ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ -
«ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ»

Υπολογιστική Μοντελοποίηση ακουστικών κυμάτων στη Βαθειά θάλασσα

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΜΑΡΙΑΝΝΑΣ Γ. ΤΕΤΑ

Ερευνητικός Επιβλέπων : Αναστάσιος Ι. Μπελιάς
Ερευνητής Β, Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»
Ακαδημαϊκός Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Αναγνωστόπουλος
Αν. Καθηγητής, Τομέας Φυσικής ,ΣΕΜΦΕ, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον ερευνητικό επιβλέποντά μου κ.Αναστάσιο Μπελιά, Ερευνητή Β του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» για τις πολύτιμες συμβουλές του ,την αμέριστη και ακούραστη συμπαράστασή του, τον συντονισμό, την επίβλεψη, και την συμβολή του προκειμένου να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Emanuel Ey, μεταπτυχιακό φοιτητή του Πανεπιστημίου του Algarve του Faro της Πορτογαλίας, για τη συνεργασία και την βοήθεια που μου προσέφερε στην επεξήγηση και κατανόηση του προγράμματος c-Traceo(που είναι μέρος της εργασίας αυτής) ,του οποίου τον κώδικά έχει γράψει ο ίδιος.

Θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλο το ερευνητικό και τεχνικό προσωπικό του Ινστιτούτου «NESTOR» στην Πύλο για την αγάπη, τη φιλική διάθεση και την κατανόηση που έδειξαν σε μένα.

Ευχαριστώ πολύ τους εξεταστές μου κατά την παρουσίαση της διπλωματικής μου εργασίας , κ.Κωνσταντίνο Αναγνωστόπουλο, Αν. Καθηγητή στον Τομέα Φυσικής της ΣΕΜΦΕ του Ε.Μ.Π. και τον κ.Μάρκου Χρήστο , Ερευνητή Α του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», καθώς επίσης και τον κ.Κωνσταντίνο Παρασκευαΐδη, Αν. Καθηγητή στον Τομέα Φυσικής της ΣΕΜΦΕ του Ε.Μ.Π., για την προθυμία, την καθοδήγηση και την καλή του διάθεση ,όσες φορές υπήρξε ανάγκη.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γιώργο και Μαρίνα για την έμπρακτη συμπαράσταση και ενθάρρυνσή τους , που ήταν πάντα κοντά μου σε ότι και αν χρειάστηκα, και που με εφοδίαζαν με κουράγιο καθ΄όλη τη διάρκεια αυτής της εργασίας.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετάται η χρήση υπολογιστικών μοντέλων για την προσομοίωση της διάδοσης των ακουστικών κυμάτων στη βαθειά θάλασσα (σε τυπικά βάθη 3000m-5000m). Γίνεται ανασκόπηση της φυσικής για τη διάδοση και απώλεια διάδοσης ακουστικών κυμάτων στη θάλασσα. Παρουσιάζονται τα μοντέλα διάδοσης που έχουν χρησιμοποιηθεί έως τώρα .

Στην παρούσα εργασία τα βάθη που μας ενδιαφέρουν είναι (3000-5000)m , το εύρος (απόσταση πηγής δέκτη) έως και 10km και η συχνότητα (16-21) KHz.Αυτό καθιστά το θεωρητικό μοντέλο ακτίνων (Ray-theoretical models) ως το πιο κατάλληλο και υλοποιείται μέσω του προγράμματος cTraceo.

Χρησιμοποιείται το cTraceo για την προσομοίωση διάδοσης ακουστικών κυμάτων για το περιβάλλον που έχει ορισθεί και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ανίχνευση ακτίνων(ray tracing),τις ιδιοακτίνες (eigenrays) και την απώλεια διάδοσης (transmission.loss).

Abstract

The scope of this thesis was to study the use of computer models so as to simulate the propagation of acoustic waves in deep sea (typically at depths of 3000m-5000m). There is a review of the physics for the propagation and propagation loss of acoustic waves in the sea. The propagation models that have been used until now are presented.

In this thesis the depths of interest are 3000m-5000m, the range (distance source receiver) up to10km and frequencies (16-21) KHz .That makes the theoretical model ray most suitable ,as implemented by the cTraceo program.

The program cTraceo is used to simulate acoustic wave propagation in the environment that has been defined and the results obtained include ray tracing, eigenrays and transmission loss diagrams.

Περιεχόμενα

Εικόνες

Κεφάλαιο 1

Κεφάλαιο 2

Κεφάλαιο 3

Πίνακες

Εισαγωγή

Τα ακουστικά κύματα παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη επικοινωνιών στη βαθειά θάλασσα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά και μετάδοση πληροφοριών, για την αναγνώριση τοποθεσίας, για τη πλοήγηση σε μια τοποθεσία(navigation) καθώς και για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης – του προσανατολισμού ενός αντικειμένου στο βυθό (orientation).

Μερικά παραδείγματα στα οποία χρησιμοποιούνται τα υποθαλάσσια ακουστικά κύματα είναι οι σταθερές διατάξεις μετρήσεων στη βαθειά θάλασσα ,τα συστήματα πλοήγησης κινητών μονάδων (Autonomous underwater vehicle-AUV) καθώς και οι πολλαπλές συστοιχίες ανιχνευτών νετρίνων στη βαθειά θάλασσα.

Στην παρούσα εργασία εξετάζουμε τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων για τη διάδοση ακουστικών κυμάτων και συγκεκριμένα την προσομοίωση ακτίνων (ray tracing) και την απώλεια διάδοσής τους στη βαθειά θάλασσα.

Αρχικά παρουσιάζεται η βασική θεωρία γύρω από τη μετάδοση ακουστικών κυμάτων στη βαθειά θάλασσα, των παραγόμενων ακτίνων (rays) και την προσομοίωση αυτών.
Στη συνέχεια αναπτύσσονται τα διάφορα μοντέλα διάδοσης και με βάση τα πλεονεκτήματα ,τα μειονεκτήματα και τα φυσικά χαρακτηριστικά που έχουμε επιλέξει, γίνεται η επιλογή του καταλληλότερου. Το μοντέλο αυτό θα χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων μας.
Ακολουθεί η παρουσίαση και η ανάλυση του προγράμματος, το οποίο βασίζεται στο μοντέλο διάδοσης που επιλέχθηκε νωρίτερα.
Με βάση το πρόγραμμα αυτό έχουμε και την παραγωγή των αποτελεσμάτων, τα οποία παρουσιάζονται και σχολιάζονται στο τελευταίο τμήμα της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 1-Υποθαλάσσια ακουστική διάδοση κυμάτων

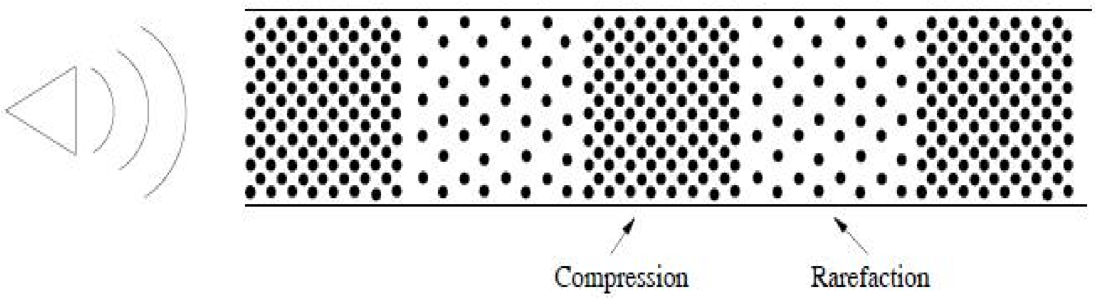
Η πτυχή της υδροακουστικής που διερευνάται εδώ, σχετίζεται με τη διάδοση των ακουστικών κυμάτων στο νερό: πώς δηλαδή μπορεί ένα σήμα να ταξιδέψει από το ένα σημείο στο άλλο και ποιοί είναι οι περιορισμοί και οι μετασχηματισμοί που υφίστανται με τον τρόπο αυτό. Το κύριο αποτέλεσμα της διάδοσης είναι να μειωθεί το πλάτος του σήματος με γεωμετρική εξάπλωση αφενός και με απορρόφηση αφετέρου. Η απορρόφηση συνδέεται με τις χημικές ιδιότητες του θαλασσινού νερού, που είναι ένας καθοριστικός παράγοντας πολλαπλασιασμού των υποβρύχιων ακουστικών κυμάτων με περιορισμένο προσβάσιμο φάσμα στις υψηλές συχνότητες.

Η εκτίμηση των απωλειών διάδοσης είναι ένας κυρίαρχος παράγοντας για την αξιολόγηση των επιδόσεων του χρησιμοποιούμενου συστήματος. Καθώς το μέσο διάδοσης κάτω από το νερό περιορίζεται από δύο καλά σηματοδοτημένες διεπαφές (ο βυθός και η επιφάνεια της θάλασσας), η διάδοση του σήματος συχνά συνοδεύεται από μια σειρά πολλαπλών διαδρομών που δημιουργούνται από ανεπιθύμητες αντανακλάσεις σε αυτές τις δύο διεπαφές. Πρακτικά αυτή η πολλαπλή ηχώ εμφανίζεται ως εκρήξεις ή σε σειρά από αντίγραφα του διαβιβαζόμενου σήματος (σε υψηλές συχνότητες), ή ως ένα χωρικό πεδίο σταθερών παρεμβολών (στις χαμηλές συχνότητες). Και οι δύο είναι κοινές πηγές προβλήματος όσον αφορά την πρόσληψη και την εκμετάλλευση των χρήσιμων σημάτων. Επιπλέον, η ταχύτητα των ακουστικών κυμάτων κυμαίνεται χωρικά στον ωκεανό, ως επί το πλείστον με το βάθος, λόγω του περιορισμού της θερμοκρασίας και της πίεσης.

Τα ηχητικά κύματα διαθλώνται ανάλογα με τις διακυμάνσεις της ταχύτητας που προέκυψαν. Αυτό είναι κάτι το οποίο φυσικά περιπλέκει την μοντελοποίηση και την ερμηνεία της χωρικής δομής του ηχητικού πεδίου. Η ευκολότερη και πιο αποτελεσματική τεχνική μοντελοποίησης είναι γνωστή ως γεωμετρική θεωρία, που αφορά την κατεύθυνση την διάδοσης των κυμάτων και την ταχύτητα (π.χ. μέσα από το γνωστό νόμο Snell-Descartes). Παρακάτω θα παρατεθούν οι θεμελιώδεις αρχές της γεωμετρικής θεωρίας , με τους κύριους τύπους να αποδίδουν την περιγραφή για τις ακτινικές διαδρομές, τους χρόνους μετακίνησης και τις απώλειες κατά μήκος αυτών των τροχιών. Η ευκολία της χρήσης αυτής της προσέγγισης και η πολύ αναλυτική φυσική περιγραφή της την κάνει να είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος στην υποβρύχια υδροακουστική μοντελοποίηση.

1.1 Η φύση των υποβρύχιων ήχων- ακουστικών κυμάτων

Οι ήχοι που ακούει το ανθρώπινο αυτί είναι το αποτέλεσμα δονήσεων εντός του αέρα.[1]Στην περίπτωση αυτή, το μέσο που ο ήχος διέρχεται είναι ο αέρας. Ωστόσο, σε ένα περιβάλλον όπως ο ωκεανός, το μέσο είναι το νερό. Και στα δύο μέσα ο ήχος διαδίδεται με σχεδόν το ίδιο τρόπο, αλλά διαφέρουν ως προς την ευαισθησία τους σε μερικούς παράγοντες. Για παράδειγμα, ο ήχος ταξιδεύει ταχύτερα στο νερό από ό, τι στον αέρα. Το νερό μπορεί να θεωρηθεί ως πιο ευαίσθητο στις διακυμάνσεις της πίεσης, και ως εκ τούτου αντιδρά γρηγορότερα. Μία σημαντική ιδιότητα του ήχου είναι ότι συμπεριφέρεται ως κύμα. Στις παραπάνω περιπτώσεις, οι δονήσεις που περιγράφονται είναι στην πραγματικότητα διακυμάνσεις της πίεσης. Αυτές οι διακυμάνσεις πίεσης προκαλούνται από τις κινήσεις των σωματιδίων εντός του μέσου (αέρας ή τα μόρια του νερού). Όταν τα σωματίδια κινούνται το ένα προς το άλλο, παρουσιάζουν υψηλή πίεση και όταν απομακρύνονται το ένα από το άλλο , υπάρχει χαμηλή πίεση. Αυτές οι δύο καταστάσεις είναι γνωστές ως συμπίεση και αραίωση, αντίστοιχα. Η εικόνα 1.1 είναι μία αναπαράσταση ενός ηχητικού κύματος που ταξιδεύει μέσα σε ένα σωλήνα.[2]



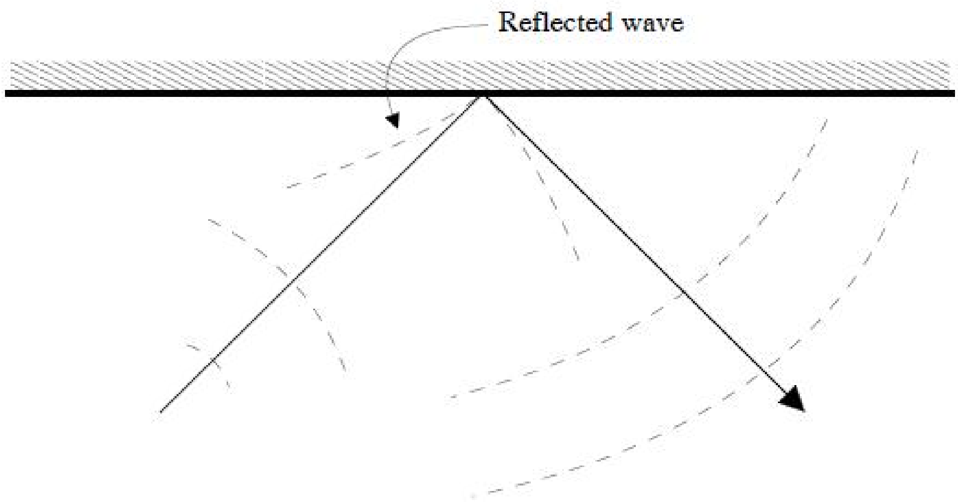
Εικόνα 1.1 Αναπαράσταση ηχητικού κύματος μέσα σε σωλήνα.

Δεδομένου ότι αυτές είναι πραγματικές κινήσεις των σωματιδίων, η πίεση δεν μπορεί να αλλάξει άμεσα από χαμηλό σε υψηλό επίπεδο. Αντ ’αυτού, πρέπει να προβλεφθεί η σταδιακή μετάβαση μεταξύ των καταστάσεων. Σε μαθηματικούς όρους, το επίπεδο της πίεσης είναι διαφορίσιμο ανά πάσα στιγμή. Τριγωνομετρικές συναρτήσεις, όπως του ημιτόνου και του συνημιτόνου, χρησιμοποιούνται συνήθως στη μοντελοποίηση ηχητικών κυμάτων. Αυτές οι βαθμιαίες μεταβάσεις είναι που δίνουν στον ήχο τη μορφή του κύματος, για το λόγο αυτό οι ήχοι συχνά αναφέρεται ως ηχητικά κύματα.

Επειδή τα ηχητικά κύματα δονούνται προς την κατεύθυνση την οποία κινούνται, έχουν χαρακτηρισθεί ως διαμήκη κύματα. Ένας άλλος τύπος κυμάτων είναι τα εγκάρσια κύματα, όπου οι δονήσεις είναι κάθετες προς την κίνηση του κύματος. Ένα κοινό παράδειγμα εγκάρσιου κύματος είναι το κύμα που δημιουργείται από ανακίνηση της μιας άκρης ενός σκοινιού.

Ο ήχος κατά τη διάδοση του ως κύμα παρουσιάζει κάποιες ενδιαφέρουσες συμπεριφορές, όταν διαδίδεται μέσα στο νερό. Αυτές οι συμπεριφορές μπορεί να είναι καταστροφικές για τα σήματα επικοινωνίας, και αυτός είναι ο λόγος που οι εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος απαιτούνται στις υποβρύχιες ακουστικές επικοινωνίες. Ας σημειωθεί ότι μερικές φορές είναι χρήσιμο να αναπαριστούμε τα ηχητικά κύματα ως ακτίνες (ray) ή ακτίνες-μονοπάτια (ray-paths).

Πολλά κείμενα που ασχολούνται με την μετάδοση του ήχου θα υιοθετήσουν την άποψη αυτή για τα ηχητικά κύματα ώστε να διευκολυνθούν οι εξηγήσεις. Αυτές οι ακτίνες-μονοπάτια (ray-paths) ουσιαστικά είναι ο κεντρικός άξονας διάδοσης ενός κύματος. Η εικόνα 1.2 δείχνει που βρίσκεται η ακτίνα στην αντανάκλαση ενός κύματος.



Εικόνα 1.7 Η θέση του κύματος καθορισμένη απο μια ακτίνα (ray-path)

1.2 Η κλίμακα dB

Λόγω του ευρέως φάσματος των πιέσεων και των εντάσεων που χαρακτηρίζουν τις μετρήσεις του ήχου, είναι σύνηθες να περιγράφεται με τη βοήθεια λογαριθμικής κλίμακας.[3] Η πιο γνωστή λογαριθμική κλίμακα που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του ήχου είναι η κλίμακα decibel (dB).

Το επίπεδο έντασης, IL, από έναν ήχο έντασης I ορίζεται ως:

$$\mathrm{IL}=10\log\frac{I_1}{I_0} \qquad (1.1)$$

όπου I_1 μετρούμενη στάθμη έντασης (watt/m2)

I_0 επίπεδο έντασης αναφοράς (watt/m2)
log λογάριθμος με βάση το 10

Δεδομένου ότι η ένταση είναι ανάλογη με το τετράγωνο της πίεσης, η έκφραση των ντεσιμπέλ για το επίπεδο ηχητικής πίεσης (SPL) γίνεται:

$$\text{SPL}=10\log\frac{P_1^{\,2}}{P_0^{\,2}}=20\log\frac{P_1}{P_0} \qquad (1.2)$$

Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι η κλίμακα των ντεσιμπέλ είναι ένα σχετικό μέτρο, και όχι μια μονάδα για τη μέτρηση του ήχου. Ως εκ τούτου, άλλες μονάδες μέτρησης και επίπεδα αναφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθούν αντί των παραπάνω.

1.3 Επίπεδο αναφοράς

Για το I_0 ή P_0 επίπεδο αναφοράς, χρησιμοποιούνται διαφορετικές τιμές για τις μετρήσεις στον αέρα και στο νερό.
Για τις μετρήσεις του ήχου στον αέρα, το επίπεδο αναφοράς του I_0 = 10-12 watt/m^2 χρησιμοποιείται για την ένταση.
Αυτό αντιστοιχεί στο όριο της ανθρώπινης ακοής στα 1000 Hz. Αν μετατραπεί σε πίεση, αυτό αντιστοιχεί σε μια αποτελεσματική (τετραγωνική ρίζα) ηχητική στάθμη πίεσης:

$$P_0 \text{ (αέρας)} = 20.4\mu\text{Pa (ή } 0.0002\mu\text{bar)} \qquad (1.3)$$

Για τις μετρήσεις του ήχου στο νερό, το επίπεδο αναφοράς πίεση ρυθμίζεται ως εξής:

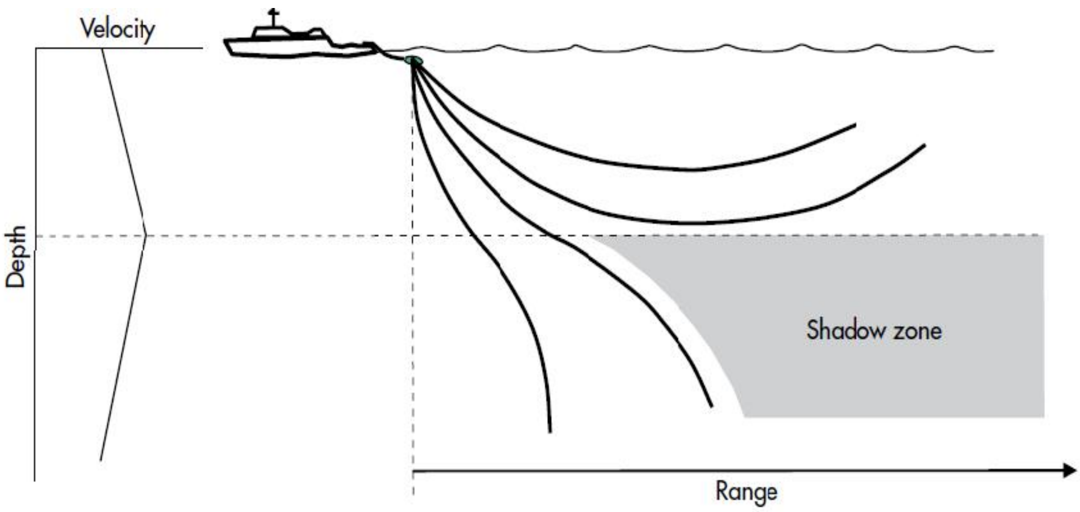
$$P_2 \text{ (νερό)} = 1\mu\text{Pa (ή } 0.000001\mu\text{bar)} \qquad (1.4)$$

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε τα διαφορετικά επίπεδα αναφοράς μεταξύ των μετρήσεων που έγιναν στον αέρα και στο νερό. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι 26dB.

Με δεδομένη μια τιμή σε dB, δεν υπάρχει ένας κανόνας βάση του οποίου θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε αν μια μέτρηση έγινε στον αέρα ή στο νερό. Ως εκ τούτου, κάθε αναφορά σε μια τιμή σε dB πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά, προκειμένου να προσδιοριστεί ο τόπος όπου η μέτρηση γίνεται, και ποιο επίπεδο αναφοράς χρησιμοποιείται.
Υπάρχει μια φυσική διαφορά μεταξύ του ήχου στον αέρα και στο νερό, και χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό επίπεδο αναφοράς, όπως αναφέρεται παραπάνω. Ως εκ τούτου, στις συγκρίσεις των μετρήσεων της πίεσης του ήχου που γίνονται στον αέρα και στο νερό, πρέπει να προστεθεί ένας διορθωτικός συντελεστής 62dB στις μετρήσεις του αέρα.

1.4 Ηχητικά κανάλια

Στη θάλασσα ένα φαινόμενο που ονομάζεται κανάλια ήχου (sound channels) εμφανίζεται συχνά.[3] Αλλαγές στη μετάδοση της ταχύτητας του ήχου λόγω της θερμοκρασίας και πίεσης θα σχηματίσουν αυτά τα ηχητικά κανάλια σε διαφορετικά βάθη και με μεταβλητά πάχη. Και οι δύο αυτοί παράγοντες θα επηρεάσουν τον τρόπο μετάδοσης των σημάτων που μεταφέρονται μέσω των ακουστικών καναλιών.
Τα κανάλια ήχου συμπεριφέρονται σαν αγωγοί που έχουν την τάση να εστιάζουν στην ενέργεια του ήχου, και η εξασθένηση σε αυτούς τους αγωγούς
μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της κανονικής σφαιρικής διασποράς. Μέσω αυτού του μηχανισμού ο ήχος μπορεί να ταξιδέψει σημαντικές αποστάσεις.
Τα ηχητικά κανάλια συχνά παίρνουν το όνομά τους από την τοποθέτησή τους στη στήλη του νερού, όπως π.χ βαθύ κανάλι θαλάσσιου ήχου, ρηχό κανάλι θαλάσσιου ήχου και μεικτών-στρωμάτων ηχητικά κανάλια ήχου.



Εικόνα 1.3 Ηχητικά κανάλια μεικτών-στρωμάτων

Τα κανάλια ήχου δεν θα μεταδώσουν όλες τις συχνότητες με τον ίδιο τρόπο. Ανάλογα με το πάχος του καναλιού, θα υπάρξει μια συχνότητα αποκοπής, και η ηχητική ενέργεια με χαμηλότερη συχνότητα δεν θα επηρεαστεί από το κανάλι. Η χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής για ένα κοντά στην επιφάνεια κανάλι ήχου της μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$f_{min}=1.76\times10^{5}\times H^{-\frac{1}{2}} \quad \text{(Hz)} \qquad (1.5)$$

όπου H το πάχος του καναλιού σε μέτρα(m) [3]
Χρησιμοποιώντας αυτόν τον τύπο, θα διαπιστωθεί ότι παραδείγματος χάριν το πάχος ενός καναλιού 145m είναι απαραίτητο για τη μετάδοση μιας συχνότητα 100 Hz .
Αν τα ηχητικά κύματα παράγονται έξω από το κανάλι, τότε πολύ λιγότερη ενέργεια θα μπει σε αυτό το χαμηλής εξασθένησης περιβάλλον, μειώνοντας σημαντικά την απόσταση που ο ήχος μπορεί να ταξιδέψει.
Ο ήχος μπορεί να ταξιδέψει μεγάλες αποστάσεις, αλλά θα υπάρξουν επίσης και σημεία στην ευρύτερη περιοχή της πηγής του ήχου που λίγος ή και καθόλου ήχος θα

φτάνει εκεί. Η εικόνα 1.3 απεικονίζει τις συνθήκες σε ένα μεικτών-στρωμάτων ηχητικό κανάλι και φαίνονται καθαρά οι ζώνες "απουσίας" ήχου».
Μια ζώνη "απουσίας" ήχου(shadow zone) ορίζεται η περιοχή στην οποία δεν έχει άμεση πορεία η ακουστική ενέργεια και μόνο η ανακλώμενη ενέργεια μπορεί να εισέλθει σ΄ αυτή. Μια ακουστική ζώνη "απουσίας" ήχου θα παρουσιαστεί αν το προφίλ ταχύτητας του ήχου δεν είναι ομοιόμορφο. Αυτό θα οδηγήσει στην κάμψη της διαδρομής διάδοσης. Το πρόβλημα με τις ζώνες "απουσίας" ήχου είναι ότι μπορούν συχνά να υπάρχουν ακόμα και σε προφίλ ήχου με ήπια μη-ομοιόμορφη ταχύτητα, και ότι είναι συνήθως μη στάσιμες στην πάροδο του χρόνου.

1.5 Ακουστική πίεση

Τα ακουστικά κύματα προέρχονται από τη διάδοση της μηχανικής διαταραχής.[4][5] Οι τοπικές συμπτύξεις και διαστολές περνούν από το ένα σημείο στα γύρω, λόγω των ελαστικών ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης. Από το ένα σημείο στο επόμενο αυτή η διατάραξη θα διαδοθεί μακριά από την πηγή της. Ο ρυθμός εξάπλωσης της διαταραχής αυτού του μέσου ονομάζεται ταχύτητα του ήχου.

Το ίδιο γεγονός θα μπορεί να παρατηρηθεί από διαφορετικά σημεία στο μέσο διάδοσης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αν η διάδοση εμφανίζεται μόνο κατά μήκος μιας διάστασης του χώρου x, μπορεί να γράψει κανείς για μια διαταραχή s (x, t) της οποίας οι όροι είναι :

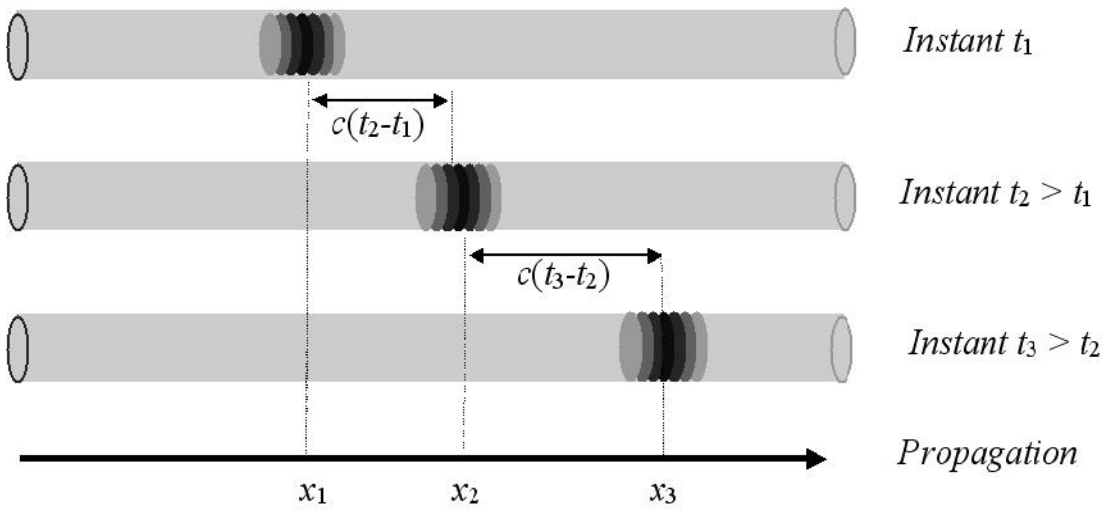
$$s(x_1,t_1) = s(x_2,t_2) = s(x_3,t_3) = ... = s(x_n,t_n) \quad (1.6)$$

Οι χρόνοι παρατήρησης $t_1, t_2, ..., t_n$ συνδέονται με τις περιοχές $x_1, x_2, ..., x_n$ και την ταχύτητα διάδοσης c ως εξής:

$$\left\{\begin{array}{lll} x_2 - & x_1 = & c(t_2 - t_1) \\ x_3 - & x_2 = & c(t_3 - t_2) \\ x_1 = & x_1 = & c(t_n - t_{n-1}) \end{array}\right\} \quad (1.7)$$

Ένα ακουστικό κύμα απαιτεί ένα ελαστικό υλικό για τη διάδοσή του (π.χ. αέριο, υγρό ή στερεό). Οι μηχανικές ιδιότητες αυτού του μέσου προσδιορίζουν την τιμή της ταχύτητας του ήχου.

Το ακουστικό κύμα χαρακτηρίζεται από το εύρος κίνησης του κάθε σωματιδίου στο μέσο διάδοσης γύρω από τη θέση της ισορροπίας, από την ταχύτητα του ρευστού που αντιστοιχεί σε αυτή την κίνηση (αυτή η ταχύτητα δεν πρέπει να συγχέεται με την ταχύτητα διάδοσης κυμάτων c) και από την προκύπτουσα ακουστική πίεση, η οποία είναι η εναλλαγή, γύρω από τη μέση υδροστατική πίεση, που προκαλείται από τις τοπικές συμπιέσεις-διαστολές που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη κίνηση. Πρακτικά, η ακουστική πίεση είναι η συχνότερα χρησιμοποιούμενη ποσότητα στη υδροακουστική. Τα υδρόφωνα (τα οποία είναι θαλάσσια μικρόφωνα που ισοδυναμούν με τα εναέρια), χρησιμοποιούνται ως υποβρύχιοι δέκτες ήχου και ουσιαστικά είναι αισθητήρες πίεσης.



Εικόνα 1.4 Μονοδιάστατη διάδοση μιας τοπικής υπερπίεσης σε κυλινδρικό κυματοδηγό, ως συνάρτηση του χρόνου

Η ακουστική πίεση εκφράζεται σε μονάδες pascal (Pa) ή καλύτερα σε micropascals (μPa).Η διαφορά μεταξύ της μέγιστης ακουστικής πίεσης και της ελάχιστης ενδέχεται να είναι εξαιρετικά υψηλή στην υδροακουστική. Ο θόρυβος του περιβάλλοντος που μετράται σε μια στενή ζώνη συχνοτήτων υπό κανονικές-ήρεμες συνθήκες μπορεί να είναι μόνο μερικές δεκάδες micropascals (μPa), ενώ η στάθμη του ήχου κοντά σε μια πηγή υψηλής ισχύος μπορεί να φθάσει το 1012 μPa.

1.6 Ταχύτητα και πυκνότητα

Η ταχύτητα διάδοσης ενός ακουστικού κύματος καθορίζεται από τα τυπικά χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης: την πυκνότητα p και το μέτρο ελαστικότητας Ε (ή, για ένα ρευστό, to αντίστροφο της ποσότητας, η συμπιεστότητα x):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho\chi}} \qquad (1.8)$$

Στο θαλασσινό νερό, η ταχύτητα ακουστικών κυμάτων είναι κοντά στην τιμή c = 1.500 m/s (στην πραγματικότητα είναι μεταξύ 1450 m/s και 1550 m/s, ανάλογα με την πίεση, την περιεκτικότητα σε αλάτι και την θερμοκρασία).

Η πυκνότητα του θαλασσινού νερού είναι περίπου p = 1,030 kg m^{-3} κατά μέσο όρο, ανάλογα με τις φυσικές παραμέτρους.
Σε θαλάσσια ιζήματα (σε πρώτη προσέγγιση θεωρούνται ως ένα ρευστό μέσο), η πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ 1.200 και 2.000 kg m^{-3}. Σε ένα ίζημα κορεσμένο από νερό, η ταχύτητα του ήχου κυμαίνεται τυπικά μεταξύ 1.500-2.000 m/s.
Ενώ στον αέρα οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας και της πυκνότητας του ήχου είναι περίπου 340 m/s και 1.3 kg m^{-3}

1.7 Συχνότητα και μήκος κύματος

Τα ηχητικά σήματα γενικά δεν είναι στιγμιαίες διαταραχές, αλλά δονήσεις που διαρκούν. Χαρακτηρίζονται από τη συχνότητα f (ο αριθμός των στοιχειωδών δονήσεων ανά δευτερόλεπτο, ισοδύναμα εκφράζονται σε Hertz, ή σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο - cps) ή τη περίοδο T (διάρκεια ενός στοιχειώδους κύκλου δόνησης, που συνδέεται με τη συχνότητα με την η σχέση T = 1 / f). Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στη υδροακουστική κυμαίνονται περίπου από 10 Hz έως 1 MHz, ανάλογα με την εφαρμογή.

Το μήκος κύματος είναι η χωρική ανταπόκριση της περιοδικότητας του χρόνου. Περιγράφεται ως η στοιχειώδης απόσταση μεταξύ δύο σημείων στο μέσο διάδοσης και υποβάλλεται στην ίδια δονητική κατάσταση με καθυστέρηση T ή μετατόπιση φάσης 2π. Διαφορετικά μπορεί να οριστεί ως η απόσταση που διανύεται από το κύμα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου του σήματος με ταχύτητα c. Ως εκ τούτου:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \tag{1.9}$$

Για ταχύτητα ήχου 1.500 m/s, τα υδροακουστικά μήκη κύματος θα είναι 150 m σε 10 Hz, 1,5 m σε 1 kHz, και 0,0015 m σε συχνότητα 1 MHz. Αυτές οι πολύ διαφορετικές τιμές των συχνοτήτων και μηκών κύματος προφανώς αντιστοιχούν σε πολύ διαφορετικές φυσικές διεργασίες, τόσο για τη διάδοση των κυμάτων στο νερό όσο και για τα χαρακτηριστικά του ίδιου του ακουστικού συστήματος. Σχετικά με τις συχνότητες οι κύριοι περιορισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι:

- το κύμα εξασθένησης του ήχου στο νερό ,το οποίο περιορίζει το μέγιστο δυνατό χρησιμοποιούμενο εύρος και του οποίου η επίδραση αυξάνεται πολύ γρήγορα με τη συχνότητα.

- οι διαστάσεις των πηγών ήχου, οι οποίες αυξάνουν σε χαμηλότερες συχνότητες για μια δεδομένη ισχύ μετάδοσης

- η χωρική επιλεκτικότητα που σχετίζεται με την κατευθυντικότητα των ακουστικών πηγών και των δεκτών, και βελτιώνεται (για ένα δεδομένο μέγεθος αισθητηρίου) καθώς αυξάνεται η συχνότητα

- ο στόχος ακουστικής απόκρισης. Ανάλογα με τη συχνότητα ένας στόχος θα αντικατοπτρίζει-δίνει λιγότερη ενέργεια, καθώς οι διαστάσεις του θα είναι μικρότερες σε σχέση με το ακουστικό μήκος κύματος.

1.8 Η κυματική εξίσωση

Η κυματική εξίσωση προκύπτει από τις αρχές της μηχανικής χρησιμοποιώντας τις καταστατικές εξισώσεις συνέχειας και κίνησης (Kinsler, et al., 1982). [6],[7].Για τα ρευστά μέσα, η εξίσωση αφορά φυσικές ποσότητες που περιγράφουν τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του ρευστού :

$$P - P_0 = \frac{(\circ - \circ_0)}{\circ_0} \qquad (1.10)$$

όπου P είναι η στιγμιαία πίεση σε ένα σημείο, P_0 είναι η πίεση ισορροπίας στο ρευστό, β είναι το αδιαβατικό μέτρο ελαστικότητας (συντελεστής θερμικής διαστολής του ρευστού), ρ είναι η πυκνότητα σε ένα σημείο και ρ_0 είναι η πυκνότητα της ισορροπίας των υγρών.

Με τη βοήθεια της ηχητικής πίεσης p και συμπύκνωσης s, η εξίσωση (1.10) μπορεί να εκφραστεί ως

$$p \approx \quad s \qquad (1.11)$$

Πού $p = P - P_0$ είναι η ηχητική πίεση και $s = \frac{\circ - \circ_0}{\circ_0}$ είναι ένα σημείο συμπύκνωσης.

Ο περιορισμός είναι ουσιώδης για την συμπύκνωση s διότι πρέπει να είναι πολύ μικρός, s<< 1 (Kinsler, et al., 1982).
Για να συσχετιστεί η κίνηση του υγρού με την συμπίεση ή την επέκτασή της, χρειαζόμαστε μια λειτουργία που αφορά την ταχύτητα u του σωματιδίου του ρευστού με στιγμιαία πυκνότητα του ρ.
Αν θεωρηθεί ένα απειροελάχιστο στοιχείο του όγκου του υγρού σταθερό στο χώρο, τότε η συνέχεια της εξίσωσης αφορά το ρυθμό αύξησης της μάζας σ αυτό το στοιχείο όγκου με τη ροή μάζας διαμέσου της κλειστής επιφάνειας γύρω από το όριο. Δεδομένου ότι η ροή πρέπει να είναι ίση με το ποσοστό της αύξησης, η εξίσωση συνέχειας παίρνει τη μορφή :

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \vec{u} = 0 \qquad (1.12)$$

Η εξίσωση της κίνησης αφορά την ακουστική πίεση p με την ταχύτητα u στιγμιαία για ένα παχύρρευστο υγρό και δεν είναι αδιαβατική. Με αυτόν τον τρόπο βρίσκεται η εξίσωση του Euler (εξίσωση δύναμης) για μικρού πλάτους ακουστικά φαινόμενα

$$\circ_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p \qquad (1.13)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, η αναδιάταξη των όρων δίνει τη γραμμική κυματική εξίσωση

$$\nabla^2 \mathrm{p} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2(x,y,z)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \qquad (1.14)$$

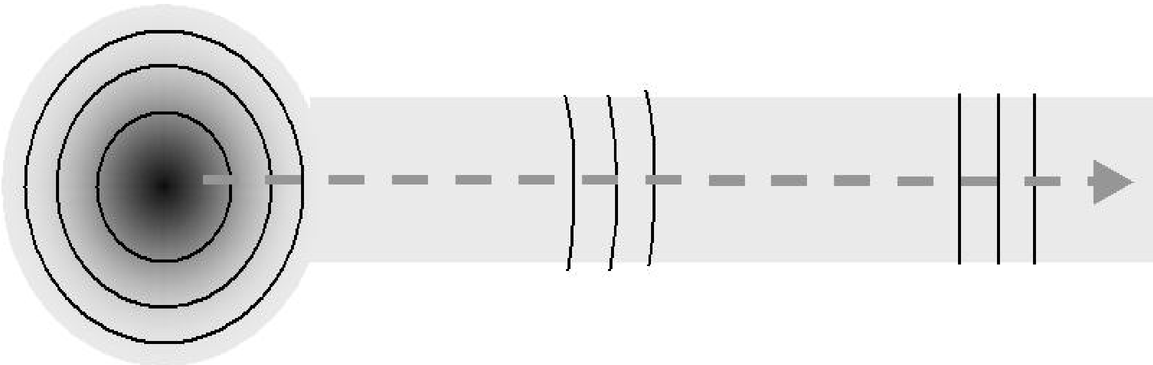
Όπου p είναι η ακουστική πίεση ενός κύματος πολλαπλασιαζόμενο στο χώρο (x, y, z) ως συνάρτηση του χρόνου t και c (x, y, z) είναι η τοπική ταχύτητα του ήχου. Όπου ∇ είναι ο Λαπλασιανός τελεστής.

Αυτή η εξίσωση είναι το σημείο εκκίνησης για την ανάπτυξη της φυσικής θεωρίας διάδοσης του ήχου από τις εφαρμογές των μεθόδων με τις οποίες υπολογίζεται η ηχητική πίεση, αν η αρχική κατανομή της καθορίζεται από τη γεωμετρία του περιβάλλοντος (την επιφάνεια και τον πυθμένα της θάλασσας και τα τυχόν εμπόδια). Οι αρχικές συνθήκες είναι απαραίτητες σε όλα τα προβλήματα, και αναφέρονται σε συγκεκριμένες διαταραχές που προκαλούν την μετάδοση του ήχου.

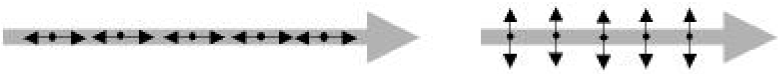
Τα επίπεδα και τα σφαιρικά κύματα είναι τα δύο βασικά εργαλεία για την μοντελοποίηση της διάδοσης των ακουστικών κυμάτων (Εικόνες 1.5-1.6).

Τα επίπεδα κύματα είναι τα πιο εύκολα στον χειρισμό τους, χρησιμοποιούνται όταν το πλάτος μπορεί να προσεγγιστεί με μια σταθερά, και τα κυματικά μέτωπα δείχνουν αμελητέα καμπυλότητα. Αυτές οι συνθήκες ικανοποιούνται και αρκετά μακριά από την πηγή του ήχου, για την μοντελοποίηση μιας τοπικής διαδικασίας.

Τα σφαιρικά κύματα περιγράφουν ένα πεδίο που μεταδίδεται σε ένα μικρό εύρος από μία σημειακή πηγή (εμφανώς μικρή σε σύγκριση με το μήκος κύματος),



Εικόνα 1.5 Σφαιρικά και επίπεδα κύματα. Η καμπυλότητα του κύματος είναι ένα σημαντικό φυσικό χαρακτηριστικό κοντά στην πηγή (γεωμετρική δομή, μείωση πλάτους) και μπορεί να αγνοηθεί στις μεγαλύτερες κλίμακες, εκεί που το κύμα μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδο (τοπικά σταθερό πλάτος)



Εικόνα 1.6 Διαμήκη (αριστερά) και εγκάρσια (δεξιά) κύματα .Η κίνηση του μέσου είναι είτε παράλληλα (λεπτά βέλη) ή κάθετα προς τη διάδοση κυμάτων (παχιά βέλη)

Όταν η στοιχειώδης κίνηση των σωματιδίων είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση διάδοσης, τα κύματα ονομάζονται πίεσης (ή διαμήκη). Αυτά είναι τα μόνα που συναντώνται σε υγρά και αέρια. Από την άλλη πλευρά, στερεά υλικά μπορεί επίσης να υποστηρίξουν τα κύματα διάτμησης (ή εγκάρσια κύματα), στα οποία η μετατόπιση και ο πολλαπλασιασμός είναι κάθετα. Χαρακτηρίζονται από τις δύο τιμές των κυμάτων ταχύτητας (διαμήκη και εγκάρσια), γεγονός που καθιστά τα μοντέλα πιο περίπλοκα (Εικόνα 1.6). Στην υδροακουστική, οι περισσότερες διαδικασίες διάδοσης μπορεί να περιγραφούν με τα κύματα πίεσης. Ωστόσο, τα εγκάρσια κύματα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν η μοντελοποίηση εμπεριέχει ενοποιημένα ιζήματα και σκέδαση από στερεούς στόχους.

1.9 Θεωρία ακτίνων (Ray Theory)

Η Θεωρία ακτίνων είναι μια εναλλακτική θεωρητική προσέγγιση για την επίλυση της εξίσωσης κύματος.[25]

Οι βασικές αρχές της Θεωρίας ακτίνων είναι η ύπαρξη ενός κύματος κατά μήκος του οποίου η φάση είναι σταθερή, καθώς επίσης η ύπαρξη των ακτίνων που περιγράφουν τη χωρική θέση της ακουστικής ενέργειας που ακτινοβολείται από την πηγή με ένα τρόπο ανάλογο της θεωρίας οπτικών ακτίνων.

Τα προγράμματα εντοπισμού ακτίνων (Ray tracing programs) χρησιμοποιούνται συνήθως στην υδροακουστική για τη μοντελοποίηση της διάδοσης της υψηλής συχνότητας ακουστικών κυμάτων ως συνάρτηση του χρόνου. Ο εντοπισμός ακτίνων(Ray tracing) περιλαμβάνει την ενσωμάτωση ενός συνόλου διαφορικών εξισώσεων που ονομάζονται εξισώσεις ακτίνων, οι οποίες περιγράφουν την τροχιά της ακτίνας.[8] Οι εξισώσεις αυτές διέπονται από δεδομένες αρχικές συνθήκες, προκειμένου να εντοπίσουν την πορεία μιας ακτίνας, όπως διαδίδεται αποκρινόμενη από την πηγή. Το πλάτος μιας ακτίνας καθορίζεται από τη διατομή του σωλήνα ακτίνων που οριοθετείται από γειτονικές ακτίνες.

Το κύριο μειονέκτημα που σχετίζεται με τον εντοπισμό των ακτίνων είναι η ύπαρξη των ζωνών σκιάς, οι οποίες είναι ζώνες μέσω των οποίων δεν περνούν ακτίνες, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα μηδενικό πεδίο πίεσης παντού στο εσωτερικό τους. Στην πραγματικότητα, υπάρχει πάντα κάποια διάθλαση του ήχου στις περιοχές που θεωρούνται ως σκοτεινές ζώνες στον εντοπισμό ακτίνων, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια διαφορά μεταξύ της ακριβούς λύσης και αυτού που προβλέπεται από τις μεθόδους εντοπισμού ακτίνων.

Ο εντοπισμός ακτίνων είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μοντελοποίηση της διάδοσης ήχου υψηλής συχνότητας . Και ο εκπεμπόμενός ήχος είναι εύκολα πιστοποιήσιμος και υπολογίσιμος.

1.9.Α.Μαθηματική προέλευση

Η Θεωρία ακτίνων μαθηματικά προέρχεται από την ακουστική εξίσωση κύματος. Η λύση της ορίζει τη χρονική καθυστέρηση της ακτίνας από την πηγή στο δέκτη, την αναλογία του πλάτους πίεσης σε μια επιθυμητή θέση με το εύρος της πίεσης σε ένα σημείο αναφοράς, και την απώλεια διάδοσης. Αυτές οι ακολουθίες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ακτίνων και διαγραμμάτων κρουστική απόκρισης..

Η βάση για τη θεωρία ακτίνων είναι η ακουστική κυματική εξίσωση, η οποία δίνεται από την εξίσωση (1.14). Ο διαχωρισμός των μεταβλητών δείχνει ότι η πίεση εξαρτάται από το τρισδιάστατο διάνυσμα θέσης x = (x, y, z) και του χρόνου t,

$$p = P(\mathbf{x})T(t) \qquad (1.15)$$

έτσι ώστε να χωρίζονται οι χωρικές και χρονικές εξαρτήσεις. Αντικαθιστώντας αυτή τη μορφή στην εξίσωση (1.14) και λαμβάνοντας τη σταθερά διαχωρισμού ως k^2 παίρνουμε

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \ , \quad \frac{d^2T}{dt^2} + k^2 c^2 T = 0 \quad (1.16)$$

Η πρώτη εξίσωση είναι η χρόνο-ανεξάρτητη εκδοχή της εξίσωσης ακουστικού κύματος, που ονομάζεται εξίσωση Helmholtz. Αν αντικαταστήσουμε k = ω / c, τότε

$$\nabla^2 p + \frac{\omega^2}{c^2(x)} p = 0 \qquad (1.17)$$

όπου c (x) είναι η τρισδιάστατη ταχύτητα ήχου και ω είναι η γωνιακή συχνότητα της πηγής. Ο Jensen αναπτύσσει μια λύση της εξίσωσης Helmholtz της μορφής

$$p(x) = e^{i\omega \tau(x)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(x)}{(i\omega)^j} \qquad (1.18)$$

όπου τ(x) είναι ο χρόνος που χρειάζεται ο ήχος να φτάσει στη θέση x και A (x) είναι το πλάτος του σήματος στο x. Η εξίσωση (1.18) ονομάζεται ακτινική σειρά. Το πρώτο και δεύτερο παράγωγο της σειράς ακτίνων, διατηρώντας μόνο τους όρους πρώτης τάξης (μια προσέγγιση υψηλής συχνότητας) δίνει την ακόλουθη άπειρη ακολουθία εξισώσεων για τις ακολουθίες τ(x) και A (x),

$$O(\omega^2) : |\nabla\tau|^2 = \frac{1}{c^2(x)} \qquad (1.19)$$

$$O(\omega) : 2\nabla\tau \cdot \nabla A_o + (\nabla^2\tau) A_o = 0 \qquad (1.20)$$

έτσι ώστε η λύση της εξίσωσης Helmholtz να είναι ένα προϊόν συνάρτησης φάσης, που ονομάζεται eikonal εξίσωση, και μια ακολουθία εύρους, που ονομάζεται εξίσωση μεταφοράς.

Για να λυθεί η eikonal εξίσωση, εισάγεται μια οικογένεια ακτίνων κάθετες προς την τροχιά του κύματος του τ (x). Αυτή η οικογένεια ακτίνων καθορίζει ένα νέο σύστημα συντεταγμένων σε σχέση με το μήκους τόξου, s. Η τροχιά των ακτίνων ακολούθως ορίζεται από το διαφορική εξίσωση

$$\frac{dx}{ds} = c\nabla\tau \qquad [1.21]$$

Και υψώνοντας στο τετράγωνο προκύπτει:

$$\left|\frac{dx}{ds}\right|^2 = c^2 |\nabla\tau|^2 \qquad (1.22)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (1.19) στην εξίσωση (1.22) παρατηρείται ότι το διάνυσμα εφαπτομένης dx/ds έχει μονάδες μήκους. Λαμβάνοντας τις καρτεσιανές συντεταγμένες της εξίσωσης (1.21) και διαφοροποιώντας την σε σχέση με το μήκος τόξου s δίνει την προκύπτουσα εξίσωση φορέα για τις τροχιές ακτίνων :

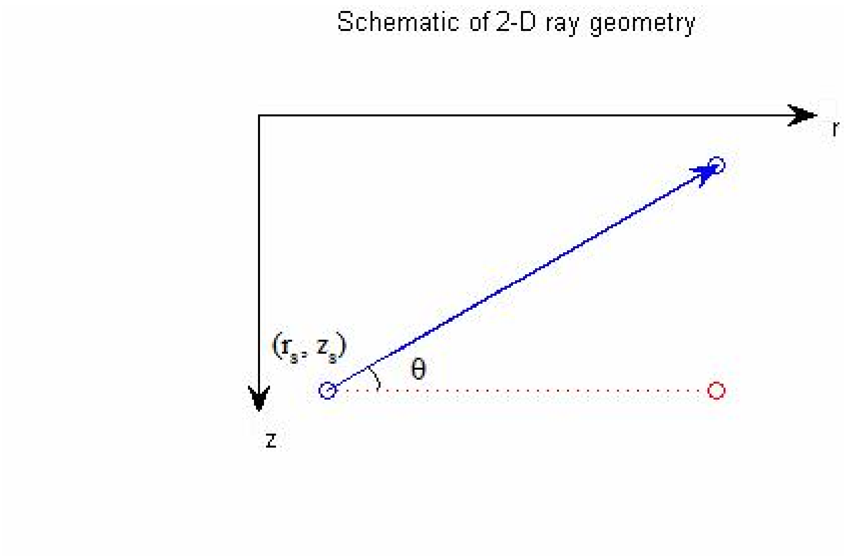
$$\frac{d}{ds}\left(\frac{1}{c}\frac{dx}{ds}\right) = -\frac{1}{c^2}\nabla c \qquad (1.23)$$

Σε κυλινδρικές συντεταγμένες (r, z) οι ακτινικές εξισώσεις μπορούν να γραφτούν με μορφή πρώτης τάξης

$$\begin{aligned} \frac{dr}{ds} &= c\xi(s), & \frac{d\xi}{ds} &= -\frac{1}{c^2}\nabla c \\ \frac{dz}{ds} &= c\varsigma(s), & \frac{d\varsigma}{ds} &= -\frac{1}{c^2}\frac{dc}{dz} \end{aligned} \qquad (1.24)$$

όπου η ενσωμάτωση αυτών των εξισώσεων δίνει την τροχιά της ακτίνας [r (s), z (s)]. Για τις εξισώσεις αυτές, οι ξ και ζ είναι βοηθητικές μεταβλητές ,εισάγονται αυθαίρετα και έτσι οι εξισώσεις μπορούν να είναι γραμμένες σε μορφή πρώτης τάξης.

Η αρχική συνθήκη για την επίλυση των ακτινικών εξισώσεων περιγράφει την ακτίνα που ξεκινάει από τη θέση πηγής (r_s, z_s), με μια καθορισμένη κατακόρυφη γωνία θ εκτόξευσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.7



Εικόνα 1.7 Σχηματική αναπαράσταση της γεωμετρίας των 2-D ακτίνων

Έτσι έχουμε :

$$r = r_s, \qquad \xi = \frac{\cos\theta}{c(0)} \tag{1.25}$$

$$z = z_s, \qquad \varsigma = \frac{\sin\theta}{c(0)} \tag{1.26}$$

Για να οριστεί το πεδίο πίεσης απαιτείται η φάση και το πλάτος της κάθε ακτίνας. Η φάση προκύπτει με την επίλυση της eikonal εξίσωσης στο ακτινικό σύστημα συντεταγμένων. Διευρύνοντας την εξίσωση (1.19)

$$\nabla\tau \cdot \nabla\tau = \frac{1}{c^2} \tag{1.27}$$

έτσι ώστε να αντικαθίσταται η αξία του ∇τ από την εξίσωση (1.21),

$$\nabla\tau \cdot \frac{1}{c}\frac{dx}{ds} = \frac{1}{c^2} \tag{1.28}$$

Τότε

$$\frac{dr}{ds} = \frac{1}{c} \tag{1.29}$$

Ενσωματώνοντας αυτή της εξίσωση σε σχέση με το s έχουμε:

$$\int_0^s d\tau = \int_0^s \frac{1}{c(s)} ds$$

$$\tau(s) - \tau(0) = \int_0^s \frac{1}{c(s)} ds$$

$$\tau(s) = \tau(0) + \int_0^s \frac{1}{c(s)} ds \tag{1.30}$$

Ο ολοκληρωτικός όρος σε αυτήν την εξίσωση είναι ο χρόνος διάδοσης κατά μήκος μιας ακτίνας (χρονική καθυστέρηση).Και η φάση του κύματος καθυστερεί σύμφωνα με το χρόνο αυτόν

Το πλάτος προσδιορίζεται με την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς. Δεδομένου ότι οι ακτίνες είναι κάθετες προς τη μετάδοση του κύματος, η εξίσωση (1.20) μπορεί να ξαναγραφτεί ως

$$\frac{2}{c}\frac{dx}{ds} \cdot \nabla A_0 + \left(\nabla^2\tau\right)A_0 = 0 \tag{1.31}$$

Το οποίο δίνει

$$\frac{2}{c}\frac{dA_0}{ds} + \left(\nabla^2\tau\right)A_0 = 0 \tag{1.32}$$

Έτσι αυτή η εξίσωση δηλώνει ότι το πλάτος κατά μήκος μιας ακτίνας αλλάζει σε σχέση με την εξάπλωση ενός σωλήνα ακτίνων, που είναι ο χώρος που οριοθετείται από δύο παρακείμενες ακτίνες. Η λύση της εξίσωση μεταφοράς μπορεί να απλοποιηθεί με τη χρήση του τρισδιάστατου Ιακωβιανού παράγοντας. Δεδομένου ότι η Ιακωβιανή ικανοποιεί την ακόλουθη κατάσταση,

$$\nabla^2 \tau = \frac{1}{\mathrm{J}} \frac{d}{ds}\left(\frac{J}{c}\right) \qquad (1.33)$$

Η εξίσωση (1.32) γίνεται

$$2\frac{dA_0}{ds} + \left[\frac{c}{J}\frac{d}{ds}\left(\frac{J}{c}\right)\right]A_0 = 0 \qquad (1.34)$$

Η ενσωμάτωση αυτής της εξίσωσης από το 0 έως το s δίνει τη λύση για την εξίσωση μεταφοράς

$$A_0(s) = A_0(0)\left|\frac{c(s)J(0)}{c(0)J(s)}\right|^{1/2} \qquad (1.35)$$

Η πίεση του ήχου για μια σημειακή πηγή σε ένα ομογενές μέσο ορίζεται ως

$$p_0(s) = A_0(s)e^{i\omega\tau} = \frac{e^{i\omega\tau/c_0}}{4\pi s} \qquad (1.36)$$

Έτσι προκύπτει ότι A_0 (s) και τ_0 (s) δίνονται από

$$A_0(s) = \frac{1}{4\pi s} \qquad (1.37)$$

Και

$$\tau_0(s) = \frac{s}{c_0} \qquad (1.38)$$

Αντικαθιστώντας το όριο της ποσότητας $A_0(0)\cdot J_0(0)$ στην εξίσωση (1.35) προκύπτει:

$$A_0(s) = \frac{1}{4\pi}\left|\frac{c(s)\cos\theta}{c(0)J(s)}\right|^{1/2} \qquad (1.39)$$

έτσι η πίεση του ήχου ως συνάρτηση του μήκους του τόξου s είναι :

$$p(s) = \frac{1}{4\pi}\left|\frac{c(s)\cos\theta}{\mathrm{c}(0)J(s)}\right|^{1/2} e^{i\omega\int_0^s \frac{1}{\mathrm{c(s)}}ds} \qquad (1.40)$$

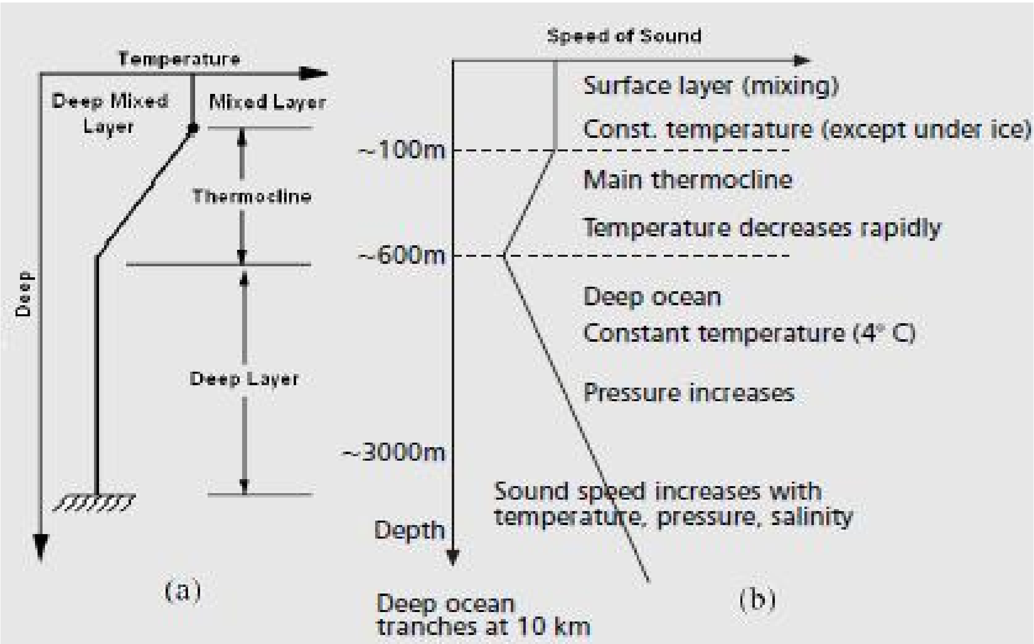
1.10 Ταχύτητα του ήχου

Η κύρια ποσότητα στη διάδοση του ήχου είναι η ταχύτητάτου και εξαρτάται από τη συμπιεστότητα και την πυκνότητα του μέσου. Ως εκ τούτου, ποικίλλει σε κάθε σημείο του ωκεανού, κάθε χρονική στιγμή, εξαιτίας της δυναμικής του θαλάσσιου περιβάλλοντος.[6],[9] Περιγράφεται με εμπειρικά μοντέλα που παρουσιάζουν μια συνάρτηση των παραμέτρων της θερμοκρασίας, της αλατότητας και της πίεσης (βάθος).[10] Μία από τους τύπους που εφαρμόζονται έχει αναπτυχθεί από τον Mackenzie, (1981):

$$c = 1448.96 + 4.591T = 5.304*10^{-2}T^2 + 2.374*10^{-4}T^3 + 1.3049(S-35) +$$

$$1.630*10^{-2}D + 1.675*10^{-7}D^2 - 1.025*10^{-2}T(S-35) - 7.139*10^{-13}TD^3 \qquad (1.41)$$

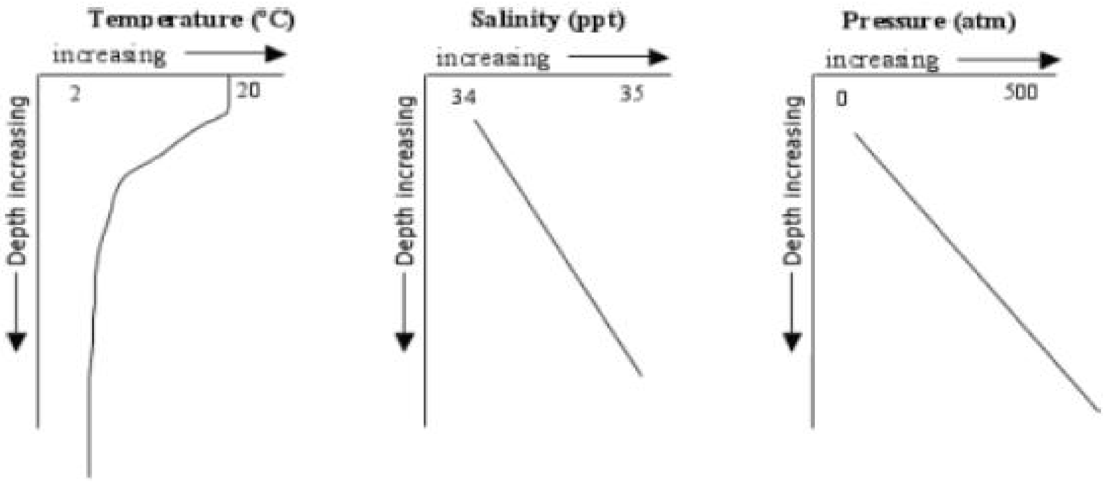
όπου c είναι η ταχύτητα του ήχου (m / s), η θερμοκρασία T (° C), η αλατότητα S (PSU) και D το βάθος (m).
Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του ήχου αυξάνει με την αύξηση οποιασδήποτε από τις τρεις παραμέτρους και της θερμοκρασίας(που είναι καθοριστικός παράγοντας). Όσον αφορά την αλατότητα, λόγω του ότι οι διακυμάνσεις στον ανοιχτό ωκεανό είναι μικρές, η επίδραση αυτής της παραμέτρου είναι επίσης μικρή, με εξαίρεση τις περιοχές κοντά στις εκβολές ποταμών, όπου η αλατότητα γίνεται ένας σημαντικός παράγοντας. [11]
Η κατανομή του προφίλ της ταχύτητας διαφέρει από ωκεανό σε ωκεανό και από εποχή σε εποχή.
Βασικά, ένα προφίλ ταχύτητας του ήχου (εικόνα 1.8-β) εξαρτάται από το προφίλ της θερμοκρασίας (εικόνα 1.8-α), η οποία μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις αυθαίρετες βαθμίδες, που η κάθε μία έχει διακριτά χαρακτηριστικά.



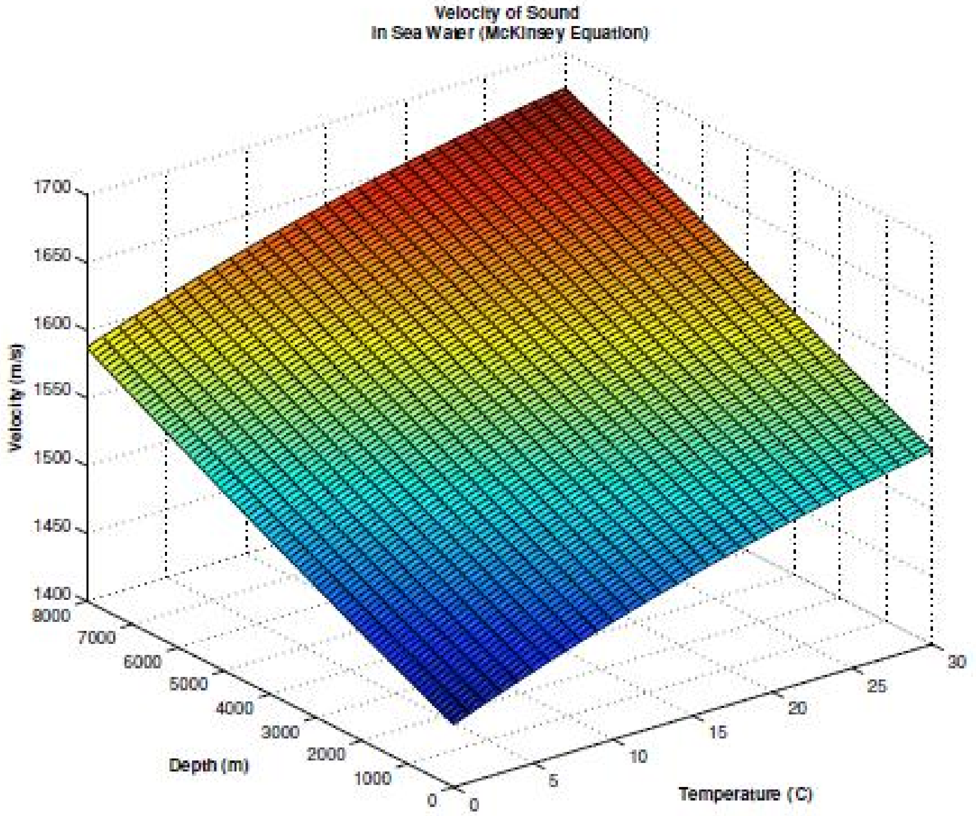
Εικόνα 1.8 (a & b) – Σχέση μεταξύ των προφίλ της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ήχου σε βαθιά νερά

Ακριβώς κάτω από την επιφάνεια βρίσκεται το μεικτό υπόστρωμα, περίπου μια ισοθερμική περιοχή, όπου η ταχύτητα επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας που προκαλούνται από τον άνεμο. Δεδομένου ότι αυτό το στρώμα χαρακτηρίζεται από ένα προφίλ θερμοκρασίας περίπου σταθερής, η ταχύτητα αυξάνεται με το βάθος, που οφείλεται σε αυξημένη πίεση. Το δεύτερο στρώμα ονομάζεται το κυρίως θερμοκλινές. Σε αυτήν την περιοχή, η θερμοκρασία μειώνεται γρήγορα με το βάθος, προκαλώντας μια ισχυρή αρνητική κλίση. Τέλος, κάτω από το θερμοκλινές και εκτεινόμενο προς τα κάτω, βρίσκεται το βαθύ στρώμα, που χαρακτηρίζεται από την σταθερότητα της θερμοκρασίας και την αύξηση της ταχύτητας του ήχου, λόγω της αύξησης της πίεσης. Σε αυτό το στρώμα, το προφίλ της ταχύτητας είναι σχεδόν γραμμικό με θετική κλίση.

Επίσης παρατηρούνται διακυμάνσεις ορισμένων παραμέτρων σε σχέση με το βάθος οι οποίες παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 1.9 Η θερμοκρασία, η αλατότητα και η πίεση σε συνάρτηση με το βάθος[17]

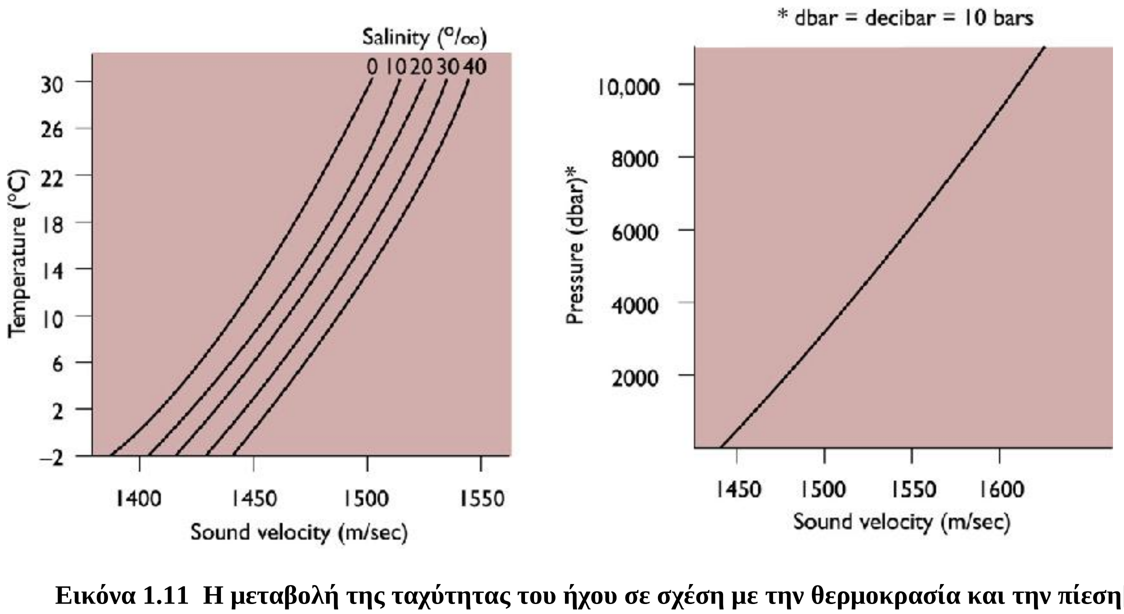


Εικόνα 1.10 Η σχέση της ταχύτητας του ήχου στον ωκεανό με το βάθος και την θερμοκρασία. (αλατότητα καθορισμένη στα 35 ppt)

[Σχέση McKisney (Υπολογίζει την ταχύτητα του ήχου με ένα σφάλμα του εύρους 0.070 m/s)

$v = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \cdot 10^{-2} T^2 + 2.374 \cdot 10^{-4} T^3 + 1.340(S - 35) + 1.630 \cdot 10^{-2} D + 1.675 \cdot 10^{-7} \cdot D^2 - 1.025 \cdot 10^{-2} \cdot T \cdot (S - 35) - 7.139 \cdot 10^{-13} \cdot T \cdot D^3$

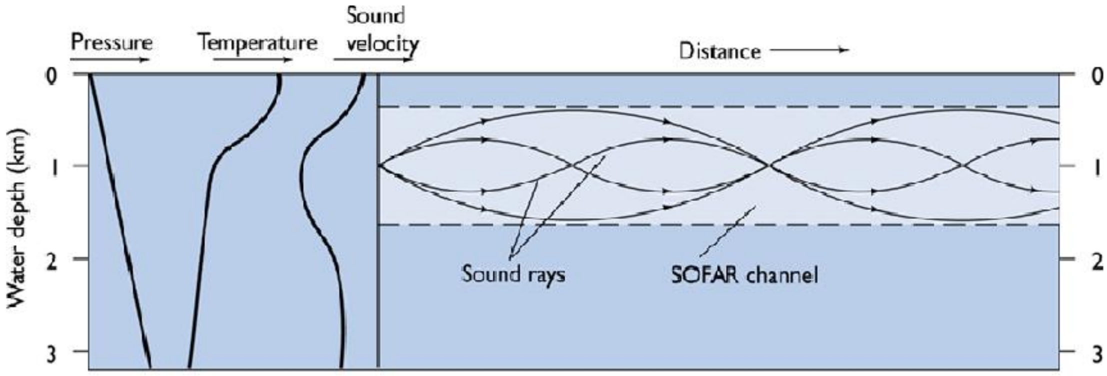
T είναι η θερμοκρασία σε $\circ$C, D είναι το βάθος σε μέτρα και S είναι η αλατότητα.][12][13]



Εικόνα 1.11 Η μεταβολή της ταχύτητας του ήχου σε σχέση με την θερμοκρασία και την πίεση[14]

1.11 Το κανάλι SOFAR (SOund Fixing And Ranging)

Ως κανάλι SOFAR χαρακτηρίζεται το οριζόντιο επίπεδο νερού στο βάθος όπου η ταχύτητα του ήχου παίρνει την μικρότερη τιμή της ~ 1000 m.Επίσης αποκαλείται κανάλι βαθύ ήχου (deep sound channel).
Λειτουργεί ως κυματοδηγός του ήχου, «παγιδεύοντας» διαδρομές διάδοσης.
Αυτή η παγίδευση συμβαίνει επειδή η ταχύτητα του ήχου αυξάνει τόσο πάνω όσο και κάτω από το εύρος της πηγής.[15]



Εικόνα 1.12 Το κανάλι SOFAR [14]

1.12 Ένταση και ισχύς

Η διάδοση ενός ηχητικού κύματος σχετίζεται άμεσα με μια ακουστική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια μπορεί να χωρισθεί σε ένα τμήμα κινητικής (που αντιστοιχεί στην κίνηση των σωματιδίων) και ένα δυναμικής (που αντιστοιχεί στο έργο που παράγουν οι ελαστικές δυνάμεις πίεσης). [16]

Η ακουστική ένταση I είναι η μέση τιμή της ροής της ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Ισούται με τη μέση τιμή της ακουστικής πίεσης που έχει προκύψει από την ταχύτητα του ρευστού (Pierce, 1989).
Για ένα επίπεδο κύμα πλάτους p_0 και την τιμή της μέσης τετραγωνικής ρίζας (RMS) $p_{rms} = p_o / \sqrt{2}$ αυτής της απόδοσης προκύπτει:

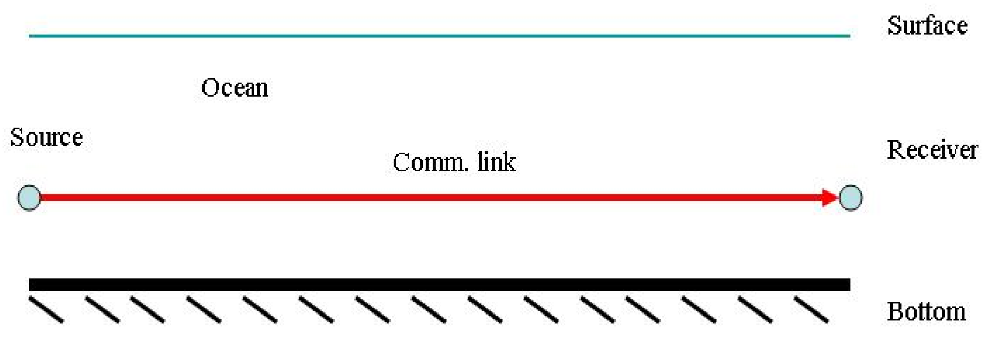
$$I = \frac{\mathrm{p_0}^2}{2pc} = \frac{p_{rms}{}^2}{\rho\mathrm{c}} \qquad (\text{in Watt/m}^2) \qquad (1.42)$$

Η ακουστική ισχύς P που ελήφθη από μία επιφάνεια Σ είναι η διόρθωση της έντασης για τη θεωρούμενη αυτή επιφάνεια. Για ένα επίπεδο κύμα, αυτό θα ήταν:

$$P = I \times \Sigma = \frac{\mathrm{p_o^2}\Sigma}{2\rho\mathrm{c}} = \frac{p_{rms}^2\Sigma}{\rho\mathrm{c}} \quad (\text{in Watt}) \qquad (1.43)$$

Όπου η ακουστική πίεση, η ένταση και η δύναμη μπορεί να ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό. Ένας πομπός υψηλής ισχύος μπορεί να μεταδώσει μια ακουστική ισχύ πολλών δεκάδων κιλοβάτ, ενώ ένα υποβρύχιο σε σιωπηλή λειτουργία μπορεί να εκπέμψει μόνο milliwatts.

Η αποτελεσματικότητα των υποβρύχιων υδροακουστικών επικοινωνιών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση του περιβάλλοντος του ωκεανού. Προκειμένου να μπορέσει να χτιστεί μια ακουστική σύνδεση επικοινωνίας υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, πρέπει να ληφθεί υπόψη το φυσικό κανάλι επικοινωνίας. Τα δύο πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της αξιοποίησης του ωκεανού ως κανάλι επικοινωνίας είναι η απώλεια μετάδοσης (συμπεριλαμβανομένων των φαινομένων παρεμβολής πολλαπλών διαδρομών) και το επίπεδο θορύβου του περιβάλλοντος. Το υποβρύχιο κανάλι επικοινωνίας είναι ανάλογο με ένα κυματοδηγό που οριοθετείται από την επιφάνεια και τον πυθμένα της θάλασσας. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που εξασθενούν τη λήψη σήματος στον ωκεανό. Διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ήχου έχουν ως αποτέλεσμα τη διάθλαση του ήχου, η οποία μπορεί να αποδυναμώσει την ισχύ του σήματος. Η διεπαφή αέρος-θαλάσσης και οι αντανακλάσεις εξαιτίας του πυθμένα της θάλασσας, δημιουργούν διάδοση πολλαπλών διαδρομών κάτι το οποίο αλλοιώνει και διασπείρει το σήμα. Επίσης διάφορες πηγές θορύβου στον ωκεανό επιδεινώνουν την ικανότητα υποδοχής του σήματος.



Εικόνα 1.13 Ο ωκεανός ως ένας κυλινδρικός κυματοδηγός

Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: την απώλεια μετάδοσης (Transmission or Propagation loss)και τον θόρυβο (noise).

1.13 .Α. Η Απώλεια διάδοσης - μετάδοσης (Transmission-Propagation loss)

Η απώλεια διάδοσης (που αναφέρεται επίσης και ως απώλεια μετάδοσης) προκαλεί την σταδιακή εξασθένηση του ηχητικού κύματος πλάτους Α καθώς ταξιδεύει. Υπάρχουν δύο κύριες αιτίες που συμβάλλουν σε αυτή την απώλεια.[5][17]
Η πρώτη είναι η απορρόφηση από το πραγματικό μέσο, το νερό. Η δεύτερη αιτία της απώλειας μετάδοσης οφείλεται στον σφαιρικό τρόπο εξάπλωσης. Αυτό συμβαίνει διότι η ένταση του κύματος μειώνεται καθώς η συνολική ισχύς του κατανέμεται στην αυξανόμενη σφαιρική επιφάνεια του.[1] [18]

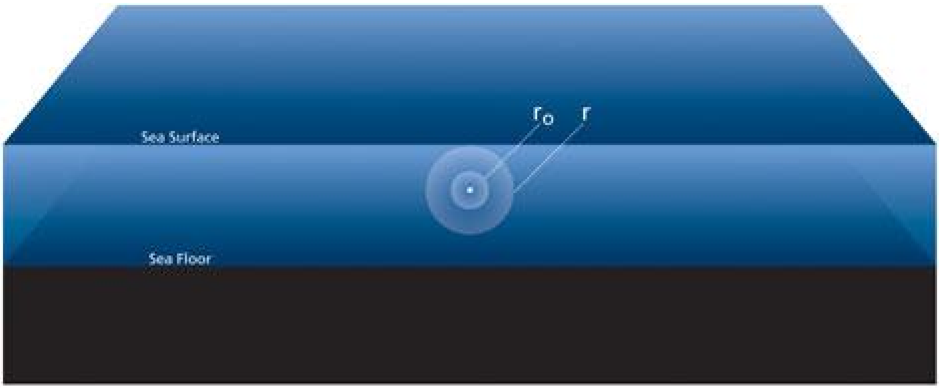
Η απώλεια διάδοσης (TL) είναι η απώλεια στο επίπεδο της έντασης ή της στάθμης ηχητικής πίεσης μεταξύ δύο σημείων πεδίου(γενικά αναφέρεται ως πηγή και δέκτης). Η απώλεια διάδοσης συνήθως εκφράζεται σε όρους λογαριθμικής κλίμακας της έντασης του ήχου σε μία περιοχή αναφοράς που βρίσκεται ένα μέτρο μακριά από το κέντρο της ακουστικής πηγής (I_0) και της έντασης του ήχου του δέκτη (I_1). Οι τιμές της απώλειας διάδοσης εκφράζονται σε decibels. [19]

Στον ωκεανό, υπάρχουν τρεις τύποι απωλειών που συμβάλλουν στην συνολική απώλεια διάδοσης. Οι απώλειες αυτές κατηγοριοποιούνται ως απώλεια εξάπλωσης (σφαιρική, κυλινδρική, συνδυασμένη)(spreading loss (Spherical, Cylindrical, Combined)),απώλεια απορρόφησης (συμπεριλαμβανομένης της σκέδαση)(absorption loss) (including scattering), και την απώλεια πολλαπλών διαδρομών(multipath loss).

1.13. Α.1 Απώλεια διασποράς (Spreading Loss)

Η απώλεια διασποράς είναι η απώλεια διάδοσης λόγω της γεωμετρικής εξάπλωσης της ακουστικής ενέργειας καθώς ο ήχος ταξιδεύει μακριά από την πηγή. Τυπικά, η απώλεια διασποράς εξαρτάται μόνο από το εύρος της διάδοσης. Ως εκ τούτου, είναι ανεξάρτητη της συχνότητας. Τα δύο πιο απλά μοντέλα για τη απώλεια διασποράς είναι τα σφαιρικά και τα κυλινδρικά.

a)Σφαιρική διασπορά(***Spherical Spreading)***



Εικόνα 1.14 Ο ήχος που παράγεται από μια πηγή ήχου (εμφανίζεται ως μια λευκή κουκίδα) στο μέσο βάθος στον ωκεανό ακτινοβολεί εξίσου σε όλες τις κατευθύνσεις. Τα επίπεδα του θορύβου είναι, επομένως, σταθερές σε σφαιρικές επιφάνειες που περιβάλλουν την πηγή του ήχου. Τα

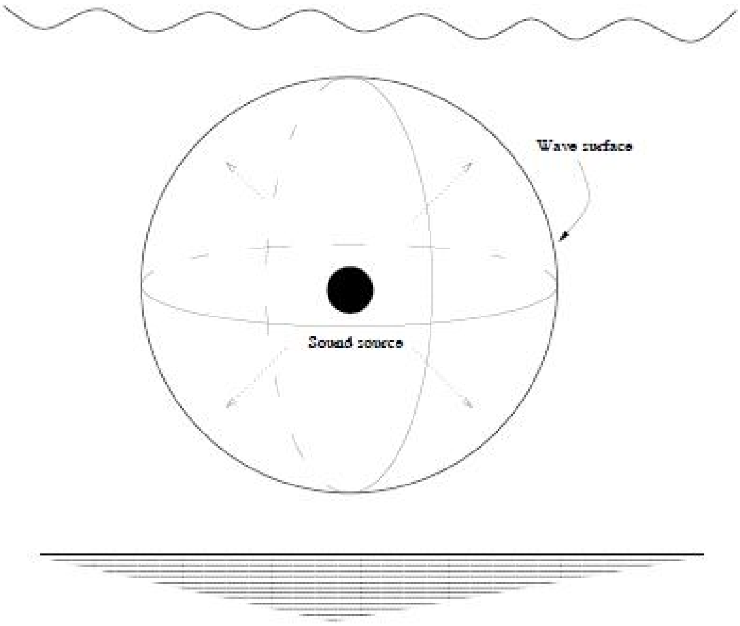
επίπεδα του θορύβου μειώνονται δραστικά ,ο ήχος διαδίδεται από μια σφαίρα με ακτίνα r_0 σε μια μεγαλύτερη σφαίρα με ακτίνα r. [17]

Η Σφαιρική εξάπλωση προκύπτει όταν ένα ηχητικό κύμα ακτινοβολεί σφαιρικά προς τα έξω από την πηγή σε ένα απέραντο μέσο. Ο τύπος για τη σφαιρική διασπορά δίνεται από:

$$TL_{Spherical} = 20\log r \quad \text{db} \qquad (1.44)$$

όπου r είναι η απόσταση από την πηγή σε m

Η πηγή του ήχου είναι στο κέντρο, και το κύμα που εκπέμπεται είναι η σφαίρα. Αυτό το πεδίο θα συνεχίσει να αυξάνεται-μεγαλώνει προς τα έξω, όπως ταξιδεύει ο ήχος.



Εικόνα 1.15 Εξάπλωση ηχητικού κύματος σφαιρικά από την πηγή

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η απώλεια που συνδέεται με τη σφαιρική εξάπλωση, η έκφραση για την ισχύ αρχικά είναι :

$$P = A \times I \qquad (1.45)$$

Όπου: P η δύναμη ,εκφράζεται σε Watt

A η περιοχή, εκφράζεται σε m^2

I η ένταση του ήχου ,μετριέται σε Watts/m^2

Η περιοχή σε αυτήν την περίπτωση είναι η περιοχή μιας σφαίρας, έτσι A γίνεται:

A = 4®r^2 [1.46]

Όπου: r Ακτίνα της σφαίρας σε μέτρα

Αντικαθιστώντας την (1.45) στην (1.46) προκύπτει ότι η ισχύς σε μια σφαίρα είναι:

$$P = 4\circledR r^2 \times I \qquad (1.47)$$

Μόλις η πηγή εκπέμψει τον ήχο, το ηχητικό κύμα θα πρέπει να μεταφέρει ένα σταθερό ποσό ηλεκτρικής ενέργειας. Αγνοώντας την ενέργεια που απορροφάται από το μέσο, η ισχύς αυτή θα παραμείνει ως επί το πλείστον σταθερή. Η απόσταση που διανύθηκε από το κύμα είναι ουσιαστικά η ακτίνα της σφαίρας. Όσο το κύμα ταξιδεύει , η ακτίνα και το εμβαδόν επιφανείας της σφαίρας θα αυξάνεται. Μαζί με αυτή, η ένταση του ηχητικού κύματος (μετρούμενη ως δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας) θα μειώνεται, καθώς η συνολική ισχύς ανακατανέμεται πάνω στην επιφάνεια της αυξανόμενης σφαίρας. Εκπροσωπώντας αυτή τη σχέση μαθηματικά προκύπτει ότι :

$$P = 4\circledR r^2 \times I_1 = P = 4\circledR r^2 \times I_2$$

$$r^2 \times I_1 = r^2 \times I_2 \qquad (1.48)$$

Πού: r_1 αρχική απόσταση από την πηγή σε μέτρα

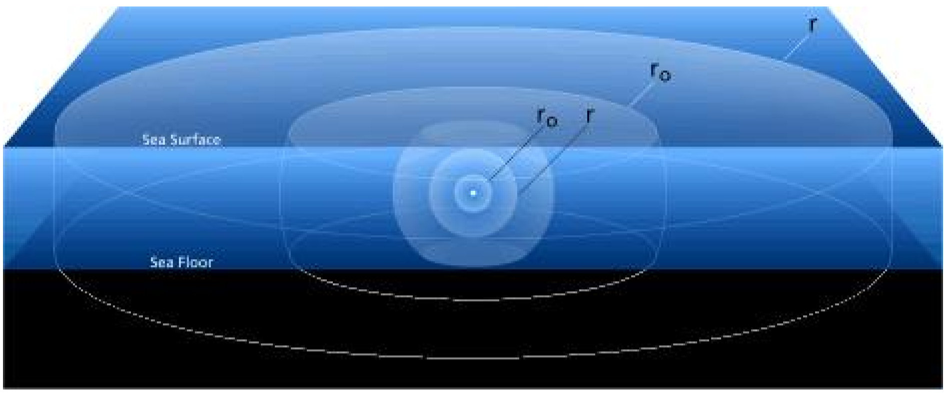
I_1 αρχική ένταση Watts/ m^2

r_2 νέα απόσταση από την πηγή σε μέτρα

I_2 νέα ένταση στο Watts/ m^2

Αποδεικνύεται ότι η προκύπτουσα ένταση είναι μια αναλογία μίας άλλης έντασης, σε μια άλλη απόσταση.

b)Κυλινδρική διασπορά (*Cylindrical Spreading)*



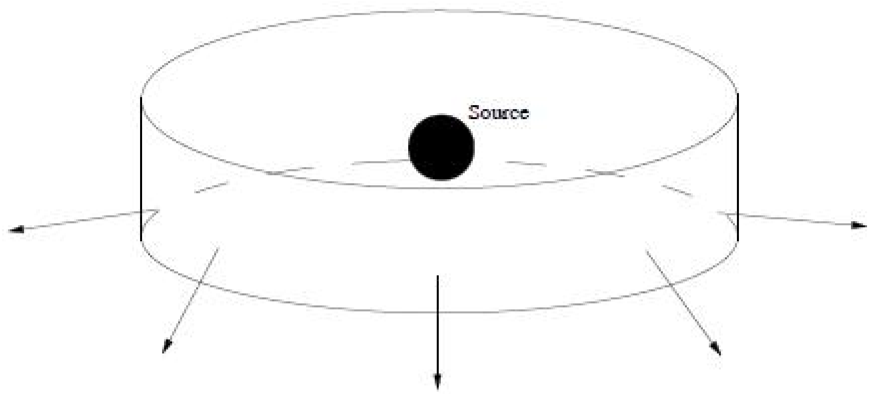
Εικόνα 1.16 Ο ήχος που παράγεται από μια πηγή (εμφανίζεται ως μια λευκή κουκκίδα) στα μέσα του ωκεανού δεν μπορεί να συνεχίσει να κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλες τις κατευθύνσεις μόλις φτάσει στην επιφάνεια ή τον πυθμένα της θάλασσας. Μόλις ο ήχος παγιδευτεί μεταξύ του άνω και του κάτω μέρος του ωκεανού αρχίζει σταδιακά να εξαπλωθεί κυλινδρικά, με τον ήχο να

ακτινοβολεί οριζοντίως μακριά από την πηγή. Τα επίπεδα του θορύβου μειώνονται πιο αργά καθώς ο ήχος διαδίδεται από έναν κύλινδρο με ακτίνα r_0 σε μεγαλύτερο κύλινδρο με ακτίνα r σε σχέση με το ποσοστό της μείωσης για τη σφαιρική διάδοση. [17]

Σε ένα φραγμένο μέσο που έχει χαρακτηριστεί ως κυματοδηγός όπως ο ωκεανός, το οποίο οριοθετείται από την επιφάνεια του ωκεανού και τον πυθμένα, τα ακουστικά κύματα ταξιδεύουν προς τα έξω μεταξύ δύο παράλληλων επιφανειών. Ως εκ τούτου, σε εύρος πολύ μεγαλύτερο από το βάθος, η ενέργεια μεταδίδεται κυλινδρικά. Ο τύπος για την κυλινδρική απώλεια διασποράς δίδεται από :

$$TL_{CYLINDRICAL} = 10 \log r \quad \text{db} \tag{1.49}$$

όπου r είναι η απόσταση από την πηγή σε μέτρα (m).



Εικόνα 1.17 Εξάπλωση ηχητικού κύματος κυλινδρικά από την πηγή

Η ένταση του ήχου σε μία μοναδιαία απόσταση από την πηγή είναι πάντα γνωστή - είναι απλώς η αρχική ισχύς του ηχητικού κύματος διαιρουμένη με 4. Έτσι, αντικαθιστώντας $r_1 = 1$, στην παραπάνω εξίσωση έχουμε μια εξίσωση για σφαιρική απώλεια διασποράς (αυτό είναι γνωστό ως μια σχέση αντιστρόφου τετραγώνου):

$$\text{I}=\frac{I_0}{r^2} \tag{1.50}$$

Πού: I Ένταση του ήχου r μέτρων από την πηγή, σε Watts/ m^2

Io Αρχική ένταση του ήχου σε Watts/ m^2

r Απόσταση από πηγή σε μέτρα

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για μεγάλες αποστάσεις, η διάδοση στα ρηχά νερά, θα γίνει κυλινδρική, καθώς τα κύματα οριοθετούνται από την επιφάνεια της θάλασσας και πυθμένα της. Χρήση μια παρόμοια μέθοδο με πριν, αλλά χρησιμοποιώντας A = h × 2 ¼ r (όπου h είναι το ύψος ή βάθος του ωκεανού), η απώλεια διασποράς γίνεται:

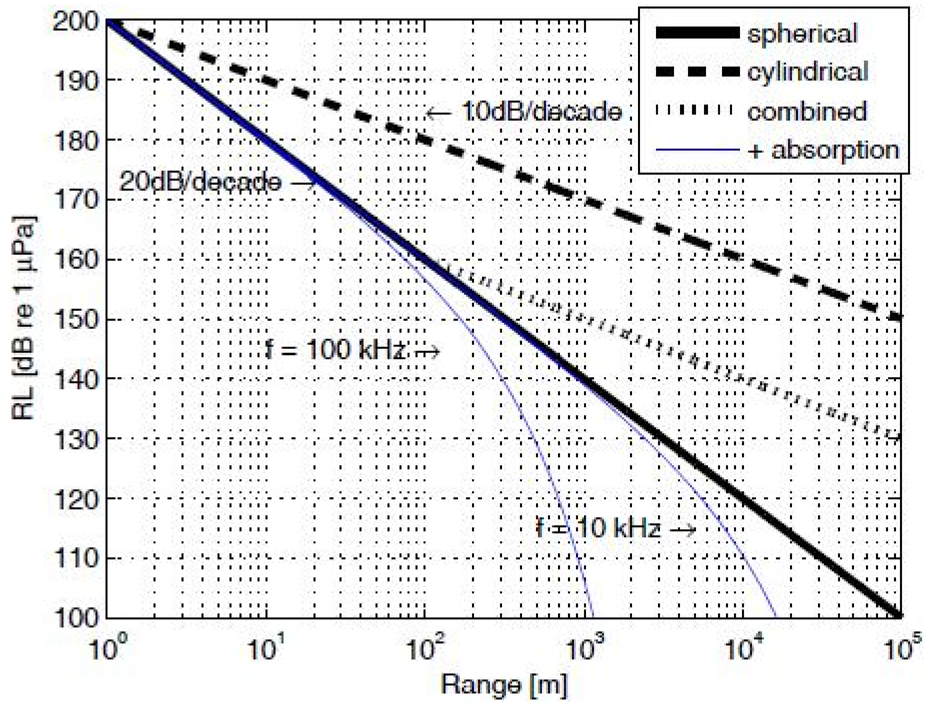
$$I = \frac{I_0}{r} \qquad (1.51)$$

Σημείωση: το κυλινδρικό μοντέλο απώλειας που συζητείται εδώ θεωρεί ότι ο πυθμένας της θάλασσας είναι επίπεδος.

c)Συνδυασμένη Απώλεια Απόδοση (Combined Spreading Loss)

Σε γενικές γραμμές, ο ήχος θα διαδοθεί σφαιρικά κοντά στην πηγή. Σε κάποια κλίμακα H, το σφαιρικό κύμα χτυπά τον πυθμένα της θάλασσας, από εδώ και πέρα, ο ήχος διαδίδεται κυλινδρικά. Σε μία κλίμακα R μεγαλύτερης από το βάθος του νερού H, η απώλεια διασποράς είναι:

$$TL_{Combined} = 20\ \log 10\frac{h}{1m} + 10\ \log 10\frac{R}{H} = 10\ \log 10\frac{h}{1m} + 10 \log 10\frac{R}{1m} \qquad (1.52)$$



Εικόνα 1.18 Γεωμετρική απώλεια διασποράς για μία πηγή 200 dB, 1μPa κ εύρους 1m. Στη συνδυασμένη απώλεια απόδοσης ο ήχος διαδίδεται σφαιρικά μέχρι *R* = *H* = 100m,και έπειτα κυλινδρικά. H απώλεια διάδοσης είναι ανεξάρτητη της f. [19]

1.13 .A.2 Απώλεια απορρόφησης (Absorption Loss)

Η απώλεια απορρόφησης είναι η απώλεια διάδοσης λόγω του ιξώδους, θερμικών, χημικών χαρακτηριστικών του νερού. Εξαρτάται από τη συχνότητα..[4],[5],[16] Ο τύπος για την απώλεια διάδοσης που οφείλεται στην απορρόφηση είναι:

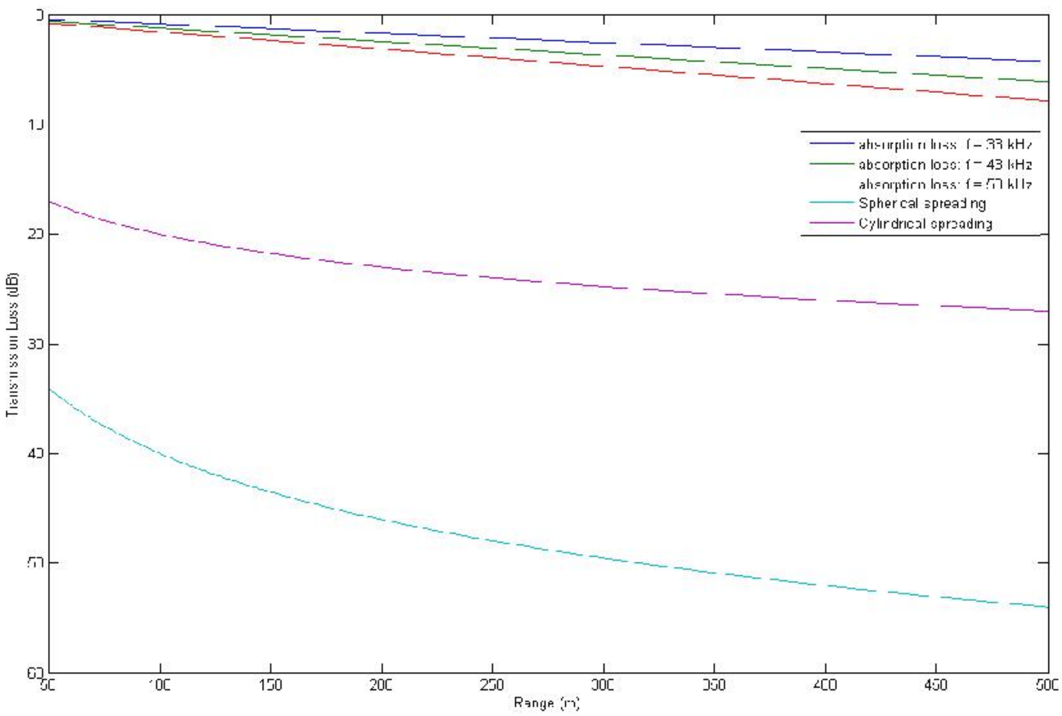
$$TL_{Absorbion} = aR \qquad (1.53)$$

όπου α είναι ο συντελεστής απορρόφησης σε dB / m και το r είναι η απόσταση από την πηγή σε m. [15]
Ο συντελεστής της απώλεια έχει τρείς παράγοντες :οι δυο πρώτοι αφορούν τις χημικές ενώσεις του βορικού οξέως (H_3BO_3) και του θειικού μαγνησίου ($MgSO_4$), και ο τρίτος είναι η συνεισφορά του καθαρού νερού.

$$\sim\ = 0{,}106\frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2}e^{(pH-8)/0{,}56} + 0{,}52\left(1+\frac{T}{43}\right)\frac{S}{35}\frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2}e^{-z/6} + \qquad (1.54)$$
$$4{,}9\times10^{-4} f^2 e^{-(T/27+z/17)}$$

Με $f_1 = 0{,}78(S/35)^{1/2}e^{T/26}$ και $f_2 = 42e^{T/17}$ [kHz]

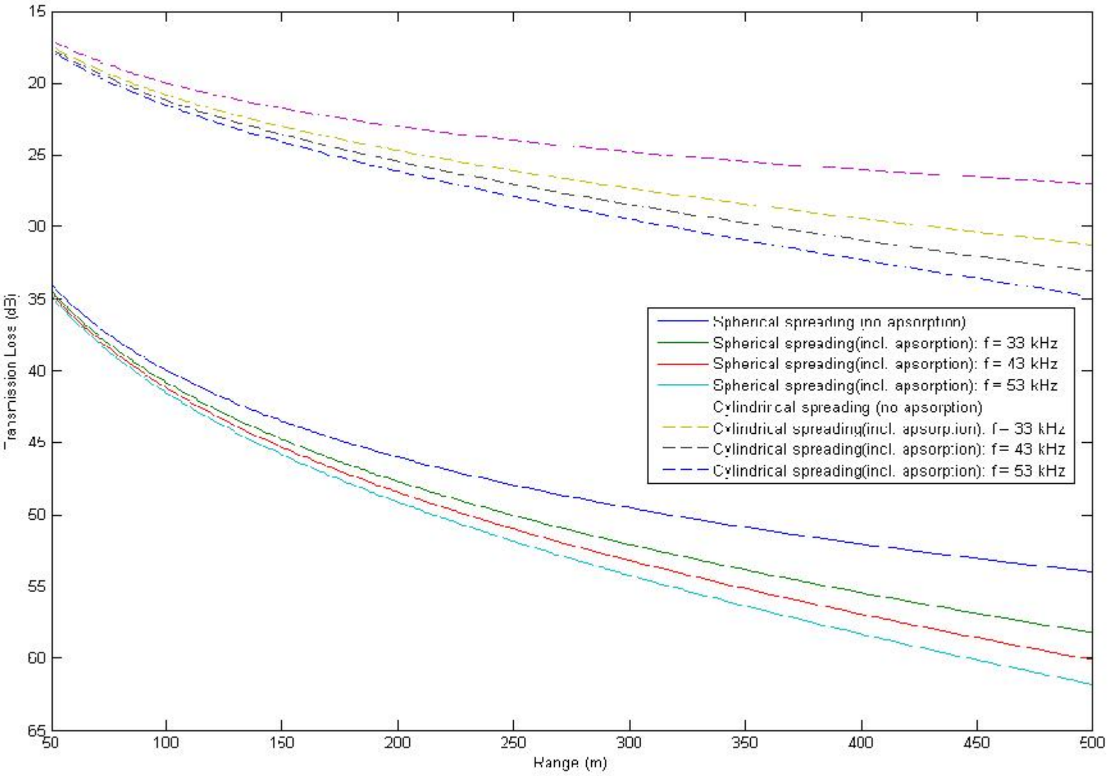
Ως ένα παράδειγμα μπορεί να διερευνηθεί η επίδραση της απώλειας απορρόφησης σε διαφορετικές συχνότητες. Τρεις αντιπροσωπευτικές συχνότητες έχουν επιλεγεί (33 kHz, 43 kHz και 53 kHz) για λεπτομερή μελέτη. Η απώλεια απορρόφησης και η γεωμετρική απώλεια διασποράς παρουσιάζονται στην εικόνα 1.19 .



Εικόνα 1.19 Σύγκριση της απώλειας απορρόφησης, της κυλινδρικής απώλεια εξάπλωσης και της σφαιρικής απώλειας εξαπλώσης στις συχνότητες των 33 kHz, 43 kHz και 53 kHz, σε ένα εύρος μεταξύ 50-500 μ[16]

Η απώλεια απορρόφησης αυξάνεται με τη συχνότητα (εικόνα 1.19). Η απώλεια διάδοσης για τις συχνότητες 33 kHz, 43 kHz και 55 kHz είναι περίπου 4 dB, 6 dB, και 8 dB, αντιστοίχως. Η σφαιρική και η κυλινδρική διάδοση διασποράς είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα.
Η σφαιρική απώλεια διάδοσης είναι 34 dB σε r = 50 m από την πηγή και αυξάνεται σε 54 dB σε r = 500 m. Η κυλινδρική απώλεια διάδοσης είναι 17 dB σε r = 50 m από την πηγή και 27 dB σε r = 500 m.

Όταν η απώλεια απορρόφησης περιλαμβάνει και τους δύο τύπους της γεωμετρικής εξάπλωσης, η απώλεια διάδοσης σε R = 500 m αυξάνεται κατά 4 έως 8 dB, ανάλογα με τη συχνότητα. Η σύγκριση αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα 1.20.



Εικόνα 1.20 Σύγκριση της απώλειας απορρόφησης με την κυλινδρική απώλεια εξάπλωσης και της απώλειας απορρόφησης με την σφαιρική απώλεια εξάπλωσης στις συχνότητες των 33 kHz, 43 kHz και 53 kHz, σε ένα εύρος μεταξύ 50-500 μ[16]

Πρέπει να αναφερθεί ότι εν τέλει η συνολική απώλεια ισούται με :

$$TL_{\mathrm{Total}} = TL_{Sherical} + TL_{C\text{³ª§¬¢°§·~ª}} + TL_{Absorption} \qquad (1.55)$$

1.13.Α.3 Απώλεια πολλαπλών διαδρομών (Multipath Loss)

Η διάδοση πολλαπλών διαδρομών ήχου αναφέρεται σε καταστάσεις στις οποίες υπάρχουν επιπλέον διαδρομές μετάδοσης ήχου εκτός από την άμεση διαδρομή διάδοσης.
Σε βαθειά ύδατα και σε μεγάλο εύρος, η λήψη από ένα δέκτη πολλαπλών διαδρομών είναι αποτέλεσμα διαθλαστικών διαδρομών διάδοσης, σε αντίθεση με διαδρομές που περιλαμβάνουν σύνορα αντανάκλασης. Σε αυτή την περίπτωση, οι σωρευτικές απώλειες λόγω των ορίων αντανάκλασης, ειδικά του πυθμένα των ωκεανών, οδηγούν στην αποτελεσματική εξάλειψη των ορίων διάδοσης μέσω πολλαπλών διαδρομών που συμβάλλουν στη λήψη ενός μακρινού ηχητικού σήματος. Η διάδοση πολλαπλών διαδρομών λόγω των ορίων αντανάκλασης πάσχει από σοβαρές απώλειες διάδοσης δεδομένου ότι οι απώλειες αναπήδησης για μεγάλο εύρος διάδοσης συσσωρεύονται στον βαθύ ωκεανό.
Ως εκ τούτου, οι σημαντικότερες συμβολές πολλαπλών διαδρομών για λήψεις μακρινών σημάτων είναι μόνο από διάθλαση ακτίνων.

1.13.Β Θόρυβος

Ο θόρυβος του περιβάλλοντος στο υποθαλάσσιο κανάλι επικοινωνίας προέρχεται τόσο από φυσικές όσο και ανθρωπογενείς πηγές. Οι φυσικές πηγές που προκαλούν θόρυβο είναι από βιολογικές και σεισμικές δραστηριότητες(θόρυβος από τα κύματα, τα ρεύματα, τις παλίρροιες, τη βροχή και τον αέρα). Οι ανθρωπογενείς πηγές θορύβου οφείλονται κυρίως στις ναυτιλιακές δραστηριότητες.[5],[16]

Ο θόρυβος όμως του περιβάλλοντος στον ωκεανό μπορεί να προκληθεί κυρίως από τέσσερις πηγές. Δηλαδή να είναι θόρυβος προερχόμενος από αναταραχές, από τη ναυτιλία, από κύματα και θερμικός θόρυβος [20][21]

Ο Θόρυβος από αναταράξεις επηρεάζει την περιοχή χαμηλών συχνοτήτων (f <10Hz).
Στο εύρος συχνοτήτων του θορύβου 10Hz-100Hz ο κύριος λόγος που τον προκαλεί είναι η μακρινή ναυτιλία, και έχει διαμορφωθεί μέσα από τον παράγοντα ναυτιλιακή δραστηριότητα s, η τιμη του οποίου κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 για χαμηλή και υψηλή δραστικότητα, αντίστοιχα.
Η επιφανειακή κίνηση προκαλείται από τον άνεμο, και αλλάζει την κίνηση των κυμάτων (w είναι η ταχύτητα του ανέμου σε m/s) είναι ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει στη δημιουργία θορύβου στην περιοχή συχνοτήτων 100 Hz - 100 kHz (η οποία είναι η περιοχή λειτουργίας που χρησιμοποιείται από την πλειοψηφία των ακουστικών συστημάτων).
Τέλος, θερμικός θόρυβος γίνεται κυρίαρχος στην περιοχή συχνοτήτων για f> 100 kHz.

Πηγή θορύβου	Συχνότητες f
Από Αναταράξεις (turbulence)	<10 Hz
Από Ναυτιλία (shipping)	10-100 Hz
Από επιφανειακή κίνηση (wind)	100Hz-100kHz
Θερμικός (thermal)	>100 kHz

Πίνακας 1.1 :Πηγές θορύβου και οι αντίστοιχες συχνότητες.

Η συνεισφορά από κάθε πηγή θορύβου μπορεί να περιγραφεί εμπειρικά. Η εικόνα 1.21 δείχνει το εκτιμώμενο επίπεδο φάσματος θορύβου (Noise Spectrum Level - NSL) σε βαθιά νερά με βάση τον εμπειρικό τύπο του Coates .[22]

$$NSL = 10\log\left(\sum_i 10^{NSL_I/10}\right) \quad \text{dB re } 1\mu\text{Pa}^2/Hz \qquad (1.56)$$

Όπου ξεχωριστά για κάθε πηγή το Επίπεδο φάσματος θορύβου είναι :

$$NSL_{therm} = -15 + 20\log(f)$$

$$NSL_{surf} = 50 + 7.5\sqrt{w} + 20\log(f) - 40\log(f + 0.4)$$

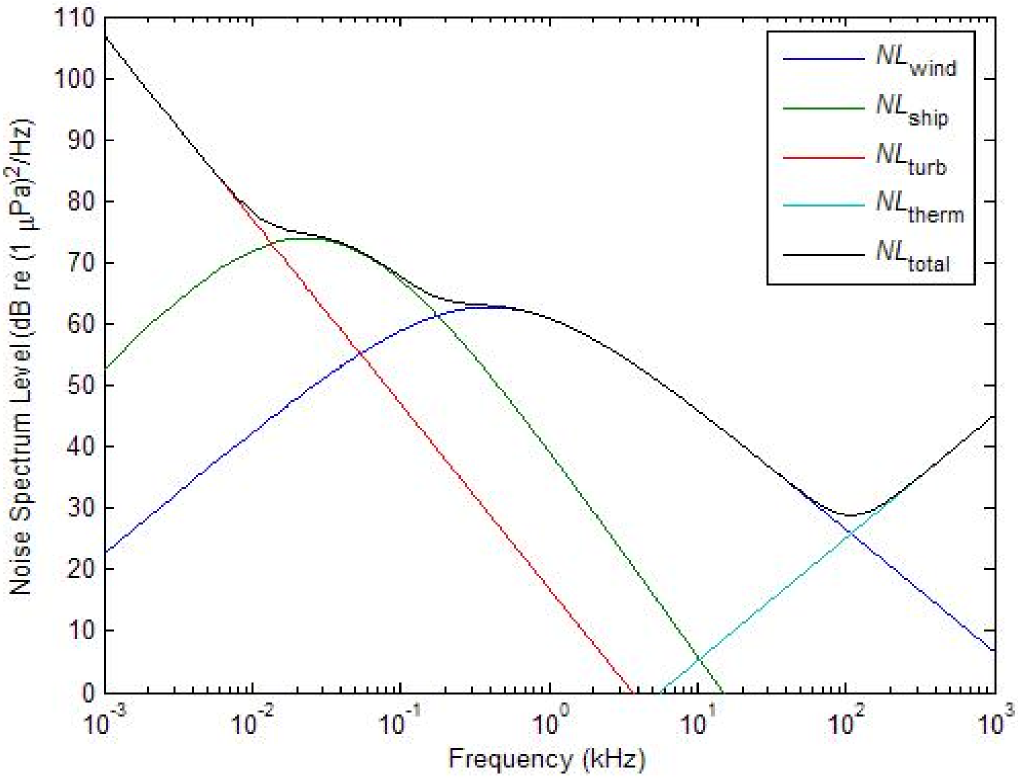
$$(1.57)$$

$$NSL_{ship} = 40 + 20(D - 0.5) + 26\log(f) - 40\log(f + 0.03)$$

$$NSL_{turb} = 17 - 30\log(f)$$

Όπου f η συχνότητα σε kHz, D η παράμετρος πυκνότητας ναυτιλίας (κυμαίνεται από 0(πολύ ελαφριά)-1(βαριά)), και w η ταχύτητα του ανέμου σε m/s

Φυσικά, οι πηγές αυτές είναι μεταβλητές ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και άλλους παράγοντες. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η εμπειρική σχέση του Coates βασίζεται σε στοιχεία που έχουν ληφθεί σε βαθειά νερά.



Εικόνα 1.21 Το επίπεδο φάσμα θορύβου (NSL) σε dB με βάση τον εμπειρικό τύπου του Coates.[22]

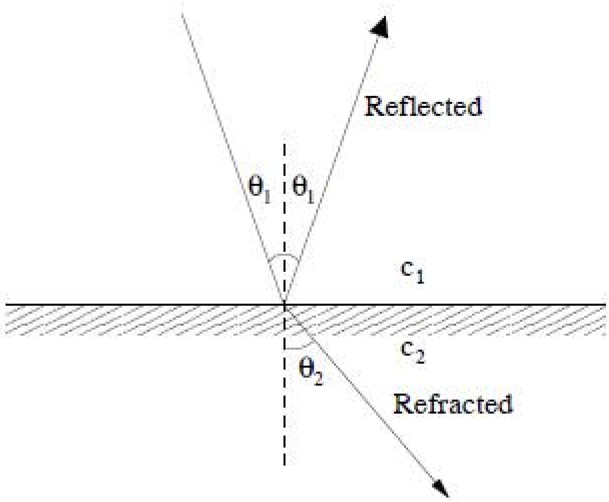
1.14 Αντανάκλαση - Reflection

Όπως όλα τα κύματα, τα υδροακουστικά κύματα μπορεί να αντανακλώνται από τα όρια του μέσου. Η αντανάκλαση είναι μία από τις κύριες αιτίες της αντήχησης στα ηχητικά σήματα.[23] Κύματα που ταξιδεύουν και αντανακλώνται, θα έχουν διανύσει μεγαλύτερες αποστάσεις από ό,τι με την άμεση διαδρομή. Λόγω αυτής της διαφοράς, το κύμα της ανακλώμενης διαδρομής θα είναι πιο εξασθενημένο και θα καθυστερεί περισσότερο. Το προκύπτον σήμα που τελικά φτάνει στο δέκτη θα παρουσιάζει όλες τις ιδιότητες των αντανακλάσεων που έχει δεχτεί.[1],[18]

Είναι γνωστό ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης σε κάθε περίπτωση-ο νόμος της ανάκλασης. Η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία του ηχητικού κύματος που φθάνει στο όριο (επίσης γνωστό ως μέσο διασύνδεσης). Ομοίως, η γωνία ανάκλασης ορίζεται ως η γωνία της ανακλώμενης ακτίνας, σε σχέση με το όριο. Αυτό το είδος της ανάκλασης κοινώς ονομάζεται κατοπτρική.
Όταν πρόκειται να καθοριστούν οι βασικές αιτίες του προκαλούν αντανακλάσεις στη υδροακουστική, υπάρχουν μόνο δύο παράμετροι που μπορούν να εξετασθούν: η επιφάνεια των ωκεανών και ο θαλάσσιος βυθός. Σε βαθειά νερά, ο ένας ή και οι δύο αυτές παράμετροι μπορούν να αγνοηθούν.

1.15 Διάθλαση - Refraction

Ο ωκεανός δεν είναι καθόλου ομογενές μέσο. Η θερμοκρασία, η πυκνότητα (συνάρτηση της πίεσης) και η αλατότητα ,όλα επηρεάζουν τη διάδοση του υδροακουστικού κύματος.
Όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν ουσιαστικά την ταχύτητα διάδοσης του μέσου.



Εικόνα 1.22 Ανακλώμενες και διαθλώμενες ακτίνες σε ένα μέσο διεπαφής

Η εικόνα 1.22 δείχνει πώς μια διαδρομή ακτίνων διαθλάται. Σύμφωνα με το νόμο του Snell, η γωνία διάθλασης είναι συνάρτηση των ταχυτήτων του ήχου στα δύο συγκεκριμένα μέσα που μοιράζονται το όριο που διασχίζεται από ένα ακουστικό κύμα:

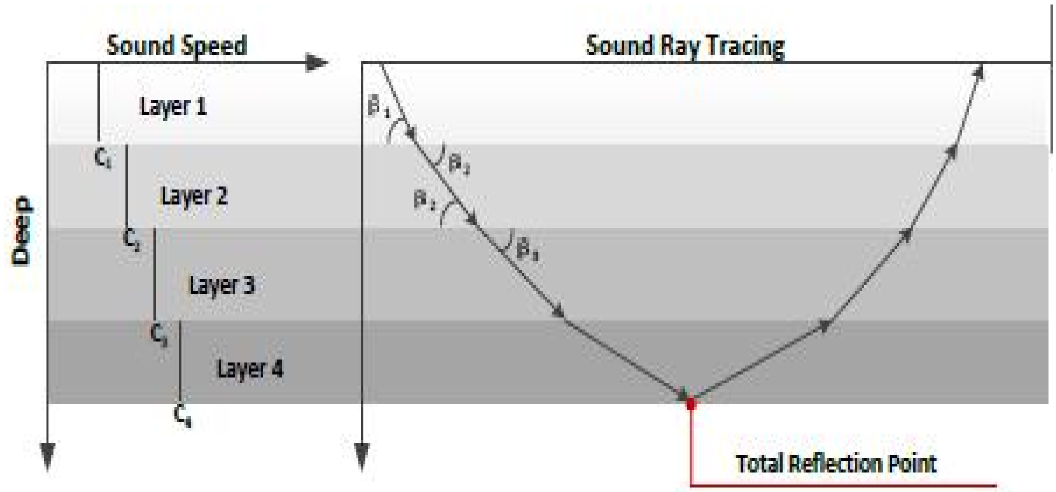
$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{c_1}{c_2} \qquad (1.58)$$

όπου: c_n η ταχύτητα του ήχου στο μέσο n
θ_n η γωνία της ακτίνας με την κανονική σε μέσο n

Όταν $c_2 > c_1$, και η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη γωνία, η ακτίνα δεν θα περάσει μέσα από το σύνορο. Αντ ’αυτού, απλά αντικατοπτρίζεται. Αυτό είναι γνωστό ως νόμος ολικής εσωτερική ανάκλασης. Η κρίσιμη γωνία μπορεί να αντικατασταθεί με $\sin\theta_2 = 1$ εντός της εξίσωσης (1.58) και να γίνει:

$$\theta c = \arcsin \frac{c_1}{c_2} \qquad (1.59)$$

Οπου: θ_c Η κρίσιμη γωνία



Εικόνα 1.23 Ανακλώμενες και διαθλώμενες ακτίνες ήχου στον ωκεανό[24]

Κεφάλαιο 2-Μοντέλα Διάδοσης

2.1 Μοντελοποίηση και Βαθειά Θάλασσα

Η επιφάνεια της θάλασσας, πέραν του ότι είναι αντανακλαστική, είναι επίσης ένα ηχητικό περιβάλλον, διότι, καθώς η τραχύτητα της επιφάνειας (που καθορίζεται από το ύψους του κύματος) αυξάνεται με τον άνεμο, οι απώλειες αντήχησης και οι ανακλαστικές απώλειες, οι φυσαλίδες εξασθένησης , οι αναταραχές και η παραγωγή θορύβου υψηλής συχνότητας λόγω των συνθηκών της θάλασσας, επηρεάζουν την ακουστική μετάδοση.[26]

Εάν οι κυματισμοί στην επιφάνεια της θάλασσας είναι πολύ μικροί, ουσιαστικά θεωρείται ότι είναι επίπεδη. Συμπεριφέρεται ως ελεύθερη(απελευθέρωση πίεσης), και ανταποκρίνεται ως ένας ιδανικός ανακλαστήρας.[27],[28]
Όπως με την επιφάνεια, η αλληλεπίδραση του ήχου με το υπόβαθρο επηρεάζει την διάδοση λόγω απωλειών εξαιτίας της ανάκλασης, της εξασθένησης λόγω πορώδους ιζήματος και της παραγωγής θορύβου χαμηλής συχνότητας.

Αυτά τα αποτελέσματα, ωστόσο, είναι πιο περίπλοκα για να υπολογιστούν λόγω της ποικίλης σύνθεσης του βυθού, η οποία κυμαίνεται από σκληρούς βράχους ως και μαλακή λάσπη. Επίσης παρατηρούνται απότομες αλλαγές στην πυκνότητα κα την ταχύτητα του ήχου. [6]

Το ανάγλυφο του πυθμένα μπορεί να είναι πολύ μεταβλητό, το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις εμποδίζει τη διάδοση του ήχου προκαλώντας την εμφάνιση μιας ζώνης απουσίας ήχου.

Η μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης του ήχου με το υπόβαθρο εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των τεχνικών μέσων για την εκτίμηση του γεωακουστικού προφίλ, το οποίο χαρακτηρίζεται από την αποτελεσματικότητα της διείσδυσης του ήχου σε βάθος, την ταχύτητα του, την πυκνότητα του και τους συντελεστές εξασθένησης και διάτμητικής επιβράδυνσης για καθένα από στρώματα του υποβάθρου. Αυτές οι γεωφυσικές παράμετροι μπορούν να παρατηρηθούν με ακρίβεια μέσω τεχνικών βασισμένες στις απώλειες διάδοσης που λαμβάνονται από τα ακουστικά μοντέλα διάδοσης.[26]

Μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των ωκεανών, ως τώρα, είναι η υψηλή ευαισθησία τους στη διάδοση των ακουστικών σημάτων με συχνότητες που κυμαίνονται από 20kHz έως 1Hz και οι διαφορετικοί τύποι ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, [29] που συγκεντρώνουν ένα σημαντικό ποσό πληροφοριών στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ένας άλλος λόγος για τον πρακτικό ενδιαφέρον της ακουστικής διάδοσης στον ωκεανό, είναι η απόσταση που ο ήχος μπορεί να διανύσει ταξιδεύοντας αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα.[30]

Τα υποβρύχια υδροακουστικά μοντέλα έχουν σχεδιαστεί ετσι ώστε να προσομοιώνουν με λεπτομέρεια τα χαρακτηριστικά της ακουστικής ενός κύματος, επιτρέποντας έτσι την πρόβλεψη της σχετικής συμπεριφοράς του.

Ωστόσο, ορισμένοι περιορισμοί είναι εγγενείς σε αυτά τα μοντέλα και συχνά έχουν να κάνουν με τα χαρακτηριστικά του μέσου, π.χ. διακύμανση του βάθους, ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας.

2.2 Ρηχά - Βαθειά Νερά

Ο όρος «ρηχά νερά" χρησιμοποιείται, όταν το περιβαλλοντικό μοντέλο των ωκεανών περιορίζεται από την επιφάνειά του στην κορυφή και από τον πυθμένα της θάλασσας στο κάτω μέρος. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτής της διάταξης, είναι ότι επιτρέπει τη παγίδευση της ηχητικής ενέργειας μεταξύ των δύο αυτών διεπαφών, που ευνοεί τη διάδοση του ήχου σε μεγάλες αποστάσεις. [26]

Τα υφιστάμενα κριτήρια για τον καθορισμό των περιοχών για το τι είναι «ρηχά» βασίζονται όχι μόνο στις ιδιότητες διάδοσης του ήχου στο μέσο, αλλά κυρίως στη συχνότητα της πηγής του ήχου και στις αλληλεπιδράσεις του ήχου με το υπόβαθρο, με αποτέλεσμα να συνδέεται το μήκος κύματος με τις διαστάσεις του κυματοδηγού. Επιπλέον, σύμφωνα με το υψομετρικό κριτήριο, που σχετίζεται με το βάθος, ο χαρακτηρισμός του «ρηχά» ορίζεται ως το βάθος που είναι λιγότερο από 200 μέτρα.[31]

Στην παρούσα διπλωματική μας ενδιαφέρει το βάθος του ωκεανού όπου η ταχύτητα του ήχου αυξάνει συνεχώς και κυρίως το βάθος των 5000-5200 m.
Αυτό σημαίνει πως θα μας απασχολήσουν τα «βαθειά» νερά.

2.3 Ανάλυση Μοντέλων Διάδοσης

Οι συνθήκες μοντελοποίησης της ακουστικής διάδοσης είναι ένα σημαντικό θέμα στη θαλάσσια ακουστική και υπάρχουν διάφορα μαθηματικά / αριθμητικά μοντέλα που βασίζονται σε διαφορετικές προσεγγίσεις. [6]

Καθώς ο ήχος διαδίδεται μέσω του ωκεανού, οι επιπτώσεις της εξάπλωσης και της εξασθένησης μειώνουν την έντασή του.[32] Η απώλεια διασποράς περιλαμβάνει τις σφαιρικές και τις κυλινδρικές απώλειες. Η απώλεια εξασθένησης περιλαμβάνει τις απώλειες λόγω της απορρόφησης, από διαρροή αγωγών, της σκέδασης και της διάθλασης. Οι απώλειες διάδοσης αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις επιδράσεις της απορρόφησης. Η διάδοση του ήχου επηρεάζεται έντονα από τις συνθήκες της επιφάνειας και των ορίων του πυθμένα, καθώς και από τη μεταβολή της ταχύτητας του ήχου μέσα στον ωκεανό. Η τυποποίηση των ακουστικών μοντέλων διάδοσης γενικά αρχίζουν με την τρισδιάστατη, χρονοεξαρτώμενη εξίσωση κύματος. Για τις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιείται μια απλοποιημένη, γραμμική, υπερβολική, δεύτερης τάξης, χρόνο-εξαρτώμενη μερική διαφορική εξίσωση:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \qquad (2.1)$$

Όπου $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$ είναι η Λαπλασιανή , Φ είναι η πιθανή συνάρτηση, c είναι η ταχύτητα του ήχου, και t είναι ο χρόνος.

Μεταγενέστερες απλουστεύσεις ενσωματώνουν μια αρμονική λύση (μονής-συχνότητας, συνεχούς κύματος) προκειμένου να ληφθεί η χρονοεξαρτώμενη εξίσωση Helmholtz. Συγκεκριμένα, μία αρμονική λύση για την πιθανή συνάρτηση Φ είναι:

$$\Phi = \text{¤}\ \mathrm{e}^{-i\mu t} \qquad (2.2)$$

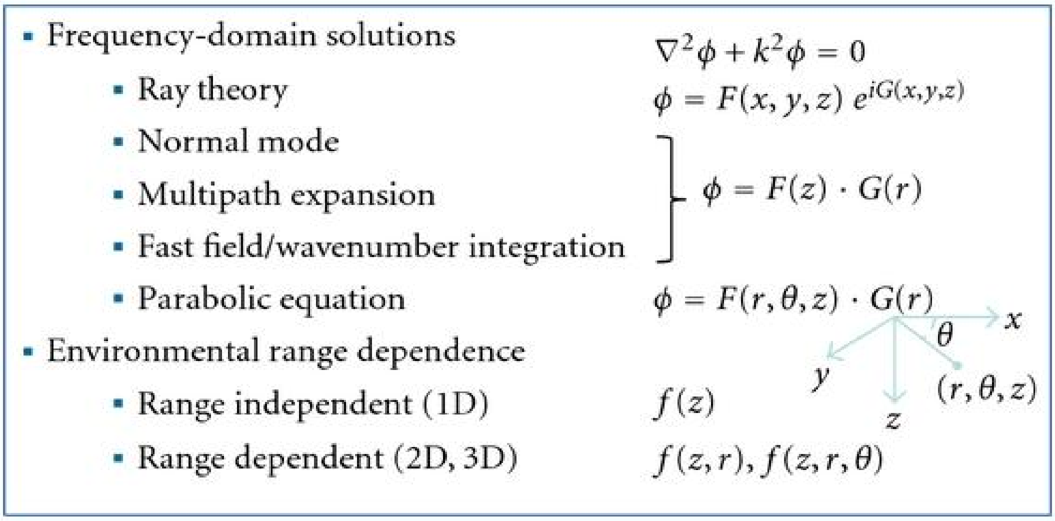
Όπου φ είναι η χρονοεξαρτώμενη συνάρτηση δυναμικού, ω είναι η συχνότητα της πηγής (2πf), και f είναι η ακουστική συχνότητα. Τότε η εξίσωση κύματος (2.1) πλησιάζει την εξίσωση Helmholtz:

$$\nabla^2 \text{¤} + k^2 \text{¤} = 0 \qquad (2.3)$$

Όπου k = (ω / c) = (2π / λ) είναι ο κυματάριθμος και λ είναι το μήκος κύματος. Η εξίσωση (2.3) αναφέρεται ως η χρόνο-ανεξάρτητη (ή στο πεδίο συχνοτήτων) εξίσωση κύματος.

Τα Μοντέλα διάδοσης είναι αναπόσπαστο μέρος της μοντελοποίησης υψηλού επιπέδου θορύβου, αντήχησης και εν τέλει απόδοσης.
Τα μοντέλα διάδοσης μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε ξεχωριστές τεχνικές[31][33] :

i. ***Ray-theoretical models*** .Τα θεωρητικά μοντέλα ακτίνων υπολογιζουν την απώλεια διάδοσης βάσει της ανίχνευσης ακτίνων.
ii. Στην υποβρύχια υδροακουστική, η θεωρία γρήγορου πεδίου(***Fast field theory)***επίσης αναφέρεται ως κυματάριθμος ολοκλήρωσης. (wave number integration). Στη σεισμολογία, η προσέγγιση αυτή συνήθως αναφέρεται ως «μέθοδος της ανακλαστικότητας» ή «μέθοδος διακριτών κυματάριθμων."
iii. ***Normal-mode solutions***.Οι λύσεις κανονικής λειτουργίας που προέρχονται από μια αναπαράσταση της εξίσωσης κύματος.
iv. ***Multipath expansion techniques.*** Οι Τεχνικές επέκτασης πολλαπλών διαδρομών επεκτείνουν το ακουστικό πεδίο από αναπαράσταση της εξίσωσης κύματος σε ένα άπειρο σύνολο ολοκληρωμάτων, καθένα από τα οποία συνδέεται με μια συγκεκριμένη οικογένεια ακτίνων-διαδρομής. Έτσι, κάθε κανονική διαδρομή μπορεί στη συνέχεια να συνδέεται με αντίστοιχες ακτίνες.
v. ***The parabolic approximation*** .Η παραβολική προσέγγιση αντικαθιστά την ελλειπτική κυματική εξίσωση με μια παραβολική εξίσωση (PE). Η χρήση της παραβολικής προσέγγισης στην επίλυση προβλημάτων κυματικής διάδοσης, μπορεί να εντοπισθεί πίσω στα μέσα της δεκαετίας του 1940, όταν εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε μεγάλες αποστάσεις ,στη τροπόσφαιρα για μετάδοση ραδιοφωνικών κυμάτων.



Εικόνα 2.1 Οργάνωση των μοντέλων διάδοσης σε πέντε ξεχωριστές τεχνικές. Μια περαιτέρω διαίρεση γίνεται σύμφωνα με ανεξάρτητη περιοχή (1D) ή εξαρτώμενη περιοχή (2D ή 3D) περιβαλλοντικών προδιαγραφών[32]

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2 , μία περαιτέρω διαίρεση μπορεί να γίνει σύμφωνα με το ανεξάρτητο φάσμα (1D, ή το βάθος εξάρτησης μόνο) ή φάσμα που εξαρτάται από περιβαλλοντικές προδιαγραφές, όπου η εξάρτηση του περιβαλλοντικού εύρους μπορεί να είναι 2D (βάθος και εύρος) ή 3D (βάθος, εύρος ζώνης και αζιμούθιο). Δεδομένου ότι και οι πέντε τεχνικές προέρχονται από την εξίσωση κύματος με τον περιορισμό λύσεων στο πεδίο των συχνοτήτων, τα προκύπτοντα μοντέλα είναι κατάλληλα για εφαρμογές ηχοεντοπιστικών συστημάτων . Κάθε μία από τις πέντε τεχνικές έχει ένα μοναδικό τομέα εφαρμογής που μπορεί να οριστεί με βάση την ακουστική συχνότητα και την πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος.
Κατά την εφαρμογή των ακουστικών μοντέλων διάδοσης, ο αναλυτής είναι συνήθως αντιμέτωπος με μια λίστα αποφάσεων που αφορούν το βάθος του νερού (βάθος σε σχέση με ρηχά), τη συχνότητα (υψηλά έναντι χαμηλών), και το φάσμα της εξάρτησης (ανεξάρτητο έναντι εξαρτώμενου φάσματος στο περιβάλλον του ωκεανού).

Οι ακόλουθες παραδοχές και προϋποθέσεις χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή της εικόνας 2.2.

(1) τα ρηχά νερά περιλαμβάνουν εκείνα τα βάθη του νερού, για τα οποία μπορεί ο ήχος να αλληλεπιδράσει σημαντικά με τον πυθμένα της θάλασσας.

(2)το όριο συχνότητα των 500 Hz είναι κάπως αυθαίρετο, αλλά δεν αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι πάνω από 500 Hz, πολλά θεωρητικά κυματικά μοντέλα χρειάζονται μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Επίσης, κάτω των 500 Hz, η φυσική ορισμένων θεωρητικών ακτινικών μοντέλων μπορεί να αμφισβητηθεί λόγω περιορισμένων περιπτώσεων.

(3) ο μαύρος κύκλος δείχνει ότι η προσέγγιση της μοντελοποίησης είναι και εφαρμόσιμη (φυσικά) και πρακτική(υπολογιστικά). Ο μισός κύκλος δείχνει ότι η προσέγγιση της μοντελοποίησης έχει κάποιους περιορισμούς στην ακρίβεια ή στην

ταχύτητα εκτέλεσης και ο ανοιχτός κύκλος δείχνει ότι η προσέγγιση μοντελοποίησης δεν εφαρμόζεται και ούτε είναι πρακτική.

Model type	Applications							
	Shallow water				Deep water			
	Low frequency		High frequency		Low frequency		High frequency	
	RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD
Ray theory	○	○	◑	●	◑	◑	●	●
Normal mode	●	◑	●	◑	●	◑	◑	○
Multipath expansion	○	○	◑	◑	◑	◑	●	◑
Fast field	●	◑	●	◑	●	◑	◑	◑
Parabolic equation	◑	●	○	○	◑	●	◑	◑

Low frequency (<500 Hz)
High frequency (>500 Hz)

RI: range-independent environment
RD: range-dependent environment

● Modeling approach is both applicable (physically) and practical (computationally)

◑ Limitations in accuracy or in speed of execution

○ Neither applicable or practical

Εικόνα 2.2 Πεδία εφαρμογής των υδροακουστικών μοντέλων διάδοσης.[32]

2.3 Α. Θεωρητικά μοντέλα ακτίνων (*Ray-theoretical models)*

Τα Θεωρητικά μοντέλα ακτίνων, μια γεωμετρική προσέγγιση, υπολογίζουν την απώλεια διάδοσης βάση της ανίχνευσης ακτίνων.[27] Η θεωρία ακτίνων ξεκινά με την εξίσωση Helmholtz. Η λύση για την φ θεωρείται ότι είναι το προϊόν μιας συνάρτησης πλάτους πίεσης A = A (x, y, z) και μιας συνάρτησης φάσης P = S (x, y, z): $\varphi = Ae^{iS}$, όπου ο εκθετικός όρος επιτρέπει ταχείες διακυμάνσεις ως συνάρτηση του εύρους και A (x, y, z) είναι μια πιο αργή μεταβλητή η οποία ενσωματώνει τις δύο γεωμετρικές εξαπλώσεις και την απώλεια του μηχανισμού. Αντικαθιστώντας τη λύση αυτή στην εξίσωση κύματος για ένα ακουστικό πεδίο γωνιακής συχνότητας ω προκύπτει:

$$\nabla^2 \text{¤}(r,z) + K^2(r,z)\text{¤}(r,z) = -\text{¢}^2(r - r_s)\text{¢}(z - z_s) \qquad (2.4)$$

όπου ο δείκτης "s" υποδηλώνει τις συντεταγμένες της πηγής. Το εύρος που είναι εξαρτώμενο από το περιβάλλον δηλώνεται ως ένας συντελεστής, $\boldsymbol{K}^2$(r, z), της μερικής διαφορικής εξίσωσης για το προφίλ της ταχύτητας του ήχου .Με το διαχωρισμό πραγματικών και φανταστικών όρους προκύπτει:

$$\frac{1}{A}\nabla^2 A - [\nabla S]^2 + K^2 = 0 \qquad (2.5)$$

και

$$2\left[\nabla A \cdot \nabla S\right] + A\nabla^2 S = 0 \qquad (2.6)$$

Η εξίσωση (2.5) περιλαμβάνει τις πραγματικές τιμές και καθορίζει τη γεωμετρία των ακτίνων. Η εξίσωση (2.6), επίσης γνωστή ως εξίσωση μεταφοράς, περιέχει τους φανταστικούς όρους και καθορίζει το εύρος του κύματος. Ο διαχωρισμός των λειτουργιών γίνεται με την παραδοχή ότι το πλάτος μεταβάλλεται πιο αργά με τη θέση από ό, τι η φάση (γεωμετρική ακουστική προσέγγιση). Η γεωμετρική ακουστική προσέγγιση είναι μια κατάσταση κατά την οποία η κλασματική μεταβολή στην κλίση της ταχύτητος του ήχου πάνω από ένα μήκος κύματος είναι μικρή σε σύγκριση με την βαθμίδα c / λ, όπου c είναι η ταχύτητα του ήχου και το λ είναι το μήκος κύματος. Συγκεκριμένα :

$$\frac{1}{A}\nabla^2 A << \mathrm{K}^2 \qquad (2.7)$$

Με άλλα λόγια, η ταχύτητα του ήχου δεν πρέπει να αλλάξει πολύ πάνω από ένα μήκος κύματος. Στο πλαίσιο αυτής της προσέγγισης, η εξίσωση (2.5) μειώνεται σε:

$$\left[\nabla S\right]^2 = K^2 \qquad (2.8)$$

Η εξίσωση (2.8) αναφέρεται ως eikonal equation. Επιφάνειες σταθερής φάσης (S = σταθερά) είναι τα μέτωπα κύματος,. Η Eikonal εξίσωση αναφέρεται στο ακουστικό μήκος της διαδρομής ως συνάρτηση των παραμέτρων διαδρομής. Αυτές οι ακτίνες αναφέρονται ως ιδιοακτίνες (Eigenrays) όταν τα τελικά σημεία είναι η πηγή και οι θέσεις του δέκτη. Διαφορικές εξισώσεις ακτίνων μπορεί στη συνέχεια να προέρχονται από την eikonal εξίσωση.

Οι ακτινικές τροχιές είναι κάθετες προς την επιφάνεια της σταθερής φάσης, S, και μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά ως εξής:

$$\frac{d}{dl}\left[k\frac{dR}{dL}\right] = \nabla K \qquad (2.9)$$

όπου L είναι το μήκος του τόξου κατά μήκος της κατεύθυνσης της ακτίνας και το R είναι το διάνυσμα μετατόπισης. Κάποιος μπορεί να ισχυριστεί ότι η κατεύθυνση της μέσης ροής (ενέργειας) προκύπτει από τις τροχιές και το πλάτος του πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο και μπορεί να ληφθεί από την πυκνότητα των ακτίνων.
Μόλις ληφθεί η S, η εξίσωση (2.6) δίνει το πλάτος. Αναφέρεται εδώ, επίσης, ότι η διόρθωση της θεωρίας ακτίνων υποθέτει πως το A μπορεί να επεκταθεί έχοντας τις ιδιότητες του αντιστρόφου της συχνότητας-ο μεγαλύτερος όρος είναι το αποτέλεσμα της άπειρης συχνότητας με τους επιπλέον όρους να είναι οι διορθώσεις συχνοτήτων.[34]

Η μέθοδος θεωρία ακτίνων είναι υπολογιστικά γρήγορη, εκτείνεται σε εξαρτώμενου εύρους προβλήματα και τα ίχνη ακτίνων δίνουν μια πολύ φυσική εικόνα των ακουστικών διαδρομών. Επίσης η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη διότι βοηθάει στην περιγραφή του πώς ο θόρυβος αναδιανέμεται όταν διαδίδεται σε μεγάλες αποστάσεις διαδρομών που περιλαμβάνουν ρηχά και βαθιά περιβάλλοντα ή/και γεωγραφικό πλάτος σε πολικές συντεταγμένες. Το μειονέκτημα της θεωρίας ακτίνων είναι ότι δεν περιλαμβάνει τη διάθλαση και τα αποτελέσματα που περιγράφουν την εξάρτηση χαμηλής συχνότητας («βαθμός παγίδευσης») των αγωγών διάδοσης.

2.3 Β .Θεωρία γρήγορου πεδίου (Fast Field Program (FFP))

Στην υποβρύχια ακουστική, η θεωρία γρήγορου πεδίου επίσης αναφέρεται ως “κυματάριθμος ολοκλήρωσης" (wave number integration).[27]Η ανεξάρτητη κυματική θεωρία λύνει την εξίσωση κύματος ακριβώς, όταν το περιβάλλον του ωκεανού δεν αλλάζει το εύρος του. Μία από τις πιθανές λύσεις είναι η αποσύνθεση του ακουστικού πεδίου ως ένα άπειρο σύνολο οριζόντιων κυμάτων,

$$\psi(r,z) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} d^2k g(k,z,z_s) e^{ik(r-r_s)} \qquad (2.10)$$

και από την εξίσωση (2.4), το βάθος εξαρτάται από τη εξίσωση Green, g (k, z, z_s), ικανοποιεί την :

$$\frac{d^2g}{dz^2} + \left(K^2(z) - k^2\right)g = -\frac{1}{2\pi}\delta(z-z_s) \qquad (2.11)$$

Υποθέτοντας ότι υπάρχει αζιμουθιακή συμμετρία, μπορούμε να ενσωματώσουμε την εξίσωση(2.10)πάνω στη γωνιακή μεταβλητή στις εξισώσεις Hankel και η ασυμπτωτική μορφή τους μειώνει την Εξίσωση (2.10) (για απλότητα, παίρνουμε r_s = 0) σε :

$$\psi(r,z) = \frac{e^{-i\pi/4}}{(2\pi r)^{1/2}}\int_{-\infty}^{\infty} dk(k)^{1/2} g(k,z,z_s) e^{ikr} \qquad (2.12)$$

Ας σημειωθεί ότι ο παράγοντας r προκύπτει από κυλινδρική διασπορά. Διακριτοποιούμε το παραπάνω ολοκλήρωμα και μετατρέπεται σε μια μορφή που επιδέχεται την τεχνική FFT θέτοντας $k_m = k_0 + m\Delta k$; $r_n = r_0 + n\Delta r$ όπου n, m = 0, 1, ..., N - 1. Υπάρχει μια πρόσθετη προϋπόθεση ΔrΔk = 2π / N .Το σχήμα διακριτοποίησης περιορίζει τη λύση για τα εξερχόμενα κύματα και εξίσωση (2.11) γίνεται

$$\psi(r_n,z) = \frac{\Delta k e^{i(k_0 r_n - \pi/4)}}{(2\pi r)^{1/2}} \sum_{m=o}^{N-1} X_m e^{2\pi i m n/N}$$

$$X_m = (k_m)^{1/2} g(k_m,z,z_s) e^{i m r_0 \Delta k} \qquad (2.13)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι τώρα εύκολο να αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT με το μεγαλύτερο μέρος της προσπάθειας να υπεισέρχεται στην αξιολόγηση της g με την επίλυση της εξίσωσης (2.11). Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος με την ένδειξη "γρήγορο πεδίο" είναι αρκετά αργή, λόγω του χρόνου που απαιτείται για τον υπολογισμό της g του, έχει πλεονεκτήματα όταν κάποιος επιθυμεί να υπολογίσει το «εγγύς πεδίο» περιοχής ή να παραλάβει διατρητικές επιδράσεις κύματος σε ελαστικά μέσα. Λόγω αυτής της τελευταίας ικανότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συστατικό διάδοσης της περιγραφής (μικρο) σεισμικού θορύβου.

Η μέθοδος FFP συχνά χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για λιγότερο ακριβείς τεχνικές. Μια τέτοια τεχνική, δεν ισχύει στο εγγύς πεδίο, αλλά για μια μεγάλη κατηγορία της σειράς ανεξάρτητων προβλημάτων μακρινού πεδίου είναι η ταχύτερη υπολογιστικά μέθοδος λειτουργίας.

2.3.Γ. Κανονικής Λειτουργίας Μοντέλο (Normal Mode Model (NM)

Οι λύσεις κανονικής λειτουργίας προέρχονται από μια αναπαράσταση της εξίσωσης κύματος.[6] Για την απόκτηση πρακτικών λύσεων, ωστόσο ,η κυλινδρική συμμετρία θεωρείται ως ένα στρωματοποιημένο μέσο (δηλαδή ,αλλαγές του περιβάλλοντος σε συνάρτηση μόνο με το βάθος).[27] Η λύση για την πιθανή συνάρτηση φ μπορεί να γραφτεί σε κυλινδρικές συντεταγμένες ως το προϊόν μιας συνάρτησης βάθους F (z) και σειρά εύρους S (R):

$$\text{¤}(z,r) = F(z)\cdot S(r) \qquad (2.14)$$

Στη συνέχεια, ο διαχωρισμός των μεταβλητών πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το $\P^2$ ως σταθερά διαχωρισμού. Οι δύο προκύπτουσες εξισώσεις είναι:

$$\frac{d^2F}{dz^2} + (k^2 - \P^2)F = 0 \qquad (2.15)$$

και

$$\frac{d^2S}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dS}{dr} + \P^2 S = 0 \qquad (2.16)$$

Η εξίσωση (2.15) είναι η εξίσωση βάθους, περισσότερο γνωστή ως εξίσωση κανονικής λειτουργίας, η οποία περιγράφει το τμήμα του στάσιμου κύματος της λύσης. Η εξίσωση (2.16) είναι η εξίσωση σειράς, η οποία περιγράφει το τμήμα του οδεύοντας κύματος της λύσης. Έτσι, κάθε κανονική λειτουργία μπορεί να θεωρηθεί ως διαδιδόμενο κύμα στην κατεύθυνση του ορίζοντα(R) και ως ένα στάσιμο κύμα στην κατεύθυνση του βάθους (z).

Η εξίσωση (2.15) της κανονικής λειτουργίας θέτει ένα πρόβλημα ιδιοτιμών. Η λύση είναι γνωστή ως συνάρτηση Green. Η εξίσωση (2.16) είναι η μηδενικής τάξης Bessel. Η λύση μπορεί να γραφτεί σε όρους της συνάρτησης Hankel μηδενικής τάξης. Η πλήρης λύση για φ μπορεί να εκφραστεί από ένα άπειρο ολοκλήρωμα, προερχόμενο από μία μονοχρωματική πηγή (μονής συχνότητας)

$$\text{¤} = \int_{-\infty}^{\infty} G(z,z_0;\P)\cdot \mathrm{H}_0^{(1)}(\P r)\cdot \P d\P \qquad (2.17)$$

όπου G είναι η συνάρτηση Green, μια συνάρτηση Hankel μηδενικής τάξης του πρώτου είδους και z_0 το βάθος της πηγή. Σημειώστε ότι η φ είναι μία συνάρτηση του βάθους πηγής (z_0) και του δέκτη (z). Για να καταλήξουμε σε αυτό που είναι γνωστό ως η λύση της κανονικής λειτουργίας με την εξίσωση κύματος, η λειτουργία της Green επεκτείνεται στην εξομάλυνση των λειτουργιών αναμονής.

Οι προσεγγίσεις της κανονικής λειτουργίας έχουν περιορισμούς σχετικά με τις ακουστικές συχνότητες κάτω από 500Hz (περίπου) που οφείλονται σε υπολογιστικές εκτιμήσεις και όχι σε τυχόν περιορισμό στην εφαρμοσμένη φυσική. Ειδικά, ο αριθμός των φάσεων που απαιτούνται για να δημιουργηθεί μια αξιόπιστη πρόβλεψη της απώλειας διάδοσης (TL) αυξάνει σε αναλογία με την ακουστική συχνότητα. Ωστόσο, ο περιορισμός των άνω συχνοτήτων στο εύρος των multi-kilohertz μπορεί να επιτευχθεί με ορισμένες υποθέσεις που αφορούν την απλούστευση της πολυπλοκότητας του περιβάλλοντος των ωκεανών.[22]

Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας Normal Modes είναι ότι, από τη στιγμή που το πρόβλημα έχει λυθεί, υπάρχει η λύση για όλες τις διαμορφώσεις του δέκτη και της πηγής και, ότι επεκτείνεται εύκολα σε μέτριες συνθήκες εξάρτησης χρησιμοποιώντας το φάσμα διαβατικής προσέγγισης.

2.3.Δ .Μοντέλα επέκτασης πολλαπλών διαδρομών (Multipath expansion models)

Στα μοντέλα επέκτασης πολλαπλών διαδρομών, χρησιμοποιείται η προσέγγιση WKB (Wentzel, Kramers και Brillouin) που μπορεί να ληφθεί ως λύση της εξίσωσης (2.15) με βάση το κανονικό μοντέλο λειτουργίας(NM).[35],[36] Στην περίπτωση αυτή, κάθε κανονική λειτουργία θα μπορούσε να εμφανίζεται ως οι αντίστοιχες ακτίνες. Ως εκ τούτου, τα μοντέλα επέκτασης πολλαπλών διαδρομών είναι ανεξάρτητα του εύρους.[31] Θεωρητικά, τα μοντέλα επέκτασης πολλαπλών διαδρομών θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως μια έκφραση της εξίσωσης κύματος, η οποία έχει ένα άπειρο σετ ολοκληρωμάτων που υποδεικνύει κάποια συγκεκριμένα ακτινικά μονοπάτια.

Σύμφωνα με ένα περιορισμένο διάστημα του πραγματικού ξ-άξονα, αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να αξιολογήσει άμεσα την άπειρη ολοκλήρωση της εξίσωσης (2.17). Ως εκ τούτου, μόνο ορισμένες λειτουργίες λαμβάνονται υπόψη. Από την άλλη πλευρά, μια περιορισμένης γωνίας πηγή μπορεί να προσομοιωθεί με τη χρήση ενός περιορισμένου αριθμού φάσεων. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμη στα βαθιά νερά σε ενδιάμεσες και υψηλές συχνότητες[37]

2.3. Ε. Μοντέλο Παραβολικής εξίσωσης (PE)

Η παραβολική μέθοδος προσέγγισης εφαρμόστηκε με επιτυχία σε κυματοδηγούς μικροκυμάτων, ακτίνα λέιζερ διάδοσης, φυσική πλάσματος, σεισμική διάδοση κυμάτων και υποβρύχια ακουστική μετάδοση.[6],[38]

Το PE προέρχεται από την παραδοχή ότι η ενέργεια διαδίδεται με ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα αναφοράς-είτε ταχύτητα διάτμησης ή συμπιεστική ταχύτητα, ανάλογα με την περίπτωση.
Η μέθοδος PE χειρίζεται τη λήψη μιας εξερχόμενης κυματικής εξίσωσης που μπορεί να λυθεί αποτελεσματικά ως ένα πρόβλημα αρχικών τιμών Αυτή η παραγοντοποίηση είναι ακριβής,όταν το περιβάλλον είναι ανεξάρτητο του εύρους. Η βασική εξίσωση για ακουστική μετάδοση μπορεί να γραφεί ως:

$$\nabla^2 ¤ + k_o^2 n^2 ¤ = 0 \qquad (2.18)$$

όπου k_o είναι ο κυματάριθμος αναφοράς (ω/c_o), ω (= 2πf) η συχνότητα της πηγής, c_o η ταχύτητα του ήχου αναφοράς, c (r, θ, z) η ταχύτητα του ήχου στο εύρος (r), αζιμουθιακή γωνία (θ) και βάθος (z), n ο δείκτης διάθλασης (C_o / c), φ το δυναμικό ταχύτητος και ∇^2 ο τελεστή Laplace. Η εξίσωση (2.14) μπορεί να γραφεί σε κυλινδρικές συντεταγμένες ως εξής:

$$\frac{\partial^2 ¤}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial ¤}{\partial r} + \frac{\partial^2 ¤}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 ¤ = 0 \qquad (2.19)$$

όπου η αζιμουθιακή σύζευξη έχει παραβλεφθεί, αλλά στο δείκτη διάθλασης παρατηρείται μια εξάρτηση από την αζιμουθιακή γωνία. Επιπλέον, υποθέτουμε μια λύση της μορφής :

$$¤ = \Psi(r,z)\cdot S(r) \qquad (2.20)$$

και καταλήγουμε:

$$\Psi\left[\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial S}{\partial r}\right] + S\left[\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{2}{S}\frac{\partial S}{\partial r}\right)\frac{\partial \Psi}{\partial r} + k_0^2 \Psi\right] = 0 \qquad (2.21)$$

Χρησιμοποιώντας το k_0^2 ως σταθερά διαχωρισμού, ξεχωρίζουμε την εξίσωση (2.21) σε δύο διαφορικές εξισώσεις, όπως ακολούθως:

$$\left[\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial S}{\partial r}\right] = -Sk_0^2 \qquad (2.22)$$

και

$$\left[\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{2}{S}\frac{\partial S}{\partial r}\right)\frac{\partial \Psi}{\partial r} + k_0^2 n^2 \Psi\right] = \Psi k_0^2 \qquad (2.23)$$

Αναδιατάσσουμε τους όρους και έχουμε:

$$\left[\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial S}{\partial r} + k_0^2 S\right] = 0 \qquad (2.24)$$

η οποία είναι η μηδενικής τάξης Bessel εξίσωση, και:

$$\left[\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{2}{S}\frac{\partial S}{\partial r}\right)\frac{\partial \Psi}{\partial r} + k_0^2 n^2 \Psi - k_0^2 \Psi\right] = 0 \quad (2.25)$$

Η λύση της εξίσωσης Bessel για τα εξερχόμενα κύματα δίδεται από την Hankel μηδενικής τάξεως συνάρτηση πρώτου είδους:

$$S = H_0^{(1)}(k_o r) \qquad (2.26)$$

Για *kor* >> 1 (προσέγγιση μακρινού πεδίου):

$$S \approx \sqrt{\frac{2}{\circledR k_0 r}}\, e^{i(k_0 r - \circledR/4)} \qquad (2.27)$$

Η εξίσωση για το Ψ (r, z) (Εξίσωση 2.24) μπορεί να απλοποιηθεί:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + 2ik_0 \frac{\partial \Psi}{\partial r} + k_0^1 (n^2 - 1)\Psi = 0 \qquad (2.28)$$

Περαιτέρω υποθέτουν ότι:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} << 2\copyright_0 \frac{\partial \Psi}{\partial r} \qquad (2.29)$$

η οποία είναι η αξονική προσέγγιση. Στη συνέχεια, η Εξίσωση (2.28) γίνεται:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + 2ik_0 \frac{\partial \Psi}{\partial r} + k_0^1 (n^2 - 1)\Psi = 0 \qquad (2.30)$$

η οποία είναι η παραβολική εξίσωση κύματος. Σε αυτή την εξίσωση, το η εξαρτάται από το βάθος (z), εύρος (R) και το αζιμούθιο (θ). Αυτή η εξίσωση μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά με διαδοχικές λύσεις, όταν το αρχικό πεδίο είναι γνωστό.

Όταν η συχνότητα είναι υψηλότερη από 500Hz (περίπου), τα μοντέλα της παραβολικής μεθόδου προσέγγισης φαίνονται μη πρακτικά λόγω του υπερβολικού χρόνου εκτέλεσης. Η υπολογιστική ένταση είναι ανάλογη με τον αριθμό των βημάτων του εύρους του διαστήματος. Το μέγεθος του βήματος μειώνεται και περισσότερα βήματα είναι αναγκαία για να επιτευχθεί το επιθυμητό εύρος πρόβλεψης όσον αυξάνει η συχνότητα.

Το πλεονέκτημα της παραβολικής υπολογιστικής προσέγγισης έγκειται στο γεγονός ότι μια παραβολική διαφορική εξίσωση μπορεί να λυθεί , στη διάσταση του εύρους, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ελλειπτική εξίσωση κύματος πρέπει να επιλυθεί αριθμητικά σε ολόκληρη την περιοχή εύρους-βάθους ταυτόχρονα. Τυπικά, ένα Γκαουσιανό πεδίο ή μια κανονικής λειτουργίας λύση χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει την αρχική.

2.4 Επιλογή Μοντέλου

Με τη βοήθεια του πίνακα της εικόνας 2.2 και γνωρίζοντας το βάθος του σημείου που μας ενδιαφέρει (5000-5200m) δύο είναι τα πιο πιθανά μοντέλα. Το θεωρητικό μοντέλο ακτίνων και το μοντέλο επέκτασης πολλαπλών διαδρομών.

Το μεν θεωρητικό μοντέλο ακτίνων για βαθειά νερά ,για χαμηλές συχνότητες, η προσέγγιση της μοντελοποίησης έχει κάποιους περιορισμούς ως προς την ακρίβεια ή την ταχύτητα εκτέλεσης τόσο για ανεξάρτητο φάσμα παραμέτρων όσο και για εξαρτώμενο φάσμα παραμέτρων. Για υψηλές συχνότητες η προσέγγιση της μοντελοποίηση είναι εφαρμόσιμη (φυσικά) και πρακτική (υπολογιστικά) τόσο για ανεξάρτητο φάσμα παραμέτρων όσο και για εξαρτώμενο φάσμα παραμέτρων.

Το δε μοντέλο επέκτασης πολλαπλών διαδρομών για βαθειά νερά ,για χαμηλές συχνότητες, η προσέγγιση της μοντελοποίησης έχει κάποιους περιορισμούς ως προς την ακρίβεια ή την ταχύτητα εκτέλεσης τόσο για ανεξάρτητο φάσμα παραμέτρων όσο και για εξαρτώμενο φάσμα παραμέτρων. Για υψηλές συχνότητες η προσέγγιση της μοντελοποίηση είναι εφαρμόσιμη (φυσικά) και πρακτική (υπολογιστικά) για ανεξάρτητο φάσμα παραμέτρων ενώ η προσέγγιση της μοντελοποίησης έχει κάποιους περιορισμούς ως προς την ακρίβεια ή την ταχύτητα εκτέλεσης για εξαρτώμενο φάσμα παραμέτρων.

Λαμβάνοντας υπόψη μας και το εύρος των συχνοτήτων στις οποίες εκπέμπει η πηγή μας (υψηλές συχνότητες) – (16-21 kHz) καταλήγουμε στην επιλογή μόνο του θεωρητικού μοντέλου ακτίνων, διότι για το μοντέλο αυτό σε υψηλές συχνότητες η προσέγγιση της μοντελοποίησης είναι εφαρμόσιμη (φυσικά) και πρακτική (υπολογιστικά) τόσο για ανεξάρτητο φάσμα παραμέτρων όσο και για εξαρτώμενο φάσμα παραμέτρων.

Κεφάλαιο 3 - Πρόγραμμα Προσομοίωσης ακουστικών ακτίνων

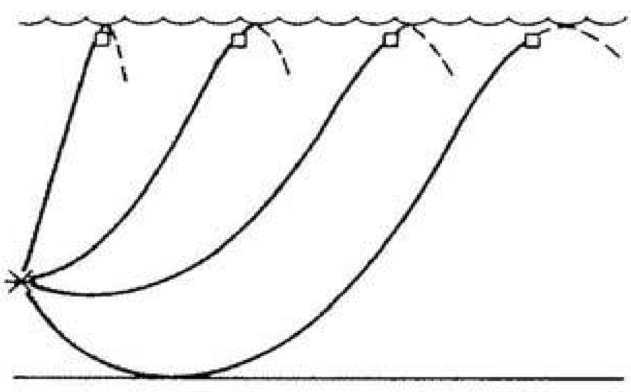
3.1 Χαρακτηριστικά Ακουστικών ακτίνων

Οι βαθείς ωκεανοί παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που ευνοούν την ακουστική επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις. Ηχητικά συστήματα modem, όπως το Seaweb, θα μπορούσαν να εκμεταλλεύονται καλά γνωστά φαινόμενα, όπως Reliable Acoustic Path (RAP) και Deep Sound Channel (DSC)[39]. Η ακουστική αμοιβαιότητα σε ένα στατικό περιβάλλον συνεπάγεται την αμφίδρομη ακουστική μετάδοση, ως εκ τούτου, οι ακουστικές ιδιότητες του καναλιού ισχύουν και για τα σήματα που μεταδίδονται αλλά και γι αυτά που λαμβάνονται.

3.1.Α. Αξιόπιστο Ηχητικό Μονοπάτι - Reliable Acoustic Path (RAP)

Ο ήχος που ταξιδεύει στον βαθύ ωκεανό μπορεί να ληφθεί μέσω διαφόρων διαδρομών διάδοσης (όπως άμεση διαδρομή, αναπήδηση στον πυθμένα, αγωγοί επιφάνειας, κ.λπ.) ανάλογα με το περιβάλλον και το βάθος της πηγής / δέκτη. Αυτές οι πολλαπλών διαδρομών αφίξεις είναι «μια συνήθης εμφάνιση στην διάδοση μεγάλου βεληνεκούς»[40] Αν και η συσσώρευση των διαφορετικών διαδρομών άφιξης μπορεί να προκαλέσει την επιδείνωση του λαμβανόμενου σήματος, "συχνά ένα μονοπάτι θα είναι κυρίαρχο και η απώλεια μετάδοσης που αντιστοιχεί σε αυτό θα είναι ελάχιστη σε σύγκριση με άλλες πιθανές διαδρομές ". Ένα τέτοιο κυρίαρχο μονοπάτι είναι το Reliable Acoustic Path (RAP).

Το φαινόμενο RAP συμβαίνει όταν μια πηγή τοποθετείται σε ένα μεγαλύτερο βάθος από ό, τι ο δέκτης στη βαθειά θάλασσα. Κάποιες πιθανές RAP φαίνονται στην Εικόνα 3.1.Το RAP δεν είναι ευαίσθητο ... ούτε στις αλλαγές κοντά στην επιφάνεια, ούτε στις διάφορες απώλειες λόγω αντανάκλασης που χαρακτηρίζουν την διάδοση εξαιτίας της αναπήδησης στο βυθό. Δεν υφίσταται διασπορά των ζημιών που συνδέονται με τις παρεμβολές στην επιφάνεια ή τις ζημίες που προκαλούνται από την αντανάκλαση στο βυθό και απορρόφηση από αυτόν. Οι απώλειες κατά τη διάδοση ενός RAP είναι σχετικά χαμηλές σε σύγκριση με άλλα μονοπάτια.

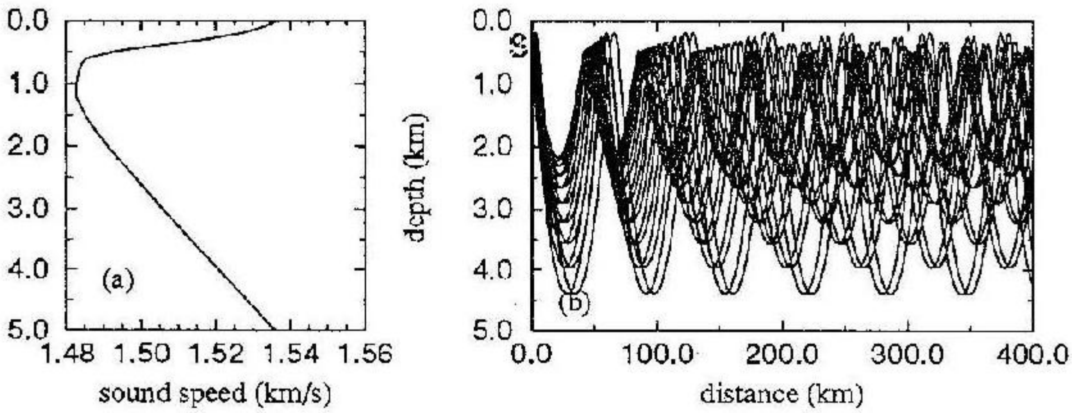


Εικόνα 3.1 Ένα «Reliable acoustic paths» από μια βαθειά πηγή σε ένα ρηχό δέκτη στην βαθειά θάλασσα.

Τα χαρακτηριστικά RAP επιτρέπουν σε μια συσκευή πυθμένα τοποθετημένη κοντά ή στον πυθμένα (όπως ένα ακουστικό μόντεμ) την αποστολή με συνέπεια ισχυρών σημάτων σε ένα δέκτη κοντά στην επιφάνεια. Εξαιτίας της ακουστικής αμοιβαιότητας, ένας ακουστικός αισθητήρας στο ή κοντά στο πυθμένα θα μπορούσε επίσης να ανιχνεύσει αντικείμενα κοντά στην επιφάνεια.

3.1.B. Βαθύ Κανάλι Ήχου -Deep Sound Channel (DSC)

Το Βαθύ Κανάλι Ήχου (Deep Sound Channel ή DSC) προκαλείται από την μετατόπιση της κλίσης της ταχύτητας του ήχου από την επιφάνεια έως τον πυθμένα του ωκεανού. Οι θερμοκρασίες του νερού είναι υψηλότερες κοντά στην επιφάνεια, γεγονός το οποίο προκαλεί την αύξηση της ταχύτητας του ήχου. Καθώς αυξάνεται το βάθος, η θερμοκρασία μειώνεται, προκαλώντας μείωση στην ταχύτητα του ήχου. Σε κάποια ελάχιστη ταχύτητα, η κλίση της ταχύτητα του ήχου πηγαίνει από αρνητικό σε θετικό. Σε αυτά τα βάθη, η θερμοκρασία είναι ισοθερμική και οι επιπτώσεις της αύξησης της υδροστατικής πίεσης γίνεται η κυρίαρχη επιρροή στην ταχύτητα του ήχου, με αποτέλεσμα να αυξάνεται με το βάθος.[41] Το βάθος στο οποίο η ταχύτητα είναι η ελάχιστη ονομάζεται άξονας DSC "προς τον οποίο οι ακτίνες του ήχου συνεχώς κάμπτονται λόγω διάθλασης". Η αλλαγή στις κλίσεις δημιουργεί έναν αγωγό όπου οι ακτίνες ήχου διαθλώνται πίσω και εμπρός μεταξύ του άξονα στα άνω και κάτω όρια (εικόνα 3.2) με χαμηλές απώλειες διάδοσης.



Εικόνα 3.2. (α) Προφίλ της ταχύτητας του ήχου στη Βαθειά θάλασσα,
(b) ακτινικά ίχνη (ray trace) στο DSC, με πηγή στα 500 m[42]

Το DSC εμφανίζεται όταν το προφίλ της ταχύτητας του ήχου έχει το χαρακτηριστικό σχήμα για βαθειά νερά.

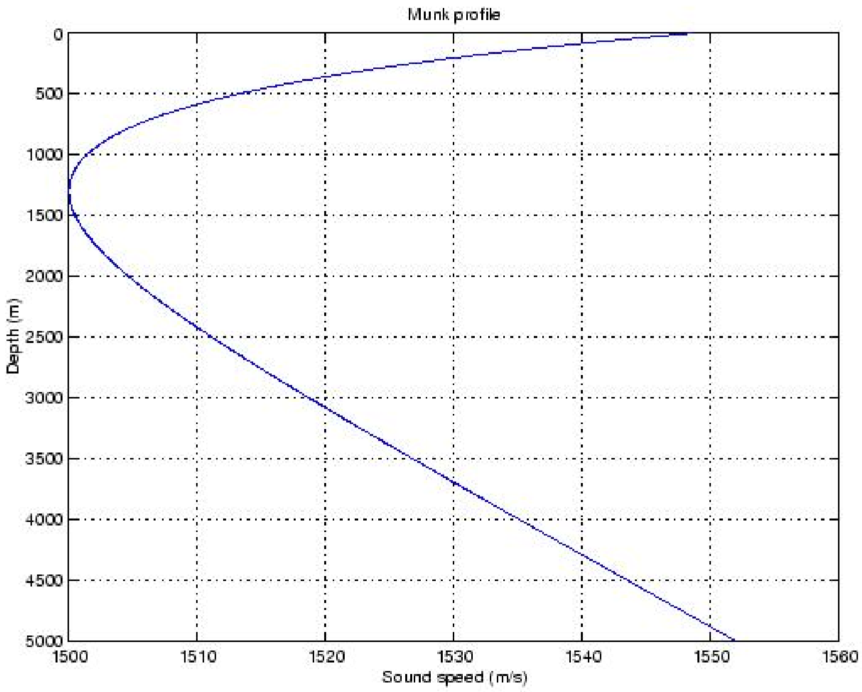
Το προφίλ Munk είναι ένα εξιδανικευμένο προφίλ ήχου-ταχύτητας (εικόνα 3.3) του ωκεανού που βασίζεται στην εξάρτηση από το βάθος και μας επιτρέπει να απεικονίσουν με πολλά χαρακτηριστικά που είναι τυπικά στη διάδοση στα βαθειά ύδατα. Στη γενική του μορφή, το προφίλ δίνεται από τον τύπο :

$$c(z) = c_1\left[1 + \varepsilon(\eta + e^{-\eta} - 1\right] \qquad (3.1)$$

$$\eta = \frac{2(z - z_1)}{B}\ , \ \varepsilon = \frac{B\gamma_A}{2} \qquad (3.2)$$

όπου c(z) είναι η ταχύτητα του ήχου ως συνάρτηση του βάθους, c_1 η ταχύτητα του ήχου στο άξονα του καναλιού (z_1), η η αδιάστατη απόσταση κάτω από τον άξονα του καναλιού, B η κλίμακα βάθους, ε ο συντελεστή διαταραχής και γ_A η κλίση του ήχου ταχύτητας για αδιαβατικό ωκεανό.

Ο Munk (1974) χρησιμοποίησε τις ακόλουθες τυπικές τιμές:
c_1 = 1,492ms^{-1}, B = 1.3km, z_1 = 1.3km, γ_A = 1.14 × 10^{-2} km^{-1} και ε = 7.4 × 10^{-3}.



Εικόνα 3.3. Το Προφίλ ήχου-ταχύτητας Munk , για βαθειά νερά[43],[50]

3.2 Πρόγραμμα Προσομοίωσης

Η μηχανική των ωκεανών και η έρευνα καλύπτει μια ευρεία περιοχή εφαρμογών που κυμαίνονται από αξιόπιστες ακουστικές επικοινωνίες, σε αποτύπωση βυθού και παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Το τελευταίο πεδίο της έρευνας γίνεται ολοένα και μεγαλύτερης σημασίας στο πλαίσιο των οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης για να διασφαλίσει ότι οι υποβρύχιοι θόρυβοι είναι σε επίπεδα που δεν επηρεάζουν δυσμενώς το θαλάσσιο περιβάλλον.[44]

Οι εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης και πρόβλεψης κυμαίνονται από την πρόβλεψη των επιπέδων θορύβου στην υδατοκαλλιέργεια και τη ναυτιλία έως και τις μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την κατασκευή και λειτουργία των υπεράκτιων αιολικών πάρκων.[8] Με την αυξανόμενη πολυπλοκότητα και το εύρος των πιθανών εφαρμογών, οι υπολογιστικές απαιτήσεις έχουν αυξηθεί σταθερά κατά τη διάρκεια των δεκαετιών.

Η ακτινική ανίχνευση(Ray tracing) είναι μια αποτελεσματική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της ακουστικής μετάδοσης υψηλών συχνοτήτων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε αυτόν τον τομέα παρουσιάζει το μοντέλο c-Traceo Gaussian beam , ένα μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Επεξεργασίας Σήματος του Πανεπιστημίου του Algarve1(Signal Processing Laboratory of the University of the Algarve1). Το cTraceo μπορεί να παρέχει προβλέψεις για την ακουστική πίεση και την ταχύτητα των σωματιδίων σε κυματοδηγούς με πολύπλοκα όρια παρουσιάζοντας ένα εξαρτώμενο φάσμα από συμπιεστικές και διατμητικές ιδιότητες. Η οπισθοσκέδαση και τα πολλαπλά αντικείμενα, επίσης, υποστηρίζονται.

3.2.Α. Περιγραφή Μοντέλου

Εδώ περιγράφεται το μοντέλο ακτινικής ανίχνευσης TRACEO Fortran-77, εφεξής καλούμενο cTraceo.[45] Όντας χαρακτηριστικά ταυτόσημο της εφαρμογής Fortran, η ανάπτυξη του cTraceo είχε ως κίνητρο την ανάγκη να προσεγγίσει το βασικό κώδικα από την άποψη της μηχανικής του λογισμικού και να επικεντρωθεί σε υψηλότερες επιδόσεις.

Το μοντέλο cTraceo είναι ένα δισδιάστατο πρότυπο ακτινικής ανίχνευσης που μπορεί να χειριστεί ακανόνιστες επιφάνειες και πολύπλοκες βαθυμετρίες με εξαρτώμενου εύρους ιδιότητες (συμπεριλαμβανομένων τόσο τις συμπιεστικές και τις διατμητικές ταχύτητες όσο και τις εξασθενήσεις),και την προαιρετική ένταξη των αντικειμένων στον κυματοδηγό.[43] Ένα σετ αναλυτικών προφίλ ταχύτητας ήχου, καθώς, τόσο το προφίλ ανεξάρτητου εύρους όσο και του εξαρτώμενου εύρους πεδίων ταχύτητας ήχου, υποστηρίζονται. Οι επιλογές εξόδου αποτελεσμάτων περιλαμβάνουν ακτινικά μονοπάτια(ray paths) και πλάτη(amplitudes), αναζήτηση ιδιοακτίνων(eigenray search), πρότυπα άφιξης(arrival patterns), ακουστική πίεση, συνεκτική απώλεια μετάδοσης(coherent transmission loss), και συνιστώσες της ταχύτητας των σωματιδίων.

Η τρέχουσα έκδοση του μοντέλου αντικαθιστά τα παλαιότερα μοντέλα γνωστά ως TRACE (ένα στάνταρ πρότυπο ακτινικής διάδοσης μοντέλο) και TRACEO (μια προσαρμογή του TRACE, η οποία επέτρεψε να εξετάσει την παρουσία ενός μόνο αντικειμένου, το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στην ακουστική πηγή και τη συστοιχία δεκτών). Δεν είναι μόνο ότι τα TRACE και TRACEO συγχωνεύθηκαν σε αυτό που είναι τώρα το cTRACEO, ο αρχικός κώδικας ξαναγράφτηκε προσεκτικά, ώστε να επιτραπεί η προαιρετική αναγραφή ενός ή περισσοτέρων αντικειμένων, να επιτρέπει στα άνω και κάτω όρια να παρουσιάζουν ιδιότητες εξαρτώμενου εύρους (συμπεριλαμβανομένων συμπιεστικών και διατμητικών ταχυτήτων και εξασθενήσεις), να επιτρέπει υπολογισμούς ιδιοακτίνων στις θέσεις που καθορίζονται

από τις συντεταγμένες, και τη παραγωγή αποτελεσμάτων (ακτίνες, αφίξεις, πλάτη, ακουστική πίεση και ταχύτητα των σωματιδίων), ως Matlab (.mat) αρχεία.
Το cTRACEO μπορεί να χειριστεί ένα συγκεκριμένο σύνολο αναλυτικών προφίλ της ταχύτητας του ήχου, ή γενικότερα πεδία ταχύτητας ήχου.[46] Η συστοιχία δεκτών μπορεί να είναι οριζόντια, κατακόρυφη, ορθογώνια, ή μπορεί να έχει ένα αυθαίρετο καμπυλόγραμμο σχήμα(τα υδρόφωνα δεν απαιτείται να είναι σε ίση απόσταση). Οι ακτίνες μπορούν να είναι μερικώς ή εντελώς αντανακλώμενες σε κάθε όριο του κυματοδηγού, ή να απορροφούνται τελείως. Το cTRACEO αναπτύχθηκε προκειμένου να μοντελοποιήσει την ακουστική μετάδοση σε περιβάλλοντα, όπου τα υπάρχοντα μοντέλα δεν ήταν σε θέση να χειριστούν (όπως κυματοειδείς επιφάνειες, πολύπλοκες βαθυμετρίες, το βάθος και το εύρος των διακυμάνσεων της ταχύτητας του ήχου, κ.λπ.), καθώς και για εφαρμογές στους τομείς της γεωακουστικής, υποβρύχιες επικοινωνίες και ακουστικά εμπόδια.

Το cTRACEO επωφελήθηκε σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα του ανίχνευσης ακτίνων Bellhop.[47],[48],[49]. Το cTRACEO δανείζεται πολλές μεθόδους από το Bellhop, αλλά πηγαίνει πέρα από τις δυνατότητες του Bellhop, επιτρέποντας τους υπολογισμούς στις ακόλουθες περιπτώσεις:

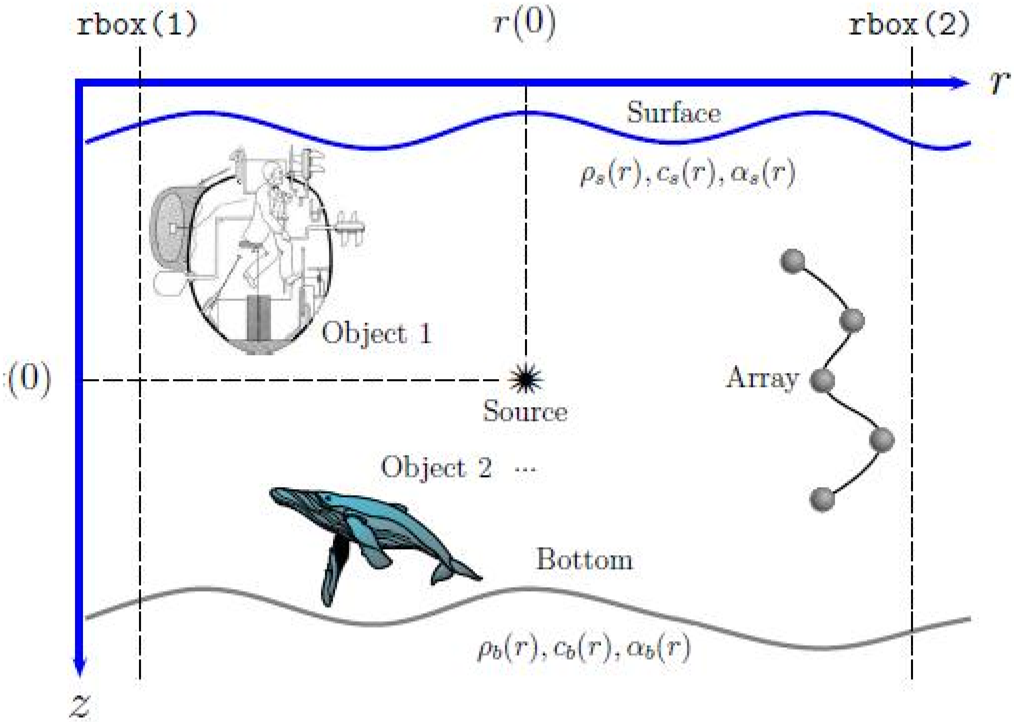
- Όταν χρησιμοποιείται ένα σύνολο αναλυτικών προφίλ
- Όταν τοποθετούνται στόχοι μεταξύ της πηγής και της ακολουθίας των δεκτών
- Όταν λαμβάνονται υπόψη τα όρια με ιδιότητες εξαρτώμενου εύρους (οι οποίες ευθύνονται επίσης για την ταχύτητα διάτμησης και εξασθένησης)
- Όταν εξετάζονται τα όρια, τα οποία εκτός του ότι είναι εν μέρει ή πλήρως αντανακλαστικά μπορεί να είναι εντελώς απορροφητικά.

3.2.Β. Γενική στρατηγική υπολογισμών

Η εικόνα 3.4 παρέχει μια γενική άποψη του κυματοδηγού που χειρίζεται το cTRACEO.[45] Η πηγή μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε μέσα σε ένα εύρος\κουτί (εφεξής αποκαλούμενο rbox), και η ανίχνευση ακτίνων τερματίζεται κάθε φορά που μια ακτίνα βγαίνει από το κουτί. Τοποθετώντας την πηγή σε οποιαδήποτε από τις περιοχές στο rbox αποτρέπει τυχόν υπολογισμούς που εκτελούνται. Για λόγους αριθμητικής σταθερότητας συνιστάται (αλλά δεν απαιτείται) ότι τόσο οι επιφανειακές όσο και οι συντεταγμένες του βυθού ορίζονται πέρα από το εύρος του rbox.

Οι γωνίες εκτόξευσης μπορούν να οριστούν δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα, όπως είναι επιθυμητό, αλλά γωνίες εκτόξευσης πολύ κοντά στο 90° (που ανιχνεύονται από την υπόθεση $\cos(\theta)<\varepsilon$) παραλείπονται. Επιπλέον, το cTRACEO χρησιμοποιεί τη σύμβαση που δηλώνει ότι οι ακτίνες προς την επιφάνεια έχουν μια θετική γωνία εκτόξευσης, ενώ οι αρνητικές γωνίες έναρξης δείχνουν διάδοση των ακτίνων προς τα κάτω. Ανάλογα με τον συντελεστή ανάκλασης R κάθε σύνορο κυματοδηγού (συμπεριλαμβανομένων των αντικειμένων) μπορεί να είναι ένα από τέσσερα διαφορετικά είδη, δηλαδή απορροφητικό ($R = 0$), άκαμπτο ($R = 1$), κενό ($R = -1$) ή ελαστικό.

Οι ακτίνες που φθάνουν σε ένα απορροφητικό όριο δεν είναι πλέον εντοπίσιμες. Μια άλλη προϋπόθεση για τον τερματισμό των ακτίνων είναι ότι η συστοιχία μπορεί να είναι οριζόντια, κατακόρυφη, ορθογώνια ή γραμμική.



Εικόνα 3.4 Γενική άποψη του κυματοδηγού του cTRACEO[45]

Η γενική στρατηγική των υπολογισμών μπορεί να συνοψισθεί ως εξής:

- Για κάθε γωνία έναρξης εντοπίζεται η ακτίνα, μέχρι να τερματιστεί ή να εξέλθει από το rbox.
- Σε κάθε βήμα της ακτίνας ελέγχεται εάν η ακτίνα είναι πάνω από την επιφάνεια, κάτω από τον πυθμένα ή μέσα σε ένα αντικείμενο. Για ένα θετικό έλεγχο προσδιορίζεται το σημείο τομής της ακτίνας με το όριο.
- Μετά την έξοδο από το rbox υπολογίζονται οι (p, q) παράμετροι και το πλάτος της ακτίνας.
- Χρησιμοποιούνται οι συντεταγμένες X και τα πλάτη για τον υπολογισμό της εξόδου που ζητήθηκε από το χρήστη.

3.2.C. Οι παράμετροι εισόδου

Η γενική δομή των παραμέτρων εισόδου μπορεί να γίνουν καλύτερα κατανοητοί αν αναλογιστεί κανείς ότι το αρχείο που χρησιμοποιείται αποτελείται από κομμάτια ,κάθε κομμάτι περιγράφει ένα συγκεκριμένο στοιχείο του κυματοδηγού, από πάνω προς τα κάτω.[45] Τα κομμάτια-παράμετροι από τους οποίους αποτελείται το αρχείο είναι η παράμετρος της πηγής(Source Block) ,η παράμετρος της υψομετρίας (Altimetry Block), η παράμετρος της ταχύτητας του ήχου(Sound Speed Block) ,η παράμετρος του αντικειμένου(Objects Block), η παράμετρος της βαθυμετρίας (Bathymetry Block),η παράμετρος της συστοιχίας (Array Block),η παράμετρος της εξόδου-αποτελέσματος(Output Block).

1. Παράμετρος Πηγής- (Source Block)

Η παράμετρος της πηγή του χρησιμοποιούμενου αρχείου περιγράφει τα χαρακτηριστικά της ακουστικής πηγής ως εξής:

- βήμα ακτίνων ray step [m]
- συντεταγμένες πηγής source coordinates [m]
- εύρος range box [m]
- συχνότητα πηγής source frequency [Hz]
- αριθμός γωνιών εκτόξευσης number of launching angles
- αρχική και τελική γωνία εκτόξευσης first and last launching angles [degree]

Προαιρετικά, ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει το ds στο μηδέν, πράγμα που οδηγεί το cTraceo, χρησιμοποιώντας τις κλίμακες του rbox, να επιλέγει αυτόματα ένα μέγεθος βήματος.

2. Παράμετρος Υψομετρίας – (Altimetry Block)

Η παράμετρος της υψομετρία περιέχει την περιγραφή της άνω διεπαφής. Οι πέντε πρώτες γραμμές της παράμετρος υψομετρίας καθορίζουν διάφορα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, ενώ οι υπόλοιπες γραμμές περιέχουν τις συντεταγμένες της διεπαφής και των ελαστικών ιδιοτήτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι:

- τύπος διεπαφής (interface type)
  καθορίζει τον τύπο διεπαφής και μπορεί να είναι ένας από τους ακόλουθους χαρακτήρες: διεπαφή απορρόφησης(absorbent interface),ελαστική διεπαφή (elastic interface), άκαμπτη διεπαφή(rigid interface), κενό πέρα από τη διεπαφή(vacuum beyond interface)
- τύπος ιδιοτήτων (interface properties)
  προσδιορίζει αν οι ιδιότητές της διεπαφής είναι ομοιογενής ή όχι, και μπορεί να είναι έναν από τους ακόλουθους χαρακτήρες: ομογενής διεπαφή (homogeneous interface),ανομοιογενής διεπαφή(non-homogeneous interface)
- τύπος παρεμβολής(interpolation type)
  καθορίζει τον τύπο της παρεμβολής που θα χρησιμοποιηθεί και μπορεί να

είναι ένας από τα ακόλουθες συμβολοσειρές : επίπεδη επιφάνεια (flat interface), επίπεδη επιφάνεια με κλίση (flat interface with a slope, τμηματική γραμμική παρεμβολή (piecewise linear interpolation), τμηματική κυβική παρεμβολή (piecewise cubic interpolation),

- μονάδες εξασθένηση(attenuation units)

- αριθμός των συντεταγμένων της διεπαφής (number of interface coordinates) δείχνει τον αριθμό των συντεταγμένων της διεπαφής για να διαβαστεί από τις μεταγενέστερες γραμμές.

3.Παράμετρος ταχύτητας ήχου – (Sound Speed Block)

Η παράμετρος της ταχύτητας του ήχου περιέχει τον ορισμό των ιδιοτήτων της ταχύτητας του ήχου, όπως φαίνεται παρακάτω:

- είδος κατανομής της ταχύτητας του ήχου(type of sound speed distribution)
- κατηγορία ταχύτητα του ήχου(class of sound speed)
- αριθμός ή σημεία στο φάσμα, αριθμός σημείων στο βάθος(number or points in range , number of point s in depth)

4.Παράμετρος αντικειμένων – (Object Block)

Η παράμετρος αντικειμένων ξεκινά με μια γραμμή που περιέχει τον αριθμό των αντικειμένων που υπάρχουν στο κυματοδηγό(nobj)
Εάν το nobj = 0, δεν υπάρχουν αντικείμενα που ορίζονται και το υπόλοιπο του μπλοκ είναι άδειο. Όλες οι υπόλοιπες γραμμές απαιτούνται μόνο για nobj> 0.
Όταν τα αντικείμενα είναι παρόντες, η επόμενη γραμμή διευκρινίζει τη μέθοδο της παρεμβολής που πρέπει να εφαρμοστεί στα όρια όλων των αντικειμένων (oitype).
Οι επιτρεπόμενες τιμές των oitype είναι «2P’ ή ’4P» -δεν επιτρέπονται αλλά είδη.
Στη συνέχεια, κάθε αντικείμενο πρέπει να προσδιορίζεται μέσω μιας δομής, όπου οι πρώτες τέσσερις γραμμές προσδιορίζουν τις ιδιότητες του αντικειμένου, και οι ακόλουθες γραμμές περιγράφουν το σχήμα του αντικειμένου.

5.Παράμετρος Βαθυμετρίας – (Bathymetry Block)

Η παράμετρος βαθυμετρία έχει την ίδια δομή με την παράμετρο υψομετρίας.

6.Παράμετρος συστοιχίας – (Array Block)

Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει τις προδιαγραφές για την σειρά του δέκτη και αποτελείται από τις ακόλουθες τέσσερις επιλογές:

- τύπου συστοιχίας (array type)

- αριθμός των στοιχείων σε έκταση και το βάθος(type number of elements in range and depth)
- εύρος υδροφώνων (hydrophone ranges)
- βάθη υδροφώνων (hydrophone depths)

7.Παράμετρος – (Output Block)

Η παράμετρος εξόδου είναι η τελευταία παράμετρος του χρησιμοποιήσιμου αρχείου και καθορίζει ποια έξοδο το μοντέλο πρέπει να παράγει και να μπορεί να γραφτεί στο αρχείο εξόδου. Η παράμετρος εξόδου έχει την ακόλουθη δομή:

- τύπος εξόδου(output type)
- παράμετρος ιδιοακτίνας(eigenray parameter)

Η παράμετρος miss χρησιμοποιείται ως όριο για την εύρεση των ιδιοακτίνων και για τον υπολογισμό των αφίξεων. Καθορίζει την απόσταση σε μέτρα, κατά την οποία μια ακτίνα που διέρχεται ενός υδροφώνου θεωρείτε ως ιδιοακτίνα.

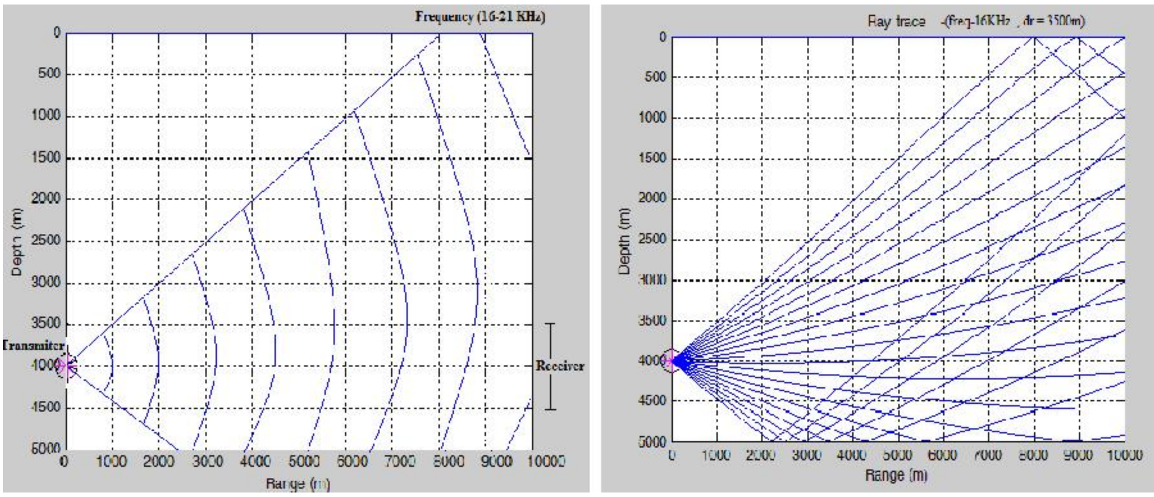
3.2.D Τα αποτελέσματα του προσομοιωτή

Μετά τη δημιουργία του αρχείου εισόδου, ο χρήστης μπορεί να τρέξει το μοντέλο, σύμφωνα με την επιθυμητή έξοδο. Το μοντέλο μπορεί να δημιουργήσει ποικιλία αποτελεσμάτων αρχείων Matlab.[45] Αλλά για την παραγωγή των αποτελεσμάτων που μας ενδιαφέρουν στην παρούσα φάση χρησιμοποιούμαι :

1. ακτίνες ή ιδιοακτίνες (ray or eigenray information)
2. ιδιοακτίνες υπολογισμένες με τη μέθοδο Regular Falsi(eigenrays by regular falsi method)
3. Απώλεια διάδοσης (transmission loss)

Κεφάλαιο 4 – Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που παρήχθησαν με τη χρήση των προγραμμάτων του c-Traceo [46].



(a) (b)

Εικόνα 4.1 (α)Διάταξη μετρήσεων ,(b) ανίχνευση ακτίνων

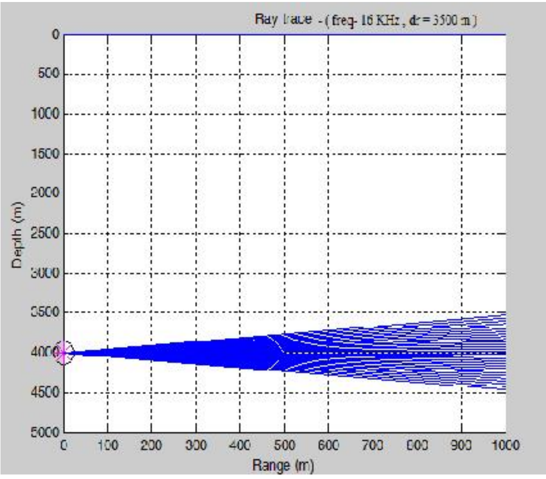
Σε όλες τις παρακάτω γραφικές ,όπως εμφανίζεται και στην εικόνα 4.1-(a), το βάθος του πυθμένα είναι 5000m, το βάθος της πηγής είναι 4000 m με σταθερή γωνία 50 μοιρών (25° & 25°), ο αριθμός των σχεδιασμένων ακτίνων (modeled rays) είναι 100.Η συχνότητα κυμαίνεται μεταξύ (16 – 21) KHz , το βάθος του δέκτη μεταξύ (3500-4500) m και η απόσταση του δέκτη από την πηγή (εύρος) μεταξύ (1-10) km.
Στην εικόνα 4.1 –(b) βλέπουμε τη διάδοση τον ακτίνων. Οι ακτίνες αυτές είναι ουσιαστικά τα κάθετα διανύσματα τον σφαιρικών κυμάτων διάδοσης. Είναι κάθετες ευθείες γραμμές ως προς τα μέτωπα του κύματος.

4.1 Ανίχνευση ακτίνων (Ray-Trace)

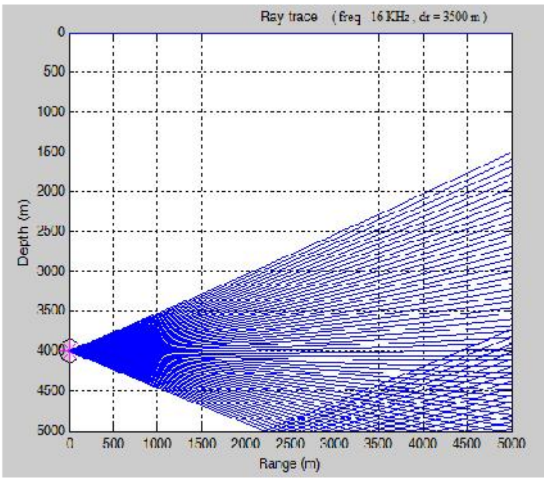
Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζουμε τα διαγράμματα της ανίχνευσης ακτίνων που θα δούμε παρακάτω

Βάθος	Συχνότητα (KHz)					
Δέκτη	16	17	18	19	20	21
3500	4.2	4.7	4.12	4.17	4.22	4.27
3800	4.3	4.8	4.13	4.18	4.23	4.28
4000	4.4	4.9	4.14	4.19	4.24	4.29
4300	4.5	4.10	4.15	4.20	4.25	4.30
4500	4.6	4.11	4.16	4.21	4.26	4.31

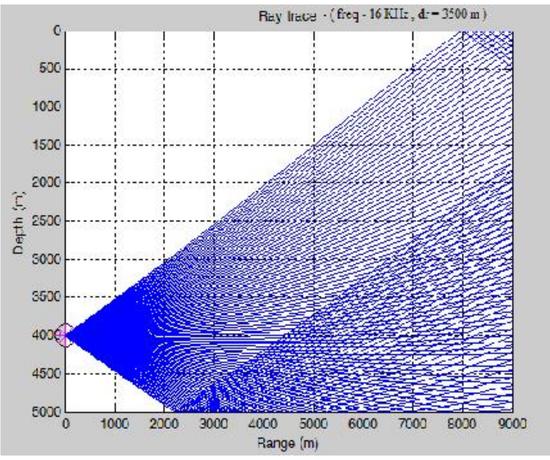
Πίνακας 4.1 Διαγράμματα Ανίχνευση ακτίνων



(a)

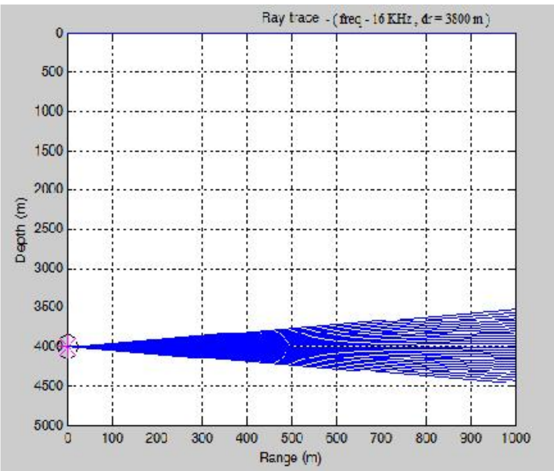


(b)

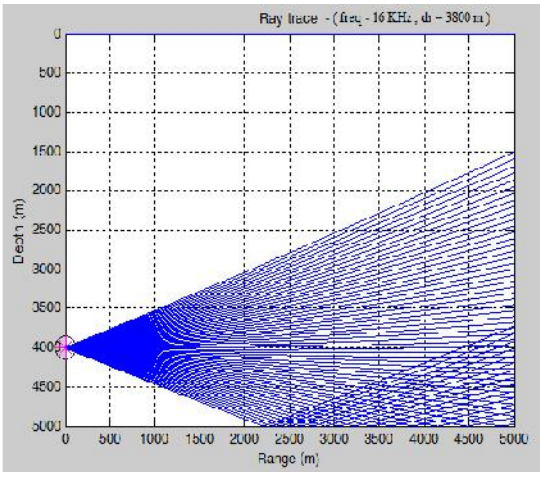


(c)

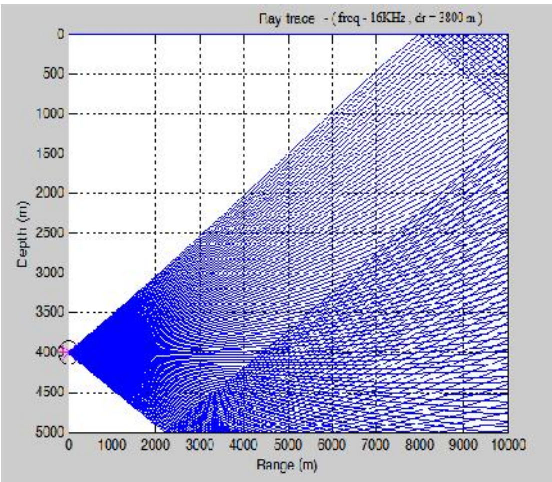
Εικόνα 4.2 Ray trace- Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών,(a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) 10000 m



(a)

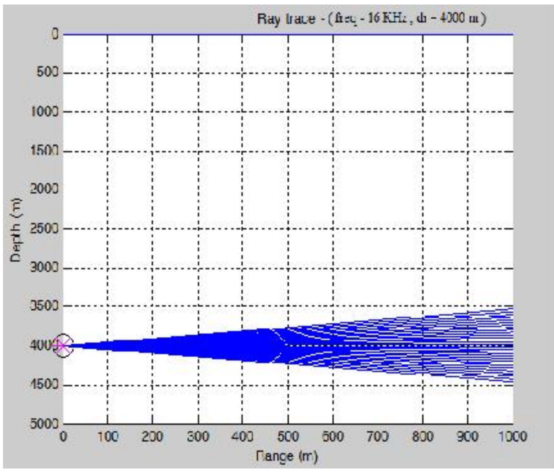


(b)

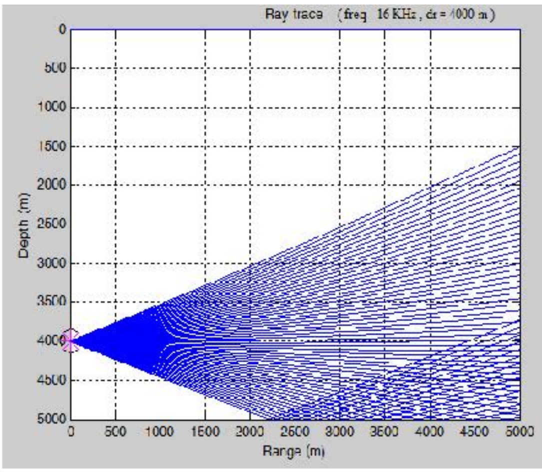


(c)

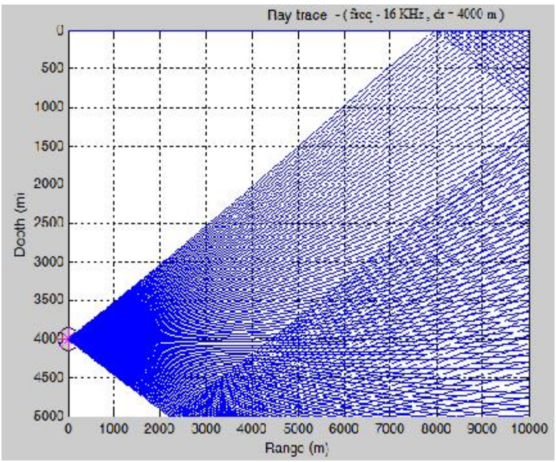
Εικόνα 4.3 Ray trace- Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

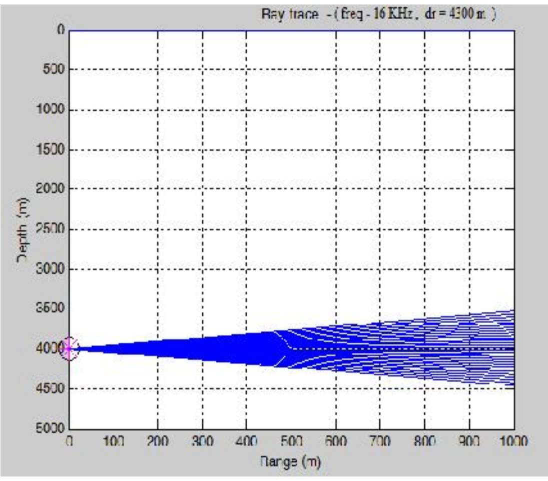


(b)

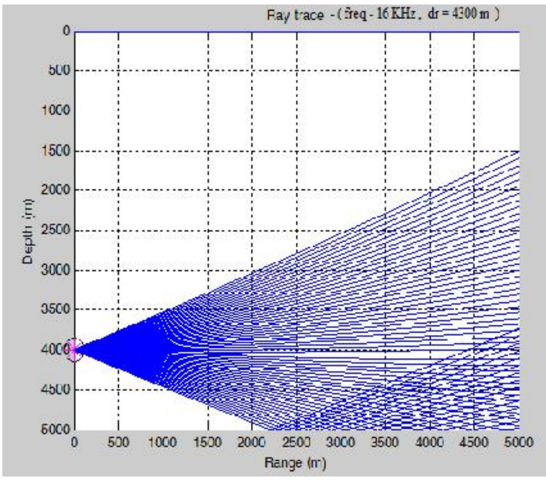


(c)

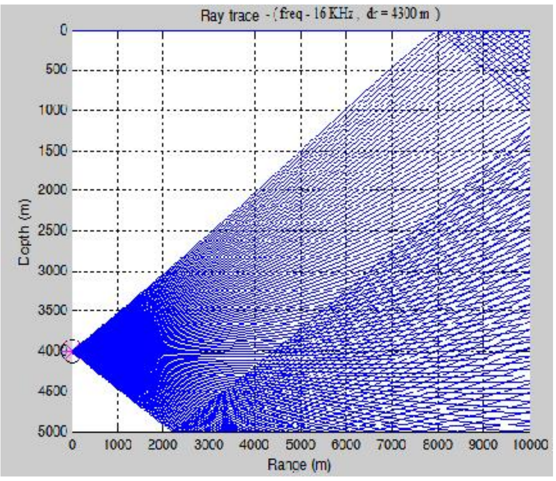
Εικόνα 4.4 Ray trace- Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

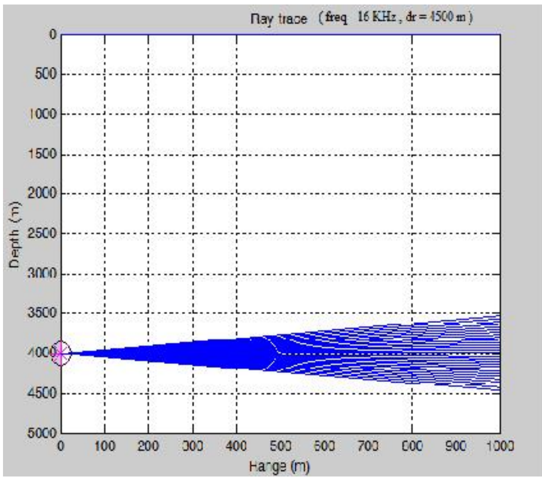


(b)

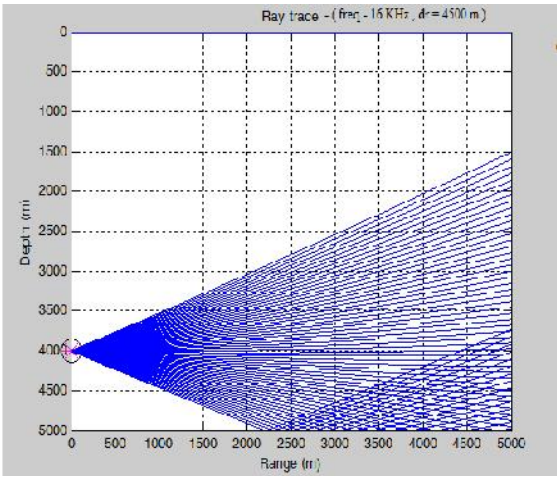


(c)

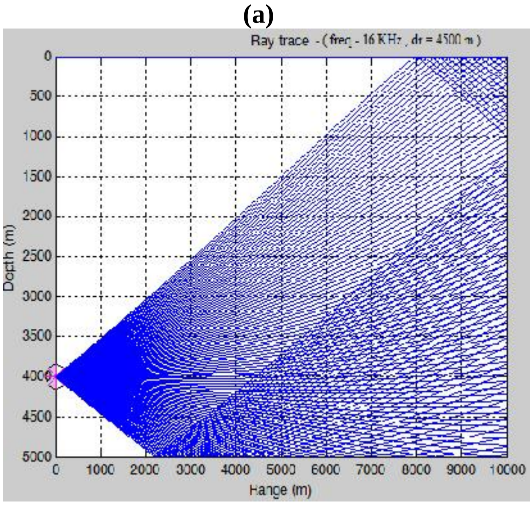
Εικόνα 4.5 Ray trace- Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

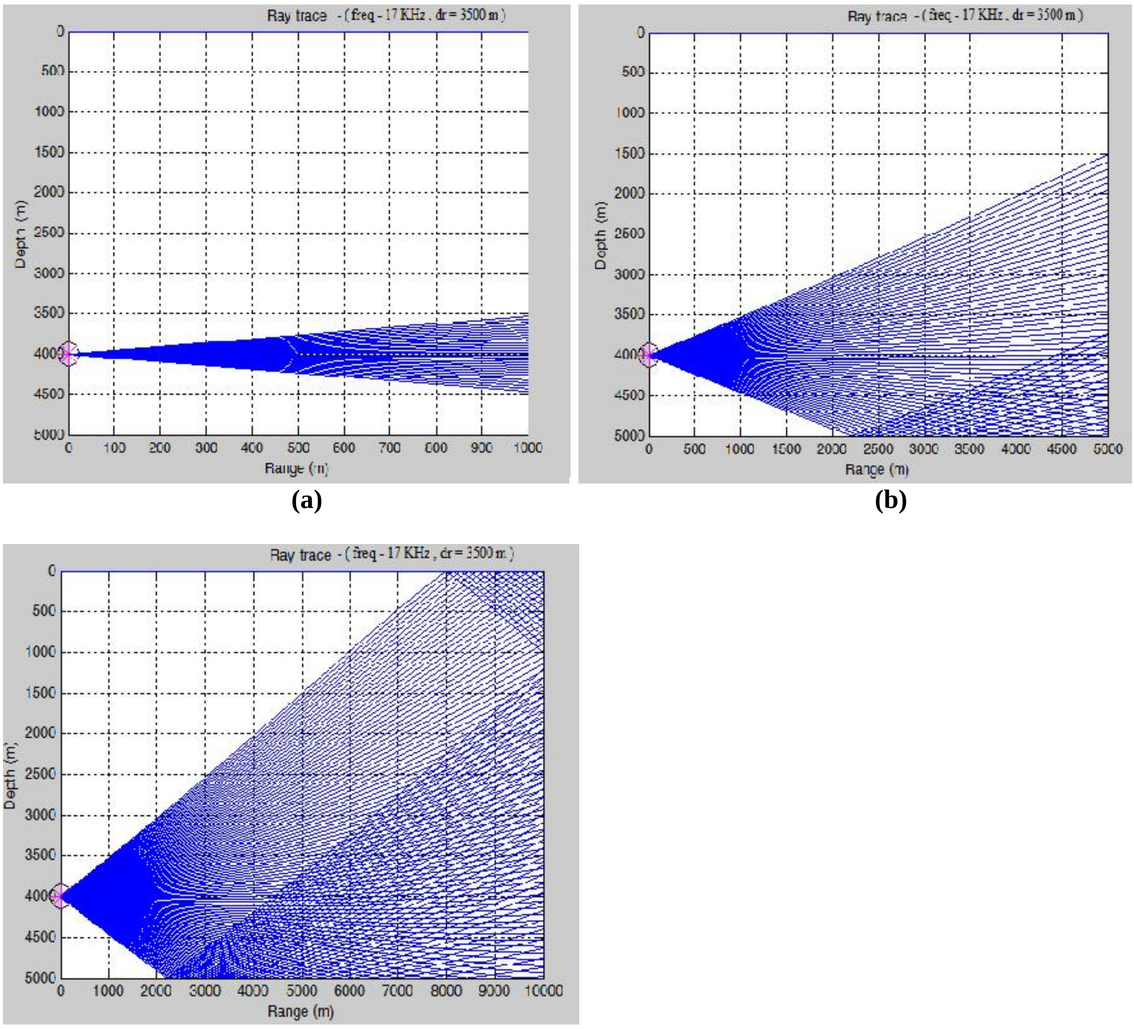


(b)



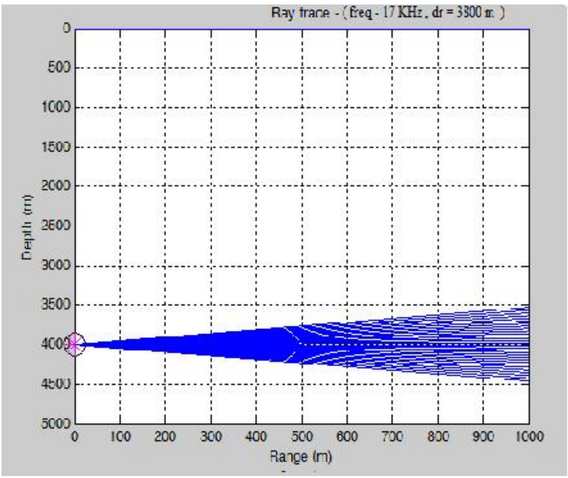
(c)

Εικόνα 4.6 Ray trace- Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m

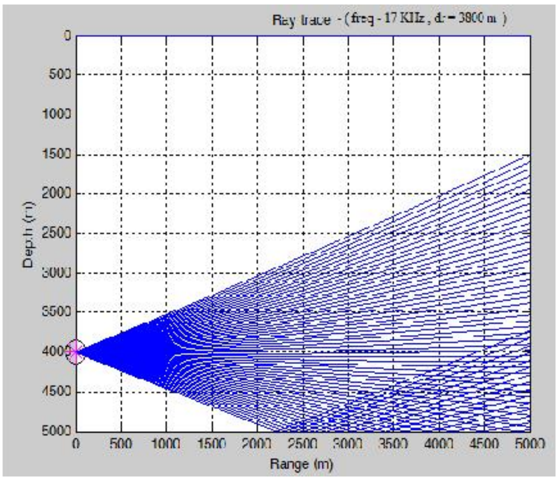


(a) (b) (c)

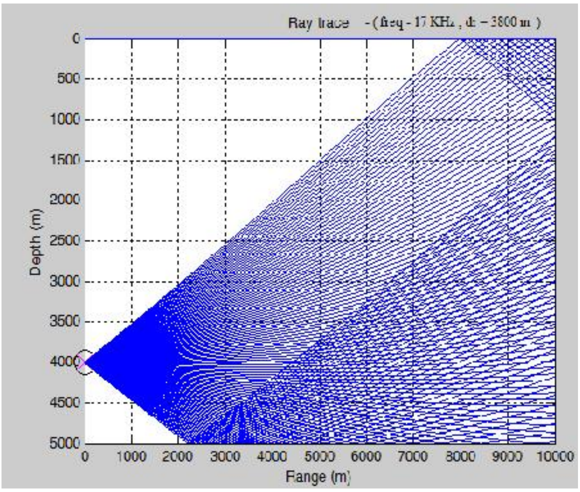
Εικόνα 4.7 Ray trace- Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

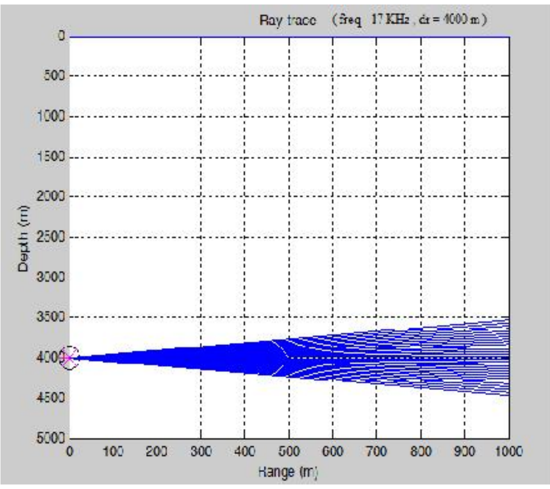


(b)

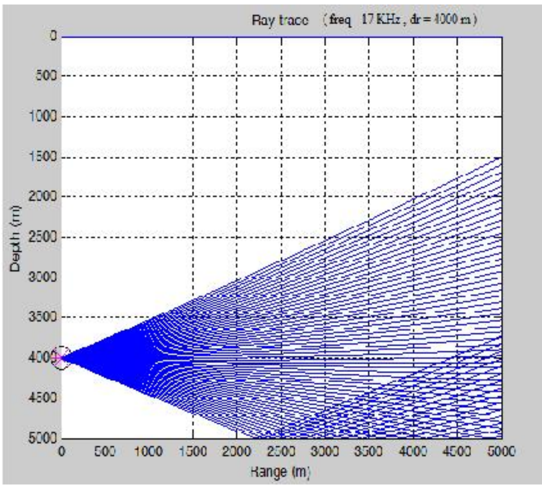


(c)

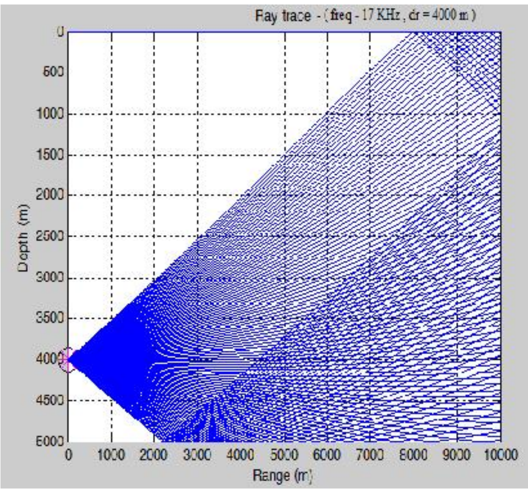
Εικόνα 4.8 Ray trace- Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

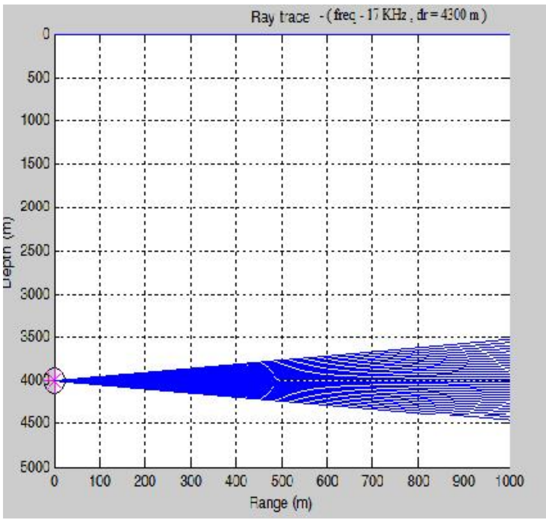


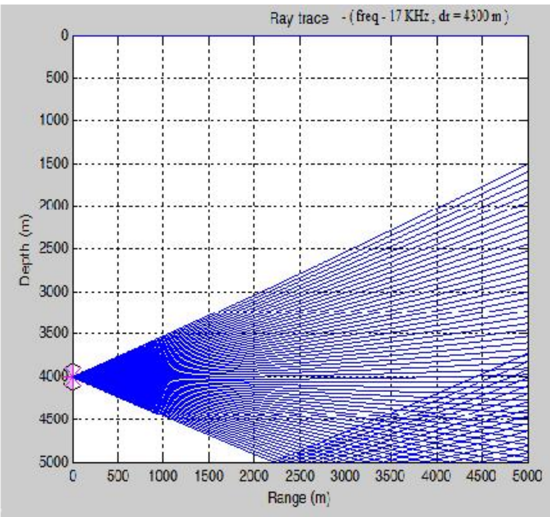
(b)



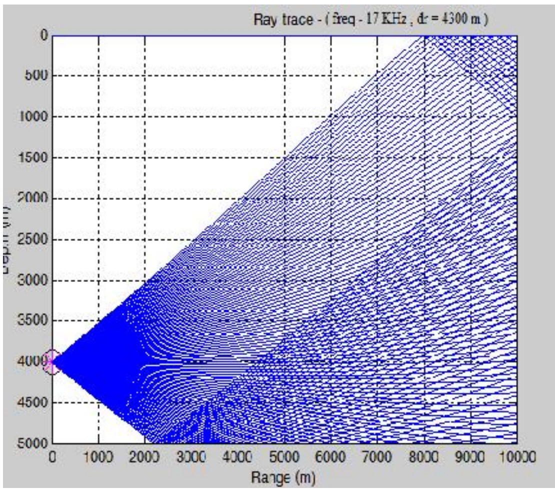
(c)

Εικόνα 4.9 Ray trace- Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



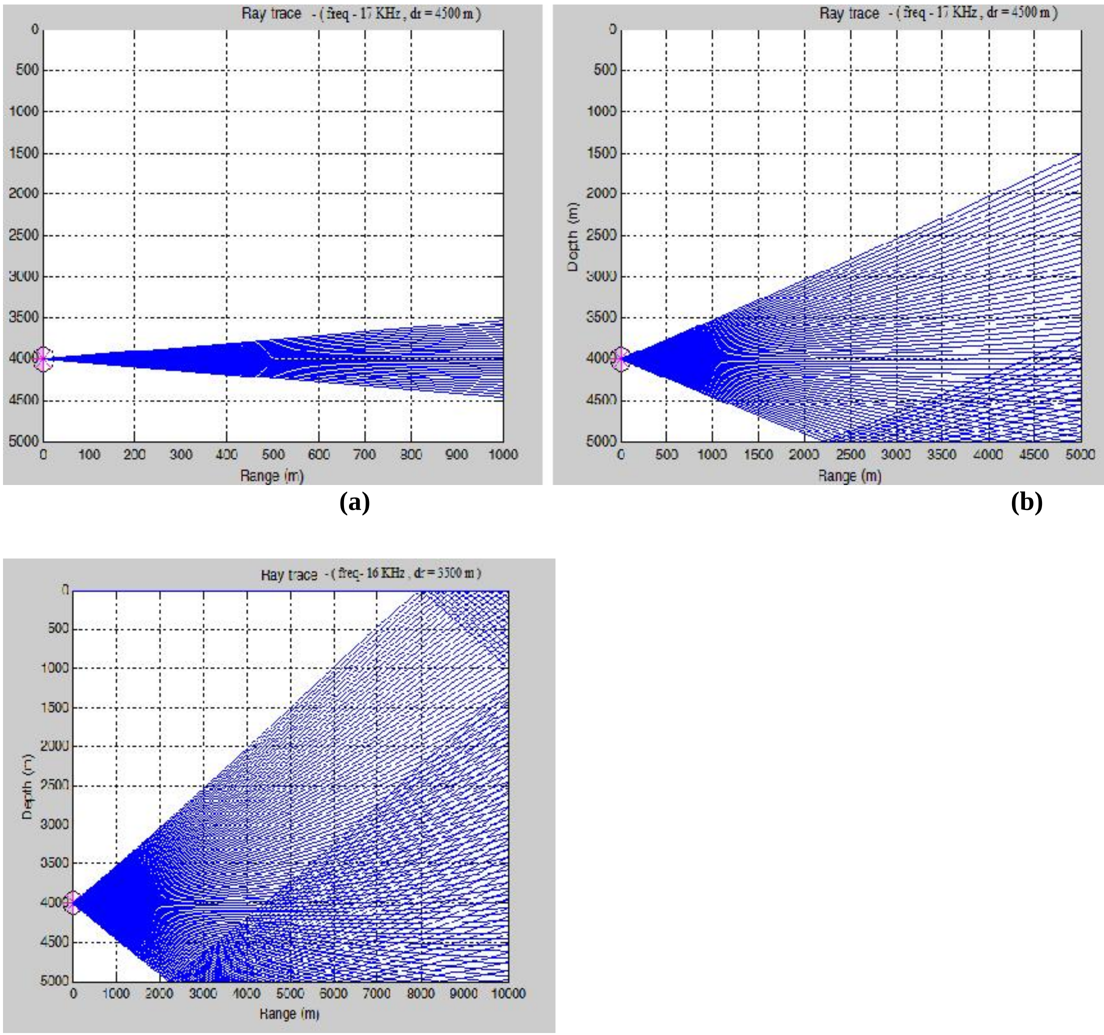


(a) **(b)**



(c)

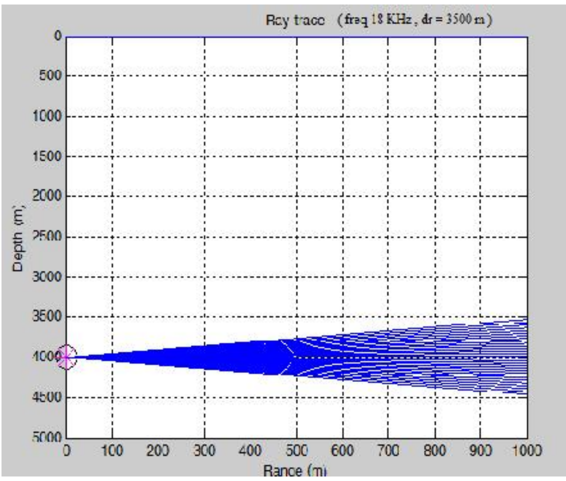
Εικόνα 4.10 Ray trace- Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



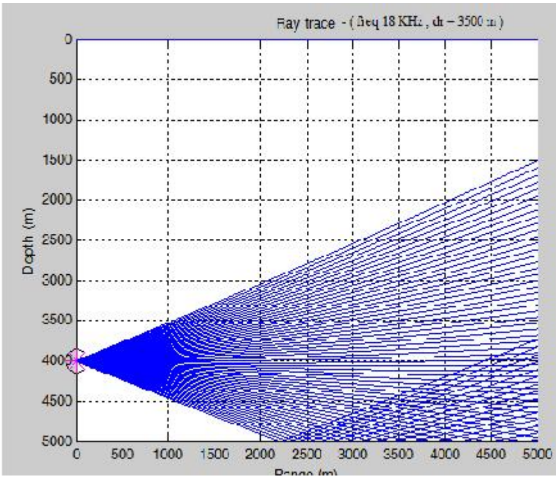
(a) (b)

(c)

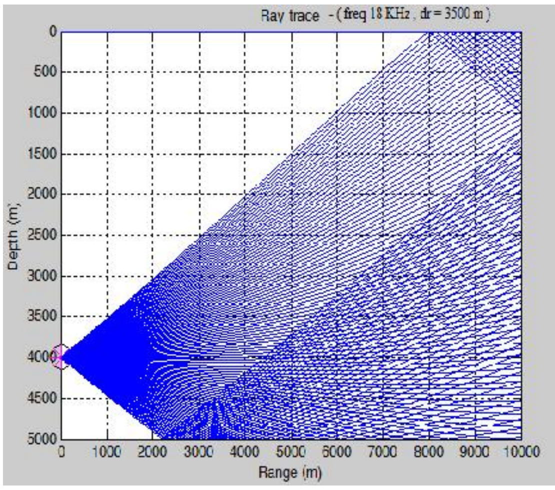
Εικόνα 4.11 Ray trace- Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

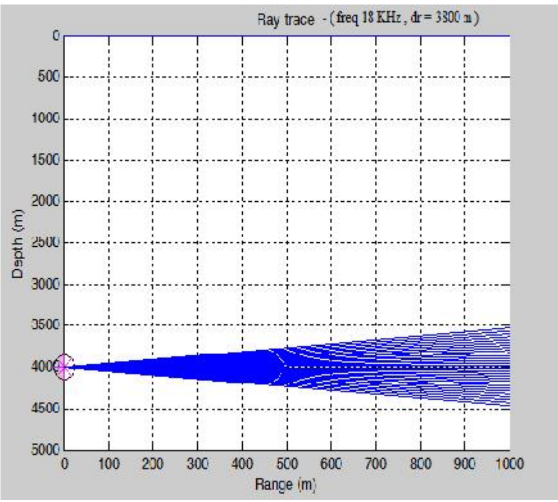


(b)

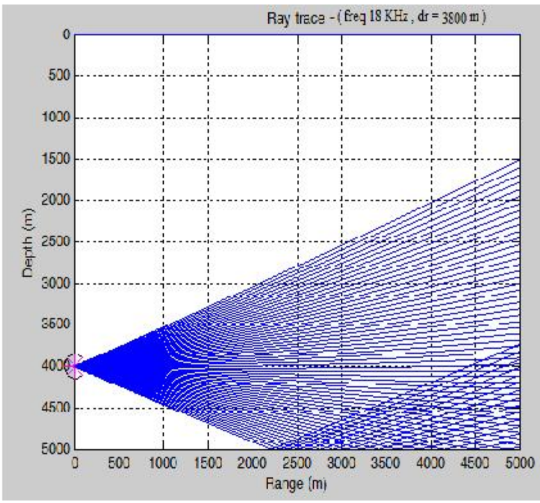


(c)

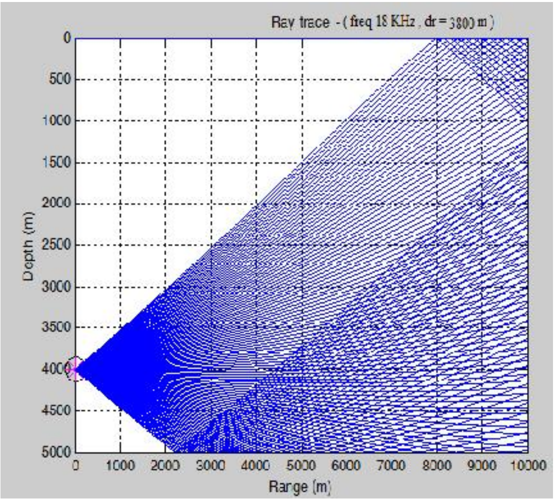
Εικόνα 4.12 Ray trace- Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

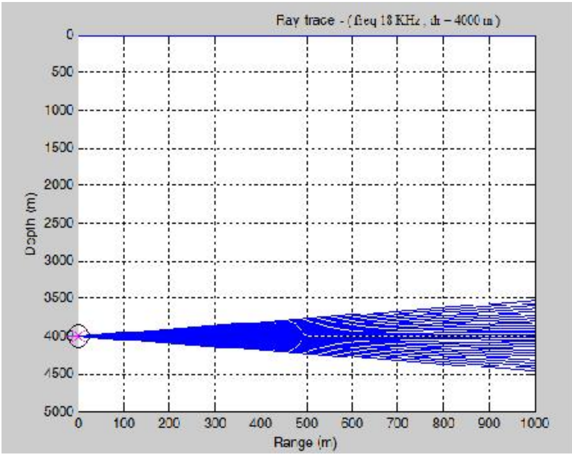


(b)

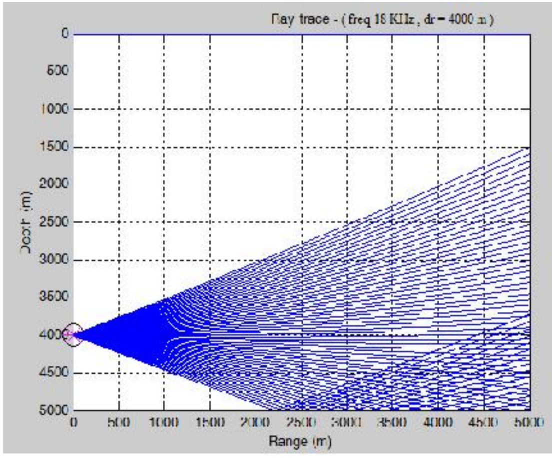


(c)

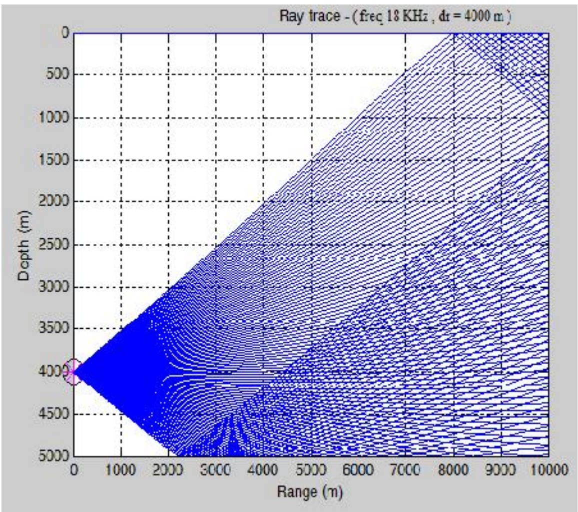
Εικόνα 4.13 Ray trace- Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

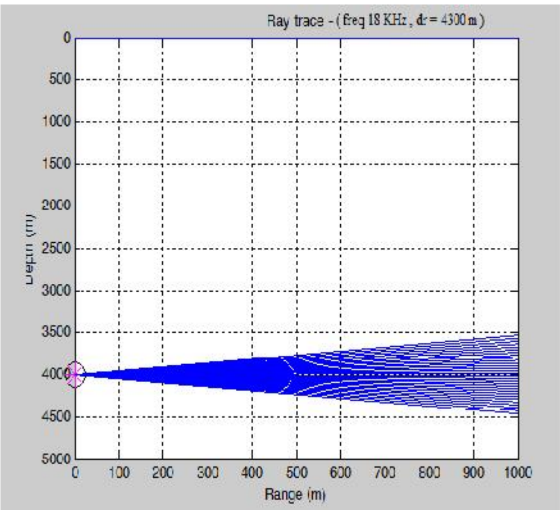


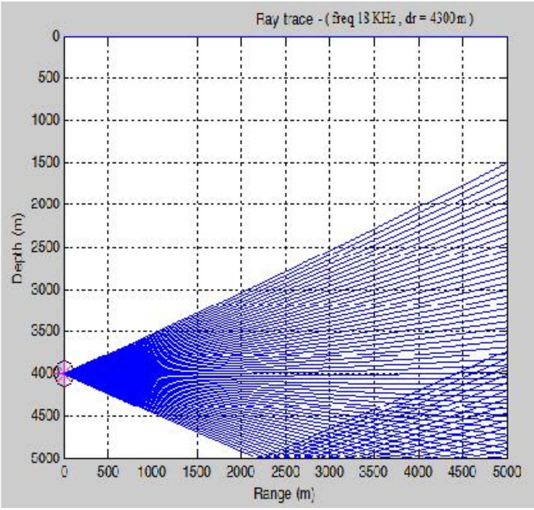
(b)



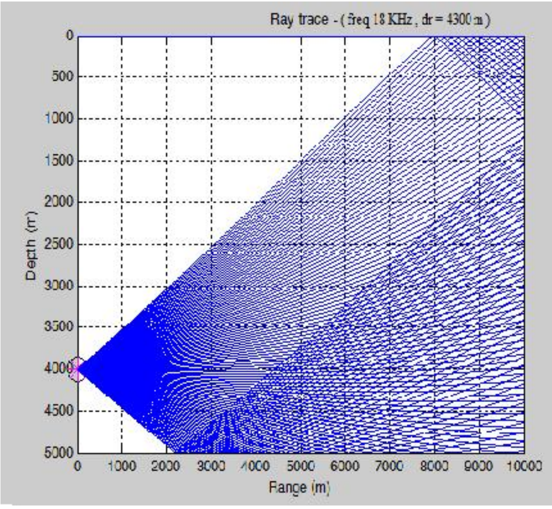
(c)

Εικόνα 4.14 Ray trace- Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



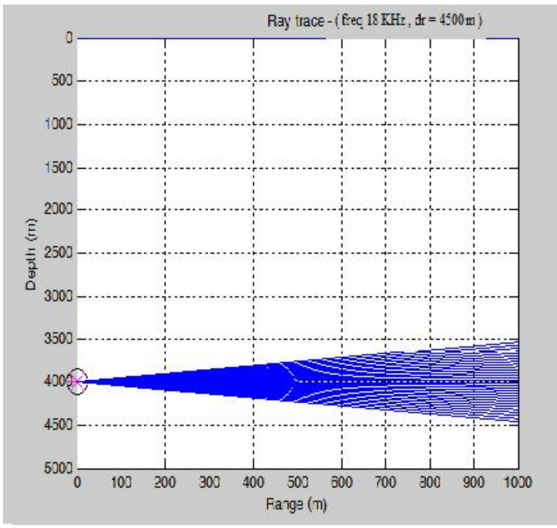


(a) **(b)**

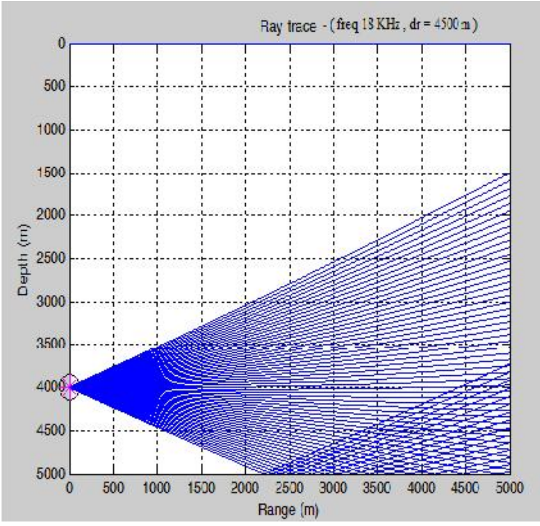


(c)

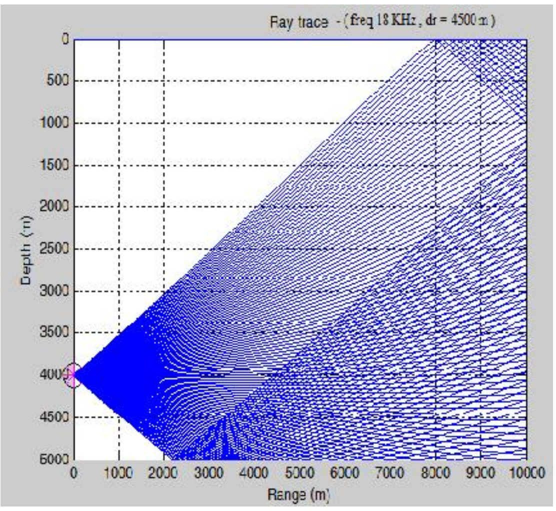
Εικόνα 4.15 Ray trace- Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

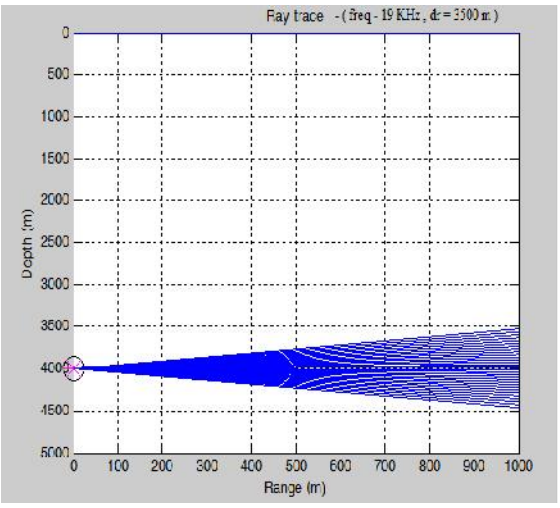


(b)

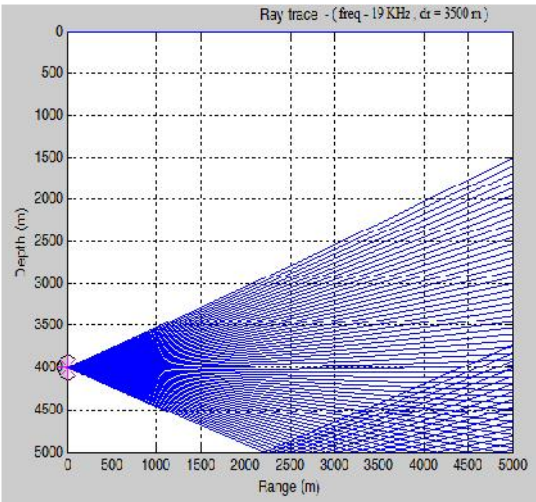


(c)

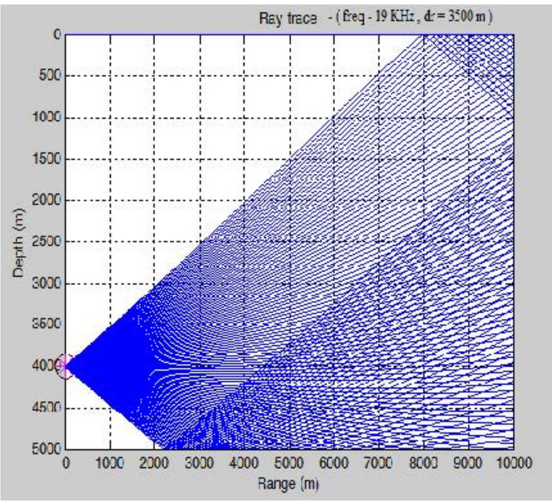
Εικόνα 4.16 Ray trace- Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

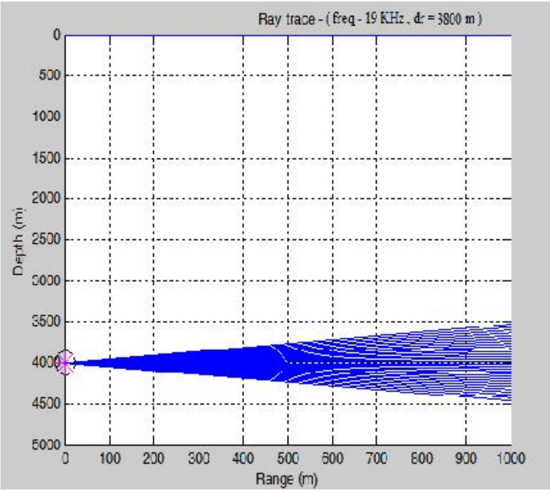


(b)

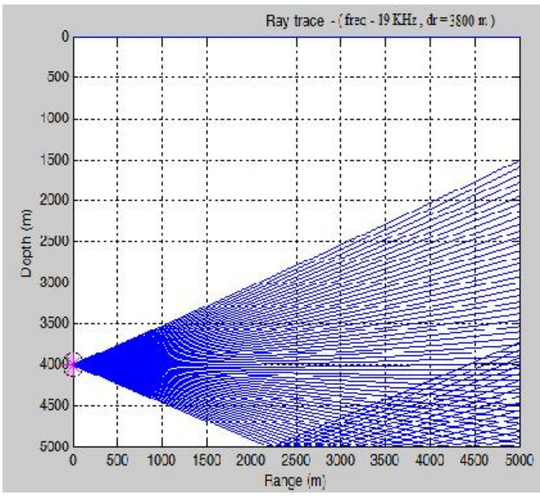


(c)

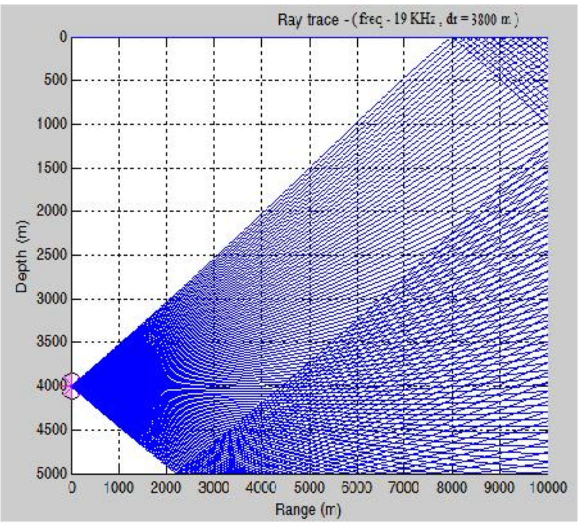
Εικόνα 4.17 Ray trace- Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

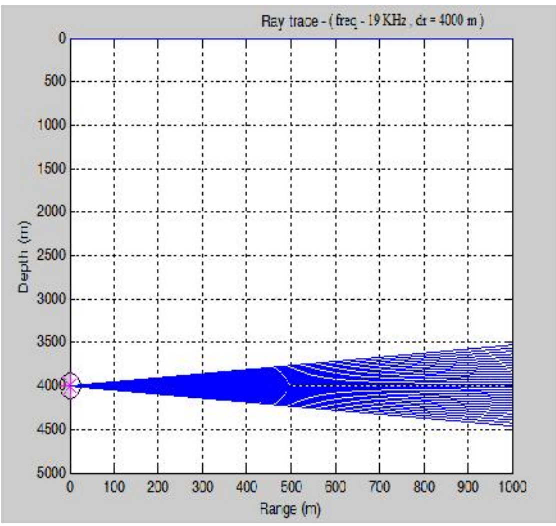


(b)

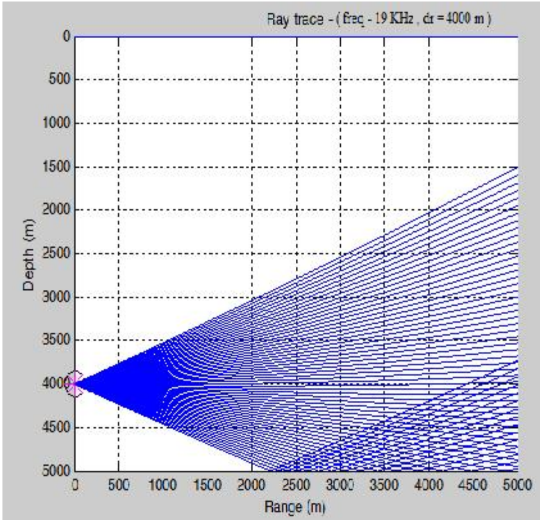


(c)

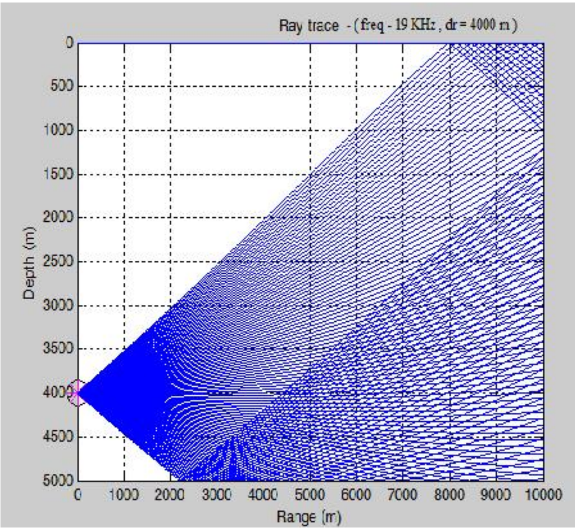
Εικόνα 4.18 Ray trace- Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

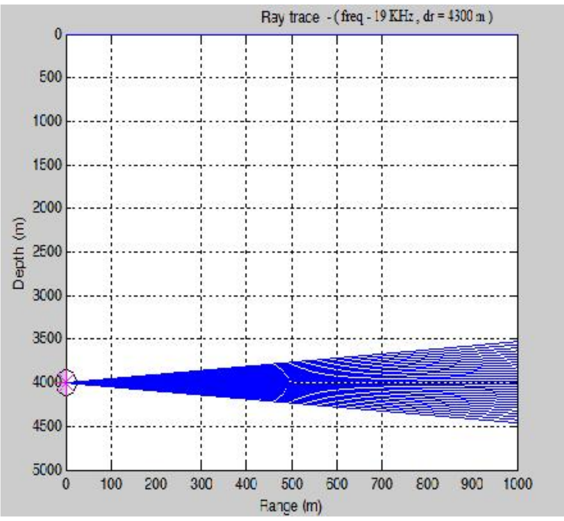


(b)

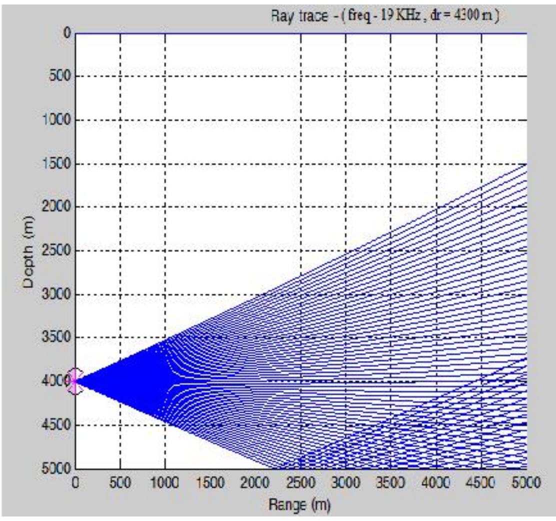


(c)

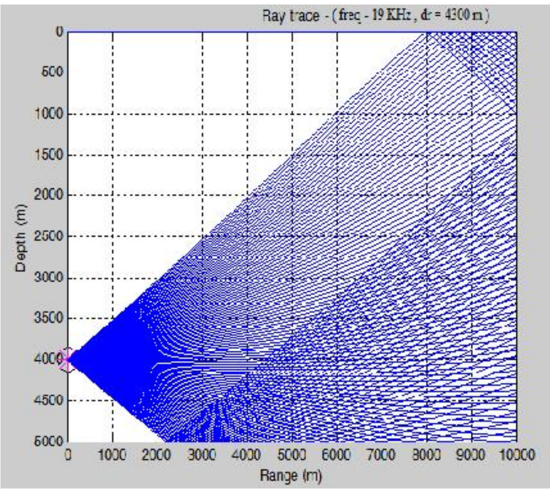
Εικόνα 4.19 Ray trace- Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

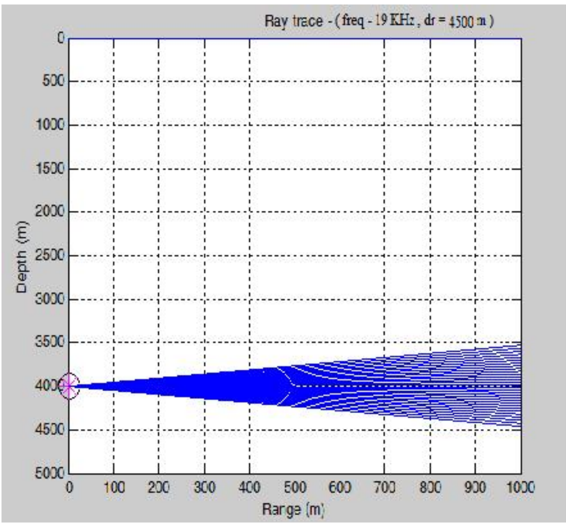


(b)

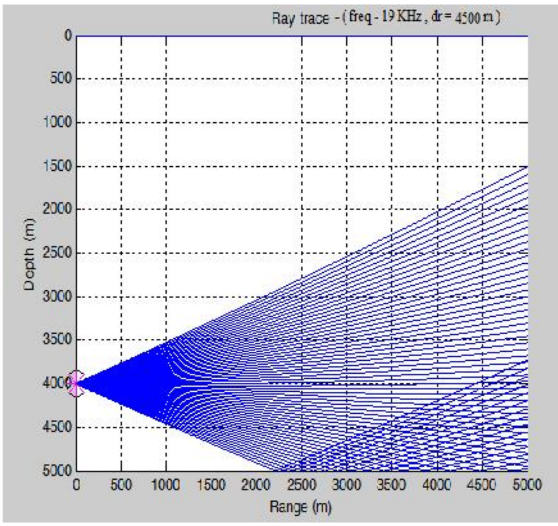


(c)

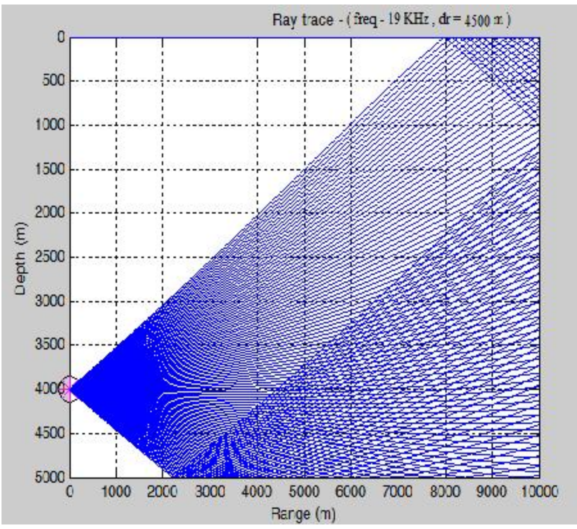
Εικόνα 4.20 Ray trace- Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

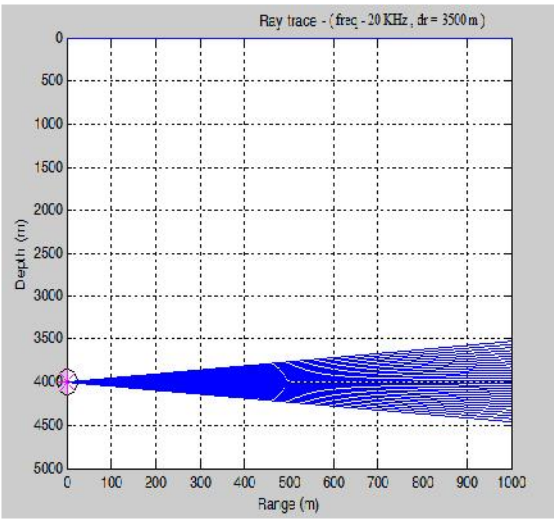


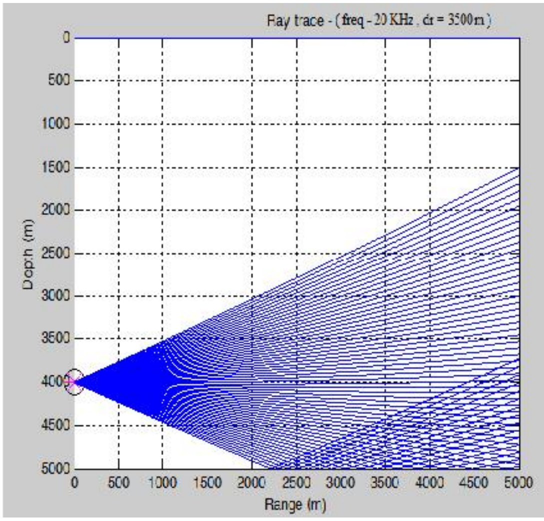
(b)



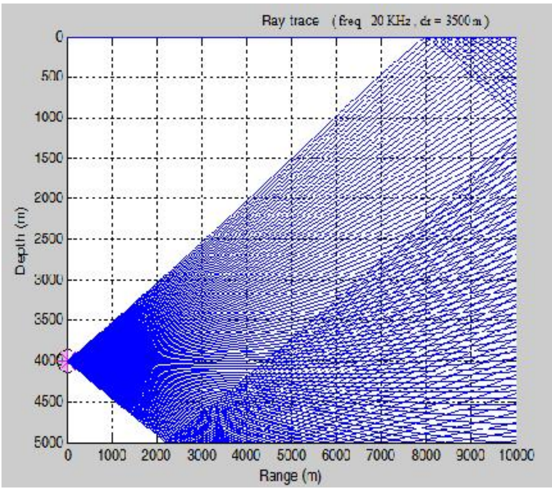
(c)

Εικόνα 4.21 Ray trace- Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



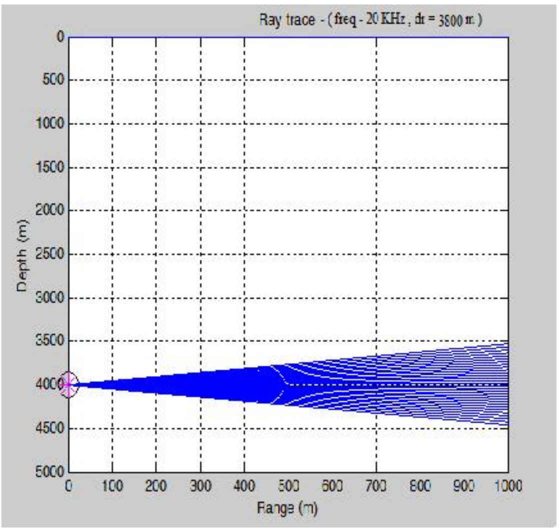


(a) **(b)**

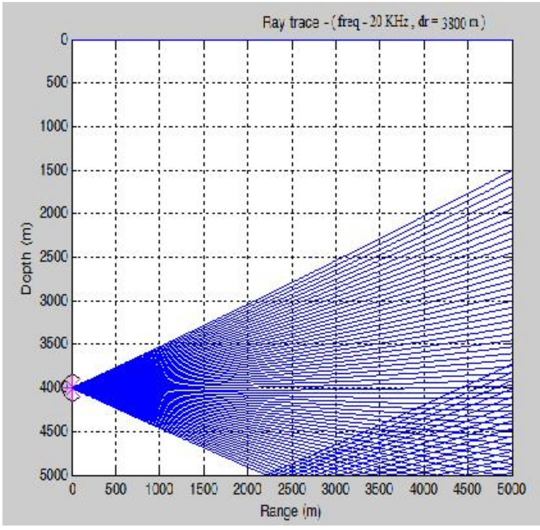


(c)

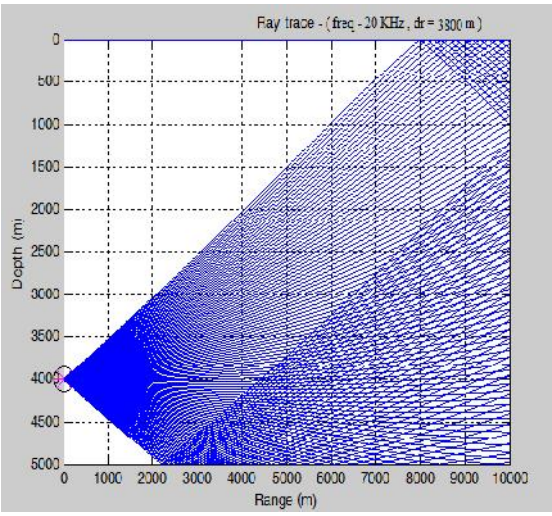
Εικόνα 4.22 Ray trace- Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

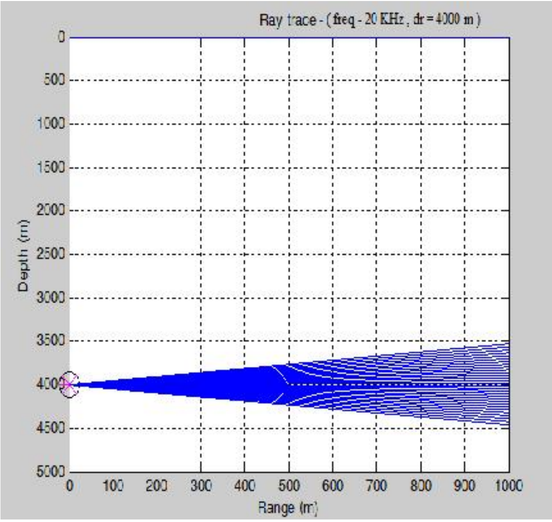


(b)

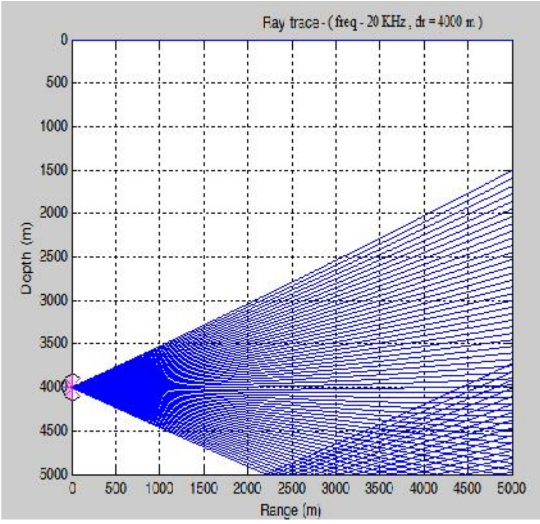


(c)

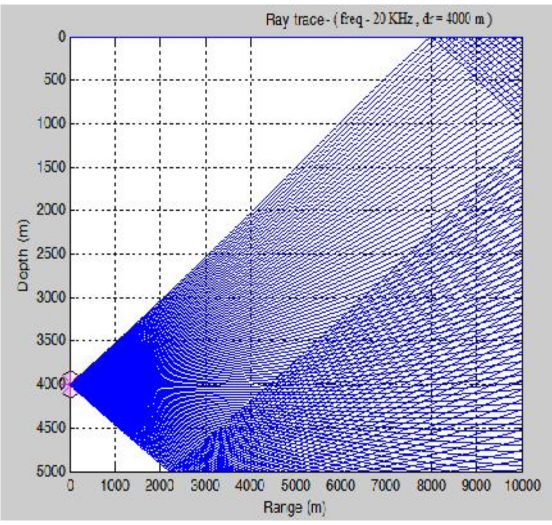
Εικόνα 4.23 Ray trace- Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

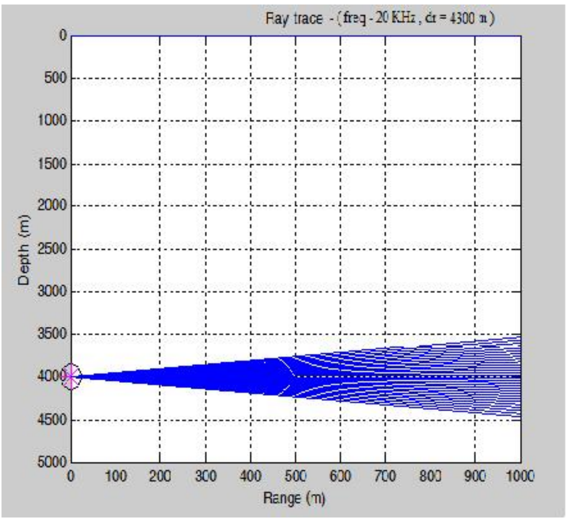


(b)

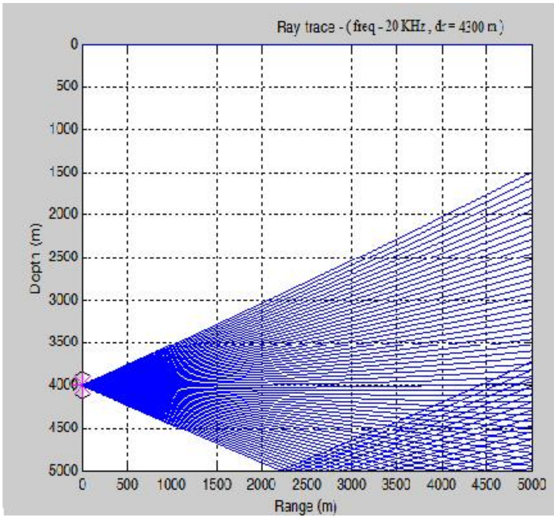


(c)

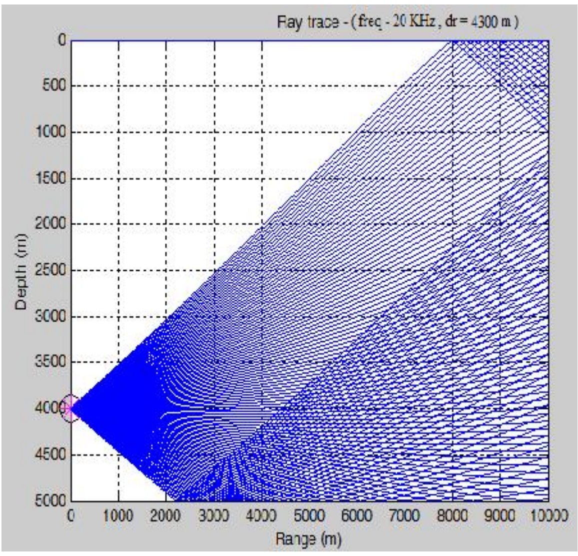
Εικόνα 4.24 Ray trace- Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

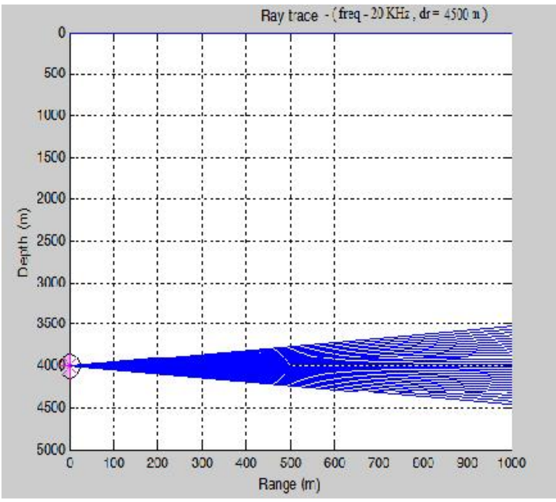


(b)

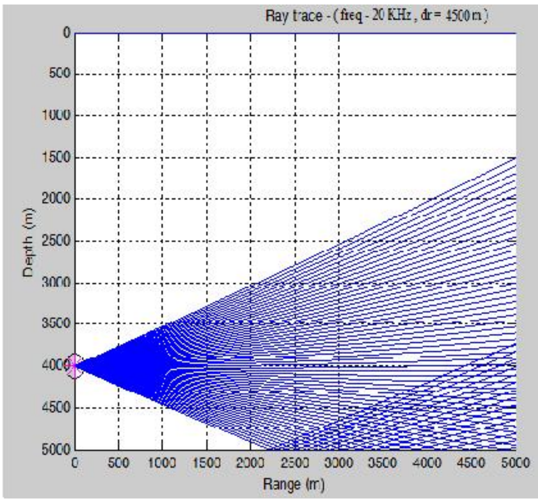


(c)

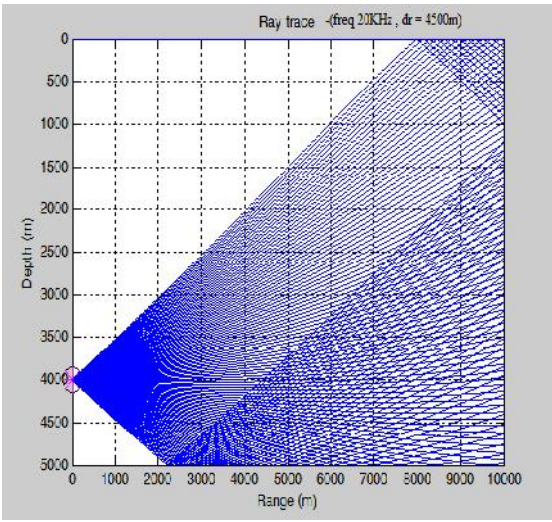
Εικόνα 4.25 Ray trace- Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

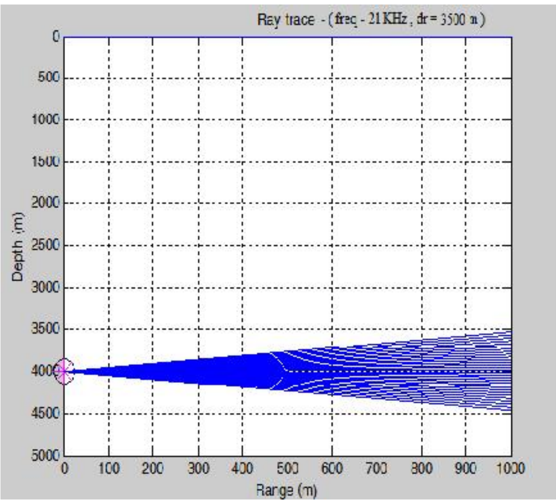


(b)

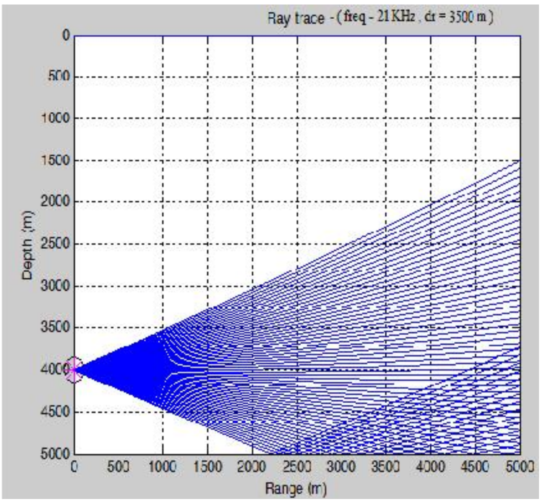


(c)

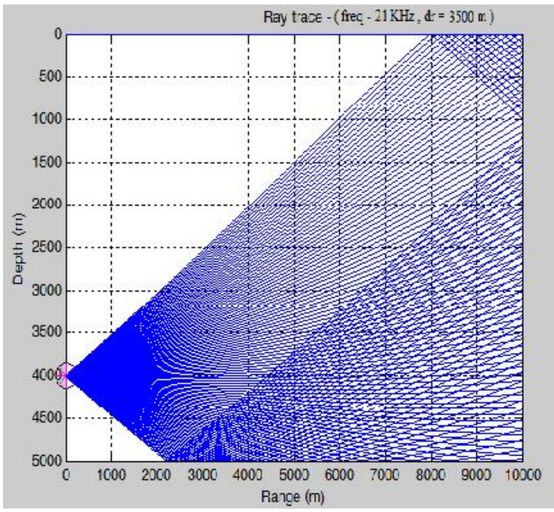
Εικόνα 4.26 Ray trace- Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

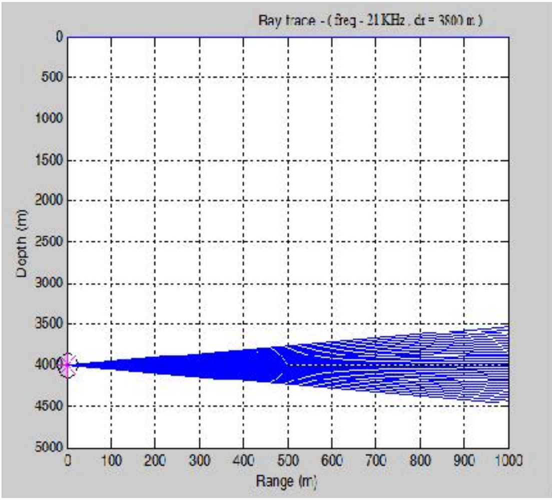


(b)

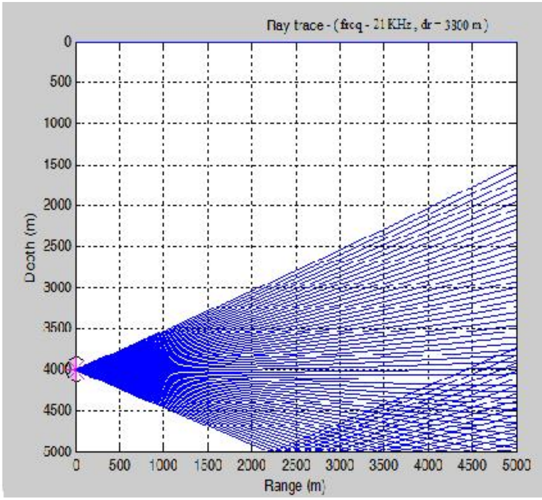


(c)

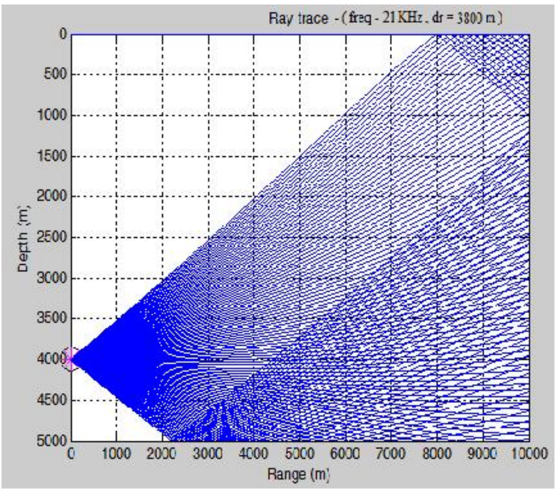
Εικόνα 4.27 Ray trace- Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

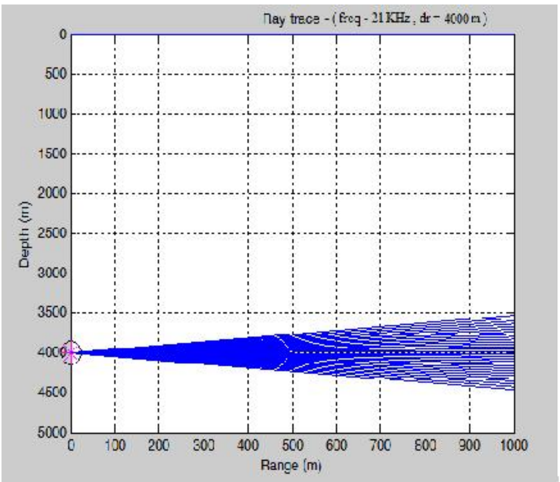


(b)

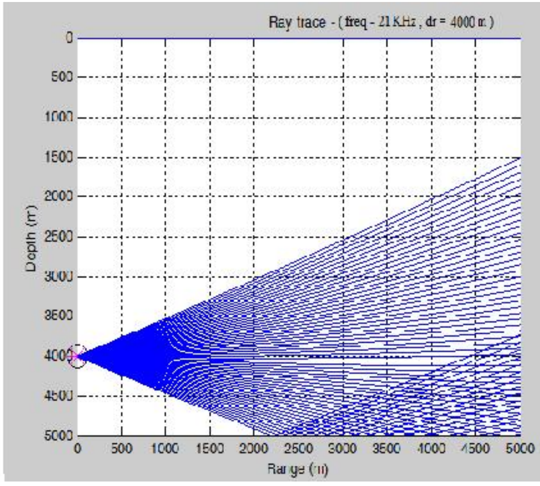


(c)

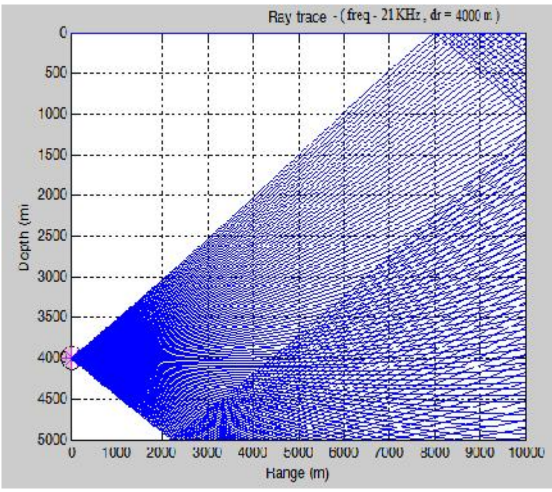
Εικόνα 4.28 Ray trace- Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

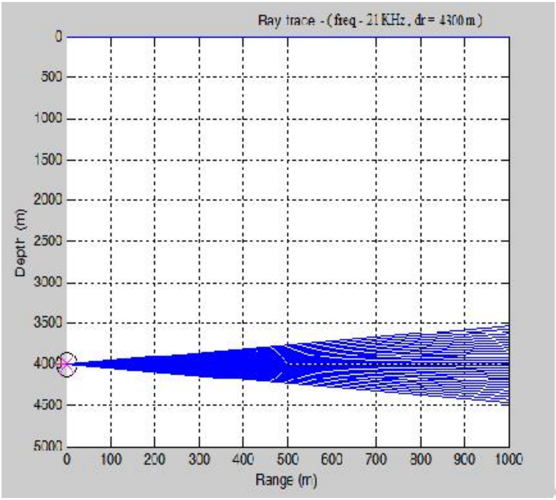


(b)

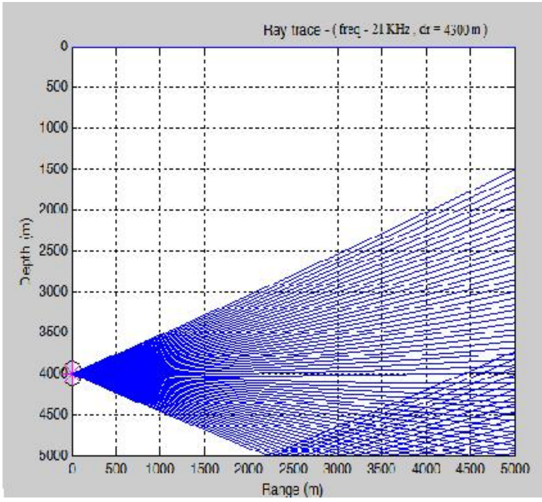


(c)

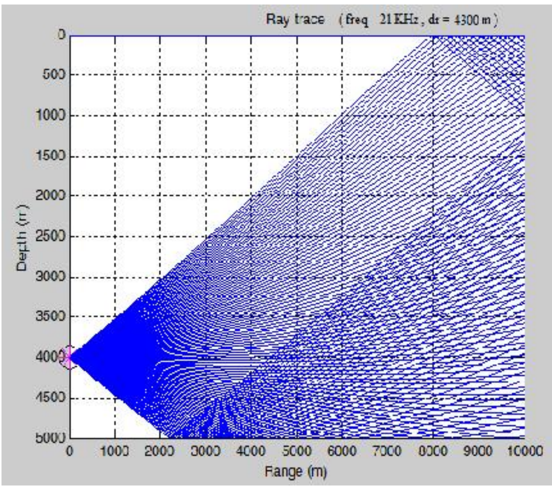
Εικόνα 4.29 Ray trace- Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

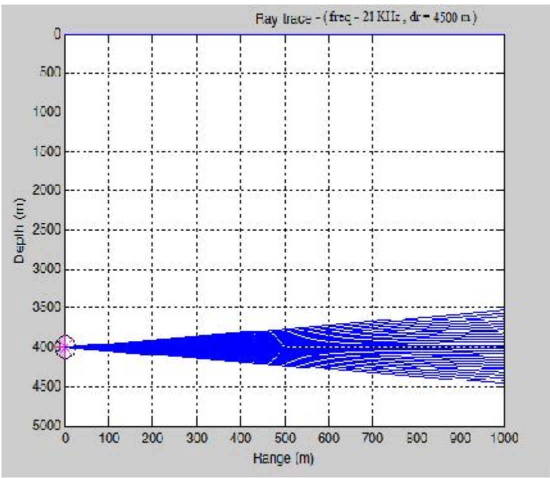


(b)

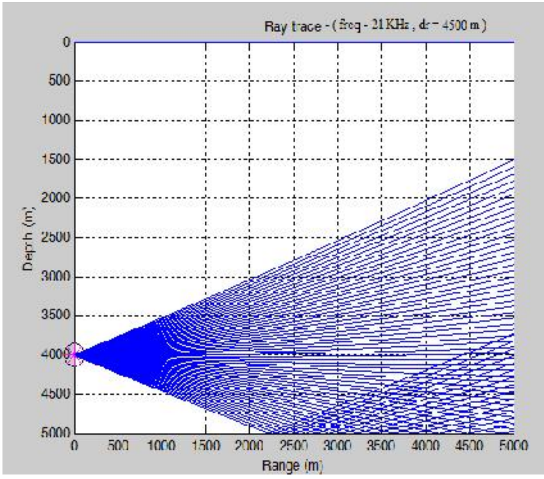


(c)

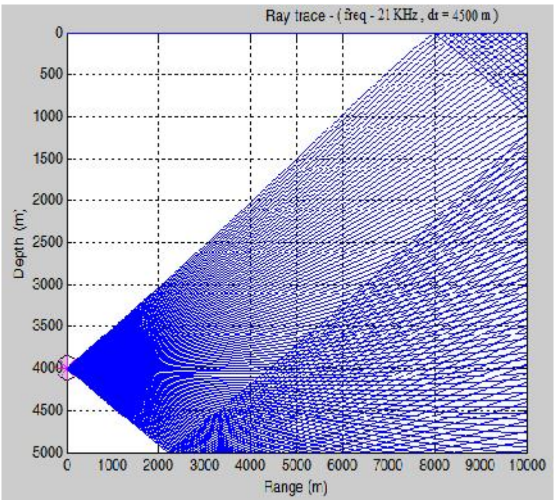
Εικόνα 4.30 Ray trace- Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)



(b)



(c)

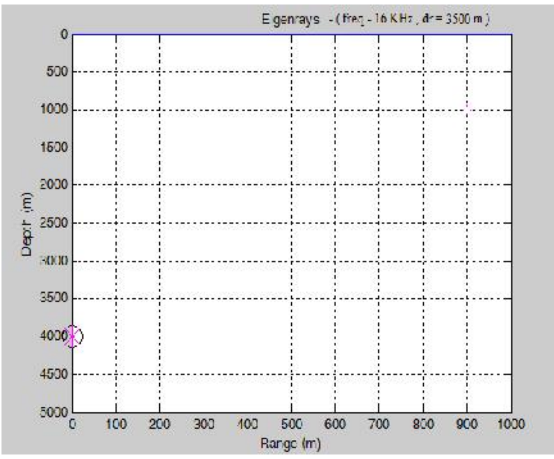
Εικόνα 4.31 Ray trace- Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m

4.2 Ιδιοακτίνες (Eigenrays)

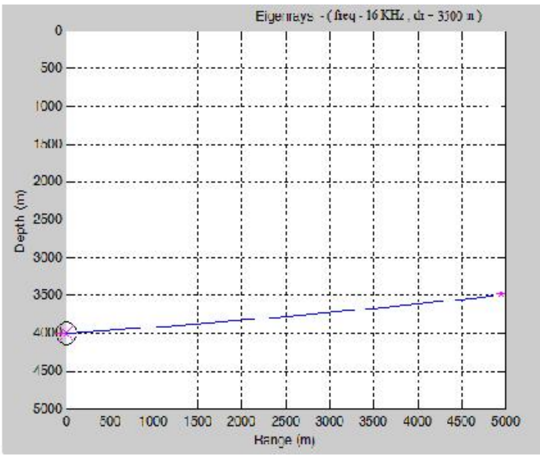
Οι ιδιοακτίνες που φαίνονται στις παρακάτω γραφικές έχουν υπολογιστεί με τη μέθοδο Regular Falsi (Παράρτημα 2)
Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζουμε τα διαγράμματα των ιδιοακτίνων που θα δούμε παρακάτω.

Βάθος	Συχνότητα (KHz)					
Δέκτη	16	17	18	19	20	21
3500	4.32	4.37	4.42	4.47	4.52	4.57
3800	4.33	4.38	4.43	4.48	4.53	4.58
4000	4.34	4.39	4.44	4.49	4.54	4.59
4300	4.35	4.40	4.45	4.50	4.55	4.60
4500	4.36	4.41	4.46	4.51	4.56	4.61

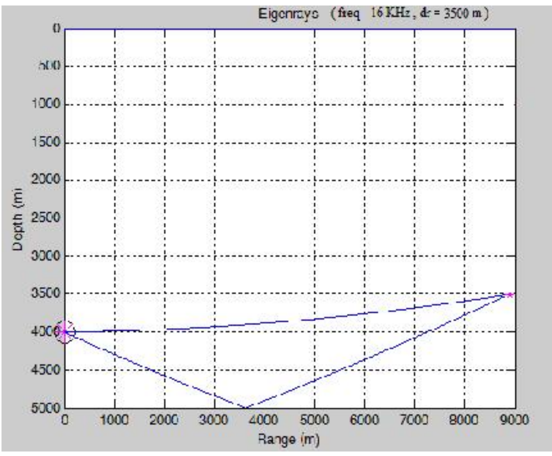
Πίνακας 4.2 Διαγράμματα Ιδιοακτίνων



(a)

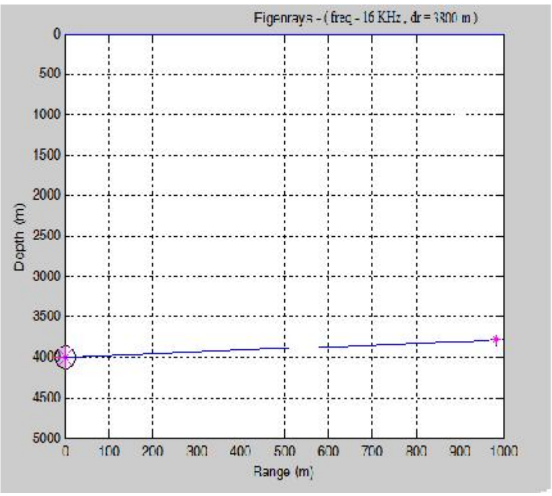


(b)

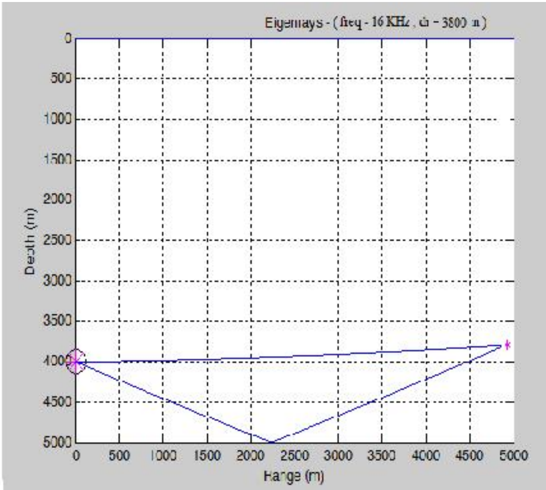


(c)

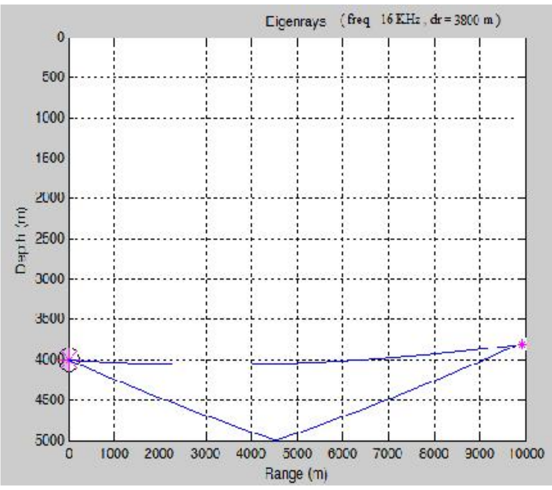
Εικόνα 4.32 Eigenrays- Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c)10000m



(a)

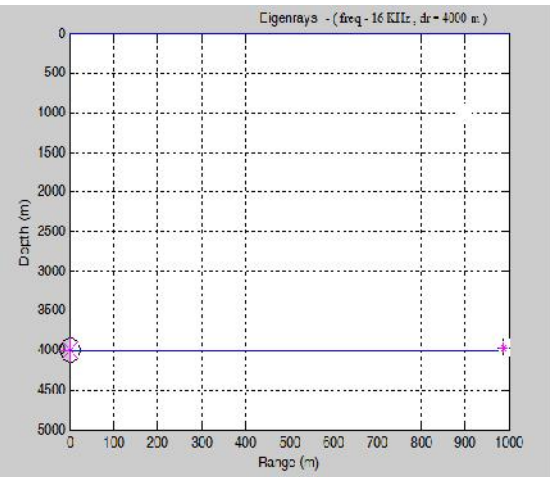


(b)

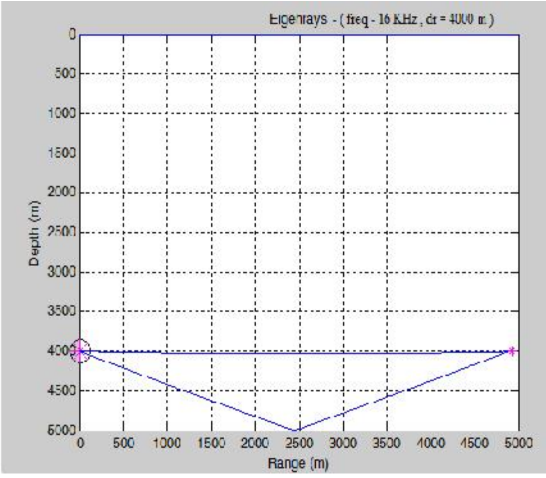


(c)

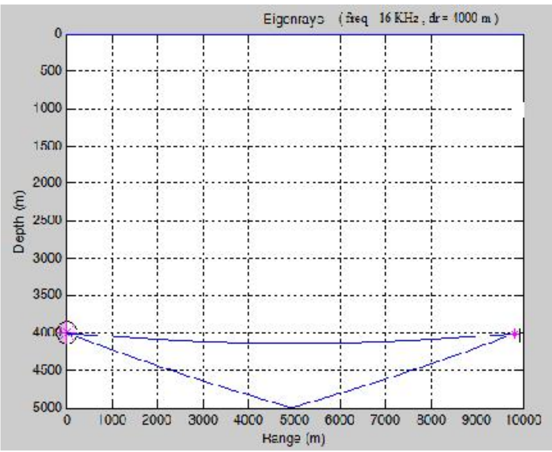
Εικόνα 4.33 Eigenrays - Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m,(c)10000m



(a)

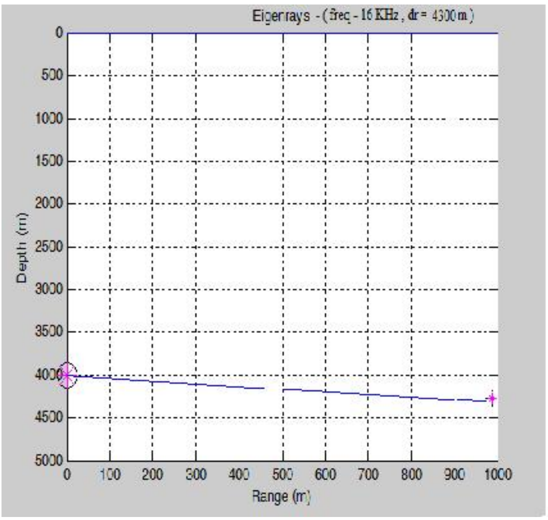


(b)

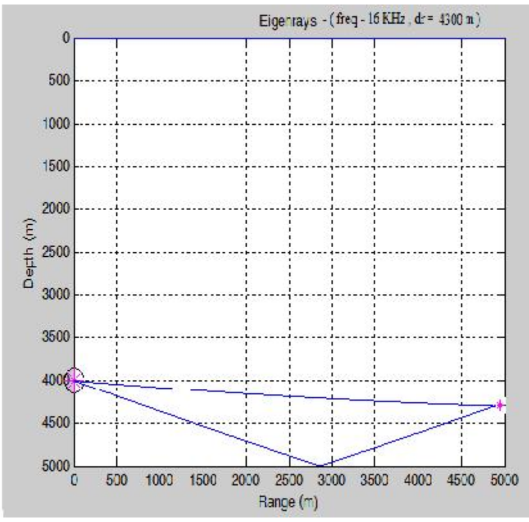


(c)

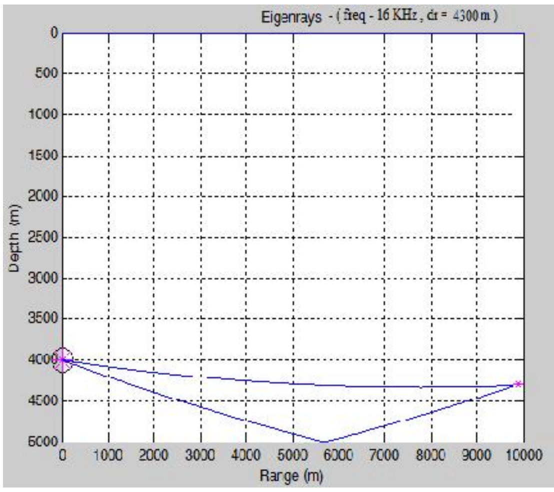
Εικόνα 4.34 Eigenrays - Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

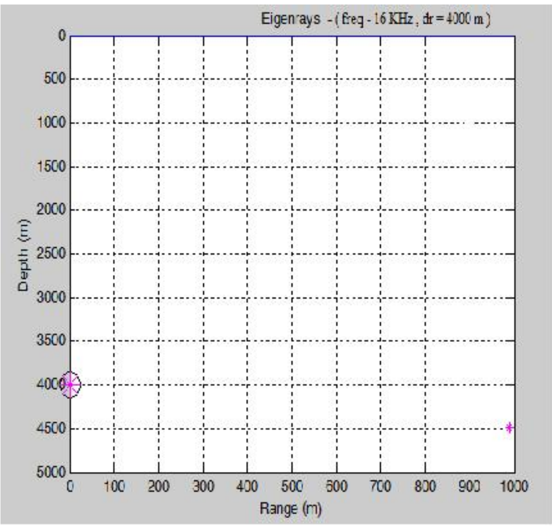


(b)

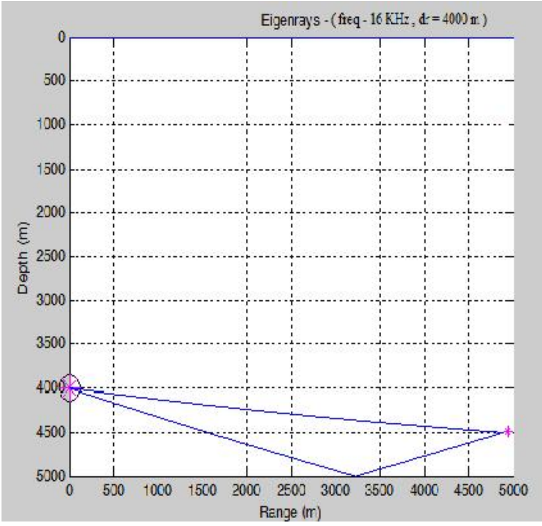


(c)

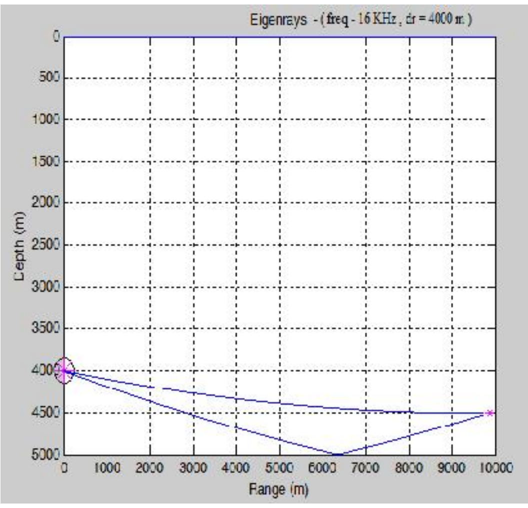
Εικόνα 4.35 Eigenrays - Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

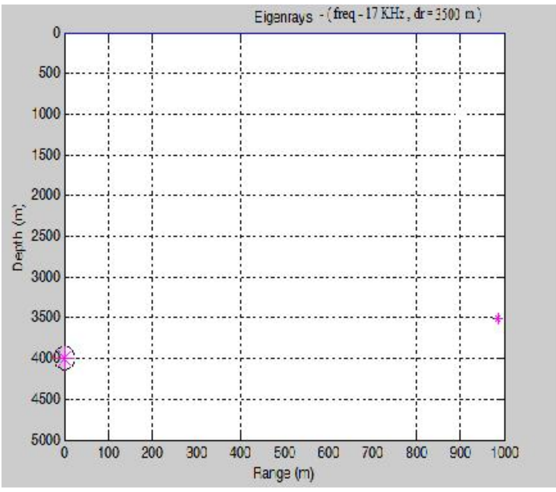


(b)

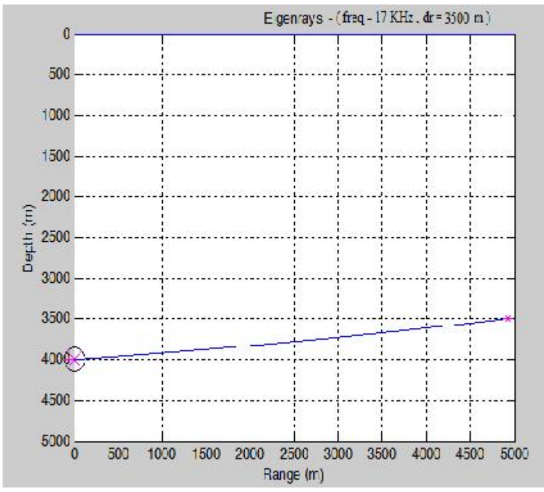


(c)

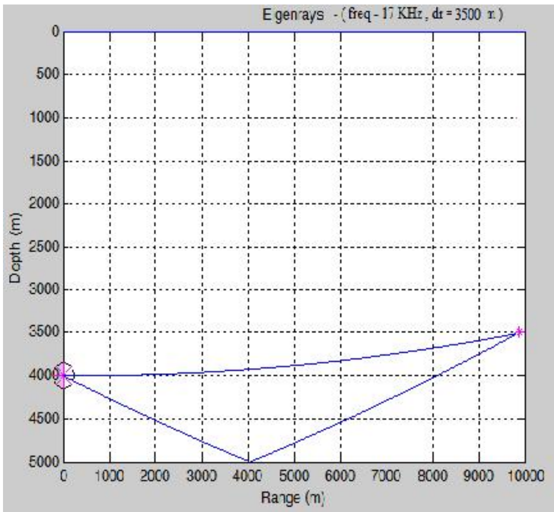
Εικόνα 4.36 Eigenrays- Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

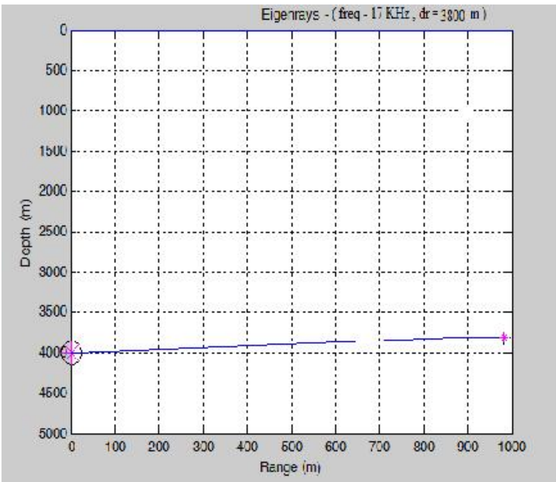


(b)

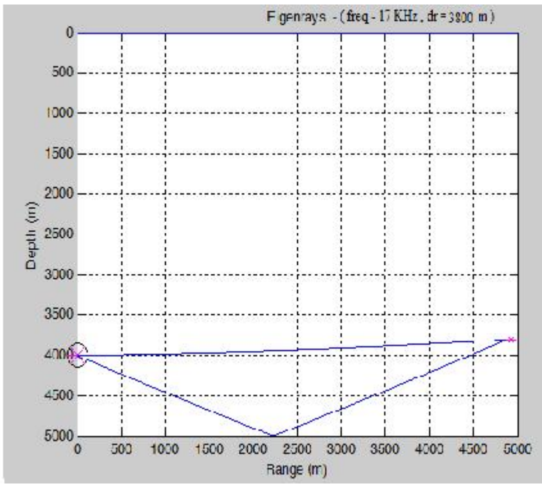


(c)

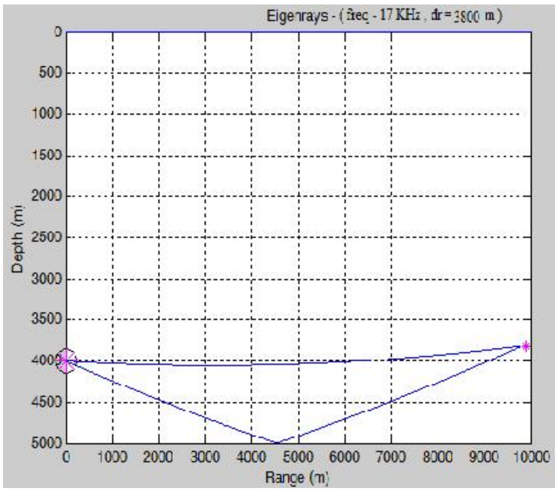
Εικόνα 4.37 Eigenrays - Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

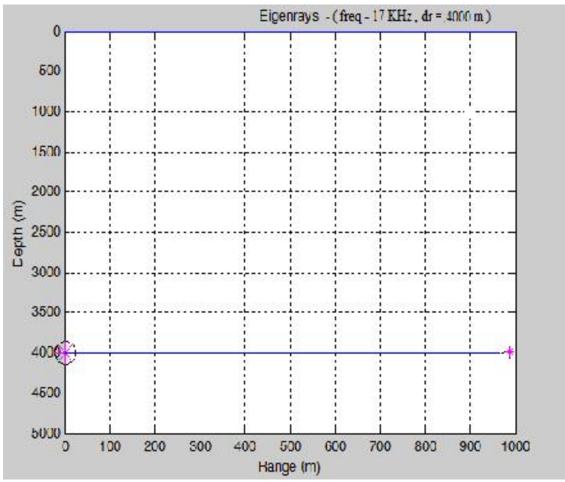


(b)

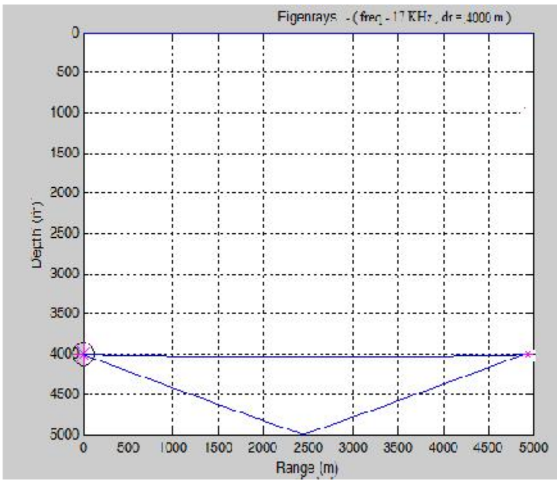


(c)

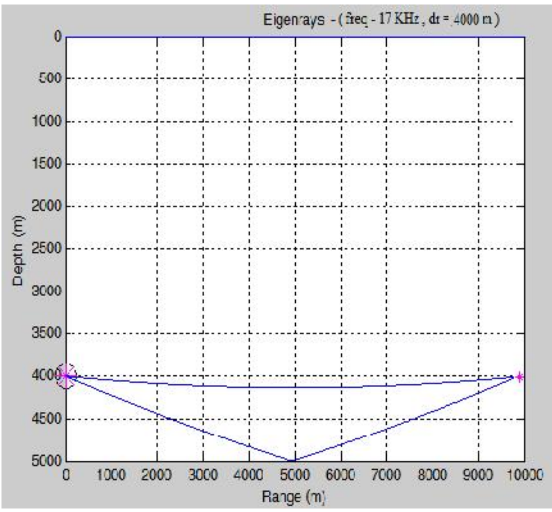
Εικόνα 4.38 Eigenrays - Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

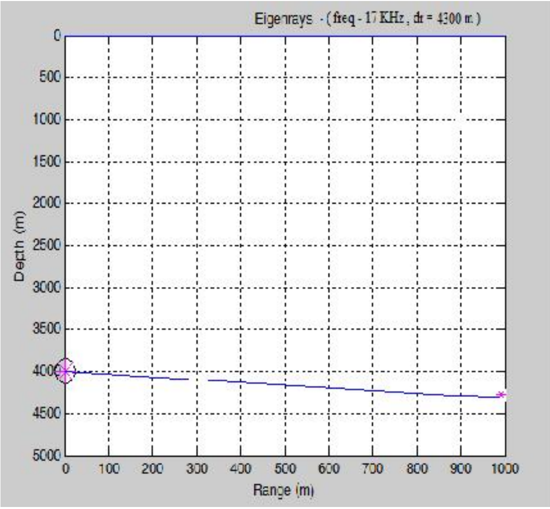


(b)

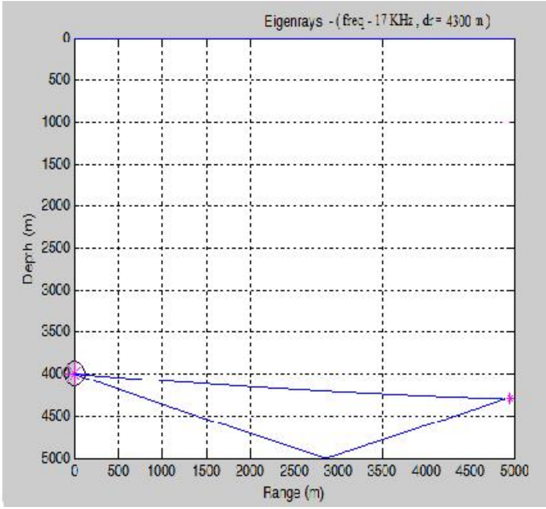


(c)

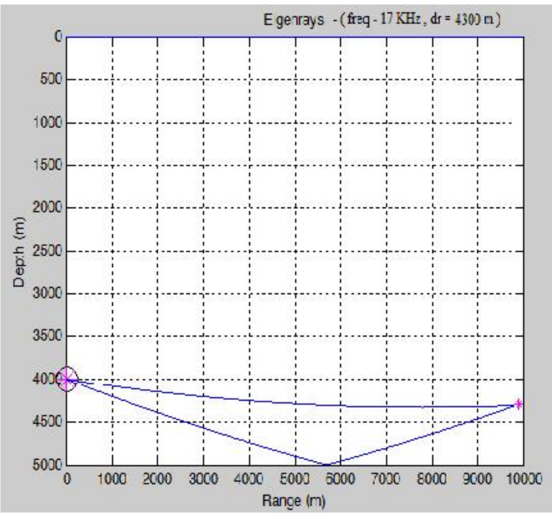
Εικόνα 4.39 Eigenrays - Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

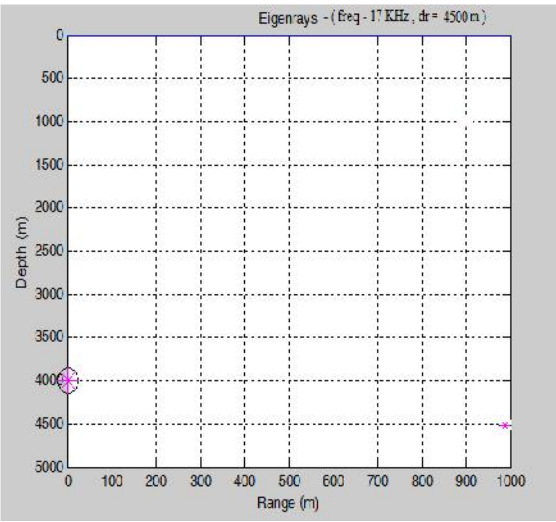


(b)

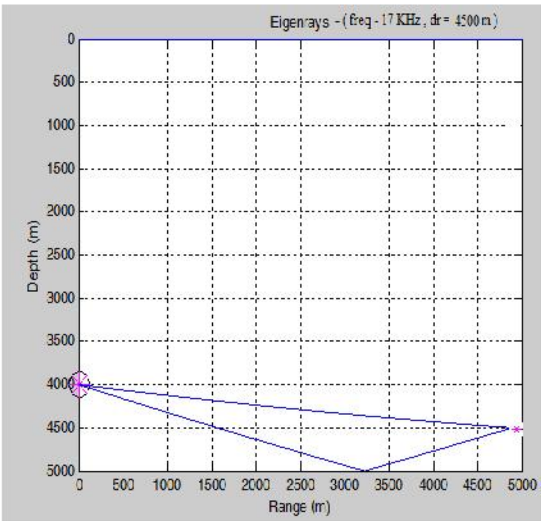


(c)

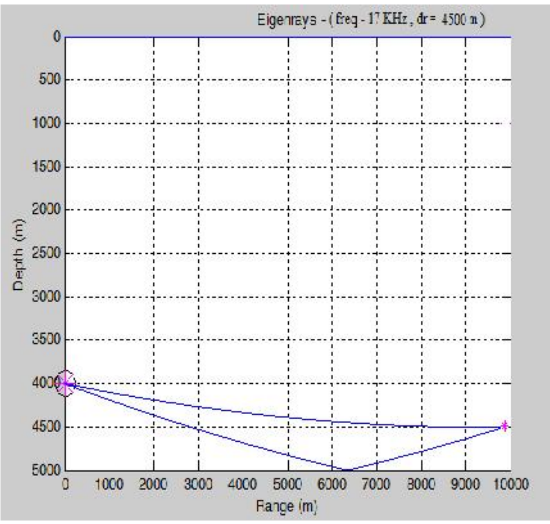
Εικόνα 4.40 Eigenrays - Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

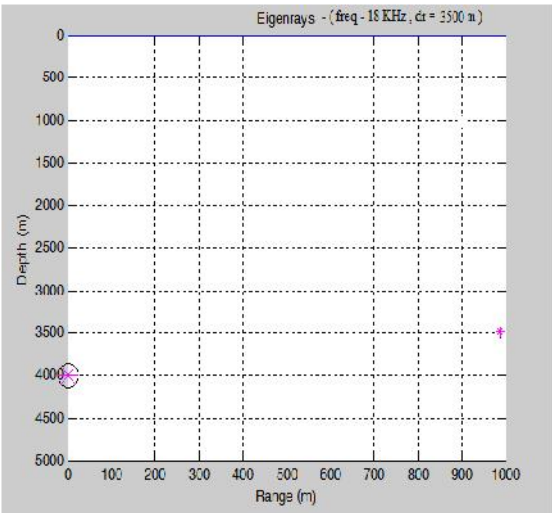


(b)

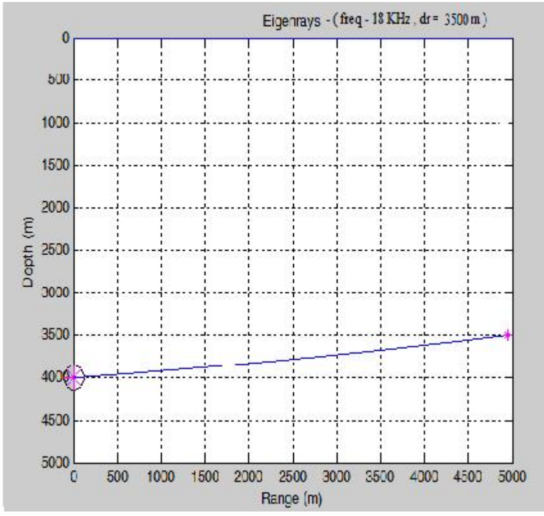


(c)

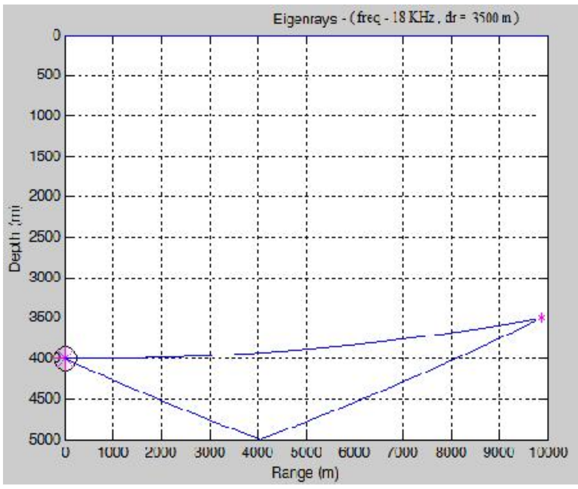
Εικόνα 4.41 Eigenrays - Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

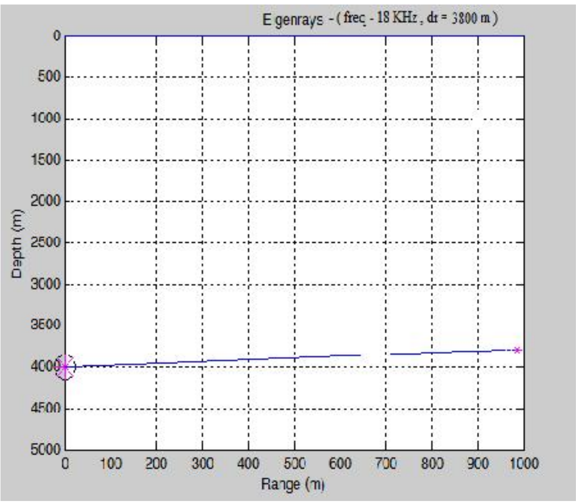


(b)

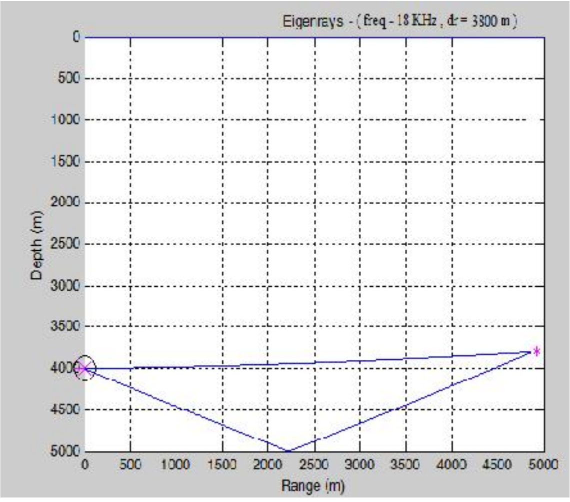


(c)

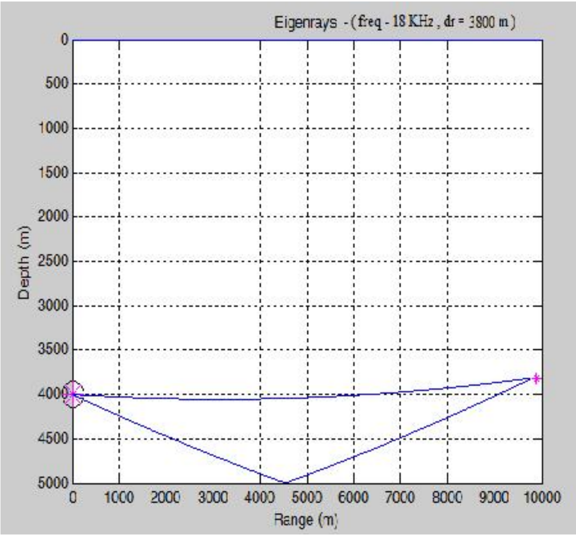
Εικόνα 4.42 Eigenrays - Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

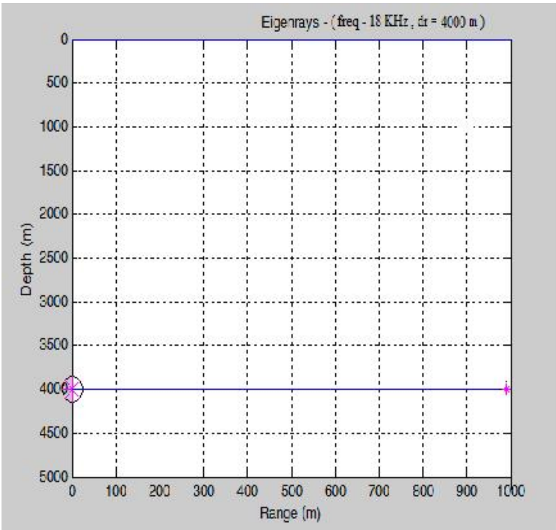


(b)

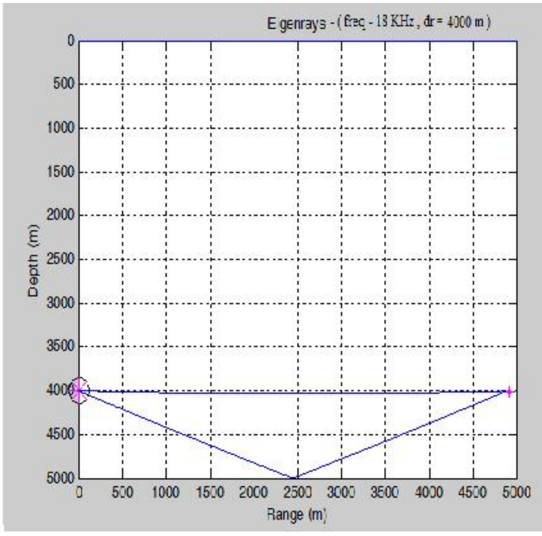


(c)

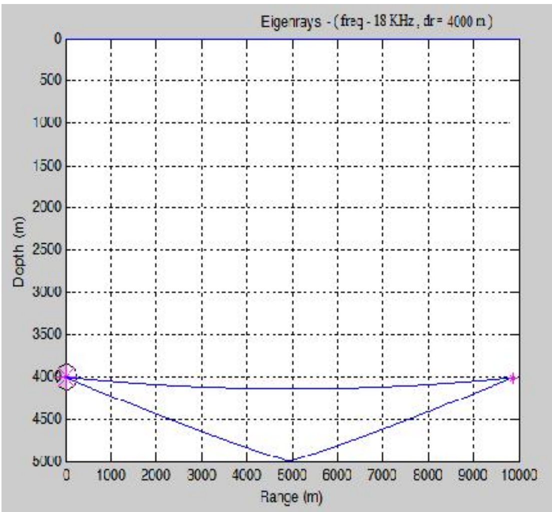
Εικόνα 4.43 Eigenrays - Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

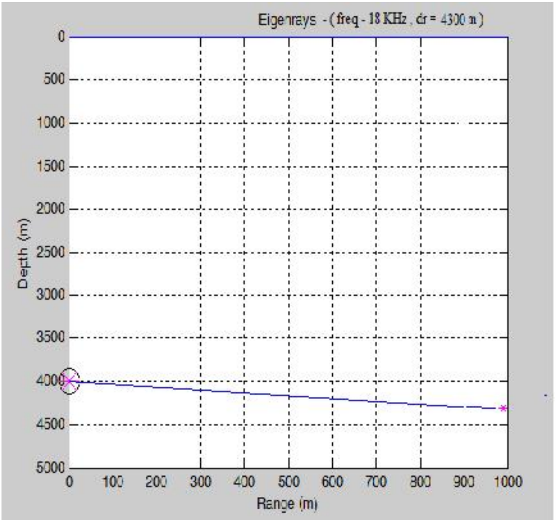


(b)

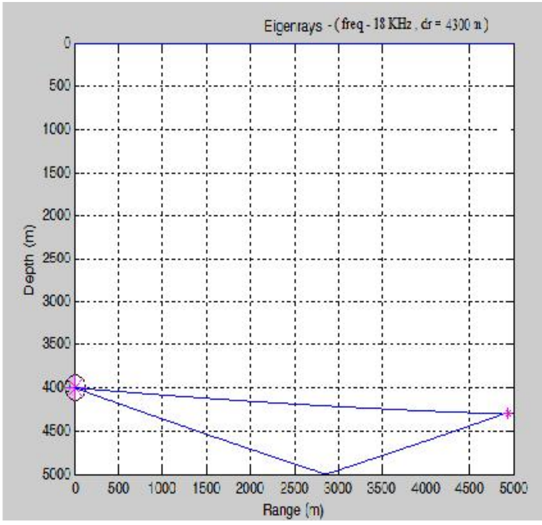


(c)

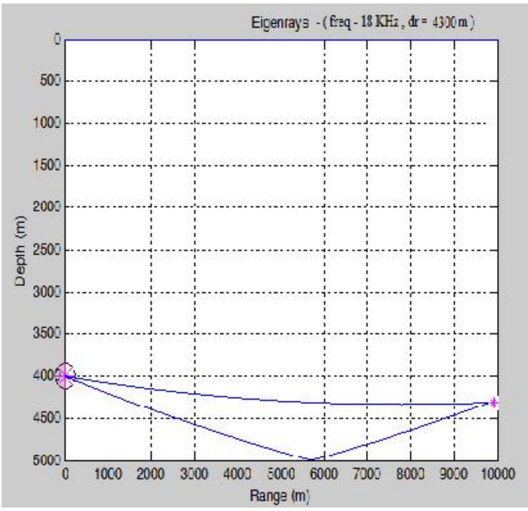
Εικόνα 4.44 Eigenrays - Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

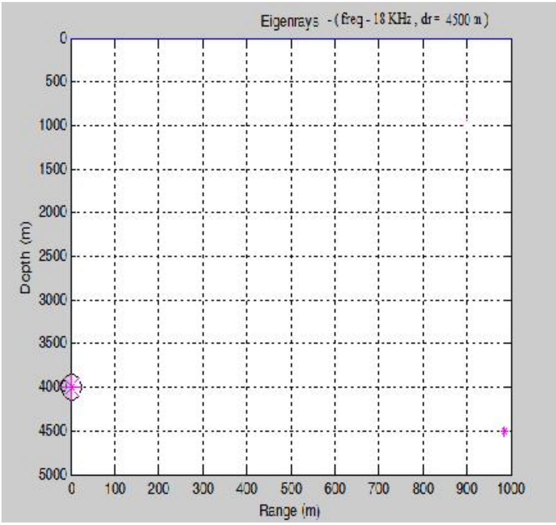


(b)

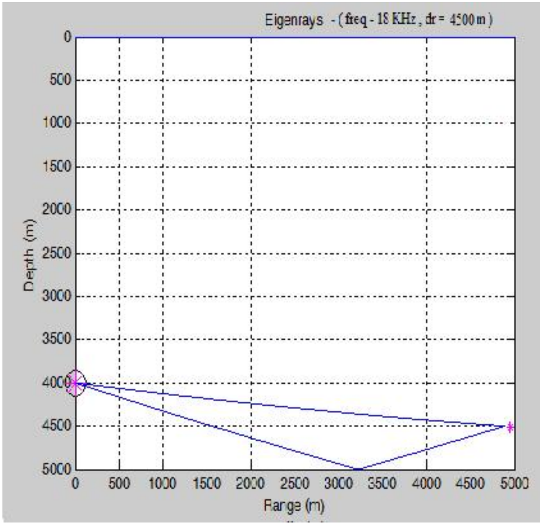


(c)

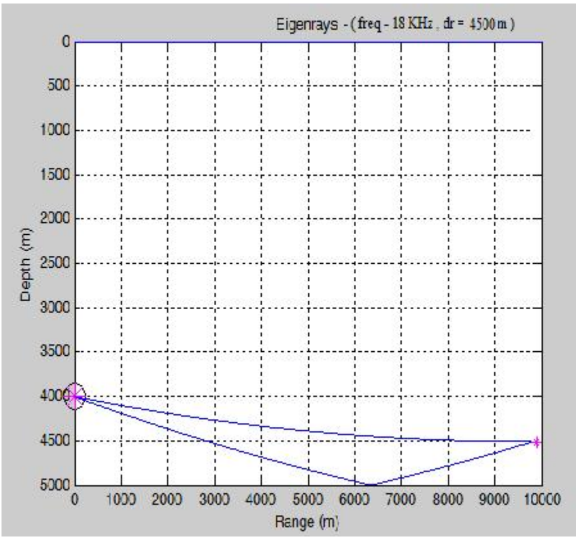
Εικόνα 4.45 Eigenrays - Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

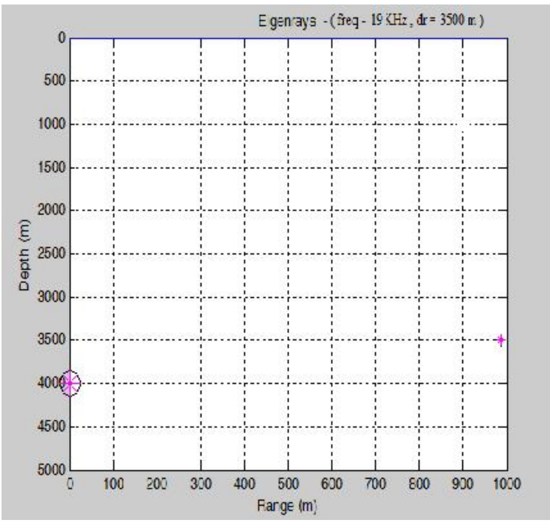


(b)

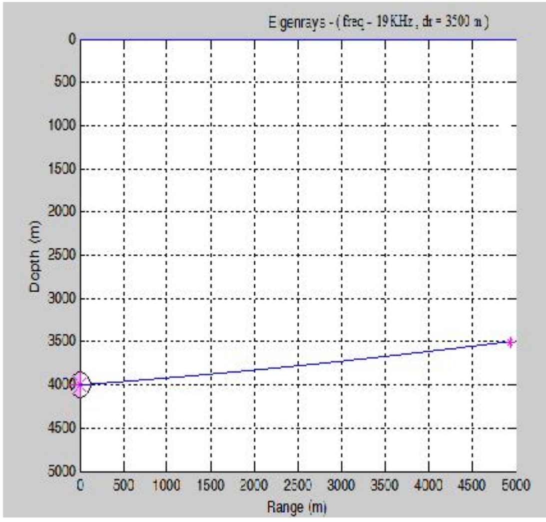


(c)

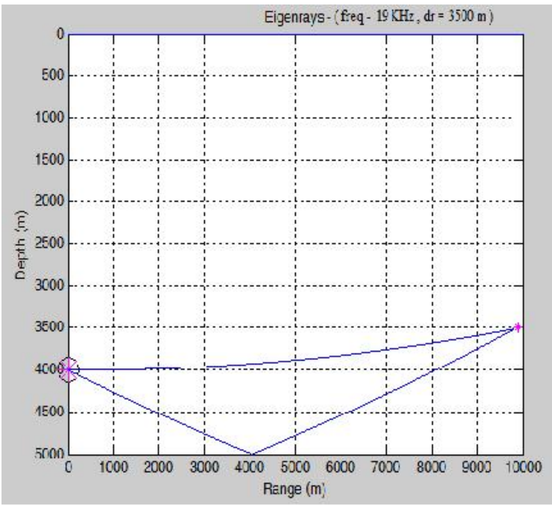
Εικόνα 4.46 Eigenrays - Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

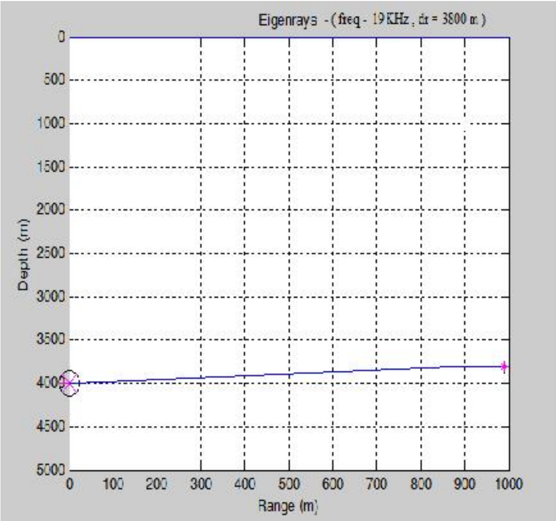


(b)

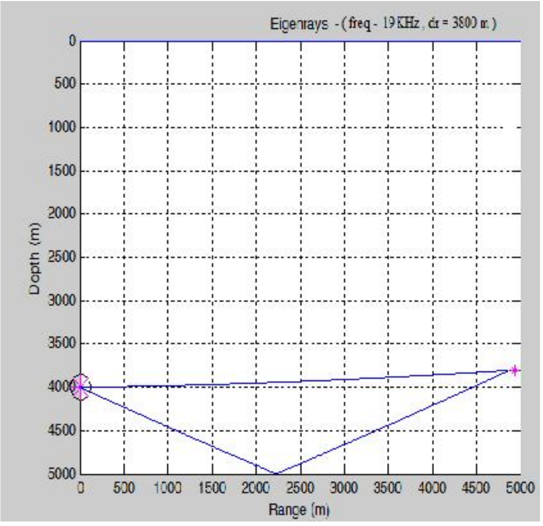


(c)

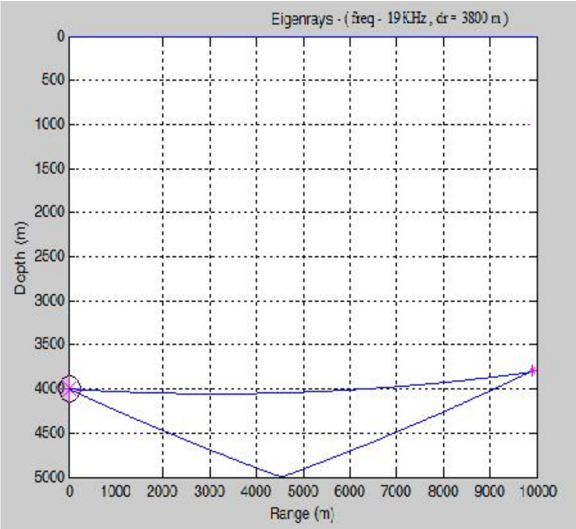
Εικόνα 4.47 Eigenrays - Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

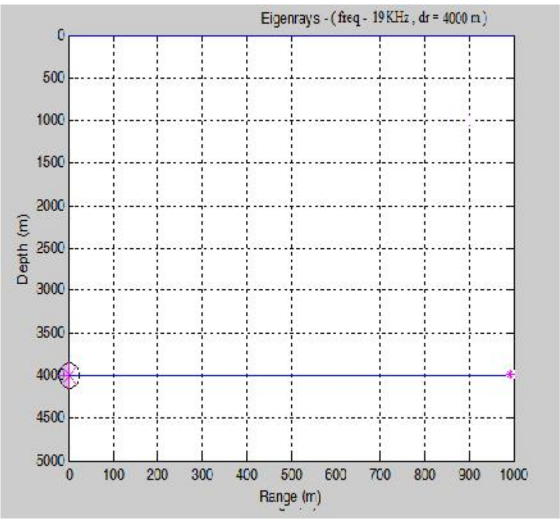


(b)

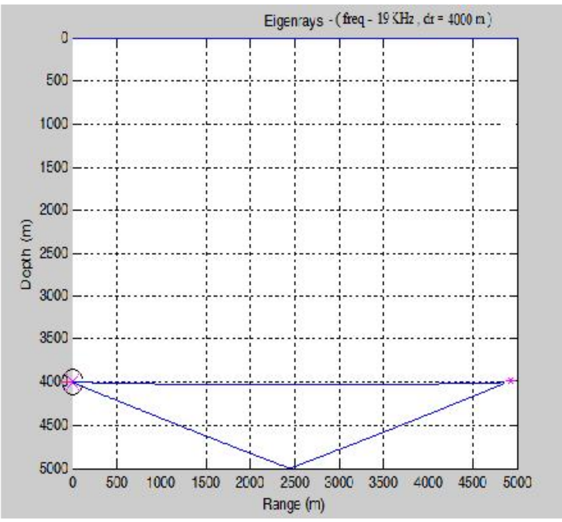


(c)

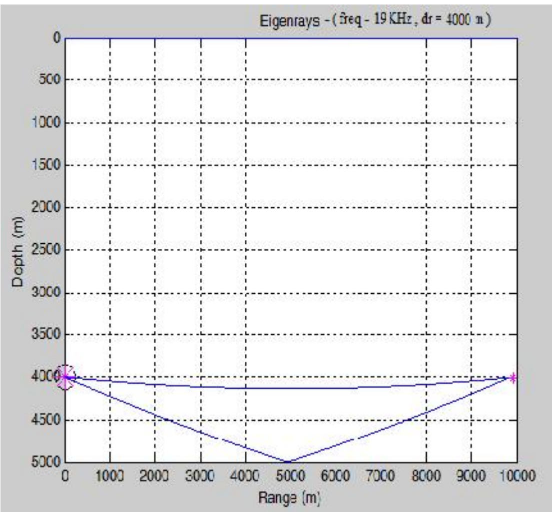
Εικόνα 4.48 Eigenrays - Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

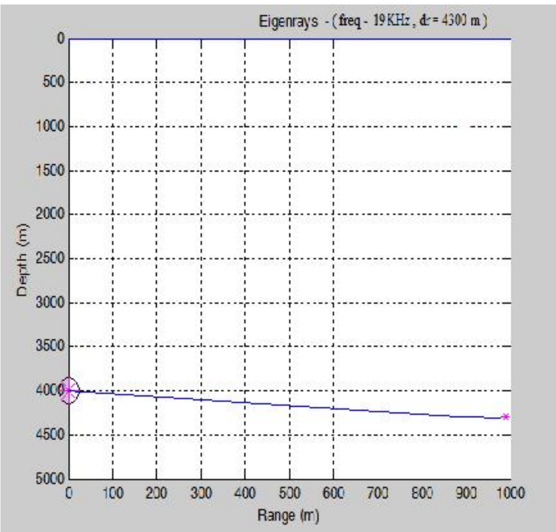


(b)

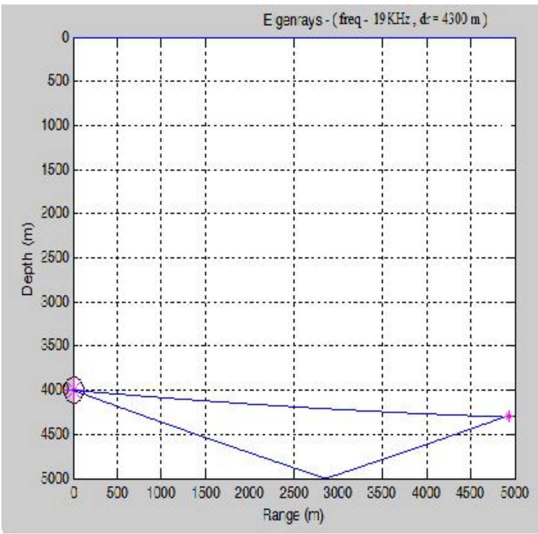


(c)

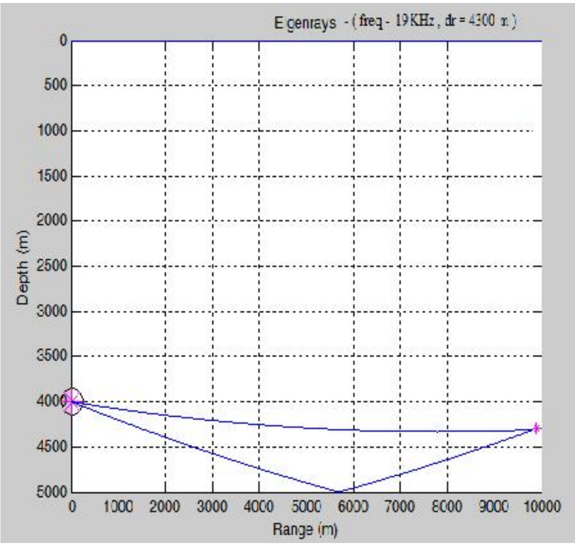
Εικόνα 4.49Eigenrays - Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

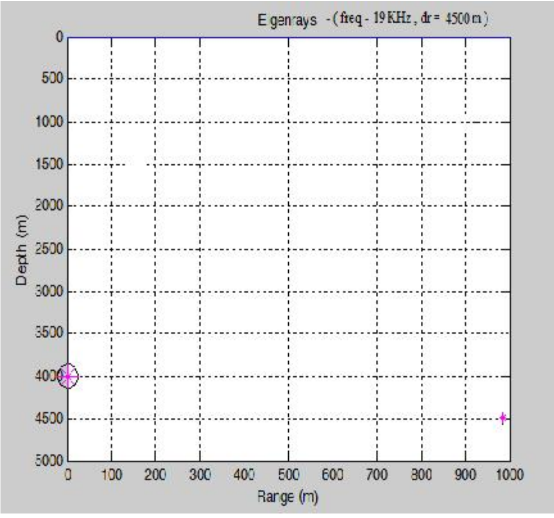


(b)

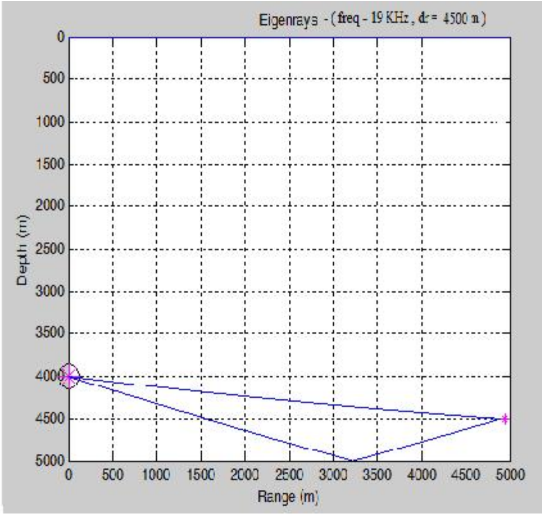


(c)

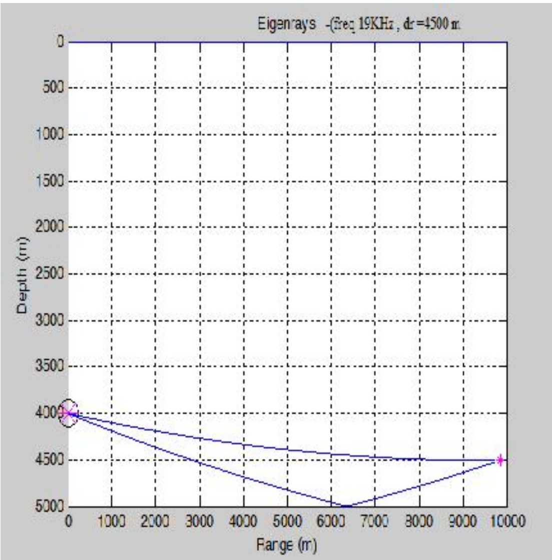
Εικόνα 4.50 Eigenrays - Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

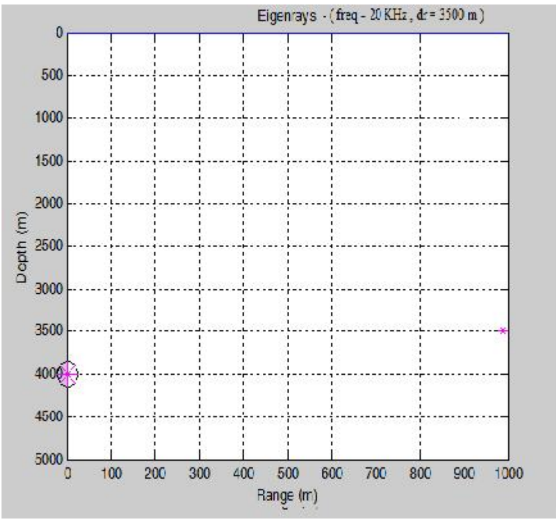


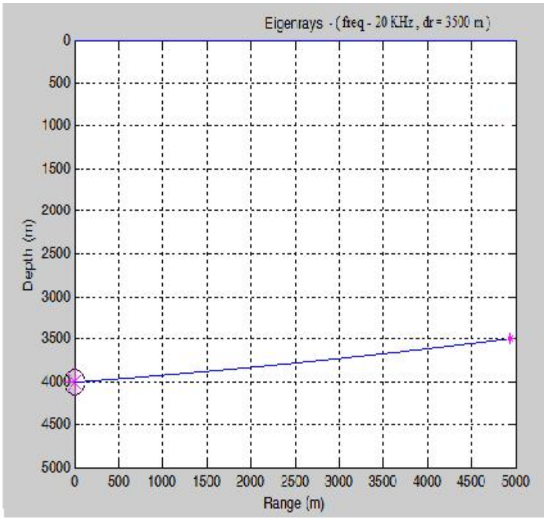
(b)



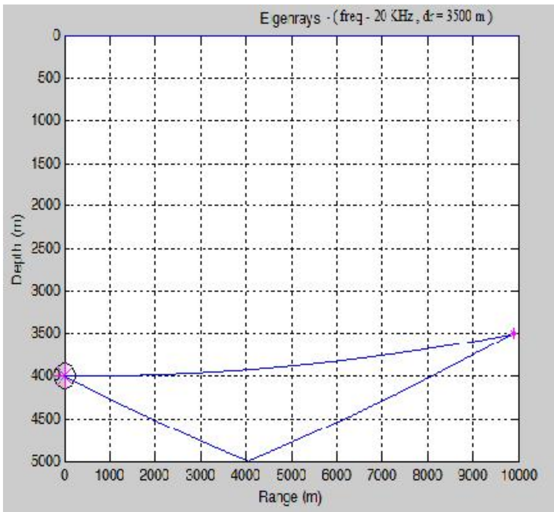
(c)

Εικόνα 4.51 Eigenrays - Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



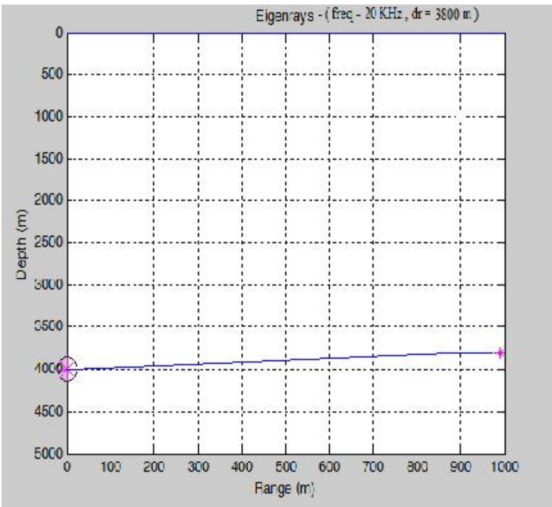


(a) **(b)**

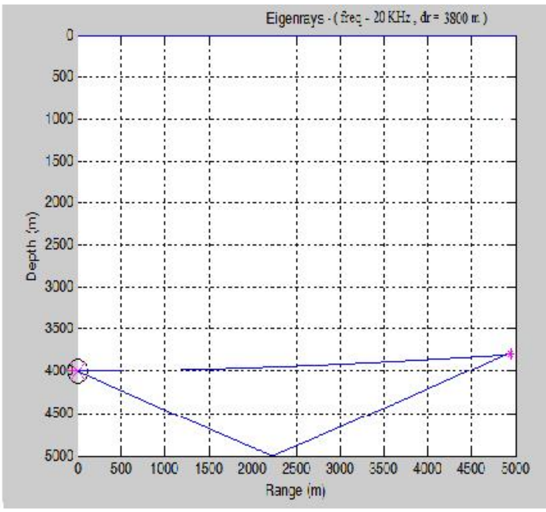


(c)

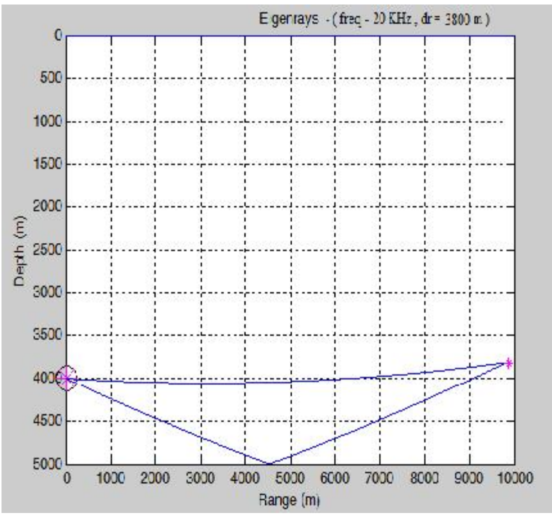
Εικόνα 4.52 Eigenrays - Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

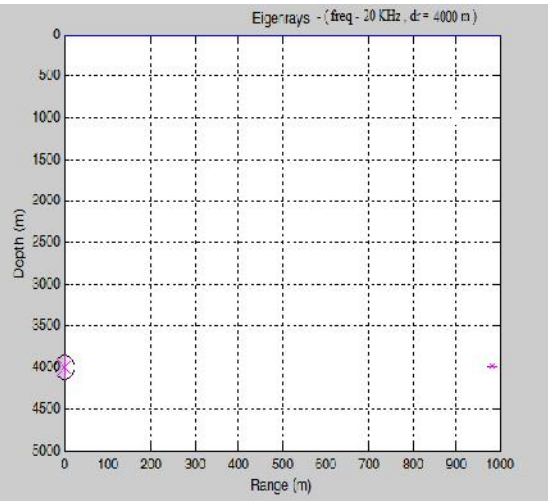


(b)

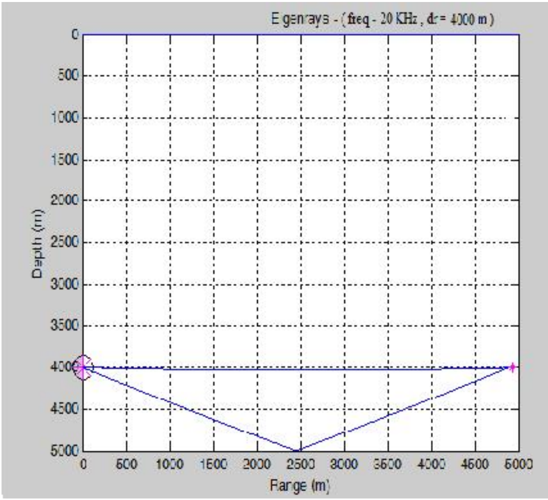


(c)

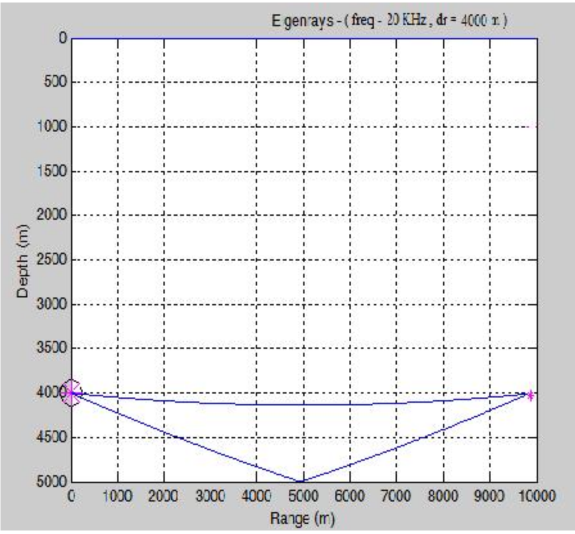
Εικόνα 4.53 Eigenrays - Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

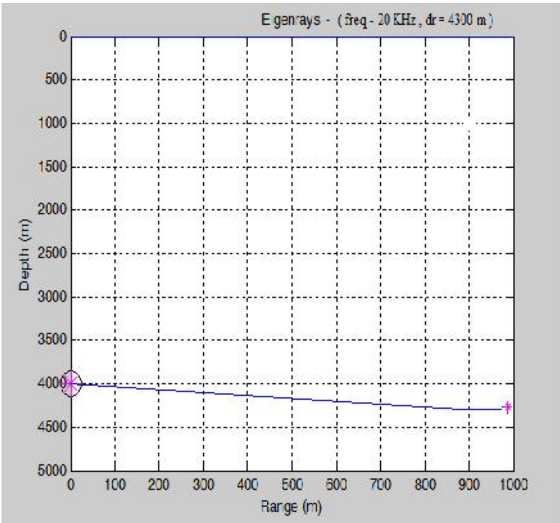


(b)

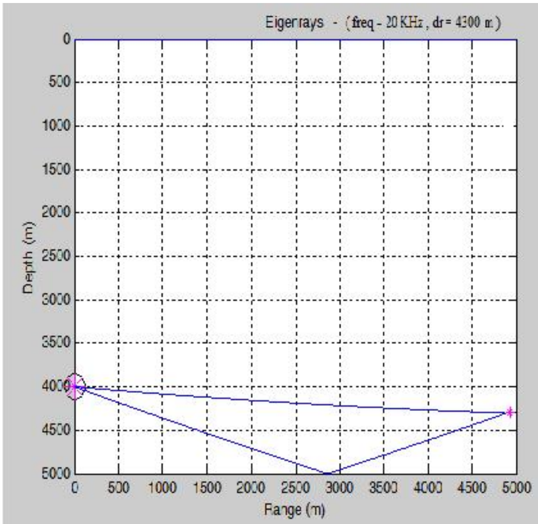


(c)

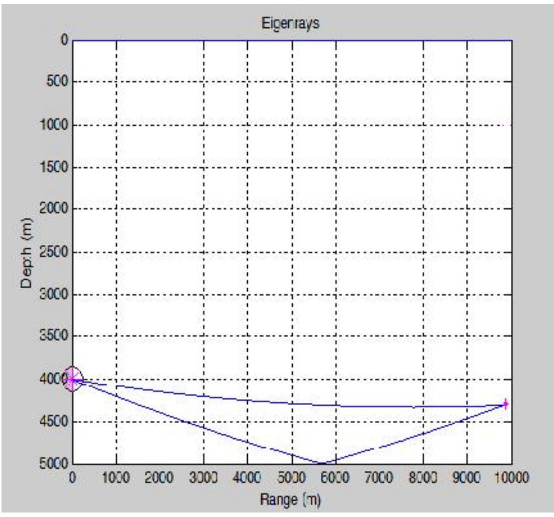
Εικόνα 4.54 Eigenrays - Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

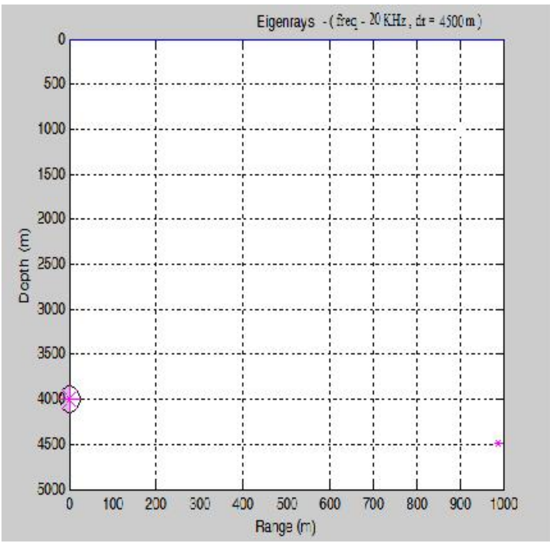


(b)

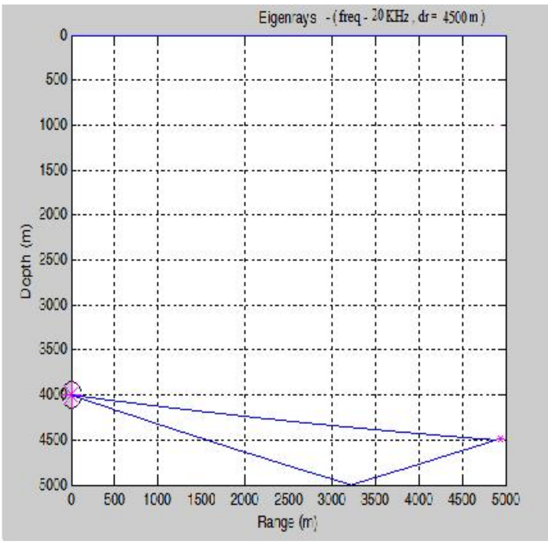


(c)

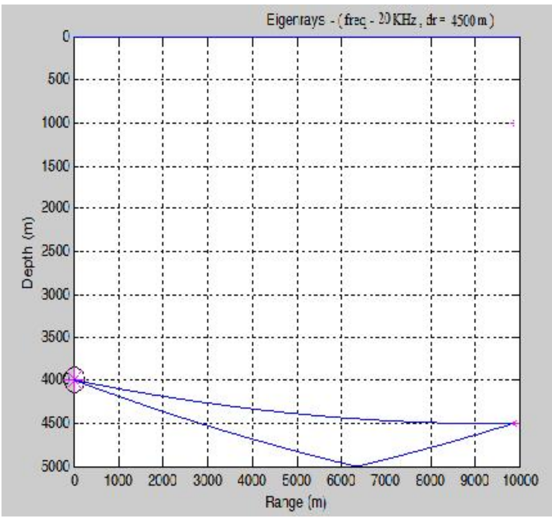
Εικόνα 4.55 Eigenrays - Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

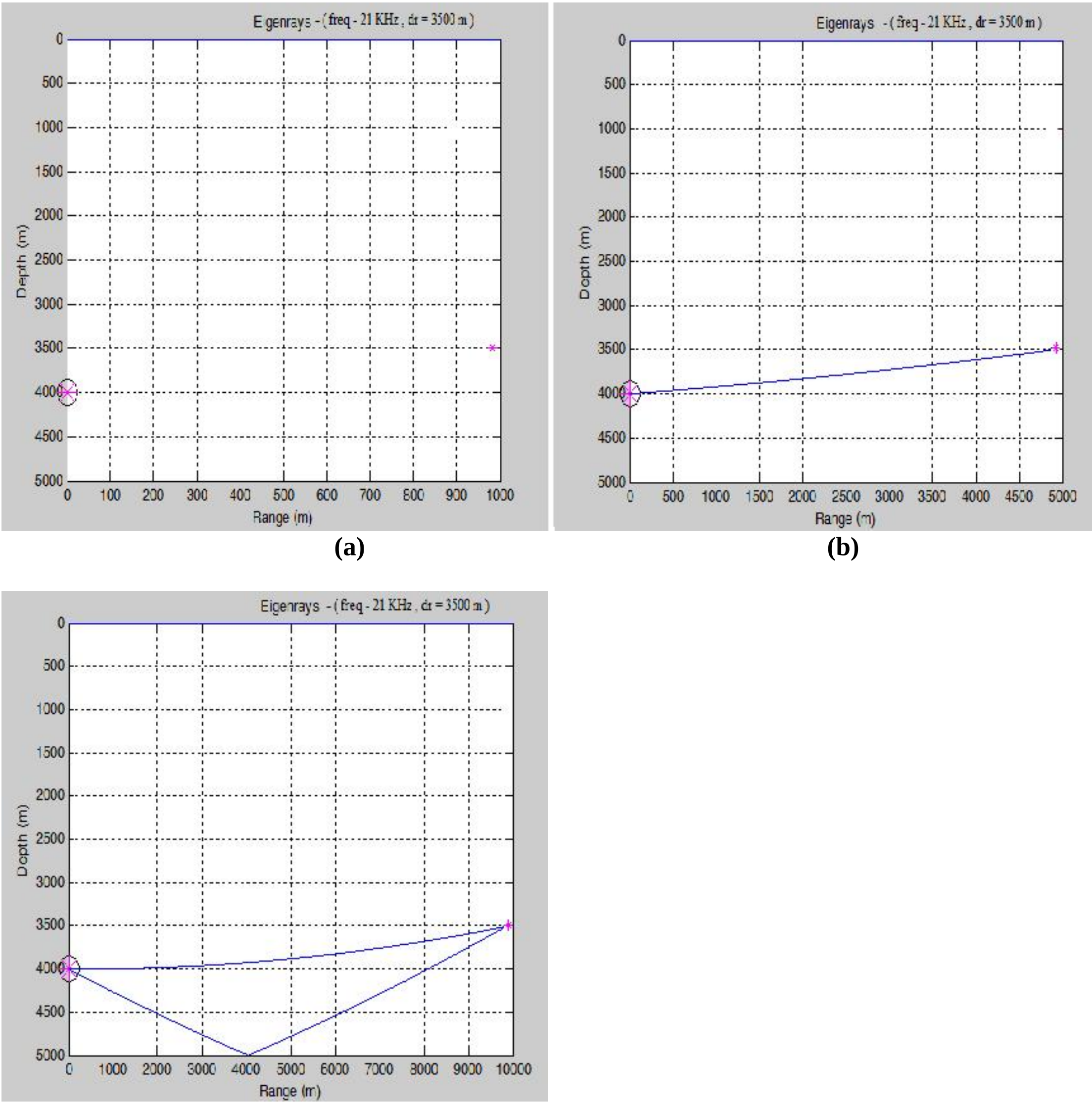


(b)



(c)

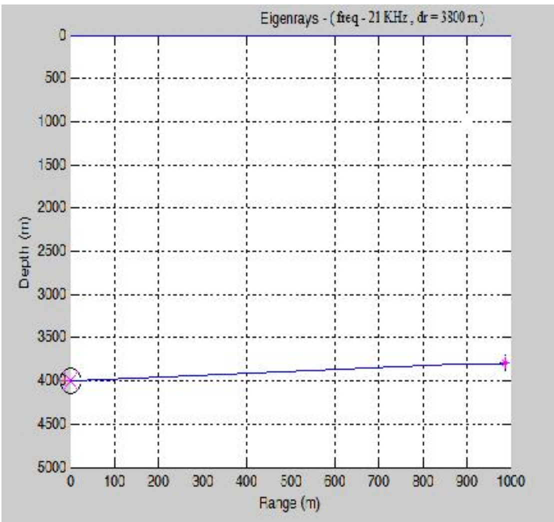
Εικόνα 4.56 Eigenrays - Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



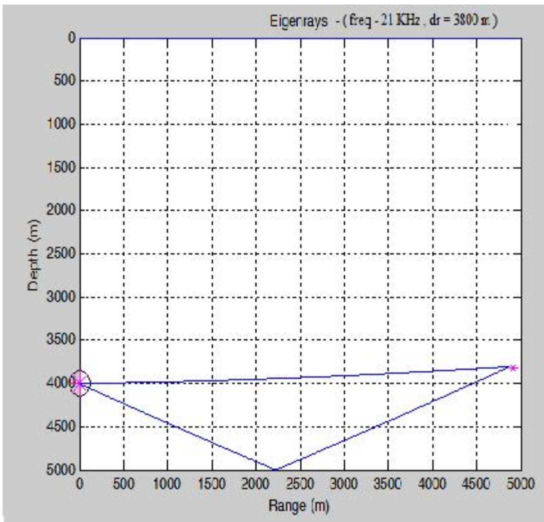
(a) (b)

(c)

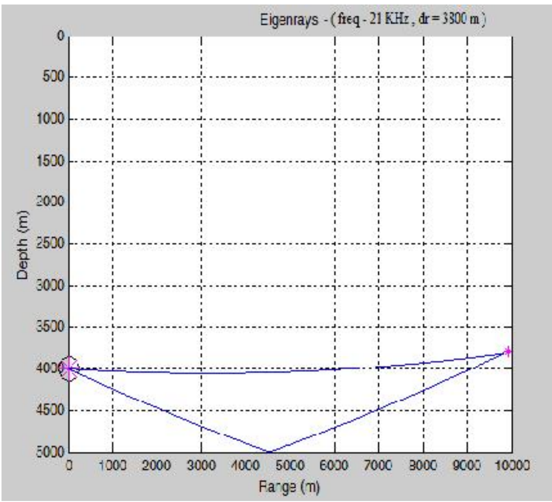
Εικόνα 4.57 Eigenrays - Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

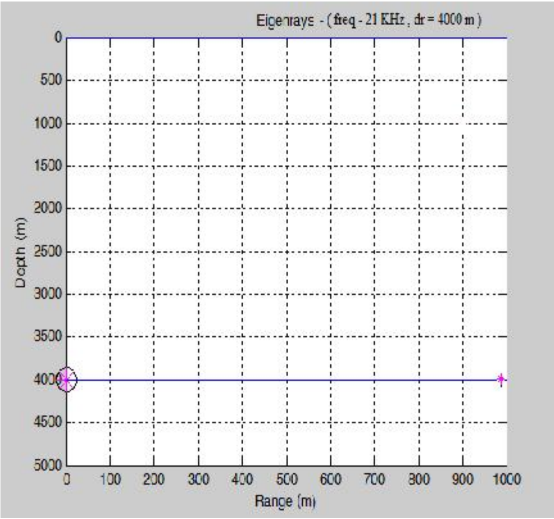


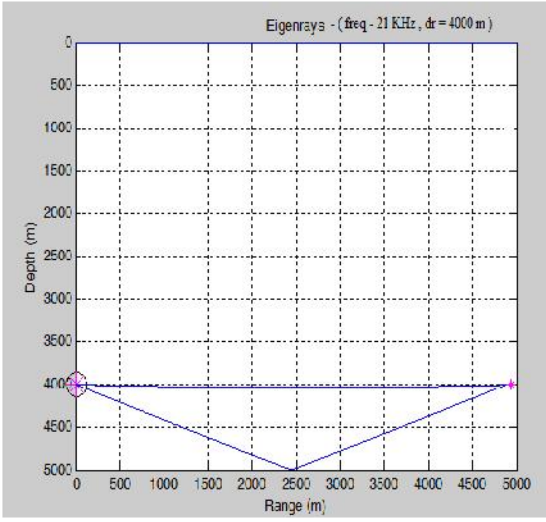
(b)



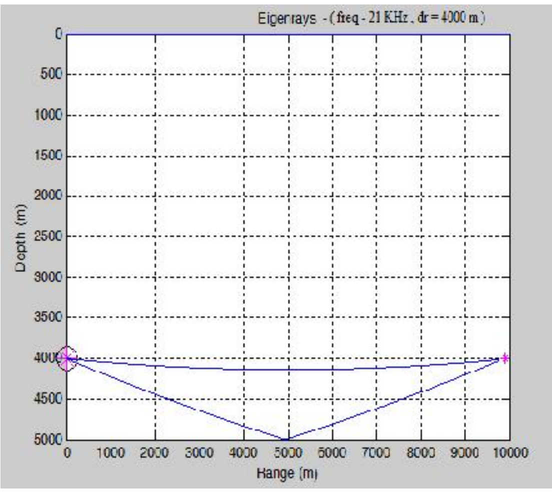
(c)

Εικόνα 4.58 Eigenrays - Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



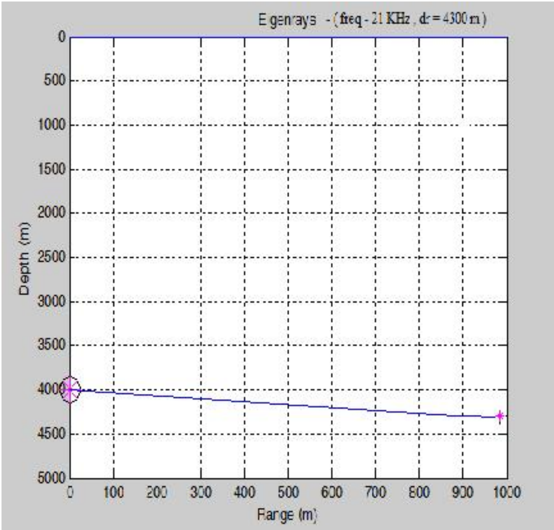


(a) **(b)**

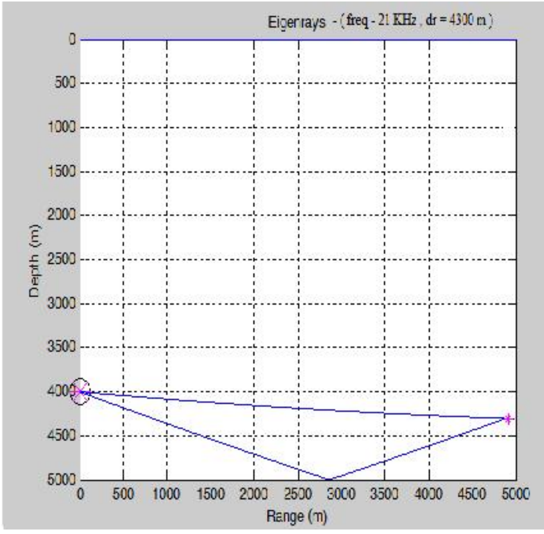


(c)

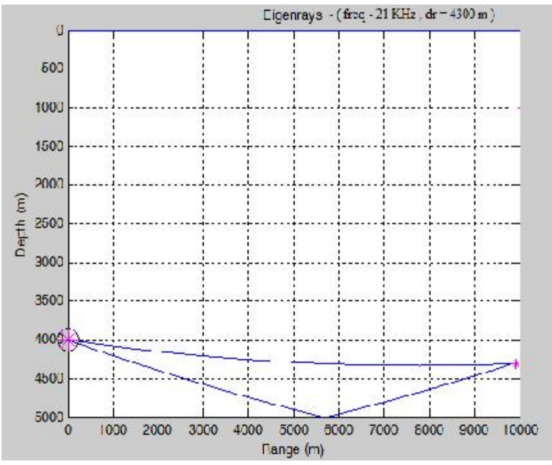
Εικόνα 4.59 Eigenrays - Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a)

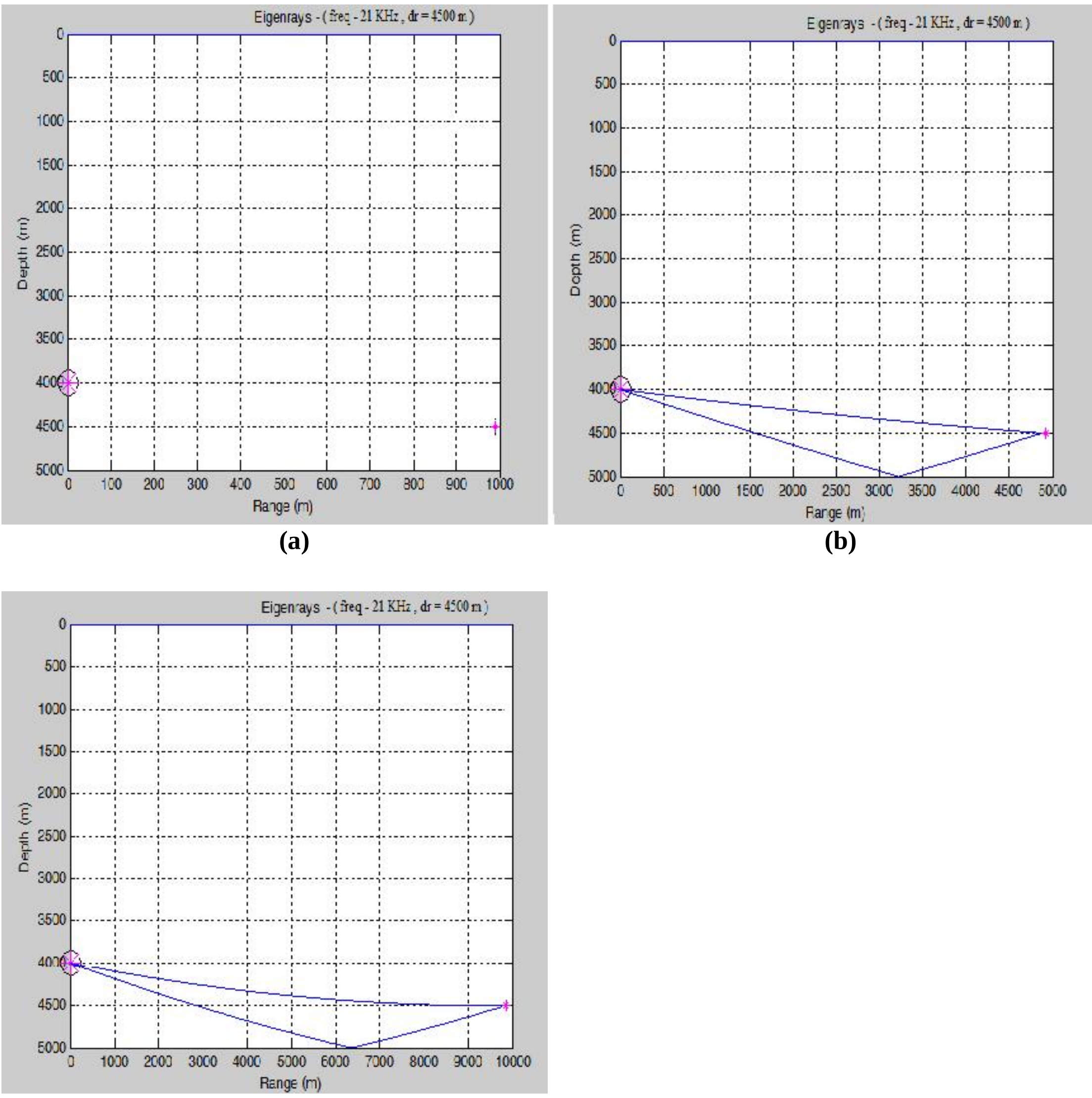


(b)



(c)

Εικόνα 4.60 Eigenrays - Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m



(a) **(b)**

(c)

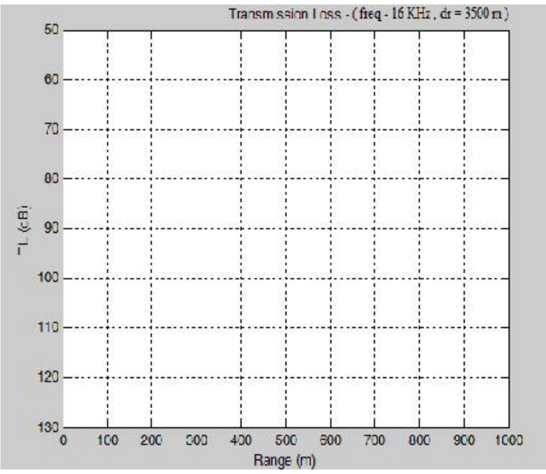
Εικόνα 4.61 Eigenrays - Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b)εύρος 5000m ,(c)10000m

4.3 Απώλεια διάδοσης (Transmission Loss)

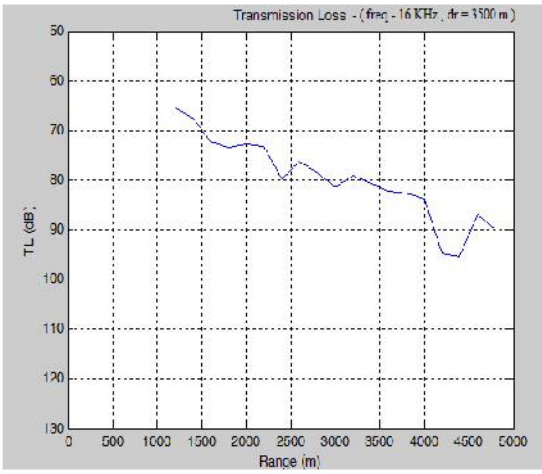
Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζουμε τα διαγράμματα της ανίχνευσης ακτίνων που θα δούμε παρακάτω

Βάθος	Συχνότητα (KHz)					
Δέκτη	16	17	18	19	20	21
3500	4.62	4.67	4.72	4.77	4.82	4.87
3800	4.63	4.68	4.73	4.78	4.83	4.88
4000	4.64	4.69	4.74	4.79	4.84	4.89
4300	4.65	4.70	4.75	4.80	4.85	4.90
4500	4.66	4.71	4.76	4.81	4.86	4.91

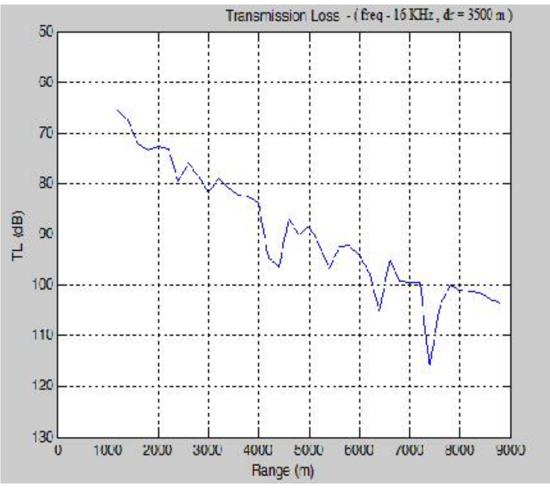
Πίνακας 4.3 Διαγράμματα Απώλειας διάδοσης



(a)

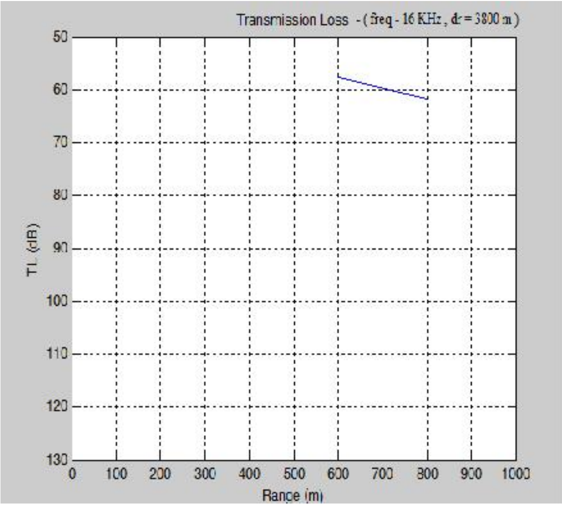


(b)

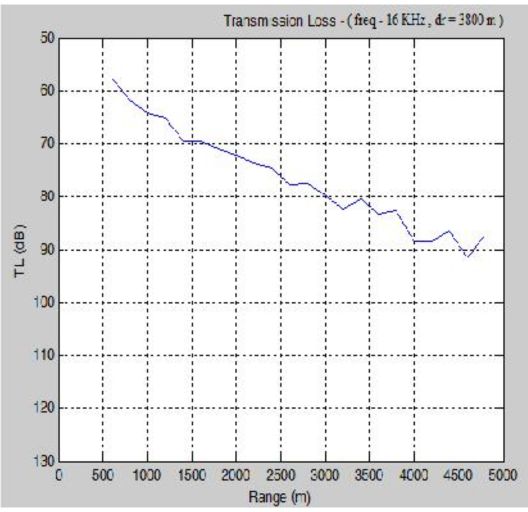


(c)

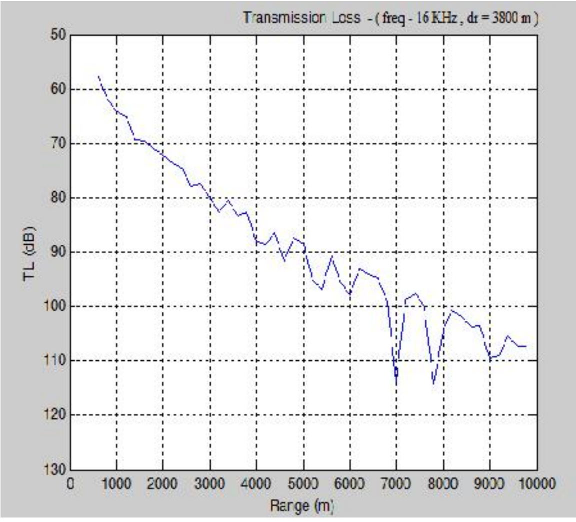
Εικόνα 4.62 Transmission Loss - Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

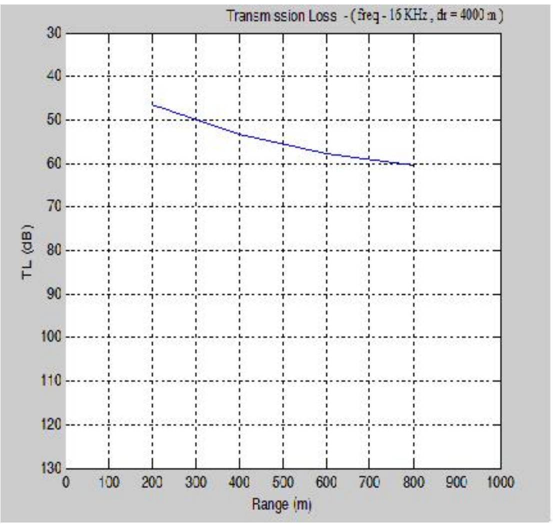


(b)

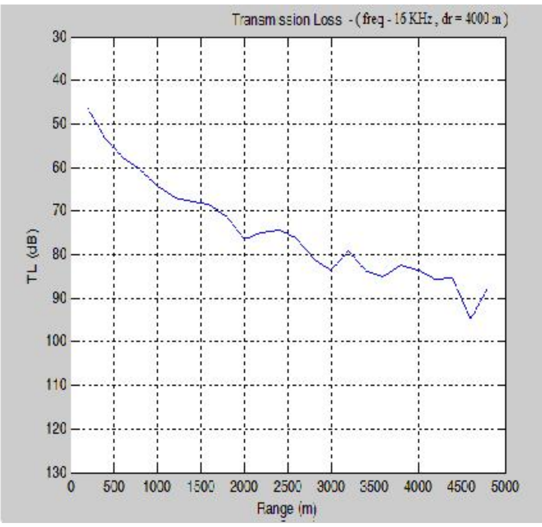


(c)

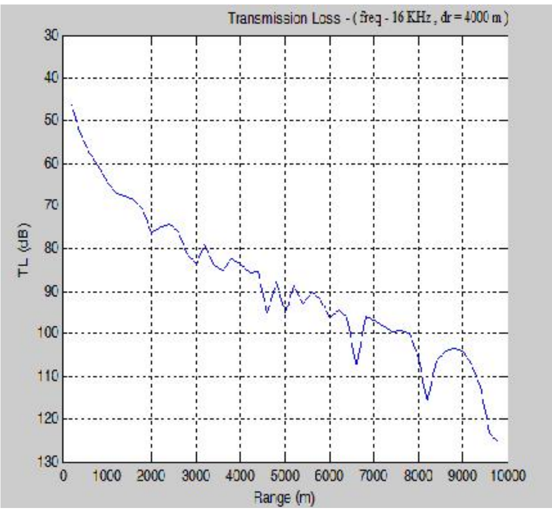
Εικόνα 4.63 Transmission Loss - Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

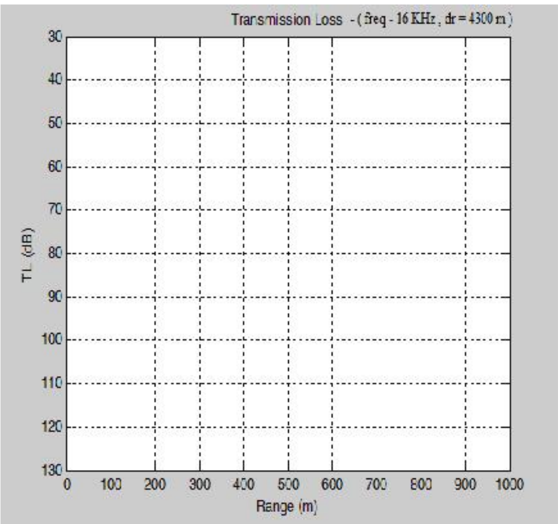


(b)

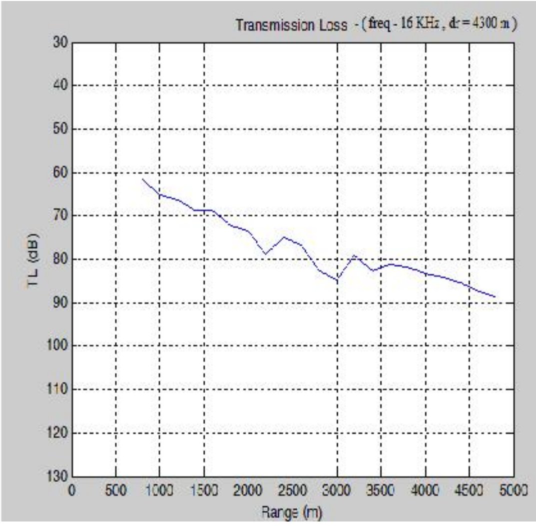


(c)

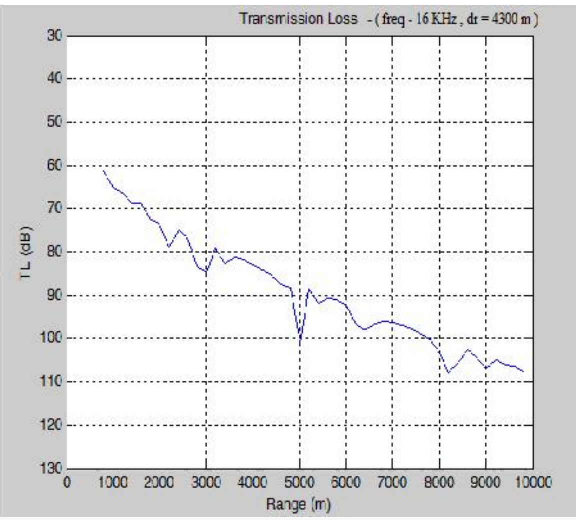
Εικόνα 4.64 Transmission Loss - Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

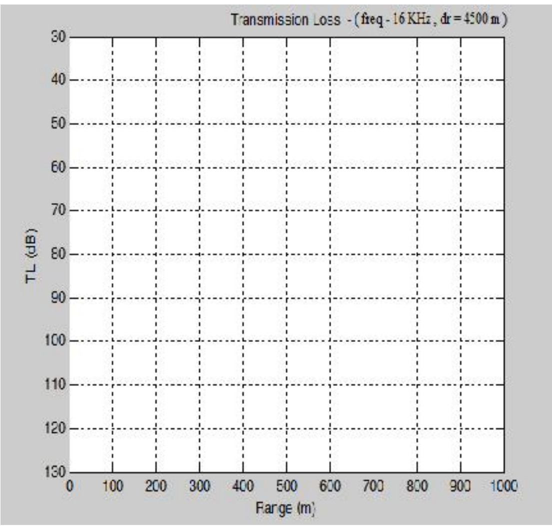


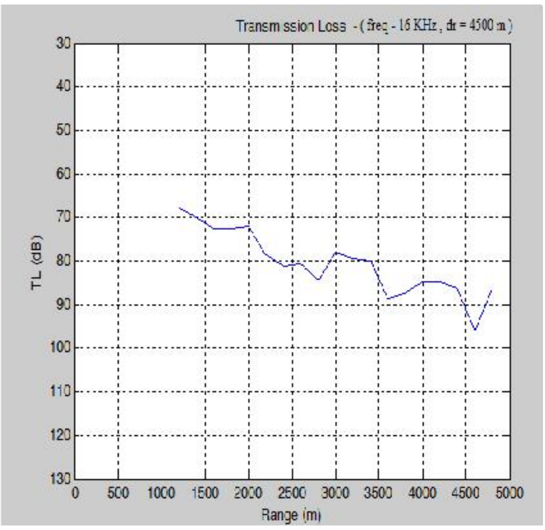
(b)



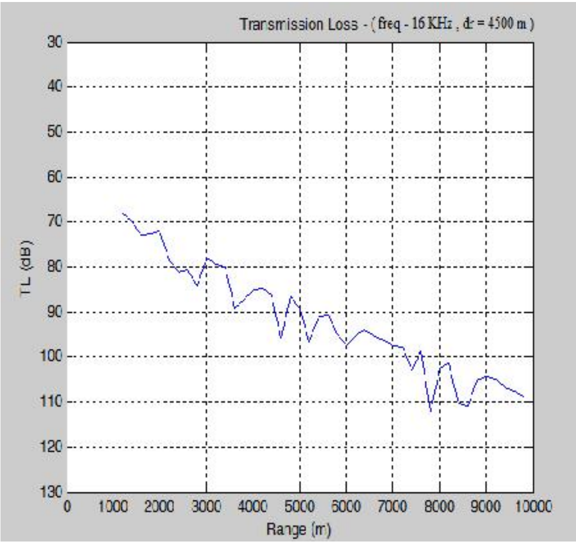
(c)

Εικόνα 4.65 Transmission Loss - Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



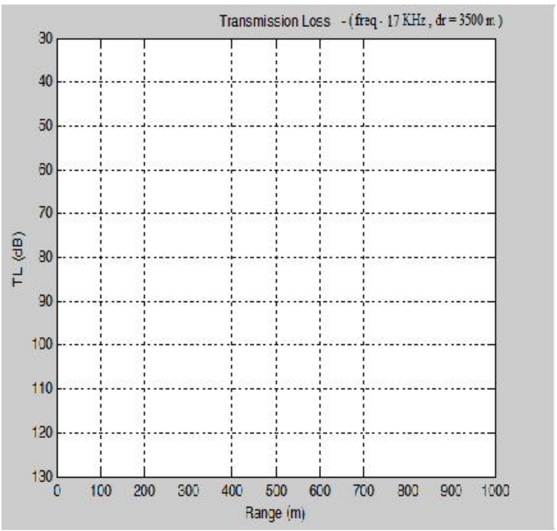


(a) (b)

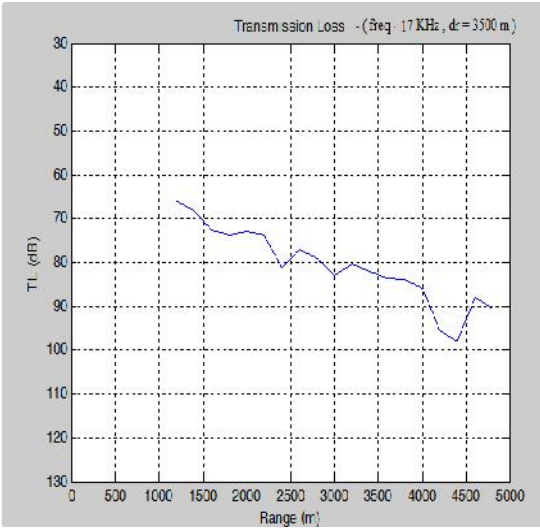


(c)

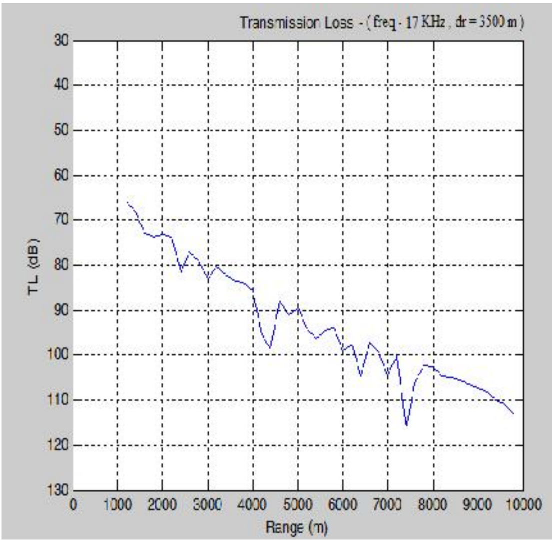
Εικόνα 4.66 Transmission Loss - Για συχνότητα 16KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

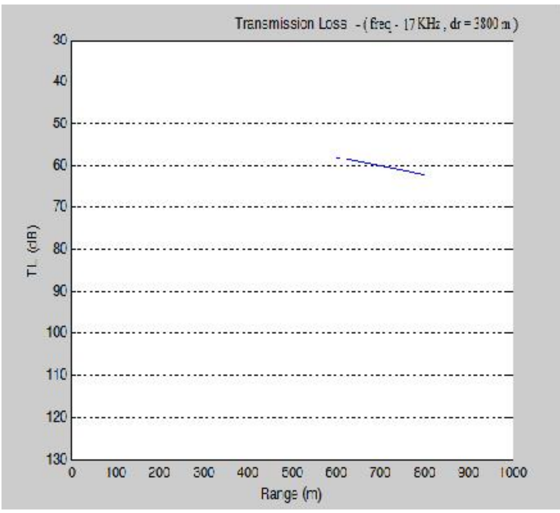


(b)

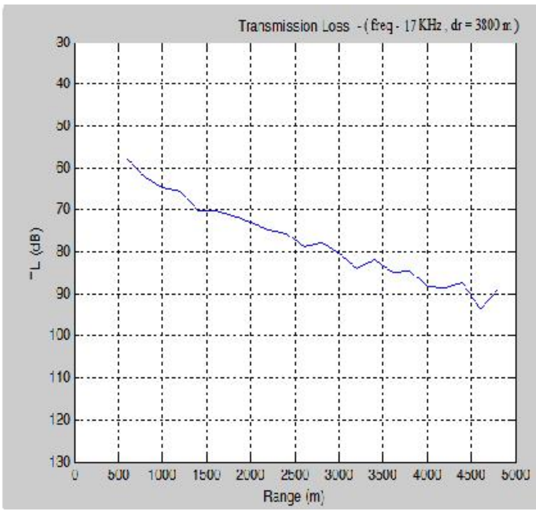


(c)

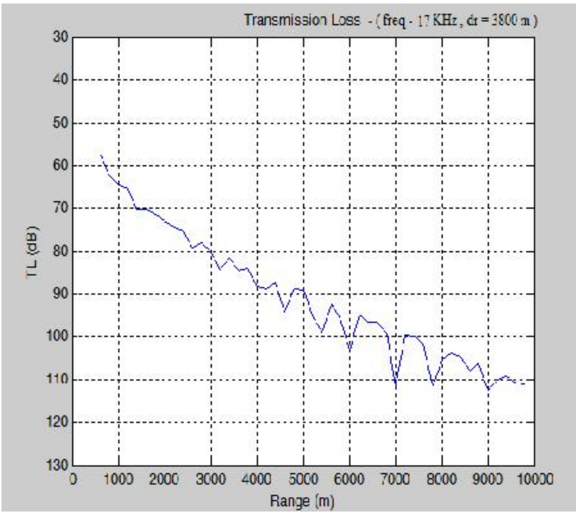
Εικόνα 4.67 Transmission Loss - Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

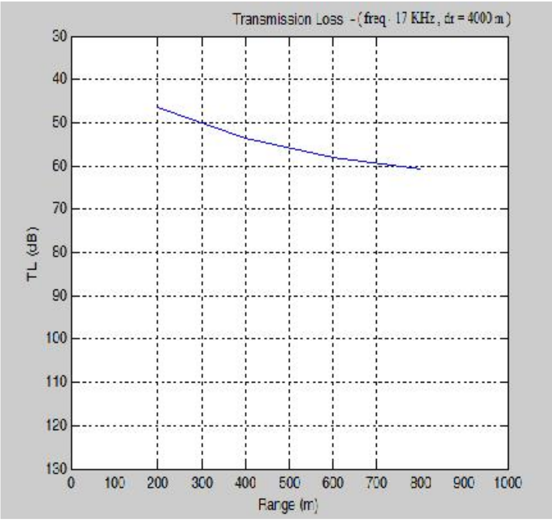


(b)

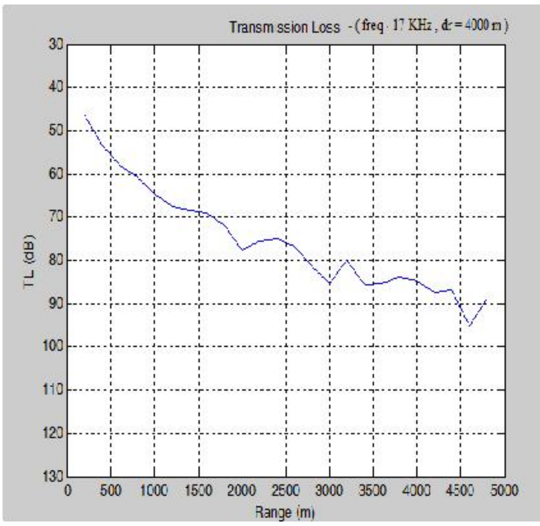


(c)

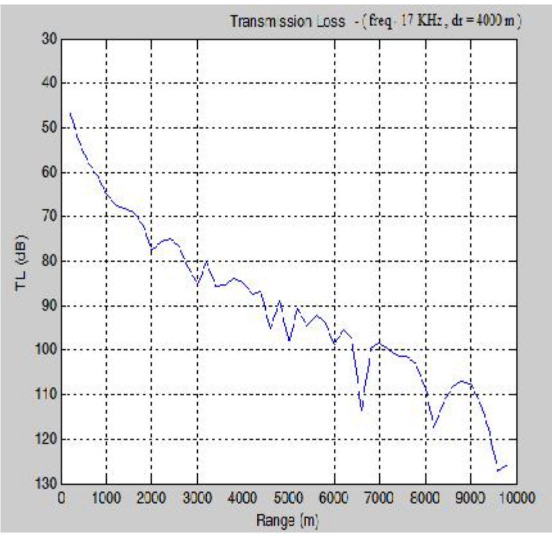
Εικόνα 4.68 Transmission Loss - Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

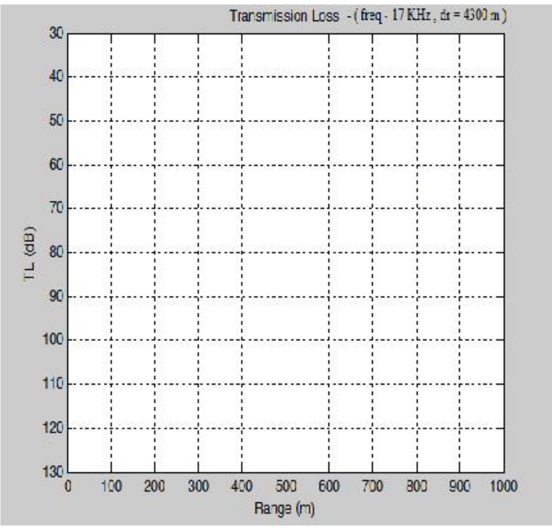


(b)

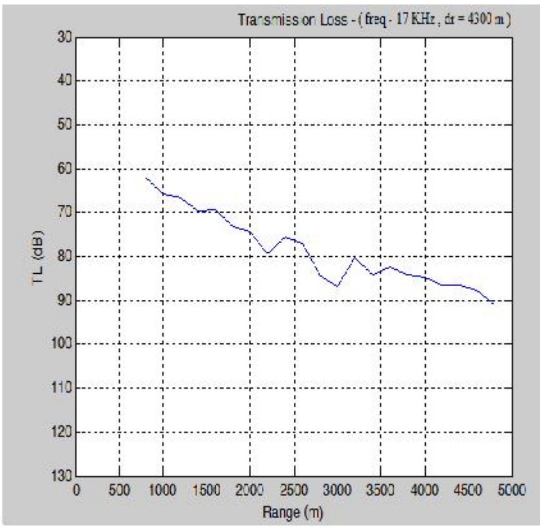


(c)

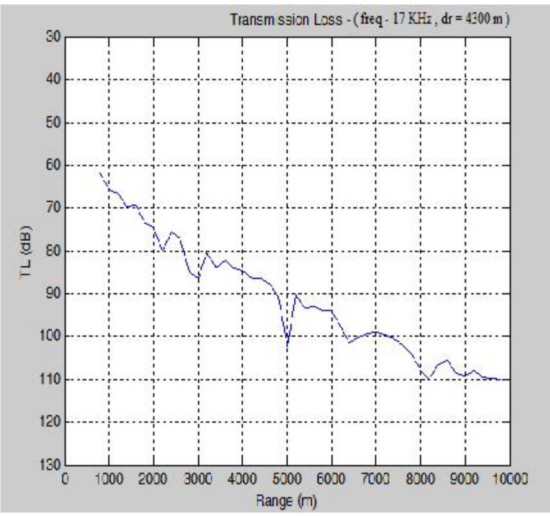
Εικόνα 4.69 Transmission Loss - Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

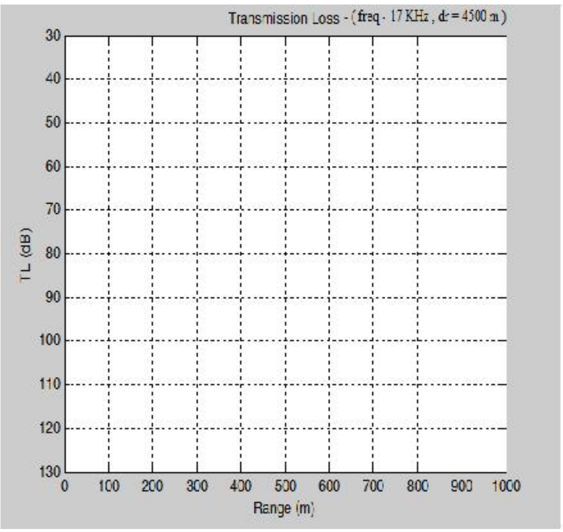


(b)

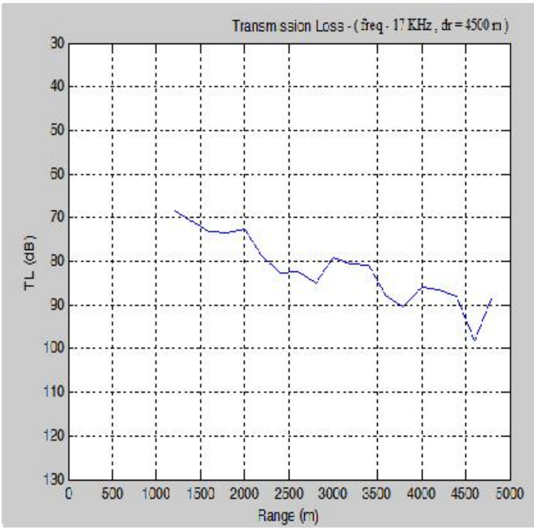


(c)

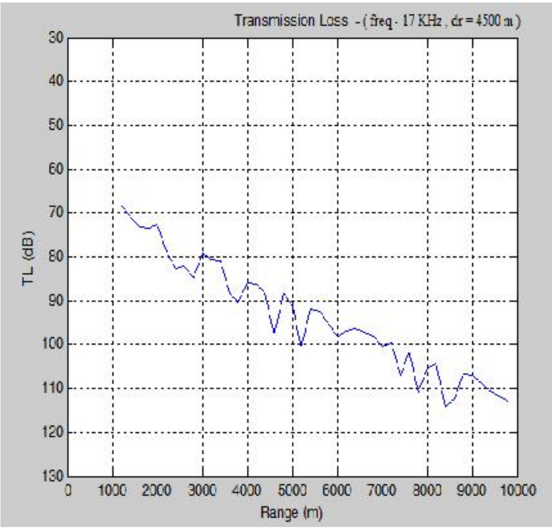
Εικόνα 4.70 Transmission Loss - Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

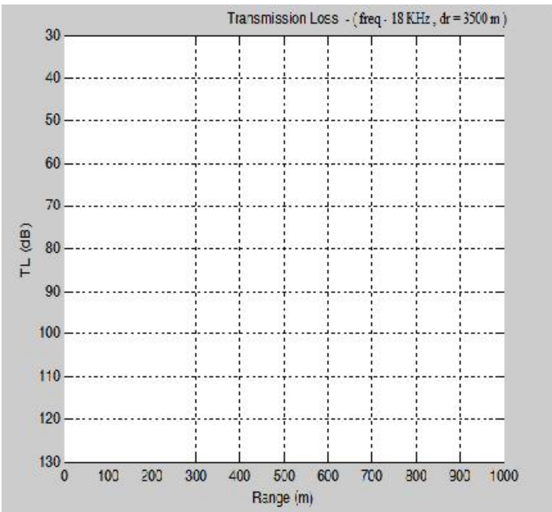


(b)

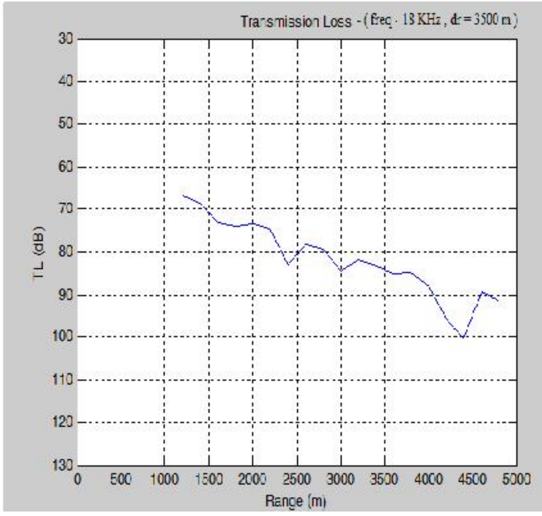


(c)

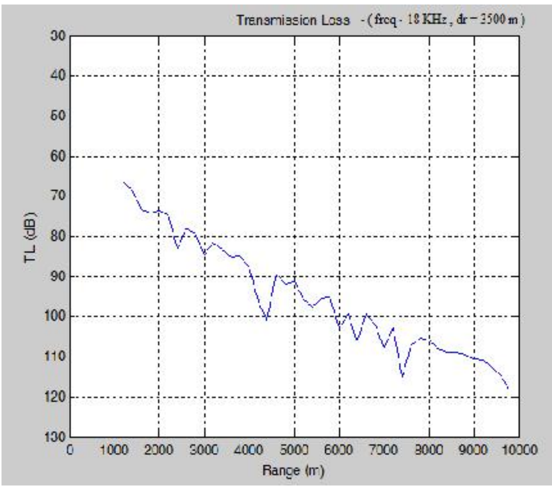
Εικόνα 4.71 Transmission Loss - Για συχνότητα 17KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

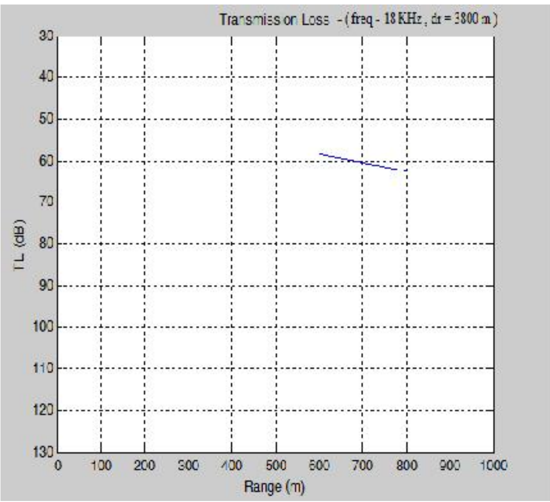


(b)

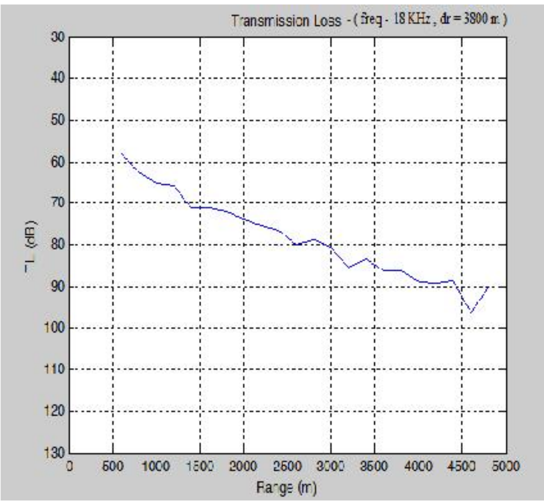


(c)

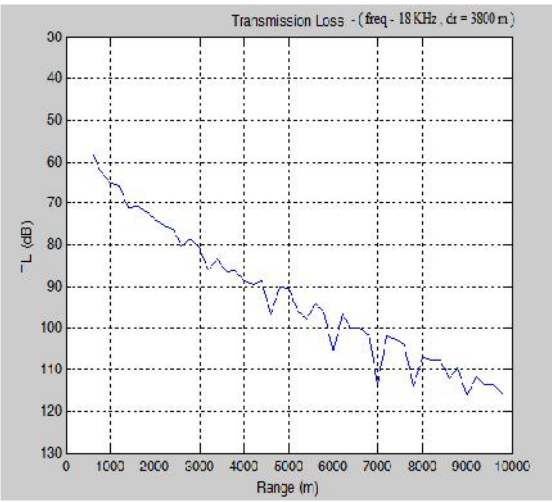
Εικόνα 4.72 Transmission Loss - Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a)εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

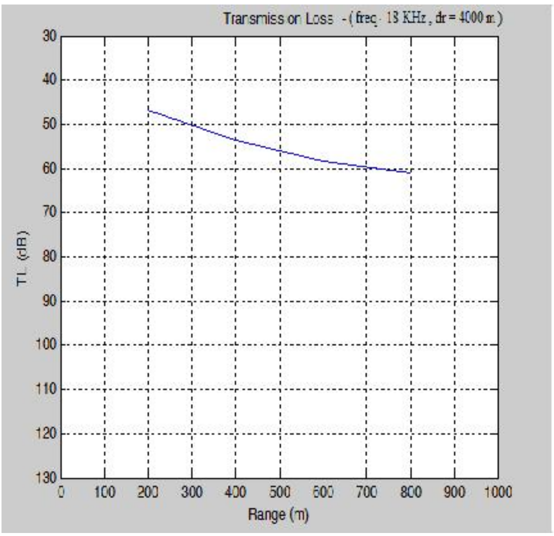


(b)

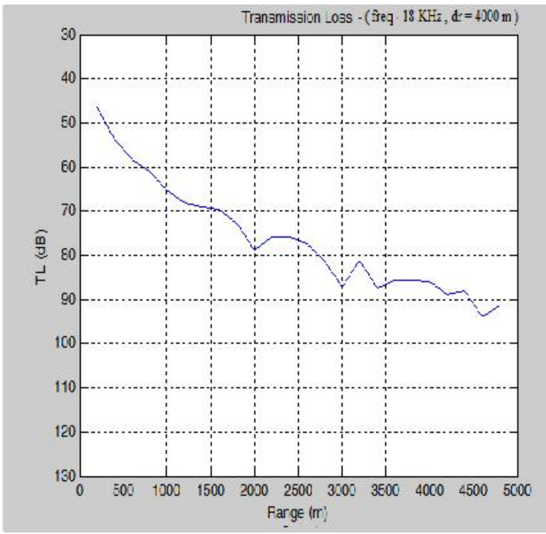


(c)

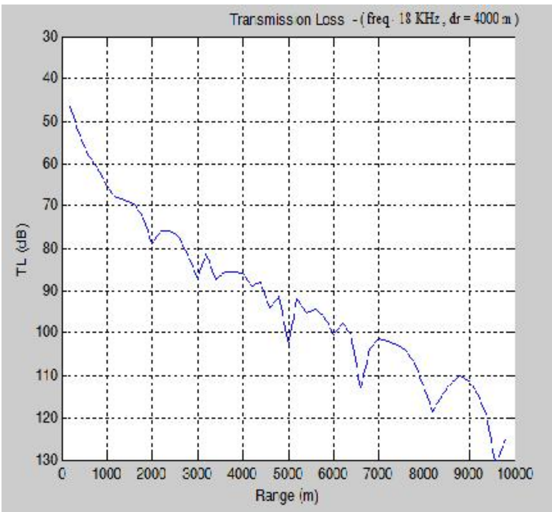
Εικόνα 4.73Transmission Loss - Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

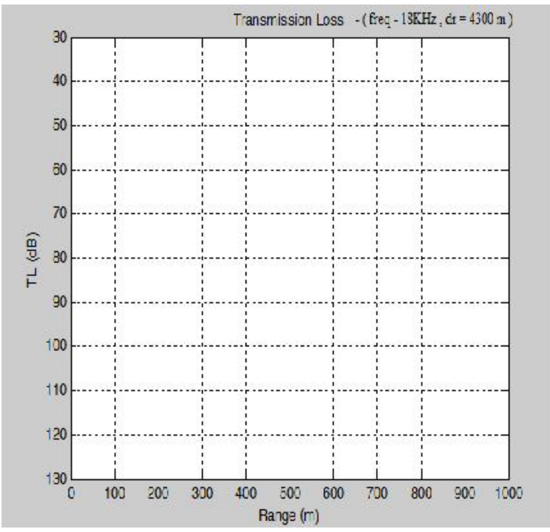


(b)

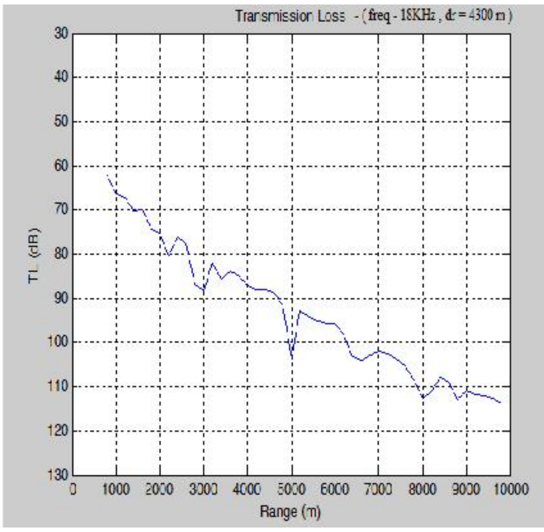


(c)

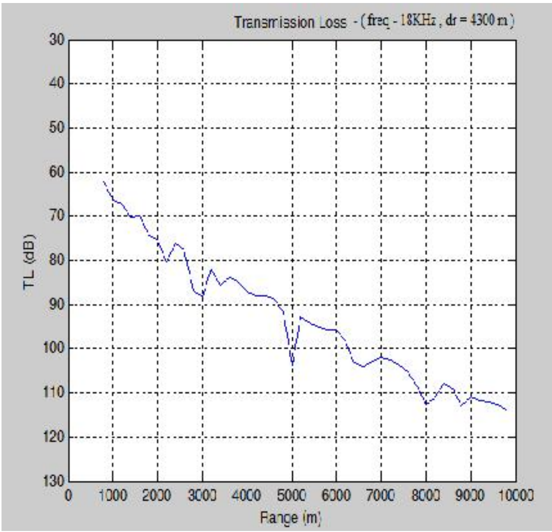
Εικόνα 4.74 Transmission Loss - Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

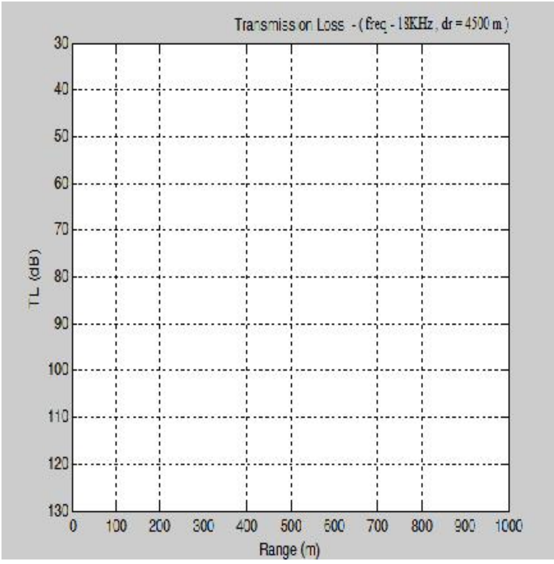


(b)

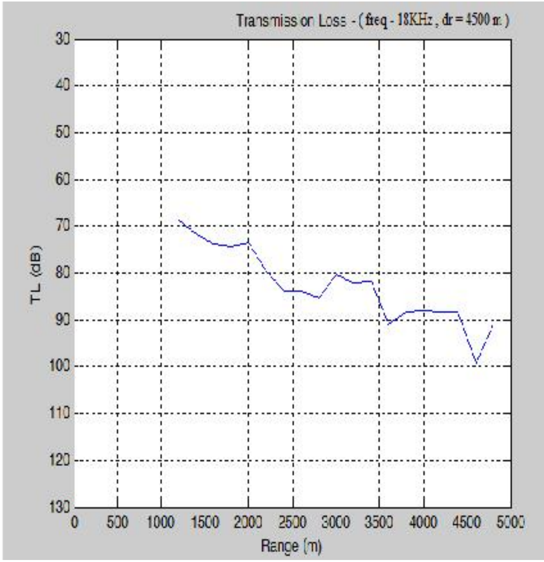


(c)

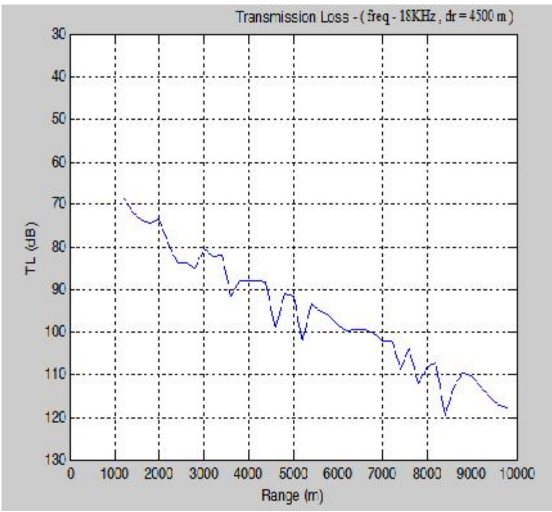
Εικόνα 4.75 Transmission Loss - Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

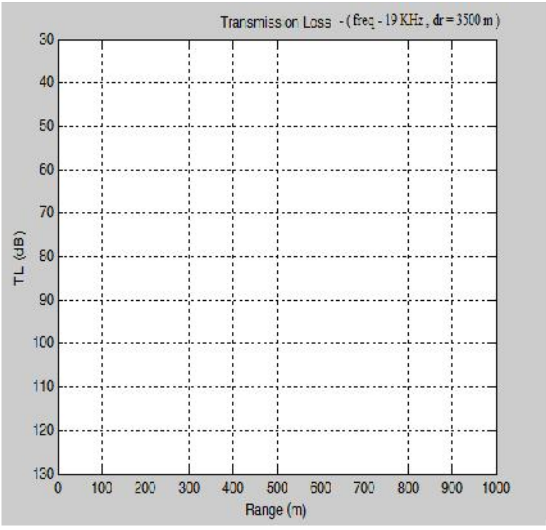


(b)

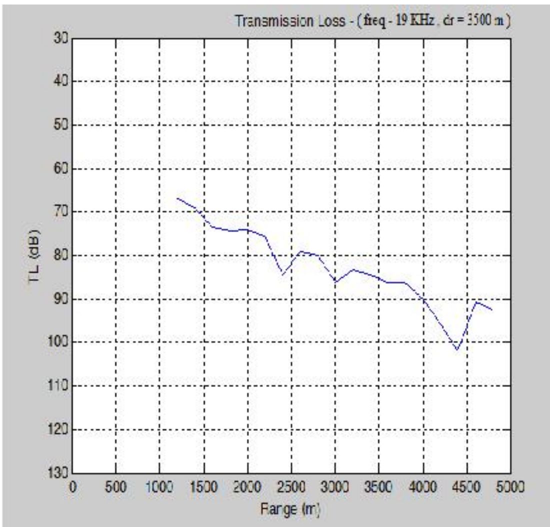


(c)

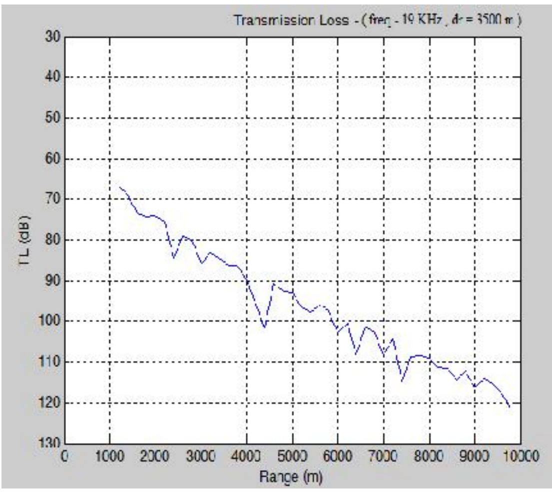
Εικόνα 4.76 Transmission Loss - Για συχνότητα 18KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

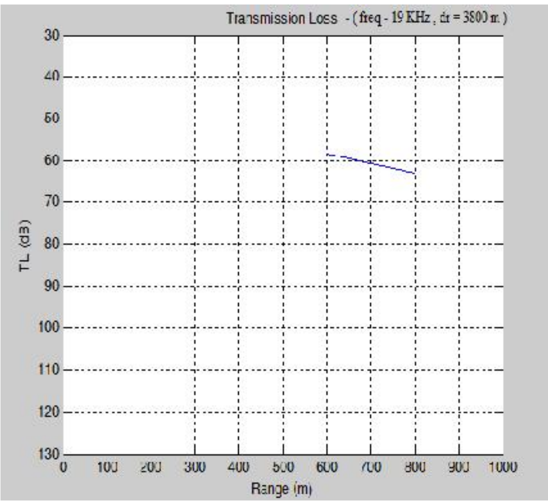


(b)

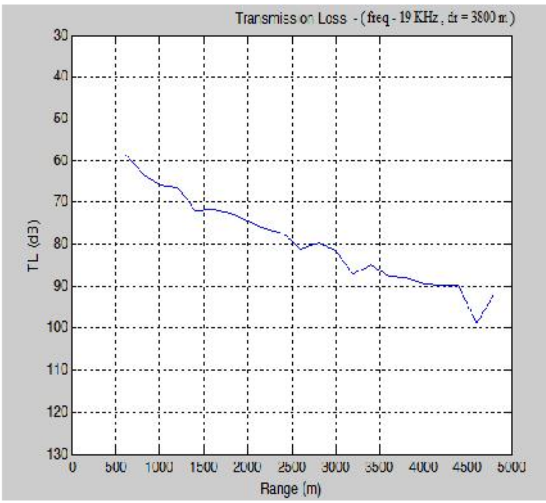


(c)

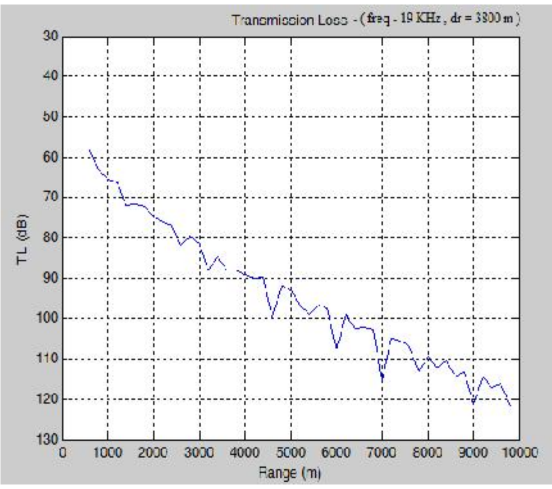
Εικόνα 4.77 Transmission Loss - Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

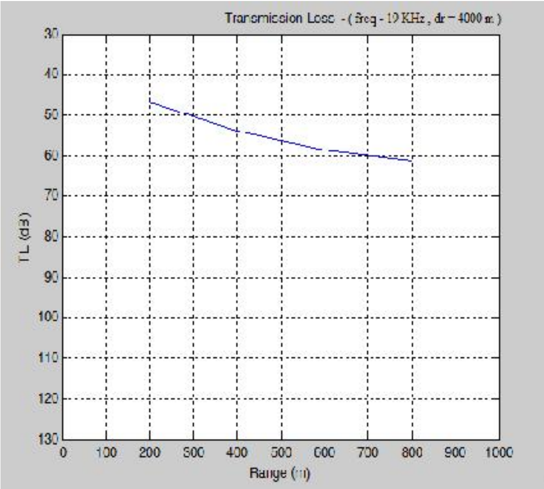


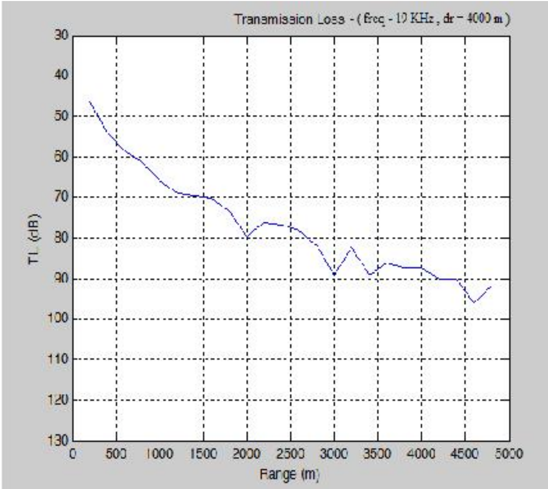
(b)



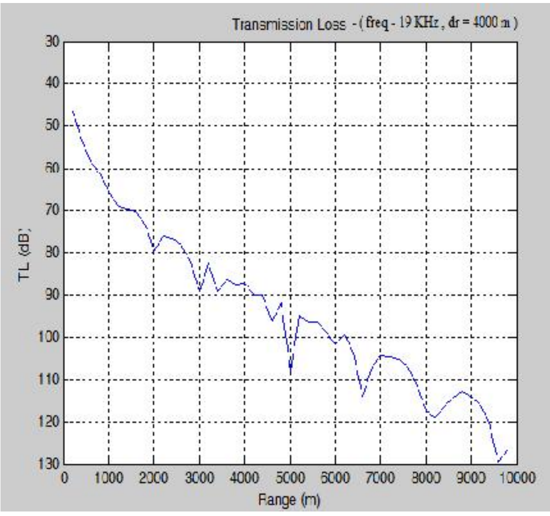
(c)

Εικόνα 4.78 Transmission Loss - Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



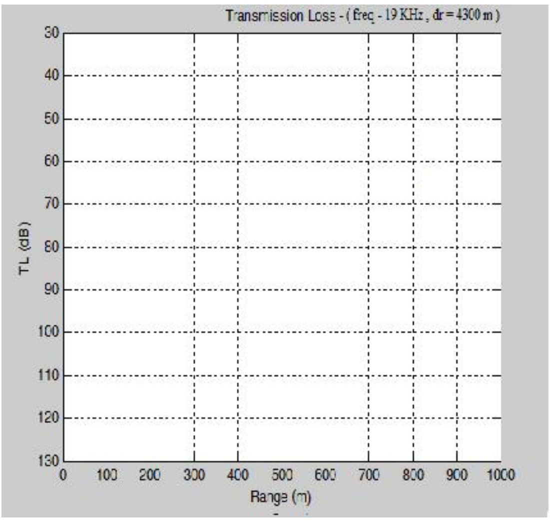


(a) **(b)**

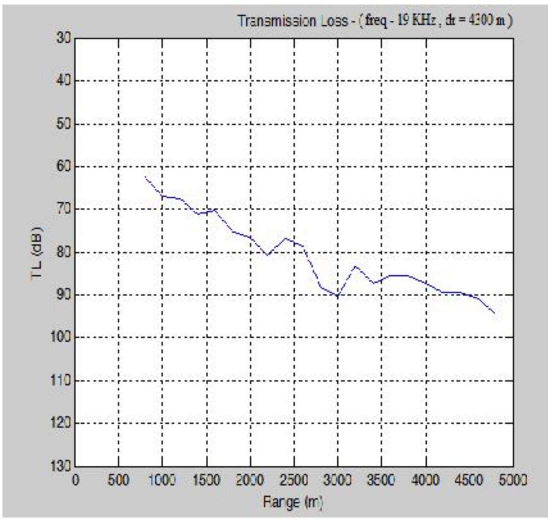


(c)

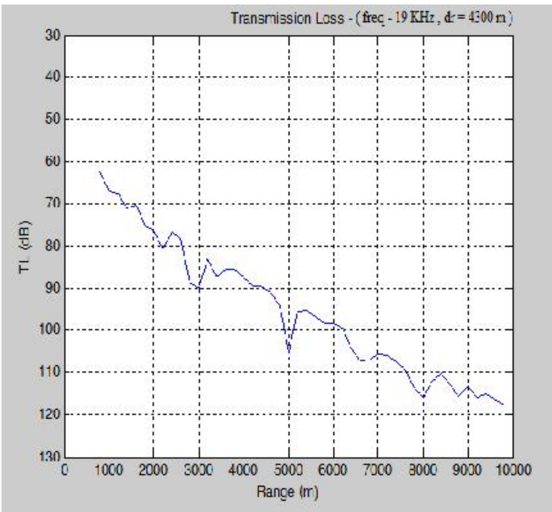
Εικόνα 4.79 Transmission Loss - Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

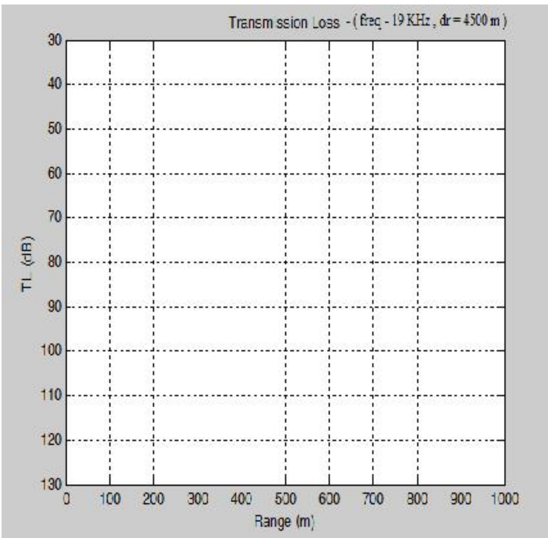


(b)

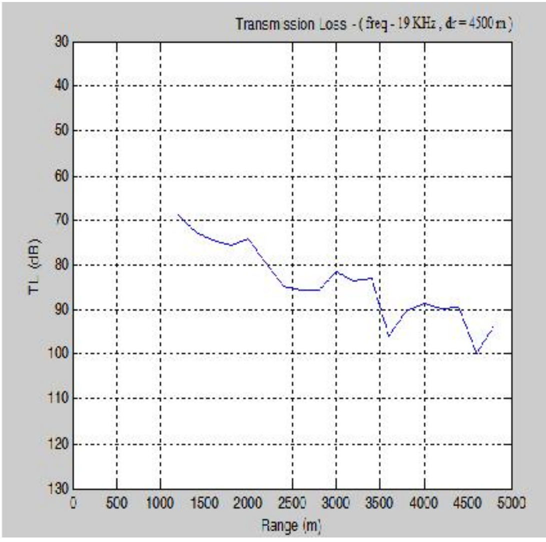


(c)

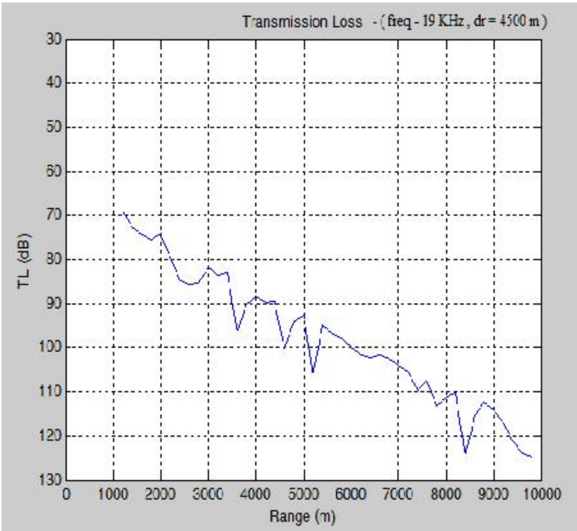
Εικόνα 4.80 Transmission Loss - Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

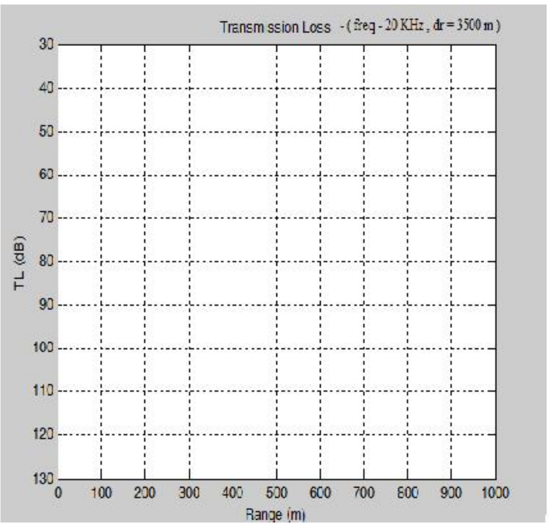


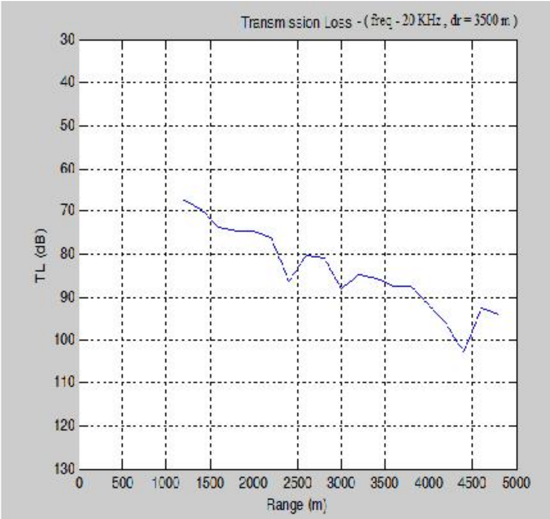
(b)



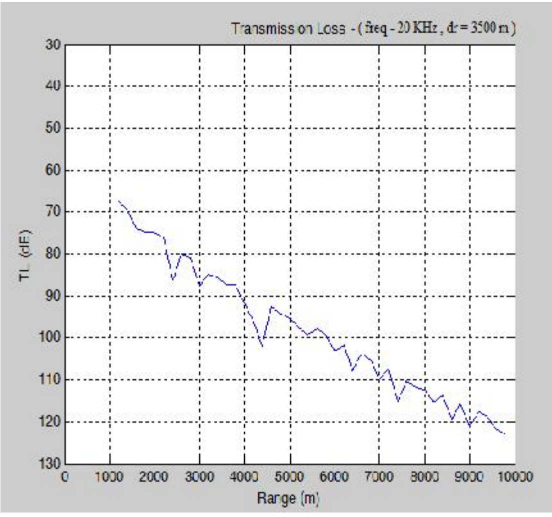
(c)

Εικόνα 4.81 Transmission Loss - Για συχνότητα 19KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



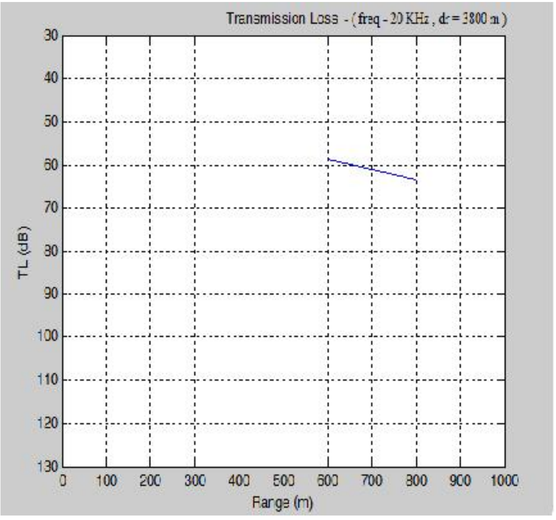


(a) **(b)**

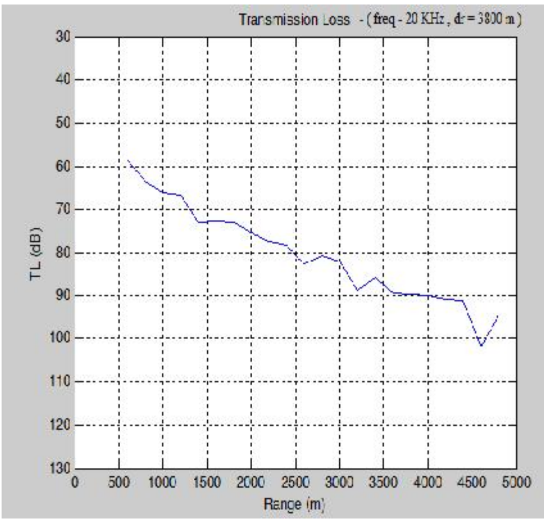


(c)

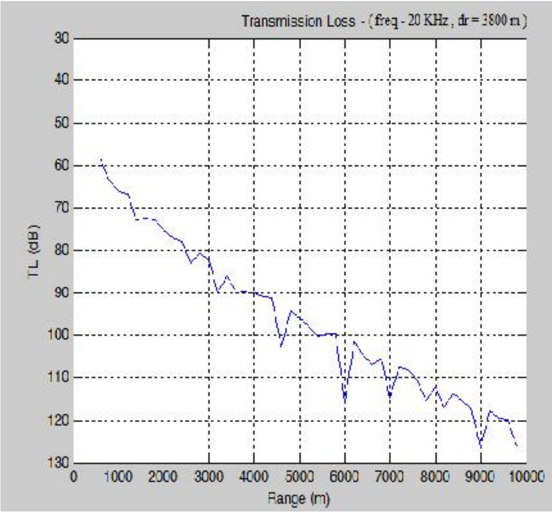
Εικόνα 4.82Transmission Loss - Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

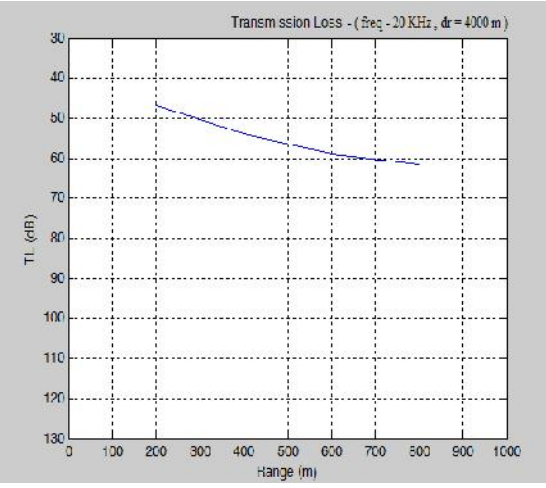


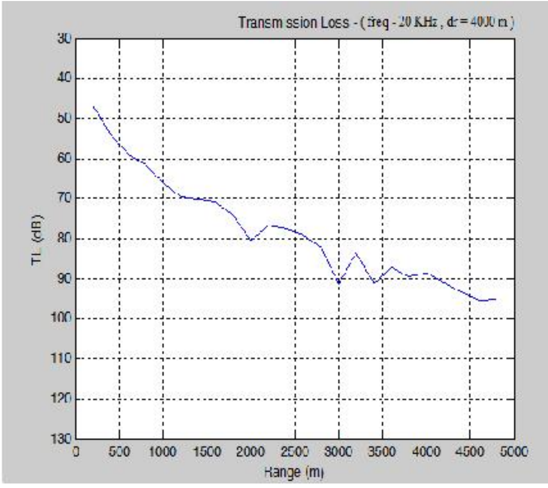
(b)



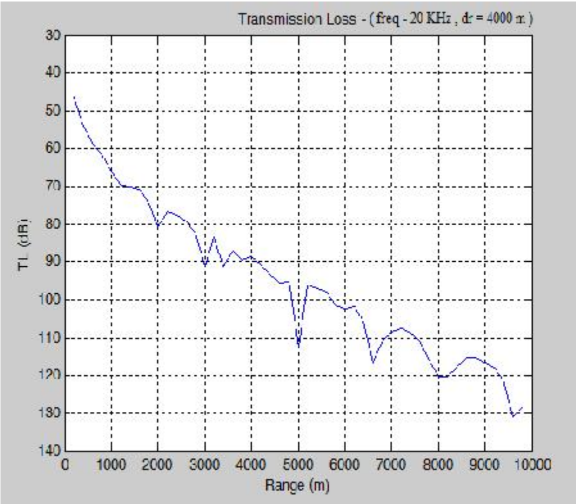
(c)

Εικόνα 4.83Transmission Loss - Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



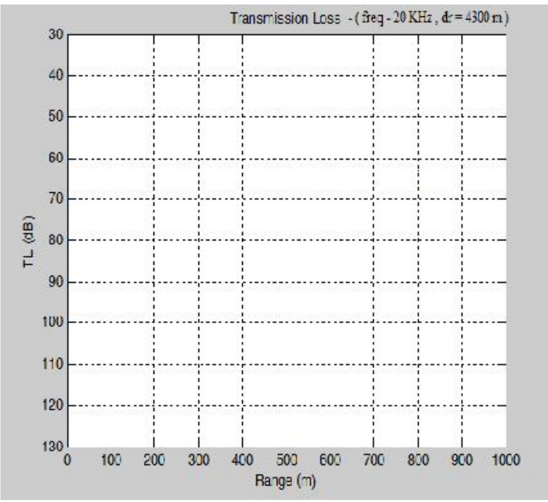


(a) **(b)**

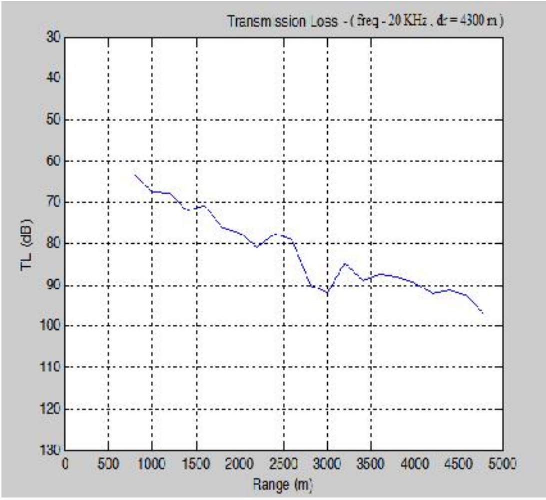


(c)

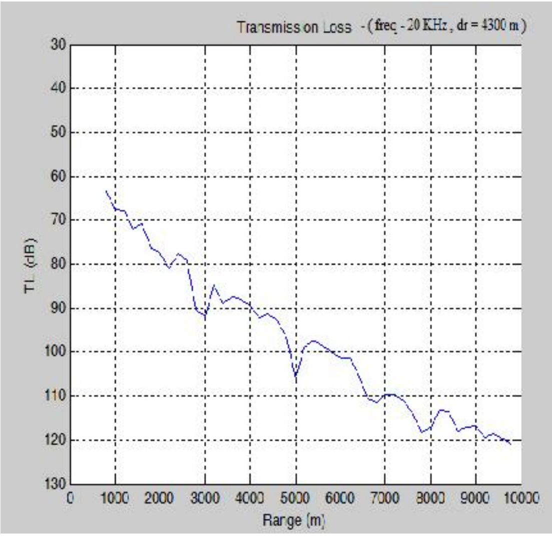
Εικόνα 4.84Transmission Loss - Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

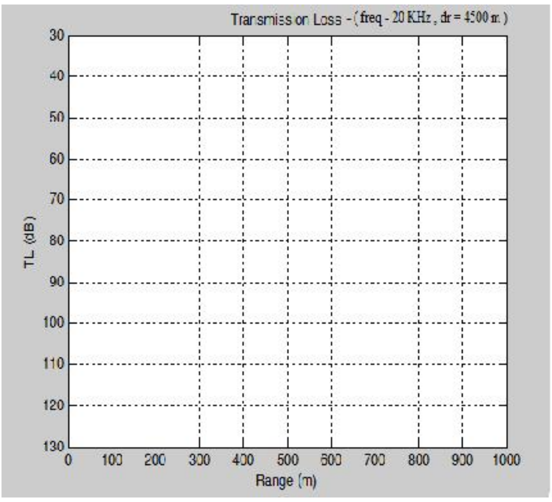


(b)

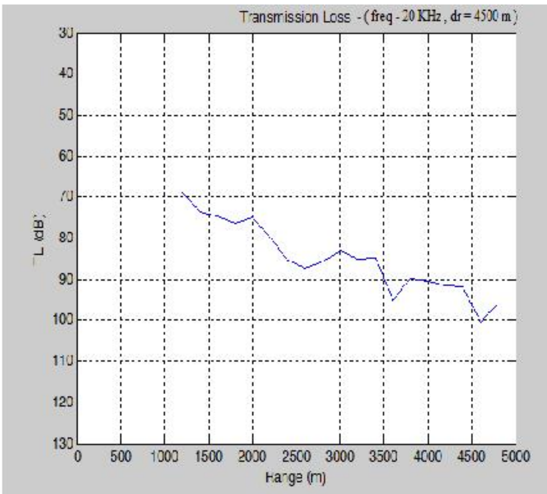


(c)

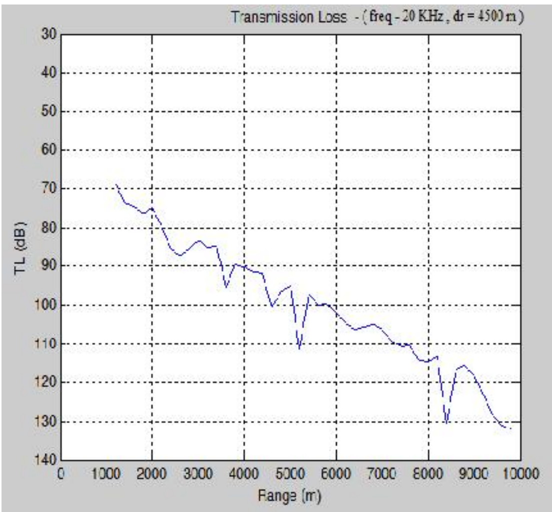
Εικόνα 4.85Transmission Loss - Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

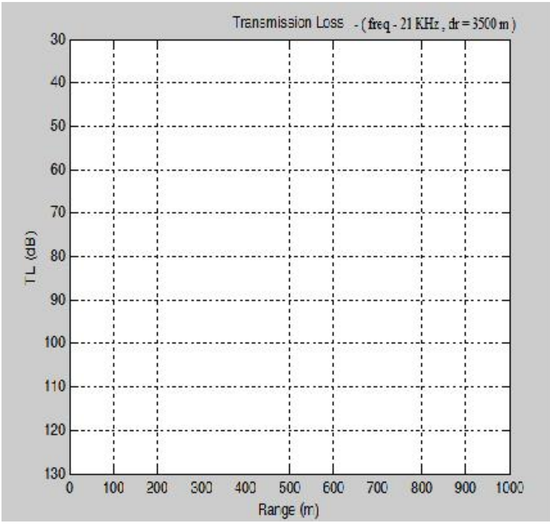


(b)

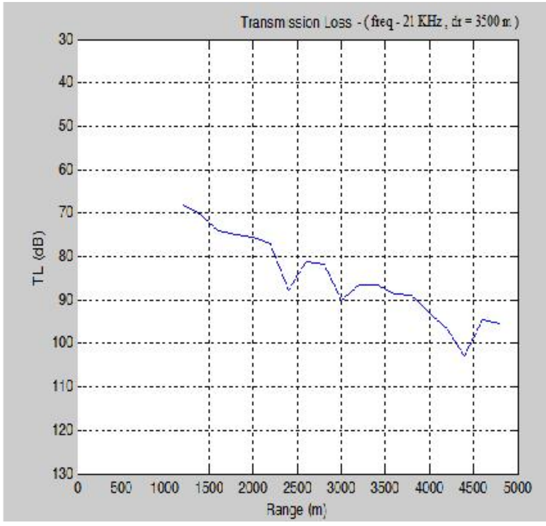


(c)

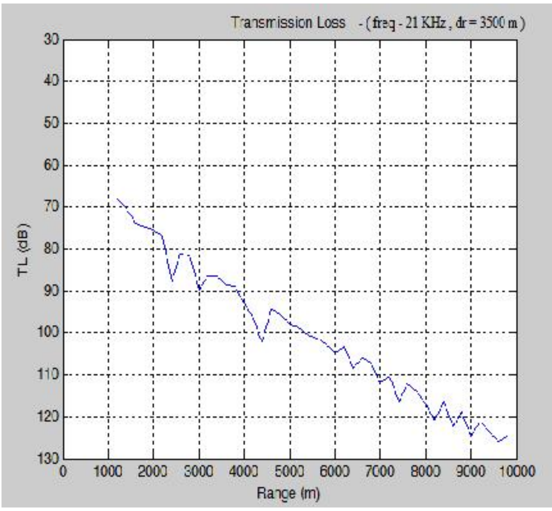
Εικόνα 4.86 Transmission Loss - Για συχνότητα 20KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

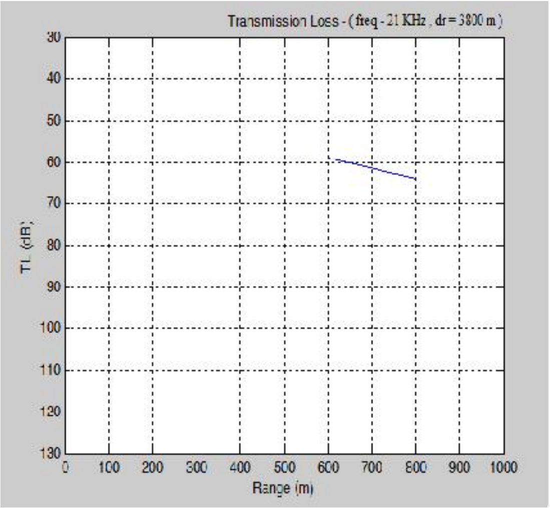


(b)

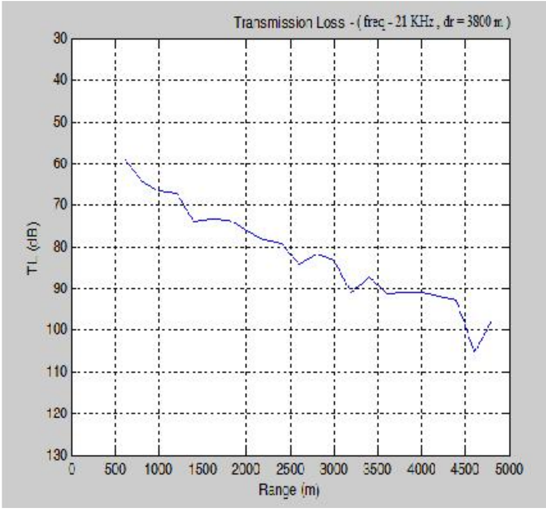


(c)

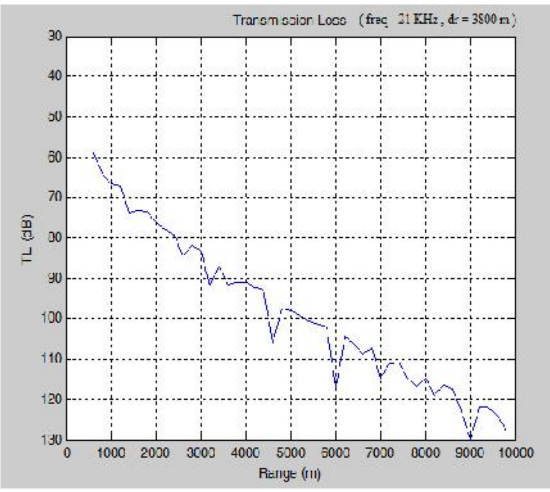
Εικόνα 4.87 Transmission Loss - Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 3500m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

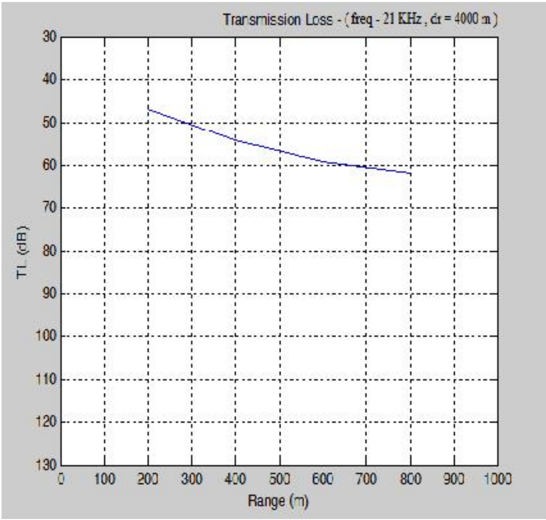


(b)

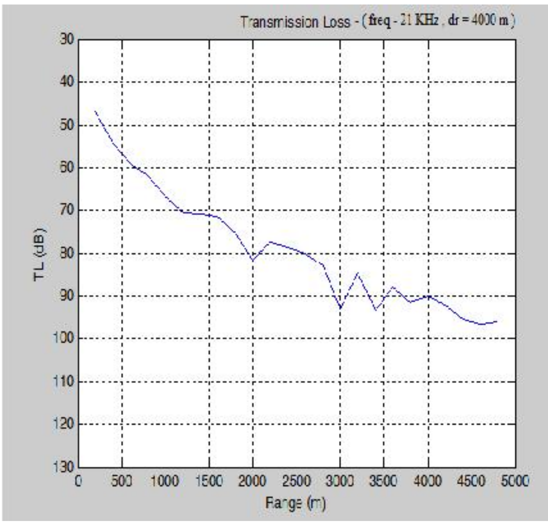


(c)

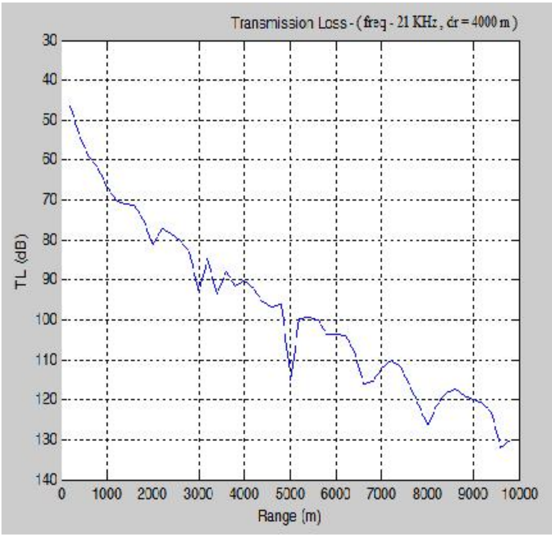
Εικόνα 4.88 Transmission Loss - Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 3800m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

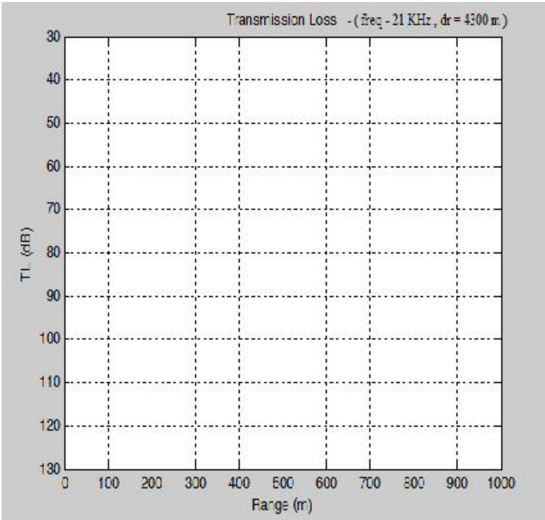


(b)

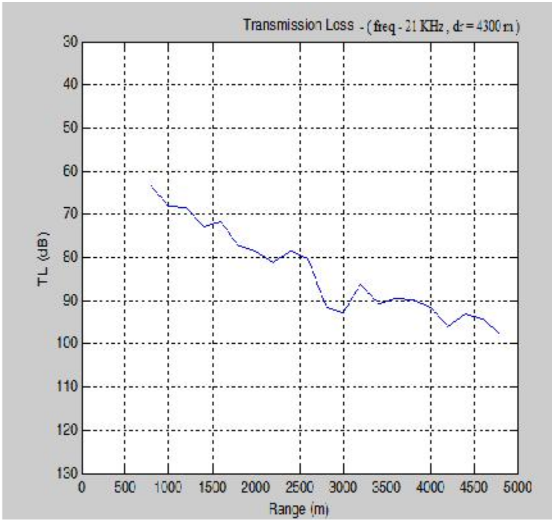


(c)

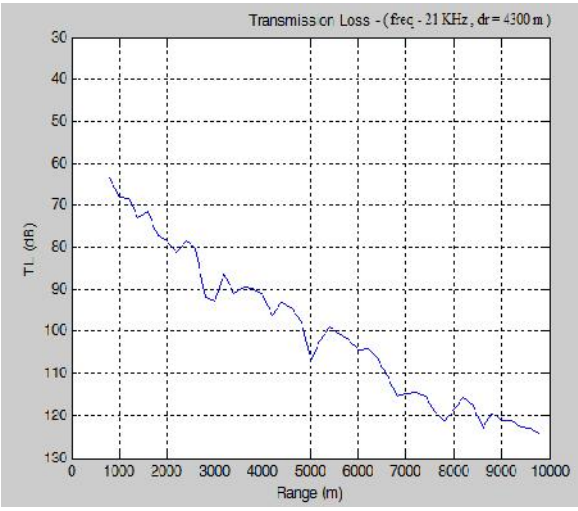
Εικόνα 4.89 Transmission Loss - Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 4000m και σταθερή γωνία 25 μοιρών, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)

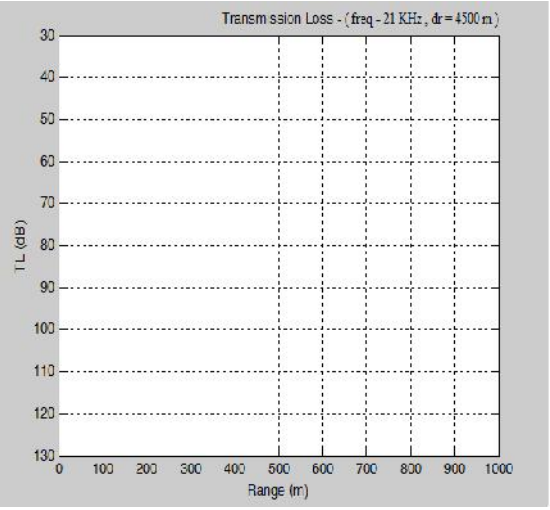


(b)

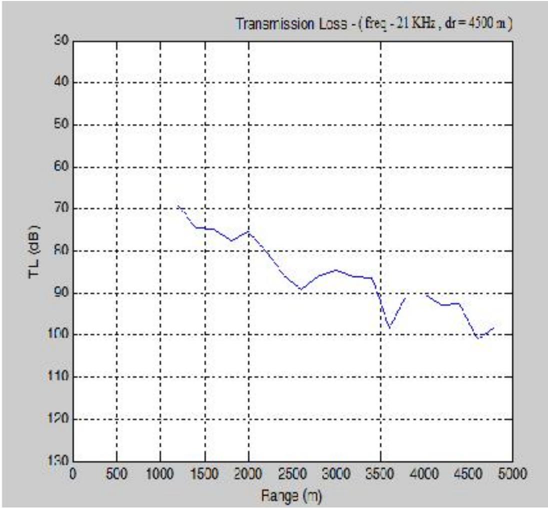


(c)

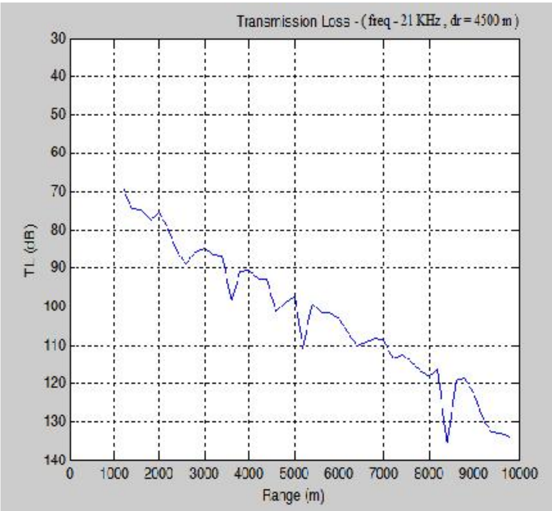
Εικόνα 4.90 Transmission Loss - Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 4300m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 10000m



(a)



(b)



(c)

Εικόνα 4.91 Transmission Loss - Για συχνότητα 21KHz και βάθος δέκτη 4500m και σταθερή γωνία, 25 μοιρών, (a) εύρος 1000m,(b) εύρος 5000m,(c) εύρος 1000m

Κεφάλαιο 5-Σύνοψη αποτελεσμάτων, πιθανές εφαρμογές και μελλοντικές μελέτες

5.1. Σύνοψη αποτελεσμάτων

5.1.Α Ανίχνευση ακτίνων (Ray trace)

Στα διαγράμματα ray trace δεν παρατηρείται καμία ιδιαίτερη αλλαγή καθώς αλλάζει η συχνότητα και το βάθος. Σε εύρος 5000m παρατηρούμε την επιστροφή των ακτίνων λόγω ανάκλασης από τον πυθμένα (ξεκινάει από τα 2300m) καθώς και σε εύρος 10000m την ανάκλαση και από την επιφάνεια(ξεκινάει από τα 8000m).

5.1.Β Ιδιοακτίνες (Eigenrays)

Παρατηρούμε πως τα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε βάθος δέκτη 3500m και 4500 m σε εύρος 1000m ,σε όλες τις συχνότητες είναι κενά.
Σε όλες τις συχνότητες στα 3500 m βάθος του δέκτη ,από τα 0m έως τα 5000m εύρος υπάρχει μόνο μια ιδιοακτίνα ενώ σε όλες τις άλλες αποστάσεις και βάθη εμφανίζονται δύο ιδιοακτίνες.
Όσο αυξάνεται η συχνότητα παρατηρούμε μια μετατόπιση προς τα δεξιά , στον άξονα του εύρους ,του σημείου που χτυπάει η δεύτερη ιδιοακτίνα στον πυθμένα και ανακλάται (έχουμε μια μετατόπιση ~3500 m στον άξονα του εύρους)

5.1.Γ Απώλεια διάδοσης (Transmission Loss)

Τα διαγράμματα με δέκτη στα 3500m,4300m και 4500m και εύρος 1000 m είναι κενά σε όλες τις συχνότητες.
Επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα, το βάθος και το εύρος μεγαλώνει η απώλεια διάδοσης και η κλίση της.
Μπορεί να αναφερθεί ότι για κάθε μια συχνότητα όταν το βάθος του δέκτη είναι 4000m τότε παρατηρείται η μέγιστη απώλεια διάδοσης. Σιγά-σιγά αυξάνεται μέχρι τα 4000m βάθος(δηλαδή από 3500-4000m)και έπειτα από τα 4000m μειώνεται και πάλι(δηλαδή από 4000-4500m).
Τέλος μπορεί να παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλώνει η συχνότητα για το ίδιο βάθος δέκτη μεγαλώνει και η κλίση της απώλειας διάδοσης.

5.2 Πιθανές εφαρμογές και μελλοντικές μελέτες

5.2.Α Μελέτες με όργανο (acoustic modem) του εμπορίου, σύγκριση πραγματικών δεδομένων με προσομοιώσεις στο cTraceo.

5.2.Β Μελέτες για την κατασκευή οργάνου (acoustic modem) με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για την επικοινωνία με άλλους πομπούς (deep-sea acoustic network)

Βιβλιογραφία

1. Underwater Acoustics Simulator for Communication ,Steven Kah Hien Wong, 2005

2. Halliday, D., Resnick, R., andWalker, J. Fundamentals of Physics Extended ,John Wiley & Sons, United States of America, 1997

3. Fundamental of underwater sound report No 406 May 2008, International Association of Oil & Gas Producers

4. An introduction to underwater acoustics : principles and applications Xavier Lurton , New York : Springer, 2002.

5. Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar Richard P. Hodges , John Wiley & Sons, 28 Ιουν 2011

6. NUMERICAL MODELING AND SIMULATION OF ACOUSTIC PROPAGATION IN SHALLOW WATER,Emerson de Sousa Costaa,b, Eduardo Bauzer Medeirosb, Buenos Aires, Argentina, 15-18 Noviembre 2010

7. DYNAMICAL SIMULATION OF UNDERWATER SOUND PROPAGATION IN THE HORMOZ STRAIT Z.Nour Ali Pour , A.M. Arasteh , M. Torabi Azad3,Y. Bahman Pour

8. Tam, P.K.;Wong, K.T. Cramer-Rao Bounds for direction finding by an acoustic vector sensor under nonideal gain-phase responses, noncollocation, or nonorthogonal orientation. IEEE Sens. J. 2009, 9, 969–982.

9. Analysis & Simulation of the Deep Sea Acoustic Channel for Sensor Networks Anuj Sehgal, School of Engineering and Science Jacobs University Bremen, M.Sc. Thesis August 2009

10. Underwater acoustic communication Channels : Propagation Models and Statistical Characterization , *Milica Stojanovic, Northeastern University James Preisig, Woods Hole Oceanographic Institution, January 2009*

11. Modelling of Wave Propagation in Shallow Water Environment, Skjalg Andersson, Norwegian University of Science and Technology Department of Electronics and Telecommunications,2008

12. Underwater Acoustic Networks and Adaptive Modems Anuj Sehgal,Jacobs University Bremen April 12, 2010

13. K. V. MacKenzie, “Nine-term equation for sound speed in the oceans,”Acoustical Society of America Journal, vol. 70, pp. 807–812, Sep. 1981.

14. Physical Oceanography 1:The physics of seawater, presentation in power point 2012,College of the Atlantic. http://www.coa.edu/index.htm

15. Underwater Acoustics: Noise and the Effects on Marine Mammals A Pocket Handbook 3rd Edition Compiled by Christine Erbe

16. PERFORMANCE EVALUATION OF A PROTOTYPE UNDERWATER SHORT-RANGE ACOUSTIC TELEMETRY MODEM,Pongsakorn Sommai ,September 2010 ,M.S. thesis,Naval Postgraduate School, Monterey, CA,

17. http://www.dosits.org/

18. Fundamental of acoustical oceanography, Herman Medwin ,Department of PhysicsNaval Postgraduate SchoolMonterey, California. Clarence S. Clay, Department of Geology & Geophysics University of Wisconsin at Madison,1998

19. Underwater Acoustics: Noise and the Effects on Marine Mammals A Pocket Handbook 3rd Edition Compiled by Christine Erbe

20. Modulation Analysis for an Underwater,Communication Channel,Júlio Diogo Miranda Xavier, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO,February 2012

21. Jordi Ribas. Underwater wireless video transmission using acoustic ofdm. Master’s thesis,Massachusetts Institute of Technology, December 2009.

22. R. F. W. Coates, *Underwater Acoustic Systems*. New York: Halsted Press, 1989.

23. High-Frequency Seafloor Acoustics,Darrell R. Jackson University of Washington Seattle, Washington and Michael D. Richardson Naval Research Laboratory Stennis Space Center, Mississippi

24. Challenges and Opportunities of Underwater Cognitive Acoustic Networks Yu Luo, Student Member, IEEE, Lina Pu, Student Member, IEEE, Michael Zuba, Student Member, IEEE, Zheng Peng, Member, IEEE, Jun-Hong Cui Member, IEEE,2012

25. Conputational ocean acoustics, Finn B. Jensen, William A. Kuperman, Michael B. Porter, Henrik Schmidt, Springer ,second edition,2011

26. Underwater Acoustic Modeling-Principles, techniques and applications forth edition ,Paul C.Etter,2002

27. Underwater Acoustics Modeling in Finite Depth Shallow Waters Emerson de Sousa Costa, Eduardo Bauzer Medeiros and Joγo Batista Carvalho Filardi, Chapter 22,Book :"Modeling and Measurments Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices."edit by Marco G.Beghi(Published 28/8/2013)

28. Xavier, B. C., Shallow Water Acoustic Propagation Models, MSc Dissertation, Ocean Engineering, COPPE/UFRJ, Brazil, (2005). *(in Portuguese)*

29. Ray Trace Modeling of Underwater Sound Propagation , Jens M. Hovem,Chapter 23, Book :"Modeling and Measurments Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices."edit by Marco G.Beghi (Published 28/8/2013)

30. Rodríguez, O. C., Submarine Acoustic Propagation Models: Comparison with the results of the with the analytical solution of the 3 layer problem. Signal processimg laboratory, Universidade do Algarve, Portugal, 1995 (*in Portuguese).*

31. Underwater Acoustic Modeling and Simulations , Paul C. Etter Spon Press, London ,UK 3rd edition,2003

32. Advanced Applications for Underwater Acoustic Modeling Paul C. Etter Northrop Grumman Corporation, P.O. Box 1693, Baltimore, MD 21203, USA Received 29 October 2011; Accepted 30 January 2012 Academic Editor: Jafar Saniie

33. "Architectural and design considerations in propagation models selection and design, simulation interoperability standards organization" in Proceeding of the Simulation Interoperability Workshop , no. 00S-SIW-054,2000,R.J.Howard,T.Foreman,D.Clark

34. Kerman, B. R., Sea Surface Sound, 253-272, Kluwer Academic Publishers, 1988.

35. A review of channel modeling techniques for underwater acoustic communications Ruoyu Su, R. Venkatesan, and Cheng Li , Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland St. John's, NL, Canada,2010

36. M. J. Buckingham, "Ocean-acoustic propagation models," *J. Acoustique*, Jun. 1992, pp: 223-287.

37. F.B.Jensen, W.A.Kuperman, M.B.Porter and H.Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, *2nd ed.*, Springer-Verlag, 2000.

38. A Computer Simulation of Underwater Sound Propagation Based on the Method of Parabolic Equations REZA SOHEILIFAR ,AFSHIN MOHSENI ARASTEH ,JALIL RASEKHI,ARASH GURAN URIMI, APPLIED COMPUTING CONFERENCE (ACC '08), Istanbul, Turkey, May 27-30, 2008.

39. Scott R. Thompson. “SOUND PROPAGATION CONSIDERATIONS FOR A DEEP-OCEAN ACOUSTIC NETWORK” M.S. thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 2009

40. Robert Urick, *Principles of Underwater Sound 3rd Edition* (Los Altos: Peninsula Publishing, 1983)

41. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J.V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics: Fourth Edition*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999.

42. P-F. Piserchia, D. Rodrigues, J. Virieux, and S. Gaffet. “Detection of underwater explosion at very long range.” In *Proc. IEEE OCEANS Conf.* vol. 2. pp. 698–702, September-October 1998.

43. SiPLAB internal reportcTraceo - User Manual Emanuel Ey and Orlando C. RodríguezRep. SiPLAB10/January/2012, CINTAL -Centro de Investigação Tecnológica do Algarve Universidade do Algarve

44. Miron, S.; Le Bihan, N.; Mars, J. Quaternion-MUSIC for vector-sensor array processing. SignalProcess. IEEE Trans. 2006, 54, 1218–1229.

45. Orlando C. Rodriguez. *The TRACEO ray tracing program*. Universidade do Algarve ,Signal Processing Laboratory, 2011.

46. http://www.siplab.fct.ualg.pt/models/ctraceo/- SiPLABoratory, FCT - University of Algarve,Campus de Gambelas,Faro, Portugal

47. Porter M.B. and Bucker H.P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic _elds. J. Acoust. Soc. America, 82(4):1349{1359, 1987.

48. Adaptation of an acoustic propagation model to the parallel architecture of a graphics processor,Emanuel Ey,2013, University of Algarve,Campus de Gambelas,Faro, Portugal

49. The BELLHOP Manual and User's Guide:PRELIMINARY DRAFT Michael B. Porter,Heat, Light, and Sound Research, Inc.La Jolla, CA, USA,January 31, 2011

50. W. H. Munk, ''Sound channel in an exponentially stratified ocean with applications to SOFAR," J. Acoust. Soc. Am. **55,** 220--226 (1974).

Παραρτήματα

1.Κώδικας Matlab αρχείων

Παρακάτω παρατίθεται αναλυτικά ο κώδικας των matlab αρχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των γραφικών του κεφαλαίου 4.

A. Ανίχνευση Ακτίνων (Ray Trace)

```
% cTraceo - Munk Profile, Deep Water, All Ray Information
%
% Written by Tordar,        Faro, Fri Dec 24 02:07:08 WET 2010
% Revised by Emanuel Ey,    30/06/2011
%
%=================================================================
==

addpath('../M-Files/');
addpath('../bin/');
clear all%, close all

disp('Deep water examples:')
case_title = '''Munk Profile, Deep Water, All Ray Information''';

%=================================================================
%
% Define source data:
%
%=================================================================

%disp('Defining source characteristics...')

freq   =    21000;
Rmaxkm =  1; Rmax = Rmaxkm*1000;
Dmax   =  5000;

ray_step = Rmax/1000;

zs = 4000; rs = 0;
np2 = 30; thetamax = 25; la = linspace(-thetamax,thetamax,np2);

source_data.ds       = ray_step;
source_data.position = [rs zs];
source_data.rbox     = [rs-1 Rmax];
source_data.f        = freq;
source_data.thetas   = la;

%=================================================================
%
% Define altimetry data:
%
%=================================================================

%disp('Defining surface characteristics...')
```

```
altimetry(1,:) = [rs-2 Rmax+2];
altimetry(2,:) = [0         0];

surface_data.type  =   '''V'''; %
surface_data.ptype =   '''H'''; % Homogeneous
surface_data.units =   '''W'''; % (Attenuation Units) Wavelenght
surface_data.itype =  '''FL''';
surface_data.x     = altimetry; % Surface coordinates
surface_data.properties = [0 0 0 0 0.0]; % Dummy parameters

%==================================================================
%
% Define sound speed data:
%
%==================================================================

%disp('Defining the sound speed profile...')

c1 = 1500; z1 = 1300;

depths = linspace(0,Dmax,1001);

c = munk( depths, z1, c1 );

ssp_data.cdist = '''c(z,z)'''; % Sound speed profile
ssp_data.cclass = '''TABL''';
ssp_data.z     = depths(:);
ssp_data.r     = [];
ssp_data.c     = c(:);

%==================================================================
%
%  Define object data:
%
%==================================================================

object_data.nobjects = 0; % No objects

%==================================================================
%
% Define bathymetry data:
%
%==================================================================

% Gaussian sea mountain:

bathymetry(1,:) = [rs-2 Rmax+2];
bathymetry(2,:) = [Dmax   Dmax];

bottom_data.type   = '''E''' ;
bottom_data.ptype  = '''H''' ; % Homogeneous bottom
bottom_data.units  =  '''W'''; % (Attenuation Units) Wavelenght
bottom_data.itype  = '''FL'''; % Bottom interpolation type
bottom_data.x      = bathymetry;     % Bottom coordinates
bottom_data.properties = [1550.0 600.0 2.0 0.1 0.0]; % Bottom
properties (speed, speed, density, absorption coefficient)

%==================================================================
```

```
%
% Define output data:
%
%==================================================================

%disp('Defining output options...')

ranges = Rmax; depths = Dmax;

m = length( ranges );
n = length( depths );

output_data.ctype       = '''ARI''';
output_data.array_shape = '''RRY''';
output_data.r           = ranges;
output_data.z           = 4500;
output_data.miss        = 0.5;

%==================================================================
%
%  Call the function:
%
%==================================================================

disp('Writing TRACEO waveguide input file...')
wtraceoinfil('munk.in',case_title,source_data,surface_data,ssp_da
ta,object_data,bottom_data,output_data);

disp('Calling TRACEO...')
!ctraceo munk

disp('Reading the output data...')
load ari

nthetas = size(rays,1);

figure, hold on
plot(rs,zs,'ko',rs,zs,'m*','MarkerSize',16)
for i = 1:nthetas
   rayCoords = size(rays(i).r,2);
   if rayCoords > 0
     plot(rays(i).r,    rays(i).z)
   end
end
plot( altimetry(1,:), altimetry(2,:),'b')
plot(bathymetry(1,:),bathymetry(2,:),'k')
box on, grid on
xlabel('Range (m)')
ylabel('Depth (m)')
title('Ray trace')
axis([0 Rmax 0 Dmax])
view(0,-90)
hold off

disp('done.')
```

B. Ιδιοακτίνες (Eigenrays)

```
% cTraceo-Munk Profile,Deep Water,Eigenray Search by Regula Falsi
%
% Written by Tordar,        Faro, Fri Dec 24 02:07:08 WET 2010
% Revised by Emanuel Ey,    30/06/2011
%
%=================================================================

addpath('../M-Files/');
addpath('../bin/');
clear all%, close all

disp('Deep water examples:')
case_title = '''Munk Profile, Deep Water, Eigenray Search by
Regula Falsi''';

%=================================================================
%
% Define source data:
%
%=================================================================

%disp('Defining source characteristics...')

freq   =    16000;
Rmaxkm = 10; Rmax = Rmaxkm*1000;
Dmax   =  5000;

ray_step = Rmax/1000;

zs = 4000; rs = 0;
np2 = 1000; thetamax = 25; la = linspace(-thetamax,thetamax,np2);

source_data.ds       = ray_step;
source_data.position = [rs zs];
source_data.rbox     = [rs-1 Rmax];
source_data.f        = freq;
source_data.thetas   = la;

%=================================================================
%
% Define altimetry data:
%
%=================================================================

%disp('Defining surface characteristics...')


altimetry(1,:) = [rs-2 Rmax+2];
altimetry(2,:) = [0         0];

surface_data.type  =   '''V'''; %
surface_data.ptype =   '''H'''; % Homogeneous
surface_data.units =   '''W'''; % (Attenuation Units) Wavelenght
surface_data.itype =  '''FL''';
surface_data.x     = altimetry; % Surface coordinates
surface_data.properties = [0 0 0 0 0.0]; % Dummy parameters
```

```
%==================================================================
%
% Define sound speed data:
%
%==================================================================

%disp('Defining the sound speed profile...')

c1 = 1500; z1 = 1300;

depths = linspace(0,Dmax,1001);

c = munk( depths, z1, c1 );

ssp_data.cdist = '''c(z,z)'''; % Sound speed profile
ssp_data.cclass = '''TABL''';
ssp_data.z    = depths(:);
ssp_data.r    = [];
ssp_data.c    = c(:);

%==================================================================
==
%
%  Define object data:
%
%==================================================================
==

object_data.nobjects = 0; % No objects

%==================================================================
%
% Define bathymetry data:
%
%==================================================================

% Gaussian sea mountain:

bathymetry(1,:) = [rs-2 Rmax+2];
bathymetry(2,:) = [Dmax   Dmax];

bottom_data.type   = '''E''' ;
bottom_data.ptype  = '''H''' ; % Homogeneous bottom
bottom_data.units  =  '''W'''; % (Attenuation Units) Wavelenght
bottom_data.itype  = '''FL'''; % Bottom interpolation type
bottom_data.x      = bathymetry;     % Bottom coordinates
bottom_data.properties = [1550.0 600.0 2.0 0.1 0.0]; % Bottom
properties (speed, speed, density, absorption coefficient)

%==================================================================
%
% Define output data:
%
%==================================================================

%disp('Defining output options...')
```

```
ranges = Rmax-100; depths = 1000;

m = length( ranges );
n = length( depths );

output_data.ctype       = '''ERF''';
output_data.array_shape = '''RRY''';
output_data.r           = ranges;
output_data.z           = 4500;
output_data.miss        = 100;

%=================================================================
%
%  Call the function:
%
%=================================================================

disp('Writing TRACEO waveguide input file...')
wtraceoinfil('munk.in',case_title,source_data,surface_data,ssp_da
ta,object_data,bottom_data,output_data);

disp('Calling TRACEO...')
!ctraceo munk

disp('Reading the output data...')
load eig

nthetas = length( thetas );

figure(1), hold on
plot(rs,zs,'ko',rs,zs,'m*','MarkerSize',16)

[a, b] = size(eigenrays);   %get dimensions of hydrophone array

for rHyd = 1:a  %iterate over hydrophone ranges
    for zHyd = 1:b  %iterate over hydrophone depths
        for i = 1:eigenrays(a,b).nEigenrays   %iterate over
eigenrays of hydrphone

plot(eigenrays(a,b).eigenray(i).r,eigenrays(a,b).eigenray(i).z)
        end
    end
end

%the eigenrays can also be plotted using the included function:
%plotEigenrays(eigenrays)

plot(ranges,depths, 'm*');
plot( altimetry(1,:), altimetry(2,:),'b')
plot(bathymetry(1,:),bathymetry(2,:),'k')
box on, grid on
xlabel('Range (m)')
ylabel('Depth (m)')
title('Eigenrays')
axis([0 Rmax 0 Dmax])
view(0,-90)
hold off

disp('done.')
```

Γ . Απώλεια διάδοσης (Transmission Loss)

```
% cTraceo-Munk Profile,Deep Water,Transmission Loss along a
Horizontal Array
%
% Written by Tordar         Faro, Fri Dec 24 02:07:08 WET 2010
% Revised by Emanuel Ey,    30/06/2011
%
%=================================================================

addpath('../M-Files/');
addpath('../bin/');

clear all%, close all
disp('Deep water examples:')
case_title = '''Munk Profile, Deep Water, Coherent Transmission
Loss along a Horizontal Array''';
imunit = sqrt( -1 );

%=================================================================
%
% Define source data:
%
%=================================================================

%disp('Defining source characteristics...')

freq   =    21000;
Rmaxkm =  10; Rmax = Rmaxkm*1000;
Dmax   =  5000;

ray_step = Rmax/1000;

zs = 4000; rs = 0;
np2 = 100; thetamax = 25; la = linspace(-thetamax,thetamax,np2);

source_data.ds       = ray_step;
source_data.position = [rs zs];
source_data.rbox     = [rs-1 Rmax];
source_data.f        = freq;
source_data.thetas   = la;

%=================================================================
%
% Define altimetry data:
%
%=================================================================

%disp('Defining surface characteristics...')


altimetry(1,:) = [rs-2 Rmax+2];
altimetry(2,:) = [0         0];

surface_data.type  =   '''V'''; %
surface_data.ptype =   '''H'''; % Homogeneous
surface_data.units =   '''W'''; % (Attenuation Units) Wavelenght
surface_data.itype =  '''FL''';
```

```
surface_data.x     = altimetry; % Surface coordinates
surface_data.properties = [0 0 0 0 0.0]; % Dummy parameters

%=================================================================
%
% Define sound speed data:
%
%=================================================================

%disp('Defining the sound speed profile...')

c1 = 1500; z1 = 1300;

depths = linspace(0,Dmax,1001);

c = munk( depths, z1, c1 );

ssp_data.cdist = '''c(z,z)'''; % Sound speed profile
ssp_data.cclass = '''TABL''';
ssp_data.z    = depths(:);
ssp_data.r    = [];
ssp_data.c    = c(:);

%=================================================================
%
%  Define object data:
%
%=================================================================

object_data.nobjects = 0; % No objects

%=================================================================
%
% Define bathymetry data:
%
%=================================================================

% Gaussian sea mountain:

bathymetry(1,:) = [rs-2 Rmax+2];
bathymetry(2,:) = [Dmax   Dmax];

bottom_data.type   = '''E''' ;
bottom_data.ptype  = '''H''' ; % Homogeneous bottom
bottom_data.units  =  '''W'''; % (Attenuation Units) Wavelenght
bottom_data.itype  = '''FL'''; % Bottom interpolation type
bottom_data.x      = bathymetry;     % Bottom coordinates
bottom_data.properties = [1550.0 600.0 2.0 0.1 0.0]; % Bottom
properties (speed, speed, density, absorption coefficient)

%=================================================================
%
% Define output data:
%
%=================================================================

%disp('Defining output options...')
```

```
output_data.ctype       = '''CTL''';
output_data.array_shape = '''HRY''';
output_data.r           = linspace(0,100*1000,501);
output_data.z           = 4500;
output_data.miss        = 0.5;

%=================================================================
%
%  Call the function:
%
%=================================================================

disp('Writing TRACEO waveguide input file...')
wtraceoinfil('munk.in',case_title,source_data,surface_data,ssp_da
ta,object_data,bottom_data,output_data);

%%
%{
disp('Calling fTRACEO...')
!traceo munk

disp('Reading the output data...')

load ctl
size(tl)
%paux_f = p; clear p
%p = paux_f(1,:) + imunit*paux_f(2,:);
%tl = -20*log10( abs(p) );

figure
plot(arrayR,tl)
axis([0 100*1000 60 120])
view(0,-90)
grid on, box on
xlabel('Range (m)')
ylabel('TL (dB)')
title('fTraceo.')
%}
%% --

disp('Calling cTraceo...')
!ctraceo munk

disp('Reading the output data...')
load ctl
%size(tl)

figure
plot(arrayR,tl)
axis([0 Rmax 30 130])
view(0,-90)
grid on, box on
xlabel('Range (m)')
ylabel('TL (dB)')
title('Transmission Loss')

%{
load kraken_tlr.dat
```

```
kr  = 1000*kraken_tlr(:,1);
ktl =      kraken_tlr(:,2);

figure(1)
plot(arrayR,tl,'--',kr,ktl)
axis([0 100*1000 60 120])
view(0,-90)
grid on, box on
xlabel('Range (m)')
ylabel('TL (dB)')
title('TRACEO vs. KRAKEN')
%}
disp('done.')
```

2. Αναζήτηση Ιδιοακτίνων

Αν και η έρευνα για ιδιοακτίνες είναι εύκολο να ορισθεί ως το έργο της εξεύρεσης ακτίνων που συνδέουν την πηγή και δέκτη, είναι ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα ανίχνευσης ακτίνων για να αντιμετωπίσει.
Είναι σημαντικό να έχουμε κατά νου ότι οι ακτίνες μπορούν να οπισθοσκεδαστούν προς την πηγή και ότι ακόμη και αν μια ακτίνα χάσει το δέκτη όπως πολλαπλασιάζεται, εξακολουθεί να έχει την ευκαιρία να χτυπήσει το δέκτη στο δρόμο πίσω προς την πηγή. Πρόσθετες δυσκολίες ανακύπτουν όταν οι ακτίνες μπορεί να απορροφηθούν από τα όρια, ή όταν μικρές διακυμάνσεις της γωνία εκτόξευσης οδηγούν προς μη-γραμμικές διακυμάνσεις των ακτινικών τροχιών (μια τυπική κατάσταση, όταν τα αντικείμενα τοποθετούνται στο εσωτερικό του κυματοδηγού). Οι δύο μέθοδοι για την αναζήτηση ιδιοακτίνων που μπορούν να εφαρμοστούν είναι:

1. *The Regula Falsi:*

Αν όλες οι ακτίνες πολλαπλασιάζονται προς τα εμπρός, το μοντέλο μπορεί να παρεμβάλλει το βάθος των ακτίνων σε κάθε εύρος συστοιχία για κάθε γωνία εκτόξευσης. και να δημιουργηθεί μια μήτρα της μορφής:

$$\begin{bmatrix} & r_1 & r_2 & r_3 & \cdots & r_m \\ \theta_1 & z_1(\theta_1) & z_2(\theta_1) & z_3(\theta_1) & \cdots & z_m(\theta_1) \\ \theta_2 & z_1(\theta_2) & z_2(\theta_2) & z_3(\theta_2) & \cdots & z_m(\theta_2) \\ \theta_3 & z_1(\theta_3) & z_2(\theta_3) & z_3(\theta_3) & \cdots & z_m(\theta_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_n & z_1(\theta_n) & z_2(\theta_n) & z_3(\theta_n) & \cdots & z_m(\theta_n) \end{bmatrix}$$

όπου $z_i(\theta_j)$ αντιπροσωπεύει το βάθος των ακτίνων στο εύρος i και γωνία εκτόξευσης j.
Στη συνέχεια, στο εύρος ith, με το υδρόφωνο να βρίσκεται σε βάθος z_h,
υπολογίζεται η εξίσωση :

$$f(\theta) = z_h - z_i(\theta)$$

χρησιμοποιώντας τη αντίστοιχη σειρά της μήτρας, αν υπάρχει μια ιδιοακτίνα στο διάστημα i και i + 1, η συνάρτηση f (θ) θα στραφούν μεταξύ i και θ_i + 1.Σε μια τέτοια περίπτωση, η μέθοδος Regula Falsi χρησιμοποιείται για να βρούμε το μηδέν της εξίσωσης. Μόλις βρεθεί το μηδέν η ακτίνα υπολογίζεται, και καταγράφεται στο παραγόμενο αρχείο ως ιδιοακτίνα. Προκειμένου να αποφευχθεί ένας άπειρος βρόχος ,η αναζήτηση της ιδιοακτίνας διακόπτεται εάν ο αριθμός των επαναλήψεων είναι μεγαλύτερος από ένα συγκεκριμένο όριο. Ιδιαίτερη μέριμνα λαμβάνεται για τις ακτίνες, που για οποιοδήποτε λόγο δεν φθάνουν στο δεδομένο εύρος συστοιχίας. Η αναζήτηση διακόπτεται εάν μια ακτίνα εντοπιστεί. Η μέθοδος Regula Falsi είναι υπολογιστικά ακριβή και αποδοτική, εφ ’όσον η εξίσωση z(θ) μπορεί να υπολογιστεί σωστά.

2. The Proximity Method

Ως εναλλακτική λύση στην προηγούμενη μέθοδο μπορεί να χρησιμοποιήσει μια λιγότερο ακριβής αναζήτηση των ιδιοακτίνων με την μέθοδο της εγγύτητας. Σε κάθε εύρος ακτινικού βάθους το z υπολογίζεται, και για κάθε βάθος (εάν υπάρχουν περισσότερα από ένα) υπολογίζεται η διαφορά

$$\left| z_h - z \right|$$

όπου z_h αντιπροσωπεύει το βάθος του υδροφώνου εάν η διαφορά είναι μικρότερη από ένα συγκεκριμένο όριο. Τότε καταγράφεται η ακτίνα στο παραγόμενο αρχείο ως ιδιοακτίνα.

Βεβαίως, η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από την επιλογή του ορίου, και από τον αριθμό των γωνιών έναρξη (όσες περισσότερες τόσο το καλύτερο).