

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ**

**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΟΤΗΤΑ ΔΕΣΜΗΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ SONAR**

**ΜΑΡΙΑ ΧΡΥΣΟΥΛΑ ΜΠΟΥΖΟΥΝΙΕΡΑΚΗ
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΤΑΡΟΥΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ (ΤΜΗΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ)**

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2022

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Εισαγωγή.....	4
1. Διάδοση ακουστικών κυμάτων στη θάλασσα.....	5
1.1 Ακουστική Εξίσωση	5
1.2 Γενικές λύσεις της ακουστικής εξίσωσης.....	5
1.3 Εφαρμογές ακουστικών κυμάτων στη θάλασσα.....	8
2. Σύστημα SONAR.....	9
2.1 Ενεργητικά συστήματα SONAR.....	9
2.2 Παθητικά συστήματα SONAR.....	10
2.3 SONAR πλευρικής σάρωσης (side scan sonar).....	11
3. Δημιουργία δέσμης εκπομπής SONAR.....	14
3.1 Σύνθεση 2 σημειακών πηγών.....	14
3.1.1 Δύο πηγές που εκπέμπουν σε φάση.....	16
3.1.2 Δίπολο.....	17
3.2 Σημειακές πηγές σε σειρά.....	17
3.2.1 Η δέσμη μακριά από την συστοιχία των πηγών (far field pattern).....	18
3.2.2 Επιλογές «βαρών» εκπομπής και φάσεων εκπομπής	23
3.3 Κατευθυντότητα δέσμης.....	26
3.3.1 Υπολογισμός της γωνίας του άξονα της δέσμης- δημιουργία δέσμης επιθυμητής γωνίας άξονα (beamforming).....	26
3.3.2 Οριοθέτηση πλευρικών λοβών.....	30
4. Χαρακτηριστικά παραδείγματα δημιουργίας δέσμης και καταυθυντότητας SONAR.....	31
5. Σύνοψη – Συμπεράσματα.....	37

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Κώδικες Matlab.....	38
Βιβλιογραφία.....	40

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση των θεμελιωδών αρχών λειτουργίας και σχεδίασης των συστημάτων SONAR. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανίχνευση/εντοπισμό, ταξινόμηση/αναγνώριση και παρακολούθηση υποβρυχίων, τορπιλών, ναρκών και άλλων αντικειμένων μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η χρήση των συστημάτων SONAR είναι και εμπορική, όπως πχ στην ακουστική χαρτογράφηση/τομογραφία του βυθού που είναι και ένα από τα βασικότερα αντικείμενα μελέτης του Εργαστηρίου Παράκτιας & Θαλάσσιας Έρευνας του Ινστιτούτου Υπολογιστικών Μαθηματικών (Ι.Υ.Μ.) του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας στο Ηράκλειο (Ι.Τ.Ε.).

Η θεωρία που παρουσιάζεται στα κεφάλαια της εργασίας περιγράφει τη λειτουργία της δέσμης εκπομπής των συστημάτων SONAR. Περιγράφει πως δημιουργείται και πως κατευθύνεται η δέσμη στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η εργασία περιέχει μία σειρά εξισώσεων μέσα από τις οποίες παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της επεξεργασίας beamforming, δηλαδή ο σχηματισμός μιας επιθυμητής δέσμης εκπομπής προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Τέλος, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις αυτές γίνεται προσομοίωση σε περιβάλλον Matlab.

Εισαγωγή

Τα ηχοεντοπιστικά συστήματα sonar αποτελούν ηλεκτροακουστικές συσκευές που εκμεταλλεύονται την διάδοση των ακουστικών κυμάτων μέσα στη θάλασσα, όπως ακριβώς τα συστήματα ραντάρ που εκμεταλλεύονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην ατμόσφαιρα. Η ηχητική ενέργεια μπορεί να διαδοθεί σε τεράστιες αποστάσεις μέσα στη θαλάσσια μάζα ακόμη και στα στερεά στρώματα του βυθού κάτω από τον πυθμένα. Το γεγονός αυτό δεν συμβαίνει με άλλες μορφές ενέργειας όπως η ηλεκτρομαγνητική, η οποία απορροφάται ταχύτατα. Παρά την συγκριτικά πολύ μικρότερη ταχύτητα διάδοσης της ηχητικής ενέργειας, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται στο υποθαλάσσιο περιβάλλον όχι μόνο για εντοπισμό αντικειμένων και στις υποβρύχιες επικοινωνίες, αλλά ακόμη και για την ταξινόμηση/ αναγνώριση στόχων, ναυτιλία, κτλ.

Το πρώτο κεφάλαιο ξεκινάει με την βασική θεωρία που χρειάζεται για να γίνει κατανοητός ο τρόπος διάδοσης ακουστικών κυμάτων στην θάλασσα. Η μαθηματική ανάλυση της ακουστικής εξίσωσης και οι γενικές λύσεις της παρουσιάζονται αναλυτικά και στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται σημαντικές εφαρμογές των ακουστικών κυμάτων. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα είδη συστημάτων sonar που αποτελούν και τα εργαλεία για τις μεθόδους εντοπισμού. Οι βασικές κατηγορίες συστημάτων sonar είναι τα ενεργητικά και τα παθητικά συστήματα sonar. Τα συστήματα sonar πλευρικής σάρωσης που χρησιμοποιούνται περισσότερο στην θαλάσσια έρευνα αναλύονται και αυτά στο δεύτερο κεφάλαιο. Στο τρίτο κεφάλαιο και το πιο σημαντικό της εργασίας γίνεται ανάλυση στον τρόπο που δημιουργείται και κατευθύνεται μια ηχητική δέσμη ενός συστήματος sonar. Παρουσιάζεται η εκπομπή ηχητικής δέσμης από μεμονωμένες σημειακές πηγές ή από μία γραμμική συστοιχία πηγών που βρίσκονται σε ορισμένες αποστάσεις μεταξύ τους. Επίσης παρουσιάζεται πως γίνεται ο υπολογισμός της γωνίας του άξονα της ηχητικής δέσμης και πως μπορεί να γίνει η δημιουργία ηχητικής δέσμης με γωνία που επιλέγεται από τον χειρίστη του sonar. Το κεφάλαιο 4 αποτελείται από χαρακτηριστικά παραδείγματα όσων αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3 χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους και διαφορετικό αριθμό πηγών. Τέλος, συνοψίζοντας γίνεται σχολιασμός και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της ανάλυσης των κεφαλαίων της εργασίας.

1. Διάδοση ακουστικών κυμάτων στη θάλασσα

1.1 Ακουστική Εξίσωση

Ένα ακουστικό κύμα είναι μία διαταραχή της πίεσης ενός μέσου που διαδίδεται μέσα στο μέσον αυτό. Για να γίνει δυνατή η μετάδοση της διαταραχής, το μέσον πρέπει να είναι συμπιεστό (να επιτρέπει αυξομειώσεις της πυκνότητας). Γι αυτό τα ακουστικά κύματα χαρακτηρίζονται ως κύματα συμπιεστότητας (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 και προκαλεί αυξομειώσεις των μεγεθών που υπεισέρχονται στην μηχανική συμπεριφορά του υλικού, όπως είναι η πυκνότητα, η πίεση, και 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 που χαρακτηρίζεται ως ακουστική ενέργεια (Hans Jenny, A Study of Wave Phenomena and Vibration, Volume 1,1967).

Η γραμμικοποιημένη ακουστική εξίσωση προκύπτει ως συνδυασμός της εξίσωσης συνέχειας, της εξίσωσης του Euler και της καταστατικής εξίσωσης σε ένα συμπιεστό μέσο. Η κυματική εξίσωση, η οποία είναι εκφρασμένη ως προς την ηχητική πίεση p σε χωρίο χωρίς πηγή έχει τη μορφή:

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

όπου p είναι συνάρτηση των χωρικών μεταβλητών και του χρόνου και c είναι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου που γενικά είναι συνάρτηση των χωρικών μεταβλητών.

1.2 Γενικές λύσεις της ακουστικής εξίσωσης

Η εξίσωση είναι μία μερική διαφορική εξίσωση δευτέρας τάξης. Οι λύσεις αυτής της εξίσωσης είναι κύματα που διαδίδονται προς όλες τις χωρικές κατευθύνσεις, όπως κάνουν τα φυσικά κύματα που προκαλούνται από μία διαταραχή. Η εξίσωση είναι γραμμική και διαχωρίσιμη και άρα για την λύση της θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο χωρισμού μεταβλητών. Για να πετύχουμε την μοναδικότητα των λύσεων πρέπει να οριστούν συνθήκες, όπως αρχικές συνθήκες και συνοριακές συνθήκες, που θα καθορίσουν το πλάτος και τη φάση του κύματος.

Επομένως θεωρώντας ότι βρισκόμαστε στις τρεις διαστάσεις μπορούμε να θέσουμε:

$$p(x, y, z, t) = P(x, y, z)T(t) \quad (2)$$

Σημειώνουμε ότι θα χρησιμοποιήσουμε το συμβολισμό P για τη χωρική συνιστώσα της ακουστικής πίεσης. Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου c θα θεωρηθεί συνάρτηση μόνο των χωρικών μεταβλητών $c = c(\vec{x})$. Έτσι μπορούμε να αντικαταστήσουμε την (2) στην ακουστική εξίσωση (1) και να πάρουμε τελικά:

$$\frac{c^2}{\rho} \nabla^2 p = \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} = -\omega^2 \quad (3)$$

και προκύπτουν οι παρακάτω δύο εξισώσεις:

$$\nabla^2 p + \frac{\omega^2}{c^2} p = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + \omega^2 T = 0 \quad (5)$$

Από τις εξισώσεις αυτές η πρώτη είναι γνωστή ως η εξίσωση Helmholtz και διέπει την χωρική εξάρτηση της ακουστικής πίεσης για μονοχρωματική πηγή (όταν η πηγή εκπέμπει σε συγκεκριμένη συχνότητα), ενώ η λύση της δεύτερης δίνει τη χρονική εξάρτηση της ακουστικής πίεσης:

$$T = Ae^{i\omega t} + Be^{-i\omega t} \quad (6)$$

με A, B σταθερές.

Το πηλίκο ω/c ονομάζεται αριθμός κύματος και μπορεί να θεωρηθεί ως το μέτρο ενός διανύσματος που έχει διεύθυνση αυτή της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος.

Επίσης θα θεωρήσουμε ότι η σταθερά B είναι 1, και δεχόμενοι από τις δύο πιθανές λύσεις, εκείνη που αντιστοιχεί σε αρνητικό πρόσημο στον εκθέτη. Αυτό σημαίνει ότι οι πηγές οι οποίες εκπέμπουν ενέργεια στο περιβάλλον με χρονική εξάρτηση $e^{-i\omega t}$. Άρα προκύπτουν λύσεις της μορφής:

$$T = e^{-i\omega t} \quad (7)$$

Οπότε η γενική λύση είναι:

$$p(x, y, z, t) = P(x, y, z)e^{-i\omega t} \quad (8)$$

Ως προς την εξίσωση (4) ο τελεστής ∇^2 παίρνει την μορφή $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ διότι αναφερόμαστε στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Επιπλέον θεωρώντας ότι:

$$\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 = k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (9)$$

όπου κάθε ένας από τους προσθετέους k_i εξαρτάται από μία μόνο μεταβλητή και αποτελούν τα μέτρα των συνιστωσών του αριθμού κύματος όταν αυτός θεωρηθεί διάνυσμα. Διαχωρίζοντας τις μεταβλητές αναζητούνται λύσεις της μορφής:

$$P(x, y, z) = P_x(x)P_y(y)P_z(z) \quad (10)$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις και την εξίσωση Helmholtz προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$\frac{d^2 P_x}{dx^2} \frac{1}{P_x} = -k_x^2 \Rightarrow \frac{d^2 P_x}{dx^2} + P_x k_x^2 = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d^2 P_y}{dy^2} \frac{1}{P_y} = -k_y^2 \Rightarrow \frac{d^2 P_y}{dy^2} + P_y k_y^2 = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d^2 P_z}{dz^2} \frac{1}{P_z} = -k_z^2 \Rightarrow \frac{d^2 P_z}{dz^2} + P_z k_z^2 = 0 \quad (13)$$

Επομένως, καταλήγουμε στις εξής λύσεις:

$$P_x(x) = A_1 e^{ik_x x} + A_2 e^{-ik_x x} \quad (14)$$

$$P_y(y) = B_1 e^{ik_y y} + B_2 e^{-ik_y y} \quad (15)$$

$$P_z(z) = C_1 e^{ik_z z} + C_2 e^{-ik_z z} \quad (16)$$

όπου οι συντελεστές υπολογίζονται εφ' όσον έχουν οριστεί οι αρχικές και οι συνοριακές συνθήκες.

Αν θεωρήσουμε ότι η διάδοση γίνεται προς μία κατεύθυνση, τότε κρατάμε τον πρώτο από τους δύο όρους της λύσης για κάθε μία από τις συναρτήσεις p_x, p_y, p_z και άρα η ακουστική πίεση παίρνει την εξής μορφή:

$$p(x, y, z, t) = A_1 B_1 C_1 e^{i(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)} \quad (17)$$

1.3 Εφαρμογές ακουστικών κυμάτων στη θάλασσα

Η ταχύτητα ενός κύματος είναι ο ρυθμός με τον οποίο οι δονήσεις κινούνται στο μέσο. Ο ήχος κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα στο νερό (της τάξης των 1500 μέτρων/δευτ.) από ό,τι στον αέρα (περίπου 340 μέτρα/δευτ.) επειδή οι μηχανικές ιδιότητες του νερού διαφέρουν από τον αέρα. Η θερμοκρασία επηρεάζει επίσης την ταχύτητα του ήχου (π.χ. ο ήχος ταξιδεύει γρηγορότερα στο ζεστό νερό από ότι στο κρύο). Με δεδομένη την ενεργό διάδοση του ήχου στη θάλασσα τα περισσότερα τεχνολογικά μέσα που κατασκευάζονται για την μελέτη του θαλάσσιου περιβάλλοντος βασίζονται στα ακουστικά κύματα. Ένα από τα πιο χρησιμοποιημένα συστήματα στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι τα SONAR «SOund NAvigation and Ranging» τα οποία θα αναλυθούν περισσότερο στο επόμενο κεφάλαιο. Για να γίνει πιο αντιληπτή η σπουδαιότητα των ακουστικών κυμάτων στην θάλασσα θα παρουσιαστούν παρακάτω οι σημαντικότερες εφαρμογές Sonar και άλλων ακουστικών συστημάτων στη θάλασσα. Οι εφαρμογές αυτές είναι στρατιωτικές και πολιτικές.

- Επιτήρηση, εντοπισμός, ταξινόμηση/ αναγνώριση και προσδιορισμός θέσης υποβρυχίων στόχων.
- Ακουστικές τορπίλες.
- Θαλάσσιες νάρκες (ακουστικές και πίεσης).
- Ναυτιλία πλοίων επιφάνειας και υποβρυχίων, πχ αποφυγή εμποδίων, ναρκών, ηχοβολιστικά (depth/echo sounders).
- Υποβρύχιες επικοινωνίες (υδροτηλεφωνα, σημαντήρες επικοινωνιών, σημαντήρες κινδύνου, υδροακουστικά modem, κτλ).
- Sonar πλευρικής σάρωσης (side scan sonar) , για την χαρτογράφηση του βυθού
- Αλιευτικά Sonar, για εντοπισμό κοπαδιών ψαριών (αλιεία, επιστημονικές έρευνες, κτλ).
- Βοηθητικές συσκευές δυτών.
- Ακουστικές κάμερες.
- Ανίχνευση σεισμικής δραστηριότητας.

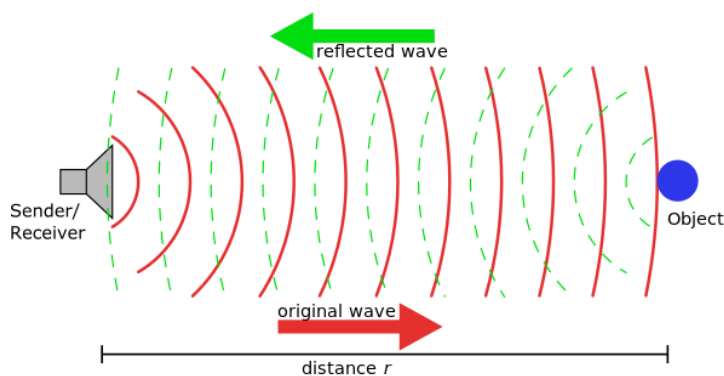
2. Σύστημα SONAR

Για την αξιοποίηση των ηχητικών κυμάτων στη θάλασσα που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο χρειαζόμαστε κατάλληλες συσκευές. Τα πιο γνωστά είναι τα συστήματα sonar. Ο όρος SONAR προέρχεται από την έννοια «SOund NAvigation and Ranging», (ήχος, πλοήγηση και εντοπισμός απόστασης). Ιστορικά, η προσπάθεια ανίχνευσης του ήχου ξεκίνησε από το 1920.

Τα συστήματα αυτά είναι ηλεκτροακουστικές συσκευές όπου μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε ηχητική και το αντίστροφο. Η πληροφορία που μεταφέρουν τα ακουστικά κύματα απεικονίζεται με κατάλληλα μέσα. Την ίδια λειτουργία συναντάμε και στα συστήματα ραντάρ. Σκοπός των συστημάτων Sonar είναι η ανίχνευση/εντοπισμός υποβρύχιων στόχων και αντικειμένων. Στις μέρες μας υπάρχει μια τεράστια ποικιλία συστημάτων sonar. Μπορούμε να τα συναντήσουμε σε πλοία επιφάνειας, υποβρύχια, ελικόπτερα ή να είναι μόνιμα εγκατεστημένα σε κάποια γεωγραφική περιοχή για επιτήρηση στενών και προσβάσεων λιμένων. Σημαντικό εργαλείο αποτελεί για την χαρτογράφηση του πυθμένα της θαλάσσιας περιοχής. Θεωρούνται άκρως απαραίτητα και σε στρατιωτικές εφαρμογές. Σε αυτήν την περίπτωση έχουν σκοπό την επιτήρηση/έρευνα, εντοπισμό, αναγνώριση, παρακολούθηση και επίθεση εναντίον υποβρυχίων στόχων. Οι βασικές κατηγορίες Sonar είναι τα ενεργητικά και τα παθητικά συστήματα, όπου θα αναλυθούν παρακάτω.

2.1 Ενεργητικά συστήματα SONAR

Η αρχή λειτουργίας των ενεργητικών συστημάτων sonar μοιάζει με των ραντάρ. Δηλαδή βασίζεται στην λήψη του ανακλώμενου στο στόχο σήματος, το οποίο εκπέμπεται από την ίδια τη συσκευή. Η ουσιαστική διαφορά είναι ότι το εκπεμπόμενο/λαμβανόμενο σήμα δεν είναι ηλεκτρομαγνητικό όπως στα ραντάρ, αλλά ηχητικό. Το ακουστικό σήμα έχει συνήθως την μορφή παλμού (sonar ping).

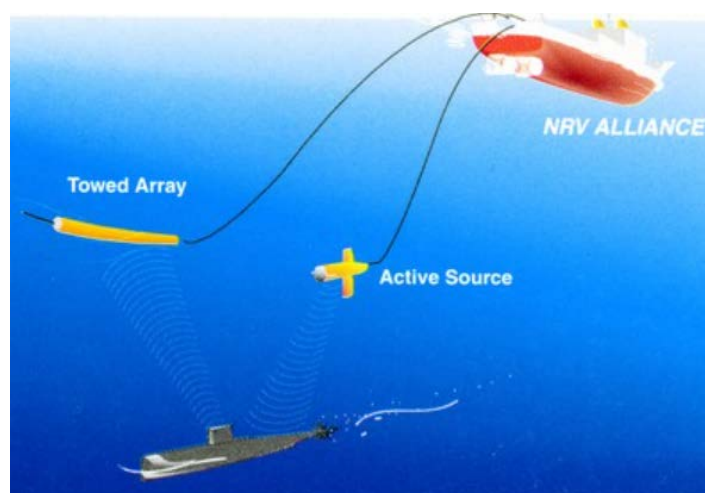


Εικόνα 1: Η αρχή λειτουργίας ενός ενεργητικού SONAR

Ιστορικά, τα πρώτα ενεργητικά ηχοεντοπιστικά συστήματα άνηκαν στην κατηγορία των λεγόμενων searchlight sonar , των οποίων ο μορφοτροπέας έστρεφε με μηχανικό τρόπο προς την επιθυμητή αζιμουθιακή κατεύθυνση για εκπομπή και λήψη του σήματος. Τα μοντέρνα ενεργητικά συστήματα είναι κατηγορίας scanning sonar, δηλαδή καλύπτουν ολόκληρο τον αζιμουθιακό τομέα (360 μοίρες). Με αυτόν τον τρόπο εκτελούν αυτόματη σάρωση των λοβών εκπομπής και λήψης, και ο μορφοτροπέας παραμένει σταθερός.

Ανάλογα με τον τύπο του συγκεκριμένου συστήματος, τα ενεργητικά sonar μπορούν να παρέχουν τα ακόλουθα στοιχεία:

- Διόπτευση (γωνία αζιμούθιου) στόχου
- Απόσταση στόχου
- Ολίσθηση Doppler του λαμβανόμενου σήματος
- Πλάτος του λαμβανόμενου σήματος



Εικόνα 2: Τρόπος σύνδεσης ενεργητικών SONAR με ερευνητικά σκάφη

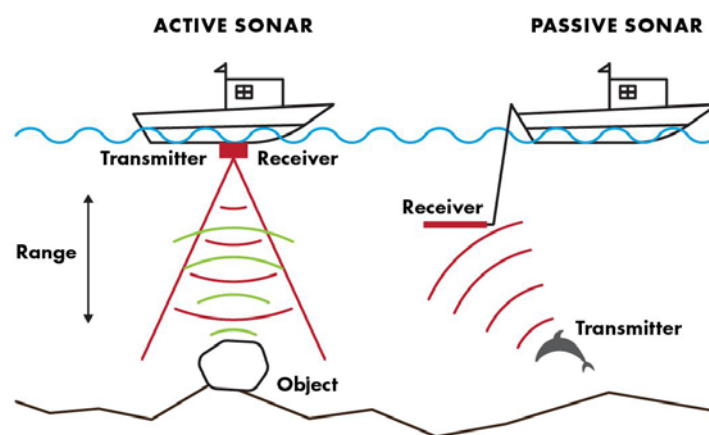
2.2 Παθητικά συστήματα SONAR

Ένας περιορισμός στη χρήση ενεργητικών σόναρ όταν αυτά χρησιμοποιούνται στην αναγνώριση ενός στόχου είναι η δυσκολία τους να κατηγοριοποιήσουν το στόχο αξιοποιώντας την επιστροφή του ήχου. Τα παθητικά συστήματα λαμβάνουν τον ήχο που παράγει ο στόχος και με κατάλληλες τεχνικές ο χειριστής έχει τη δυνατότητα αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης του στόχου είτε αυτός είναι φυσικός (π.χ. ένα θαλάσσιο θηλαστικό) είτε ανθρωπογενής (π.χ. ένα υποβρύχιο) Στα παθητικά συστήματα sonar, η ηχητική πηγή είναι ο ίδιος στόχος. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην λήψη και ανάλυση του εκπεμπόμενου από

το στόχο ήχου. Ανάλογα με τον τύπο του συγκεκριμένου συστήματος, τα παθητικά sonar μπορούν επίσης να δίνουν τις ακόλουθες πληροφορίες:

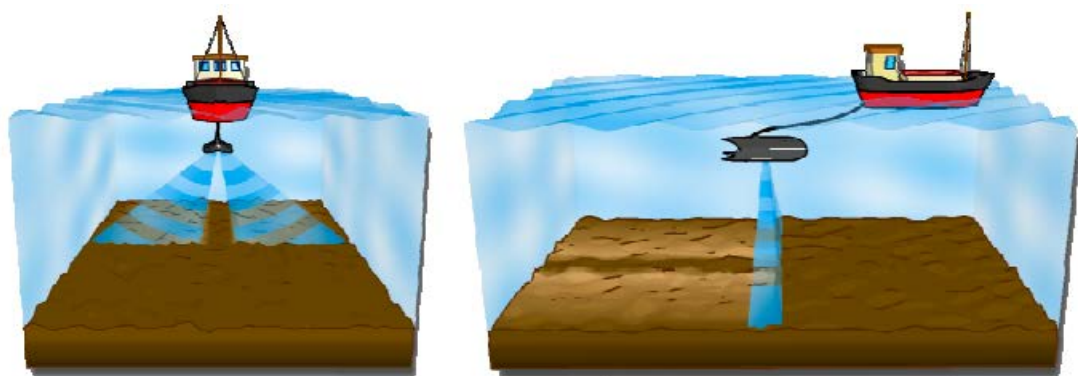
- Διόπτευση (γωνία αζιμούθιου) στόχου
- Συχνότητα λαμβανόμενου σήματος στόχου
- Ολίσθηση συχνότητας Doppler του λαμβανόμενου σήματος στόχου
- Πλάτος του λαμβανόμενου σήματος στόχου (dB)

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι διαφορές ανάμεσα στο παθητικό και στο ενεργητικό σύστημα sonar.



Εικόνα 3: Διαφορές ανάμεσα σε ένα παθητικό και ένα ενεργητικό SONAR

2.3 SONAR πλευρικής σάρωσης (side scan sonar)



Εικόνα 4: Τρόπος λειτουργίας – σάρωσης ενός SONAR πλευρικής σάρωσης

Το 1960 ο Δρ. Harold Edgerton (καθηγητής στο τμήμα Ινστιτούτο Τεχνολογίας στη Μασαχουσέτη) άρχισε να προσαρμόζει τις τεχνικές του στη φωτογράφιση με φλας υψηλής ταχύτητας στην ακουστική, έχοντας καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η φωτογράφιση δεν ταίριαζε στις σκοτεινές συνθήκες που υπάρχουν στον βυθό. Στέλνοντας «λάμπεις» ακουστικής ενέργειας στο νερό και καταγράφοντας την ηχώ, ο Edgerton ανέπτυξε ένα ρυμουλκούμενο sonar με πλευρική όψη που θα μπορούσε να δημιουργήσει μία συνεχή εικόνα του πυθμένα το οποίο ισχύει και σήμερα.

Η αρχή λειτουργίας του sonar πλευρικής σάρωσης είναι η ίδια ενός sonar σταθερής γωνίας εκπομπής. Η ηχητική ενέργεια που εκπέμπεται με τη μορφή ενός παλμού μικρής διάρκειας (ring) ανακλάται σε ένα αντικείμενο (στόχο) και επιστρέφει στη συσκευή εκπομπής, έχοντας υποστεί αλλοίωση των χαρακτηριστικών της ανάλογα με την ποιότητα του στόχου. Εάν τα χαρακτηριστικά της λήψης σε συνδυασμό με τη γνώση της ταχύτητας του ήχου στη θάλασσα και της γωνίας εκπομπής αξιοποιηθούν κατάλληλα μπορεί να αποκτήσει κανείς τις πληροφορίες που θα του δώσουν μία εικόνα ή ακόμη και ταυτοποίηση του στόχου.

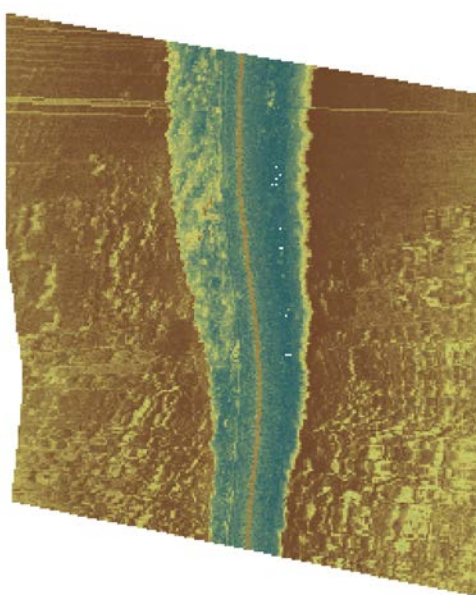
Στα σύγχρονα συστήματα sonar, με την βοήθεια κατάλληλου προγράμματος, αυτή η γραμμή σάρωσης πληροφοριών που είναι συνεχής, αποστέλλεται στον υπολογιστή για να ερμηνευθεί και να εμφανιστούν διαδοχικά όλα μαζί τα δεδομένα που συλλέχθηκαν. Στην περίπτωση ενός sonar απεικόνισης του βυθού, η τελική εικόνα που σχηματίζεται είναι μια «ακουστική» εικόνα του πυθμένα της θάλασσας.



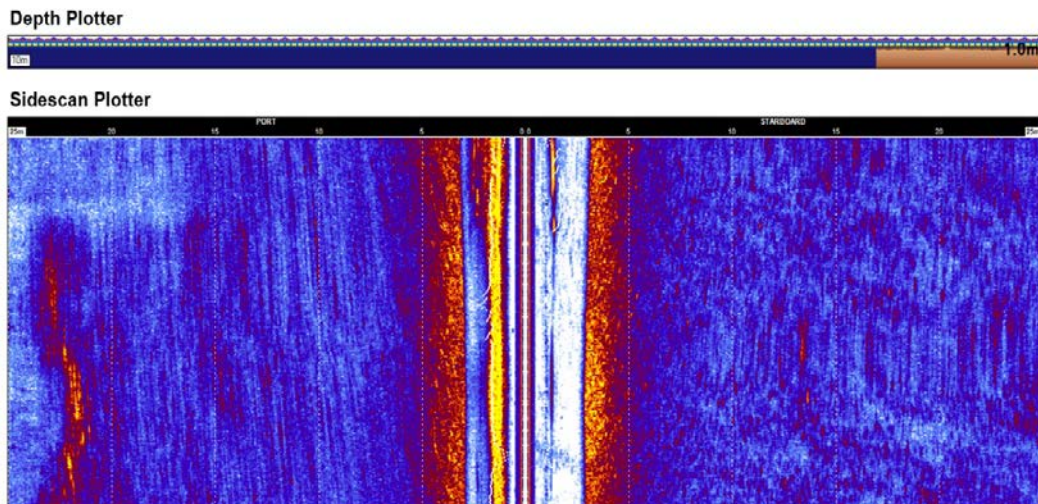
Εικόνα 5: Γωνίες εκπομπής ενός SONAR πλευρικής σάρωσης

Στην εικόνα 5 φαίνονται τυπικές διατάξεις sonar που έχει τη δυνατότητα να «βλέπει» κάτω του και πάνω από τον οριζόντιο άξονα.

Στις εικόνες 6 και 7 παρουσιάζονται οι καταγραφές που παίρνουμε από το Sonar πλευρικής σάρωσης με ονομασία Tritech StarFish 452F Side Scan Sonar System. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται από το Εργαστήριο Παράκτιας & Θαλάσσιας Έρευνας του Ιδρύματος Τεχνολογίας Και Έρευνας (Ι.Τ.Ε.). Οι εικόνες αυτές μας παρουσιάζουν πως ακριβώς απεικονίζεται η χαρτογράφηση του βυθού μιας θαλάσσιας περιοχής. Στο κέντρο και των δύο εικόνων παρατηρούμε αποχρώσεις του μπλε. Οι ζώνες αυτές απεικονίζουν την στήλη του νερού που υπάρχει ανάμεσα στο σύστημα Sonar και στον πυθμένα. Οι υπόλοιπες περιοχές που έχουν διαφορετικούς χρωματισμούς δείχνουν συνήθως τις βραχώδεις περιοχές του βυθού ή περιοχές που έχουν αρκετά φύκια.



Εικόνα 6: Καταγραφή πυθμένα στην περιοχή της Παχιάς Άμμου Ιεράπετρας με Sonar πλευρικής σάρωσης



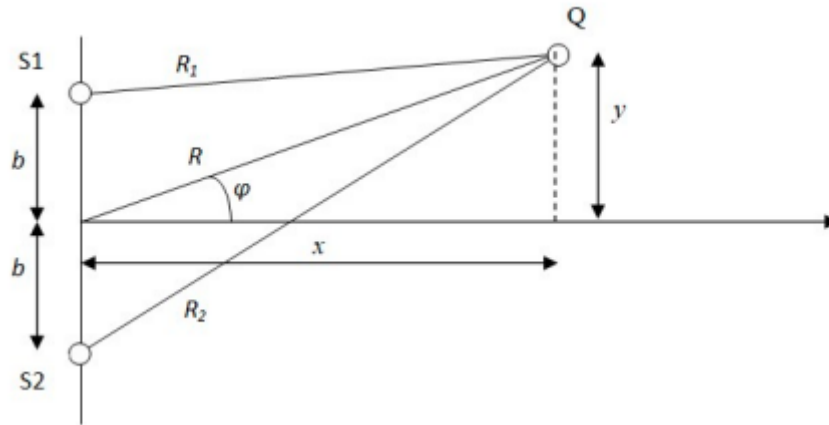
Εικόνα 7: Καταγραφή πυθμένα στην περιοχή της Ελούντας Λασιθίου. Εικόνα από το πρόγραμμα ανάλυσης δεδομένων Starfish scanline V2.1.

3. Δημιουργία δέσμης εκπομπής SONAR

Γνωρίζουμε ότι η εκπομπή ηχητικής ενέργειας από μία πηγή γίνεται συνήθως με την μορφή δέσμης. Τα χαρακτηριστικά της δέσμης είναι η διεύθυνση εκπομπής που ορίζεται από τον άξονά της και το εύρος της. Τα χαρακτηριστικά αυτά εξαρτώνται από το είδος και την κατασκευή του ακουστικού μεταλλάκτη (transducer) και μπορούν να μελετηθούν με τη χρήση στοιχειωδών πηγών που βρίσκονται σε συγκεκριμένη διάταξη. Θα μελετήσουμε τα δύο αυτά χαρακτηριστικά στη συνέχεια θεωρώντας αρμονικές πηγές δηλαδή πηγές που εκπέμπουν ήχο συγκεκριμένης συχνότητας (μονοχρωματικές).

3.1 Σύθεση 2 σημειακών πηγών

Για τις πηγές θα θεωρήσουμε ότι είναι σημειακές παντοκατευθυντικές που σημαίνει ότι εκπέμπουν σφαιρικά κύματα ομοιόμορφα σε όλες τις διευθύνσεις. Πριν ξεκινήσει η ανάλυση ας λάβουμε υπόψιν μας την γεωμετρία της σύθεσης των δύο πηγών όπως εμφανίζεται στην εικόνα 8.



Εικόνα 8: Γεωμετρία σύνθεσης δύο πηγών

Στη μελέτη των δύο αυτών πηγών θα θεωρήσουμε ότι η απόσταση του σημείου λήψης από την αρχή των αξόνων είναι πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση των πηγών μεταξύ τους. Δηλαδή,

$$R \gg 2b \quad (18)$$

Από το σχήμα 8 παίρνουμε τα εξής δεδομένα:

$$R_1^2 = (y - b)^2 + x^2 \quad (19)$$

$$R_1^2 = (R \sin \varphi - b)^2 + R^2 \cos^2 \varphi = R^2 - 2Rb \sin \varphi + b^2 \quad (20)$$

$$R_1 = (R^2 - 2Rb \sin \varphi + b^2)^{1/2} \quad (21)$$

$$R_1 = R \left(1 - \frac{2b \sin \varphi}{R} + \frac{b^2}{R^2} \right)^{1/2} \quad (22)$$

Επειδή θεωρούμε ότι $R \gg 2b$ ή

$$b/R \ll 1 \quad (23)$$

και χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα:

$$(1 + q)^{\frac{1}{2}} = 1 + \frac{q}{2} - \frac{q^2}{8} + \frac{q^3}{16} + \dots \quad (24)$$

όπου q ένας μικρός αριθμός, και θεωρώντας ότι:

$$q \rightarrow \frac{b^2}{R^2} - \frac{2b \sin \varphi}{R} \quad (25)$$

τότε προκύπτει η σχέση:

$$R_1 = R \left(1 - \frac{b}{R} \sin \varphi + \frac{b^2}{2R^2} (1 - \sin^2 \varphi) + \dots \right) \quad (26)$$

Αγνοώντας τους όρους με δυνάμεις υψηλότερες του 2, παίρνουμε τελικά:

$$R_1 \approx R - b \sin \varphi \quad (27)$$

Ομοίως και για την δεύτερη πηγή μπορούμε να δείξουμε ότι θα βρίσκεται σε απόσταση:

$$R_2 \approx R + b \sin \varphi \quad (28)$$

Το σήμα που θα φτάσει στο σημείο λήψης από τις δύο πηγές, θα είναι μία συνεισφορά και των δύο σημάτων. Όμως θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας αν οι δύο αυτές πηγές εκπέμπουν σε φάση ή αν έχουν κάποια διαφορά φάσης μεταξύ τους. Οι περιπτώσεις αυτές θα αναλυθούν παρακάτω.

3.1.1 Δύο πηγές που εκπέμπουν σε φάση

Στην περίπτωση αυτή οι πηγές εκπέμπουν σε φάση άρα το σήμα που θα ληφθεί στο σημείο λήψης θα είναι το άθροισμα των δύο σημάτων. Επίσης θα θεωρήσουμε ότι $2b=d$. Επομένως:

$$p_{tot} = \frac{A}{R_1} e^{i(\omega t - kR_1)} + \frac{A}{R_2} e^{i(\omega t - kR_2)} \quad (29)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις που βρήκαμε προηγουμένως για τις αποστάσεις των πηγών R_1 και R_2 προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} p_{tot} &= \frac{A}{R_1} e^{i(\omega t - k(R - b \sin \varphi))} + \frac{A}{R_2} e^{i(\omega t - k(R + b \sin \varphi))} = \\ &= \frac{A}{R_1} e^{i(\omega t - kR)} e^{i(kb \sin \varphi)} + \frac{A}{R_2} e^{i(\omega t - kR)} e^{-i(kb \sin \varphi)} \end{aligned} \quad (30)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν την αρχική υπόθεση για σημείο λήψης σε μεγάλη απόσταση από την πηγή, θα δεχθούμε ότι τα πλάτη της λύσης της ακουστικής εξίσωσης είναι ίδια, δηλαδή $R_1 = R_2 = R$. Με αυτόν τον τρόπο δεν θα επηρεαστεί και η διαφορά φάσης των πηγών. Άρα:

$$p_{tot} = \frac{A}{R} e^{i(\omega t - kR)} (e^{i(kb \sin \varphi)} + e^{-i(kb \sin \varphi)}) \quad (31)$$

Η οποία μπορεί να εκφραστεί και ως:

$$p_{tot} = \frac{2A}{R} e^{i(\omega t - kR)} \cos(kb \sin \varphi) \quad (32)$$

3.1.2 Δίπολο

Στην περίπτωση αυτή οι δύο πηγές εκπέμπουν με διαφορά φάσης 180° . Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα θεωρήσουμε ότι η πηγή 1 εκπέμπει όπως πριν, και η πηγή 2 εκπέμπει με διαφορά φάσης 180° σε σχέση με την πρώτη πηγή. Οπότε η ακουστική εξίσωση θα πάρει την μορφή:

$$p_{tot} = \frac{A}{R_1} e^{i(\omega t - kR_1)} + \frac{A}{R_2} e^{i(\omega t - kR_2 + \pi)} \quad (33)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις για τις αποστάσεις των πηγών R_1 και R_2 προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} p_{tot} &= \frac{A}{R_1} e^{i(\omega t - k(R - b \sin \varphi))} + \frac{A}{R_2} e^{i(\omega t - k(R + b \sin \varphi) + \pi)} = \\ &= \frac{A}{R_1} e^{i(\omega t - kR)} e^{i(kb \sin \varphi)} + \frac{A}{R_2} e^{i(\omega t - kR)} e^{(-ikb \sin \varphi + i\pi)} = \\ &= \frac{A}{R_1} e^{i(\omega t - kR)} e^{i(kb \sin \varphi)} + \frac{A}{R_2} e^{i(\omega t - kR)} e^{(-ikb \sin \varphi)} e^{i\pi} \end{aligned} \quad (34)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι $R_1 = R_2 = R$. Με αυτόν τον τρόπο δεν θα επηρεαστεί και η διαφορά φάσης των πηγών. Άρα:

$$p_{tot} = \frac{A}{R} e^{i(\omega t - kR)} (e^{i(kb \sin \varphi)} - e^{-i(kb \sin \varphi)}) \quad (35)$$

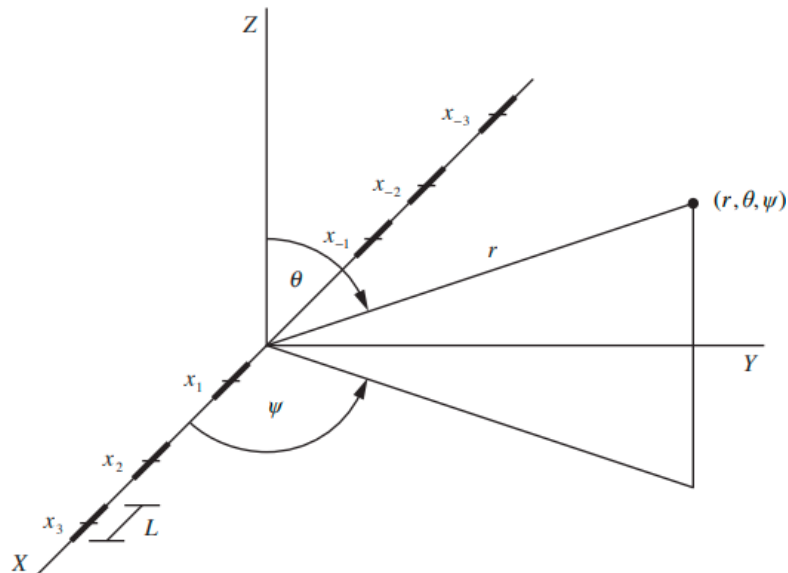
Η οποία μπορεί να εκφραστεί και ως:

$$p_{tot} = \frac{2iA}{R} e^{i(\omega t - kR)} \sin(kb \sin \varphi) \quad (36)$$

3.2 Σημειακές πηγές σε σειρά (Linear Arrays)

Σε αυτή την ενότητα θα μελετηθεί η περίπτωση της σύνθεσης περισσότερων από δύο πηγών, που ισαπέχουν απόσταση b μεταξύ τους και είναι τοποθετημένες στην ίδια ευθεία. Θα θεωρήσουμε ότι η ευθεία αυτή ταυτίζεται με τον άξονα x' . Επίσης στη γενική περίπτωση θα θεωρήσουμε ότι κάθε πηγή εκπέμπει με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που απεικονίζονται στη σύνθεσή τους.

3.2.1 Η δέσμη μακριά από την συστοιχία των πηγών (far field pattern)



Εικόνα 9: Συστοιχία πηγών σχεδιασμένη σε τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων

Αρχικά θα ορίσουμε r το εύρος του πεδίου της πηγής σε μέτρα όπου ισχύει $r = |r| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, και $\hat{r} = u\hat{x} + v\hat{y} + w\hat{z}$ το αδιάστατο μοναδιαίο διάνυσμα προς την κατεύθυνση του r , δηλαδή $r = r\hat{r}$, όπου

$$u = \sin\theta\cos\psi$$

$$v = \sin\theta\sin\psi$$

$$w = \cos\theta$$

που είναι αδιάστατα μεγέθη και είναι εκφρασμένα ως προς τις σφαιρικές γωνίες θ και ψ .

Η ακουστική πίεση $p(t,r)$ σε μονάδες Pa που ισχύει στην περιοχή απομακρυσμένου πεδίου δίνεται από την εξίσωση:

$$p(t, r, \theta, \psi) \cong jA_x \frac{\rho_0 f_0}{2r} D(f, \theta, \psi) \exp \left[+j2\pi f_0 \left(t - \frac{r}{c} \right) \right]$$

όπου A_x είναι συντελεστής πλάτους σε μονάδες volt, ρ_0 είναι η σταθερή πυκνότητα ισορροπίας ενός ομογενές ρευστού και $f_0 = \frac{c}{\lambda}$, λ το μήκος κύματος σε μέτρα.

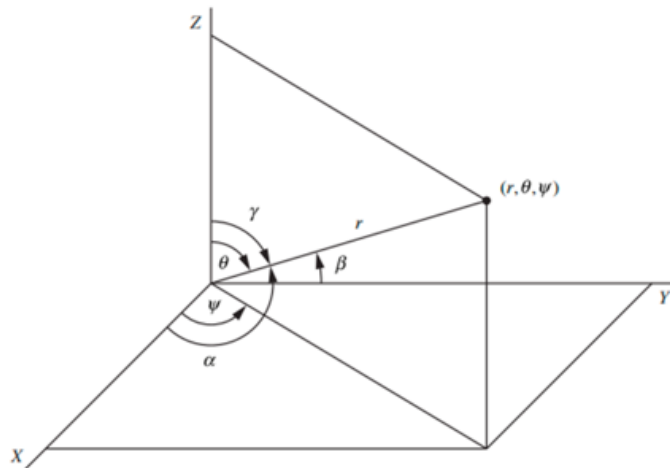
Από τα παραπάνω προκύπτει ο ορισμός της δέσμης μακριά από την συστοιχία των πηγών (far field pattern) θεωρώντας ότι η γραμμική συστοιχία πηγών είναι στον άξονα των $x'x$ ως:

$$D(f, f_x) = F_{x_A} \{A(f, x_A)\} = \int_{-\infty}^{\infty} A(f, x_A) \exp(+j2\pi f_x x_A) dx_A \quad (37)$$

όπου $A(f, x)$ είναι η σύνθετη απόκριση συχνότητας (σύνθετη συνάρτηση διαφράγματος) μίας συστοιχίας πηγών και

$$f_x = \frac{u}{\lambda} = \frac{\sin\theta \cos\psi}{\lambda} \quad (38)$$

ορίζουμε την χωρική συχνότητα στην κατεύθυνση των συντεταγμένων, η οποία εκφράζεται σε πολικές συντεταγμένες.



Εικόνα 10: Γεωμετρική περιγραφή του πολικού και του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων

Η σύνθετη απόκριση συχνότητας A ορίζεται ως

$$A(f, x_A) = \sum_{n=-N/2}^{-1} c_n(f) e_n(f, x_A - x_n) + \sum_{n=1}^{N/2} c_n(f) e_n(f, x_A - x_n) \quad (39)$$

$$A(f, x_A) = \sum_{n=1}^{N/2} [c_{-n}(f) e_{-n}(f, x_A - x_{-n}) + c_n(f) e_n(f, x_A - x_n)] \quad (40)$$

όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των πηγών και

$$c_n(f) = a_n(f) \exp[+j\theta_n(f)] \quad (41)$$

όπου $c_n(f)$ είναι μία σύνθετη συνάρτηση βάρους (complex weight) και $a_n(f)$ είναι το βάρος πλάτους (amplitude weight), τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα. Επίσης $\theta_n(f)$ είναι η φάση της εξίσωσης και $e_n(f,x)$ είναι η σύνθετη συχνότητα απόκρισης (σύνθετη συνάρτηση διαφράγματος) του στοιχείου n , γνωστό και ως στοιχείο συνάρτησης.

Επομένως,

$$D(f, f_x) = \sum_{n=1}^{N/2} [c_{-n}(f)E_{-n}(f, f_x)\exp[+j2\pi f_x x_{-n}] + c_n(f)E_n(f, f_x)\exp[+j2\pi f_x x_n]] \quad (42)$$

όπου,

$$F_{x_A}\{e_n(f, x_A - x_n)\} = E_n(f, f_x) \exp(+j2\pi f_x x_n) \quad (43)$$

$$E_n(f, f_x) = F_{x_A}\{e_n(f, x_A)\} \quad (44)$$

Τα παραπάνω μπορούμε να συνοψιστούν ως εξής:

$$D(f, f_x) = E(f, f_x)S(f, f_x) \quad (45)$$

$$E(f, f_x) = F_{x_A}\{e(f, x_A)\} \quad (46)$$

όπου

$$S(f, f_x) = \sum_{n=1}^{N/2} [c_{-n}(f)\exp[+j2\pi f_x x_{-n}] + c_n(f)\exp[+j2\pi f_x x_n]] \quad (47)$$

Κανονικοποιώντας την συνάρτηση προκύπτει

$$S_{max} = \max|S(f, f_x)| = \sum_{n=1}^{N/2} [a_{-n}(f) + a_n(f)] \quad (48)$$

Η συνάρτηση E

$$E(f, f_x) = S(f) \quad (49)$$

είναι το far-field beam pattern ενός παντοκατευθυντικού σημειακού στοιχείου και δεν είναι συνάρτηση των σφαιρικών γωνιών θ και ψ .

Επομένως το far-field beam pattern μπορεί να ξανά γραφεί ως εξής:

$$D(f, f_x) = S(f)S(f, f_x) \quad (50)$$

όπου

$$S(f, f_x) = \sum_{n=-N'}^{N'} \alpha_n(f) \exp[+j[2\pi f_x n d + \theta_n(f)]] \quad (51)$$

με $N' = \frac{N-1}{2}$

$$f_x = \frac{v}{\lambda} = \frac{\sin \theta \cos \psi}{\lambda} \quad (52)$$

$$\theta_n = -2\pi f'_x n d \quad (53)$$

και $f'_x = \frac{v}{\lambda} = \frac{\sin \theta' \cos \psi'}{\lambda} \quad (54)$

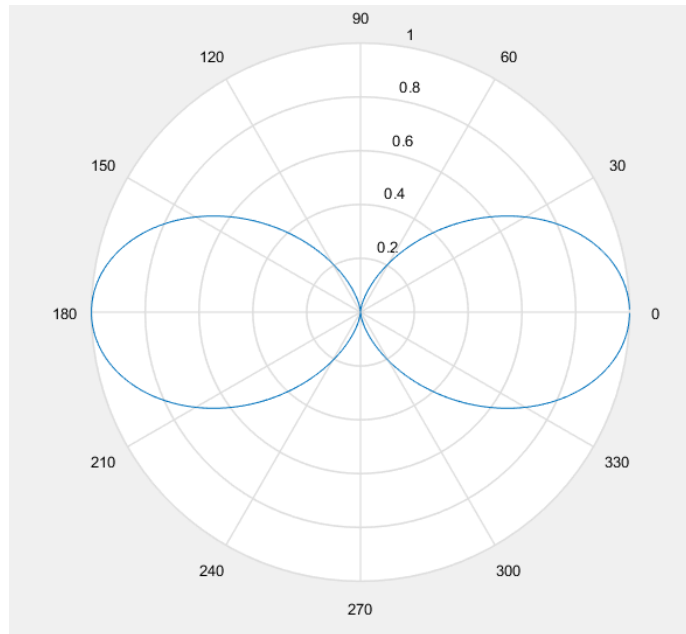
Για απλοποίηση θα μελετήσουμε την κατευθυντότητα στο επίπεδο xy και θα θεωρήσουμε ότι οι πηγές βρίσκονται στον άξονα x . Επίσης θα θεωρήσουμε ότι χρησιμοποιούμε ορθογώνιο βάρος πλάτους. Η ανάλυση των βαρών πλάτους θα γίνει εκτενέστερα στην επόμενη ενότητα.

$$D = \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{\pi M d \sin(\psi)}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{\pi d \sin(\psi)}{\lambda}\right)} \quad (55)$$

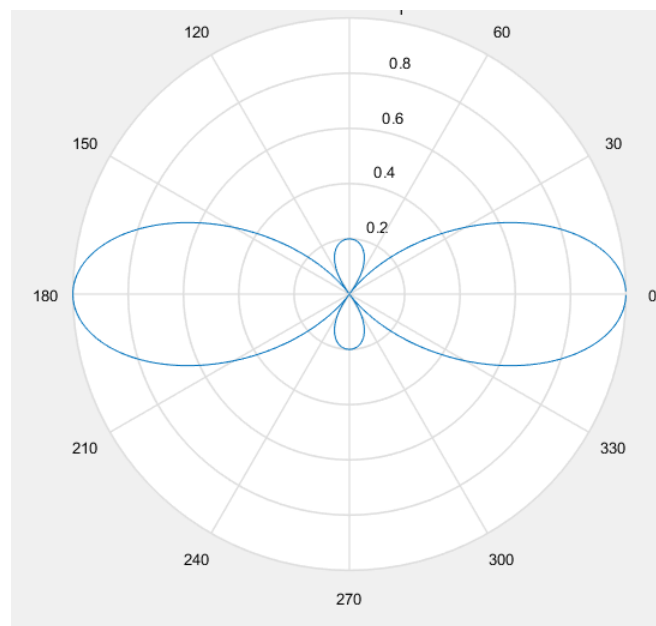
όπου $M = \frac{N-1}{2}$

Το αποτέλεσμα που αποτυπώθηκε στην παραπάνω σχέση θα εξηγηθεί πως προέκυψε στην ενότητα 3.3.1.

Γραφικά μπορούμε να απεικονίσουμε την κατευθυντότητα των πηγών σε σύστημα πολικών συντεταγμένων όπως φαίνονται στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 11: Πολικό διάγραμμα εκπομπής πηγής μακρινής δέσμης συστοιχίας πηγών ενός δίπολου με $d/\lambda=1/2$.



Εικόνα 12: Πολικό διάγραμμα εκπομπής πηγής μακρινής δέσμης συστοιχίας 2 πηγών

3.2.2 Επιλογές «βαρών» εκπομπής και φάσεων εκπομπής

Η επιλογή των βαρών πλάτους (amplitude weights) που χρειαζόμαστε για το πρόβλημα του υπολογισμού της μακρινής δέσμης πεδίου (far field pattern) είναι σημαντική γιατί θα καθορίσει την τελική εξίσωση της κατευθυντότητας. Υπάρχει ποικιλία βαρών που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της συχνότητας απόκρισης των γραμμικών συστοιχιών. Υπάρχουν κοινές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα Sonar, radar και γενικότερα συστημάτων επικοινωνίας έτσι ώστε να βοηθήσει στην παραγωγή δέσμης μακρινού πεδίου, στους υπολογισμούς του εύρους δέσμης και στην σχέση μεταξύ των πλάτων δέσμης και των πλευρικών λοβών της δέσμης μακρινού πεδίου. Οι περιπτώσεις των βαρών πλάτους που θα παρουσιαστούν παρακάτω είναι τα πιο συνηθισμένα που συναντιούνται στους ηλεκτοακουστικούς μετατροπείς. Ως βάρη πλάτους των συστοιχιών χρησιμοποιούνται συνήθως τα παράθυρα πλάτους (amplitude windows). Τα παράθυρα αυτά βοηθούν στην μείωση των πλευρικών λοβών που σχηματίζονται στις γραφικές παραστάσεις των δέσμεων μακρινού πεδίου.

Οι κατηγορίες των παράθυρων αυτών και οι αντίστοιχες δέσμες μακρινού πεδίου είναι:

➤ *Ορθογώνιο παράθυρο πλάτους (Rectangular Amplitude Window)*

Στην περίπτωση αυτή έχουμε ότι η σύνθετη απόκριση συχνότητας είναι

$$A(f, x_A) = a(f, x_A) = f(x) = \begin{cases} 1, & |x_A| \leq L/2 \\ 0, & x_A \geq L/2 \end{cases} \quad (56)$$

οπότε το $D_N(f, \theta, \psi)$ γίνεται

$$D_N(f, \theta, \psi) = \text{sinc} \left(\frac{L}{\lambda} \sin\theta \cos\psi \right) \quad (57)$$

χρησιμοποιώντας την γνωστή ταυτότητα $\text{sinc}x = \frac{\sin(x\pi)}{(x\pi)}$ και κανονικοποιώντας την εξίσωση προκύπτει ότι

$$D_N(f, \theta, \psi) = \frac{\sin\left(\frac{L}{\lambda} \sin\theta \cos\psi\right)}{\sin\left(\frac{L}{\lambda} \sin\theta \cos\psi\right)} \quad (58)$$

➤ Τριγωνικό παράθυρο (Triangular window)

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε

$$a(f, x_A) = f(x) = \begin{cases} 1 - \frac{x_A}{L/2}, & |x_A| \leq L/2 \\ 0, & x_A \geq L/2 \end{cases} \quad (59)$$

Άρα η δέσμη του μακρινού πεδίου είναι:

$$D_N = \frac{D}{D_{max}} \quad (60)$$

$$D_{max} = |D(f, 0)| = \frac{L}{2} \quad (61)$$

$$D(f, f_x) = \frac{L}{2} \sin^2 \left(\frac{f_x L}{2} \right) \quad (62)$$

Άρα τελικά προκύπτει:

$$D_N(f, f_x) = \sin^2 \left(\frac{f_x L}{2} \right) \quad (63)$$

Παρατηρούμε ότι ενώ το ορθογώνιο παράθυρο είναι ασυνεχές στα σημεία $x = \pm L/2$, το τριγωνικό παράθυρο πλησιάζει το μηδέν στο $x = \pm L/2$ με σχετικά ομαλό τρόπο. Υπάρχει ένας γενικός κανόνας που αναφέρει ότι όσο πιο ομαλά πλησιάζει το μηδέν ένα παράθυρο πλάτους στα άκρα $x = \pm \frac{L}{2}$, τόσο χαμηλότερο θα είναι τα επίπεδα των πλευρικών λοβών του δέσμιου μακρινού πεδίου. Να διευκρινιστεί ότι η λέξη ομαλότερο σημαίνει με μικρή κλίση.

Οι συναρτήσεις των παραθύρων πλάτους που θα ακολουθήσουν, για άρτιους ακέραιους αριθμούς του α , μπορούν να εκφραστούν με την μορφή συνημίτονου, δηλαδή $\cos(\omega t)$.

Πιο συγκεκριμένα:

$$\omega(n) = a_0 - a_1 \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right) + a_2 \cos \left(\frac{4\pi n}{N} \right) - a_3 \cos \left(\frac{6\pi n}{N} \right) + a_4 \cos \left(\frac{8\pi n}{N} \right) - \dots \quad (64)$$

με

α	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4
0	1				
2	0,5	0,5			
4	0,375	0,5	0,125		
6	0,3125	0,46875	0,1875	0,03125	
8	0,2734375	0,4375	0,21875	0,0625	$7,8125 \times 10^{-3}$

➤ *Παράθυρο πλάτους συνημίτονου (cosine-sum amplitude window)*

Η σύνθετη απόκριση συχνότητας σε αυτό το παράθυρο πλάτους είναι:

$$\omega(n) = \sum_{k=0}^K (-1)^k a_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (65)$$

με $0 \leq n < N$

Επομένως η δέσμη μακρινού πεδίου είναι:

Κανονικοποιώντας πρώτα

$$D_{max} = |D(f, 0)| = \frac{2L}{\pi} \quad (66)$$

Άρα τελικά προκύπτει:

$$D_N(f, f_x) = \frac{\cos(\pi f_x L)}{1 - (2f_x L)^2} \quad (67)$$

➤ *Παράθυρο Hann και Hamming (Hann and Hamming windows)*

Το παράθυρο του αθροίσματος συνημίτονου για $k=1$ γίνεται:

$$\omega(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (68)$$

με $0 \leq n < N$

Παίρνοντας ότι $a_0 = a_1 = 0,5$ έχουμε ότι:

$$\begin{aligned} \omega(n) &= 0,5(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)) \\ &= \sin^2\left(\frac{\pi n}{N}\right) \end{aligned} \quad (69)$$

➤ *Παράθυρο Blackman (Blackman window)*

Σε αυτό το παράθυρο έχουμε ότι:

$$\omega(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) \quad (70)$$

με $\alpha_0 = \frac{1-\alpha}{2}$, $\alpha_1 = 0,5$, $\alpha_2 = \frac{\alpha}{2}$

Προσεγγιστικά παίρνουμε

$$\alpha = 0,16.$$

Άρα

$$\alpha_0 = 0,42$$

$$\alpha_1 = 0,5$$

$$\alpha_2 = 0,08$$

Αν και τα βάρη πλάτους είναι εν γένει συναρτήσεις της συχνότητας, τα παραπάνω πλάτη είναι εκφρασμένα συναρτήσεις του αριθμού των στοιχείων n .

Τα βάρη πλάτους, καθώς και τα βάρη φάσης χρησιμοποιούνται για την ψηφιακή επεξεργασία της δέσμης του σήματος (beamforming) η οποία θα αναλυθεί στην συνέχεια.

3.3 Κατευθυντότητα δέσμης

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να κατευθύνουμε το πεδίο της δέσμης μίας συστοιχίας πηγών σε όποιο σημείο επιθυμούμε.

3.3.1 Υπολογισμός της γωνίας του άξονα της δέσμης- Δημιουργία δέσμης επιθυμητής γωνίας άξονα (beamforming)

Υπενθυμίζοντας τις σχέσεις 50-54, το πεδίο μακρινής δέσμης όταν έχει $\theta_n(f) = 0$ γίνεται:

$$D(f, f_x) = S(f) \sum_{n=-N'}^{N'} \alpha_n(f) \exp[+j[2\pi f_x n d]] \quad (71)$$

ενώ όταν $\theta_n(f) \neq 0$ γίνεται:

$$D'(f, f_x) = S(f) \sum_{n=-N'}^{N'} \alpha_n(f) \exp[+j[2\pi f_x n d + \theta_n(f)]] \quad (72)$$

Αν οι πηγές ισαπέχουν μεταξύ τους τότε $x_n = nd$ και άρα προκύπτει:

$$D'(f, f_x) = S(f) \sum_{n=-N'}^{N'} \alpha_n(f) \exp[+j2\pi(f_x - f'_x)x_n] \quad (73) \quad \text{Για}$$

παράδειγμα ας εφαρμόσουμε τα παραπάνω για να κατευθύνουμε ένα δίπολο.

Ένα δίπολο είναι μία γραμμική συστοιχία δύο πηγών. Οι πηγές αυτές απέχουν απόσταση d μεταξύ τους και ισαπέχουν από την αρχή των αξόνων $d/2$. Οι θέσεις είναι συμμετρικές ως προς την αρχή των αξόνων επομένως θα ισχύουν να εξής:

$$\alpha_1(f) = \alpha_2(f) \quad (74)$$

$$\theta_1(f) = \theta_2(f) \quad (75)$$

όπου οι τιμές 1 και 2 αναφέρονται στις 2 πηγές.

Άρα θα έχουμε:

$$\begin{aligned} S(f, f_x) &= \alpha_1(f) \{ \exp[+j[2\pi f_x d + \theta_1(f)]] - \exp[-j[2\pi f_x d + \theta_1(f)]] \} \\ \Rightarrow S(f, f_x) &= j2\alpha_1(f) \sin[\pi f_x d + \theta_1(f)] \end{aligned} \quad (76)$$

Άρα το πεδίο μακρινής δέσμης είναι:

$$D(f, f_x) = S(f) j2\alpha_1(f) \sin[\pi f_x d + \theta_1(f)] \quad (77)$$

Το μέτρο (μέγεθος) του πεδίου θα γίνει:

$$|D(f, f_x)| = 2|S(f)||\alpha_1(f)||\sin[\pi f_x d + \theta_1(f)]| \quad (78)$$

Η μεγιστοποίηση του μεγέθους δίνεται από την σχέση:

$$|D_{max}| = 2|\alpha_1(f)||S(f)| \quad (79)$$

Άρα προκύπτει:

$$|D_N(f, f_x)| = |\sin[\pi f_x d + \theta_1(f)]| \quad (80)$$

όπου

$$\theta_1(f) = -\pi f'_x d \quad (81)$$

Άρα,

$$|D_N(f, f_x)| = |\sin[\pi d(f_x - f'_x)]| \quad (82)$$

Ξέρουμε ότι:

$$f_x = \frac{v}{\lambda} = \frac{\sin \theta \cos \psi}{\lambda}$$

και

$$f'_x = \frac{v}{\lambda} = \frac{\sin \theta' \cos \psi'}{\lambda}$$

Επομένως

$$|D_N(f, f_x)| = \left| \sin \left[\pi \frac{d}{\lambda} (u - u') \right] \right| \quad (83)$$

$$\Rightarrow |D_N(f, \theta, \psi)| = \left| \sin \left[\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \theta \cos \psi - \sin \theta' \cos \psi') \right] \right| \quad (84)$$

Επειδή θέλουμε να υπολογίσουμε το πεδίο μακρινής δέσμης στο επίπεδο θα ορίσουμε τις γωνίες $\theta = \theta' = 90^\circ$, οπότε

$$|D_N(f, 90, \psi)| = \left| \sin \left[\pi \frac{d}{\lambda} (\cos \psi - \cos \psi') \right] \right| \quad (85)$$

Η εξίσωση αυτή είναι το μέγεθος του κανονικοποιημένου πεδίου μακρινής δέσμης το οποίο μπορεί να κατευθυνθεί από την γωνία ψ' , όπου μπορούμε να της ορίσουμε οποιαδήποτε γωνία θέλουμε.

Τα βάρη πλάτους που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα μπορούμε να τα γενικεύσουμε. Ας θεωρήσουμε ότι το βάρος πλάτους μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή:

$$\alpha_n(f) = A \cos \left(\frac{b\pi n}{N-1} \right) \quad (86)$$

με $n = -N', \dots, 0, \dots, N'$

όπου οι τιμές που μπορούν να πάρουν τα A και b είναι:

A: 1, 0.5, 0.54, 0.46, 0.42, 0.08 και

b: 0, 1, 2, 4

Το βάρος πλάτους μπορεί να γραφτεί και ως:

$$\alpha_n(f) = \frac{A}{2} \exp \left[j \frac{b\pi n}{N-1} \right] + \frac{A}{2} \exp \left[-j \frac{b\pi n}{N-1} \right] \quad (87)$$

Επίσης η σχέση (51) γραφεται:

$$S(f, f_x) = \sum_{n=-N'}^{N'} \alpha_n(f) \exp[+j2\pi n d [f_x - f'_x]] \quad (88)$$

Χρησιμοποιώντας την σειρά

$$\sum_{k=-K}^K \exp[+jk\alpha] = \frac{\sin[(2K+1)\alpha/2]}{\sin(\alpha/2)} \quad (89)$$

Και αντιστοιχίζοντας $\alpha \rightarrow 2\pi n d [f_x - f'_x]$ και $N' \rightarrow K$ παίρνουμε τελικά ότι:

$$S(f, f_x) = \frac{A}{2} \cdot \frac{\sin[\pi(f_x - f'_x)Nd + \frac{b\pi N}{2(N-1)}]}{\sin[\pi(f_x - f'_x)d + \frac{b\pi}{2(N-1)}]} + \frac{A}{2} \frac{\sin[\pi(f_x - f'_x)Nd - \frac{b\pi N}{2(N-1)}]}{\sin[\pi(f_x - f'_x)d - \frac{b\pi}{2(N-1)}]} \quad (90)$$

Παρατηρούμε ότι η κατευθυντότητα της δέσμης πλέον εμπεριέχει τον όρο $f_x - f'_x$. Είναι εμφανώς ότι έχει προστεθεί μια επιπλέον φάση στην εξίσωσή μας. Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η παραπάνω διατύπωση ας δειχθεί ένα παράδειγμα.

Εάν έχουμε $A=1$ και $b=0$ τότε προκύπτει:

$$a_n(f) = 1$$

και έχουμε

$$S(f, f_x) = \frac{\sin(N\pi f_x d)}{\sin(\pi f_x d)} \quad (91)$$

Και γνωρίζοντας ότι

$$f_x = \frac{v}{\lambda} = \frac{\sin \theta \cos \psi}{\lambda}$$

Προκύπτει ότι:

$$S(f, f_x) = \frac{\sin(N\pi \frac{d}{\lambda} \sin\theta \cos\psi)}{\sin(\pi \frac{d}{\lambda} \sin\theta \cos\psi)} \quad (92)$$

3.3.2 Οριοθέτηση πλευρικών λοβών

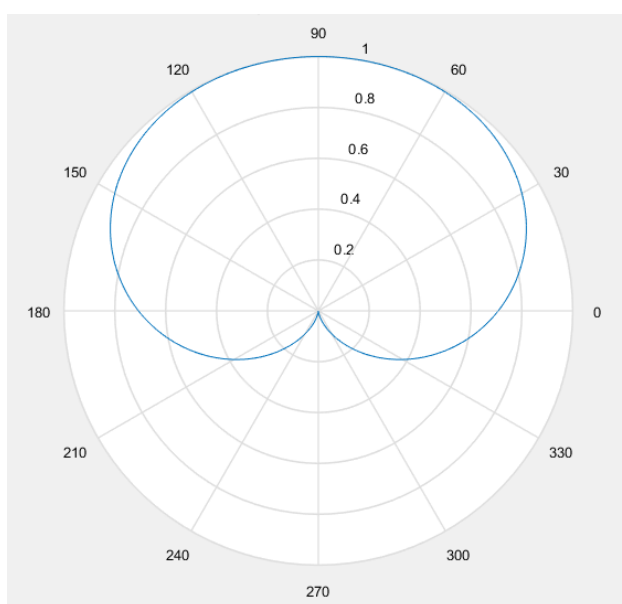
Παρατηρώντας τα διαγράμματα των πεδίων μακρινής δέσμης βλέπουμε ότι εκτός από τους κύριους λοβούς υπάρχουν κι άλλοι μικρότεροι λοβοί. Οι πλευρικοί αυτοί λοβοί παράγονται από μία συστοιχία που η απόσταση μεταξύ των πηγών είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε το πεδίο μακρινής δέσμης να εκπέμπει σε περισσότερες από μία κατευθύνσεις.

Όπως προαναφέρθηκε υπάρχει ένας γενικός κανόνας που αναφέρει ότι όσο πιο ομαλά πλησιάζει το μηδέν ένα παράθυρο πλάτους στα άκρα $x = \pm \frac{L}{2}$ τόσο χαμηλότερο θα είναι τα επίπεδα των πλευρικών λοβών του δέσμιου μακρινού πεδίου. Αν γίνεται μείωση στους πλευρικούς λοβούς τότε έχουμε αύξηση του εύρους του πλευρικού λοβού του μοτίβου της δέσμης.

4 Χαρακτηριστικά παραδείγματα δημιουργίας δέσμης και κατευθυντότητας SONAR

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων με συγκεκριμένες παραμέτρους και αποτελεί προσομοίωση της λειτουργίας των συστημάτων sonar. Θα παρουσιαστούν διαγράμματα που έχουμε ορίσει την κατεύθυνση της δέσμης, την απόσταση των πηγών, το μήκος κύματος εκπομπής της δέσμης και τον αριθμό των πηγών. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να δειχθεί ότι ανάλογα με τον τρόπο που θα αλλάξουμε το σύστημα sonar, θα επηρεάσει την κατευθυντότητα της εκπεμπόμενης ηχητικής δέσμης. Ταυτόχρονα θέτουμε σε εφαρμογή τις σχέσεις που μας δίνουν την δυνατότητα να δημιουργήσουμε ηχητική δέσμη εκπομπής στην κατεύθυνση που εμείς θέλουμε.

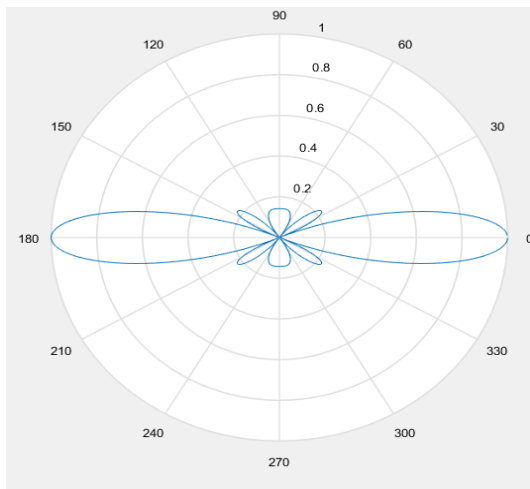
Θεωρούμε ότι ο άξονας των x' είναι κατακόρυφος άξονας και ο άξονας των y' είναι ο οριζόντιος άξονας. Επίσης θεωρούμε ότι οι πηγές βρίσκονται στον κατακόρυφο άξονα x' . Στις παρακάτω εφαρμογές συμπεριλάβαμε ως βάρος πλάτους το ορθογώνιο δηλαδή $a(f, x_A) = 1$. Οι εξισώσεις (55), (85) χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση των διαγραμμάτων και εντάχθηκαν στους κώδικες matlab που βρίσκονται στο Παράρτημα.



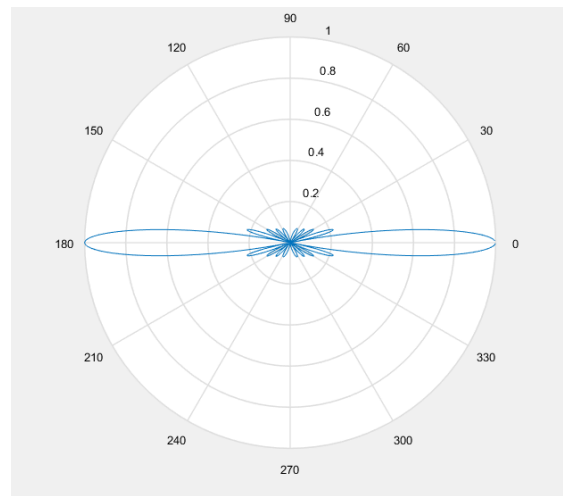
Εικόνα 13: Καρδιοειδές μοτίβο δέσμης. Πολικό διάγραμμα εκπομπής πηγής μακρινής δέσμης από συστοιχία 2 πηγών με $\lambda=4d$ και γωνία περιστροφής στις 90 μοίρες.

Στην εικόνα 13 φαίνεται ο σχηματισμός ηχητικής δέσμης από δύο πηγές στις οποίες ορίσαμε την μεταξύ τους απόσταση d να είναι 4 φορές μικρότερη από το

μήκος κύματος των πηγών. Επίσης ακολουθώντας τα βήματα που περιγράφονται στο Παράρτημα, ορίσαμε στο πρόγραμμα να στρίψει στις 90 μοίρες.



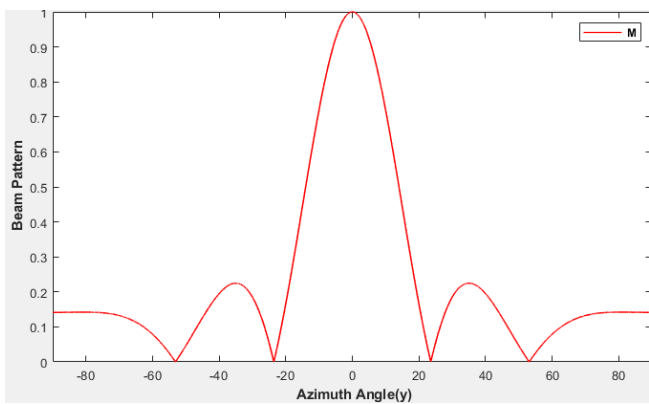
(α)



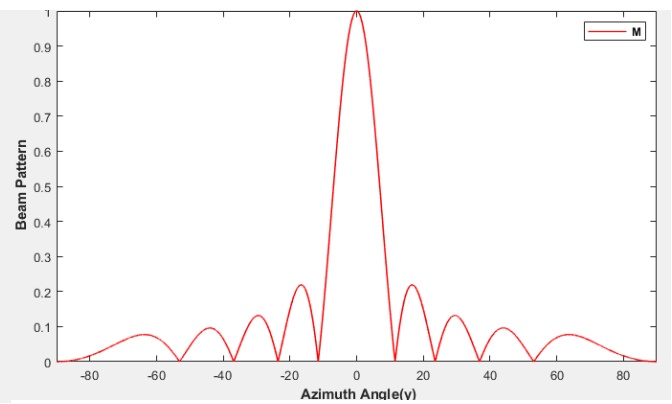
(β)

Εικόνα 14: Πολικό διάγραμμα εκπομπής πηγής μακρινής δέσμης από συστοιχία α) 10 πηγών με $d/\lambda=1/4$ και μηδενική γωνία περιστροφής και β) 20 πηγών με $d/\lambda=1/4$ και μηδενική γωνία περιστροφής .

Στην εικόνα 14 παρουσιάζεται η γραμμική συστοιχία 10 πηγών και 20 πηγών, στις οποίες έχουμε θέσει τις ίδιες αποστάσεις d μεταξύ των πηγών και θεωρούμε ότι εκπέμπουν στα ίδια μήκη κύματος χωρίς να τα έχουμε στρέψει. Στην εικόνα 15 βλέπουμε τις διαφορές της εκπεμπόμενης δέσμης συναρτήσει της γωνίας ψ και για τις δύο γραμμικές συστοιχίες έχοντας τις ίδιες παραμέτρους.



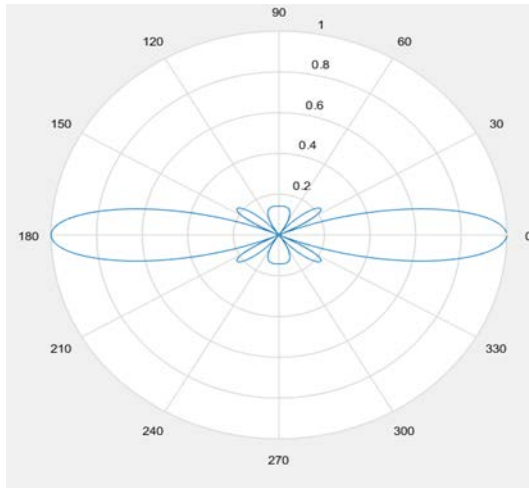
(α)



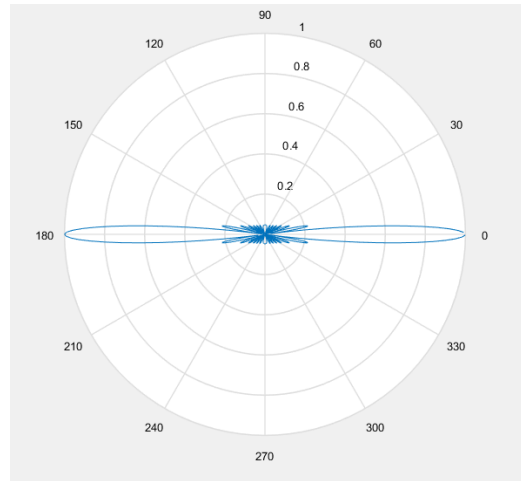
(β)

Εικόνα 15: Καρτεσιανό διάγραμμα εκπεμπόμενης δέσμης συναρτήσει της γωνίας ψ . α) Για 10 πηγές, β) Για 20 πηγές.

Η ίδια διαδικασία έγινε και για γραμμική συστοιχία με 30 πηγές, όπως φαίνονται στις εικόνες 16 και 17.

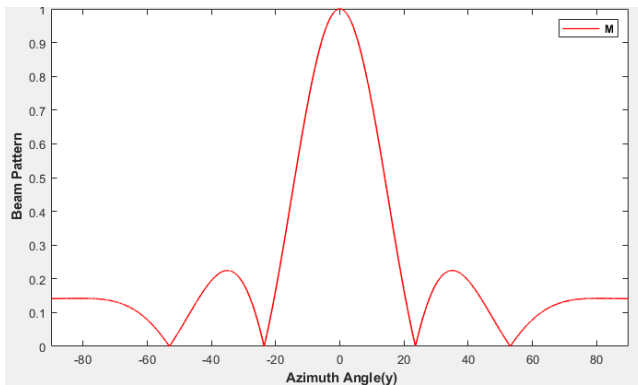


(α)

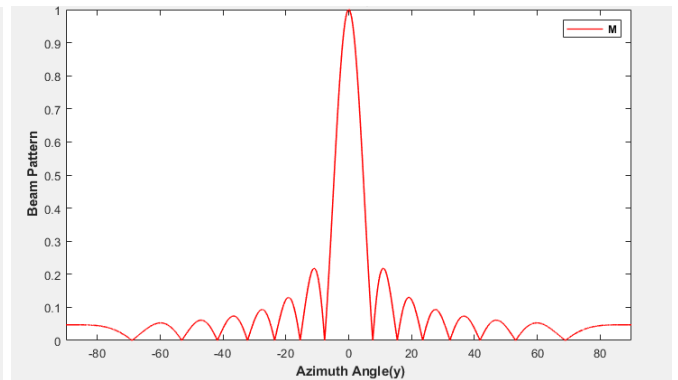


(β)

Εικόνα 16: Πολικό διάγραμμα εκπομπής πηγής μακρινής δέσμης από συστοιχία α) 10 πηγών με $d/\lambda=1/4$ και μηδενική γωνία περιστροφής και β) 30 πηγών με $d/\lambda=1/4$ και μηδενική γωνία περιστροφής.



(α)



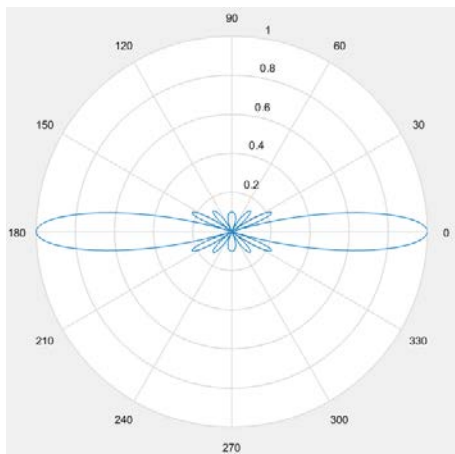
(β)

Εικόνα 17: Καρτεσιανό διάγραμμα εκπεμπόμενης δέσμης συναρτήσει της γωνίας ψ . α) Για 10 πηγές, β) Για 30 πηγές.

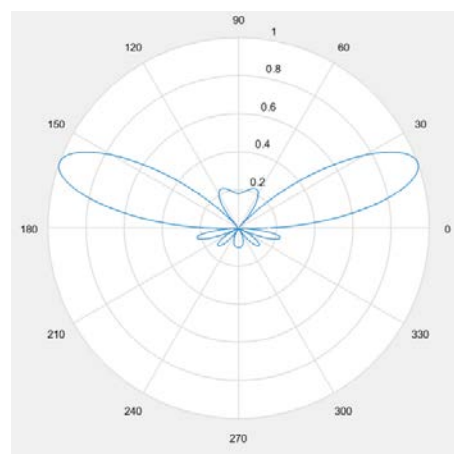
Ένα ερώτημα που μπορεί να δημιουργηθεί κατά την παρατήρηση των εικόνων 14 και 16 είναι πως θα μπορούσαμε να παράξουμε την ίδια μορφή ηχητικής δέσμης των 10 πηγών αν αντί για 10 πηγές έχουμε 20 ή 30 πηγές. Για να δημιουργήσουμε τα ίδια χαρακτηριστικά με την ηχητική δέσμη των 10 πηγών αρκεί να αυξήσουμε

το μήκος κύματος που εκπέμπουν οι πηγές, κρατώντας σταθερή την απόσταση των πηγών. Για παράδειγμα, αν έχουμε μια γραμμική συστοιχία πηγών που εκπέμπουν ηχητική ενέργεια μήκους κύματος $\lambda=20\text{m}$ και βρίσκονται μεταξύ τους σε απόσταση $d=5\text{ m}$, τότε για να εκπέμπουν οι 20 και οι 30 πηγές την ίδια ηχητική δέσμη θα πρέπει να βάλουμε τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Μια ακόμη δυνατότητα στην επεξεργασία της ηχητικής δέσμης είναι η μείωση του εύρους της δέσμης αυτής και πως μπορούμε να την στρέψουμε σε γωνία 20 μοιρών. Στην εικόνα 18 φαίνεται η ηχητική δέσμη με 10 πηγές και $d/\lambda=1/3$ η σχέση μεταξύ της απόστασης των πηγών και του μήκους κύματος. Στην εικόνα 19 μπορεί κάποιος να παρατηρήσει τις διαφορές που υπάρχουν στην γραμμική συστοιχία πριν και μετά θέσουμε την δέσμη σε στροφή 20 μοιρών.

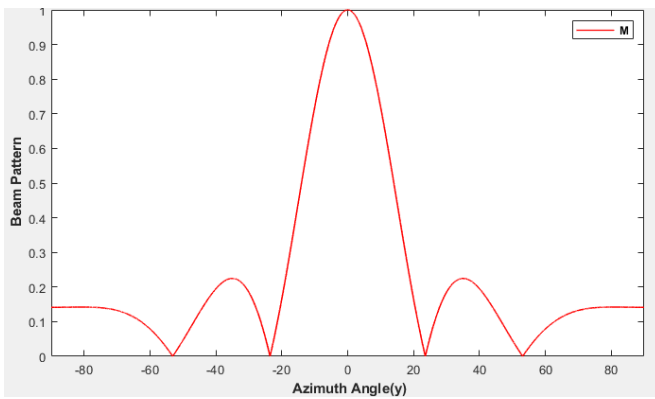


(α)

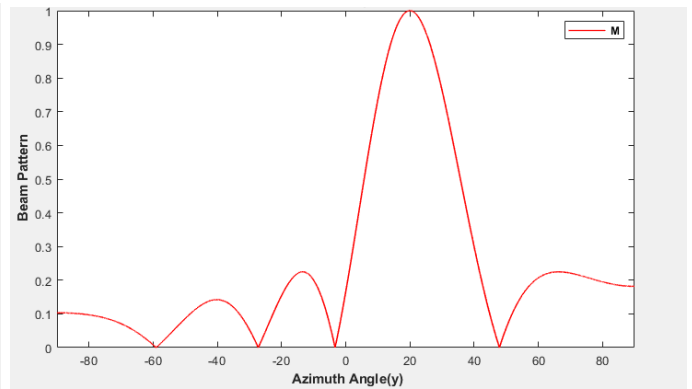


(β)

Εικόνα 18: Πολικό διάγραμμα εκπομπής πηγής μακρινής δέσμης από συστοιχία 10 πηγών με α) $d/\lambda=1/3$ και μηδενική γωνία περιστροφής και β) $d/\lambda=1/4$ και 20 μοίρες γωνία περιστροφής.



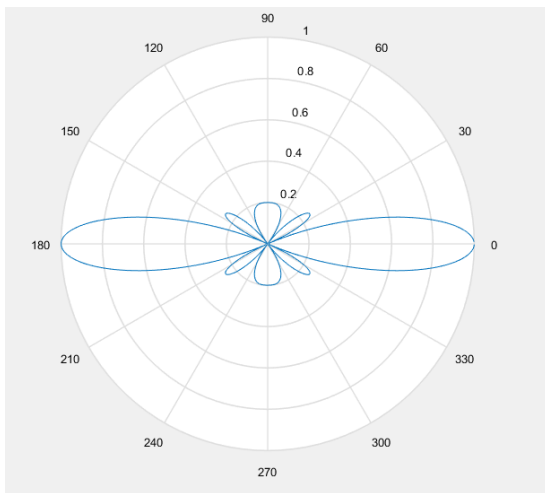
(α)



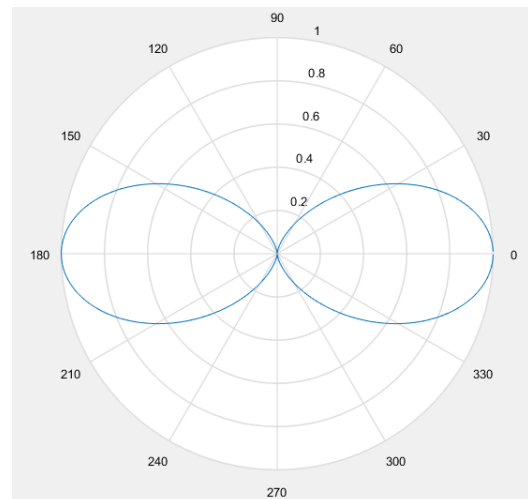
(β)

Εικόνα 19: Καρτεσιανό διάγραμμα εκπεμπόμενης δέσμης συναρτήσει της γωνίας ψ για 10 πηγές α) χωρίς γωνία περιστροφής β) με γωνία περιστροφής.

Τα επόμενα παραδείγματα που ακολουθούν αφορούν γραμμικές συστοιχίες που αποτελούνται από 5 πηγές. Στην εικόνα 20 βλέπουμε δύο διαγράμματα όπου έχουν διαφορετικά μήκη κύματος. Στην πρώτη εικόνα το μήκος κύματος είναι $\lambda=20\text{m}$ ενώ στην δεύτερη το μήκος κύματος είναι $\lambda=50\text{m}$ κρατώντας σταθερή την απόσταση των πηγών. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι όσο αυξάνεται το μήκος κύματος οι πλευρικοί λοβοί μειώνονται. Επομένως, οι παράμετροι που θέτουμε στο πρόγραμμα μας μπορούν να ελέγξουν τους πλευρικούς λοβούς της δέσμης.



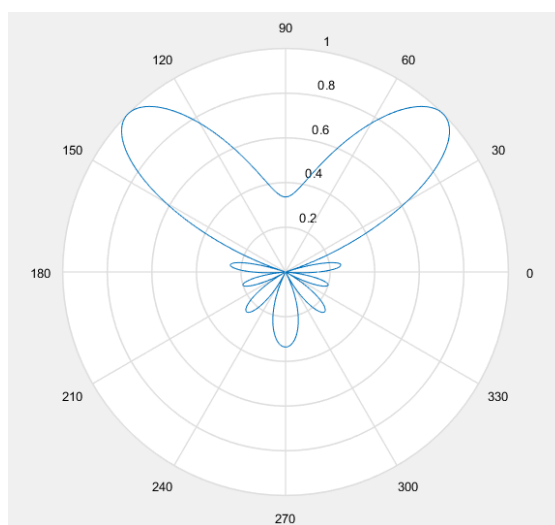
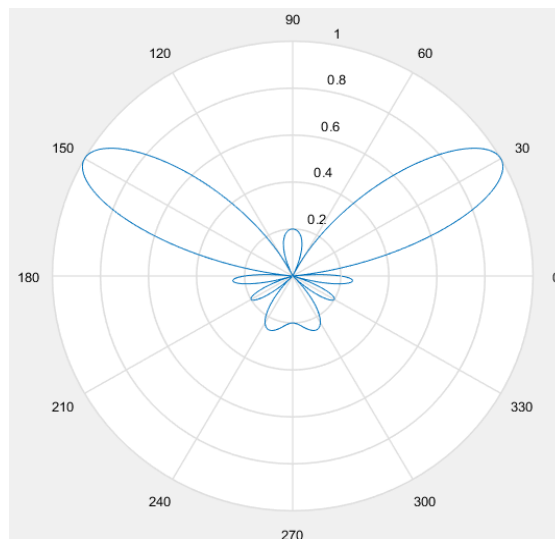
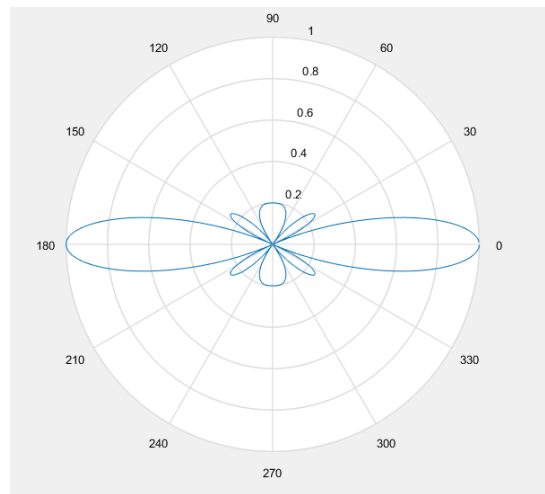
(α)



(β)

Εικόνα 20: Πολικό διάγραμμα εκπομπής πηγής μακρινής δέσμης από συστοιχία 5 πηγών α) με $d=\lambda/2$ και μηδενική γωνία περιστροφής και β) με $d=\lambda/5$ και μηδενική γωνία περιστροφής.

Στην εικόνα 21 δίνονται τα πολικά διαγράμματα γραμμικής συστοιχίας 5 πηγών με διαφορετικές γωνίες στροφής.



Εικόνα 21: Πολικό διάγραμμα εκπομπής πηγής μακρινής δέσμης από συστοιχία 5 πηγών με $d=\lambda/2$, χωρίς γωνία περιστροφής, με γωνία περιστροφής 30 μοίρες και 45 μοίρες.

5. Σύνοψη – Συμπεράσματα

Με την εργασία αυτή παρουσιάστηκε η θεωρία της δημιουργίας ηχητικής δέσμης από μία γραμμική συστοιχία υδροφώνων στην οποία αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν όλοι οι περιορισμοί και οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν για να γίνει μία επιτυχημένη εκπομπή μακρινής δέσμης. Η εκπομπή ηχητικές δέσμης με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κατεύθυνσης και εύρους εκπομπής ηχητικής ενέργειας είναι βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας ενός ενεργητικού sonar. Το ενεργητικό sonar πλευρικής σάρωσης πρέπει να στρέφει την ακουστική ενέργεια σε συγκεκριμένη διεύθυνση και ανάλογα με το επιθυμητή διακριτοποίηση να έχει και ανάλογο εύρος δέσμης.

Με την βοήθεια των εξισώσεων μπορέσαμε να δούμε τα σημεία εκείνα στα οποία πρέπει να δώσει έμφαση ένας χρήστης έτσι ώστε να καταφέρει να στείλει από μία γραμμική συστοιχία πηγών μία ηχητική δέσμη σε οποιαδήποτε γωνία εκείνος επιθυμεί. Κατά την επίλυση των εξισώσεων του κεφαλαίου 3 έγινε επιλογή του ορθογώνιου βάρους πλάτους για απλότητα. Το γεγονός αυτό όμως δεν περιορίζει στην χρήση των υπόλοιπων βαρών πλάτους από τα οποία μπορεί να επηρεαστεί ανάλογα η ηχητική δέσμη. Ανάλογα τα παράθυρα πλάτους που θα χρησιμοποιηθούν, θα δώσουν την δυνατότητα στους χρήστες να μειώσουν τους πλευρικούς λοβούς. Το σημαντικό αποτέλεσμα της επίλυσης των εξισώσεων ήταν η εξίσωση 85 μέσα από την οποία παρατηρούμε ότι δίνει την ευκολία στον χειριστή του συστήματος sonar να επιλέξει εκείνος σε ποια κατεύθυνση επιθυμεί να στείλει την ηχητική δέσμη εκπομπής μέσα στον θαλάσσιο χώρο. Το πλεονέκτημα αυτό παρουσιάζεται μέσα από τα παραδείγματα που φαίνονται στο κεφάλαιο 4 όπου τίθενται σε εφαρμογή όλες οι δυνατότητες που περιεγράφηκαν θεωρητικά στο κεφάλαιο 3.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Κώδικες Matlab

Οι κώδικες που φαίνονται παρακάτω χρησιμοποιήθηκαν στο κεφάλαιο 4 για να απεικονιστούν τα διαγράμματα του κεφαλαίου. Εκτελώντας τα προγράμματα στο matlab, ο χρήστης μπορεί να πληκτρολογήσει τον αριθμό των πηγών, το μήκος κύματος που εκπέμπουν οι πηγές και την απόσταση μεταξύ των πηγών χρησιμοποιώντας τις ίδιες μονάδες μέτρησης. Αν ο χρήστης επιθυμεί να στρίψει την ηχητική δέσμη σε οποιαδήποτε γωνία, μπορεί με τον κώδικα B να επαναλάβει τα βήματα που έκανε στον κώδικα A και να συνεχίσει πληκτρολογώντας και την επιθυμητή γωνιά που θέλει να στρίψει την δέσμη σε μοίρες. Μετά το πέρας του προγράμματος θα εμφανιστούν στην οθόνη τρία διαγράμματα. Το πρώτο διάγραμμα είναι το πολικό διάγραμμα που δείχνει την εκπεμπόμενη δέσμη. Στο δεύτερο διάγραμμα φαίνεται σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, η εκπεμπόμενη δέσμη συναρτήσει της γωνίας ψ σύμφωνα με την στις εξισώσεις (55) και (85). Τέλος, στο τρίτο διάγραμμα ο χρήστης μπορεί να δει σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων την σχέση μεταξύ της εκπεμπόμενης δέσμης και της χωρικής συχνότητας f_x .

A)

```
% Program in which wavelength and sensor distance are manually
provided.

% Number of sensors entered by the user will be stored in M.
M = input('Enter number of sensors: ');
display('Enter the wavelength and sensors in same dimensional
units');
d = input('Enter the spacing of sensors: ');
lambda = input('Enter the wavelength of signal: ');

theta = -90:0.01:90; % Azimuth angle in degrees.
theta_polar = 0:0.01:2*pi; % Azimuth angle in radians.
fs = sind(theta); % Spatial frequency.

B_cartesian =
abs((1/M).*(sin(pi*M*d*(sind(theta))/lambda))./sin(pi*d*(sind(theta))
/lambda));
figure(1);
plot(theta,B_cartesian,'-r','LineWidth',1); % Plot the beam pattern
in cartesian coordinates.
xlim([-90 90]);
ylim([0 1]);
title('\bf Uniform Linear Array Beam Pattern');
ylabel('\bf Beam Pattern');
xlabel('\bf Azimuth Angle(y)');
legend('\bf M');
figure(2);
plot(fs,B_cartesian,'-r','LineWidth',1); % Plot the beam pattern in
cartesian coordinates with spatial frequency.
xlim([-1 1]);
ylim([0 1]);
```

```

title('\bf Uniform Linear Array Beam Pattern with Spatial
Frequency');
ylabel('\bf Beam Pattern');
xlabel('\bf Spatial Frequency(fx)');
legend('\bf M');
figure(3);
B_polar =
abs((1/M).*(sin(pi*M*d*(sin(theta_polar))/lambda))./sin(pi*d*(sin(theta_polar))/lambda));
polar(theta_polar, B_polar); % Plot the beam pattern in polar
coordinates.
title('\bf Uniform Linear Array Beam Pattern in Polar Coordinates');
legend('\bf M');

```

B)

% Program in which wavelength and sensor distance are manually provided.

```

M = input('Enter number of sensors: ');
display('Enter the wavelength and sensors in same dimensional
units');
d = input('Enter the spacing between the sensors: ');
lambda = input('Enter the wavelength: ');
steering_angle = input('Enter steering angle in degrees: ');

theta = -90:0.01:90; % Azimuth angle in degrees.
theta_polar = 0:0.01:2*pi; % Azimuth angle in radians.
fs = sind(theta); % Spatial frequency.

x = (d/lambda).*(sind(theta)-sind(steering_angle));
y = (d/lambda).*(sin(theta_polar)-sin(deg2rad(steering_angle)));

B_cartesian = abs((1/M).*(sin(pi*M*x))./sin(pi*x));
figure(1);
plot(theta,B_cartesian, '-r', 'LineWidth',1);
xlim([-90 90]);
ylim([0 1]);
title('\bf Uniform Linear Array Beam Pattern');
ylabel('\bf Beam Pattern');
xlabel('\bf Azimuth Angle(y)');
legend('\bf M');
figure(2);
plot(fs,B_cartesian, '-r', 'LineWidth',1);
xlim([-1 1]);
ylim([0 1]);
title('\bf Uniform Linear Array Beam Pattern with Spatial
Frequency');
ylabel('\bf Beam Pattern');
xlabel('\bf Spatial Frequency(fx)');
legend('\bf M');
figure(3);
B_polar = abs((1/M).*(sin(pi*M*y))./sin(pi*y));
polar(theta_polar, B_polar);
title('\bf Uniform Linear Array Beam Pattern in Polar Coordinates');
legend('\bf M');

```


Βιβλιογραφία

- Lawrence J. Ziomek, Lawrence J - *An Introduction to Sonar Systems Engineering* (CRC Press_Taylor & Francis Group 2017).
- Γεώργιος Α. Σαγός, *Εισαγωγή στην υδροακουστική και στην τεχνολογία Sonar*, (Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2019).
- <https://uboat.net/articles/id/52>
- StarFish 453OEM System Manual
- https://en.wikipedia.org/wiki/Grating_lobes
- Hans Jenny, *A Study of Wave Phenomena and Vibration*, Volume 1, 1967
- Μιχάλη Ταρουδάκη, *Εισαγωγή στην Ακουστική Ωκεανογραφία*. Διδακτικές σημειώσεις Πανεπιστήμιο Κρήτης 2021.
- Μιχάλη Ταρουδάκη, *Μαθηματική Μοντελοποίηση Ακουστικής Διάδοσης στη Θάλασσα*, . Διδακτικές σημειώσεις Πανεπιστήμιο Κρήτης 2020.