηχανημάτων (Machinery Noise).....	55
2.4.3 Θόρυβος Ροής (Flow Noise).....	55
2.4.4 Θόρυβος Προπέλας (Propeller Noise).....	56
2.5 Συνολικό επίπεδο θορύβου.....	57
2.6 Τεχνικές μείωσης / καταπίεσης θορύβου	59
3. Αντηχήσεις (Reverberation ή Back Scattering).....	61

3.1 Γενικά	61
3.2 Τύποι αντηχήσεων	61
3.3 Υπολογισμός αντηχήσεων	62
3.4 Μοντέλα υπολογισμού αντηχήσεων	63
3.5 Τεχνικές καταπίεσης των αντηχήσεων	66
4. Δύναμη στόχου (Target Strength)	68
4.1 Γενικά	68
4.2 Προσδιορισμός της τιμής TS (Target Strength)	70
4.3 Ακουστική απόκρυψη	70
4.4 Μοντέλα υπολογισμού αντηχήσεων	71
5. Τύποι και γενικά χαρακτηριστικά συστημάτων sonar	72
5.1 Γενικά	72
5.2 Ιστορική ανασκόπηση	73
5.3 Ενεργητικά συστήματα Sonar (Active Sonar)	76
5.3.1 HMS (Hull Mounted Sonar)	76
5.3.2 VDS (Variable Depth Sonar)	78
5.3.3 Χαμηλόσυχνα ενεργητικά Sonar LFAS (Low Frequency Active Sonar)	79
5.3.4 Sonar ναρκοθηρίας	80
5.3.5 Ενεργητικοί ηχοσημαντήρες (Active sonobuoys)	82
5.3.6 Ανιχνευτές ψαριών (Fish-finder Sonar)	82
5.5 Παθητικά συστήματα Sonar (Passive Sonar)	84
5.4.1 Hull Mounted Sonar (HMS)	84
5.4.2 Towed Array Sonar Systems (TASS)	85
5.5.4 Στατικά ή μόνιμα συστήματα παθητικής επιτήρησης	87
5.5.5 Παθητικοί ηχοσημαντήρες (passive sonobuoys)	88
6.1 Γενικά	90
6.2 Τύποι μορφοτροπέων	90
6.2.1 Μορφοτροπείς μαγνητοσυστολής (magnetostriuctive transducers)	91
6.2.2 Μορφοτροπείς ηλεκτροσυστολής (electrostrictive transducers)	93
6.2.3 Πιεζοηλεκτρικοί μορφοτροπείς (piezoelectric transducers)	94
6.3 Σημαντικά χαρακτηριστικά υλικών μορφοτροπέων	96
7. Εξισώσεις Sonar	98
7.1 Γενικά	98
7.2 Εξίσωση ενεργητικού Sonar	100
7.3 Εξίσωση παθητικού Sonar	100
7.4 Πρόγνωση αποστάσεων εντοπισμού	103
7.5 Δείκτης αξίας FOM (Figure of Merit)	103
8. Ψηφιακή επεξεργασία σημάτων (digital signal processing)	105
8.1 Σήματα	105
8.2 Κατηγορίες σημάτων	105
8.3 Ρυθμοί ταλαντώσεων	108
8.4 Φασματική ανάλυση ακουστικών σημάτων	109
8.5 Ανάλυση Fourier	110
8.5.1 Σειρές Fourier	110
8.5.2 Μετασχηματισμός Fourier (Fourier Transform – FT)	112

8.5.3 Μετασχηματισμός Fourier βραχέως χρόνου (Short Time Fourier Transform - STFT)	112
8.5.4 Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT) ...	113
8.5.5 Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform - FFT)	114
8.6 Δειγματοληψία – Κβάντιση.....	114
8.6.1 Θεώρημα δειγματοληψίας.....	115
8.7 Αντιμετώπιση θορύβου	116
8.7.1 Οι αλγόριθμοι ALE (Adaptive Line Enhancement).....	116
ΜΕΡΟΣ Β'	118
9. Μεταφορά της επιστημονικής γνώσης στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση	118
ΕΝΟΤΗΤΑ: Ήχος.....	118
9.1 Σχέδιο μαθήματος για τη μελέτη στάσιμων ηχητικών κυμάτων σε σωλήνα Kundt και υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου στον αέρα.....	118
9.2 Σχέδιο μαθήματος για τη μελέτη της ταχύτητας του ήχου στα ρευστά (νερό).	130
Συμπεράσματα.....	140

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1 Τα γενικά χαρακτηριστικά του ηχητικού κύματος	13
Εικόνα 2 (a-f) Η δομή του αυτιού και τα χαρακτηριστικά της ζώνης συχνοτήτων του.....	15
Εικόνα 3 Οκτάβα, $1/3$ της οκτάβας και $1/n$ της οκτάβας	18
Εικόνα 4 Περίγραμμα ίσης ηχηρότητας.....	22
Εικόνα 5 Μεταβολή της πυκνότητας του θαλασσινού νερού	24
Εικόνα 6 Μεταβολή της ταχύτητας του ήχου στο θαλασσινό νερό	24
Εικόνα 7 Μεταβολή της θερμοκρασίας , της αλατότητας και της ταχύτητας του ήχου	25
Εικόνα 8 Γεωμετρικές απώλειες	28
Εικόνα 9 Απεικόνιση του Spherical Spreading Loss	29
Εικόνα 10 Διάγραμμα της μεταβολής του συντελεστή εξασθένισης α	31
Εικόνα 11 Η σκέδαση αποτελεί μηχανισμό απωλειών της ηχητικής ενέργειας	32
Εικόνα 12 Σκέδαση της ηχητικής ενέργειας	33
Εικόνα 13 Σκέδαση της ηχητικής ενέργειας στη θαλάσσια επιφάνεια	34
Εικόνα 14 Διαφυγή ηχητικής ενέργειας προς το βυθό	34
Εικόνα 15 Διαφυγή ηχητικής ενέργειας από τον επιφανειακό ηχητικό διάυλο	35
Εικόνα 16 Πρόσκρουση της ηχητικής ενέργειας στο βυθό.....	37
Εικόνα 17(α) Ανάκλαση ακουστικού σήματος σε πυκνό πυθμένα	39
Εικόνα 18 Ο νόμος του Snell	41
Εικόνα 19 Διάγραμμα ταχύτητας του ήχου στη θάλασσα.....	43
Εικόνα 20 Επιφανειακός ηχητικός διάυλος.....	44
Εικόνα 21 Απεικόνιση αξιόπιστου ηχητικού διαύλου και ζώνης συγκλίσεως.....	45
Εικόνα 22 Απεικόνιση ζώνης σύγκλισης	46
Εικόνα 23 1^{η} και 2^{η} ζώνη σύγκλισης.....	46
Εικόνα 24 Ηχητική διάδοση μέσω ανακλάσεων του πυθμένα.....	47
Εικόνα 25 Ηχητική διάδοση μέσω ανακλάσεων σε βαθύ πυθμένα.....	48
Εικόνα 26 Επικρατέστερες πηγές Ambient Noise.....	52
Εικόνα 27 Διάταξη Baffle	57
Εικόνα 28 Καμπύλες θορύβου “Knudsen”.....	59
Εικόνα 29 Επίπεδα μέσης στάθμης αντήχησης	65
Εικόνα 30 Υπολογισμός του TS (Target Strength)	69
Εικόνα 31 Βασική διαμόρφωση συστήματος sonar	73

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 Η κεντρική συχνότητα της οκτάβας και του 1/3 της οκτάβας	19
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 Πίνακας τιμών εξασθένισης α	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 Διάφορες εκφράσεις της ταχύτητας του ήχου	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 Target Strength) διαφορετικών σχημάτων	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 Αντιστοιχία ρευστού και ταχύτητας διάδοσης του ήχου.....	133
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 Αντιστοιχία θερμοκρασίας και ταχύτητας διάδοσης του ήχου	133

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

AG	Array Gain
AGC	Automatic Gain Control
ASDIC	Anti-Submarine Detection Investigation Committee
ASRAP	Acoustic Sensor Range Prediction
ASW	Anti-Submarine Warfare
AUX	Auxiliary
ASW	Anti-Submarine Warfare
BT	Bathymograph
dB	Decibel
CASS	Command Activated Sonobuoy System
CATAS	Critical Angle Towed Array Sonar
CZ	Convergence Zone
DAZ	Direct Arrival Zone
DICASS	Directional Command Activated Sonobuoy System
DFT	Discrete Fourier Transform
DI	Directivity Index
DP	Direct Path
DT	Detection Threshold
DTAS	Depressed Towed Array Sonar
FAS	Flank Array Sonar
FFT	Fast Fourier Transform
FOM	Figure of Merit
HF	High Frequency
HMS	Hull Mounted Sonar
Hz	Herz
LF	Low Frequency
LFAS	Low Frequency Active Sonar
MAD	Magnetic Anomaly Detector
MDL	Minimum Detectable Level

MDS	Minimum Discernible Signal
MF	Medium Frequency
P_d	Probability of Detection
P_{fa}	Probability of False Alarms
PL	Propagation Loss
RAP	Reliable Acoustic Path
RMS	Root Mean Square
SE	Signal Excess
SL	Source Level
SNR	Signal-To-Noise Ratio
SONAR	Sound Navigation And Ranging
SPL	Sound Pressure Level
SS	Sea State
SVP	Sound Velocity Profile
TASS	Towed Array Sonar Systems
TL	Transmission Loss
TR	Time Record
TRDT	Tribeam Rotationally Directed Transmission
VDS	Variable Depth Sonar
VHF	Very High Frequency
VLF	Very Low Frequency
Y/B	Υποβρύχιο

ΜΕΡΟΣ Α'

1. Διάδοση του ήχου στη θάλασσα

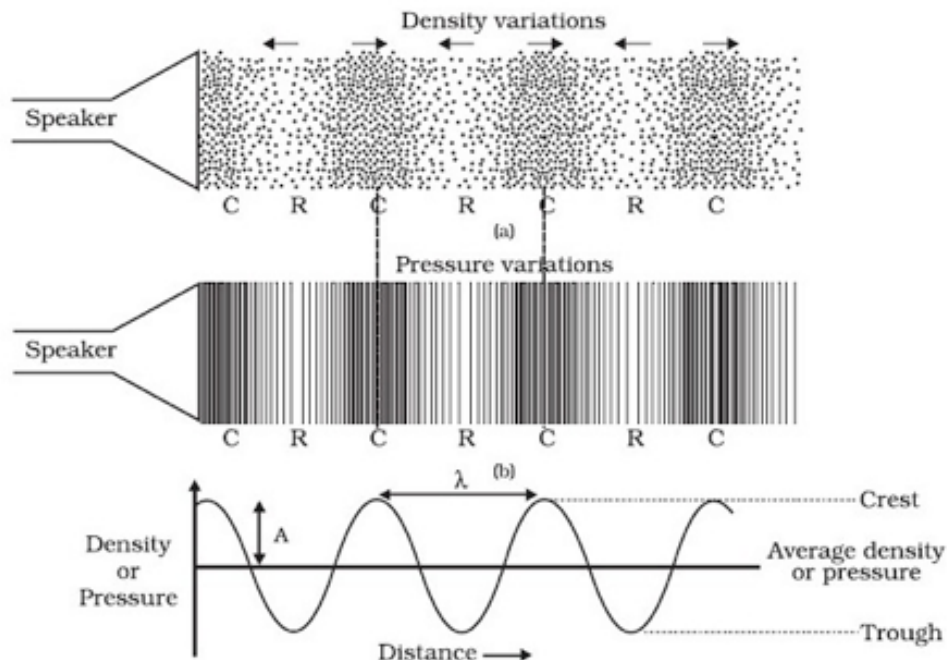
1.1 Η φύση του ήχου – τύποι κυμάτων

Ως ήχος αναφέρεται η υποκειμενική εντύπωση που προκαλείται λόγω της διέγερσης των αισθητήριων οργάνων της ακοής από ταχείες μεταβολές πίεσης (φυσικό αίτιο) του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτές οι μεταβολές πίεσης διαδίδονται με τη μορφή ηχητικών κυμάτων.

Τα ηχητικά κύματα παράγονται από σώματα που εκτελούν μηχανικές ταλαντώσεις (δονήσεις) και τα οποία στη συνέχεια διαδίδονται σε στερεά, υγρά και αέρια υλικά μέσα. Στο απόλυτο κενό, η ηχητική ενέργεια δεν διαδίδεται. Συνεπώς, τα ηχητικά κύματα είναι μηχανικά κύματα (ελαστικότητας), τα οποία μεταφέρουν μηχανική ενέργεια και για τη διάδοσή τους απαιτούν κάποιο υλικό μέσο. Στα ρευστά (υγρά και αέρια), Η ηχητική ενέργεια που διαδίδεται πάντοτε με μια μορφή που είναι γνωστή ως **διαμήκη** ή **επιμήκη** κύματα (**longitudinal** ή **compressional waves**), ενώ στα στερεά μπορεί να διαδίδεται επιπρόσθετα και με τη μορφή των εγκάρσιων κυμάτων (**transverse waves**).¹

Στα διαμήκη / επιμήκη κύματα, τα μόρια του υλικού μέσου ταλαντώνονται παράλληλα προς τη διεύθυνση διάδοσης (κάθετα στα μέτωπα κύματος). Συνεπώς, αποτελούν κύματα πίεσης, που δημιουργούν διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα και για τη διάδοσή τους απαιτούν υλικά μέσα με ελαστικότητα όγκου (Εικόνα 1). Στα εγκάρσια κύματα τα σωματίδια (μόρια) ταλαντώνονται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων (παράλληλα με τα μέτωπα κύματος) και επομένως απαιτούν υλικά μέσα με ελαστικότητα σχήματος. (Σάγος, 2019)

¹ Τα εγκάρσια κύματα στο εσωτερικό της μάζας ενός στερεού είναι γνωστά και ως **διατμητικά κύματα (shear waves)**. Τα ρευστά δεν μπορούν να συντηρήσουν τέτοια κύματα. Ειδικοί τύποι εγκάρσιων κυμάτων που συναντώνται σε στερεά υλικά είναι τα (**flexural** ή **bending waves**), πχ σε ράβδους ή πλάκες, καθώς επίσης και τα επιφανειακά κύματα (**surface waves**).



Εικόνα 1 Τα γενικά χαρακτηριστικά του ηχητικού κύματος
(Ανακτήθηκε την 14/4/21 από: <http://aven.amritalearning.com>)

1.2 Οι μονάδες του ήχου

Οι ακουστικές μετρήσεις εκφράζονται σχεδόν πάντα σε ντεσιμπέλ (dB), τα οποία είναι μονάδες που εμπεριέχουν λογαρίθμους διαφορών αναλογιών. Η ανάγκη για μια μονάδα λογαριθμικής μέτρησης προέκυψε στην ακουστική για δύο λόγοι: πρώτον, το φάσμα των εντάσεων ήχου που βρίσκονται στην πράξη κυμαίνεται από περίπου 10^{-9} W/m^2 για έναν ψίθυρο ελάχιστα κατανοητό, έως πάνω από ένα kW/m^2 κοντά σε ένα αεριοθούμενο αεροσκάφος, δεύτερον η ανθρώπινη αντίδραση στα ακουστικά ερεθίσματα είναι περίπου λογαριθμική. Για τους λόγους αυτούς, φαινόταν λογικό να υιοθετηθεί λογαριθμικές μονάδες για ακουστικές μετρήσεις. Η χρήση λογαριθμικών μέτρων δεν είναι μοναδική στην ακουστική, αλλά αντιθέτως τέτοιες ποσότητες είναι αρκετά συχνές και στη θερμοδυναμική. (Ross, 1976)

Οι φυσικές ποσότητες, όπως η πίεση, η ταχύτητα, η ένταση, η ενέργεια και η σύνθετη αντίσταση, σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά διάδοσης των ακουστικών κυμάτων. Σε ένα μονοδιάστατο ακουστικό σύστημα όπως ένας αγωγός, τα ακουστικά κύματα περιγράφονται

με τα παραπάνω βασικά μεγέθη. Κατά την εξέταση αυτών των φυσικών ποσοτήτων, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε πώς να τα χρησιμοποιούμε, διότι αποτελούν τη βάση για περαιτέρω επεξεργασία και εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν τον ήχο και τη διάδοση του. Οι μονάδες που σχετίζονται με τον ήχο μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες: στις απόλυτες μονάδες και τις υποκειμενικές μονάδες. Οι πρώτες εκφράζουν την ακουστική έκφραση των φυσικών διαστάσεων ενώ οι δεύτερες λαμβάνουν υπόψη την υποκειμενική αναγνώριση του ήχου. (Kim, 2010)

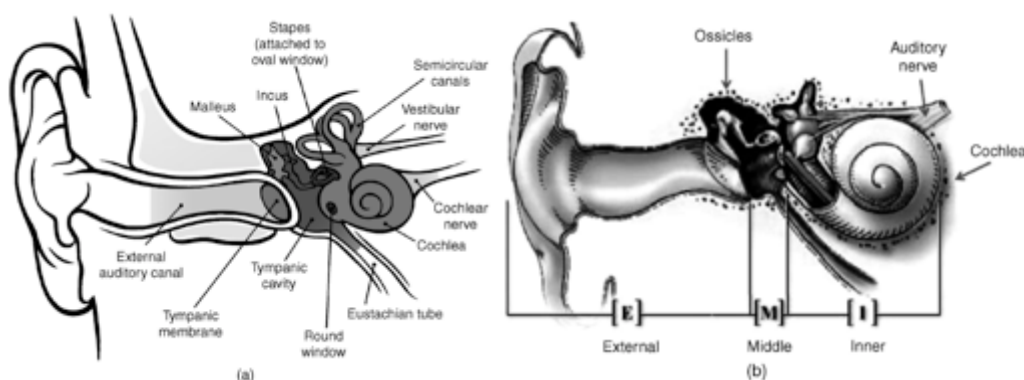
Ας ξεκινήσουμε πρώτα με τις απόλυτες μονάδες. Η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας, η οποία είναι η πίεση έχει μονάδες: Μονάδα πίεσης = Pascal (Pa) = N/m^2 . Η ταχύτητα η οποία ορίζεται ως η αλλαγή του ρυθμού μεταβολής του χρόνου έχει μονάδες:

Μονάδα ταχύτητας = m/sec . Η ένταση, η οποία είναι η ισχύς ανά μονάδα εμβαδού έχει ως μονάδες: Μονάδα έντασης = $Pa \times m/sec = Watt/m^2$. Τέλος ορίζεται η μονάδα ενέργειας: Μονάδα ενέργειας = $joule = Watt \times sec$.

Για να κατανοήσουμε τις υποκειμενικές ενότητες, πρέπει να καταλάβουμε πώς ακούμε που σημαίνει ότι πρέπει να μελετήσουμε το σύστημα ακοής μας. Η Εικόνα 2(α) απεικονίζει το ανθρώπινο σύστημα ακοής. Ο ήχος φτάνει στο αυτί και δονεί το τύμπανο του αυτιού (Εικόνα 2 (a), εξωτερικό αυτί, Εικόνα 2 (b)). Αυτή η δόνηση ενισχύεται από τρία οστάρια πριν φτάσει στον κοχλία (μεσαίο αυτί, Εικόνα 2 (b)). Ο κοχλίας έχει μια μεμβράνη που αναφέρεται ως βασική μεμβράνη στη μεσαία περιοχή της, η οποία είναι γεμισμένη με υγρό (Εικόνα 2(c)). Τριχωτά κύτταρα βρίσκονται στη μεμβράνη (Εικόνα 2 (d)) ενώ η κίνηση αυτών των κυττάρων παράγει σήματα που μεταφέρονται στον εγκέφαλο. Ο εγκέφαλος επεξεργάζεται το σήματα αυτά και εμπλουτίζει έτσι το σύστημα της γνώσης μας. Έτσι αναγνωρίζουμε τον ήχο και τις πληροφορίες που φέρει². Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των τριχωτών κυττάρων είναι ότι συμπεριφέρονται σαν ένα χωρικά κατανομημένο φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 (e) και (f). Είναι γνωστό ότι οι

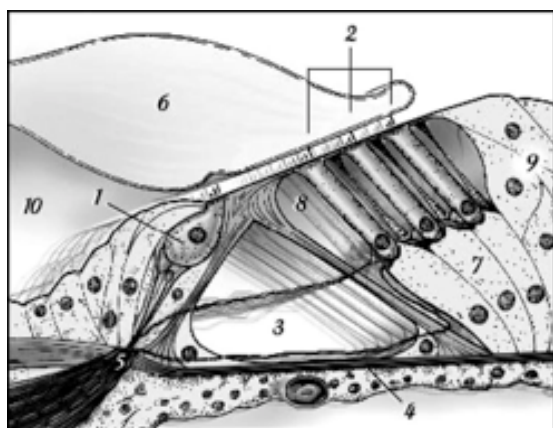
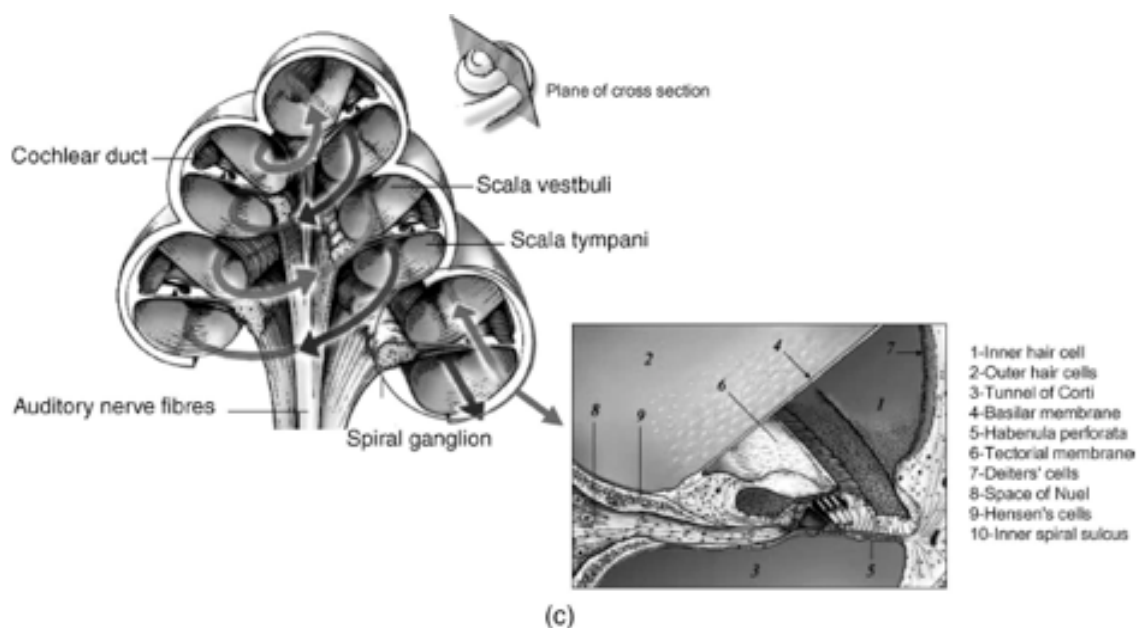
² Το ακουστικό σήμα αναμένεται να μεταδοθεί αποτελεσματικά στο ρευστό του κοχλίου. Όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζεται μία αναπόφευκτη μεταβλητή αντίσταση όταν ο ήχος διαδίδεται από τον αέρα σε υγρό. Για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή σύνθετη αντίσταση ταιριάζοντας τις προσπάθειες του αυτιού μας, με διάφορους τρόπους, για να απελευθερώσουμε κατά κάποιο τρόπο την αστάθεια αντίστασης. Μία πηγή είναι η αναλογία περιοχής μεταξύ του μεγέθους του τυμπάνου και του μεγέθους του οβάλ (περίπου 17:1). Μια επιπλέον ενίσχυση οφείλεται στο φαινόμενο του μοχλού του οστού του μέσου ωτός. Άλλοι παράγοντες ενίσχυσης ποικίλουν ανάλογα με τη συχνότητα. Για παράδειγμα, το αυτί έχει μέγιστη ενίσχυση 2,5 kHz. Ο ώμος, το κεφάλι και η επιφάνεια του σώματος συμβάλλουν επίσης στην ενίσχυση. Το σύνολο αυτών των ενισχύσεων είναι περίπου στα 30 dB.

άνθρωποι δεν ακούνε τη συχνότητα του ήχου σε απόλυτη κλίμακα, αλλά μάλλον σχετικά³. Για αυτόν τον λόγο, συνήθως χρησιμοποιούμε σχετικές μονάδες για τις συχνότητες. Η ζώνη μεταξύ της συχνότητας αναφοράς (f_1) και η συχνότητα που είναι διπλάσια από αυτή (f_2) αναφέρεται ως «οκτάβα». Η ζώνη 1/3 οκτάβας, που είναι δημοφιλής στη μηχανική ελέγχου θορύβου, έχει συχνότητα $2^{1/3} f_1$, ενώ η συχνότητα αναφοράς είναι η συχνότητα της άνω ζώνης f_2 . Η κεντρική συχνότητα (f_0) κάθε ζώνης βρίσκεται στο γεωμετρικό κέντρο της μπάνας. (Kim, 2010)



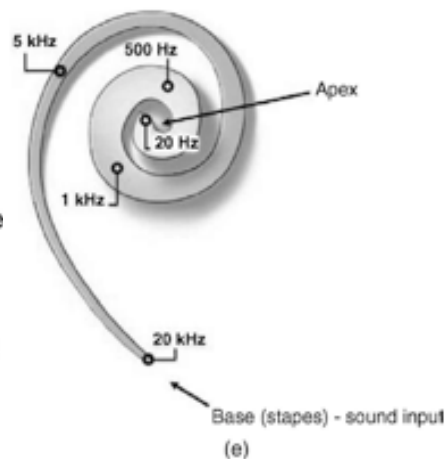
Εικόνα 2 (a-f) Η δομή του αυτιού και τα χαρακτηριστικά της ζώνης συχνοτήτων του. (a) Η δομή ενός ανθρώπινου αυτιού. (Redrawn με άδεια από τους D. Purves et al., Neuroscience, 3rd edition, 2004, σ. 288, Sinauer Associates, Inc., Μασαχουσέτη, ΗΠΑ., 2004 Sinauer Associates Inc.) (b) Εξωτερικό, μεσαίο και εσωτερικό αυτί. (c) Βασιλική μεμβράνη και το όργανο Corti. (d) Η διατομή του κοχλίου με τα αισθητήρια κύτταρα (που βρίσκονται στο όργανο του Corti) τα οποία περιβάλλονται από κοχλιακά υγρά. (e) Χάρτης συχνότητας: μετακίνηση κατά μήκος του κοχλίου, σε διαφορετικές θέσεις εμφανίζονται διαφορετικές ακουστικές συχνότητες εισόδου. (f) Τονοτοπική οργάνωση. (Εικόνες 2 (b έως f) σχέδια του Stephan Blatrix, από το “Promenade around cochlea,” Ιστοσελίδα EDU: <http://www.cochlea.org> από τους Re'my Pujol et al., INSERM και University Montpellier.)

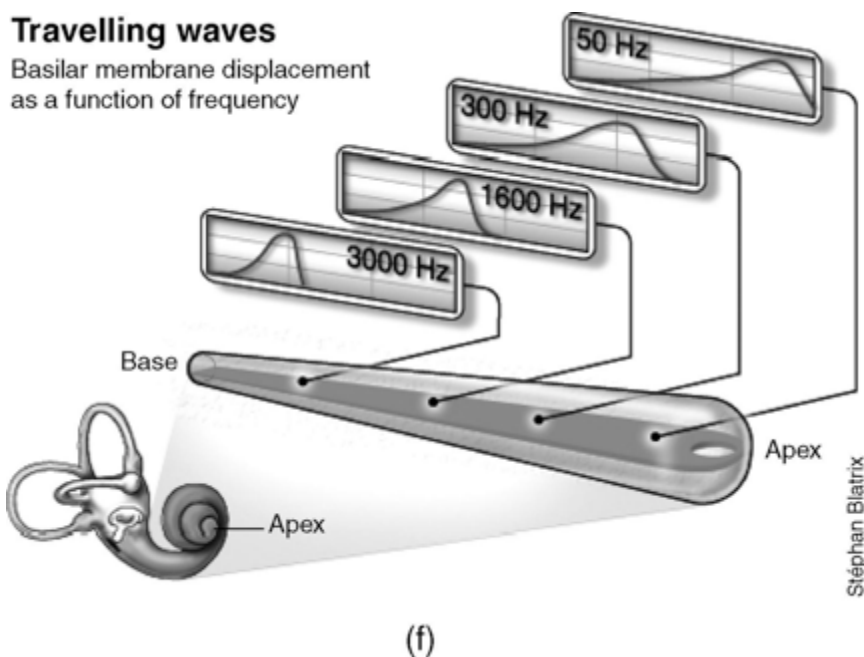
³ Η γνώση της συχνότητας ή του βήματος κύματος ποικίλλει από άτομο σε άτομο.



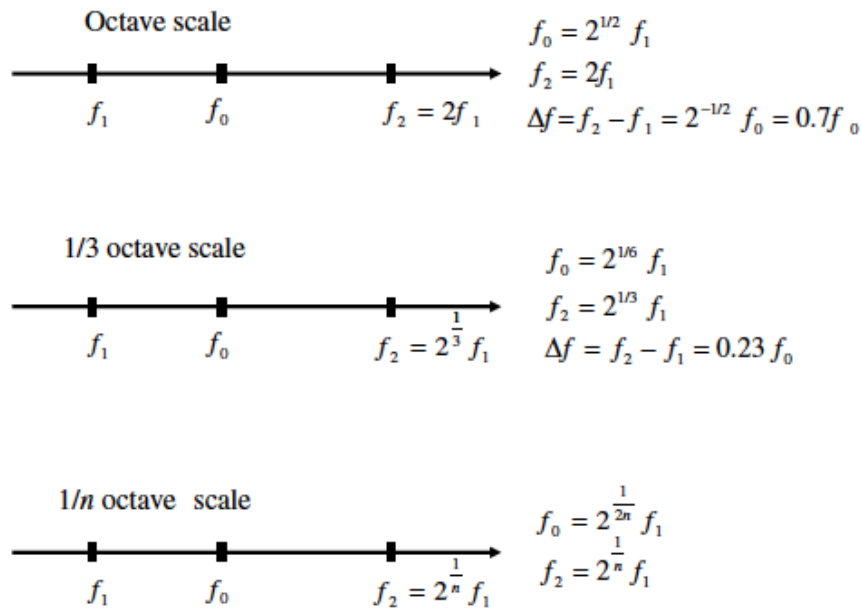
(d)

- 1-Inner hair cell
- 2-Outer hair cells
- 3-Tunnel of Corti
- 4-Basilar membrane
- 5-Habenula perforata
- 6-Tectorial membrane
- 7-Deiters' cells
- 8-Space of Nuel
- 9-Hensen's cells
- 10-Inner spiral sulcus





Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, η κεντρική συχνότητα μπορεί να είναι οποιαδήποτε συχνότητα. Ωστόσο, για ευκολία, χρησιμοποιούμε τις τυπικές κεντρικές συχνότητες (Εικόνα 4). Το εύρος ζώνης συχνοτήτων της οκταβικής ζώνης είναι περίπου 70% και εκείνο της ζώνης 1/3 οκτάβας είναι περίπου 23% της αντίστοιχης ζώνης (Εικόνα 3). Επομένως, όσο υψηλότερη είναι η κεντρική συχνότητα, τόσο ευρύτερη είναι η ζώνη συχνοτήτων. Όπως βλέπουμε στην τυπική ζώνη συχνοτήτων, οι άνθρωποι μπορούν να ακούσουν τον ήχο σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Το ακουστικό εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται μεταξύ 20 Hz και 20 kHz. Υπάρχουν δύο σημαντικοί λόγοι για τους οποίους κλιμακώνουμε ή μετράμε τη συχνότητα του ενδιαφέροντός μας με μία οκτάβα ή το 1/3 της οκτάβας: (i) ακούμε τη συχνότητα σε σχετική κλίμακα και (ii) δεν μπορούμε να εκφράσουμε το ακουστικό μας εύρος συχνοτήτων χρησιμοποιώντας μια γραμμική κλίμακα συχνοτήτων.



Εικόνα 3 Οκτάβα, 1/3 της οκτάβας και 1/n της οκτάβας (Yang-Hann, 2010, σ.89)

Octave band center frequency	One-third octave band, center frequency	Band limits	
		Lower	Upper
31.5	25	22	28
	31.5	28	35
	40	35	44
63	50	44	57
	63	57	71
	80	71	88
125	100	88	113
	125	113	141
	160	141	176
250	200	176	225
	250	225	283
	315	283	353
500	400	353	440
	500	440	565
	630	565	707
1000	800	707	880
	1000	880	1130
	1250	1130	1414
2000	1600	1414	1760
	2000	1760	2250
	2500	2250	2825
4000	3150	2825	3530
	4000	3530	4400
	5000	4400	5650
8000	6300	5650	7070
	8000	7070	8800
	10 000	8800	11 300
16 000	12 500	11 300	14 140
	16 000	14 140	17 600
	20 000	17 600	22 500

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 Η κεντρική συχνότητα της οκτάβας και του 1/3 της οκτάβας (Yang-Hann, 2010, σ. 90)

1.3 Ακουστική (ηχητική) πίεση και ένταση – Ειδική ακουστική αντίσταση (εμπέδηση)

Η ένταση των ηχητικών κυμάτων είναι ανάλογη με την ποσότητα ενέργειας που περνά ανά δευτερόλεπτο διαμέσω ενός μέσου διάδοσης, σε ορθή γωνία ως προς την κατεύθυνση της διάδοσης. Το ηχητικό κύμα έχει τόσο κινητική όσο και δυναμική ενέργεια. Η μέση κινητική ενέργεια ισούται με τη μέση δυναμική ενέργεια ενώ η συνολική ενέργεια είναι διπλάσια από

τον μέσο όρο είτε κινητικής είτε δυναμικής ενέργειας σε όλο το χρονικό φάσμα. Επιπρόσθετα, η συνολική ενέργεια ισούται με το μέγιστο είτε της κινητικής είτε της δυναμικής ενέργειας. Συνεπώς, η συνολική ενέργεια του ηχητικού κύματος μπορεί να προσδιοριστεί μέσω του υπολογισμού της μέγιστης κινητικής ενέργειας όλων των μορίων που κινούνται μπρος-πίσω από τις θέσεις ισορροπίας καθώς το κύμα περνά. Εάν το ηχητικό κύμα εκτελεί απλή αρμονική κίνηση, η μέγιστη ταχύτητα u ενός δονούμενου σωματιδίου του μέσου μετάδοσης είναι $2\pi aF$, όπου το a είναι το πλάτος της κίνησης ενώ F η συχνότητα. Η μέγιστη κινητική ενέργεια ενός σωματιδίου ισούται με τη συνολική ενέργεια E αυτού του σωματιδίου $E = \frac{1}{2}mu^2$ ergs/σωματίδιο. Αν θεωρήσουμε ότι η πυκνότητα του μέσου είναι ρ σε gm/cm^3 , και εάν η πυκνότητα ρ αντικαθισταθεί από τη μάζα m , το αποτέλεσμα είναι η ενεργειακή πυκνότητα ή η ενέργεια ανά μονάδα έντασης του ήχου, δηλαδή $E = \frac{1}{2}\rho u^2 \Rightarrow E = 2\pi^2\rho a^2 F^2$ ergs/cm³. Η ένταση ενός ηχητικού κύματος, που καθορίζει τη δύναμη της αίσθησης και την δυνατότητα λήψης εξαρτάται από την ένταση I που είναι η ενέργεια. (Bureau of Naval Personnel, 1953)

1.4 Επίπεδο ακουστικής / ηχητικής πίεσης SPL (Sound Pressure Level) – Επίπεδο ηχητικής έντασης IL (Intensity Level)

Είναι προφανές ότι η συμπίεση (ένταση) του ήχου, καλύπτει μια μεγάλη κλίμακα τιμών, εξαρτώμενη από τον τρόπο δημιουργίας, για παράδειγμα από ένα ψιθύρισμα μέχρι μια μεγάλη έκρηξη. Το πρόβλημα αυτό της μεγάλης κλίμακας τιμών έχει αντιμετωπιστεί με την χρήση του επιπέδου συμπίεσης (έντασης) του ήχου (*Sound Pressure Level – SPL*). Η λέξη επίπεδο, χρησιμοποιείται για να γίνει κατανοητό ότι ο αριθμός που αναφέρεται να αντιπροσωπεύει μια σχέση σύγκρισης, ισχύς ή ισοδυνάμων ποσοτήτων ισχύος δηλώνεται σε dB.

Η πίεση αλλάζει μόνο προς την κατεύθυνση κατά τη διάδοση του ήχου, ενώ είναι ίδια σε όλα τα σημεία ως προς αυτή την κατεύθυνση. Η ταχύτητα του ήχου αναφέρεται στη διαμήκη κίνηση των κυμάτων στο μέσο και σχετίζεται με το μήκος κύματος και τη συχνότητα

$$c = f\lambda$$

Η ταχύτητα του ήχου δεν πρέπει να συγχέεται με την ταχύτητα των σωματιδίων u , η οποία αναφέρεται στην κίνηση των μορίων μέσα στο μέσο διάδοσης.

Το επίπεδο κύμα ακολουθεί την σχέση:

$$p = (\rho c)u$$

όπου p = pressure (Pa ή N/m^2), u = ταχύτητα σωματιδίων (m/s),

ρ =πυκνότητα του υγρού= $10^3 kg/m^3$ για το θαλασσινό νερό,

c =ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος= 1.5×10^3 m/s στο θαλασσινό νερό,

ρc =ειδική ακουστική εμπίεση, $Z=1.5 \times 10^6$ m^{-2}/s^{-1} για το θαλασσινό νερό

Το ηχητικό κύμα φέρει μηχανική ενέργεια μαζί του με τη μορφή κινητικής ενέργεια των σωματιδίων και την ενέργεια των τάσεων στο μέσο διάδοσης. Επειδή το κύμα διαδίδεται, μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας ανά δευτερόλεπτο θα ρέει κατά μήκος της περιοχής της μονάδας κανονικά προς την κατεύθυνση της διάδοσης. Αυτή η ενέργεια ανά δευτερόλεπτο (ισχύς) η οποία αφορά μια συγκεκριμένη περιοχή είναι γνωστή ως ένταση το κύμα (ισχύς ανά περιοχή μονάδας). Για ένα επίπεδο κύμα, η ένταση συσχετίζεται με την πίεση σύμφωνα με τη σχέση:

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

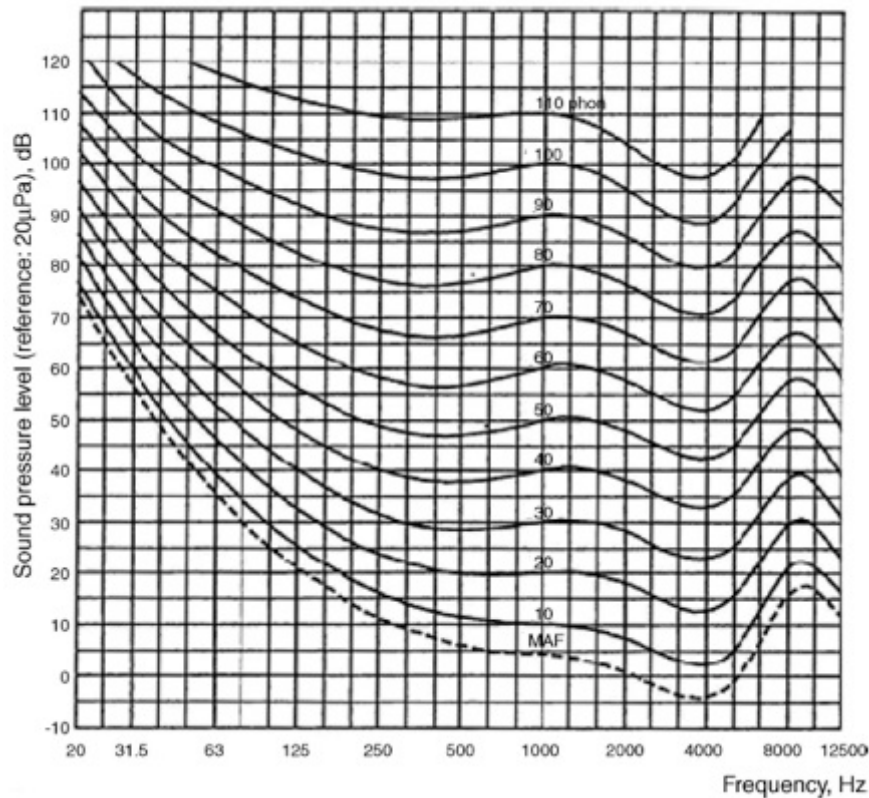
Η ένταση αναφοράς (I_r) στον υποβρύχιο ήχο είναι η ένταση ενός επίπεδου κύματος, το οποίο έχει RMS ίσο με 1 μPa . Εισάγοντας $p = 10^{-6}$ και $\rho c = 1,5 \times 10^6$ στην παραπάνω εξίσωση, λαμβάνουμε:

$$I_r = 0.67 \times 10^{-18} W/m^2$$

Οι εντάσεις αναφέρονται συχνά ως "re 1 μPa ". Αυτό είναι σαφώς εσφαλμένο, δεδομένου ότι το micropascal είναι μια μονάδα πίεσης και όχι έντασης (ισχύς ανά περιοχή μονάδας). Αυστηρά οι εντάσεις θα πρέπει να αναφέρονται ως "η ένταση λόγω πίεσης 1 μPa ".

Η πίεση αναφοράς είναι ο μικρότερος ήχος που μπορεί να ακούσει ο άνθρωπος. Ο πρώτος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούμε μια κλίμακα λογαρίθμου και όχι μια γραμμική κλίμακα είναι ότι μπορούμε να ακούσουμε ήχο σε ένα εύρος από μικρό πλάτος έως εξαιρετικά μεγάλο

πλάτος. Από την Εικόνα 4, μπορούμε να δούμε ότι το άνθρωπος μπορεί να ακούσει από περίπου 0 dB έως κάπου στην περιοχή των 130-140 dB.(Waite, 2002)

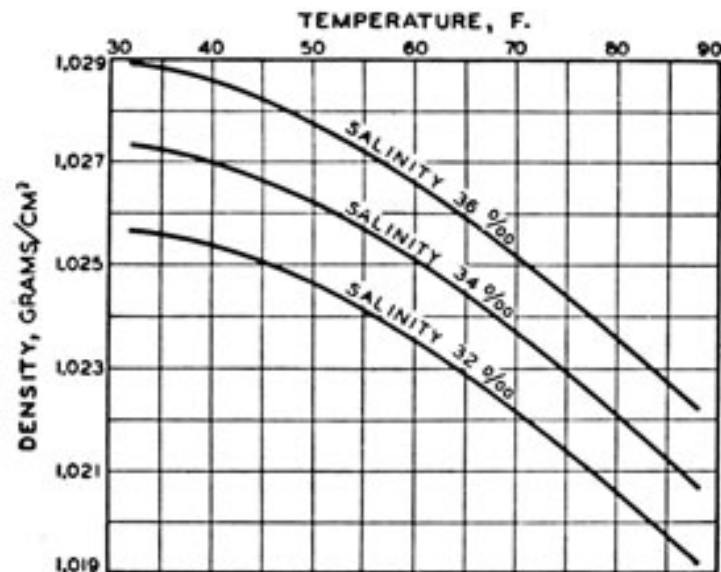


Εικόνα 4 Περίγραμμα ίσης ηχηρότητας: κάθε γραμμή δείχνει το SPL σε σχέση με τη συχνότητα που αντιστοιχεί σε ένταση (phon) καθαρού ήχου 1 kHz. (Αναπαραγωγή από ISO 226 (2003), "Normal equalloudness-level contours", Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης, Γενεύη).

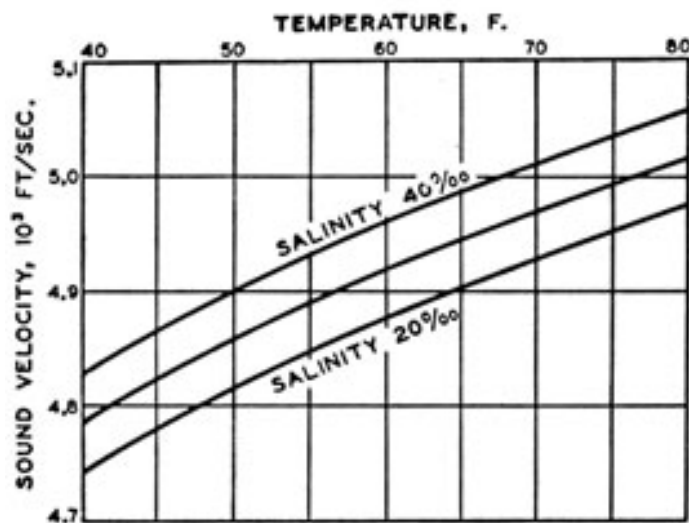
1.5 Ταχύτητα διάδοσης του ήχου

Η διάθλαση του ήχου στο θαλασσινό νερό αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη μετάδοση του ήχου στο νερό. Σε ένα ομοιογενές μέσο ο ήχος θα ταξιδέψει σε ευθείες γραμμές. Όμως, όπως στην περίπτωση του φωτός, η διαδρομή ενός ηχητικού κύματος αλλάζει και από ευθεία γίνεται καμπύλη, εάν η ταχύτητα της διάδοσης είναι διαφορετική από σημείο σε σημείο. Το μέτωπο του κύματος που εισέρχεται σε ένα μέσο υπό γωνία, υφίσταται αλλαγή κατεύθυνσης, εάν η ταχύτητα του κύματος στο δεύτερο μέσο είναι διαφορετική από αυτή στο πρώτο. Ένα μέρος του κύματος ταξιδεύει πιο γρήγορα από το άλλο, ενώ η κυματομορφή είναι

προσανατολισμένη προς το μέσο με τη χαμηλότερη ταχύτητα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάθλαση. Οι νόμοι της οπτικής γεωμετρίας μπορούν να εφαρμοστούν στη διάθλαση ήχου, αν και είναι εφαρμόσιμοι για ήχους πολύ υψηλής συχνότητας, μη λαμβάνοντας όμως υπόψη φαινόμενα όπως η σκέδαση, περίθλαση, ανάκλαση και απορρόφηση. Η ταχύτητα του ήχου σε υγρό μέσο μπορεί να είναι υπολογίζεται από το συντελεστή ελαστικότητας E και την πυκνότητα ρ , αυτού του μέσου $u = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. Εάν για τα E και ρ χρησιμοποιήσουμε το Βρετανικό Σύστημα Μονάδων, η ταχύτητα είναι σε πόδια ανά δευτερόλεπτο. Όπως υποδεικνύεται από την παραπάνω εξίσωση η αναλογία συντελεστή ελαστικότητας προς την πυκνότητα οποιουδήποτε μέσου μετάδοσης, καθορίζει τη ταχύτητα ήχου σε αυτό το μέσο. Οποιαδήποτε επιρροή η οποία αλλάζει κάθε παράγοντα, προσδίδει αλλαγή στο λόγο $\frac{E}{\rho}$ με αντίστοιχη επίδραση στην ταχύτητα. Η αναλογία $\frac{E}{\rho}$ διέπεται από τη θερμοκρασία, την πίεση και την αλατότητα, ενώ η ταχύτητα του ήχου πρέπει να αξιολογείται για οποιοδήποτε σύνολο συνθηκών. Αύξηση σε οποιονδήποτε από αυτούς τους παράγοντες θα αυξήσουν την ταχύτητα του ήχου. Η θερμοκρασία, για παράδειγμα, επηρεάζει συνήθως την πυκνότητα σε μεγαλύτερο βαθμό από ό,τι επηρεάζει τον συντελεστή ελαστικότητας. Έτσι, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του μέσου, τόσο χαμηλότερη είναι η πυκνότητα και τόσο υψηλότερη η ταχύτητα. Από τους τρεις παράγοντες (θερμοκρασία, πίεση, αλατότητα) που ελέγχουν τις μεταβλητές E και ρ , η θερμοκρασία είναι μακράν η περισσότερο σημαντική στη μετάδοση ήχου στην χρήση του sonar. Στην Εικόνα 5 παρατηρούμε ότι η πυκνότητα αλλάζει με μεταβλητό ρυθμό σε σχέση με τη θερμοκρασία. Έτσι, με σταθερή τιμή στην αλατότητα, η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται με τη θερμοκρασία με μεταβλητό ρυθμό.



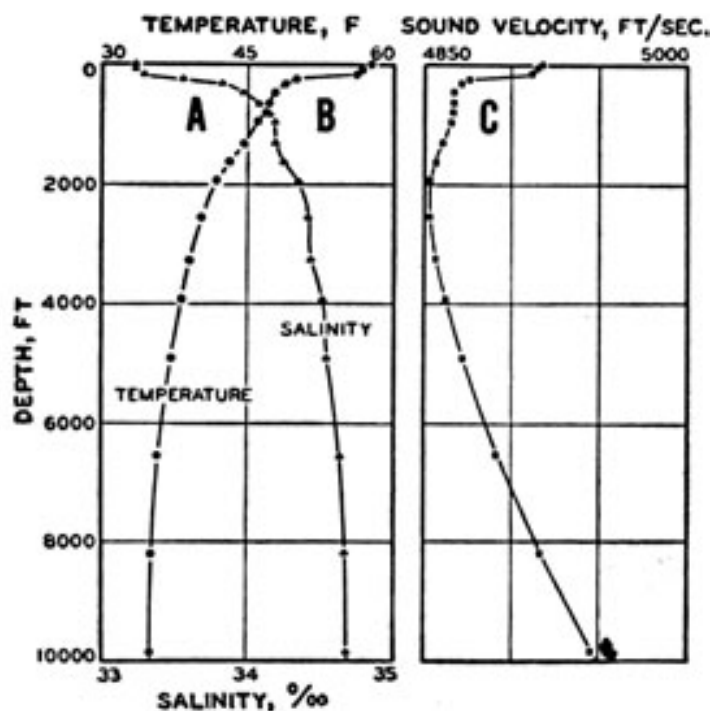
Εικόνα 5 Μεταβολή της πυκνότητας του θαλασσινού νερού σε συνάρτηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας (Bureau of Naval Personnel, 2005, σ.8)



Εικόνα 6 Μεταβολή της ταχύτητας του ήχου στο θαλασσινό νερό σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και τρεις τιμές της αλατότητας (Bureau of Naval Personnel, 2005, σ.8)

Στην Εικόνα 6 παρατηρείται η διακύμανση της ταχύτητας του ήχου με τη θερμοκρασία για τρεις τιμές αλατότητας. Η αύξηση σε αλατότητα 1 μορίου στα 1.000 αυξάνει την ταχύτητα του ήχου 4,27 πόδια/δευτ.

Η μέση θερμοκρασία μειώνεται με το βάθος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, και σε περίπου 2.500 πόδια, αυτή η μείωση είναι αρκετά μεγάλη για να εξουδετερώσει το αποτέλεσμα της αύξησης της αλατότητας και της πίεσης, ενώ παράλληλα η ταχύτητα του ήχου μειώνεται.



Εικόνα 7 Μεταβολή της θερμοκρασίας, της αλατότητας και της ταχύτητας του ήχου σε σχέση με το βάθος του ωκεανού. (Bureau of Naval Personnel, 2005, σ.9)

Σε μεγαλύτερα βάθη, το αποτέλεσμα της πίεσης αρχίζει να υπερβαίνει το φαινόμενο θερμοκρασίας και η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται με το βάθος. Αυτή η ελάχιστη ταχύτητα του ήχου στα μεγάλα βάθη έχει ενδιαφέρουσες ακουστικές συνέπειες. (Bureau of Naval Personnel, 1953)

1.6 Κυματική εξίσωση

Με τη βοήθεια των βασικών αρχών της δυναμικής των ρευστών και θεωρώντας μηδενικές μηχανικές απώλειες, αποδεικνύεται ότι η γραμμική κυματική εξίσωση για τα διαμήκη κύματα (πχ ηχητικά κύματα μέσα σε ρευστά), αποτελεί μία ομογενή διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης (υπερβολικής μορφής):

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 p}{dt^2} = 0 \quad \text{ή} \quad \nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = 0$$

όπου, c είναι η ταχύτητα των κυμάτων στο υλικό μέσο (ταχύτητα διάδοσης των ισοφασικών μετώπων),

φ είναι το δυναμικό της σωματιδιακής ταχύτητας ταλαντώσεων, ορίζεται από τη σχέση:

$$\nabla \varphi = \vec{u}$$

$$\nabla = \frac{d}{dx} \vec{i} + \frac{d}{dy} \vec{j} + \frac{d}{dz} \vec{k}$$

είναι ο ορισμός του λεγόμενου τελεστή grad, σε καρτεσιανές συντεταγμένες x, y, z . Για επίπεδα κύματα που διαδίδονται κατά τον άξονα των x , ο τελεστής αυτός απλοποιείται σε

$$\nabla = \frac{d}{dx} \vec{i}$$

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$$

είναι ο ορισμός του λεγόμενου τελεστή Laplace, σε καρτεσιανές συντεταγμένες x, y, z . Για επίπεδα κύματα που διαδίδονται κατά τον άξονα των x , ο τελεστής αυτός απλοποιείται σε

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2}$$

Ο πρώτος όρος της κυματικής εξίσωσης εκφράζει με την χωρική μεταβολή, ενώ ο δεύτερος όρος την χρονική μεταβολή της πίεσης ή του δυναμικού της σωματιδιακής ταχύτητας. Εισάγοντας τη δράση της ακουστικής πηγής στην ανωτέρω εξίσωση του δυναμικού τότε έχουμε μία μη ομογενή διαφορική κυματική εξίσωση:

$$\nabla^2 \varphi(t, \vec{r}) - \frac{1}{c^2(r)} \frac{d^2}{dt^2} \varphi(t, \vec{r}) = f(t, \vec{r})$$

όπου $f(t, \vec{r})$ εκφράζει τα χαρακτηριστικά εκπομπής της πηγής που εισάγει το ακουστικό σήμα στο μέσο διάδοσης. Η συνάρτηση αυτή μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους και λέγεται κατανομή ή συνάρτηση πηγής κατά τη χρονική στιγμή t και στη θέση \vec{r} .

όπου $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$ αποτελεί το διάνυσμα θέσης ενός εξεταζόμενου σημείου στο χώρο.

1.7 Απώλειες ηχητικής διάδοσης (transmission / propagation loss)

Η ηχητική διάδοση μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον αποτελεί μια διαδικασία αρκετά περίπλοκη και δύσκολα προβλέψιμη με υψηλή ακρίβεια στην πράξη. Η ακριβέστερη δυνατή γνώση των παραμέτρων περιβάλλοντος που επηρεάζουν το πρόβλημα της διάδοσης (πχ οριζόντιο και κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας του ήχου, βαθυμετρία, ποιότητα / στρωμάτωση του βυθού, κτλ) είναι δυνατόν να βοηθήσει στην επιτυχή εκτίμηση των απωλειών της ηχητικής διάδοσης TL (Transmission ή Propagation Loss) και κατ'επέκταση στη λήψη ορθότερων σποφάσεων για την απόδοση και τον αποτελεσματικότερο τρόπο επιχειρησιακής χρησιμοποίησης / εκμετάλλευσης των συστημάτων sonar. Η λογαριθμική έκφραση (σε dB) των απωλειών ηχητικής διάδοσης TL σε κάποια απόσταση r από την πηγή, ορίζεται ως ακολούθως :

$$TL = 20 \log \frac{p(1m)}{p(r)} = 10 \log \frac{I(1m)}{I(r)}$$

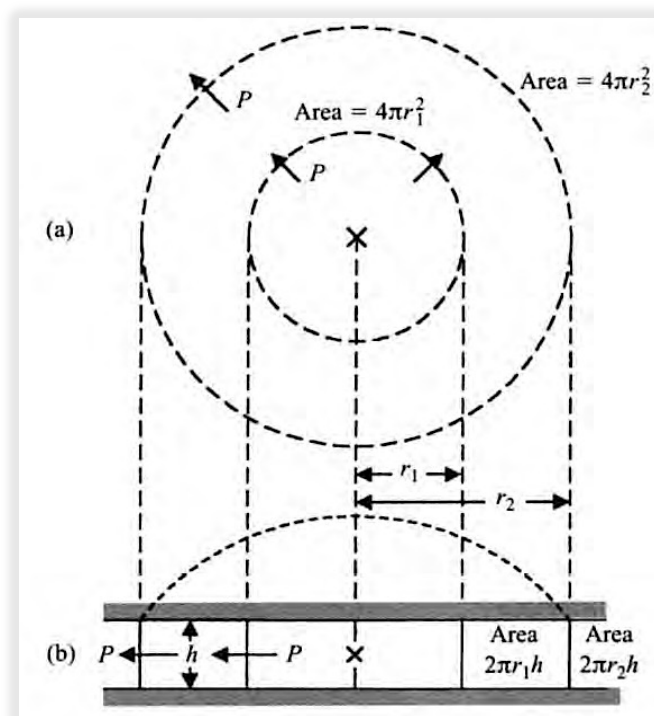
Οι αναφερόμενες στην προηγούμενη σχέση τιμές των ηχητικών πιέσεων και εντάσεων, είναι συνήθως rms (ενεργές τιμές). Επομένως, η τιμή TL αποτελεί ένα μέτρο της μείωσης με την απόσταση του επιπέδου ηχητικής πίεσης SPL ή της ηχητικής έντασης IL, και συγκεκριμένα κατά τη διάδοση του σήματος στο διάστημα μεταξύ ενός σημείου που βρίσκεται σε απόσταση 1m από το ακουστικό κέντρο της πηγής και ενός άλλου σημείου που βρίσκεται σε απόσταση r . Η τιμή TL στις εξισώσεις sonar χρησιμοποιείται με θετικό πρόσημο, ενώ στα διαγράμματα που προκύπτουν από τους διάφορους κώδικες υπολογισμού αναγράφεται με αρνητικό πρόσημο. Υπάρχουν πολλών ειδών απώλειες ηχητικής διάδοσης μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον, οι βασικότερες από τις οποίες είναι οι γεωμετρικές (geometrical / spreading loss), απορρόφησης (absorption loss), σκέδασης (scattering loss) και διαφυγής

(leakage loss). Σύμφωνα με τον Σάγο (2019), η συνολική τιμή απωλειών TL (transmission ή propagation loss) αποτελεί την υπέρθεση (άθροισμα) όλων των επιμέρους συνιστώσων :

$$TL_{total} = TL_g + TL_{abs} + TL_s + TL_l.....$$

1.7.1 Γεωμετρικές απώλειες (geometrical / spreading loss)

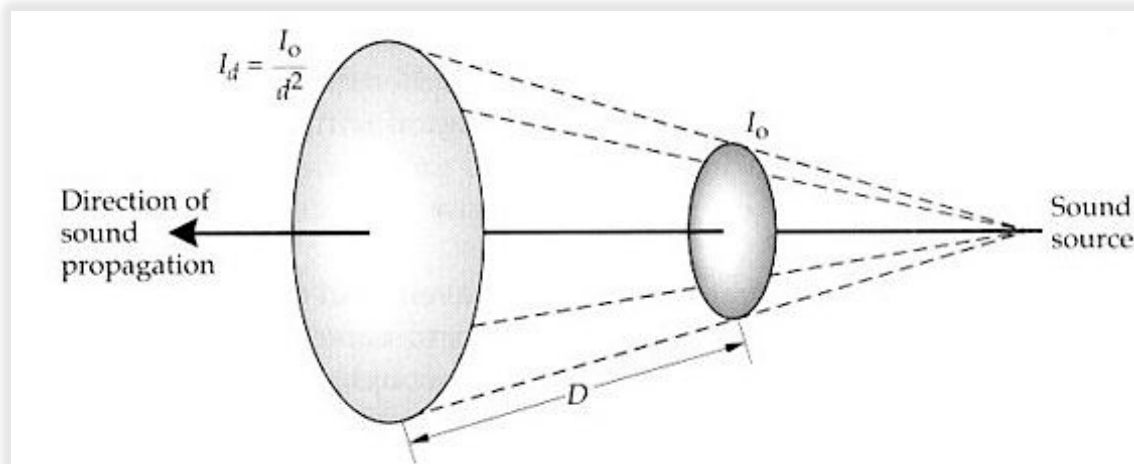
Η απόκλιση της ηχητικής ενέργειας γνωστή και σαν απώλεια εξάπλωσης (Spreading Loss), είναι μια γεωμετρική έννοια, η οποία αντιπροσωπεύει μια ομαλή εξασθένηση ενός ηχητικού σήματος, καθώς αυτό διαχέεται έξω από την πηγή. Δύο είναι τα είδη του Spreading Loss, η σφαιρική απώλεια (Spherical Spreading) και η κυλινδρική (Cylindrical Spreading). Η σφαιρική απώλεια συμβαίνει όταν οι ανακλάσεις ή οι διαθλάσεις δεν επηρεάζουν την διάδοση των ηχητικών δεσμών. Για να παραστήσουμε τον τρόπο αυτό απώλειας, υποθέτουμε μια ηχητική πηγή σαν ένα σημείο όπου έχει εκπέμψει ένα ποσό ηχητικής ενέργειας. Καθώς η ενέργεια ταξιδεύει μακριά από την πηγή, διαχέεται σε σχήμα σφαιρικό όπως φαίνεται στις εικόνες 8 και 9.



Εικόνα 8 Γεωμετρικές απώλειες (Waite, 2002, σ.44)

Η σφαίρα όλο και μεγαλώνει όσο η απόσταση από την ηχητική πηγή αυξάνει και επομένως η ένταση του ήχου μειώνεται ανάλογα. Η μείωση της έντασης είναι ανάλογη με την αύξηση της επιφάνειας της περιοχής της σφαίρας. Η επιφάνεια της περιοχής της σφαίρας δίνεται από τον τύπο $A = 4\pi r^2$ και η μείωση της έντασης του ήχου είναι ανάλογη του τετραγώνου της ακτίνας. Εάν θεωρήσουμε ότι η ακτίνα της σφαίρας είναι η απόσταση της ηχητικής πηγής, η απώλεια σε dB που οφείλεται στην εξάπλωση ανάμεσα ενός σημείου 1 yard από την πηγή και τον δέκτη, δίνεται από τον τύπο:

Spherical Spreading Loss (dB) = $10\log R^2$ ή $20\log R$, όπου R είναι η απόσταση σε yards ανάμεσα της ηχητικής πηγής και του δέκτη. (Waite, 2002)



Εικόνα 9 Απεικόνιση του Spherical Spreading Loss ως προς την απόσταση από την ηχητική πηγή
(Ανακτήθηκε την 4/5/21 από <https://slidetodoc.com/sound-transmission-and-echolocation-sound-transmission-sound-properties/>)

1.7.2 Απώλειες απορρόφησης (Absorption Loss)

Όταν ένα ηχητικό κύμα ταξιδεύει μέσω του θαλασσινού νερού, οι απώλειες απορρόφησης λαμβάνουν χώρα μέσω δύο κύριων μηχανισμών:

- **το ιξώδες:** απώλειες λόγω ιξώδους εμφανίζονται είτε στο γλυκό είτε στο αλμυρό νερό. Αυτή η συνεισφορά είναι ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας και υπολογίζεται με την ευθεία διακεκομμένη γραμμή για το γλυκό νερό ανάλογα με την τιμή του α (dB/Km) όπως φαίνεται στην εικόνα 10. (Waite, 2002)
- **μοριακή χαλάρωση:** απώλειες λόγω μοριακής χαλάρωσης υπάρχουν μόνο στο θαλασσινό νερό. Ο μηχανισμός αυτός είναι μια μείωση των μορίων σε ιόντα που

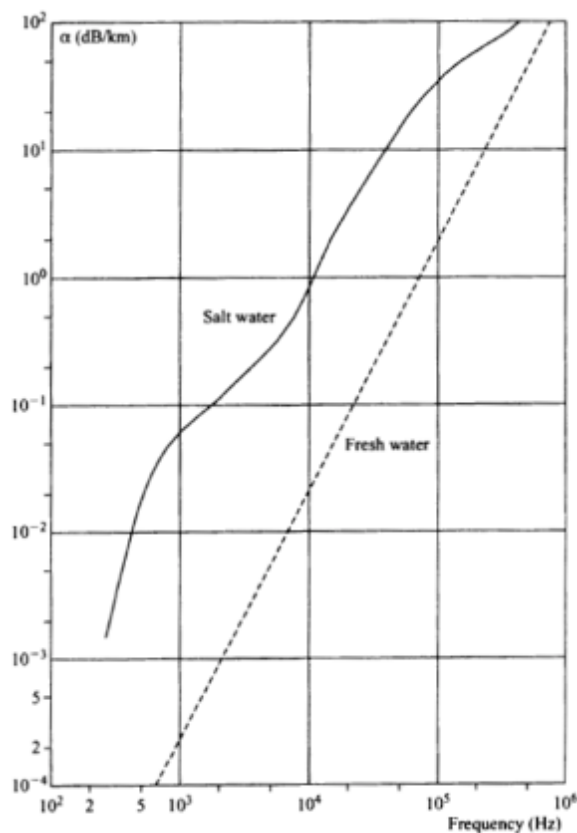
προκαλούνται από το πίεση του ήχου. Σε πολύ υψηλές συχνότητες (μεγαλύτερες από περίπου 500 kHz), οι αλλαγές πίεσης είναι πολύ γρήγορες για να λάβει χώρα χαλάρωση και επομένως δεν απορροφάται η ενέργεια. Η χαλάρωση του θεικού μαγνησίου είναι κυρίαρχη στο εύρος συχνοτήτων 2 έως 500 kHz. Για συχνότητες κάτω από 2kHz η χαλάρωση του βορικού οξέος συμβάλλει σε απώλειες.

Έχουν εκτελεστεί εκτενείς μετρήσεις αυτών των απωλειών και έχει αποδειχθεί ότι σχετίζονται με τη συχνότητα, το βάθος (πίεση) και την αλατότητα. Η συνολική απώλεια δίνεται ως συντελεστής εξασθένησης α (dB/km). Ο συντελεστής εξασθένησης α , αυξάνεται γρήγορα με τη συχνότητα και τις αλλαγές θερμοκρασίας. Επίσης διαφέρει με το βάθος και την αλατότητα, αλλά λιγότερο έντονα. Ο Πίνακας 2 απεικονίζει την μεταβολή (ppt) με βάση τους τύπους Francois και Harrison. Η πρόβλεψη για το α , στο φάσμα συχνοτήτων μεταξύ 0,5kHz και 100kHz υπολογίζεται από τον τύπο: $\alpha = 0,05f^{1.4}$. (Waite, 2002)

T (°C)	α (dB/km)									
	0.5 kHz	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	20 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	500 kHz
5	0.02	0.06	0.14	0.33	1.00	3.80	15	30	55	120
10	0.02	0.06	0.14	0.29	0.82	3.30	16	35	60	125
15	0.02	0.06	0.14	0.26	0.68	2.80	17	40	65	130

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 Πίνακας τιμών εξασθένησης α (Waite, 2002, σ. 47)

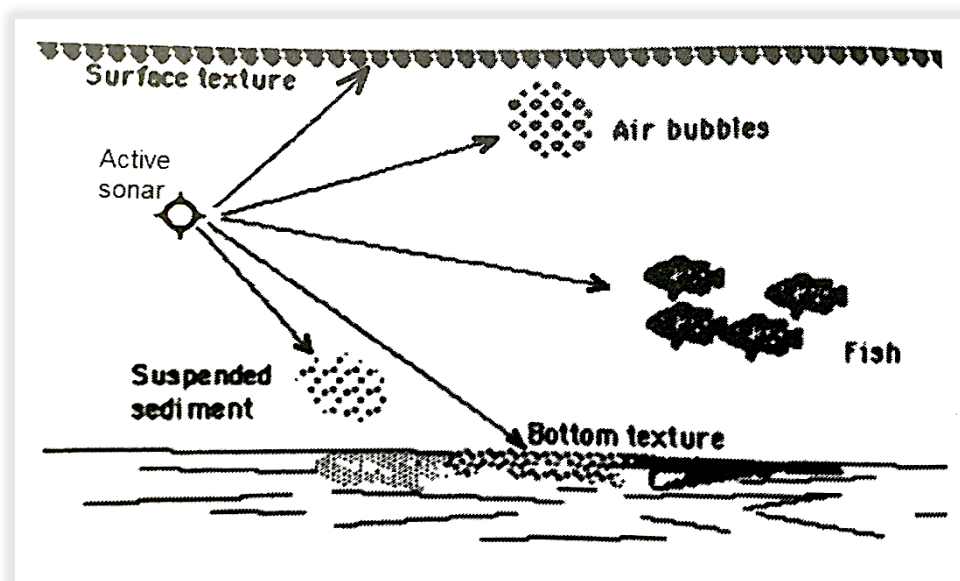
Στον πίνακα 2 φαίνεται με ικανοποιητική ακρίβεια οι τιμές του συντελεστή εξασθένησης α σε σχέση με την θερμοκρασία και την συχνότητα. Η επεξεργασία μέσω της γραμμικής παρεμβολής καθορίζει με επαρκή ακρίβεια τις συχνότητες.



Εικόνα 10 Διάγραμμα της μεταβολής του συντελεστή εξασθένισης α (Waite, 2002, σ. 46)

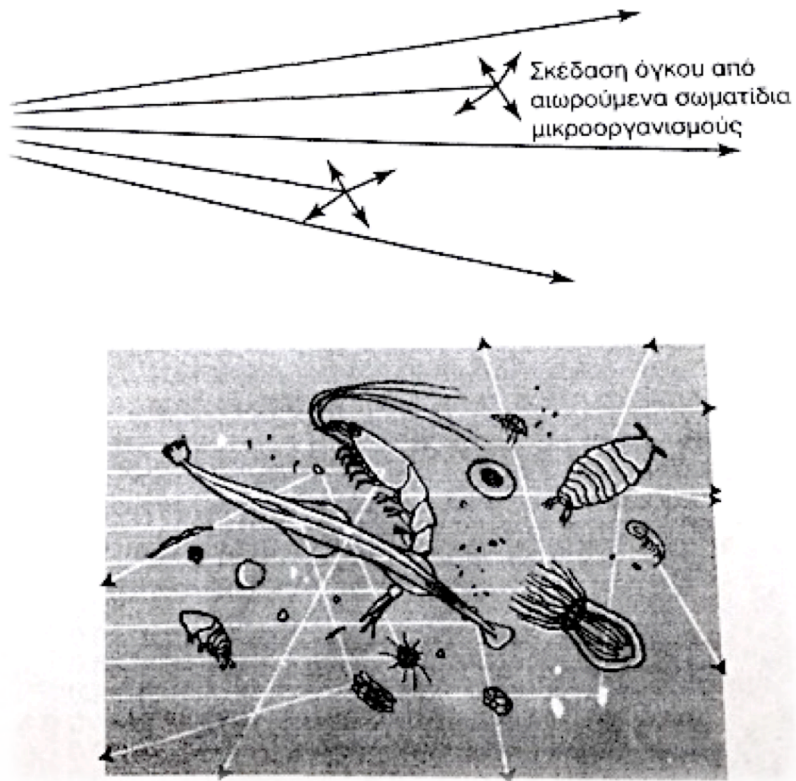
1.7.3 Απώλειες σκέδασης (scattering loss)

Η σκέδαση ή διάχυση των ηχητικών κυμάτων στο βυθό, στη θάλασσα επιφάνεια και σε ανομοιογένειες της θαλάσσιας μάζας (πχ φυσαλίδες, διάφορους μικροοργανισμούς, αγέλες ψαριών ή μικροσωματίδια αιωρούμενα στη θαλάσσια μάζα), αποτελεί μηχανισμό απωλειών λόγω του διασκορπισμού της ηχητικής ενέργειας προς άλλες κατευθύνσεις διαφορετικές από την κατοπτρικά ανακλώμενη (specular reflection) ή εμπρόσθια σκεδαζόμενη ενέργεια (forward scattering). Σημαντικό μέρος της ανεπιθύμητα σκεδαζόμενης ηχητικής ενέργειας των ενεργητικών συστημάτων sonar αποτελούν οι λεγόμενες αντηχήσεις (reverberations) ή οπισθοσκέδαση (backscattering) που εξετάζονται διεξοδικότερα στο Κεφάλαιο 3.



Εικόνα 11 Η σκέδαση αποτελεί μηχανισμό απωλειών της ηχητικής ενέργειας, η οποία μπορεί να προκληθεί από τη θαλάσσια επιφάνεια, το βυθό, φυσαλίδες, αγέλες ψαριών και διάφορους αιωρούμενους σκεδαστές (Σάγος, 2019, σ. 34)

Η απώλειες σκέδασης στη θαλάσσια επιφάνεια αυξάνονται ανάλογα με τη συχνότητα του ακουστικού κύματος και την κατάσταση θαλάσσης. Γενικά, οι απώλειες λόγω πρόσπτωσης στη θαλάσσια επιφάνεια κυμαίνονται από 1 dB για τις χαμηλότερες έως 10 dB για τις υψηλότερες συχνότητες, με το μεγαλύτερο ποσοστό να οφείλεται αποκλειστικά στη σκέδαση και ένα ελάχιστο μέρος να οφείλεται στη διαφυγή της ενέργειας προς την ατμόσφαιρα ($<0.02\%$).



Εικόνα 12 Σκέδαση της ηχητικής ενέργειας, από αιωρούμενους μέσα στη θάλασσα μάζα μικροοργανισμούς (volume scattering) (Σάγος, 2019 σ. 35)

Οι απώλειες σκέδασης και απορρόφησης της ηχητικής ενέργειας του εκπεμπόμενου και λαμβανομένου σήματος, οι οποίες οφείλονται στη συγκέντρωση παγιδευμένων φυσαλίδων αέρα γύρω από το θόλο το προβολέα, είναι γνωστές και ως καταστολή (quenching). Το φαινόμενο αυτό, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη λειτουργία του sonar. Τέτοιου είδους απώλειες εμφανίζονται επίσης σε ισχυρό προνευστασμό (pitching) του πλοίου, κάτω από εξαιρετικά δυσμενείς καιρικές συνθήκες, όπου η πλώρη ανασηκώνεται αρκετά έξω από το νερό, και στη συνέχεια προκρούει πάνω στη θάλασσα με μεγάλη δύναμη. Στις περιπτώσεις αυτές υπάρχουν χρονικά διαστήματα μέσα στα οποία οι ενδείκτες απεικόνισης (οθόνες) το σύστημα των sonar εμφανίζονται εντελώς "νεκροί". Ορισμένες από τις σχηματιζόμενες φυσαλίδες, λόγω πχ του φαινομένου της σπηλαίωσης, διατηρούνται για μεγάλα χρονικά διαστήματα (έως και μερικές ώρες), μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την απόδοση της συσκευής sonar τόσο κατά τη λειτουργία εκπομπής όσο και κατά τη λειτουργία της λήψης. (Σάγος, 2019)

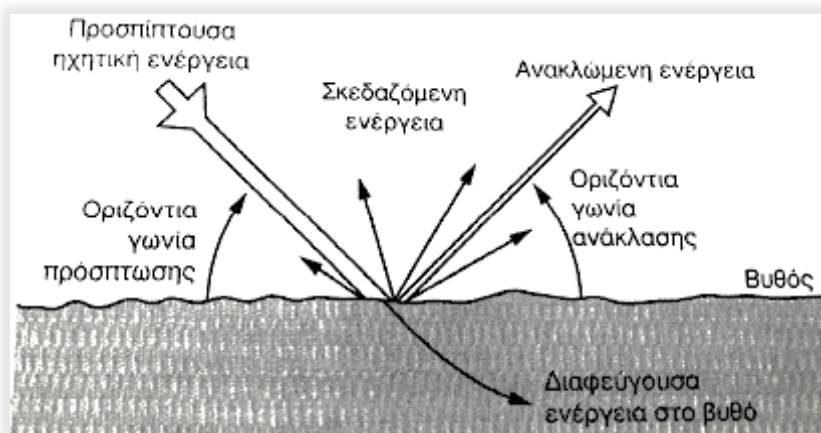


Εικόνα 13 Σκέδαση της ηχητικής ενέργειας στη θαλάσσια επιφάνεια (sea surface scattering)
(Σάγος, 2019 σ. 35)

1.7.4 Απώλειες διαφυγής (leakage loss)

Οι ασυνέχειες που μπορεί να έχει το νερό σαν μέσο διάδοσης της ηχητικής ενέργειας, έχει σαν αποτέλεσμα ένα μέρος της ενέργειας αυτής να διακόπτεται και να επανκρίνεται. Αυτή η επανεκπομπή της ηχητικής ενέργειας ονομάζεται Scattering (διασκόρπιση). Επομένως σαν Scattering Loss μπορεί να θεωρηθούν οι ανακλάσεις της ηχητικής ενέργειας μακριά από την κατεύθυνση όπου το ηχητικό κύμα μετακινείται. Για το λόγο αυτό το μπροστινό ηχητικό κύμα έχει ως απώλεια ενέργειας και μείωση έντασης.

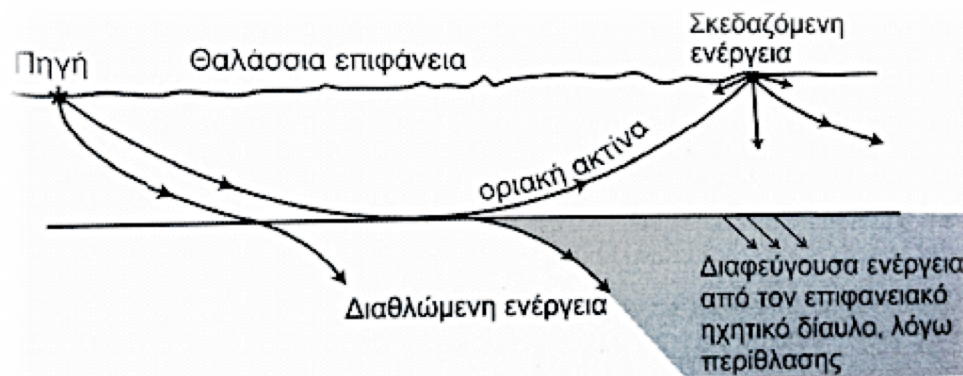
Ο βαθμός της απώλειας από το Scattering Loss, εξαρτάται από την τοπογραφία του βυθού, τις ανωμαλίες του και την συχνότητα του υπό διάδοση ήχου. Οι μεγάλες αλλαγές στην τοπογραφία του βυθού, προκαλούν μεγάλες απώλειες, όταν αυτές συμβαίνουν κατά μήκος της διεύθυνσης της διάδοσης του ηχητικού κύματος. Όσο λιγότερο ανώμαλος γίνεται ο πυθμένας τόσο λιγότερες είναι και οι απώλειες.



Εικόνα 14 Διαφυγή ηχητικής ενέργειας προς το βυθό (Σάγος, 2019, σ. 35)

Το Scattering Loss όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ποικίλει και με την συχνότητα. Σε γενικές γραμμές όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της συχνότητας του ηχητικού κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η απώλεια από το Scattering. Ενώ αντίθετα όσο μικρότερη, τόσο λιγότερες είναι οι απώλειες.

Ο επιφανειακός ηχητικός διάυλος αποτελεί ένα κανάλι για τη διάδοση του ήχου κοντά στην επιφάνεια του ωκεανού. Τα χαρακτηριστικά του επιφανειακού ηχητικού διαύλου έχουν μελετηθεί εκτενώς συμπεριλαμβανομένων των ωκεανογραφικών και ακουστικών χαρακτηριστικών. Σε πολλές περιπτώσεις ηχητικής διάδοσης, όπως πχ είναι ο επιφανειακός ηχητικός διάυλος (surface duct), μέρος της ηχητικής ενέργειας διαφεύγει από τον περιορισμένο χώρο του διαύλου, λόγω του φαινομένου της περίθλασης (diffraction). Η διαφυγή αυτή, παρατηρείται κυρίως από την κάτω οριακή επιφάνεια του στρώματος, με αποτέλεσμα την επιπρόσθετη μείωση της διαδιδόμενης με την απόσταση ηχητικής ενέργειας στο εσωτερικό του επιφανειακού διαύλου.



Εικόνα 15 Διαφυγή ηχητικής ενέργειας από τον επιφανειακό ηχητικό διάυλο (Σάγος, 2019, σ. 38)

1.8 Συντελεστής ανάκλασης (reflection coefficient)

Ο συντελεστής ανάκλασης ακουστικής πίεσης R , για ένα ακουστικό κύμα που προσπίπτει πάνω στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών μέσων, ορίζεται ο λόγος: $R = \frac{P_r}{P_i}$

όπου P_r το πλάτος (για αρμονικά κύματα) ή rms (ενεργή) τιμή της κατοπτρικά ανακλώμενης (specular reflected) ακουστικής πίεσης

P_i το πλάτος (για αρμονικά κύματα) ή rms (ενεργή) τιμή της προσπίπτουσας (incident) ακουστικής πίεσης

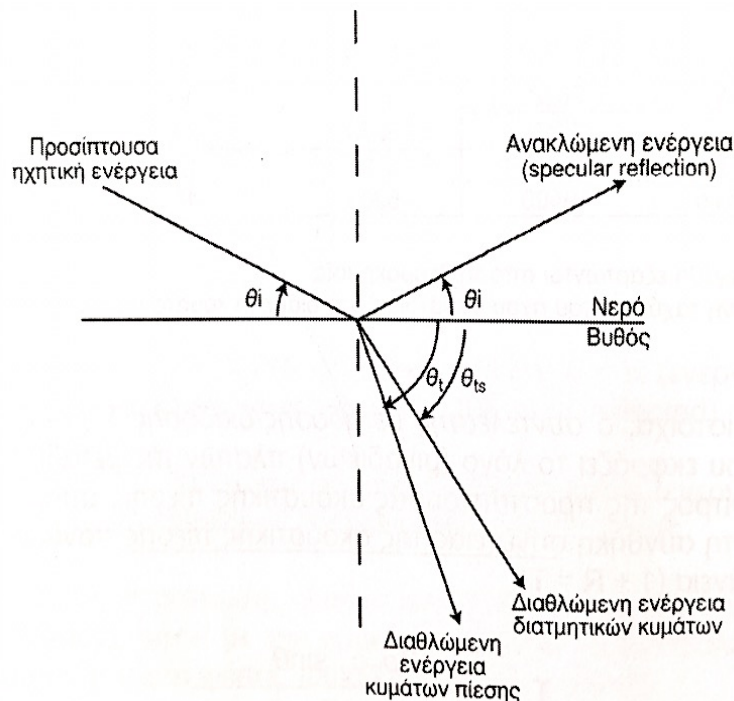
Στη γενική περίπτωση, ο συντελεστής R έχει μιγαδική τιμή (λόγος μιγαδικών πλατών), αφού με την ανάκλαση μπορεί να μεταβάλλεται εκτός από το μέτρο και η γωνία φάσης του ανακλώμενου κύματος. Θεωρώντας μια επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο ρευστών 1 και 2 (πχ δύο διαφορετικών στρωμάτων νερού ή νερού και μαλακού πυθμένα), καθώς επίσης και ότι η πηγή βρίσκεται σε αρκετή απόσταση από την επιφάνεια αυτή (οπότε τα ηχητικά κύματα θεωρούνται ότι έχουν επίπεδα μέτωπα), τότε ο συντελεστής ανάκλασης R (ή συντελεστής ανάκλασης Rayleigh), από τους νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης (Snell) των ηχητικών ακτινών, αποδεικνύεται ότι ισούται με :

$$R = \frac{p_2 c_2 \sin \theta_i - p_1 c_1 \sin \theta_t}{p_2 c_2 \sin \theta_i + p_1 c_1 \sin \theta_t}$$

όπου, θ_i η οριζόντια γωνία πρόσπτωσης και θ_t η οριζόντια γωνία διάθλασης (μετάδοσης). Αντίστοιχα, ο συντελεστής μετάδοσης / διάδοσης T (transmission coefficient) που εκφράζει το λόγο (μιγαδικών) πλατών της μεταδιδόμενης (διαθλώμενης) προς της προσπίπτουσας ακουστικής πίεσης, μπορεί να υπολογισθεί από τη συνθήκη συνέχειας της ακουστικής πίεσης πάνω στη διαχωριστική επιφάνεια $T = R + 1$:

$$T = \frac{2p_2 c_2 \sin \theta_i}{p_2 c_2 \sin \theta_i + p_1 c_1 \sin \theta_t}$$

Σύμφωνα με τον Σάγο (2019), η κρίσιμη γωνία (critical angle) πρόσπτωσης είναι η θεωρητική γωνία κάτω από την οποία η ανάκλαση του κύματος είναι ολική, δηλαδή δεν εμφανίζονται καθόλου απώλειες λόγω ανάκλασης αφού δεν παρατηρείται καθόλου μεταδιδόμενη / διαθλώμενη ενέργεια προς το δεύτερο μέσο, είναι: $\theta_c = \arccos\left(\frac{c_1}{c_2}\right)$.



Εικόνα 16 Πρόσκρουση της ηχητικής ενέργειας στο βυθό. Τα διατμητικά κύματα απορροφώνται σχετικά γρήγορα με αποτέλεσμα να μη διαδίδονται σε μεγάλη απόσταση από τον πυθμένα (Σάγος, 2019, σ.44)

1.9 Φαινόμενο Doppler

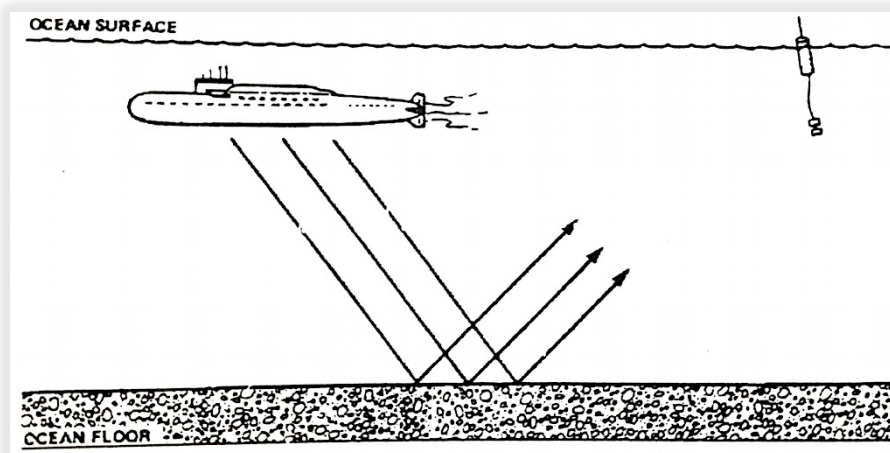
Η αρχή του Doppler η οποία ισχύει για όλες τις κυματικές κινήσεις αναπτύχθηκε από τον Αυστριακό Φυσικό Christian Doppler (1803-1853). Αυτή η αρχή μας δείχνει ότι όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ της πηγής και του δέκτη, σε μια κυματική κίνηση, η συχνότητα που λαμβάνει ο δέκτης είναι διαφορετική από εκείνη του πομπού. Η αρχή του Doppler έχει σημαντική λειτουργία σε εφαρμογές του sonar. Αν ένας παρατηρητής κινείται προς μια πηγή θορύβου, ακούει τον ήχο με μεγαλύτερη συχνότητα από ότι εάν παρέμενε ακίνητος. Εάν ο παρατηρητής απομακρύνεται από την πηγή του ήχου, ακούει έναν τόνο του οποίου η συχνότητα είναι χαμηλότερη από εκείνη κατά την οποία ο παρατηρητής είναι ακίνητος. Έτσι εμφανίζεται η συχνότητα του ήχου να αυξάνεται όταν κινείται ένας παρατηρητής προς μια πηγή και φαίνεται να μειώνεται όταν απομακρύνεται από αυτό. Ομοίως, εάν η πηγή κινείται προς τον παρατηρητή, η συχνότητα είναι υψηλότερη, ενώ αντίθετα αν η πηγή απομακρύνεται από το παρατηρητή, η συχνότητα είναι χαμηλότερη. Όταν ο παρατηρητής είναι ακίνητος, ο αριθμός των κυμάτων που δέχεται κάθε δευτερόλεπτο είναι F_0 , η πραγματική δηλαδή συχνότητα του ο ήχου. Όταν ο παρατηρητής κινείται προς την

πηγή, λαμβάνει περισσότερα ηχητικά κύματα σε κάθε δευτερόλεπτο παρά όταν είναι ακίνητος. Εάν ο μέσος ρυθμός απόστασης είναι dR (σε πόδια ανά δευτερόλεπτο), ο επιπλέον αριθμός κυμάτων που λαμβάνονται ανά δευτερόλεπτο είναι εκείνος που λαμβάνει από την απόσταση η οποία αλλάζει στο 1 δευτερόλεπτο. Επειδή η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κυμάτων είναι το μήκος κύματος λ , αυτός ο αριθμός είναι $\frac{dR}{\lambda}$. Εάν η σχέση για την ταχύτητα u του ήχου είναι $u = F_0 \cdot \lambda$, ο αριθμός των επιπλέον λαμβανόμενων κυμάτων είναι $F_0 \frac{dR}{u}$. Η συχνότητα F είναι ο συνολικός αριθμός που λαμβάνονται σε κάθε δευτερόλεπτο και ως εκ τούτου δίνεται από την σχέση : $F = F_0$. (Bureau of Naval Personnel, 1953)

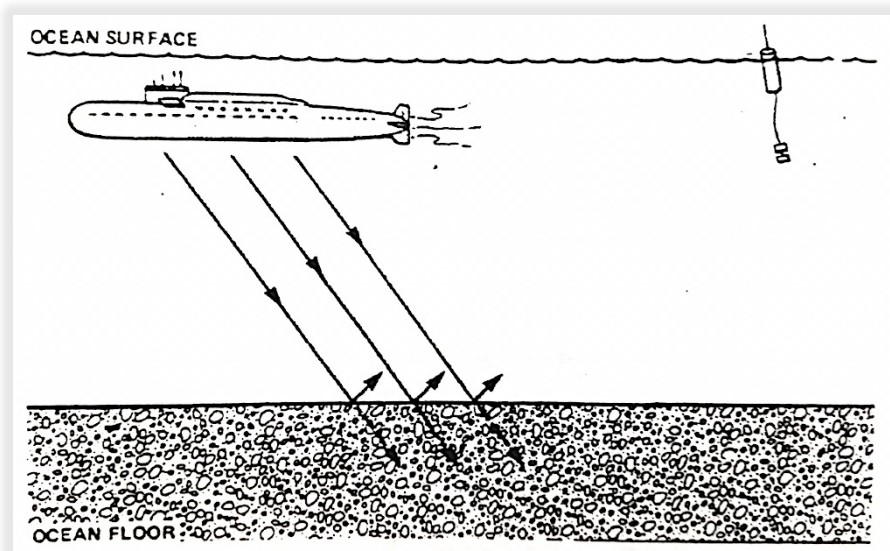
1.10 Απώλειες βυθού

Η απώλεια από τον πυθμένα (Bottom Loss), συμβαίνει όταν τα ηχητικά κύματα εισχωρούν στον πυθμένα της θάλασσας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα μέρος της ηχητικής ενέργειας το οποίο ανακλάται από το πυθμένα, ταυτόχρονα να εκπέμπεται μέσα σε αυτόν. Η απορρόφηση αυτή εξαρτάται από την σύνθεση του πυθμένα, τη γωνία πρόσκρουσης και την συχνότητα του ήχου.

Όταν η σύνθεση του πυθμένα της θάλασσας είναι λασπώδης, η απορρόφηση του είναι μεγάλη, οπότε και οι απώλειες της ηχητικής ενέργειας είναι μεγάλες. Ενώ αντίθετα όταν είναι βραχώδης η απορρόφηση του είναι μικρότερη, οπότε και οι απώλειες είναι μικρότερες. Όταν η σύνθεση του είναι αμμώδης, τότε επικρατεί μια ενδιάμεση κατάσταση, και οι απώλειες κυμαίνονται σε μέτρια επίπεδα. Σε γενικές γραμμές όσο πιο πυκνή είναι η σύνθεση του πυθμένα, τόσο πιο ικανή είναι στο να ανακλάσει την ηχητική ενέργεια, με λιγότερη απορρόφηση και κατά συνέπεια με λιγότερες απώλειες.



Εικόνα 17(α) Ανάκλαση ακουστικού σήματος σε πυκνό πυθμένα



Εικόνα 17(β) Απορρόφηση ακουστικού σήματος σε μαλακό πυθμένα

Επιπλέον ο βαθμός με τον οποίο η ηχητική ενέργεια ανακλάται ή απορροφάται από την σύνθεση του πυθμένα της θάλασσας, εξαρτάται από την γωνία πρόσκρουσης ή όπως ονομάζεται Grazing Angle. Όσο μικρότερη είναι η γωνία πρόσκρουσης α° , (τόσο μεγαλύτερη είναι η Grazing Angle ϵ°), τόσο μικρότερη ενέργεια θα ανακλαστεί και τόσο περισσότερο ενέργεια θα απορροφηθεί, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλες απώλειες. Ενώ αντίθετα, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία πρόσκρουσης α° , (τόσο μικρότερη είναι η Grazing Angle ϵ°), τόσο μεγαλύτερη ενέργεια θα ανακλαστεί και τόσο μικρότερη θα είναι η απορρόφηση, με αποτέλεσμα να έχουμε λιγότερες απώλειες. Καθώς η γωνία πρόσκρουσης α° μεγαλώνει, όλο

και περισσότερο η ηχητική ενέργεια που προσκρούει ανακλάται, μέχρι ενός σημείου όπου η περαιτέρω αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης α° δεν εκτιμάται ότι παράγει ανακλώμενη ενέργεια. Αυτή η γωνία ονομάζεται Critical Angle b° και μας δίνει τη μέγιστη δυνατότητα ποσού ενέργειας που θα ανακλαστεί για έναν τύπο πυθμένα. (Medwin, 1998)

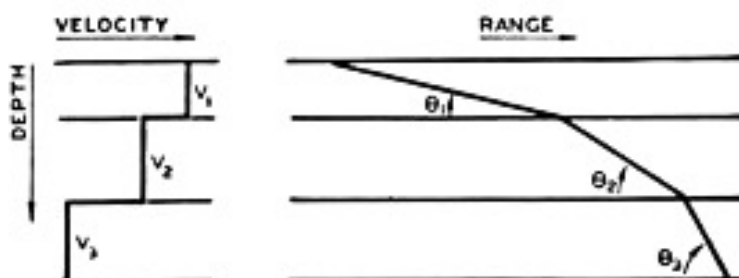
1.11 Διάθλαση (refraction) - Νόμος του Snell

Σύμφωνα με το Bureau of Naval Personnel (1953), έχει παρατηρηθεί το γεγονός ότι μια ακτίνα ήχου κάμπτεται ή ελαφρώς καμπυλώνει από την ευθεία διαδρομή που ακολουθεί κατά την διάδοση της, όταν περνά υπό γωνία από ένα στρώμα θαλασσινού νερού σε ένα δεύτερο στρώμα όπου η ταχύτητα είναι διαφορετική από εκείνη που είχε στο πρώτο στρώμα. Με τη μέθοδο προσδιορισμού της ταχύτητας του ήχου σε κάθε σημείο της θάλασσας, είναι θεωρητικά δυνατό να υπολογιστούν οι ακουστικές ακτίνες κατά τις οποίες ταξιδεύει ο ήχος. Εάν, για λόγους απλότητας, ο ωκεανός θεωρηθεί στρωματοποιημένος έτσι ώστε η θερμοκρασία σε όλα τα σημεία που έχουν το ίδιο βάθος να είναι η ίδια, ο υπολογισμός γίνεται αρκετά απλός. Ο υπολογισμός βασίζεται στον γνωστό νόμο περί διάθλασης του Snell που μπορεί να μελετήσει κανείς σε όλα τα εγχειρίδια της φυσικής, όπως ισχύει για τις ακτίνες του φωτός. Η Εικόνα 18 δείχνει μια ιδιαίτερα απλή περίπτωση τριών στρωμάτων ή στρωμάτων, σε καθένα από τα οποία η ταχύτητα του ήχου είναι σταθερή. Εάν θεωρήσουμε ότι ένα επίπεδο κύμα διέρχεται από αυτά τα τρία επίπεδα, ο νόμος του Snell είναι

$$\frac{u_1}{\cos(\theta_1)} = \frac{u_2}{\cos(\theta_2)} = \frac{u_3}{\cos(\theta_3)}$$

όπου u_1 είναι η ταχύτητα και θ_1 η κλίση του της ακτίνας στο πρώτο στρώμα και ούτω καθεξής. Σημειώστε ότι η γωνία κλίσης θ , είναι το συμπλήρωμα της γωνίας που δίνεται συνήθως με τον νόμο του Snell. Η ακτίνα σε καθένα στρώμα είναι ένα τμήμα μιας ευθείας γραμμής αλλά αν τα στρώματα γίνουν πολύ λεπτά, η ακτίνα πλησιάζει μια ομαλή καμπύλη. Σε κάθε σημείο κατά μήκος της ακτίνας, η σχέση μεταξύ της κλίσης της ακτίνας και της ταχύτητας του ήχου εξακολουθεί να δίνεται από την εξίσωση :

$$\frac{u_1}{\cos(\theta_1)} = \frac{u_2}{\cos(\theta_2)} = \frac{u_3}{\cos(\theta_3)}$$



Εικόνα 18 Διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται ο νόμος του Snell (Bureau of Naval Personnel, 2005, σ. 11)

1.12 Το προφίλ ταχύτητας του ήχου SVP (Sound Velocity Profile)

Η ταχύτητα του ήχου c στον ωκεανό κυμαίνεται μεταξύ από 1450 έως 1540 m/s και ποικίλλει ως συνάρτηση πολλών φυσικών παραμέτρων, όπως θερμοκρασία, αλατότητα και πίεση (βάθος). Οι διαφορές στην ταχύτητα του ήχου μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη διάδοση (απόσταση ή ποιότητα) του ήχου στον ωκεανό. Ο Πίνακας 3 μας δίνει κατά προσέγγιση εκφράσεις για την ταχύτητα του ήχου ως συνάρτηση αυτών των φυσικών παραμέτρων. (Stergiopoulos, 2001)

Expression	Limits	Ref.
$c = 1492.9 + 3(T - 10) - 6 \times 10^{-3}(T - 10)^2$ $- 4 \times 10^{-3}(T - 18)^2 + 1.2(S - 35)$ $- 10^{-2}(T - 18)(S - 35) + D/61$	$-2 \leq T \leq 24.5^\circ$ $30 \leq S \leq 42$ $0 \leq D \leq 1000$	1 ^a
$c = 1449.2 + 4.6T - 5.5 \times 10^{-2}T^2$ $+ 2.9 \times 10^{-4}T^3 + (1.34 - 10^{-2}T)(S - 35)$ $+ 1.6 \times 10^{-2}D$	$0 \leq T \leq 35^\circ$ $0 \leq S \leq 45$ $0 \leq D \leq 1000$	2 ^b
$c = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2$ $+ 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.340(S - 35)$ $+ 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-2}D^2$	$0 \leq T \leq 30^\circ$ $30 \leq S \leq 40$ $0 \leq D \leq 8000$	3 ^c

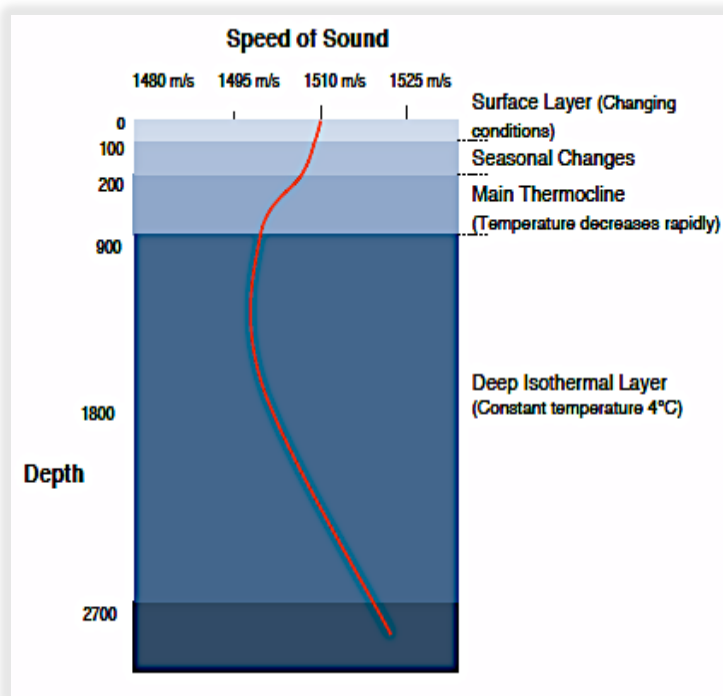
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 Διάφορες εκφράσεις της ταχύτητας του ήχου (Stergiopoulos, 2001, σ. 10-5)

Η χρήση των ηχητικών ακτίνων δευκολύνει πολύ την οπτική απεικόνιση της διάδοσης του ήχου. Οι ηχητικές ακτίνες αποτελούν γραμμές κάθετες στα μέτωπα κύματος. Ωστόσο, οι ακτίνες δεν αποτελούν ακριβή υποκατάστατα των κυμάτων, παρά μόνον προσεγγίσεις που ισχύουν κάτω από ορισμένες συνθήκες (τυπικά στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες). Αποδεικνύεται, ότι οι ηχητικές ακτίνες αντιπροσωπεύουν εκείνα τα σημεία στο χώρο, στα οποία συμβάλλουν προσθετικά οι λεγόμενοι κανονικοί ιδιορυθμοί (normal modes). Αυτό σημαίνει, ότι σε πολύ χαμηλές συχνότητες ή σε πολύ ρηχά ύδατα, δηλαδή εκεί που υπάρχει

ένας και μοναδικός ιδιορυθμός (ή ακόμη και ελάχιστοι ιδιορυθμοί), δεν υπάρχουν καθόλου ηχητικές ακτίνες.

Η **θεωρία των ακτινών** βασίζεται στη χρήση των κανόνων της γεωμετρικής οπτικής. Μεταξύ των άλλων, η μέθοδος αυτή καταλήγει στο **νόμο του Snell** και εφαρμόζει απλές τεχνικές γραφικής απεικόνισης των ηχητικών (**ray tracing**). Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη ταχύτητα υπολογισμού, καθώς επίσης και η παροχή μίας παραστατικής και εύκολα αντιληπτής εικόνας του τρόπου διάδοσης του ήχου στη θάλασσα. (Σάγος, 2019).

Οι ακτίνες διάδοσης που ακολουθεί ο υποβρύχιος ήχος, καθορίζονται από το προφίλ της ταχύτητας του ήχου (*Sound Velocity Profile, SVP*) ή διαφορετικά προφίλ ταχύτητας ήχου (*Sound Speed Profile, SSP*), δηλαδή τη ταχύτητα του ήχου στο νερό σε συνάρτηση με το βάθος του νερού. Η ταχύτητα του ήχου όχι μόνο ποικίλλει ανάλογα με το βάθος, αλλά και ποικίλλει σε διαφορετικές περιοχές του ωκεανού. Σε βαθιά νερά, το SVP κυμαίνεται περισσότερο στο άνω ωκεανό λόγω διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και των καιρικών συνθηκών. Ακριβώς κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας βρίσκεται το επιφανειακό στρώμα, όπου η ταχύτητα του ήχου επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία και τη επίδραση του ανέμου. Κάτω από αυτό το στρώμα βρίσκεται η εποχική θερμοκλίνη όπου η θερμοκρασία και η ταχύτητα μειώνονται με το βάθος και οι μεταβολές της είναι εποχιακές. Στο επόμενο στρώμα η κύρια θερμοκλίνη, η θερμοκρασία και η ταχύτητα μειώνονται με την αύξηση του βάθους ενώ οι επιφανειακές συνθήκες έχουν μικρή επίδραση. Τέλος, υπάρχει το βαθύ ισοθερμικό στρώμα, όπου η θερμοκρασία είναι σχεδόν σταθερή στους 3,9 °C και η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με το βάθος. Στην Εικόνα 19 φαίνεται μία βαθυθερμογραφική παρατήρηση, SVP (*Sound Velocity Profile*) ως συνάρτηση του βάθους.



Εικόνα 19 Ένα τυπικό διάγραμμα ταχύτητας του ήχου στη θάλασσα (Burrowes & Khan, 2011, σ.183)

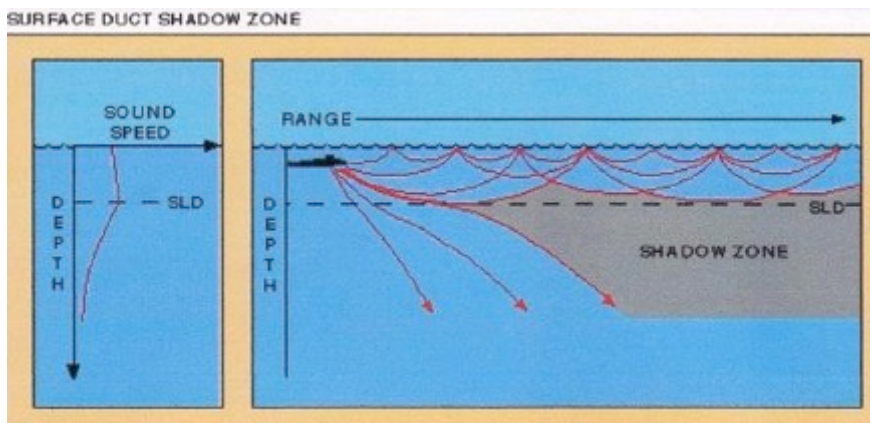
Όταν η ταχύτητα του ήχου είναι ελάχιστη σε ένα συγκεκριμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια, τότε αυτό το βάθος ονομάζεται άξονας του υποβρύχιου καναλιού ήχου. Η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται τόσο πάνω όσο και κάτω από αυτόν τον άξονα. Όταν το ηχητικό κύμα ταξιδεύει μέσα από ένα μέσο με κλίση ταχύτητας ήχου, η κατεύθυνση της διαδρομής του το ηχητικό κύμα κάμπτεται προς την περιοχή χαμηλότερης ταχύτητας ήχου. Σε ρηγά νερά, το SVP είναι ακανόνιστο και δύσκολο να προβλεφθεί λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας της επιφάνειας και των μεταβολών της αλατότητας, τον άνεμο, καθώς και των πολλαπλών αντανακλάσεων του ήχου από τον βυθό. (Stergiopoulos, 2001)

1.13 Ηχητικοί διάυλοι διάδοσης

1.13.1 Επιφανειακός ηχητικός διάυλος (surface duct ή mixed layer)

Ο τρόπος διάδοσης surface duct, συμβαίνει όταν ο άνεμος προκαλεί κυματισμό και πτώση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας, με αποτέλεσμα το υψηλότερο στρώμα να αναμειγνύεται. Η αύξηση της πίεσης με το βάθος σε ένα thermal mixed layer σχηματίζει μια θετική διαβάθμιση της ταχύτητας του ήχου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι ηχητικές δέσμες από την πηγή, να ανακλαστούν στην επιφάνεια και στη συνέχεια να διαθλασθούν μέσα στο

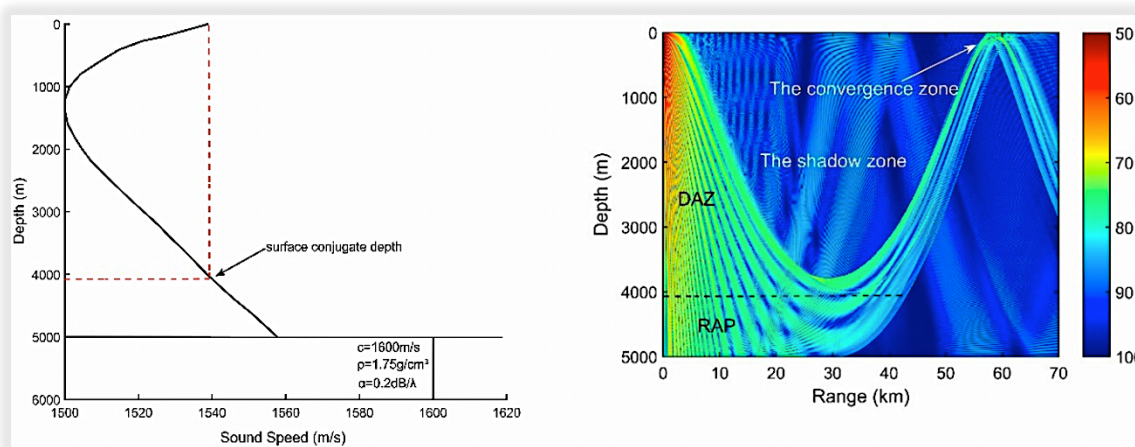
ηχητικό στρώμα βάθος (Sonic Layer Depth), προκαλώντας έτσι μια σκιερή Ζώνη (Shadow Zone) όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20 Επιφανειακός ηχητικός διάυλος (Ανακτήθηκε την 23/5/21 από <https://www.oc.nps.edu/~bird/oc2930/acoustics/surfaceduct.html>)

1.13.2 Αξιόπιστος ηχητικός διάυλος RAP (Reliable Acoustic Path)

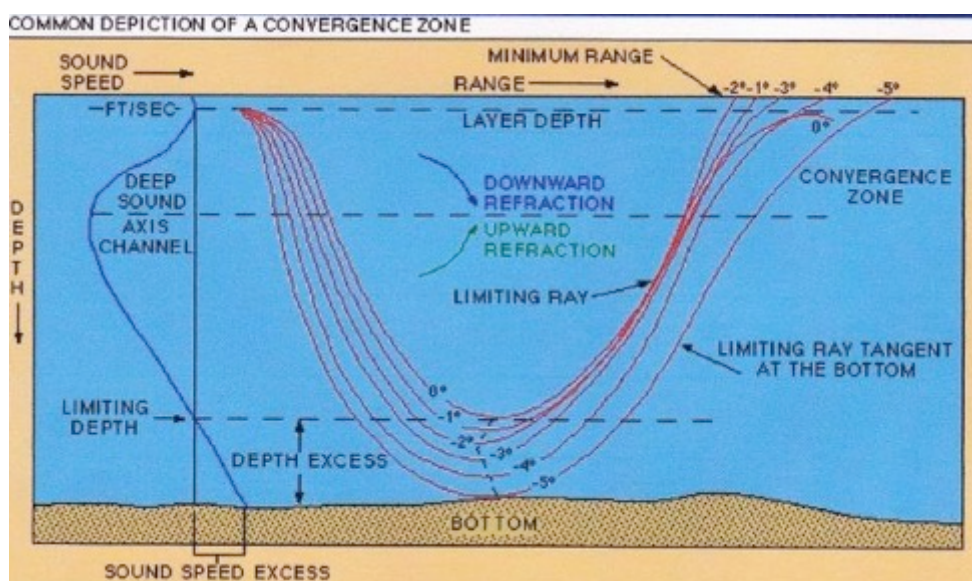
Σε έναν αξιόπιστο ηχητικό διάυλο (Reliable Acoustic Path), οι ηχητικές δέσμες φεύγουν από μια πηγή θορύβου η οποία βρίσκεται σε βάθος, με μια ανοδική κατεύθυνση και φτάνουν στην επιφάνεια. Ο τρόπος αυτός διάδοσης ονομάζεται έτσι λόγω της μη επίδρασης των επιρροών της επιφάνειας, στο Velocity Profil του ήχου. Το Reliable Acoustic Path μπορεί να φανεί χρήσιμο για αποστάσεις μεγαλύτερες πέραν αυτών που επιτυγχάνονται σε ένα surface duct. Η ζώνη άμεσης άφιξης (DAZ / Direct-Arrival Zone) και η αξιόπιστη ακουστική διαδρομή (RAP / Reliable Acoustic Path) αποτελούν σημαντικούς ακουστικούς αγωγούς σε νερά με μεγάλο βάθος. Η ανάλυση του gain μίας κάθετης στοιχειοκεραίας με βάση το DAZ και το RAP είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση των επιδόσεων ανίχνευσης της. Τα τελευταία χρόνια, οι εφαρμογές του DAZ και του RAP έχουν λάβει αυξανόμενη προσοχή λόγω των μοναδικών ακουστικών ιδιοτήτων τους. Στο DAZ, τα ηχητικά σήματα φθάνουν στο υδροφώνο κυρίως μέσω άμεσων και επιφανειακών ακτινοδρομικών διαδρομών.



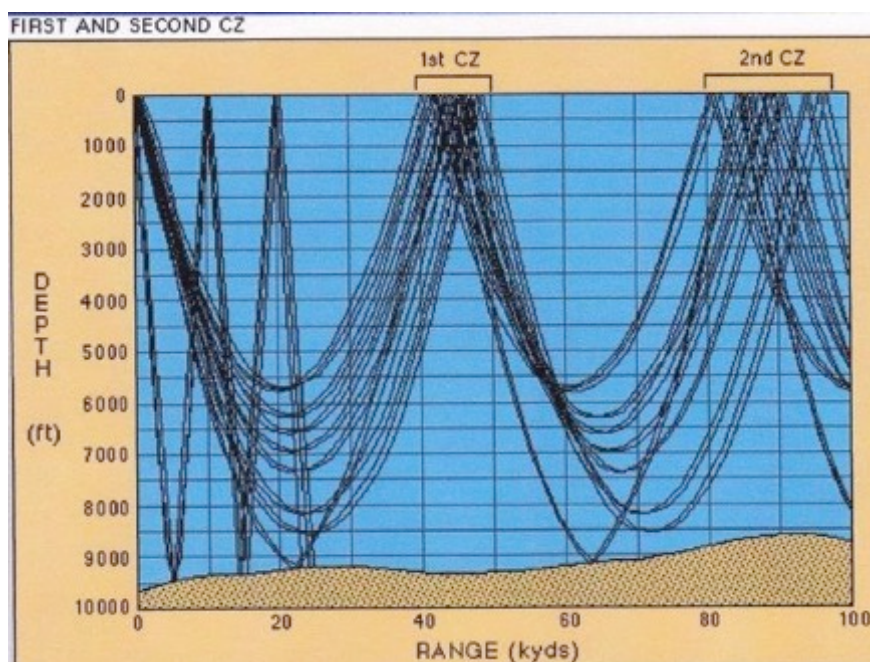
Εικόνα 21 Απεικόνιση αξιόπιστου ηχητικού διαύλου και ζώνης συγκλίσεως ως προς το βάθος και την απόσταση από την ηχητική πηγή. Η χρωμοκοδικοποιημένη κλίμακα αφορά τις απώλειες διάδοσης μίας ηχητικής πηγής στα 100m και συχνότητα εκπομπής στα 150 Hz. (Ανακτήθηκε την 30/4/21 από <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3462>)

1.13.3 Ζώνη σύγκλισης CZ (convergence zone)

Οι convergence zones (CZ) είναι περιοχές στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, όπου οι ηχητικές δέσμες εστιάζονται, συγκλίνουν (converge), με αποτέλεσμα υψηλές επιπέδου ταχύτητες. Χρειάζονται μια αρνητική διαβάθμιση της ταχύτητας του ήχου, στην επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν, με μια θετική διαβάθμιση από κάτω. Επιπλέον η θάλασσα θα πρέπει να είναι αρκετά βαθιά για να δημιουργηθεί μια ταχύτητα του ήχου μεγαλύτερη από την ταχύτητα επιφάνειας. Αρχικά οι ηχητικές δέσμες στρέφουν προς τα κάτω, λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας του ήχου στην επιφάνεια. Στη συνέχεια λόγω της θετικής διαβάθμισης που επικρατεί από την αύξηση της πίεσης του νερού, οι ηχητικές δέσμες διαθλούνται προς την επιφάνεια. Αυτές οι διαθλασμένες ηχητικές δέσμες, συχνά συγκλίνουν στην επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν, μέσα από τις συνδυασμένες επιδράσεις των διαθλάσεων. Αυτή η σύγκλιση των ηχητικών δεσμών σχηματίζει έντονα πεδία τα οποία είναι χρήσιμα στην ανίχνευση των υποβρυχίων. (Medwin, 1998)



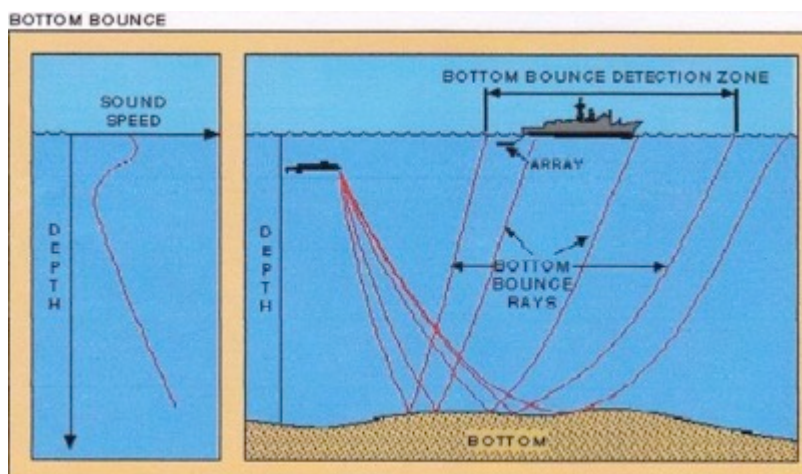
Εικόνα 22 Απεικόνιση ζώνης σύγκλισης (Ανακτήθηκε την 30/4/21 από <https://www.oc.nps.edu/~bird/oc2930/acoustics/soundchannel.html>)



Εικόνα 23 1^η και 2^η ζώνη σύγκλισης (Ανακτήθηκε την 28/5/21 από <https://www.oc.nps.edu/~bird/oc2930/acoustics/soundchannel.html>)

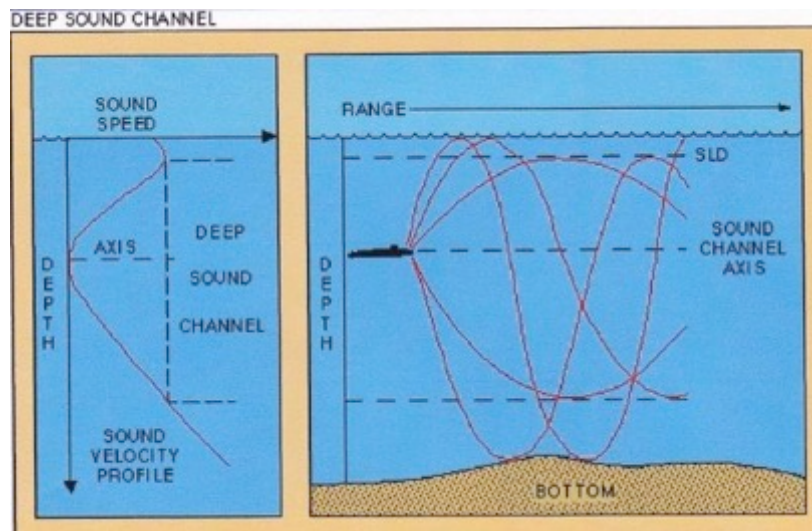
1.13.4 Ανάκλαση στο βυθό BB (bottom bounce) – Ηχητική διάδοση σε ρηγά και βαθιά ύδατα

Σε μια περιοχή της θάλασσας όπου η ταχύτητα του ήχου μειώνεται με το βάθος σε μια ελάχιστη τιμή ενώ στη συνέχεια αυξάνεται, αναφέρεται σαν ένας ηχητικός διάυλος (Sound channel). Δηλαδή για τη δημιουργία του τρόπου αυτού διάδοσης θα πρέπει να έχουμε μια αρνητική διαβάθμιση πάνω από μια θετική. Πάνω από το βάθος τις ελάχιστης τιμής θερμοκρασίας, οι ηχητικές δέσμες κάμπτονται προς τα κάτω. Ενώ κάτω από το βάθος της ελάχιστης τιμής οι ηχητικές δέσμες κάμπτονται προς τα πάνω. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι ηχητικές δέσμες της πηγής που δημιουργούνται μέσα στο διάυλο, να παγιδεύονται και να διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις.



Εικόνα 24 Ηχητική διάδοση μέσω ανακλάσεων του πυθμένα
(Ανακτήθηκε την 23/5/21 από <https://www.oc.nps.edu/~bird/oc2930/acoustics/bottombounce.html>)

Σε βαθιές θάλασσες όπου τα νερά στην επιφάνεια είναι ζεστά και τα χαμηλότερα πιο κρύα, έχουμε τη δημιουργία του φαινομένου Deep Sound Channel, όπου παρουσιάζεται σε βάθη από 200 έως 300 m.(Εικόνα 25)



Εικόνα 25 Ηχητική διάδοση μέσω ανακλάσεων σε βαθύ πυθμένα
(Ανακτήθηκε την 23/5/21 από <https://www.oc.nps.edu/~bird/oc2930/acoustics/soundchannel.html>)

Στα πάνω στρώματα της θάλασσας στο θερμοκλινές, έχουμε την δημιουργία του φαινομένου φυσικά *Shallow Sound channel*, όπου μπορεί να εμφανιστεί σε οποιοδήποτε βάθος κάτω από το στρώμα βάθους (Sonic Layer Depth). Συνήθως εμφανίζεται σε βάθη από 45 έως 150 m. Το φαινόμενο αυτό της διάδοσης, μπορεί να δημιουργήσει καταστάσεις, όπου οι υψηλές συχνότητες της πηγής να διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις ενώ οι χαμηλές συχνότητες σε μικρότερες αποστάσεις.

2. Θόρυβος (Background noise)

2.1 Γενικά

Συνήθως όταν ένα άτομο χρησιμοποιεί τη λέξη θόρυβος, αναφέρεται σε ήχους όπως αυτοί των αεριωθούμενων αεροσκαφών, το βουητό των φορτηγών από έναν κοντινό αυτοκινητόδρομο ή τη ρακέτα που ακούγεται από τα παιδιά του γείτονα. Αυτοί οι ήχοι είναι ενοχλητικοί επειδή εισβάλλουν και παρεμβαίνουν πάνω σε δραστηριότητες όπως η συζήτηση και ο ύπνος, μπορεί ακόμη και να παρεμβαίνουν στην ικανότητα κάποιου να σκέφτεται. Ο θόρυβος είναι ο ανεπιθύμητος ήχος που παρεμποδίζει την κανονική λειτουργία ενός συστήματος. Η κρισιμότητα του θορύβου και ο βαθμός στον οποίο απαιτούνται μέτρα ελέγχου του θορύβου, δεν εξαρτώνται μόνον από το επίπεδο θορύβου, αλλά και από την πυκνότητα των παρεμβολών που προκαλεί σε άλλες λειτουργίες.

Ο υποβρύχιος θόρυβος είναι ήχος στο νερό που περιορίζει τη στρατιωτική αποτελεσματικότητα των ναυτικών συστημάτων. Τα υποβρύχια αποτελούν ναυτικές μονάδες στις οποίες ο θόρυβος διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο, καθώς οι ήχοι που εκπέμπουν μπορούν να αποκαλύψουν την παρουσία τους στον εχθρό. Επιπλέον, χρησιμοποιούν ακουστικά σήματα για υποβρύχιες επικοινωνίες, ενώ χρησιμοποιούν ενεργητικό sonar για την ανίχνευση παρουσίας οποιουδήποτε εχθρού, οι λειτουργίες του οποίου περιορίζονται από το θόρυβο. Ήχοι που εκπέμπονται από πλοία επιφανείας αποκαλύπτουν την παρουσία τους στα εχθρικά υποβρύχια και όπως στο υποβρύχιο, οι αυτοθόρυβοι περιορίζουν την ικανότητα τους για να ανιχνεύουν στόχους. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι ήχοι από ένα πλοίο επιφανείας παρεμβαίνουν επίσης στην απόδοση του sonar μίας άλλης ναυτικής μονάδας. Ένα άλλο παράδειγμα περιορισμού από αυτοθόρυβο είναι αυτό των τορπιλών παθητικού εντοπισμού, που χρησιμοποιούν ήχους που εκπέμπονται από πλοία και υποβρύχια, με σκοπό τον εντοπισμό αυτών των στόχων. Τέλος, η αποτελεσματικότητα από σχετικά αθόρυβα συστήματα, όπως τα buoys (σημαδούρες), καθορίζονται από τον θόρυβο του περιβάλλοντος στη θάλασσα. Αυτός ο υποβρύχιος θόρυβος παίζει κυρίαρχο ρόλο στον Ναυτικό πόλεμο, ενώ αναγνωρίζεται σήμερα ως ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο για την διεξαγωγή επιχειρήσεων από τα περισσότερα Πολεμικά Ναυτικά στον κόσμο. Αφιερώνονται αξιόλογες προσπάθειες τόσο στη μείωση του θορύβου όσο και στην ανάπτυξη μεθόδων του προς εκμετάλλευση. Το

αντικείμενο που αφορά την εκμετάλλευση του θορύβου είναι ως επί το πλείστον απόρρητο. Ωστόσο, υπό το πρίσμα της φυσικής και της μηχανικής μπορούν να συζητηθούν με γενικό τρόπο χωρίς να αποκαλυφθούν διαβαθμισμένες πληροφορίες στρατιωτικών συστημάτων. (Ross, 1976)

Σύμφωνα με τον Waite (2002), θόρυβος είναι το υπόβαθρο στο οποίο πρέπει να ανιχνεύουν τα ενεργητικά και τα παθητικά sonar τους στόχους. Για ένα ενεργητικό sonar, ο θόρυβος αυξάνεται από αντηχήσεις ανεπιθύμητων πηγών ενώ το υπό αξιολόγηση σήμα είναι η ηχώ από τον στόχο. Για ένα παθητικό sonar, το σήμα είναι επίσης θόρυβος ο οποίος εκπέμπεται από τον στόχο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε τις πηγές θορύβου στα συστήματα sonar και στη συνέχεια θα θεωρήσουμε τον συνολικό θόρυβο ως φόντο στο σήμα ανίχνευσης, τον αυτο-θόρυβο (self noise) του συστήματος sonar. Υπάρχουν τρεις πηγές θορύβου που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

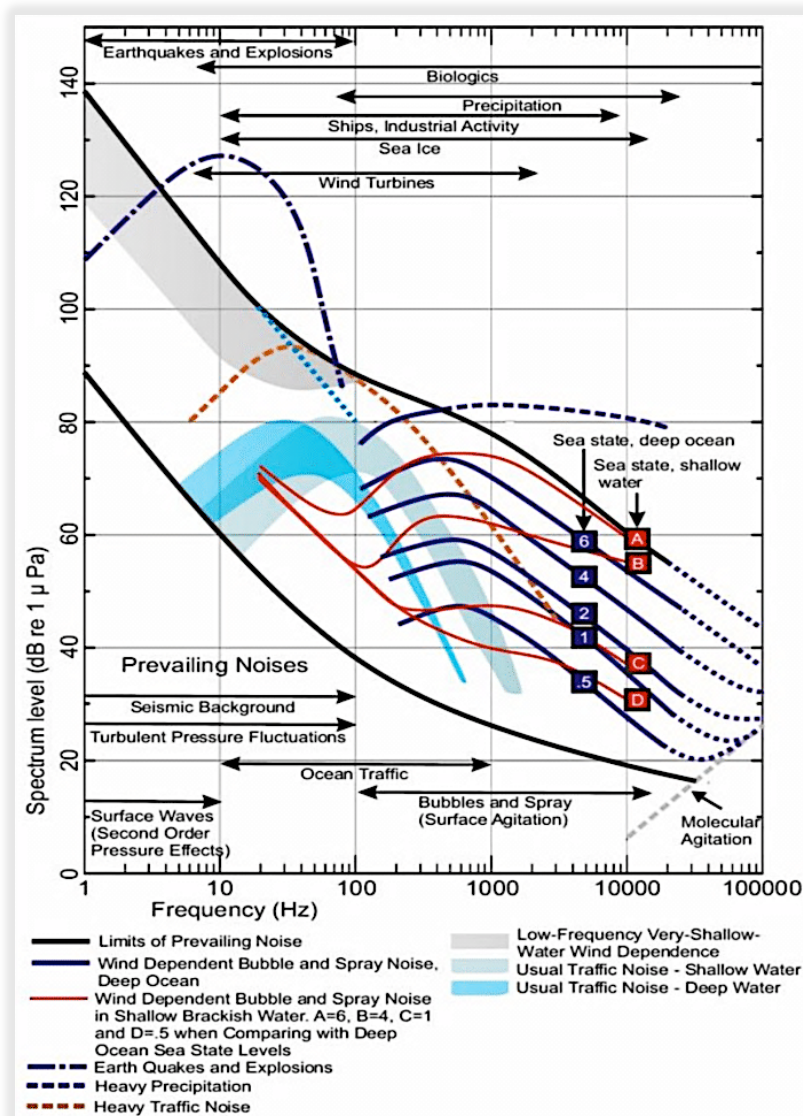
- ο θερμικός θόρυβος
- ο θόρυβος από τη θάλασσα (θόρυβος περιβάλλοντος)
- ο θόρυβος από τα σκάφη

2.2 Θόρυβος περιβάλλοντος (Ambient Noise)

Θόρυβο περιβάλλοντος ονομάζουμε τον ήχο υποβάθρου που υπάρχει γύρω από ένα υδρόφωνο. Είναι μέρος του συνολικού background θορύβου που δεν οφείλεται στις αναγνωρίσιμες εντοπισμένες πηγές. Υπάρχει στις θάλασσες ανεξάρτητα από τις παρατηρούμενες δραστηριότητες. Ο θόρυβος που προέρχεται από παρεμβολές (interfering noise) από το ίδιο το υδρόφωνο ή από το σύστημα του αισθητήρα (sensor) είναι γνωστός σαν αυτοθόρυβος (self noise). Ο αυτοθόρυβος είναι ξεχωριστός από το θόρυβο περιβάλλοντος. Οι πιο βασικοί συντελεστές προέρχονται από τις διαδρομές των πλοίων, την κατάσταση στην επιφάνεια της θάλασσας, την βροχή, τους βιολογικούς οργανισμούς και τέλος τον πάγο. Στις περισσότερες περιπτώσεις συντελεστές του ήχου υποβάθρου, επηρεάζουν μερικές συχνότητες περισσότερο από άλλες, προκαλώντας μεγαλύτερη διακύμανση στα επίπεδα του ambient noise κατά μήκος του φάσματος συχνοτήτων. Επιπλέον, για ένα τμήμα του φάσματος, ο ήχος υποβάθρου μπορεί να γίνει μεταβλητός ως προς το χρόνο. (Ross, 1976).

Ο υποβρύχιος περιβαλλοντικός θόρυβος καλύπτει το εύρος συχνοτήτων από κάτω από 1 Hz έως εκατοντάδες kHz. Σε αυτό το ευρύ φάσμα συχνοτήτων, τα δεδομένα δείχνουν ότι ο

θόρυβος έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά σε διαφορετικές συχνότητες, με τη φασματική κλίση εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά σε διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες, όπως είναι πχ η ταχύτητα του ανέμου. Πραγματοποιήθηκαν πρωτοποριακές εργασίες για τις μετρήσεις και την περιγραφή του θορύβου του περιβάλλοντος από μια ομάδα ακουστικών με επικεφαλής τον V.O. Knudsen, ο οποίος διερεύνησε το περιβάλλον θορύβου στην περιοχή συχνοτήτων από 200 Hz έως 50 kHz. Τα αποτελέσματά τους, που δημοσιεύθηκαν για πρώτη φορά στο 1948 από τον Knudsen, συνοψίζονται σε μια σειρά καμπυλών που περιγράφουν το περιβάλλον φάσματα θορύβου, γνωστά ως φάσματα Knudsen. Από φυσική και εννοιολογική άποψη, το επίπεδο θορύβου περιβάλλοντος στη θάλασσα είναι το καλύτερο από την άποψη χαρακτηριστικών μηχανισμών πηγών θορύβου, βλέπε Εικόνα 26. Η Εικόνα αυτή απεικονίζει την ποικιλομορφία των πηγών θορύβου περιβάλλοντος, του επίπεδου ακουστικής πίεσης ως προς τη συχνότητα. (Neighbors & Brandley, 2017)



Εικόνα 26 Επικρατέστερες πηγές Ambient Noise

(Ανακτήθηκε την 23/5/21 από <https://www.researchgate.net/figure/The-ambient-noise-spectra-schematics-by-Wenz-1962-presented-in-the-form-as-wasfig2343153165>)

2.3 Μοντέλα υπολογισμού θορύβου περιβάλλοντος

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα (κώδικες σε ηλεκτρονικό υπολογιστή), τα οποία χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του επιπέδου θορύβου περιβάλλοντος για διάφορες γεωγραφικές περιοχές της υδρογείου. Αυτά, προσπαθούν να λαμβάνουν υπόψη όσο το δυνατόν ακριβέστερα όλους ή ορισμένους από τους παράγοντες που περιγράφησαν προηγουμένως. Αποκλειστικά για το θόρυβο περιβάλλοντος, το Αμερικανικό Ναυτικό διαθέτει μία παγκόσμια βάση δεδομένων (Data Base), για κάθε μισή μοίρα γεωγραφικού

πλάτους και μήκους.⁴ Ο ακριβέστερος τρόπος προσδιορισμού του θορύβου περιβάλλοντος, είναι η απευθείας επιτόπου μέτρηση στη περιοχή ενδιαφέροντος (in-situ), με τη βοήθεια κάποιας κατάλληλα βαθμονομημένης για το σκοπό αυτό διατάξης υδρόφωνων. Η απαιτούμενη όμως διακρίβωση αποτελεί μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία. Επισημαίνεται, ότι οι περισσότερες ενεργητικές και παθητικές ανθυποβρυχιακές συσκευές, παρέχουν δυνατότητα μέτρησης του συνολικού θορύβου που λαμβάνει η συσκευή. Η τιμή αυτή του θορύβου, Συνήθως είναι γνωστή ως LE (Beam Noise). (Σάγος, 2019)

▪ **Μοντέλα εκτίμησης θορύβου περιβάλλοντος AN (Ambient Noise)**

Τα μοντέλα αυτά υπολογίζουν το μέσο επίπεδο θορύβου περιβάλλοντος στη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος (σε μορφή πολικών διαγραμμάτων ή πινάκων), το οποίο οφείλεται στις καιρικές συνθήκες (κυματισμός, βροχή, κτλ), τη ναυτιλιακή κίνηση και τη θαλάσσια ζωή (βιολογικός θόρυβος). Ορισμένα χαρακτηριστικά μοντέλα της κατηγορίας αυτής, είναι τα ακόλουθα:

1. DANES – Directional Ambient Noise Estimation System. Λαμβάνει υπόψη μόνο το θόρυβο ναυτιλίας και κυματισμού (λόγω ανέμου). Καλύπτει ολόκληρη την υδρόγειο, ανά μία μοίρα πλάτους και μήκους. Επιλύει την παθητική εξίσωση sonar για τους υπολογισμούς απωλειών διάδοσης. Ως στοιχεία εισόδου, απαιτεί την γεωγραφική περιοχή, τις συχνότητες ενδιαφέροντος, το βάθος στο δέκτη, το χρόνο καθώς και το προφίλ της ταχύτητας του ήχου.

2. RANDI 3.1 – Research Ambient Noise Directionality model. Λαμβάνει υπόψη το θόρυβο ναυτιλίας, κυματισμού (λόγω ανέμου), βιολογικό θόρυβο, κατάσταση θαλάσσης, βροχής και μακρινών πηγών. Αποτελεί μοντέλο εξαρτώμενο της απόστασης (range dependent), το οποίο χρησιμοποιεί το SuperSNAP για τον υπολογισμό των απωλειών ηχητικής διάδοσης (υποστηρίζεται από βάση δεδομένων με πληροφορίες προφίλ ταχύτητας του ήχου, βαθυμετρίας και γεωακουστικών παραμέτρων). Επίσης περιλαμβάνει κάποιο μοντέλο προσομείωσης της κίνησης των διερχόμενων πλοίων και υπολογισμού του παραγόμενου θορύβου (το παραβολικό μοντέλο FEPE). Το RANDI υπολογίζει το συνολικό επίπεδο θορύβου (omni level) αλλά και την οριζόντια και κατακόρυφη κατευθυντικότητα του περιβαλλοντικού θορύβου χαμηλών συχνοτήτων (10 – 500Hz).

⁴ Σε παράκτιες περιοχές, η ακρίβεια βάσεων δεδομένων αυτό του τύπου είναι σχετικά περιορισμένη. Στις περιοχές αυτές, παρατηρείται μεγαλύτερη χωρική και χρονική μεταβλητότητα των τιμών θορύβου περιβάλλοντος, αφού υπεισέρχονται ακόμη και οι ανθρώπινες δραστηριότητες επί της ξηράς.

▪ **Μοντέλα εκτιμήσεις λαμβανόμενου θορύβου LE (Beam Noise)**

Υπολογίζουν τις στατιστικές ιδιότητες του χαμηλόσυχνου ναυτιλιακού θορύβου, εφαρμόζοντας μεθόδους είτε αναλυτικές (με βάση την παθητική εξίσωση sonar) είτε προσομείωσης ρεαλιστικών καταστάσεων (πχ Monte Carlo). Η τιμή του θορύβου LE, μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως η συνέλιξη (convolution) του διαγράμματος ακτινοβολίας (Beam pattern) του συγκεκριμένου συστήματος λήψης, με το άθροισμα των εντάσεων των διαφόρων πηγών θορύβου. Ορισμένα χαρακτηριστικά μοντέλα της κατηγορίας αυτής είναι τα ακόλουθα :

1. BBN – Bolt Beranek Newman, Inc
2. DSBN

2.4 Αυτοθόρυβος (Self Noise)

Ο αυτοθόρυβος ενός sonar θεωρείται ως τάση θορύβου που εμφανίζεται στην είσοδο του δέκτη. Είναι πιο βολικό, ωστόσο, τόσο για το σχεδιασμό όσο και για την ανάλυση της απόδοσης, να οριστεί στην είσοδο του συστήματος, δηλαδή στη διασύνδεση συστοιχίας / νερού. Η ένταση θορύβου δίνεται σε dB σε σχέση με την πανοραμική ένταση του επίπεδου κύματος με πίεση ίση με 1 μPa στο φάσμα του 1 Hz, σε ισοτροπικό φάσμα επιπέδου. Εάν υποθέσουμε ότι το σκάφος βρίσκεται σε μια ήρεμη θάλασσα και δεν υπάρχει θόρυβος από έτερες πηγές, ο αυτοθόρυβος οφείλεται αποκλειστικά στον συνδυασμό της πλατφόρμας του sonar και το ίδιο το sonar. (Waite, 2002)

2.4.1 Ηλεκτρικός θόρυβος (Electrical Noise)

Ο σχεδιασμός του sonar εξασφαλίζει ότι ο ηλεκτρικός θόρυβος που εισέρχεται από τον δέκτη του είναι αμελητέος. Αλλαγές στη συστοιχία και στη ζώνη συχνοτήτων του sonar μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στον χειριστή, ειδικά εάν η ευαισθησία της κεραίας είναι χαμηλότερη και ο συντελεστής θορύβου του δέκτη πρέπει να ελεγχθεί και να βελτιωθεί εφόσον κριθεί απαραίτητο. Οι ηλεκτρικές παρεμβολές στα καλώδια μεταξύ συστοιχίας και του δέκτη είναι συχνά το πρόβλημα. Η αποτελεσματική ηλεκτρομαγνητική γείωση των καλωδίων σε χαμηλές συχνότητες είναι πολύ δύσκολη. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να

εξαλειφθεί ή να μετριαστεί από σύγχρονες τεχνικές στις οποίες οι αναλογικές τάσεις από τα υδρόφωνα μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή κοντά στην κεραία. (Waite, 2002)

2.4.2 Θόρυβος Μηχανημάτων (Machinery Noise)

Τα μηχανήματα που βρίσκονται πλησιέστερα στην κεραία δημιουργούν το μεγαλύτερο πρόβλημα και είναι κυρίως μηχανήματα πρόωσης ή βοηθητικά μηχανήματα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να μειωθεί η συμβολή τους στον αυτοθόρυβο:

- Σχεδιασμός των μηχανημάτων με κύρια παράμετρο το χαμηλότερο επίπεδο θορύβου.
- Απομόνωση της κεραίας από τον θώλο και τον σκελετό του πλοίου χρησιμοποιώντας αντικραδασμικές βάσεις.
- Απομόνωση των μηχανημάτων, του άξονα καθώς και των σωληνωμάτων χρησιμοποιώντας αντικραδασμικές βάσεις.
- Διαχωρισμός συστοιχιών και μηχανημάτων. Τοποθέτηση των κεραιών πολύ μπροστά από τα κύρια μηχανήματα πρόωσης και αποφυγή τοποθέτησης βοηθητικών μηχανημάτων κοντά σε συστοιχίες.

2.4.3 Θόρυβος Ροής (Flow Noise)

Ο Waite (2002) υποστηρίζει ότι η κύρια αιτία του θορύβου ροής, είναι η ροή λόγω της κίνησης του πλοίου, πάνω από τον θόλο του sonar καθώς και πάνω από το κύτος κοντά στον θώλο. Εδώ υπάρχουν τέσσερις (4) τρόποι για να τον μειώσουμε:

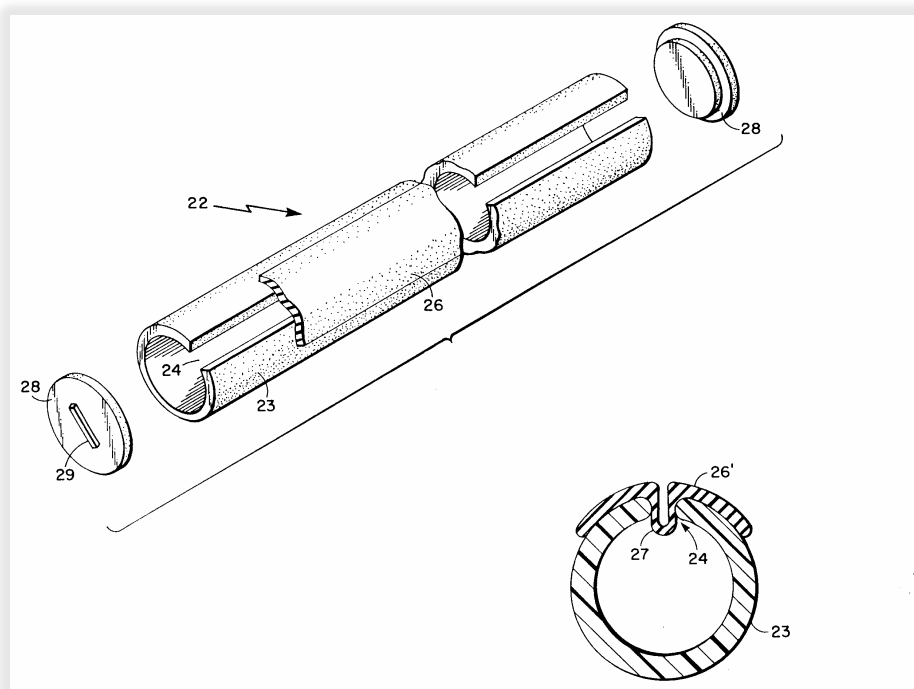
- καλός υδροδυναμικός σχεδιασμός του θόλου
- Ομαλές διεπαφές μεταξύ θόλου και κύτους
- Μειωμένη τραχύτητα επιφάνειας του θόλου και του παρακείμενου κύτους
- Επικάλυψη του θόλου και του κύτους: η επίστρωση του κύτους πρέπει να συνεχιστεί και πέρα από τον θώλο.

2.4.4 Θόρυβος Προπέλας (Propeller Noise)

Ο θόρυβος της προπέλας απορρέει από ένα φαινόμενο γνωστό ως σπηλαίωση, το οποίο παρουσιάζεται κατά την λειτουργία της προπέλας. Σπηλαίωση ονομάζεται η δημιουργία φυσαλίδων στο νερό κατά την περιστροφή της προπέλας. Καθώς η προπέλα περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα, η πίεση στην πλάτη των πτερυγίων είναι μικρότερη από την πίεση εξάτμισης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ατμού. Καθώς το πλήθος και το μέγεθος των φυσαλίδων αυξάνονται, η τιμή της διαφορά πίεσης μεταξύ της πρόσοψης και της πλάτης των πτερυγίων μειώνεται. Αυτό οδηγεί στην μείωση της πρόωσης που παράγεται από την προπέλα. Η κατάσταση αυτή είναι γνωστή ως ‘thrust breakdown’. Όταν οι φυσαλίδες αυτές μεταφερθούν με την κίνηση του ρευστού σε περιοχές υψηλής πίεσης καταρρέουν, εκλύοντας ενέργεια και προκαλώντας δονήσεις θόρυβο και επιφανειακές φθορές στη προπέλα. (Black, 2007)

Ο Ross (1976) αναφέρει ότι ο θόρυβος της προπέλας παράγεται από έναν καθαρά υδροδυναμικό μηχανισμό όπως η σπηλαίωση στις άκρες των πτερυγίων ή σπηλαίωση στα ίδια τα πτερύγια ή από μηχανική δόνηση των πτερυγίων. Εδώ υπάρχουν δύο τρόποι για να μειωθεί η συμβολή του στο αυτοθόρυβο και τον εκπεμπόμενο θόρυβο:

- Agouti: μια συσκευή που εκπέμπει φυσαλίδες αέρα κοντά στα πτερύγια για αντικατάσταση των φυσαλίδων που δημιουργούνται από τη σπηλαίωση. Βελτίωση της τάξης των 10 dB είναι εφικτή σε υψηλές ταχύτητες πλοίου (πάνω από 20 κόμβους).
- Διαφράγματα απομόνωσης θορύβου (Baffles, βλέπε εικόνα 27): τοποθετούνται μέσα στον θόλο για να προστατεύσουν τη συστοιχία των υδροφώνων από τον θόρυβο που προκαλεί η προπέλα λόγω του φαινομένου της σπηλαίωσης, με ταυτόχρονη όμως μείωση της απόδοσης του sonar.



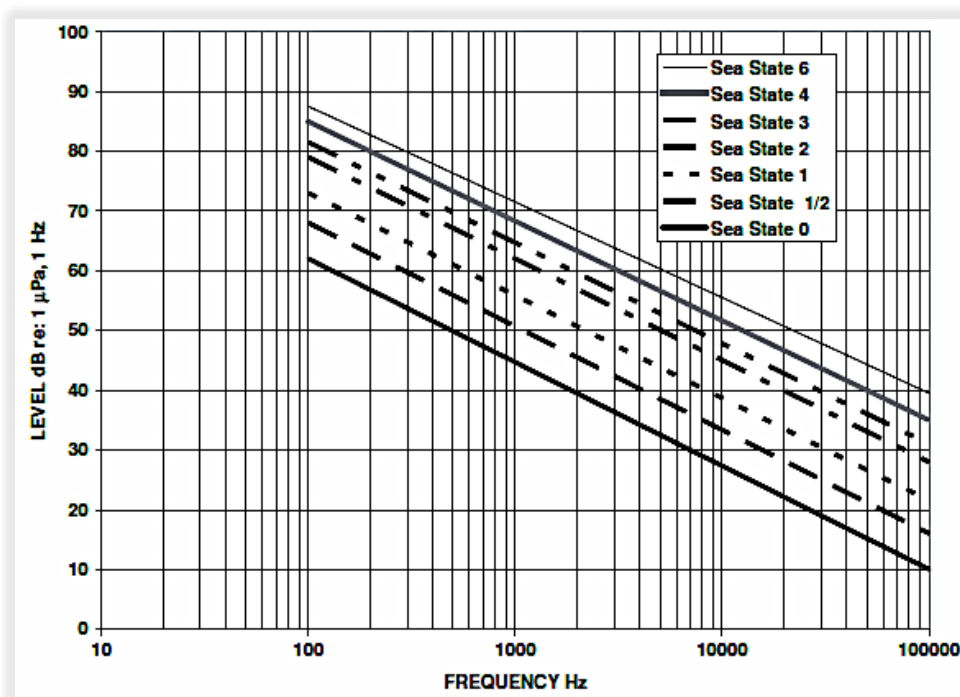
Εικόνα 27 Ένα κύλινδρος (22) για την απορρόφηση ή/και την κατάπνιξη σημάτων θορύβου που παράγονται εντός υποβρυχίου ή πλοίου επιφανείας. Περιλαμβάνει σωλήνα γεμάτο αέρα (23) με διαμήκη κενό (24) που εκτείνεται σε όλο το μήκος του σωλήνα (23). Μία λαστιχένια κάλυψη (26) περικλείει το κενό (24) και τα τελικά καλύμματα (28) σφραγίζουν τον σωλήνα (22). Μία διάταξη από Baffle αποτελείται από τέτοιους σωλήνες (22) που ευθυγραμμίζονται για να σχηματίσουν ένα πάνελ. Τέτοια πάνελ μπορούν στη συνέχεια να τοποθετούνται για αυξημένη απόσβεση των ακουστικών σημάτων.

2.5 Συνολικό επίπεδο θορύβου

Πριν από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, ουσιαστικά δεν υπήρχαν μετρήσεις για το θόρυβο του περιβάλλοντος. Αυτό συνέβη κυρίως για δύο λόγους: (1) έλλειψη βαθμονομημένων υδροφώνων και (2) το ενδιαφέρον για το ενεργητικό sonar. Για τα ενεργητικά sonar, ο αυτοθόρυβος στα αντιτορπιλικά του Β' Παγκοσμίου Πολέμου ήταν συνήθως πολύ πάνω από τα επίπεδα θορύβου περιβάλλοντος· όταν ο αυτοθόρυβος δεν ήταν πάνω από τα επίπεδα περιβάλλοντος, υπήρχαν πολλές αντηχήσεις. Αρχικά, η έλευση των ακουστικών ναρκών και του παθητικού sonar ήταν η κινητήρια δύναμη για την πραγματοποίηση μετρήσεων θορύβου περιβάλλοντος. Στον τομέα της υποβρυχίας ακουστικής υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία σχετικά με το θόρυβο του περιβάλλοντος και την επεξεργασία του. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου και συνετέλεσαν στην ανάπτυξη καμπυλών ως γνωστού συνόλου

θορύβου περιβάλλοντος έναντι της κατάστασης της θάλασσας Sea State (θαλάσσιος κυματισμός) και της συχνότητας, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 28. Οι μετρήσεις του Knudsen⁵, οι οποίες έγιναν κυρίως σε παράκτια ύδατα με έμφαση στις συχνότητες άνω του 1 kHz, παρουσιάζουν ιστορικό ενδιαφέρον. Πρόσφατες μετρήσεις στον Βορειοανατολικό Ειρηνικό έδειξαν σημαντική αύξηση του θορύβου περιβάλλοντος για συχνότητες κάτω των 300 Hz σε σύγκριση με τα δεδομένα που καταγράφονται στην ίδια θέση 40 χρόνια νωρίτερα. Οι πρόσφατες μετρήσεις θορύβου περιβάλλοντος είναι 10-12 dB υψηλότερες στην περιοχή μεταξύ των 30-50 Hz, με τη διαφορά να μειώνεται σταδιακά στο μηδέν καθώς πλησιάζουν τα 300 Hz. Μια λογική εξήγηση για αυτό το γεγονός είναι η αύξηση τόσο του αριθμού όσο και του μεγέθους της εμπορικής ναυτιλίας στη θάλασσα κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου. (Hodges, 2010)

⁵ Ο Vern Oliver Knudsen (27.12.1893-13.05.1974) έλαβε το πτυχίο του φυσικού από το Πανεπιστήμιο Brigham Young University (BYU) το 1915. Έλαβε το διδακτορικό του στη φυσική από το Πανεπιστήμιο του Σικάγο το 1922. Οι εκδόσεις του Vern Knudsen περιλαμβάνουν δύο εμβληματικά βιβλία, την "Αρχιτεκτονική Ακουστική" και το "Ακουστικός Σχεδιασμός στην Αρχιτεκτονική" με τον Cyril M. Harris το 1950. Ίδρυσε από κοινού την Ακουστική Εταιρεία της Αμερικής (ASA) και διετέλεσε πρόεδρος της το 1933-35, ενώ η ASA του απένειμε το Μετάλλιο Wallace Clement Sabine το 1958 και το Χρυσό Μετάλλιο το 1967. Ήταν ο αποδέκτης του Μεταλλίου John H. Potts (Χρυσό) από την Εταιρεία Ακουστικής Μηχανικής (AES) το 1964. Το 1934 Vern Knudsen έγινε Κοσμήτορας του Τμήματος Αποφοίτων του Νότιου Τμήματος του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια, μια θέση που κατείχε για 24 χρόνια και κατά τη διάρκεια της οποίας το Τμήμα Αποφοίτων του UCLA αυξήθηκε από 287 σε 5160. Υπηρέτησε ως Πρύτανης του UCLA από το 1959-1960, όπου υπάρχει ένα κτίριο που ονομάζεται προς τιμήν του. Ο Knudsen ήταν διευθυντής του Τμήματος Πολεμικής Έρευνας του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και βοήθησε στη βελτίωση του sonar. (Ανακτήθηκε την 6/6/2021 από: <https://en.wikipedia.org/wiki/VernOliverKnudsen>)



Εικόνα 28 Καμπύλες θορύβου “Knudsen” από τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο (Hodges, 2010, σ. 138).

2.6 Τεχνικές μείωσης / καταπίεσης θορύβου

Οι τεχνικές μείωσης / καταπίεσης του θορύβου, είναι απαραίτητες τόσο για την καλύτερη απόδοση των ενεργητικών και παθητικών συστημάτων των sonar (βελτίωση του FOM (Figure of Merit) όσο και για την μείωση της πιθανότητας εντοπισμού και του κινδύνου προσβολής από ακουστικές торπίλες και νάρκες (σε υψηλές και χαμηλές συχνότητες αντίστοιχα). Επίσης όσο δυσκολότερος είναι ο εντοπισμός ενός σκάφους, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η αβεβαιότητα του αντιπάλου.

Για παράδειγμα για τα υποβρύχια, το μέσο επίπεδο του εκπεμπόμενου θορύβου έχει παρατηρηθεί ότι μειώνεται με ρυθμό περί το 1 dB ετήσιως (συνολική μείωση -35 dB από το 1960, δηλαδή πάνω από 3000 φορές). Αυτό έχει επιτευχθεί κυρίως λόγω της ανάπτυξης των τεχνολογικών εξελίξεων της μηχανολογίας (mechanical engineering) οι οποίες εφαρμόζονται ευρέως στις νέες κατασκευές. Αποτέλεσμα είναι, ο παθητικός ανθυποβρυχιακός πόλεμος να έχει φτάσει πλέον σε ένα οριακό σημείο μειούμενων προσόδων (diminishing returns), έτσι ώστε να απαιτείται η εφαρμογή ισχυρότερων αλγορίθμων επεξεργασίας σημάτων, πολύ υψηλότερων υπολογιστικών απαιτήσεων συγκριτικά με το επιτυγχανόμενο όφελος σε

αξιοποιήσιμες αποστάσεις εντοπισμού. Σήμερα υπάρχει μια τεράστια ποικιλία τεχνικών / μέτρων μείωση του θορύβου, οι κυριότερες από τις οποίες είναι οι ακόλουθες:

- **PRAIRIE / MASKER**

Τα συστήματα PRAIRIE/MASKER υπάρχουν από την δεκαετία του 1950, ως μία προσπάθεια για τη μείωση του εκπεμπόμενου θορύβου των πολεμικών πλοίων επιφάνειας. Το σύστημα PRAIRIE αποτελεί σύστημα εκδίωξης αέρα υπό πίεση, από σειρές οπών που βρίσκονται στις άκρες των πτερυγίων των προπελών. Οι δημιουργούμενες φουσαλίδες εκδιωκόμενου αέρα καταλαμβάνουν τις περιοχές υποπίεσης, στις οποίες τείνει να εμφανιστεί το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Το σύστημα MASKER αποτελεί σύστημα εκδίωξης αέρα από κάποιες πλευρικές ζώνες γάστρας (masker belts), κάτω από την ίσαλο. Με τον τρόπο αυτό, παράγεται στρώμα / φράγμα φουσαλίδων αέρα γύρω από το σκάφος, το οποίο ενεργεί ως φράγμα που εμποδίζει την διάδοση των θορύβων που εκπέμπονται από την γάστρα του πλοίου σε μεγάλες αποστάσεις.

- Πλευση με ταχύτητες πλοίου μικρότερες της ταχύτητας εμφάνισης σπηλαίωσης. Αποτελεί ένα από τα απλούστερα, αλλά και τα βασικότερα μέτρα που λαμβάνονται για τον αθόρυβο πλου. Η σπηλαίωση προκαλείται επίσης από την απότομη αύξηση της ταχύτητας, αλλά και από τις απότομες αλλαγές πορείας του πλοίου (μεγάλες γωνίες πηδαλίου).
- Χρήση ειδικά σχεδιασμένων «ήσυχων» προπελών, χαμηλών στροφών λειτουργίας. Συγκεκριμένα οι αθόρυβες προπέλες κατασκευάζονται από μέταλλο υψηλής τεχνολογίας και μεγαλύτερης σκληρότητας. Για την ελάττωση του φαινομένου της σπηλαίωσης και την μετατόπιση του σε υψηλότερες ταχύτητες, οι προπέλες έχουν μεγάλη διάμετρο με πολλά πτερύγια μικρότερης επιφάνειας.
- Τακτικός εξωτερικός καθαρισμός των θόλων των συσκευών sonar, από τις διάφορες επικαθίσεις μικροοργανισμών (θαλάσσια ρύπανση). (Σάγος, 2019)

3. Αντηχήσεις (Reverberation ή Back Scattering)

3.1 Γενικά

Η αντήχηση όπως και ο θόρυβος αποτελεί μια διαφθείρουσα επιρροή που μπορεί να καλύψει την επιστροφή του sonar. Σημειώνουμε επίσης ότι, σε αντίθεση με το θόρυβο, η αντήχηση προκαλείται από τη λειτουργία του sonar, όντας ως αποτέλεσμα της αντανάκλασης των μεταδιδόμενων σημάτων προς τον δέκτη από παρακείμενους διασκορπιστές ή επιφάνειες. Ενώ η αυξανόμενη ισχύς των σημάτων βοηθά στη βελτίωση της ανίχνευσης ενάντια στον θόρυβο, αυτό δεν συμβαίνει με την αντήχηση. Στην περίπτωση αυτή, η αύξηση της μεταδιδόμενης στάθμης ισχύος θα αυξήσει το λαμβανόμενο επίπεδο αντήχησης ανάλογα. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η αιτία της αντήχησης αποτελεί η επιστροφή των μεταδιδόμενων σημάτων από παρακείμενες ανακλαστικές επιφάνειες, επισημαίνουμε δύο κύριες αιτίες αυτού του φαινομένου: την αντήχηση της επιφάνειας, όπου ο ήχος ανακλάται ή διασκορπίζεται πίσω στον μορφοτροπέα λήψης από την επιφάνεια της θάλασσας ή από τον πυθμένα της θάλασσας και την αντήχηση όγκου, η οποία προκαλείται από την αντανάκλαση από σωματίδια, θαλάσσιους οργανισμούς, φυσαλίδες κ.ο.κ., σε εναιώρημα σε την πορεία της μεταδιδόμενης δέσμης. Υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης της κυριαρχίας της μίας ή της άλλης κατάστασης στην πλειονότητα των επιχειρησιακών καταστάσεων, ενώ το επίπεδο αντήχησης RL (Reverberation Level) αποτελεί λειτουργία του επιπέδου πηγής, του μήκους παλμού καθώς και της απόστασης από τη θέση διασποράς. (Coates, 1990)

3.2 Τύποι αντηχήσεων

Όταν ο ήχος μεταδίδεται υποβρυχίως διασκορπίζεται από τη θαλάσσια ζώή, διανέμεται στη θάλασσα και την ανομοιογενή δομή της ίδιας της θάλασσας, μέσω αντανάκλασεων από την επιφάνεια και τον πυθμένα της. Το στοιχείο με το οποίο η εκπομπόμενη ηχητική ενέργεια ανακλάται πίσω στην πηγή είναι γνωστή ως backscattering. Η ενέργεια του backscattering αποτελεί αντήχηση, η οποία περιλαμβάνει τον ίδιο τον στόχο, καθώς και όλες τις αντηχήσεις γύρω από αυτόν.

Συνολικά ο θόρυβος, η αντήχηση, καθώς και η οπισθοσκέδαση της συνολικής αντανάκλασης, σχηματίζει το υπόβαθρο για την ανίχνευση στόχων από ένα ενεργητικό sonar. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα, η αντήχηση μπορεί να είναι το κυρίαρχο συστατικό αυτού

του στοιχείου. Είναι επομένως πολύ σημαντικό για το σχεδιασμό των ενεργητικών sonar να έχει γίνει ο υπολογισμός αυτού του μεγέθους, καθώς και του τρόπου με τον οποίο αυτό ποικίλλει με την τραχύτητα και την τριβή. Οι αντηχήσεις σύμφωνα με τον Coates (1990) μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την πηγή τους:

- Αντήχηση όγκου είναι η αντήχηση η οποία προέρχεται από διασκορπιστές εντός του όγκου της θάλασσας.
- Αντήχηση η οποία προέρχεται από την επιφάνεια της θάλασσας.
- Αντήχηση του βυθού η οποία προέρχεται από διασκορπιστές που βρίσκονται στον πυθμένα της θάλασσας.

Η κύρια πηγή αντήχησης στη θάλασσα οφείλεται σε βιολογικά στοιχεία. Διαφορετικοί θαλάσσιοι οργανισμοί επηρεάζουν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων του ενεργητικού sonar. Σε συχνότητες άνω των 30 kHz, οι διασκορπιστές είναι ζωοπλαγκτόν. Σε συχνότητες μεταξύ 2 kHz και 10 kHz, οι κυρίαρχοι διασκορπιστές είναι οι διάφοροι τύποι ψαριών που διαθέτουν ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από ένα σάκο γεμάτο αέρα που βοηθά τα ψάρια να διατηρήσουν και να προσαρμόσουν την πλευστότητά τους (νηκτική κύστη). Ακουστικά το σύστημα αυτό αφορά μια εσωτερική φυσαλίδα αέρα που γίνεται ηχηρή σε συχνότητα ανάλογα με το μέγεθος και το βάθος των ψαριών. (Etter, 2013)

3.3 Υπολογισμός αντηχήσεων

Το μέγεθος των αντηχήσεων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (παραμέτρους), οι κυριότεροι από τους οποίους είναι οι ακόλουθοι:

- Η κατευθυντικότητα (DI) του προβολέα της συσκευής, η οποία έχει άμεση σχέση με την απόκριση σε σήματα που λαμβάνονται από γωνίες πέραν του κυρίου ακουστικού άξονα MRA (Maximum Response Axis). Το στενότερο γωνιακό εύρος απόκρισης του κυρίου λοβού και οι χαμηλότερης στάθμης πλευρικοί λόφοι μειώνουν τις λαμβανόμενες αντηχήσεις .
- Η απόσταση από την πηγή. Σε μικρότερες αποστάσεις, οι αντηχήσεις υπερисχύουν του επιπέδου θορύβου. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις, η κατάσταση λειτουργίας μεταπίπτει από “reverberation limited “ σε “noise limited”.

- Η εκπεμπόμενη ακουστική ισχύς της συσκευής. Επειδή τα φασματικά χαρακτηριστικά των αντηχήσεων μοιάζουν με αυτά του εκπεμπόμενου σήματος, αύξηση της έντασης του εκπεμπόμενου σήματος αυξάνει απευθείας ανάλογα και την ένταση των αντήχησης. Επομένως, μειώνοντας την εκπεμπόμενη ισχύ (SL) μειώνονται και οι αντηχήσεις.
- Η μέθοδος εκπομπής (transmission mode), πχ OMNI (360^0), RDT (Rotational Directional Transmit), TRDT (Tribeam Rotationally Directed Transmission), κτλ επηρεάζει τις αντηχήσεις λόγω επίδρασης στην παραγόμενη τιμή SL (Source Level).
- Το μήκος του εκπεμπόμενου παλμού. Οι μικρότερης διάρκειας παλμοί CW μειώνουν την εκπεμπόμενη ενέργεια, ελαττώνοντας ταυτόχρονα και τις παραγόμενες αντηχήσεις (μειώνεται όμως παράλληλα και η ένταση της επιστρεφόμενης ηχούς του στόχου).
- Η διαμόρφωση του εκπεμπόμενου παλμού. Για παράδειγμα, η χρήση παλμών FM μειώνει τις παραγόμενες αντηχήσεις σε σχέση με τους παλμούς CW, διότι στην πρώτη περίπτωση η εκπεμπόμενη ενέργεια διαμοιράζεται σε πολλές συχνότητες. (Ross, 1976)

3.4 Μοντέλα υπολογισμού αντηχήσεων

Η διασπορά του ήχου από ογκομετρικές ανομοιογένειες στον ωκεανό μπορεί να περιγραφεί είτε από το νόμο Rayleigh, είτε από τη γεωμετρική ακουστική διασπορά. Ο νόμος του Rayleigh εφαρμόζεται όταν το μέγεθος (d) του σωματιδίου διασποράς είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος (λ) του ήχου. Η γεωμετρική ακουστική σκέδαση ισχύει όταν το d είναι πολύ μεγαλύτερο από το λ . Μια ενδιάμεση προϋπόθεση ισχύει όταν το d είναι περίπου ίσο με λ . Συγκεκριμένα, οι ακόλουθες σχέσεις έχουν ως εξής:

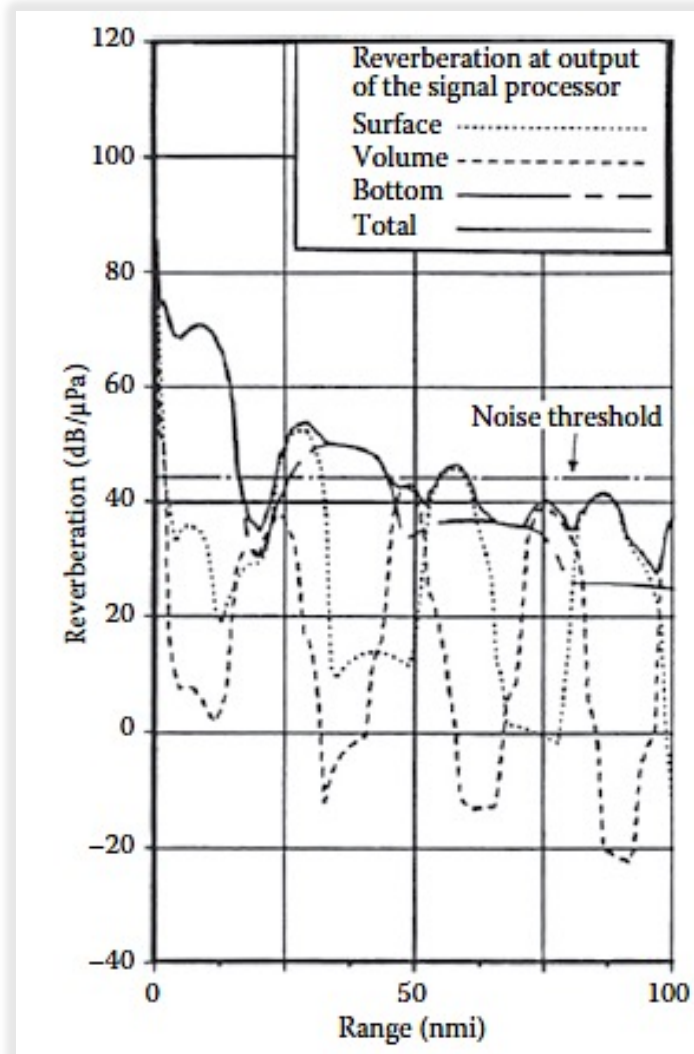
1. Εάν $d \ll \lambda$, η πίεση του διασκορπισμένου ήχου είναι ανάλογη με f^2 (όπου f είναι η ακουστική συχνότητα) και με τον όγκο του διασκορπιστή, ανεξάρτητα από το σχήμα του (νόμος Rayleigh).
2. Εάν $d \approx \lambda$, η πίεση αποτελεί μια περίπλοκη λειτουργία της συχνότητας και ποικίλλει επίσης με τις ακουστικές ιδιότητες του διασκορπιστή μαζί με τα χαρακτηριστικά του ωκεάνιου μέσου και των ορίων.

3. Εάν $d \gg \lambda$, η σκέδαση είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα και εξαρτάται μόνο από τις ακουστικές ιδιότητες του διασκορπιστή και της διατομής του (γεωμετρική ακουστική σκέδαση). Η κατάσταση αυτή εν μέρει ενθάρρυνε την ανάπτυξη δύο διαφορετικών προσεγγίσεων μοντελοποίησης της αντήχησης στον ωκεανό: μοντέλα διασποράς κυττάρων (cell scattering) και μοντέλα διασποράς σημείων (point-scattering).

Τα μοντέλα διασποράς κυττάρων υποθέτουν ότι οι διασκορπιστές κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο τον ωκεανό. Έτσι, ο ωκεανός μπορεί να χωριστεί σε κύτταρα, καθένα από τα οποία διαθέτει μεγάλο αριθμό διασκορπιστών. Η ένταση μιας διασποράς χρησιμοποιείται ανά έκταση ή όγκο ανάλογα με την περίπτωση. Αυτή η προσέγγιση είναι συνηθέστερη στη μοντελοποίηση του sonar. Τα μοντέλα σκέδασης σημείων βασίζονται σε μια στατιστική προσέγγιση στην οποία οι διασκορπιστές υποτίθεται ότι διανέμονται τυχαία σε όλο τον ωκεανό. Το επίπεδο της αντήχησης στη συνέχεια υπολογίζεται αθροίζοντας τις ηχώ από κάθε μεμονωμένο διασκορπιστή. Αυτό η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για παράδειγμα για τη μοντελοποίηση κάτω από τον πάγο. Η αντήχηση είναι πρόβλημα που εξελίσσεται ως προς το χρόνο. Τα επίπεδα αντήχησης μπορούν να περιγραφούν ως συνάρτηση της απόστασης από τον δέκτη, προσδιορίζοντας το επίπεδο αντήχησης που αντιστοιχεί στο χρόνο μετά την ενεργητική εκπομπή, ως κορυφές από τα διασκεδαζόμενα σήματα που φτάνουν στον δέκτη. Το στοιχείο απώλειας μετάδοσης πολλών μοντέλων αντήχησης βασίζεται σε θεωρητικές εκτιμήσεις. Τα μοντέλα που βασίζονται σε θεωρητικές εκτιμήσεις κυμάτων συνήθως δεν είναι κατάλληλα για υπολογισμούς σε υψηλές συχνότητες που εφαρμόζονται στον sonar λόγω του απαιτούμενου χρόνου υπολογισμού. Ωστόσο, για τις σύγχρονες εφαρμογές χαμηλής συχνότητας, οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία. Για παράδειγμα, έχουν χρησιμοποιηθεί τεχνικές κανονικής λειτουργίας για την προσομοίωση των αντηχήσεων στους ωκεάνιους κυματοθραύστες και ένα αμφίδρομο μοντέλο παραβολικής εξίσωσης (PE, Parabolic Equation) που υπολογίζει τη διασκεδαζόμενη ενέργεια που χρησιμοποιείται σε προσομοιώσεις αντήχησης. (Etter, 2013)

Τα μοντέλα αντήχησης συνδυάζονται συνήθως με το περιβάλλον, τη διάδοση, τον θόρυβο καθώς και μοντέλα επεξεργασίας σήματος για να σχηματίσουν μια νέα κατηγορία μοντέλων που αφορούν ενεργητικά sonar. Στην ανάλυση της απόδοσης του sonar, η αντήχηση και ο

θόρυβος περιβάλλοντος θεωρούνται από κοινού ως το επίπεδο συγκάλυψης κατά την οποία πρέπει να ανιχνεύεται ένα σήμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι χρήσιμο να κατανοηθεί ποιος παράγοντας συνεισφέρει περισσότερο (ο θόρυβος ή η αντήχηση), για τη δημιουργία του υποβάθρου παρεμβολής. Τέτοιες διαγνωστικές πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση νέων σχεδίων sonar ή για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των υπαρχόντων sonar. Η Εικόνα 29 απεικονίζει γραφικά το αποτέλεσμα που παράγεται από μια αντήχηση μεγάλης απόστασης, βασισμένη με προσέγγιση μοντέλου διασποράς κυττάρων.



Εικόνα 29 Επίπεδα μέσης στάθμης αντήχησης (επιφάνεια, βυθός, όγκος και σύνολο) έναντι της απόστασης όπως προβλέπεται από ένα μοντέλο αντήχησης. Το όριο θορύβου σχεδιάζεται για λόγους σύγκρισης. (Προσαρμοσμένο από Hoffman, D.W., LIRA: Ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της απόδοσης ενεργητικών συστημάτων sonar χαμηλής συχνότητας για μέσες αποστάσεις επιτήρησης. (Nav. Ocean Syst. Ctr, Tech. Doc. 259, 1979).

Το επίπεδο αντήχησης αντιστοιχεί στη στιγμή που το σήμα φτάνει στη συστοιχία μετά τη διασπορά από το στόχο σε συγκεκριμένη απόσταση. Το μέσο επίπεδο αντήχησης λαμβάνει υπόψιν το μήκος παλμού και προσαρμόστηκε για την επεξεργασία της ενίσχυσης. Αυτό αντιστοιχεί στην αντήχηση στο εύρος ζώνης λήψης κατά την έξοδο του επεξεργαστή σήματος πριν από το κατώφλι εντοπισμού της συσκευής. Κάθε ένα από τα στοιχεία όπως ο πυθμένας, η επιφάνεια και του όγκου της αντήχησης είναι το άθροισμα των αντίστοιχων εντάσεων που προκύπτουν από τις εντοπισμένες ακτίνες. Το κατώφλι θορύβου που εμφανίζεται στην αντήχηση, είναι ο συνδυασμός θορύβου περιβάλλοντος και αυτοθορύβου στο εύρος ζώνης του δέκτη κατά την έξοδο του επεξεργαστή σήματος. Σε αυτό το παράδειγμα, το κατώφλι θορύβου υπολογίζεται με τη διόρθωση του φάσματος στάθμης θορύβου για την ενίσχυση του σήματος της συστοιχίας, εύρος ζώνης και την ενίσχυση της επεξεργασίας. (Etter, 2013)

3.5 Τεχνικές καταπίεσης των αντηχήσεων

Όλες οι τεχνικές καταπίεσης των αντηχήσεων έχουν σκοπό τη μετάπτωση από ένα περιβάλλον “reverberation limited”, σε ένα περιβάλλον “noise limited”. Πολλές φορές, μία τεχνική από μόνη της μπορεί να μην είναι αρκετή κι απαιτείται η συνδυασμένη εφαρμογή περισσότερων μέτρων. Οι κυριότερες τεχνικές καταπίεσης των αντηχήσεων είναι οι ακόλουθες:

- Μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος (είτε απευθείας, είτε μέσω επιλογής κατάλληλου mode εκπομπής). Αύξηση της τιμής SL, μπορεί να προκαλεί αύξηση της ηχούς του στόχου, αλλά προκαλεί ταυτόχρονα και αύξηση των αντηχήσεων.
- Το στενότερο γωνιακό εύρος απόκρισης του κύριου λοβού και οι χαμηλότερης στάθμης πλευρικοί λοβοί μειώνουν τις λαμβανόμενες αντηχήσεις.
- Έρευνα σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την πηγή. Σε κοντινές αποστάσεις, οι αντηχήσεις υπερσχύουν του επίπεδου θορύβου. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις, η κατάσταση λειτουργίας μεταπίπτει από “reverberation limited” σε “noise limited”.
- Επιλογή εκπομπής παλμών CW μικρής διάρκειας, της τάξης των 10 ms (συνήθως ορθογώνιας περιβάλλουσας). Οι μικρής διάρκειας παλμοί έχουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων και επομένως παράγουν αντηχήσεις χαμηλής έντασης. Οι μεγαλύτερης διάρκειας παλμοί CW παράγουν αντήχησης στενότερου φάσματος, με αποτέλεσμα να έχουμε υψηλή διακύμανση (variance)

του πλάτους των επιχειρήσεων στο πεδίο του χρόνου και μεγαλύτερη (χειρότερη) τιμή DT. Μειονέκτημα της χρήσης μικρότερης διάρκειας παλμών, αποτελεί η ταυτόχρονη μείωση του επιπέδου της λαμβανόμενης ισχύος του στόχου (μείωση της τιμής TS).

- Επιλογή εκπομπής παλμών FM (συνήθως ορθογώνιας περιβάλλουσας), οι οποίοι είναι ευρέως φάσματος (wideband) και μεγάλης χρονικής διάρκειας της τάξης των μερικών εκατοντάδων msec. Με την τεχνική αυτή, οι αντηχήσεις καλύπτουν σχεδόν το ίδιο εύρος συχνοτήτων με το εύρος διέλευσης BW του δέκτη. Έτσι μειώνεται το πλάτος διακύμανσης (variance) των αντηχήσεων στο πεδίο του χρόνου (ενώ αυξάνεται η ταχύτητα διακύμανσης), διατηρώντας την ίδια περίπου τιμή DT με την περίπτωση ενός “noise limited” περιβάλλοντος.
- Επιλογή μικρότερης κεντρικής συχνότητας λειτουργίας (εκπομπής), στην οποία παρουσιάζονται χαμηλότερες αντηχήσεις από τη θαλάσσια επιφάνεια. Οι αντηχήσεις από το βυθό εξαρτώνται σημαντικά από το είδος (ποιότητα) αυτού.
- Αποφυγή χρήσης μονοστατικών συστημάτων sonar σε ρηχά ύδατα.
- Χρήση διστατικών (bi-static) ή πολυστατικών (multistatic) LFAS.

4. Δύναμη στόχου (Target Strength)

4.1 Γενικά

TS (Target strength), είναι το μέτρο της έντασης σε decibel (dB) που ο στόχος εκπέμπει, με απόσταση αναφοράς το 1m από το ονομαστικό «ακουστικό κέντρο» του στόχου. Ας υποθέσουμε για παράδειγμα, ότι χρησιμοποιείται ενεργό sonar για τη μέτρηση του target strength ενός στόχου σε μέσου βάθους θάλασσα, όπως ένα υποβρύχιο δοκιμών, που βρίσκεται κάθετα κάτω από το σκάφος εκπομπής, Εικόνα 30. Ας υποθέσουμε ότι το βάθος του υποβρυχίου είναι 120 m., το sonar έχει ηλεκτρική ισχύ προβολέα 500 W και η ένταση επιστροφής της ηχούς είναι 143dB re 1 μ .Pa. Η πηγή υπολογίζεται :

$$SL = 10\log P + 167 = 194 \text{ dB re } 1 \mu.\text{Pa}$$

Για τον υπολογισμό της απώλειας μετάδοσης, υποθέτουμε συνθήκες ελεύθερου πεδίου σε βαθιά νερά και ως εκ τούτου σφαιρική διάδοση, έτσι ώστε να:

$$TL = 20\log r = 20\log 120 = 42 \text{ dB}$$

Η ένταση που φτάνει στο υποβρύχιο είναι :

$$SL - TL = 194 - 42 = 152 \text{ dB re } 1 \mu.\text{Pa}$$

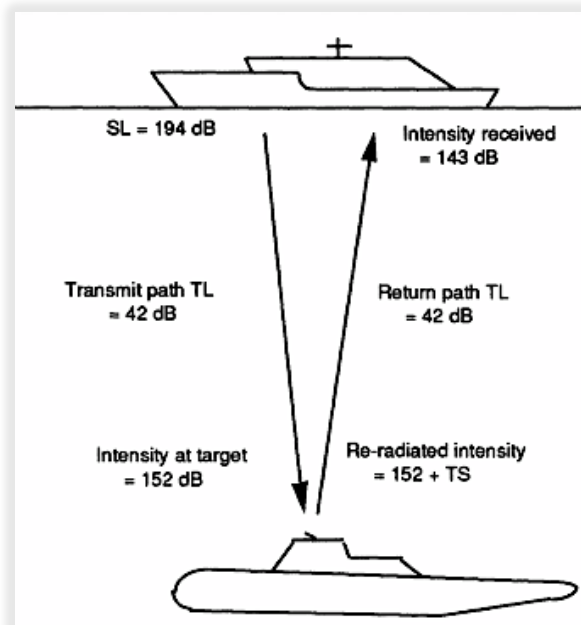
Υποθέτουμε ότι το υποβρύχιο έχει TS (Target Strength). Η ισχύς του σήματος σε ένα μέτρο είναι 152 + TS. Λαμβάνουμε υπόψιν την απώλεια επιστροφής μετάδοσης (Return transmission loss), για να βρούμε την ένταση στο σκάφος επιφανείας. Αυτό το έχουμε μετρήσει 143 dB re 1 μ .Pa. Απλοποιώντας και επιλύοντας ως προς το target strength, διαπιστώνουμε ότι : TS = 33 dB re 1 μ .Pa

Το παράδειγμα που παρατίθεται παραπάνω, μας παρέχει μία ένδειξη του τρόπου με τον οποίο μπορεί να μετρηθεί το Target Strength. Για στρατιωτικούς στόχους, όπως σε υποβρύχια, νάρκες και τορπίλες, μια τέτοια μέτρηση αποτελεί απλή διαδικασία. Οπτική αξιολόγηση ενός στόχου γίνεται μέσω της φωτογράφισης ενός μοντέλου συγκεκριμένου τύπου υποβρυχίου, βαμμένο σε μαύρο ματ. Μόνο τα ιδιαίτερα καλά αντανακλαστικά επίπεδα "ξεχώρισαν" στο ματ μαύρο φόντο όταν το μοντέλο φωτίστηκε με έντονο φως. Μια πιο σύγχρονη προσέγγιση χρησιμοποιεί φωτογραφίες του υποβρυχίου που δημιουργήθηκαν από επεξεργασία μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών, για την επίτευξη του ίδιου σκοπού. Μια θεωρητική εκτίμηση

του TS εξάγεται από μερικές απλές μορφές στερεών, μερικές από τις οποίες παρατίθενται στον πίνακα 4.

a = radius; range = r; L = length; k = wavenumber		
Solid sphere	$10 \log(a^2/4)$	$r \gg a; ka \gg 1$ (sphere "large")
Long cylinder	$10 \log(ar/2)$	e.g. oil-pipeline
Cylinder	$10 \log(aL^2/2)$	$r \gg a; ka \gg 1$ e.g. side view of torpedo

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 Target Strength) διαφορετικών σχημάτων (Coates, 1990, σ.24)



Εικόνα 30 Υπολογισμός του TS (Target Strength) μέσω των εξισώσεων του sonar (Coates, 1990, σ.23)

Τα TS των βιολογικών στόχων μπορούν επίσης να προσδιορισθούν μέσω μίας μέτρησης ή και κατά προσέγγιση. Το πρόβλημα περιπλέκεται από το γεγονός ότι πολλά θαλάσσια ζώα που παρουσιάζουν επιστημονικό ή εμπορικό ενδιαφέρον, βρίσκονται σε κοπάδια. Η κοινωνική συμπεριφορά εντός του κοπαδιού μπορεί να αποδόσει μη ισχύοντα δεδομένα και ως εκ τούτου μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω σύγχυση και σφάλματα. (Coates, 1990)

4.2 Προσδιορισμός της τιμής TS (Target Strength)

Η σκέδαση της ηχητικής ενέργειας από ένα σώμα αποτελεί πολύπλοκο φυσικό φαινόμενο. Μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας εισέρχεται στο εσωτερικό του σώματος, άλλο μέρος μετατρέπεται από κύματα πίεσης σε εγκάρσια κύματα κτλ. Για την εύρεση στην πράξη της τιμής TS κάποιου πραγματικού στόχου ουσιαστικά απαιτείται η εκτέλεση μετρήσεων στο μακρινό του πεδίο.

Γενικά, για κάθε στόχο υπάρχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικά είδη τιμών TS: η μια τιμή αφορά σε σήματα στενού φάσματος (narrowband) και η άλλη σε σήματα ευρέως φάσματος (broadband). Για τα συνήθη CW και FM σήματα των ενεργητικών συσκευών sonar, πρακτικά θεωρείται ικανοποιητικός ο υπολογισμός μίας τιμής TS πλησίον της κεντρικής συχνότητας λειτουργίας του συστήματος sonar. Στις περιπτώσεις εκείνες κατά τις οποίες έχουμε πάρα πολύ ευρεία μεταβολή συχνοτήτων (broadband sonars), τότε η τιμή TS καθορίζεται με βάση την ευρέως φάσματος ροή ενέργειας.

Μια εμπειρική σχέση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητική προσέγγιση για τον πρακτικό υπολογισμό της τιμής TS υποβρυχίων στόχων χωρίς αντι-ανακλαστικές επιστροφές, είναι η ακόλουθη L:

$$TS \approx 9 \log[\min(f, 2)] + 11 \exp\left[\frac{\theta - 90}{10}\right] - 30 \exp\left(-\frac{\theta}{10}\right) + 11 \log D - 25$$

όπου, θ η γωνία έγκλισης ($0^\circ < \theta < 90^\circ$), ο διαμήκης άξονας του στόχου αντιστοιχεί σε $\theta = 0^\circ$, f η συχνότητα του ακουστικού σήματος [kHz], D το εκτόπισμα του υποβρυχίου σε τόνους.

4.3 Ακουστική απόκρυψη

Ερευνητές έχουν αποδείξει ότι μεταϋλικά (meta materials), δηλαδή τεχνικά υλικά, τυπικά κυψελωτής κατασκευής, μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να προκύψει μια ακουστική ασπίδα (acoustic cloak), δηλαδή να παρακάμπτονται από τα ηχητικά κύματα και να καθιστούν τα αντικείμενα μη προσβάσιμα (ορατά) σε αυτά.

Ένα τέτοιο υλικό αποτελείται από ηχητικούς κρυστάλλους, συμπαγείς κυλίνδρους σε περιοδική διάταξη πολλαπλών λεπτών στρώσεων, η οποία "σκεδάζει" τα προσπίπτοντα ηχητικά κύματα με τρόπο ώστε αυτά να κάμπτονται γύρω από το αντικείμενο.

Οι εφαρμογές μπορεί να είναι από στρατιωτικές (πχ υποβρύχια σκάφη που προσπαθούν να αποφύγουν τον εντοπισμό τους από ενεργητικά sonar), μέχρι και στον πολιτικό τομέα (πχ κατεύθυνση θορύβου σε αίθουσες συναυλιών μακριά από τα σημεία ενδιαφέροντος ή αντιμετώπιση των πηγών θορύβου γενικότερα). (Σάγος, 2019)

4.4 Μοντέλα υπολογισμού αντηχήσεων

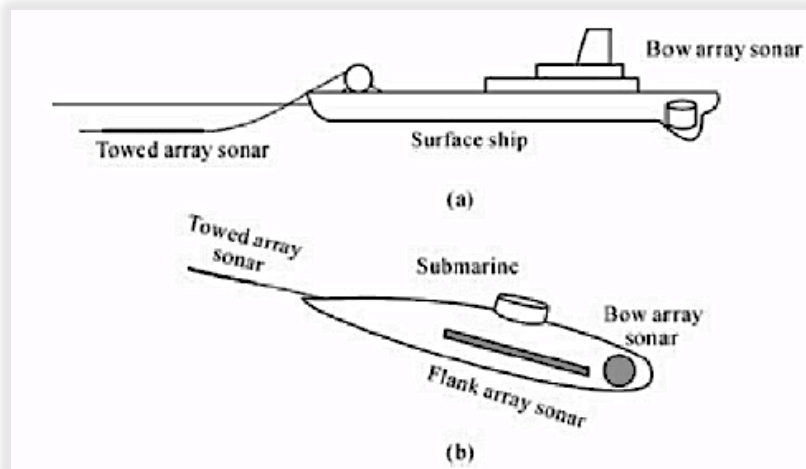
Γενικότερα τα μοντέλα υπολογισμού αντηχήσεων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Σε αυτά που υποδιαιρούν το θαλάσσιο χώρο σε ομοιόμορφα κατανεμημένες κυψέλες (cell scattering models) και προδιορίζουν το επίπεδο αντηχήσεων από την σύνθεση των συνεισφορών όλων αυτών των υποδιαιρέσεων.
- Σε αυτά που υπολογίζουν την αντήχηση ως άθροισμα επιστροφών από τυχαία κατανεμημένους σκεδαστές (point scattering models).

5. Τύποι και γενικά χαρακτηριστικά συστημάτων sonar

5.1 Γενικά

Τα ηχοεντοπιστικά συστήματα (*SOund Navigation And Ranging*) αποτελούν ηλεκτροακουστικές συσκευές που εκμεταλλεύονται την διάδοση των κυμάτων ηχητικής ενέργειας μέσα στη θαλάσσια μάζα, όπως ακριβώς τα συστήματα ραντάρ του ηλεκτρονικού πολέμου εκμεταλλεύονται την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα και γενικότερα στον ελεύθερο χώρο. Ο κύριος στόχος των συστημάτων είναι ο εντοπισμός υποβρύχιων σκαφών και άλλων αντικειμένων, η ακουστική χαρτογράφηση / τομογραφία του βυθού, καθώς επίσης και υποθαλάσσιες επικοινωνίες. Από όλες τις τεχνικές που έχουν δοκιμαστεί στην πράξη (πχ χρήση συστημάτων ραντάρ, laser, ανίχνευση διαταραχών μαγνητικού πεδίου, κτλ), η αποδοτικότερη που έχει προκύψει μέχρι σήμερα για τις υποθαλάσσιες εφαρμογές είναι η χρήση του υποβρύχιου ήχου. Η ηχητική ενέργεια μπορεί να διαδοθεί σε τεράστιες αποστάσεις μέσα στη θαλάσσια μάζα ακόμη και στα στερεά στρώματα του βυθού κάτω από τον πυθμένα, τη στιγμή κατά την οποία άλλες μορφές ενέργειας όπως ηλεκτρομαγνητική απορροφώνται ταχύτατα. Οι μέθοδοι εντοπισμού με τη χρήση υποβρύχιου ήχου διακρίνονται γενικά σε ενεργητικές (ενεργές) και σε παθητικές. Κατά την ενεργητική μέθοδο, το ηχητικό σήμα εκπέμπεται εσκεμμένα μέσα στο νερό και ακολούθως διαδίδεται στο υποθαλάσσιο περιβάλλον, αναμένοντας τον εντοπισμό του στόχου μέσω της λήψης του ανακλώμενου από αυτόν σήματος (αρχή λειτουργίας ανάλογη με του κλασσικού ραντάρ). Κατά την παθητική μέθοδο, Το ηχητικό σήμα ενδιαφέροντος παράγεται από τον ίδιο τον στόχο (αρχή λειτουργίας παρόμοια με των παθητικών ηλεκτροοπτικών συστημάτων εντοπισμού στο υπέρυθρο και ορατό φάσμα). Επομένως, ένα παθητικό σύστημα εντοπισμού δεν εκπέμπει καθόλου δική του ενέργεια μέσα στη θαλάσσια μάζα. Ορισμένα συστήματα Sonar συνδυάζουν ταυτόχρονα τις λειτουργίες του ενεργητικού και παθητικού εντοπισμού, οι οποίες δρουν μεταξύ τους συμπληρωματικά για μεγαλύτερη ακόμη αποτελεσματικότητα. (Σάγος, 2019)



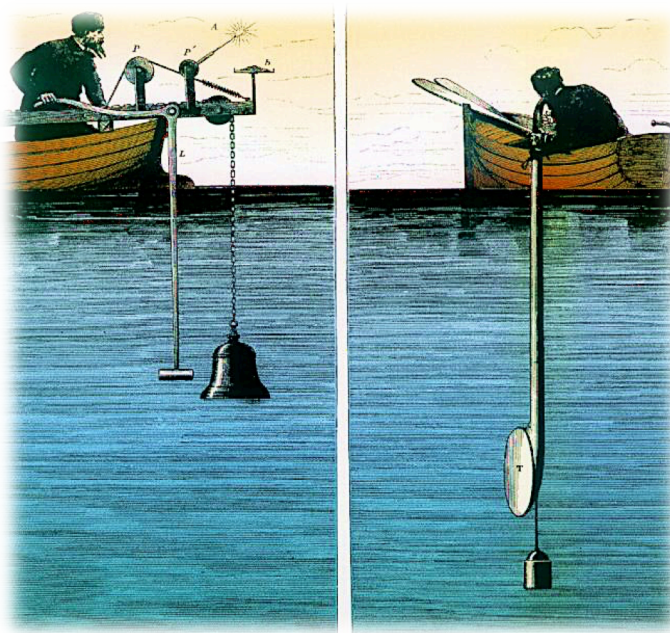
Εικόνα 31 Βασική διαμόρφωση συστήματος sonar (α) Πλοίου επιφανείας (β) Υποβρυχίου (Qihu, 2012, σ.6)

Οι συστοιχίες των sonar αποτελούνται από ομάδες υδροφώνων, οι οποίες ονομάζονται ακουστικές κεραίες. Μια ακουστική συστοιχία παρέχει μέσω του ελέγχου των ιδιοτήτων κατευθυντηκότητας, την ακουστική εκπομπή και λήψη. Όταν αναφερόμαστε για τη λήψη σήματος από συστοιχίες, τα υδρόφωνα αναφέρονται συχνά ως *στοιχεία ή δέκτες*. Η απλούστερη διαμόρφωση για μία συστοιχία, είναι εκείνη όπου τα στοιχεία ισαπέχουν μεταξύ τους σε μια γραμμή, όπου όλοι οι δέκτες είναι ίδιοι και έχουν την ίδια ιστροπική ευαισθησία. **Ιστροπική ευαισθησία** σημαίνει ότι ο δέκτης είναι εξίσου ευαίσθητος σε όλες τις χωρικές κατευθύνσεις. Επίσης, τα περισσότερα από τα ζητήματα που αφορούν τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των συστοιχιών μπορούν και αντιμετωπίζονται στο πλαίσιο των γραμμικών κεραιών. Άλλες μορφές συστοιχιών είναι επίπεδες (δισδιάστατες) και μη επίπεδες, όπως οι **hullmounted** συστοιχίες που έχουν κυλινδρικό ή σφαιρικό σχήμα. Διαφέρουν από τις γραμμικές, όχι μόνο στην απόδοση αλλά και στους τρόπους επεξεργασίας που χρησιμοποιούν για την ανάλυση των σημάτων λήψης και εκπομπής. Αυτές αναφέρονται γενικότερα ως τρισδιάστατες συστοιχίες. (Sullivan, 2015)

5.2 Ιστορική ανασκόπηση

Είναι κοινώς αποδεκτό ότι ήδη από τον 6ο αιώνα π.Χ., ο Πυθαγόρας ήταν ο πρώτος Έλληνας που μελέτησε την προέλευση των μουσικών ήχων. Έδειξε ότι οι υψηλότεροι τόνοι παράγονται από τις πιο κοντές σε μήκος χορδές, ενώ μισή χορδή σε μήκος, εκπέμπει ένα τόνο με μια οκτάβα πιο πάνω. (Anselmet & Mattei, 2016)

Ο Αριστοτέλης (384-322 π.Χ) είχε παρατηρήσει τη διάδοση του ήχου στο νερό. Στην πραγματεία του ο Galileo (1564-1642), ερευνά την επιρροή του μήκους, της τάσης και της πυκνότητας της χορδής ενώ καταγράφει επίσης ότι οι ήχοι των οποίων οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια των χαμηλότερων συχνοτήτων που συνδυάζονται ευχάριστα με το αυτί. Το 1636, ο Φραγκισκανός μοναχός Mersenne (1588-1648) πραγματοποίησε στο Παρίσι, την πρώτη σοβαρή δημοσίευση σχετικά με τη δόνηση των χορδών. Ήταν ο πρώτος που μέτρησε τη συχνότητα ενός μουσικού ήχου. Από τα τέλη του 15^{ου} αιώνα (1490 μ.Χ), ο Leonardo da Vinci φαίνεται ότι ήταν ο πρώτος που διεξήγαγε συστηματικές επιστημονικές παρατηρήσεις σχετικά με την υδροακουστική. Συγκεκριμένα, είχε διαπιστώσει ότι μέσω του διαδιδόμενου στη θάλασσα ήχου ήταν δυνατό να ακουστούν σε μεγάλες αποστάσεις τα πλοία της εποχής του, τις γαλέρες. Το 1827 έγινε πρακτικά αξιόπιστη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου στο νερό της λίμνης της Γενεύης, από τον Ελβετό φυσικό J.D. Colladon και το Γάλλο μαθηματικό C.F. Sturm. (Εικόνα 32)



Εικόνα 32 Μέτρηση της ταχύτητας του ήχου στο νερό το 1827 (Marage, 2010, σ.6)

Στο τέλος του 19^{ου} αιώνα άρχισαν οι προσπάθειες μετρήσεως της ταχύτητας διαδόσεως του ήχου εντός του ύδατος με διάφορα πειράματα αποστολής και λήψεως ηχητικών κυμάτων. Τότε άρχισε η εποχή της υποβρύχιας ακουστικής και η ανάπτυξης της γίνεται επιτακτική ανάγκη, με την απαίτηση του εντοπισμού υποβρυχίων κατά τη διάρκεια του Α^{ου} Παγκοσμίου

Πολέμου. Η δομικοί λίθοι ήταν έτοιμοι, διότι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, για την κατασκευή μορφοτροπέων, ήταν ήδη γνωστό από το 1880 από τον Pierre Curie. Το φαινόμενο Doppler – Fizeau, σχετικά με την μεταβολή της συχνότητάς του ήχου, από την σχετική κίνηση της ηχητικής πηγής ως προς το μέσον διαδόσεως, ήταν γνωστό από το 1848. Ενώ η θεωρία των σύνθετων κυμάτων είχε διατυπωθεί από τον Fourier το 1807. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών λυχνιών, το 1917 έγινε από τον Paul Langevin προσπάθεια παραγωγής ισχυρών ακουστικών κυμάτων, καθώς και ενίσχυσης των ασθενώς λαμβανόμενων ανακλάσεων με σκοπό τον εντοπισμό υποβρυχίων.

Κατά τη διάρκεια του Β^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, το Βρετανικό Ναυτικό χρησιμοποίησε συσκευή εκπομπής και λήψεως ηχητικών κυμάτων εντός της θάλασσας, για τον εντοπισμό των Γερμανικών υποβρυχίων που ονομάστηκε ASDIC. Η συσκευή αυτή τελειοποιήθηκε από το Αμερικανικό Ναυτικό και μετονομάστηκε από τότε σε sonar, από τα αρχικά των λέξεων Sound Navigation and Ranging. Προς το τέλος του πολέμου εμφανίστηκαν και τα πρώτα Doppler Sonar. Όμως οι σημαντικότερες εξελίξεις στον τομέα των συστημάτων sonar ακολούθησαν μετά από το τέλος το Β^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου.

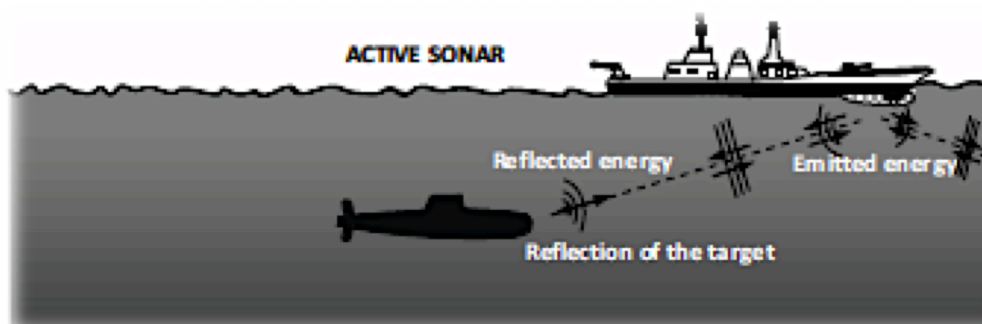
Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, ο Ψυχρός Πόλεμος συντέλεσε στην ανάπτυξη των συστημάτων sonar, έχοντας ως αποτέλεσμα την πρόοδο της θεωρητικής και πρακτικής κατανόησης της υποβρυχίας ακουστικής, με τη βοήθεια τεχνικών που βασίζονται σε υπολογιστές. Νέες τεχνικές και εξοπλισμοί εισήχθησαν στον στρατιωτικό τομέα του sonar, όπως η ρυμουλκούμενη συστοιχία, πλευρική κεραία, sonar μεταβλητού βάθους, σύμφωρο sonar και sonar απεικόνισης του βυθού. Σε πολιτικές εφαρμογές, το ενδιαφέρον επιστημόνων και μηχανικών ήταν μεγάλο, λόγω εφαρμογών όπως η υποβρύχια εξερεύνηση για φυσικό αέριο και πετρέλαιο, θαλάσσια έρευνα και διάσωση, υποβρύχια αρχαιολογία κ.λπ.

Το sonar ως σύνθετο ηλεκτρονικό σύστημα, αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας πολλές επιστήμες, όπως την ηλεκτρολογία, των μηχανική των ωκεανών, ραδιοεπικοινωνία, επιστήμες υλικών, τεχνολογία μικροεπεξεργαστών καθώς και θεωρία επεξεργασίας σήματος. Μέχρι τη δεκαετία του 1960, η τεχνική που υιοθετήθηκε στα συστήματα sonar ήταν η αναλογική επεξεργασία σήματος. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ηλεκτρονικοί καθοδικοί σωλήνες ή τρανζίστορ. Δεδομένου ότι η χρήση αναλογικής επεξεργασίας σήματος περιορίζεται από διάφορες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένου του εύρους ζώνης

συχνότητας του σήματος, τη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και τη χωρητικότητα μνήμης, η απόδοση των εν λόγω συστημάτων παρέμενε σε σχετικά χαμηλό επίπεδο. Ωστόσο, το βασικό πλαίσιο του σήματος επεξεργασίας του sonar είχε ήδη εδραιωθεί κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου και είχε αποτελέσει ανεξάρτητο πεδίο της υποβρύχιας ακουστικής. Ο ερευνητικός τομέας ο οποίος χρησιμοποιούσε τη θεωρία στατιστικού εντοπισμού στην υποβρύχια ακουστική καθώς και το βασικό μοντέλο του θορύβου του περιβάλλοντος σε μεμονωμένα και ομοιογενή μέσα μετάδοσης είχαν πλέον καθιερωθεί. (Qihu, 2012)

Η κατασκευή των sonar βελτιώθηκε δραστικά, από τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις, όπως τον εντοπισμό στόχων χαμηλού θορύβου από μεγάλες αποστάσεις, της ανάγκης αναγνώρισεως στόχων από την ακουστική χροιά, την αποφυγή παρεμβολών από άλλες πηγές θορύβου κ.α. αλλά κυρίως από την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής τεχνολογίας και πρόσφατα των ηλεκτρονικών υπολογιστών. (Σάγος, 2019)

5.3 Ενεργητικά συστήματα Sonar (Active Sonar)



Εικόνα 33 Διάταξη ενεργητικού sonar (Marage & Mori, 2010, σ.325)

5.3.1 HMS (Hull Mounted Sonar)

Περίπου το 60% των συστημάτων sonar των μοντέρνων πλοίων επιφάνειας διαθέτουν μορφοτροπέα (προβολέα) εγκατεστημένο επί της γάστρας του σκάφους (Εικόνες 34,35). Τα εν λόγω συστήματα διακρίνονται περαιτέρω σε BMS (Bow Mounted Sonar) και σε KMS (Keel Mounted Sonar). Τα BMS έχουν βολβοειδούς μορφής θόλους εγκατεστημένους στην πλώρη του σκάφους, σε αντίθεση με τα KMS τα οποία είναι εγκατεστημένα πιο πίσω επί της τρύπιδας (καρένας). Το πλεονέκτημα των BMS, είναι ότι βρίσκονται μακρύτερα από τις

κύριες πηγές αυτοθορύβου (προωστήριο σκεύος) της πλατφόρμας. Το βασικό μειονέκτημα των BMS είναι ότι εξωτερικά του θόλου σχηματίζονται ευκολότερα φυσαλίδες αέρα λόγω της υδροδυναμική ροής και των κατακόρυφων ταλαντώσεων της πλατφόρμας, οι οποίες προκαλούν απώλειες του μεταδιδόμενου ακουστικού σήματος. Γενικά, τα συστήματα HMS παρουσιάζουν ικανοποιητική απόδοση στον εντοπισμό στόχων μέσα στον επιφανειακό ηχητικό διάυλο (surface duct). Για στόχους όμως κάτω από το βάθος στρώματός, η απόδοση περιορίζεται σημαντικά κυρίως λόγω της εμφάνισης των λεγόμενων σκιερών ζωνών (shadow zones),(§1.13.1)



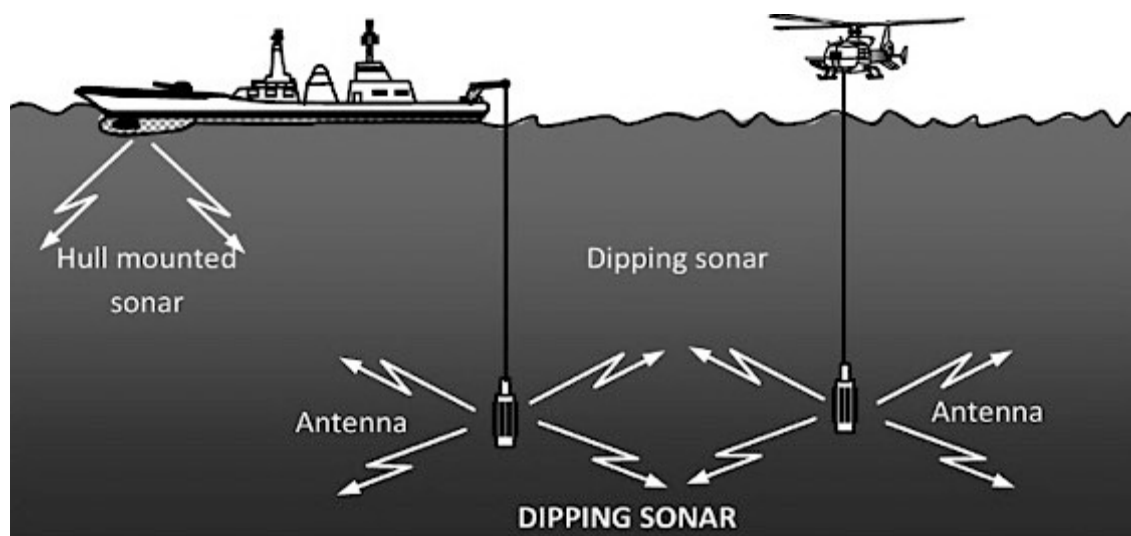
Εικόνα 34 Hull Mounted Sonar (Ανακτήθηκε την 23/5/21 από:
<https://www.thalesgroup.com/en/markets/defence-and-security/naval-forces/underwater-warfare/bluescan/hull-mounted-sonars>)



Εικόνα 35 Hull Mounted Sonar (Ανακτήθηκε την 23/5/21 από <https://www.navyrecognition.com/index.php/focus-analysis/naval-technology/5504-thales-kingklip-mk2-the-next-gen-hull-mounted-sonar-of-the-french-navy-fti-frigates.html>)

5.3.2 VDS (Variable Depth Sonar)

Ο φορέας του βυθιζόμενου sonar (Variable Depth Sonar), μετακινείται στη ζώνη προς παρακολούθηση και ποντίζει την ακουστική κεραία σχεδόν με μηδενική ταχύτητα. Στη συνέχεια πραγματοποιεί διάφορες εκπομπές και εάν δεν έχει αποκτήσει τα επιθυμητά αποτελέσματα, ανασηκώνει τον θώλο και ξεκινά νέα έρευνα σε έτερη περιοχή. Αυτός ο τύπος sonar δεν απαιτεί σημαντικά μηχανικά συστήματα. Χρησιμοποιείται συχνά από μικρά αεροπλανοφόρα, ταχύπλοα πλοία και ελικόπτερα (όπου τα μηχανικά συστήματα είναι πιο εξελιγμένα). Ένα απλό βαρούλκο μας επιτρέπει να εκτελέσουμε τη μηχανική λειτουργία, δηλαδή την πόντιση καθώς και την ανάσυρση του θώλου, βλέπε Εικόνα 36. (Marage & Mori, 2010)



Εικόνα 36 Sonar μεταβλητού βάθους από διάφορες μονάδες (Marage & Mori, 2010, σ.330)

5.3.3 Χαμηλόσυχνα ενεργητικά Sonar LFAS (Low Frequency Active Sonar)

Τα κλασικά παθητικά συστήματα συστοιχιών υδροφώνων, από μόνα τους έχουν περιορισμένες δυνατότητες ανίχνευσης μοντέρνων υποβρυχίων αθόρυβης τεχνολογίας (ιδιαίτερα σε ρηγά, παράκτια και θορυβώδη περιβάλλοντα). Επίσης, το πρόβλημα του ενεργητικού εντοπισμού στα παράκτια και ρηγά ύδατα (littoral waters), είναι πολύ πιο δύσκολο από τα βαθιά ύδατα των ωκεανών. Ορισμένοι από τους παράγοντες που δυσκολεύουν τον ενεργητικό εντοπισμό στις παράκτιες περιοχές, είναι η περισσότερη πολύπλοκη ηχητική διάδοση (ανώμαλη οριζόντια και κατακόρυφη διαβάθμιση της ταχύτητας του ήχου), οι υψηλές αντηχήσεις, αλλά και η σχετικά χαμηλή ολίσθηση Doppler των αργά κινούμενων στόχων (πχ συμβατικά υποβρύχια). Επομένως, είναι προφανής η απαίτηση εφαρμογής βελτιωμένων ισχυρών αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος πραγματικού χρόνου, καθώς επίσης και συστημάτων υψηλής υπολογιστικής ισχύος. Μια λύση στα προηγούμενα προβλήματα παρέχουν τα συστήματα LFAS, τα οποία μπορούν να δώσουν αποστάσεις εντοπισμού μεγαλύτερες του δραστικού βεληνεκού των όπλων των υποβρυχίων, ιδιαίτερα στις δύσκολες περιοχές των υψηλών αντηχήσεων.

Τα συστήματα LFAS αποτελούνται από τα εξής τρία βασικά υποσυστήματα:

- Ρυμουλκούμενος προβολέας. Αποτελείται από μικρό αριθμό στοιχείων εκπομπής ηχητικής ενέργειας, τυπικά στη ζώνη συχνοτήτων 500-1500 Hz. Τα στοιχεία αυτά, λόγω των χαμηλών συχνοτήτων λειτουργίας τους είναι μεγάλου σχετικά μεγέθους και βάρους, με αποτέλεσμα να μην είναι πρακτικά δύνατη η κατασκευή προβολέα με μεγάλο αριθμό από αυτά.

- Ρυμουλκούμενη συστοιχία υδροφώνων. Περιλαμβάνει ένα σχετικά μεγάλο αριθμό υδροφώνων προσαρμοσμένων σε ένα καλώδιο, και αποτελεί το δέκτη του συστήματος LFAS. Η διάταξη αυτή των υδροφώνων, δημιουργεί περιφερειακά κωνικούς λόγους λήψης, από τους οποίους ο καθένας αντιστοιχεί σε ένα μικρό τόξο διοπτύσεων.
- Κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Αποτελεί την καρδιά του συστήματος LFAS, η οποία μεταξύ των άλλων εκτελεί τις λειτουργίες της διαμόρφωσης των λοβών και της επεξεργασίας των σημάτων, με απώτερο σκοπό την απεικόνιση των στοιχείων των διαφόρων στόχων σε κάποιο δίκτυο διοπτύσεων – αποστάσεων.

5.3.4 Sonar ναυκοθηρίας

Η σωστή επιλογή της συχνότητας λειτουργίας οδηγεί σε μια αποτελεσματική διαδικασία. Μια τυπική συχνότητα λειτουργίας για ένα ηχοβολιστικό, για χρήση πάνω από τις περιοχές της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας σε βάθη έως 500 m, είναι 40 kHz. Στους ωκεανούς, απαιτούνται χαμηλότερες συχνότητες για την αποφυγή υπερβολικών απωλειών απορρόφησης (Absorption Losses), οι οποίες θα περιόριζαν το μέγιστο βάθος ανίχνευσης. Τα 20 kHz αποτελούν την ιδανική συχνότητα για τη χρήση αυτή. Στις λίμνες όπου οι απώλειες απορρόφησης είναι πολύ λιγότερες, για την ανίχνευση μικρών στόχων, όπως το πλαγκτόν κοντά στην επιφάνεια, χρησιμοποιούνται υψηλότερες συχνότητες, συνήθως από 100 έως 500 kHz. Γενικότερα στα μεγάλα βάθη όπως είναι οι ωκεανοί (μεγάλη απόσταση εντοπισμού) χρησιμοποιούνται ηχοβολιστικά μικρής συχνότητας, ενώ αντίθετα για μικρά βάθη όπως αυτά μιας λίμνης (μικρότερη απόσταση εντοπισμού) χρησιμοποιούνται ηχοβολιστικά υψηλής συχνότητας.

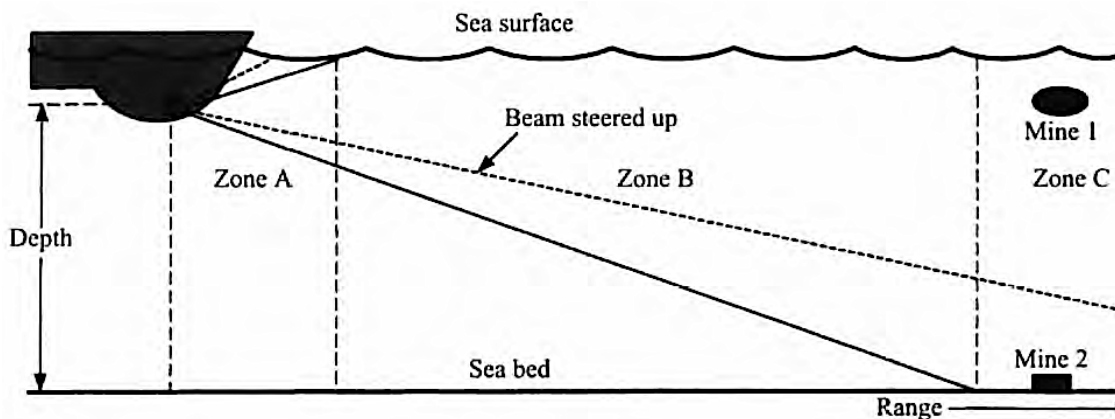
Τα sonar πλευρικής σάρωσης λειτουργούν στο φάσμα συχνοτήτων μεταξύ 20kHz έως 500kHz. και εμφανίζονται να έχουν την απαραίτητη απόδοση για να χρησιμοποιηθούν για ανεύρεση ναρκών. Τα μικρά μήκη παλμού και οι στενοί ακουστικοί λοβείς παρέχουν επαρκή διάκριση στην απόσταση και διόπτρευση για τον εντοπισμό και την ταξινόμηση των ναρκών. Επιχειρησιακά είναι σαφώς προτιμότερο να εντοπίζεται η νάρκη που βρίσκεται μπροστά από το πλοίο, σε απόσταση τέτοια κατά την οποία το πλοίο να έχει τον χρόνο να εκτελέσει κινήσεις αποφυγής της.

Το sonar έρευνας ναρκών λοιπόν είναι παρόμοιο με ένα ανθυποβρυχιακό sonar μιας για παράδειγμα πολεμικής μονάδας όπως είναι το sonar μιας φρεγάτας. Η κεραία είναι

τοποθετημένη στην καρίνα ή τον πλωριό θόλο του σκάφους, ενώ έχει ένα ευρύ τόξο κάλυψης ερεύνης με κέντρο την πλώρη. Η ταξινόμηση των επαφών που μοιάζουν με νάρκες είναι δύσκολη, ιδιαίτερα όταν βρίσκονται σε μεγάλο βάθος ή είναι προ προσδεδεμένες σ' αυτόν, όπου η ανίχνευση και η ταξινόμηση είναι συχνά δύσκολη, λόγω της αντήχησης από τον βυθό της θάλασσας. Τα target strengths των επαφών είναι χαμηλά και ως εκ τούτου για να κάνουμε εντοπισμό απέναντι στις αντιχήσεις, απαιτείται στενός λοβός και μικρά μήκη παλμού. Μπορεί να είναι είτε ένας παλμός CW (Continuous Wave) με μικρό μήκος παλμού με λιγότερο από 1 ms, είτε ένας παλμός ευρείας ζώνης FM (Frequency Modulated). Αυτό θα περιορίσει τον θόρυβο, αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση το εύρος ζώνης είναι αρκετά μεγάλο τουλάχιστον 10 kHz, ενώ δίνει έναν παλμό με μήκος παλμού 0,1ms. Οι σύγχρονες νάρκες είναι πολύ δύσκολοι ακουστικοί στόχοι. Έχουν σχήμα και επένδυση που εξασφαλίζουν πολύ χαμηλές ακουστικές υπογραφές. Σε ακραίες περιπτώσεις, η ανίχνευση και η ταξινόμηση του αντικειμένου ως νάρκη μπορεί να είναι μόνο εφικτή κάνοντας χρήση ένα όχημα ROV (Remotely Operated Vehicle), το οποίο διαθέτει κεραία sonar και μπορεί να προσεγγίσει πολύ κοντά το αντικείμενο. (Waite, 2002)

Η Εικόνα 37 δείχνει πώς η απεικόνιση της ανίχνευσης ποικίλλει ανάλογα με το βάθος και την απόσταση. Στη ζώνη A το background είναι μόνο θόρυβος. Στη ζώνη B το background είναι θόρυβος και αντηχήσεις από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι νάρκες εντοπίζονται και αναγνωρίζονται σε αυτήν τη ζώνη σχετικά εύκολα. Οι νάρκες που είναι εγκατεστημένες στο βυθό δεν εντοπίζονται εύκολα διότι το μέτωπο του ηχητικού κύματος δεν φτάνει στον πυθμένα της θάλασσας. Στη ζώνη C το background είναι θόρυβος καθώς και αντηχήσεις από την επιφάνεια της θάλασσας και τον βυθό, ενώ και οι δύο τύποι ναρκών μπορούν να ανιχνευθούν και να ταξινομηθούν σε αυτήν τη ζώνη. Σε σπάνιες περιπτώσεις όπου η αντήχηση της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από την αντήχηση από τον βυθό, η ανίχνευση και η ταξινόμηση των ναρκών μπορεί να βελτιωθεί με την κατεύθυνση της ηχητικής ακτίνας προς τα πάνω, όπως υποδεικνύεται από το περίγραμμα της διακεκομμένης δέσμης στο σχήμα ως προς την απόσταση της νάρκης 1, το ηχητικό κύμα δεν έχει φτάσει στον πυθμένα της θάλασσας και επομένως, δεν υπάρχει αντήχηση από τον βυθό (εκτός από τις πλευρικές λοβούς της δέσμης σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα). Ένα sonar ανίχνευσης ναρκών επομένως, γίνεται πιο αποτελεσματικό όταν έχει διαθέσιμους για χρήση περισσότερους ακουστικούς λοβούς. Ένας αποτελεσματικός τρόπος λειτουργίας, περιλαμβάνει αρκετούς λοβούς, όλοι ή

μερικοί από τους οποίους μπορούν να παρακολουθούνται ταυτόχρονα από τον χειριστή.
(Waite, 2002)



Εικόνα 37 Ανίχνευση ναρκών ως προς την απόσταση και το βάθος (Waite, 2002, σ.234)

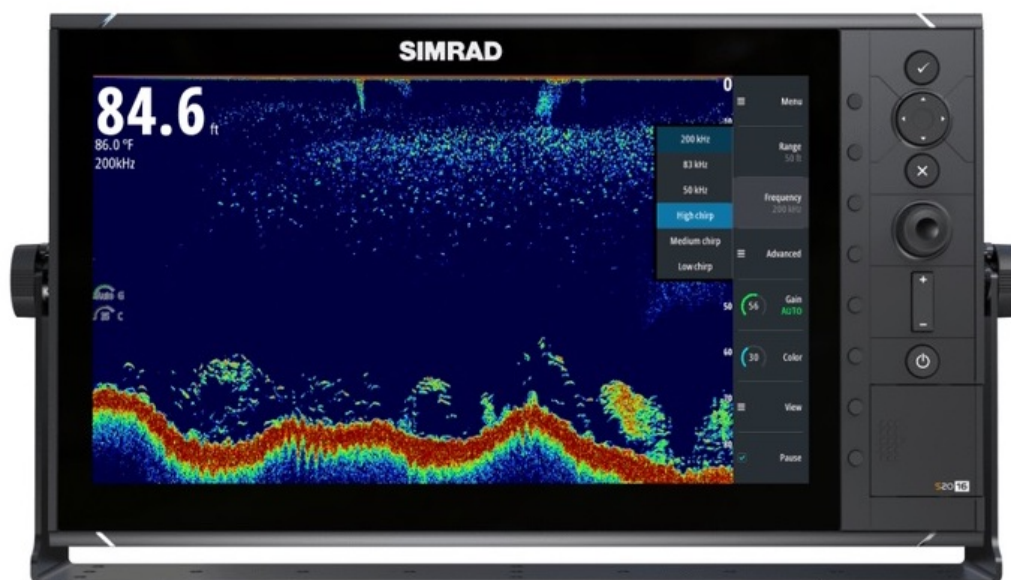
5.3.5 Ενεργητικοί ηχοσημαντήρες (Active sonobuoys)

Οι ενεργητικοί ηχοσημαντήρες εκπέμπουν ηχητικούς παλμούς και αναμένουν την λήψη της ηχούς από ανάκλαση πάνω στο στόχο. Χρησιμοποιούνται κυρίως για τον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης του υποβρυχίου, σε σχετικά μικρές αποστάσεις (έως 4kyds). Τα παλαιότερα μοντέλα ήταν τα λεγόμενα “ringers” ή “rangers” τα οποία παρείχαν μόνο την απόσταση και την ολίσθηση Doppler. Στη συνέχεια ακολούθησαν τα CASS (Command Activated Sonobuoy System) με δυνατότητα ενεργητικής εκπομπής μέσω εντολής τηλεχειρισμού, ενώ σήμερα χρησιμοποιούνται τα DICASS (Directional Command Activated Sonobuoy System) τα οποία διαθέτουν τηλεχειρισμό και παρέχουν διόπτρευση, απόσταση και ολίσθηση Doppler.

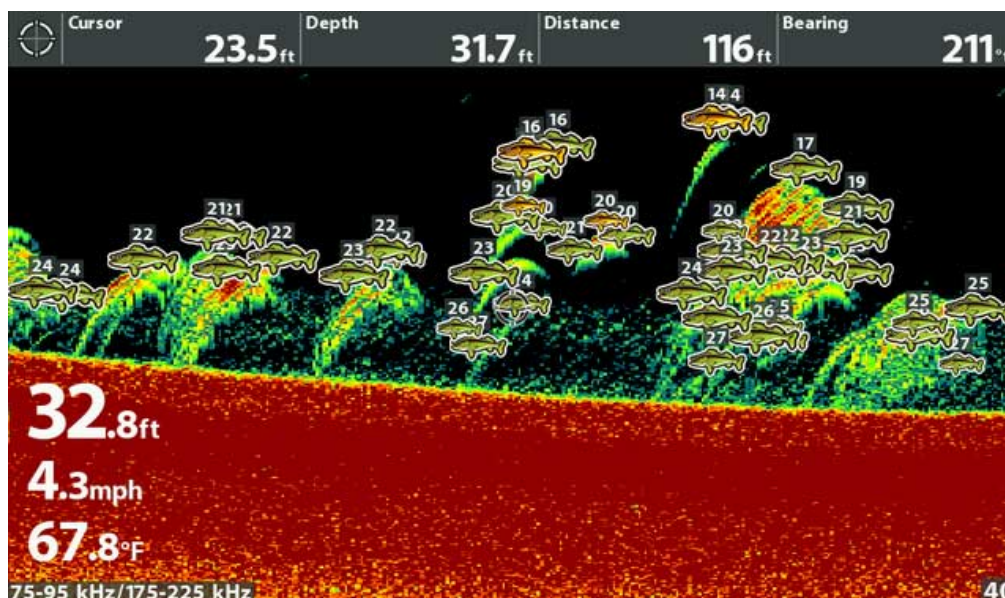
5.3.6 Ανιχνευτές ψαριών (Fish-finder Sonar)

Αποτελούν μικρούς τύπους ερασιτεχνικών ενεργητικών συστημάτων, που χρησιμοποιούνται από αλιευτικά σκάφη. Εφαρμόζουν εξειδικευμένους αλγόριθμους που εντοπίζουν / διακρίνουν τα κοπάδια ψαριών από άλλα αντικείμενα, εκτιμούν το μέγεθος και την κατανομή αυτών, ενώ τα πιο εξελιγμένα από αυτά εφαρμόζουν και τεχνικές αναγνώρισης του είδους των ψαριών. Πολλά από τα fish finders είναι κατακόρυφης σάρωσης, αλλά ορισμένα μοντέλα είναι εμπρόσθιας ή και ακόμα και πλευρικής σάρωσης. Η εκπεμπόμενη ισχύς εξόδου σπάνια ξεπερνάει το 1 kW rms και το μέγιστο βάθος κάλυψης κυμαίνεται από 200

έως 800 m. Οι συχνότητες λειτουργίας είναι επιλεγόμενες από 38 έως 200 kHz (οι
χαμηλότερες συχνότητες είναι για τα βαθύτερα νερά).



Εικόνα 38 Απεικόνιση του βυθού από συσκευή Fish Finder (Ανακτήθηκε την 13/8/21 από:
<https://skoukios-fishing.gr/shop/σκάφος/bythometro-gps/simrad-s2016-fish-finder-16/>



Εικόνα 39 Απεικόνιση του βυθού και εκτίμηση του μεγέθους των κοπαδιών ψαριών από συσκευή Fish Finder
(Ανακτήθηκε την 13/8/21 από: <https://fishfinderbrand.com/how-to-read-fish-finder-screen/>)

5.5 Παθητικά συστήματα Sonar (Passive Sonar)

5.4.1 Hull Mounted Sonar (HMS)

Σύμφωνα τον Waite (2002) τα Hull Mounted Sonar που τοποθετούνται στο κύτος χρησιμοποιούνται ευρέως σε πλοία επιφανείας και υποβρύχια. Αυτή η κατηγορία sonar έχει εξής γενικά χαρακτηριστικά:

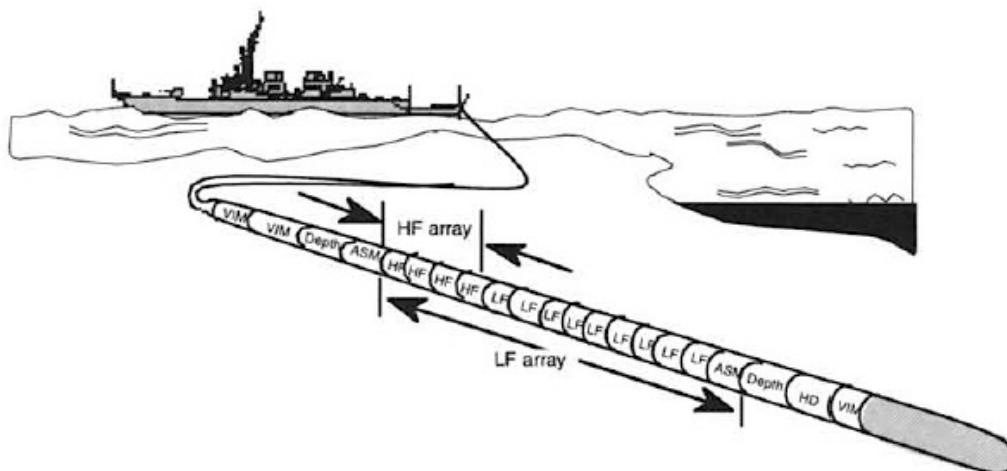
- Κυλινδρική συστοιχία με διάμετρο 1 έως 3m, 0,5 έως 2m ύψος, ενώ γενικότερα το μέγεθος προσαρμόζεται ανάλογα με την πλατφόρμα που θα τοποθετηθεί.
- Σε θόλο τρόπιδας ή πιο συχνά για τα σύγχρονα sonar σε θόλο πλώρης. Το σημείο πλώρης προσφέρει στατιστικά το χαμηλότερο αυτοθόρυβο.
- Οι συχνότητες λειτουργίας είναι μεταξύ 3 έως 15 kHz. Η επιλεχθήσα συχνότητα έχει σκοπό να επιτύχει μια αποδεκτή ισορροπία μεταξύ της απόδοσης του sonar έναντι στο θόρυβο και τις αντηχήσεις για το μέγεθος της κεραίας.
- Η ανίχνευση κυμαίνεται από 5 km (15 kHz) έως 20 km (3 kHz), αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.



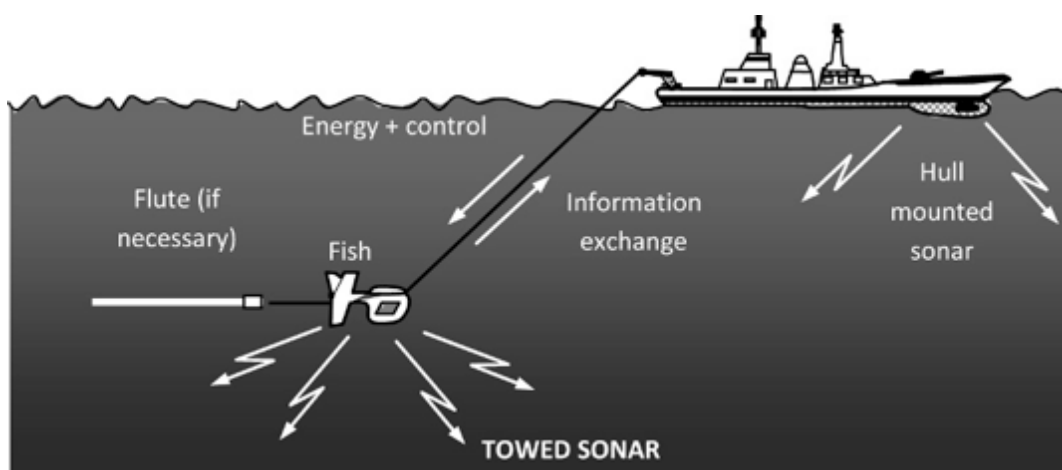
Εικόνα 42 Πλωραία κεραία sonar υποβρυχίου τύπου Seawolf SSN-21 (Ανακτήθηκε την 29/5/21 από:
<https://www.e-telescope.gr/en/science/science-misc/basic-concepts-in-submarines-evolution>)

5.4.2 Towed Array Sonar Systems (TASS)

Αποτελούν συστήματα γραμμικών συστοιχιών υδροφώνων, τα οποία ρυμουλκούνται από πλοία επιφανείας ή υποβρύχια. Τα συστήματα TASS εμφανίστηκαν για πρώτη φορά περί τις αρχές της δεκαετίας του 1970, με σκοπό την αντιμετώπιση της αυξανόμενης απειλής των Σοβιετικών υποβρυχίων της εποχής. Οι συρόμενες συστοιχίες (Towed Array) καθώς και τα καλώδια τους είναι μακρά σε μήκος, ενώ η λειτουργίας τους βασίζεται στη χρήση χαμηλών συχνοτήτων. Το μέγιστο Target Strength (TS), θεωρητικά μπορεί να φτάσει τα 10 dB, αλλά και πάλι πολύ κοντά σε απόσταση από τη διάταξη και μη λαμβάνοντας υπ' όψιν την οποιαδήποτε καμπυλότητα της κεραίας. Οι κοντές σε μήκος συστοιχίες έχουν χαμηλότερο μέγιστο TS και αυτό σε συνδυασμό με την υποβρύχια τακτική, που γενικά προσπαθεί να αποφύγει την έκθεση των υποβρυχίων στον αντίπαλο, καθώς και τις συρόμενες συστοιχίες τους, ως προς την επιφάνεια του λοβού λήψεως, καθιστά σχεδόν απίθανη τη χρήση των συρόμενων συστοιχιών για επιχειρησιακή ανίχνευση ή ταξινόμηση. (Waite, 2002)



Εικόνα 43 Σχηματική αναπαράσταση Towed Array Line από σκάφος επιφανείας
(Stergiopoulos, 2001, σ.10-13)



Εικόνα 44 Διάταξη Towed Array Sonar Systems (TASS) (Marage & Mori, 2010, σ.331)

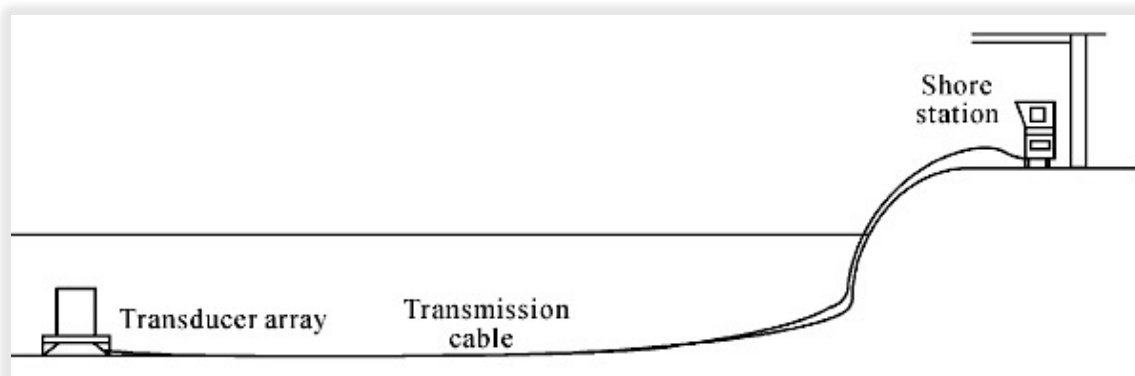
Το ακουστικό μήκος της ρυμουλκούμενης συστοιχίας μπορεί να επιλεγεί από τον χειριστή του συστήματος να είναι αρκετά μεγάλο, έτσι ώστε να καλύπτεται με καλή ακρίβεια η απαίτηση της εξαγωγής σχετικά ακριβούς διόπτρευσης των ηχητικών πηγών πολύ χαμηλών συχνοτήτων (που βρίσκονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις). Για την αποφυγή του θορύβου από την επιφάνεια της θάλασσας, η παρέαση⁶ των ρυμουλκούμενων συστοιχιών θα πρέπει να διεξάγεται στο μεγαλύτερο δυνατό βάθος, τυπικά μεγαλύτερο των 150m. Οι ρυμουλκούμενες συστοιχίες υδροφώνων διακρίνονται σε συστήματα DTAS (Depressed Towed Array Sonar) και CATAS (Critical Angle Towed Array Sonar). Στα DTAS, το βάθος

⁶ Παρέαση συστοιχίας, αποτελεί η διαδικασία άφησης μέσω ειδικού μηχανισμού, καθώς και ρυμούλκησης της συστοιχίας

παρέασης ρυθμίζεται από το βάθος στο οποίο βρίσκεται το ρυμουλκούμενο σώμα (towed body ή depressor), ενώ στα CATAS ρυθμίζεται από την ταχύτητα, το μήκος και το βάρος του καλωδίου ρυμούλκησης (η συστοιχία δεν συνδέεται σε ρυμουλκούμενο σώμα). (Σάγος, 2019)

5.5.4 Στατικά ή μόνιμα συστήματα παθητικής επιτήρησης

Στη δεκαετία του 1950, το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ άρχισε να εγκαθιστά σταθερές συστοιχίες sonar τόσο στις ανατολικές όσο και στις δυτικές ακτές. Το παλαιότερο σύστημα που αναπτύχθηκε ονομάστηκε σύστημα Caesar. Το εύρος ανίχνευσης αυτού του συστήματος ήταν περίπου 16 έως 27 ναυτικά μίλια. Συγκεκριμένα τη δεκαετία του 1960 τοποθετήθηκαν 36 σταθμοί σταθερής συστοιχίας στην ανατολική ακτή της ΕΣΣΔ και στη θάλασσα της Ιαπωνίας. Ταυτόχρονα το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ εκτός από το σύστημα Caesar ανέπτυξε και ένα νέο σύστημα σύστημα ηχητικής επιτήρησης το ονομαζόμενο SOSUS. Αυτό ήταν ένα κατανεμημένο σύστημα συστοιχιών, το οποίο μετέδιδε το σήμα του μέσω καλωδίου οπτικής ίνας. Η μέγιστη εμβέλεια ανίχνευσης ήταν περίπου 50 ναυτικά μίλια.



Εικόνα 45 Βασική διαμόρφωση παράκτιας συστοιχίας (Qihu, 2012, σ.554)

Το αρχικό έργο για την ανάπτυξη ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης για το Αμερικανικό Ναυτικό ήταν ένα ενεργητικό / παθητικό sonar σταθερής συστοιχίας. Από τη δεκαετία του 1970 πραγματοποιήθηκε ένα μεγάλος αριθμός θαλάσσιων πειραμάτων που έλαβαν χώρα στις Βερμούδες στον Ατλαντικό Ωκεανό. Το έργο ονομαζόταν Άρτεμης. Η κεραία λήψης του συστήματος Άρτεμης είχε 3.000 πόδια μήκος και η συστοιχία των πομπών

ζύγιζε εκατό τόνους. Το σχέδιο διακόπηκε όταν η δαπάνη είχε φτάσει το ποσό των 1,2 δισεκατομμυρίων δολαρίων.

Παράλληλα η Σοβιετική Ένωση ανέπτυξε παρόμοια συστήματα. Ο παλαιότερος παράκτιος σταθμός ακουστικής επιτήρησης ήταν ο σταθμός BOJIXOB, ο οποίος ονομάζονταν SOSS (Σύστημα επιτήρησης Σοβιετικού Ωκεανού), σύμφωνα με τη βιβλιογραφία δυτικών χωρών. Το 1968 αναφέρθηκε ότι ένα σοβιετικό πυρηνικό υποβρύχιο Golf Class βυθίστηκε 1200 χλμ βορειοδυτικά της Χαβάη. Το σύστημα SOSS δεν εντόπισε την καταστροφή αυτή, ενώ αντίθετα το SOSUS το εντόπισε σε βάθος 4.877m. Η μονάδα επεξεργασίας σήματος του sonar σταθερής συστοιχίας ήταν στο σταθμό της ακτής και η εξέλιξη του ήταν ραγδαία. Στις μέρες μας το σύστημα αυτό αποτελεί ένα συνδυασμό υποβρύχιας σταθερής συστοιχίας με sonobuoy, δορυφόρο και σκάφος επιτήρησης. (Qihu, 2012)

5.5.5 Παθητικοί ηχοσημαντήρες (passive sonobuoys)

Οι παθητικοί ηχοσημαντήρες αποτελούν μικρογραφίες αυτόνομων παθητικών συστημάτων sonar, οι οποίοι ρίπτονται κυρίως από αεροσκάφη ναυτικής συνεργασίας, ναυτικά ελικόπτερα ή ακόμη και από πολεμικά πλοία. Παρέχουν στοιχεία για έρευνα, εντοπισμό, αναγνώριση, παρακολούθηση και επίθεση υποβρυχίων στόχων, μέχρι κατάστασης θαλάσσης Sea State έως 5. Οι πληροφορίες που λαμβάνουν τα υδρόφωνα μεταδίδονται ασύρματα μέσω VHF / FM σημάτων, για περαιτέρω επεξεργασία και απεικόνιση από τις συσκευές του αεροσκάφους, ελικοπτέρου ή του πλοίου. Οι ηχοσημαντήρες είναι αναλώσιμες μονάδες, δηλαδή μετά το πέρας της διάρκειας τους (έως και 8 ώρες περίπου), δεν συλλέγονται αλλά βυθίζονται μόνοι τους. Για το λόγο αυτό αποτελούν το χαμηλότερο σε κόστος σύστημα για την υποθαλάσσια επιτήρηση.

Οι μοντέρνου τύπου ηχοσημαντήρες είναι εξοπλισμένοι με δέκτη GPS για την καλύτερη μετάδοση της ακριβούς θέσης τους. Κατά την έφεση τους, ενεργοποιείται ένα αλεξίπτωτο επιβράδυνσης, για την ομαλή πρόσκρουση τους στο νερό. Στη συνέχεια, μετά την είσοδό τους στο νερό ενεργοποιείται η οικολογική μπαταρία που διαθέτουν καθώς επίσης και ο μηχανισμός γέμισης του πλωτήρα με αέριο CO₂. Ο πλωτήρας αυτός συγκρατεί το ηλεκτρονικό σύστημα, με το τμήμα του πομπού RF στην επιφάνεια του νερού, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται κατακόρυφα σε βάθος τα υδρόφωνα με τα ηλεκτρονικά τους τμήματα. Το βάθος ανάπτυξης των υδροφώνων, η διάρκεια ζωής τους καθώς και το κανάλι

εκπομπής RF (1-99 channels), πρωτοποθετούνται στον ηχοσημαντήρα πριν από την άφεση του από το χειριστή.



Εικόνα 46 Λήψη επαφής υποβρυχίου από παθητικό ηχοσημαντήρα και μετάδοση στοιχείων μέσω πομπού RF σε ιπτάμενα μέσα (Ανακτήθηκε την 11/8/21 από: <https://www.navalnews.com/naval-news/2021/03/catching-ever-stealthier-submarines-french-navy-to-get-new-sonobuoy-technology/> - prettyPhoto)

6. Ηλεκτρο – ακουστικοί μορφοτροπείς (Electroacoustic Transducers)

6.1 Γενικά

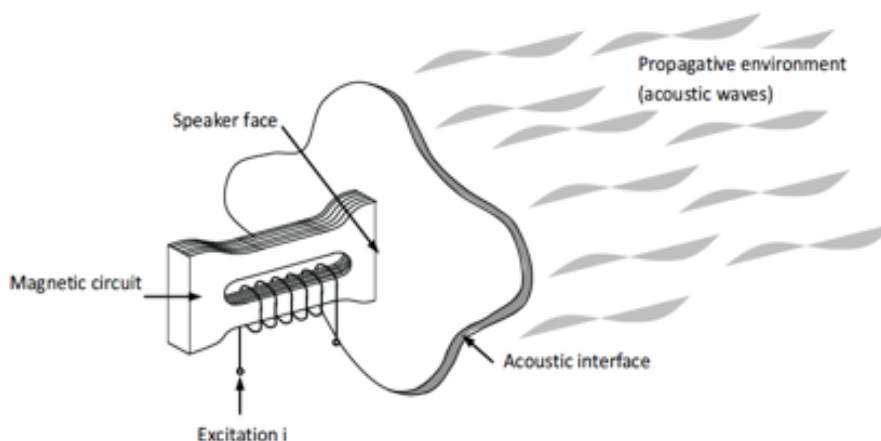
Τα υδρόφωνα ή αλλιώς μορφοτροπείς (transducer), είναι οι αισθητήρες που μετατρέπουν τα κύματα πίεσεως του ήχου εντός του ύδατος, σε ηλεκτρικά σήματα και αντίστροφα. Τα υδρόφωνα, ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους, κατατάσσονται σε **κρυσταλλικά**, **κεραμικά** και **μαγνητοσυσταλτικά**. Τα κρυσταλλικά υδρόφωνα βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, με το οποίο μηχανική καταπόνηση / παραμόρφωση στον κρύσταλλο αναπτύσσει τάση στις έδρες του. Φυσικά υλικά που παρουσιάζουν έντονο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ο χαλαζίας (SiO_2) και το άλας Seignette (Τρυγικό άλας Καλίου - Νατρίου). Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται κεραμικά υλικά, όπως το Τιτανιούχο Βάριο και το κράμα Μόλυβδου Τιτανιούχου Ζirkονίου, που παρουσιάζουν επιπλέον μεγάλη απόδοση. Το υδρόφωνο επομένως είναι κατάλληλα κατασκευασμένο, ώστε το προσπίπτον ηχητικό κύμα να παραμορφώνει τον κρύσταλλο ελαστικά και να παράγει την ανάλογη τάση. Αντίστροφα, εφαρμογή τάσης κατάλληλα στον κρύσταλλο, προκαλεί μεταβολή στις διαστάσεις του, ώστε να παράγει ηχητικό κύμα ανάλογο του πλάτους και της συχνότητας του ηλεκτρικού σήματος που του επιβάλλεται.

6.2 Τύποι μορφοτροπέων

Οι μορφοτροπείς των περισσότερων συστημάτων Sonar είναι διατάξεις αποτελούμενες από πολλά στοιχεία (transducer elements). Για παράδειγμα, σε ένα ενεργό sonar, οι διατάξεις αυτές συνήθως είναι οργανωμένες έτσι ώστε να σχηματίζουν μια κυλινδρική επιφάνεια, αποτελούμενη από κατακόρυφες στήλες στοιχείων (staves). Η αξιοπιστία της λειτουργίας των ηλεκτροακουστικών μορφοτροπέων συστημάτων Sonar έχει βελτιωθεί σημαντικά σε σχέση με το παρελθόν. Ανάλογα με τον τύπο των στοιχείων που χρησιμοποιούν και ειδικότερα ανάλογα με τις φυσικές ιδιότητες των υλικών τους και τον τρόπο κατασκευής τους, οι ακουστικοί μορφοτροπείς Sonar διακρίνονται σε διάφορους τύπους, οι οποίοι περιγράφονται στη συνέχεια.

6.2.1 Μορφοτροπίες μαγνητοσυστολής (magnetostrictive transducers)

Τα μαγνητοσυσταλτικά υδρόφωνα βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής (magnetostriction)⁷. Ως μαγνητοσυστολή καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο ορισμένα κρυσταλλικά υλικά, κάτω από την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μεταβάλλουν ελαφρά τις φυσικές τους διαστάσεις (συστέλλονται ή διαστέλλονται ελαστικά $< 2\%$), λόγω της ευθυγράμμισης των στοιχειωδών μαγνητικών περιοχών που τα αποτελούν (περιοχές Weiss). Όταν σιδηρομαγνητικό υλικό βρεθεί εντός μαγνητικού πεδίου, μειώνεται το μήκος του κατά την διεύθυνση του διανύσματος του πεδίου. Αντίστροφα, εάν σιδηρομαγνητικό υλικό εντός μαγνητικού πεδίου, παραμορφωθεί κατά τον άξονα του πεδίου, αναπτύσσει πεδίο ομόρροπο ή αντίρροπο προς το υπάρχον, ανάλογα με την κατεύθυνση της παραμορφώσεως⁸. Έτσι στα μαγνητοσυσταλτικά υδρόφωνα απαιτείται πάντα ένα μαγνητικό πεδίο, προερχόμενο συνήθως από μικρό μόνιμο μαγνήτη, που προκαλεί την λεγόμενη πόλωση των υδροφώνων. Το μαγνητικό πεδίο που προκαλεί την παραμόρφωση του σιδηρομαγνητικού υλικού, παράγεται από πηνίο περιελιγμένο στη μεγαλύτερη διάσταση του. (Σάγος, 2019)

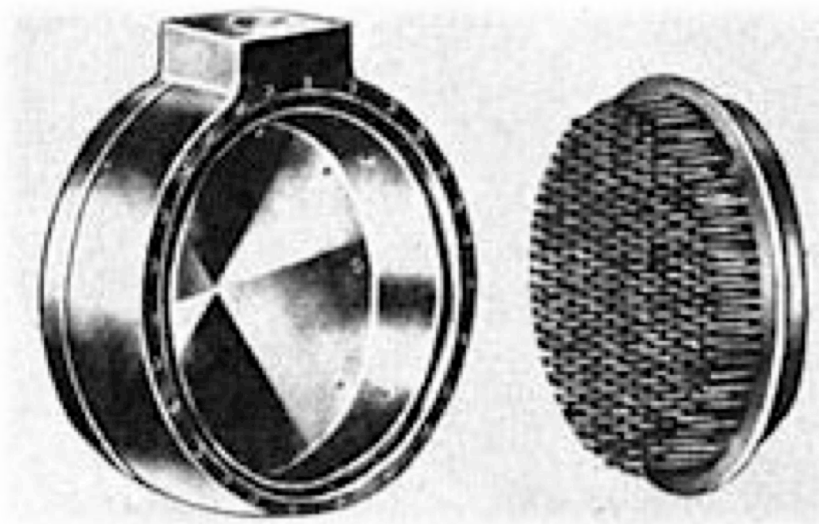


Εικόνα 47 Μορφοτροπέας μαγνητοσυστολής (Marage & Mori, 2010, σ.99)

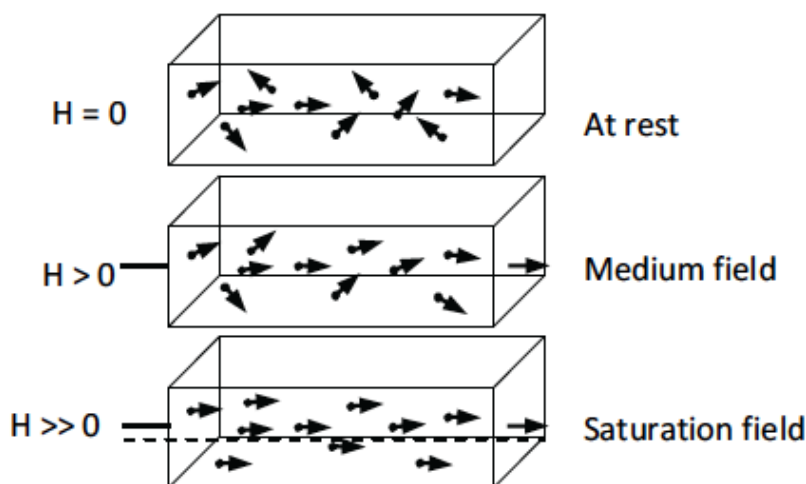
⁷ Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής ανακαλύφθηκε το 1842, από τον Άγγλο φυσικό James Prescott Joule (1818-1889).

⁸ Κατά την λεγόμενη θετική μαγνητοσυστολή, το μήκος της σιδηρομαγνητικής ράβδου μεγαλώνει με την εφαρμογή αυξανόμενου αξονικού μαγνητικού πεδίου. Για παράδειγμα, τέτοια υλικά είναι ο σίδηρος σε μικρές εντάσεις μαγνητικών πεδίων και το κράμα TERFENOL-D. Το αντίθετο ακριβώς συμβαίνει κατά την αρνητική μαγνητοσυστολή, σε υλικά όπως πχ το νικέλιο και το ανοπτημένο κοβάλτιο, όπου το μήκος της ράβδου ελαττώνεται (συστέλλεται) με την εφαρμογή αυξανόμενου μαγνητικού πεδίου. Το κοβάλτιο και το TERFENOL-D (τέρβιο-σίδηρος- δυσπρόσιο) παρουσιάζουν πολύ ισχυρή μαγνητοσυστολή.

Ο σιδηρομαγνητισμός, αποτελεί την οριακή περίπτωση παραμαγνητισμού η οποία εξηγείται επιστημονικά με την κβαντική θεωρία. Στην πράξη μέσω της κβαντικής θεωρίας, διαπιστώνουμε ότι οι περιοχές του σιδηρομαγνητικού υλικού, του οποίου το εύρος είναι στην ατομική κλίμακα, δείχνουν σημαντικές μαγνητικές ροπές που προκύπτουν από το προσθήκη των περιστροφών ηλεκτρονίων στις εξεταζόμενες περιοχές. Ελλείψει εξωτερικών πεδίων, οι μαγνητικές ροπές (και συνεπώς οι αντίστοιχες δυνάμεις αλληλεπίδρασης) κατανέμονται τυχαία. Η εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου τείνει να προσανατολίζει τις στοιχειώδης μαγνητικά περιοχές σε μία κατεύθυνση, με αποτέλεσμα την συστολή ή διαστολή του υλικού. Οι δυνάμεις δηλαδή αλληλεπίδρασης του μαγνητικού πεδίου με τα στοιχειώδη σωματίδια του μορφοτροπέα, προς μία κατεύθυνση, τροποποιούν τις διαστάσεις του υλικού. Αν μειώσουμε το εξωτερικό πεδίο, η μαγνητική ροπή μειώνεται, αλλά με κάποια καθυστέρηση λόγω της τριβής. Αυτό είναι γνωστό ως "φαινόμενο υστέρησης". (Marage & Mori, 2010)



Εικόνα 48 Αισθητήρας μαγνητοσυστολής (Bureau of Naval Personnel, 2005, σ.80)



Εικόνα 49 Μοντέλο μαγνητοσυστολής (Marage & Mori, 2010, σ.98)

6.2.2 Μορφοτροπίες ηλεκτροσυστολής (electrostrictive transducers)

Ορισμένα κρυσταλλικά υλικά, γνωστά ως φεροηλεκτρικά (ferroelectric)⁹, μεταβάλλουν έντονα τις φυσικές διαστάσεις (ελαστική παραμόρφωση), όταν εφαρμόζεται σε αυτά ηλεκτρικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό, όταν οφείλεται στα ίδια τα πολικά μόρια του υλικού, τα οποία παρουσιάζουν μόνιμη ηλεκτρική ροπή/ πολικότητα (dipole moment), ονομάζεται ηλεκτροσυστολή (electrostriction). Η ηλεκτροσυστολή είναι ανεξάρτητη της φοράς του ηλεκτρικού πεδίου, δηλαδή σε κάθε αναστροφή της πολικότητας του πεδίου, η κατεύθυνση της παραμόρφωσης παραμένει η ίδια (δεν αναστρέφεται). Το μέγεθος της παραγόμενης μηχανικής παραμόρφωσης (μετατόπισης) είναι ανάλογο της δεύτερης (ή υψηλότερης) δύναμης της έντασης του πεδίου ή του τετράγωνου της εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής τάσης. Το φαινόμενο της ηλεκτροσυστολής παρατηρείται στα διηλεκτρικά υλικά όλων των κρυσταλλικών ομάδων.

⁹ Φεροηλεκτρικά (ferroelectric) λέγονται τα κρυσταλλικά υλικά που παρά την απουσία ηλεκτρικού πεδίου διαθέτουν αυθόρμητα μόνιμη ηλεκτρική πόλωση, της οποίας η πολικότητα αναστρέφεται για την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου.

6.2.3 Πιεζοηλεκτρικοί μορφοτροπείς (piezoelectric transducers)

Οι πιεζοηλεκτρικοί μορφοτροπείς αποτελούν παραλλαγή των μορφοτροπέων ηλεκτροσυστολής. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο¹⁰ εμφανίζεται στις 20 από τις 32 κρυσταλλικές ομάδες και ανακαλύφθηκε περί τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, δηλαδή πριν από την ηλεκτροσυστολή. Τα δύο αυτά φαινόμενα είναι συγγενικά μεταξύ τους και μπορεί να παρουσιάζονται ταυτόχρονα στο ίδιο υλικό, αλλά όμως σε μακροσκοπικό επίπεδο υπερισχύει το ένα από τα δύο. Επίσης, όλα τα φεροηλεκτρικά υλικά (ferroelectrics) λόγω έλλειψης κρυσταλλικής συμμετρίας είναι και πιεζοηλεκτρικά, ενώ το αντίθετο δεν ισχύει πάντοτε (μόνον ορισμένα πιεζοηλεκτρικά είναι και φεροηλεκτρικά, πχ η περίπτωση του χαλαζία¹¹.(Σάγος,2019)

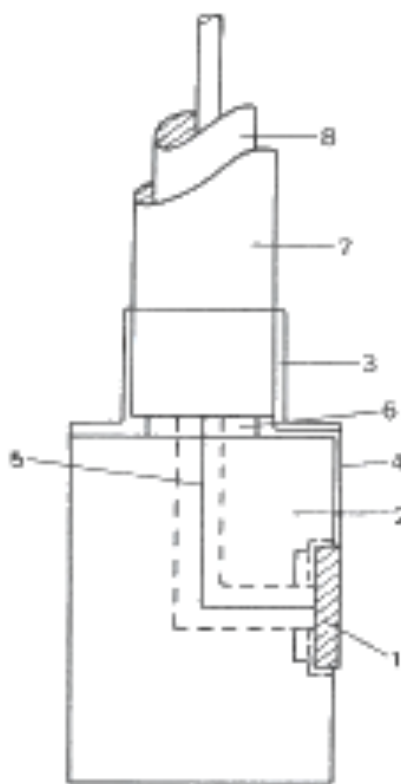


Εικόνα 50 Ένα ολοκληρωμένο υδρόφωνο. Η πολυουρεθάνη έχει χρώμα λευκό. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, όταν εκτίθεται σε υπεριώδες φως, το καουτσούκ μετατρέπεται σε πιο σκούρο καφέ.
(Andrew Gray,2018)

¹⁰ Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1880, από τον Γάλλο φυσικό Pierre Curie (1859-1906).

¹¹ Ο χαλαζίας ήταν από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή στοιχείων ηλεκτροακουστικών μορφοτροπέων (1917), τόσο από τον Γάλλο φυσικό Paul Langevin, όσο κι από τον Καναδό φυσικό Robert William Byle (ο τελευταίος εργάστηκε στο βρετανικό πρόγραμμα που αργότερα έγινε γνωστό ως ASDIC). Η χρήση του χαλαζία σε υδρακουστικές εφαρμογές διεκόπη από τη δεκαετία του 1930. Αποτελεί καθαρό διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂), το οποίο είναι άχρωμο διαφανές υλικό άφθονο στη φύση, σκληρό, δύσκολο στην κατεργασία και δε διαλύεται στο θαλασσινό νερό.

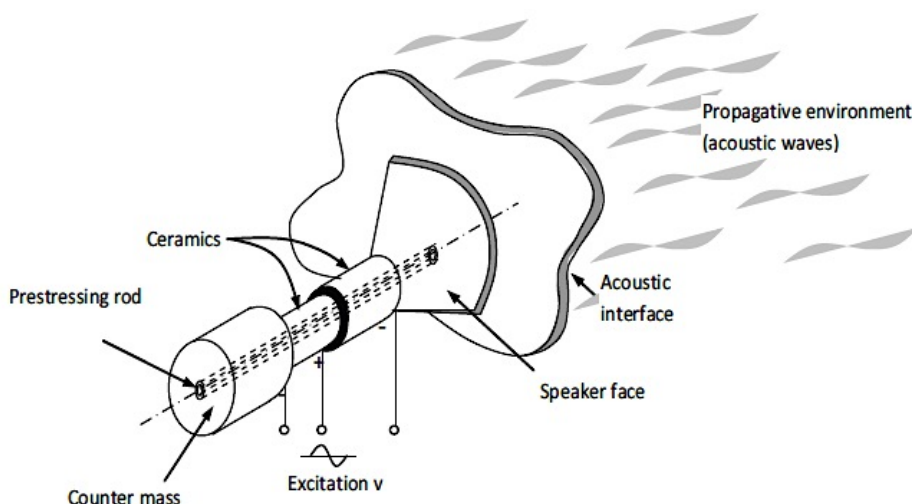
Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται για ορισμένα κρυσταλλικά υλικά από την εμφάνιση ηλεκτρικών φορτίων σε συγκεκριμένες επιφάνειες όταν εφαρμόζουμε μηχανική καταπόνηση σε ένα υλικό. Αυτό είναι το άμεσο πιεζοηλεκτρικό αποτέλεσμα. Αντίστροφα, εάν εφαρμόσουμε ηλεκτρικά φορτία σε ένα κρυσταλλικό υλικό, μηχανικές τάσεις και συνεπώς αλλαγές στο σχήμα εμφανίζονται σε δεδομένες κατευθύνσεις. Αυτό είναι το αντίστροφο πιεζοηλεκτρική επίδραση.



Εικόνα 51 Διάγραμμα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. 1) Πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, 2) βάση στήριξης, 3) πλαστικός σύνδεσμος σύνδεσης, 4) καλώδιο γείωσης, 5) Καλώδιο δεδομένων, 6) Στέλεχος στήριξης, 7) Ορειχάλκινος σωλήνας, 8) Ομοαξονικός ταλαντωτής

Στον τομέα της γραμμικότητας του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με τις δράσεις. Ένα από τα πρώτα πιεζοηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο χαλαζίας. Σήμερα ο χαλαζίας έχει εγκαταλειφθεί, δίνοντας τη θέση του σε κεραμικές ή κρυσταλλικές ενώσεις που λαμβάνονται από τη σύντηξη ενός μίγματος σιδηροηλεκτρικών ουσιών (όπως πχ το τιτανικό βάριο, τιτανικός ζirkονικός μόλυβδος κ.λπ.) χυτοί εκ των προτέρων σε μια καθορισμένη μορφή. Διατίθενται ποικίλες φόρμες, συμπεριλαμβανομένων

πλακών, δίσκων, δακτυλίων και σωλήνων. Κατά τη φάση παραγωγής, τα πιεζοηλεκτρικά χαρακτηριστικά δίδονται από την εφαρμογή ενός έντονου ηλεκτρικού πεδίου που ενεργεί στην κρυσταλλική δομή και παράγει πόλωση των κεραμικών. Σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό τα ευθύ και αντίστροφα αποτελέσματα μπορούν να εμφανιστούν σε πολλές κατευθύνσεις, ακόμα και αν η ενέργεια είναι προς μία κατεύθυνση.



Εικόνα 52 Μορφοτροπέας ηλεκτροσυστολής (Marage & Mori, 2010, σ.105)

6.3 Σημαντικά χαρακτηριστικά υλικών μορφοτροπέων

Σημαντικά χαρακτηριστικά του μορφοτροπέα είναι η συχνότητα συντονισμού, ο μηχανικός συντελεστής ποιότητας, η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση και ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής ζεύξης. Ένας λόγος για περισσότερη συζήτηση είναι ότι ορισμένες πτυχές της θεωρίας του μορφοτροπέα δεν είναι τυποποιημένες. Για παράδειγμα, υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί ορισμοί που χρησιμοποιούνται για τον ηλεκτρομηχανικό συντελεστή ζεύξης και τον μηχανικό συντελεστή ποιότητας. Ένας άλλος λόγος για περισσότερη ανάλυση των χαρακτηριστικών του μορφοτροπέα είναι η ανάγκη παρουσίασης συγκεκριμένων εκτιμήσεων. Η απόδοση του μορφοτροπέα καθορίζεται από την αποτελεσματική ζεύξη συντελεστή που είναι συνήθως μικρότερος από τον συντελεστή σύζευξης υλικού του ενεργού υλικού που χρησιμοποιείται στον μορφοτροπέα. Υπάρχουν πολλές αιτίες της μειωμένης απόδοσης που χαρακτηρίζει ένα μορφοτροπέα, όπως προβληματικά εξαρτήματα του μορφοτροπέα, δυναμικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς και δινορεύματα που εμφανίζονται σε μαγνητομορφοτροπέις. Στη συνέχεια, θα μελετήσουμε πρακτικές μεθόδους προσδιορισμού

του αποτελεσματικού συντελεστή σύζευξης που προκύπτουν από πολλές από αυτές τις αιτίες, μέσω συγκεκριμένων παραδειγμάτων. (Sherman & Butler, 2007)

7. Εξισώσεις Sonar

7.1 Γενικά

Σύμφωνα με τον QiHu (2012), η εξίσωση sonar αποτελεί μια σημαντική έννοια στο σχεδιασμό του sonar. Αντικατοπτρίζει την ουσιαστική σχέση μεταξύ των μέσων και του sonar, των συστημάτων sonar και των υπό ανίχνευση στόχων, καθώς και την γενικότερη κατάσταση λειτουργίας του. Μόλις γίνει η επιλογή της μορφής του σήματος, λαμβάνονται υπ'όψιν οι κύριες παράμετροι της εξίσωσης sonar, όπως το επίπεδο εκπομπής, η τοποθεσία του δέκτη, η συχνότητα, το μήκος παλμού και η ζώνη του πλάτους διαμόρφωσης. Το ακουστικό ηχητικό πεδίο, πχ το ωκεάνιο περιβάλλον, έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση του sonar. Οι κύριες παράμετροι του ηχητικού πεδίου περιλαμβάνουν την ταχύτητα του ανέμου, το προφίλ ταχύτητας ήχου, τη θερμοκρασία, την πίεση, το βάθος και τα χαρακτηριστικά του πυθμένα της θάλασσας. Η εξίσωση sonar αντικατοπτρίζει αντικειμενικά τις κύριες παραμέτρους στο σχεδιασμό sonar και ως εκ τούτου είναι η βασική έννοια στο σχεδιασμό sonar.

Υπάρχουν τρεις τύποι παραμέτρων στην εξίσωση sonar:

(1) Παράμετροι που ορίζονται από το σύστημα sonar. SL (Source Level): ο δείκτης ηχητικής πίεσης, δηλαδή η λήψη ηχητικής πίεσης σε απόσταση 1m από τον πομπό. GS (Gain Strength): η ενίσχυση του σήματος από το sonar. Λαμβάνεται από την κεραία του sonar, το κέρδος χώρου υποδηλώνεται επίσης από τον συντελεστή κατευθυντικότητας DI.

GT: Κέρδος που αφορά τον χρόνο του συστήματος sonar. Αυτό προκύπτει από τη χρονική ενσωμάτωση επεξεργασίας του σήματος. DT: Δείκτης αναγνώρισης, που ονομάζεται επίσης το όριο ανίχνευσης. Αυτό υποδεικνύει το ελάχιστο SNR (Signal to Noise Ratio) εξόδου, από το οποίο ένας χειριστής sonar μπορεί να εντοπίσει τον στόχο.

(2) Παράμετροι που καθορίζονται από τον στόχο SL: Ηχητική πίεση δείκτη του εκπεμπόμενου θορύβου, μετρούμενη σε απόσταση στόχου από πηγή. TS (Target Strength): η συνολική ένταση της ηχητικής υπογραφής του στόχου.

(3) Παράμετροι που καθορίζονται από το ωκεάνιο περιβάλλον NL (ή NL+RL): Επίπεδο θορύβου περιβάλλοντος (ή θορύβου περιβάλλοντος συν αντήχηση). Αυτό μερικές φορές ονομάζεται θόρυβος background και μπορεί να αποτελείται από θόρυβο

περιβάλλοντος, αντήχηση ή αυτο-θόρυβος μιας πλατφόρμας sonar. TL: Απώλεια μετάδοσης, υποδεικνύοντας την υποτίμηση της διάδοσης από 1m σε κάποια απόσταση. Όλες οι παράμετροι που περιγράφονται παραπάνω εκφράζονται σε τιμές dB και συνήθως συχνότητα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει ανάπτυξη των βασικών εξισώσεων, την κατανόηση του δείκτη ανίχνευσης κατωφλίου ανίχνευσης DT (Detection Threshold), του δείκτη εντοπισμού d και τους συσχετισμούς με την πιθανότητα ανίχνευσης P_d καθώς και την πιθανότητα ψευδών επαφών P_{fa} . Στη συνέχεια θα γίνει ανάπτυξη των εξισώσεων sonar για την εφαρμογή τους σε ενεργητικά και παθητικά sonar παρακολούθησης και επικοινωνίας. Αυτό συμβαίνει επειδή απαιτείται λεπτομερή γνώση της επεξεργασίας σήματος για την ανάπτυξη μιας έκφρασης για DT κατάλληλο για μια συγκεκριμένη κατηγορία sonar.

Οι εξισώσεις sonar χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της απόδοσης μιας γνωστής διάταξης sonar, καθώς επίσης και στη σχεδίαση ενός sonar για δεδομένη απόδοση. Για την πρόβλεψη της απόδοσης του συστήματος είναι αναγκαίοι οι παράμετροι του sonar. Οι εξισώσεις sonar επιλύονται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απώλειες διάδοσης σε συγκεκριμένες δυνατότητες εντοπισμού και ψευδοεπαφών. Οι απώλειες διάδοσης μετατρέπονται σε εκτιμήσεις της απόστασης εντοπισμού στο περιβάλλον ενδιαφέροντος. Όταν σχεδιάζεται ένα sonar για ανίχνευση σε κάποια προκαθορισμένη απόσταση, πρώτα υπολογίζεται η απώλεια διάδοσης για το περιβάλλον ενδιαφέροντος και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις sonar για επίλυση για τις παραμέτρους σύμφωνα με τις παραμέτρους που έχει θέσει ο χειριστής. Αυτή η διαδικασία συχνά περιορίζεται αρκετά όπως για παράδειγμα από το μέγεθος της πλατφόρμας ή το κόστος εξοπλισμού, ενώ υποβοηθείται σημαντικά από την εμπειρία του χειριστή sonar. (Waite, 2002)

Η βασική εξίσωση sonar απλώς εκφράζει τη διαφορά μεταξύ του σήματος ως προς το θόρυβο (Signal to Noise Ratio) στην έξοδο του διαμορφωτή δέσμης (Beamformer) και το κατώφλι ανίχνευσης (DT). Αυτή η διαφορά είναι η υπέρβαση σήματος (Signal-Excess, SE) και σε μορφή dB δίνεται από τον τύπο:

$$SE = S - N - DT$$

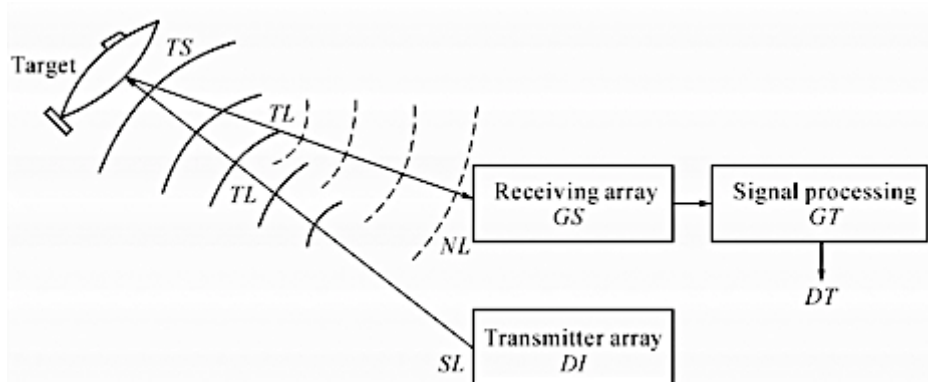
Η ισχύς του σήματος είναι στο εύρος ζώνης ανάλυσης και η ισχύς θορύβου είναι σε ζώνη του 1 Hz. Το κατώφλι αυτό ορίζεται έτσι ώστε ένα σήμα με S/N (στην έξοδο του Beamformer) ίσο με DT, έχει συγκεκριμένη (συνήα 50%) πιθανότητα ανίχνευσης (P_D) για την απαιτούμενη πιθανότητα ψευδοεπαφών (P_{fa}). Η τιμή του DT εξαρτάται από αυτές τις πιθανότητες και την

επεξεργασία του σήματος sonar. Με άλλα λόγια το Signal Excess (SE) το οποίο είναι μηδέν αντιστοιχεί σε P_d στο 50% και το θετικό SE δείχνει $P_d > 50\%$. (Waite, 2002)

7.2 Εξίσωση ενεργητικού Sonar

Τα ενεργητικά sonar εκπέμπουν ήχο και εντοπίζουν ηχώ στόχων. Το επίπεδο σήματος είναι: $S = SL + TS - 2PL$, όπου το Source Level (SL) είναι το επίπεδο εκπομπής της συστοιχίας των προβολέων, ενώ το Propagation Loss (PL) είναι η απώλεια που υφίσταται η εκπομπή του ενεργητικού sonar σε μία διαδρομή της. Επομένως σύμφωνα με τον Waite (2002), η βασική εξίσωση του ενεργητικού sonar είναι:

$$SE = (SL + TS - 2PL) - N - DT$$



Εικόνα 53 Παραγωγή της εξίσωσης του ενεργητικού sonar (Gihu, 2012, σ.169)

7.3 Εξίσωση παθητικού Sonar

Σύμφωνα με τον Waite (2002), τα παθητικά sonar ανιχνεύουν τα σήματα που εκπέμπονται από τους στόχους ενώ το επίπεδο λαμβανόμενου σήματος περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$S = SL - PL$$

όπου το SL (Source Level) είναι το επίπεδο πηγής του στόχου (ο εκπεμπόμενος θόρυβος στη ζώνη συχνοτήτων ενδιαφέροντος) και PL (Propagation Loss) τις απώλειες έντασης του

σήματος λόγω της διάδοσης.

Η βασική παθητική εξίσωση sonar είναι:

$$SE = (SL - PL) - N = DT$$

όπου το SE (Signal Excess) αποτελεί το DT (Detection Threshold) στην εξίσωση του παθητικού sonar, το όριο σε dB που αν ξεπεραστεί γίνεται εντοπίσιμος ένας στόχος από παθητική στοιχειοκεραία.

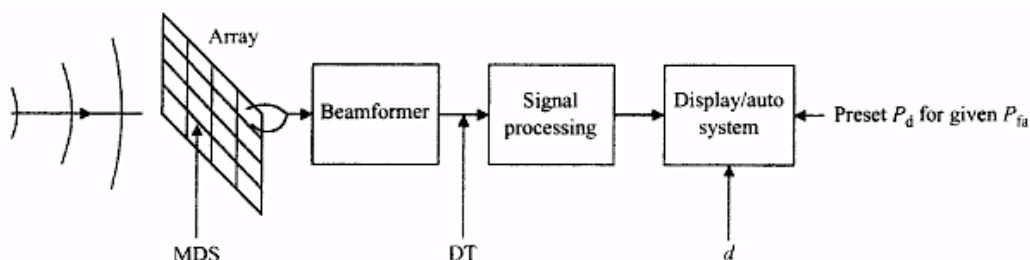
Όλα τα συστήματα λήψης sonar σχεδιάζονται σύμφωνα με το Block Diagram της εικόνας 54. Το ελάχιστο διακριτό σήμα από την στοιχειοκεραία είναι: (MDS-Minimum Discernible Signal) είναι ο λόγος Signal to Noise της στοιχειοκεραίας για συγκεκριμένες τιμές P_d (Probability of Detection) και P_{fa} (Probability of False Alarms):

$$MDS = DT - DI \text{ (στην περίπτωση που ο θόρυβος είναι ιστροπικός)}$$

$$MDS = DT - AG \text{ (στην περίπτωση που ο θόρυβος είναι κατευθυντικός)}$$

Το Detection Threshold (DT) είναι η αναλογία της μέσης ισχύς των σημάτων ως προς τη μέση ισχύς θορύβου (εκφρασμένη σε μορφή dB) η οποία μετράται μετά από το beamforming, με προκαθορισμένες τιμές P_d και P_{fa} . Η ισχύς σήματος βρίσκεται στο εύρος ζώνης ανάλυσης και η ισχύς θορύβου βρίσκεται στη ζώνη του 1 Hz. Το Detection Index d , ορίζεται ως

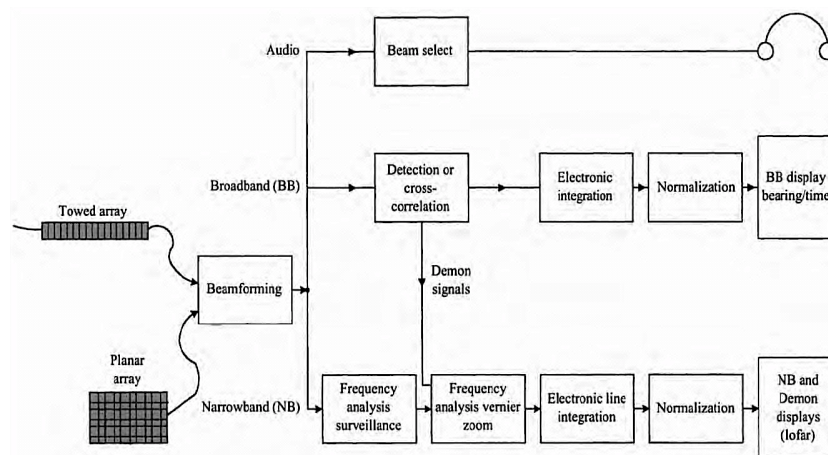
$$d = \left(\frac{\text{mean}(S + N) - \text{mean}(N)}{\text{std dev}(N)} \right)^2$$



Εικόνα 54 Σύστημα παθητικού sonar (Waite, 2002, σ.121)

Η Εικόνα 55 μας δείχνει ένα πλήρες παθητικό σύστημα sonar. Από τα λαμβανόμενα σήματα της συστοιχίας δημιουργούνται ακουστικοί λοβοί σε όλο το εύρος συχνοτήτων, ενώ στη συνέχεια στέλνεται το ακουστικό σήμα για χρήση από τον χειριστή sonar. Απο το ακουστικό σήμα του sonar, είναι διαθέσιμη η ακρόαση είτε ενός λοβού (Acoustic Beam), είτε ενός εύρους ζώνης. Το ευρυζωνικό sonar (Broadband), επεξεργάζεται σήματα από τον beamformer είτε χρησιμοποιώντας την ένταση του σήματος, είτε μέσω τεχνικών διασταυρούμενης συσχέτισης (Cross – Correlation Techniques). Το κέρδος ολοκλήρωσης (Integration Gain) για την ανίχνευση ενέργειας σήματος είναι $5\log BT_e$, και για διασταυρούμενη συσχέτιση $5\log 2BT_e$, όπου B είναι το εύρος ζώνης σήματος (συνήθως μια οκτάβα) και T_e είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης (ο χρόνος που ένα σήμα να παραμείνει μέσα σε ένα λοβό).

Το sonar στενής ζώνης (narrowband) εκτελεί υπολογισμό φάσματος συχνοτήτων για να μετατρέψει την έξοδο του beamformer, σε φάσματα μέσω δύο σταδίων. Το πρώτο στάδιο εφαρμόζεται σε όλα τα δεδομένα από όλους τους λοβούς για την παραγωγή ικανότητας επιτήρησης, ενώ το δεύτερο στάδιο επιτρέπει στον χειριστή να «μεγεθύνει» (να αυξήσει την ανάλυση συχνότητας) σε ένα συγκεκριμένο μέρος του συνολικού φάσματος. Αυτό το δεύτερο στάδιο είναι επίσης γνωστό ως επεξεργασία vernier. Το κέρδος (Gain) από τη συνολική διαδικασία είναι $10\log B$, όπου B είναι το εύρος ζώνης της τελικής ανάλυσης. Αν το εύρος ζώνης σημάτων B_s , είναι μεγαλύτερο από B, τότε θα γίνει μείωση του Gain κατά $10\log \frac{B}{B_s}$. Στη συνέχεια γίνεται άθροιση της ενέργειας από κάθε κελί ανάλυσης (cell analysis) σε διάφορα χρονικά βήματα. Ο αριθμός των βημάτων είναι γνωστός ως intergration factor (IF) και το Gain είναι $5\log IF$.



Εικόνα 55 Σύστημα παθητικού sonar (Waite, 2002, σ.130)

7.4 Πρόγνωση αποστάσεων εντοπισμού

Η πρόγνωση των αποστάσεων εντοπισμού, μπορεί να χωριστεί νοητά σε δύο κύρια μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά αποκλειστικά τον τρόπο διάδοσης της ηχητικής ενέργειας στο νερό (διάθλαση, απορρόφηση, κτλ). Το μέρος αυτό, αφορά τον υπολογισμό των απωλειών ηχητικής διάδοσης ή / και την χάραξη των ηχητικών ακτινών (ray trace). Εδώ, είναι δυνατό να αποκαλύψουμε τις περιοχές στις οποίες ο εντοπισμός του στόχου (ενεργητικός ή παθητικός) είναι πρακτικά αδύνατος, λόγω πχ σκιερών ζωνών, διαμόρφωσης βυθού, κτλ. Το δεύτερο μέρος, αφορά τον προς διορισμό της μέγιστης απόστασης στην οποία το σήμα ενδιαφέροντος χάνεται μέσα στο θόρυβο και δεν είναι δυνατόν πλέον να εντοπιστεί. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται η χρήση του δείκτη αξίας FOM (Figure of Merit) του συστήματος. Η τιμή FOM αποτελεί βασικό παράγοντα προσδιορισμού της μέγιστης απόστασης εντοπισμού και υπολογίζεται από την εξίσωση του sonar. (Σάγος, 2019)

7.5 Δείκτης αξίας FOM (Figure of Merit)

Η εξίσωση sonar μπορεί εκ νέου να μεταβληθεί, ως συνέπεια του επανακαθορισμού του SNR (Signal to Noise Ratio), ώστε να περιγραφεί το PL (Propagation Loss), στην περίπτωση που το SNR είναι ίσο με το DT (Detection Threshold), δηλαδή ότι το sonar βρίσκεται στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Όταν η απόδοση του sonar είναι στο MDL (Minimum Detectable Level) δηλαδή $P_d = 0.5$, η τιμή αυτή PL ονομάζεται FOM του sonar και περιγράφει το μέγιστο PL που μπορεί να υπάρξει ενώ εξακολουθείται να πληρούνται οι προδιαγραφές επιδόσεων MDL. Από τη βασική παθητική εξίσωση sonar:

$$SNR^a = 10 \log_{10} S^a = SL - PL - NL + AG$$

$FOM = SL - NL + AG - DT_{50}^a$, όπου DT_{50}^a είναι το όριο ανίχνευσης μετά από επεξεργασία συστοιχίας αισθητήρων για $P_d = 0,5$ ενώ το AG (Array Gain) αποτελεί την ενίσχυση του σήματος από την στοιχειοκεραία. Για ένα ενεργητικό σύστημα sonar, η σχέση μεταξύ RL (Reverberation Level) και PL, υπολογίζει το FOM, κυρίως για ένα σενάριο με περιορισμένο θόρυβο. Με την εκ νέου διευθέτηση της εξίσωσης:

$$\text{SNR}^a = \text{SL} - 2\text{PL} + \text{TS} - \text{NL} + \text{AG}$$

$$\text{το FOM γίνεται: } \text{FOM} = \frac{1}{2} \text{DT}_{50}^a$$

η οποία είναι η μέγιστη τιμή PL (για μία διαδρομή) που επιτρέπει ώστε το σύστημα να επιτύχει την επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Σε ένα περιβάλλον όπου το PL αυξάνεται με την απόσταση, το FOM χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η μέγιστη απόσταση εντοπισμού, κατά την οποία το σύστημα sonar επιτυγχάνει το επιθυμητό σημείο λειτουργίας, το οποίο είναι στοιχείο χρήσιμο σε επιχειρησιακό πλαίσιο. Ωστόσο, το FOM απαιτεί τον καθορισμό διαφόρων ποσοτήτων, όπως είναι το NL, το TS (Target Strength) για τα ενεργά συστήματα και το SL (Source Level) για τα παθητικά συστήματα. (Abraham, 2019)

8. Ψηφιακή επεξεργασία σημάτων (digital signal processing)

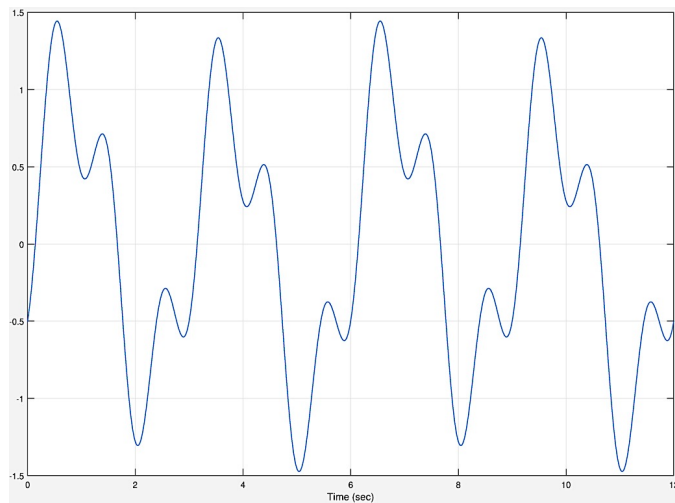
8.1 Σήματα

Ως σήμα ονομάζεται μία συνάρτηση κάποιας μεταβλητής (φυσικού μεγέθους), συνήθως του χρόνου ή του χώρου, που εκφράζει μία σειρά από γεγονότα μεταβαλλόμενα ως προς τη μεταβλητή αυτή (χρόνο ή χώρο), και τα οποία μεταφέρουν οι περιέχουν ορισμένες πληροφορίες. Το τελευταίο χαρακτηριστικό διαχωρίζει τα σήματα από το θόρυβο, ο οποίος δεν μεταφέρει καμία απολύτως πληροφορία. Σε κάθε χρονική στιγμή, το σήμα έχει κάποια συγκεκριμένη τιμή, πραγματική (όπως τα περισσότερα σήματα στη φύση) ή μιγαδική. Τα σήματα τα οποία μας απασχολούν στην υδροακουστική και στα συστήματα sonar, είναι ακουστικά (ηχητικά) και ηλεκτρικά (μεταβολές ηλεκτρικής τάσης).

8.2 Κατηγορίες σημάτων

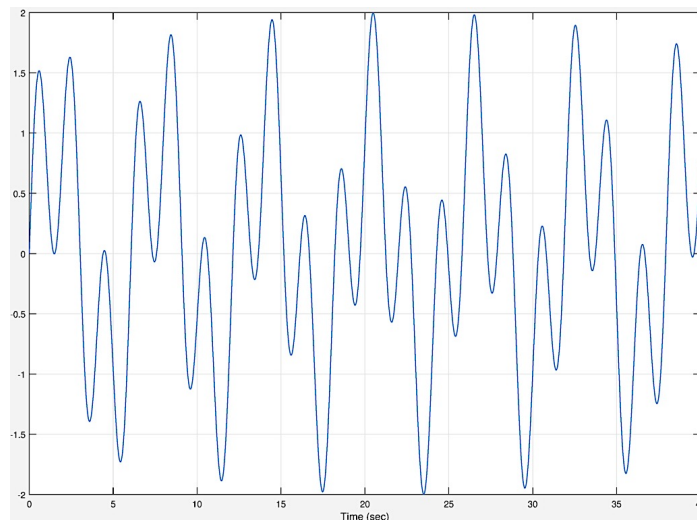
Υπάρχουν πολλές κατηγορίες σημάτων, ορισμένες από τις οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Περιοδικά (periodic). Είναι σήματα επαναλαμβανόμενα στο χρόνο δηλαδή εμφανίζουν κάποια σταθερή περίοδο επανάληψης T , πχ $s(t) = s(t + T)$. Διακρίνονται σε απλά ημιτονοειδή (αρμονικά) και σε σύνθετα. Τα σύνθετα σήματα αναλύονται σε διακριτές αρμονικές συχνότητες (τόνοι), οι οποίες είναι όλες πολλαπλάσια κάποιας βασικής (θεμελιώδους) συχνότητας. Παράδειγμα αρμονικού κύματος, είναι ο τόνος του διαπασών, ενώ σύνθετου σήματος είναι ο ήχος ενός βιολιού.



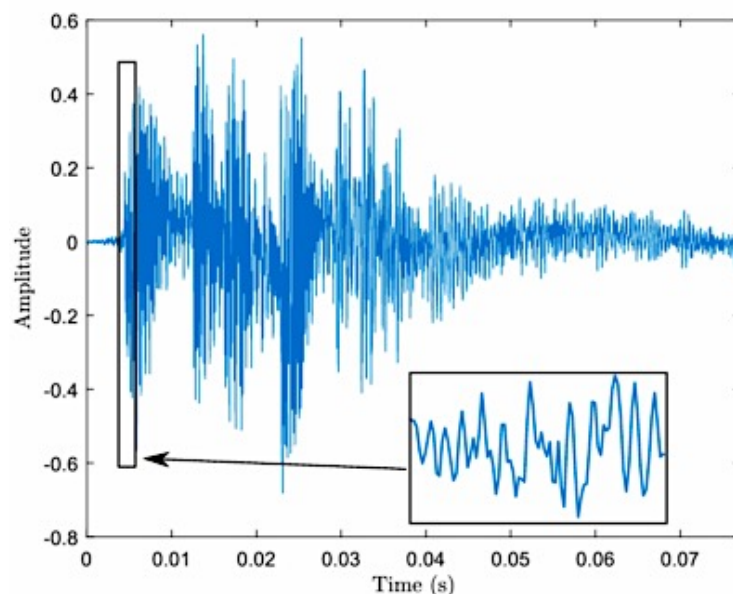
Εικόνα 56 Γράφημα περιοδικού σήματος ως προς το χρόνο (Ανακτήθηκε την 9/8/21 από:
<https://web.mst.edu/~kosbar/ee3430/ff/fourier/periodic.html>)

- Μη περιοδικά ή απεριοδικά (non-periodic ή aperiodic). Είναι όλα τα σήματα, οποία δεν είναι περιοδικά, δηλαδή δεν παρουσιάζουν καμία περίοδο επανάληψης στο χρόνο.
 - Σχεδόν περιοδικά (almost periodic). Αναλύονται σε διακριτές συχνότητες, Αλλά δεν υπάρχει μια αυστηρά συγκεκριμένη βασική (θεμελιώδης) συχνότητα. αποτελούν σήματα που παράγονται από δυναμικά συστήματα, όπως πχ οι κραδασμοί της προπέλας ενός αεροσκάφους που κινείται από πολλούς μη συγχρονισμένους μεταξύ τους βενζινοκινητήρες, αλλά και οι έμφωνοι ήχοι (φωνήματα) της ανθρώπινης φωνής. (Εικόνα 57)



Εικόνα 57 Σχεδόν περιοδικό σήμα ως προς το χρόνο (Ανακτήθηκε την 9/8/21 από:
<https://web.mst.edu/~kosbar/ee3430/ff/fourier/periodic.html>)

- Μεταβατικά (transients). Είναι σήματα μικρής διάρκειας, με συνεχή φάσματα συχνοτήτων, πχ η διαταραχή της τάσης που προκαλεί το κλείσιμο του διακόπτη ενεργοποίησης κάποιας συσκευής, ο θόρυβος των πηδαλίων των υποβρυχίων κτλ. Ένα μεταβατικό σήμα μπορεί να θεωρηθεί ως το όριο μιας περιοδικής συνάρτησης, της οποίας η περίοδος τείνει στο άπειρο. (Εικόνα 58)



Εικόνα 58 Μεταβατικό σήμα (transient) ως προς το χρόνο (Ανακτήθηκε την 9/8/21 από: <https://www.researchgate.net/figure/Two-examples-of-transients-a-A-turn-on-transient-of-an-electrical-signal-drill-forfig1337406869>)

- Τυχαία ή στατιστικά ή στοχαστικά (random/statistical/stochastic), δηλαδή τα περισσότερα σήματα που συναντάμε στην πράξη στις τηλεπικοινωνίες (ακολουθίες δυαδικών ψηφίων), Στα ραντάρ, Στην υδροακουστική / sonar, κτλ., συμπεριλαμβανομένου και του θορύβου, στα οποία οι μελλοντικές τους τιμές δεν μπορώ να προβλεφθούν επακριβώς με βάση τις παρατηρηθείσες παρελθούσες τιμές, αλλά υπάρχει κάποια αβεβαιότητα. Για αυτό και εκφράζονται με τη βοήθεια των νόμων των πιθανοτήτων και της στατιστικής.
- Σήματα ισχύος οι πεπερασμένης ισχύος ή απείρου μήκους (finite power signals), αποτελούν για παράδειγμα οι παλμοσειρές οποιασδήποτε μορφής, όπως πχ είναι ο παραγόμενος ήχος από γαρίδες, καθώς και όλα τα περιοδικά σήματα.

- Ενεργειακά σήματα ή πεπερασμένης ενέργειας ή πεπερασμένου μήκους (finite power signals), είναι τα διαφόρων μορφών παλμικά σήματα ακόμη και οι εκρήξεις.
- Αναλογικά (analog time), δηλαδή τα σήματα στα οποία τόσο ο χρόνος όσο και οι τιμές τους μεταβάλλονται συνεχόμενα (χωρίς διάκενα) και μπορούν να λαμβάνουν οποιαδήποτε τιμή. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα περισσότερα σήματα που συναντώνται στην φύση (και στην υδροακουστική), πχ το ακουστικό σήμα που παράγεται από κάποιο πλοίο (ακουστική υπογραφή) και διαδίδεται μέσα στο νερό όπου και τελικά λαμβάνεται από κάποιο σύστημα υδροφώνων, οι ήχοι των μουσικών οργάνων μιας ορχήστρας, το ασθενές ηλεκτρικό σήμα μίας κεφαλής δίσκων βινυλίου κτλ.
- Διακριτά (dicrete time), είναι τα σήματα στα οποία ο χρόνος έχει διακριτές τιμές (συνήθως ισαπέχουσες), ενώ το ίδιο το σήμα μεταβάλλεται συνεχόμενα. πχ η ημερήσια τιμή του δείκτη συναλλαγών του χρηματιστηρίου κτλ.
- Ψηφιακά (digital), είναι τα σήματα στα οποία τόσο ο χρόνος όσο και οι τιμές τους μεταβάλλονται με διακριτό τρόπο, πχ οι αποθηκευμένες πληροφορίες σε ένα δίσκο CD, τα δεδομένα που μεταφέρονται στο internet κτλ. Τα ψηφιακά σήματα, είναι αυτά τα οποία μπορούμε στην πράξη να χειριζόμαστε / επεξεργαζόμαστε και να αποθηκεύουμε με μεγαλύτερη ευκολία πχ σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Σήμερα η αναλογική επεξεργασία σημάτων έχει σχεδόν εγκαταλειφθεί ολοκληρωτικά (πλην ελαχίστων περιπτώσεων που αποτελούν εξαιρέσεις). Οι λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι πολλοί, πχ η μεγαλύτερη ευκολία και ευελιξία της ψηφιακής τεχνολογίας, το συνήθως χαμηλότερο κόστος και η υψηλότερη ακρίβεια εφαρμογής αυτής, μικρότερη ευαισθησία στο θόρυβο, καθώς και η μικρότερη επίδραση των συνθηκών περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία). (Σάγος, 2019)

8.3 Ρυθμοί ταλαντώσεων

Οποιοδήποτε μηχανικό / μηχανολογικό σύστημα (κατασκευή) επιτρέπεται να δονείται και να παράγει ήχο παλλόμενο κάτω από ορισμένους **ρυθμούς μηχανικών ταλαντώσεων (vibration modes)** ή κανονικούς ιδιορρυθμούς (**normal modes**). Αυτοί, αποτελούν χαρακτηριστικούς τρόπους αρμονικής κίνησης των τμημάτων του εν λόγω συστήματος (κατασκευής), κάτω από συγκεκριμένες συχνότητες και μεταξύ τους φασικές σχέσεις,

γνωστούς απλά και ως **συντονισμός (resonances)**. Αρχίζοντας από τις απλούστερες περιπτώσεις, όπως είναι μία ράβδος, μία ελασμάτινη πλάκα, ένα διαπασών και φθάνοντας σε πιο πολύπλοκες κατασκευές όπως είναι ένα μουσικό όργανο (πχ βιολί), η άτρακτος ενός αεροσκάφους, τα πτερύγια των προπελών και η γάστρα ενός πλοίου, μία γέφυρα, ακόμα κι ένα κτίριο ή ένα μόριο της ύλης, όλα αυτά παρουσιάζουν το καθένα τους δικούς του ιδιαίτερους ρυθμούς ταλαντώσεων, ανάλογα με τα μηχανολογικά του χαρακτηριστικά (δομή, υλικά, στερέωση) και τον τρόπο διέγερσης του.

Ο καθένας από τους ρυθμούς ταλαντώσεων, αντιστοιχεί σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα (ιδιο)συντονισμού (resonance ή natural frequency). Όλες οι συχνότητες μαζί, ανάλογα με την περίπτωση, μπορεί να είναι είτε αρμονικές (**harmonics**) είτε μη αρμονικές (απλές **overtones**)¹². Στην πρώτη περίπτωση το παραγόμενο ηχητικό σήμα θα είναι περιοδικό, δηλαδή θα μπορεί να λυθεί σε μια σειρά αρμονικών (ημιτονοειδών) κυμάτων, τα οποία θα είναι ακέραια πολλαπλάσια κάποιας θεμελιώδους (βασικής) συχνότητας (πρώτης αρμονικής). Δύο οποιεσδήποτε αρμονικές έχουν λόγους συχνοτήτων ρητούς αριθμούς (κλάσματα ακεραίων) ενώ δυο γειτονικές μεταξύ τους αρμονικές απέχουν κατά το εύρος της θεμελιώδους συχνότητας. Στη δεύτερη περίπτωση των μη αρμονικών ταλαντώσεων, το παραγόμενο ηχητικό σήμα θα είναι σχεδόν περιοδικό, δηλαδή δεν θα υπάρχει καμιά θεμελιώδη συχνότητα (οι λόγοι των συνιστωσών συχνοτήτων δεν παρουσιάζουν αρμονική συσχέτιση ενώ μπορεί να ακόμη και άρρητοι αριθμοί).

Η συνολική κίνηση (γενική ταλάντωση) ενός συστήματος αποτελεί την απλή υπέρθεση (άθροιση) των ιδιορρυθμών του, οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους (η διέγερση του ενός δεν προκαλεί την διέγερση του άλλου). Με μαθηματικούς όρους, αυτό σημαίνει ότι οι ιδιορρυθμοί είναι μεταξύ τους ορθογώνιοι.

8.4 Φασματική ανάλυση ακουστικών σημάτων

Σε οποιοδήποτε ακουστικό σήμα ανεξαρτήτως κατηγορίας που ανήκει, αντίστοιχη κάποια φασματική ανάλυση (απεικόνισης) ή ανάλυση συχνοτήτων. Αυτό σημαίνει ότι κάθε σήμα μπορεί να εκφραστεί ή να αναληθεί σε ένα πλήθος πολλών απλών ημιτονοειδών σημάτων, τα οποία αποτελούν τις συνιστώσες του (πλάτος, συχνότητα, χρόνος).

¹² Η θεμελιώδης συχνότητα και οι overtones μαζί λέγονται partials (η θεμελιώδης συχνότητα δεν θεωρείται overtone). Επίσης, οι συχνότητες overtones δεν είναι πάντοτε αρμονικές.

Η διαδικασία της φασματικής ανάλυσης σήματος είναι απαραίτητη διεργασία στις περιπτώσεις τις οποίες απαιτείται ο εντοπισμός ασθενών ακουστικών σημάτων (χαμηλής τιμής λόγου σήματος προς το θόρυβο).

Η φασματική ανάλυση των ακουστικών σημάτων μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, ο πιο κλασικός από τους οποίους είναι η ανάλυση Fourier. Η ανάλυση Fourier αποτελεί μια πολύ συνηθισμένη μαθηματική μέθοδος μεταφοράς / μετατροπής ενός σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας.

Ο Γάλλος μαθηματικός Fourier, ήταν ο πρώτος που ανακάλυψε ότι ένα συνεχόμενο αναλογικό περιοδικό σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί σαν το άθροισμα από ειδικά επιλεγμένα στοιχειώδη ημιτονοειδή σήματα. Η εξίσωση του ημιτόνου είναι:

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi)$$

όπου A είναι το πλάτος του σήματος, f είναι η συχνότητα του σήματος και φ η γωνία φάσης του κύματος.

Όλα τα σήματα, ανεξάρτητα με το πόσο σύνθετα είναι, μπορούν σχηματιστούν αθροίζοντας τέτοιες ημιτονικές συναρτήσεις σαν κύμα. Αυτή η αρχή μπορεί να αποτελέσει την βάση για την ανάλυση των ηχητικών κυμάτων, ενώ η σύνθεση του σήματος από υπέρθεση ημιτόνων ονομάζεται σύνθεση Fourier.

8.5 Ανάλυση Fourier

Η ανάλυση Fourier αποτελεί μία πολύ συνηθισμένη μαθηματική μέθοδο μεταφοράς μετατροπής ενός σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας (ή του χώρου) στο πεδίο της συχνότητας (ή της χωρικής συχνότητας). Ανάλογα με το είδος του σήματος, η φασματική ανάλυση (φάσμα Fourier) διεξάγεται με έναν από τους τρόπους που περιγράφονται στη συνέχεια.

8.5.1 Σειρές Fourier

Ένα περιοδικό, άπειρο στο χρόνο από $-\infty$ έως $+\infty$ (πεπερασμένης ισχύος) συνεχές / αναλογικό στο χρόνο σήμα $x(t)$ μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα αρμονικών ημιτονοειδών

κυματομορφών, δηλαδή αναλύεται σε ένα διακριτό στη συχνότητα μη περιοδικό (απεριοδικό) απείρου μήκους σήμα (φάσμα διακριτών γραμμών)¹³.

$$x(t) = x(t + nT), \quad -\infty < t < +\infty$$

όπου, T η περίοδος του σήματος $f_0 = \frac{1}{T}$ είναι η θεμελιώδης (βασική συχνότητα Hz),
 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ είναι η θεμελιώδης γωνιακή ή κυκλική συχνότητα (rad/sec), $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Οι συχνότητες nf_0 για $n \geq 1$, λέγονται αρμονικές συχνότητες. Για $n=1$ η συχνότητα λέγεται θεμελιώδης (fundamental) ή πρώτη αρμονική. Στην τιμή $n=0$ αντίστοιχη η συνεχής συνιστώσα (dc).

Η εκθετική μορφή της ανάλυσης σε σειρά Fourier είναι η παρακάτω:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X_n e^{j2n\omega_0 t}$$

όπου, X_n είναι οι μιγαδικοί συντελεστές της σειράς Fourier που εκφράζουν τις φασματικές συνιστώσες (κατά πλάτος και φάση) του σήματος:

$$X_n = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad \text{με } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Οι εμφανιζόμενες αρνητικές συχνότητες στις ανωτέρω σχέσεις δεν έχουν κάποια φυσική σημασία και δεν περιέχουν καμία επιπρόσθετη πληροφορία για τις συναρτήσεις που είναι πραγματικά σήματα. (Medwin, 1998)

¹³ Όταν ένα σήμα υπακούει στις λεγόμενες συνθήκες Dirichlet (δηλαδή αποτελεί περιοδική συνάρτηση με πεπερασμένο πλήθος μέγιστων, ελαχίστων και ασυνεχειών μέσα σε μία περίοδο), τότε αναλύεται οπωσδήποτε σε σειρά Fourier. Το αντίθετο δεν ισχύει πάντοτε, δηλαδή εάν κάποιο σήμα δεν υπακούει στις συνθήκες αυτές, τότε δεν μπορεί να αναληθεί σε σειρά Fourier, εκτός από ορισμένες σχετικά σπάνιες περιπτώσεις. Η ύπαρξη και η μοναδικότητα μιας σειράς ημιτονοειδών συναρτήσεων αποτελούν θεωρητικά θέματα που απασχολούν τους μαθηματικούς. Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν τις σειρές Fourier ως ένα εργαλείο ανάλυσης και σύνθεσης σημάτων, το οποίο έχει πολλές πρακτικές εφαρμογές.

8.5.2 Μετασχηματισμός Fourier (Fourier Transform – FT)

Η αντίστροφη διαδικασία από την σύνθεση Fourier είναι ο διαχωρισμός ενός σήματος σε στοιχειώδη ημιτονικά σήματα και ονομάζεται ανάλυση Fourier. Η ανάλυση Fourier μας επιτρέπει να διαπιστώσουμε ποιες συχνότητες είναι παρούσες στο σήμα και πόσο δυνατή είναι η επίδραση από κάθε μια από αυτές. Η μαθηματική έκφραση της ανάλυσης Fourier ονομάζεται μετασχηματισμός Fourier (Fourier Transform-FT) και δίνεται από τους ορισμούς:

$$\text{Ευθύς μετασχηματισμός Fourier: } X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt$$

$$\text{Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier: } x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{-i\omega t} d\omega$$

όπου, $\omega = 2\pi f$ είναι η γωνιακή ή κυκλική συχνότητα (rad/sec)

Στις παραπάνω εξισώσεις το $x(t)$ είναι η συνάρτηση χρόνου και το $X(f)$ είναι η αντίστοιχη συνάρτηση συχνότητας. Με την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier, ένα σήμα το μεταφερθούμε από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Ο μετασχηματισμός Fourier ο οποίος είναι αντιστρεπτός, με αποτέλεσμα όταν επιλέξουμε οποιονδήποτε από τους δύο τρόπους στο ένα πεδίο, αυτόματα τροποποιείται και στο άλλο.

8.5.3 Μετασχηματισμός Fourier βραχέως χρόνου (Short Time Fourier Transform - STFT)

Για την επεξεργασία των σημάτων σε υπολογιστές απαιτείται η μετατροπή τους από αναλογικά σε διακριτά. Αυτό έχει επίπτωση και στη μορφή της φασματικής ανάλυσης αυτών.

Ο μετασχηματισμός Fourier βραχέως χρόνου (Short Time Fourier Transform - STFT) κατακερματίζει το σήμα σε μικρά συνεχόμενα κομμάτια (frames) και πραγματοποιεί μετασχηματισμό Fourier σε καθένα από αυτά, αναλύοντας έτσι τη μεταβολή του σήματος και ως προς τον χρόνο. Αυτό δημιουργεί καινούργιες δυσκολίες. Αφού ο μετασχηματισμός Fourier απαιτεί το σήμα να είναι άπειρο, κάθε κομμάτι του σήματος θα πρέπει να μετατραπεί πρώτα σε ένα σήμα με άπειρο μήκος. Το απότομο κόψιμο στο τέλος και η απότομη έναρξη ενός frame, έχει σαν αποτέλεσμα κατά τον μετασχηματισμό την εμφάνιση ημιτόνων με πολύ

μεγάλες συχνότητες που εκφράζουν τις γρήγορες μεταβολές τα οποία δεν υπάρχουν στο αρχικό σήμα.

Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα έρχεται με την διαδικασία της δημιουργίας παραθύρου (windowing). Κάθε frame πολλαπλασιάζεται με μια συνάρτηση δημιουργίας παραθύρου (windowing function) η οποία σταδιακά μειώνει το σήμα σε κάθε frame ως την τιμή 0 (διαδικασία ζύγισης). Παράλληλα επιλέγεται ένα ποσοστό επικάλυψης μεταξύ των frames έτσι ώστε μαζί με το κατάλληλο windowing, ο μετασχηματισμός να γίνεται με την μέγιστη ακρίβεια. Η μαθηματική σχέση για το μετασχηματισμό Fourier βραχέως χρόνου είναι:

$$X(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t' - t)x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

8.5.4 Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT)

Ένα περιοδικό, άπειρο στο χρόνο (πεπερασμένης ισχύος) διακριτό στο χρόνο σήμα $x(k \Delta T) = x(k\Delta T + N\Delta T)$, αναλύεται σε επίσης περιοδικό σήμα στη διακριτή συχνότητα. όπου, ΔT είναι το διάστημα ή περίοδος δειγματοληψίας (sampling period / interval) N περίοδος του διακριτού σήματος.

Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) δίνεται από τον τύπο:

$$X_D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta T) e^{-j2\pi nk/N} \text{ όπου } n = 0, 1, \dots, N-1$$

ενώ ο αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier (IDFT) δίνεται από τον τύπο:

$$x(k\Delta T) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_D(n) e^{j2\pi nk/N} \text{ όπου } k = 0, 1, \dots, N-1$$

Στους ανωτέρω ορισμούς, η ψηφιακή συχνότητα ισούται με $2\pi n/N$. (Medwin, 1998)

8.5.5 Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform - FFT)

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για τον υπολογισμό του DFT, όπως για παράδειγμα η λύση των γραμμικών εξισώσεων. Ο πιο ευρείας χρήση τρόπος και ταυτόχρονα πιο αποδοτικός είναι ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier Fast Fourier Transform-FFT), ο οποίος αποτελεί έναν εξαιρετικά γρήγορο υπολογιστικό αλγόριθμο του DFT και είναι αυτός που στην πράξη υλοποιείται αντί του DFT. Ο FFT, ομαδοποιώντας κατάλληλα τις εισόδους πριν από την εκτέλεση των πολλαπλασιασμών, επιτυγχάνει να καταλήξει στο ίδιο μαθηματικό αποτέλεσμα με τον DFT έχοντας εφαρμόσει πολύ λιγότερες αριθμητικές πράξεις. Το πλήθος των απαιτούμενων μιγαδικών πολλαπλασιασμών για τον υπολογισμό του FFT, είναι:

$$\frac{N}{2} \log_2 N \text{ όπου } N \text{ δύναμη του } 2$$

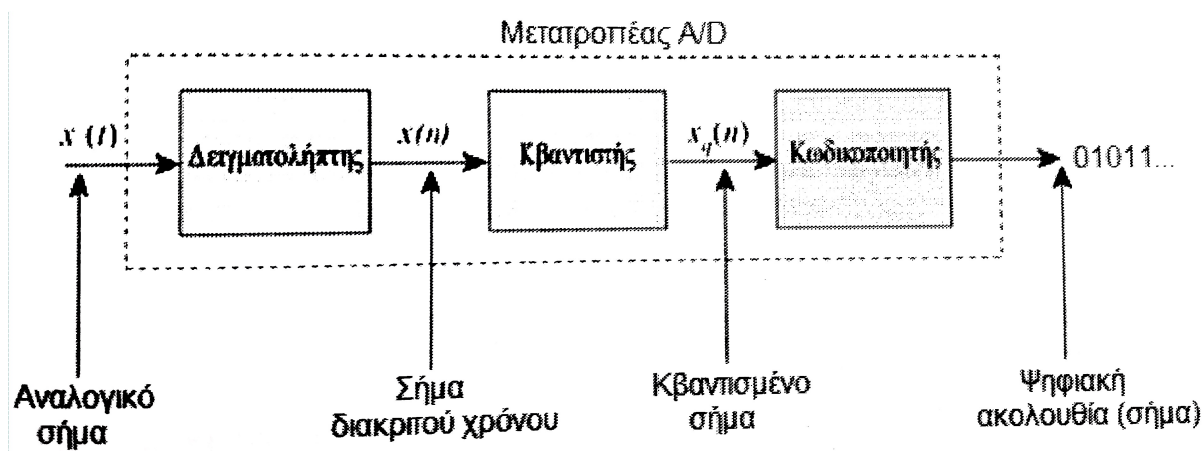
Για παράδειγμα για τον υπολογισμό του DFT ενός διακριτού σήματος 1024 δειγμάτων, απαιτούνται $1024^2 = 1.048.576$ μιγαδικοί πολλαπλασιασμοί, ενώ για τον υπολογισμό του αντίστοιχου FFT απαιτούνται μόλις $\left(\frac{1024}{2}\right) \log_2 1024 = 5120$ μιγαδικοί πολλαπλασιασμοί.

8.6 Δειγματοληψία – Κβάντιση

Τα διάφορα σήματα που συναντάμε στη φύση είναι όλα αναλογικά (ακουστικά, ηλεκτρομαγνητικά κτλ). Όμως, πριν από την οποιαδήποτε επεξεργασία των σημάτων αυτών (φασματική ανάλυση κτλ), μας διευκολύνει η μετατροπή τους σε ψηφιακά. Η μετατροπή αυτή, εκτελείται με δύο διαδοχικές διεργασίες: τη δειγματοληψία και την κβάντιση.

Η δειγματοληψία (sampling) είναι η διαδικασία μετατροπής ενός αναλογικού σήματος σε διακριτού χρόνου. Σε καθορισμένες χρονικές στιγμές, παίρνουμε δείγματα του αναλογικού σήματος $x(t)$, τα οποία αποτελούν τις τιμές του διακριτού σήματος $x(n)$. Ουσιαστικά, τα αναλογικά αποτελούν διακριτά σήματα με άπειρη συχνότητα δειγματοληψίας.

Η κβάντιση ή ψηφιοποίηση (quantization ή digitization) ακολουθεί τη δειγματοληψία και αποτελεί τη διαδικασία μετατροπής ενός σήματος διακριτού χρόνου σε ψηφιακό (digital), δηλαδή σε διακριτές τιμές, οι οποίες κωδικοποιούνται σε μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων 0 και 1.



Εικόνα 59 Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, μέσω των διαδικασιών δειγματοληψίας και κβάντισης. (Σάγος, 2019, σ.479)

8.6.1 Θεώρημα δειγματοληψίας

Σημαντικό χαρακτηριστικό της δειγματοληψίας είναι η συχνότητα με την οποία εκτελείται. Η μεταφορά ενός σήματος από τον αναλογικό στο διακριτό χρόνο, διέπεται από το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon¹⁴, σύμφωνα με το οποίο η συχνότητα δειγματοληψίας f_s (sampling rate/frequency) θα πρέπει να υπερβαίνει το διπλάσιο της μέγιστης συχνότητας f_{max} των συνιστωσών του αναλογικού σήματος:

$$f_s > 2f_{max}$$

Η συνθήκη αυτή (ή **κριτήριο Nyquist**) είναι ικανή και αναγκαία ώστε να υπάρχει δυνατότητα ανάκτησης όλων των συνιστωσών συχνοτήτων (πληροφοριών) του αρχικού αναλογικού σήματος, από την f_{max} και κάτω. Η ελάχιστη (οριακή) συχνότητα δειγματοληψίας f_s λέγεται και **ρυθμός Nyquist**.

Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών δειγμάτων ΔT λέγεται περίοδος ή διάστημα δειγματοληψίας (sampling period/interval). Μέσα στα ενδιάμεσα χρονικά διαστήματα μεταξύ των δειγμάτων αποσβένονται διάφορα μεταβατικά φαινόμενα και αποκαθίσταται η σταθερότητα των κυκλωμάτων δειγματοληψίας.

¹⁴ Claude E. Shannon (1915-2001) : Μαθηματικός , θεμελιωτής της θεωρίας της πληροφορικής.

Η χρονική διάρκεια του τμήματος εκείνου του αναλογικού σήματος που καταχωρείται για δειγματοληψία και περαιτέρω επεξεργασία, λέγεται **χρόνος ή μήκος καταγραφής / παρατήρησης TR (time record ή record length)**. Εάν η ακρίβεια ανάλυσης συχνότητας (frequency resolution) είναι Δf και το συνολικό πλήθος των δειγμάτων μέσα στο διάστημα ενός μήκους καταγραφής TR είναι N , τότε ισχύουν οι ακόλουθες απλές σχέσεις:

$$f_s > 2f_{max} = N\Delta f$$

$$TR = N\Delta T$$

$$f_s = \frac{1}{\Delta T}$$

$$\Delta F = \frac{1}{TR}$$

Η συχνότητα $\frac{f_s}{2}$ αποκαλείται συχνότητα αναδίπλωσης (folding frequency) και ισούται με την f_{max} . (Ross, 1976)

8.7 Αντιμετώπιση θορύβου

Ο θόρυβος υπάρχει πάντοτε κι είναι ανεπιθύμητος, τόσο στα αναλογικά όσο και στα ψηφιακά συστήματα επεξεργασίας. Ειδικότερα στην περίπτωση της ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων ο θόρυβος μπορεί να αντιμετωπιστεί καλύτερα, αφού πχ η φασματική ανάλυση Fourier διαθέτει εγγενώς τη δυνατότητα αυτή. Πέραν όμως αυτού, εφαρμόζονται και ορισμένες ιδιαίτερες τεχνικές μείωσης της επίδρασης του θορύβου, οι βασικότερες από τις οποίες εξετάζονται στη συνέχεια.

8.7.1 Οι αλγόριθμοι ALE (Adaptive Line Enhancement)

Οι αλγόριθμοι **ALE (Adaptive Line Enhancement)** έχουν σκοπό την επαύξηση της ικανότητας εντοπισμού ασθενών, σταθερών διακριτών φασματικών συνιστωσών (αγνώστων

στην γενική περίπτωση), δηλαδή σημάτων στενού φάσματος (tonals) Μέσα στον ισχυρό θόρυβο ευρέως φάσματος του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Ένας αλγόριθμος ALE, μπορεί για παράδειγμα να επενεργεί κατ' επιλογή του χειριστή στο μιγαδικό φάσμα εξόδου του αλγορίθμου FFT της συσκευής, και να βελτιώνει τόσο στο κατώφλι εντοπισμού DT (Detection Threshold) όσο και την ανάλυση συχνοτήτων (frequency resolution). Οι αλγόριθμοι αυτοί, βασίζονται στη χρήση προσαρμοσμένων φίλτρων (adaptive filters). Αποτελούν ειδικές μορφές αλγορίθμων ακύρωσης θορύβου ANC (Adaptive Noise Cancellers), που καταπιέζουν το θόρυβο ευρέως φάσματος και επιτρέπουν τη διέλευση των διακριτών συχνοτήτων (tonals) με ελάχιστες απώλειες. (Σάγος, 2019)

ΜΕΡΟΣ Β'

9. Μεταφορά της επιστημονικής γνώσης στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση

ΕΝΟΤΗΤΑ: Ήχος

9.1 Σχέδιο μαθήματος για τη μελέτη στάσιμων ηχητικών κυμάτων σε σωλήνα Kundt και υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου στον αέρα

A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

ΔΙΑΡΚΕΙΑ: 4 διδακτικές ώρες

Η άσκηση απευθύνεται σε μαθητές Λυκείου και εκτελείται στο εργαστήριο από τους μαθητές με την υποστήριξη του καθηγητή.

B. ΔΙΔΑΚΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ:

- Η εξοικείωση με τη χρήση απλών πειραματικών διατάξεων και με τη χρήση των αισθητήρων (μικρόφωνου, διαστήματος).
- Η εξοικείωση με τη χρήση γεννήτριας ακουστικών συχνοτήτων.
- Η αισθητοποίηση του φαινομένου του ηχητικού συντονισμού.
- Η ικανότητα εύρεσης των μέγιστων του στάσιμου ακουστικού κύματος.
- Η εξοικείωση με μετρήσεις μήκους.
- Η εφαρμογή θεωρητικών γνώσεων στην εξαναγκασμένη ταλάντωση όγκου αέρα.
- Ο πειραματικός υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου στον αέρα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Η κατανόηση και η εκτίμηση των σφαλμάτων που υπεισέρχονται κατά τις μετρήσεις.

Γ. ΟΡΓΑΝΑ:

- Διαφανής κυλινδρικός σωλήνας Kundt με έμβολο πάνω σε βάση.
- Μεγάφωνο ενσωματωμένο στη βάση κοντά στο ανοικτό άκρο του σωλήνα.

- Γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων.
- Ψηφιακό θερμόμετρο χώρου.

Δ. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ:

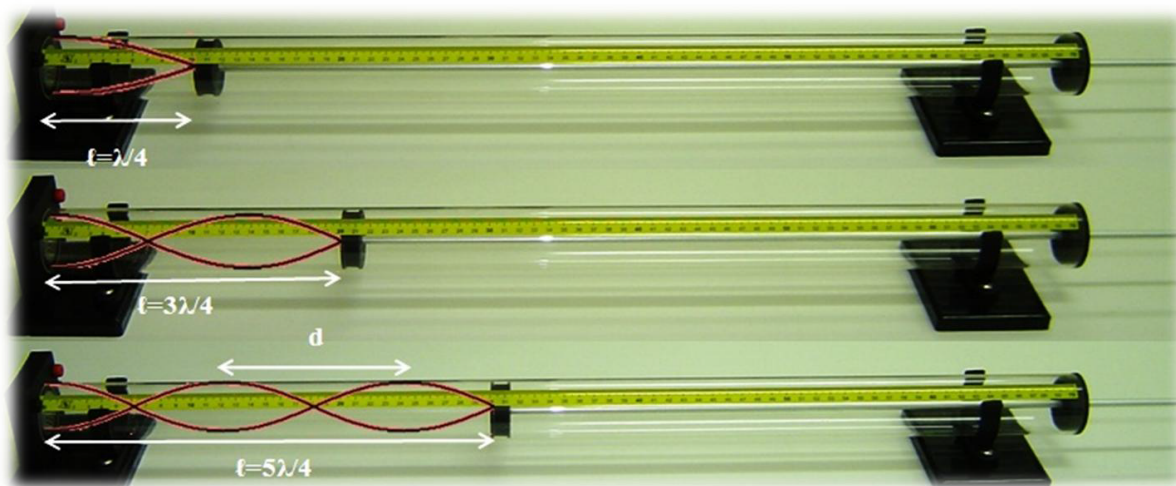
Τα σώματα, τα οποία όταν ταλαντώνονται μπορούν να παράγουν ήχους καλούνται ηχητικές πηγές. Υπάρχουν απλοί ήχοι που οφείλονται σε αρμονική μεταβολή της πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα, σύνθετοι ήχοι που οφείλονται σε μια περιοδική, όχι αρμονική μεταβολή της πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα και αναλύονται σε άπειρους το πλήθος απλούς ήχους, που οι συχνότητες τους είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας θεμελιώδους συχνότητας. Από αυτούς τους απλούς ήχους εκείνος που έχει την μικρότερη συχνότητα λέγεται πρώτος αρμονικός ενώ οι άλλοι αρμονικοί ανώτερης τάξης. Επίσης υπάρχουν θόρυβοι και κρότοι. Για την μελέτη του φαινομένου των στάσιμων κυμάτων σε σωλήνα, λαμβάνουμε υπόψη το γεγονός ότι τα ηχητικά κύματα είναι διαμήκη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια της διάδοσης ενός ηχητικού κύματος στον αέρα, να έχουμε πυκνώματα και αραιώματα αέρα. Στα ανοικτά άκρα δημιουργούνται πάντα κοιλίες κίνησης και ενδιάμεσα δημιουργούνται δεσμοί. Ο αέρας που βρίσκεται στον σωλήνα έχει τη δική του συχνότητα δόνησης και με κατάλληλη διέγερση μπορούν να δημιουργηθούν μόνιμα στάσιμα κύματα από τη συμβολή του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος.

Στην παρούσα περίπτωση ο όγκος του αέρα περιορίζεται από κυλινδρικό δοχείο ανοικτό στο ένα άκρο, το άλλο άκρο του οποίου μπορεί να είναι μεταβλητό μέσω εμβόλου. Η διέγερση του όγκου του αέρα γίνεται από το ηχητικό κύμα που εκπέμπεται από μεγάφωνο, το οποίο τροφοδοτείται από γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων.

Στην επιφάνεια του εμβόλου αντιστοιχεί πάντοτε δεσμικό σημείο κίνησης του στάσιμου κύματος, ενώ στο ανοικτό άκρο του σωλήνα κατά τον συντονισμό αντιστοιχεί κοιλία κίνησης. Κατά την έναρξη του πειράματος έχουμε το έμβολο κοντά στο ανοικτό άκρο και επιδιώκουμε συντονισμό απομακρύνοντας το έμβολο. Ο συντονισμός εντοπίζεται από την ενίσχυση του ήχου, που παράγεται από τον δονούμενο όγκο αέρα .

Με απομάκρυνση του εμβόλου επιτυγχάνεται ενίσχυση του ήχου διαδοχικά στην πρώτη, δεύτερη, τρίτη κ.λ.π. θέση συντονισμού. Ο συντονισμός επιτυγχάνεται όταν το μήκος της στήλης του αέρα είναι περιττό πολλαπλάσιο του $\lambda/4$, δηλαδή όταν μεταξύ του μήκους ℓ της στήλης αέρα και του μήκους κύματος λ ισχύει η σχέση:

$$l = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} \rightarrow \lambda = \frac{4l}{2n+1} \quad (1) \quad \text{όπου } n=0,1,2,3,\dots$$



Εικόνα 60 Μετρήσεις μηκών κατά των οποίων επιτυγχάνονται οι συντονισμοί

Από την εξίσωση (1) υπολογίζουμε το μήκος κύματος λ , αν εφαρμοστεί για κάποια τιμή του n και μετρήσουμε το αντίστοιχο l .

Για διευκόλυνσή μας υπολογίζουμε τη διαφορά της απόστασης ανάμεσα σε δύο μέγιστα και έχουμε το $\lambda / 2$.

Με γνωστά το μήκος κύματος λ και τη συχνότητα f του ήχου βρίσκουμε την ταχύτητα του ήχου στον αέρα από τη σχέση :

$$u = \lambda \cdot f \quad (2)$$

Επειδή η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, σύμφωνα με τη σχέση:

$$u_{\theta} = u_0' \cdot \sqrt{1 + \frac{\theta}{273}} \Rightarrow u_0' = u_{\theta} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{273+\theta}{273}}} \quad (3)$$

υπολογίζουμε την ταχύτητα του ήχου στον αέρα u_0' στη θερμοκρασία 0°C και γνωρίζοντας ότι στη θερμοκρασία αυτή η θεωρητική τιμή της είναι $u_0 = 331 \text{ m/s}$ βρίσκουμε την % απόκλιση της πειραματικής τιμής από τη θεωρητική.

$$\alpha = \frac{u_{\Theta\text{ΕΩΡ}} - u_{\Pi\text{ΕΙΡ}}}{u_{\Theta\text{ΕΩΡ}}} \cdot \% \quad (4)$$

Διόρθωση του μήκους κύματος λ :

Στην πραγματικότητα η πρώτη κοιλία κίνησης δημιουργείται ελαφρά έξω από το χείλος του σωλήνα. Αν θέλουμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια το μήκος κύματος από το πρώτο μέγιστο του ήχου που ακούμε εργαζόμαστε ως εξής:

Αν η κοιλία του στάσιμου κύματος σχηματίζεται σε απόσταση s από το χείλος του σωλήνα, τότε η εξίσωση (1) για τις δύο πρώτες τιμές του n δίνει :

$$l_1 + s = \frac{\lambda}{4} \quad (5)$$

$$l_2 + s = 3 \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (6)$$

Με επίλυση του συστήματος των δύο εξισώσεων βρίσκουμε τη διόρθωση s και το ζητούμενο μήκος κύματος λ :

$$s = l_2 - 3 \cdot \frac{l_1}{2} \quad (7)$$

$$\lambda = 4 \cdot l_1 + s \quad (8)$$



Εικόνα 59 Απόσπασμα από το Περιοδικό Γεωσεισμοί (Δρ. Ευθύμιος Λέκκας, Καθηγητής Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών)

Το μάθημα ξεκινά με συζήτηση στην τάξη και σχολιασμό της παραπάνω φωτογραφίας (βλέπε εικόνα 59).

Βλέπουμε το «τυχαίο χτύπημα» του Εγκέλαδου στον μεγάλο σεισμό της Τουρκίας. Ανάλογο φαινόμενο είχαμε στο σεισμό της Πάρνηθας το 1999. Στο μεγάλο σεισμό του 1995, στο Di-nor της Τουρκίας, πέντε δημόσια κτήρια κατασκευασμένα με το ΙΔΙΟ σχέδιο, την ΙΔΙΑ χρονιά, από τον ΙΔΙΟ κατασκευαστή, με τα ΙΔΙΑ χρήση και στην ΙΔΙΑ περιοχή - σε ΙΔΙΟ έδαφος- δέχτηκαν σεισμική δόνηση 6,1 ρίχτερ.

Το πρώτο παρέμεινε όρθιο, το δεύτερο κατέρρευσε, το τρίτο έμεινε όρθιο, το τέταρτο κατέρρευσε και το πέμπτο έμεινε όρθιο.

Οι μαθητές καλούνται να σχολιάσουν τι μπορεί να είχε συμβεί στο γήινο υπέδαφος των κτηρίων.

.....

.....

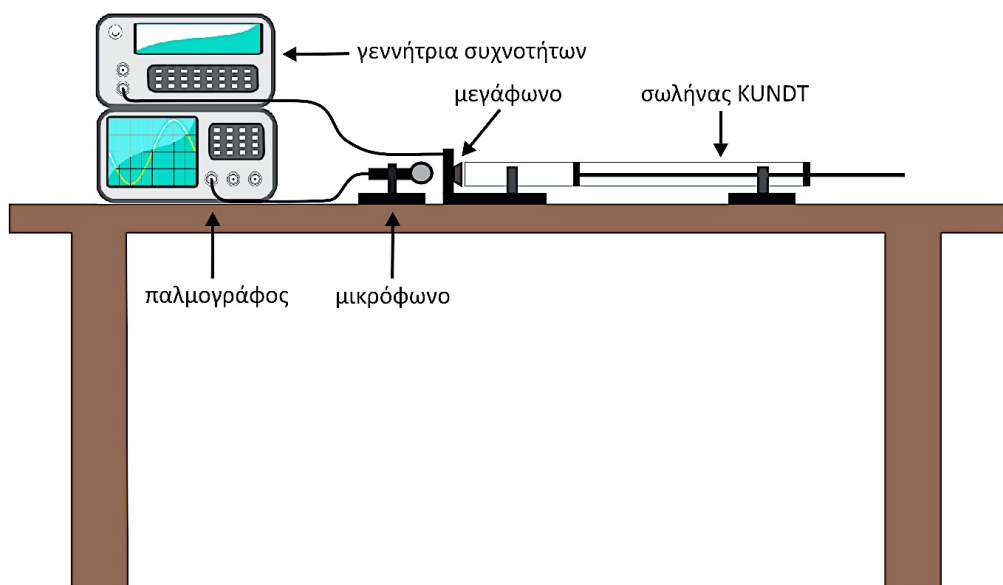
.....

.....

Ε. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Ήχος γνωστής συχνότητας διεγείρει σε εξαναγκασμένη ταλάντωση όγκο αέρα, στο εσωτερικό σωλήνα, του οποίου η ιδιοσυχνότητα μπορεί να μεταβάλλεται. Κατά τον συντονισμό μετράμε το μήκος κύματος λ και από αυτό βρίσκουμε πειραματικά την ταχύτητα v του ήχου στον αέρα σε θερμοκρασία δωματίου.

ΣΤ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



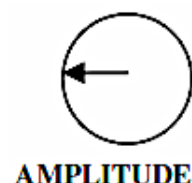
Εικόνα 61 Συνδεσμολογία πειραματικής διάταξης

1. Τοποθετούμε τη συσκευή με τον σωλήνα και το μεγάφωνο στον πάγκο εργασίας. Το μεγάφωνο του σωλήνα Kundt συνδέεται στην έξοδο SIGNAL OUT της γεννήτριας συχνοτήτων.
2. Το μικρόφωνο τοποθετείται ακριβώς πίσω από το μεγάφωνο του σωλήνα, συνδέεται στην είσοδο CH1 του παλμογράφου και χρησιμεύει για να έχουμε εκτός από ακουστική και οπτική ένδειξη της μεγιστοποίησης της έντασης του ήχου. Θα ήταν προτιμότερο να τοποθετηθεί δίπλα στο σωλήνα Kundt και κάθετα προς αυτόν, αλλά σε μια τέτοια περίπτωση θα χρειαζόταν κατάλληλος προενισχυτής του μικροφωνικού σήματος. Χρησιμοποιούμε επίσης θερμόμετρο για την καταγραφή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του

πειράματος.

3. Συνδέουμε το μεγάφωνο με τη γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων, προσέχοντας την πολικότητα του μεγαφώνου. Μετακινούμε το έμβολο, ώστε να βρίσκεται κοντά στο ανοικτό χείλος του σωλήνα (προς το μεγάφωνο).
4. Συνδέουμε τη γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων στο δίκτυο, τη θέτουμε σε λειτουργία και επιλέγουμε ημιτονική συχνότητα εργασίας 800 Hz.

5. Προσοχή το κομβίο AMPLITUDE το στρέφουμε πολύ λίγο (ώστε να αντιστοιχεί στη θέση 9 του ωρολογιακού δίσκου) γιατί κινδυνεύει να καεί το μεγάφωνο της συσκευής.



6. Με τη βοήθεια της ειδικής λαβής έλκουμε αργά το έμβολο προς την άλλη άκρη του σωλήνα και παρατηρούμε την σταδιακή αύξηση της έντασης του ήχου. Συνεχίζουμε μέχρι τη θέση εκείνη που εντοπίζουμε το δεύτερο μέγιστο της έντασης του ήχου (δεύτερη θέση συντονισμού).

7. Με τον κανόνα μετρήσατε το μήκος L_2 του σωλήνα που είναι μπροστά από το έμβολο και σημειώστε το στον πίνακα ΠΚ1.

8. Χωρίς να μεταβάλλετε τη συχνότητα της πηγής, συνεχίσετε να έλκετε το έμβολο μέχρι να προσδιορίσετε τη θέση που έχουμε και πάλι συντονισμό. Μετρήσατε το μήκος L_3 και σημειώστε το στον πίνακα ΠΚ1.

Επαναλάβετε τα βήματα 5,6,7 και βρείτε τις μέσες τιμές L_{2M} και L_{3M} .

9. Επανατοποθετήσατε το έμβολο στην άκρη του σωλήνα και επιλέξατε συχνότητα 1000 Hz. Αρχίσατε να έλκετε αργά το έμβολο μέχρι να προσδιορίσετε τη θέση του δεύτερου και του τρίτου συντονισμού. Σημειώσατε στον πίνακα ΠΚ1 τις τιμές των μηκών L_{2M} και L_{3M} . Επαναλάβετε τις μετρήσεις και βρείτε τις μέσες τιμές L_{2M} και L_{3M} .

10. Συνεχίσατε με συχνότητες 1200 Hz , 1400 Hz και 1600 Hz.

11. Συμπληρώσατε τον πίνακα ΠΚ1 και κάνετε σε μιλιμετρέ χαρτί τη γραφική παράσταση του αθροίσματος λ συναρτήσει του $1/f$.

12. Υπολογίσατε την κλίση της ευθείας και την τιμή της ταχύτητας του ήχου στον αέρα.

$u_{\text{πειρ}} = \text{κλίση της ευθείας} = \dots\dots\dots \text{m/sec}$

Θερμοκρασία $\theta = \dots\dots\dots$ $^{\circ}\text{C}$

Θεωρητικός υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου $u_{\text{θεωρ}} = \dots\dots\dots$ m/sec

($u_0 = 331$ m/s)

13. Υπολογίσατε το % σφάλμα της πειραματικής μέτρησης της ταχύτητας του ήχου.

% σφάλμα = $\dots\dots\dots$

14. Γυρίστε στο βήμα 11 και κάνετε σε μιλλιμετρέ χαρτί τη γραφική παράσταση $L_{2M} + L_{3M}$ συναρτήσει του $1/f$. Υπολογίστε τη διόρθωση μήκους x του σωλήνα από το σημείο τομής της ευθείας με τον άξονα x .

Σημείο τομής της ευθείας με τον κατακόρυφο άξονα $\dots\dots\dots = -2x$

Άρα $x = \dots\dots\dots$ cm.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΚ 1 $\theta = \dots\dots\dots$ $^{\circ}\text{C}$

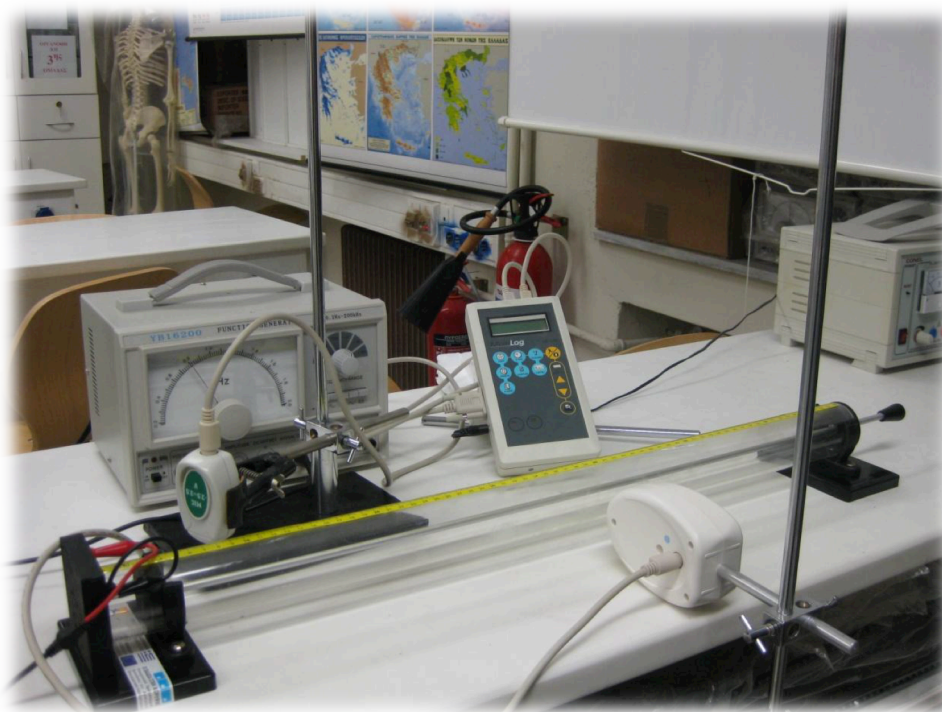
Συχνότητα f (Hz)	2ος συντονισμός μήκος L_2 (cm)	L_{2M}	3ος συντονισμός μήκος L_3 (cm)	L_{3M}	λ (cm)	$1/f \times 10^{-3}$ (sec)
800						
1000						
1200						
1400						
1600						

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ (λ ως προς $1/f$)

Η. Σύστημα Συγχρονικής Λήψης – Απεικόνισης

Χρησιμοποιεί στην οπτικοποίηση της μεταβολής της πίεσης του αέρα, μέσω του μικροφώνου, που η λειτουργία του προσομοιάζει με τη λειτουργία του ανθρώπινου αυτιού.

1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ



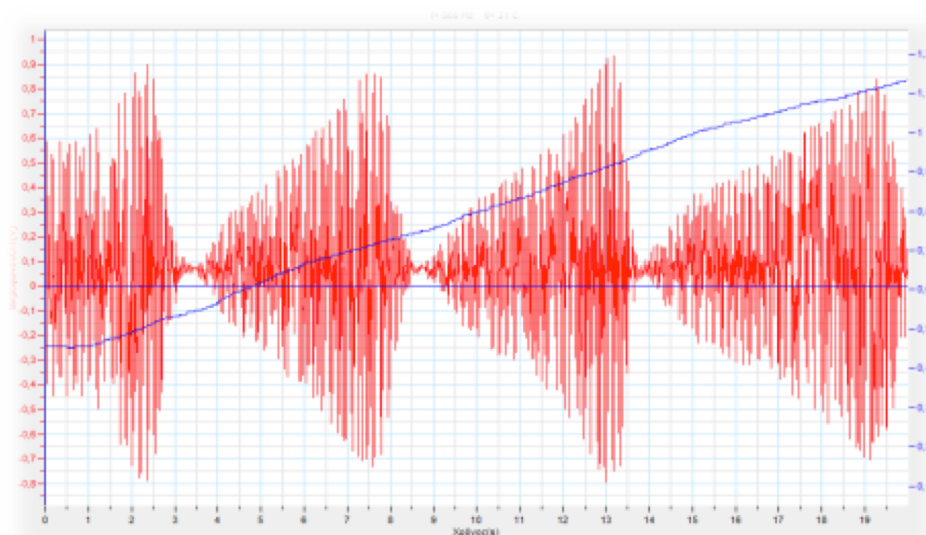
Εικόνα 62 Συνδεσμολογία της πειραματικής διάταξης

2. ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η λήψη των μετρήσεων γίνεται από τους μαθητές, με τη βοήθεια / επίβλεψη του καθηγητή.

- i. Πιέζουμε το εικονίδιο λήψης δεδομένων στη γραμμή εργαλείων για να αρχίσει η καταγραφή. Ταυτόχρονα μετακινούμε το έμβολο του σωλήνα προς τα έξω με αργό και σταθερό ρυθμό, οπότε παρατηρούμε την ένταση του ήχου να αυξομειώνεται.

Στην οθόνη του υπολογιστή καταγράφονται ταυτόχρονα ο ήχος με τα μέγιστα και ελάχιστα του (κόκκινη παράσταση) και η απόσταση του εμβόλου από τον αισθητήρα του διαστήματος (μπλε γραμμή).



Εικόνα 63 Καταγραφή του ήχου κατά την μετακίνηση του εμβόλου

- ii. Πριν την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων αποθηκεύουμε την μέτρηση πιέζοντας το πλήκτρο "**Αποθήκευση**" στη γραμμή εργαλείων.
- iii. Με τις δυνατότητες που μας παρέχει το λογισμικό, επεξεργαζόμαστε τα πειραματικά αποτελέσματα. Η απόσταση των διαδοχικών μεγίστων αντιστοιχεί στο μισό του μήκους κύματος. Εμφανίζουμε τους δύο δείκτες και με το ποντίκι τους σύρουμε πάνω στα διαδοχικά μέγιστα ώστε να μετρήσουμε τις αποστάσεις τους. Οι τιμές της απόστασης των επιλεγμένων σημείων εμφανίζονται στη γραμμή πληροφοριών, στο κάτω μέρος της οθόνης.
- iv. Μεταφέρουμε στον ΠΙΝΑΚΑ 1 τις τιμές των αποστάσεων των διαδοχικών μεγίστων που μετρήσαμε.
- v. Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για συχνότητες 800, 1000, 1200, 1400, 1600 Hz.
- vi. Σε μιλλιμετρέ χαρτί σχεδιάζουμε τη γραφική παράσταση της $1 / f$ ως προς λ , η οποία προσεγγίζεται από την καλύτερη ευθεία.

- vii. Υπολογίζουμε την κλίση της ευθείας η οποία εκφράζει την ταχύτητα του ήχου στην θερμοκρασία του πειράματος.
- viii. Υπολογίζουμε την θεωρητική τιμή της ταχύτητας στην θερμοκρασία του πειράματος. Υπολογίζουμε την απόκλιση α % της πειραματικής τιμής από τη θεωρητική. Σε ποια σφάλματα στις μετρήσεις μπορεί να οφείλεται η απόκλιση αυτή;
- ix. Με βάση τη ταχύτητα που υπολογίσαμε πειραματικά, υποδείξτε μέθοδο μέτρησης άγνωστης ακουστικής συχνότητας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 $\theta = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$

Συχνότητα f (Hz)	$1/f \cdot 10^{-3}$ (sec)	λ (m)
800		
1000		
1200		
1400		
1600		

Θ. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΣΤΙΣ ΟΜΑΔΕΣ, ΣΤΗΝ ΤΑΞΗ, ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ:

1. Σε ποιους παράγοντες μπορεί να οφείλεται το σφάλμα στη μέτρηση των μηκών L στον σωλήνα;

.....
.....

2. Πόση είναι η απόσταση μεταξύ δύο κοιλιών;

.....
.....

3. Η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από τη συχνότητα της ηχητικής πηγής;

.....
.....

4. Ποια η διαφορά μεταξύ της ταχύτητας διάδοσης κύματος και της ταχύτητας ταλάντωσης των σημείων του ελαστικού μέσου;

.....
.....

Ι. ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΠΙΤΙ

Περιηγηθείτε στο διαδίκτυο και καταγράψτε πληροφορίες για τα στάσιμα κύματα που δημιουργούνται στην αέρια στήλη στο κλαρίνο.

9.2 Σχέδιο μαθήματος για τη μελέτη της ταχύτητας του ήχου στα ρευστά (νερό).

Α. ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

Η εργαστηριακή άσκηση απευθύνεται σε μαθητές Λυκείου και έχει διάρκεια 4 διδακτικές ώρες.

Β. ΔΙΔΑΚΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ:

- Η εξοικείωση με τη χρήση απλών πειραματικών διατάξεων και με τη χρήση των αισθητήρων.
- Προσδιορισμός του μήκους κύματος του ήχου στα ρευστά (νερό) μέσω της προβολής του ειδώλου πάνω σε πέτασμα και στη συνέχεια ο υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου.
- Μελέτη της εξάρτησης της ταχύτητας του ήχου από τη θερμοκρασία του ρευστού.

Γ. ΟΡΓΑΝΑ:



Εικόνα 64 Πειραματική διάταξη

- (1) Παλμογράφος.
- (2) Πηγή υπερήχων.
- (3) Τροφοδοτικό πηγής υπερήχων.
- (4) Φακός, συγκλίνων με εστιακή απόσταση +20mm.
- (5) Πέτασμα.

Προσοχή: Φροντίζετε να έχετε τη γεννήτρια των υπερήχων κλειστή, όταν η κεφαλή της βρίσκεται έξω από το υγρό (υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης).

Δ. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ:

Ήχος

Ο ήχος είναι μηχανικό διαμήκες κύμα (longitudinal wave) ενώ το φως είναι εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Ήχο γενικά καλούμε το αίτιο, το οποίο διεγείρει το αισθητήριο της ακοής. Ο ήχος δε διαδίδεται στο κενό, γιατί είναι μηχανικό κύμα και χρειάζεται υλικό μέσο, π.χ. άτομα ή μόρια αερίων – υγρών – στερεών, για να διαδοθεί. Τα ηχητικά κύματα είναι τα κύματα που προκαλούνται σε ένα μέσο λόγω παλμικής κίνησης του μέσου.

Ο ήχος είναι μηχανικό (ελαστικό) κύμα, γιατί η ταχύτητα διάδοσης του εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης και την πυκνότητα του. Οι ήχοι που μπορεί να ακούσει ο άνθρωπος βρίσκονται στην περιοχή συχνοτήτων 16Hz–20.000Hz. Τα ηχητικά κύματα είναι διαμήκη κύματα, γιατί οι ταλαντώσεις των σωματιδίων του μέσου γίνονται κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Παρατηρούμε ότι σε άλλες περιοχές προκύπτει πύκνωμα και σε άλλες αραιώμα των σωματιδίων του μέσου (πυκνώματα και αραιώματα). Τα διαμήκη κύματα, όπως και τα εγκάρσια, διακρίνονται σε διαδιδόμενα ή τρέχοντα, όπου συμβαίνει μετακίνηση της φάσης και μεταφορά της ενέργειας από σημείο του μέσου σε άλλο σημείο, και σε στάσιμα κύματα, όπου η φάση δε μετατοπίζεται και η ενέργεια δε μεταφέρεται.

Στα στάσιμα κύματα τα σημεία του μέσου που παραμένουν συνεχώς ακίνητα ονομάζονται δεσμοί, και απέχουν απόσταση ίση με το μισό του μήκους κύματος. Τα σημεία που βρίσκονται στο μέσον της απόστασης μεταξύ δύο δεσμών και ονομάζονται κοιλίες, και ταλαντώνονται με το μέγιστο πλάτος. Κατά τη διάδοση ενός στάσιμου κύματος δε συμβαίνει μεταφορά ύλης του μέσου αλλά μόνο διάδοση ενέργειας, και αυτό μόνο στα τρέχοντα

κύματα, σε αντίθεση με τα στάσιμα, όπου δε μεταφέρεται ενέργεια.

Ταχύτητα διάδοσης ηχητικών κυμάτων

Η ταχύτητα του ήχου είναι η απόσταση που διανύθηκε κατά τη διάρκεια μιας μονάδας του χρόνου από ένα ηχητικό κύμα που διαδίδεται σε ελαστικό μέσο. Σε ξηρό αέρα στους 20°C, η ταχύτητα του ήχου είναι 343,2m/s. Αυτό ισοδυναμεί με 1235,62km/h, ή περίπου 1km ανά 3s. Συνήθως η ταχύτητα του ήχου αναφέρεται στην ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων στον αέρα. Ωστόσο, η ταχύτητα του ήχου διαφέρει από υλικό σε υλικό. Ο ήχος ταξιδεύει ταχύτερα σε υγρά και μη πορώδη στερεά από ό,τι στον αέρα. Ταξιδεύει περίπου 4,3 φορές πιο γρήγορα στο νερό (1484m/s) και σχεδόν 15 φορές πιο γρήγορα σε σίδηρο (5120m/s), σε σχέση με τον αέρα στους 20°C.

Η ταχύτητα του ήχου μέσα σε ένα υλικό εξαρτάται από το μέτρο της σκληρότητας αυτού του υλικού (η αντίσταση που παρουσιάζει ένα ελαστικό υλικό κατά την παραμόρφωσή του, όταν ασκείται σε αυτό μια δύναμη), και από την πυκνότητά του.

Για παράδειγμα, ο ήχος θα ταξιδέψει 1,59 φορές γρηγορότερα στο νικέλιο (Ni) από ό,τι στο χαλκό (Cu), λόγω της μεγαλύτερης ακαμψίας του νικελίου παρόλο που έχουν περίπου την ίδια πυκνότητα. Ο ήχος ταξιδεύει περίπου 1,41 φορές πιο γρήγορα στο ελαφρύτερο αέριο του υδρογόνου (πρώτιο) σε σύγκριση με το βαρύτερο υδρογόνο (δευτέριο). Το δευτέριο έχει παρόμοιες ιδιότητες με το πρώτιο, αλλά είναι δύο φορές πυκνότερο από το πρώτιο. Ο ήχος ταξιδεύει πιο γρήγορα στα στερεά από ό,τι στα υγρά, και ταχύτερα στα υγρά από ό,τι στα αέρια, γιατί τα στερεά είναι πιο δύσκολο να συμπιεστούν από τα υγρά, και τα υγρά, με τη σειρά τους, είναι πιο δύσκολο να συμπιεστούν από τα αέρια.

Η ταχύτητα του ήχου σε ένα μέσο, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1)$$

όπου K η σκληρότητα του ελαστικού υλικού (N/m^2) και ρ η πυκνότητα του υλικού (kg/m^3). Όταν το μέσο είναι εκτεταμένο στερεό ή υγρό ή αέριο το K παριστά το μέτρο ελαστικότητας όγκου. Για επίμηκες στερεό μέσο (π.χ. ράβδο ή σύρμα), το K αντικαθίσταται με το μέτρο του Young, E .

Επειδή η πυκνότητα του μέσου αλλάζει με τη θερμοκρασία, σημαίνει ότι και η ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα σε αυτό το μέσο αλλάζει.

Σε αέριο μέσο στη σχέση (1), το K μπορεί να αντικατασταθεί με το $\gamma = C_P/C_V$, εφόσον θεωρήσουμε ότι τα πυκνώματα και τα αραιώματα μέσα στο αέριο συμβαίνουν σε αδιαβατικές συνθήκες (C_P και C_V είναι η θερμοχωρητικότητα του μέσου υπό συνθήκες σταθερής πίεσης και σταθερού όγκου αντίστοιχα).

ΠΙΝΑΚΑΣ 5

Υγρό	Ταχύτητα ήχου (m/s)
Οξικό οξύ	1.584
Ακετόνη	1.174
Αιθυλική αλκοόλη (αιθανόλη)	1.144
Βενζίνη	1.298
Χλωροφόρμιο	995
Αιθέρας	985
Γλυκερίνη	1.904
Κηροζίνη	1.324
Υδράργυρος	1.450
Μεθυλική αλκοόλη (Μεθανόλη)	1.143
Φαινόλη	1.274

ΠΙΝΑΚΑΣ 6

Θερμοκρασία (°C)	Ταχύτητα του ήχου (m/s)
0	1.403
5	1.427
10	1.447
20	1.481
25	1.493
30	1.507
40	1.526
50	1.541
60	1.552
70	1.555
80	1.555
90	1.550
100	1.543

Ένταση του ήχου

Ένταση του ήχου σε κάποια περιοχή του χώρου ορίζεται το ποσό της ενέργειας του ήχου της διερχόμενης ανά μονάδα υποθετικής επιφάνειας, η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του ήχου στην εν λόγω περιοχή, μέσα σε κάποιο χρόνο δια του χρόνου αυτού. Δηλαδή είναι η ροή της ενέργειας του ήχου.

Υπέρηχοι

Ένα υπερηχητικό κύμα (ultrasonic wave) είναι ένα ηχητικό κύμα με συχνότητα μεγαλύτερη των 20kHz. Λόγω του πολύ μικρού μήκους κύματος των υπερηχητικών κυμάτων (συγκρίσιμο με το μήκος κύματος των ακτίνων X) έχουν μεγάλη διεισδυτική δύναμη. Το ανθρώπινο αυτί δεν μπορεί να αναγνωρίσει τους υπέρηχους, αλλά κάποια ζώα, όπως οι νυχτερίδες και τα σκυλιά, μπορούν να αισθανθούν το κύμα υπερήχων.

Οι υπέρηχοι παράγονται κατά το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού σε πιεζοηλεκτρικά υλικά και του μαγνητισμού (magnetostriktion) μαγνητικών υλικών. Κατά το μαγνητισμό αλλάζουν το σχήμα και οι διαστάσεις του μαγνητικού υλικού, με τη μεταβολή του όγκου να είναι της τάξης του 10^{-6} .

Η ενέργεια του κύματος είναι ανάλογη και με το τετράγωνο της συχνότητας και με το τετράγωνο του πλάτους και γι' αυτό οι υπέρηχοι μεταφέρουν μεγαλύτερη ενέργεια από τα ηχητικά κύματα ίδιου πλάτους και επιτυγχάνουν έντονα χημικά, βιολογικά, μηχανικά και θερμικά αποτελέσματα. Μπορούμε να αναμείξουμε υγρά δύσκολα μειγνύμενα, να καταστραφούν μικροοργανισμοί κ.λπ. Επίσης υπάρχουν εφαρμογές στην Ιατρική, σε βυθομετρήσεις κ.ά.

Δημιουργία στάσιμου κύματος μέσα σε υγρό

Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιείται μια πηγή υπερήχων που το άκρο της είναι τοποθετημένη στην επιφάνεια (εισέρχεται λίγο εντός) μικρής δεξαμενής νερού (ή άλλου ρευστού). Οι υπέρηχοι θα διαδοθούν στο υγρό (διαμήκη κύματα, πυκνώματα-αραιώματα) και στον πυθμένα της δεξαμενής θα ανακλαστούν. Το προσπίπτον με το ανακλώμενο ηχητικό κύμα θα συμβάλουν δημιουργώντας ένα στάσιμο ηχητικό κύμα (stationary longitudinal wave). Συγχρόνως από τα πλαϊνά διαφανή τοιχώματα της δεξαμενής διέρχεται φωτεινή δέσμη από

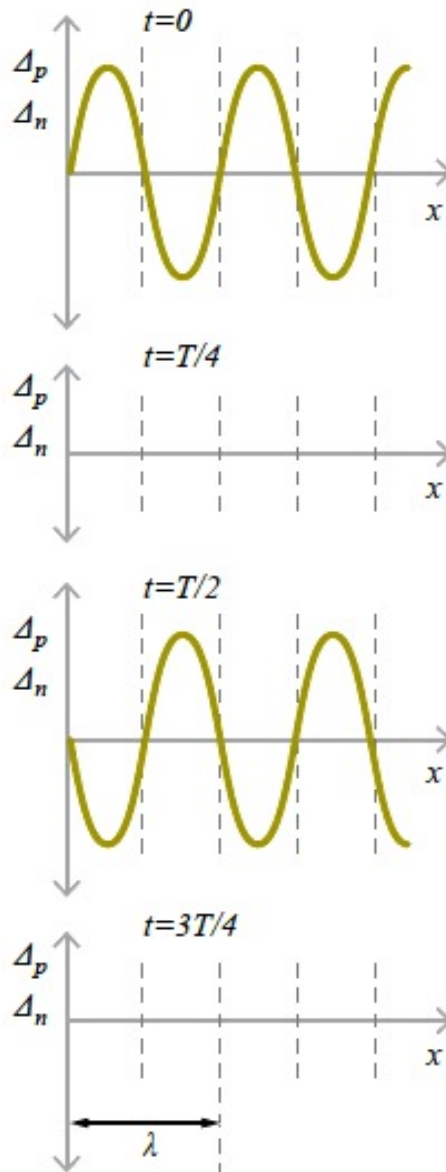
μια πηγή λέιζερ, η οποία προσπίπτει κάθετα στα δημιουργούμενα στάσιμα κύματα των υπερήχων και καθώς εξέρχεται από την δεξαμενή την παρατηρούμε πάνω σε πέτασμα. Το πέτασμα χρησιμεύει για να παρατηρηθούν τα οπτικά φαινόμενα του φωτός λέιζερ που δημιουργούνται εξαιτίας της αλλαγής του δείκτη διάθλασης του υγρού (λόγω της δημιουργίας πυκνωμάτων και αραιωμάτων στο υγρό που οφείλονται στο στάσιμο κύμα). Στην Εικόνα 65 παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στη πίεση του ήχου Δp και στη θέση x μέσα στο υγρό, για τέσσερις φάσεις του στάσιμου κύματος. Ο δείκτης διάθλασης αλλάζει λόγω των μεταβολών της πίεσης. Η μεταβολή του δείκτη διάθλασης Δn μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της μεταβολής της πίεσης Δp .

Η σχηματική λειτουργία της πειραματικής διάταξης εξηγείται στην Εικόνα 66. Το φως του λέιζερ, καθώς διέρχεται δια μέσου του υγρού, εκτρέπεται πάνω στους δεσμούς του στάσιμου κύματος των υπερήχων γιατί εκεί υπάρχει σημαντική τοπική μεταβολή του δείκτη διάθλασης του υγρού σε σχέση με τις κοιλίες. Στις περιοχές όπου υπάρχουν κοιλίες εκτρέπεται πολύ δύσκολα, δηλαδή διέρχεται με σχετικά μεγαλύτερη ευκολία. Επομένως οι δεσμοί της ταλάντωσης του στάσιμου κύματος των υπερήχων εμφανίζονται σαν σκοτεινές λωρίδες και οι κοιλίες σαν φωτεινές λωρίδες του κεντρικού ειδώλου του λέιζερ πάνω στο πέτασμα, βλέπε Εικόνα 67. Στην Εικόνα 65, στις φάσεις $t=T/4$ και $t=3T/4$ αντιστοιχούν οι κοιλίες, όπου το φως καθώς περνά δια μέσου του υγρού δεν εκτρέπεται αλλά συνεχίζει την πορεία του δημιουργώντας φωτεινές λωρίδες (βλέπε Εικόνα 67). Η απόσταση μεταξύ των δεσμών ($\lambda/2$), και επομένως το μήκος κύματος λ των υπερήχων, μπορεί να υπολογισθεί από το ύψος d του προβαλλόμενου ειδώλου πάνω στο πέτασμα και του αριθμού N των κροσσών (φωτεινές λωρίδες) που περιέχει (βλέπε σχήμα 67), χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

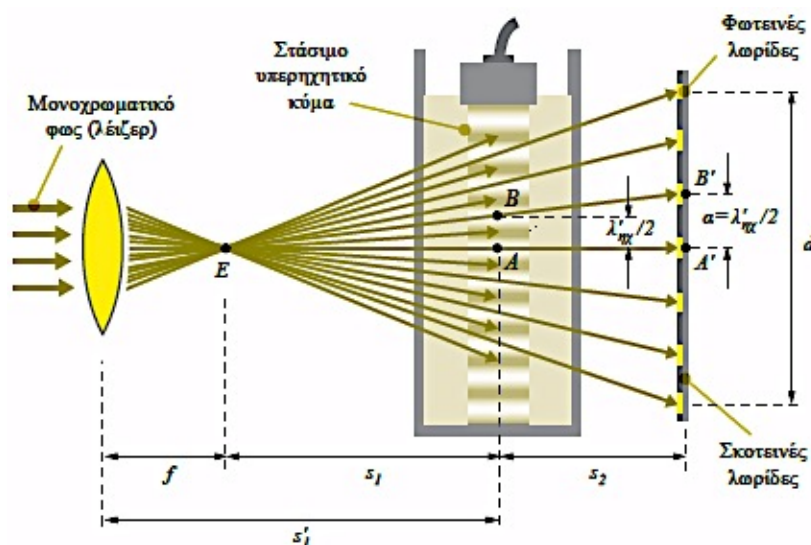
$$\lambda = 2\alpha \frac{s_1}{s_1 + s_2} \quad (13.2)$$

$$\alpha = \frac{d}{N+1} \quad (13.3)$$

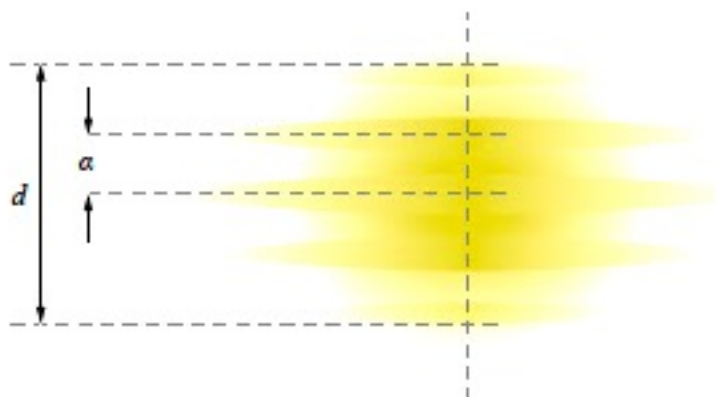
$$c = \lambda \cdot \nu \quad (13.4)$$



Εικόνα 65 Η τοπική κατανομή της μεταβολής της πίεσης και του δείκτη διάθλασης ως συνάρτηση του γεωμετρικού τόπου μέσα στο οπτικό μέσο, κατά διεύθυνση κάθετη στη διάδοση του φωτός, για τέσσερις φάσεις ενός στάσιμου κύματος. Η κατανομή αυτή, μέσα σε ένα ρευστό οπτικό μέσο, εξαρτάται από το μήκος κύματος του στάσιμου κύματος. Στις φάσεις $t=T/4$ (ή $\lambda/4$) και $t=3T/4$ (ή $3\lambda/4$), (όπου T είναι η περίοδος ταλάντωσης του στάσιμου κύματος των υπερήχων και λ το μήκος κύματος), η μεταβολή της πίεσης και του δείκτη διάθλασης είναι μηδέν και παρατηρούνται οι κοιλίες του στάσιμου κύματος. Στις φάσεις $t=0$ και $t=T/2$ (ή $\lambda/2$), παρουσιάζονται καθαρά δεσμοί που απέχουν ο ένας από τον άλλο διάστημα $\lambda/2$.



Εικόνα 66 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.



Εικόνα 67 Φωτεινές λωρίδες πάνω στο πέτασμα.

Ε. Εκτέλεση

Η μέτρηση του μήκους κύματος του ηχητικού κύματος επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας στάσιμου κύματος μέσα στο ρευστό στο οποίο διαδίδεται ο ήχος.

Το στάσιμο κύμα αλλάζει τον ομοιογενή δείκτη διάθλασης του ρευστού σε διαδοχικές διαστρώσεις μεγάλου και μικρού δείκτη διάθλασης (πυκνώματα και αραιώματα ρευστού). Το στάσιμο ηχητικό κύμα φωτίζεται με φως λέιζερ και απεικονίζεται πάνω σε πέτασμα, όπου

και μετριέται.

Προσοχή: Φροντίζετε να έχετε τη γεννήτρια των υπερήχων κλειστή, όταν η κεφαλή της βρίσκεται έξω από το υγρό (υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης).

1. Γεμίστε το γυάλινο δοχείο μέχρι περίπου τα $2/3$ με νερό, το οποίο πρέπει να βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
2. Τοποθετήστε το γυάλινο δοχείο με το νερό στη βάση του, ανάμεσα στο φακό και στο πέτασμα.
3. Τοποθετήστε τη κεφαλή της πηγής, ώστε να εισέρχεται μερικά χιλιοστά μέσα στο υγρό, με τη βάση της παράλληλη προς τον πυθμένα του δοχείου. Η δέσμη λέιζερ αποκλίνει με τη βοήθεια ενός συγκλίνοντος φακού εστιακής απόστασης $f=20\text{mm}$.
4. Ελέγξτε και, αν χρειάζεται, διορθώστε, ώστε ο φακός να απέχει περίπου $30\text{--}40\text{cm}$ από το δοχείο με το υγρό και το πέτασμα περίπου 1m από το δοχείο.
5. Ανοίξτε το λέιζερ.
6. Ρυθμίστε το λέιζερ και το φακό έτσι, ώστε η δέσμη του λέιζερ να διασχίζει το υγρό, περνώντας ανάμεσα από την κεφαλή της πηγής και τον πυθμένα του δοχείου.
7. Ανοίξτε τη γεννήτρια των υπερήχων. Προσπαθήστε να ρυθμίσετε την κλίση της κεφαλής, έτσι ώστε η βάση της να είναι όσο το δυνατόν παράλληλη με τον πυθμένα του δοχείου και να φανεί μια καθαρή Εικόνα από φωτεινές και σκοτεινές λωρίδες πάνω στο πέτασμα, όπως περίπου στο σχήμα 13.3. Αν χρειαστεί αυξομειώστε ελαφρώς το πλάτος, από τη γεννήτρια.
8. Μετρήστε την απόσταση d για έναν συγκεκριμένο αριθμό N φωτεινών λωρίδων.
9. Από τον παλμογράφο μετρήστε την περίοδο T , ώστε να υπολογίσετε τη συχνότητα του κύματος. Για να μην αλλάξει η θερμοκρασία του υγρού, όση ώρα μετράτε, διατηρείτε κλειστή τη γεννήτρια των υπερήχων.
10. Μετρήστε τις αποστάσεις s_2 και s_1' .
11. Μετρήστε με το θερμόμετρο τη θερμοκρασία του νερού.
12. Αδειάστε το νερό από το γυάλινο δοχείο μέσα στη συσκευή θέρμανσης.
13. Επαναλάβετε από το βήμα 1 την ίδια διαδικασία, για υγρό διαφορετικής θερμοκρασίας. Ανοίξτε τη συσκευή θέρμανσης του νερού, ρυθμίζοντας το διακόπτη θερμοκρασίας στους 50°C . Μόλις ο λαμπτήρας της συσκευής σβήσει το νερό έχει θερμανθεί περίπου στους 50°C .
14. Να μετρήσετε τη θερμοκρασία του ζεστού νερού που έχετε τοποθετήσει μέσα στο δοχείο.

ΣΤ. Επεξεργασία μετρήσεων

Για κάθε θερμοκρασία του νερού:

1. Υπολογίστε την απόσταση a μεταξύ δύο διαδοχικών φωτεινών λωρίδων από τη σχέση (13.3).
2. Υπολογίστε τη συχνότητα του κύματος $\nu = \frac{1}{T}$.
3. Υπολογίστε την απόσταση s_1 , ($s_1 = s_1' - f$), με $f=20\text{mm}$.
4. Από τη σχέση (13.2), υπολογίστε το μήκος κύματος λ .
5. Από τη σχέση (13.4) υπολογίστε την ταχύτητα του ήχου στο νερό στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη θερμοκρασία των 50°C .
6. Συγκρίνετε τις τιμές που υπολογίσατε με τις αντίστοιχες θεωρητικές από τον πίνακα 13.2 και βρείτε την εκατοστιαία απόκλιση των τιμών σας.

Συμπεράσματα

Η Επιστήμη της Υποβρυχίου Ακουστικής αναπτύχθηκε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, εάν αγνοήσουμε τη χρήση των σωλήνων ακρόασης του Leonardo da Vinci ήδη από τον 15^ο αιώνα. Ωστόσο, η αξιοποίηση του υποβρύχιου ήχου για τον εντοπισμό στόχων (sonar), τοποθετείται χρονικά πρόσφατα ενώ η καταγωγή των σημερινών συστημάτων προσδιορίζεται στον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο.

Με το τέλος του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, ενεργητικά sonar που λειτουργούσαν στα 20 kHz περίπου και συστοιχίες μορφοτροπέων λίγων μόνο στοιχείων, ήταν σε θέση να ανιχνεύσουν υποβρύχια σε απόσταση 1 έως 2 χλμ. Τα στοιχεία του συστήματος ήταν λίγο διαφορετικά από ότι σήμερα.

Μετά τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο, οι βελτιώσεις που λάμβαναν χώρα τόσο στα υποβρύχια όσο και τις torpilles, ανάγκασαν τις εταιρείες που κατασκεύαζαν sonar να χρησιμοποιούν χαμηλότερες συχνότητες στα συστήματά τους, με σκοπό την αύξηση των αποστάσεων ανίχνευσης και εντοπισμού. Στη δεκαετία του '50, sonar όπως το RN Type 177 που λειτουργούσε μεταξύ 6 και 12 kHz, εισήλθαν σε υπηρεσία τόσο σε Πολεμικά Ναυτικά του NATO όσο και του Συμφώνου της Βαρσοβίας. Αυτά τα sonar, σε θεωρητικό επίπεδο κατασκευάστηκαν για αποστάσεις εντοπισμού μέχρι και 20 χλμ, αλλά στο πεδίο ήταν δύσκολο να επιτευχθεί ο εντοπισμός σε αυτή την απόσταση. Επιχειρησιακά το εύρος ανίχνευσης πλησίαζε το 30% των θεωρητικών τιμών, αλλά η χρήση των πρώτων υπολογιστών κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '70, βοήθησε σε μεγάλο βαθμό τον χειριστή του sonar να εκτελέσει τα απαιτητικά καθήκοντα για επιτήρηση και ταξινόμηση των στόχων. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών του 20^{ου} αιώνα, τα όλο και πιο αθόρυβα υποβρύχια καθώς και τα όπλα μεγάλης εμβέλειας, οδήγησαν τους κατασκευαστές sonar να ελαττώσουν τις συχνότητες λειτουργίας, τόσο για τα ενεργητικά όσο και για τα παθητικά συστήματα, με αποτέλεσμα τη σημερινή γενιά sonar των συρόμενων συστοιχιών πολύ χαμηλών συχνοτήτων.

Το sonar θα μπορούσαμε να πούμε ότι φαίνεται να έχει φτάσει σε συγκεκριμένα επιχειρησιακά όρια. Τα ενεργητικά sonar σπάνια ανιχνεύουν υποβρύχια πέρα των 40 με 50χλμ απόσταση. Οι μελλοντικοί στόχοι που θα πρέπει να θέσουν οι κατασκευαστές sonar είναι οι εξής:

- (1) Διασφάλιση του ορίου απόστασης εντοπισμού ώστε αυτό να επιτυγχάνεται συχνότερα.
- (2) Την μείωση των ψευδοεπαφών σε όλα τα είδη περιβάλλοντος.

Η μελέτη καθώς και η εξέλιξη της επιστήμης της υποβρύχιας ακουστικής, λειτούργησε καταλυτικά σε πολλά πεδία όπως είναι η ασφάλεια ναυσιπλοΐας, η παρακολούθηση των αλλαγών που λαμβάνουν χώρα στον πλανήτη Γη (όπως πχ η υποβρύχια ηφαιστειογενή δραστηριότητα, η χαρτογράφηση των υποθαλάσσιων χαρακτηριστικών καθώς και η παρακολούθηση των θαλάσσιων οργανισμών). Αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό η εμπορική ναυτιλία, ενώ μέσω των σεισμικών ερευνών γίνεται η αναζήτηση νέων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η χρήση όμως ειδικά των ενεργητικών sonar, λόγω των πολλών περιστατικών που οδήγησαν θηλαστικά (πχ φάλαινες και δελφίνια) σε θάνατο, καθιστά τη χρήση τους υπό αυστηρούς περιορισμούς. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλη ευαισθητοποίηση στο θέμα αυτό, ενώ έχουν θεσπιστεί θαλάσσιες περιοχές στις οποίες απαγορεύεται ρητά η ανθυποβρυχιακή δράση.

Βιβλιογραφία

- Abraham, D. (2019). *Underwater Acoustic Signal Processing*. Cham: Springer.
- Anselmet, F. & Mattei, P. (2016). *Acoustics and Vibrations*. London: ISTE Ltd.
- Ainslie, M. (2010). *Principles of Sonar Performance Modeling*. Berlin: Springer – Verlag.
- Bureau of Naval Personnel, (1953). *Naval Sonar*. Washington DC: U.S. Navy Training Publications Center.
- Black, D.S. (2007). *Thrust Breakdown Characteristics of Conventional Propellers*. West Bethesda: Naval Surface Warfare Center – Carderock Division.
- Burrowes, G. & Khan, J. Y. (2011). *Short-Range Underwater Acoustic Communication Networks, Autonomous Underwater Vehicles*. Mr. Nuno Cruz (Ed.).
- Coates, R. (1990). *Underwater Acoustic Systems*. London: Macmillan Education Ltd.
- Etter, P. (2013). *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. Boca Raton: CRC Press.
- Hodges, R. (2010). *Underwater Acoustics - Analysis, Design and Performance of Sonar*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Kim, Y.H. (2010). *Sound Propagation, An Impedance Based Approach*. Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Ltd.
- Marage, J.P. & Mori, Y. (2010). *Sonar and Underwater Acoustics*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Medwin, H. & Glay, C. (1998). *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. San Diego: Academic Press.
- Neighbors, T. & Brandley, D. (2017). *Applied Underwater Acoustics*. Amsterdam: Elsevier.
- Qihu, L. (2012). *Digital Sonar Design in Underwater Acoustics*. Zhejiang: University Press.
- Ross, D. (1976). *Mechanics of Underwater Noise*. California: Pergamon Press.
- Stergiopoulos, S. (2001). *Advanced Signal Processing Handbook*. New York: CRC Press.
- Sherman, C.H. & Butler, J. (2007). *Transducers and Arrays for Underwater Sound*. Cohasset: Springer.

Sullivan, E. (2015). *Model-Based Processing for Underwater Acoustic Arrays*. Portsmouth: Springer.

Waite, A.D.,(2002). *Sonar for Practicing Engineers*. Chichester: John Wiley & Sons.

Σάγος, Γ. (2019). *Εισαγωγή στην Υδροακουστική και στην Τεχνολογία Sonar*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.