



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2016-17
ΣΧΕΔΙΑΣΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ (SYSTEMS ENGINEERING)

(ΠΔ 96 /2015/ΦΕΚ 163Α'/20.08.2014)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗ

ΘΑΛΑΣΣΑ ΑΠΟ ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ

ΥΔΡΟΦΩΝΩΝ

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων
για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Υπό:

ΠΑΡΑΣΧΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

A.M.: 20140180015

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2017

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Παράσχου Δημητρίου εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής (Επιβλέπων)

Δεσσαλέρμος Σπυρίδων



Καθηγητής (Συνεπιβλέπων)

Δάρας Νικόλαος



Καθηγητής

Κανέλλος Φώτιος



© Copyright υπό Παράσχος Δημήτριος

Έτος 2017

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων και του τμήματος μηχανικών παραγωγής και διοίκησης του πολυτεχνείου Κρήτης. Στο σημείο αυτό αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς και θερμές ευχαριστίες μου, σε όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Και πρώτα απ' όλα, στον επιβλέποντα καθηγητή Δεσσαλέρμο Σπυρίδων για τη συνεχή καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξη, τις ουσιώδεις συμβουλές, καθώς και την αδιάκοπη συμπαράσταση και ενθάρρυνση που μου παρείχε σε όλο αυτό το διάστημα. Μεγάλο μέρος της πτυχιακής μου εργασίας στηρίζεται εκτός από την προσωπική του ενασχόληση και σε προσωπικές του σημειώσεις, που τόσο απλόχερα μου προσέφερε. Σημειώσεις οι οποίες προέκυψαν από χρόνια προσωπικής του έρευνας και εμπειρίας.

Στην συνέχεια και με την ίδια θερμή θα ήθελα να αναφερθώ και να ευχαριστήσω τον κύριο Δάρα Νικόλαο, η γνωριμία μου με τον οποίο αποτέλεσε σημείο σταθμό για την επίτευξη αυτού του στόχου, καθώς και την ολοκλήρωση των σπουδών μου. Ο άψογος επαγγελματισμός του, η έμπειρη καθοδήγησή του και οι μεγάλες ευκαιρίες που μου προσέφερε απλόχερα καθ' όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού αποτέλεσαν την ιδανικότερη χείρα βοήθειας, ώστε να μπορώ σήμερα να φτάσω στο σημείο που βρίσκομαι. Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και για τον κύριο Καννέλο Φώτιο που ως καθηγητής του μεταπτυχιακού προγράμματος συνέβαλε τα μέγιστα, μέσα από τη διδασκαλία του και τη συμμετοχή του στην παρούσα εργασία. Ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω σε όλους τους καθηγητές και των δύο σχολών για την άφογη εκτέλεση του διδακτικού τους έργου, καθώς και το σύνολο της γνώσης που παρείχαν. Ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου για την ηθική τους και όχι μόνο υποστήριξη, καθώς και για τις ηθικές αρχές με τις οποίες με ανέθρεψαν, όπως και την αδερφή μου που με εμπνέει μέσα από την αγωνιστικότητα και τη μαχητικότητά της. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύντροφό για την στήριξη και την κατανόηση στις δύσκολες στιγμές.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	28
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ	30
ΘΕΩΡΙΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ	30
§1. ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ	31
§2. ΕΙΔΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΜΠΕΔΗΣΗ	36
§3. ΈΝΤΑΣΗ ΤΟΥ ΉΧΟΥ	38
§4. ΝΟΜΟΣ SNELL.....	40
§5. ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΉΧΟΥ.....	44
5.1. Βαθύ Κανάλι Ήχου	46
5.2. Αξιοπίστη Ακουστική Διαδρομή.....	47
5.3. Επιφανειακός Αγωγός Διάδοσης.....	49
5.4. Διάδοση Ζώνης Σύγκλισης	51
5.5. Διάδοση Αναπήδησης Πυθμένα	52
§6. ΕΞΙΣΩΣΗ SONAR	53
6.1. Λόγος Σήματος προς Θόρυβο	53
6.2. Επίπεδο σήματος	54
6.3. Επίπεδο θορύβου.....	55
§7. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	57
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ	58
ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΘΥΠΟΒΡΥΧΙΑΚΟΥ ΠΟΛΕΜΟΥ	58
§1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	61
§2. ΑΝΤΙΜΕΤΡΑ	62
§3. ΤΥΠΟΙ SONARS.....	74
3.1. Ενεργό Sonar.....	74

3.2. Παθητικό Sonar.....	76
3.3. Sonar Μεταβλητού Βάθους.....	77
3.4. Towed Arrays.....	78
3.5. Εμβαπτιζόμενα Sonars.....	79
3.6. Sonobuoys.....	80
3.7. Παθητικά Sonobuoys.....	81
3.8. Ενεργά Sonobuoys.....	81
3.9. Εκρηκτική ηχώ.....	82
3.10. Sonobuoys Ειδικού Σκοπού.....	83
3.11. SOSUS.....	84
3.12. SURTASS.....	86
§4. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	87
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ	88
ΘΟΡΥΒΟΣ	88
§1. ΠΗΓΕΣ ΘΟΡΥΒΟΥ	89
§2. ΚΑΤΕΓΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΘΟΡΥΒΟΣ	93
§3. ΑΥΤΟΘΟΡΥΒΟΣ	103
3.1. Μηχανήματα.....	103
3.2. Θόρυβος προπελών.....	104
3.3. Υδροδυναμικός θόρυβος (flow noise).....	106
3.4. Μηχανικοί κραδασμοί.....	107
3.5. Ανθρώπινος παράγοντας.....	108
3.6. Εσωτερικός αυτοθόρυβος ηλεκτρονικών κυκλωμάτων συστημάτων sonar.....	109
3.7. Μεταβατικά σήματα (transients).....	109
§4. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	110

4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	112
	ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ	112
	§1. BROADBAND	113
	§2. NARROWBAND	114
	§3. TRANSIENT	116
	§4. ΣΥΝΘΕΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΥΠΟΓΡΑΦΗΣ ΠΛΟΙΩΝ	117
	§5. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	121
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	124
	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ	124
	§1. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ	126
	§2. ΘΕΩΡΗΜΑ NYQUIST-SHANNON	127
	§3. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER	128
	§4. ALIASING	131
	§5. UPSAMPLING ΚΑΙ DOWNSAMPLING	135
	§6. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ SNR	138
	§7. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΕΣΗΣ ΣΤΟΧΟΥ-BEAMFORMING	140
	§8. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ DOPPLER	145
	§9. ΕΙΔΗ ΠΑΡΑΘΥΡΩΝ	146
	§10. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	148
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	150
	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΥΔΡΟΦΩΝΩΝ	150
	§1. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	151
	§2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	152
	§3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΜΙΚΡΟ ΘΟΡΥΒΟ	155

§4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΜΕΤΡΙΟ ΘΟΡΥΒΟ	164
§5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΟ ΘΟΡΥΒΟ	173
§6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	182
§7. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	191
7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ	192
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ	192
§1. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΕΝΑ ΥΔΡΟΦΩΝΟ	193
§2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ	200
§3. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	215
8 ΚΕΦΑΛΑΙΟ	216
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	216
§1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	216
§2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	219
9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	223
10 ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ.....	229

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Ακουστική ΣΝΔ Δεσσαλέρμος Σπυριδων	35
Εικόνα 1.2 2006 Encyclopedia Britannica, Inc	36
Εικόνα 1.3 Πορεία ακτίνας διαμέσου πολλαπλών στρωμάτων (θεωρητική προσέγγιση)	37
Εικόνα 1.4 Πορεία ακτίνας διαμέσου πολλαπλών στρωμάτων (ρεαλιστική προσέγγιση)	38
Εικόνα 1.5 Τυπική βαθιά θάλασσα SSP	41
Εικόνα 1.6 Διάδοση στο κανάλι βαθύ ήχου	42
Εικόνα 1.7 Βαθιά πηγή: αξιόπιστη ακουστική διαδρομή	42
Εικόνα 1.8 Ταχύτητα του ήχου σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος	43
Εικόνα 1.9 Επιφανειακός αγωγός διάδοσης: ρηχή πηγή	44
Εικόνα 1.10 Επιφανειακός αγωγός διάδοσης: βαθύτερη πηγή	45
Εικόνα 1.11 Διάδοση ζώνης σύγκλισης	46
Εικόνα 1.12 Διάδοση αναπήδησης πυθμένα	47
Εικόνα 2.1 Πρώτες συσκευές για κίνηση κάτω από το νερό	54
Εικόνα 2.2 USS Albacore	55
Εικόνα 2.3 Ένας φύλακας στον US Highway 101 όπου έχουν στοιβαχτεί τμήματα των μεταλλικών διχτύων που προστάτευαν τα λιμάνια κατά το ΒΠΠ (Hank Walker, 195)	58
Εικόνα 2.4 Φωτογραφία πλευρικού αντιτορπιλικού στεγανού (anti-torpedo bulge/blister) παλαιού πλοίου επιφανείας των αρχών του 20ου αιώνα.	59
Εικόνα 2.5 Το υπό ανάπτυξη σύστημα αντιτορπιλικής προστασίας του USN χρησιμοποιεί ελαφρές hard kill αντιτορπιλικές τορπίλες ATT (Anti-Torpedo Torpedoes)	64
Εικόνα 2.6 Το βρετανικό σύστημα Sonar 2170 SSTD (Surface Ship Torpedo defense)	65
Εικόνα 2.7 Το Γερμανικό hard kill αντίμετρο Barracuda	66

<i>Εικόνα 2.8 Το ισραηλινής κατασκευής seagull</i>	68
<i>Εικόνα 2.9 Sonar 2051</i>	69
<i>Εικόνα 2.10 Sonar type 212 submarine</i>	70
<i>Εικόνα 2.11 Σόναρ μεταβλητού βάθους</i>	72
<i>Εικόνα 2.12 TAS-3 towed array</i>	73
<i>Εικόνα 2.13 AQS-13 sonar εμβαπτιζόμενο από ελικόπτερο Sea King</i>	74
<i>Εικόνα 2.14 sonobuoy απο Orion P-3</i>	75
<i>Εικόνα 2.15 Σταθμοί SOSUS στη δεκαετία του 70</i>	79
<i>Εικόνα 2.16 Σταθμοί SOSUS το 2010</i>	80
<i>Εικόνα 2.17 Σύστημα SURTASS με 4 περιστρεφόμενους λοβούς</i>	81
<i>Εικόνα 3.1 Παγκόσμιος θαλάσσιος θόρυβος απο εμπορικά σκάφη</i>	84
<i>Εικόνα 3.2 Ambient noise</i>	87
<i>Εικόνα 3.3 Κάθετη κατευθυντικότητα</i>	88
<i>Εικόνα 3.4 Οριζόντια κατευθυντικότητα</i>	89
<i>Εικόνα 3.5 Ισοτροπικός θόρυβος</i>	89
<i>Εικόνα 3.6 Θόρυβος υποβρυχίου</i>	90
<i>Εικόνα 3.7 Σήματα που λαμβάνονται σε φάση</i>	91
<i>Εικόνα 3.8 Σήματα που λαμβάνονται εκτός φάσης</i>	92
<i>Εικόνα 3.9 Κύριος και δευτερεύοντες λοβοί</i>	93
<i>Εικόνα 3.10 Άφιξη σήματος υπό γωνία και χρονική υστέρηση dt για κάθε υδρόφωνο</i>	94
<i>Εικόνα 3.11 Δύο λοβοί προερχόμενοι απο μία συστοιχία</i>	95

Εικόνα 3.12 Φαινόμενο σπηλαίωσης	101
Εικόνα 3.13 Υδροδυναμικός θόρυβος	102
Εικόνα 3.14 Συστοιχία υδροφώνων μήκους 1300m με υδρόφωνα ανα ένα μέτρο	103
Εικόνα 4.1 Σύνθεση λαμβανόμενου σήματος	107
Εικόνα 4.2 Μηχανικά μέρη	109
Εικόνα 4.3 Τορπιλοσωλήνες υποβρυχίου	110
Εικόνα 4.4 Σύνθεση υπογραφής σκάφους	111
Εικόνα 4.5 Εξέλιξη έντασης εκπεμπόμενης υπογραφής	112
Εικόνα 4.6 Κατανομή συχνοτήτων σε συνάρτηση με στρατιωτικές εφαρμογές	116
Εικόνα 5.1 Στάδια <i>analog-to-digital</i> μετατροπής	118
Εικόνα 5.2 Δειγματοληψία και κβάντιση	119
Εικόνα 5.3 Δειγματοληψία χαμηλής συχνότητας	120
Εικόνα 5.4 Μετασχηματισμός <i>Fourier</i>	123
Εικόνα 5.5 Φάσματα χωρίς <i>aliasing</i>	126
Εικόνα 5.6 Φάσματα με <i>aliasing</i>	127
Εικόνα 5.7 <i>Upsampling</i> κατά παράγοντα L	129
Εικόνα 5.8 <i>downsampling</i> κατά παράγοντα $M=2$	130
Εικόνα 5.9 Περίπτωση <i>aliasing</i> (χάνεται πληροφορία)	130
Εικόνα 5.10 Μέτωπο κύματος προσπίπτει σε συστοιχία υπό γωνία θ	134

<i>Εικόνα 5.11 Μεγαλύτερος αριθμός υδροφώνων σημαίνει συνεπάγεται στενότεροι λοβοί</i>	136
<i>Εικόνα 5.12 Φαινόμενο Doppler σε γραμμικό φάσμα απορρόφησης</i>	138
<i>Εικόνα 6.1 Δημιουργία εικονικού περιβάλλοντος και προσομοίωση της πραγματικότητας</i>	142
<i>Εικόνα 6.2 http://www.naval-technology.com</i>	146
<i>Εικόνα 6.3 DOA με χαμηλό θόρυβο</i>	148
<i>Εικόνα 6.4 DOA με χαμηλό θόρυβο (πολικό διάγραμμα)</i>	149
<i>Εικόνα 6.5 Γωνίες ανίχνευσης και θέσεις στόχων</i>	150
<i>Εικόνα 6.6 Διάγραμμα downsampling</i>	153
<i>Εικόνα 6.7 Σύγκριση ασματικής κατανομής πρώτου στόχου</i>	154
<i>Εικόνα 6.8 Σύγκριση ασματικής κατανομής δεύτερου στόχου</i>	155
<i>Εικόνα 6.9 Σύγκριση ασματικής κατανομής τρίτου στόχου</i>	155
<i>Εικόνα 6.10 DOA με μέτριο θόρυβο</i>	157
<i>Εικόνα 6.11 DOA με μέτριο θόρυβο (πολικό διάγραμμα)</i>	158
<i>Εικόνα 6.12 Γωνίες ανίχνευσης και θέσεις στόχων</i>	159
<i>Εικόνα 6.13 Διάγραμμα downsampling</i>	162
<i>Εικόνα 6.14 Σύγκριση ασματικής κατανομής πρώτου στόχου</i>	163
<i>Εικόνα 6.15 Σύγκριση ασματικής κατανομής δεύτερου στόχου</i>	164
<i>Εικόνα 6.16 Σύγκριση ασματικής κατανομής τρίτου στόχου</i>	164

<i>Εικόνα 6.17 DOA με υψηλό θόρυβο</i>	166
<i>Εικόνα 6.18 DOA με υψηλό θόρυβο (πολικό διάγραμμα)</i>	167
<i>Εικόνα 6.19 Γωνίες ανίχνευσης και θέσεις στόχων</i>	168
<i>Εικόνα 6.20 Διάγραμμα <i>downsampling</i></i>	171
<i>Εικόνα 6.21 Σύγκριση ασματικής κατανομής πρώτου στόχου</i>	172
<i>Εικόνα 6.22 Σύγκριση ασματικής κατανομής δεύτερου στόχου</i>	173
<i>Εικόνα 6.23 Σύγκριση ασματικής κατανομής τρίτου στόχου</i>	173
<i>Εικόνα 6.24 DOA με χαμηλή δειγματοληψία</i>	175
<i>Εικόνα 6.25 DOA με χαμηλή δειγματοληψία (πολικό διάγραμμα)</i>	176
<i>Εικόνα 6.26 Γωνίες ανίχνευσης και θέσεις στόχων</i>	177
<i>Εικόνα 6.27 Διάγραμμα <i>downsampling</i></i>	180
<i>Εικόνα 6.28 Σύγκριση ασματικής κατανομής πρώτου στόχου</i>	181
<i>Εικόνα 6.29 Σύγκριση ασματικής κατανομής δεύτερου στόχου</i>	182
<i>Εικόνα 6.30 Σύγκριση ασματικής κατανομής τρίτου στόχου</i>	182
 <i>Εικόνα 7.1 Με άθροιση των <i>downsampled</i> δειγμάτων το σήμα ενισχύεται σε βάρος του θορύβου</i>	 185
<i>Εικόνα 7.2 Διάγραμμα <i>downsampling</i></i>	187
<i>Εικόνα 7.3 Φασματική κατανομή του εξηκοστού εβδομού δευτερολέπτου</i>	188
<i>Εικόνα 7.4 Φασματική κατανομή με <i>downsampling</i></i>	189

Εικόνα 7.5 Φασματική κατανομή χωρίς <i>downsampling</i>	190
Εικόνα 7.6 Σχετική γωνία συστοιχίας και προσπίπτοντος ηχητικού σήματος	193
Εικόνα 7.7 DOA στόχου	194
Εικόνα 7.8 DOA στόχου (πολικό διάγραμμα)	194
Εικόνα 7.9 Εκμετάλευση <i>Beamformation</i> προς μείωση θορύβου	196
Εικόνα 7.10 <i>Correlation</i> σημάτων	197
Εικόνα 7.11 Σχηματισμός κύριου λοβού έναντι ομοιοκατευθυντικής καταγραφής	197
Εικόνα 7.12 Στρέψη κύριου λοβού προς στόχο για $d/\lambda=0.5$	198
Εικόνα 7.13 Στρέψη κύριου λοβού προς στόχο για $d/\lambda=0.3$	199
Εικόνα 7.14 Στρέψη κύριου λοβού προς στόχο με 32 υδρόφωνα	200
Εικόνα 7.15 Διάγραμμα <i>downsampling</i>	201
Εικόνα 7.16 Φασματική ανάλυση 97 ^{ου} δευτερολέπτου	202
Εικόνα 7.17 <i>Lofargram</i> πειράματος	204
Εικόνα 8.1 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου	210
Εικόνα 8.2 Στάδια εντοπισμού, ταυτοποίησης και προσδιορισμού θέσεως και ταχύτητας στόχου	212
Εικόνα 8.3 Εκτίμηση απόστασης πηγής	215

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ASW AntiSubmarine Warefare

AWGN Additive White Gaussian Noise

CBF Conventional Beamforming

CSM Cross Spectrum Matrix

FT Fourier Transform

FFT Fast Fourier Transform

DFT Discrete Fourier Transform

DIFAR Directional Frequency Analysis Recording

DOA Direction of Arrival

ESPRIT Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariant Technique

GPS Global Positioning System

LOFAR Low Frequency Analysis and Recording

LOFARgram Low Frequency Analysis and Recording Gram

MUSIC MUltiple Signal Classification

SNR Signal to Noise Ratio

SOFAR SOund Fixing and Ranging

SONAR SOund Navigation And Ranging

TOI Target of Interest

ULA Uniform Linear Array

WGN White Gaussian Noise

AIP Air Independent Propulsion

SL Sound Level

DTFT Discrete Time Fourier Transform

SNR Sound To Noise Ratio

DFT Discrete Fourier Transform

IDFT Inverse Discrete Fourier Transform

HMS Hull Mounted Sonars

AG Array Gain

DCL Detection Classification Localization

TCM Torpedo Counter Measures

ASDIC Anti-Submarine Detection Investigation Committee

BB Botom Bounce

RAP Reliable Acoustic Path

SSP Sound Speed Profile

ΛΙΣΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

∇	Ανάδελτα	A^T	Ανάστροφος πίνακας
A^\dagger	Ερμητιανός πίνακας	A^{-1}	Αντίστροφος πίνακας
$\det(A)$	Ορίζουσα του πίνακα A	Σ	Άθροισμα
\int	Ολοκλήρωμα	\times	Εξωτερικό γινόμενο
$*$	Συνέλιξη	∞	Άπειρο
\forall	Για κάθε	\exists	Υπάρχει
\acute{o}	Δεν υπάρχει	\in	Ανήκει
\notin	Δεν ανήκει	$!$	Παραγοντικό
$\frac{dy}{dx}$	Παράγωγος	$\frac{d^2y}{d^2x}$	Δεύτερη παράγωγος
$\frac{\partial^2 \Omega}{\partial u^2}$	Δεύτερη μερική παράγωγος	$\frac{\partial \Omega}{\partial u}$	Μερική παράγωγος

ABSTRACT

Sonar systems have been in practical use since the turn of the 20th century, and they are considered to be one of the most developed engineering systems. The main research subjects have concerned with detection and tracking tasks. In this work, the research is focused in the development of a signal processing algorithm, for passive sonar system, based on modern and intelligent methods. Each method has been briefly discussed as more details can be found through the references at the end.

Detection in passive sonar systems, is one of the most challenging areas in the military field. In passive sonar system, received noises with SNR as low as -15dB are very common at the receiver (Urlick 1983). Generally the challenge of sonar signal processing is to detect/classify targets with very weak noises as this is an important factor in modern naval battles. In addition to the long-range detection, primary advantages of passive sonar systems are the stealthy monitor and the low complexity together with low power consumption of the sensors. On this paper, the signal is being processed both in time and space (subspace methods). For space processing the DOA (Direction Of Arrival) reveals the energy peak in relation to scanning angle, allowing us to detect target position. For time processing, there are two methods applied. First of all, by downsampling, the recorded noise is being significantly reduced due to the fact that noise follows a random frequency distribution whereas signal does not. After that the overlapping of time windowed spectra, leads to an improvement of the initial lofargram that is being produced. Both simulated and real data's are being processed and the result are quite promising.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία γίνεται ανάπτυξη ορισμένων εκ των σύγχρονων μεθόδων επεξεργασίας ηχητικών σημάτων από συστοιχίες υδροφώνων. Στόχος είναι η κάλυψη των σημαντικότερων τεχνικών εξαγωγής πληροφοριών μέσα από ένα δύσκολο και θορυβώδες περιβάλλον. Στη συγκεκριμένη εργασία περιλαμβάνεται η ανάπτυξη αλγορίθμων τόσο για τη μελέτη πειραματικών δεδομένων όσο και τη δημιουργία προσομοιώσεως, μέσω της εφαρμογής του θεωρητικού υποβάθρου που διέπει τις μεθόδους εξαγωγής σημάτων, καθώς και την επεξεργασία τους, εδώ και δεκαετίες. Οι μέθοδοι αυτές έχουν αναπτυχθεί μέσα από χρόνια μελετών και πειραμάτων με κύριο κίνητρο τις αναπερίόδους πολεμικές συγκρούσεις οι οποίες ώθησαν την έρευνα στα όριά της. Όπως έχει ειπωθεί από τον Ηράκλειτο πόλεμος πάντων μὲν πατήρ ἐστι, πάντων δὲ βασιλεύς. Η φυσική αδυναμία ανάπτυξης ενός συστήματος υποθαλάσιου ραντάρ σε συνδυασμό με την ταχύτητα του ήχου στο νερό κατέστησε από πολύ νωρίς τα ηχητικά σήματα κυρίαρχα στο υποθαλάσσιο πεδίο μάχης. Στην παρούσα εργασία θα διερευνηθεί η δυνατότητα εντοπισμού ενός στόχου με αναζήτηση σε broadband φασματική κατανομή. Εξέλιξη της παρούσας εργασίας θα αποτελούσε η αναζήτηση σε narrowband κατανομή, δεδομένου ότι η γνώση που προέρχεται από παρακολούθησεις και καταγραφές στόχων δεν είναι ελλιπής. Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες των ηχητικών κυμάτων, και γενικότερα οι φυσικοί νόμοι που καθορίζουν τους όποιους κανόνες. Παρουσιάζεται αναλυτικά η εξίσωση σόναρ, μια εξίσωση που ορίζει τις προϋποθέσεις για την ανίχνευση μιας ηχητικής πηγής εντός ενός θορυβώδους περιβάλλοντος. Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί τη βιβλιογραφική επισκόπηση των τεχνολογιών κατασκευής συστημάτων, την ιστορική εξέλιξη και ορισμένα από τα σύγχρονα συστήματα που αναπτύσσονται ανα τον κόσμο. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στα χαρακτηριστικά των υποθαλάσιων ηχητικών κυμάτων και πως αυτά διαχέονται και διαδίδονται

κάτω από τα κύματα, τον υποθαλάσσιο θόρυβο και πώς παράγεται, καθώς και τον αυτοθόρυβο που επηρεάζει άμεσα τις καταγραφές. Στο τέταρτο κεφάλαιο εξηγείται ποιά είναι η σύνθεση μιας ηχητικής υπογραφής και πως είναι δυνατόν ένας στόχος να ταυτοποιηθεί και όχι απλώς να εντοπιστεί. Έμφαση δίνεται στο διαχωρισμό χρήσιμων πληροφοριών από τον αδιάφορο περιβάλλον θόρυβο. Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι βασικότερες ιδιότητες και αρχές που διέπουν την επεξεργασία σημάτων, πώς αυτές καταφέρνουν να εξορύξουν το σήμα, να το επεξεργαστούν και να μεγιστοποιήσουν την απόκριση μιας συστοιχίας μέσα από μεθόδους όπως το beamforming. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση σε matlab και πώς αυτή επιτρέπει στο χειριστή να προσομοιώσει καταστάσεις που πειραματικά είναι δύσκολο να επαληθευτούν λόγω περιορισμένων πόρων. Μέσω της προσομοίωσης, δοκιμάζονται οι τεχνικές της θεωρίας και εντοπίζονται τα όριά τους. Στο έβδομο κεφάλαιο ακολουθεί το άκρως ενδιαφέρον πειραματικό κομμάτι το οποίο στην πράξη πλέον υλοποιεί όλα τα προαναφερθέντα και θέτει τους πρακτικούς περιορισμούς που οριοθετούν τα σύνορα μεταξύ πραγματικότητας και θεωρίας. Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων, προσπάθεια ερμηνείας τους και αναφέρονται οι πιθανές μελλοντικές προοπτικές.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Θεωρία Υποβρύχιας Ακουστικής

Η επιστήμη της υποβρύχιας ακουστικής επικεντρώνεται γύρω από την διάδοση της ακουστικής ενέργειας στο νερό και στα γειτονικά του μέσα. Επομένως η μελέτη των αρχών διάδοσης του ήχου σε ένα μέσο, καθώς και των αρχών μετάβασης από ένα μέσο σε ένα άλλο, αποτελούν βάση της συγκεκριμένης έρευνας στην συγκεκριμένη θεματική περιοχή. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα βασικά σημεία της κυματικής θεωρίας περιορίζοντας την μαθηματική ανάλυση στα επίπεδα κύματα και στα φαινόμενα τοπικής διάδοσης και ανάκλασης κυμάτων ανάμεσα στις διεπιφάνειες. Θα παρουσιαστούν οι φυσικές αρχές και οι φυσικοί νόμοι, οι περιορισμοί και τα μαθηματικά εργαλεία. Θα παρουσιαστεί το προφίλ της ταχύτητας του ήχου στο νερό, καθώς και η διαφοροποίηση των ηχητικών ακτίδων σε σχέση με τις εκάστοτε επικρατούσες συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης κ.τ.λ. Τέλος, σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των τρόπων με τους οποίους η εκμετάλευση όλης της παραπάνω γνώσης μπορεί να βελτιώσει την υποθαλάσσια επιτήρηση.

§1. Κυματική Εξίσωση

Ένα ακουστικό κύμα είναι μία διαταραχή της πίεσης ενός μέσου που διαδίδεται στο μέσον αυτό. Για να καταστεί δυνατή η μετάδοση της διαταραχής, το μέσον πρέπει να είναι συμπίεστο (να επιτρέπει αυξομειώσεις της πυκνότητας). Γι αυτό τα ακουστικά κύματα χαρακτηρίζονται ως κύματα συμπίεστότητας (compressional waves). Η διαταραχή προέρχεται από την ακουστική πηγή που με κάποιο φυσικό τρόπο (π.χ. ταλάντωση ή έκρηξη) διαταράσσει την κατάσταση ισορροπίας του μέσου με έμφαση στα κινητικά χαρακτηριστικά των στοιχειωδών σωματιδίων που το αποτελούν, προκαλώντας αυξομειώσεις σε μεγέθη που υπεισέρχονται στην μηχανική συμπεριφορά του υλικού, όπως είναι η πυκνότητα, η πίεση, ή η ταχύτητα των στοιχειωδών σωματιδίων. Ανάλογα με το μέγεθος της διαταραχής η πηγή χαρακτηρίζεται ως μεγάλης ή μικρής έντασης. Είναι αυτονόητο ότι η ακουστική διαταραχή προσδίδει ενέργεια στο σύστημα, και η οποία χαρακτηρίζεται ως “ακουστική ενέργεια” (Hans Jenny, A Study of Wave Phenomena and Vibration, Volume 1, 1967).

Κάθε συνάρτηση της μορφής $p(x,t) = f(x-ut)$ περιγράφει μια διαταραχή που οδεύει προς τα δεξιά αναλλοίωτη και με ταχύτητα u . Μια μαθηματική περιγραφή της διαταραχής αυτής μπορεί να εκφραστεί συνδυάζοντας την αρχή διατήρησης της μάζας, την αρχή διατήρησης της ροπής και την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Το αποτέλεσμα είναι η γραμμικοποιημένη κυματική εξίσωση. Πρόκειται για μια μερική διαφορική εξίσωση δευτέρας τάξεως η οποία εκφρασμένη με όρους ηχητικής πίεσης p και έχει τη μορφή:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.1.1)$$

Οι λύσεις αυτής της εξίσωσης, που είναι αρχικά μηδέν έξω από κάποια περιορισμένη περιοχή, διαδίδονται με σταθερή ταχύτητα προς όλες τις χωρικές κατευθύνσεις, όπως κάνουν τα φυσικά κύματα που προκαλούνται από μια τοπική διαταραχή. Η σταθερά c ταυτίζεται με την ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Η εξίσωση αυτή είναι γραμμική, καθώς το άθροισμα οποιονδήποτε δύο λύσεων αποτελεί και αυτό λύση. Στη φυσική, αυτή η ιδιότητα ονομάζεται αρχή της επαλληλίας. Η εξίσωση από μόνη της δεν καθορίζει μια λύση. Μια μοναδική λύση επιτυγχάνεται με τον καθορισμό ενός προβλήματος με περαιτέρω συνθήκες, όπως οι αρχικές συνθήκες, που καθορίζουν το μέτρο και την ταχύτητα του κύματος.

Μια τεχνική για τη λύση των μερικών διαφορικών εξισώσεων όπως η κυμματική, είναι η μέθοδος των χωριζομένων μεταβλητών. Με βάση τη μέθοδο αυτή, μια μερική διαφορική εξίσωση για μία συνάρτηση πολλών μεταβλητών, μπορεί να χωριστεί σε μια ομάδα συνήθων διαφορικών εξισώσεων, κάθε μια από τις οποίες ορίζεται για μια συνάρτηση που εξαρτάται από μία μόνο μεταβλητή (συναρτήσεις που μεταβάλλονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη). Μια και ο αριστερός όρος είναι συνάρτηση μόνο των χωρικών μεταβλητών και ο δεξιός όρος συνάρτηση μόνο του χρόνου, για να ισχύει η εξίσωση, θα πρέπει κάθε όρος να ισούται με μια σταθερά. Έτσι :

$$\frac{c^2}{p} \nabla^2 p = \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} = -\omega^2 \quad (1.1.2)$$

Προκύπτουν λοιπόν οι εξής δύο εξισώσεις:

$$\nabla^2 p + \frac{\omega^2}{c^2} p = 0 \quad (1.1.3)$$

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + \omega^2 T = 0 \quad (1.1.4)$$

Από τις εξισώσεις αυτές η πρώτη είναι γνωστή ως εξίσωση Helmholtz και διέπει την χωρική εξάρτηση της ακουστικής πίεσης για «μονοχρωματική πηγή» (μόνο μία συχνότητα), ενώ η λύση της δεύτερης δίνει τη χρονική εξάρτηση της ακουστικής πίεσης.

Η δεύτερη έχει δύο ανεξάρτητες μεταξύ τους λύσεις :

$$T = Ae^{i\omega t} + Be^{-i\omega t} \quad (1.1.5)$$

με A, B σταθερές.

Χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορεί να θεωρηθεί ότι η σταθερά B είναι 1, και δεχόμενοι από τις δύο πιθανές λύσεις, εκείνη που αντιστοιχεί σε αρνητικό πρόσημο στον εκθέτη. Αυτό σημαίνει ότι πηγές οι οποίες εκπέμπουν ενέργεια στο περιβάλλον με χρονική εξάρτηση $e^{-i\omega t}$. Προκύπτουν δηλαδή λύσεις της μορφής:

$$T = e^{-i\omega t} \quad (1.1.6)$$

Κατόπιν αυτών, η συνολική λύση για την πίεση διαταραχής γράφεται:

$$p_1(\vec{x}, t) = p(\vec{x})e^{-i\omega t} \quad (1.1.7)$$

Όσον αφορά την πρώτη, το σύστημα συντεταγμένων στο οποίο αναφερόμαστε είναι το καρτεσιανό, για το οποίο ο τελεστής ∇^2 λαμβάνει τη μορφή:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1.1.8)$$

Επιπλέον θεωρώντας ότι:

$$\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 = k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (1.1.9)$$

όπου κάθε ένας από τους προσθετέους k_i εξαρτάται από μία μόνο μεταβλητή, διαχωρίζοντας τις μεταβλητές αναζητούνται λύσεις της μορφής:

$$p(\vec{x}) = p(x, y, z) = p_x(x)p_y(y)p_z(z) \quad (1.1.10)$$

Αντικαθιστώντας την ανωτέρω έκφραση στην εξίσωση Helmholtz και χρησιμοποιώντας τη σχέση (1.1.4), προκύπτει:

$$\frac{\theta^2 p_x}{\theta x^2} \frac{1}{p_x} + \frac{\theta^2 p_y}{\theta y^2} \frac{1}{p_y} + \frac{\theta^2 p_z}{\theta z^2} \frac{1}{p_z} + k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = 0 \quad (1.1.11)$$

Εξετάζοντας τη σχέση 1.1.11 διαπιστώνεται ότι στο άθροισμα υπάρχουν έξι όροι οι οποίοι ανά δύο είναι συναρτήσεις μιας μεταβλητής. Απαιτώντας τα ζεύγη των όρων αυτών να είναι 0, καθ' ότι πρόκειται για άθροισμα θετικών όρων, προκύπτει ένα σύστημα τριών εξισώσεων :

$$\frac{d^2 p_x}{dx^2} + k_x^2 p_x = 0 \quad (1.1.12)$$

$$\frac{d^2 p_y}{dy^2} + k_y^2 p_y = 0 \quad (1.1.13)$$

$$\frac{d^2 p_z}{dz^2} + k_z^2 p_z = 0 \quad (1.1.14)$$

Η αλλαγή στο συμβολισμό της παραγώγου που πλέον είναι συνήθης και όχι μερική οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε μία από αυτές τις συναρτήσεις είναι συναρτήσεις μιας μεταβλητής. Οι λύσεις θα είναι:

$$p_x(x) = A_1 e^{ik_x x} + A_2 e^{-ik_x x} \quad (1.1.15)$$

$$p_y(y) = A_1 e^{ik_y y} + A_2 e^{-ik_y y} \quad (1.1.16)$$

$$p_z(z) = A_1 e^{ik_z z} + A_2 e^{-ik_z z} \quad (1.1.17)$$

όπου οι συντελεστές υπολογίζονται εφ' όσον έχει οριστεί πλήρως το πρόβλημα.

Κρατώντας μόνο τον πρώτο από τους δύο όρους της λύσης για κάθε μία από τις συναρτήσεις p_x , p_y , p_z , σημαίνει ότι αποδεκτή γίνεται αποκλειστικά η διάδοση προς τη μία κατεύθυνση. Η λύση έτσι λαμβάνει τη μορφή:

$$p_1(x, y, z, t) = A_1 B_1 C_1 e^{i(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)} \quad (1.1.18)$$

και σε διανυσματική μορφή:

$$p_1(x, y, z, t) = D e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)} \quad (1.1.19)$$

όπου $D = A B C$. Προκύπτει δηλαδή ότι ο κυματαριθμός k μπορεί να θεωρηθεί ως διανυσματικό μέγεθος με συνιστώσες x, y, z .

Διαπιστώνεται τέλος οι επιφάνειες σταθερής φάσης είναι επίπεδα, κάθετα στο διάνυσμα k . Επομένως η (1.1.19) αντιπροσωπεύει λύση για επίπεδα κύματα, με το διάνυσμα του κυματαριθμού να είναι κάθετο στην επιφάνεια σταθερής φάσης.

§2. Ειδική Ακουστική Εμπέδηση

Ο λόγος της ακουστικής πίεσης, σε ένα μέσο, προς την συσχετιζόμενη στοιχειώδη ταχύτητα ορίζεται ως ειδική ακουστική εμπέδηση.

$$z = \frac{p}{u} \quad (1.2.1)$$

Για τα επίπεδα κύματα ο λόγος αυτός ισοδυναμεί με το γινόμενο της πυκνότητας επί την ταχύτητα του ήχου στο συγκεκριμένο μέσο.

$$z = \pm \rho_0 c \quad (1.2.2)$$

όπου ρ_0 είναι η πυκνότητα σε g/cm^3 και c η ταχύτητα του ήχου σε cm/sec . Έτσι, η ειδική ακουστική αντίσταση διαφόρων μέσων διάδοσης δίδεται σε μονάδες $g/(cm^2 sec)$ ενώ, αν οι τιμές της ακουστικής αντίστασης πολλαπλασιασθούν επί 10^{-5} , η ειδική ακουστική αντίσταση εκφράζεται σε *Rayls*, δηλαδή $1 Rayl = 1 g/(cm^2 sec) \times 10^{-5}$. Στη σχέση (1.2.2), το θετικό ή αρνητικό πρόσημο εξαρτάται από την κατεύθυνση διάδοσης (θετική ή αρνητική κατεύθυνση αντίστοιχα). Συχνά, το γινόμενο $\rho_0 c$ έχει μεγαλύτερη σπουδαιότητα ως μια χαρακτηριστική ιδιότητα του μέσου, απ' ό,τι το ρ_0 ή το c ανεξάρτητα μεταξύ τους. Για το λόγο αυτό το $\rho_0 c$ ονομάζεται χαρακτηριστική εμπέδηση (αντίσταση) του μέσου. Παρότι η ειδική ακουστική εμπέδηση του μέσου είναι μια πραγματική ποσότητα για τα οδεύοντα επίπεδα κύματα, αυτό δεν αληθεύει για τα στάσιμα επίπεδα κύματα ή για τα αποκλίνοντα κύματα.

Η z μπορεί να γραφτεί ως μιγαδικός:

$$z = r + ix \quad (1.2.3)$$

όπου r είναι η ειδική ακουστική ωμική αντίσταση και x η ειδική ακουστική χωρητική αντίσταση του μέσου για το συγκεκριμένο υπό μελέτη κύμα. Η χαρακτηριστική εμπίεση ενός μέσου για τα ακουστικά κύματα είναι ανάλογη με το δείκτη διάθλασης n ενός διαφανούς μέσου στα κύματα φωτός, με την κυματική εμπίεση ενός διηλεκτρικού μέσου στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και με την χαρακτηριστική εμπίεση z_0 σε μια ηλεκτρική γραμμή μεταφοράς.

Χαρακτηριστικές τιμές ακουστικής εμπίεσης:

- Στον αέρα $\rho_0 c = 1.2 \cdot 340 = 410 \text{ Pa sec/m}$
- Στο νερό $\rho_0 c = 1000 \cdot 1500 = 1.5 \cdot 10^6 \text{ Pa sec/m}$

§3. Ένταση του Ήχου

Η ακουστική ένταση I ορίζεται ως η ποσότητα της ακουστικής ενέργειας που διέρχεται από τη μοναδιαία επιφάνεια, στη μονάδα του χρόνου. Αυτή η ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τη σύνθεση της κινητικής ενέργειας και του έργου των δυνάμεων επαναφοράς των μορίων. Ισούται με το κατά μέσο όρο αποτέλεσμα της ακουστικής πίεσης εξ' αιτίας της ταχύτητας του ρευστού (Pierce, 1989). Για επίπεδο κύμα με p_o και $p_{rms} = \frac{p_o}{\sqrt{2}}$ προκύπτει:

$$I = \frac{p_o^2}{2\rho c} = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad (1.3.1)$$

Οι μονάδες της ακουστικής έντασης είναι Watts/m². Η ακουστική ισχύς P που λαμβάνεται από μία επιφάνεια Σ είναι το εξωτερικό γινόμενο της έντασης επί το εμβαδόν, δηλαδή:

$$P = I \times \Sigma = p_o^2 \frac{\Sigma}{2\rho c} = p_{rms}^2 \frac{\Sigma}{\rho c} \quad (1.3.2)$$

Τόσο η ακουστική πίεση και η ένταση όσο και η ισχύς, μπορούν να έχουν πολύ μεγάλο εύρος τιμών. Αρκεί να αναφερθεί ότι ένα ενεργό σόναρ μπορεί να εκπέμπει ισχύ δεικνύων κιλοβάτ ενώ ένα υποβρύχιο σε αθόρυβη κατάσταση μόλις μερικά μίλιβατ. Λόγω αυτού του τεράστιου εύρους, οι τιμές συνήθως κβαντίζονται σε λογαριθμική κλίμακα και μετρώνται σε Decibels (dB). Εξ ορισμού η κλίμακα Decibel αναφέρεται στο δεκαπάσιο του λογαρίθμου με βάση το δέκα, του λόγου των δύο ισχύων. Για παράδειγμα αν $10 \log_{10}(P_1/P_2) = 10 \text{ dB}$ τότε η ισχύς P_1 είναι δέκα φορές μεγαλύτερη της ισχύος P_2 .

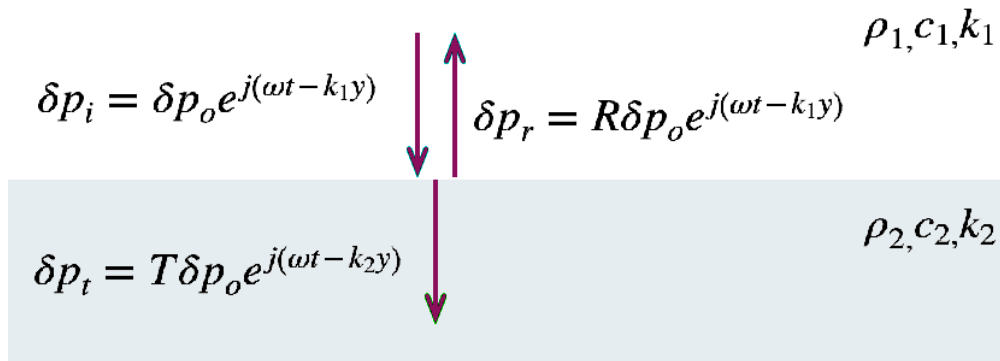
Προφανώς επειδή πίεση και ισχύς συνδέονται μέσω της σχέσης $P \propto \rho^2$, από τις ιδιότητες των λογαρίθμων προκύπτει:

$$10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = 10 \log\left(\frac{\rho_1^2}{\rho_2^2}\right) = 10 \log\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^2 = 20 \log\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \quad (1.3.3)$$

Δεν θα πρέπει λοιπόν να συγχέεται αυτή η διαφοροποίηση μεταξύ πυκνοτήτων και πιέσεων-εντάσεων. Μια διαφορά 10 dB αναφέρεται σε λόγο 10 όσον αφορά τις ενέργειες, αλλά σε λόγο $\sqrt{10} \approx 3,1$ όσον αφορά τις πιέσεις. Είναι αναγκαίο λοιπόν να πάντα να διευκρινίζεται η ποσότητα αναφοράς (dB re P_2 ή dB re ρ_2).

§4. Νόμος Snell

Απο τη συνέχεια της ακουστικής πίεσης και της ταχύτητας σε μία διαχωριστική επιφάνεια προκύπτει:



Εικόνα 1.1 Ακουστική ΣΝΔ Δεσσαλέρομος Σπυριδων

$$\delta p_0 e^{j(\omega t + k_1 0)} + R \delta p_0 e^{j(\omega t + k_1 0)} = T \delta p_0 e^{j(\omega t + k_2 0)} \Rightarrow \delta p_0 (1 + R) = T \delta p_0 \Rightarrow 1 + R = T \quad (1)$$

$$\frac{\delta p_0}{\rho_1 c_1} e^{j(\omega t + k_1 0)} - R \frac{\delta p_0}{\rho_1 c_1} e^{j(\omega t + k_1 0)} = T \frac{\delta p_0}{\rho_2 c_2} e^{j(\omega t + k_2 0)} \Rightarrow \frac{\delta p_0}{\rho_1 c_1} (1 - R) = T \frac{\delta p_0}{\rho_2 c_2} \Rightarrow \frac{1 - R}{\rho_1 c_1} = \frac{T}{\rho_2 c_2} \quad (2)$$

$$\frac{(1)}{(2)} \rightarrow \frac{1 + R}{1 - R} = \frac{T}{T} \Rightarrow \frac{1 + R}{1 - R} = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \Rightarrow R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}$$

Ως συντελεστής ανάκλασης ορίζεται:

$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (1.4.1)$$

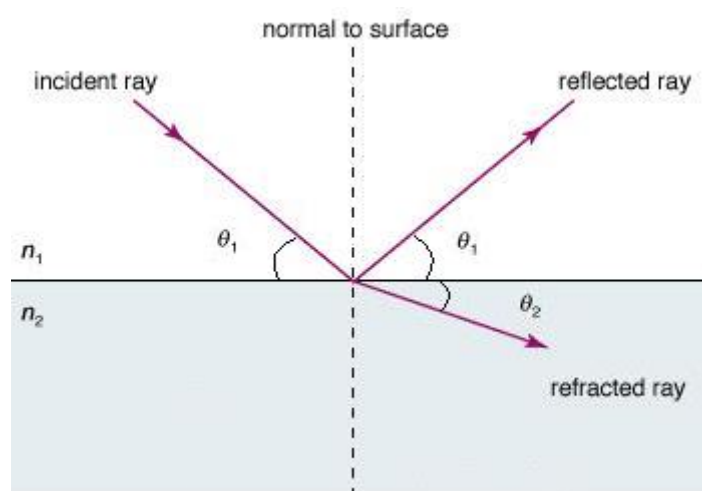
Και ως συντελεστής διέλευσης:

$$T = 1 + R \Rightarrow T = \frac{2 \rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (1.4.2)$$

Κατα τη μετάβαση του ήχου από ένα υλικό σε ένα άλλο παρατηρείται μια αλλαγή στη διεύθυνση του ανύσματος k (κάθετο στο μέτωπο του κύμματος). Υποθέτοντας ότι η ακουστική πηγή βρίσκεται σε αρκετά μεγάλη απόσταση από τη διεπιφάνεια, έτσι ώστε το μέτωπο του κύματος να μπορεί να θεωρηθεί επίπεδο, ότι η ταχύτητα στα δύο μέσα είναι c_1 και c_2 . Και ότι η πρόσπτωση του κύματος γίνεται υπο γωνία θ_1 ως προς τον κατακόρυφο άξονα, μέρος της ενέργειας ανακλάται και επιστρέφει στο αρχικό μέσο ενώ η υπόλοιπη ενέργεια διαθλάται υπό γωνία θ_2 στο δεύτερο μέσο. Ο νόμος του Snell του οποίου η αποδείξη γίνεται με απλή γεωμετρία, αποτελεί μια σχέση που συνδέει τις γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης με τις ταχύτητες του ήχου στα δύο μέσα.

$$\frac{\cos \theta_1}{c_1} = \frac{\cos \theta_2}{c_2} \quad (1.4.3)$$

Αντίστοιχα αποδεικνύεται ότι η γωνία ανάκλασης είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης.

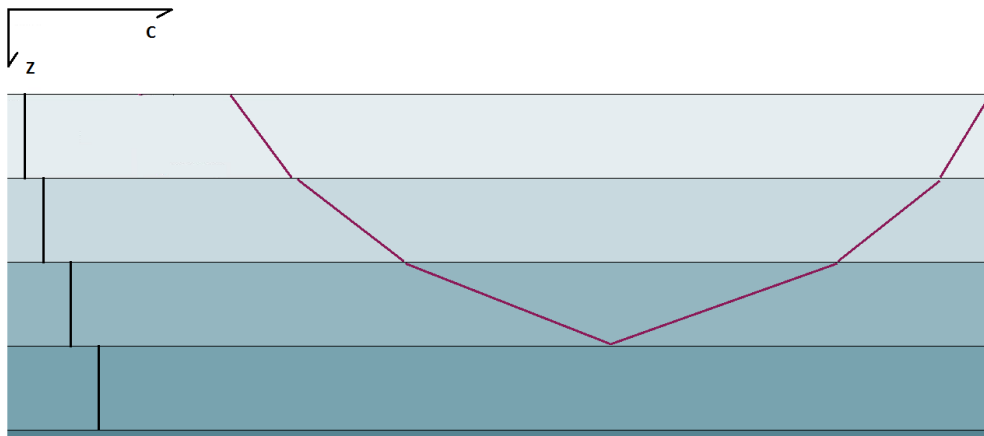


Εικόνα 1.2 Encyclopedia Britannica, Inc 2006

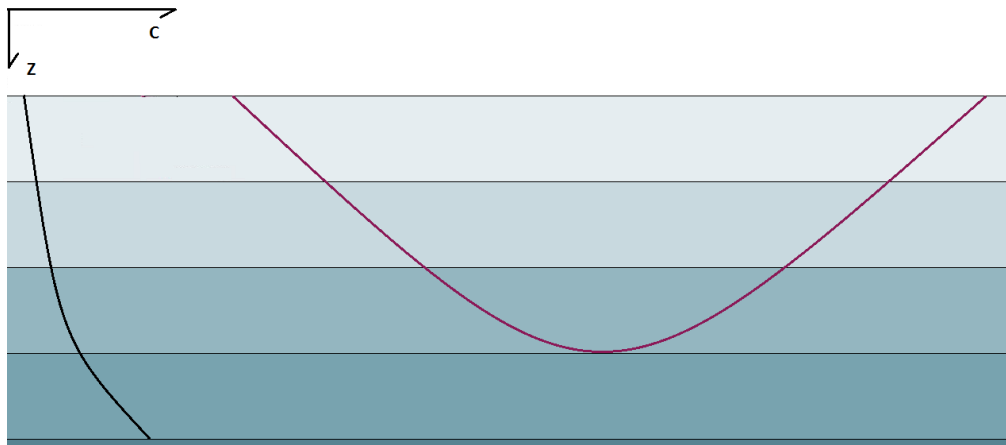
Η κρίσιμη γωνία είναι:

$$\beta_c = \arccos\left(\frac{c_1}{c_2}\right) \quad (1.4.4)$$

Σε αυτή τη γωνία, η διαθλώμενη ακτίνα κινείται παράλληλα στη διεπιφάνεια. Για γωνίες μικρότερες της κρίσιμης γωνίας παρατηρείται ολική ανάκλαση. Ο νόμος του Snell μπορεί να εφαρμοστεί και για πολλαπλά στρώματα. Στο σχήμα 1.3 η ακτίνα υπόκειται σε πολλαπλές διαθλάσεις μέχρι το επίπεδο στο οποίο παρατηρείται ολική ανάκλαση. Θεωρώντας ότι ο αριθμός των στρωμάτων προσεγγίζει ένα πολύ μεγάλο αριθμό, το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 1.4.



Εικόνα 1.3 Πορεία ακτίνας διαμέσου πολλαπλών στρωμάτων (θεωρητική προσέγγιση)



Εικόνα 1.4 Πορεία ακτίνας διαμέσου πολλαπλών στρωμάτων (ρεαλιστική προσέγγιση)

$$\frac{\cos \beta_1}{c_1} = \dots = \frac{\cos \beta_i}{c_i} = \frac{\cos \beta_{i+1}}{c_{i+1}} = \frac{\cos \beta_N}{c_N} = \text{σταθερά} \quad (1.4.5)$$

Εν κατακλείδει, το άνυσμα της δέσμης στρέφει προς το στρώμα με τη χαμηλότερη ταχύτητα.

§5. Προφίλ Ταχύτητας του Ήχου

Το προφίλ της ταχύτητας του ήχου (SSP) είναι μια γραφική παράσταση της ταχύτητας του ήχου στη θάλασσα συναρτήσει του βάθους. Το SSP εξαρτάται από την τοποθεσία, την αλατότητα, την εποχή, την ώρα της ημέρας και τις καιρικές συνθήκες. Στις περισσότερες περιοχές η αλατότητα μπορεί να θεωρηθεί σταθερή στα 35 ppt, αλλά σε μερικά περιβάλλοντα, αυτή διαφέρει. Κοντά σε εκβολές ποταμών η αλατότητα είναι ιδιαίτερα μεταβλητή, όπως πχ. στην Αρκτική λόγω της τήξεως του πάγου, κοντά στην επιφάνεια, καθώς και σε ορισμένα τμήματα της Βαλτικής. Πολύ χαμηλή αλατότητα παρατηρείται βέβαια και σε διάφορα βάθη. Χαμηλή περιεκτικότητα σε αλάτι σημαίνει πολύ χαμηλούς συντελεστές εξασθένησης και κατά συνέπεια μειωμένες απώλειες διάδοσης. Η θερμοκρασία της θάλασσας ως συνάρτηση του βάθους είναι μεταβλητή και δύσκολο να προσδιοριστεί. Η ταχύτητα του ήχου αυξάνει συναρτήσει της θερμοκρασίας και του βάθους. Όταν το νερό κοντά στην επιφάνεια είναι θερμότερο από ό,τι σε μεγαλύτερα βάθη, υπάρχουν δύο αντίθετες τάσεις καθώς αυξάνεται το βάθος:

- Η ταχύτητα του ήχου να μειώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας.
- Η ταχύτητα του ήχου να αυξάνεται με την αυξανόμενη πίεση.

Η πίεση σε σχέση με το βάθος δίνεται από τη σχέση:

$$P = P_0 + \rho gh \quad (1.5.1)$$

Πέραν όμως της σχέσης 1.5.1, υπάρχει και η ακριβέστερη (Leroy formula 1968)

$$P = [1,0052405(1 + 5,28 \cdot 10^{-3} \sin \varphi)z + 2,36 \cdot 10^{-6} z^2 + 10,196]10^4 Pa \quad (1.5.2)$$

όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος και z το βάθος. (Lurton, X. An Introduction to Underwater Acoustics, 1st ed. London, Praxis Publishing LTD, 2002, p37)

Το αποτέλεσμα αυτών των αντίθετων τάσεων παράγουν τις SSP που ποικίλουν ευρέως μέσα στα πρώτα εκατοντάδες μέτρα βάθους. Το SSP περιπλέκεται ακόμη περισσότερο από ημερήσιες αλλαγές, καθώς και από την ανάμιξη του επιφανειακού στρώματος από τον άνεμο και τα κύματα. Στην εικόνα 1.5 παρουσιάζεται μια τυπική βαθιά θάλασσα, στην οποία η SSP χωρίζεται σε τέσσερα κύρια επίπεδα:

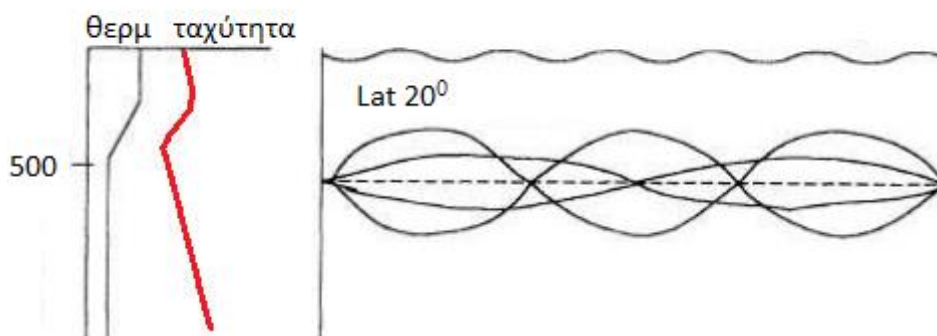
- **Επιφανειακό στρώμα:** πρόκειται για ένα στρώμα από ισοθερμικό νερό που αναμειγνύεται από τη δράση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας. Ο ήχος τείνει να παγιδευτεί σε αυτό το στρώμα λόγω των επιφανειακών ανακλάσεων και διαθλάσεων.
- **Εποχιακό θερμοκλινές:** εδώ η θερμοκρασία μειώνεται με το βάθος. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και του φθινοπώρου, το θερμοκλινές είναι ισχυρό και αναγνωρίσιμο. Κατά τη διάρκεια όμως του χειμώνα και της άνοιξης είναι αδύναμο και αναμειγνύεται με το επιφανειακό στρώμα.
- **Κύριο θερμοκλινές:** το στρώμα αυτό επηρεάζεται ελάχιστα από τις εποχές του χρόνου. Εμφανίζεται όπου παρουσιάζεται μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από κρύα βάθη της θάλασσας. Αν και η πίεση αυξάνει με το βάθος, η τάση στην αλλαγή θερμοκρασίας και πίεσης είναι να μειωθεί η ταχύτητα του ήχου μέσω αυτού του στρώματος.
- **Βαθιά ισοθερμική στρώση:** ο πυθμένας έχει σταθερή θερμοκρασία περίπου 4 °C. Η ταχύτητα του ήχου αυξάνει με την αυξανόμενη πίεση. Σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη το στρώμα εκτείνεται πιο κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας και στην περιοχή της Αρκτικής ενδέχεται να εξαλειφθούν εντελώς τα άλλα στρώματα. Η τάση αυτή φαίνεται στην διακεκομμένη καμπύλη του Σχήματος 1.5 για ένα γεωγραφικό πλάτος περίπου 60° .



Εικόνα 1.5 Τυπική βαθιά θάλασσα SSP

5.1. Βαθύ Κανάλι Ήχου

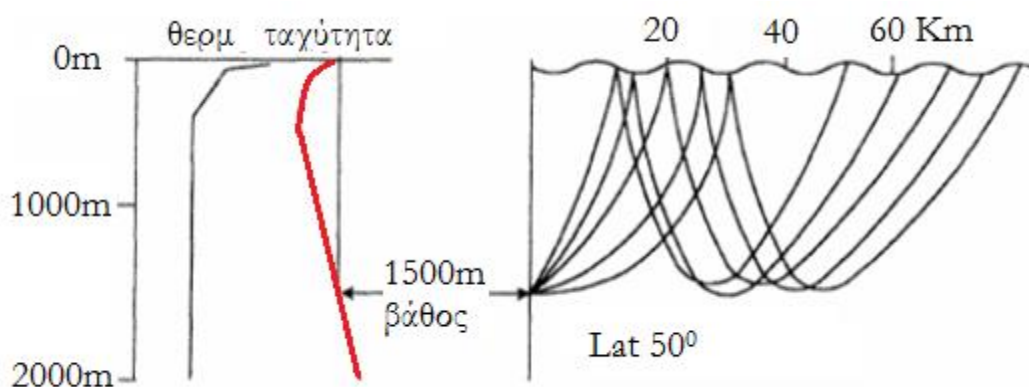
Μεταξύ της αρνητικής κλίσης του κύριου θερμοκλινούς και της θετικής κλίσης από το βαθύ στρώμα, υπάρχει μια ελάχιστη ταχύτητα ήχου, όπου ο ήχος έχει την τάση να εστιάζεται λόγω διάθλασης. Το βάθος στο οποίο λαμβάνει χώρα αυτή η εστίαση είναι γνωστό ως το βαθύ κανάλι ήχου (DSC). Για να καταστεί εκμεταλεύσιμο αυτό το κανάλι, η ακουστική πηγή τοποθετείται κοντά στο ελάχιστο του SSP (που μπορεί να είναι μόνο μερικές εκατοντάδες μέτρα σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη) και, επειδή η εξάπλωση είναι κυλινδρική, τα ακουστικά κύματα παγιδεύονται μέσα στο προαναφερθέν κανάλι και διαδίδονται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν ο δέκτης είναι κοντά στον άξονα του καναλιού. Το Σχήμα 1.6 παρουσιάζει ένα απλοποιημένο διάγραμμα ακτίνας ήχου για μια πηγή τοποθετημένη σε βάθος κοντά στο ελάχιστο της ταχύτητας του ήχου και με κατακόρυφο εύρος δέσμης περίπου 20° .



Εικόνα 1.6 Διάδοση στο κανάλι βαθύ ήχου

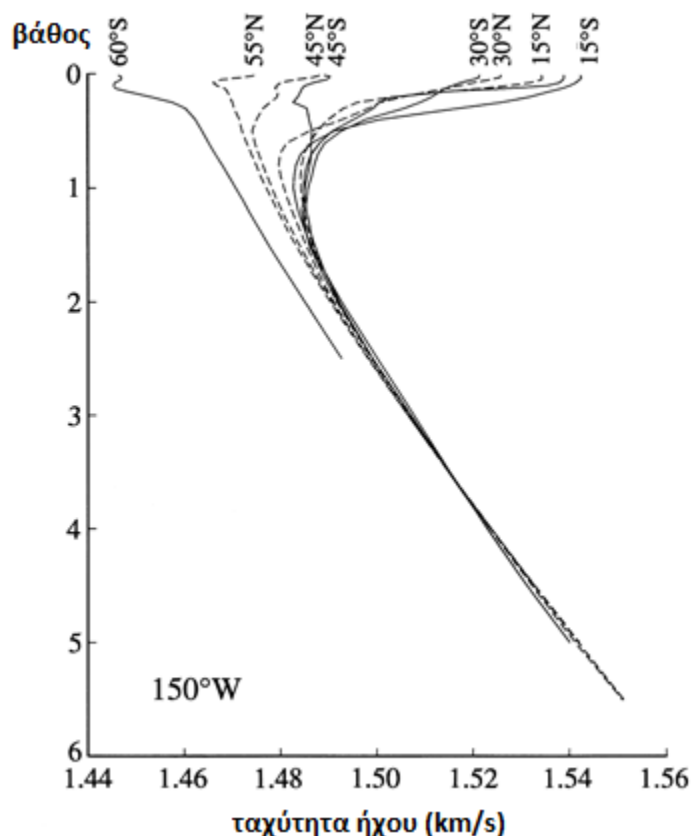
5.2. Αξιόπιστη Ακουστική Διαδρομή

Τοποθετώντας την πηγή βαθιά στην θάλασσα (τουλάχιστον 1000 m) μπορεί να βελτιωθεί η ανίχνευση των ρηχών στόχων, δηλαδή στόχων σε βάθη κατάδυσης τυπικών υποβρύχιων (Εικόνα 1.7). Η διαδρομή είναι γνωστή ως «αξιόπιστη», επειδή δεν είναι ευαίσθητη στις μεγάλες μεταβολές της επιφάνειας της θάλασσας αλλά ούτε και στις απώλειες απορρόφησης του πυθμένα. Προϋποθέσεις για αξιόπιστη ακουστική διαδρομή (RAP), υπάρχουν, όταν η πηγή τοποθετείται σε ένα κρίσιμο βάθος, όπου η ταχύτητα του ήχου είναι ίση με την ταχύτητα του ήχου στην επιφάνεια.



Εικόνα 1.7 Βαθιά πηγή: αξιόπιστη ακουστική διαδρομή

Σε ιδιαίτερα υψηλά γεωγραφικά πλάτη, το DSC (Κανάλι βαθύ ήχου) μπορεί να είναι κοντά στο κρίσιμο βάθος της RAP (αξιόπιστης ακουστικής διαδρομής). Η ικανότητα να κατευθύνει το Sonar τη δέσμη κάθετα καθώς και η ικανότητά του να χρησιμοποιηθεί σε μεταβλητά βάθη, βοηθά στη μείωση των σκοτεινών ζωνών που διαφορετικά θα υπήρχαν.

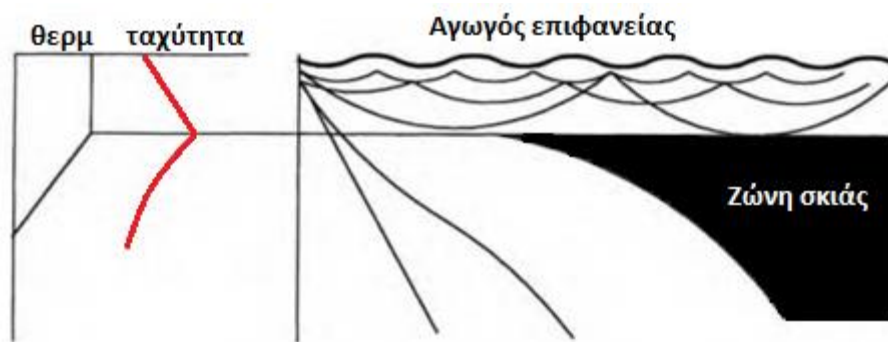


Εικόνα 1.8 Ταχύτητα του ήχου σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος

Τα μεγάλα βάθη, τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη τόσο της πηγής όσο και του δέκτη (τουλάχιστον 500 m για τη λειτουργία DSC και 1000 μ. για τη λειτουργία RAP) επιβάλλουν αυστηρούς μηχανικούς και κινητικούς περιορισμούς σχετικά με τη χρήση τους. Ο σχεδιασμός ικανών στοιχείων λειτουργίας σε βάθη άνω των, 1000 m είναι δύσκολος, αν όχι αδύνατος και οι απώλειες στα μακριά πλέον καλώδια περιορίζουν αισθητά τα αποτελέσματα.

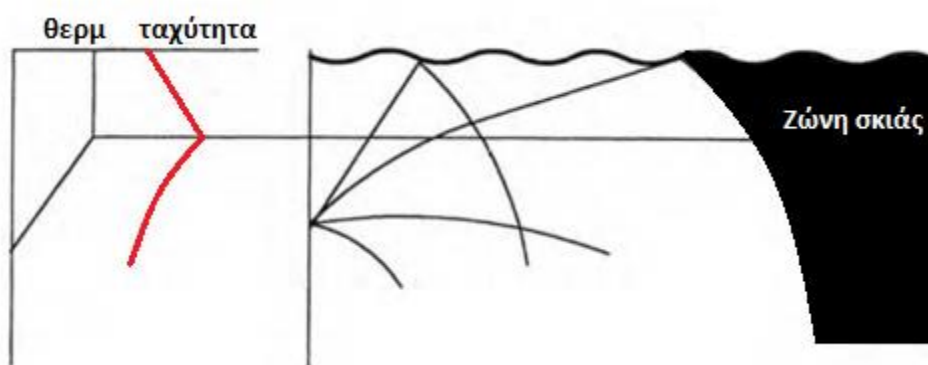
5.3. Επιφανειακός Αγωγός Διάδοσης

Όταν οι άνεμοι και τα κύματα επιφανείας αναμιγνύονται με τα ρηχά στρώματα της θάλασσας, παράγεται ένα σχεδόν ισοθερμικό στρώμα, όπου το αποτέλεσμα της πίεσης κυριαρχεί και η ταχύτητα του ήχου αυξάνει μέχρι το κάτω μέρος του αγωγού. Έπειτα η θερμοκρασία αρχίζει να πέφτει και η ταχύτητα του ήχου αρχίζει να μειώνεται μέχρι το ελάχιστο της DSC. Αυτό το ισοθερμικό στρώμα (ο αγωγός επιφανείας) μπορεί να είναι από πολύ μικρός (5 μ) έως και πολύ μεγάλος (200 μ). Οι αγωγοί των 50-100 μ είναι κοινοί στα ψυχρότερα νερά του κόσμου. Το σχήμα 1.9 δείχνει την επίδραση της διάδοσης του ήχου από μια πηγή εντός του αγωγού. Οι ακτίνες που εκπέμπονται κοντά στο οριζόντιο διαθλώνται προς τα πάνω και υποβάλλονται σε πολλές ανακλάσεις επιφανείας. Από την άλλη, οι ακτίνες που διαπερνούν το στρώμα διαθλώνται γρήγορα προς τα κάτω, παράγοντας έτσι μια ζώνη σιάς, όπου σχεδόν καμία ηχητική ενέργεια δεν τη διαπερνά. Συνεπώς στόχοι εντός της ζώνης σιάς, δηλ. κάτω από τον επιφανειακό αγωγό, είναι δύσκολο να ανιχνευθούν. Όπως σε όλες τις διαδόσεις στη θάλασσα, καμία κατάσταση δεν είναι τέλεια και δεν περιγράφεται από μία απλοποιημένη ακτίνα ίχνους. Η ζώνη σιάς, είναι μια περιοχή σιάς όπου η ένταση ήχου είναι πολύ μειωμένη και η μετάβαση από τον επιφανειακό αγωγό δεν είναι δυνατή.



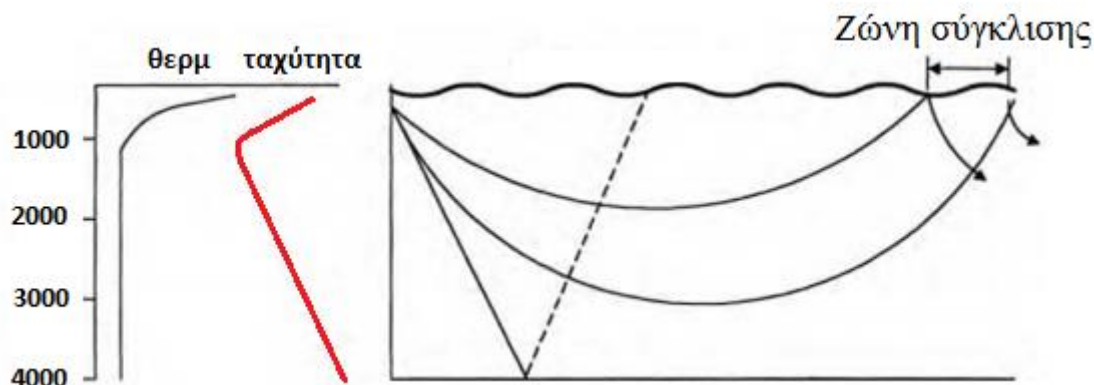
Εικόνα 1.9 Επιφανειακός αγωγός διάδοσης: ρηχή πηγή

Η αύξηση του βάθους της πηγής έτσι ώστε να είναι κάτω από το επιφανειακό στρώμα (Σχήμα 1.10) έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της εμβέλειας έως την έναρξη της ζώνης σκιάς, αλλά τότε αυτή μπορεί και εκτείνεται και εντός του επιφανειακού αγωγού. Έτσι με DSC και με RAP λειτουργίες, με δυνατότητα δηλαδή μεταβολής του βάθους (ένα μεταβλητού βάθους Sonar VDS το οποίο αναπτύσσεται από ένα κινούμενο πλοίο επιφανείας ή ένα ελικόπτερο) προσφέρονται σημαντικά λειτουργικά πλεονεκτήματα.



Εικόνα 1.10 Επιφανειακός αγωγός διάδοσης: βαθύτερη πηγή

5.4. Διάδοση Ζώνης Σύγκλισης

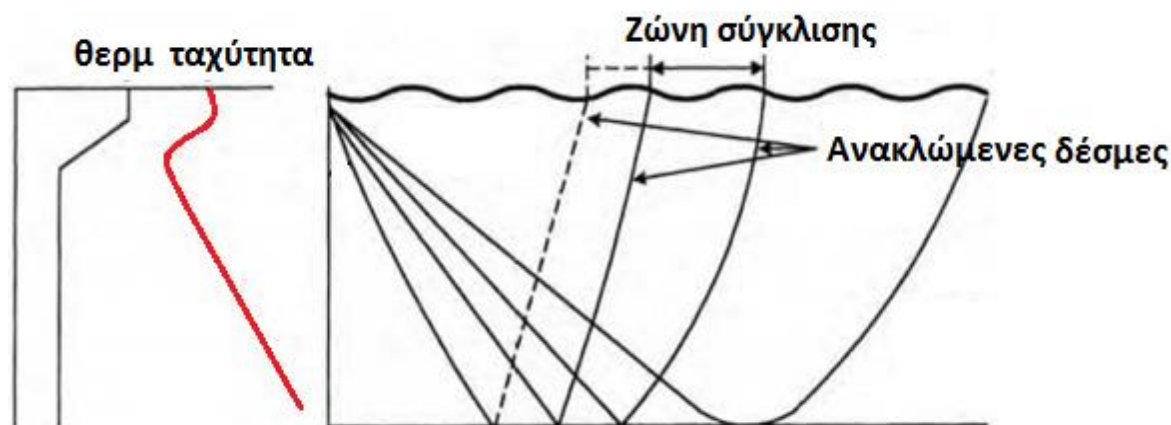


Εικόνα 1.11 Διάδοση ζώνης σύγκλισης

Ηχητικές ακτίνες ενδέχεται να ανέλθουν σε απότομες γωνίες παράγοντας ζώνες σκιάς. Για μεγαλύτερα βάθη αυτές οι ακτίνες στρέφονται προς τα πάνω και σχηματίζουν δακτυλίους υψηλής έντασης. Κάθε δακτύλιος είναι γνωστός ως ζώνη σύγκλισης (CZ). Το νερό πρέπει να είναι αρκετά βαθύ για να συμβεί αυτή η προς τα πάνω διάθλαση, η οποία εμποδίζει τις ακτίνες να χτυπήσουν στον πυθμένα. Τυπικά το βάθος του νερού πρέπει να είναι άνω των 3000 μέτρων. Ανάλογα με το βυθό, η πρώτη ζώνη σύγκλισης θα συμβεί σε περίπου 30-50 χλμ. και θα έχει 3-5 χιλιόμετρα πλάτος. Η διάδοση είναι σφαιρικής εξάπλωσης (δεν υπάρχουν όρια για τη συγκράτηση του ήχου) και οι απώλειες απορρόφησης είναι οι αναμενόμενες για μία θερμοκρασία περίπου 4 °C (η θερμοκρασία αυτή να καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής). Το αποτέλεσμα της εστίασης δίνει μία αύξηση της σύγκλισης συνήθως 3-6 dB. Οι διαδοχικές ζώνες σύγκλισης εμφανίζονται σε πολλαπλάσια του αρχικού εύρους. Παθητικά συστήματα συνήθως μπορούν να κάνουν ανιχνεύσεις μέχρι και για δεύτερη ή ακόμη και τρίτη ζώνη σύγκλισης.

5.5. Διάδοση Αναπήδησης Πυθμένα

Διάδοση είναι δυνατή και με χρήση των ανακλάσεων του πυθμένα (Σχήμα 1.12). Η δέσμη του Sonar είναι τώρα σιόπιμα προς τα κάτω σε σχετικά απότομες γωνίες. Η αποτελεσματικότητα του τρόπου καθορίζεται από τη φύση του πυθμένα, ο οποίος είναι είτε απορροφητικός είτε ανακλαστικός. Η απορρόφηση του πυθμένα μεταβάλλεται με τη γωνία πρόσκρουσης, όπως και με τις ζώνες σύγκλισης. Υπάρχει ένα εύρος δακτυλίου, το οποίο ποικίλει ανάλογα με τη γωνία της δέσμης από το Sonar. Για μικρές γωνίες πρόσπτωσης το εύρος του αντίστοιχου δακτυλίου μπορεί να είναι πολύ μεγάλο. Εδώ δεν υφίσταται κέρδος εστίασης και η απώλεια από την αντανάκλαση του πυθμένα είναι τυπικά μεταξύ 10 και 20 dB. Ως εκ τούτου η λειτουργία είναι πολύ απαιτητική σε ισχύ και μέγεθος διάταξης.



Εικόνα 1.12 Διάδοση αναπήδησης πυθμένα

Ένα τέτοιο λοιπόν ενεργό σύστημα, θα πρέπει να είναι μεγάλο, πολύ απαιτητικό σε τροφοδοτικά και πομπούς καθώς και θα απαιτεί μεγάλο χώρο για την τοποθέτηση των συστοιχιών. Το εύρος βέβαια στη λειτουργία BB (Bottom Bounce) είναι μεγαλύτερο από ό,τι στην εστιασμένη CZ λειτουργία (Dessalermos, Spyridon. Undersea acoustic propagation channel estimation. Naval Postgraduate School Monterey, California, 2005).

§6. Εξίσωση Sonar

Υπάρχουν πολλές μορφές εξισώσεων που συνθέτουν την εξίσωση του παθητικού SONAR αλλά το κοινό μεταξύ όλων αυτών είναι ότι προσπαθούν να ποσοτικοποιήσουν όλες τις παραμέτρους στην παθητική ανίχνευση του ήχου από ένα στόχο. Η μορφή που θα παρουσιαστεί είναι:

$$\frac{L_S}{N} = S_L - T_L - (N_L - D_I) \quad (1.6.1)$$

Ο ήχος που εκπέμπεται από ένα υποβρύχιο αντιπροσωπεύεται από το S_L . Οι απώλειες κατά τη διάδοση του θορύβου αντιπροσωπεύονται από το T_L . Ο ανακλώμενος ήχος από το βυθό είναι N_L , και η κατευθυντικότητα αντιπροσωπεύεται από το δείκτη D_I . (United States Naval Academy, Physics Department, Ed Tucholski, chapter 9, 2007).

6.1. Λόγος Σήματος προς Θόρυβο

Το επίπεδο της έντασης στα αριστερά είναι ο λόγος του σήματος που λαμβάνεται από ένα δέκτη σόναρ προς το θόρυβο. Ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο είναι μια σημαντική έννοια, επειδή αντιπροσωπεύει το βαθμό στον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ένας ενισχυτής προκειμένου να βελτιωθεί η έξοδος. Αν η αναλογία του σήματος προς το θόρυβο (SNR) είναι κοντά στη μονάδα, ο θόρυβος είναι σχεδόν ίσος με το σήμα. Οπότε η ενίσχυση θα αυξήσει και το θόρυβο και δεν παρέχεται καμία ουσιαστική βελτίωση. Για υψηλές τιμές του δείκτη, η ενίσχυση θα βελτιώσει το μέγεθος του σήματος σε σχέση με το θόρυβο. Πόσο μεγάλος θα πρέπει όμως να είναι ο λόγος αυτός; Αυτό είναι ένα κατώφλι που ορίζεται αυθαίρετα (DT). Κάθε περίπτωση πάνω από το όριο ανίχνευσης, αναφέρεται ως υπέρβαση σήματος. Συνήθως το κατώφλι τίθεται έτσι ώστε ένας εκπαιδευμένος χειριστής σόναρ να είναι

σε θέση να διακρίνει ένα στόχο κατά το 50% του χρόνου. Να επισημανθεί ότι το παθητικό σόναρ συγκρίνει "επίπεδα" (σε dB) και όχι πραγματικές εντάσεις. Ως εκ τούτου το L_S / N ορίζεται ως:

$$L_{\frac{S}{N}} = 10 \log \left(\frac{Signal}{Noise} \right) \quad (1.6.2)$$

6.2. Επίπεδο σήματος

Η στάθμη του σήματος που λαμβάνεται στον ανιχνευτή είναι το πηλίκο των δύο ποσοτήτων στη δεξιά πλευρά της παρακάτω εξίσωσης. Πρόκειται για την ένταση του σήματος που εκπέμπεται από το στόχο και την ένταση του σήματος που λαμβάνεται από την πηγή. Αυτός ο λογάριθμος του λόγου, ονομάζεται source level (SL):

$$S_L = 10 \log \frac{I_S}{I_0} \quad (1.6.3)$$

Με I_S συμβολίζεται η ένταση του σήματος που εκπέμπει ο στόχος και με I_0 η ένταση αναφοράς.

Καθώς το σήμα ταξιδεύει μέσα στο νερό, ένα μέρος του σήματος χάνεται μέσω διαφόρων μηχανισμών. Το σύνολο αυτής της απώλειας ποσοτικοποιείται ως απώλεια διάδοσης.

$$T_L = 10 \log \frac{I_S}{I_R} \quad (1.6.4)$$

όπου I_R η ένταση του ληφθέντος σήματος.

Η διαφορά των δύο παραπάνω συντελεστών καθορίζει το ποσό του σήματος που λαμβάνει ο ανιχνευτής.

$$L_S = S_L - T_L \quad (1.6.5)$$

Προφανώς η απώλεια διάδοσης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ της πηγής και του δέκτη. Δεδομένου ότι αυτή η απόσταση είναι η πλέον σημαντική σε μια εμπλοκή, προσαρμόζεται αντίστοιχα η εξίσωση του παθητικού σόναρ για να την περιλαμβάνει. Η απώλεια που μπορεί να γίνει ανεκτή και ταυτόχρονα να εξακολουθεί να τηρείται το κριτήριο ανίχνευσης, ονομάζεται συντελεστής κέρδους. Η ποσότητα αυτή παρέχει ένα μέσο για την εκτίμηση της απόστασης στην οποία μπορεί να επιτευχθεί ανίχνευση. Ο συντελεστής κέρδους είναι λοιπόν:

$$T_{LA} = S_L - L_{\frac{S}{N}K} - (N_L - D_I) \quad (1.6.6)$$

όπου T_{LA} είναι ο συντελεστής κέρδους, $L_{(S/N)K}$ το προαναφερθέν κατώφλι και $(N_L - D_I)$ το επίπεδο και η κατεύθυνση του θορύβου.

6.3. Επίπεδο θορύβου

Το επίπεδο του θορύβου N_L είναι το άθροισμα του υποβάθρου και του αυτοθορύβου τα οποία μειώνουν την ικανότητα ανίχνευσης του σήματος του στόχου. Δίνεται από τον τύπο:

$$N_L = 10 \log\left(\frac{I_n}{I_0}\right) \quad (1.6.7)$$

όπου I_n η ένταση του θορύβου (Joseph T. Hansen, link budget analysis for undersea acoustic signaling ,naval postgraduate school June 2002).

Σε ορισμένες περιπτώσεις λαμβάνεται υπ' όψιν και η κατευθυντικότητα D_I , που είναι μια αναλογία του θορύβου που ανιχνεύεται σε στοχευμένη κατεύθυνση, προς το θόρυβο από οποιαδήποτε κατεύθυνση.

$$D_1 = 10 \log\left(\frac{N_{ND}}{N_D}\right) \quad (1.6.8)$$

όπου N_{ND} είναι η ισχύς του θορύβου απο οποιαδήποτε κατεύθυνση και N_D η ισχύς του θορύβου σε στοχευμένη κατεύθυνση.

Όταν ένας ανιχνευτής καταγράφει προς κάθε κατεύθυνση, ο λόγος θα είναι 1, οπότε το D_L θα αντιστοιχεί σε 0 dB. Αν πρόκειται για συστοιχία υδροφώνων, οι λοβοί (κατευθύνσεις) που σχηματίζονται εισάγουν την κατευθυντικότητα και ο ισότροπος θόρυβος συμπιέζεται. Το επίπεδο θορύβου L_n είναι το άθροισμα της συνολικής επίδρασης του θορύβου και του αυτοθορύβου που εμποδίζουν την ικανότητα ανίχνευσης του σήματος που προέρχεται από το στόχο.

$$L_n = (N_L - D_I) \quad (2.6.9)$$

§7. Σύνοψη Κεφαλαίου

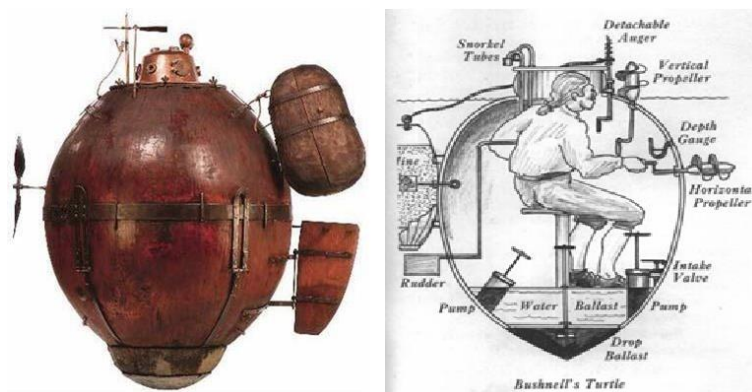
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι φυσικοί νόμοι και οι αρχές που διέπουν τη διάδοση του ήχου στο νερό, καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτής της διάδοσης. Παρουσιάστηκε η κυματική εξίσωση και οι λύσεις της, καθώς και η ειδική ακουστική εμπέδηση. Επιπλέον παρουσιάστηκαν επίσης η μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με τις παραμέτρους που την επηρεάζουν, η διάθλαση που προκαλείται από τη διαφοροποίησή της και ο νόμος του Snell. Στην τελευταία παράγραφο αναλύεται η εξίσωση που διέπει τα παθητικά σόναρ, οι παράμετροι και οι μεταβλητές που τη συνθέτουν. Τέλος παρουσιάστηκε το κατώφλι του εντοπισμού και πως αυτό ορίζεται.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Θεωρία Ανθυποβρυχιακού Πολέμου

Οι πρώτες απόπειρες για την κατασκευή ενός μέσου που θα κινείται και θα επιχειρεί κάτω από την επιφάνεια του νερού, χρονολογούνται εδώ και τέσσερις σχεδόν αιώνες. Πραγματικός όμως πρόγονος του υποβρύχιου μπορεί να θεωρηθεί μόνο το μικρό δισκοειδές ξύλινο σκάφος American turtle, που κατασκεύασε το 1775 ο Αμερικανός Ντέιβιντ Μπουνσέλ. Είκοσι πέντε χρόνια αργότερα ο επίσης Αμερικανός Ρόμπερτ Φούλτον κατασκεύασε ένα ανάλογο σκάφος, το Nautilus, στη Βρέστη. Και τα δύο καταδύονταν με υδάτινο έρμα και ήταν χειροκίνητα. Από τις προσπάθειες που ακολούθησαν αξίζει να μνημονευθεί το Plongeur των Γάλλων Μπουρζουά και Μπρεν (1863). Πρόκειται για ένα σιδερένιο σκάφος μήκους 42,5 μ., εφοδιασμένο με εμβολοφόρα μηχανή, που λειτουργούσε με πεπιεσμένο αέρα. Με τις προόδους που σημειώθηκαν στην κατασκευή των συσσωρευτών, τα επόμενα σχέδια για υποβρύχια βασίστηκαν στην ηλεκτρική ενέργεια, η οποία όμως παρουσίαζε κι αυτή περιορισμένη αυτονομία, γι' αυτό τελικά υιοθετήθηκε ο θερμοδυναμικός κινητήρας.

Υποβρύχια με την κοινή έννοια, που να μπορούν δηλαδή να καταδύονται και να αναδύονται κατά βούληση, παρουσιάστηκαν στο τέλος του 19ου αι. κι από τότε εξελίχθηκαν συνεχώς και ως πλοία αλλά και ως προς τον εξοπλισμό τους, προτού καταλήξουν στα σημερινά που κινούνται με ατομική ενέργεια και έχουν τεράστια αυτονομία.



Εικόνα 2.1 Πρώτες συσκευές για κίνηση κάτω από το νερό (<http://www.navsourc.org/>)

Η υπεροχή των υποβρυχίων κατά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο καθώς και τις πρώτες μέρες του Β' Παγκοσμίου Πολέμου οδήγησε σε τραγικές (και απρόβλεπτες) απώλειες μεταξύ όλων των μεγάλων ναυτικών δυνάμεων που πήραν μέρος στις συγκρούσεις. Ειδικά ο Β' Παγκοσμίος Πόλεμος ήταν ένα ορόσημο για αρκετές και σημαντικές εξελίξεις στον υποθαλάσσιο πόλεμο. Παραδείγματα αποτελούν η ανάπτυξη των ενεργών σόναρ ή ASDIC, σαν απάντηση στον ολοένα αυξανόμενο αριθμό των Γερμανικών U-boat τα οποία έφτασαν περίπου τα 240 μέχρι το Μάρτιο του 1943. Στην εποχή που ακολούθησε, και κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, τα σκληρά μαθήματα και οι πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες του Β' Παγκοσμίου Πολέμου είχαν ως αποτέλεσμα να βελτιωθούν σημαντικά τόσο τα υποβρύχια όσο και ο ανθυποβρυχιακός πόλεμος. Αυτό περιελάμβανε αλλαγές στη μορφή του κύτους (με απαρχή το USS *Albacore* (AGSS-569), γύρω στο 1948), αλλαγή στις τεχνολογίες πρόωσης (εμφανίζονται πυρηνοκίνητα υποβρύχια, γύρω στο 1951), και την άφιξη των υποβρυχίων με βαλλιστικούς πυραύλους στα μέσα της δεκαετίας του 1950. Η πρόωση με τη χρήση πυρηνικού αντιδραστήρα επιτρέπει στο υποβρύχιο να βρίσκεται για μήνες ή και χρόνια, (θεωρητικά τουλάχιστον) στη θάλασσα χωρίς ανάγκη ανεφοδιασμού σε καύσιμα ή οξυγόνο. Το USS *Nautilus* (SSN-571) ήταν το πρώτο πυρηνοκίνητο υποβρύχιο στην ιστορία. Η δυνατότητα εκτόξευσης πυραύλων με πυρηνικές κεφαλές, σε συνδυασμό με τον μη εύκολο εντοπισμό του

υποβρυχίου από τον αντίπαλο, καθιστούν ακόμα και σήμερα ένα πυρηνικό υποβρύχιο πολύτιμο όπλο. Έτσι, κυρίως για τους Αμερικανούς και τους Σοβιετικούς, ο στόλος των υποβρυχίων αποτέλεσε παρακαταθήκη για την περίπτωση ενός πυρηνικού πολέμου, κυρίως για το δεύτερο χτύπημα, και γι αυτό αναπτύχθηκε ανάλογα.



Εικόνα 2.2 USS Albacore (<http://www.navsource.org/>)

Πολύ λιγότερο γνωστές είναι οι αμέτρητες φορές κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου (αλλά και μετέπειτα), όταν μέσω υποβρυχίων έχουν γίνει προσπάθειες να επηρεαστεί, άμεσα ή έμμεσα, η πορεία των γεω-πολιτικών γεγονότων από την ίδια την παρουσία τους και μόνο. Παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη του HMS *Dreadnought* στα Φώκλαντ τον Νοέμβριο του 1977, ή η χρήση ενός Ολλανδικού υποβρυχίου κλάσης Walrus το οποίο επιχειρούσε κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης του Κοσσυφοπεδίου το 1999 και ήταν επιφορτισμένο να εμποδίζει τα όποια Γιουγκοσλαβικά υποβρύχια ενδεχομένως να απειλούσαν πλοία του Νατοϊκού στόλου. Τόσο το κινήγι για την καταστροφή των υποβρυχίων αλλά και από την άλλη πλευρά η ανάγκη για αποφυγή τους, εξακολουθεί να ωθεί την τεχνολογία στα όρια.

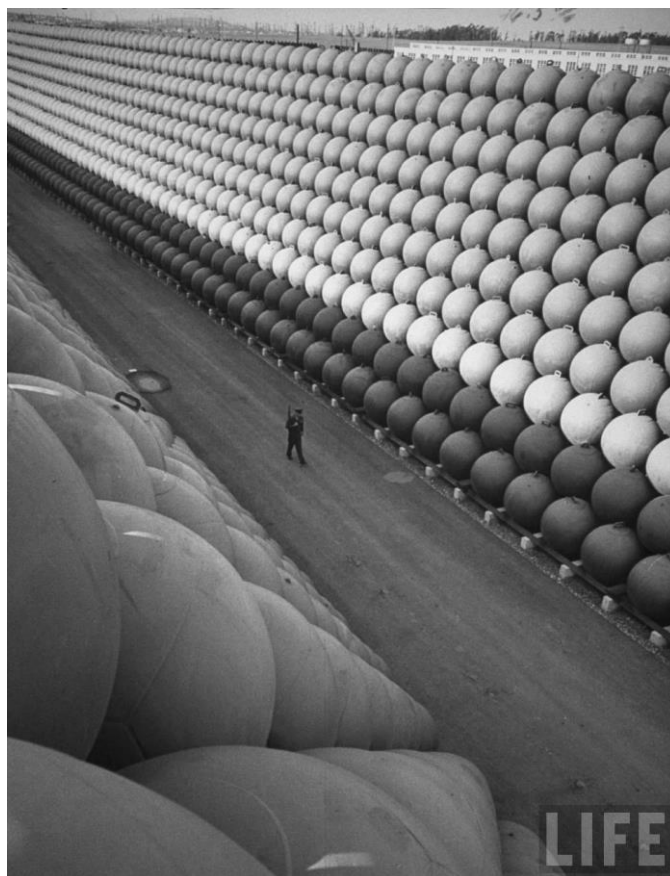
§1. Ιστορική Αναδρομή

Κατά το δέκατο ένατο αιώνα, οι επιστήμονες άρχισαν να εξερευνούν τις φυσικές ιδιότητες που σχετίζονται με τη διάδοση του ήχου στο νερό. Το 1882, ο Ελβετός φυσικός Daviel Colladen προσπάθησε να υπολογίσει την ταχύτητα του ήχου στο νερό στη λίμνη της Γενεύης. Στον απόηχο της καταστροφής του Τιτανικού, ο Langevin και ο συνάδελφός του Chilowsky (Ρώσος μηχανικός), ανέπτυξαν αυτό που ονομάζεται «υδρόφωνο» ως μηχανισμό για μπορούν τα πλοία να ανιχνεύουν τα παγόβουνα. Παρόμοια συστήματα τέθηκαν άμεσα σε χρήση ως βοηθήματα για την υποβρύχια πλοήγηση. Η βελτίωση των ηλεκτρονικών και της τεχνολογίας γενικότερα επέτρεψαν την παραγωγή σημαντικά βελτιωμένων συσκευών ακρόασης και καταγραφής.

Η απειλή των υποβρυχίων κατά τη διάρκεια του Α Παγκοσμίου Πολέμου έκανε επείγουσα την εξέλιξη των SONAR. Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ηχητικά κύματα και το αντίστροφο, ενεργοποίησε ραγδαίες εξελίξεις κατά τα τελευταία χρόνια του πολέμου. Αν και τα ενεργά SONAR αναπτύχθηκαν πολύ αργά για να χρησιμοποιηθούν ευρέως κατά τη διάρκεια του Α Παγκοσμίου Πολέμου, η προσπάθεια για την ανάπτυξή τους επέφερε τεράστια τεχνολογικά κέρδη. Από νωρίς στο Β Παγκόσμιο Πόλεμο, το βρετανικό ναυτικό κατέβαλε προσπάθειες για να εξοπλίσει κάθε πλοίο του, με προηγμένες συσκευές ανίχνευσης. Η χρήση των ASDIC αποδείχθηκε καθοριστική για την προσπάθεια των βρετανών να αποκρούσουν τα γερμανικά υποβρύχια.

§2. Αντίμετρα

Ένα πρόβλημα ζωτικής σημασίας, τόσο για τα πλοία επιφανείας όσο και για τα υποβρύχια, αποτελεί ο έγκαιρος εντοπισμός και η αποφυγή ή εξουδετέρωση των διαρκώς τεχνολογικά εξελισσόμενων τορπιλών. Η αποτελεσματική αντιμετώπιση των όπλων αυτών είναι από τη φύση της ένα αρκετά περίπλοκο έργο. Οι μικροί χρόνοι αντίδρασης, το αντίξοο θαλάσσιο περιβάλλον και οι αυξημένες ικανότητες των μοντέρνων υποβρυχίων όπλων, συνθέτουν ένα δύσκολο πρόβλημα για την αντιμετώπιση της απειλής αυτής. Ιστορικά, τα πρώτα αντίμετρα εναντίον των τορπιλών ήταν εντελώς παθητικά, όπως πχ η τοποθέτηση συρμάτων φραγμάτων γύρω από αγκυροβολημένα πλοία και η κατασκευή στεγανών διαμερισμάτων στη γάστρα των πλοίων. Η αντιμετώπιση των ακουστικών τορπιλών, αρχικά στηριζόταν κυρίως στη μείωση του εκπεμπόμενου αυτοθορύβου, καθώς και της μαγνητικής υπογραφής του σκάφους, καθώς επίσης και στον έλεγχο της λειτουργίας των συστημάτων sonar (ελαχιστοποίηση των εκπομπών των ενεργητικών συστημάτων και εντοπισμός επερχόμενων τορπιλών με την εκμετάλλευση των παθητικών συστημάτων sonar). Στη συνέχεια, μεταξύ άλλων ακολούθησε η ανάπτυξη διαφόρων αντιμέτρων (soft & hard kill). Σήμερα, διεξάγονται οι εντατικότερες έρευνες από ποτέ, για την εξεύρεση εξυπνότερων και αποτελεσματικότερων τεχνικών αντιμετώπισης των τορπιλών. Μία διάκριση των αντιμέτρων κατά τορπιλών είναι τα τεχνικά ή υλικά αντίμετρα (material TCM) και τα τακτικά αντίμετρα (tactical TCM). Τα πρώτα αφορούν σε μεθόδους ή υλικά μέσα, που έχουν σκοπό την προσέλκυση ή την καταστροφή της τορπίλης και μπορεί να είναι αναλώσιμα είτε μη αναλώσιμα. Τα δεύτερα αποτελούν τρόπους ενέργειας ή δράσης, πχ χειρισμοί τακτικού επιπέδου, για την αποφυγή τορπίλης.



Εικόνα 2.3 Ένας φύλακας στον US Highway 101 όπου έχουν στοιβαχτεί τμήματα των μεταλλικών δικτύων που προστάτευαν τα λιμάνια κατά το ΒΠΠ (Hank Walker, 195)

Ως προς το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα τα τεχνικά αντίμετρα TCM διακρίνονται σε συστήματα soft kill εφόσον έχουν σκοπό την παραπλάνηση των ακουστικών τορπιλών και σε συστήματα hard kill εφόσον έχουν σκοπό την καταστροφή των τορπιλών. Η έρευνα που διεξάγεται παγκοσμίως από διάφορα κράτη για την ανάπτυξη και εξέλιξη αποτελεσματικών τέτοιων συστημάτων, είναι συνεχής και με υψηλό οικονομικό κόστος (εκατοντάδων εκατομμυρίων δολαρίων). Σε κάθε περίπτωση, από πλευράς τακτικής εξακολουθεί ακόμη να θεωρείται ευκολότερη και ίσως προτιμότερη η απευθείας αντιμετώπιση των ιδίων των υποβρυχίων, από τις τορπίλες τους.



Εικόνα 2.4 Φωτογραφία πλευρικού αντιτορπιλικού στεγανού (anti-torpedo bulge/blister) παλαιού πλοίου επιφανείας των αρχών του 20ου αιώνα. (<http://www.navsourc.org/>)

Η ανίχνευση για την έγκαιρη αναγνώριση και εντοπισμό της ακριβούς θέσης μίας επερχόμενης τορπίλης (torpedo alert) αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιβίωση στο σύγχρονο περιβάλλον των επιχειρήσεων, τόσο των υποβρυχίων όσο και των πλοίων επιφανείας. Οι παράγοντες αυτοί εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της ίδιας της τορπίλης, τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων, των συστημάτων sonar και του φορέα αυτών, καθώς επίσης και από τις επικρατούσες συνθήκες περιβάλλοντος, οι οποίες είναι ιδιαίτερα ποικιλόμορφες στις παράκτιες περιοχές. Επίσης, από την αποτελεσματική σύνθεση όλων των πληροφοριών των εμπλεκόμενων αισθητήρων, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό τόσο ο έγκαιρος εντοπισμός όσο και η ορθή εκτίμηση των χαρακτηριστικών της επερχόμενης απειλής, προκειμένου στη συνέχεια να αναλαμβάνονται τα κατάλληλα αντίμετρα (reactive countermeasures).

Συνήθως, για να επιτευχθεί αποτελεσματικός παθητικός εντοπισμός των διακριτών ακουστικών συχνοτήτων (narrowband detection) που εκπέμπονται από μία τορπίλη, απαιτείται σύστημα sonar με εξαιρετικής απόδοσης beamforming και δυνατότητα απόκρισης του συστήματος λήψης τουλάχιστον στην περιοχή του φάσματος 1000 - 4000 Hz (LOFAR). Επίσης, για τον εντοπισμό του ευρέως φάσματος (broadband detection) των τορπιλών απαιτείται σύστημα με απόκριση στην περιοχή 10 - 5000 Hz. Καθοριστικός παράγοντας σε όλες τις περιπτώσεις αποτελεί ο αυτοθόρυβος της πλατφόρμας του παθητικού συστήματος sonar. Ο σχετικά υψηλός αυτοθόρυβος των πλοίων επιφανείας περιορίζει στις περισσότερες των περιπτώσεων την απόσταση εντοπισμού των επερχόμενων τορπιλών από τα παθητικά συστήματα γάστρας (HMS – Hull Mounted Sonars), σε μόλις μερικές εκατοντάδες ή στην ευνοϊκότερη περίπτωση λίγες χιλιάδες μέτρα. Αντίθετα, ο εντοπισμός από ρυμουλκούμενες συστοιχίες υδροφώνων (towed arrays) επιτυγχάνεται σε αριστά μεγαλύτερες αποστάσεις, κυρίως λόγω του χαμηλότερου αυτοθορύβου και του υψηλότερου κέρδους (AG – Array Gain) των συστημάτων αυτών. Στην περίπτωση των ανθυποβρυχιακών τορπιλών που βάλλονται εναντίον υποβρυχίων, οι αποστάσεις εντοπισμού είναι εξαιρετικά μικρές (όπως και οι χρόνοι αντίδρασης), λόγω της τακτικής με βάση την οποία χρησιμοποιούνται τα όπλα αυτά (εκτοξεύονται από πολύ μικρές αποστάσεις).

Για τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα, οι εφαρμοζόμενες τεχνολογίες ενεργητικού και παθητικού εντοπισμού τορπιλών υιοθετούν προηγμένες μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, όπως πχ προσαρμοζόμενα φίλτρα ακύρωσης θορύβου (adaptive noise cancellation), προσαρμοζόμενες τεχνικές σχηματισμού λοβών (adaptive beamforming), μεθόδους ταύτισης πεδίου (matched field processing), κτλ. Η αναγνώριση επίσης μίας επερχόμενης τορπίλης με αποδεικτά χαμηλό ρυθμό ψευδών συναγερμών, αποτελεί και αυτή ένα πολύ σημαντικό προαπαιτούμενο, καθώς έχει άμεση σχέση με το απαιτούμενο πλήθος εκτοξευτών και το φόρτο αντιμέτρων soft & hard kill, εκ μέρους των αμυνόμενων πλοίων φορέων.

Μία ακόμη υπό ανάπτυξη τεχνολογία για την ανίχνευση, την αναγνώριση και τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης επερχόμενων τορπιλών εναντίον πλοίων επιφανείας (DCL – Detection, Classification & Localization), είναι αυτή των εναέριων συστημάτων σάρωσης δέσμης laser με δυνατότητα απεικόνισης υποβρύχιων αντικειμένων. Συστήματα laser imaging εφαρμόζονται ήδη στην πράξη για τον εντοπισμό θαλασσίων ναρικών. Ορισμένα παραδείγματα από συστήματα έρευνας για την ανίχνευση, αναγνώριση, εντοπισμό της θέσης και αντιμετώπιση τορπιλών που έχουν παρουσιασθεί για την προστασία πλοίων επιφανείας (point defense), είναι τα ακόλουθα:

SPARTACUS & NGDS:

Αποτελεί Γαλλικό soft kill σύστημα επιτήρησης, εντοπισμού και προειδοποίησης επερχόμενων τορπιλών, εκτόξευσης ρουκετών και στατικών αντιμέτρων εκπομπής θορύβου (decoys/jammers), σε αποστάσεις έως 3 km και σε προκαθορισμένο βάθος. Εξέλιξή του αποτελεί το ανάλογο επίσης σύστημα Contralto-V, όπως και το επόμενης γενιάς NGDS(New Generation Dagaie System) της DCN.

SATAR (UMS 4520):

Σύστημα της Thomson Marconi Sonar, το οποίο υποστηρίζει διασύνδεση με τα ήδη εγκατεστημένα συστήματα HMS ή VDS των πλοίων.

ALBATROS (UMS 4530):

Αυτόνομο σύστημα της Thomson Marconi Sonar, το οποίο διαθέτει ειδικής μορφής ρυμουλκούμενη γραμμική συστοιχία υδροφώνων, με χαμηλό ποσοστό εσφαλμένων συναγερμών.

SEA DEFENDER Mk I & II (UMS 4550):

Πλήρες σύστημα αυτοπροστασίας της Thales Underwater Systems, το οποίο εκτελεί αυτόματη έρευνα για ανίχνευση, αναγνώριση, εντοπισμό θέσης και χρήση αντιμέτρων κατά

των επερχόμενων τορπιλών. Μεταξύ των άλλων, περιλαμβάνει μία ρυμουλκούμενη συστοιχία τριπλών υδροφώνων (triplets), ένα σύστημα αισθητήρων γάστρας, αναλώσιμα αντίμετρα LESCUT, καθώς επίσης και συνεργασία με τα διαδεδομένα ρυμουλκούμενα αντίμετρα AN/SLQ-25A Nixie.

SLAT (Système de Lutte Anti-Torpilles):

Αποτελεί ολοκληρωμένο Γαλλο-Ιταλικό soft kill παθητικό σύστημα επιτήρησης, αναγνώρισης, εντοπισμού της θέσης και προειδοποίησης επερχόμενων τορπιλών, της κοινοπραξίας (consortium) Euroslat. Το σύστημα έχει ήδη εγκατασταθεί στις φρεγάτες αεράμυνας Horizon (φορείς επίσης και της ανθυποβρυχιακής τορπίλης MU-90), καθώς και στο Ιταλικό αεροπλανοφόρο Giuseppe Garibaldi. Παράγωγα του συστήματος εγκαθίστανται στις νέες Ιταλο-Γαλλικές φρεγάτες FREMM (European FRigates Multi-Mission). Το SLAT περιλαμβάνει τα ακόλουθα τμήματα/υποσυστήματα:

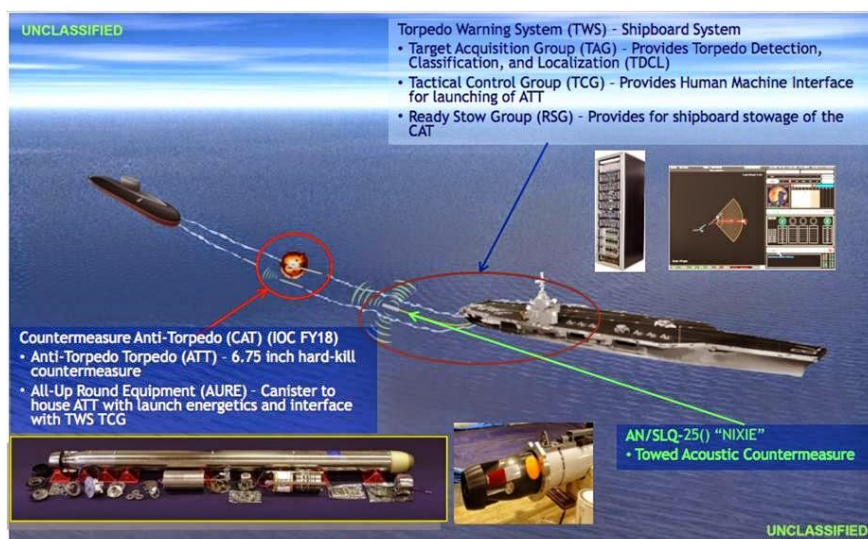
- **ALERTO.** Αποτελεί μία ρυμουλκούμενη γραμμική συστοιχία 42 τριπλών υδροφώνων (για ενσωματωμένη δυνατότητα επίλυσης αμφιβολίας διοπτύσεων) και προαιρετικά μία σταθερή συστοιχία γάστρας (hull mounted cylindrical sonar array). Διαθέτει δυνατότητες επεξεργασίας και ανάλυσης ακουστικών δεδομένων (narrowband & broadband), όπως επίσης και σύζευξης δεδομένων (datafusion) από άλλους αισθητήρες.
- **RATO.** Αποτελεί σύστημα επεξεργασίας στοιχείων (beamforming, φασματικής ανάλυσης, ανίχνευσης, αναγνώρισης, αυτόματης παρακολούθησης, κτλ). Το σύστημα αυτό, αφού αναγνωρίσει την επερχόμενη τορπίλη, ενεργοποιεί την εκτόξευση soft kill αντιμέτρων σε κατάλληλες θέσεις, σε συνδυασμό με προτάσεις εκτέλεσης ελιγμών αποφυγής.
- **CMAT.** Περιλαμβάνει τα εκτοξευόμενα, παρασυρόμενα ηλεκτρο-ακουστικά αντίμετρα παραγωγής θορύβου ευρέως φάσματος (drifting jammers) και τα αυτοκινούμενα αντίμετρα παραγωγής σημάτων παρεμβολής ψευδοστόχων (mobile decoys), για την παραπλάνηση της ακουστικής κεφαλής της επερχόμενης τορπίλης. Τα αντίμετρα αυτά, κατασκευάζονται από τη WASS.

Ο επιδιωκόμενος τρόπος παραπλάνησης της τορπίλης από το SLAT μοιάζει με την παρεμφερή τεχνική του κεντροειδούς (centroid), που εφαρμόζεται για την αποφυγή επερχόμενων κατευθυνόμενων βλημάτων.

AN/WSQ-11 Torpedo Defense System (TDS):

Αρχικά, υπήρξε ένα κοινό Αγγλο-Αμερικανικό πρόγραμμα (από τη δεκαετία του 1980), για την προστασία των πλοίων επιφανείας από όλων των ειδών τις τορπίλες, γνωστό με την ονομασία SSTD (Surface Ship Torpedo Defense system) ή Joint-SSTD. Το SSTD περιελάμβανε τη συνδυασμένη λειτουργία ρυμουλκούμενης συστοιχίας υδροφώνων (towed array), χρήσης αναλωσίμων ακουστικών αντιμέτρων (decoys), καθώς επίσης και ένα hard kill σύστημα εκτόξευσης ελαφρών αντιτορπιλικών τορπιλών (Mk-46 Mod7). Στο σύστημα αυτό, τα λαμβανόμενα στοιχεία όλων των ακουστικών αισθητήρων του πλοίου υπόκεινται σε επεξεργασία, για την ανίχνευση, αναγνώριση και τον προσδιορισμό της θέσης της επερχόμενης τορπίλης, χρησιμοποιώντας προηγμένους αλγορίθμους επεξεργασίας και απεικόνισης των στοιχείων. Στη συνέχεια, το σύστημα αναπτύχθηκε με την ονομασία AN/SLX-1 MSTRAP (Multi-Sensor Torpedo Recognition and Alertment Processor), από τη Northrop Grumman. Τελικά, η ολοκλήρωση του συστήματος με το ανθυποβρυχιακό σύστημα AN/SQQ-89(V)6 των πλοίων επιφανείας του USN αντιμετώπισε σημαντικές δυσκολίες, λόγω των πολλών ψευδών συναγερμών (false alarms) στο παράκτιο περιβάλλον επιχειρήσεων. Για το λόγο αυτό, το πρόγραμμα διεκόπη και στη θέση του το USN αποφάσισε την ανάπτυξη ενός άλλου συστήματος με την ονομασία AN/WSQ-11 Torpedo Defense System (TDS), καθώς επίσης και τη βελτίωση των επιχειρησιακά διαδεδομένων αντιμέτρων AN/SLQ-25A Nixie. Το νέο σύστημα AN/WSQ-11 (γνωστό και ως Whiskey 11 ή Super Nixie) της Ultra Electronics, διαθέτει ευρεία μπάντα λειτουργίας (10-100 kHz) και εφόσον ολοκληρωθούν επιτυχώς οι διεξαγόμενες δοκιμές προορίζεται να εγκατασταθεί σε αντιτορπιλικά DDG-51, αεροπλανοφόρα και μεγάλα πλοία αμφιβίων επιχειρήσεων. Βασίζεται στο προηγούμενο

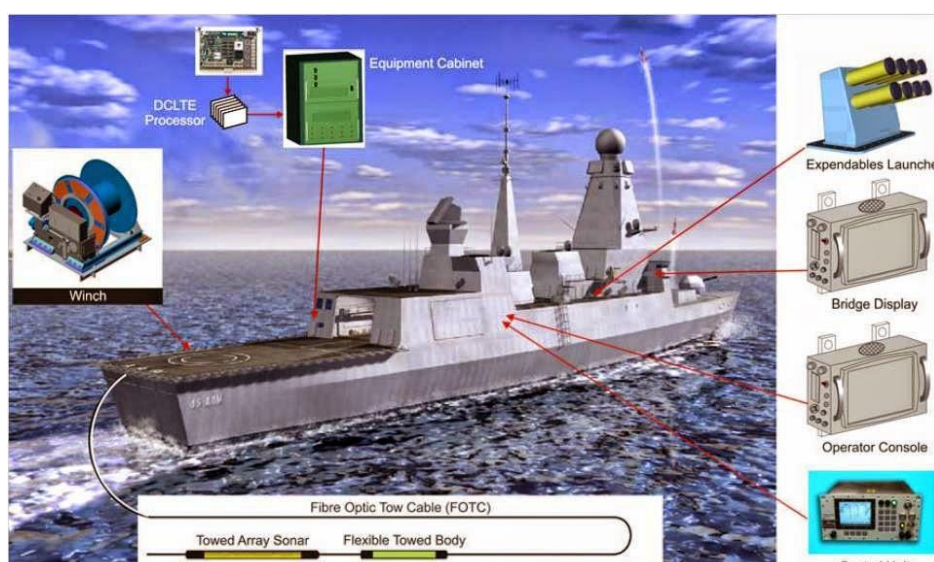
MSTRAP, αλλά εκτός από τον παθητικό χρησιμοποιεί και ενεργητικό εντοπισμό πολλών επερχόμενων τορπιλών (μέσω υψηλής συχνότητας active sonar). Επίσης, θα μπορεί να βάζει έως και 4 ελαφρές hard kill αντιτορπιλικές τορπίλες AT'T (Anti-Torpedo Torpedoes), εμβέλειας μερικών εκατοντάδων μέτρων. Οι τορπίλες αυτές, θα αναπτύσσουν υψηλές ταχύτητες και θα διαθέτουν θερμικό σύστημα πρόωσης λιθίου (Li) που θα αντιδρά με το θαλασσινό νερό (SCEPS). Θα διαθέτουν seeker πολλαπλών λειτουργιών, ψηφιακή επεξεργασία σήματος (νευρωνικά δίκτυα, fuzzy-logic, κτλ) και δυνατότητα προσαρμογής εν κινήσει για την αντιμετώπιση οποιουδήποτε τύπου τορπίλης.



Εικόνα 2.5 Το υπό ανάπτυξη σύστημα αντιτορπιλικής προστασίας του USN χρησιμοποιεί ελαφρές hard kill αντιτορπιλικές τορπίλες AT'T (Anti-Torpedo Torpedoes)

Το αντίστοιχο του AN/WSQ-11 σύστημα του Βρετανικού Ναυτικού είναι το αυτόνομης λειτουργίας Sonar 2170 SSTD (Sea Sentor η εξαγωγή έκδοση) της Ultra Electronics, το οποίο είναι ήδη επιχειρησιακό στις φρεγάτες Type 23. Το εν λόγω σύστημα είναι reactive soft kill και διαθέτει μία ρυμουλκούμενη συστοιχία υδροφώνων (εύρους πολλών οκτάβων) για εντοπισμό τορπιλών, στην οποία ενσωματώνεται κατάλληλα και το υφιστάμενο ρυμουλκούμενο αντίμετρο Sonar 2070 (βασισμένο στο AN/SLQ-25A Nixie). Επίσης, έχει

εγκατασταθεί και σε ορισμένα βοηθητικά πλοία RFA, καθώς και στα νέα αντιτορπιλικά ναυτικής αεράμυνας Type 45. Το εν λόγω σύστημα διεξάγει έρευνα για ανίχνευση, αναγνώριση και εντοπισμό της θέσης της επερχόμενης τορπίλης (DCL) με βάση κάποιον επεξεργαστή TRAMP (Torpedo Recognition Acoustic Multibeam Processor) που έχει αναπτύξει η QinetiQ. Επιπλέον, παρέχει συμβουλές σε τακτικό επίπεδο για την αντιμετώπιση της τορπίλης τόσο με ελιγμούς αποφυγής όσο και με την ανάπτυξη αναλώσιμων ακουστικών αντιμέτρων για την αποπλάνηση (seduction) αυτής. Μελλοντικά, εξετάζεται η ενσωμάτωση της ανθυποβρυχιακής τορπίλης Sting Ray Mod1 σε αντιτορπιλικό ρόλο.



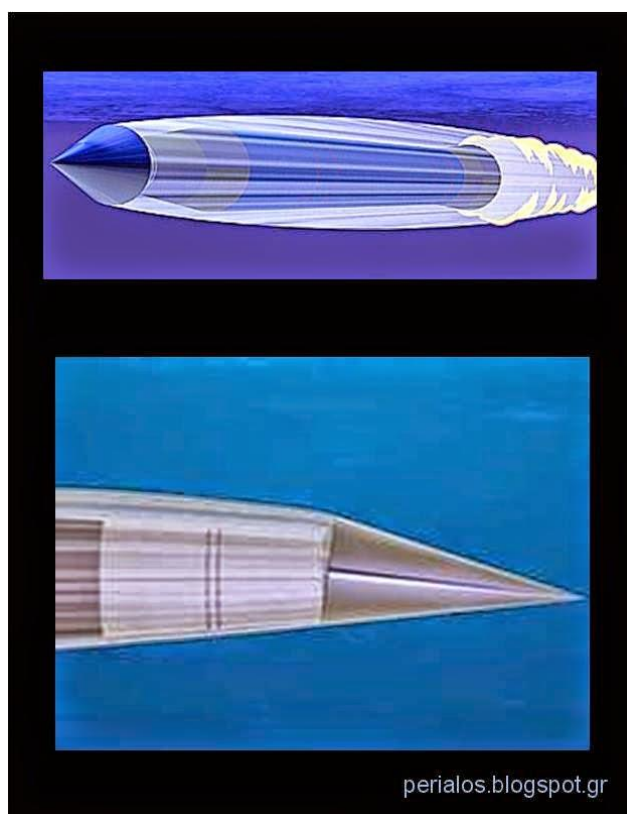
Εικόνα 2.6 Το βρετανικό σύστημα Sonar 2170 SSTD (Surface Ship Torpedo defense)

TAU (Torpedoabwehr für Überwasserschiffen) της BWB:

Αποτελεί υπό ανάπτυξη γερμανικό σύστημα ενεργητικού και παθητικού ακουστικού εντοπισμού μέσω sonar στη γάστρα (HMS) και ρυμουλκούμενης συστοιχίας υδροφώνων (COTASS). Επίσης, προβλέπεται δυνατότητα hard kill με αντιτορπιλικές τορπίλες ΑΤΤ (Anti-Torpedo Torpedoes) πυραυλικής πρόωσης.

Barracuda της Diehl BGT Defence:

Αποτελεί γερμανικό πειραματικό πρόγραμμα ανάπτυξης hard kill αντιμέτρων κατά τορπιλών και υποβρυχίων. Προορίζεται για την αντιτορπιλική προστασία πλοίων επιφανείας και υποβρυχίων. Διαθέτει πυραυλοκινητήρα (ταχύτητα >200 knots - 360 km/h), αδρανειακό σύστημα κατεύθυνσης για τη σταθεροποίηση του και μία κινούμενη κωνική κεφαλή για την ελεγχόμενη αλλαγή της πορείας του (canard control).



Εικόνα 2.7 Το Γερμανικό hard kill αντίμετρο Barracuda

SEASPIDER της ATLAS Elektronik:

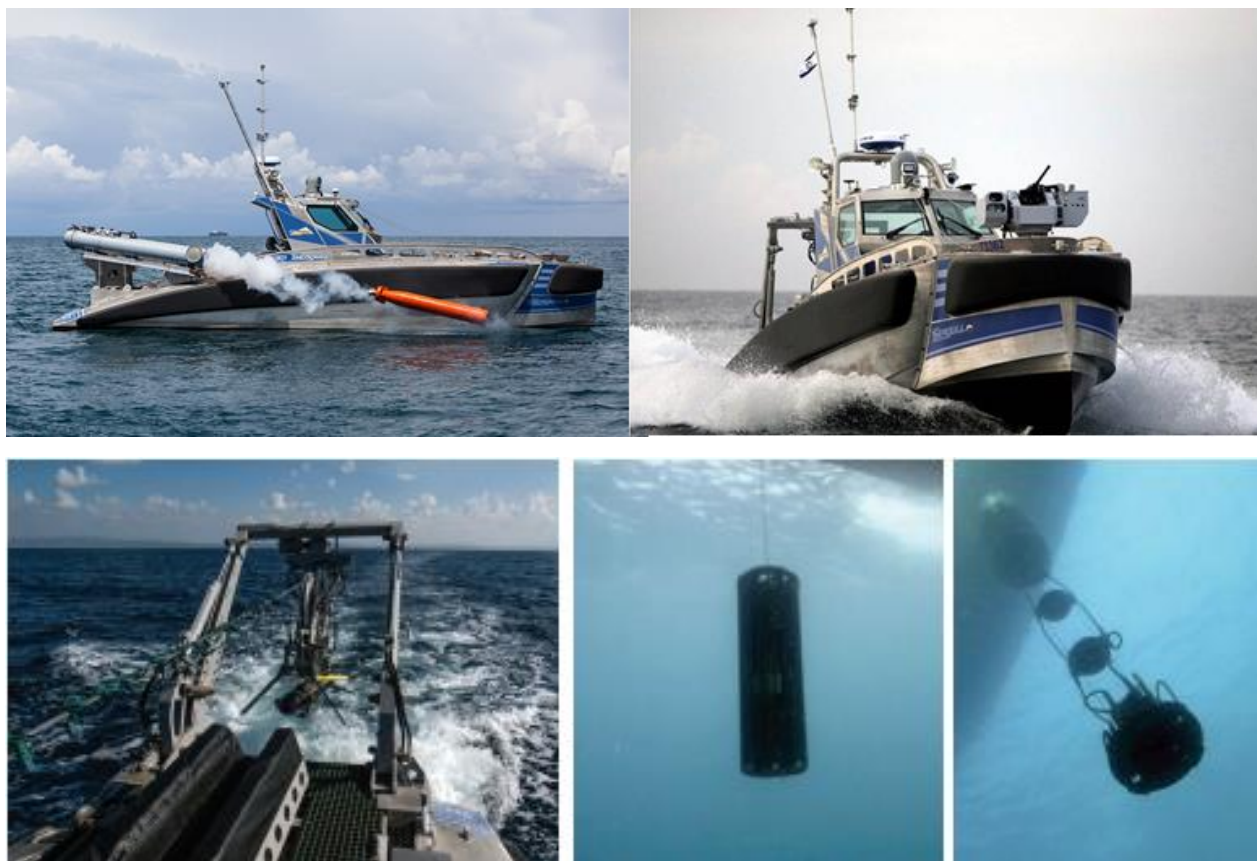
Αποτελεί υπό ανάπτυξη Γερμανικό πρόγραμμα, το οποίο προβάλλεται ως μία σχετικά χαμηλού κόστους λύση για την αντιτορπιλική προστασία πλοίων επιφανείας και υποβρυχίων. Συνδυάζει ενεργητικό (μόνο για πλοία επιφανείας) και παθητικό εντοπισμό της επερχόμενης τορπίλης, εξαιρετικά ταχεία εκτίμηση και hard kill εξουδετέρωση της απειλής με μίας υψηλής ταχύτητας και ευελιξίας αντιτορπιλική τορπίλη ATT, γνωστή με την ονομασία MTW (Mini Torpedo Welcome). Η τελευταία είναι μικρής εμβέλειας και εξαιρετικά μικρού φυσικού μεγέθους (μήκος 2.26 m, διάμετρος 21 cm, βάρος 115 kg). Χρησιμοποιεί πρόωση πυραυλοκινητήρα και ενεργητικό sonar υψηλών συχνοτήτων. Ο εφαρμοζόμενος από το σύστημα αλγόριθμος αναγνώρισης (classification) της επερχόμενης τορπίλης, λαμβάνει υπ' όψη στοιχεία όπως ο θόρυβος από την πρόσκρουση της τορπίλης στο νερό και η έναρξη λειτουργίας του συστήματος πρόωσης αυτής (για τις ανθυποβρυχιακές τορπίλες), καθώς επίσης τον παραγόμενο θόρυβο και τις ενεργητικές εκπομπές της επερχόμενης τορπίλης.

SEAPIKE ή LCAW (Low Cost ASW Weapon) της ATLAS Elektronik:

Αποτελεί hard kill αντίμετρο κατά τορπιλών. Κατά την είσοδο στο νερό εκτελεί ενεργητική έρευνα βυθιζόμενο κατακόρυφα χωρίς καθόλου πρόωση. Η πρόωση ενεργοποιείται μετά από τον εντοπισμό του στόχου, οπότε το όπλο λαμβάνει οριζόντια θέση και συνεχίζει το πρόγραμμα του εναντίον της επερχόμενης τορπίλης.

Seagull της Elbit Systems

Η ισραηλινή εταιρεία Elbit Systems ανέπτυξε ένα ταχύπλοο δωδεκάμετρο ρομποτικό σκάφος το seagull το οποίο έχει ως κύριο σκοπό τη διεξαγωγή ανθυποβρυχιακού αγώνα. Διαθέτει πλευρικά σόναρ, εμπρόσθιο ενεργό σόναρ και σόναρ μεταβλητού βάθους για τον εντοπισμό και εξουδετέρωση ναρκών, δυτών αλλά κυρίως υποβρυχίων μιάς και διαθέτει ηλεκτροοπτικές/θερμικές κάμερες, ρομποτικό πύργο και εκτοξευτή τορπιλών. Αποτελεί χαμηλού κόστους λύση, ευέλικτο και κυρίως χαμηλού ρίσκου αναλώσιμο μέσο ανθυποβρυχιακού αγώνα.



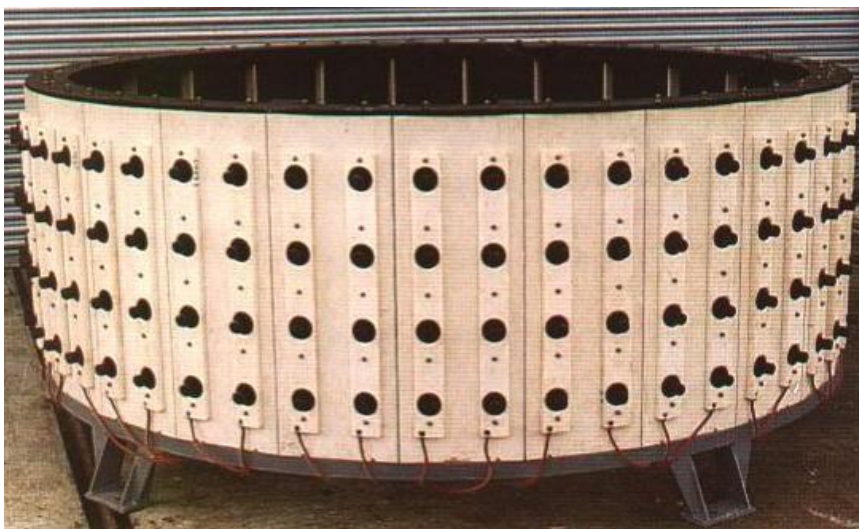
Εικόνα 2.8 Το ισραηλινής κατασκευής seagull (<http://photos.usni.org/>)

§3. Τύποι Sonars

Η τεχνολογία Stealth είναι αναμφισβήτητα το κύριο χαρακτηριστικό του υποβρυχίου και πρόκειται για μακράν το πιο δύσκολο έργο στον ASW (Anti Submarine Warfare). Η αναζήτησή τους κυρίως στις ανοιχτές θάλασσες χαρακτηρίζεται ως αναζήτηση βελόνας στα άχυρα. Το Sonar αναμφίβολα αποτελεί το στυλοβάτη του ανθυποβρυχιακού πολέμου. Οι τύποι των Sonar είναι:

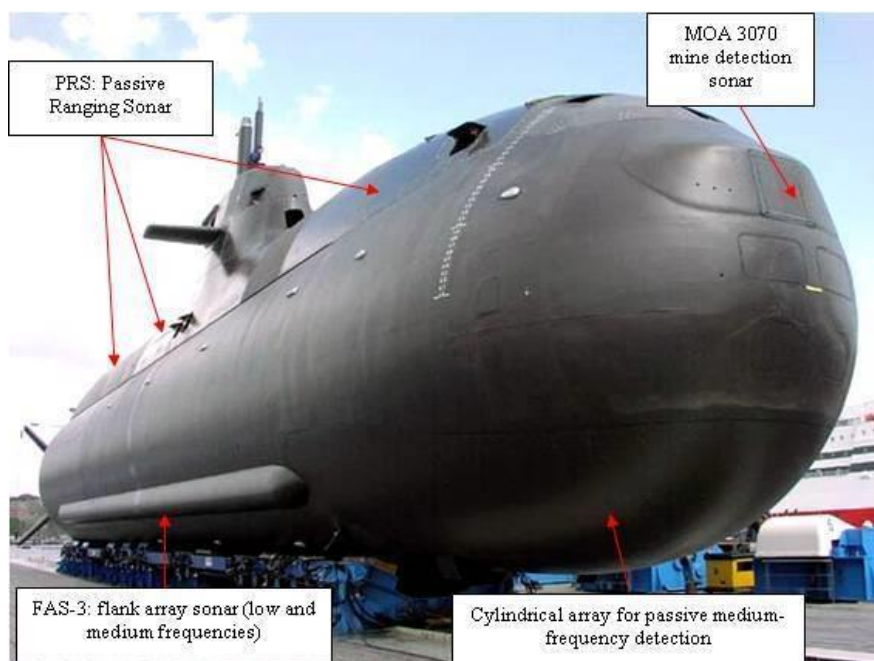
3.1. Ενεργό Sonar

Μία μέθοδος εντοπισμού είναι το ενεργό σόναρ, το οποίο λειτουργεί σαν ενεργό ραντάρ, στέλνοντας ένα παλμό ηχητικής ενέργειας στο νερό, το οποίο στη συνέχεια ανακλάται από το στόχο και επιστρέφει ως αντανάκλαση (ή echo) στο σόναρ. Έτσι προδίδεται η θέση του στόχου. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν "δέσμες" για την αποστολή rings σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις και έτσι να βελτιωθεί ο εντοπισμός της θέσης του στόχου.



Εικόνα 2.9 Sonar 2051 (<http://photos.usni.org/>)

Σε γενικές γραμμές, η ισχύς του σόναρ θα υπαγορεύσει το μέγιστο εύρος του. Δεδομένου ότι ο μεγαλύτερος εντοπισμός επιτυγχάνεται στις χαμηλότερες συχνότητες, μόνο μεγάλες συστοιχίες είναι σε θέση να παράξουν τα απαραίτητα μεγάλα μήκη κύματος. Η αναγκαιότητα μιας μεγάλης συστοιχίας σόναρ προφανώς οδηγεί σε φυσικούς περιορισμούς, ιδιαίτερα όταν ο χώρος πάνω σε ένα πολεμικό πλοίο ή υποβρύχιο είναι περιορισμένος. Μεγάλες συστοιχίες μπορούν να προσθέσουν σημαντική έλξη και απαιτούν μεγάλες πηγές ενέργειας σε συνδυασμό με την υποστήριξη του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού τους. Τα ενεργά σόναρ τοποθετούνται γενικά στην πλώρη ή την καρίνα, δίνοντας κάλυψη μπροστά από το πλοίο. Διάφορα υλικά απορρόφησης τοποθετούνται ακριβώς πίσω από τη συστοιχία, τόσο για την προστασία των επιβατών του πλοίου ή του υποβρυχίου από τον πολύ δυνατό ήχο (μπορεί να φτάνει μέχρι και τα 250 ντεσιμπέλ!) αλλά και για την πρόληψη ανακλάσεων. Σύγχρονα πλοία επιφανείας και υποβρύχια έχουν ένα συνδυασμό ενεργητικών και παθητικών σόναρ αντί να στηρίζονται σε ένα μόνο σύστημα.



Εικόνα 2.10 Sonar type212 submarine (<http://www.navsource.org/>)

Ένα από τα μειονεκτήματα του ενεργητικού σοναρ είναι ότι προδίδει τη θέση του, στο στόχο. Έτσι μπορεί να λειτουργήσει ως φάρος για τους εχθρούς και να προσελκύσει τορπίλες ή πυραύλους cruise προς την κατεύθυνσή του. Υπάρχουν περιπτώσεις, όμως, όπου ένα ενεργό σοναρ είναι προτιμότερο. πχ το ενεργό σοναρ μπορεί να είναι χρήσιμο όταν ο στόχος είναι diesel-ηλεκτρικό υποβρύχιο, δεδομένου ότι αυτά είναι πολύ ήσυχα όταν λειτουργούν με τις μπαταρίες τους.

3.2. Παθητικό Sonar

Η προτιμώμενη προσέγγιση για την ανίχνευση υποβρυχίων του εχθρού ήταν ανέκαθεν η χρήση των παθητικών σοναρ. Πρόκειται για το κυρίως όργανο του ASW, και όπως αναφέρεται, έχει υποβαθμίσει τη χρήση του ενεργού σοναρ σε ειδικές μόνο περιστάσεις. Όπως και με το ενεργό σοναρ, τα υδρόφωνα μπορούν να τοποθετηθούν σε μια σειρά για να βελτιώσουν το εύρος δέσμης και την κατευθυντικότητα. Επιπλέον τα παθητικά υδρόφωνα είναι πολύ ελαφρύτερα και λιγότερο πολύπλοκα από ότι τα ενεργά, γενικά επειδή δεν έχουν τις ίδιες απαιτήσεις σε υψηλή ισχύ. Συστοιχίες, τοποθετούνται παράλληλα με το μήκος του πλοίου ή του υποβρυχίου, ώστε να επωφεληθούν από το μειωμένο βάρος και την πολυπλοκότητα.

3.3. Sonar Μεταβλητού Βάθους

Προκειμένου να βελτιωθεί η ικανότητα εντοπισμού υποβρυχίων που μπορεί να κρύβονται κάτω από το θερμοκλινές, αναπτύχθηκαν τα μεταβλητού βάθους Sonar (VDS) τη δεκαετία του 1950. Τα κύρια πλεονεκτήματα του VDS, είναι η δυνατότητά τους να τοποθετηθούν μακριά από τον αυτοθόρυβο του πλοίου, να διαπεράσουν το θερμοκλινές, και να παρέχουν 360 μοιρών κάλυψη. Το VDS έχει όμως και τα μειονεκτήματά του. Πρόκειται για μια δυσκίνητη διάταξη, με ογκώδη εξοπλισμό που είναι δύσκολο να αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια δυσμενών καιρικών συνθηκών.



Εικόνα 2.11 Σόναρ μεταβλητού βάθους (<http://www.naval-technology.com>)

3.4. Towed Arrays

Κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, όταν ο Βόρειος Ατλαντικός ήταν το κυρίως θέατρο των επιχειρήσεων των τότε υπερδυνάμεων, τα χαμηλών συχνοτήτων παθητικά συρόμενα σόναρ, αναδείχθηκαν ως το κύριο μέσο για τον ASW των πλοίων επιφανείας. Αξιοποιώντας τις εξελίξεις στην επεξεργασία σήματος, και εκμεταλλευόμενα τα άριστα χαρακτηριστικά ακουστικής διάδοσης στο βαθύ κανάλι ήχου (DSC), οι ρυμουλκούμενες συστοιχίες ήταν ικανές να ανιχνεύσουν στόχους σε δεκάδες μίλια. Σε αντίθεση με τα VDS, στα οποία το σόναρ είναι εγκιβωτισμένο σε ένα σώμα ή κήτος στο τέλος του καλωδίου ρυμούλκησης, εδώ η συρόμενη συστοιχία αποτελείται από ένα σωλήνα ή περίβλημα από κάποιο ελαστομερές υλικό, (όπως καουτσούκ) μεταξύ 2 και 4 ίντσών σε διάμετρο που περιέχει πολυάριθμους αισθητήρες ή δέκτες διατεταγμένους με γραμμικό τρόπο. Η διάμετρος της συστοιχίας έχει άμεση σχέση με το θόρυβο ροής και είναι επιθυμητό αυτός να μειωθεί στο ελάχιστο. Αυτό είναι δύσκολο από ένα σημείο κι έπειτα απο μηχανική άποψη, αλλά ακόμα κι έτσι, οι σύγχρονες τεχνικές είναι σε θέση να επιτύχουν μια ελάχιστη διάμετρο περίπου μιας ίντσας.



Εικόνα 2.12 TAS-3 towed array (<http://photos.usni.org/>)

3.5. Εμβαπτιζόμενα Sonars

Τα εμβαπτιζόμενα sonar είναι μια παραλλαγή των VDS. Ενώ κατά κύριο λόγο τοποθετούνται πάνω σε ελικόπτερα, μπορούν να τοποθετηθούν και σε πλοία ή μικρά περιπολικά σκάφη. Ενώ αιωρείται ένα ελικόπτερο μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα βαρούλκο και να τοποθετήσει ένα sonar στο επιθυμητό βάθος. Και πάλι ο αυτοθόρυβος είναι ελάχιστος, επειδή η συστοιχία απομονώνεται από το θόρυβο και τους κραδασμούς του ελικοπτερου.



Εικόνα 2.13 AQS-13 sonar εμβαπτιζόμενο από ελικόπτερο Sea King (<http://www.navsourc.org/>)

Σε ένα εμβαπτιζόμενο sonar δεν υπάρχουν τυφλά σημεία. Έχει κάλυψη 360 μοιρών και εύρος που αγγίζει τα χιλιάδες χιλιόμετρα, ενώ νεότερα συστήματα με χρήση sonobuoy, επιτρέπουν και την επικοινωνία με φιλικά υποβρύχια. Στα παλαιότερα, η ισχύς παρέχεται μέσω ενός συσσωρευτή, αλλά στα νεότερα η τροφοδοσία γίνεται άμεσα από το ελικόπτερο. Με αυτά τα sonar είναι εύκολος ο εντοπισμός πολύ αθόρυβων ντίτζελ υποβρυχίων. Παραδείγματα αποτελούν τα συστήματα AQS-14 και AQS-20. Το νέο AQS-22 FLASH (Folding Low Frequency Active Sonar for Helicopters) έχει προσαρμοστεί στο MH-60R Seahawk (καθώς και άλλα είδη), και χρησιμοποιείται στην ανίχνευση υποβρυχίων, στην παρακολούθηση και στην ταξινόμησή τους.

3.6. Sonobuoys

Τα Sonobuoys είναι ουσιαστικά αναλώσιμες συσκευές σόναρ, που συνήθως αναπτύσσονται από αεροσκάφη, αν και μπορούν να αναπτυχθούν και από πλοία. Στην πραγματικότητα, τα πρώτα sonobuoys εμφανίστηκαν την περίοδο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και ήταν ένα αναλώσιμο σύστημα ρυμουλκούμενο πίσω από συνοδούς νηοπομπών για την ανίχνευση Γερμανικών U-boat. Η ανάπτυξη των sonobuoy ατόνησε αμέσως μετά. Σήμερα τα sonobuoys ρίπτονται είτε με αλεξίπτωτο, είτε από πλοίο. Η όποια πλατφόρμα θα πρέπει αντίστοιχα να είναι εφοδιασμένη με τον κατάλληλο ηλεκτρονικό εξοπλισμό που απαιτείται για να λαμβάνει και να επεξεργάζεται τα δεδομένα (συνήθως μέσω πομπού VHF). Ενεργοποιούνται από την επαφή με το θαλασσινό νερό και διαθέτουν ένα φουσκωτό τμήμα ώστε ο δέκτης να διατηρείται κάτω από την επιφάνεια του νερού σε ένα ορισμένο βάθος, ενώ ταυτόχρονα η κεραία να παραμένει στην επιφάνεια. Τα Sonobuoys ταξινομούνται και κατά μέγεθος (A, B, C, κ.λπ.), αλλά και κατά είδος (ενεργητικά ή παθητικά).



Εικόνα 2.14 Sonobuoy από Orion P-3 (<http://photos.usni.org/>)

3.7. Παθητικά Sonobuoys

Τα παθητικά sonobuoys παραδοσιακά αποτελούν την κύρια επιλογή για ανοικτές θάλασσες. Στηριζόμενα στην παθητική ανίχνευση αποικρύπτεται στον εχθρό το γεγονός ότι είναι υπό παρακολούθηση, ή ότι ένα αεροσκάφος ψάχνει για αυτόν. Τα πρώτα παθητικά sonobuoys (όπως η SSQ-23) παρέχουν μόνο ανίχνευση ενός στόχου χωρίς ένδειξη της θέσης. Το CODAR (Correlation Detection And Ranging), σύστημα που αναπτύχθηκε για να παρέχει και εντοπισμό όταν τουλάχιστον ένα ζεύγος Sonobuoys αναπτύσσεται και συγκρίνοντας τους χρόνους άφιξης του σήματος, εντοπίζει τη θέση του στόχου. Αυτό όμως είναι χρονοβόρο, και όχι ιδιαίτερα αποτελεσματικό όταν το υποβρύχιο κινείται ήσυχα. Η SSQ-53 DIFAR σειρά του Ναυτικού των ΗΠΑ με παθητικά sonobuoys, έχει δυνατότητες ανίχνευσης κατεύθυνσης, και προσφέρει δυνατότητα επιλογής βάθους (μεταξύ 90, 200, 400 και 1.000 ποδών, ανάλογα με τον τύπο) καθώς και δυνατότητα επιλογής του χρόνου λειτουργίας (μεταξύ 0,5, 1, 2, 4 ή και 8 ωρών). Ένα άλλο παράδειγμα, είναι η SSQ-77 VLAD (Vertical Line Array) η οποία συνδυάζει την κατευθυντική ικανότητα του DIFAR με μια κάθετη συστοιχία υδροφώνων για τη βελτίωση της παρακολούθησης σε ένα θορυβώδες, περιβάλλον υψηλής κυκλοφορίας.

3.8. Ενεργά Sonobuoys

Ο ακουστικός παλμός από ένα ενεργό sonobuoy παρέχει πιο εύκολα πληροφορίες για την κατεύθυνση ενός στόχου. Επιπλέον, όταν ποντίζονται δύο ή περισσότερα sonobuoys, είναι δυνατό να διαπιστωθεί η ταχύτητα και η πορεία του στόχου. Τα ενεργά sonobuoys συνήθως αναπτύσσονται σε μεγαλύτερα βάθη από τα παθητικά και λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε ισχύ, έχουν μικρότερη διάρκεια λειτουργίας. Η πρώτη SSQ-47 Ranger σειρά ενεργών sonobuoy παρήγαγε ένα παλμό κάθε 10 δευτερόλεπτα σε μία από έξι συχνότητες. Είχε επιλεγόμενο βάθος, αλλά μικρή διάρκεια ζωής, και παρείχε περιορισμένο φάσμα

πληροφοριών. Αντικαταστάθηκε από την SSQ-50 CASS (Command Activated sonobuoy System), η οποία παρήγαγε ένα παλμό σε τέσσερις σταθερές συχνότητες αλλά ρυθμιζόμενες από την πλατφόρμα εκτόξευσης και όχι αυτόνομα. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, το Ναυτικό των ΗΠΑ εισήγαγε την SSQ-62 DICASS (Directional Command Activated sonobuoy System) της σειράς ενεργών sonobuoys, με κατευθυντική ικανότητα και διαμορφούμενη συχνότητα. Ο πολλαπλασιασμός των πολύ ήσυχων ντίζελ-ηλεκτρικών υποβρυχίων μεταξύ των άλλων (πολύ ήσυχα για την αποτελεσματική χρήση παθητικών sonobuoys) έχει οδηγήσει σε αυξημένο ενδιαφέρον για τα ενεργά sonobuoys.

3.9. Ειρηνική ηχώ

Πειράματα ακουστικής διάδοσης που διεξήχθησαν από τους Ewing και Worzel κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου αποκάλυψαν ότι, οι ήχοι χαμηλής συχνότητας απο εκρήξεις στο Περθ της Αυστραλίας μπορούσαν να εντοπιστούν από υδρόφωνα κοντά στις Βερμούδες περπου τρεισήμισι ώρες αργότερα. Ένας άλλος λοιπόν τρόπος ανίχνευσης, ήταν η χρήση μικρών ειρηνικών που θα μπορούσαν να εκραγούν κοντά σε παθητικά sonobuoys και θα δημιουργούσαν ένα ευρυζωνικό ακουστικό παλμό ο οποίος ανανακλώμενος από ένα κοντινό εχθρικό υποβρύχιο θα το καθιστούσε εντοπίσιμο. Αυτή η τεχνική, που ονομάζεται Julie, εισήχθη στο Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ το 1956. Οι Σοβιετικοί όμως ήταν αυτοί που έκαναν εκτεταμένη χρήση της ειρηνικής ηχούς. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, η προσέγγιση της Julie αντικαταστάθηκε από τα ενεργά sonobuoys, αλλά η χρήση των ειρηνικών υλών ως μέθοδος συνεχίζεται και σήμερα με την SSQ-110 (EER) και την πιο πρόσφατη SSQ-101 ADAR (Air Deployed Active Receiver). Η τελευταία χρησιμοποιεί συστοιχία υδροφώνων για την περαιτέρω βελτίωση της ικανότητας ανίχνευσης σε ρηχά και παράκτια νερά.

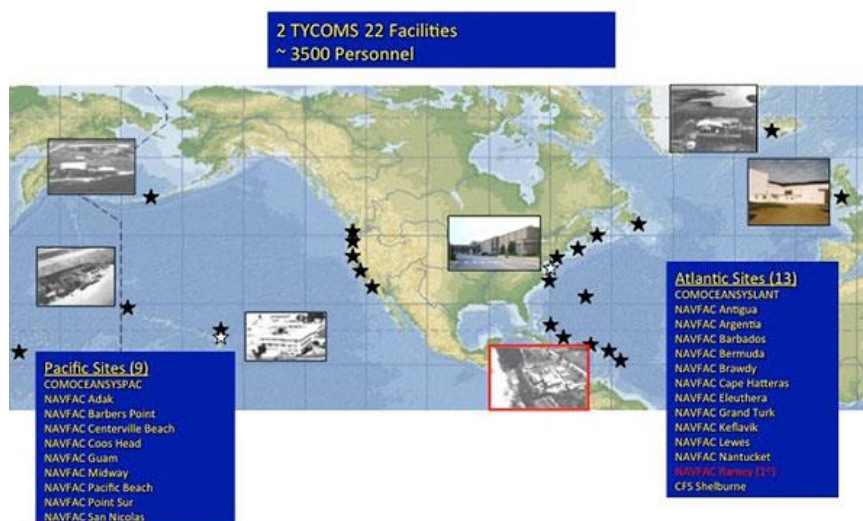
3.10. Sonobuoys Ειδικού Σκοπού

Εξειδικευμένα sonobuoys μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ανιχνεύσουν τα ηλεκτρικά πεδία, τις μαγνητικές ανωμαλίες, τη διατάραξη της βιοφωταύγειας (φως που εκπέμπεται από μικροοργανισμούς και διαταράσσεται από κάποιο διερχόμενο υποβρύχιο) και τη μέτρηση σημαντικών περιβαλλοντικών παραμέτρων όπως π.χ. η θερμοκρασία του νερού, η θερμοκρασία του αέρα, η βαρομετρική πίεση, και το ύψος του κύματος. Αν και δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσουν άμεσα εχθρικά υποβρύχια, τα sonobuoys αυτά είναι ενδιαφέροντα για την εξέλιξη του ASW. Πριν από την ανάπτυξη των sonobuoys αυτών, είναι σκόπιμο να ληφθεί ένα κατακόρυφο προφίλ θερμοκρασίας του τοπικού περιβάλλοντος. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν στη συνέχεια να κατευθύνουν το χειριστή ως προς τα βάθη που τον συμφέρει να τοποθετήσει τα sonobuoys ανίχνευσης. Η SSQ-36B (πιο σύντομα BT) χρησιμοποιείται ευρέως από το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ για το σκοπό αυτό. Τα υποβρύχια μπορούν επίσης να απελευθερώσουν ανιχνευτές τέτοιους, που ανεβαίνουν ως την επιφάνεια και βυθιζόμενοι επιστρέφουν τα δεδομένα της θερμοκρασίας στο υποβρύχιο. Προφανώς, αν το υποβρύχιο είναι πολύ βαθιά, απαιτείται σημαντικός χρόνος για να ξεκινήσει η λήψη των δεδομένων.

3.11. SOSUS

Τα πρότζεκτ CAESAR και SOSUS είναι ίσως από τα πιο σημαντικά και μυστικά πρότζεκτ του Ψυχρού Πολέμου. Η δράση του SOSUS είχε ως αποστολή την έγκαιρη προειδοποίηση της όποιας Σοβιετικής απειλής καθώς και την παροχή ζωτικής σημασίας πληροφοριών. Το αποκορύφωμα πολλών ερευνητικών προσπαθειών στις αρχές του 1950 σχετικά με το θέμα της ακουστικής διάδοσης χαμηλών συχνοτήτων, κατέληξε στο να σχεδιάσκει και τελικά να αναπτυχθεί ένα ευρύ σύστημα επιτήρησης. Εν συντομία αποτελείται από συστοιχίες παθητικών υδροφώνων κρεμασμένων κάθετα από τις πλευρές υποβρύχιων βουνών το οποίο εκμεταλλευόμενο την πολύ μεγάλη εξάπλωση των χαμηλών συχνοτήτων μπορεί και εποπτεύει τις βαθιές λεκάνες του Ατλαντικού ωκεανού. Μέχρι τα τέλη του 1957, αρκετοί επίγειοι σταθμοί παρακολούθησης τοποθετήθηκαν κατά μήκος της ανατολικής ακτής της Βόρειας Αμερικής, αλλά και στην δυτική ακτή, με υδροφωνα που εκτείνονται από την Καλιφόρνια μέχρι τη Χαβάη. Επιπλέον έχουν τοποθετηθεί ορισμένα σε διάφορα στρατηγικά σημεία όπως το Βόρειο Ακρωτήριο και το στενό του Γιβραλτάρ.

IISS Manning in the Mid 70s



Εικόνα 2.15 Σταθμοί SOSUS στη δεκαετία του 70 (<http://www.navsourc.org/>)

Με το τέλος του Ψυχρού Πολέμου διεκόπη η λειτουργία μεγάλου μέρους του δικτύου δράσης του SOSUS, με πολλούς σταθμούς παρακολούθησης να κλείνουν. Οι συστοιχίες υδροφώνων είναι ακόμα εκεί, αλλά έχουν τεθεί σε stand-by κατάσταση στην οποία τα δεδομένα είναι διαθέσιμα, αλλά όχι σε real time κατάσταση.

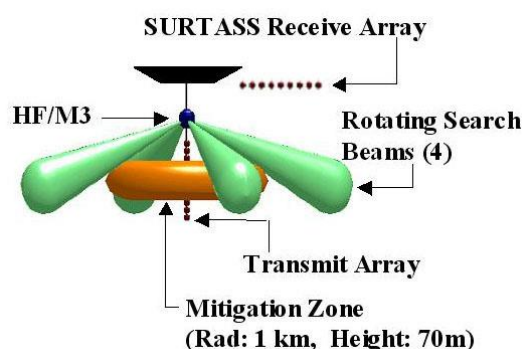
IUSS Manning in 2010



Εικόνα 2.16 Σταθμοί SOSUS το 2010 (<http://www.navsourc.org/>)

3.12. SURTASS

Αποτελεί κινητό παθητικό σύστημα υποβρύχιας επιτήρησης χαμηλών ακουστικών συχνοτήτων, το οποίο χρησιμοποιεί διαφόρων τύπων ρυμουλκούμενες μικρής διαμέτρου συστοιχίες υδροφωνων. Τυπικό μήκος οριζόντιας συστοιχίας υδροφωνων $>1500\text{m}$. Είναι εγκατεστημένο σε αμερικανικά υποβρύχια SSBN και χρησιμοποιήθηκε για την επιτήρηση των κινήσεων των Σοβιετικών υποβρυχίων, σε περιοχές που δεν κάλυπταν τα μόνιμα εγκατεστημένα συστήματα ξηράς. Τα συλλεγόμενα στοιχεία στέλνονταν μέσω δορυφόρων (SHF) σε κατάλληλα κέντρα επεξεργασίας στις ΗΠΑ και στη συνέχεια, έπειτα απο επεξεργασία αναμεταδίδονταν στις επιχειρησιακές μονάδες που βρίσκονταν σε αποστολή, για ανάλογη εκμετάλλευση. Η εξέλιξη των SURTASS για την βελτίωση της απόδοσης εντοπισμού σε παράκτια ύδατα, περιελάμβανε ορισμένα σχέδια με δυο ρυμουλκούμενες συστοιχίες υδροφώνων (twin – line), ευρισκόμενες σε σταθερή μεταξύ τους απόσταση (twin line array). Η τεχνική αυτή, καταπιέζει το λαμβανόμενο θόρυβο περιβάλλοντος και αναδεικνύει τα σήματα ενδιαφέροντος, με αντίτιμο τη μεγαλύτερη απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ. Μια άλλη ενδιαφέρουσα τεχνική που επεκτείνει τις δυνατότητες των SURTASS, είναι η χρήση κάποιας πηγής χαμηλών συχνοτήτων, που έχει σκοπό τη μετατροπή του συστήματος σε LFAS (Low Frequency Active Sonar).



Εικόνα 2.17 Σύστημα SURTASS με 4 περιστρεφόμενους λοβούς (<http://www.surtass-lfa-eis.com>)

§4. Σύνοψη Κεφαλαίου

Η Α/Υ έρευνα στη μοντέρνα ναυτική τακτική βασίζεται στη γνώση του συγκεκριμένου θαλασσίου περιβάλλοντος και στη συντονισμένη και αποτελεσματική χρήση/ειμετάλλευση μεγάλης ποικιλίας ακουστικών και μη ακουστικών αισθητήρων, κυρίως από εναέρια μέσα (αεροσκάφη και ελικόπτερα), αλλά και πλοία επιφανείας/υποβρύχια. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια ιστορική αναδρομή, η οποία είναι απαραίτητη προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι νέες τάσεις στον Α/Υ πόλεμο, σε σχέση πάντα με τα συστήματα που αναπτύχθηκαν κατά το παρελθόν. Ο ψυχρός πόλεμος και ο ανταγωνισμός του, σε συνδυασμό με την τεχνολογική επανάσταση οδήγησε σε νέες τάσεις και δημιούργησε νέες απαιτήσεις στον συγκεκριμένο τομέα. Δημιουργήθηκαν μεγαλύτερα υποβρύχια, πολυπλοκότερα, γρηγορότερα, με μεγαλύτερη αυτονομία και πολύ πιο εξελιγμένα συστήματα. Αναθεωρήθηκαν ο σχεδιασμός των επιχειρήσεων καθώς και το δόγμα δράσης τους. Κατασκευάστηκαν πολυδάπανοι υποθαλάσσιοι γίγαντες, με στρατηγικής ισχύος όπλα και ισχύ. Τα συστήματα εξελίσσονται, τα υποβρύχια γίνονται όλο και πιο αθόρυβα οι απαιτήσεις αυξάνονται. Παρουσιάστηκαν επίσης τα νέα συστήματα τα οποία αναπτύσσονται ανά τον κόσμο, καθώς και οι καινοτομίες που φέρουν. Κάθε επιχειρησιακός χώρος έχει ξεχωριστές απαιτήσεις και για αυτό το λόγο τα συστήματα προσαρμόζονται ανάλογα.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Θόρυβος

Υπάρχει ένα πλήθος πηγών θορύβου στο υποθαλάσσιο περιβάλλον, αλλά η κύρια, συνεισφορά προέρχεται από λίγες μόνο αιτίες. Ο θόρυβος του περιβάλλοντος, σε αντίθεση με άλλες πηγές, δεν προέρχεται από μια συγκεκριμένη κατεύθυνση ή πηγή, αλλά εμφανίζεται ως ομογενής και ισότροπος.

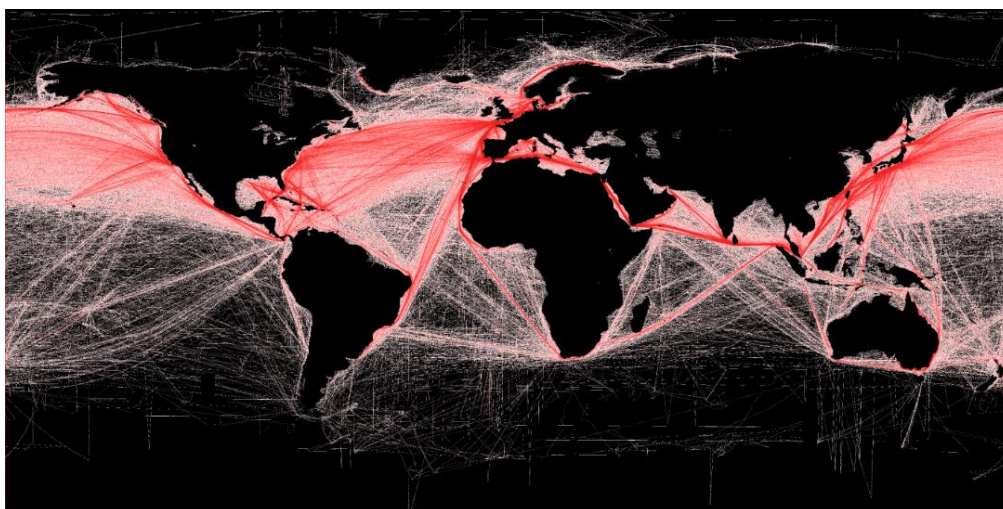
Η πιο προφανής συνεισφορά στο θόρυβο του περιβάλλοντος είναι τα φαινόμενα που συμβαίνουν στην επιφάνεια της θάλασσας. Όσο μεγαλύτερο το μέγεθος των κυμάτων, τόσο μεγαλύτερη είναι η συνεισφορά του θορύβου αυτού. Επειδή τα κύματα προκαλούνται από τους ανέμους, υπάρχει μια άμεση αντιστοιχία ανάμεσα στην ταχύτητα του ανέμου και την κατάσταση της θάλασσας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη είναι η συνεισφορά του θορύβου. Η συχνότητα αυτού του θορύβου τείνει να είναι μεγαλύτερη από 300 Hz.

Η δεύτερη πηγή θορύβου προέρχεται από τη ναυτιλία. Σε περιοχές όπου υπάρχουν πολλά διερχόμενα πλοία, ο θόρυβος του περιβάλλοντος αυξάνεται σημαντικά. Αυτός ο θόρυβος, σε αντίθεση με το θόρυβο από το θαλάσσιο στοιχείο, είναι χαμηλής συχνότητας (<300 Hz).

Τέλος τρίτη πιθανή πηγή περιβαλλοντικού θορύβου είναι οι βιολογικές πηγές, δηλαδή θόρυβος εξ' αιτίας της θαλάσσιας ζωής. Αυτός είναι τόσο ευρύς και ποικίλος που καθίσταται απρόβλεπτος.

§1. Πηγές Θορύβου

Θόρυβος περιβάλλοντος (Ambient noise) ονομάζεται ο background ήχος που λαμβάνεται από ένα υδρόφωνο με βασικότερες πηγές αυτού να είναι τα παντός τύπου πλοία, η κατάσταση στην επιφάνεια της θάλασσας, η βροχή, οι βιολογικοί οργανισμοί καθώς και ο πάγος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι κάθε συντελεστής του ambient noise, επηρεάζει συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων περισσότερο σε σχέση με το σύνολο του φάσματος, προκαλώντας μεγαλύτερη διακύμανση στα επίπεδα του ambient noise κατά μήκος του φάσματος συχνοτήτων. Για ένα τμήμα του φάσματος, το επίπεδο του ambient noise μπορεί να μεταβληθεί με το χρόνο.



Εικόνα 3.1 Παγκόσμιος θαλάσσιος θόρυβος απο εμπορικά σκάφη

Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων, περίπου από 10 Hz έως 300 Hz, επικρατέστερη πηγή είναι η συσσωρευμένη ενέργεια των πλοίων που βρίσκονται πολύ μακριά για να ακουστούν χωριστά. Παρατηρώντας το φάσμα θορύβου των μακρινών δρομολογίων των πλοίων, εντοπίζεται διαφορά από αυτή των κοντινών δρομολογίων, πράγμα που οφείλεται στην μεταβολή της συχνότητας από την εξασθένηση. Το

επίπεδο του εκπεμπόμενου θορύβου των δρομολογίων των πλοίων που συμβάλει στην δημιουργία του περιβαλλοντικού θορύβου, εξαρτάται από την απόσταση που θα έχει το υδρόφωνο, από την κυκλοφορία, τα δρομολόγια των πλοίων, και από τις συνθήκες διάδοσης της ηχητικής ενέργειας.

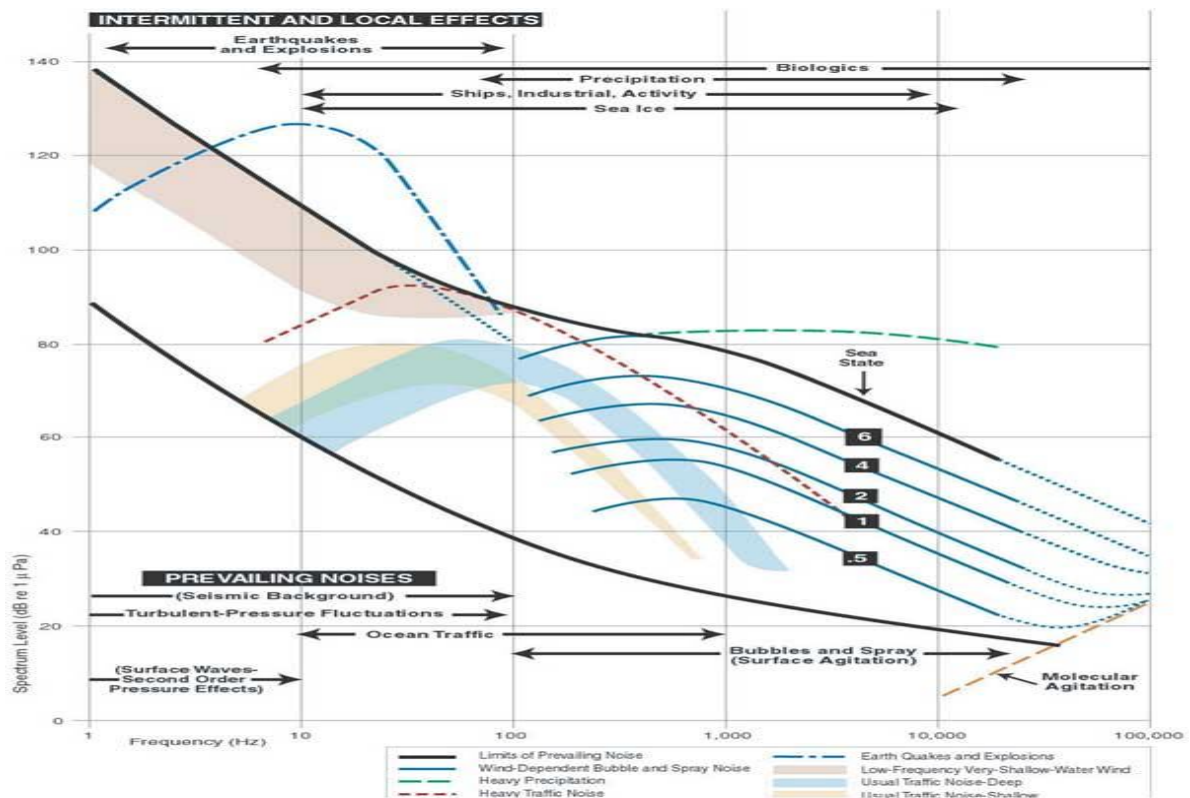
Στην περιοχή υψηλότερων συχνοτήτων, περίπου από 300 Hz έως 5 kHz, η κύρια πηγή του περιβαλλοντικού θορύβου, προέρχεται από την κατάσταση της επιφάνειας της θάλασσας (sea state noise). Η κατάσταση της θάλασσας σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα του ανέμου, η οποία μπορεί να μετρηθεί και να υπολογισθεί. Ο περιβαλλοντικός θόρυβος δημιουργείται επίσης από διακοπτόμενες και τοπικές επιρροές, όπως είναι η βροχή, οι βιολογικοί οργανισμοί, ο πάγος και οι σεισμοί. Η βροχή και οι καταιγίδες αυξάνουν το επίπεδο του περιβαλλοντικού θορύβου σε μερικές συχνότητες. Ο χαρακτηριστικός θόρυβος που παράγεται από τη βροχή, κυμαίνεται σε μια κλίμακα συχνοτήτων από 500 Hz έως 15 kHz. Οι μεγάλες καταιγίδες μπορούν να δημιουργήσουν θόρυβο με συχνότητες χαμηλές όπως π.χ. 100 Hz και μπορούν ουσιαστικά να επηρεάσουν την κατάσταση του θορύβου σε μεγάλες αποστάσεις από το κέντρο της καταιγίδας.

Ο θόρυβος από τους βιολογικούς οργανισμούς, συμβάλει στο περιβαλλοντικό θόρυβο σε πολλές θαλάσσιες περιοχές. Λόγω των συμπεριφορών και των ακουστικών χαρακτηριστικών των ποικίλων ήχων που παράγονται, μερικές θαλάσσιες περιοχές είναι περισσότερο θορυβώδεις από άλλες. Η επιρροή των βιολογικών δραστηριοτήτων στο γενικό επίπεδο του θορύβου, είναι μεγαλύτερη σε ρηχά νερά, απ' ό,τι σε ανοικτές θάλασσες και μεγαλύτερη σε τροπικές και σε ήπιες ζώνες απ' ό,τι σε κρύα νερά. Οι πιο γνωστοί και έντονοι θόρυβοι από θαλάσσιους οργανισμούς που παρατηρούνται σε ρηχά νερά, είναι αυτοί που παράγονται από κρωγμούς που προέρχονται από τις γαρίδες αλλά και από μερικές ποικιλίες ψαριών. Τα ψάρια δηλαδή είναι και αυτά σημαντική πηγή βιολογικού θορύβου στις περισσότερες θάλασσες. Ο

θόρυβος που παράγουν τα ψάρια και τα οστρακόδερμα περιορίζεται σχεδόν αποκλειστικά σε κόλπους, υφάλους και παράλια νερά.

Στις ανοιχτές θάλασσες, οι φάλαινες, τα δελφίνια και τα μεγάλα θαλάσσια κήτη κυριαρχούν στη δημιουργία βιολογικού θορύβου. Ο θόρυβος των θηλαστικών περιλαμβάνει μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων απ' ότι οι θόρυβοι που προέρχονται από τα ψάρια και τα οστρακόδερμα. Έχουν καταγραφεί από πολύ χαμηλές συχνότητες π.χ. 19 Hz έως πολύ υψηλές της τάξεως των 196 kHz. Παρ' όλα αυτά οι συνήθεις συχνότητες βρίσκονται μέσα στη κλίμακα των ακουστικών συχνοτήτων. Οι φάλαινες παράγουν μια ποικιλία θορύβων πάνω από 189 Db, σε κλίμακα 20 με 30 kHz.

Ο θαλάσσιος πάγος είναι άλλος ένας παράγοντας που επιδρά στο επίπεδο του περιβαλλοντικού θορύβου. Η επιρροή του εξαρτάται από την κατάσταση του πάγου, δηλαδή από το βαθμό μορφοποίησης του, ή από το βαθμό αποσύνθεσής του, καθώς και από τη περιοχή που καλύπτει. Εάν εξαιρέσουμε τη μηχανική ή τη θερμική πίεση που ασκείται στον πάγο, σε γενικές γραμμές το επίπεδο του θορύβου κατά την αύξηση του είναι σχετικά χαμηλό. Έρευνες έχουν δείξει ότι η ένταση αυτού του θορύβου μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας κατά την διάρκεια που ο πάγος μεγαλώνει. Εξαιρεση σε αυτή τη περίοδο της σχετικά χαμηλού επιπέδου θορύβου, είναι η εξαιρετικά θορυβώδης κατάσταση (λόγω του παγιδευμένου αέρα) αποτέλεσμα της παραμόρφωσης και της προσωρινής διάσπασης του πάγου κατά την αύξησής του.

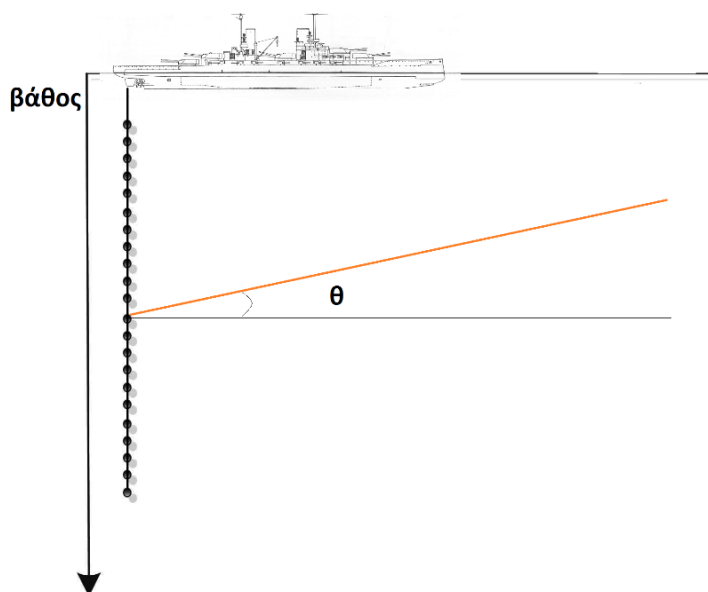


Εικόνα 3.2 Ambient noise (<http://stellwagen.noaa.gov>)

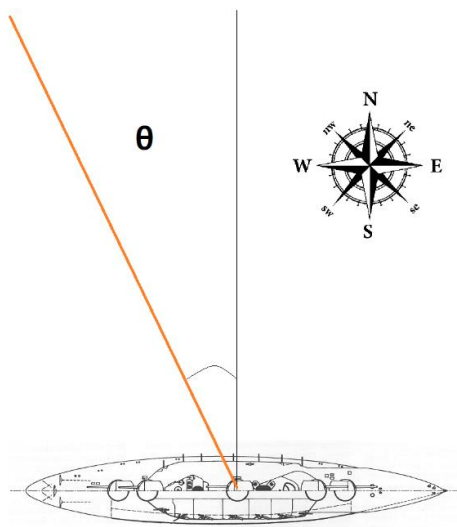
§2. Κατευθυντικότητα και θορύβος

Ο σχεδιασμός και η χρήση των συστοιχιών υδροφώνων (hydrophone arrays) βοηθά στον προσδιορισμό της κατευθυντικότητας των λαμβανόμενων σημάτων. Χρησιμοποιώντας τις συστοιχίες υδροφώνων προκαλούνται στενά εστιασμένα σχέδια (patterns) συχνότητας, ειδικής ευαισθησίας, τα οποία μπορούν να σκοπεύουν σε επιθυμητές κατευθύνσεις και είναι δυνατόν να καθοριστεί η κάθετη ή και η οριζόντια κατευθυντικότητα, σύμφωνα με τις πηγές προέλευσης του σήματος και τους τρόπους διάδοσης του.

Η κάθετη κατευθυντικότητα περιγράφεται με τα γωνιακά χαρακτηριστικά σε σχέση με την νοητή μεσοκάθετο της συστοιχίας, ενώ η οριζόντια περιγράφεται με τα γωνιακά χαρακτηριστικά σε οριζόντιο πλάνο γύρω από την λαμβανόμενη συστοιχία.

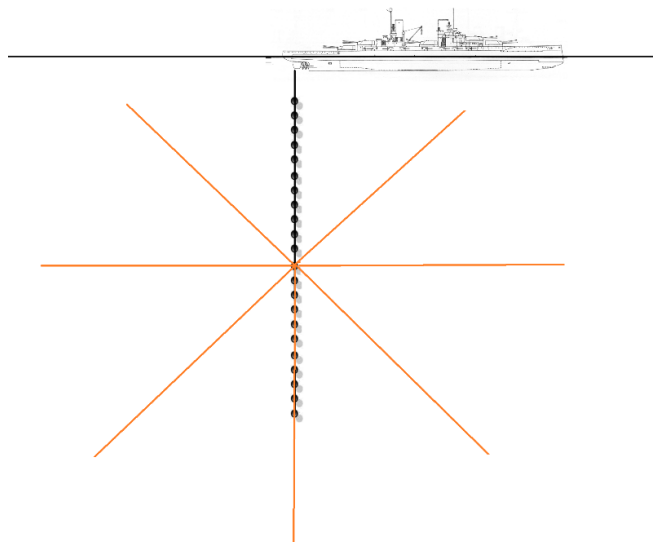


Εικόνα 3.3 Κάθετη κατευθυντικότητα



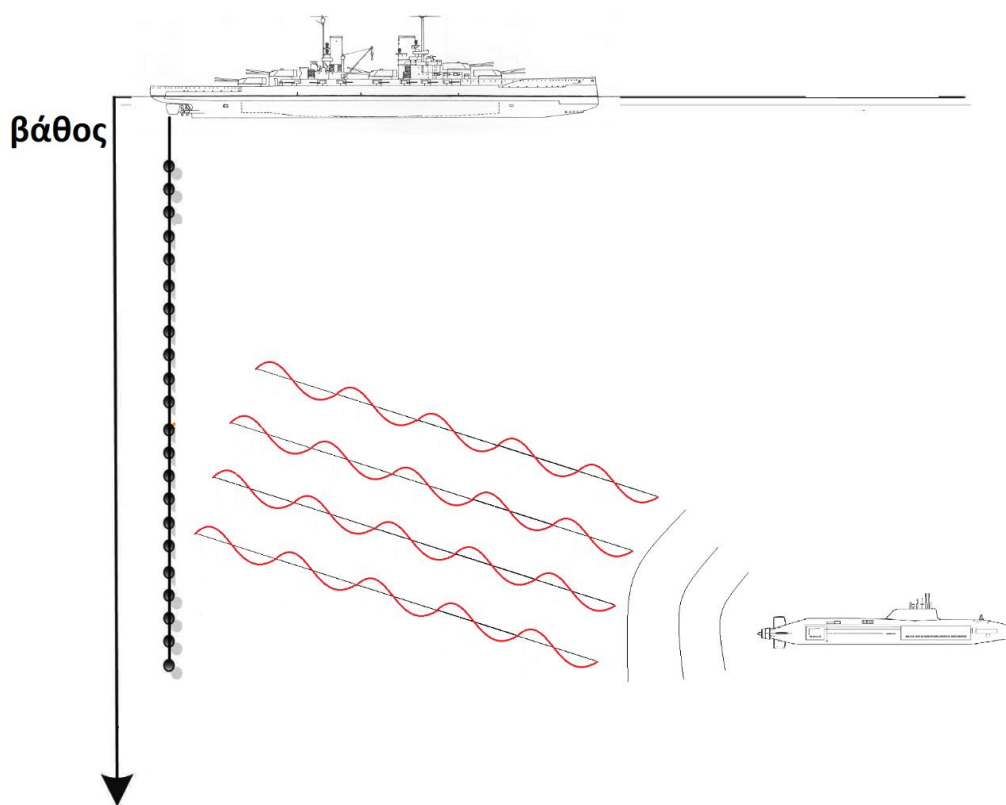
Εικόνα 3.4 Οριζόντια κατευθυντικότητα

Εξαιρώντας τα κοντινά σήματα παρεμβολών, ένα μεγάλο μέρος της συχνότητας του περιβαλλοντικού θορύβου είναι ισότροπος. Ο θόρυβος δηλαδή είναι ίδιος στη συχνότητα και στην ισχύ από οποιαδήποτε κατεύθυνση.



Εικόνα 3.5 Ισοτροπικός θόρυβος

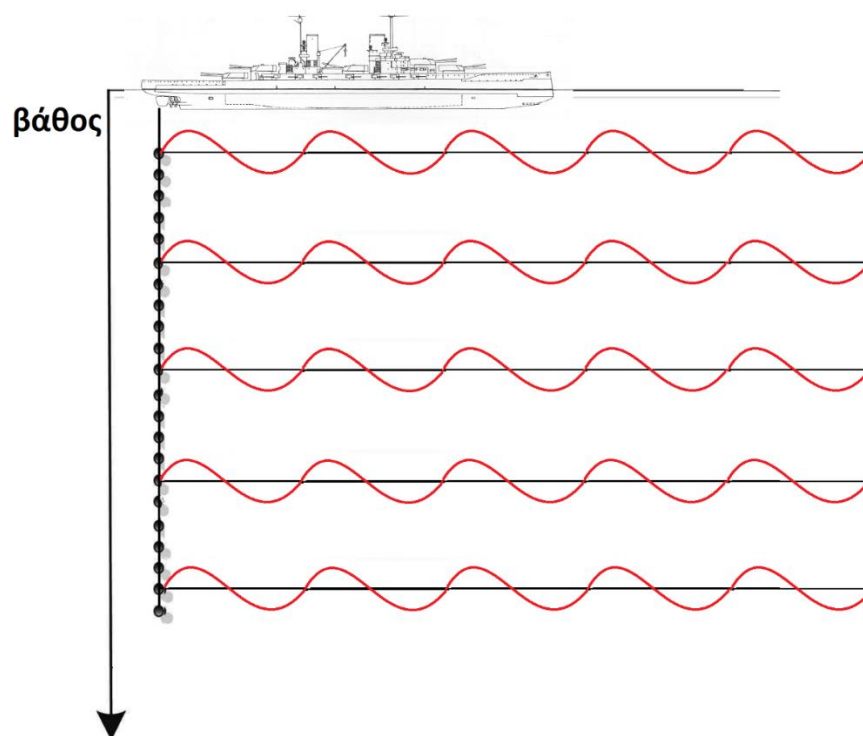
Επιπλέον ο περιβαλλοντικός θόρυβος είναι ασύγχρονος (incoherent signal). Αυτό σημαίνει ότι η σχέση των φάσεων των κυμάτων της ακουστικής συχνότητας είναι τυχαία ή χαοτική. Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα σε μεγάλο βαθμό, των πολλών πηγών που είναι διανεμημένες σε μεγάλες περιοχές και συμβάλλουν στην αύξηση του τοπικού περιβαλλοντικού θορύβου. Ο αυτοθόρυβος ενός Υ/Β, παρουσιάζει υψηλή συμφασικότητα σημάτων. Αυτό δίνει συμφασικά κύματα κατά μήκος μιας επίπεδης επιφάνειας κάθετης στο άνωσμα διάδοσης του κύματος, όπου τα ακουστικά κύματα έχουν ταξιδέψει την ίδια απόσταση και μέσα στην ίδια στήλη νερού, παραμένοντας στην ίδια φάση σε οποιοδήποτε σημείο της επίπεδης επιφάνειας.



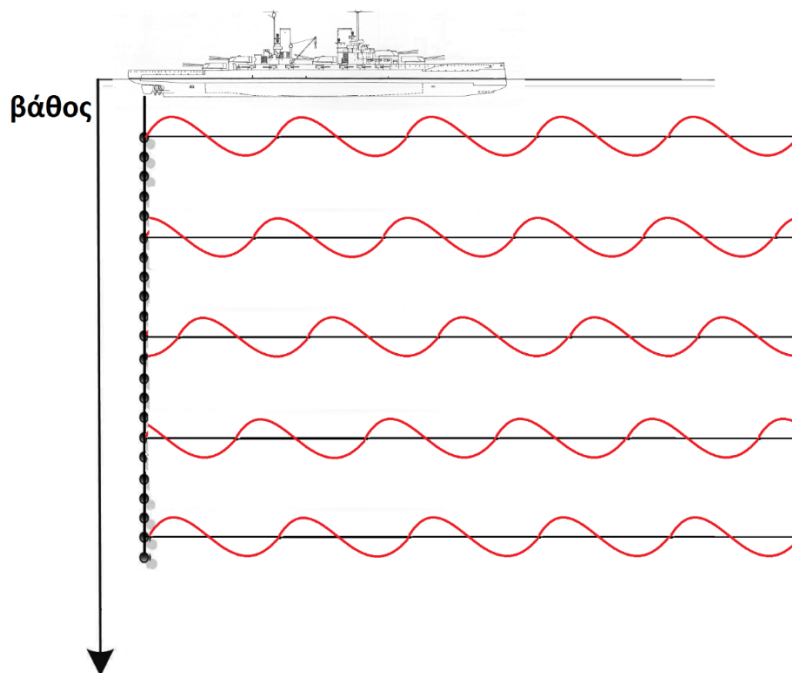
Εικόνα 3.6 Θόρυβος υποβρυχίου

Μια συστοιχία λειτουργεί αθροίζοντας τις αποκρίσεις των υδροφώνων της ξεχωριστά. Όταν η ξεχωριστή απόκριση των υδροφώνων της συστοιχίας συνδυαστεί, τα σήματα που λαμβάνονται σε φάση αθροίζονται συμφασικά με αποτέλεσμα την αύξηση του κέρδους-πλάτους τους, ενώ τα σήματα που λαμβάνονται και αθροίζονται εκτός φάσης, έχουν σαν αποτέλεσμα την πολύ μικρότερη αύξηση του πλάτους τους.

Σε αυτές τις περιπτώσεις η συστοιχία των υδροφώνων μπορεί να παρέχει κέρδος φιλτράροντας ή μειώνοντας το παρατηρούμενο επίπεδο των ασυνάρτητων ισοτροπικών σημάτων του περιβαλλοντικού θορύβου, εφόσον αυξήσει το παρατηρούμενο επίπεδο των ομοιογενών συμφασικών σημάτων.



Εικόνα 3.7 Σήματα που λαμβάνονται σε φάση

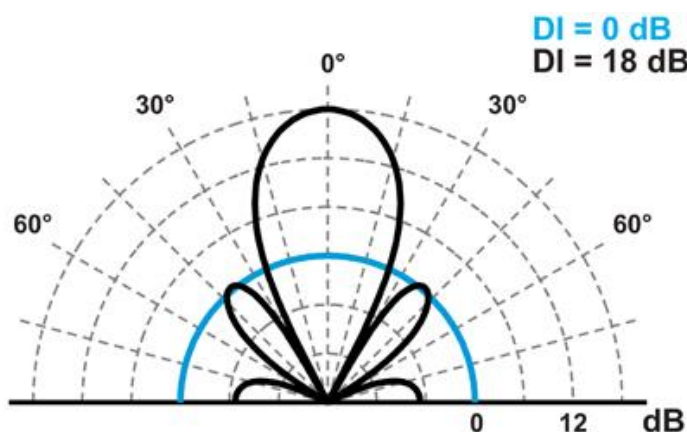


Εικόνα 3.8 Σήματα που λαμβάνονται εκτός φάσης

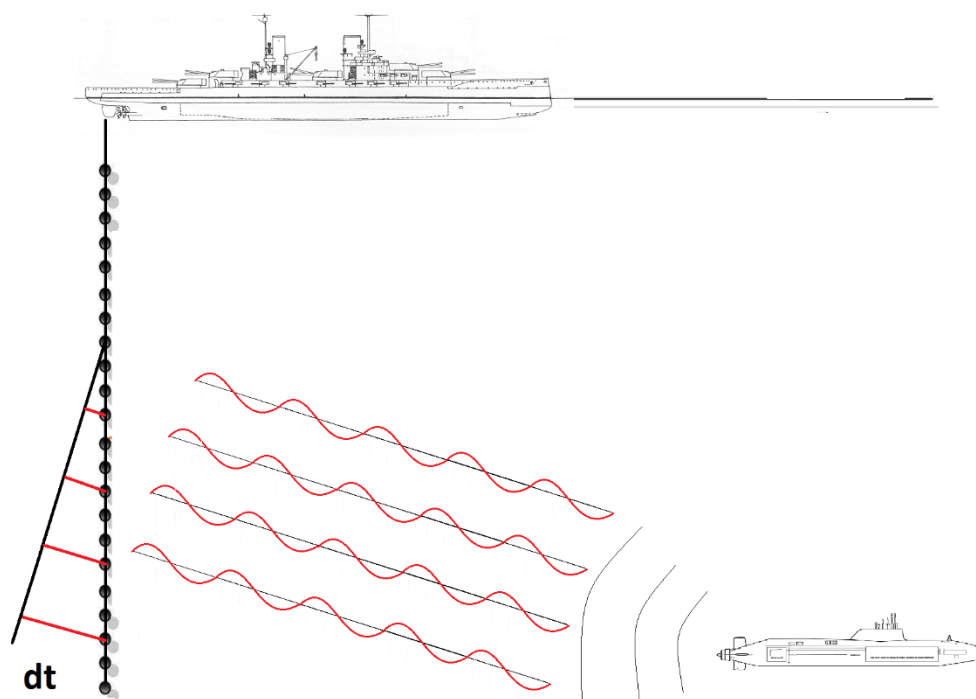
Αιόμα και στη περίπτωση των ομοιογενών σημάτων, η απόκριση μια συστοιχίας ποικίλει ανάλογα με την κατεύθυνση του προσπίπτοντος μετώπου. Αυτό βέβαια εξαρτάται από την κατασκευή της συστοιχίας, από τον καθορισμό της κατεύθυνσης του λαμβανόμενου σήματος και από τη μείωση των λαμβανόμενων ομοιογενών και ασυνάρτητων σημάτων. Η κατευθυντικότητα μιας συστοιχίας έχει σαν σκοπό τον εντοπισμό των ημιτονοειδών σημάτων που λαμβάνονται σε κάποια κατεύθυνση και τείνουν να είναι σε φάση σε όλα τα υδρόφωνα της συστοιχίας, δεδομένου ότι ο θόρυβος του υποβάθρου και τα ομοιογενή σήματα από άλλες κατευθύνσεις είναι εκτός φάσης. Αυτή η κατεύθυνση της μέγιστης σε φάση κατάστασης είναι ο ακουστικός άξονας (acoustic axis) της συστοιχίας και η κατεύθυνση της μέγιστης ευαισθησίας.

Στην Εικόνα 3.7, απεικονίζεται η κατευθυντικότητα ομοιογενών σημάτων σε οριζόντια κατεύθυνση. Τα σήματα παραμένουν σε φάση σε κάθε ένα ξεχωριστό υδρόφωνο της συστοιχίας. Όταν συνδυάσουμε αυτήν την απόκριση θα έχουμε το μέγιστο δυνατό λαμβανόμενο σήμα. Αντίθετα στην Εικόνα 3.8, παρατηρείται ότι όταν αλλάξει η οριζόντια κατευθυντικότητα τα ίδια σήματα φτάνουν με διαφορετική φάση σε κάθε υδρόφωνο, με αποτέλεσμα όταν συνδυαστεί αυτή την απόκριση να προκύπτει ένα πολύ χαμηλό επίπεδο σήματος. Οι αλλαγές αυτές της απόκρισης μιας συστοιχίας ανάλογα με την κατεύθυνση είναι γνωστές σαν Beam Pattern (μορφή δέσμης). Στις πιο συνηθισμένες συστοιχίες το Beam Pattern είναι συμμετρικό και δηλώνεται σε dB.

Καθώς τα ηχητικά κύματα φτάνουν και συναντούν μια συστοιχία υδροφώνων, το σήμα θα φτάσει πρώτα στο ένα υδρόφωνο και στη συνέχεια ακολουθούν τα υπόλοιπα υδρόφωνα της συστοιχίας. Αυτό φαίνεται καλύτερα στην Εικόνα 3.10, όπου παρατηρείται χρονική καθυστέρηση μεταξύ των αισθητήρων. Εάν από αυτά η απόκριση του κάθε υδροφώνου καθυστερεί για χρόνο d/c , όπου c η ταχύτητα του ηχητικού κύματος, και d η απόσταση των υδροφώνων, τότε υπάρχει η δυνατότητα να στραφούν τα υδρόφωνα γεωμετρικά μαζί με το κύριο λοβό (Main Beam), προς την επιθυμητή κατεύθυνση.



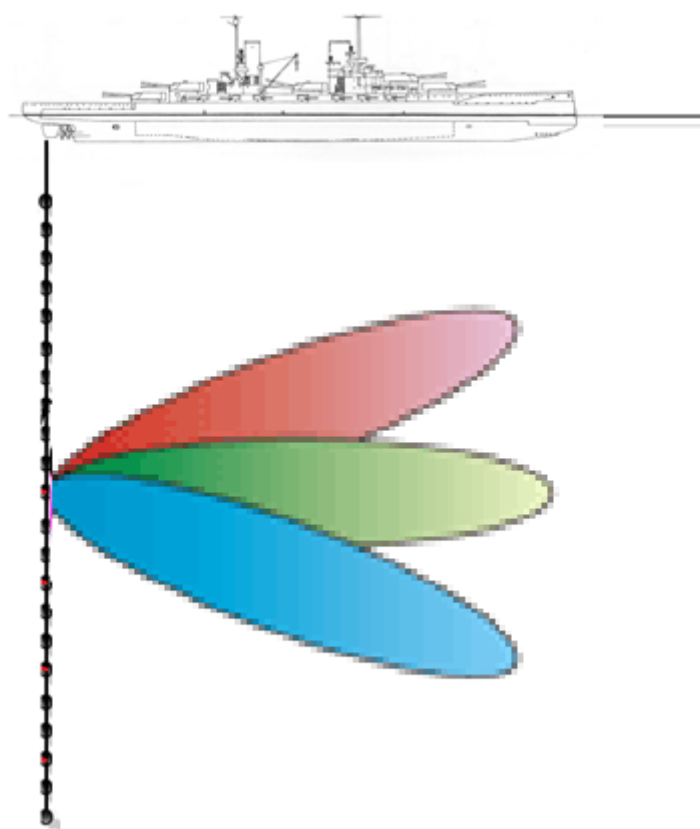
Εικόνα 3.9 Κύριος και δευτερεύοντες λοβοί (www.frontiersin.org)



Εικόνα 3.10 Άφιξη σήματος υπό γωνία και χρονική υστέρηση dt για κάθε υδρόφωνο

Έτσι με αυτό τον τρόπο μπορούν να σχηματιστούν και να καθοδηγηθούν αρκετοί λοβοί ταυτόχρονα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.11. Η λειτουργία αυτή συμβαίνει στον αλγόριθμο του υδροφώνου, και ονομάζεται In Buoy Signal Processing (IBSP). Η απόσταση ανάμεσα στα υδρόφωνα μιας συστοιχίας, παίζει μεγάλο ρόλο και εξαρτάται από τη συχνότητα που ενδιαφερόμαστε να ανιχνεύσουμε καθώς και για την οποία η συστοιχία κατασκευάστηκε. Πολλές συστοιχίες χρησιμοποιούν διάστημα ανάμεσα στα υδρόφωνα ίσο με το $\frac{1}{2}$ του μήκους κύματος και αυτό γιατί θεωρητικά ο περιβάλλον θόρυβος μηδενίζεται. Αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιώντας το $\frac{1}{2}$ του μήκους κύματος σαν το διάστημα μεταξύ των υδροφώνων, η συστοιχία μπορεί να μεγιστοποιήσει την απόδοσή της απέναντι στον ανεπιθύμητο ισοτροπικό θόρυβο.

Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα, το διάστημα μεταξύ των υδροφώνων δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το $\frac{1}{2}$ του μήκους κύματος της μεγαλύτερης συχνότητας για την οποία η συστοιχία έχει συντονιστεί. Καθώς οι αισθητήρες μπορούν ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθούν δύο λοβοί και ο κάθε ένας να καθοδηγείται ανεξάρτητα από τον άλλο ενώ παράλληλα να εστιάζει σ' ένα συγκεκριμένο τμήμα της φασματικής κατανομής.



Εικόνα 3.11 Τρεις λοβοί προερχόμενοι από μία συστοιχία

Παρατηρείται λοιπόν ότι για το σχηματισμό των 250 Hz συντονισμένου καθοδηγούμενου λοβού, η συστοιχία θα μπορούσε συνδυάζει π.χ τα υδρόφωνα H_1 , H_3 , H_5 , ενώ για το σχηματισμό των 500 Hz τα υδρόφωνα H_1 , H_2 , H_3 . Κάθε ένα από αυτά τα γκρουπ των υδροφώνων έχει ανεξάρτητα κυκλώματα καθυστέρησης, απαραίτητα για την καθοδήγηση του αντίστοιχου λοβού στην επιθυμητή κατεύθυνση.

Μια συστοιχία είναι σχεδόν πάντα σκιασμένη με την μέγιστη απόκριση στο κέντρο και την ελάχιστη απόκριση στο τέλος ή στις άκρες της συστοιχίας έτσι ώστε η ευαισθησία να ελαττώνεται σταδιακά από μια υψηλή τιμή στη μέσα μεριά, προς μια χαμηλή προς την έξω μεριά. Αλλά μπορεί η σκίαση να είναι μειωμένη στον κύριο λοβό (Main Beam) και αυξημένη στους πλευρικούς λοβούς. Η ανάποδη αυτή λειτουργία σκίασης μπορεί να επιτευχθεί με τη ρύθμιση της μέγιστης απόκρισης στο τέλος ή στις άκρες της συστοιχίας και τη μικρότερη σκίαση στο κέντρο της συστοιχίας. Η επιρροή της σκίασης με αυτό τον τρόπο περιορίζει-μηδενίζει, τον κύριο λοβό, ενώ ταυτόχρονα διευρύνει τους πλευρικούς λοβούς. Αυτός είναι και ο τρόπος λειτουργίας του κυκλώματος DL (Directional Listening), SD (Steer Difar) και SO (Steer Omni) του συστήματος AQA-7 DIFAR του ΑΦΝΣ P-3B.

Το κέρδος (Gain) της συστοιχίας είναι η βελτίωση του λόγου Signal to Noise Ratio, δηλαδή του λαμβανόμενου σήματος ενός υδροφώνου σε σχέση με τον λαμβανόμενο θόρυβο όλου του περιβάλλοντος. Το κέρδος αυτό μετράται σε dB και δίνεται από το τύπο:

$$AG = 10 \log \frac{\frac{S}{N}_{\text{συστοιχίας}}}{\frac{S}{N}_{\text{υδροφώνου}}} \quad (3.2.1)$$

Όπου S είναι το σήμα (Signal), N ο θόρυβος (Noise) και AG το κέρδος της συστοιχίας (Array Gain). Η κατευθυντικότητα της συστοιχίας μειώνει τους θορύβους που φτάνουν από άλλες κατευθύνσεις, δηλαδή εκτός του ακουστικού άξονά της. Ο συντελεστής κατευθυντικότητας ορίζεται ως ο λόγος από ένα κατευθυνόμενο υδρόφωνο, σε σχέση με τον περιφερειακό θόρυβο (omnidirectional). Η τιμή του συντελεστή κατευθυντικότητας είναι πάντα θετική και όσο πιο μεγάλος είναι, τόσο μεγαλώνουν και οι πιθανότητες εντοπισμού κάποιας πηγής θορύβου από τη συστοιχία.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, η μελέτη των χαρακτηριστικών της κατευθυντικότητας του περιβάλλοντος θορύβου, κάθετα και οριζόντια, έχει σαν αποτέλεσμα το σχεδιασμό και τη χρησιμοποίηση μεθόδων για τη βελτίωση του λόγου Signal to Noise Ratio, που επιτυγχάνεται από την επεξεργασία του σήματος. Αυτές είναι οι τυπικές μέθοδοι που χρησιμοποιούν οι συστοιχίες υδροφώνων για να σχηματίσουν τα patterns της δέσμης (beamformed), και τους μηδενισμούς (σκιάσεις). Έτσι με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να σχηματισθεί ένας λοβός καθορισμένης κατεύθυνσης, μειώνοντας το λαμβανόμενο pattern ή δημιουργώντας μια σκίαση προς την κατεύθυνση των ανεπιθύμητων θορύβων. Τελικά έτσι μπορεί να επιτευχθεί μια αύξηση του κέρδους του επιθυμητού σήματος και παράλληλα μείωση του περιβάλλοντος θορύβου.

§3. Αυτοθόρυβος

Ο αυτοθόρυβος (self noise) SN προκαλείται από όλες τις πηγές θορύβου, είτε από το ίδιο το σύστημα sonar είτε από τον φορέα αυτού. Κάθε υποβρύχιο ή πλοίο παράγει το δικό του αυτοθόρυβο, ο οποίος χαρακτηρίζεται τόσο την κλάση που ανήκει, όσο και την συγκεκριμένη υπογραφή του. Πρακτικά ο αυτοθόρυβος μετράται με τη βοήθεια υδροφώνων τοποθετημένων επί του σκάφους. Οι συνηθέστερες πηγές αυτοθορύβου, είναι οι ακόλουθες:

3.1. Μηχανήματα

Προέρχεται από το κύριο σύστημα πρόωσης (στρόβιλοι, μηχανές Diesel, κύριοι άξονες μειωτήρες) και τα βοηθητικά μηχανήματα του σκάφους (γεννήτριες, αντλίες, ανεμιστήρες, εξαεριστήρες, συμπιεστές). Ο θόρυβος αυτός παράγεται από μηχανήματα που περιλαμβάνουν περιστρεφόμενα ή παλινδρομικά τμήματα, αφού σε αυτά πάντοτε υπάρχουν κάποια μη απολυτά ζυγοσταθμισμένα κινούμενα μέρη. Οι ανισορροπίες που οδηγούν στην παραγωγή μηχανικών κραδασμών και απαιτούν ζυγοστάθμιση, είναι τριών ειδών : α) δυναμική ανισορροπία (dynamic imbalance), η οποία παρατηρείται σε όλα τα περιστρεφόμενα μηχανήματα, β) κρουστική ανισορροπία (impulse imbalance), που παρατηρείται σε όλες τις παλινδρομικές / εμβολοφόρες μηχανές (Diesel). γ) ηλεκτρική ανισορροπία (electrical imbalance), η οποία παρατηρείται σε μαγνητικά και ηλεκτρικά κυκλώματα. Ο θόρυβος αυτός ακολουθεί διάφορα μονοπάτια διάδοσης και τελικά εκπέμπεται στο νερό από την γάστρα του σκάφους. Λαμβάνεται από τα υδρόφωνα του συστήματος sonar, είτε μέσω της ίδιας της πλατφόρμας/φορέα είτε μετά από διάδοσή τους, μέσα στο νερό. Αποτελεί την επικρατέστερη μορφή αυτοθορύβου στις χαμηλές ταχύτητες πλου. Ο θόρυβος των μηχανημάτων πρόωσης έχει τη μορφή διακριτών συχνοτήτων αλλά και ευρέως φάσματος ταυτόχρονα. (Πηγή: Δεσσαλέρμος Σπυρίδων Ακουστική ΣΝΔ).

3.2. Θόρυβος προπελών.

Οι προπέλες, αποτελούν μια από τις βασικότερες πηγές θορύβου (υδροδυναμικός θόρυβος, σπηλαιώση), λόγω της μη ομοιόμορφης ροής του νερού κοντά στην περιοχή τους. Βασική συνιστώσα είναι ο θόρυβος σπηλαιώσης (cavitation noise), ο οποίος αποτελεί έντονο, συνεχόμενο θόρυβο ευρέως φάσματος, εκτεινόμενο ανάλογα με τη σχεδίαση της προπέλας μέσα σε μια μεγάλη περιοχή συχνοτήτων από 10 – 50 Hz έως και 100 kHz. Οφείλεται στο σχηματισμό φυσαλίδων ατμού και διαλυμένων αερίων, όχι λόγω μεταβολής θερμοκρασίας, αλλά λόγω της απότομης υποπίεσης (κάτω από τη μέγιστη τάση ατμών και νερού), που αναπτύσσεται σε ορισμένες περιοχές από τη γρήγορη περιστροφική κίνηση της προπέλας. Η υποπίεση αυτή, ουσιαστικά κατεβάζει το σημείο βρασμού του νερού στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, οπότε σχηματίζονται φυσαλίδες. Όταν πάψει το αίτιο που τις δημιουργήσε, οι φυσαλίδες αυτές σκάνε βιαία (συμπυκνώνονται με μεγάλη ταχύτητα σε χρόνο της τάξης των 3 msec), προκαλώντας εκκωφαντικό θόρυβο. Οι μεγαλύτερες φυσαλίδες, προκαλούν θόρυβο στις χαμηλές συχνότητες, ενώ οι μικρότερες στις υψηλές συχνότητες. Ο θόρυβος αυτός επικρατεί στις υψηλές ταχύτητες, και συγκεκριμένα πάνω από την λεγόμενη ταχύτητα σπηλαιώσης. Η σπηλαιώση αυξάνει σημαντικά τους μηχανικούς κραδασμούς ολόκληρου του σκάφους, αφού το νερό που σχηματίζεται από την απότομη συμπύκνωση των υδρατμών προσκρούει στις μεταλλικές επιφάνειες που συναντά (και ταυτόχρονα τις διαβρώνει). Η διαμόρφωση του σχήματος της πρύμνης, καθώς και το διάστημα μεταξύ των άκρων των πτερυγίων και της γάστρας ενός υποβρυχίου αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες διέγερσης των τοιχωμάτων αυτού. Η εμφάνιση της σπηλαιώσης, εξαρτάται από την ταχύτητα, την υδροστατική πίεση, τη σχεδίαση και την κατάσταση των πτερυγίων. Διακρίνεται σε δυο βασικούς τύπους, στον tip vortex cavitation (εμφανίζεται στα άκρα των πτερυγίων όπου παρατηρείται η υψηλότερη ταχύτητα κίνησης) και στο σημαντικότερο τύπο sheet cavitation.

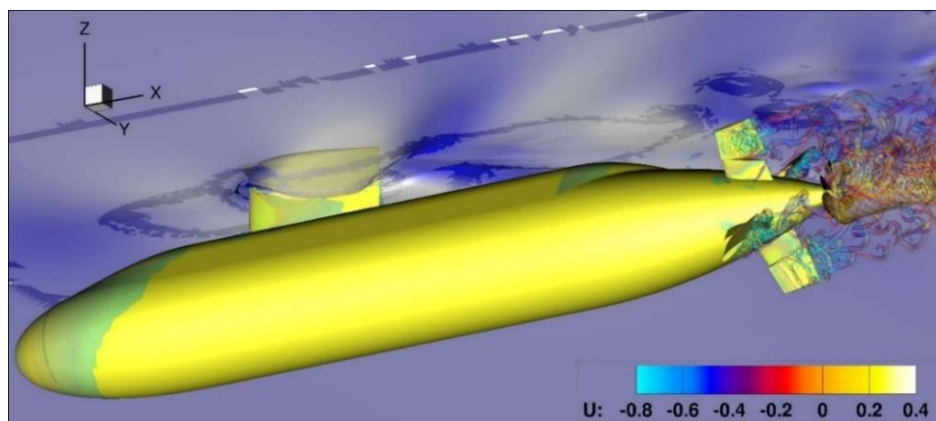
Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, αρχικά εμφανίζεται το πρώτο και στη συνέχεια το δεύτερο είδος σπηλαίωσης που είναι το σημαντικότερο αφού παράγει τον εντονότερο θόρυβο. Γενικά, ο θόρυβος σπηλαίωσης διαμορφώνεται κατά πλάτος, ανάλογα με τον αριθμό των προπелών, της ταχύτητας περιστροφής και του αριθμού των πτερυγίων της κάθε προπέλας. Αποδιαμορφώνοντας τον παραγόμενο αυτό θόρυβο σπηλαίωσης, προκύπτουν χρήσιμα στοιχεία αναγνώρισης του τύπου και της ταχύτητας ενός σκάφους. Οι προπέλες παράγουν επίσης και το γνωστό φαινόμενο συριγμού (singing propellers), υπό μορφή μιας σειράς πολύ κοντινών μεταξύ τους διακριτών συχνοτήτων, με θεμελιώδη συχνότητα την τιμή PSR (Propeller Shaft Rate). Προέρχεται από τις έντονες μηχανικές ταλαντώσεις των πτερυγίων στις συχνότητες συντονισμού αυτών και μπορούν να διεγερθούν είτε υδροδυναμικά είτε από τον κύριο προωστήριο άξονα. Το φαινόμενο εμφανίζεται εντονότερο σε συγκεκριμένες ταχύτητες περιστροφής της προπέλας και οι παραγόμενες συχνότητες κυμαίνονται στην περιοχή από 90 Hz έως 2 kHz, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου και της προπέλας. Στους περισσότερους τύπους πλοίων, το φαινόμενο αυτό έχει περιστασιακή εμφάνιση και στα υδροφωνα ακούγεται ως οξύς συριγμός.



Εικόνα 3.12 Φαινόμενο σπηλαίωσης

3.3. Υδροδυναμικός θόρυβος (flow noise)

Αποτελεί θόρυβο ευρέως φάσματος, ο οποίος παράγεται από την σχετική κίνηση του νερού γύρω από τη γάστρα του σκάφους ή την κατακόρυφη κίνηση των ηχοσημαντήρων μέσα στο νερό. Ο θόρυβος αυτός, έχει σχέση και με την παραγωγή του κύματος πλώρης και των απόνερων. Αυξάνεται με την ταχύτητα του σκάφους και την ύπαρξη ρύπανσης στη γάστρα. Η τυρβώδης ροή του ύδατος (turbulent flow), προκαλεί επί πλέον ταλαντώσεις των εξωτερικών επιφανειών της γάστρας. Ο υδροδυναμικός θόρυβος μειώνεται με την καλύτερη σχεδίαση της γάστρας, έτσι ώστε αυτή να διαθέτει ομαλές γραμμές χωρίς απότομες μεταβολές κλίσης. Επίσης μειώνεται με την καλύτερη σχεδίαση της πλώρης, των πτερυγίων γάστρας και των διαφόρων εισαγωγών και εξαγωγών θαλασσινού νερού. Τα πτερύγια σταθεροποίησης (stabilizer fins), κάτω από μεγάλες γωνίες κλίσης δημιουργούν όπως και οι προπέλες σπηλαίωση. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των ελαστικών ή συνθετικών θόλων sonar έναντι των χαλύβδινων, είναι ο μειωμένος υδροδυναμικός θόρυβος που εμφανίζουν τα πρώτα έναντι των δεύτερων. Υδροδυναμικό θόρυβο παράγει ακόμα και η τυρβώδης ροή μέσα σε σωλήνες και αντλίες, η οποία εκτός από συνεχόμενο θόρυβο ευρέως φάσματος, μπορεί επίσης να οδηγήσει και στην παραγωγή συγκεκριμένων φασματικών γραμμών λόγω του συντονισμού τμημάτων της εγκατάστασης.



Εικόνα 3.13 Υδροδυναμικός θόρυβος (<http://www.tecplot.com/>)

3.4. Μηχανικοί κραδασμοί

Μηχανικοί κραδασμοί, του καλωδίου ρυμούλκησης του towed array, οι οποίοι μεταδίδονται στα υδροφωνα της ρυμουλκούμενης συστοιχίας, δημιουργούν επίσης θορύβους. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει επιτευχθεί σημαντική μείωση στην ένταση αυτών των θορύβων με διάφορες τεχνικές μεθόδους απόσβεσης αλλά και μέσα από τη μείωση της διαμέτρου του ρυμουλκούμενου καλωδίου.



Εικόνα 3.14 Καλώδιο συστοιχίας υδροφώνων μήκους 1300m με υδρόφωνα ανα ένα μέτρο (
<http://www.tboverse.us>)

3.5. Ανθρώπινος παράγοντας

Πρόκειται για θορύβους που προέρχονται από δραστηριότητες του πληρώματος. Οι θόρυβοι αυτοί, συνήθως δεν επηρεάζουν δραστικά την ακουστική υπογραφή ενός στόχου, αλλά καλό είναι να διατηρούνται σε ελεγχόμενο επίπεδο μέσω της κατάλληλης εκπαίδευσης του πληρώματος.

3.6. Εσωτερικός αυτοθόρυβος ηλεκτρονικών κυκλωμάτων συστημάτων sonar

Συνήθως, ο θόρυβος αυτός βρίσκεται σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο από όλα τα υπόλοιπα είδη θορύβου (10 -20 db κάτω), και γι' αυτό δεν αποτελεί σοβαρό πρόβλημα στα συστήματα sonar.

3.7. Μεταβατικά σήματα (transients)

Προέρχονται από αναπόφευκτες δραστηριότητες, όπως πχ χειρισμός πηδαλίων, κίνηση πτερυγίων stabilizers, άνοιγμα πωμάτων τορπιλοσωλήνων, λειτουργία αναπνευστήρα (snorket), εκβολές απορριμμάτων. Οι μετρήσεις αυτοθορύβου των πλοίων, θα πρέπει να εκτελούνται σε περιοχές σχετικά μεγάλου βάθους (> 200 m) και με καλή κατάσταση θαλάσσης (sea state < 2). Μεγάλες αυξήσεις αυτοθορύβου, αποτελούν ένδειξη κάποιου προβλήματος, πχ φθορά ή ρύπανση.

§4. Σύνοψη Κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε η φύση του υποθαλάσιου θορύβου και οι πηγές του. Εγινε εκτενής αναφορά για το φάσμα του θορύβου αυτού, καθώς και για το εύρος των συχνοτήτων που επηρεάζει περισσότερο η κάθε πηγή. Εκτός από το προαναφερθέν φάσμα έγινε αναφορά και για τα επίπεδα εντάσεως σε Db, καθώς και ο τρόπος που όλα αυτά επηρεάζονται από την γεωγραφική θέση π.χ. εγγύτητα σε ακτές. Στη συνέχεια έγινε αναφορά για τον τρόπο με τον οποίο μια συστοιχία μπορεί να στρέψει «την προσοχή της» προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις και να αποφύχει την ενίσχυση ανεπιθύμητων θορύβων. Παρουσιάστηκε ακόμα η ομοιογένεια ως προς τις γωνίες η οποία διέπει τον περιβάλλοντα θόρυβο, καθώς και η μη συμφασική άφιξη του στη συστοιχία. Στο τελευταίο κομμάτι του κεφαλαίου παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίο ο ίδιος ο φορέας των υδροφώνων μπορεί και δημιουργεί παρεμβολές και θόρυβο. Πρόκειται για τον λεγόμενο αυτοθόρυβο που συμπιέζεται σημαντικά όταν η γραμική διάταξη των υδροφώνων δεν βρίσκεται ενσωματωμένη στη γάστρα του σκάφους. Τέλος έγινε αναφορά και σε όλους τους θορύβους του σκάφους εκτός από αυτούς που προέρχονται από τη συστοιχία.

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Ακουστικές Υπογραφές

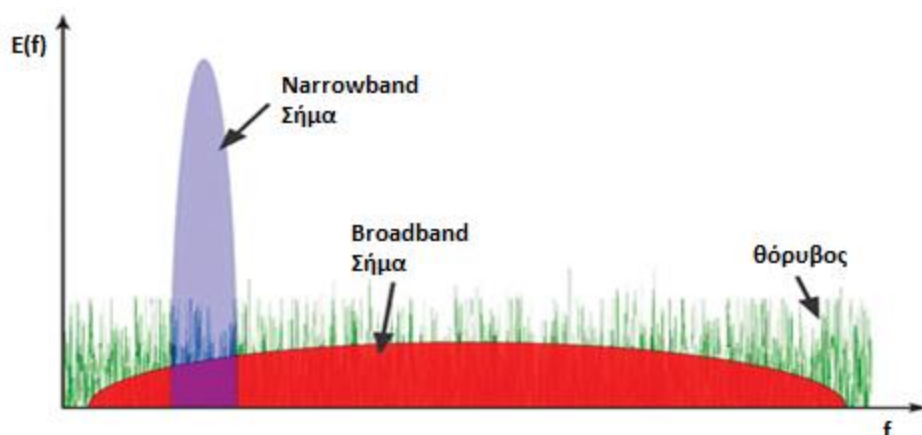
Η λειτουργία ενός παθητικού sonar αφορά την συλλογή ενός μεγάλου αριθμού ακουστικών σημάτων, τα περισσότερα εκ των οποίων είναι αδιάφορα, ενώ ένα περιορισμένο μέρος τους χαρακτηρίζονται ως ακουστικά σήματα ενδιαφέροντος. Τα σήματα ενδιαφέροντος, τα οποία περιλαμβάνουν λίγες διακριτές συχνότητες των στόχων, βρίσκονται ενσωματωμένα σε ένα υπόβαθρο θορύβου. Ένα παθητικό sonar προσπαθεί να ανιχνεύσει τα ενδιαφέροντα αυτά σήματα που βρίσκονται εντός του υποβάθρου, στα πλαίσια κάποιας δεδομένης χρονικής περιόδου. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, τα σήματα που λαμβάνει ένα σύστημα παθητικού sonar διακρίνονται σε:

- Wideband-WB (ευρείας ζώνης), αποτελεί τον όλο θόρυβο μαζί με το σήμα ενδιαφέροντος (background noise και signal of interest).
- Broadband-BB (πλατιάς ζώνης), αποτελεί ένα μέρος του όλου θορύβου και περιλαμβάνει μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων (συνήθως μέχρι τα 3 kHz).
- Narrowband-NB (περιορισμένης ζώνης), αποτελεί ένα μικρό τμήμα του όλου θορύβου, εντοπίζεται στο φάσμα κάτω από το 1 kHz, και περιλαμβάνει τα λεγόμενα σήματα "tonals" του στόχου. Αυτά είναι ισχυρές αιχμές θορύβων σε ασυνεχείς συχνότητες και είναι λίγο ή πολύ σταθερά στη συχνότητα και στο εύρος. Αυτά τα "χρήσιμα σήματα" (signals of interest) αναμιγνύονται διαρκώς με τα σήματα του περιβαλλοντικού θορύβου και του θορύβου της θαλάσσιας κυκλοφορίας που είναι άχρηστα για το χειριστή.

§1. *Broadband*

Αυτός ο τύπος ενέργειας επεκτείνεται σε ένα μεγάλο μέρος του ανιχνεύσιμου φάσματος. Η ενέργεια αυτή που εκπέμπεται από ένα σκάφος είναι αποτέλεσμα της δράσης των προπελών και της ολικής κίνησης της γάστρας το νερό. Μεμονωμένα στοιχεία συχνότητας δεν είναι ευδιάκριτα και επομένως οι ενδείξεις για την ταξινόμηση του σκάφους δεν είναι παρούσες. Οι Broadband πηγές δημιουργούν μια ακουστική ενέργεια σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, παρόμοια με μια θερμική πηγή στην ηλεκτρο-οπτική. Ο θόρυβος από την προπέλα και τον άξονα είναι γενικά χαμηλός σε συχνότητες, δηλαδή κάτω από 1000 Hz. Μια BB υπογραφή μπορεί γενικά να αποτελείται από:

- Υδραυλική αντήχηση (συντονισμό) (Hydraulic resonance)
- Θόρυβο ροής (Flow noise)
- Cavitation
- Κυματισμό πτερυγίων (Blade flutter)
- Αντήχηση υφάλων (Hull resonance: swaths)



Εικόνα 4.1 Σύνθεση λαμβανόμενου σήματος

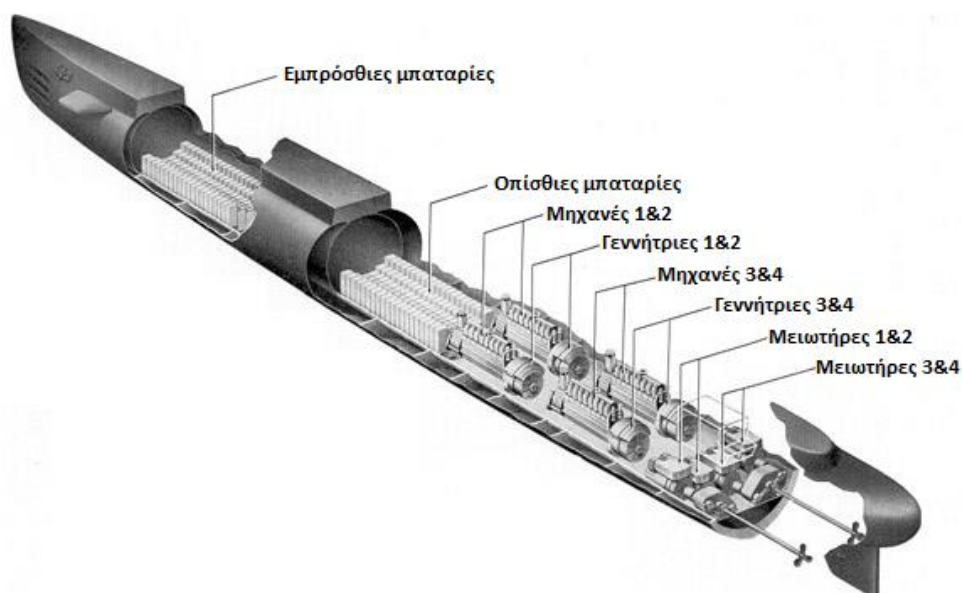
§2. *Narrowband*

Η ενέργεια αυτή αποτελείται από μεμονωμένες και συγκεκριμένες συχνότητες ("tonals"). Αυτές οι μεμονωμένες συχνότητες απεικονίζονται στο lofargram ως διακριτές γραμμές συχνότητων. Κάθε μία διακριτή συχνότητα μπορεί να πηγάζει από συγκεκριμένη πηγή του σκάφους. Τα μηχανήματα αυτά ή τα επιθέματα της γάστρας του, παράγουν ένα επαναλαμβανόμενο κύκλο ή μια δόνηση και έχουν μια NB φάσματος υπογραφή.

Υπάρχουν γενικά δύο συναφείς, αλλά διαφορετικής προελεύσεως, τέτοιες γραμμές: i) τα συστήματα πρόωσης ενός πολεμικού πλοίου και ii) το φαινόμενο της σπηλαιώσης. Το τελευταίο μπορεί να ανιχνευθεί με την εφαρμογή αλγορίθμων που ψάχνουν για χαρακτηριστικές συχνότητες του ευρυζωνικού θορύβου που εκπέμπεται από το πλοίο. Το σύστημα πρόωσης του πλοίου, όντας μια μηχανή ντίζελ, παράγει tonals λόγω των κυκλικών επαναλήψεων, των κινητών τμημάτων της μηχανής. Συνδυαστικά με τον κινητήρα λειτουργεί μια σειρά από βοηθητικές μονάδες και αρκετές αντλίες. Το αποτέλεσμα είναι δονήσεις σε διάφορες αλλά συγκεκριμένες συχνότητες οι οποίες μεταφέρονται μέσα στο νερό. Τυπικές συχνότητες που μπορούν να ανιχνευθούν είναι η κινήσεις των κυλίνδρων, ο ρυθμός ανάφλεξης του καυσίμου και οι στροφές του στροφαλοφόρου άξονα. Όλες αυτές οι συχνότητες βρίσκονται στο χαμηλό μέρος των συχνότητων.

Σπηλαιώση είναι η επίδραση του σχηματισμού φυσαλίδων αερίου, κοντά στα άκρα των πτερυγίων μιας προπέλας. Η πίεση του κινούμενου νερού στο στρώμα κοντά στη λεπίδα είναι μειωμένη, επιτρέποντας έτσι την εξάτμιση. Οι φυσαλίδες που δημιουργούνται έχουν ένα χαρακτηριστικό μέσο χρόνο ζωής μετά τον οποίο θα διαλυθούν. Ο παραγόμενος θόρυβος περιέχει πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των πτερυγίων και το ρυθμό περιστροφής τους. Λόγω της εφαρμογής beamforming, η εισερχόμενη ένταση του ήχου προδίδει εύκολα την κατεύθυνση της πηγής. Συμπερασματικά μια NB φάσματος υπογραφή μπορεί να αποτελείται από:

- Μηχανή πρόωσης
- Κιβώτιο γραναζιών (Gear box)
- Άξονα προπέλας
- Blade rate (Mechanical & Cavitation)
- Βοηθητικά μηχανήματα (αντλίες, κινητήρες, συμπιεστές, ανεμιστήρες)
- Θόρυβος ροής (SRC's)



Εικόνα 4.2 Μηχανικά μέρη (<https://maritime.org/tech/power.htm>)

§3. *Transient*

Η transient υπογραφή δεν είναι συνεχής αλλά είναι μια πολύ μικρή σε χρονική διάρκεια εκπεμπόμενη ενέργεια, που προέρχεται από μη περιοδικές και επαναλαμβανόμενες διεργασίες. Η διάρκειά τους μπορεί να κυμαίνεται από μερικά milliseconds έως και seconds. Είναι πολύ χαρακτηριστικά τα σήματα που εκπέμπονται και μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό της ηχητικής υπογραφής.

Τα σημαντικότερα παραδείγματα των transients είναι:

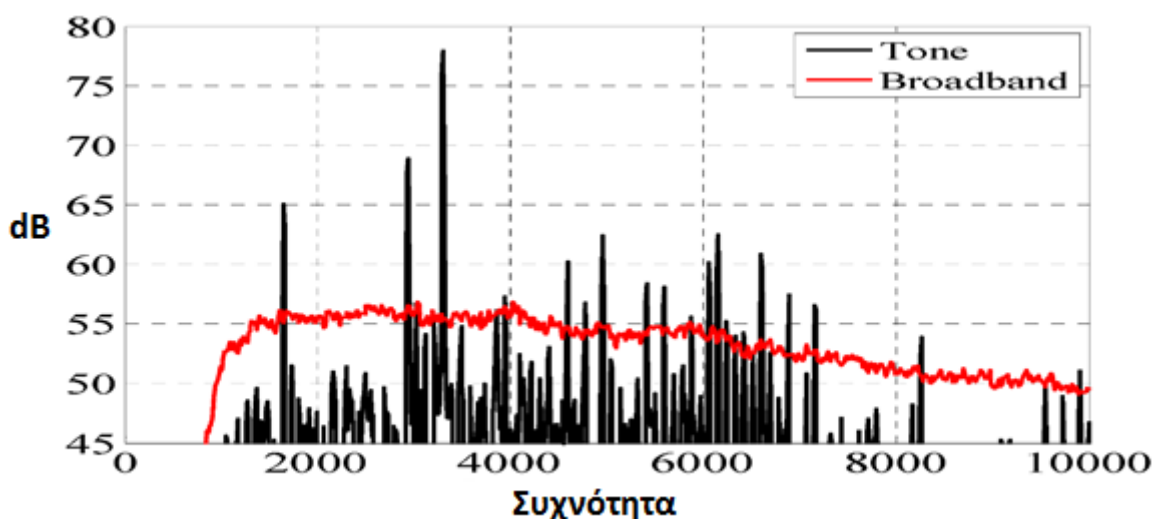
- Αντλίες
- Πόρτα σωλήνων τορπιλών
- Βολή τορπιλών
- Απροσδιόριστα γεγονότα.



Εικόνα 4.3 Τορπιλοσωλήνες υποβρυχίου (<http://www.navsourc.org/>)

§4. Σύνθεση Ακουστικής Υπογραφής Πλοίων

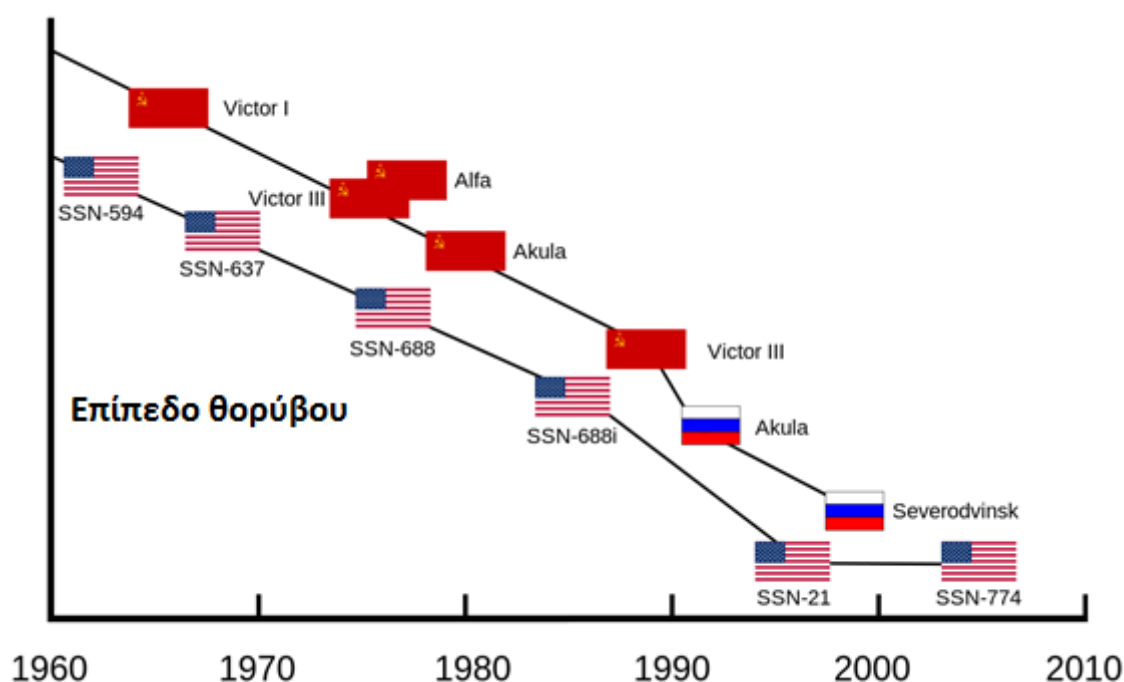
Ο συνολικός εκπεμπόμενος θόρυβος ενός σκάφους είναι η σύνθεση του BB και NB θορύβου του.



Εικόνα 4.4 Σύνθεση υπογραφής σκάφους

Όσον αφορά τις διαφορετικές γενεές υποβρυχίων, υπάρχουν τα παλαιού τύπου υποβρύχια, τα οποία είναι εξαιρετικά θορυβώδη και τα νέας γενεάς υποβρύχια είτε με συμβατική, είτε πυρηνική είτε με AIP πρόωση (AIP-Air Independent Propulsion) τα οποία είναι πολύ αθόρυβα. Στη δεκαετία του '80, κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου, τα υποβρύχια οποιουδήποτε τύπου ήταν εξαιρετικά θορυβώδη. Η ποσότητα επικράτησε της ποιότητας και οι υπογραφές τους ήταν εύκολα αναγνωρίσιμες. Όμως στα υποβρύχια νέας γενιάς, η τεχνολογική πρόοδος τα έχει εξελίξει και τα έχει μεταβάλει σε όλο και πιο αθόρυβα και άρα δυσκολότερα ανιχνεύσιμα στο NB φάσμα. Για το λόγο αυτό επιδιώκεται η ανίχνευση στο BB φάσμα.

Όμως το φάσμα του Broadband θορύβου (BB) δεν περιέχει κανέναν ιδιαίτερα κυρίαρχο τόνο, αλλά αντ' αυτού ένα μεγάλο αριθμό συχνοτήτων, υπο μορφή συνεχούς φάσματος. Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και πιο δύσκολο να αναγνωριστεί και να προσδιοριστεί ένα υποβρύχιο μέσα στο BB φάσμα θορύβου επειδή κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, ο broadband θόρυβος τους μειώνεται συνεχώς.



Εικόνα 4.5 Εξέλιξη έντασης εκπεμπόμενης υπογραφής

Ένας τρόπος λοιπόν για να εντοπιστεί ένα υποβρύχιο ή γενικότερα ένας στόχος, είναι να εντοπιστεί ο θόρυβος που εκπέμπει και στη συνέχεια να ταυτοποιηθεί με βάση μια ενημερωμένη ηλεκτρονική βιβλιοθήκη. Η διαδικασία αυτή μπορεί να το καταστήσει εντοπίσιμο ως προς την ταυτότητά του, τη θέση του, ακόμα και την ταχύτητά του. Οι πηγές θορύβου που μπορεί να αποκαλύψουν ένα στόχο ενδιαφέροντος είναι διάφοροι (πχ. μηχανικά μέρη, προπέλλες, γεννήτριες, υδροδυναμικοί θόρυβοι κ.α) και έχουν προαναφερθεί. Γενικά για

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

Table A1. A model of a SL spectrum of submarines

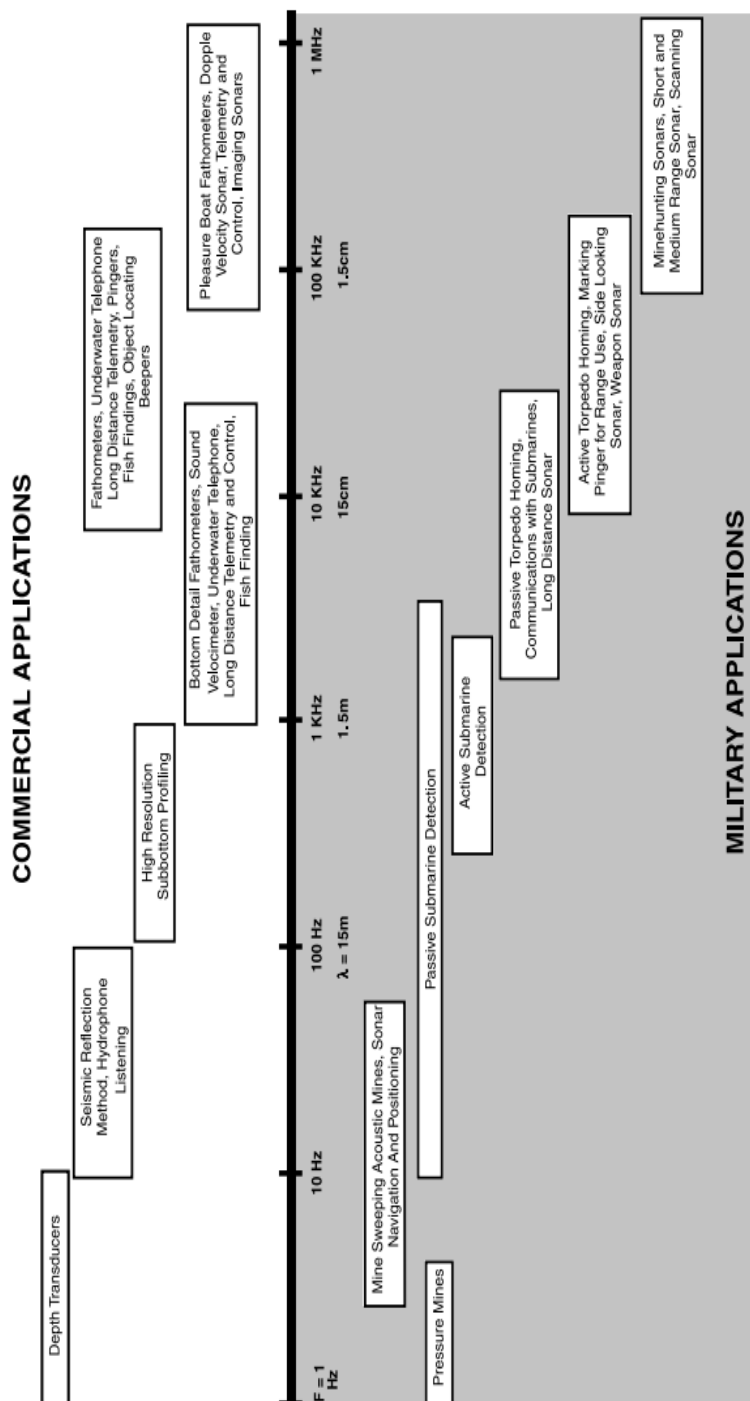
	SL component of the spectrum [relative to 1 Pa at 1 m]	Spectral strength of SL in a frequency band (1Hz) [relative to 1 Pa at 1m]
	5-200 Hz	1kHz
"Noisy" Submarine	140	120
"Quiet" Submarine	120	100
"Very quiet" Submarine	100	80

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

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

§5. Συνοψη κεφαλαίου

Όλες οι παραπάνω πηγές θορύβου συμβάλλουν στην ακουστική υπογραφή του στόχου, παρέχοντας BB και NB ζώνες συχνότητων. Όπως προειπώθηκε ο εκπεμπόμενος θόρυβος του σκάφους αποτελείται και από Broadband θόρυβο και από διακριτές συχνότητες Narrowband. Και οι δύο μορφές θορύβου BB και NB αποτελούν θεμελιώδη στην παθητική ταξινόμηση μιας καταγραφής και ποικίλουν λόγω του περιβαλλοντικού θορύβου, των συνθηκών διάδοσης, της κατάστασης λειτουργίας του σκάφους, τον τύπο και το βάθος του. Η ισχύς του εκπεμπόμενου θορύβου που λαμβάνεται από το παθητικό σύστημα sonar εξαρτάται κυρίως από το ποσό απορρόφησης του ήχου κατά τη διάρκεια της μετάβασής του από το σκάφος προς το δέκτη. Το ποσό αυτό εξαρτάται επίσης και από τη συχνότητα του εκπεμπόμενου θορύβου. Γενικά όσο υψηλότερη η συχνότητα τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό απορρόφησης. Αυτός είναι και ο λόγος όπου τα σήματα χαμηλής συχνότητας διαδίδονται πιο μακριά από τα σήματα υψηλότερης συχνότητας. Παρουσιάστηκαν λοιπόν οι βασικές αρχές σύμφωνα με τις οποίες επιχειρείται η ταυτοποίηση ενός στόχου και που επικεντρώνονται οι προσπάθειες, δηλαδή κυρίως σε χαμηλές συχνότητες που δεν μπορούν να καταπιεστούν και προέρχονται από πηγές του σκάφους που δεν μπορούν να καταπιεστούν.



Εικόνα 4.6 Κατανομή συχνοτήτων σε συνάρτηση με στρατιωτικές εφαρμογές
(<http://www.navsource.org/>)

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

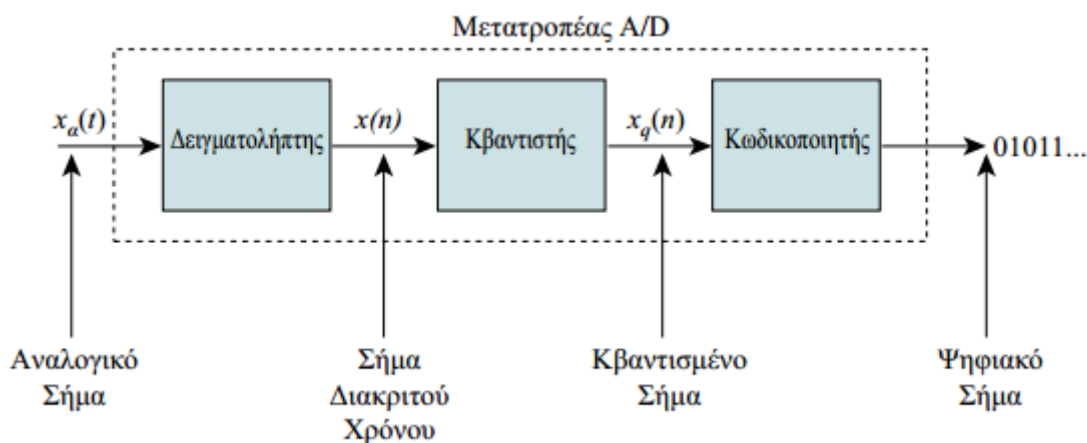
Επεξεργασία ακουστικών σημάτων

Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος αφορά την ψηφιακή αναπαράσταση των σημάτων, την ανάλυση, την τροποποίηση και την εξαγωγή πληροφοριών από αυτά, με τη βοήθεια ψηφιακών επεξεργαστών. Περιπτώσεις τέτοιες είναι η αφαίρεση του θορύβου από ένα σήμα, η εύρεση του μετασχηματισμού Fourier κάποιων δεδομένων και η απόδοση σ' ένα σήμα, μιας μορφής πιο κατάλληλης για επεξεργασία των προς ανάλυση πληροφοριών που εμπεριέχει.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους προτιμάται η ψηφιακή επεξεργασία ενός σήματος έναντι της αναλογικής. Κατά κύριο λόγο, ένα ψηφιακά προγραμματιζόμενο σύστημα παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία στην τροποποίηση των πράξεων ψηφιακής επεξεργασίας με μια απλή μετατροπή του προγράμματος. Αντίθετα μια τέτοια τροποποίηση ενός αναλογικού συστήματος συνεπάγεται την επανασχεδίαση του κυκλώματος και συνεπακόλουθα, έλεγχο και επιβεβαίωση (testing and verification) της ορθής λειτουργίας του. Η ακρίβεια έχει επίσης πολύ σπουδαίο ρόλο. Τα ψηφιακά σήματα αποθηκεύονται σε μαγνητικά ή οπτικά μέσα (λ.χ. μαγνητικούς ή οπτικούς δίσκους, usb, κ.ά.) χωρίς υποβάθμιση της πιστότητάς τους, πέραν αυτής που υπεισήλθε στη διαδικασία μετατροπής τους από αναλογικά σε ψηφιακά. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα μεταφοράς και επεξεργασίας τέτοιων σημάτων σε μη πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα εφαρμογής πιο περίπλοκων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος. Τα σήματα ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα σήματα συνεχούς χρόνου και στα σήματα διακριτού χρόνου. Συνήθως, ως ανεξάρτητη μεταβλητή χρησιμοποιείται ο χρόνος, χωρίς όμως να αποκλείεται η ανεξάρτητη μεταβλητή να είναι κάποιο άλλο φυσικό

μέγεθος, όπως για παράδειγμα η απόσταση, η θερμοκρασία ή η πίεση. Παρ' όλα αυτά έχουν επικρατήσει τα σήματα διακριτού χρόνου.

Για να επεξεργαστούν τα αναλογικά σήματα με ψηφιακά μέσα, απαιτείται η μετατροπή τους σε ψηφιακή μορφή, δηλαδή η μετατροπή τους σε μία ακολουθία αριθμών πεπερασμένης ακρίβειας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακό (analog-to-digital conversion, A/D) και τα αντίστοιχα κυκλώματα ονομάζονται «μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό» (analog-to-digital converters, ADCs). Η διαδικασία αυτή γίνεται σε τρία στάδια, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



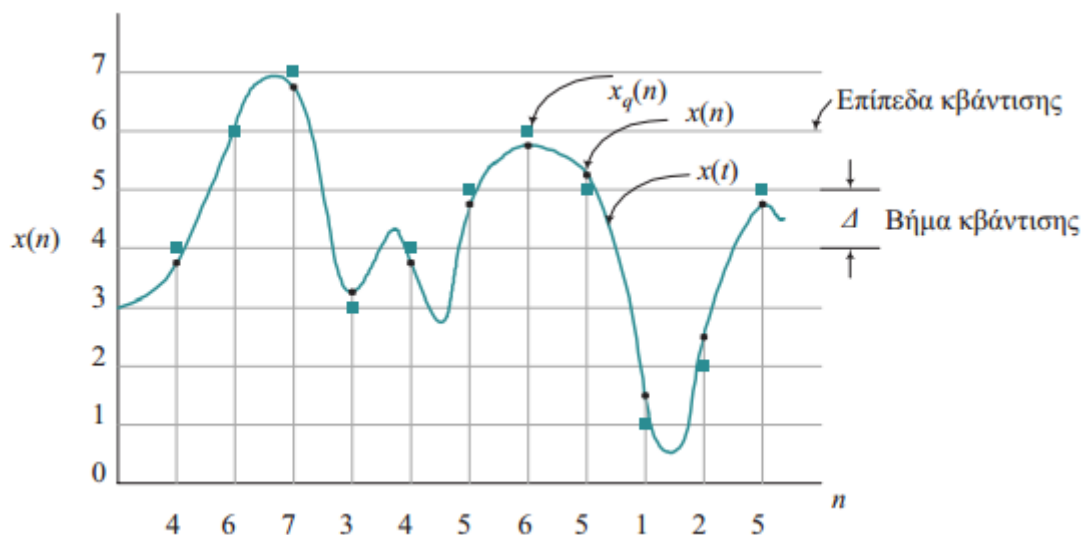
Εικόνα 5.1 Στάδια analog-to-digital μετατροπής

§1. Δειγματοληψία

Δειγματοληψία (sampling): Είναι η διαδικασία μετατροπής ενός σήματος συνεχούς χρόνου σε σήμα διακριτού χρόνου, παίρνοντας δείγματα του σήματος συνεχούς χρόνου σε διακριτές χρονικές στιγμές. Έτσι, αν $x_a(t)$ είναι η είσοδος στο δειγματολήπτη, τότε η έξοδος αυτού είναι $x_a(nT) \equiv x(n)$, όπου T η περίοδος δειγματοληψίας.

Κβάντιση (quantisation): Πρόκειται για τη διαδικασία μετατροπής ενός σήματος διακριτού χρόνου αλλά συνεχών τιμών, σε σήμα διακριτού χρόνου και διακριτών τιμών (ψηφιακό). Το κάθε δείγμα του σήματος αντιπροσωπεύεται από μία τιμή η οποία επιλέγεται από ένα πεπερασμένο σύνολο πιθανών τιμών. Η διαφορά μεταξύ του αρχικού μη κβαντισμένου δείγματος $x(n)$ και της κβαντισμένης εξόδου $x_q(n)$ αποτελεί το λεγόμενο σφάλμα κβάντισης.

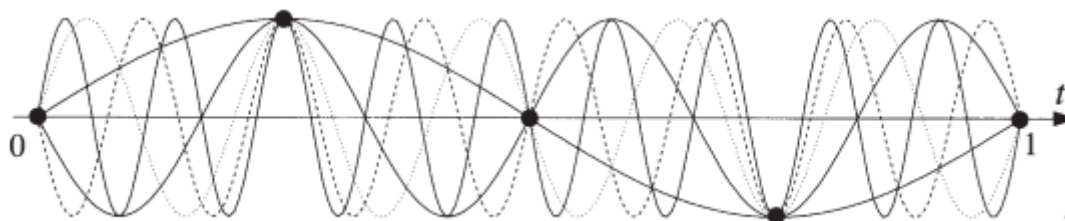
Κωδικοποίηση (coding): Κατά τη διαδικασία της κωδικοποίησης, κάθε διακριτή τιμή $x_q(n)$ αντιπροσωπεύεται από έναν αριθμό αποτελούμενο από bits.



Εικόνα 5.2 Δειγματοληψία και κβάντιση

§2. Θεώρημα Nyquist-Shannon

Σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist-Shannon η συχνότητα F_s , με την οποία λαμβάνονται τα δείγματα ενός σήματος, πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την υψηλότερη συχνότητα F_{\max} που περιέχεται στο σήμα, δηλαδή $F_s \geq 2F_{\max}$. Με άλλα λόγια, το θεώρημα δειγματοληψίας μας λέει πως για να μη χαθεί πληροφορία θα πρέπει να λαμβάνονται τουλάχιστον δύο δείγματα ανά περίοδο. Για παράδειγμα οι συχνότητες (F_k) 2,5 kHz, 5,5 kHz, 8,5 kHz, ..., 30,5 kHz, ... δεν ξεχωρίζουν από τη συχνότητα (F_0) 500Hz για συχνότητα δειγματοληψίας (F_s) ίση με 3 kHz



Εικόνα 5.3 Δειγματοληψία χαμηλής συχνότητας

Το φαινόμενο το οποίο παρατηρείται όταν δεν τηρείται η σχέση $F_s \geq 2F_{\max}$ ονομάζεται φαινόμενο χαμηλού ρυθμού δειγματοληψίας (aliasing), ή φαινόμενο φασματικής επικάλυψης (spectral overlap) και είναι γνωστό από τις κινηματογραφικές ταινίες, στις οποίες πολλές φορές παρατηρείται ότι οι τροχοί ενός αυτοκινήτου περιστρέφονται αντίθετα προς την κατεύθυνση κίνησης του.

§3. Μετασχηματισμός Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (DTFT, discrete-time Fourier transform) ενός σήματος διακριτού χρόνου $x(n)$ είναι η αναπαράσταση του σήματος αυτού, ως συνδυασμό μιγαδικών εκθετικών ακολουθιών της μορφής $\{e^{-j\omega n}\}$, όπου ω είναι μεταβλητή, γνωστή και ως (κυκλική) συχνότητα. Ο DTFT μίας ακολουθίας, εάν υπάρχει, είναι μοναδικός. Η αρχική ακολουθία μπορεί να υπολογιστεί, όταν μας δίνεται ο DTFT αυτής, με τη βοήθεια του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier διακριτού χρόνου. Ο DTFT $X(e^{j\omega})$ της ακολουθίας $x(n)$ ορίζεται ως

$$X(e^{j\omega}) \equiv F\{x(n)\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (6.3.1)$$

ενώ ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου ορίζεται ως

$$x(n) \equiv F^{-1}\{X(e^{j\omega})\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega})e^{j\omega n} d\omega \quad (6.3.2)$$

Οι σχέσεις αυτές αποτελούν το λεγόμενο ζεύγος μετασχηματισμών Fourier διακριτού χρόνου. Η σχέση (6.3.1) ονομάζεται και εξίσωση ανάλυσης, ενώ η (6.3.2) εξίσωση σύνθεσης. Μία ακολουθία λοιπόν μπορεί να εκφραστεί ως γραμμικός συνδυασμός μιγαδικών εκθετικών ακολουθιών. Η συνάρτηση $X(e^{j\omega})$ είναι μιγαδική και μπορεί να γραφεί ως

$$X(e^{j\omega}) = X_r(e^{j\omega}) + jX_i(e^{j\omega}) \quad (6.3.3)$$

όπου $X_r(e^{j\omega})$ και $X_i(e^{j\omega})$ είναι πραγματικές συναρτήσεις ως προς ω , και αποτελούν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της $X(e^{j\omega})$ αντίστοιχα. Σε πολικές συντεταγμένες η $X(e^{j\omega})$ γράφεται:

$$X(e^{j\omega}) = |X(e^{j\omega})|e^{j\theta(\omega)} \quad (6.3.4)$$

$$|X(e^{j\omega})| = \sqrt{X_r^2(e^{j\omega}) + X_i^2(e^{j\omega})} \quad (6.3.5)$$

$$\theta(\omega) \arg\{X(e^{j\omega})\} = \tan^{-1}\left[\frac{X_i(e^{j\omega})}{X_r(e^{j\omega})}\right] \quad (6.3.6)$$

Ο DTFT $X(e^{j\omega})$ της ακολουθίας $x(n)$ είναι μία συνεχής συνάρτηση του ω . Επιπλέον, είναι περιοδική ως προς ω με περίοδο ίση με 2π , δηλαδή:

$$X(e^{j(\omega+2\kappa\pi)}) = X(e^{j\omega}) \quad (6.3.7)$$

$$\begin{aligned} X(e^{j(\omega+2\kappa\pi)}) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{j(\omega+2\kappa\pi)n} = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n}e^{-j2\kappa n\pi} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n} = X(e^{j\omega}) \end{aligned} \quad (6.3.8)$$

Ο μετασχηματισμός Fourier λοιπόν ενός σήματος διακριτού χρόνου $x(n)$ είναι η συνεχής συνάρτηση $X(e^{j\omega})$. Η συνάρτηση αυτή δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί με τη χρήση ενός ψηφιακού επεξεργαστή σήματος, ο οποίος είναι συνήθως ένας γενικού σκοπού υπολογιστής ή ένα ειδικά σχεδιασμένο ψηφιακό κύκλωμα. Εκείνο που είναι εύκολο να υπολογιστεί, είναι τα δείγματα του φάσματος $X(e^{j\omega})$. Ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (DTFT) της πεπερασμένου μήκους N ακολουθίας $x(n)$, δηλαδή $x(n) = 0$ για $n < 0$ και $n \geq N$, ισούται με

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n}, 0 \leq \omega \leq 2\pi \quad (6.3.9)$$

όπου τα όρια του αθροίσματος αντικατοπτρίζουν το γεγονός ότι $x(n) = 0$ εκτός του διαστήματος $0 \leq n \leq N-1$. Εάν ληφθούν δείγματα της συνεχούς συνάρτησης $X(e^{j\omega})$ σε ισαπέχοντα διαστήματα σε συχνότητα $\omega_k = k\Delta\omega = k(2\pi/N)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, τότε θα προκύπτουν τα δείγματα:

$$X(k) \equiv X\left(\frac{2\pi k}{N}\right) = X(e^{j\omega})\Big|_{\omega=2\pi k/N} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6.3.10)$$

Αφού η $X(e^{j\omega})$ είναι περιοδική με περίοδο 2π , μόνο τα δείγματα της βασικής περιοχής συχνοτήτων είναι απαραίτητα. Επειδή τα δείγματα αυτά προκύπτουν από τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier $X(e^{j\omega})$ σε N ισαπέχουσες διακριτές συχνότητες, η σχέση (6.3.10) ονομάζεται διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT) της $x(n)$. Αποδεικνύεται ότι μπορεί να ανακατασκευαστεί η ακολουθία $x(n)$ από τα δείγματα $X(k)$ στη συχνότητα, με βάση τη σχέση:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kn/N}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6.3.11)$$

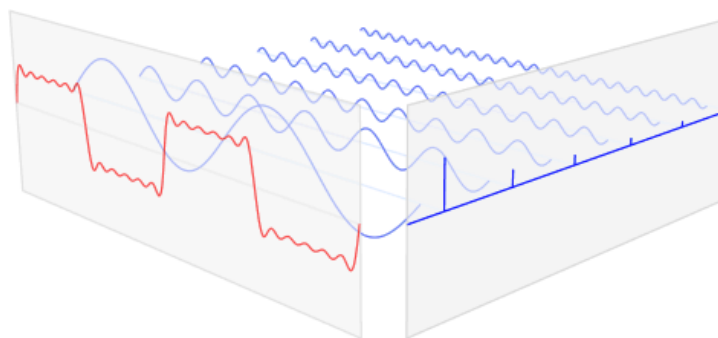
η οποία αποτελεί τον αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Fourier (inverse DFT, IDFT). Τόσο η ακολουθία $x(n)$, όσο και η ακολουθία $X(k)$ είναι του ίδιου μήκους N . Οι σχέσεις αυτές τελικά θα μπορούσαν να εκφραστούν συνοπτικά ως:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6.3.12)$$

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) W_N^{-nk}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6.3.13)$$

Όπου:

$$W_N = e^{-j2\pi/N} \quad (6.3.14)$$



Εικόνα 5.4 Μετασχηματισμός Fourier

§4. Aliasing

Η δειγματοληψία ενός σήματος $g(t)$ μπορεί να θεωρηθεί ως ο πολλαπλασιασμός του σήματος με μια σειρά από συναρτήσεις δέλτα, οι οποίες απέχουν συγκεκριμένη απόσταση T . Έτσι λαμβάνονται μόνο οι τιμές της $g(t)$ στα σημεία που η συνάρτηση δέλτα δεν ισούται με μηδέν. Προφανώς $f_s = 1/T$.

$$s(t) = g(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (6.4.1)$$

Με $g(t)$ να είναι το αρχικό συνεχές σήμα και $s(t)$ το τελικό. Στη συνέχεια από το μετασχηματισμό Fourier προκύπτει το φάσμα στο πεδίο της συχνότητας.

$$S(f) = F\{s(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (6.4.2)$$

Ο πολλαπλασιασμός στο πεδίο του χρόνου, αντιστοιχεί με συνέλιξη στο πεδίο της συχνότητας

$$S(f) = G(f) * F\left\{\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)\right\} \quad (6.4.3)$$

Όμως για το μετασχηματισμό της συνάρτησης δέλτα ισχύει:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{i2\pi \frac{n}{T} t} \quad (6.4.4)$$

$$\text{Με} \quad A_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) e^{i2\pi \frac{n}{T} t} dt \quad (6.4.5)$$

Τα όρια της ολοκλήρωσης της σχέσεως (6.4.5) αντιστοιχούν σε μια περίοδο. Ωστόσο, το ολοκλήρωμα μπορεί να αντικατασταθεί με ένα από μείον άπειρο έως άπειρο, και η περιοδική συνάρτηση των δέλτα συναρτήσεων μπορεί να αντικατασταθεί με μία μονό δέλτα συνάρτηση. Έτσι, η προηγούμενη εξίσωση ξαναγράφεται ως εξής:

$$A_n = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-i2\pi \frac{n}{T} t} dt = \frac{1}{T} F\{\delta(t)\} \Big|_{f=\frac{n}{T}} = \frac{1}{T} \quad (6.4.6)$$

Άρα

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{i2\pi \frac{n}{T} t} \quad (6.4.7)$$

Από τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier προκύπτει:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{i2\pi ft} df \quad (6.4.8)$$

$$F^{-1}\{\delta(f - f_0)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(f - f_0) e^{i2\pi ft} df = e^{i2\pi f_0 t} \quad (6.4.9)$$

Και τελικά:

$$e^{i2\pi \frac{n}{T} t} = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(f - \frac{n}{T}) e^{i2\pi ft} df \quad (6.4.10)$$

$$F\left\{\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)\right\} = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - \frac{n}{T}) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_{\text{sampling}}) \quad (6.4.11)$$

Επανερχόμενοι στο αρχικό σήμα:

$$S(f) = G(f) * \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_{\text{sampling}}) \quad (6.4.12)$$

Και δεδομένου ότι η συνέλιξη δύο σημάτων δίνεται από τη σχέση:

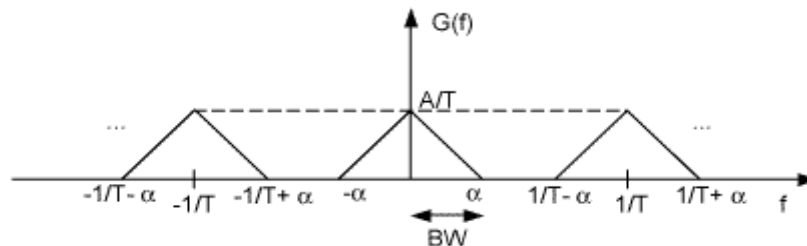
$$A(f) * B(f) = \int_{-\infty}^{\infty} A(f') B(f - f') df' = \int_{-\infty}^{\infty} B(f') A(f - f') df' \quad (6.4.13)$$

Προκύπτει:

$$S(f) = G(f) * \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_{\text{sampling}}) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f') \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - f' - nf_{\text{sampling}}) df' = \quad (6.4.14)$$

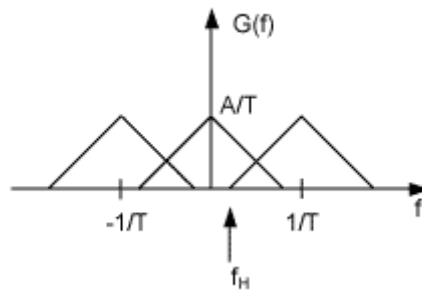
$$\frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(f') \delta(f - f' - nf_{\text{sampling}}) df' = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} G(f - nf_{\text{sampling}}) \quad (6.4.15)$$

Όπως προαναφέρθηκε το θεώρημα δειγματοληψίας επιβάλλει πως όταν η δειγματοληψία γίνεται στο πεδίο του χρόνου κάθε T , αντιγράφεται το φάσμα κάθε $1/T$ κύκλους ανά δευτερόλεπτο. Σχηματίζεται λοιπόν το παρακάτω διάγραμμα γνωστό και ως shark teeth.



Εικόνα 5.5 Φάσματα χωρίς aliasing

Θα πρέπει όμως τα παραπάνω «δόντια» να μην αλληλοεπικαλύπτονται σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist-Shanon, προκειμένου να μην χάνεται πληροφορία κατά τη δειγματοληψία. Το φαινόμενο κατά το οποίο συχνότητες υψηλές μπορεί να συγχέονται με συχνότητες χαμηλότερες ονομάζεται aliasing. Μία τέτοια κατάσταση φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 5.6 Φάσματα με aliasing

Παρατηρείται λοιπόν ότι η f_H , εμφανίζεται σε πολύ χαμηλότερη συχνότητα από ότι θα έπρεπε. Θα μπορούσε να ανακτηθεί ένα τέτοιο σήμα, χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο lowpass προκειμένου να απομονωθεί το πρώτο φάσμα, και να εξαλειφθούν τα υπόλοιπα. Όμως έτσι συντηρούνται οι επικαλύψεις και δεν εξαλείφεται η παραποίηση του σήματος. Το aliasing μπορεί να είναι τόσο ισχυρό που σε ορισμένες περιπτώσεις να καταστρέψει το σήμα.

§5. Upsampling και Downsampling

Έστω ένα απλό ημιτονοειδές σήμα $x(t) = A\cos(2\pi f_0 t + \phi)$ το οποίο δειγματοληπτείται με συχνότητα f_s (μεγαλύτερη της συχνότητας Nyquist). Δηλαδή $f_s > 2f_0$. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα $x[n] = A\cos(\frac{2\pi f_0}{f_s} n + \phi)$

Η διαδικασία του upsampling (π.χ. κατά παράγοντα 2) περιλαμβάνει την παρεμβολή μηδενικών δειγμάτων ανάμεσα στα υπάρχοντα δείγματα. Πιο συγκεκριμένα:

$x_{12}[n] = \frac{A}{2} \cos(\frac{2\pi f_0}{2f_s} n + \phi) + (-1)^n \frac{A}{2} \cos(\frac{2\pi f_0}{2f_s} n + \phi)$ (στην ουσία το $x_{12}[n]$ παίρνει την τιμή μηδέν όποτε το n είναι περιττό).

Επειδή όμως $\cos(\pi n) = (-1)^n$ η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$x_{12}[n] = \frac{A}{2} \cos(\frac{2\pi f_0}{2f_s} n + \phi) + \frac{A}{2} \cos(\pi n) \cos(\frac{2\pi f_0}{2f_s} n + \phi)$$

Και από τις τριγωνομετρικές ιδιότητες $\cos(\alpha)\cos(\beta) = \frac{1}{2}[\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$ και $\cos(\pi - \alpha) = \cos(\pi + \alpha)$ προκύπτει:

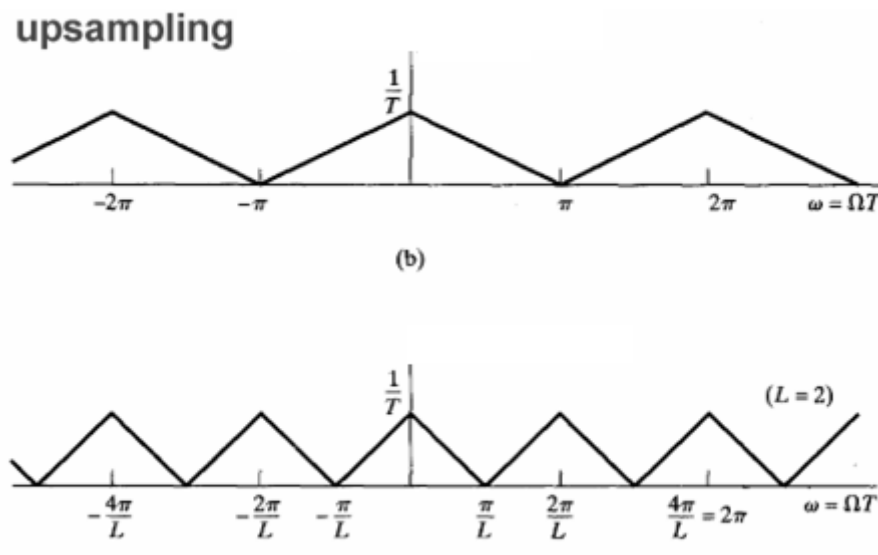
$$x_{12}[n] = \frac{A}{2} \cos(\frac{2\pi f_0}{2f_s} n + \phi) + \frac{A}{2} \cos(\pi n) \cos(\frac{2\pi(f_s - f_0)}{2f_s} n + \phi) \quad (6.5.1)$$

Αυτό είναι το σήμα πριν από την διελυσή του από το φίλτρο παρεμβολής και τώρα πλέον παρατηρούνται δύο κύματα. Σε γενικές γραμμές, αν γίνει upsampling κατά L παράγοντα τότε δημιουργούνται L ημιτονοειδή κύματα. Το κάθε ένα από αυτά σταθμίζεται κατά $1/L$ και αυτό εξασφαλίζει ότι το άθροισμα του πλάτους όλων των ημιτονοειδών κυμάτων θα έχει την ίδια τιμή με το πρωτότυπο ημιτονοειδές κύμα στα αρχικά δείγματα και μηδέν στα υπόλοιπα. Μετά την εφαρμογή του φίλτρου παρεμβολής, το αποτέλεσμα είναι το ίδιο που θα λαμβανόταν με δειγματοληψία εξ' αρχής υψηλότερη, αλλά αποκλιμακούμενο κατά $1/L$. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για downsampling προκύπτει:

$$x_{\downarrow 2}[n] = A \cos\left(\frac{4\pi f_0}{f_s} n + \phi\right) \quad (6.5.2)$$

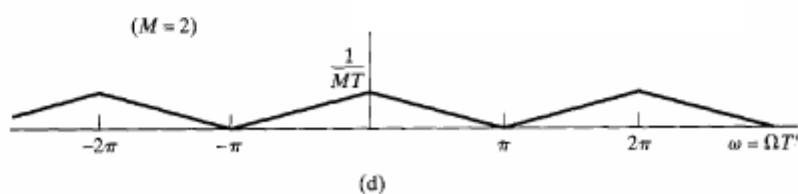
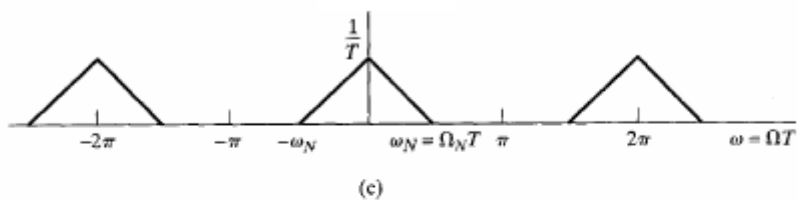
Αντίθετα με το upsampling, στο downsampling παραμένει ένα μόνο ημιτονοειδές και άρα το πλάτος δεν κλιμακώνεται ή αποκλιμακώνεται.

Γενικά στο downsampling παραλείπονται δείγματα, οπότε από ένα αρχικό σήμα N δειγμάτων προκύπτει ένα σήμα N / M , όπου M είναι ο συντελεστής μείωσης της δειγματοληψίας. Με FFT του συνολικού σήματος, φαίνεται και παρακάτω ότι η συνολική ενέργεια είναι χαμηλότερη, κάτι το οποίο είναι λογικό, καθώς παραλείπονται δείγματα. Ωστόσο, η μέση ενέργεια παραμένει σταθερή. Στο upsampling, προστίθενται μηδενικά μεταξύ των δειγμάτων, και έτσι η συνολική ενέργεια παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από το L . Ωστόσο, η μέση ενέργεια είναι χαμηλότερη σε αυτή την περίπτωση, καθώς έχουν προστεθεί δείγματα χωρίς ενέργεια (τα μηδενικά). Downsampling κατά μεγάλο συντελεστή M μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα aliasing.



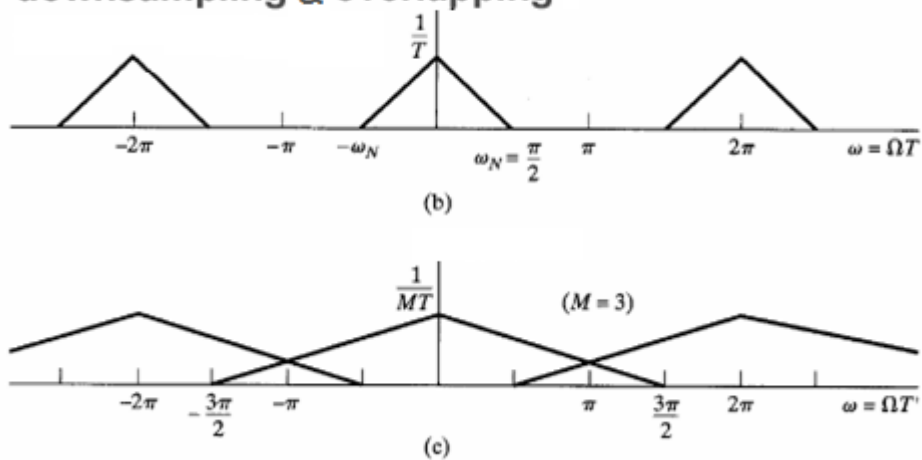
Εικόνα 5.7 Upsampling κατά παράγοντα L

downsampling



Εικόνα 5.8 Downsampling κατά παράγοντα $M=2$

downsampling & overlapping



Εικόνα 5.9 Περίπτωση aliasing (χάνεται πληροφορία)

§6. Συντελεστής SNR

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (συντομογραφία SNR ή S/N) είναι ένας συντελεστής που συγκρίνει το επίπεδο του επιθυμητού σήματος προς το επίπεδο του θορύβου. Ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος σήματος προς την ισχύ θορύβου και εκφράζεται σε ντεσιμπέλ. Μια αναλογία μεγαλύτερη από 1:1 (μεγαλύτερη από 0 dB) σημαίνει ισχυρότερο σήμα από θόρυβο. Ενώ το SNR είναι διαδεδομένο για ηλεκτρικά σήματα, μπορεί να εφαρμοστεί και σε οποιαδήποτε μορφή σήματος. Μεταξύ αυτών και σε ηχητικά σήματα όπως αυτά που λαμβάνει

ένα σόναρ. Ο λόγος είναι $SNR = \frac{P_s}{P_n}$ (6.6.1)

όπου P_s είναι η ισχύς του σήματος και P_n η ισχύς του θορύβου. Τόσο η ισχύς του σήματος όσο και αυτή του θορύβου μετρώνται στο ίδιο σύστημα. Όμως τα σήματα εκφράζονται συχνά με τη χρήση της λογαριθμικής κλίμακας ντεσιμπέλ, οπότε:

$$P_{s,dB} = 10\log_{10}(P_s) \quad (6.6.2) \quad \text{και} \quad P_{n,dB} = 10\log_{10}(P_n) \quad (6.6.3)$$

Αντίστοιχα:

$$SNR_{dB} = 10\log_{10}(SNR) \quad (6.6.4)$$

Δηλαδή $SNR_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{P_s}{P_n}\right) \quad (6.6.5)$

Αυτός ο συντελεστής θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια στο μέρος της προσομοίωσης ώστε να μπορεί να καθοριστεί το επίπεδο του σήματος έναντι του θορύβου. Από τον τύπο (6.6.5) και για λόγο $SNR=-20$ η ισχύς του θορύβου είναι εκατό φορές μεγαλύτερη από αυτή του σήματος. Και αποδεικνύεται ως εξής:

$$SNR_{dB} = 10\log_{10}(SNR) = 10\log_{10}\left(\frac{P_S}{P_N}\right) \quad (6.6.6)$$

$$20 = 10\log_{10}\left(\frac{P_S}{P_N}\right) \quad (6.6.7)$$

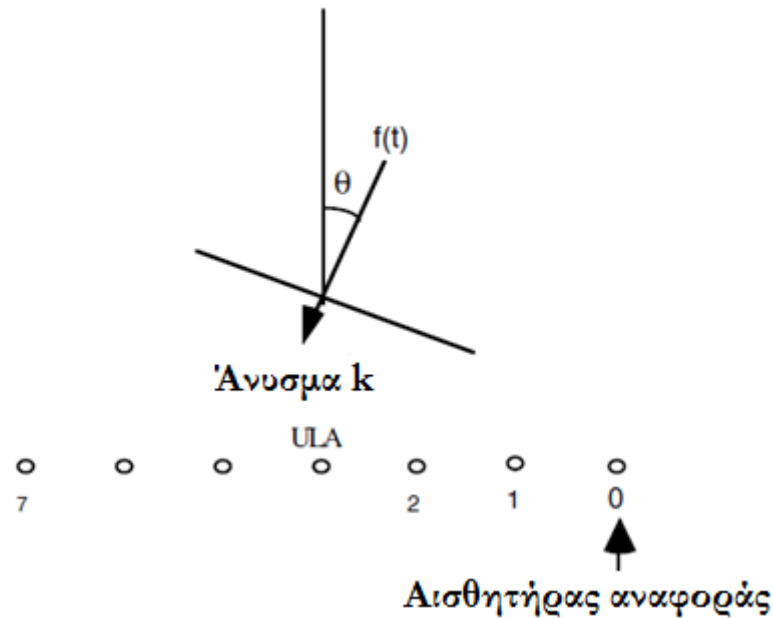
$$10^2 = \frac{P_S}{P_N} \quad (6.6.8)$$

$$P_S = 100P_N \quad (6.6.9)$$

§7. Εκτίμηση θέσης στόχου-Beamforming

Έστω ένα επίπεδο μέτωπο κύματος (far field), με κυματομορφή $f(t)$, το οποίο προσπίπτει υπό γωνία θ σε μια συστοιχία (ULA) με M αισθητήρες, οι οποίοι βρίσκονται σε απόσταση d μεταξύ τους. Στην επεξεργασία σήματος η γωνία πρόσπτωσης είναι γνωστή και ως κατεύθυνση άφιξης (DOA). Η DOA μετριέται πάντα σε σχέση με τη συστοιχία, ενώ το αζιμούθιο μετριέται σε σχέση με τον άξονα x , ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό της συστοιχίας. Για να ξεχωρίζουν αυτά τα δύο, το αζιμούθιο συμβολίζεται με ϕ . Υποθέτοντας ότι $f_m(t)$ με $m=0,1,2,\dots,M-1$ είναι η λαμβανόμενη έξοδος από τους αισθητήρες και εφ' όσον το σήμα προσπίπτει στη συστοιχία υπο γωνία, οι έξοδοι των αισθητήρων θα παρουσιάζουν χρονική καθυστέρηση. Στην ουσία η έξοδος του πρώτου αισθητήρα θα είναι $f_0(t) = f(t)$, η έξοδος του δεύτερου αισθητήρα θα είναι $f_1(t) = f(t - \Delta t)$ κτλ. Γενικότερα η έξοδος του m -ιστού αισθητήρα θα είναι $f_m(t) = f(t - m\Delta t)$. Η έξοδος των αισθητήρων στο πεδίο της συχνότητας αναπαριστάται ως εξής:

$$f_m(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dF(\omega) e^{j\omega(t - m\frac{d}{c} \sin \theta)} \quad (6.7.1)$$



Εικόνα 5.10 Μέτωπο κύματος προσπίπτει σε συστοιχία υπό γωνία θ

Η απλούστερη μορφή επεξεργασίας των σημάτων είναι η άθροιση χωρίς χρονική καθυστέρηση:

$$g(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dF(\omega) H(\omega\tau) e^{j\omega t} \quad (6.7.2)$$

όπου $H(\omega\tau)$ είναι η συνάρτηση απόκρισης της συστοιχίας, η οποία δίνεται από τη σχέση:

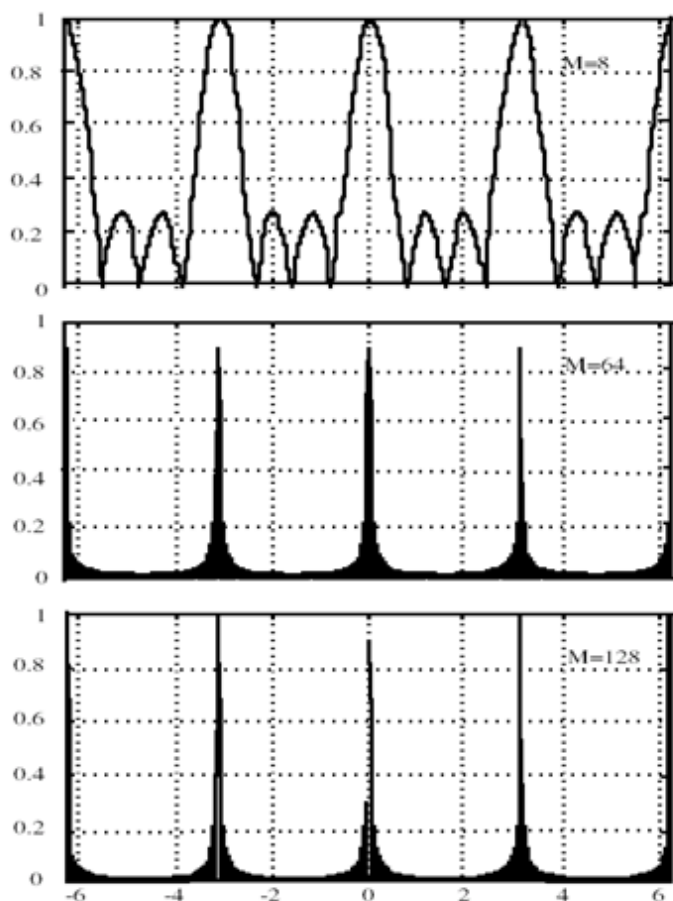
$$H(\omega\tau) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j\omega m \frac{d}{c} \sin \theta} \Rightarrow H(\omega\tau) = \frac{\sin(M \frac{\omega\tau}{2})}{M \sin(\frac{\omega\tau}{2})} e^{j \frac{M-1}{2} \omega \frac{d}{c} \sin \theta} \quad (6.7.3)$$

Στην περίπτωση που κάθε αισθητήρας για λόγους σκίασης των δευτερευόντων λοβών αποκτά κάποιο βάρος α_m με $m=0,1,2,\dots,M-1$ η συνάρτηση γίνεται:

$$H(\omega\tau) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} a_m e^{j\omega m \frac{d}{c} \sin \theta} \quad (6.7.4)$$

Μερικά παραδείγματα της συνάρτησης απόκρισης για διάφορα μεγέθη συστοιχιών φαίνονται στην εικόνα 5.11. Η σχέση (6.7.4) είναι περιοδική συνάρτηση με περίοδο 2π . Το μέγιστο εντοπίζεται για $\omega\tau = 2n\pi$, με το n να είναι ακέραιος και το $\tau = \frac{d}{c} \sin \theta$. Το μέγιστο στο $n=0$ είναι γνωστό ως κύριος λοβός ενώ τα υπόλοιπα στα $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ είναι γνωστά ως δευτερεύοντες λοβοί. Εάν αποτυπωθεί η απόλυτη τιμή του πλάτους, η περίοδος γίνεται π . Οι δευτερεύοντες λοβοί μπορούν να παραληφθούν εάν περιοριστεί το εύρος του $\omega\tau$ σε $\pm\pi$, και για συγκεκριμένη συχνότητα η DOA θα ικανοποιεί τη σχέση $\frac{d}{\lambda} \sin \theta \leq \frac{1}{2}$. Για θ μεταξύ του εύρους $\pi/2$ θα πρέπει η απόσταση των υδροφώνων να μην ξεπερνά το μισό του μήκους κύματος της υπό ανίχνευσης συχνότητας. Μειώνοντας το εύρος της θ πχ $-\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$, αυξάνεται η επιτρεπόμενη απόσταση που μπορούν να έχουν τα υδρόφωνα, δηλαδή $\frac{d}{\lambda} \leq \frac{\sqrt{2}}{2}$. Όλα τα παραπάνω βέβαια ισχύουν για ομοιόμορφη συστοιχία δηλαδή για ομοιόμορφη κατανομή αισθητήρων. Η απόκριση των αισθητήρων είναι συνάρτηση του $\omega \frac{d}{c} \sin \theta$. Αν δύο ημιτονοειδή σήματα διαφορετικής συχνότητας π.χ. ω_1, ω_2 και διαφορετικής γωνίας προσπτώσεως π.χ. θ_1, θ_2 φτάσουν στη συστοιχία ενδέχεται να παράξουν την ίδια απόκριση αν $\omega_1 \sin \theta_1 = \omega_2 \sin \theta_2$. Η συνάρτηση απόκρισης έχει έναν κύριο λοβό, γύρω από τον οποίο αναπτύσσονται δευτερεύοντες λοβοί, μειούμενου πλάτους. Ο πρώτος μηδενισμός εμφανίζεται για $\theta_{zero} = \sin^{-1}(\frac{\lambda}{Md})$ όπου για μεγάλο M , γίνεται αντιστρόφως ανάλογος του μήκους της συστοιχίας.

Στην επόμενη εικόνα παρατηρείται ότι ο πρώτος πλευρικός λοβός βρίσκεται 13.5 dB χαμηλότερα από τον κύριο λοβό. Τόσο το πλάτος όσο και το εύρος των λοβών μπορεί να μεταβληθεί με κατάλληλες συναρτήσεις βάρους. (Prabhakar S. Naidu)



Εικόνα 5.11 Μεγαλύτερος αριθμός υδροφώνων σημαίνει συνεπάγεται στενότεροι λοβοί

Η μέγιστη απόκριση του συστήματος επιτυγχάνεται όταν η DOA είναι $\theta=0$. Υπάρχει όμως η δυνατότητα η μέγιστη απόκριση να επιτευχθεί και σε άλλες γωνίες εάν προστεθεί ένας παράγοντας χρονικής καθυστέρησης μεταξύ των αισθητήρων. Πρόκειται για μία όχι μηχανική

αλλά μαθηματική στρέψη της συστοιχίας. Έστω ότι υπεισέρχεται μια χρονική καθυστέρηση τ_o σε κάθε αισθητήριο. Το άθροισμα των εξόδων πλέον θα δίνεται από:

$$g(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(t + m\tau_o) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dF(\omega) H \left(\omega \left(\tau - \frac{d}{c} \sin \theta_o \right) \right) e^{j\omega t} \quad (6.7.5)$$

Το μέγιστο εμφανίζεται για $\theta = \theta_o$ και μπορεί να θεωρηθεί ότι η συστοιχία έχει στραφεί κατά τη διεύθυνση θ_o . Τώρα πλέον η απόκριση της συστοιχίας είναι συνάρτηση της DOA. Επιπλέον το εύρος του κύριου λοβού αυξάνεται καθώς αυξάνεται η DOA. Για να γίνει κατανοητό αυτό βοηθά η απόκριση του συστήματος κοντά στο μέγιστο $\tau_o = \frac{d}{c} \sin \theta_o$. Ο πρώτος μηδενισμός θα συμβεί σε μια γωνία διαφορετική από τη θ_o και σε απόσταση $\Delta\theta = \theta_o - \sin^{-1}(\sin \theta_o - \frac{\lambda}{Md})$ από αυτή. Συμπερασματικά, η διεύθυνση του κύριου λοβού οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς η γωνία αυξάνεται, η προβολή της απόστασης των αισθητήρων πάνω στην ευθεία του μετώπου μειώνεται. Η απόκριση μεγιστοποιείται για $\frac{d}{\lambda}(\sin \theta_o - \sin \theta) = n$, με n ακέραιο. Στην περίπτωση όπου $\frac{d}{\lambda} \leq \frac{1}{2}$ η λύση είναι μία και $\theta = \theta_o$. Για $\frac{d}{\lambda} > \frac{1}{2}$, η προηγούμενη σχέση δίνει περισσότερες λύσεις. Μία για τον κύριο λοβό και οι υπόλοιπες για τους δευτερεύοντες. Για παράδειγμα αν $\frac{d}{\lambda} = 1$ (δηλαδή η απόσταση των αισθητήρων είναι ίση με το μήκος κύματος), θα υπάρχουν λύσεις για $n=0$ και $n=\pm 1$ (Richard G Lyons. Understanding digital signal processing).

§8. Φαινόμενο Doppler

Όταν μια ηχητική πηγή κινείται ως προς ένα παρατηρητή η συχνότητα που παρατηρείται εμφανίζεται μετατοπισμένη. Η μετατόπιση αυτή εξαρτάται από τις ταχύτητες τόσο του κύματος εντός του μέσου διάδοσης όσο και από τις σχετικές ταχύτητες της πηγής και του στόχου. Πιο συγκεκριμένα:

$$f_0 = f_s \frac{c \pm V_0}{c \mp V_s} \quad (6.8.1)$$

Όπου f_s είναι η εκπεμπόμενη συχνότητα, f_0 είναι η ληφθείσα συχνότητα, c είναι η ταχύτητα του ήχου στο νερό, V_0 η ταχύτητα του παρατηρητή και V_s η ταχύτητα της πηγής. Τα πρόσημα στη σχέση (6.7.1) καθορίζονται από τη σχετική ταχύτητα της πηγής και του δέκτη. Ενδεικτικά στην εικόνα 5.12, για κάθε κόμβο παρατηρείται μια μετατόπιση της εκπεμπομένης συχνότητας κατά Δf .



Εικόνα 5.12 Φαινόμενο Doppler σε γραμμικό φάσμα απορρόφησης

§9. Είδη παραθύρων

Το φαινόμενο διαρροής συχνοτήτων οφείλεται στο γεγονός ότι για να χρησιμοποιηθεί ο DFT για τη φασματική ανάλυση ενός σήματος, πρέπει να περιοριστεί το μήκος δείγματος N του σήματος σε κάποια πεπερασμένη τιμή. Δηλαδή η ανάλυση διεξάγεται σε ένα τμήμα του σήματος το οποίο έχει αποκοπεί από το αρχικό σήμα. Η απότομη αυτή διακοπή του σήματος δημιουργεί διαρροή συχνοτήτων η οποία διορθώνεται μερικώς με κατάλληλη επιλογή συνάρτησης παραθύρου (window function). Σε απάντηση του ερωτήματος αυτού και στην προσπάθεια να παραμείνει το φάσμα συχνότητας $x(\omega)$ όσο γίνεται αναλλοίωτο, έχουν δημοσιευτεί πολλές συναρτήσεις παραθύρου. Οι πιο γνωστές από αυτές είναι:

Τετραγωνικό παράθυρο

$$\bar{\omega}_n = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq L-1 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

Παράθυρο Bartlett (τριγωνικό)

$$\bar{\omega}_n = 1 - \frac{|n-N|}{N+1}, \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad \text{όταν } L = 2N+1 \quad (6.9.1)$$

$$\bar{\omega}_n = 1 - \frac{|n-N+0,5|}{N+1}, \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad \text{όταν } L = 2N \quad (6.9.2)$$

Παράθυρο Hanning

$$\bar{\omega}_n = 0,5(1 + \cos \frac{2\pi(n-N)}{L}), \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad \text{όταν } L = 2N+1 \quad (6.9.3)$$

$$\bar{\omega}_n = 0,5(1 + \cos \frac{2\pi(n-N+0,5)}{L}), \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad \text{όταν } L = 2N \quad (6.9.4)$$

Παράθυρο Hamming

$$\bar{\omega}_n = 0,54 + 0,46 \cos \frac{2\pi(n-N)}{L}, \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad \text{όταν } L = 2N+1 \quad (6.9.5)$$

$$\bar{\omega}_n = 0,42 + 0,5 \cos \frac{2\pi(n-N+0,5)}{L} + 0,08 \cos \frac{4\pi(n-N+0,5)}{L}, \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad \text{όταν } L = 2N \quad (6.9.6)$$

Παράθυρο Kaiser

$$\bar{\omega}_n = \frac{I_0(\beta \sqrt{1 - (\frac{n-N}{N})^2})}{I_0(\beta)}, \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad \text{όταν } L = 2N+1 \quad (6.9.7)$$

$$\bar{\omega}_n = \frac{I_0(\beta \sqrt{1 - (\frac{n-N+0,5}{N})^2})}{I_0(\beta)}, \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad \text{όταν } L = 2N \quad (6.9.8)$$

$$I_0(x) = 1 + \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{x^k}{2^k k!} \right]^2 \quad (6.9.9)$$

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται η διαμόρφωση του κύριου και των δευτερευόντων λοβών μετά την εφαρμογή ορισμένων παραθύρων

Παράθυρο	Πλάτος δευτ. Λοβού (dB)	Εύρος κύριου λοβού
Τετραγωνικό	-13	$4\pi/L$
Bartlett	-25	$8\pi/L$
Hanning	-31	$8\pi/L$
Hamming	-41	$8\pi/L$

§10. Σύνοψη κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές και τα θεωρήματα κατά την επεξεργασία ενός σήματος όχι απαραίτητα ηχητικού. Οι ίδιες αρχές διέπουν και την επεξεργασία ηλεκτρομαγνητικών σημάτων αλλά και άλλων. Όλη αυτή η πληθώρα μαθηματικών εργαλείων είναι χρήσιμη για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος ανίχνευσης και ταυτοποίησης στόχων. Είναι απαραίτητα εργαλεία για την καταπίεση του θορύβου, ο οποίος υπό άλλες συνθήκες δεν θα επέτρεπε στο σήμα να αναδυθεί και είναι τεχνικές που εφαρμόστηκαν τόσο στην προσομοίωση που ακολουθεί όσο και στην επεξεργασία των πραγματικών δεδομένων, στη συνέχεια. Παρουσιάστηκε το θεώρημα Nyquist-Shannon και το φαινόμενο του aliasing που μπορεί να προκύψει αν η συχνότητα δειγματοληψίας δεν είναι ικανοποιητική, ο μετασχηματισμός Fourier καθώς και τα εργαλεία downsampling και upsampling. Τέλος παρουσιάστηκαν τα βασικότερα παράθυρα που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία σήματος, το φαινόμενο Doppler και η μέθοδος DOA με την οποία εκτιμάται η γωνία άφιξης του σήματος από το στοχο.

6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Προσομοίωση από συστοιχία υδροφώνων

Η τεχνική της προσομοίωσης αφορά τη δημιουργία ενός εικονικού περιβάλλοντος πειραματισμού ή ενός μοντέλου εργασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε οι εκπαιδευόμενοι να δουλέψουν σε ψηφιακό περιβάλλον με συνθήκες όσο πιο κοντά γίνεται στις πραγματικές. Η τεχνική της προσομοίωσης χρησιμοποιείται για να βοηθήσει τους ερευνητές να πειραματιστούν με σενάρια που δεν θα ήταν εύκολο να διεξαχθούν στην πραγματικότητα. Μέσω του ειδικού εικονικού περιβάλλοντος, μπορούν να γίνουν πειράματα και να ελεγχθούν υποθέσεις. Η καταλληλότητα του λογισμικού συνδέεται κυρίως με την ευκολία του να δημιουργεί ο χρήστης νέες καταστάσεις προσομοίωσης, στην καταλληλότητα των μεταβλητών που παρέχονται για χειρισμό, καθώς και στις πολλαπλές αναπαραστάσεις που οπτικοποιούν τα δεδομένα του υπό προσομοίωση φαινομένου. Γενικά τα περισσότερα συστήματα προσομοίωσης φαινομένων εντάσσονται σε μαθήματα που άπτονται των φυσικών επιστημών.



Εικόνα 6.1 Δημιουργία εικονικού περιβάλλοντος και προσομοίωση της πραγματικότητας

§1. Απαιτήσεις Προσομοίωσης

Η προσομοίωση θα πρέπει να πληρεί ορισμένες προδιαγραφές, προκειμένου να έχει την ευελιξία που απαιτείται ώστε να εξυπηρετεί το χρήστη. Θα πρέπει ο αριθμός των στόχων προς ανίχνευση να είναι μεταβλητός και καθοριζόμενος από τον ερευνητή. Αυτό είναι απαραίτητο καθώς σε πραγματικές συνθήκες σπάνια ο στόχος θα είναι ένας. Ο αριθμός των υδροφώνων είναι επίσης μια παράμετρος που θα πρέπει να μεταβάλλεται, καθώς θα δίνεται έτσι η δυνατότητα στον ερευνητή να προσομοιώσει μεγάλες συστοιχίες π.χ. 32 υδροφώνων αλλά και μικρές π.χ. 2 ή 3 υδροφώνων με τους αντίστοιχους βέβαια περιορισμούς στην απόδοση των μικρών συστοιχιών. Επιπλέον η απόσταση μεταξύ των υδροφώνων είναι μια παράμετρος καθοριζόμενη από τον ερευνητή, καθώς επίσης και ο αριθμός των εκπεμπόμενων από τους στόχους συχνοτήτων. Οι θέσεις των στόχων καθώς και η κατανομή της φασματικής πυκνότητας ακουστικής ισχύος αυτών θα πρέπει να έχουν τυχαίο χαρακτήρα, όπως ακριβώς συμβαίνει και στις πραγματικές συνθήκες, έτσι ώστε να ελέγχεται κάθε φορά η δυνατότητα του προγράμματος να εξάγει με ορθότητα τις ζητούμενες πληροφορίες. Ένα από τα πιο καίρια σημεία του αλγορίθμου της προσομοίωσης είναι να παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) προκειμένου να μπορούν να προσομοιωθούν εξαιρετικά θορυβώδη περιβάλλοντα που είναι και τα πιο απαιτητικά. Για κάθε στόχο γίνεται μια σύγκριση του αρχικά λαμβανόμενου σήματος με το επεξεργασμένο, προκειμένου να φανεί κατά πόσο ο αλγόριθμος απέδωσε σωστά. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει ο τυχαίος θόρυβος που πηγάζει από διάφορες διευθύνσεις να καταπιεστεί ικανοποιητικά και να αποκαλυφθούν έτσι, ενδιαφέρουσες συχνότητες του στόχου, οι οποίες πηγάζουν από πολύ συγκεκριμένη διεύθυνση.

§2. Ανάλυση Προσομοίωσης

Σε αυτή την παράγραφο θα αναπτυχθεί η μαθηματική ανάλυση του αλγορίθμου προσομοίωσης. Στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε, προσομοιάζονται K διαφορετικά επίπεδα ακουστικά κύματα από K διαφορετικές διευθύνσεις που προσπίπτουν σε μια γραμμική συστοιχία M υδροφώνων –που ισαπέχουν απόσταση d μεταξύ τους– με γωνίες πρόσπτωσης θ_k ($1 \leq k \leq K$). Επισημαίνεται ότι τα K διαφορετικά επίπεδα ακουστικά κύματα αντιστοιχούν σε K διαφορετικές τυχαίες ακουστικές υπογραφές $s_k(t)$. Το m -ιοστό υδρόφωνο λαμβάνει ένα σήμα $f_m(t)$ που είναι αλγεβρικό άθροισμα των K διαφορετικών ακουστικών σημάτων $s_{m,k}(t)$ και του θορύβου περιβάλλοντος $e_m(t)$. Τα παραπάνω σήματα είναι συνεχούς χρόνου. Σε διακριτό χρόνο n τα εν λόγω σήματα γράφονται και συνδέονται ως εξής:

$$f_m(n) = \sum_{k=1}^K g_{m,k}(n) + e_m(n).$$

Έκαστο υδρόφωνο λαμβάνει το σήμα $f_m(t)$ χρησιμοποιώντας συχνότητα δειγματοληψίας f_{sam} .

Αρχικά, ο αλγόριθμος υπολογίζει ευρυζωνικά (broadband) την ισχύ που λαμβάνει η συστοιχία από διάφορες γωνίες πρόσπτωσης (από -60° έως 60°). Αυτό επιτυγχάνεται με την ηλεκτρονική περιστροφή δέσμης σε έκαστη γωνία πρόσπτωσης και την εν συνεχεία εξαγωγή της ισχύος $P(\theta_i)$ του προκύπτοντος σήματος. Αυτή η μεταβλητή υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$P(\theta_i) = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(n + m\tau_i) \right)^2 = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(n + m \frac{d}{c} \sin \theta_i) \right)^2, \quad -60^\circ \leq \theta_i \leq 60^\circ \quad (7.2.1)$$

Εξετάζοντας την προκύπτουσα ισχύ $P(\theta_i)$ συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης θ_i , εξάγονται οι τιμές των γωνιών πρόσπτωσης στις οποίες μεγιστοποιείται η λαμβανόμενη από την συστοιχία ισχύς. Αυτές οι γωνίες, όπως είναι αναμενόμενο, θα είναι οι αριθμητικές εκτιμήσεις των γωνιών πρόσπτωσης που αντιστοιχούν στα K επίπεδα ακουστικά κύματα ($\hat{\theta}_k$).

Εν συνεχεία, ο αλγόριθμος περιστρέφει ηλεκτρονικά τον κύριο λοβό στις διευθύνσεις της μέγιστης ισχύος $\hat{\theta}_k$, υπολογίζοντας τις αντίστοιχες αριθμητικές εκτιμήσεις των ακουστικών υπογραφών $z_k(n)$. Επισημαίνεται ότι λόγω της εστίασης του κυρίου λοβού στην εκάστοτε DOA, λαμβάνεται και ενισχύεται το ακουστικό σήμα (υπογραφή) που λαμβάνεται από την συγκεκριμένη κατεύθυνση, συμπιέζοντας ταυτόχρονα τα λοιπά ακουστικά επίπεδα κύματα που αντιστοιχούν στις λοιπές ακουστικές υπογραφές, καθώς και τον θόρυβο περιβάλλοντος.

Εν συνεχεία, ο αλγόριθμος υπολογίζει τον μετασχηματισμό FOURIER των εξαγόμενων σημάτων $\hat{z}_k(n)$. Τα προκύπτοντα σήματα $\hat{Z}_k(f)$, με την κατάλληλη επεξεργασία απεικονίζουν την πυκνότητα φασματικής ισχύος των ληφθέντων ακουστικών σημάτων $\hat{z}_k(n)$ στο εύρος συχνοτήτων $-f_{sam}/2 \leq f \leq f_{sam}/2$. Η πυκνότητα φασματικής ισχύος είναι εξαιρετικά χρήσιμη όπως προαναφέρθηκε, καθόσον καθίσταται δυνατή η αναγνώριση των πλοίων/υποβρυχίων χρησιμοποιώντας τυχόν υφιστάμενες βιβλιοθήκες ακουστικών υπογραφών.

Συχνά, το απαραίτητο εύρος συχνοτήτων στο πλαίσιο της αναγνώρισης στόχων με χρήσης υφιστάμενων βιβλιοθηκών είναι κατά πολύ μικρότερο από αυτό που προκύπτει από την προαναφερθείσα διαδικασία. Σε αυτή την περίπτωση είναι χρήσιμη η εισαγωγή της διαδικασίας του downsampling. Η εν λόγω διαδικασία υλοποιείται στον αλγόριθμο της προσομοίωσης. Εάν, επί παραδείγματι, είναι επιθυμητή η υποβάθμιση της συχνότητας δειγματοληψίας κατά ένα συντελεστή L , κατ' αρχήν υπολογίζονται μέσω του αλγορίθμου τα

επεξεργασμένα ακουστικά σήματα $\hat{s}_k(n)$ (με υποτιμημένη συχνότητα δειγματοληψίας f_{sam}/L) ως εξής:

$$\hat{s}_k(n) = \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{z}_k(L^*n + l) \right) \quad (7.2.2)$$

Τελικά, ο αλγόριθμος υπολογίζει εις νέου τον μετασχηματισμό FOURIER των εξαγόμενων σημάτων $\hat{s}_k(n)$. Τα προκύπτοντα σήματα $\hat{S}_k(f)$, με την κατάλληλη επεξεργασία και με overlapping απεικονίζουν την πυκνότητα φασματικής ισχύος των ληφθέντων ακουστικών σημάτων $\hat{s}_k(n)$ στο νέο εύρος συχνοτήτων $-f_{sam}/2L \leq f \leq f_{sam}/2L$. Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται προς εφαρμογή overlapping και τελικά η νέα πυκνότητα φασματικής ισχύος που προκύπτει, απεικονίζεται μόνο στο απαραίτητο εύρος συχνοτήτων στο πλαίσιο της αναγνώρισης στόχων με χρήση υφιστάμενων βιβλιοθηκών ενώ παράλληλα έχει ακόμη πιο συμπιεσμένο τον θόρυβο του περιβάλλοντος σε σχέση με προηγουμένως.



Εικόνα 6.2 <http://www.naval-technology.com>

§3. Αποτελέσματα με μικρό θόρυβο

Σε αυτή την προσομοίωση δημιουργήθηκαν τρεις στόχοι, οι οποίοι παράγουν ήχους σε 12 τυχαίες συχνότητες ο κάθε ένας. Το πλάτος των εκπεμπόμενων συχνοτήτων είναι επίσης τυχαίο καθώς και η θέση τους στο χώρο. Πρόκειται λοιπόν για άκρως ρεαλιστική προσομοίωση εκπεμπόμενου θορύβου από στόχο. Το σήμα αυτό αναμειγνύεται με τον υποθαλάσσιο θόρυβο και έτσι το τελικό αποτέλεσμα αναπαριστά πλήρως τη λήψη από ένα υδρόφωνο σε πραγματικές συνθήκες. Η συστοιχία υποτίθεται ότι διαθέτει 32 υδρόφωνα διατεταγμένα ανά μέτρο. Η συχνότητα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 80000Hz και η καταγραφή διήρκησε 10 δευτερόλεπτα. Η γωνία σάρωσης του beamforming γίνεται σε εύρος 120 μοιρών και ο λόγος SNR ορίζεται να είναι 10. Συνοπτικά:

Αριθμός υδροφώνων 32

Απόσταση υδροφώνων 1m

Συχνότητα δειγματοληψίας 80000Hz

Χρονική διάρκεια καταγραφής 10sec

Αριθμός στόχων 3

Συχνότητες που εκπέμπει κάθε στόχος 12

Γωνία σάρωσης 60 μοίρες

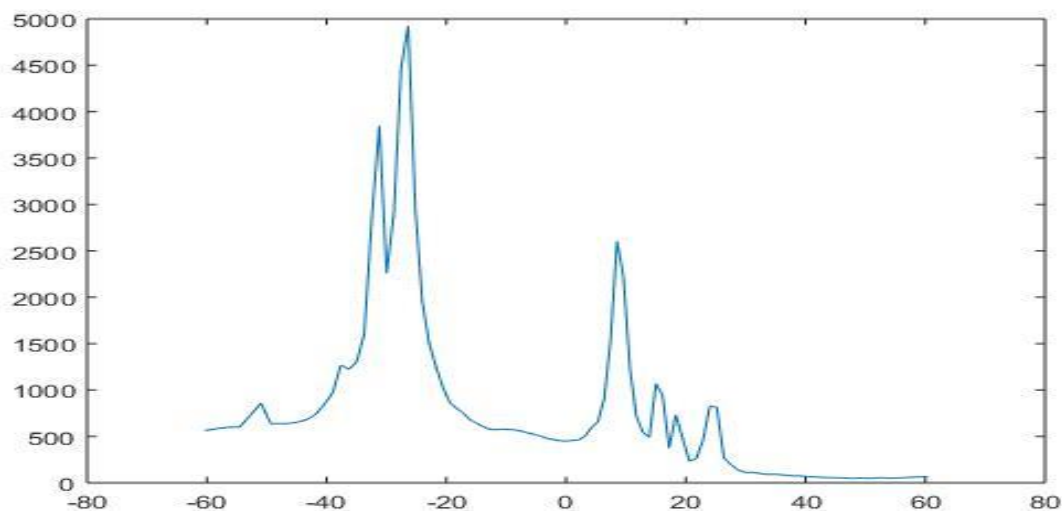
SNR = 10

Η προσομοίωση λοιπόν δημιουργεί τεχνητά το σήμα και το αναμειγνύει με το θόρυβο.

Πιο συγκεκριμένα $f_m(n) = \sum_{k=1}^K g_{m,k}(n) + e_m(n)$ με το K να είναι 3 και το m να είναι 32. Το πρώτο μέρος της σχέσης αντιστοιχεί στο άθροισμα του σήματος των τριών στόχων και το δεύτερο είναι το $e(n)$ που αντιστοιχεί στο θόρυβο που εισέρχεται στην καταγραφή του κάθε υδροφώνου m . Ο θόρυβος αυτός δεν είναι λευκός αλλά ακολουθεί την κατανομή της εικόνας 3.2. Στη συνέχεια με τη σχέση:

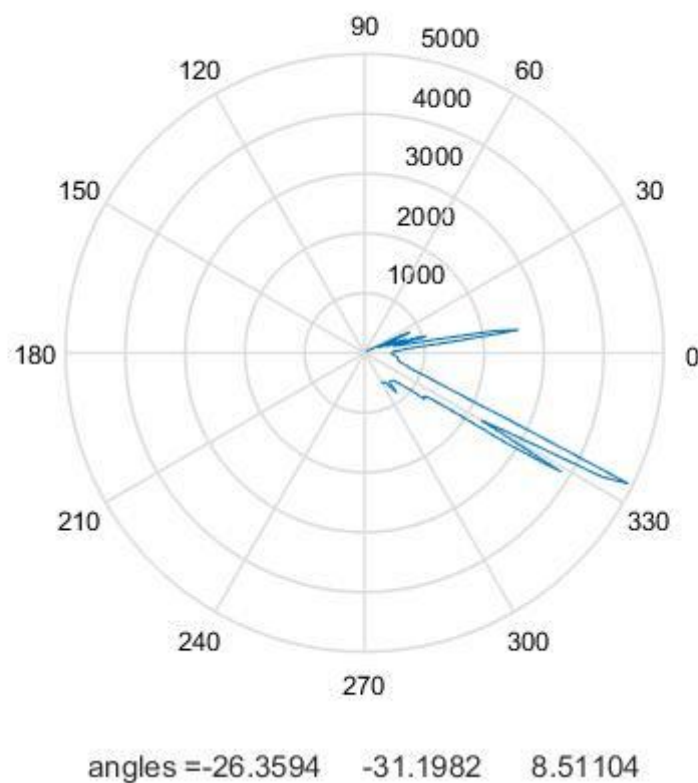
$$P(\theta_i) = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(n + m\tau_i) \right)^2 = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(n + m \frac{d}{c} \sin \theta_i) \right)^2, \quad -60^\circ \leq \theta_i \leq 60^\circ$$

υπολογίζεται η ισχύς ως συνάρτηση της γωνίας. Επειδή ένα σήμα ενδιαφέροντος προέρχεται από μία κατεύθυνση ενώ ο θόρυβος είναι ισοτροπικός, είναι αναμενόμενο να παρουσιάζονται τοπικά μέγιστα στην κατεύθυνση των στόχων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα επόμενα δύο διαγράμματα:



Εικόνα 6.3 DOA με χαμηλό θόρυβο

Και σε πολικό διάγραμμα:



Εικόνα 6.4 DOA με χαμηλό θόρυβο (πολικό διάγραμμα)

Παρουσιάζονται τρεις γωνίες στις -26° , στις -31° και στις 8.5° . Τα οποία αντιστοιχούν σε -0.45 , -0.54 και 0.15 rad. Εκεί η λαμβανόμενη ενέργεια παρουσιάζει υψηλή ισχύ και προδίδεται έτσι η ύπαρξη πηγής, σε κάθε μία από αυτές.

Το πρώτο μέγιστο θα έχει συνολική ισχύ:

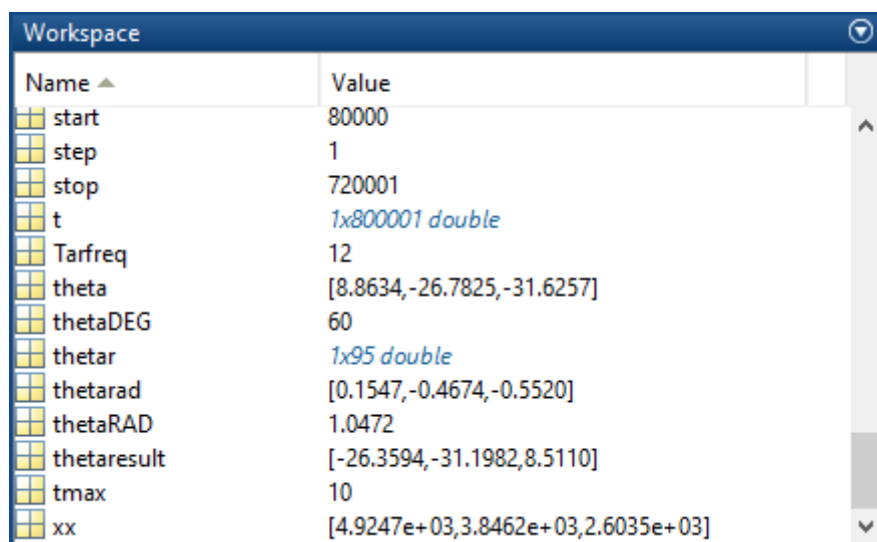
$$P(-0,45) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{-0,45}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(-0,45)) \right)^2$$

Αντίστοιχα το δεύτερο και το τρίτο:

$$P(-0,54) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{-0,54}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(-0,54)) \right)^2$$

$$P(0,15) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{0,15}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(0,15)) \right)^2$$

Τα αποτελέσματα για την εύρεση της διεύθυνση του προσπίπτοντος στη συστοιχία μετώπου, έδωσαν με ακρίβεια δεκάτου σωστά αποτελέσματα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Αρκεί να παρατηρήσει κανείς τις γωνίες theta που αποτελούν τις τυχαίες γωνίες στις οποίες τοποθέτησε ο αλγόριθμος τους στόχους και τις γωνίες thetaresult που αντιπροσωπεύουν τις γωνίες που ανιχνεύθηκαν. Τα αποτελέσματα είναι πολύ θετικά και οφείλονται κατά κύριο λόγο στην τιμή του SNR.



Name	Value
start	80000
step	1
stop	720001
t	1x800001 double
Tarfreq	12
theta	[8.8634,-26.7825,-31.6257]
thetaDEG	60
thetar	1x95 double
thetarad	[0.1547,-0.4674,-0.5520]
thetaRAD	1.0472
thetareult	[-26.3594,-31.1982,8.5110]
tmax	10
xx	[4.9247e+03,3.8462e+03,2.6035e+03]

Εικόνα 6.5 Γωνίες ανίχνευσης και θέσεις στόχων

Πιο συγκεκριμένα η τιμή του λόγου SNR έχει οριστεί να είναι 10, και άρα η ισχύς του περιβάλλοντος θορύβου δεν ξεπερνά την ισχύ του στόχου.

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(SNR) = 10 \log_{10}\left(\frac{P_s}{P_N}\right)$$

$$10 = 10 \log_{10}\left(\frac{P_s}{P_N}\right)$$

$$10 = \frac{P_s}{P_N} \quad (6.7.1)$$

όπου P_s είναι η ισχύς του σήματος και P_N η ισχύς του θορύβου. Άρα στο συγκεκριμένο τρέξιμο της προσομοίωσης η ισχύς του σήματος είναι δεκαπλάσια από την ισχύ του θορύβου.

Εν συνεχεία, ο αλγόριθμος περιστρέφει ηλεκτρονικά τον κύριο λοβό στις διευθύνσεις της μέγιστης ισχύος ($\hat{\theta}_1 = 8,5^\circ, \hat{\theta}_2 = -26,3^\circ, \hat{\theta}_3 = -31,2^\circ$) και υπολογίζει τις αντίστοιχες αριθμητικές εκτιμήσεις των ακουστικών υπογραφών $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$. Υπενθυμίζεται ότι λόγω της εστίασης του κυρίου λοβού στις εκάστοτε DOA, λαμβάνεται και ενισχύεται το ακουστικό σήμα (υπογραφή) από τις συγκεκριμένες κατευθύνσεις, συμπιέζοντας ταυτόχρονα τα λοιπά ακουστικά επίπεδα κύματα, που αντιστοιχούν στις λοιπές ακουστικές υπογραφές, καθώς και το θόρυβο περιβάλλοντος. Δημιουργούνται έτσι τρεις λοβοί, οι οποίοι στρέφονται στις γωνίες που έλαβαν τη μεγαλύτερη ισχύ.

Με $fs = 80000 \text{ samples / second}$

$$\Delta t_2 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(0,45)}{1480} = 0,00061 \text{ sec} = 0,61 \text{ m sec}$$

$$\Delta t_1 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(0,54)}{1480} = 0,00058 \text{ sec} = 0,58 \text{ m sec}$$

$$\Delta t_3 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(0,15)}{1480} = 0,00067 \text{ sec} = 0,67 \text{ m sec}$$

$$\Delta_{1 \text{ samples}} = 80000 * 0,00061 = 46,36 \approx 46$$

$$\Delta_{2 \text{ samples}} = 80000 * 0,000608 = 48,67 \approx 49$$

$$\Delta_{3 \text{ samples}} = 80000 * 0,00067 = 53,44 \approx 53$$

$$z_1(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t - 0,00061 \text{ m})$$

$$z_2(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t - 0,00058 \text{ m})$$

$$z_3(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t + 0,00067 \text{ m})$$

Αυτές είναι οι σχέσεις από τις οποίες προκύπτει η τελική φασματική κατανομή για κάθε στόχο.

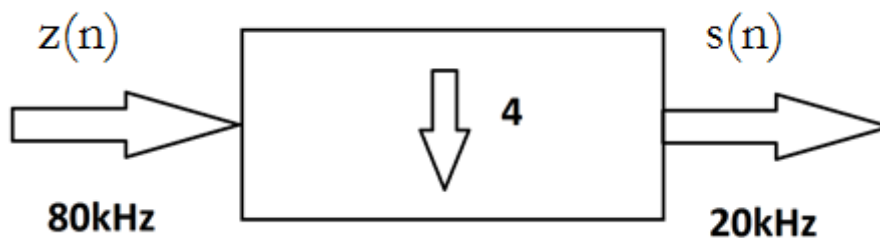
Εδώ αποτυπώνονται οι χρονικές υστερήσεις που απαιτούνται προκειμένου να στραφούν οι κύριοι λοβοί στις κατευθύνσεις των στόχων.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει τον μετασχηματισμό FOURIER των εξαγόμενων σημάτων $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$ από τη σχέση:

$$Z_k(f) = \sum_{n=0}^{N-1} z_k(n) e^{-j2\pi n/N}, n = 0, 1, \dots, N-1$$

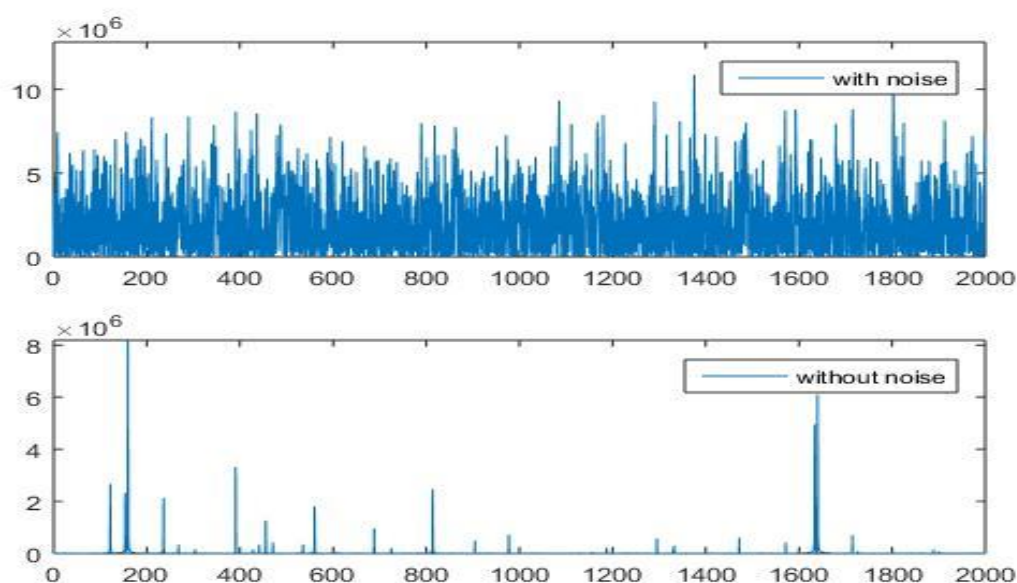
Τα προκύπτοντα στο πεδίο της συχνότητας σήματα $Z_1(f), Z_2(f), Z_3(f)$, με την κατάλληλη επεξεργασία απεικονίζουν την πυκνότητα της φασματικής ισχύος των ληφθέντων ακουστικών σημάτων $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$ στο εύρος συχνοτήτων $-f_{sam}/2 \leq f \leq f_{sam}/2 \Rightarrow -40000 \leq f \leq 40000$. Όπως προαναφέρθηκε, το απαραίτητο εύρος συχνοτήτων στο πλαίσιο της αναγνώρισης στόχων με χρήση υφιστάμενων βιβλιοθηκών είναι κατά πολύ μικρότερο από αυτό που προκύπτει από την προαναφερθείσα διαδικασία. Σε αυτή την περίπτωση είναι χρήσιμη η εισαγωγή της διαδικασίας του downsampling. Η εν λόγω διαδικασία με συντελεστή $L=4$, επεξεργάζεται τα ακουστικά σήματα $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$ και μειώνει την f_{sam} σε $f_{sam}/4$:

$$\hat{s}_k(n) = \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{z}_k(L \cdot n + l) \right)$$

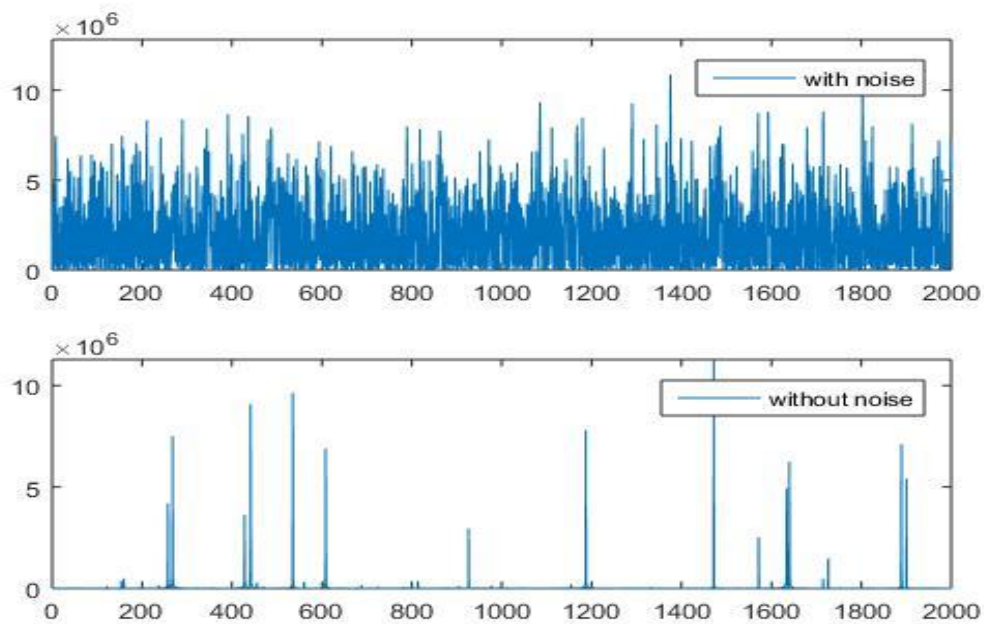


Εικόνα 6.6 Διάγραμμα downsampling

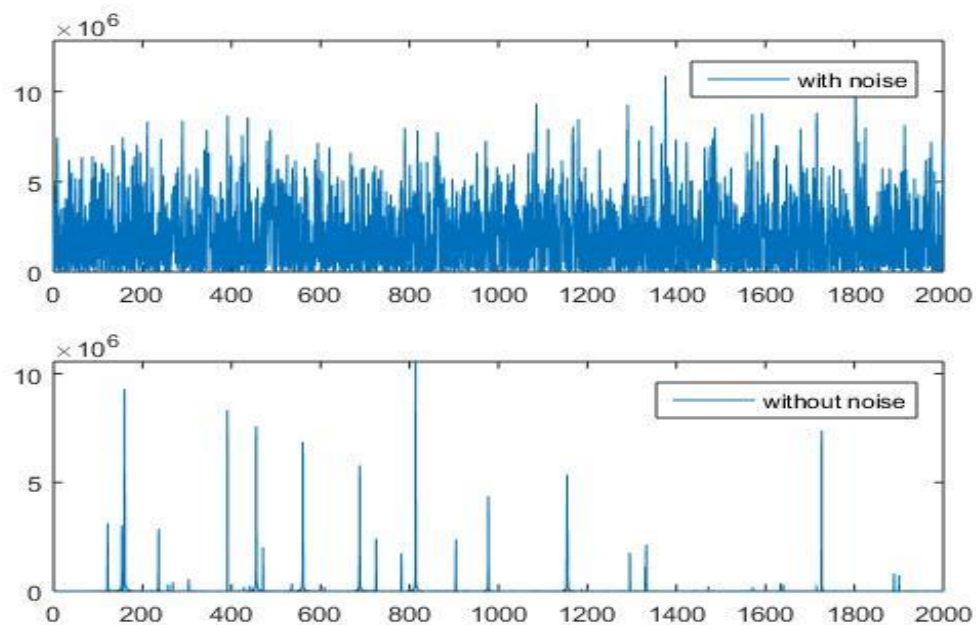
Τελικά, ο αλγόριθμος υπολογίζει εκ νέου τον μετασχηματισμό FOURIER των εξαγόμενων σημάτων $\hat{s}_k(n)$. Τα προκύπτοντα σήματα $\hat{S}_k(f)$, με την κατάλληλη επεξεργασία απεικονίζουν την πυκνότητα φασματικής ισχύος των ληφθέντων ακουστικών σημάτων $\hat{s}_k(n)$ στο νέο πλέον εύρος συχνοτήτων $-\frac{f_{sam}}{2L} \leq f \leq \frac{f_{sam}}{2L} \Rightarrow -10000 \leq f \leq 10000$. Η νέα πυκνότητα φασματικής ισχύος που προκύπτει με overlapping και απεικονίζεται μόνο στο απαραίτητο εύρος συχνοτήτων στο πλαίσιο της αναγνώρισης στόχων με χρήση υφιστάμενων βιβλιοθηκών ενώ παράλληλα έχει ακόμη πιο συμπιεσμένο τον θόρυβο του περιβάλλοντος σε σχέση με προηγουμένως. Το εύρος αυτό περιορίζεται από μηδέν έως 2kHz και παρουσιάζεται στις επόμενες εικόνες για κάθε στόχο. Είναι εμφανής η συμπίεση του θορύβου και η ανάδειξη των συχνοτήτων εκπομπής του κάθε στόχου.



Εικόνα 6.7 Σύγκριση φασματικής κατανομής πρώτου στόχου



Εικόνα 6.8 Σύγκριση φασματικής κατανομής δεύτερου στόχου



Εικόνα 6.9 Σύγκριση φασματικής κατανομής τρίτου στόχου

§4. Αποτελέσματα με μέτριο θόρυβο

Σε αυτή την προσομοίωση δημιουργήθηκαν πάλι τρεις στόχοι, οι οποίοι παράγουν ήχους σε 12 τυχαίες συχνότητες ο κάθε ένας. Το πλάτος των εκπεμπόμενων συχνοτήτων είναι επίσης τυχαίο καθώς και η θέση τους στο χώρο. Το σήμα ως γνωστόν από την προηγούμενη προσομοίωση αναμειγνύεται με τον υποθαλάσσιο θόρυβο και έτσι το τελικό αποτέλεσμα αναπαριστά πλήρως τη λήψη από ένα υδρόφωνο σε πραγματικές συνθήκες. Η συστοιχία υποτίθεται ότι διαθέτει 32 υδρόφωνα διατεταγμένα ανα μέτρο. Η συχνότητα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 80000Hz και η καταγραφή διήρκησε 10 δευτερόλεπτα. Η γωνία σάρωσης του beamforming γίνεται σε εύρος 120 μοιρών και ο λόγος SNR ορίζεται να είναι 0. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς του θορύβου είναι ίση με αυτή του στόχου.

Συνοπτικά:

Αριθμός υδροφώνων 32

Απόσταση υδροφώνων 1m

Συχνότητα δειγματοληψίας 80000Hz

Χρονική διάρκεια καταγραφής 10sec

Αριθμός στόχων 3

Συχνότητες που εκπέμπει κάθε στόχος 12

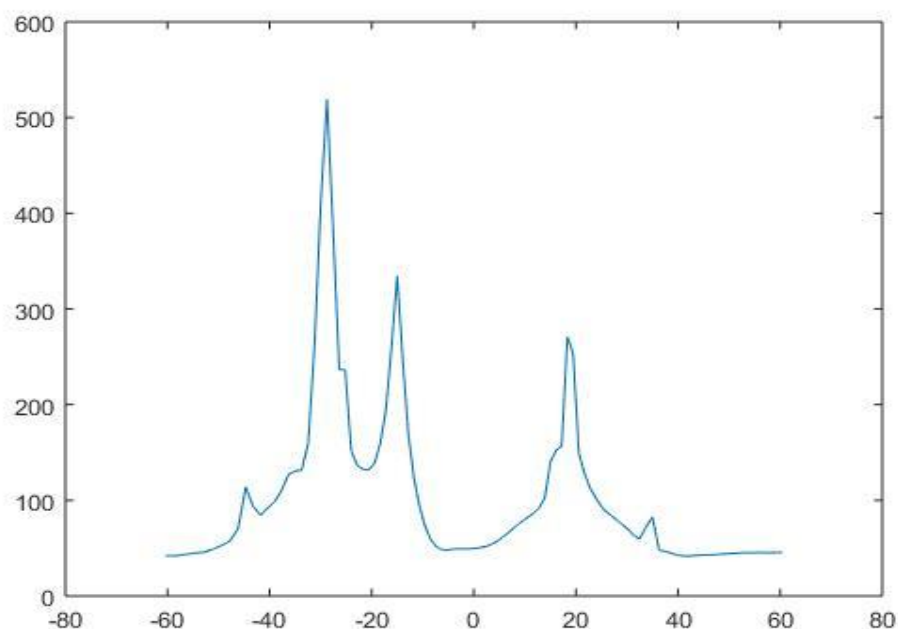
Γωνία σάρωσης 120 μοίρες

SNR=0

Η προσομοίωση λοιπόν δημιουργεί τεχνητά το σήμα σε ανάμειξη με το σήμα του στόχου. Δημιουργείται δηλαδή και πάλι σήμα τύπου $f_m(n) = \sum_{k=1}^K g_{m,k}(n) + e_m(n)$ με το K να είναι και πάλι 3 λόγω των στόχων και το m να είναι 32. Το πρώτο μέρος της σχέσης υπενθυμίζεται ότι αντιστοιχεί στο άθροισμα του σήματος των τριών στόχων και το δεύτερο είναι το $e(n)$ που αντιστοιχεί στο θόρυβο που εισέρχεται στην καταγραφή του κάθε υδροφώνου m . Στη συνέχεια με τη σχέση:

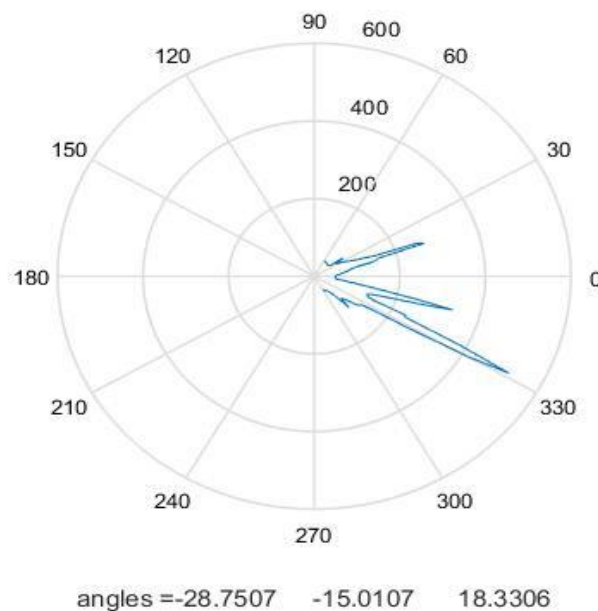
$$P(\theta_i) = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(n + m\tau_i) \right)^2 = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(n + m \frac{d}{c} \sin \theta_i) \right)^2, \quad -60^\circ \leq \theta_i \leq 60^\circ$$

υπολογίζεται η ισχύς ως συνάρτηση της γωνίας. Επειδή ο θόρυβος είναι ισотροπικός ενώ το σήμα του στόχου εμφανίζει συγκεκριμένη κατευθυντικότητα παρουσιάζονται τοπικά μέγιστα στις κατευθύνσεις των στόχων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα επόμενα δύο διαγράμματα:



Εικόνα 6.10 DOA με μέτριο θόρυβο

Και σε πολικό διάγραμμα:



Εικόνα 6.11 DOA με μέτριο θόρυβο (πολικό διάγραμμα)

Παρουσιάζονται τρεις γωνίες στις -28.7° , στις -15° και στις 18° . Τα οποία αντιστοιχούν σε -0.5 , -0.26 και 0.31 rad. Εκεί η λαμβανόμενη ενέργεια παρουσιάζει υψηλή ισχύ και προδίδεται έτσι η ύπαρξη πηγής, σε κάθε μία από αυτές τις κατευθύνσεις.

Το πρώτο μέγιστο θα έχει συνολική ισχύ:

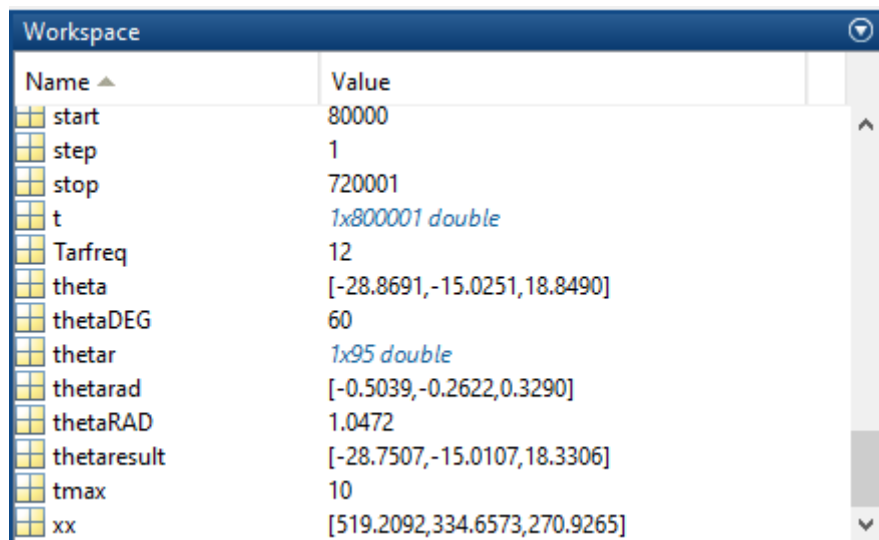
$$P(-0,5) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{-0,5}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(-0,5)) \right)^2$$

Αντίστοιχα για το δεύτερο και το τρίτο:

$$P(-0,26) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{-0,26}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(-0,26)) \right)^2$$

$$P(0,31) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{0,31}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(0,31)) \right)^2$$

Τα αποτελέσματα όσον αφορά τη διεύθυνση του προσπίπτοντος στη συστοιχία μετώπου, έδωσαν και πάλι με μεγάλη ακρίβεια, σωστά αποτελέσματα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Name	Value
start	80000
step	1
stop	720001
t	1x800001 double
Tarfreq	12
theta	[-28.8691,-15.0251,18.8490]
thetaDEG	60
thetar	1x95 double
thetarad	[-0.5039,-0.2622,0.3290]
thetaRAD	1.0472
thetareult	[-28.7507,-15.0107,18.3306]
tmax	10
xx	[519.2092,334.6573,270.9265]

Εικόνα 6.12 Γωνίες ανίχνευσης και θέσεις στόχων

Από την τιμή του λόγου SNR φαίνεται ότι έχει οριστεί η ισχύς του περιβάλλοντος θορύβου να είναι ίση με την ισχύ του στόχου. Πιο συγκεκριμένα με τιμή του λόγου 0 προκύπτει:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(SNR) = 10 \log_{10}\left(\frac{P_s}{P_N}\right)$$

$$0 = 10 \log_{10}\left(\frac{P_s}{P_N}\right)$$

$$1 = \frac{P_s}{P_N}$$

$$P_s = P_N$$

όπου P_s είναι η ισχύς του σήματος και P_N η ισχύς του θορύβου. Άρα στο συγκεκριμένο τρέξιμο της προσομοίωσης η ισχύς του σήματος είναι ίση με την ισχύ του θορύβου.

Εν συνεχεία, ο αλγόριθμος περιστρέφει ηλεκτρονικά τον κύριο λοβό στις διευθύνσεις της μέγιστης ισχύος ($\hat{\theta}_1 = 18,3^\circ, \hat{\theta}_2 = -28,75^\circ, \hat{\theta}_3 = -15^\circ$) και υπολογίζει τις αντίστοιχες αριθμητικές εκτιμήσεις των ακουστικών υπογραφών $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$. Με αυτό τον τρόπο ενισχύεται το ακουστικό σήμα των στόχων, ενώ ταυτόχρονα συμπιέζονται τα λοιπά ακουστικά επίπεδα κύματα που αντιστοιχούν στις άλλες ακουστικές υπογραφές, καθώς και τον θόρυβο του περιβάλλοντος. Δημιουργούνται έτσι τρεις λοβοί, οι οποίοι στρέφονται στις γωνίες που έλαβαν τη μεγαλύτερη ισχύ και γίνεται έτσι καθαρότερη η καταγραφή.

Με $f_s = 80000 \text{ samples / second}$

$$\Delta t_1 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(0,5)}{1480} = 0,000593 \text{ sec} = 0,59 \text{ m sec}$$

$$\Delta t_2 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(0,26)}{1480} = 0,000653 \text{ sec} = 0,65 \text{ m sec}$$

$$\Delta t_3 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(0,31)}{1480} = 0,000643 \text{ sec} = 0,64 \text{ m sec}$$

$$\Delta_{1 \text{ samples}} = 80000 * 0,000593 = 47,43 \approx 47$$

$$\Delta_{2 \text{ samples}} = 80000 * 0,000653 = 52,23 \approx 52$$

$$\Delta_{3 \text{ samples}} = 80000 * 0,000643 = 51,47 \approx 51$$

$$z_1(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t - 0,00059 \text{ m})$$

$$z_2(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t - 0,00065 \text{ m})$$

$$z_3(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t + 0,00064 \text{ m})$$

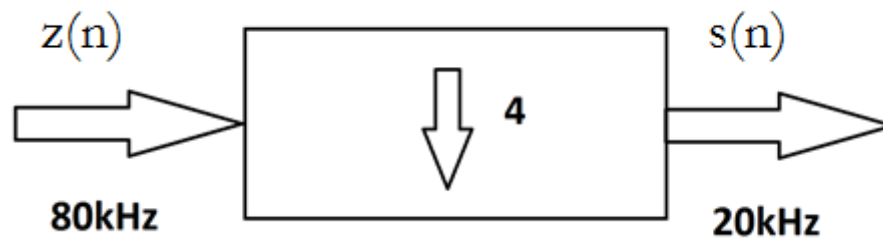
Οι παραπάνω σχέσεις είναι αυτές με βάση τις οποίες στρέφονται οι κύριοι λοβοί στην κατεύθυνση των στόχων αυτής της προσομοίωσης. Επιπλέον υπολογίζεται και ο αριθμός των δειγμάτων κατά τα οποία θα πρέπει να μετατοπιστεί η καταγραφή του κάθε υδροφώνου προκειμένου να επιτευχθεί η προαναφερθείσα στρέψη.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει τον μετασχηματισμό FOURIER των εξαγόμενων σημάτων $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$ από τη σχέση:

$$Z_k(f) = \sum_{n=0}^{N-1} z_k(n) e^{-j2\pi f n / N}, n = 0, 1, \dots, N-1$$

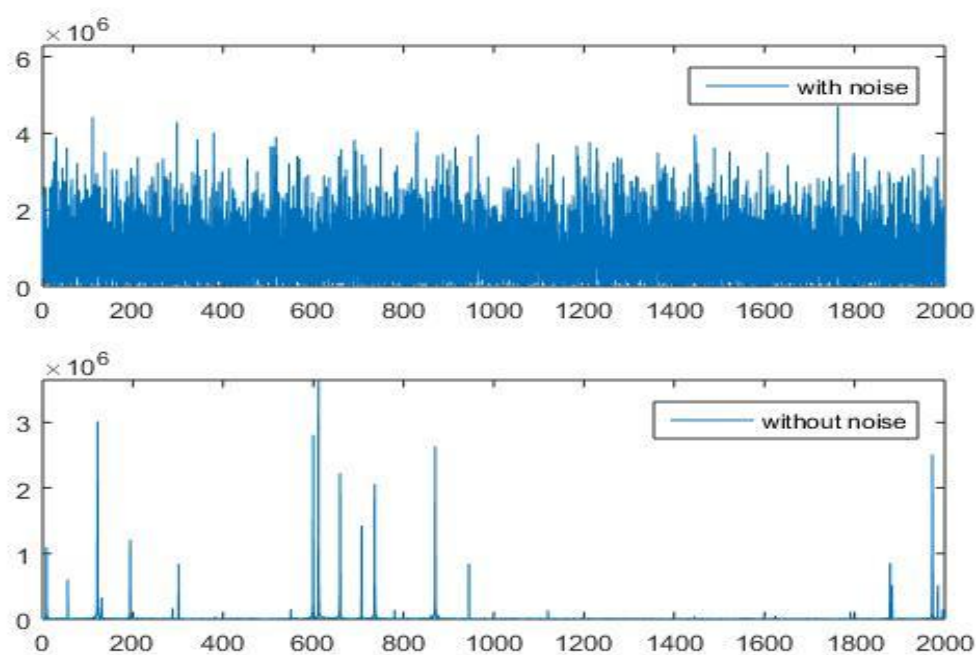
Τα προκύπτοντα στο πεδίο της συχνότητας σήματα $Z_1(f), Z_2(f), Z_3(f)$, με την κατάλληλη επεξεργασία απεικονίζουν την πυκνότητα φασματικής ισχύος των ληφθέντων ακουστικών σημάτων $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$ στο εύρος συχνοτήτων $-f_{sam}/2 \leq f \leq f_{sam}/2 \Rightarrow -40000 \leq f \leq 40000$. Το απαραίτητο εύρος συχνοτήτων για την αναγνώριση των στόχων είναι μικρότερο από αυτό που προκύπτει από την προαναφερθείσα διαδικασία. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιείται downsampling. Η εν λόγω διαδικασία με συντελεστή $L=4$, επεξεργάζεται τα ακουστικά σήματα $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$ και μειώνει την f_{sam} σε $f_{sam}/4$:

$$\hat{s}_k(n) = \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{z}_k(L \cdot n + l) \right)$$

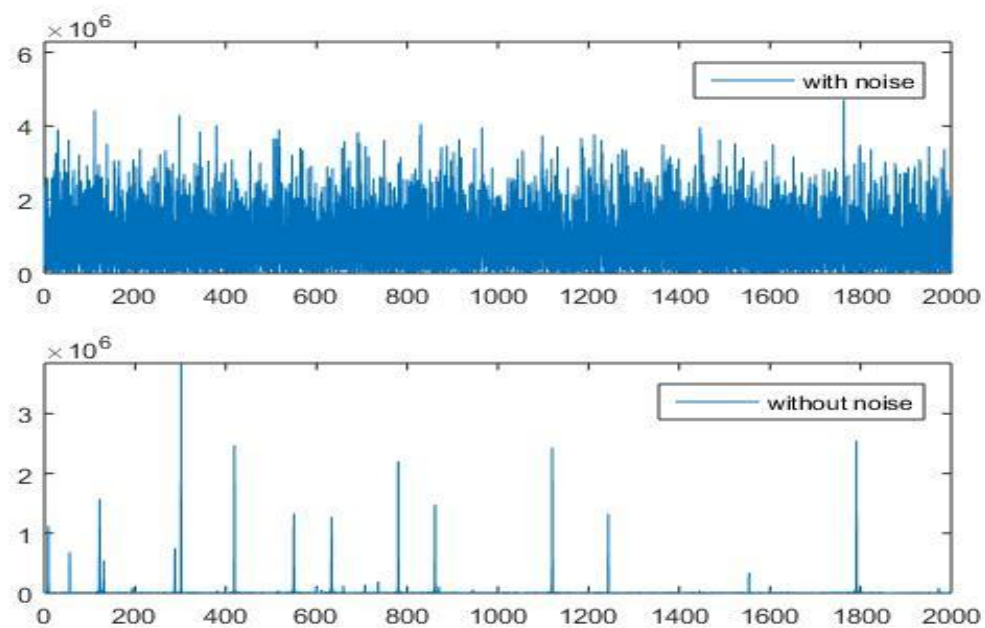


Εικόνα 6.13 Διάγραμμα downsampling

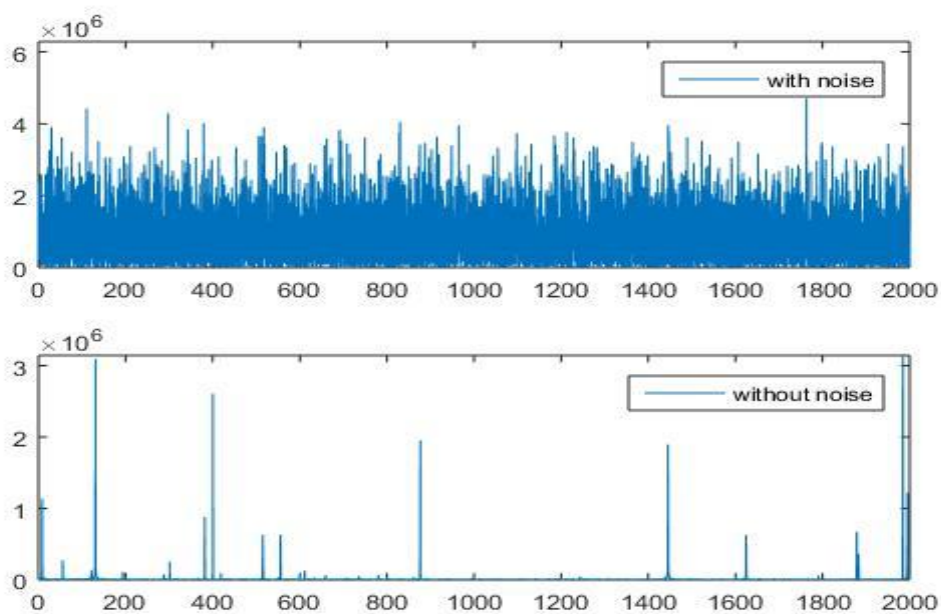
Στη συνέχεια ο αλγόριθμος υπολογίζει εκ νέου το μετασχηματισμό FOURIER των εξαγόμενων σημάτων $\hat{s}_k(n)$. Τα προκύπτοντα σήματα $\hat{S}_k(f)$, με την κατάλληλη επεξεργασία απεικονίζουν την πυκνότητα φασματικής ισχύος των ληφθέντων ακουστικών σημάτων $\hat{s}_k(n)$ στο νέο εύρος συχνοτήτων που είναι $-\frac{f_{sam}}{2L} \leq f \leq \frac{f_{sam}}{2L} \Rightarrow -10000 \leq f \leq 10000$. Η νέα πυκνότητα φασματικής ισχύος που προκύπτει, απεικονίζεται σε ένα ακόμα πιο περιορισμένο εύρος συχνοτήτων στα πλαίσια της αναγνώρισης στόχων με χρήση υφιστάμενων. Το εύρος αυτό περιορίζεται και πάλι από μηδέν έως 2kHz και παρουσιάζεται στις επόμενες εικόνες για κάθε στόχο, όπου πραγματοποιείται σύγκριση με την αρχική-χωρίς επεξεργασία καταγραφή. Και πάλι το σήμα εκπομπής του εκάστοτε στόχου, όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν, είναι ξεκάθαρο.



Εικόνα 6.14 Σύγκριση ασματικής κατανομής πρώτου στόχου



Εικόνα 6.15 Σύγκριση ασματικής κατανομής δεύτερου στόχου



Εικόνα 6.16 Σύγκριση ασματικής κατανομής τρίτου στόχου

§5. Αποτελέσματα με πολύ υψηλό θόρυβο

Σε αυτή την προσομοίωση δημιουργήθηκαν και πάλι τρεις στόχοι, οι οποίοι παράγουν ήχους σε 12 τυχαίες συχνότητες ο κάθε ένας. Το πλάτος των εκπεμπόμενων συχνοτήτων είναι επίσης τυχαίο καθώς και η θέση τους στο χώρο. Το σήμα ως γνωστόν από τις προηγούμενες προσομοιώσεις αναμειγνύεται με τον υποθαλάσσιο θόρυβο προκειμένου το τελικό αποτέλεσμα να αναπαριστά πλήρως τη λήψη από ένα υδρόφωνο σε πραγματικές συνθήκες. Η συστοιχία υποτίθεται ότι διαθέτει 32 υδρόφωνα διατεταγμένα ανα μέτρο. Η συχνότητα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 80000Hz και η καταγραφή διήρκησε 10 δευτερόλεπτα. Η γωνία σάρωσης του beamforming γίνεται σε εύρος 120 μοιρών και ο λόγος SNR ορίστηκε να είναι -25. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς του θορύβου ξεπερνά κατά πολύ αυτή του στόχου!

Συνοπτικά:

Αριθμός υδροφώνων 32

Απόσταση υδροφώνων 1m

Συχνότητα δειγματοληψίας 80000Hz

Χρονική διάρκεια καταγραφής 10sec

Αριθμός στόχων 3

Συχνότητες που εκπέμπει κάθε στόχος 12

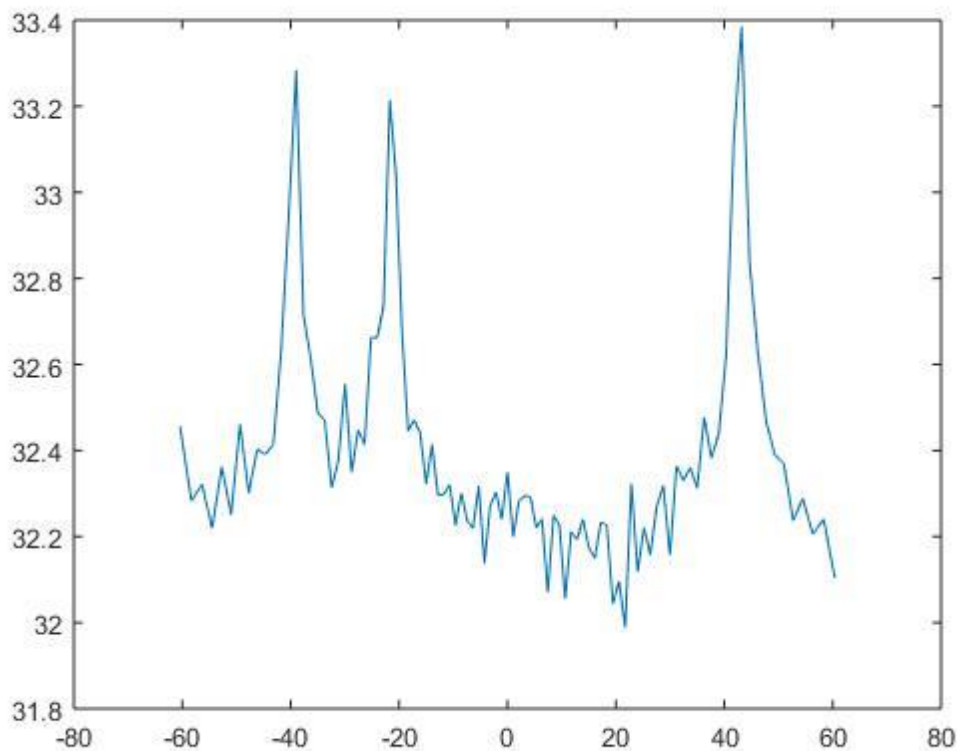
Γωνία σάρωσης 120 μοίρες

SNR=-25

Η προσομοίωση λοιπόν δημιουργεί τεχνητά το σήμα σε ανάμειξη με το στόχο σύμφωνα με τη σχέση $f_m(n) = \sum_{k=1}^K g_{m,k}(n) + e_m(n)$ με το K να είναι 3 και το m να είναι 32. Στη συνέχεια μέσω της σχέσης:

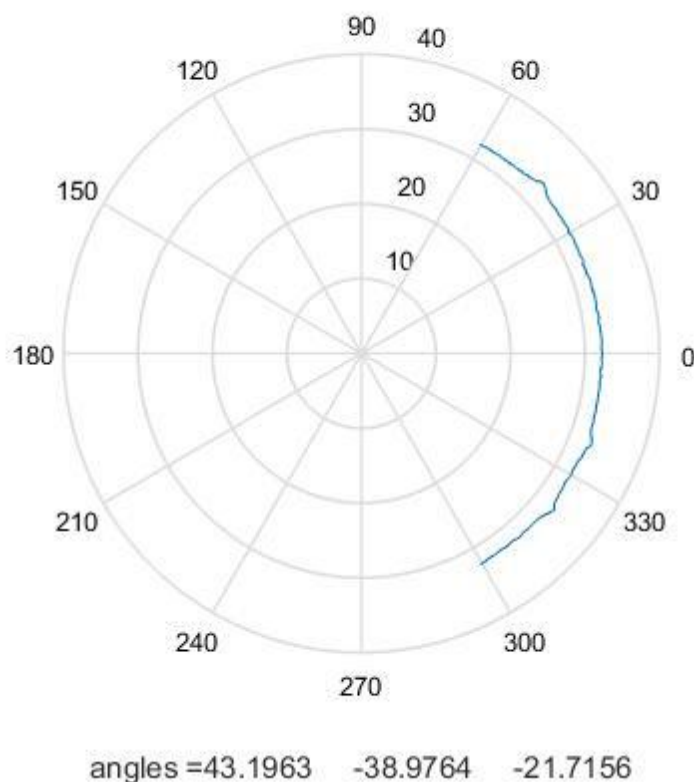
$$P(\theta_i) = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(n + m\tau_i) \right)^2 = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(n + m \frac{d}{c} \sin \theta_i) \right)^2, \quad -60^\circ \leq \theta_i \leq 60^\circ$$

αυπολογίζεται η λαμβανόμενη ισχύς ως συνάρτηση της γωνίας. Στο επόμενο διάγραμμα αποτυπώνεται η κατανομή της ισχύος σε συνάρτηση με τη γωνία σάρωσης.



Εικόνα 6.17 DOA με υψηλό θόρυβο

Αντίστοιχα και στο πολικό διάγραμμα της εικόνας 6.18, διακρίνονται οι γωνίες στις οποίες συγκεντρώνεται περισσότερη ενέργεια. Επειδή όμως ο θόρυβος είναι 316 φορές πιο ισχυρός από το σήμα, η μέση ισχύς ανά γωνία είναι αυξημένη.



Εικόνα 6.18 DOA με υψηλό θόρυβο (πολικό διάγραμμα)

Παρουσιάζονται τρεις γωνίες στις $43,2^0$, στις $-38,9^0$ και στις $-21,7^0$. Τα οποία αντιστοιχούν σε 75.3, -6.78 και -37.8 rad. Εκεί η λαμβανόμενη ενέργεια παρουσιάζει υψηλή ισχύ και προδίδεται έτσι η ύπαρξη πηγής, σε κάθε μία από αυτές.

Το πρώτο μέγιστο θα έχει συνολική ισχύ:

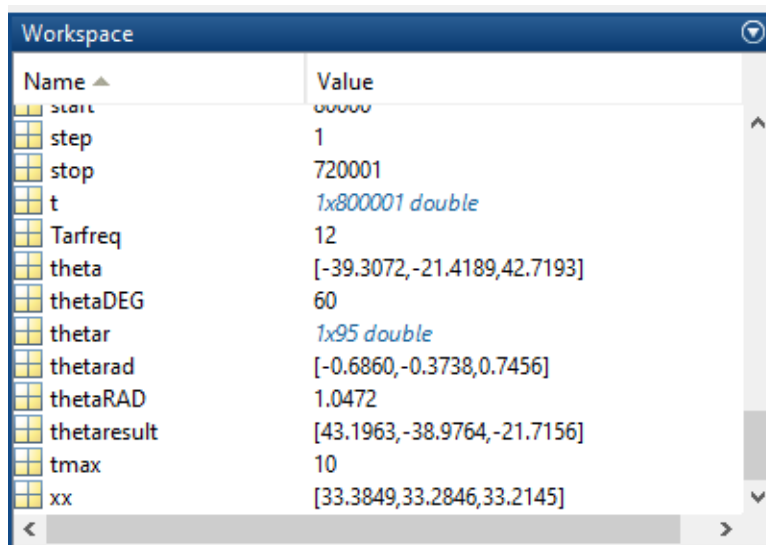
$$P(75,3) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{75,3}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(75,3)) \right)^2$$

Αντίστοιχα για το δεύτερο και το τρίτο:

$$P(-6,78) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{-6,78}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(-6,78)) \right)^2$$

$$P(-37,8) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{-37,8}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(-37,8)) \right)^2$$

Στην εικόνα που ακολουθεί επιβεβαιώνεται ότι παρό το έντονα θορυβώδες περιβάλλον ο αλγόριθμος κατάφερε επιτυχώς να εντοπίσει τις κατευθύνσεις των στόχων με πολύ καλή ακρίβεια.



Name	Value
start	0000
step	1
stop	720001
t	1x800001 double
Tarfreq	12
theta	[-39.3072,-21.4189,42.7193]
thetaDEG	60
thetar	1x95 double
thetarad	[-0.6860,-0.3738,0.7456]
thetaRAD	1.0472
thetareult	[43.1963,-38.9764,-21.7156]
tmax	10
xx	[33.3849,33.2846,33.2145]

Εικόνα 6.19 Γωνίες ανίχνευσης και θέσεις στόχων

Η τιμή του λόγου SNR έχει οριστεί να είναι -25. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς του περιβάλλοντος θορύβου ξεπερνά κατά πολύ την ισχύ του στόχου. Πιο συγκεκριμένα τιμή -25 προκύπτει:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(SNR) = 10 \log_{10}\left(\frac{P_s}{P_N}\right)$$

$$-25 = 10 \log_{10}\left(\frac{P_s}{P_N}\right)$$

$$10^{-2,5} = \frac{P_s}{P_N}$$

$$P_s = 10^{-2,5} P_N \Rightarrow P_N = 316 P_s$$

όπου P_s είναι η ισχύς του σήματος και P_N η ισχύς του θορύβου. Άρα στο συγκεκριμένο τρέξιμο της προσομοίωσης η ισχύς του σήματος περίπου 300 φορές μικρότερη από την ισχύ του θορύβου. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος στρέφει ηλεκτρονικά τον κύριο λοβό στις διευθύνσεις της μέγιστης ισχύος ($\hat{\theta}_1 = 43,2^\circ, \hat{\theta}_2 = -38,97^\circ, \hat{\theta}_3 = -21,7^\circ$) και υπολογίζει τις αντίστοιχες αριθμητικές εκτιμήσεις των ακουστικών υπογραφών $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$. Η στρέψη αυτή πραγματοποιείται μέσα από τον υπολογισμό του αριθμού των δειγμάτων που πρέπει να μετατοπιστεί κάθε υδρόφωνο, σύμφωνα με τους παρακάτω υπολογισμούς:

Με $fs = 80000 \text{ samples / second}$

$$\Delta t_1 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(75,3)}{1480} = 0,000672 \text{ sec} = 0,67 \text{ m sec}$$

$$\Delta t_2 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(6,78)}{1480} = 0,000594 \text{ sec} = 0,59 \text{ m sec}$$

$$\Delta t_3 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(37,8)}{1480} = 0,000672 \text{ sec} = 0,67 \text{ m sec}$$

$$\Delta_{1 \text{ samples}} = 80000 * 0,000678 = 53,79 \approx 54$$

$$\Delta_{2 \text{ samples}} = 80000 * 0,000594 = 47,51 \approx 48$$

$$\Delta_{3 \text{ samples}} = 80000 * 0,000672 = 53,77 \approx 54$$

$$z_1(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t + 0,00067 \text{ m})$$

$$z_2(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t - 0,00059 \text{ m})$$

$$z_3(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t - 0,00067 \text{ m})$$

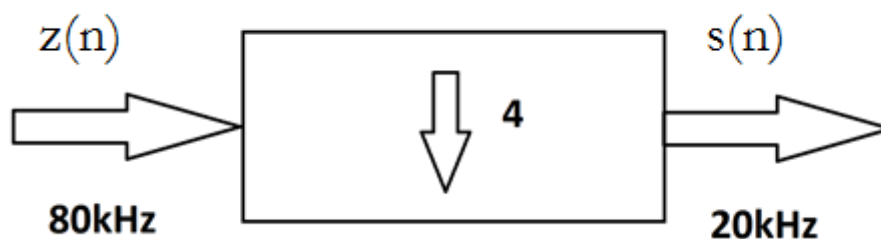
Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει τον μετασχηματισμό FOURIER των εξαγόμενων σημάτων $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$ από τη σχέση

$$Z_k(f) = \sum_{n=0}^{N-1} z_k(n) e^{-j2\pi n/N}, n = 0, 1, \dots, N-1$$

Τα προκύπτοντα στο πεδίο της συχνότητας σήματα $Z_1(f), Z_2(f), Z_3(f)$, με την κατάλληλη επεξεργασία απεικονίζουν την πυκνότητα φασματικής ισχύος των ληφθέντων ακουστικών σημάτων $s_1(n), z_2(n), z_3(n)$ στο εύρος συχνοτήτων $-f_{sam}/2 \leq f \leq f_{sam}/2 \Rightarrow -40000 \leq f \leq 40000$.

Στη συνέχεια από εφαρμογή downsampling με συντελεστή $L=4$, επεξεργάζονται τα ακουστικά σήματα $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$ και μειώνεται η f_{sam} σε $f_{sam}/4$:

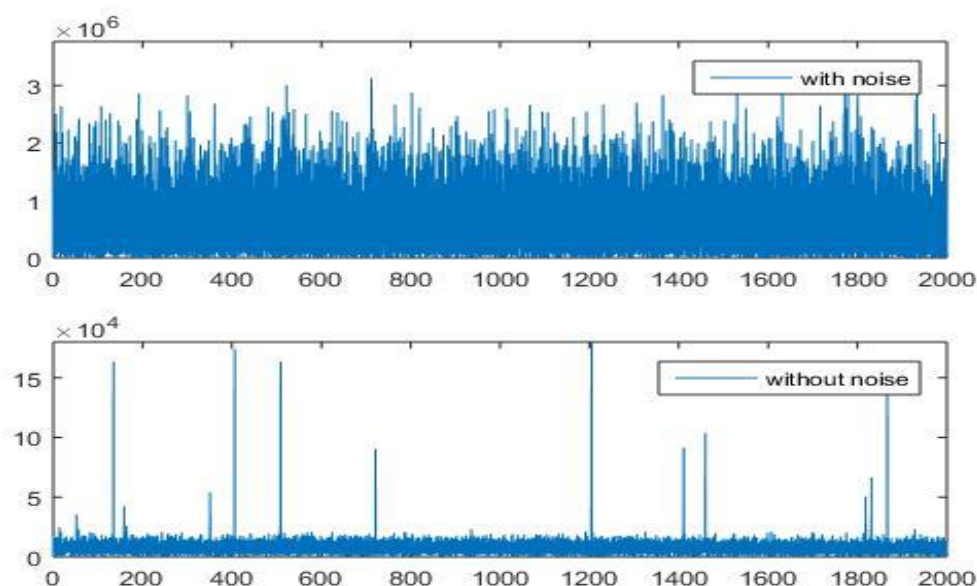
$$\hat{s}_k(n) = \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{z}_k(L \cdot n + l) \right)$$



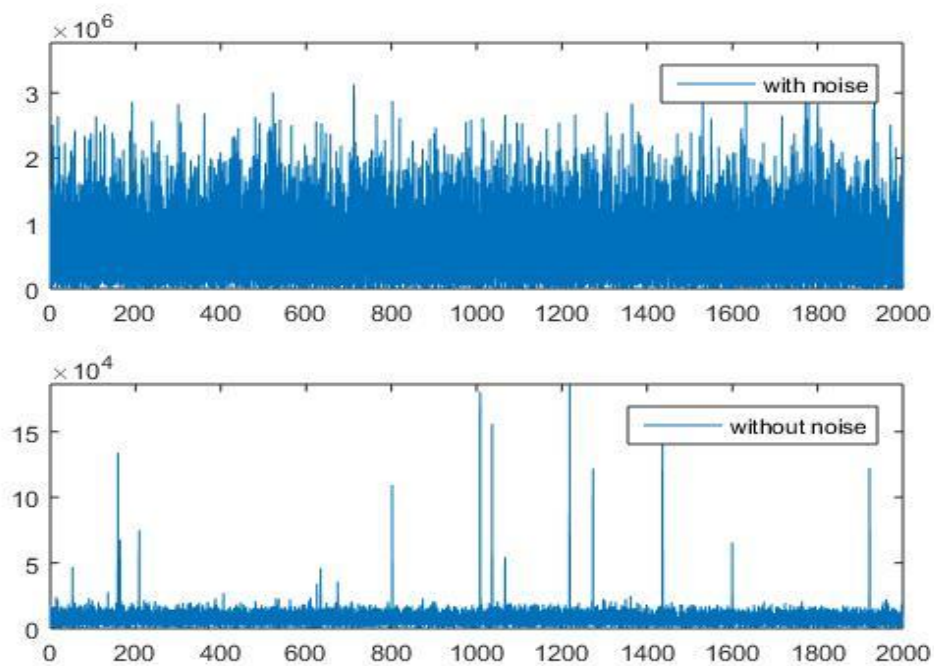
Εικόνα 6.20 Διάγραμμα downsampling

Τελικά, ο αλγόριθμος υπολογίζει εκ νέου τον μετασχηματισμό FOURIER των εξαγόμενων σημάτων $\hat{s}_k(n)$. Τα προκύπτοντα σήματα $\hat{S}_k(f)$, με την κατάλληλη επεξεργασία απεικονίζουν την πυκνότητα φασματικής ισχύος των ληφθέντων ακουστικών σημάτων $\hat{s}_k(n)$ στο νέο εύρος συχνοτήτων $-f_{sam}/2L \leq f \leq f_{sam}/2L \Rightarrow -10000 \leq f \leq 10000$.

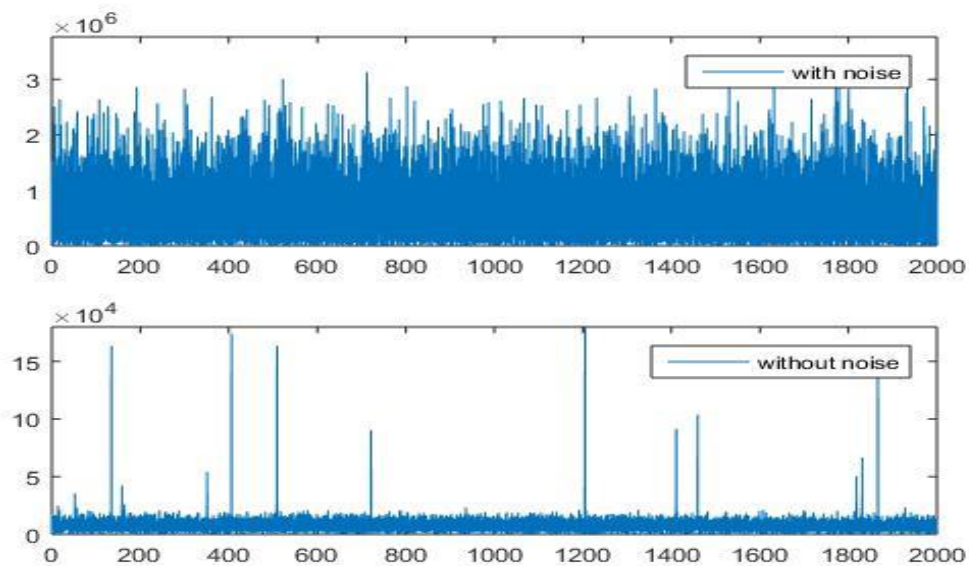
Η νέα πυκνότητα φασματικής ισχύος που προκύπτει, απεικονίζεται μόνο στο απαραίτητο εύρος συχνοτήτων στο πλαίσιο της αναγνώρισης στόχων με χρήση υφιστάμενων βιβλιοθηκών ενώ παράλληλα έχει λιγότερο συμπιεσμένο τον θόρυβο του περιβάλλοντος σε σχέση με προηγουμένως εξ' αιτίας του υψηλού θορύβου. Το εύρος αυτό περιορίζεται από μηδέν έως 2kHz και παρουσιάζεται στις επόμενες εικόνες για κάθε στόχο. Είναι εμφανής ο θόρυβος, αλλά οι συχνότητες εκπομπής του εκάστοτε στόχου παραμένουν ευδιάκριτες. Ο κύριος λόγος της συγκεκριμένης προσομοίωσης ήταν ο έλεγχος της απόκρισης του αλγορίθμου σε εξαιρετικά δυσμενείς εισόδους. Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας, για κάθε στόχο, έπειτα από την συμπίεση του περιβάλλοντος θορύβου.



Εικόνα 6.21 Σύγκριση ασματικής κατανομής πρώτου στόχου



Εικόνα 6.22 Σύγκριση ασματικής κατανομής δεύτερου στόχου



Εικόνα 6.23 Σύγκριση ασματικής κατανομής τρίτου στόχου

§6. Αποτελέσματα με χαμηλή συχνότητα δειγματοληψίας

Σε αυτή την προσομοίωση δημιουργήθηκαν πάλι τρεις στόχοι, οι οποίοι παράγουν ήχους σε 12 τυχαίες συχνότητες ο κάθε ένας. Το πλάτος των εκπεμπόμενων συχνοτήτων είναι επίσης τυχαίο καθώς και η θέση τους στο χώρο. Το σήμα ως γνωστόν από τις προηγούμενες προσομοιώσεις αναμειγνύεται με τον υποθαλάσσιο θόρυβο και έτσι το τελικό αποτέλεσμα αναπαριστά πλήρως τη λήψη από ένα υδρόφωνο σε πραγματικές συνθήκες. Η συστοιχία υποτίθεται ότι διαθέτει 32 υδρόφωνα διατεταγμένα ανα μέτρο. Η συχνότητα δειγματοληψίας αυτή τη φορά ορίστηκε στα 40000Hz και η καταγραφή διήρκησε 10 δευτερόλεπτα. Η γωνία σάρωσης του beamforming γίνεται σε εύρος 120 μοιρών και ο λόγος SNR ορίζεται να είναι -10. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς του θορύβου είναι ίση με αυτή του στόχου!

Συνοπτικά:

Αριθμός υδροφώνων 32

Απόσταση υδροφώνων 1m

Συχνότητα δειγματοληψίας 40000Hz

Χρονική διάρκεια καταγραφής 10sec

Αριθμός στόχων 3

Συχνότητες που εκπέμπει κάθε στόχος 12

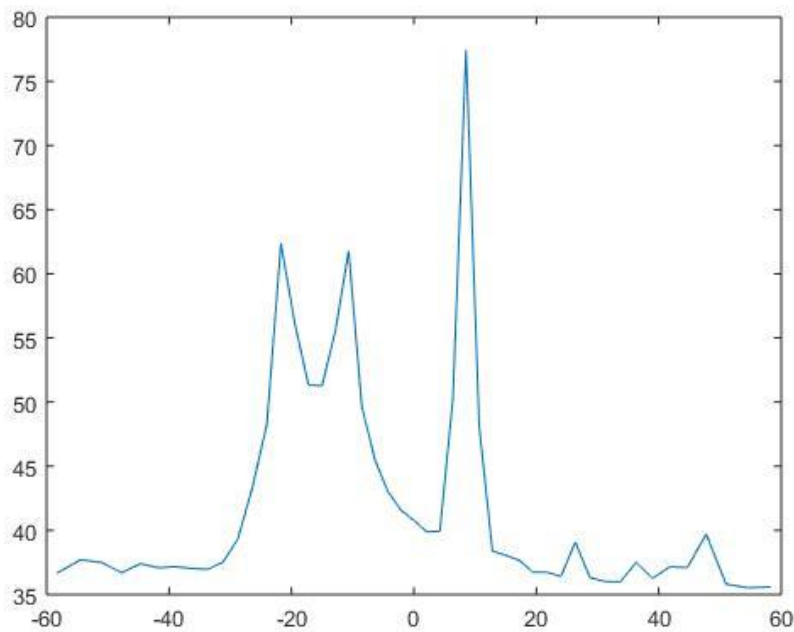
Γωνία σάρωσης 120 μοίρες

SNR=-10

Η προσομοίωση λοιπόν δημιουργεί τεχνητά το σήμα ανάμειγμένο με το στόχο. Πιο συγκεκριμένα $f_m(n) = \sum_{k=1}^K g_{m,k}(n) + e_m(n)$ με το K να είναι 3 και το m να είναι 32. Στη συνέχεια από τη σχέση:

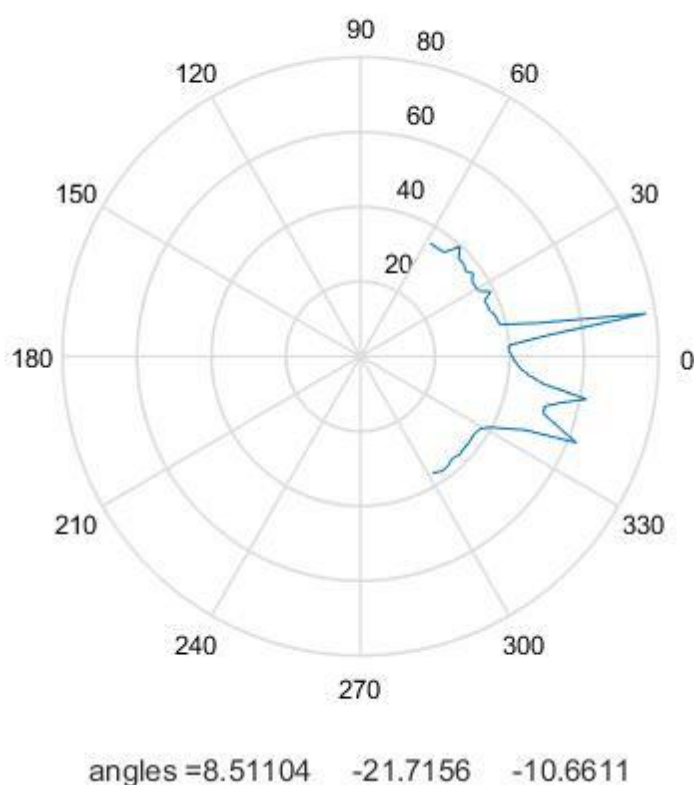
$$P(\theta_i) = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(n + m\tau_i) \right)^2 = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(n + m \frac{d}{c} \sin \theta_i) \right)^2, \quad -60^\circ \leq \theta_i \leq 60^\circ$$

υπολογίζεται η ισχύς ως συνάρτηση της γωνίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επόμενο διάγραμμα:



Εικόνα 6.24 DOA με χαμηλή δειγματοληψία

Αντίστοιχα και στο πολικό διάγραμμα που ακολουθεί διακρίνονται οι γωνίες στις οποίες συγκεντρώνεται η περισσότερη ενέργεια. Επειδή όμως ο θόρυβος είναι 10 φορές πιο ισχυρός από το σήμα, η μέση ισχύς ανά γωνία είναι και πάλι αυξημένη.



Εικόνα 6.25 DOA με χαμηλή δειγματοληψία (πολικό διάγραμμα)

Παρουσιάζονται τρεις γωνίες στις $8,5^\circ$, στις $-21,7^\circ$ και στις $-10,66^\circ$. Οι οποίες αντιστοιχούν σε $0,14$, $-0,38$ και $-0,18$ rad. Εκεί η λαμβανόμενη ενέργεια παρουσιάζει υψηλή ισχύ και προδίδεται έτσι η ύπαρξη πηγής, σε κάθε μία από αυτές.

Το πρώτο μέγιστο θα έχει συνολική ισχύ:

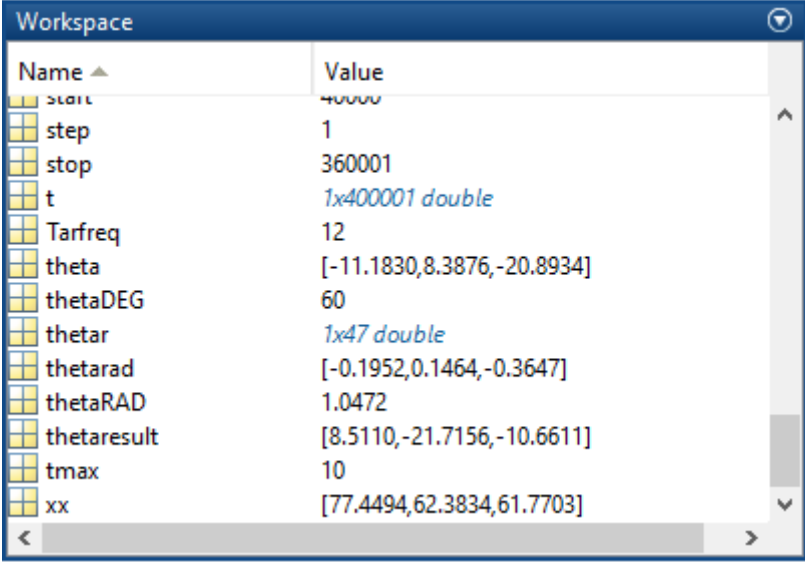
$$P(0,14) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{0,14}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(0,14)) \right)^2$$

Αντίστοιχα για το δεύτερο και το τρίτο:

$$P(-0,38) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{-0,38}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(-0,38)) \right)^2$$

$$P(0,18) = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m\tau_{0,18}) \right)^2 = \left(\frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(n + m \frac{1}{1480} \sin(0,18)) \right)^2$$

Στην επόμενη εικόνα διακρίνονται οι γωνίες της θέσης των στόχων καθώς και οι γωνίες οι οποίες ανιχνεύθηκαν. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και παρά τη χαμηλή δειγματοληψία, ανιχνεύθηκαν επιτυχώς οι στόχοι.



Name	Value
start	40000
step	1
stop	360001
t	1x400001 double
Tarfreq	12
theta	[-11.1830, 8.3876, -20.8934]
thetaDEG	60
thetar	1x47 double
thetarad	[-0.1952, 0.1464, -0.3647]
thetaRAD	1.0472
thetareult	[8.5110, -21.7156, -10.6611]
tmax	10
xx	[77.4494, 62.3834, 61.7703]

Εικόνα 6.26 Γωνίες ανίχνευσης και θέσεις στόχων

Για την συγκεκριμένη τιμή του λόγου SNR, η ισχύς του περιβάλλοντος θορύβου ξεπερνά την ισχύ του στόχου κατά 10 φορές.

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(SNR) = 10 \log_{10}\left(\frac{P_S}{P_N}\right)$$

$$-10 = 10 \log_{10}\left(\frac{P_S}{P_N}\right)$$

$$0,1 = \frac{P_S}{P_N}$$

$$P_N = 10 P_S$$

όπου P_S είναι η ισχύς του σήματος και P_N η ισχύς του θορύβου. Άρα στο συγκεκριμένο τρέξιμο της προσομοίωσης η ισχύς του σήματος είναι δεκαπλάσια από την ισχύ του θορύβου.

Εν συνεχεία, ο αλγόριθμος περιστρέφει ηλεκτρονικά τον κύριο λοβό στις διευθύνσεις της μέγιστης ισχύος ($\hat{\theta}_1 = 8,5^\circ, \hat{\theta}_2 = -21,7^\circ, \hat{\theta}_3 = -10,6^\circ$) και υπολογίζει τις αντίστοιχες αριθμητικές εκτιμήσεις των ακουστικών υπογραφών $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$. Δημιουργούνται έτσι τρεις λοβοί, οι οποίοι στρέφονται στις γωνίες που έλαβαν τη μεγαλύτερη ισχύ, σύμφωνα με τις σχέσεις που ακολουθούν.

Με $fs = 40000 \text{ samples / second}$

$$\Delta t_1 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(0,14)}{1480} = 0,000669 \text{ sec} = 0,67 \text{ m sec}$$

$$\Delta t_2 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(0,38)}{1480} = 0,000627 \text{ sec} = 0,63 \text{ m sec}$$

$$\Delta t_3 = \frac{dist}{u} = \frac{1 \cos(0,18)}{1480} = 0,000665 \text{ sec} = 0,67 \text{ m sec}$$

$$\Delta_{1 \text{ samples}} = 40000 * 0,000669 = 26,76 \approx 27$$

$$\Delta_{2 \text{ samples}} = 40000 * 0,000627 = 25,1 \approx 25$$

$$\Delta_{3 \text{ samples}} = 40000 * 0,000665 = 26,59 \approx 27$$

$$z_1(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t + 0,00067 \text{ m})$$

$$z_2(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t - 0,00063 \text{ m})$$

$$z_3(t) = \frac{1}{32} \sum_{m=0}^{31} f_m(t - 0,00067 \text{ m})$$

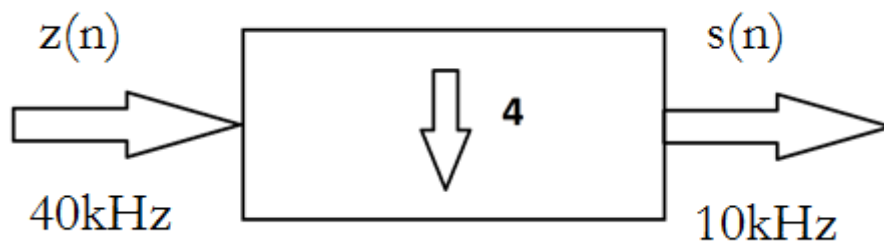
Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει τον μετασχηματισμό FOURIER των εξαγόμενων σημάτων $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$ από τη σχέση:

$$Z_k(f) = \sum_{n=0}^{N-1} z_k(n) e^{-j2\pi n/N}, n = 0, 1, \dots, N-1$$

Τα προκύπτοντα στο πεδίο της συχνότητας σήματα $Z_1(f), Z_2(f), Z_3(f)$, με την κατάλληλη επεξεργασία απεικονίζουν την πυκνότητα φασματικής ισχύος των ληφθέντων ακουστικών σημάτων $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$ σε ένα εύρος συχνοτήτων $-f_{sam}/2 \leq f \leq f_{sam}/2 \Rightarrow -20000 \leq f \leq 20000$.

Τέλος, μέσω της διαδικασίας downsampling στα ακουστικά σήματα $z_1(n), z_2(n), z_3(n)$ μειώνεται η f_{sam} σε $f_{sam}/4$:

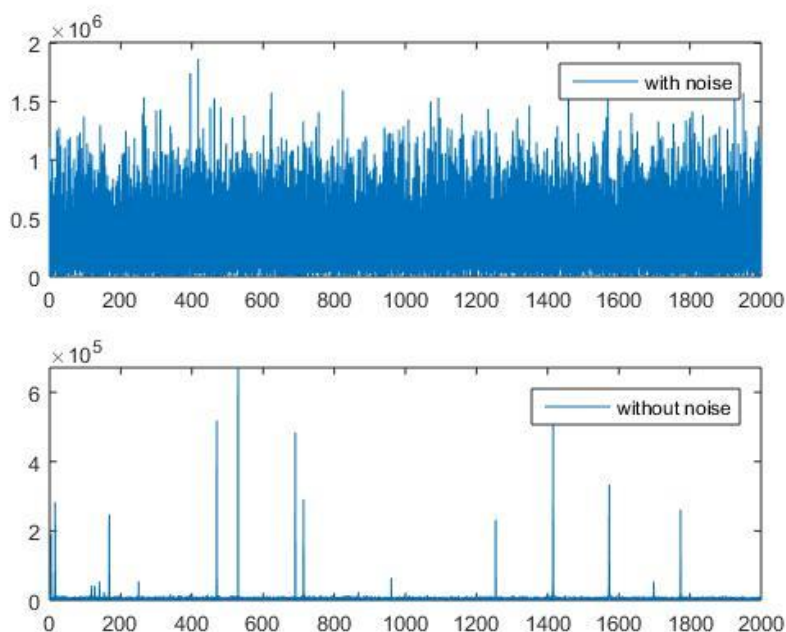
$$\hat{s}_k(n) = \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{z}_k(L \cdot n + l) \right)$$



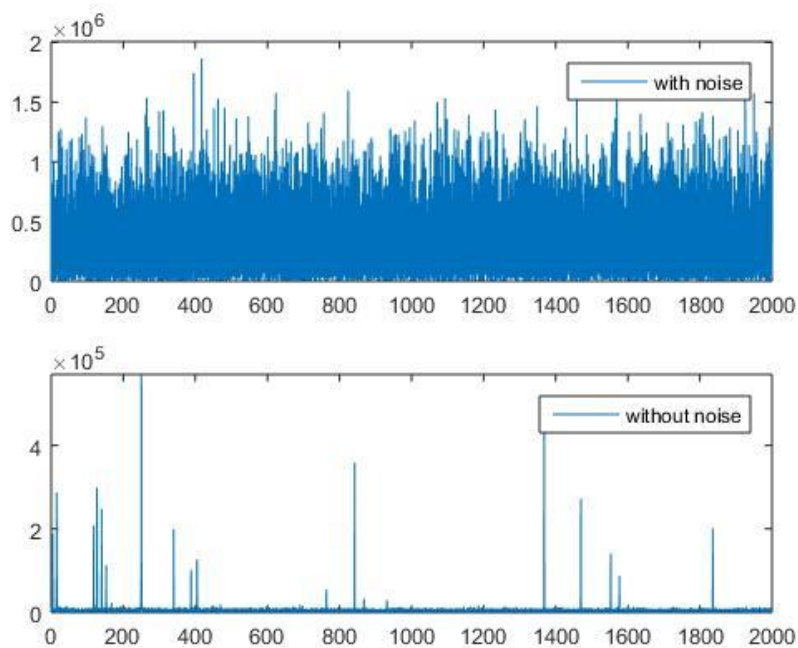
Εικόνα 6.27 Διάγραμμα downsampling

Τελικά, ο αλγόριθμος υπολογίζει εκ νέου το μετασχηματισμό FOURIER των εξαγόμενων σημάτων $\hat{s}_k(n)$. Τα προκύπτοντα σήματα $\hat{S}_k(f)$, με την κατάλληλη επεξεργασία απεικονίζουν την πυκνότητα φασματικής ισχύος των ληφθέντων ακουστικών σημάτων $\hat{s}_k(n)$ στο νέο πλέον εύρος συχνοτήτων $-f_{sam}/2L \leq f \leq f_{sam}/2L \Rightarrow -5000 \leq f \leq 5000$.

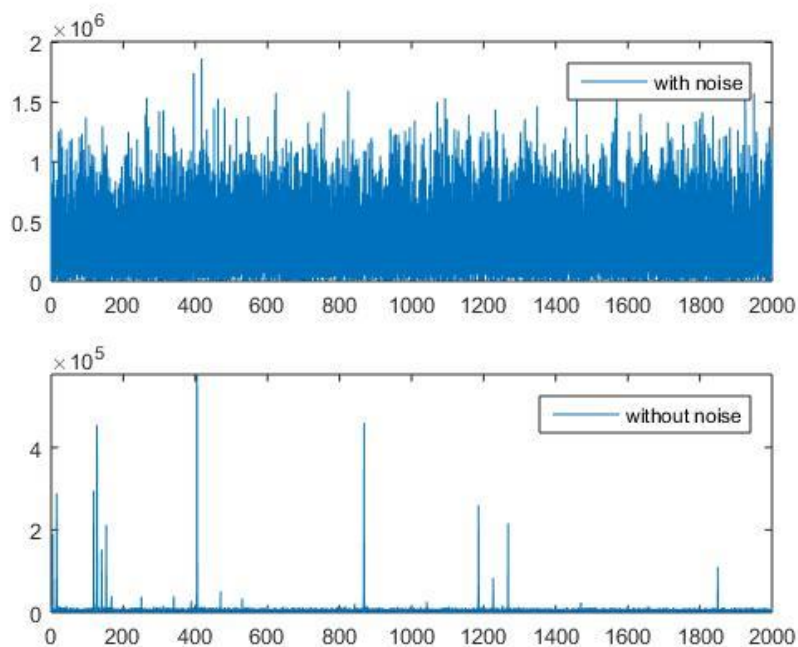
Η νέα πυκνότητα φασματικής ισχύος που προκύπτει, απεικονίζεται όπως και στις προηγούμενες προσομοιώσεις, μόνο στο απαραίτητο εύρος συχνοτήτων, δηλαδή από μηδέν έως 2kHz. Η χαμηλή δειγματοληψία φαίνεται να αποδίδει και μάλιστα έχει το πλεονέκτημα ότι μειώνει τους υπολογισμούς και άρα τις ανάγκες για υπολογιστική ισχύ. Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή φασματικής ισχύος για τους τρεις στόχους, μετά από την επεξεργασία της καταγραφής.



Εικόνα 6.28 Σύγκριση ασματικής κατανομής πρώτου στόχου



Εικόνα 6.29 Σύγκριση ασματικής κατανομής δεύτερου στόχου



Εικόνα 6.30 Σύγκριση ασματικής κατανομής τρίτου στόχου

§7. Σύνοψη κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύχθηκε το τμήμα της εργασίας που αφορά την προσομοίωση. Παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα από διάφορες προσομοιώσεις και για διάφορες τιμές του συντελεστή SNR. Στην αρχή ορίστηκε ο συντελεστής να είναι πολύ ευνοϊκός με το εκπεμπόμενο από το στόχο σήμα να είναι ισχυρότερο και να επικρατεί του θορύβου. Στη συνέχεια ελέγχθηκε η απόδοση του αλγορίθμου για σήμα ίσης ισχύος με το θόρυβο. Στο επόμενο στάδιο δοκιμάστηκε η αξιοπιστία του αλγορίθμου σε ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες όπου ο θόρυβος είναι περίπου 300 φορές ισχυρότερος από το σήμα. Παρά τη δυσκολία, ο αλγόριθμος απέδωσε και τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά. Τέλος προσομοιώθηκε ένα σενάριο με χαμηλότερη συχνότητα δειγματοληψίας και θόρυβο δεκαπλάσιο του σήματος. Αυτό δίνει τη δυνατότητα χρήσης μικρότερης υπολογιστικής ισχύος και αποδίδονται σε συντομότερο χρονικό διάστημα τα αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος έχει αναπτυχθεί σε Matlab εξαιτίας των πολλών πλεονεκτημάτων (έναντι των παραδοσιακών γλωσσών προγραμματισμού) που προσφέρει, όπως αποτελεσματικές ρουτίνες επεξεργασίας π.χ. φίλτρα, FFT αλλά και πράξεις πινάκων, εκτεταμένες δυνατότητες γραφικών αποτύπωσης, εργαλεία για τη δημιουργία εφαρμογών GUI (σε μελλοντική εξέλιξη του παρόντος αλγορίθμου) καθώς και δυνατότητες για real time επεξεργασία σήματος με σχετική ευκολία. Συμπερασματικά, στην παρούσα κατάσταση της, η προσομοίωση φαίνεται ικανή να προσομοιώσει πολλαπλά σενάρια.

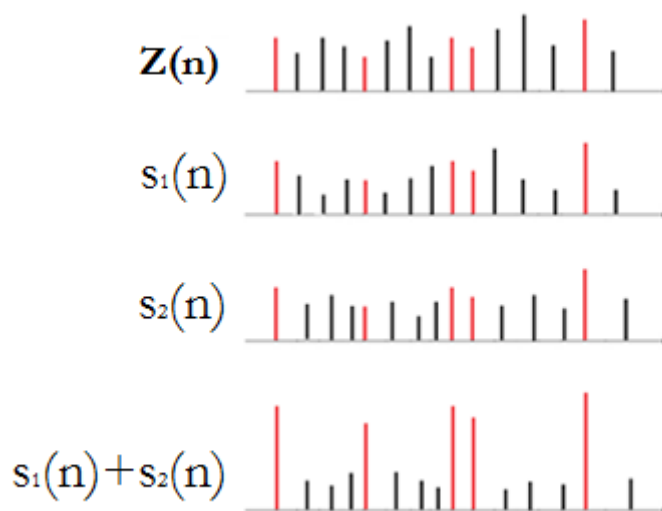
7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Επεξεργασία πραγματικών ακουστικών σημάτων

Ο σκοπός του ακόλουθου προγράμματος και σε συνέχεια της προαναφερθείσας προσομοίωσης, είναι με χρήση των τεχνικών επεξεργασίας σήματος, να καταπιεστεί ο θόρυβος από πραγματικές πλέον μετρήσεις, σε πραγματικές συνθήκες προκειμένου να γίνει εντοπισμός και ταυτοποίηση ενός πραγματικού στόχου. Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα. Το πρώτο αφορά την καταγραφή από ένα υδρόφωνο, με συχνότητα δειγματοληψίας 8000Hz, ενός σιάφους και την επεξεργασία του σήματός του, προς ανάδειξη της ηχητικής του υπογραφής. Για την πραγματοποίηση του δεύτερου πειράματος, καταγράφηκε η διέλευση ενός σιάφους από τρία στατικά υδρόφωνα, ποντισμένα σε 15,30 και 45 μέτρα βάθους αντίστοιχα. Το σιάφος πραγματοποίησε διελεύσεις, από τις οποίες προέκυψαν 16 καταγραφές για κάθε υδρόφωνο. Αυτές οι καταγραφές είναι πολύτιμες για την εξαγωγή συμπερασμάτων, καθώς σε ένα απόλυτα ελεγχόμενο πειραματικό περιβάλλον τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα. Συνεπώς, με αυτό τον τρόπο, δοκιμάζεται η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου και εντοπίζονται οι αδυναμίες του. Ο μικρός αριθμός υδροφώνων εξισοροπείται από την υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας που παρέχουν τα μεγάλης ακρίβειας και ποιότητας υδρόφωνα. Είναι λοιπόν εφικτή η διεξαγωγή πειραμάτων από τα οποία θα μπορούσαν εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τις ικανότητες του αλγορίθμου.

§1. Επεξεργασία ακουστικών σημάτων από ένα υδρόφωνο

Το πειραματικό μέρος της εργασίας ξεκινά με την επεξεργασία αποτελεσμάτων από ένα μόνο υδρόφωνο. Τα δεδομένα προέρχονται από διεξαγωγή παλαιότερου πειράματος κατά το οποίο είχε καταγραφεί με συχνότητα δειγματοληψίας 8000 Hz, η διέλευση ενός σκάφους και είχε γίνει επεξεργασία και ανάδειξη της φασματικής κατανομής του. Η διαδικασία περιελάμβανε την καταγραφή σε αρχείο wav και στη συνέχεια την εφαρμογή downsampling. Με την εφαρμογή downsampling ο θόρυβος συμπιέζεται, ενώ ταυτόχρονα το σήμα αναδεικνύεται. Στις ρέπλικες οι οποίες προκύπτουν, το σήμα παραμένει, ενώ αντίθετα ο θόρυβος, λόγω της τυχαιότητας που τον διέπει, παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Εάν στη συνέχεια αθροιστούν οι ρέπλικες, οι συχνότητες του σήματος θα εμφανιστούν ιδιαίτερα ενισχυμένες, σε αντίθεση με τις συχνότητες που παράγονται ως αποτέλεσμα του θορύβου. (Πηγή: Δεσσαλέριμος Σπυρίδων). Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό.



Εικόνα 7.1 Αθροισή downsampled δειγμάτων

Υποθέτοντας ότι το σήμα ενδιαφέροντος είναι σημειωμένο με κόκκινες φασματικές γραμμές και ο θόρυβος με μαύρες, στην εικόνα 7.1 παρουσιάζεται η αποσύνθεση και επανασύνθεση του σήματος. Το ληφθέν σήμα $z[n]$ υφίσταται downsampling σύμφωνα με τη σχέση (7.1.1)

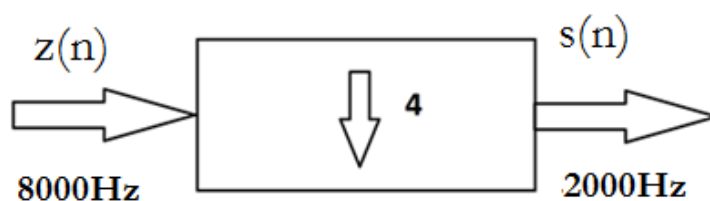
$$S(n) = \begin{cases} s_1[n] & \text{για } n \in [1, 5, 9, \dots, 1+4i, \dots] \quad \mu\epsilon \quad i \in N \\ s_2[n] & \text{για } n \in [2, 6, 10, \dots, 2+4i, \dots] \quad \mu\epsilon \quad i \in N \\ s_3[n] & \text{για } n \in [3, 7, 11, \dots, 3+4i, \dots] \quad \mu\epsilon \quad i \in N \\ s_4[n] & \text{για } n \in [4, 8, 12, \dots, 4+4i, \dots] \quad \mu\epsilon \quad i \in N \end{cases} \quad (7.1.1)$$

Δημιουργούνται έτσι τέσσερις ρέπλικες s_1, s_2, s_3, s_4 .

Κάθε ρέπλικα υφίσταται μετασχηματισμό FOURIER σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$S(f) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) W_N^{nk}, k = 0, 1, \dots, N-1$$

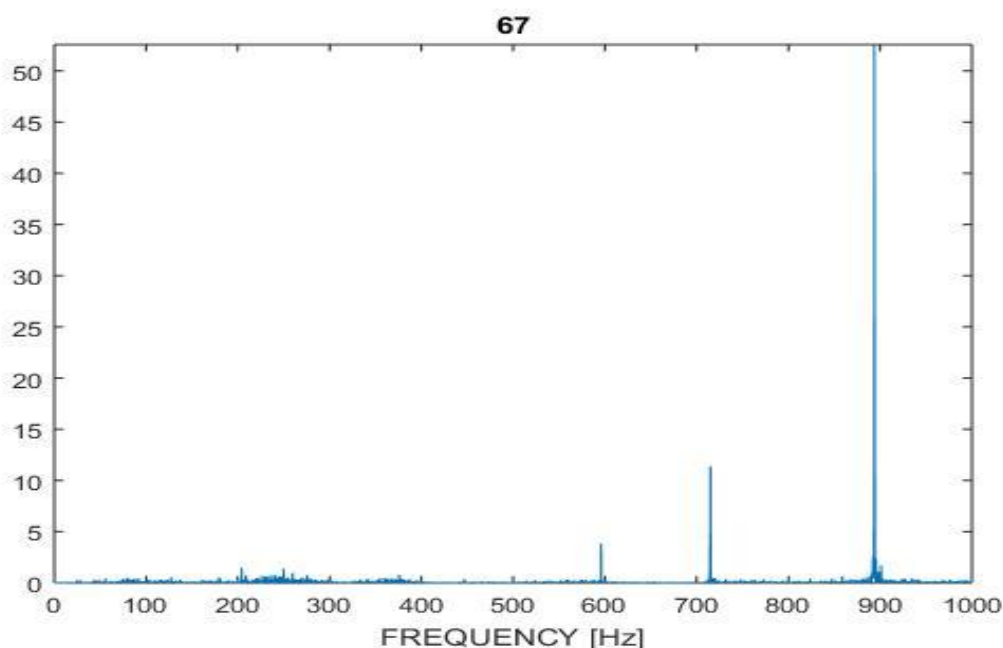
Με την παραπάνω επεξεργασία λαμβάνεται η πυκνότητα της φασματικής ισχύος του σήματος στο εύρος συχνοτήτων $-f_{sam}/8 \leq f \leq f_{sam}/8 \Rightarrow -1000 \leq f \leq 1000$ και αυτό δι' ότι η εν λόγω διαδικασία με συντελεστή $L=4$, επεξεργάζεται το ακουστικό σήμα και το μειώνει από f_{sam} σε $f_{sam}/4$:



Εικόνα 7.2 Διάγραμμα downsampling

Έτσι προκύπτουν τέσσερις φασματικές κατανομές του ίδιου σήματος οι οποίες όμως δεν είναι ίδιες. Με αυτή τη μέθοδο, το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με αυτό που θα προέκυπτε από τέσσερις ανεξάρτητες καταγραφές, με μικρότερη όμως δειγματοληψία. Στη συνέχεια και με άθροισή τους (όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.1) παράγεται μια φασματική κατανομή με ενισχυμένο το σήμα ενδιαφέροντος και καταπιεσμένο το θόρυβο.

Τελικά, η νέα πυκνότητα φασματικής ισχύος που προκύπτει έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος από αυτό που πραγματικά απαιτείται στα πλαίσια της αναγνώρισης του στόχου. Γι αυτό παρουσιάζεται το φάσμα από μηδέν έως 1kHz. Το κάθε χρονικό παράθυρο εύρους ενός δευτερολέπτου, παράγει τις δικές του κυρίαρχες συχνότητες. Αυτές οι κυρίαρχες συχνότητες σε κάθε χρονικό παράθυρο έχουν άμεση σχέση μεταξύ τους, καθώς οι όποιες μεταβολές είναι αργές για το χρονικό διάστημα του ενός δευτερολέπτου. Ενδεικτική φασματική κατανομή του εξηκοστού εβδόμου δευτερολέπτου παρατίθεται στην εικόνα 7.3.

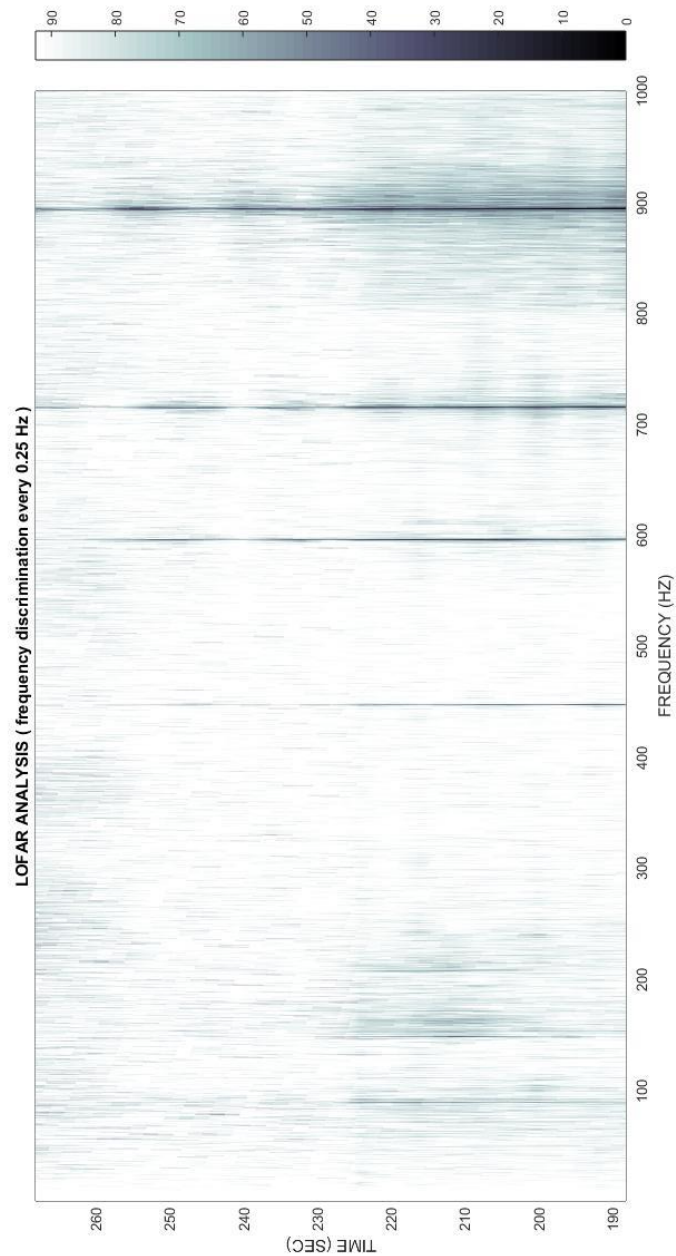


Εικόνα 7.3 Φασματική κατανομή του εξηκοστού εβδόμου δευτερολέπτου

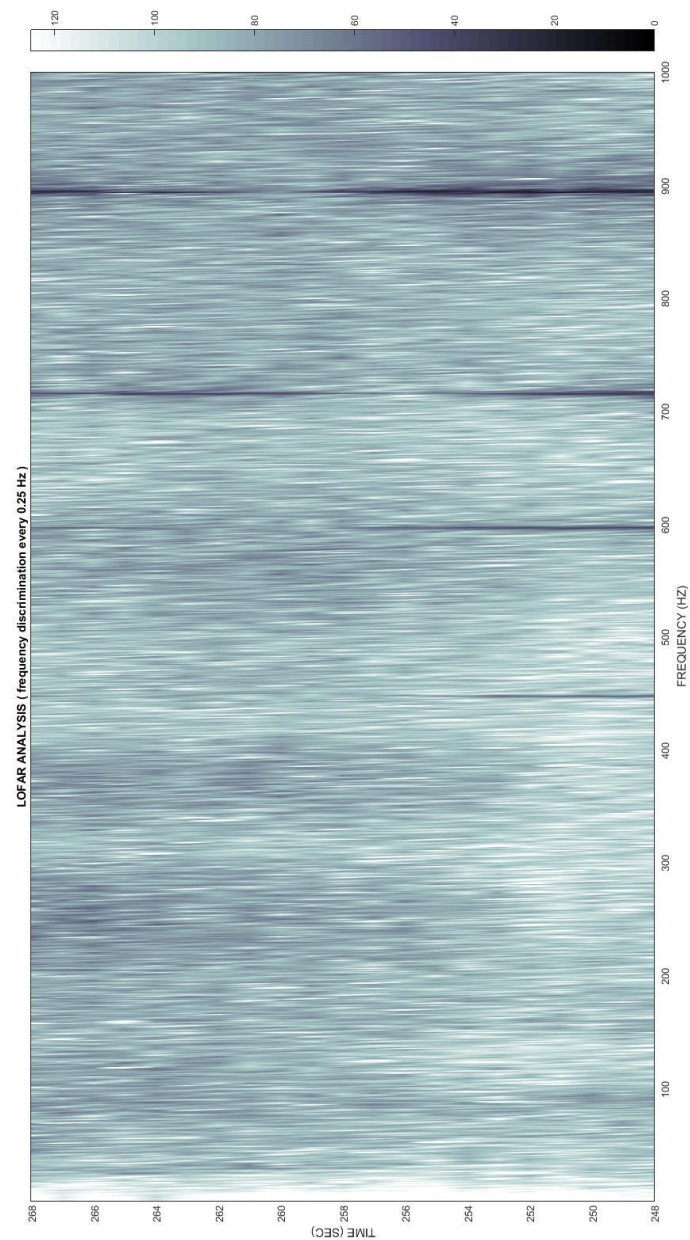
Απο την καταγραφή του σιάφους προέκυψε λοιπόν η παραπάνω φασματική κατανομή με έντονη εκπομπή στις συχνότητες που παρουσιάζουν μέγιστο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε δευτερόλεπτο και εφαρμόζεται μέθοδος overlapping των φασματικών κατανομών οι οποίες είναι συνάρτηση του χρόνου. Συνθέτεται λοιπόν το παρακάτω μοντέλο καταράκτη, στο οποίο κάθε χρονικό παράθυρο που απεικονίζεται προκύπτει από τη σχέση:

$$P''_t(f) = 0,6 \cdot P'_t(f) + 0,2 \cdot \sum_{n=-2}^{-1} P_{t+n}(f) + 0,2 \cdot \sum_{n=1}^2 P_{t+n}(f) \quad 3 \leq t \leq t_{ol} - 3 \quad (7.1.2)$$

Όπου t είναι διακριτή μεταβλητή και αντιστοιχεί στο ελάχιστο δευτερόλεπτο της καταγραφής. Για την εξαγωγή της φασματικής εικόνας κατά το t δευτερόλεπτο λαμβάνονται υπ' όψιν οι φασματικές κατανομές των $t-2$, $t-1$, t , $t+1$, $t+2$. Το αποτέλεσμα είναι η καλύτερη ανάλυση της εικόνας του καταράκτη μέσα από τη διαδικασία που ονομάζεται overlapping.



Εικόνα 7.4 Φασματική κατανομή του εξηκοστού εβδόμου δευτερολέπτου με downsampling



Εικόνα 7.5 Φασματική κατανομή του εξηκοστού εβδομού δευτερολέπτου χωρίς downsampling

Παρατηρώντας τις εικόνες 7.4 και 7.5 είναι εύκολο να διαπιστωθεί η σημασία του downsampling ιδιαίτερα στην προσπάθεια ανίχνευσης χαμηλών συχνοτήτων (μέχρι 400 Hz). Η διαδικασία αυτή συμπίεσε τις τυχαίες συχνότητες που παρεμπόδιζαν την εξόρυξη του σήματος και έδωσε μια πολύ πιο ξεκάθαρη εικόνα της φασματικής κατανομής του σκάφους. Ορισμένες συχνότητες (τέσσερις για την αρίβεια) είναι πολύ ισχυρές για να καταπιεστούν ακόμα και χωρίς downsampling. Εκτός όμως από αυτές, οι υπόλοιπες που όπως θα παρατηρήσει κανείς στην εικόνα 7.4 υπάρχουν, και βρήσκονται χαμηλά στη φασματική κατανομή, χάνονται εντός του περιβάλλοντος θορύβου. Η διαδικασία του downsampling, αποτελεί την καλύτερη απόδειξη ότι μια λήψη μπορεί με την κατάλληλη επεξεργασία να αποκαλύψει πληροφορίες, οι οποίες εκ πρώτης όψεως φαίνεται (ψευδώς) ότι δεν υπήρχαν. Γι αυτό το λόγο η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε τόσο στις προσομοιώσεις, όσο και στα πειραματικά μέρη της παρούσας εργασίας και έπαιξε κύριο ρόλο στην εξόρυξη των σημάτων.

§2. Επεξεργασία ακουστικών σημάτων από συστοιχία

Για την επεξεργασία πραγματικών ακουστικών σημάτων έγινε χρήση μιας καταγραφής από τρία υδρόφωνα τοποθετημένα σε βάθη 15,30 και 45 μέτρα βάθος αντίστοιχα όπου είχε καταγραφεί η διέλευση ενός σκάφους σε συγκεκριμένη απόσταση. Αν και ο αριθμός των υδρόφωνων ήταν μικρός τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Επιτεύχθηκε ανίχνευση της θέσης του σκάφους καθώς και της μεταβολής της σε σχέση με το χρόνο.

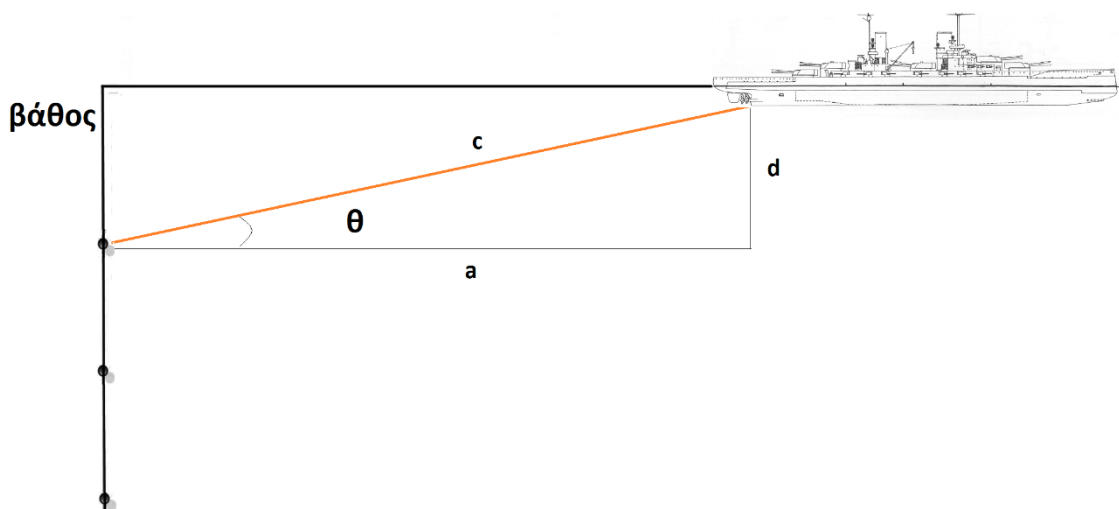
Το πρόγραμμα λαμβάνει την καταγραφή, και δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τα δευτερόλεπτα τα οποία θα αποκοπούν προκειμένου να υλοποιηθεί το μέρος του προγράμματος που αφορά την DOA. Στη συνέχεια υπολογίζεται η θέση του στόχου από τον τύπο:

$\sin \theta = \frac{d}{c}$ όπου d η απόσταση των υδρόφωνων, a η απόσταση του στόχου και c η αντίστοιχη υποτείνουσα του τριγώνου που σχηματίζεται.

Γνωρίζοντας ότι το σκάφος κινήθηκε περίπου 70 μέτρα από τη συστοιχία, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η αναμενόμενη από τον αλγόριθμο γωνία.

$$\sin \theta = \frac{15}{70} \Rightarrow \sin \theta = 0,22 \Rightarrow \theta = \sin^{-1} 0,22 \Rightarrow \theta = 12,7^\circ$$

Αναμένεται λοιπόν μια γωνία περίπου 13 μοιρών.



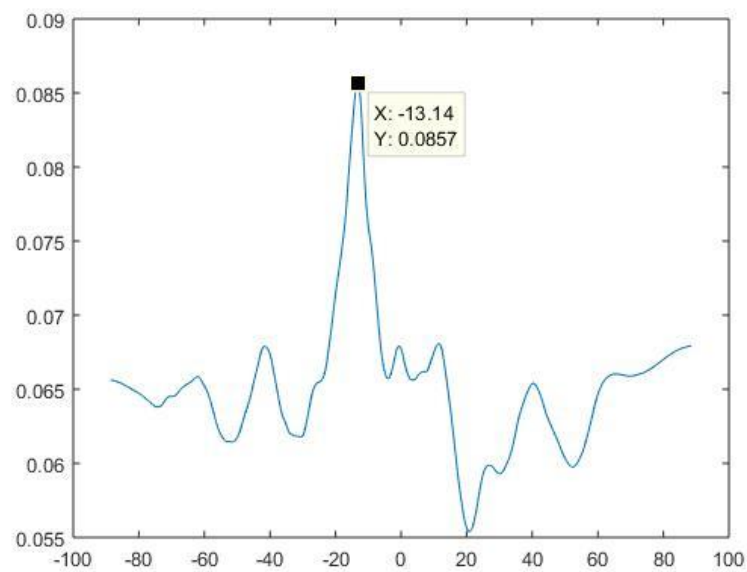
Εικόνα 7.6 Σχετική γωνία συστοιχίας και προσπίπτοντος ηχητικού σήματος

Στην εικόνα 7.1 παρουσιάζεται η γεωμετρία του πειράματος, οι αποστάσεις και η γωνία της ηχητικής ακτίνας που κατεθύνεται από το σκάφος, προς τη συστοιχία των τριών υδροφώνων

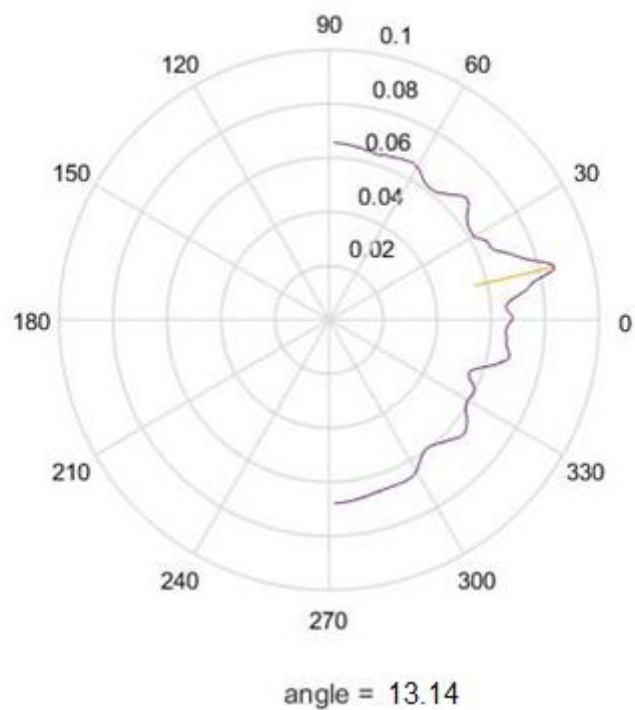
Η σχέση από την οποία θα προκύψει η κατανομή της ισχύος σαν συνάρτηση της γωνίας είναι:

$$P(\theta_i) = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m(n + m\tau_i) \right)^2 = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m\left(n + m \frac{d}{c} \sin \theta_i\right) \right)^2, \quad -90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για το χρονικό διάστημα από 20 έως 30 sec της καταγραφής προκύπτει το διάγραμμα της παρακάτω εικόνας. Σε αυτό εντοπίζεται ένα ξακάθαρο μέγιστο στις -13,14 μοίρες, εξαιρετικά κοντά στην αναμενόμενη τιμή. Επειδή σίγουρα θα υπάρχουν ανακλάσεις, παρατηρούνται μικρότερα τοπικά μέγιστα διάφορες γωνίες.



Εικόνα 7.7 DOA στόχου



Εικόνα 7.8 DOA στόχου (πολικό διάγραμμα)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται η κατανομή της ενέργειας ανά γωνία. Με πορτοκαλί σημειώνεται η γωνία η οποία δέχεται την περισσότερη ενέργεια και αντιστοιχεί σε 0,23 rad. Το ξεκάθαρο μέγιστο παρατηρείται τόσο στην εικόνα 7.2 όσο και στην εικόνα 7.3. Η ισχύς για τη συγκεκριμένη γωνία θα είναι:

$$P(0,23) = \left(\frac{1}{3} \sum_{m=0}^2 f_m(n + m\tau_{0,23}) \right)^2 = \left(\frac{1}{3} \sum_{m=0}^2 f_m\left(n + m \frac{15}{1480} \sin(0,23)\right) \right)^2$$

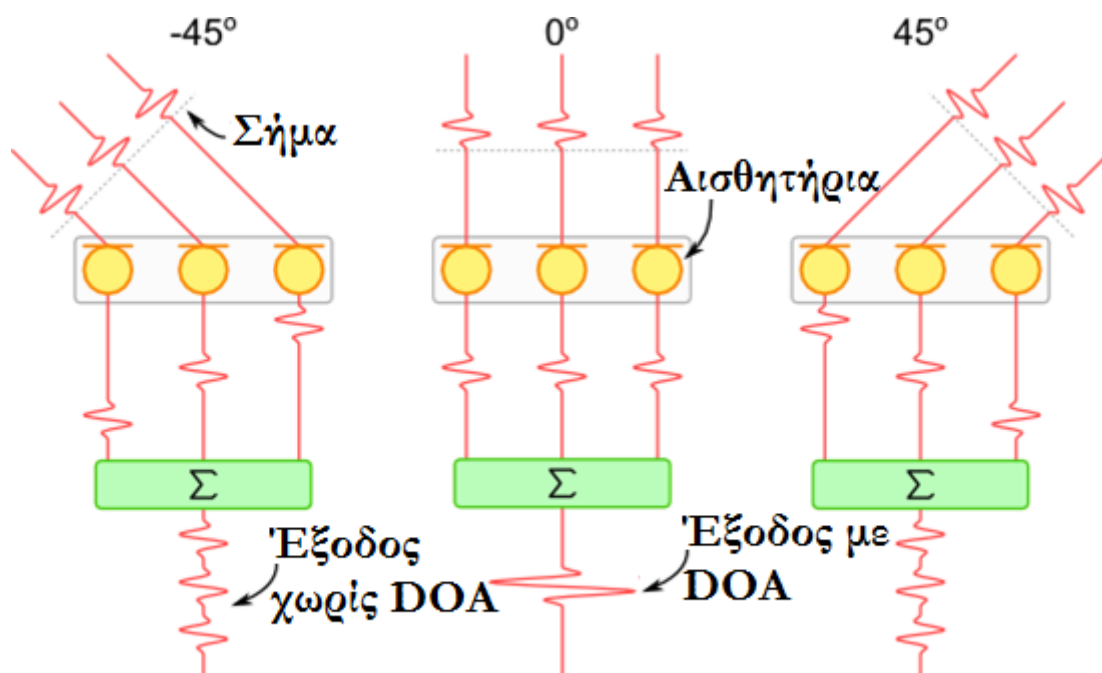
Από τη στιγμή πλέον που είναι γνωστή η κατεύθυνση της ηχητικής πηγής, θα πρέπει να στραφεί ηλεκτρονικά η συστοιχία προκειμένου ο κύριος λοβός να στοχεύει προς τη γωνία που παρουσίασε τη μέγιστη ισχύ. Υπολογίζεται λοιπόν στη συνέχεια η χρονική καθυστέρηση Δt_i που θα πρέπει να προστεθεί σε κάθε υδρόφωνο, προκειμένου να στραφεί ο κύριος λοβός κατά γωνία θ_{\max} .

Με $fs = 65536 \text{ samples / second}$

$$\Delta t = \frac{\text{dist}}{u} = \frac{15 \cos(13,14)}{1480} = 0,0098 \text{ sec} = 9,8 \text{ msec}$$

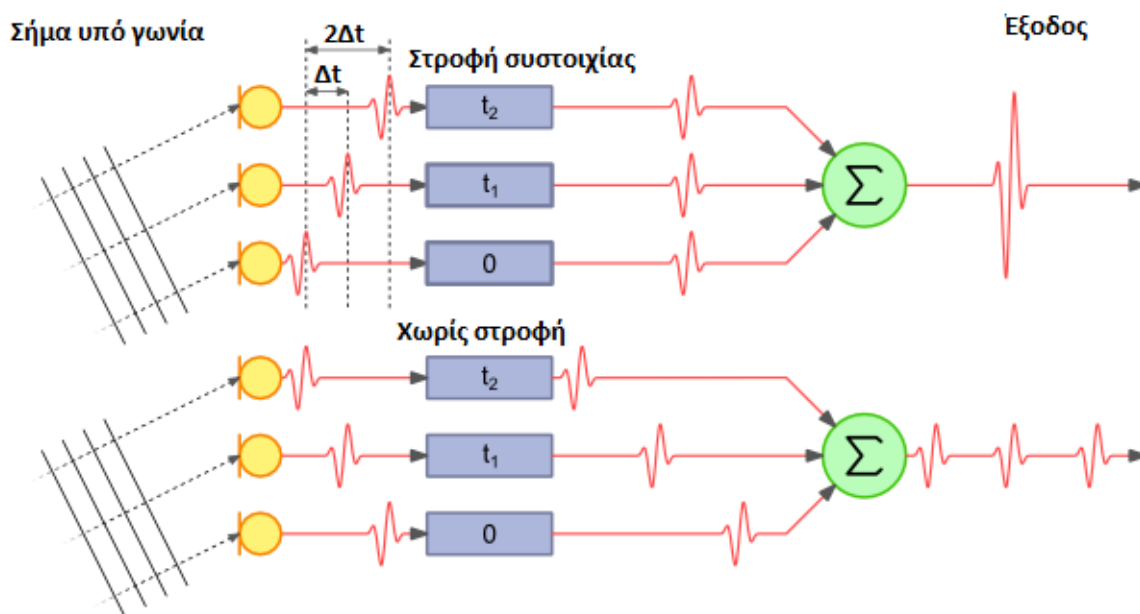
$$\Delta \text{samples} = 65536 * 0,009 = 646,8254 \approx 647$$

$$z(t) = \frac{1}{3} \sum_{m=0}^2 f_m(t + 0,0098m)$$



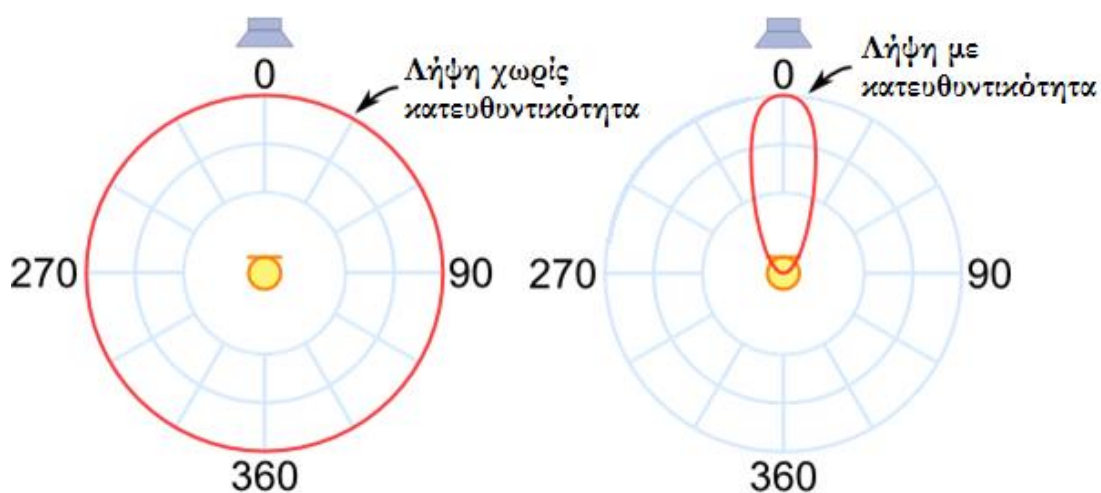
Εικόνα 7.9 Εκμετάλλευση Beamformation προς μείωση θορύβου

Στο m -οστό υδρόφωνο λοιπόν θα πρέπει να προστεθεί μια καθυστέρηση ή προπόρευση κατά $\Delta isamples = 645 * m$. Το αν θα πρέπει να προστεθούν ή να αφαιρεθούν απο κάθε υδρόφωνο αυτά τα δείγματα, εξαρτάται από το πρόσημο της γωνίας και ο λόγος είναι εμφανής στην προηγούμενη εικόνα. Στην πράξη εξαρτάται από το ποιο υδρόφωνο είναι το πλησιέστερο στην πηγή. Στρογγυλοποιήσεις του αριθμού των δειγμάτων επιβάλλεται να γίνουν διότι δεν νοείται δεκαδικός αριθμός τους. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η διαδικασία της υστέρησης που προκαλείται σκόπιμα στο κάθε υδρόφωνο, προκειμένου η έξοδος να είναι ένα ενισχυμένο σήμα με ταυτόχρονη συμπίεση του θορύβου. Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή με απλή άθροιση των καταγραφών, όπως φαίνεται και στην εικόνα, το σήμα διασκορπάζεται χρονικά και δεν αποδίδεται το ίδιο ικανοποιητικό αποτέλεσμα με πριν.



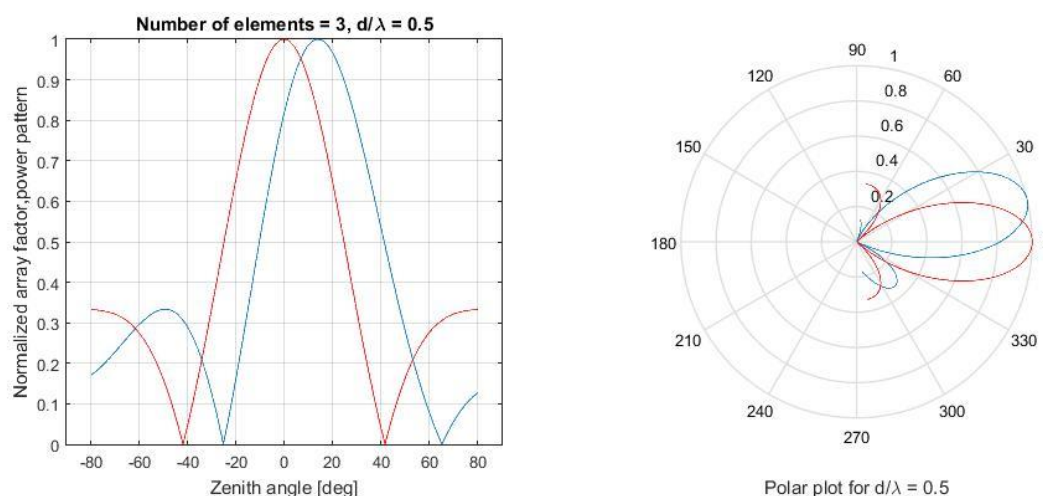
Εικόνα 7.10 Correlation σημάτων

Τέλος δημιουργείται η σύνθεση. Ένα αρχείο wav το οποίο περιέχει την καταγραφή όπως θα είχε γίνει εάν η πηγή βρισκόταν εντός στον κύριου λοβού. Πρόκειται για τη βέλτιστη δυνατή καταγραφή που θα δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα.



Εικόνα 7.11 Σχηματισμός κύριου λοβού έναντι ομοιοκατευθυντικής καταγραφής

Όπως έχει προειπωθεί, η απόσταση μεταξύ των υδροφώνων είναι που καθορίζει το μέγεθος και το σχήμα του κύριου λοβού. Αυτό είναι που κάνει τη συστοιχία να έχει καλύτερη απόκριση σε ορισμένες συχνότητες. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται ο κύριος λοβός για τη συχνότητα των 50Hz (μέγιστη απόκριση για τη συστοιχία του πειράματος) καθώς και η στρέψη του προς το στόχο (13,14 μοίρες). Ο λοβός είναι αρκετά διευρυμένος και εμφανίζει και δυο δευτερεύοντες λοβούς δεξιά και αριστερά αυτού.

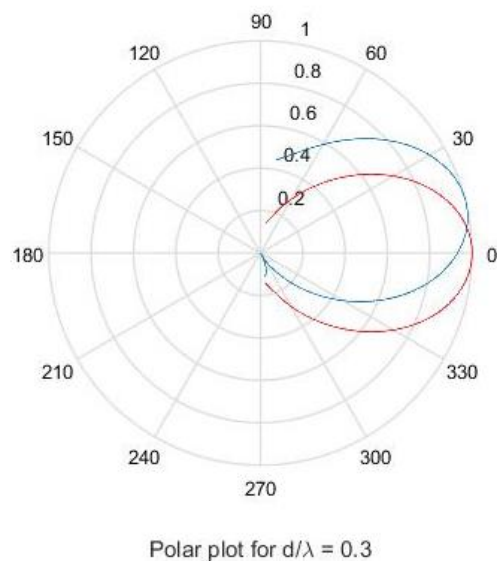
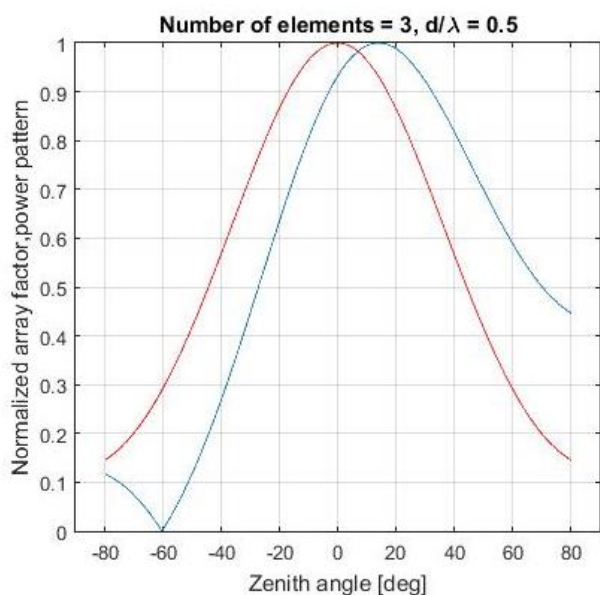


Εικόνα 7.12 Στρέψη κύριου λοβού προς στόχο για $d/\lambda=0.5$

Γενικά υποθέτοντας μια γραμμική συστοιχία με N υδροφωνα διατεταγμένα σε απόσταση d μεταξύ τους, στα οποία έχει αποδοθεί το ίδιο βάρος, δηλαδή $w_1 = w_2 = \dots = w_M$ και η φάση του m -οστού υδροφώνου είναι αυξημένη κατά i σε σχέση με αυτή του $m-1$ υδροφώνου η συστοιχία εκτός από γραμμική λέγεται και ομοιόμορφη. Σε αυτή την περίπτωση η κανονικοποιημένη ενέργεια δίνεται από τη σχέση:

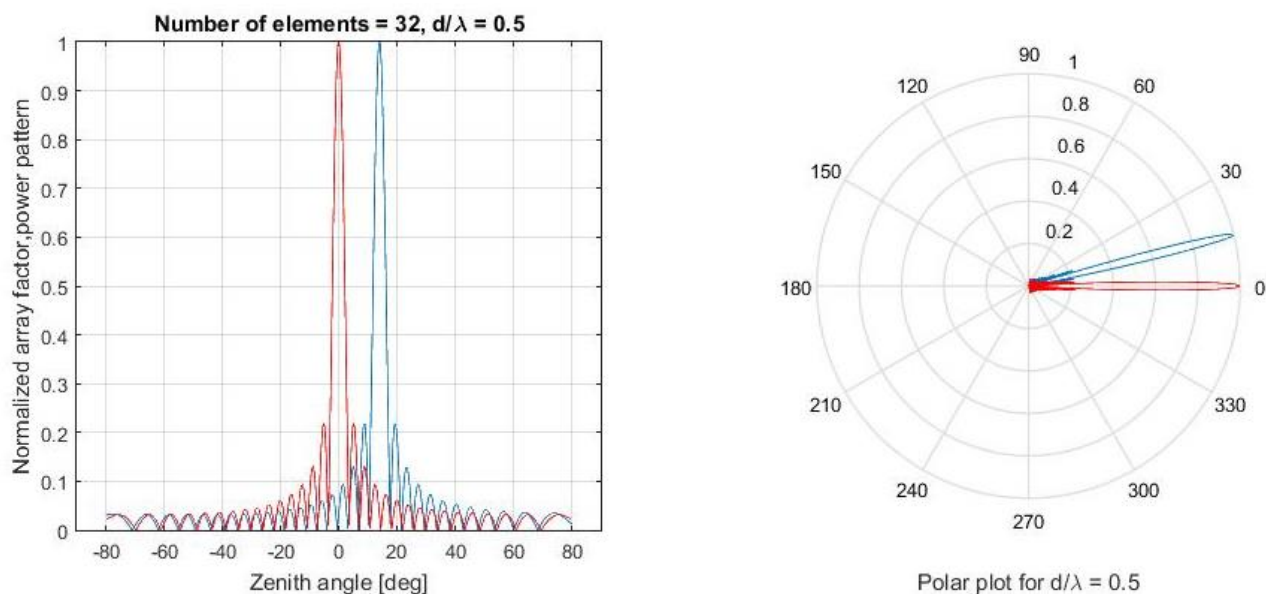
$$E(\varphi) = \frac{1}{M} \frac{\sin \left[\frac{M}{2} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \varphi + i \right) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \varphi + i \right) \right]} \quad (7.2.1)$$

Αυτή είναι η σχέση που δίνει τις παραπάνω γραφικές. Βέβαια το λ είναι το μήκος κύματος και άρα από αυτό προκύπτει η συχνότητα για την οποία ο λοβός έχει αυτό το σχήμα. Για διαφορετική συχνότητα ο λοβός δεν έχει την ίδια αποδοτικότητα π.χ. για $f=100\text{Hz}$ προκύπτει:



Εικόνα 7.13 Στρέψη κύριου λοβού προς στόχο για $d/\lambda=0.3$

Στην εικόνα 7.8 παρατηρείται ότι ο κύριος λοβός αποκτά μεγαλύτερο εύρος, άρα λιγότερο καλή απόκριση/ευαισθησία. Παρ' όλα αυτά, ο λοβός παραμένει ικανοποιητικά προσανατολισμένος προς το στόχο. Για $N=32$ και $d=1$ για τη συχνότητα των 744 Hz θα παρατηρούνταν οι λοβοί της εικόνας 7.9, οι οποίοι θα είχαν ακόμα καλύτερη συμπίεση του θορύβου λόγω του μικρού τους πλάτους, και άρα πολύ καλύτερη εστίαση, προς το στόχο. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι εστίαση δεν σημαίνει ότι αποσβένεται πλήρως είτε ο θόρυβος του περιβάλλοντος, είτε το σήμα από τυχόν άλλους στόχους. Το κέρδος του beamforming είναι μια καλύτερη ευαισθησία στο σήμα του στόχου. Στην καταγραφή αναπόφευκτα θα υπάρχει θόρυβος, ανεξάρτητα από το εύρος του λοβού και γι αυτό απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία του σήματος.

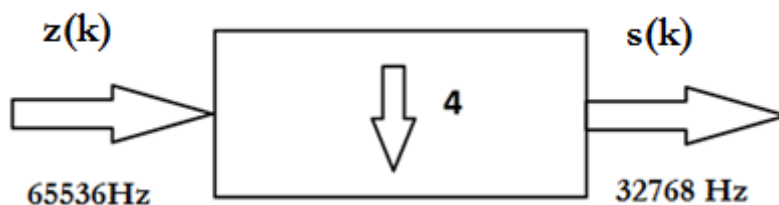


Εικόνα 7.14 Στρέψη κύριου λοβού προς στόχο με 32 υδροφωνα

Εν συνεχεία, ο αλγόριθμος αφού στρέψει ηλεκτρονικά τον κύριο λοβό στη διεύθυνση της μέγιστης ισχύος $\hat{\theta} = 13,14^\circ$, υπολογίζει τις αντίστοιχες αριθμητικές εκτιμήσεις της ακουστικής υπογραφής. Λόγω της εστίασης του κυρίου λοβού στην DOA, λαμβάνεται και ενισχύεται το ακουστικό σήμα (υπογραφή) από την συγκεκριμένη κατεύθυνση, συμπιέζοντας ταυτόχρονα τα λοιπά ακουστικά κύματα που αντιστοιχούν στον ισοτροπικό θόρυβο. Ο λοβός αυτός λόγω μικρού αριθμού υδροφώνων είναι αρκετά διευρυμένος όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.8 ενώ θα ήταν πολύ πιο στοχευμένη και ακριβής η αντίστοιχη καταγραφή που θα γινόταν με περισσότερα υδροφωνα. π.χ. εικόνα 7.9. Μια επιλογή που αναπτύχθηκε και προσφέρει ο αλγόριθμος είναι η επιλεκτική αποσόβηση υδροφώνων, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων με διαφορετική απόσταση μεταξύ υδροφώνων και άρα δυνατότητα μεταβολής του d . Έτσι δίδεται η δυνατότητα να μεταβληθεί ο λόγος d/λ και άρα η διακριτική ικανότητα σε συγκεκριμένες συχνότητες.

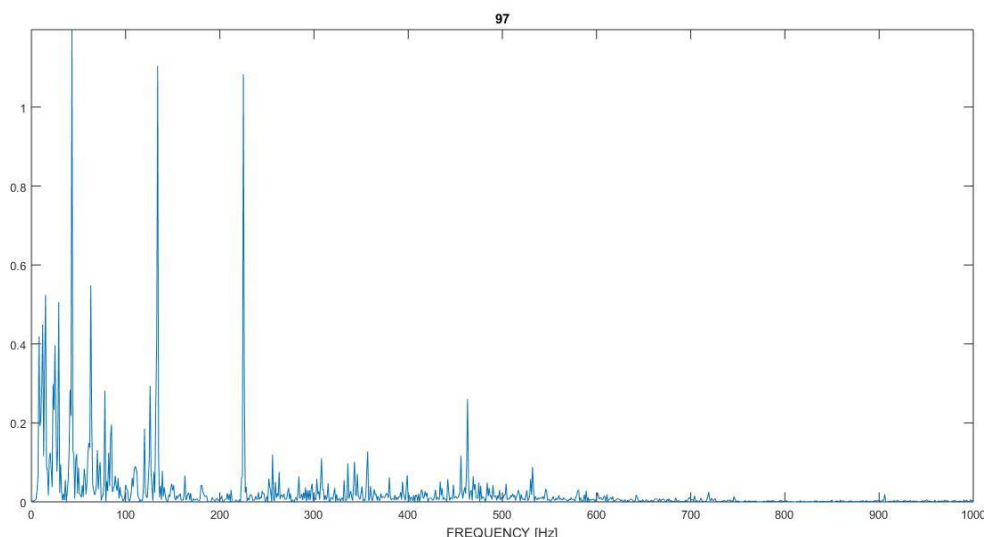
Εν συνεχεία, ο αλγόριθμος υπολογίζει τον μετασχηματισμό FOURIER. Το αποτέλεσμα του σήματος στο πεδίο της συχνότητας, με την κατάλληλη επεξεργασία απεικονίζει την πυκνότητα της φασματικής ισχύος του σήματος στο εύρος συχνοτήτων $-f_{sam}/2 \leq f \leq f_{sam}/2 \Rightarrow -32768 \leq f \leq 32768$. Όπως προαναφέρθηκε το απαραίτητο εύρος συχνοτήτων στο πλαίσιο της αναγνώρισης στόχων με χρήσης υφιστάμενων βιβλιοθηκών είναι κατά πολύ μικρότερο από αυτό που προκύπτει από την προαναφερθείσα διαδικασία. Σε αυτή την περίπτωση είναι χρήσιμη όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο η εισαγωγή της διαδικασίας του downsampling. Η εν λόγω διαδικασία με συντελεστή $L=4$, επεξεργάζεται το ακουστικό σήμα και μειώνει την f_{sam} σε $f_{sam}/4$:

$$\hat{s}_k(n) = \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{z}_k(L \cdot n + l) \right)$$



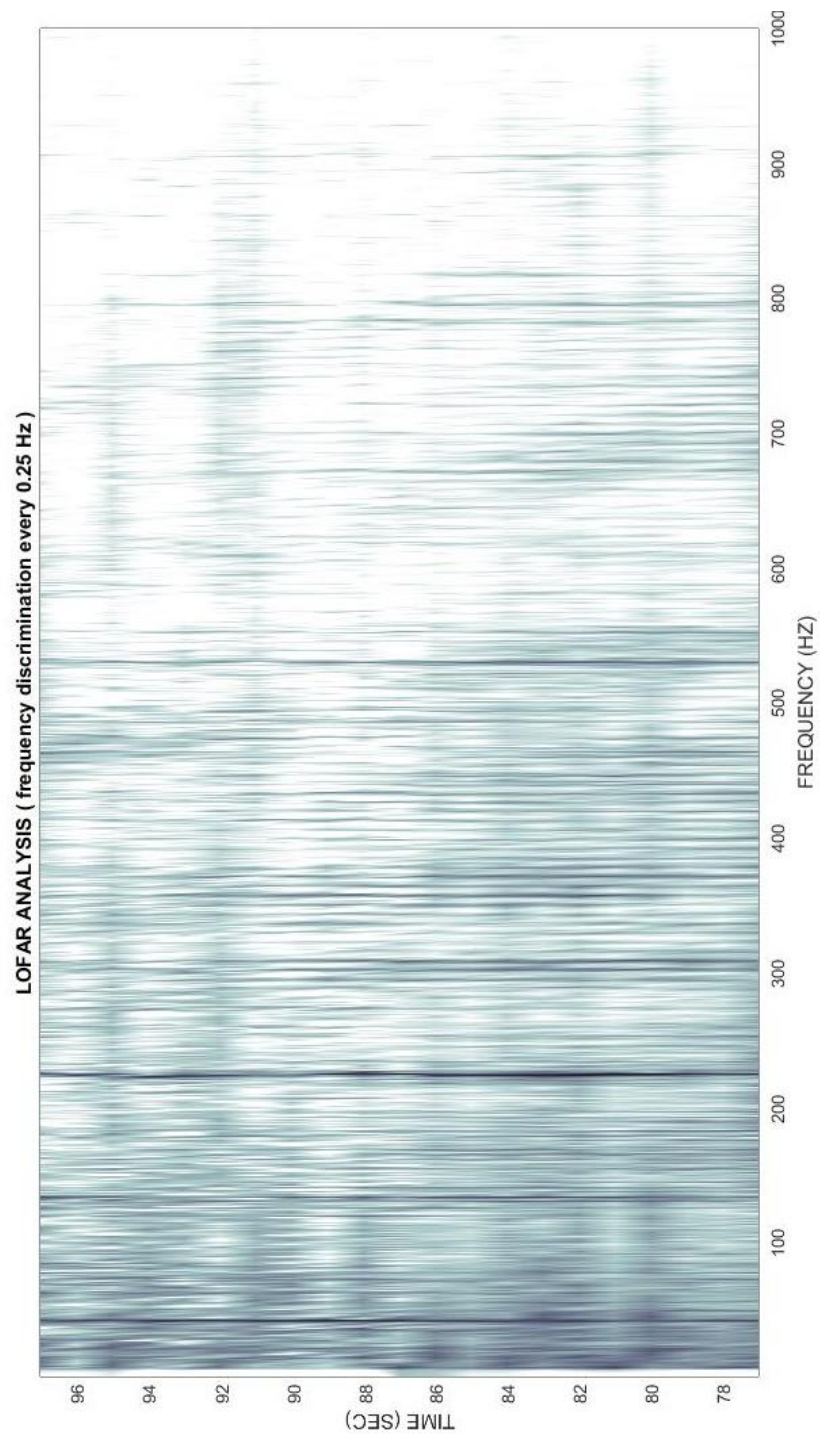
Εικόνα 7.15 Διάγραμμα downsampling

Τελικά, ο αλγόριθμος υπολογίζει εκ νέου το μετασχηματισμό FOURIER των εξαγόμενων σημάτων $\hat{s}_k(n)$. Το τελικό σήμα $\hat{S}_k(f)$, με την κατάλληλη επεξεργασία απεικονίζει την πυκνότητα φασματικής ισχύος του ληφθέντος ακουστικού σήματος $\hat{s}_k(n)$ στο νέο πλέον εύρος συχνοτήτων $-\frac{f_{sam}}{2L} \leq f \leq \frac{f_{sam}}{2L} \Rightarrow -16384 \leq f \leq 16384$. Τα αποτελέσματα $\hat{s}_1(n), \hat{s}_2(n), \hat{s}_3(n)$ χρησιμοποιούνται για την επανάληψη του αλγορίθμου και την εξαγωγή του αποτελέσματος με χρήση overlapping. Η νέα αυτή πυκνότητα φασματικής ισχύος που προκύπτει, έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος από αυτό που πραγματικά απαιτείται στα πλαίσια της αναγνώρισης του στόχου. Γι αυτό παρουσιάζεται το φάσμα από μηδέν έως 1kHz. Το κάθε χρονικό παράθυρο εύρους ενός δευτερολέπτου, παράγει τις δικές του κυρίαρχες συχνότητες. Αυτές οι κυρίαρχες συχνότητες σε κάθε χρονικό παράθυρο έχουν άμεση σχέση μεταξύ τους, καθώς οι όποιες μεταβολές είναι αργές για το χρονικό διάστημα του ενός δευτερολέπτου. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο μετασχηματισμός για το ενενηκοστό έβδομο δευτερόλεπτο της καταγραφής.



Εικόνα 7.16 Φασματική ανάλυση 97^{ου} δευτερολέπτου

Στο τέλος κατασκευάζεται το μοντέλο καταράκτης το οποίο αποτελεί τη σύνθεση όλων των μετασχηματισμών *fourier* που προέκυψαν για κάθε χρονικό παράθυρο. Πρόκειται για ένα τριών διαστάσεων διάγραμμα όπου ο άξονας x είναι ο άξονας των συχνοτήτων, y είναι ο άξονας του χρόνου και z είναι ο άξονας της ισχύος. Για τον υπολογισμό του κάθε χρονικού παραθύρου λαμβάνεται υπ' όψιν τόσο τα προηγούμενα όσο και τα επόμενα χρονικά παράθυρα. Επειδή η θέση του στόχου μεταβάλλεται σχετικά αργά με το χρόνο, τα χρονικά παράθυρα δεν μπορούν παρά να έχουν άμεση σχέση μεταξύ τους. Στο δεύτερο τρέξιμο όμως του προγράμματος, το κάθε χρονικό παράθυρο προκύπτει από τη σύνθεση των προηγούμενων αλλά και των επόμενων από αυτό παραθύρων. Το αποτέλεσμα είναι μια εξομάλυνση στις γραμμές του καταράκτη, κάνοντας πιο ευδιάκριτες τις συχνότητες που δεν ήταν αρχικά αρκετά ευδιάκριτες.



Εικόνα 7.17 Lofargram πειράματος

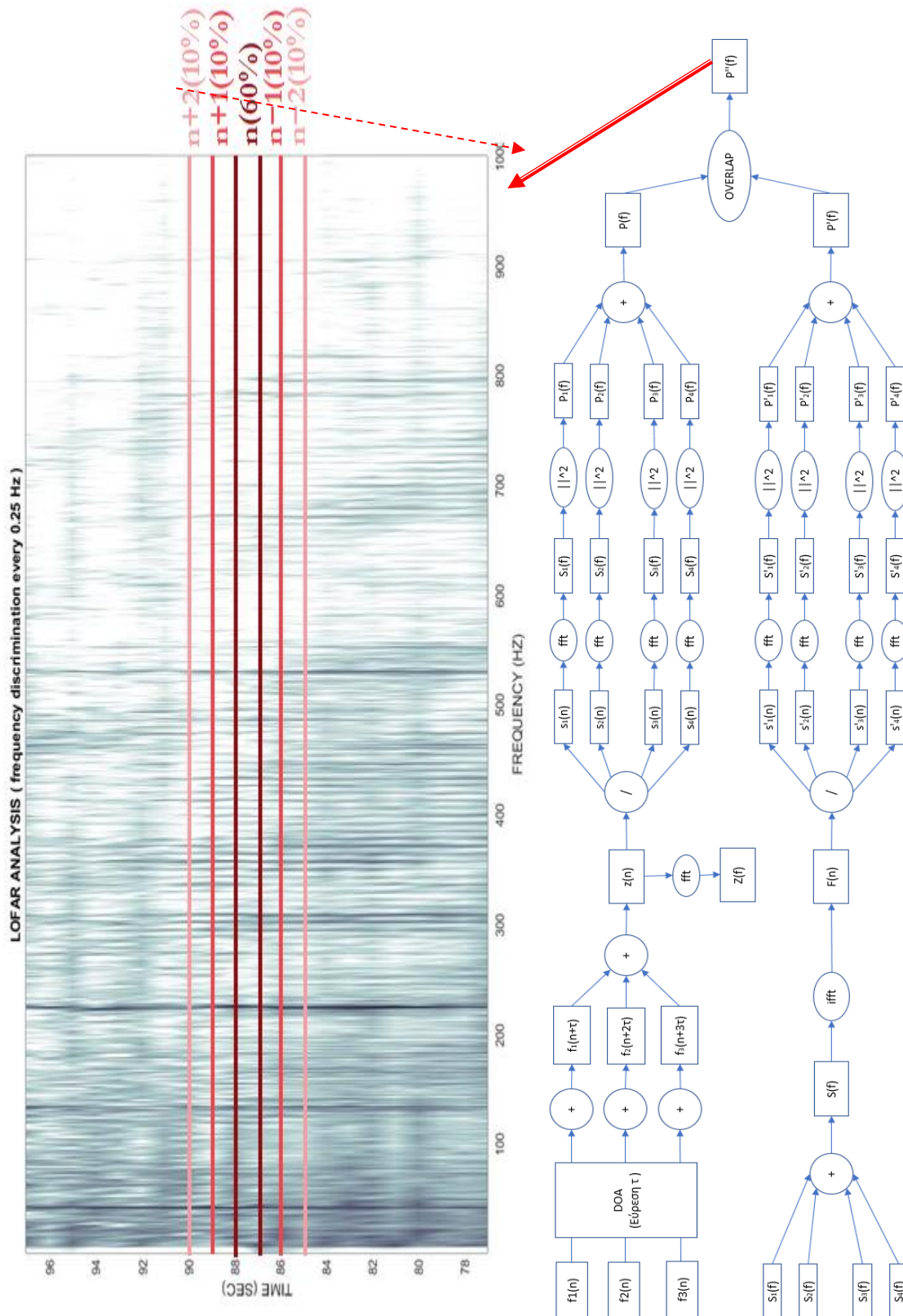
Κάθε χρονικό παράθυρο που απεικονίζεται στον καταράκτη προκύπτει από τη σχέση:

$$P''_t(f) = 0,6 \cdot P'_t(f) + 0,2 \cdot \sum_{n=-2}^{-1} P_{t+n}(f) + 0,2 \cdot \sum_{n=1}^2 P_{t+n}(f) \quad 3 \leq t \leq t_{ol} - 3 \quad (7.2.2)$$

Όπου t είναι διακριτή μεταβλητή και αντιστοιχεί στο εκάστοτε δευτερόλεπτο της καταγραφής. Για την εξαγωγή της φασματικής εικόνας κατά το t δευτερόλεπτο λαμβάνονται υπ' όψιν οι φασματικές κατανομές των $t-2$, $t-1$, t , $t+1$, $t+2$. Το αποτέλεσμα είναι η καλύτερη ανάλυση της εικόνας του καταράκτη. Παρατηρώντας τα τρία τελευταία δευτερόλεπτά του, επειδή δεν υπάρχουν οι μελλοντικές καταγραφές, $t+1$ και $t+2$ δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός με βάση τον παραπάνω τύπο και η εικόνα είναι πιο θολή.

Στην εικόνα 7.12 λοιπόν παρατηρείται σημαντική συμπίεση του θορύβου, με ταυτόχρονη ανάδειξη των συχνοτήτων του στόχου. Ειδικά στις χαμηλές συχνότητες για τις οποίες είχε προσαρμοστεί η συστοιχία, η ευκρίνεια είναι μεγαλύτερη. Η καταγραφή των 97 αυτών δευτερολέπων, ανέδειξε κυρίως τέσσερις πολύ έντονες συχνότητες, περίπου στα 220Hz, στα 30Hz, στα 130Hz και στα 540Hz αλλά και άλλες λιγότερο έντονες σε διάφορες τιμές της φασματικής κατανομής.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται συνολικά η διαδρομή του σήματος από την αρχική του λήψη έως και την τελική εξαγωγή του αποτελέσματος. Με ορθογώνιο παραλληλόγραμμο απεικονίζονται οι καταστάσεις του σήματος, ενώ με κύκλο/έλειψη οι μαθηματικές διεργασίες της επεξεργασίας του. Επιπλέον παρουσιάζεται μια εξήγηση του overlapping και πως στο τέλος, προκειμένου να εξαχθεί το αποτέλεσμα ενός χρονικού παραθύρου, λαμβάνονται υπ' όψιν τα μελλοντικά και τα παρελθοντικά χρονικά παράθυρά του.



§3. Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα που επιβεβαίωσαν τόσο τη θεωρία όσο και την προσομοίωση. Παρουσιάστηκε η διαδικασία με την οποία στέφεται ο κύριος λοβός της συστοιχίας προς το στόχο προκειμένου να καταστούν εκμεταλεύσιμες πλήρως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συστοιχίας καθώς και ο τρόπος που επηρεάζεται το σχήμα του λοβού από τον αριθμό των υδροφώνων. Γενικότερα όσο πιο στενός είναι ο λοβός τόσο περισσότερο απομονώνονται θόρυβοι από άλλες κατευθύνσεις και τόσο ενισχύονται τα σήματα που προέρχονται από το στόχο. Φαίνεται λοιπόν πόσο σημαντικό είναι το beamforming που χρησιμοποιείται τόσο στις έξυπνες κεραιές όσο και στα υδρόφωνα. Παρουσιάστηκε η δυνατότητα εντοπισμού ενός στόχου, της θέσης του αλλά και των χαρακτηριστικών της ταυτότητάς του. Επιπλέον έγινε χρήση μεθόδων όπως downsampling και overlapping με απώτερο σκόπο τη μείωση του θορύβου. Κατασκευάστηκε το lofargram (καταράκτης) στο οποίο διακρίνονται καθαρά οι κυρίαρχες συχνότητες που πηγάζουν από το στόχο και θα μπορούσαν να τον ταυτοποιήσουν. Με την επικάλυψη των χρονικών παραθύρων που προηγούνται αλλά και αυτών που έπονται, το lofargram φάνηκε πιο ξεκάθαρο και ευδιάκριτο. Σε αυτό οι χαμηλές συχνότητες είναι πιο καλά αποτυπωμένες, καθώς είναι η απόσταση των υδροφώνων τέτοια που καθορίζει ότι θα υπάρχει μεγαλύτερη ευκρίνεια σε αυτή την περιοχή.

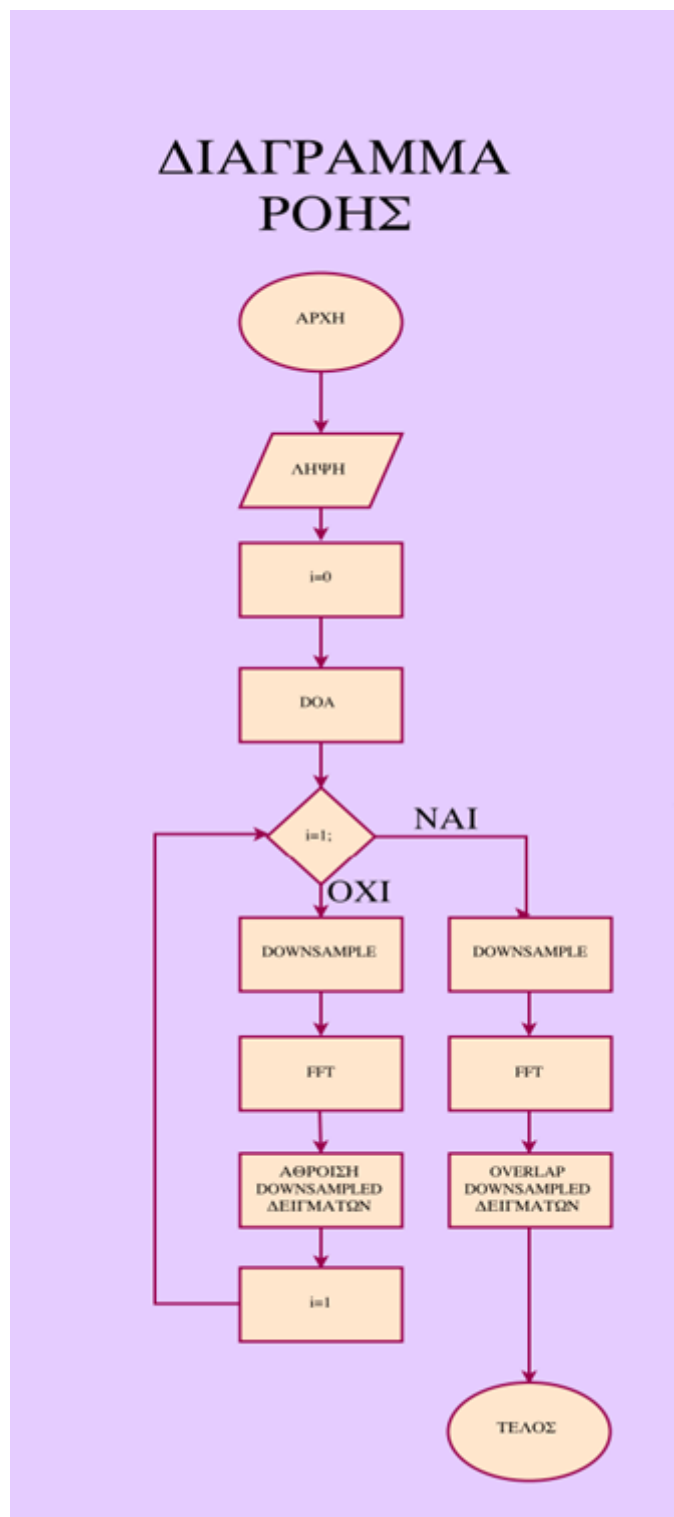
8 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

§1. Συμπεράσματα

Από τα προηγούμενα κεφάλαια γίνεται κατανοητό ένα μέρος από το σύνολο της διαδικασίας που ονομάζεται επεξεργασία σήματος και περιλαμβάνει τις μεθόδους όπως ανάλυση fourier, επιτάλωση χρονικών παραθύρων, downsampling κ.α. Σκοπός όλων των παραπάνω είναι η καταπίεση του θορύβου και η ανάδειξη του σήματος ενδιαφέροντος μέσα από τεχνικές, οι οποίες διέπουν όχι μόνο ηχητικά σήματα αλλά και τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα. Αρχικά παρουσιάστηκε η ιστορική εξέλιξη του ανθυποβρυχιακού αγώνα καθώς και οι νέες τάσεις στην ανάπτυξη αντιμέτρων. Το λογισμικό Matlab προτιμήθηκε, καθώς ενδείκνυται για τη επεξεργασία ψηφιακών σημάτων (digital signal processing) ως κατασκευασμένο για να επεξεργάζεται πίνακες και χρησιμοποιήθηκε τόσο για τη δημιουργία της προσομοίωσης όσο και για τη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους της εργασίας (Robert J. Schilling, Sandra L Harris. Fundamentals of Digital Signal Processing Using MATLAB). Αναπτύχθηκε λοιπόν ένα πρόγραμμα προσομοίωσης για να παρέχει τις ευελιξίες που δεν παρέχουν τα πειράματα, όπως η άμεση αναπαράσταση πραγματικών συνθηκών και η πολύ γρήγορη αλλαγή μεταβλητών ποσοτήτων. Ειδικά στον συγκεκριμένο τομέα, η διεξαγωγή πειραμάτων δεν είναι απλή υπόθεση και προϋποθέτει δέσμευση αρκετών πόρων. Επειδή όμως και η διεξαγωγή ενός πειράματος σε ρεαλιστικές συνθήκες είναι αναντιτατάστατη, από τα πειράματα που ακολούθησαν της προσομοίωσης, έγινε φανερό ότι υπάρχει πολύ καλή δυνατότητα εντοπισμού της κατεύθυνσης μιας ηχητικής πηγής καθώς και η εξόρυξη των συχνοτήτων που αυτή εκπέμπει. Τα αποτελέσματα είναι άκρως ενθαρρυντικά αν συλογιστεί

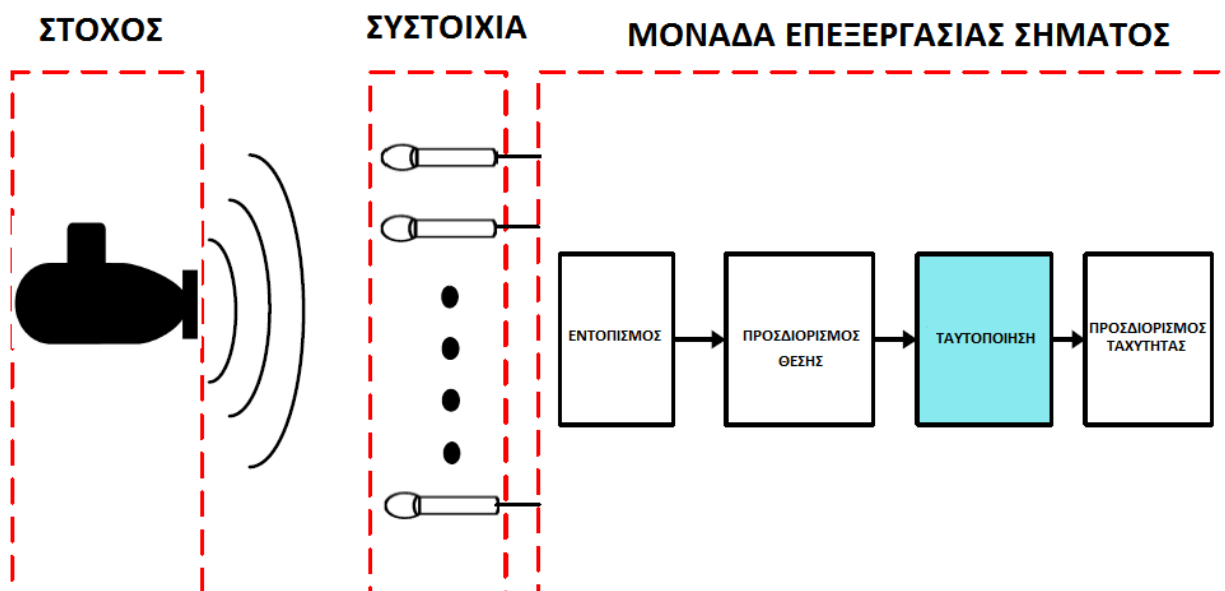
κάνεις ότι στην καταγραφή του σιάφους από τη συστοιχία κατά το πειραματικό μέρος της εργασίας, η γωνία που υπολογίστηκε, σχεδόν ταυτίζεται με την πραγματική. Γι αυτό το λόγο το συγκεκριμένο υλικό μπορεί να θεωρηθεί πετυχημένο και μπορεί να αποτελέσει βάση για μελλοντικές εργασίες όπως αυτές που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο. Οι κύριες συχνότητες του στόχου, αποκαλυπτόμενες έδωσαν μια πολύ καλή εικόνα για την ταυτότητα του σιάφους και ανέδειξαν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Πέρα από το κομμάτι του προγράμματος παρουσιάστηκε μια σύντομη και περιεκτική αναδρομή του ανθυποβρυχιακού αγώνα, τα νέα αλλά και παλαιότερα συστήματα που αναπτύχθηκαν και αναπτύσσονται ανά τον κόσμο, καθώς και τα βασικότερα μαθηματικά εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούνται στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος.



Εικόνα 8.1 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου

§2. Μελλοντική εργασία

Σε μελλοντικό χρόνο θα μπορούσε να εξελιχθεί ένα σύστημα το οποίο θα μπορούσε να υποστηρίξει τη λειτουργία τόσο σταθερών όσο και κινητών υδροφώνων, τα οποία θα μπορούσαν να συλλέγουν τα δεδομένα τους σε ένα σταθερό δέκτη και συνυπολογίζοντας τόσο τη σχετική θέση των στατικών υδροφώνων όσο και φαινόμενα dopler των κινούμενων, να συνθέσουν μια πολύ καλή εποπτεία μιας περιοχής. Ένα δίκτυο υδροφώνων, τα οποία συνεργαζόμενα, θα λειτουργούν σαν μέσο εποπτείας και αποτρεπτικότητας. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται τα στάδια μιας στοιχειώδους μονάδας σόναρ.



Εικόνα 8.2 Στάδια εντοπισμού, ταυτοποίησης και προσδιορισμού θέσεως και ταχύτητας στόχου

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τα δύο πρώτα στάδια της μονάδας επεξεργασίας σήματος, δηλαδή τον εντοπισμό ενός σήματος ενδιαφέροντος μέσα από ένα θορυβώδες περιβάλλον καθώς και τον προσδιορισμό της θέσης του μέσω DOA. Σε μελλοντικό χρόνο θα μπορούσαν να εξελιχθούν τα επόμενα δύο στάδια. Αυτό της ηλεκτρονικής ταυτοποίησης μέσα από μια ενημερωμένη βιβλιοθήκη στόχων και αυτό του προσδιορισμού της σχετικής ταχύτητάς του. Έχοντας τη γνώση μέσω intelligence κάποιων συγκεκριμένων συχνοτικών εκπομπών του στόχου, υπάρχει η δυνατότητα αναζήτησης narrowband αντί για broadband φάσματος με τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα που συνεπάγεται αυτό. Για την υλοποίηση αυτή έχουν ήδη αναπτυχθεί αλγόριθμοι όπως π.χ. ο MUSIC (Multiple Signal Classifier), ή ο ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques). Σε μετέπειτα στάδιο και μέσω ενός εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου θα μπορούσαν να αναζητηθούν τυχόν μοτίβα εντός της λήψης τα οποία πιθανώς να παρουσιάζουν ομοιότητες με τα γνωστά από intelligence μοτίβα, των στόχων ενδιαφέροντος. Η ταυτοποίηση του στόχου θα μπορούσε ακόμα να περιλαμβάνει:

Εντοπισμός Peak συχνοτήτων

Απο τον προσδιορισμό μιας ηχητικής υπογραφής δεν μπορεί να λείπει ο εντοπισμός των κυρίαρχων συχνοτήτων. Εντοπίζοντας τα peak των συχνοτήτων για κάθε χρονικό παράθυρο, γίνεται δυνατή η σύγκριση, προκειμένου να διαχωριστούν αυτά τα οποία συντηρούνται με την πάροδο του χρόνου, από αυτά που είναι πιθανώς τυχαία και παροδικά.

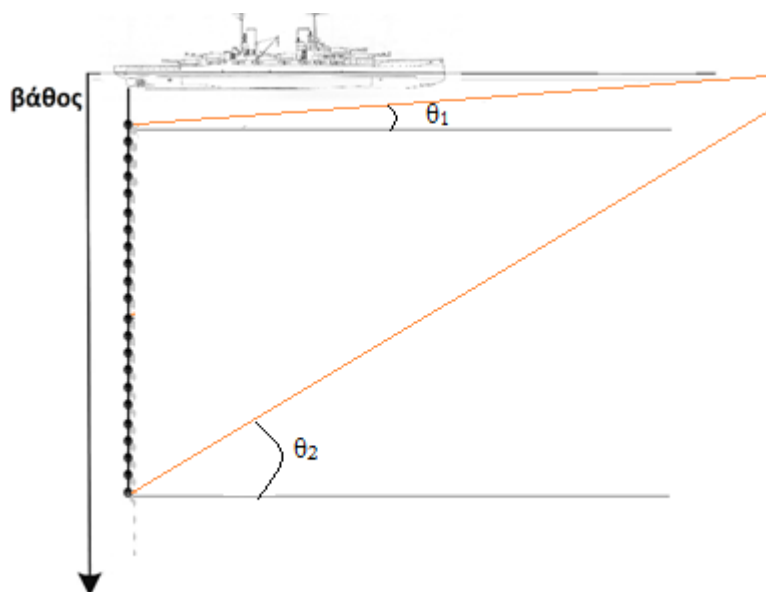
Εντοπισμός ενεργειακής κατανομής συχνοτήτων

Σε συνέχεια των προηγούμενων θα μπορούσε να ακολουθήσει διαχωρισμός της φασματικής κατανομής σε όχι απαραίτητα ισομεγεθούς εύρους κατηγορίες, προκειμένου να εξετασθεί σε κάθε κλάση η ποσότητα της ληφθείσας ενέργειας. Για παράδειγμα μια περιοχή θα μπορούσε να περιλαμβάνει τις συχνότητες από 0-50Hz ενώ μία άλλη από 50-70 Hz. Στη συνέχεια θα μπορούσε να συγκριθεί το πλάτος της εκπεμπόμενης ενέργειας (σε σχέση πάντα με το συντελεστή απορρόφησης στο νερό για τις συγκεκριμένες εντός του εύρους συχνότητες) με αυτό που θα υπάρχει στην βιβλιοθήκη. Έτσι θα μπορούσε να ελεγχθεί αν η ληφθείσα ηχητική ενέργεια ακολουθεί ένα αναμενόμενο μοτίβο.

Εκτίμηση απόστασης στόχου

Εκτός από τα παραπάνω θα μπορούσε σε μελλοντικό χρόνο να αναπτυχθεί ο αλγόριθμος με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί εκτός από την κατεύθυνση του στόχου να εκτιμηθεί και η απόστασή του από τη συστοιχία ως εξής:

Για την εκτίμηση της DOA χρησιμοποιείται το πρώτο υδρόφωνο ως σημείο αναφοράς, και στρέφονται τα υπόλοιπα. Αν επαναληφθεί η διαδικασία ξεκινώντας από το τελευταίο υδρόφωνο θα προκύψει μια διαφορετική γωνία. Γνωρίζοντας τις δυο γωνίες και το μήκος της συστοιχίας θα μπορούσε να εκτιμηθεί η απόσταση της πηγής. Στην παρακάτω εικόνα αναπτύσσεται ο παραπάνω συλλογισμός.



Εικόνα 8.3 Εκτίμηση απόστασης πηγής

9 Βιβλιογραφία

1. Dessalermos, Spyridon. Undersea acoustic propagation channel estimation. Naval Postgraduate School Monterey, California, 2005
2. Dessalermos, Spyridon. Adaptive reception for underwater communications. Naval Postgraduate School Monterey, California, 2011
3. Lurton, X. An Introduction to Underwater Acoustics, 1st ed. London, Praxis Publishing LTD, 2002, p37
4. John G. Proakis. Digital Communications (Fourth Edition), McGraw-Hill, New York, 2001.
5. Stergios Stergiopoulos, Defence and Civil Institute of Environmental Medicine University of Western Ontario. Geoffrey Edelson Sanders, Lockheed Martin Company. Theory and Implementation of Advanced Signal Processing for Active and Passive Sonar Systems
6. Dale Green and Joseph Rice, “Synthetic Undersea Acoustic Transmission Channels”, High Frequency Ocean Acoustics, 2004.
7. Eduardo F. de Simas Filho, Nondestructive Testing Research Group. Natanael Nunes de Moura, Jos’e Manoel de Seixas, Signal Processing Laboratory. Neural passive sonar signal classification using independent component analysis.
8. M. J. Hinich, —Frequency-wavenumber array processing,|| Journal of Acoustical Society of America, Vol. 69, No3, pp. 732–737, March 1981
9. Youssef Khmou , Said Safi , and Miloud Frikel. Comparative Study between Several Direction of Arrival Estimation Methods Department of Mathematics and Informatics, Beni Mellal. Morocco

10. Ali Massoud. Direction of arrival estimation in passive sonar systems
11. Robert J. Schilling, Sandra L Harris. Fundamentals of Digital Signal Processing Using MATLAB
12. Y.H.Yang. Relaxation method applied to lofargram Naval postgraduate school Monterey California
13. J.G Proakis, E.M. Sozer, J. A. Rice and M. Stojanovic, “Shallow water acoustic networks”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 39, Issue 11, pp. 114-119, November 2001.
14. Ed Tucholski, United States Naval Academy, Physics Department, chapter 9, 2007
15. J. Rice, B. Creber, C. Fletcher, P. Baxley, K. Rogers, K. McDonald, D. Rees, M. Wolf, S. Merriam, R. Mehio, J. Proakis, K. Scussel, D. Porta, J. Baker, J. Hardiman and D. Green, “Evolution of Seaweb underwater acoustic networking”, *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, Vol. 3, pp. 2007 – 2017, September 2000.
16. Martin Siderius, Michael B. Porter and Vincent K. McDonald, “Experiments Study Underwater Acoustic Communications”, *Sea Technology*, Vol. 45, Issue 5, pp. 42-47, May 2004.
17. John G. Proakis *Digital Communications (Fourth Edition)*, McGraw-Hill, New York, 2001.
18. M.D. Green and J. A. Rice, “Channel-tolerant FH-MFSK acoustic signaling for undersea communications and networks”, *IEEE Oceanic Engineering*, Vol. 25, Issue 1, pp. 28-39, January 2000.

19. Richard G Lyons. Understanding digital signal processing
20. M. Siderius, M. B. Porter, P. Hursky and V. K. McDonald, “Measurements and modeling comparisons of underwater communications performance at three shallow-water sites”, *OCEANS 2003 Proceedings*, Vol. 4, pp. 1773-1779, September 2003.
21. J. Proakis, M. Stojanovic and A. Benson, “Towards Robust Adaptive Acoustic Communications”, *IEEE Oceans*, Vol. 2, pp. 1243-1249, September 2000.
22. Joseph A. Rice and Dale Green, “Handshake protocols and adaptive modulation for underwater communications networks”, *OCEANS '98 Conference Proceedings*, Vol. 1, pp. 487-491, September 1998.
23. Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Crippens and James V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics (Fourth Edition)*, John Wiley & Sons, New York, 2000.
24. Finn B. Jensen, William A. Kuperman and Michael B. Porter, Henrik Schmidt, *Computational Ocean Acoustics (First Edition)*, Springer-Verlag, New York, 2000.
25. Joseph T. Hansen, *Link Budget Analysis for Undersea Acoustic Signaling*, Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002.
26. Hannah Kessler, Spyridon Dessalermos, Vassilios Karakikes and Konstantinos Tsaprazis, *Tonpilz Transducer Project*, unpublished paper, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2005.

27. Peter Duke, *Direct-sequence spread-spectrum modulation for utility packet transmission in underwater acoustic communication networks*, Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002.
28. Robert S. Kennedy, *Fading Dispersive Communications Channels (First Edition)* Wiley-Interscience, New York, 1969.
29. Joseph A. Rice, "Acoustic Signal Dispersion and Distortion by Shallow Undersea Transmission Channels", *High Frequency Acoustics in Shallow Water*, Lerici, Italy, 1997.
30. Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications – Principles and Practice (Second Edition)*, Prentice Hall, New Jersey, 2002.
31. Jon M. Kalscheuer, *A selective automatic repeat request protocol for undersea acoustic links*, Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2004.
32. Maurice D. Green and Joseph A. Rice, "Handshake Protocols for Underwater Communications", *IEEE Oceans Conference*, Vol. 1, pp. 487-491, September 1998.
33. Laurence J. Ziomec, *Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing (First Edition)*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1995.
34. Roger L. Peterson, Rodger E. Ziemer and David E. Borth, *Introduction to Spread Spectrum Communications (First Edition)*, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
35. Georgios N. Pelekanos, *Performance of acoustic spread-spectrum signaling in simulated ocean channels*, Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2003.

36. Ethem Mutlu Sozer, Reliable Communications over Frequency-Selective Rapidly Fading Channels, PhD Thesis, Northeastern University, Boston, Massachusetts, May 2003.
37. Dale Green and Joseph Rice, “Synthetic Undersea Acoustic Transmission Channels”, *High Frequency Ocean Acoustics*, pp. 73-81, 2004.
38. K. Karkkainen, “Optimized PN Sequences Available for Simulation of CDMA Systems,” [<http://www.ee.oulu.fi/~kk/>], last accessed April 2005.
39. Robert P. Goddard. The Sonar Simulation Toolset, Release 4.1: Science, Mathematics, and Algorithms Applied Physics Laboratory University of Washington
40. Sergio Rui Silva. Advances in sonar technology. Vienna Austria
41. Brahosky, Vance A. A combinatorial approach to automated LOFARGRAM analysis. Naval Postgraduate School Monterey, California.
42. Robert Mill and Guy Brown. Auditory-Based Time-Frequency Representations and Feature Extraction Techniques for Sonar Processing. University of Sheffield
43. Stevens, John Davenport. Detection of short transients in colored noise by multiresolution analysis. Naval Postgraduate School Monterey, California.
44. Αθανάσιος Σκορδάς, Βασίλειος Αναστασόπουλος. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνων και σημάτων. ΕΑΠ
45. N. N. de Moura, J. M. de Seixas and Ricardo Ramos. Passive Sonar Signal Detection and Classification Based on Independent Component Analysis. Federal University of Rio de Janeiro

46. J-C. Di Martino S. Tabbone. An approach to detect lofar lines CRIN/CNRS-INRIA. Lorraine, Campus Scientifique Vandoeuvre-les-Nancy, France
47. Lei Dong, Hefeng Dong. Bellhop – A modeling approach to Sound propagation in the ocean Department of Electronics and Telecommunication. Norwegian University of Science and Technology
48. Biniyam Tesfaye Taddese. Sound Source Localization and Separation. Macalester College.

10 Ιστότοποι

<http://mathworld.wolfram.com>

<http://dsp.stackexchange.com>

<http://www.sp4comm.org/webversion/livre.html>

<http://www.cmtec.com/dataacquisition/towedary.htm>

<http://www.naval-technology.com/>

<http://survincity.com/2012/06/the-threat-from-the-depths/>

<http://dave-mech.tumblr.com/>

<http://www.labbookpages.co.uk/audio/beamforming/delaySum.html>

<http://dspguru.com/>

<http://www.noaa.gov/>

<http://rickcampbellauthor.com/styled/index.html>

<http://www.perch-base.org/glossary.htm#J>