



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΠΟΛΥΒΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ (ΑΠΟ ΠΛΟΙΟ ΣΕ
ΠΛΟΙΟ): ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΑΡΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΠΟΛΥΒΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ (ΑΠΟ ΠΛΟΙΟ ΣΕ ΠΛΟΙΟ): ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΑΡΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβρης 2017

.....

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΣΤΑΡΑΚΗΣ

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright ©Σταράκης Εμμανουήλ, 2017 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των μοντέλων απωλειών διάδοσης στις θαλάσσιες επικοινωνίες, καθώς και οι δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά των θαλάσσιων πολυβηματικών δικτύων πλέγματος που δημιουργούνται κυρίως από γειτονικά πλοία. Αρχικά, αναλύθηκαν τα φαινόμενα που επιδρούν στη μετάδοση του σήματος όπως οι υδρατμοί, η κίνηση θάλασσας και των πλοίων, καθώς και η καμπυλότητα της γης και το φαινόμενο της περίθλασης. Παρουσιάστηκαν κάποια βασικά μοντέλα απωλειών διάδοσης που ταιριάζουν στο θαλάσσιο περιβάλλον και στη συνέχεια υλοποιήθηκαν σε MATLAB για να εξετασθεί η ευαισθησία των παραμέτρων τους. Εξάχθηκαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Επιπλέον παρουσιάστηκε η έννοια της συνδεσιμότητας στα αδόμητα πολυβηματικά δίκτυα και εξηγήθηκαν διάφορα βασικά μοντέλα κινητικότητας, δίνοντας έμφαση στο μοντέλο των Τυχαίων Στάσεων και στο μοντέλο Τυχαίας Κατεύθυνσης. Κάνοντας χρήση αυτών των μοντέλων, της μεθοδολογίας των τυχαίων σημείων Poisson για την κατανομή των πλοίων στον χώρο, των μοντέλων απωλειών διάδοσης που προαναφέρθηκαν για την εύρεση της ισχύς υλοποιήθηκαν σε MATLAB διάφορες προσομοιώσεις. Στόχος τους η εκτίμηση της συνδεσιμότητας και της πιθανότητας απομόνωσης σε διαφορά σενάρια επικοινωνίας πλοίων με διαφορετικές παραμέτρους. Ενδιαφέροντα αποτελέσματα εξήχθησαν.

Λέξεις κλειδιά

Μοντέλα απωλειών διάδοσης, θαλάσσιες επικοινωνίες, πλοία, πολυβηματικά δίκτυα, συνδεσιμότητα, πιθανότητα απομόνωσης, ανακλώμενη ακτίνα, μοντέλο δύο ακτινών, τροποποιημένο μοντέλο δύο ακτινών, Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, περίθλαση.

Abstract

The goal of the present diploma thesis is the study of maritime propagation loss models and also the study of the characteristics and the capabilities of maritime mesh networks, which are formulated by neighbor ships. Firstly, phenomena affecting signal transmission such as water vapor, sea and ship motion, as well as the curvature of the earth and the phenomenon of diffraction, were analyzed. Some important propagation loss models, which are appropriate for the marine environment, were presented and then were implemented in MATLAB to draw conclusions. Moreover, the concept of connectivity to ad hoc mesh networks and various basic mobility models were illustrated, emphasizing on the Random Station models and the Random Direction model. Using these models, the Poisson Point Process for the insertion of the ships, the maritime propagation loss models that was mentioned above to find the receiver power, several simulations have been performed using MATLAB. Their objective is the evaluation of the connectivity and the probability of isolation in various maritime ship-to-ship communication scenarios with different parameters. Interesting conclusions have been drawn.

Keywords

Propagation loss models, maritime communications, ships, ad hoc mesh networks, connectivity, probability of isolation, reflected ray, 2-ray model, modified version of 2-ray, Random Waypoint Mobility Model, Random Direction Mobility Model, diffraction.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο αρχικά για την ανάθεση του θέματος, αλλά και για τη συνεχή βοήθεια, τις υποδείξεις και τις κατευθύνσεις του, που συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου. Επίσης, θα ήταν παράλειψη αν δεν ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξη που μου προσέφεραν στα χρόνια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο.

ΠΙΚΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ...12

1.1 Εισαγωγή.....	12
1.2 Επίγεια ραδιοσυστήματα.....	12
1.2.1 Ανάλυση συστημάτων.....	12
1.2.2 Νέα συστήματα και καινοτομίες.....	14
1.3 Επίγεια κινητά δίκτυα.....	16
1.3.1 Ανάλυση συστημάτων.....	16
1.3.2 Νέα συστήματα και καινοτομίες.....	18
1.4 Δορυφορικά δίκτυα.....	19
1.4.1 Δορυφορικά κινητά δίκτυα (MSS) στην L ζώνη συχνοτήτων.....	19
1.4.2. Δορυφορικά δίκτυα VSAT.....	21
1.5 Συνδυαστικά δίκτυα (mesh/ad hoc network).....	22
1.5.1 Αρχιτεκτονική του δικτύου.....	23
1.5.2 Χαρακτηριστικά των δικτύων πλέγματος(mesh/ad hoc network).24	
1.5.3. Προκλήσεις και εμπόδια.....	24
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΓΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ.....27

2.1 Βασικό μοντέλο διάδοσης.....	27
2.2 Ανακλάσεις από γειτονικά πλοία και μετατοπίσεις Doppler.....	28
2.3 Καμπυλότητα της γης	29
2.3.1 Τροποποίηση μοντέλου 2-ακτινών για να συμπεριληφθεί η καμπυλότητα.....	30
2.4 Μεταβολές σήματος εξαιτίας της κίνησης του πλοίου.....	32
2.4.1 Συνδυασμός κίνησης του πλοίου και καμπυλότητα της γης.....	33
2.4.2 Ανάλυση των επιδράσεων της κίνησης του πλοίου	35
2.4.3 Θαλάσσιες καταστάσεις και μοντελοποίηση κυμάτων.....	36

2.5	Σημασία της έλλειψης εμποδίων στην πρώτη ζώνη Fresnel.....	38
2.6	Παρουσία των στρωμάτων εξάτμισης (evaporation ducts) στα θαλάσσια κανάλια.....	39
2.6.1	Παράγοντας διάδοσης και μοντέλο απωλειών.....	40
2.6.2	Στρώματα εξάτμισης (evaporation ducts).....	40
2.6.3	Advanced Propagation Model.....	41
2.6.3.1	Parabolic Equation Model.....	41
2.6.3.2	Ray Optics Model.....	43
2.6.3.3	Flat Earth Model.....	44
2.6.4	Χρήση μοντέλου διαλείψεων.....	44
2.6.5	Επίδραση του στρώματος εξάτμισης στο σήμα.....	46
2.7	Γραμμικό μοντέλο απωλειών διάδοσης βασισμένο στο P.1546-2.....	53
2.8	Μοντέλο σχεδόν ντετερμινιστικό, συνδυασμός του PEI μοντέλου και της σύστασης της ITU-R P.1546-2.....	54
2.8.1	Σύγκριση μετρήσεων με μοντέλο PEI.....	55
2.8.2	Σύγκριση μετρήσεων με άλλα μοντέλα απωλειών διάδοσης..	57
2.8.3	Παρουσίαση του σχεδόν ντετερμινιστικού συνδυαστικού Μοντέλου.....	57
2.9	Μοντέλο απωλειών σε τροπικές περιοχές.....	59
2.9.1	Περιβάλλον διάδοσης ακριβώς πάνω από την επιφάνεια του νερού.....	59
2.10	Μοντέλο απωλειών διάδοσης σε θαλάσσια κανάλια 5G.....	62
2.10.1	Μετρήσεις στις συχνότητες 35GHz και 94GHz.....	63
2.10.2	Προτεινόμενο μοντέλο απωλειών για 5G τεχνολογία στις θαλάσσιες επικοινωνίες.....	65
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	67
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	69
3.1	Έννοια συνδεσιμότητας.....	69
3.2	Συνδεσιμότητα και ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα.....	69

3.3 Κατασκευή ενός πολυβηματικού δικτύου.....	70
3.4 Poisson Boolean το βασικό μοντέλο συνδεσιμότητας.....	71
3.4.1 Υπολογισμός συνδεσιμότητας με την χρήση του Poisson Boolean.....	71
3.5 Μοντέλο συνδεσιμότητας που συμπεριλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του καναλιού.....	73
3.6 Βασικά μοντέλα κινητικότητας (Mobility Models).....	74
3.6.1 Τυχαία μοντέλα κινητικότητας (Random-based mobility models)..	74
3.6.1.1 Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου (Random Walk Mobility Model).....	75
3.6.1.2 Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων (Random Waypoint Mobility Model).....	75
3.6.1.3 Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης (Random Direction Mobility Model).....	76
3.6.2 Μοντέλα κινητικότητας με χρονική εξάρτηση (Mobility models with temporal dependency).....	77
3.6.2.1 Μοντέλο Κινητικότητας Gauss – Markov (Gauss – Markov Mobility Model).....	77
3.6.2.2 Πιθανοτική εκδοχή του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου (Probabilistic Version of Random Walk Mobility Model).....	78
3.6.3 Μοντέλα Κινητικότητας με Γεωγραφικό Περιορισμό (Mobility models with Geographic Restriction).....	79
3.6.3.1 Μοντέλο Κινητικότητας Μονοπατιού (Pathway Mobility Model).....	80
BIBLIOΓΡΑΦΙΑ.....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....	83
--	-----------

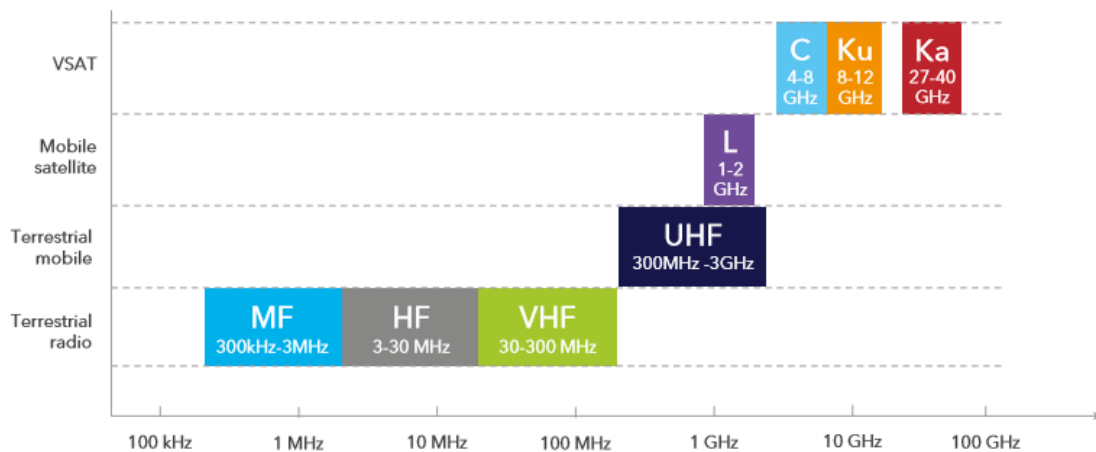
4.1 Μοντέλο δύο ακτινών (Βασικό για την ντετερμινιστική προσέγγιση των απωλειών διάδοσης στις θαλάσσιες επικοινωνίες κοντινών αποστάσεων)...	83
4.2 Μοντέλο τριών ακτινών (επίδραση των υδρατμών και του στρώματος που δημιουργούν).....	86
4.3 Γραμμικό μοντέλο απωλειών διάδοσης βασισμένο στο P.1546-2.....	89
4.4 Τροποποιημένο μοντέλο δύο ακτινών για ντετερμινιστική προσέγγιση απωλειών διάδοσης στις θαλάσσιες επικοινωνίες σε συχνότητες που λειτουργεί το 5G.....	91
4.5 Σχεδόν ντετερμινιστικό μοντέλο βάσει του P.1546 της ITU-R και του P.E.L μοντέλου.....	94
4.6 Προσπάθεια συνδυασμού μοντέλων.....	98
4.6.1 P.1546-2 σε συνδυασμό με το τροποποιημένο μοντέλο 2-ακτινων (Για 5G).....	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESH NETWORKS) ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.....	101
5.1 Χαρακτηριστικά πρωτοκόλλων	101
5.2 Προσομοιώσεις.....	104
5.2.1 Προσομοιώσεις με χρήση μοντέλου τυχαίων στάσεων.....	104
5.2.2 Προσομοιώσεις με χρήση μοντέλου τυχαίας κατεύθυνσης.....	117
5.3 Συμπεράσματα προσομοιώσεων.....	125
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	126
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	127
6.1 Πιθανές μελλοντικές έρευνες.....	127

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Παλαιότερα, τα πλοία που έφευγαν από το λιμάνι έχαναν κάθε επικοινωνία με την ακτή. Αυτό ήταν γεγονός μέχρι την εισαγωγή των ραδιοσυστημάτων στις αρχές του 20ου αιώνα. Έκτοτε, τόσο η χωρητικότητα του καναλιού όσο και η κάλυψη βελτιώθηκαν σταδιακά ενώ προστέθηκαν νέα συστήματα και τεχνολογίες. Πλέον υπάρχει η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ πλοίου και σταθμού βάσης σε οποιαδήποτε επίγειο σημείο. Αυτό συμβαίνει λόγω των διαφορετικών δικτύων που μπορούν να εφαρμοστούν στις θαλάσσιες επικοινωνίες. Συγκεκριμένα μιλάμε για τα δίκτυα μέσω των επίγειων ραδιοσυστημάτων, τα επίγεια κινητά, τα δορυφορικά κινητά δίκτυα (MSS) στην L ζώνη και τα δορυφορικά VSAT δίκτυα. Τα πρώτα λειτουργούν στις MF (300kHz-3MHz), HF (3MHz-30MHz), VHF (30MHz-300MHz) ζώνες συχνοτήτων, τα επίγεια κινητά δίκτυα στην UHF (300MHz -3GHz), τα MSS στην L (1-2GHz) και τα VSAT στις C (4-8GHz), Ku (8-12GHz) και Ka (27-40GHz) όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.



Εικόνα 1.1. Ζώνες συχνοτήτων σχετικές με τις θαλάσσιες επικοινωνίες[1]

1.2 Επίγεια ραδιοσυστήματα

1.2.1 Ανάλυση συστημάτων

Τα επίγεια ραδιοσυστήματα VHF, HF, MF στις θαλάσσιες επικοινωνίες αποτελούν το αρχαιότερο τμήμα τους και ως εκ τούτου τη θεμελιώδη βάση των GMDSS υποχρεωτικών προδιαγραφών. Οι υπηρεσίες που παρέχονται είναι :

- Digital Selective Calling (DSC): Η DSC είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί ψηφιακούς κωδικούς, οι οποίοι δίνουν τη δυνατότητα σε έναν σταθμό να έρχεται σε επαφή και να μεταφέρει πληροφορίες με άλλους σταθμούς. Συνήθως χρησιμοποιείται για μηνύματα κινδύνου, για επείγουσα ανάγκη και για την ευρύτερη ασφάλεια του πλοίου. Επίσης αποσκοπεί στην εξάλειψη της συνεχής παρακολούθησης των συχνοτήτων κινδύνου, αφού πλέον το σύστημα αυτοματοποιείται.[2]
- Narrowband Direct Printing (NBDP) : Το NBDP είναι μια τεχνική που επεξεργάζεται τα ραδιοσήματα , με σκοπό την απεικόνισή τους μέσω τηλέγραφου. Το NBDP (γνωστό επίσης και ως radio telex) είναι διαμορφωμένο με FSK σε κανάλια HF των 0,5 kHz και υποστηρίζει μετάδοση δεδομένων χαμηλής ταχύτητας (100 bps) στις ζώνες 1,6-26,5 MHz. Γίνεται χρήση του NBDP για την αναφορά θέσεων των πλοίων και τη δημοσίευση μετεωρολογικών προειδοποιήσεων και προβλέψεων από σταθμούς στην ακτή.[2]
- Navtex (Navigational Telex): Το Navtex είναι μια διεθνής αυτοματοποιημένη υπηρεσία άμεσης εκτύπωσης που λειτουργεί στις μεσαίες συχνότητες των 518 kHz και 490 kHz για την μετάδοση προειδοποιήσεων και προβλέψεων πλοήγησης και μετεωρολογικών φαινομένων καθώς και επείγουσες πληροφορίες που αφορούν την ασφάλεια. Το Navtex αναπτύχθηκε για να παρέχει ένα χαμηλού κόστους, απλό και αυτοματοποιημένο μέσο για τη λήψη πληροφοριών σε απόσταση περίπου 370 χλμ. (200 ναυτικά μίλια) από την ακτή. Η διεθνής συχνότητα navtex είναι 518 kHz και οι εκπομπές αυτές είναι πάντα στα αγγλικά, ενώ χρησιμοποιεί την 490 kHz ειδικά για εκπομπές σε τοπικές γλώσσες.[2]
- AIS (automatic identification system): Το AIS είναι ένα σύστημα ανταλλαγής δεδομένων βασισμένο στο TDMA που χρησιμοποιείται από πλοία και αρχές της ξηράς. Ο κύριος σκοπός του AIS είναι η βελτίωση της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας, ο αποτελεσματικός έλεγχος των πλοίων, η προστασία του περιβάλλοντος και η διευκόλυνση της λειτουργίας της VTS (Vessel Traffic Services) υπηρεσίας που ελέγχει και παρακολουθεί τη θαλάσσια κίνηση. Το AIS παρέχει στα πλοία την δυνατότητα της ανταλλαγής ηλεκτρονικών δεδομένων για την αναγνώριση, τη θέση, την πορεία και την ταχύτητα, των γειτονικών πλοίων αλλά και του ίδιου στους σταθμούς ξηράς, ώστε να υπάρχει ο απαιτούμενος έλεγχος. Χρησιμοποιεί τα κανάλια VHF AIS 1 (161.975 MHz) και AIS 2 (162.025 MHz) ή περιφερειακά κανάλια σε καθορισμένες γεωγραφικές περιοχές, ενώ για μεγαλύτερη κάλυψη γίνεται χρήση και δορυφορικών δικτύων.

Οι διαφορές μεταξύ των συστημάτων εντοπίζονται στις ζώνες συχνοτήτων και στην ακτίνα κάλυψης. Στον πίνακα 1 παρουσιάζεται η ακτίνα κάλυψης των τριών ζωνών συχνοτήτων των επίγειων ραδιοσυστημάτων που χρησιμοποιούνται στις θαλάσσιες επικοινωνίες. Όπως φαίνεται και στον πίνακα στην VHF ζώνη η εμβέλεια είναι περιορισμένη στα 40 με 60 ναυτικά μίλια , όμως αυτό εξισορροπείται με την

καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών που παρέχει λόγω του μεγαλύτερου φάσματος που μπορεί να διαθέσει.

SYSTEM/BAND	TYPICAL COVERAGE FROM EARTH STATION
VHF	40 - 60 nautical miles
MF	150 - 200 nautical miles
HF	Worldwide (given appropriate conditions & frequency)

Πίνακας 1.1. Τυπική κάλυψη ραδιοσυστημάτων [1]

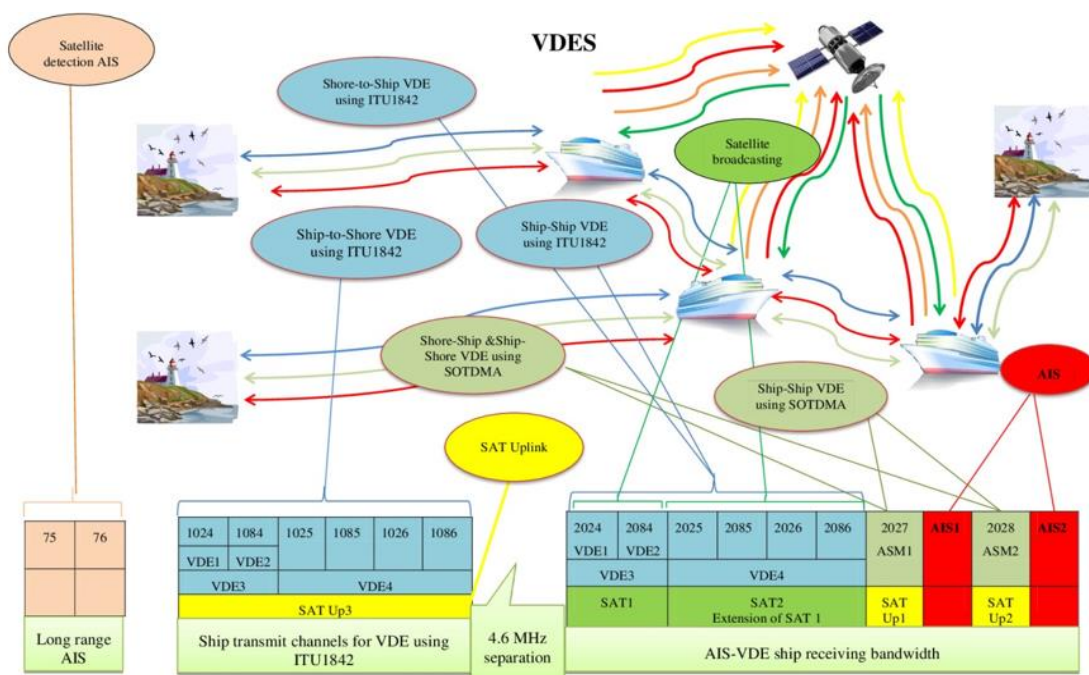
Τα συγκεκριμένα συστήματα προτείνονται από τις θαλάσσιες αρχές και λειτουργούν σε πληθώρα περιπτώσεων εκτός από το εμπόριο, ενώ το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι οι υπηρεσίες που προσφέρουν παρέχονται χωρίς χρέωση στην ναυτιλιακή κοινότητα.[1]

Αν και οι υπηρεσίες αυτές είναι πολύ χρήσιμες και αναγκαίες για την ασφάλεια των πλοίων, οι τεχνολογικές εξελίξεις σε αυτές τις ζώνες δεν έχουν καταφέρει την υποστήριξη ευρυζωνικών θαλάσσιων δικτύων. Αυτό καθίσταται σαφές εάν ληφθεί υπόψη ότι στις συγκεκριμένες ζώνες το εύρος ζώνης είναι περιορισμένο, άρα σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους (δορυφορικά δίκτυα, επίγεια κινητά δίκτυα) τα συστήματα αυτά παρέχουν φάσμα στενής ζώνης. Έτσι, δεν υπάρχει μεγάλη ανάπτυξη στα συγκεκριμένα συστήματα. Επίσης, στις ζώνες MF και VHF η κάλυψη είναι περιορισμένη σε μια απόσταση από τον σταθμό όπως φαίνεται και από τον πίνακα 1, ενώ στην HF υπάρχει περιορισμός στην ποιότητα της υπηρεσίας που παρέχεται.[1]

1.2.2 Νέα συστήματα και καινοτομίες

Το VDES (VHF Data Exchange System) είναι η νέα ελπιδοφόρα καινοτομία του συγκεκριμένου τομέα θαλάσσιων επικοινωνιών, όπου θα επιτύχει την δημιουργία μίας υπηρεσίας ψηφιακών δεδομένων στα ήδη υπάρχουσα VHF ραδιοσυστήματα. Σκοπός της είναι η αντικατάσταση του AIS και η δημιουργία νέων καναλιών ανταλλαγής δεδομένων, που θα μπορούν να υποστηρίξουν νέες ναυτιλιακές εφαρμογές. Το VDES μπορεί να δώσει κανάλια με υψηλότερο ρυθμό και μεγαλύτερη ευφύια (307,2 kbps ανά 100kHz) από αυτά του AIS (9,6 kbps ανά 25 kHz). Αναμένεται να αποτελέσει μία αξιόπιστη λύση για εφαρμογές ελέγχου ναυτιλιακής κίνησης (VTS: Vessel Traffic Service) καθώς και ασφάλειας (MSI: Maritime Safety Information). Αντιθέτως, εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις φάσματος δεν είναι σε θέση να

υποστηρίζει , για αυτό η χρήση του θα περιορίζεται σε υπηρεσίες και μηνύματα στενής ζώνης. Επιπλέον , το VDES έχει σχεδιαστεί για την ισχυροποίηση του δικτύου ,την μεγαλύτερη ανταλλαγή δεδομένων και την παγκόσμια κάλυψη, πράγμα που προϋποθέτει και την ενσωμάτωση ποικίλων λειτουργιών. Οι ραδιοζεύξεις του εξυπηρετούν την επικοινωνία μεταξύ πλοίων, σταθμών βάσεως με πλοίων καθώς και την επικοινωνία με μερικούς δορυφόρους(εικόνα 2).[2]



Εικόνα 1.2. Κανάλια VDES [2]

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 2) παρουσιάζονται και οι συχνότητες που λειτουργούν τα παραπάνω δίκτυα.

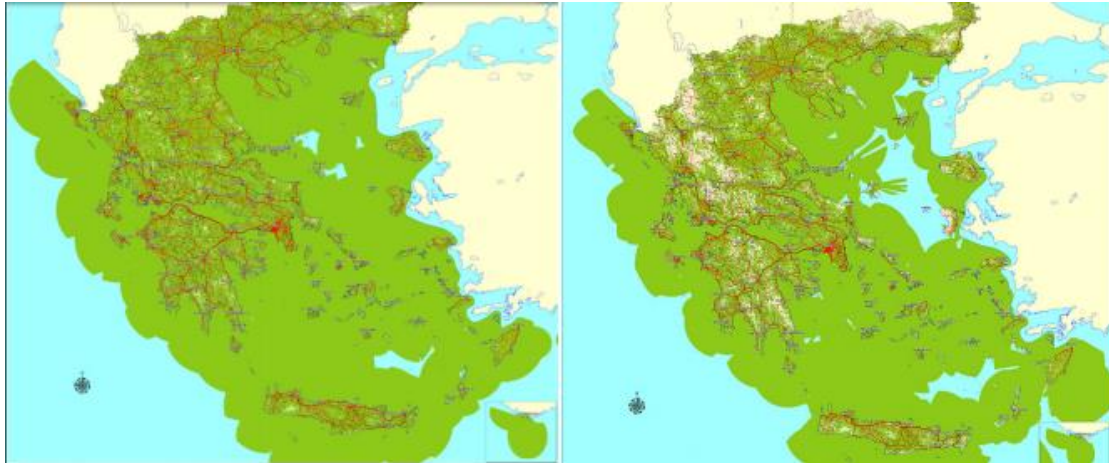
Channel number in Appendix 18	Transmitting frequencies (MHz) for ship and coast stations	
	Ship stations (ship-to-shore) Ship stations (long range AIS) Ship stations (ship-to-satellite)	Coast stations (ship-to-ship) Satellite-to-ship ⁴
AIS 1	161.975	161.975
AIS 2	162.025	162.025
75 (long range AIS)	156.775 (ships are Ix only)	N/A
76 (long range AIS)	156.825 (ships are Ix only)	N/A
2027 (ASM 1)	161.950 (2027)	161.950 (2027)
2028 (ASM 2)	162.000 (2028)	162.000 (2028)
24 (VDE 1)	157.200 (1024)	161.800 (2024)
84 (VDE 2)	157.225 (1084)	161.825 (2084)
24/84 (VDE 3)	50 kHz channel (1024/1084, merged)	50 kHz channel (2024/2084, merged)
2024/2084 (SAT 1)	N/A	50 kHz channel (2024/2084, merged) (For satellite broadcasting to ship)
25/85/26/86 (VDE 4, SAT2)	100 kHz channel (25/85/26/86, lower legs, merged)	100 kHz channel (25/85/26/86, upper legs, merged)
25	157.250 (1025)	161.850 (2025)
85	157.275 (1085)	161.875 (2085)
26	157.300 (1026)	161.900 (2026)
86	157.325 (1086)	161.925 (2086)

Πίνακας 1.2. VHF κανάλια και συχνότητες για το VDES (AIS, ASM and VDE)[2]

1.3 Επίγεια κινητά δίκτυα

1.3.1 Ανάλυση συστημάτων

Οι επίγειες κινητές επικοινωνίες έχουν καταφέρει αξιοσημείωτη ανάπτυξη τις τελευταίες δύο δεκαετίες προσφέροντας ποιοτικότερες υπηρεσίες στους χρήστες στη στεριά. Όπως είναι κατανοητό, στους σταθμούς βάσης που βρίσκονται κοντά στις ακτές έχει ανατεθεί ο ρόλος της διαχείρισης της ναυτιλιακής κίνησης. Η τρέχουσα κάλυψη 3G εκτείνεται σε περίπου 10 ναυτικά μίλια (nm), ενώ οι υπηρεσίες 2G φτάνουν τα 20 nm ή και ακόμη μακρύτερα σε ορισμένες περιοχές. Για παράδειγμα στο Αιγαίο έχει επιτευχθεί μεγαλύτερη κάλυψη 2G και 3G όπως παρουσιάζουν οι παρακάτω εικόνες από τους κύριους παρόχους. Αυτό έχει επιτευχθεί με την εκμετάλλευση των γεωγραφικών θέσεων των νησιών και έχει ως αποτέλεσμα τα πλοία που ταξιδεύουν μέσω του Αιγαίου στη μαύρη θάλασσα, να έχουν τουλάχιστον κατά 90% 2G κάλυψη, ουσιαστικά σε μια απόσταση 300 nm.[3]



Εικόνα 1.3. a) 2G κάλυψη b) 3G κάλυψη[3]

Με την κατάλληλη ισχύ, κεραία και διαμόρφωση και τη χρήση της ζώνης των 800-900 MHz, οι υπηρεσίες 4G (LTE) μπορεί να φθάσουν τα 100 km (50 nm), αν και με μειωμένες ταχύτητες δεδομένων. Επιπλέον, ενώ οι τυπικές ταχύτητες δεδομένων 3G είναι της τάξης των μερικών Mbps, οι νέες τεχνολογίες 4G όπως το LTE μπορούν να παρέχουν πάνω από 100Mbps. Παρόλο που η ακτίνα κάλυψης για μετάδοση φωνής είναι μικρότερη από τα συστήματα VHF, τα κυψελωτά συστήματα είναι μία χρήσιμη εναλλακτική για τη συνδεσιμότητα μικρών πλοίων σε μικρή απόσταση από την ακτή, καθώς και μεγάλων πλοίων όταν πλησιάζουν στα λιμάνια και μπλοκάρεται το VSAT τους από υψηλά εμπόδια όπως κτήρια και βουνά. Τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν με τη σειρά τους βασικά μειονεκτήματα και περιορισμούς. Αρχικά όπως έχει προαναφερθεί μπορούν να παρέχουν αξιόπιστη συνδεσιμότητα σε πλοία που δεν απέχουν μεγάλες αποστάσεις από το σταθμό βάσης στην ακτή. Άρα δεν μπορεί να αποτελέσει το πρωταρχικό σύστημα αλλά μια εναλλακτική και συμπληρωματική μέθοδο. Επίσης, η δραματική τεχνολογική εξέλιξη στα κυψελωτά δίκτυα δεν έχει τον αντίστοιχο αντίκτυπο στις θαλάσσιες επικοινωνίες γιατί η βάση και η προτεραιότητα δίνεται στους χρήστες στην στεριά ως επί το πλείστο. Ταυτόχρονα θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά και το κόστος των χρηστών που κάνουν χρήση της υπηρεσίας, αφού χρησιμοποιούνται αδειοδοτημένες περιοχές φάσματος, ενώ παράλληλα προστίθενται και το κόστος περιαγωγής στα διεθνή ταξίδια.

Το Wi-Fi είναι μια άλλη επίγεια κινητή τεχνολογία που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Το Wi-Fi ορίζεται ως τα προϊόντα του ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN) βασισμένα στα πρότυπα του IEEE 802.11 στο μη ρυθμισμένο φάσμα των 2.4GHz και 5GHz. Τα τελευταία χρόνια έχουν υπάρξει αρκετά παραδείγματα ανάπτυξης δικτύου Wi-Fi σε λιμάνια, π.χ. Βλαδιβοστόκ (Ρωσία), Ρότερνταμ (Ολλανδία) και Όκλαντ (Νέα Ζηλανδία) [1]. Αυτές οι ζώνες IP συνήθως δημιουργούνται από τις χώρες της σημαίας των πλοίων ή τις λιμενικές αρχές για να διευκολύνουν την υποχρεωτική αναφορά, ή από τους φορείς τηλεπικοινωνιών για την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο έναντι κάποιου κόστους. Καθώς το Wi-Fi δεν έχει άδεια χρήσης, οι προσφερόμενες υπηρεσίες έχουν πολύ χαμηλό κόστος ή και καθόλου ανά χρήστη. Παρ' όλο που το WiFi παραμένει μια εξαιρετικά ικανή και

οικονομικά αποδοτική επιλογή για σημεία με μεγάλο όγκο χρηστών, λόγω του μη εξουσιοδοτημένου φάσματος δημιουργούνται αρκετές προκλήσεις που αφορούν την ποιότητα των υπηρεσιών. Σύμφωνα με έρευνα του Ινστιτούτου Ναυτιλίας του Greenwich, οι ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια αποτελούν τον κύριο λόγο για την αργή δημιουργία δικτύων Wi-Fi στα λιμάνια.

Το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) είναι ένα άλλο διαλειτουργικό πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας (IEEE 802.16) που χρησιμοποιείται από τη Ναυτιλιακή και Λιμενική Αρχή της Σιγκαπούρης (MPA) για την παροχή συνδρομητικής υπηρεσίας με το όνομα WISEPORT στο λιμάνι της Σιγκαπούρης, βασιζόμενη στη ζώνη φάσματος των 2.3 GHz (με άδεια), παρέχοντας κάλυψη 15 km και ρυθμούς δεδομένων από 512 kbps έως 8 Mbps. Το WiMAX όμως γενικότερα δεν αποδίδει τα αναμενόμενα αποτελέσματα [3], ειδικότερα στην κάλυψη λόγω προβλήματος που παρουσιάζεται στην εφαρμογή της κατάλληλης κεραιάς στα τερματικά, ενώ παράλληλα παρουσιάζει παρόμοια προβλήματα ασφαλείας με το WiFi.

1.3.2 Νέα συστήματα και καινοτομίες

Μια ενδιαφέρουσα πρόσφατη εξέλιξη είναι η ανάπτυξη κινητών μικρών κελιών (picocells) επί των σκαφών. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην εγκατάσταση ενός σταθμού βάσης 2G/3G (picocell) στο σκάφος, που επιτρέπει την πρόσβαση συσκευών με δυνατότητα 2G/3G συνδεσιμότητας. Η On-Waves (Ισλανδία) και η MCP (Νορβηγία) είναι δύο εταιρείες που παρέχουν τέτοιες λύσεις, οι οποίες είναι πολύ δημοφιλείς στα κρουαζιερόπλοια. Το βασικό πλεονέκτημα με αυτά τα συστήματα είναι ότι οι χρήστες έχουν εύκολα τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν τις προσωπικές τους φορητές συσκευές. Η χρήση τους όμως είναι σχετικά ακριβή λόγω της χρήσης του VSAT backhaul και των διεθνών χρεώσεων περιαγωγής.

Η MCP συμμετέχει επίσης και σε άλλη ενδιαφέρουσα ανάπτυξη πάνω στον τομέα των ναυτιλιακών επίγειων κινητών επικοινωνιών, καθώς σχεδιάζουν την ανάπτυξη ενός δικτύου LTE (4G) στη νορβηγική υφαλοκρηπίδα. Ο κύριος στόχος είναι η παροχή επικοινωνίας στα άτομα και στα συστήματα των πλατφόρμων εκμετάλλευσης κοιτασμάτων, αλλά με ακτίνα κάλυψης υπηρεσίας έως 30-40 nm. Πολλά από τα πλοία που περνούν μπορούν επίσης να επωφεληθούν από την υπηρεσία, η οποία θα είναι προσβάσιμη μέσω τυπικού εξοπλισμού. Ένα τέτοιο υπεράκτιο δίκτυο 4G θα καταστήσει δυνατή την παραμονή των υπεράκτιων σκαφών εφοδιασμού εντός κάλυψης 4G κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης, καθώς και κατά τη διάρκεια μεγάλου μέρους του ταξιδιού από και προς το λιμάνι.



Εικόνα 1.4. Σχεδιασμός 4G κάλυψης της MCP στην Νορβηγική υφαλοκρητίδα

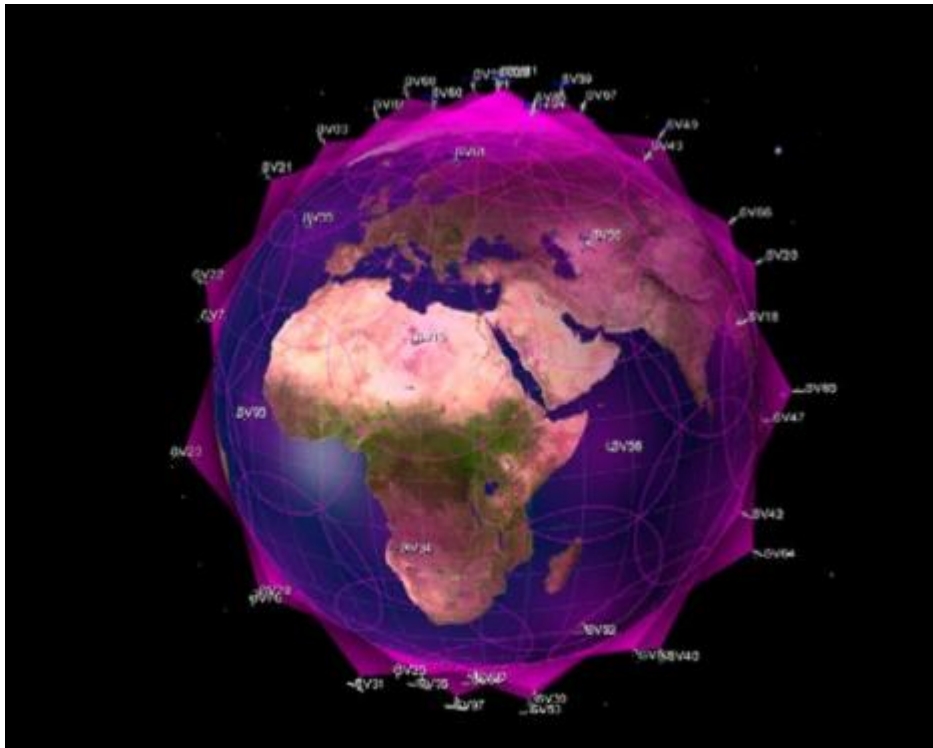
Εκτός από αυτά, αναμένονται καινοτομίες που θα χρησιμοποιούν μη αδειοδοτημένες τεχνολογίες Wi-Fi. Έχουν ήδη γίνει έρευνες στην συχνότητα 5.8 GHz στην οποία οι διεθνείς κανονισμοί επιτρέπουν τη χρήση υψηλότερης ισχύς μετάδοσης, αυξάνοντας έτσι την εμβέλεια. Δημιουργήθηκε σύνδεση σημείου προς σημείο με χαμηλού κόστους εξοπλισμό και αποδείχθηκε η επίτευξη της παροχής 1 Mbit/s έως και σε 7χλμ, όπως και η ικανοποιητική υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου.[6]

1.4 Δορυφορικά δίκτυα

1.4.1 Δορυφορικά κινητά δίκτυα (MSS) στην L ζώνη συχνοτήτων

Από την ίδρυσή της το 1976, η Inmarsat υπήρξε ένας αξιόπιστος πάροχος υπηρεσιών δορυφορικών επικοινωνιών στην ναυτιλιακή κοινότητα ενώ κατέχει και λειτουργεί ένα δίκτυο δορυφόρων στην L-ζώνη σε γεωστατική τροχιά (35.786 χιλιόμετρα υψόμετρο) και πύλες (gateway) που συνδέονται με τα δημόσια δίκτυα. Το Inmarsat-C είναι ένα προϊόν για χαμηλού ρυθμού μηνύματα που ξεκίνησε το 1992, και αποτελεί μέρος του εξοπλισμού για τα σκάφη βάση των προδιαγραφών του GMDSS. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η Fleet Broadband η οποία είναι μια οικογένεια ευρυζωνικών προϊόντων που ξεκίνησε το 2007, έχει σχεδιαστεί για τους Inmarsat-4 δορυφόρους και παρέχονται υπηρεσίες 3G-τύπου έως και 500 kbps. Τα πλεονεκτήματα των σημερινών προϊόντων Inmarsat είναι η αξιοπιστία και η μεγάλη κάλυψη ενώ πλέον είναι ο κυρίαρχος παίκτης, με μερίδιο αγοράς περίπου 90% στα κινητά δορυφορικά συστήματα (L-band). [1]

Ένας άλλος πυλώνας της συγκεκριμένης κατηγορίας δικτύων είναι το δορυφορικό σύστημα της εταιρίας Iridium. Οι δορυφόροι της λειτουργούν στην L ζώνη συχνοτήτων, βρίσκονται στην χαμηλή τροχιά (LEO) σε υψόμετρο περίπου 780 χιλιομέτρων, έχουν τροχιακή ταχύτητα 27000 km/s και χρειάζονται 100 λεπτά για την ολοκλήρωση ενός κύκλου γύρω από γη. Επιτυγχάνουν ισχυρότερα σήματα, συντομότερη διαδρομή μετάδοσης και φυσικά την δυνατότητα κάλυψης των πόλων της γης. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι και η απευθείας επικοινωνία με τους γειτονικούς δορυφόρους μέσω δια-δορυφορικών συνδέσεων (ISL). Όπως καθίσταται όμως ξεκάθαρο σε αυτά τα συστήματα αντιμετωπίζουμε φαινόμενα Doppler και δορυφορικές διαπομπές. Στην εικόνα 5 φαίνονται οι LEO δορυφόροι της Iridium και η παγκόσμια κάλυψη που παρέχουν.



Εικόνα 1.5. Οι 66 LEO δορυφόροι της Iridium

Στον συγκεκριμένο τομέα βρίσκονται άλλοι δύο σημαντικοί οργανισμοί. Αρχικά η Thuraya, η οποία κάνει χρήση δύο γεωστατικών δορυφόρων και παρέχει το ναυτιλιακό πακέτο OrionIP που δίνει παρόμοιες υπηρεσίες όπως το πακέτο Fleet Broadband της Inmarsat. Ο άλλος είναι η OrbComm η οποία διαθέτει δίκτυο 29 LEO δορυφόρων σε υψόμετρο 775 χιλιομέτρων με κύριο σκοπό την υποστήριξη M2M (machine-to-machine) εφαρμογών, ενώ είναι μοναδική αφού είναι η μόνη που λειτουργεί στην VHF ζώνη μεταξύ 137-150 MHz.

Τα MSS δορυφορικά συστήματα έχουν περιορισμένο εύρος φάσματος λόγω της χρήσης κατά κύριο λόγο της L ζώνης συχνοτήτων και παράλληλα υψηλές τιμές χρήσης των υπηρεσιών, πράγμα που μειώνει τους ρυθμούς ανάπτυξης των τεχνολογιών στον συγκεκριμένο τομέα.

1.4.2. Δορυφορικά δίκτυα VSAT

Τα VSAT είναι τερματικά τα οποία υποστηρίζονται από δορυφόρους σε γεωσύγχρονη τροχιά και λειτουργούν στις C, Ku και Ka ζώνες. Λαμβάνοντας υπόψη το μεγάλο διαθέσιμο φάσμα στις ζώνες αυτές, παρέχονται υψηλοί ρυθμοί δεδομένων και το κόστος είναι σημαντικά χαμηλότερο από τα συστήματα στην L-ζώνη όπως αυτά της Inmarsat και της Iridium. Επίσης ένα άλλο αξιοσημείωτο τεχνικό χαρακτηριστικό είναι η χρήση ενός ακριβή και αξιόπιστου μηχανισμού σταθεροποίησης και παρακολούθησης, ώστε να ευθυγραμμίζεται η κεραία του τερματικού με τον εκάστοτε δορυφόρο. Ένα συνηθισμένο VSAT μπορεί να παρέχει ταχύτητες δεδομένων πάνω από 4 Mbit / s, ενώ η συνδρομή εξαρτάτε από το μέγεθος του δορυφορικού πιάτου, την κάλυψη και το εύρος ζώνης. Ένα τυπικό κόστος συνδρομής VSAT κυμαίνεται μεταξύ 1000\$ και 5000\$. Σε αντίθεση με τα συστήματα MSS στην L-band, η αγορά των VSAT είναι άκρως ανταγωνιστική και έχουν πραγματοποιηθεί πολλές εμπορικές και τεχνολογικές εξελίξεις τα τελευταία έτη.

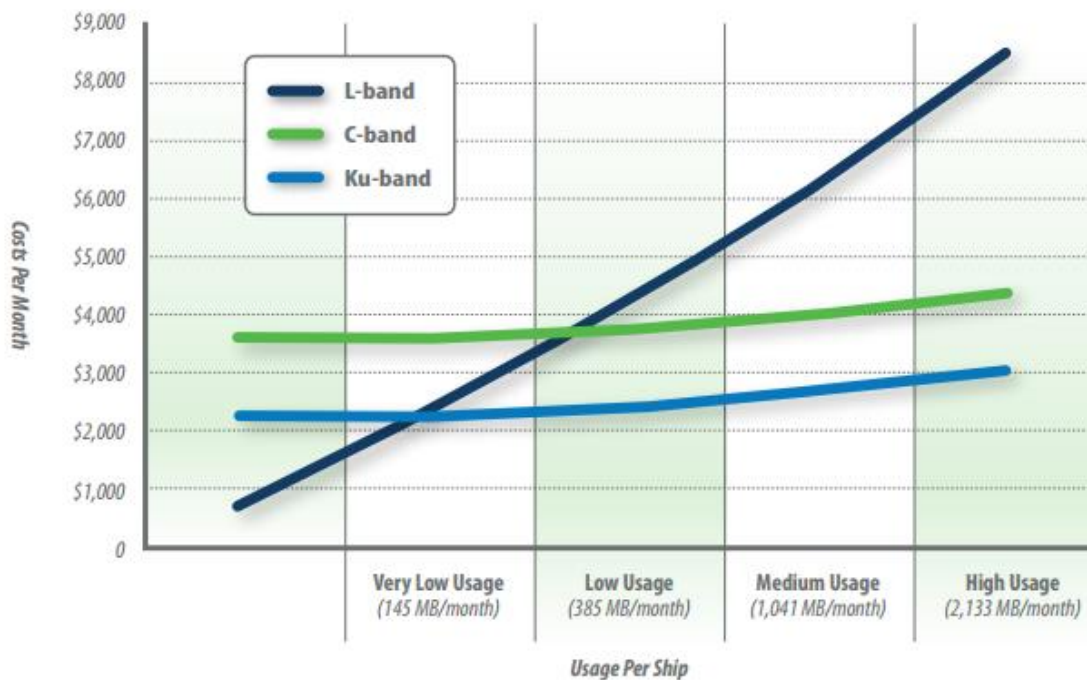
Εξαιτίας του χαμηλότερου κέρδους της κεραίας, τα VSAT στην C-ζώνη παρέχουν εξαιρετική κάλυψη λόγω των μεγάλων δέσμεων που επιτυγχάνουν και καλύπτουν μεγάλες θαλάσσιες περιοχές, απαιτώντας όμως μεγαλύτερες διαστάσεις κεραίας (1.8m-2.4m) πράγμα που φαίνεται στον πίνακα 3(table 3) [4]. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών στην Ku-ζώνη η κάλυψη έχει βελτιωθεί και μπορούν πλέον να προσφέρουν μια πολύ αποδοτική εναλλακτική λύση έναντι των συστημάτων της C-ζώνης. Μάλιστα προσφέρουν δυνατότερο σήμα στις περιοχές κάλυψης (πίνακας 3). Στην Ka-ζώνη εξακολουθούν να υπάρχουν λίγοι δορυφόροι, αλλά λόγω του όγκου του διαθέσιμου εύρους ζώνης και τα πιθανά οφέλη απόδοσης από το υψηλότερο κέρδος κεραίας, υπάρχει η προσδοκία το κόστος χρήσης να μειωθεί μακροπρόθεσμα και να είναι μικρότερο από εκείνο της Ku-ζώνης.

	C-band	Ku-band	L-band
Antenna size	1.8m - 2.4m	.6m - 1.8m	.6m or lower
Frequency	3-6 GHz	12-18 GHz	Less than 2 GHz
Data rate	Up to 4+ Mbps	Up to 4+ Mbps	Up to 432 Kbps
Beam coverage	Global	Coastal, regional, near global	Global
Typical pricing model	Flat-fee	Flat-fee	Pay-per-use
Future direction	Required for large vessels crossing deep ocean waters Weaker signal than Ku-band, but has a larger coverage	Emerging choice for majority of small to large vessels Smaller beam footprints, but can be overlapped to accommodate most vessels routes	Incumbent technology, but becoming relegated to vessels with minimal communications requirements, or as a back up to VSAT

Πίνακας 1.3. Σύγκριση μεταξύ C-ζώνης , Ku-ζώνης and L-ζώνης [4]

Επίσης όσον αφορά το κόστος λειτουργίας οι τεχνολογίες MSS στη L-ζώνη παρουσιάζουν μία οικονομικότερη λύση όταν πρόκειται να γίνει περιορισμένη χρήση, κυρίως γιατί η πολιτική που ακολουθείται είναι η πληρωμή ανάλογα με τη χρήση που γίνεται. Καθώς όμως οι απαιτήσεις των εφαρμογών αυξάνονται , τα VSAT

και ειδικότερα εκείνα που λειτουργούν στη Ku-ζώνη και ίσως μελλοντικά και αυτά στην Ka-ζώνη, αποτελούν οικονομικότερη επιλογή αφού το κόστος μηνιαία είναι σταθερό (Εικόνα 6).[4]



Εικόνα 1.6. Κόστος υπηρεσιών [4]

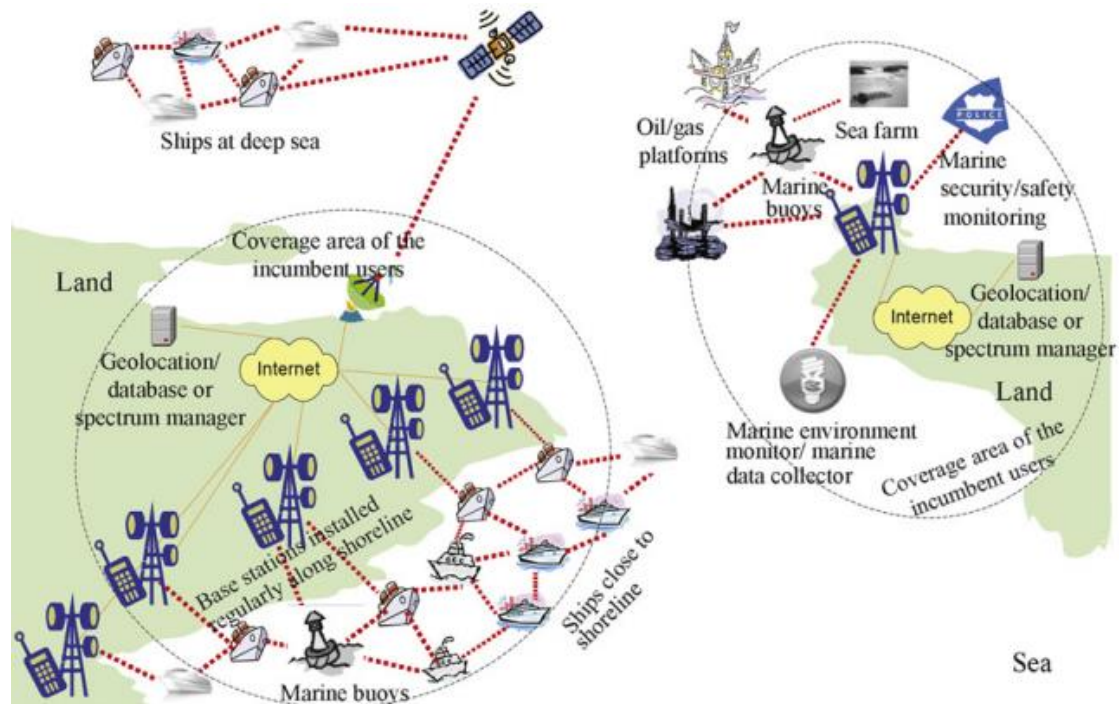
Το κύριο εμπόδιο για την υιοθέτηση του VSAT είναι το μέγεθος και το κόστος του εξοπλισμού του τελικού χρήστη. Εξαιτίας των προηγμένων ηλεκτρονικών συστημάτων του τερματικού και την ιδιαίτερως μεγάλης πλατφόρμας σταθεροποίησης της κεραίας, το κόστος του εξοπλισμού και της εγκατάστασης ναυτιλιακών VSAT είναι συνήθως στο εύρος \$ 50.000- \$ 100.000, το οποίο είναι πολύ υψηλότερο από ό, τι των προϊόντων L-ζώνης. Επίσης όσον αφορά τους κανόνες, τους κανονισμούς και τα πρότυπα λειτουργίας των VSAT, υπάρχει μεγάλη ασάφεια αφού γενικότερα δεν αναγνωρίζονται σαν επιλογή επικοινωνίας από την GMDSS. Ένα εξίσου σημαντικό πρόβλημα των συγκεκριμένων συστημάτων είναι η εξασθένηση σήματος και οι διαλείψεις που δημιουργούνται από τις καιρικές συνθήκες. Οι επιπτώσεις αυτές γίνονται σημαντικές σε συχνότητες πάνω από 11GHz και άρα απαιτούνται τρόποι που θα περιοριστούν ιδιαίτερα στην Ka-ζώνη. Τέλος, λόγω της χρήσης γεωσύγχρονων δορυφόρων οι υπηρεσίες VSAT δεν παρέχονται σε περιοχές με γεωγραφικό πλάτος πάνω από 75 μοίρες, άρα δεν έχουν εφαρμογή στους πόλους.

1.5 Συνδυαστικά δίκτυα (mesh/ad hoc network)

Στις θαλάσσιες επικοινωνίες υπάρχει η ανάγκη για οικονομικά και γρήγορα δίκτυα, πράγμα που δεν επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό με τα προηγούμενα τεχνολογικά συστήματα. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί ένα δίκτυο που διαμορφώνεται από γειτονικά πλοία, από τους θαλάσσιους φάρους και τις

σημαδούρες και συνδέεται με τα χερσαία δίκτυα μέσω των παραλιακών σταθμών βάσης. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα καινοτόμο δίκτυο πλέγματος το οποίο θα έχει την ικανότητα να συνδυάζει τις μεθόδους επικοινωνίας, το οποίο βασίζεται στην IEEE 802.16d τεχνολογία πλέγματος και στο αρχικό πρόγραμμα TRITON που έθεσε τις βάσεις για τα συγκεκριμένα ναυτιλιακά δίκτυα.[5]

1.5.1 Αρχιτεκτονική του δικτύου



Εικόνα 1.7. Αρχιτεκτονική των δικτύων πλέγματος (πολυβηματικών) [7]

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 7 μπορούμε να διακρίνουμε τρεις κατηγορίες των εν λόγω δικτύων.

- 1) Το κινητό δίκτυο που περιλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ των πλοίων κοντά στην ακτή και την επικοινωνία πλοίων με τους σταθμούς βάσης στη στεριά. Διαμορφώνεται από γειτονικά πλοία κοντά στην ακτή, θαλάσσιες σημαδούρες που χρησιμοποιούνται ως σταθμοί προώθησης δεδομένων και σταθμούς βάσης που εγκαθίστανται κατά μήκος της ακτογραμμής. Ένα τέτοιο σενάριο δικτύου εντοπίζεται σε μία στενή θαλάσσια έκταση με πολυσύχναστες ναυτιλιακές λωρίδες (όπως ο Πορθμός της Μαλάκκα) ή σε ένα λιμάνι με πολλά αγκυροβολημένα πλοία (όπως το λιμάνι της Σιγκαπούρης). Η πυκνότητα κόμβων είναι υψηλή και τα δεδομένα μεταφέρονται από ένα σταθμό στο εκάστοτε πλοίο μέσω των ενδιάμεσων πλοίων και κόμβων.[7]
- 2) Το κινητό δίκτυο πλέγματος των πλοίων μακριά από την ακτή. Όπως είναι προφανές βαθιά στους ωκεανούς δεν υπάρχει υψηλή πυκνότητα κόμβων για να προωθηθούν τα πακέτα, καθιστώντας αναγκαία την χρήση

δορυφορικών δικτύων. Έτσι χρειάζεται η εγκατάσταση ευφυή εξοπλισμού στα πλοία ώστε να κάνουν και χρήση δορυφορικών υπηρεσιών όταν η απόσταση των κοντινών πλοίων είναι μεγάλη.

- 3) Τα δίκτυα σταθερών θαλάσσιων δικτύων σχηματίζονται από θαλάσσιες εγκαταστάσεις όπως πλατφόρμες πετρελαίου ή φυσικού αερίου, από θαλάσσιες φάρμες και από ναυτιλιακές συσκευές παρακολούθησης. Εάν είναι απαραίτητο, μπορούν να εγκατασταθούν και θαλάσσιοι σημαντήρες για την αναμετάδοση και δρομολόγηση πακέτων. Επίσης είναι αναγκαία η ύπαρξη σταθμών στην ακτή που βρίσκονται κοντά σε αυτές τις εγκαταστάσεις.

1.5.2 Χαρακτηριστικά των δικτύων πλέγματος (mesh/ad hoc network)

Τα εν λόγω δίκτυα ενδέχεται να είναι στην ακτίνα κάλυψης των ήδη υφισταμένων. Για την κοινή τους λοιπόν λειτουργία είναι αναγκαίος ευφυής εξοπλισμός για την ανίχνευση διαθέσιμου φάσματος και η συχνή πρόσβαση σε γεωγραφική βάση δεδομένων για την ενημέρωση των κατειλημμένων καναλιών. Επίσης, σε διεθνή ταξίδια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικοί κανόνες και περιορισμοί της χρήσης του εξουσιοδοτημένου φάσματος της εκάστοτε χώρας.

Σημαντική προϋπόθεση για την εύρωστη λειτουργία είναι και η αξιοποίηση των λευκών φασματικών περιοχών της θαλάσσιας επικράτειας. Υπάρχουν λίγες μελέτες για τις λευκές περιοχές του φάσματος στη θάλασσα. Οι περιοχές που εστιάζεται το ενδιαφέρον είναι στο τηλεοπτικό φάσμα και η περιοχή μεταξύ 400 MHz και 5 GHz που λειτουργεί το επίγειο κυψελωτό δίκτυο. Ζώνες που μακριά από τη στεριά και τους επίγειους σταθμούς μπορούν να δώσουν αρκετές λευκές περιοχές για προσωρινή χρήση. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης του φάσματος των επίγειων θαλάσσιων επικοινωνιών και ειδικότερα της ζώνης VHF μεταξύ 156 και 174 MHz, που μπορεί αξιόπιστα να εξυπηρετήσει ευκαιριακές επικοινωνίες υψηλών ταχυτήτων. Ένα σημαντικό στοιχείο για τη χρήση των θαλάσσιων 'λευκών' περιοχών (white space) είναι ότι οι πρωταρχικοί χρήστες (πλοία και αρχές) πρέπει να προστατεύονται, γιατί συνήθως αυτές οι ζώνες είναι για μετάδοση σημαντικών πληροφοριών όπως σήματα κινδύνου και εκπομπή μετεωρολογικών δεδομένων. Έτσι, απαιτείται η πιθανότητα ανίχνευσης να είναι αρκετά υψηλή έτσι ώστε η μετάδοση που έχει προτεραιότητα να μπορεί να ανιχνευθεί με ακρίβεια και στον ελάχιστο χρόνο. Απαιτείται ακόμα και η άμεση εκκένωση των καναλιών, όταν πρόκειται ένας πρωταρχικός χρήστης να τα αξιοποιήσει [7].

1.5.3. Προκλήσεις και εμπόδια

Γενικότερα στις θαλάσσιες επικοινωνίες και κυρίως στα συγκεκριμένα δίκτυα μεγάλο πρόβλημα προκαλεί η αδιάκοπη κίνηση της επιφάνειας της θάλασσας. Τα θαλάσσια κύματα αλλάζουν το προσανατολισμό, το ύψος και ως εκ τούτου το κέρδος και την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Η ταραχή της επιφάνειας της θάλασσας

μπορεί να μετρηθεί από έναν όρο που λέγεται θαλάσσια κατάσταση (sea state) η οποία χαρακτηρίζει παραμέτρους όπως το ύψος κύματος, το μέσο μήκος του κύματος και τη μέση περίοδο των θαλάσσιων κυμάτων. Μία υψηλότερη κατάσταση μεταφράζεται σε υψηλότερα και με μεγαλύτερο μήκος κύματα όπως και μεγαλύτερες περιόδους ταραγμένης θαλάσσιας επιφάνειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη ποιότητα των δικτύων πλέγματος και την ανάγκη διαφορετικού σχεδιασμού του πρωτοκόλλου υψηλού επιπέδου. Για παράδειγμα σε ένα κανάλι που βγαίνει εκτός λειτουργίας μπορεί η αποκατάσταση να αργήσει για αρκετά δευτερόλεπτα, λόγω της μακράς περιόδου των κυμάτων στη θάλασσα. Σε αυτή την περίπτωση όλες οι αναμεταδόσεις για ένα αποτυχημένο πακέτο πάνω στην ίδια σύνδεση, θα αποτύχουν. Έτσι η στρατηγική της αύξησης του αριθμού των αναμεταδόσεων δεν φέρνει αποτέλεσμα στα δίκτυα που εξετάζουμε. Η λύση μπορεί να προέλθει από τις εναλλακτικές επιλογές και την ευελιξία.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα πρόκληση είναι η αντιμετώπιση των φαινομένων διάδοσης. Το θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις τύπους:

- Ανοιχτή θάλασσα μακριά από τη στεριά : Ακολουθεί το μοντέλο των δύο ακτινών , μια της απευθείας διαδρομής του σήματος (LOS) και μία ανακλώμενη από το νερό.
- Κοντά στην ακτή και σε λόφους : Εκτός από τις δύο ακτίνες (LOS και ανάκλασης) έχουμε και άλλες, από τις αντανάκλασεις στους βράχους ή στο λοφώδες έδαφος, έτσι το κανάλι παρουσιάζει διαλείψεις που ακολουθούν την Rician κατανομή.
- Λιμάνια και στενές θαλάσσιες λωρίδες : Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε ανακλάσεις από πολλές πλευρές και η ακτίνα LOS δεν είναι πλέον η κυρίαρχη άρα παρουσιάζονται διαλείψεις τύπου Rayleigh.

Τέλος, είναι απαραίτητη η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ των συχνοτήτων, του ύψους της κεραίας και της απόστασης κάλυψης στα δίκτυα πλέγματος. Για την προστασία του απευθείας σήματος που μας ενδιαφέρει (LOS), απαιτείται η απομάκρυνση των εμποδίων από την πρώτη ζώνη Fresnel. Οι έρευνες δείχνουν ότι στη συχνότητα 700 MHz, προκειμένου να επιτευχθεί καθαρή 60% της πρώτης ζώνης Fresnel, για μία απόσταση επικοινωνίας 15 χλμ., το μέσο ύψος της κεραίας πρέπει να είναι πάνω από 27 μέτρα πράγμα δύσκολο για μικρά πλοία. Όταν αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας στα 3 GHz, το απαιτούμενο μέσο ύψος κεραίας μειώνεται στα 15 μέτρα. Για το λόγο αυτό πρέπει να υπάρχει συνυπολογισμός όλων των παραμέτρων για το σωστό αποτέλεσμα [7].

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1]: Steinar Låg, Bjørn-Johan Vartdal ,Knut Erik Knutsen , “Ship connectivity” , DNV GL STRATEGIC RESEARCH & INNOVATION POSITION PAPER 04-2015.

- [2]: “Maritime Radiocommunication Systems and Requirements”, Radiocommunication Study Groups ITU.
- [3]: Panagiotis Chatzigiannis, John H Gibson, Dr. Gurminder Singh, “Connecting Land-Based Networks to Ships”, 18th International Command and Control Research and Technology Symposium (ICCRTS), June 19-21, 2013 Alexandria, VA.
- [4]: www.idirect.net, “The Maritime VSAT Advantage: A cost analysis of VSAT broadband versus L-band pay-per-use service”, iDirect.
- [5]: J. Shankar, P.-Y. Kong, M.-T. Zhou, Y. Ge, H. Wang, C.-W. Ang, W. Su, H. Harada, “TRITON: High Speed Maritime Mesh Networks”, Proceedings of IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008 (PIMRC 2008), 15-18 September 2008, Palais de Festivals, France.
- [6]: Mário J. Lopes, Filipe Teixeira, Jorge B. Mamede, Rui Campos, “Wi-Fi broadband maritime communications using 5.8 GHz band”, Underwater Communication and Networking (UComms), 3-5 September 2014, Sestri Levante, Italy.
- [7]: Ming-Tuo Zhou, Hiroshi Harada “Cognitive maritime wireless mesh/ad hoc networks”, Journal of Network and Computer Applications 35 ,518–52 2012.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

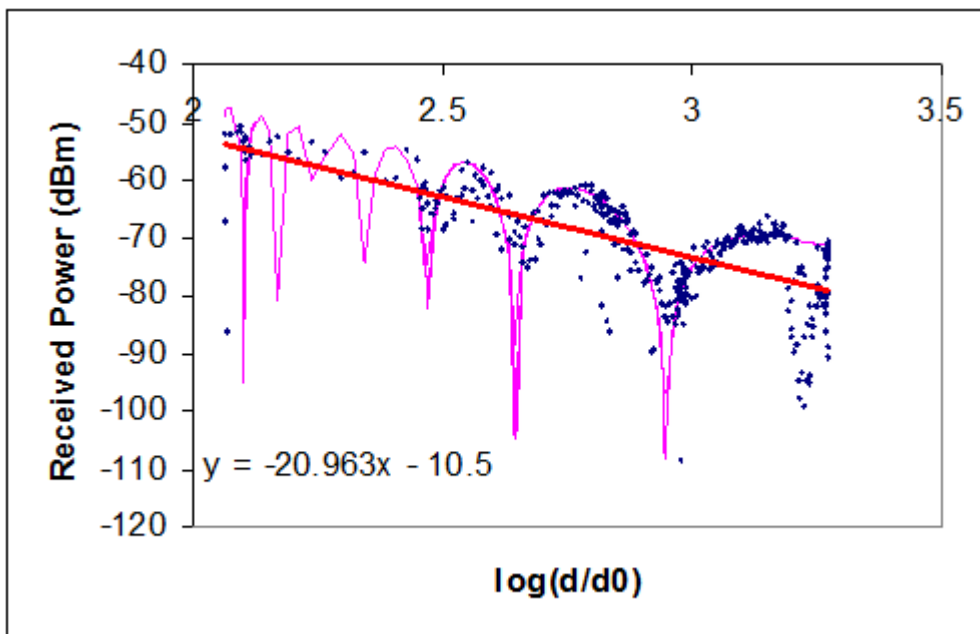
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΓΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

2.1 Βασικό μοντέλο διάδοσης

Το 2006 και 2007 έγιναν έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο στενό της Σιγκαπούρης σε συχνότητα 2.43GHz κάνοντας χρήση της εξίσωσης απλής κλίσης για την λαμβανόμενη ισχύ:

$$P_r(d) = \overline{P_r(d_0)} - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - X_\sigma \quad (2.1)$$

Γενικότερα, η X_σ αποτελεί τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση σ . Οι παράμετροι n (εκθέτης απωλειών διάδοσης) και σ προσεγγίζονται μέσω γραμμικής παλινδρόμησης των τιμών των απωλειών διάδοσης, σε σχέση με την ομαλοποιημένη απόσταση και με τη μέθοδο του ελάχιστου τετραγωνικού σφάλματος (MMSE). Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τις μετρήσεις με μπλε κουκίδες, ενώ με ροζ γραμμή έχουμε το πολύ σημαντικό μοντέλο των δύο ακτινών. Η πρώτη ακτίνα θεωρείται εκείνη που φτάνει απευθείας στον δέκτη, ενώ η δεύτερη η ακτίνα που προήλθε από την ανάκλαση με την επιφάνεια της θάλασσας. Αποδεικνύεται λοιπόν ότι το μοντέλο δύο ακτινών μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά την μετάδοση πάνω από το νερό.



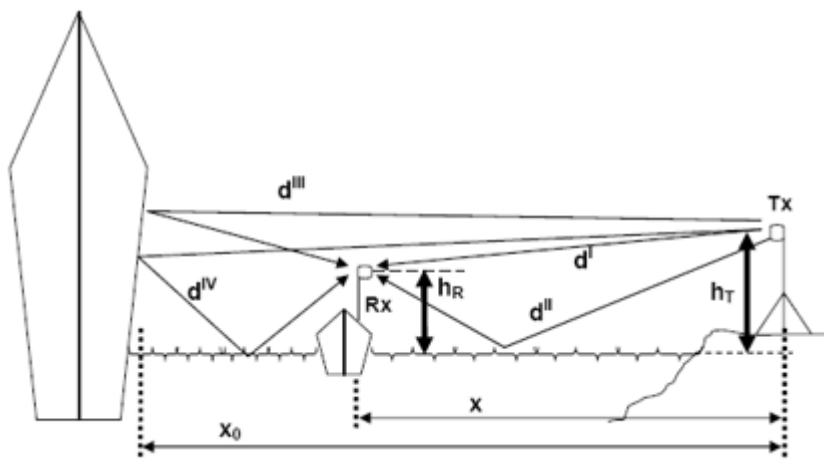
Εικόνα 2.1. Λαμβανόμενη ισχύς συναρτήσει της ομαλοποιημένης απόστασης

Στην ζώνη των 2.43GHz η επιφάνεια της θάλασσας παραμένει καλός αγωγός, γεγονός που συμβαίνει όταν $f < \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r}$ όπου σ η αγωγιμότητα, ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του

κενού και ϵ_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού. Στην προκειμένη περίπτωση για το θαλασσινό νερό έχουμε $\sigma=5$ S/m και $\epsilon_r=81$. Έτσι για $f < 7$ GHz η επιφάνεια της θάλασσας θεωρείται καλός αγωγός. [1]

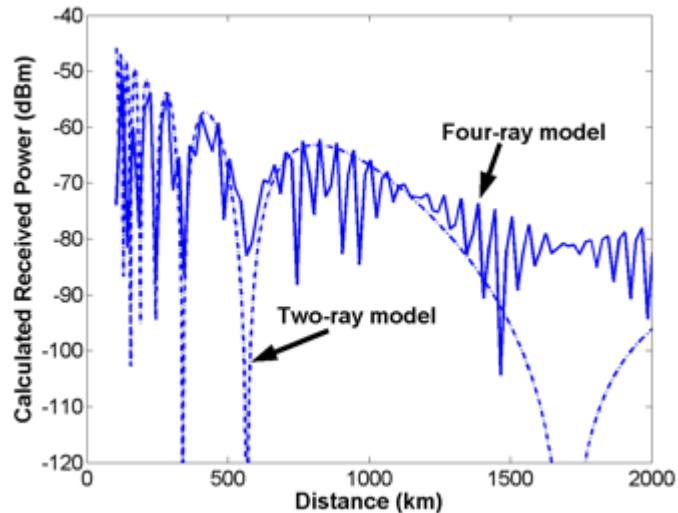
2.2 Ανακλάσεις από γειτονικά πλοία και μετατοπίσεις Doppler

Μία άλλη ιδιότητα των θαλάσσιων καναλιών είναι οι ανακλάσεις του σήματος από γειτονικά πλοία και οι μετατοπίσεις Doppler της συχνότητας λόγω της κίνησής τους. Για παράδειγμα όπως αναφέρεται και στην σύσταση ITU-R M.2202, όταν υπάρχει γειτονικό ακίνητο πλοίο, τότε στο φασματογράφο βλέπουμε άλλη μία κορυφή, που αντιστοιχεί στο σήμα που ανακλάστηκε από το πλοίο. Επίσης οι συχνότητες που εμφανίζονται είναι μετατοπισμένες κατά $f_d = \frac{v f_c}{c}$ όπου v ταχύτητα του πλοίου, c η ταχύτητα του φωτός και f_c η συχνότητα μετάδοσης, ανάλογα αν πλησιάζει στο πλοίο ή στον πομπό. Όπως προαναφέρθηκε όταν η LOS είναι κυρίαρχη τότε μπορούμε να προσεγγίσουμε το λαμβανόμενο σήμα με το μοντέλο δύο ακτινών. Εάν τώρα το πλοίο κάνει χρήση κατευθυντικής κεραίας στραμμένη προς τον πομπό τότε αποκλείει το ανακλώμενο σήμα και το μοντέλο δύο ακτινών είναι αποτελεσματικό. Στην περίπτωση όμως χρήσης ομοιοκατευθυντικής κεραίας πρέπει να λάβουμε υπόψη και τη δεύτερη κορυφή και άρα απαιτείται μοντέλο τεσσάρων ακτινών όπως παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 2.2. Γεωμετρία μοντέλου 4-ακτινών

Με αυτό το μοντέλο τώρα δεν αγνοείται η επίδραση των δύο ακτινών που ανακλώνται στο δεύτερο πλοίο. Βέβαια τα θεωρητικά αυτά μοντέλα προϋποθέτουν τέλεια ανάκλαση στην επιφάνεια της θάλασσας. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται τα λαμβανόμενα σήματα σύμφωνα με τα δύο αυτά μοντέλα.

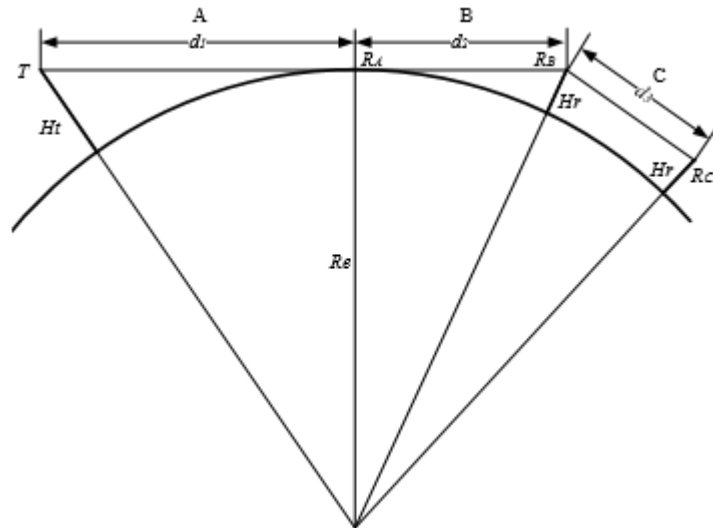


Εικόνα 2.3. Σύγκριση μοντέλου 2-ακτινών και 4-ακτινών

Φαίνεται ότι στο μοντέλο δύο ακτινών έχουμε πιο αργές μεταβολές από ότι στο μοντέλο των τεσσάρων ακτινών. Τα μοντέλα αυτά αποδεδειγμένα είναι αποτελεσματικά σε συχνότητα λειτουργίας 5.8 GHz και αντιπροσωπεύουν μία σταθερή υπηρεσία WiMAX με χρήση κατευθυντικής (2-ακτινών) ή ομοιοκατευθυντικής (4-ακτινών) κεραίας πλοίου. Η χρήση πάντως της κατευθυντικής κεραίας μπορεί όπως είδαμε να μειώσει τις παρεμβολές και το φαινόμενο Doppler, αλλά υπάρχει μεγάλη δυσκολία στην στόχευση του πομπού λόγω των θαλάσσιων κυμάτων και της κίνησης που προκαλούν. [1]

2.3 Καμπυλότητα της γης

Στις θαλάσσιες επικοινωνίες είναι αδήριτη ανάγκη να εξεταστεί η καμπυλότητα της γης και η επίδραση της στην μετάδοση του σήματος. Η εικόνα 4 παρουσιάζει την μετάδοση ανάμεσα σε ένα σταθμό βάσης στην ξηρά και σε ένα πλοίο. Η διαδρομή χωρίζεται σε τρία κομμάτια. Το A κομμάτι είναι από τον πομπό (T) μέχρι το τέρμα του ορίζοντα (R_A), το B από τον δέκτη (R_B) μέχρι το σημείο του ορίζοντα που βλέπει (R_A) και το C όπου αποτελεί την σκιώδη περιοχή πέρα από το R_B . Στο A μέρος έχουμε διάδοση ελευθέρου χώρου, ενώ στο B μέρος έχουμε αύξηση του φαινομένου της περίθλασης λόγω του τρόπου που διαδίδονται τα κύματα. [2]



Εικόνα 2.4. Τα τρία μέρη της διάδοσης πάνω από τη θάλασσα

Ορίζουμε ως ύψος κεραίας του πομπού και του δέκτη H_t και H_r . Μέσω γεωμετρικών σχέσεων έχουμε:

$$d_1^2 + R_e^2 = (H_t + R_e)^2 \quad (2.2)$$

$$d_1 = \sqrt{2R_e H_t + H_t^2} \quad (2.3)$$

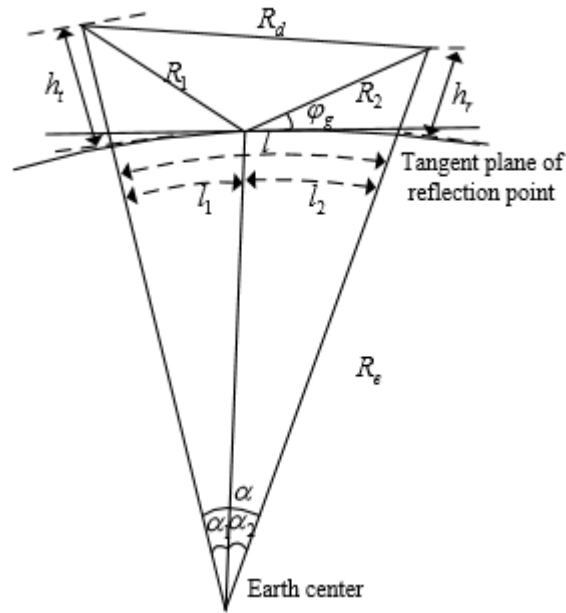
Όπου $R_e = 8500$ km η ακτίνα της γης και λόγω $R_e \gg H_t$ έχουμε

$$d_1 = \sqrt{2R_e H_t} \quad (2.4)$$

$$d_1 = \sqrt{2R_e H_r} \quad (2.5)$$

2.3.1 Τροποποίηση μοντέλου 2-ακτινών για να συμπεριληφθεί η καμπυλότητα

Πρέπει λοιπόν στο μοντέλο δύο ακτινών να συμπεριληφθεί και η καμπυλότητα της γης για μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Η βάση για την τροποποίηση του μοντέλου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.5. 2-ακτινών μοντέλο που συμπεριλαμβάνει την καμπυλότητα
Ορίζεται R_d η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και η γωνία α δίνεται:

$$a = \cos^{-1} \left(\frac{(h_t + R_e)^2 + (h_r + R_e)^2 - R_d^2}{2(h_t + R_e)(h_r + R_e)} \right) \quad (2.6)$$

ενώ το l_1 μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση

$$2l_1^3 - 3ll_1^2 + (l^2 - 2R_e(h_r + h_t))l_1 + 2R_e h_r l = 0 \quad (2.7)$$

και τα $\alpha_1, \alpha_2, R_1, R_2$ από

$$a_1 = \frac{l_1}{R_e} \quad (2.8)$$

$$a_2 = \frac{l - l_1}{R_e} \quad (2.9)$$

$$R_1 = \sqrt{R_e^2 + (R_e + h_t)^2 - 2R_e(R_e + h_t)\cos a_1} \quad (2.10)$$

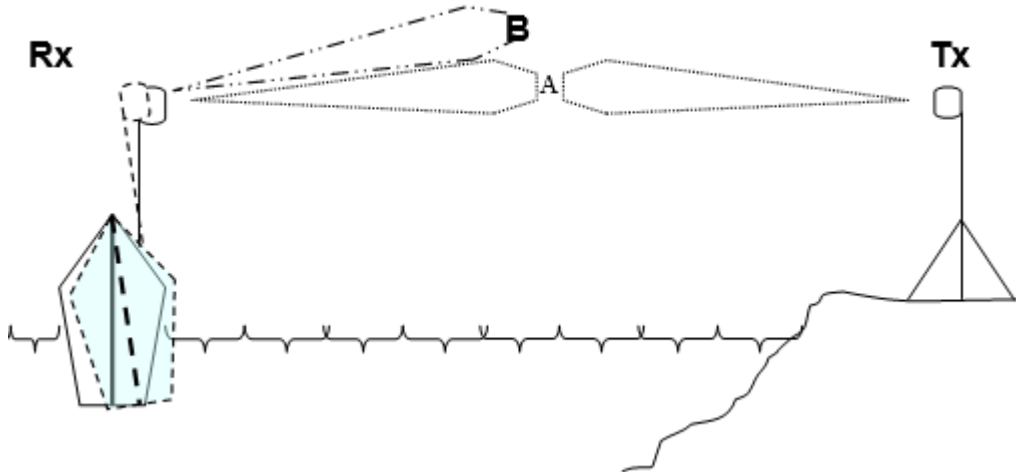
$$R_2 = \sqrt{R_e^2 + (R_e + h_r)^2 - 2R_e(R_e + h_r)\cos a_2} \quad (2.11)$$

Τέλος η γωνία διάδοσης μπορεί να υπολογιστεί:

$$\varphi_g = \sin^{-1} \left(\frac{h_r}{R_2} - \frac{R_2}{2R_e} \right) \quad (2.12)$$

2.4 Μεταβολές σήματος εξαιτίας της κίνησης του πλοίου

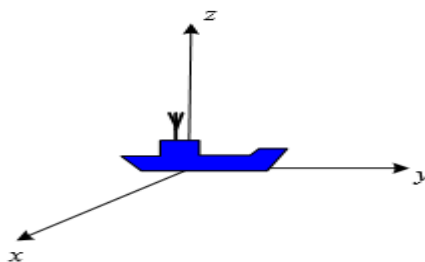
Ο κυματισμός της θάλασσας κινεί το πλοίο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της λαμβανόμενης ισχύς. Το συγκεκριμένο φαινόμενο μπορεί εύκολα να κατανοηθεί με την παρακάτω εικόνα.



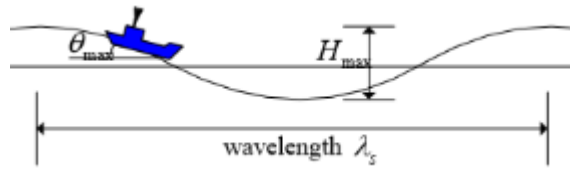
Εικόνα 2.6. Παρουσίαση κίνησης του πλοίου

Υποθέτουμε ότι ο πομπός είναι στη στεριά και ο δέκτης πάνω στο πλοίο. Οι κεραίες όταν είναι στραμμένες στο σημείο A είναι ευθυγραμμισμένες και το σήμα λαμβάνεται με μέγιστη ισχύ, ενώ όταν αρχίζει να κουνάει το πλοίο, η κεραία του πλοίου ευθυγραμμίζεται με το σημείο B, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η λαμβανόμενη ισχύς.

Το φαινόμενο όμως είναι πιο πολύπλοκο εφόσον οι κατευθύνσεις της κίνησης του πλοίου δεν είναι μόνο πάνω-κάτω, αλλά αριστερά-δεξιά και μπροστά-πίσω. Μπορούμε να το περιγράψουμε το μοντέλο κίνησης $(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma)$ με έξι βαθμούς ελευθερίας. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα 3D σύστημα συντεταγμένων (x,y,z)



Το εύρος κίνησης του πλοίου κατά τον άξονα z (πάνω-κάτω) H_{max} ορίζεται από την κορυφή του κύματος μέχρι το χαμηλότερο σημείο του κυματισμού. Η κίνηση στους δύο εναπομείναντες άξονες μπορεί να εκφραστεί ως θ_{max} , όπου είναι η μέγιστη γωνιακή απόκλιση από την κάθετη κατεύθυνση.



Βάση γεωμετρικών σχέσεων μπορούμε να καταλήξουμε στην παρακάτω σχέση:

$$\theta_{max} = \arcsin\left(\frac{\pi H_{max}}{\sqrt{\lambda_s^2 + \pi^2 H_{max}^2}}\right) \quad (2.13)$$

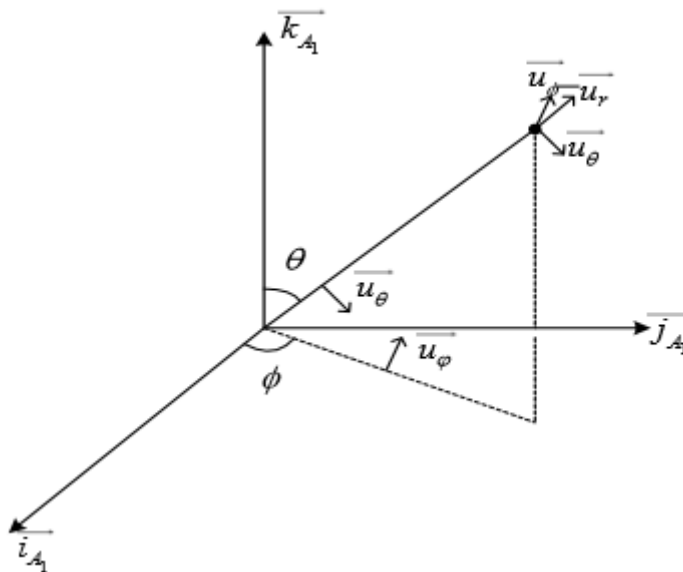
Όπου το λ_s είναι το μήκος κύματος του θαλάσσιου κύματος.

2.4.1 Συνδυασμός κίνησης του πλοίου και καμπυλότητα της γης

Εδώ παρουσιάζεται η διανυσματική συνάρτηση ακτινοβολίας G για τον υπολογισμό της πολικότητας και του κέρδους κεραίας σε κάθε κατεύθυνση.

$$G = \sqrt{G(\theta, \varphi)} U = \sqrt{G(\theta, \varphi)} \begin{pmatrix} U_\theta(\theta, \varphi) \\ U_\varphi(\theta, \varphi) \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Τα μεγέθη και οι γωνίες παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα



Έτσι η μήτρα της απευθείας ακτίνας C_D μπορεί να υπολογιστεί ως

$$C_D = \frac{1}{R_d} \sqrt{G^A} \sqrt{G^B} \begin{pmatrix} U_\theta^B & U_\varphi^B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u}_\theta^A \tilde{u}_\theta^B & \tilde{u}_\varphi^A \tilde{u}_\theta^B \\ \tilde{u}_\theta^A \tilde{u}_\varphi^B & \tilde{u}_\varphi^A \tilde{u}_\varphi^B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_\theta^A \\ U_\varphi^A \end{pmatrix} e^{-\frac{j2\pi R_d}{\lambda}} \quad (2.15)$$

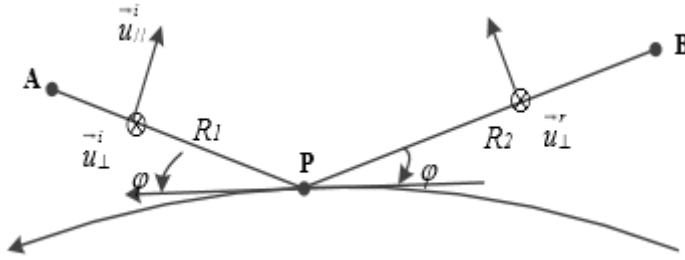
Όπου \tilde{u}_θ και \tilde{u}_φ τα μοναδιαία διανύσματα των γωνιών θ και φ .

Η μήτρα της ανακλώμενης ακτίνας είναι πιο περίπλοκη και ορίζεται ως:

$$C_R = \frac{1}{R_1 + R_2} \sqrt{G^A} \sqrt{G^B} \begin{pmatrix} U_\theta^B & U_\varphi^B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u}_\theta^B \tilde{u}_\parallel^r & \tilde{u}_\theta^B \tilde{u}_\perp^r \\ \tilde{u}_\varphi^B \tilde{u}_\parallel^r & \tilde{u}_\varphi^B \tilde{u}_\perp^r \end{pmatrix} \rho_{FD} \rho_r \begin{pmatrix} \rho_\parallel & 0 \\ 0 & \rho_\perp \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u}_\theta^A \tilde{u}_\parallel^r & \tilde{u}_\theta^A \tilde{u}_\perp^r \\ \tilde{u}_\varphi^A \tilde{u}_\parallel^r & \tilde{u}_\varphi^A \tilde{u}_\perp^r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_\theta^A \\ U_\varphi^A \end{pmatrix} e^{-\frac{j2\pi(R_1+R_2)}{\lambda}}$$

(2.16)

Όπου τα \tilde{u}_\parallel^r και \tilde{u}_\perp^r φαίνονται στην στο παρακάτω σχήμα



και ρ_{FD} είναι ο συντελεστής της ενεργειακής διασποράς.

$$\rho_{FD} = \left(1 + \frac{2R_1R_2}{R_e(R_1 + R_2) \sin \varphi_g} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{2R_1R_2}{R_e(R_1 + R_2)} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

Επίσης ο συντελεστής ανάκλασης υπολογίζεται ως:

$$\rho_r = \exp(-2(2\pi g)^2) I_0(2(2\pi g)^2) \quad (2.18)$$

$$g = \frac{(\sigma_h \sin \varphi_g)}{\lambda} \quad (2.19)$$

όπου σ_h είναι η rms τιμή της απόκλισης του ύψους της επιφάνειας, φ_g η γωνία διάδοσης και I_0 η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικού βαθμού. Έτσι η ισχύς σήματος στο δέκτη δίνεται από την εξίσωση:

$$P(dB) = 10 \log \frac{P_r}{P_t} = 10 \log \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 |C_D + C_R|^2 \right) = 20 \log \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) |C_D + C_R| \right) \quad (2.20)$$

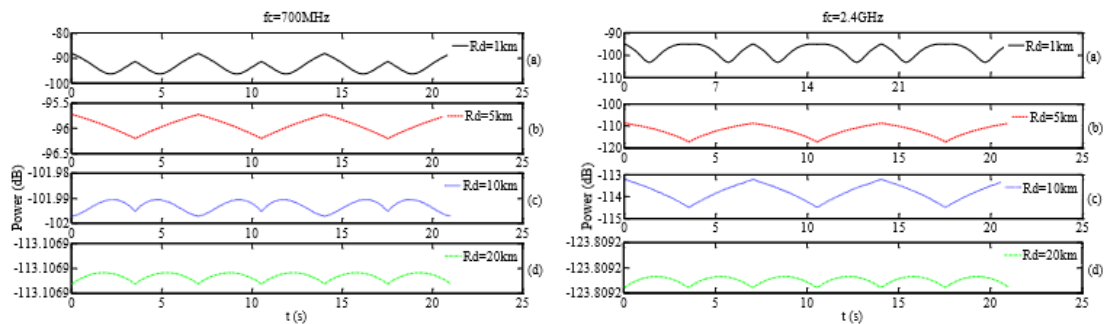
Για το A τμήμα διαδρομής μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουμε δύο ακτίνες, την απευθείας και την ανακλώμενη, ενώ στο B μπορούμε να αγνοήσουμε την ανακλώμενη ακτίνα.[2] Άρα οι απώλειες διάδοσης θα δίνονται από τις εξισώσεις:

$$L_a = 147.5582 - 20 \log f + 20 \log |C_{DP} + C_{RP}| \quad (2.21)$$

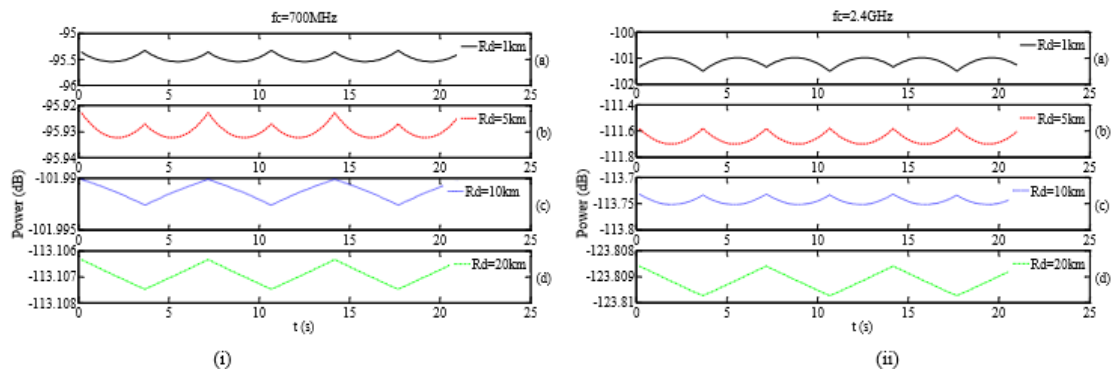
$$L_b = 147.5582 - 20 \log f + 20 \log |C_{DP}| \quad (2.22)$$

2.4.2 Ανάλυση των επιδράσεων της κίνησης του πλοίου

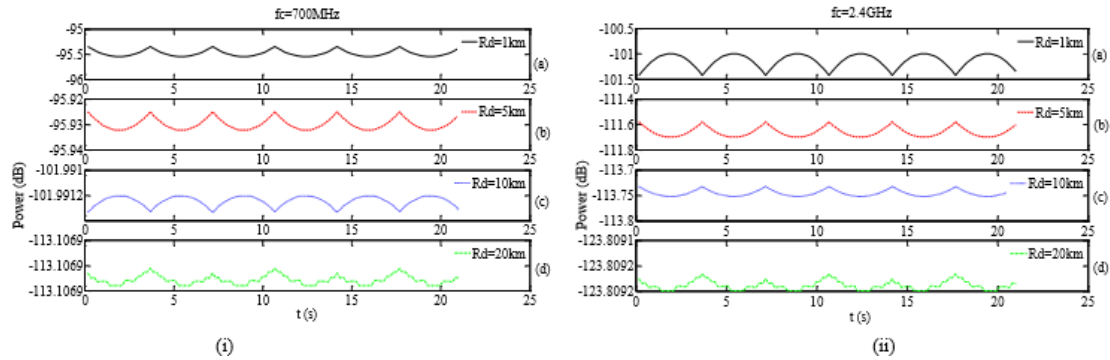
Κάνοντας χρήση του παραπάνω μοντέλου απωλειών αποδείχθηκε, ότι όσο αυξάνεται η απόσταση μετάδοσης, οι μεταβολές στο λαμβανόμενο σήμα μειώνονται και άρα μειώνεται η επίδραση της κίνησης του πλοίου στο σήμα. Επίσης σημαντική παράμετρος που ενδιαφέρει την ανάλυση των επικοινωνιών πάνω από τη θάλασσα είναι η σπουδαιότητα των τριών κινήσεων του πλοίου (πάνω-κάτω, δεξιά-αριστερά, μπροστά-πίσω). Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται το λαμβανόμενο σήμα σε σχέση με το χρόνο, σε τέσσερις αποστάσεις (1km,5km,10km,20km) για τις τρεις διαφορετικές κινήσεις του πλοίου, βάσει του μοντέλου που παρουσιάστηκε, σε δύο ενδεικτικές συχνότητες ($f=700\text{MHz}$, $f=2.4\text{GHz}$). Οι τρεις πρώτες αποστάσεις σύμφωνα με το μοντέλο απωλειών διάδοσης συμπεριλαμβάνονται στο Α τμήμα ενώ τα 20 km στο Β τμήμα αφού το σημείο ένωσης των δύο τμημάτων είναι στα 13km βάσει των κεραιών που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 2.7. Ισχύς σήματος λήψης σε σχέση με το χρόνο για την πάνω-κάτω κίνηση του πλοίου.



Εικόνα 2.8. Ισχύς σήματος λήψης σε σχέση με το χρόνο για την αριστερά-δεξιά κίνηση του πλοίου.



Εικόνα 2.9. Ισχύς σήματος λήψης σε σχέση με το χρόνο για την μπροστά-πίσω κίνηση του πλοίου.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα παρατηρείται ότι η απώλεια ισχύος που συμβαίνει στην κίνηση κατά τον άξονα z (πάνω-κάτω) είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των άλλων δύο. Πιο συγκεκριμένα εντοπίζεται στην πάνω-κάτω κίνηση του πλοίου μια απώλεια ισχύος της τάξης των 9dB , ενώ στις άλλες δύο περίπου 0.2dB. Επομένως, η κίνηση πάνω-κάτω του πλοίου λόγω των θαλάσσιων κυμάτων έχει την μεγαλύτερη και σημαντικότερη επίδραση στο σήμα. Επιπλέον από τα διαγράμματα συμπεραίνεται ότι στα 20km ,δηλαδή στο τμήμα Β της διαδρομής διάδοσης, οι μεταβολές στο σήμα και στις τρεις κινήσεις είναι μηδαμινές. Άρα στις μεγάλες αποστάσεις η κίνηση των κυμάτων δεν επιδρά σημαντικά στο λαμβανόμενο σήμα. Τέλος, στα 700MHz έχουμε μεταβολές στην ισχύ του σήματος μικρότερες από ότι στα 2.4GHz. Για παράδειγμα στο 1km στα 700MHz εντοπίζεται μεταβολή σήματος 9dB ενώ για την ίδια απόσταση στα 2.4GHz έχουμε μεταβολή 16dB. Άρα συμπεραίνεται ότι καθώς αυξάνουμε τη συχνότητα μετάδοσης αυξάνεται και η επίδραση της κίνησης του πλοίου στο σήμα λήψης. [2]

2.4.3 Θαλάσσιες καταστάσεις και μοντελοποίηση κυμάτων

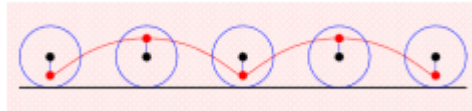
Γενικότερα η κατάσταση της θάλασσας μπορεί να χαρακτηριστεί από τις θαλάσσιες καταστάσεις Pierson-Moskowitz, όπου κατηγοριοποιούν τις θαλάσσιες συνθήκες σε 10 διαφορετικά επίπεδα. Στον πίνακα 1 φαίνονται τα διαφορετικά επίπεδα.

Sea State Level	Significant height (m)	Avg. Period (sec)	Avg. Wave Length (m)
0	0.09	0.5-1	0.46-0.61
1	0.15-0.3	1.5-2.0	3-5
2	0.46-0.91	2.5-3.5	6-12
3	1.07-1.52	3.5-4.5	14-20
4	1.83-2.29	5.0-5.5	24-30
5	2.44-3.66	5.5-7.0	32-48
6	4.27-6.10	7.5-9.0	56-80
7	7.62-12.19	10.0-12.5	100-160
8	13.72-18.29	13.0-15.0	180-237
9	21.34-27.43	16.5-18.5	280-360

Πίνακας 2.1. Θαλάσσιες καταστάσεις Pierson-Moskowitz

Τα επίπεδα από 0-3 αντιστοιχούν σε ήρεμη θάλασσα, με ύψος κύματος χαμηλότερο των δύο μέτρων. Τα 4-5 θεωρούνται μέτριες συνθήκες, ενώ από το επίπεδο 6 και πάνω οι θαλάσσιες συνθήκες θεωρούνται δύσκολες με κύματα ύψους κοντά στα 30 μέτρα.

Γενικότερα τα θαλάσσια κύματα μπορούν να θεωρηθούν ως τροχοειδή κύματα όπως φαίνεται στην εικόνα 10.



Εικόνα 2.10. Σχήμα του τροχοειδούς κύματος

Επίσης μπορούν να μοντελοποιηθούν με τις εξισώσεις:

$$x = a \cdot \theta - b \cdot \sin \theta \quad (2.23)$$

$$y = a - b \cos \theta \quad (2.24)$$

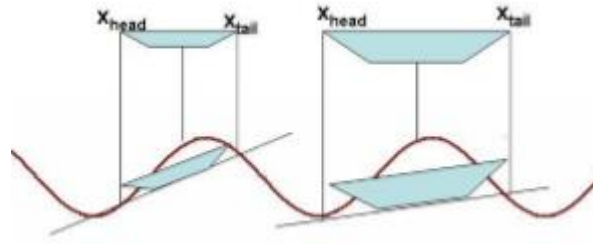
όπου a είναι του μεγάλου κύκλου (κόκκινη γραμμή), b η ακτίνα του μικρού κύκλου όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Προφανώς $a > b$ και έτσι μπορούμε να ορίσουμε :

$$a = \frac{\lambda}{2\pi}, b = \frac{H}{2} \quad (2.25)$$

Όπου H είναι το ύψος του κύματος και λ το μήκος του κύματος. Απλοποιούμε το μοντέλο ορίζοντας:

$$\theta = 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (2.26)$$

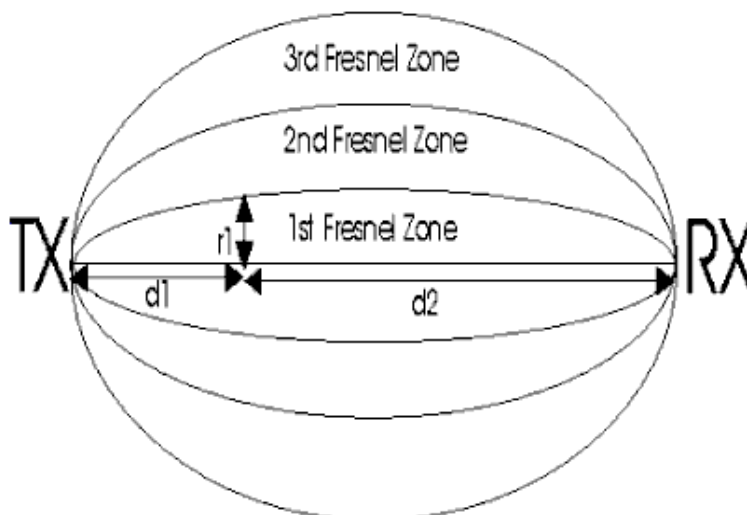
όπου T η περίοδος του κύματος, x η σχετική θέση του πλοίου από την αρχή των αξόνων και t ο στιγμιαίος χρόνος. Η ανάλυση αυτή έχει ως αποτέλεσμα, υπολογίζοντας την εφαπτομένη σε κάθε σημείο του κύματος, να εντοπιστεί η αντίστοιχη γωνιακή κλίση του πλοίου και άρα και της κεραίας του. Όμως αυτή η μοντελοποίηση δεν λαμβάνει υπόψη το μέγεθος του πλοίου. Είναι λογικό ένα μεγάλο πλοίο να μην έχει τόσο έντονες αναταράξεις όσο ένα μικρότερο στις ίδιες θαλάσσιες συνθήκες. Για αυτό το λόγο ορίζονται δύο μεταβλητές για το μπροστινό μέρος του πλοίου και το πίσω αντίστοιχα x_{head} και x_{tail} . Έτσι υπολογίζοντας τα αντίστοιχα y με τη μορφή του κύματος και ενώνοντάς τα με μια γραμμή, υπάρχει η δυνατότητα εύρεσης της γωνιακής κλίσης. Για μεγαλύτερη κατανόηση η συγκεκριμένη προσέγγιση παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.[3]



Εικόνα 2.11. Τα μικρότερα πλοία έχουν μεγαλύτερη γωνιακή απόκλιση από ότι τα μεγάλα.

2.5 Σημασία της έλλειψης εμποδίων στην πρώτη ζώνη Fresnel

Γενικότερα στις μεταδόσεις σε GHz συχνότητες έχουμε σοβαρές επιδράσεις από φαινόμενα NLoS. Σημαντικός παράγοντας λοιπόν για τον σχεδιασμό σταθερών ασυρμάτων ζεύξεων είναι η καθαρότητα της ζεύξης. Για αυτόν τον λόγο χρειάζεται η αναφορά στις ζώνες Fresnel, δηλαδή στους γεωμετρικούς τόπους των σημείων για τα οποία η διαφορά του μήκους της διαδρομής του δευτερεύοντος πεδίου από το μήκος της απευθείας διαδρομής είναι πολλαπλάσιο του $\lambda/2$. Οι ζώνες Fresnel σχηματίζουν ελλειπτικά σφαιροειδή εκ περιστροφής με άξονα τη διαδρομή διάδοσης πομπού και δέκτη όπως φαίνεται και στην εικόνα 12.[4]

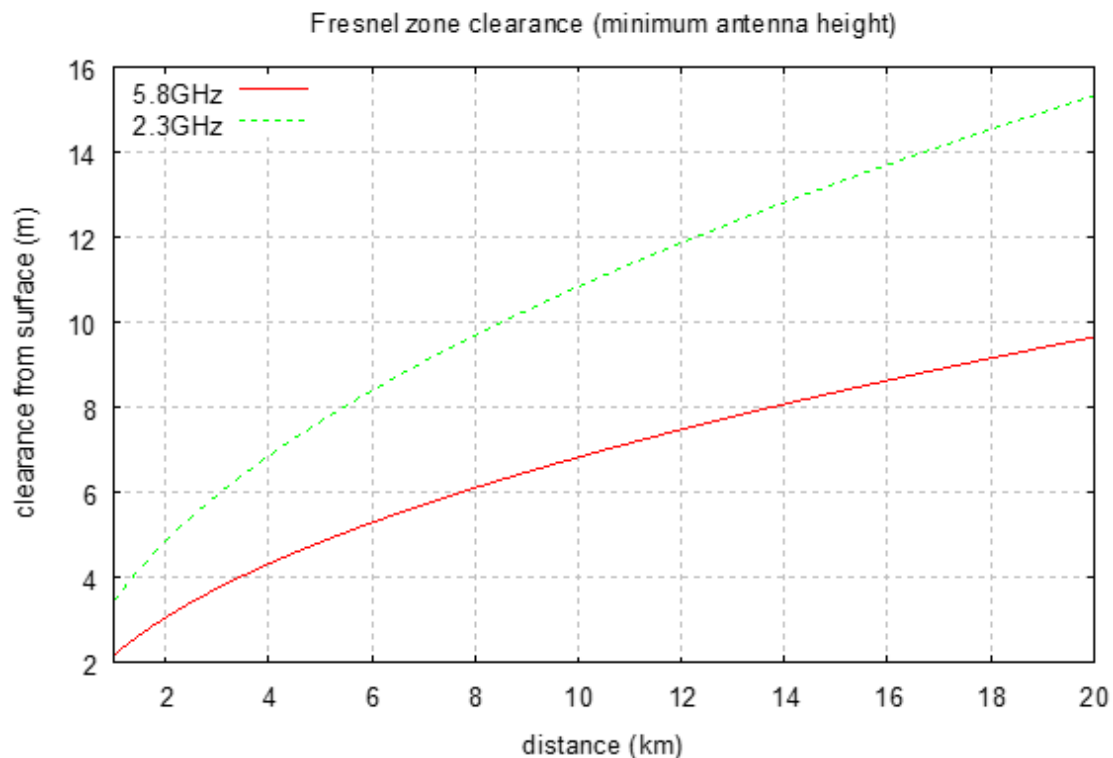


Εικόνα 2.12. Ζώνες Fresnel

Όταν το μήκος της ζεύξης $d_1 + d_2$ είναι πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα της n-οστής ζώνης Fresnel r_n ισχύει η προσέγγιση[4]:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.27)$$

όπου τα μήκη d_1 και d_2 καθορίζονται από τη θέση του σημαντικότερου εμποδίου κατά μήκος της ζεύξης. Διαισθητικά, η πρώτη ζώνη Fresnel μπορεί να θεωρηθεί ως η περιοχή όπου συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος εκπομπής. Είναι λοιπόν αναγκαίο να μην παρεμποδίζεται η ζώνη αυτή για να μην μειώνεται σημαντικά η ισχύς λήψης. Έτσι και στις θαλάσσιες επικοινωνίες πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η καθαρότητα της πρώτης ζώνης με αποτέλεσμα να θέτει περιορισμούς στο ύψος της κεραίας. Για παράδειγμα στις συχνότητες 2.3GHz και 5.8GHz έχουν γίνει οι απαραίτητες έρευνες και αναλόγως την επιθυμητή απόσταση, υπάρχει περιορισμός του ελάχιστου ύψους της ζεύξης πάνω από το νερό όπως φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα (εικόνα 13).



Εικόνα 2.13. Το ελάχιστο ύψος κεραίας που απαιτείται για την καθαρότητα της πρώτης ζώνης Fresnel

Όπως φαίνεται για μεγαλύτερες συχνότητες έχουμε μικρότερους περιορισμούς στο ελάχιστο ύψος της κεραίας αλλά χρειάζεται μεγαλύτερη ισχύς για να αντιμετωπίσει τις απώλειες.[1]

2.6 Παρουσία των στρωμάτων εξάτμισης (evaporation ducts) στα θαλάσσια κανάλια

Οι μηχανισμοί που διέπουν τη μετάδοση ραδιοκυμάτων σε θαλάσσια περιβάλλοντα είναι πολύπλοκοι και αποτελούν παράγοντα πολλαπλών ατμοσφαιρικών μεταβλητών, συμπεριλαμβανομένων της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της πίεσης. Καθώς τα ΗΜ κύματα διαδίδονται μέσω της ατμόσφαιρας, υπάρχουν φαινόμενα διάθλασης, εξασθένησης λόγω βροχής στις υψηλές ζώνες και απορρόφησης αερίων. Αυτές οι επιδράσεις μεταβάλλουν τον προσανατολισμό του

ηλεκτρομαγνητικού κύματος και προκαλούν σύγκλιση ή απόκλιση της ενέργειας. Στην παρούσα ενότητα θα γίνει μία μικροσκοπική ανάλυση ώστε να κατανοηθεί η επίδραση των υδρατμών στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα.[5]

2.6.1 Παράγοντας διάδοσης και μοντέλο απωλειών

Σε όλα τα μοντέλα διάδοσης ραδιοσημάτων θεμελιώδης είναι ο παράγοντας F που ορίζεται ως:

$$F = \left| \frac{E}{E_0} \right| \quad (2.28)$$

Όπου το E είναι η ένταση του πεδίου σε ένα σημείο, ενώ το E_0 η ένταση πεδίου στο ίδιο σημείο κάτω από συνθήκες ελευθέρου χώρου και με την προϋπόθεση γινόταν χρήση ιστροπικών κεραιών χωρίς απώλειες. Οι απώλειες διάδοσης σε dB υπολογίζονται από την διαφορά των απωλειών ελευθέρου χώρου με τον παράγοντα F :

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) - 20 \log F \quad (2.29)$$

Όπου ο πρώτος όρος είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου, r να είναι η απόσταση και λ το μήκος κύματος. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι στον παράγοντα F περιλαμβάνονται όλες οι επιδράσεις του περιβάλλοντος στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, όπως οι ατμοσφαιρικές επιπτώσεις και οι επιπτώσεις από την ανάκλαση στην κατά διαστήματα μεταβλητή επιφάνεια της θάλασσας.

2.6.2 Στρώματα εξάτμισης (evaporation ducts)

Πολλές παράμετροι, των οποίων ο δείκτης διάθλασης n είναι ο πιο σημαντικός, επηρεάζουν την διάδοση του σήματος στην τροπόσφαιρα, το χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας της γης. Σε θαλάσσια περιβάλλοντα, η εξάτμιση των υδάτων έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ατμοσφαιρικών στρωμάτων. Η κατακόρυφη κλίση της διάθλασης αυτών των ατμοσφαιρικών στρωμάτων ποικίλει απότομα και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτές οι ατμοσφαιρικές στρώσεις είναι γνωστές ως στρώματα εξάτμισης. Οι μεταβολές του δείκτη διάθλασης μπορούν να οδηγήσουν σε ένα φαινόμενο κυματοδήγησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, που μπορεί να αυξήσει την εμβέλεια των μεταδιδόμενων σημάτων, αλλά επίσης να δημιουργήσει τυφλά σημεία και ζώνες όπου δεν μπορεί να ληφθεί σήμα, πράγμα που συμβαίνει ακριβώς πάνω από το ύψος του στρώματος, αφού οι απώλειες διάδοσης αυξάνονται ραγδαία. Επιπλέον τα στρώματα εξάτμισης λειτουργούν ως πορώδεις κυματοδηγοί που παγιδεύουν ακτινοβολούμενη ενέργεια επιτρέποντας την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις, ξεπερνώντας ακόμη και το κανονικό οριζόντιο εύρος. Τα στρώματα εξάτμισης χαρακτηρίζονται από το ύψος τους και τα τροποποιημένα προφίλ διαθλαστικότητας $M(z)$. Ο τροποποιημένος

δείκτης διάθλασης λαμβάνει υπόψη την καμπυλότητα της γης και τον δείκτη διάθλασης n και ορίζεται ως:

$$M(z) = (n-1 + \frac{z}{a}) \times 10^6 \quad (2.30)$$

Όπου z είναι το υψόμετρο του σημείου μέτρησης με αρχή την επιφάνεια της θάλασσας, και a είναι η ακτίνα της γης. [5]

2.6.3 Advanced Propagation Model

Το μοντέλο αυτό είναι ένα υβριδικό μοντέλο κατασκευασμένο από τον συνδυασμό του Radio Physical model (RPO) μοντέλου και του (TPREM) Terrain Parabolic Equation Model. Το RPO είναι ένα μοντέλο πάνω από το νερό που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μεγέθους των απωλειών διάδοσης σε όλα τα ύψη και τα εύρη, ενώ το TPREM είναι ένα μοντέλο για διάδοση πάνω από το νερό και πάνω από το έδαφος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης σε χαμηλές γωνίες και ύψη. Ειδικότερα το APM αποτελείται από τις ίδιες υβριδικές μεθόδους του RPO. Αυτές είναι το μοντέλο επίπεδης γης (FE), των οπτικών ακτινών (RO) και τον αλγόριθμο PE χωρισμένου βήματος Fourier. Το αποτέλεσμα της συγχώνευσης του RPO και του TPREM είναι ένα μοντέλο διάδοσης HM που μπορεί να υπολογίσει την επίδραση του καναλιού διάδοσης λαμβάνοντας υπόψη τα περιβαλλοντικά φαινόμενα, όπως το εύρος της διαθλαστικότητας, τις μεταβολές του εδάφους, τις διαφορές διηλεκτρικές σταθερές για τον υπολογισμό της αγωγιμότητας και της πόλωσης, τη σκέδαση της τροπόσφαιρας και την απορρόφηση των αερίων. [5]

2.6.3.1 Parabolic Equation Model

Η βασική εξίσωση του συγκεκριμένου μοντέλου είναι :

$$u(x + \Delta x, z) = e^{ik_0 \Delta x 10^{-6} M(z)} \mathcal{F}^{-1} \left\{ e^{i \Delta x \sqrt{k_0^2 - p^2 - k_0}} \mathcal{F} \{ u(x, z) \} \right\} \quad (2.31)$$

Όπου το x και z είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες του εύρους και του ύψους αντίστοιχα, το $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ είναι ο κυματαριθμός, Δx είναι το αυξανόμενο βήμα του εύρους που το πεδίο διαδίδεται, $M(z)$ είναι ο τροποποιημένος δείκτης διάθλασης, το $p = k_0 \sin(\theta)$, όπου το θ είναι η γωνία διάδοσης και μετράτε από τον οριζόντιο άξονα. Η ποσότητα u είναι κλιμακωτή συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου και εφόσον στη διαδικασία της ομαλοποίησης και της μετατροπής από σφαιρικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες το πεδίο διατηρεί μια σαφή εξάρτηση από το εύρος διάδοσης, ο παράγοντας F μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$F = |u(x, z)| \sqrt{x} \quad (2.32)$$

ή σε dB

$$20 \log F = 10 \log \left[(u_r^2 + u_i^2) x \right] \quad (2.33)$$

Όπου το u_r^2 και u_i^2 είναι το πραγματικό μέρος και το φανταστικό αντίστοιχα της ποσότητας u . Για τους υπολογισμούς ο αλγόριθμος PE κάνει χρήση FFT (fast Fourier transform), άρα για μεγαλύτερη αποδοτικότητα πρέπει το μοντέλο να τρέχει με το όσον το δυνατόν μικρότερο FFT μέγεθος. Επίσης, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο καθορίζεται από το ύψος και τη γωνία, ενώ το μέγεθος του πλέγματός του ακολουθεί το κριτήριο του Nyquist και καθορίζεται από :

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{max}} \quad (2.34)$$

Όπου από την παραπάνω εξίσωση καθορίζεται το μέγεθος πλέγματος αλλά και το μέγεθος του FFT που χρειάζεται. Για να συμπεριληφθούν όλες οι επιδράσεις ανάκλασης, θέλουμε η γωνία διάδοσης να είναι σχετικά μικρή, ενώ για να έχουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα ο αλγόριθμος PE όπως εφαρμόζεται στην APM δεν πρέπει να εκτελείται με γωνία διάδοσης μικρότερη από κάποια ελάχιστη γωνία. Αυτή η ελάχιστη γωνία ποικίλει ανάλογα με τη συχνότητα και καθορίζεται από μία πολυωνυμική προσαρμογή ενός συνόλου γωνιών και συχνοτήτων που καθορίστηκαν αρχικά από δοκιμές. Για παράδειγμα, στη χαμηλότερη συχνότητα των 100 MHz, η ελάχιστη γωνία PE μπορεί να είναι μέχρι 5 μοίρες, ενώ στα 20 GHz η ελάχιστη γωνία μπορεί να είναι μικρότερη από 0,4 μοίρες.

Από την άλλη, η μέγιστη γωνία διάδοσης καθορίζεται από μία επαναληπτική γεωμετρική μέθοδο ακτινών, από το ύψος της εκπεμπόμενης κεραίας στο ύψος του υψηλότερου στρώματος κυματοδηγού που καθορίζεται από την μέγιστη τιμή του μοντέλου διαθλαστικότητας. Έτσι η θ_{max} είναι η μεγαλύτερη τιμή γωνίας που υπολογίζεται από αυτήν τη διαδικασία. Για την αρχικοποίηση του ίχνους των ακτινών ορίζουμε τη γωνία έναρξης ψ . Η περιοριστική γωνία πρόσπτωσης είναι 2,5 φορές επί το όριο που δόθηκε από τους Reed και Russell, με τιμές πάνω από 0.002 ακτίνια, ενώ περιλαμβάνει και έναν επιπλέον όρο στον υπολογισμό των στρωμάτων:

$$\psi = \psi_0 + \delta\psi \quad (2.35)$$

$$\psi_0 = \text{MAX} \left(0.002, \frac{0.04443}{f_{MHz}^{0.333}} \right) \quad (2.36)$$

$$\delta\psi = \sqrt{2 \times 10^{-6} \Delta M} \quad (2.37)$$

Όπου το ΔM είναι η διαφορά στο διαθλαστικό προφίλ μεταξύ της ελάχιστης τιμής και εκείνης στην επιφάνεια, ενώ για προφίλ που εξαρτώνται από την εμβέλεια το ψ_0 διπλασιάζεται.[6]

2.6.3.2 Ray Optics Model

Το μοντέλο RO εφαρμόζεται σε γωνίες μεγαλύτερες από τη μέγιστη γωνία διάδοσης του PE, θ_{\max} , και κάτω από 5 μίρες. Η μέθοδος RO συμπεριλαμβάνει την ανίχνευση μιας σειράς άμεσων και ανακλώμενων ακτινών που περνούν από επιλεγμένα σημεία ελέγχου, την παρεμβολή των μεγεθών τους και τη γωνία φάσης τους σε κάθε επιθυμητό σημείο λήψης. Το μέγεθος κάθε ακτίνας υπολογίζεται από έναν όρο διάδοσης βασιζόμενο στην εξάπλωση ελεύθερου χώρου, ενώ η γωνία φάσης προσδιορίζεται από τη διαφορά του μήκους της οπτικής διαδρομής κάθε ακτίνας με την ακτίνα που καταφθάνει απευθείας. Η απόσταση, η εξάπλωση και η διαφορά του μήκους οπτικής διαδρομής υπολογίζονται σε κάθε στάδιο και αθροίζονται σε όλη τη διαδρομή μέχρι το επιθυμητό σημείο λήψης:

$$X = \sum_i (a_1 - a_0) g_i^{-1} \quad (2.38)$$

$$S = \sum_i \left(\frac{a}{a_1} - \frac{a}{a_0} \right) g_i^{-1} \quad (2.39)$$

$$D = \sum_i \left[\left(10^{-6} M_i - \frac{1}{2} a_0^2 \right) (a_1 - a_0) + \frac{1}{3} (a_1^3 - a_0^3) \right] g_i^{-1} \quad (2.40)$$

$$g_i = \frac{10^{-6} (M_{i+1} - M_i)}{z_{i+1} - z_i} \quad (2.41)$$

Όπου a είναι η γωνία του πομπού, το a_0 και το a_1 είναι οι γωνίες στην αρχή και στο τέλος του κάθε βήματος ανίχνευσης ακτινών. Μόλις υπολογιστεί η συνολική περιοχή X , η σφαιρική εξάπλωση S και η συνολική διαφορά μήκους οπτικής διαδρομής D για κάθε ακτίνα, ο παράγοντας διάδοσης για τις απευθείας ακτίνες F_d και τις ανακλώμενες F_r δίνεται από:

$$F_d^2 = f_d^2 \left| \frac{X}{\beta_d S_d} \right| \quad (2.42)$$

$$F_r^2 = f_r^2 R^2 \left| \frac{X}{\beta_r S_r} \right| \quad (2.43)$$

$$\Omega = (D_r - D_d) k_0 + \varphi \quad (2.44)$$

Όπου f_d και f_r είναι συντελεστές κεραίας για τις γωνίες των απευθείας ακτινών και των ανακλώμενων στον πομπό, οι β_d και β_r είναι οι γωνίες διάδοσης στο σημείο λήψης των απευθείας ακτινών και των ανακλώμενων, το R και το φ είναι το μέγεθος και η καθυστέρηση φάσης του συντελεστή αντανάκλασης και Ω είναι η ολική γωνία φάσης μεταξύ των άμεσων και των ανακλώμενων ακτινών. Έτσι τώρα ο συντελεστής ανάκλασης υπολογίζεται από:

$$F^2 = F_d^2 + F_r^2 + 2F_d F_r \cos \Omega \quad (2.45)$$

Ένας βασικός περιορισμός του μοντέλου RO είναι ότι υποθέτει ένα οριζόντιο ομοιογενές διαθλαστικό περιβάλλον και πρέπει να χρησιμοποιείται πάνω σε επίπεδες επιφάνειες, απαιτώντας έτσι τα προφίλ του εδάφους να είναι επίπεδα μέσα στα πρώτα χιλιόμετρα από την πηγή. Για τα προφίλ του εδάφους που διαφέρουν ανάλογα με την απόσταση, τα διαγράμματα κάλυψης που παράγονται έχουν περιορισμούς στις γωνίες, οπότε οι απώλειες δεν μπορούν να υπολογιστούν σε μεγάλα ύψη και σε κοντινή απόσταση.[6]

2.6.3.3 Flat Earth Model

Το μοντέλο FE εφαρμόζεται σε όλα τα ύψη, σε αποστάσεις πάνω από 2,5 km από την πηγή (αν θεωρήσουμε ότι το προφίλ του εδάφους είναι επίπεδο για τα πρώτα 2,5km) και σε όλες τις γωνίες διάδοσης μεγαλύτερες από 5 μοίρες. Αν και το F υπολογίζεται με βάση την γεωμετρία μίας επίπεδης γης, η καμπυλότητα της γης και τα φαινόμενα διαθλάσεως πρέπει να υπολογίζονται για να εξασφαλιστεί η ομαλή μετάβαση μεταξύ των περιοχών FE και RO σε εξαιρετικά μεγάλα ύψη και περιοχές. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας έναν αποτελεσματικό συντελεστή ακτίνας της γης, k_e , ο οποίος υπολογίζεται με τη μέθοδο ανίχνευσης ακτινών χρησιμοποιώντας γωνία ανύψωσης 5 μοίρες από την πηγή μέχρι το μέγιστο ύψος ενδιαφέροντος. Ο συντελεστής διάδοσης F στη συνέχεια υπολογίζεται με την βοήθεια των παρακάτω εξισώσεων:

$$z_e = z - \frac{x^2}{2ak_e} \quad (2.46)$$

$$r_1 = \sqrt{(z_e - z_t)^2 + x^2}, \quad r_2 = \sqrt{(z_e + z_t)^2 + x^2} \quad (2.47)$$

$$a_d = \tan^{-1}\left[\frac{z_e - z_t}{x}\right], \quad a_r = -\tan^{-1}\left[\frac{z_e + z_t}{x}\right] \quad (2.48)$$

$$\Omega = (r_2 - r_1)k_0 + \varphi \quad (2.49)$$

$$F_d^2 = f(a_d)^2, \quad F_r^2 = f(a_r)^2 R^2 \quad (2.50)$$

Όπου τα r_1 και r_2 είναι τα μήκη της διαδρομής της απευθείας ακτίνας και της ανακλώμενης, x είναι η απόσταση και το a η μέση ακτίνα της γης. Πρέπει να σημειωθεί ότι τώρα για τον υπολογισμό των απωλειών ελευθέρου χώρου πρέπει να βάλουμε την απόσταση r_1 για να συμπεριλαμβάνει και την κλίση της γης. [4]

2.6.4 Χρήση μοντέλου διαλείψεων

Ένα κανάλι διάδοσης RF μπορεί να διαμορφωθεί ως ένα αργό, χρονικά μεταβαλλόμενο και με διαλείψεις κανάλι με πρόσθετο λευκό Gaussian θόρυβο (AWGN). Η κύρια ιδιότητα του διαύλου με διαλείψεις είναι ότι είναι μια συσχετισμένη και χρονικά μεταβαλλόμενη τυχαία διαδικασία. Ένα χρήσιμο μοντέλο για την προσέγγιση των διαλείψεων είναι το μοντέλο Nakagami-m. Στο μοντέλο

Nakagami, η παράμετρος m περιγράφει την επίδραση των διαλείψεων του διαύλου, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει ένα ευρύ φάσμα διακύμανσής τους. Αυτό το μοντέλο είναι ιδιαίτερα πολύτιμο επειδή η παράμετρος m του μοντέλου Nakagami μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση άλλων κατανομών όπως την Rician και τη λογαριθμική κατανομή. Το μοντέλο Nakagami είναι συνεπώς κατάλληλο για την μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών συνθηκών και της επίδρασής τους στην ισχύ των RF σημάτων. Προσφέρει επίσης μεγάλη ευελιξία στην εφαρμογή εμπειρικών δεδομένων, καθιστώντας το ιδανικό για χρήση στις υπό θαλάσσιες συνθήκες επικοινωνίες. Το μοντέλο καναλιού Nakagami- m δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{Nakagami}(x(d); m(d)) = \frac{2m^m x^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right) x \quad (2.51)$$

Για τιμές $m < 1$ έχουμε διαλείψεις πιο σοβαρές από τις διαλείψεις τύπου Rayleigh, ενώ για τιμές $m > 1$ έχουμε πιο ήπιες διαλείψεις που πλησιάζουν τις συνθήκες του ελεύθερου χώρου. Για $m=1$ τότε έχουμε διαλείψεις Rayleigh, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην παρακάτω ανάλυση.

Ένα σημαντικό κριτήριο απόδοσης για την αξιολόγηση των συστημάτων επικοινωνίας που λειτουργούν μέσω διαύλων με διαλείψεις είναι η πιθανότητα αποκοπής (Pout), δηλαδή η πιθανότητα να διακοπεί ουσιαστικά η επικοινωνία. Συνήθως η Pout ορίζεται ως η πιθανότητα η στιγμιαία τιμή του SNR να πέσει κάτω από μια καθορισμένη τιμή κατωφλίου. Δεδομένου ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) είναι:

$$p_{pdf}(x) = \frac{1}{\Omega} \exp\left(-\frac{x}{\Omega}\right) \quad (2.52)$$

Όπου x η περιβάλλουσα του σήματος, το Ω το μέσο SNR και ορίζεται και ως $\Omega = 2\sigma^2 \left(\frac{E_s}{N_0}\right)$ όπου σ είναι το κέρδος ισχύος των διαλείψεων, E_s η ενέργεια ανα μεταδιδόμενο σύμβολο και $N_0/2$ είναι η σταθερά του λευκού θορύβου (AWGN). Έτσι η Pout είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής του x και ορίζεται:

$$p_{out}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\Omega}\right) \quad (2.53)$$

Επίσης το κατώφλι ορίζεται στις θαλάσσιες επικοινωνίες ως:

$$\Omega_T = P_T + G_T + G_R + L_{rec_sen} - L_{sys} - L_{cp} \quad (2.54)$$

Όπου P_T είναι η ισχύς εκπομπής (σε dBW), G_T είναι το κέρδος της κεραίας του πομπού (σε dBi), G_R είναι το κέρδος της κεραίας του δέκτη (σε dBi), L_{rec_sen} είναι η ευαισθησία του δέκτη (σε dB), L_{sys} οι απώλειες του συστήματος (σε dB), L_{cp} είναι ο συντελεστής απωλειών της διασταύρωσης των δύο πολώσεων (σε dB).

Το SNR υπολογίζεται:

$$SNR = P_R - P_N \quad (2.55)$$

Όπου P_R η ισχύς λήψης (σε dBW) και P_N η ισχύς του AWGN θορύβου (σε dBW). Η P_R μπορεί να αναλυθεί:

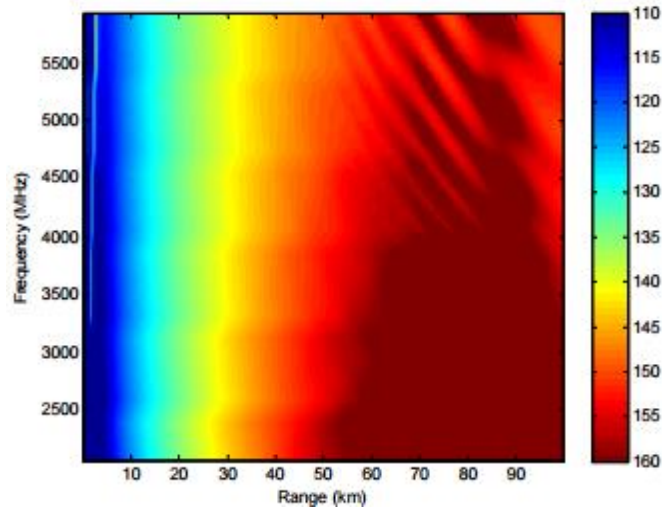
$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_{APM} - L_{sys} - L_{cp} \quad (2.56)$$

Όπου προφανώς οι L_{APM} είναι οι απώλειες του μοντέλου APM. [5]

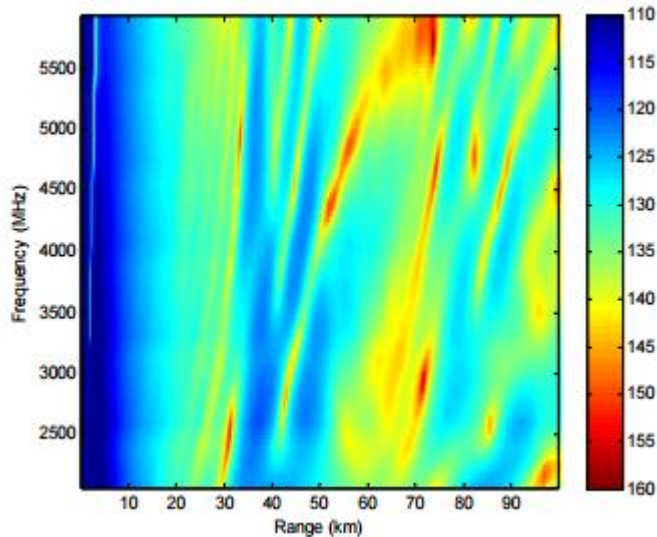
2.6.5 Επίδραση του στρώματος εξάτμισης στο σήμα

Γενικότερα σκοπός των ερευνών ήταν η πραγματική επίδραση των στρωμάτων εξάτμισης στο μεταδιδόμενο σήμα σε διάφορες συχνότητες. Βάση αποτέλεσαν οι μετρήσεις πάνω στην ζεύξη επικοινωνίας ανάμεσα σε ένα πλοίο και ένα μη επανδρωμένο σκάφος(USV) και η επικοινωνία ενός USV με USV.

Στην εικόνα 14 παρουσιάζονται οι απώλειες διάδοσης (L) για 14m (μέσος όρος παγκοσμίως) και 24m ύψους στρώματος εξάτμισης, κάνοντας χρήση κεραίας πομπού ύψους 25m και κεραίας δέκτη 3m. Αυτή η περίπτωση είναι παρόμοια με μία ζεύξη καραβιού με USV σε ένα εύρος κεντρικών συχνοτήτων για τις οποίες μπορεί ένα COTS ράδιο να συντονιστεί. Παρατηρείται ότι όσο μειώνουμε το ύψος του στρώματος εξάτμισης τόσο αυξάνεται η εξασθένηση του σήματος[5].



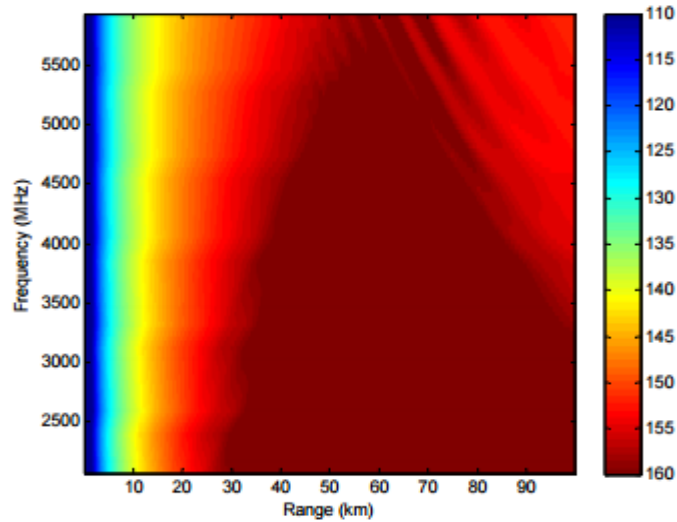
a)



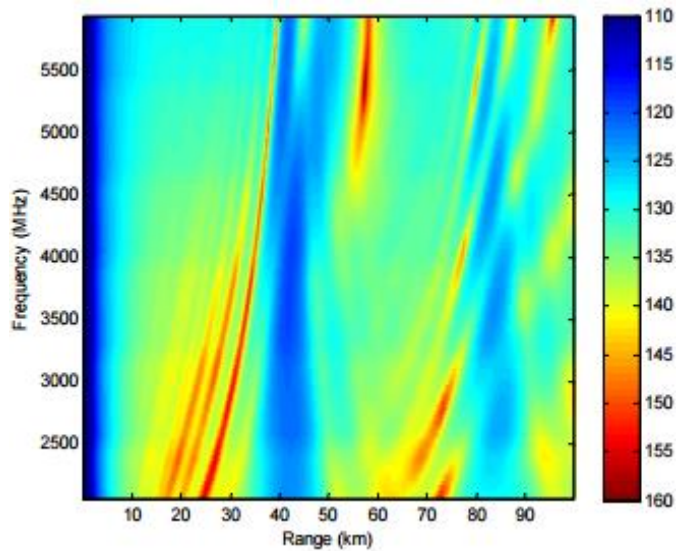
b)

Εικόνα 2.14. Απώλειες διάδοσης σε σχέση με την απόσταση(σε km) και την συχνότητα(MHz) για επικοινωνία πλοίου (ύψος κεραίας=25m) με USV (ύψος κεραίας=3m) και ύψος στρώματος a) 14m και b) 24m

Στην επόμενη εικόνα φαίνονται οι απώλειες διάδοσης σε μία ζεύξη ανάμεσα σε δύο USV με ύψος κεραιών 3m. Εδώ αποδεικνύεται ότι η το ύψος της κεραίας σχετίζεται με το ύψος του στρώματος, αφού όπως φαίνεται και στις εικόνες στη μετάδοση πλοίου με USV έχουμε καλύτερη επίδοση, που οφείλεται στην χρήση κεραίας ύψους 25m και στην ικανότητά της να μεταδίδει σήματα πάνω από τα στρώματα εξάτμισης(14m και 24m).



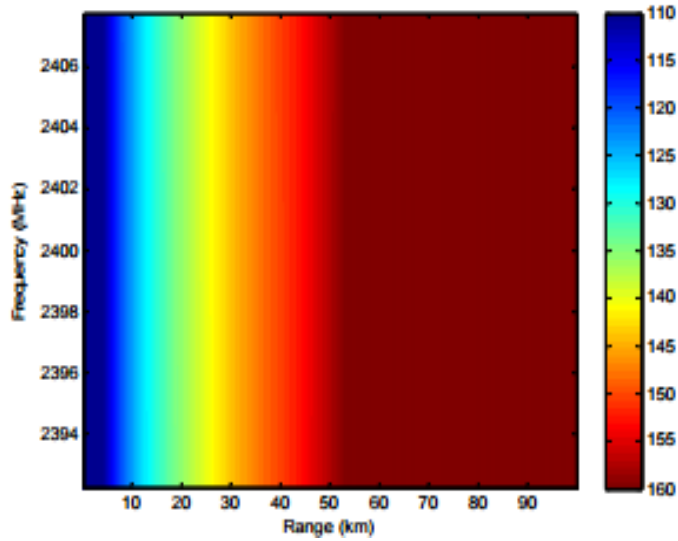
a)



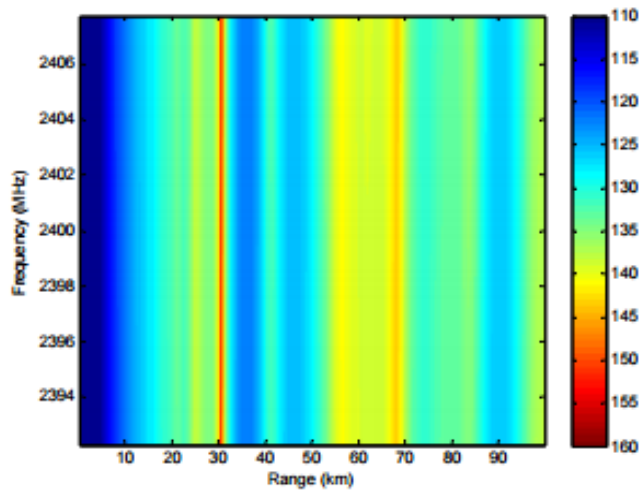
b)

Εικόνα 2.15. Απώλειες διάδοσης σε σχέση με την απόσταση(σε km) και την συχνότητα(MHz) για επικοινωνία USV (ύψος κεραίας=3m) με USV (ύψος κεραίας=3m) και ύψος στρώματος a) 14m και b) 24m

Τώρα θα μειώσουμε το φάσμα του μεταδιδόμενου σήματος σε 16 MHz ώστε να εντοπίσουμε τυχόν διαφορές με τις ευρυζωνικές επικοινωνίες.

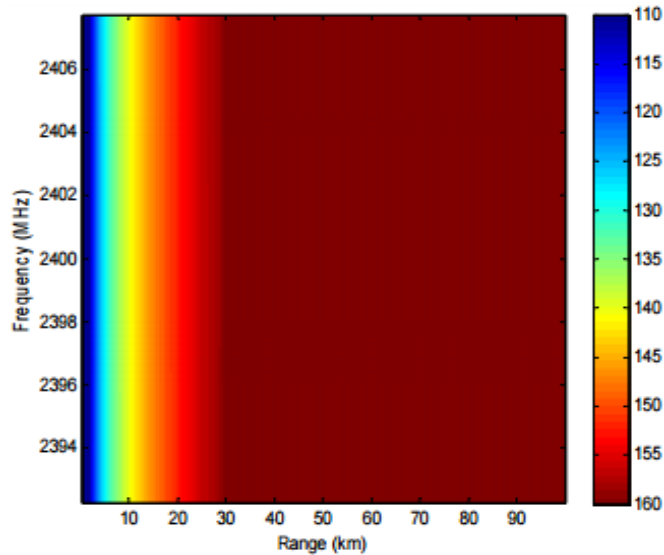


a)

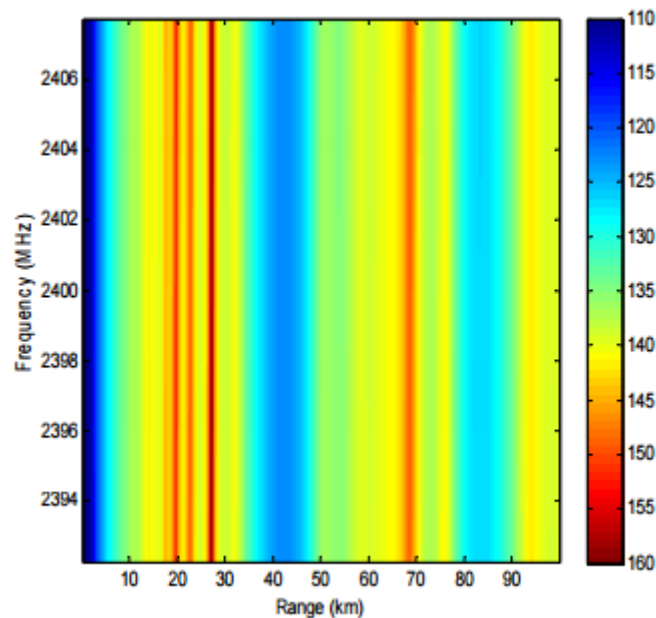


b)

Εικόνα 2.16. Απώλειες διάδοσης φάσματος 16MHz σε σχέση με την απόσταση(σε km) και την συχνότητα(MHz) για επικοινωνία πλοίου (ύψος κεραίας=25m) με USV (ύψος κεραίας=3m) και ύψος στρώματος a) 14m και b) 24m



a)



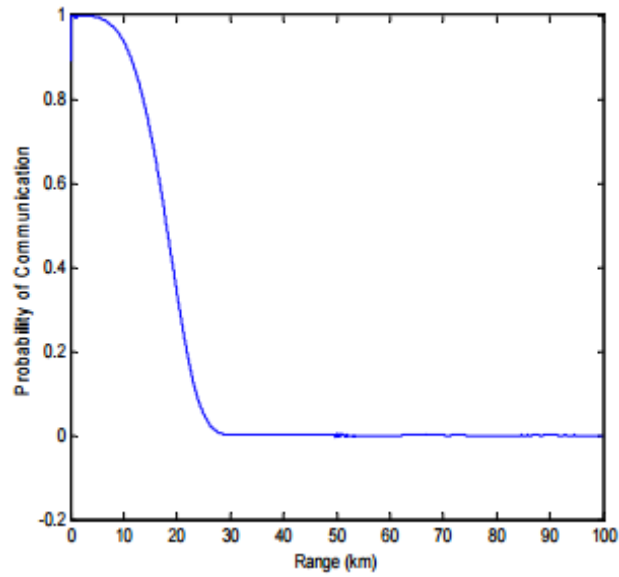
b)

Εικόνα 2.17. Απώλειες διάδοσης φάσματος 16MHz σε σχέση με την απόσταση (σε km) και την συχνότητα (MHz) για επικοινωνία USV (ύψος κεραίας=3m) με USV (ύψος κεραίας=3m) και ύψος στρώματος a) 14m και b) 24m

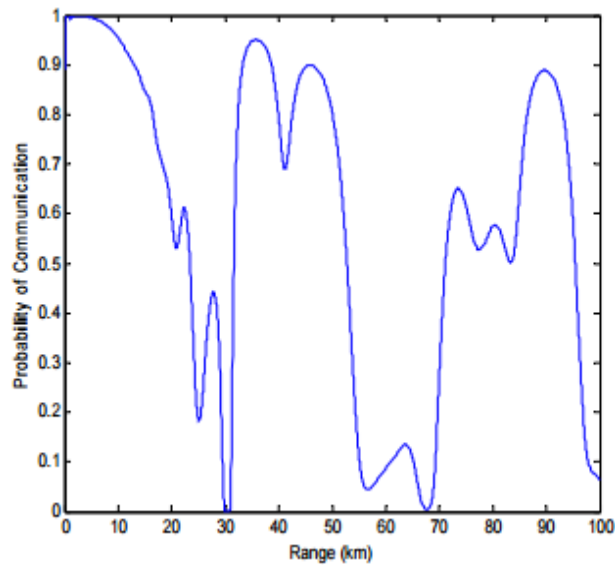
Παρατηρώντας τις εικόνες 16,17 βλέπουμε ότι σε ένα στενό φάσμα των 16MHz οι διαφορές των απωλειών διάδοσης των συχνοτήτων στην ίδια απόσταση δεν είναι τόσο μεγάλες όσο ήταν στις προηγούμενες εικόνες που είχαμε ευρύ φάσμα.

Κάνοντας τώρα χρήση του μοντέλου Nakagami-m με $m=1$ (διαλείψεις Rayleigh) μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα αποκοπής και συνεπώς αντιστρόφως

την πιθανότητα λειτουργίας θεωρώντας και $L_{rec_sen} = 135\text{dB}$ όπως φαίνεται παρακάτω:

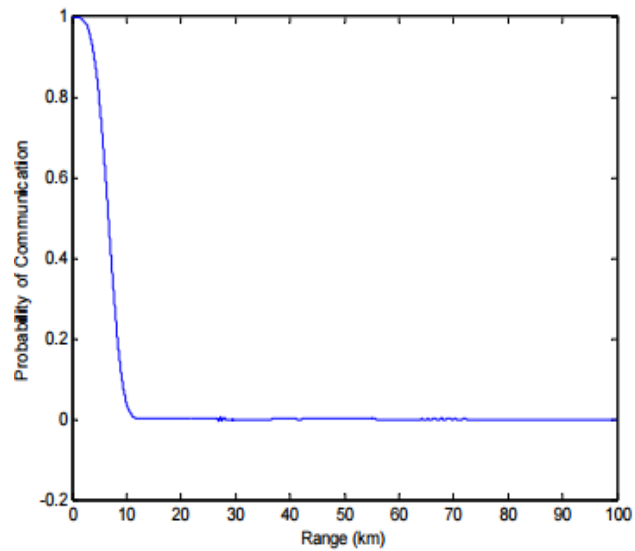


a)

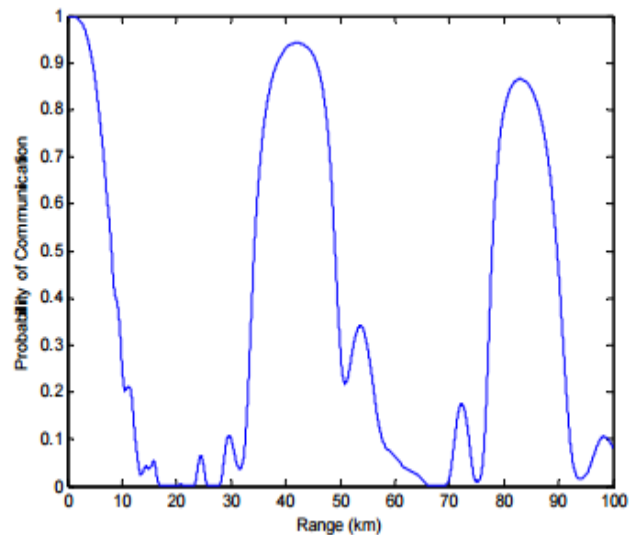


b)

Εικόνα 2.18. Πιθανότητα λειτουργίας με Rayleigh διαλείψεις πλοίου-με-USV και ύψος στρώματος a) 14m και b) 24m



a)



b)

Εικόνα 2.19. Πιθανότητα λειτουργίας με Rayleigh διαλείψεις USV-με-USV και ύψος στρώματος a) 14m και b) 24m

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε και στις εικόνες 18 και 19 μεγαλύτερη πιθανότητα να υπάρχει διαθέσιμη επικοινωνία έχουμε στην επικοινωνία πλοίου-με-USV από ότι σε αυτήν του USV-με-USV. Αυτό συμβαίνει λόγω ότι στην δεύτερη περίπτωση η κεραία είναι μόνο 3 μέτρα πάνω από την θάλασσα και έτσι υπάρχει μεγαλύτερη ευαισθησία στην εξασθένηση λόγω των στρωμάτων εξάτμισης και της τραχύτητας τη επιφάνειας της θάλασσας.

2.7 Γραμμικό μοντέλο απωλειών διάδοσης βασισμένο στο P.1546-2

Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται στην σύσταση της ITU-R P.1546-2 και αποτελεί μία προσέγγιση των απωλειών διάδοσης στο θαλάσσιο περιβάλλον, που προέρχεται από μετρήσεις στην συχνότητα των 800MHz και από ύψη κεραιών $h_t = h_r = 12m$. Ορίζεται σαν μοντέλο αναφοράς, οι υπολογισμένες απώλειες διάδοσης για κρύες θαλάσσιες περιοχές στο 10% του χρόνου. Ως εκ τούτου, λαμβάνοντας υπόψη τις καμπύλες της σύστασης εξάγεται το παρακάτω γραμμικό μοντέλο:

$$PL^{10\%}(d) = PL_{FS} 1_{\{d \leq d_{c,0}\}} + PL_m^{10\%} 1_{\{d_{c,0} \leq d \leq d_{c,2}\}} \quad (2.57)$$

Όπου PL_{FS} είναι οι απώλειες διάδοσης ελεύθερου χώρου, $d_{c,0} = \frac{4h_r h_t}{\lambda} = 1.54km$ είναι η κρίσιμη απόσταση (η οποία θα αναλυθεί διεξοδικά σε επόμενη ενότητα) εκφρασμένη σε km, ο συμβολισμός 1 ισούται με την μονάδα όταν ισχύει η ανίσωση στις αγκύλες αλλιώς ισούται με 0 και $PL_m^{10\%}(d)$ είναι οι απώλειες διάδοσης για κρύες θαλάσσιες περιοχές στο 10% του χρόνου και δίνεται από:

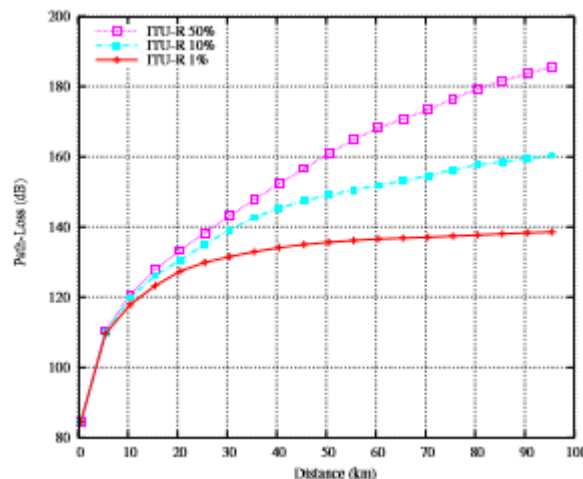
$$PL_m^{10\%}(d) = K_{m,0}^{10\%} d^{-\gamma_{m,0}^{10\%}} 1_{\{d_{c,0} \leq d \leq d_{c,1}\}} + K_{m,1}^{10\%} d^{-\gamma_{m,1}^{10\%}} 1_{\{d_{c,1} \leq d \leq R\}} \quad (2.58)$$

Όπου $R = d_{c,2} = 20km$ η απόσταση κάλυψης και $d_{c,1} = 5km$. Επίσης, ο δείκτης εξασθένησης του ελεύθερου χώρου είναι $K_{FS} = 0.89 \times 10^{-9}$ και ο εκθέτης διαδρομής $\gamma_{FS} = 2$. Με παρόμοιο τρόπο σχηματίζεται το μοντέλο των απωλειών διάδοσης για τις κρύες θαλάσσιες περιοχές στο 1% του χρόνου και εκείνο για τις περιοχές με εύκρατο κλίμα στο 50% του χρόνου:

$$PL_m^{1\%}(d) = K_{m,0}^{1\%} d^{-\gamma_{m,0}^{1\%}} 1_{\{d_{c,0} \leq d \leq d_{c,1}\}} + K_{m,1}^{1\%} d^{-\gamma_{m,1}^{1\%}} 1_{\{d_{c,1} \leq d \leq R\}} \quad (2.59)$$

$$PL_m^{50\%}(d) = K_{m,0}^{50\%} d^{-\gamma_{m,0}^{50\%}} 1_{\{d_{c,0} \leq d \leq d_{c,1}\}} + K_{m,1}^{50\%} d^{-\gamma_{m,1}^{50\%}} 1_{\{d_{c,1} \leq d \leq R\}} \quad (2.60)$$

Στην εικόνα 20 φαίνονται οι διαφορετικές απώλειες διάδοσης από τα ITU-R μοντέλα στο 50%, 10%, 1% του χρόνο.



Εικόνα 2.20. Οι απώλειες διάδοσης (dB) σε σχέση με το ποσοστό χρόνου και την απόσταση, $h_t = h_r = 12m$, $f = 800MHz$

Όπως φαίνεται για τις κοντινές αποστάσεις οι μεταβολές των απωλειών δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές, αντίθετα από ότι συμβαίνει στις μακρινές αποστάσεις. Τέλος οι τιμές των τιμών των δεικτών που προαναφέρθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 2.[7]

	ITU-R 50%	ITU-R 10%	ITU-R 1%
$K_{m,0}$	1.28×10^{-9}	1.23×10^{-9}	1.11×10^{-9}
$\gamma_{m,0}$	2.9	2.8	2.53
$K_{m,1}$	6×10^{-9}	4.38×10^{-9}	3.17×10^{-9}
$\gamma_{m,1}$	3.9	3.57	3.23

Πίνακας 2.2. Οι τιμές των μεταβλητών διάδοσης

2.8 Μοντέλο σχεδόν ντετερμινιστικό, συνδυασμός του PEL μοντέλου και της σύστασης της ITU-R P.1546-2.

Δύο βασικά μοντέλα διάδοσης είναι το FSL (Free Space Loss) και το PEL (Plane Earth Loss) τα οποία βασίζονται στην εξίσωση του Friis και στην μέθοδο των δύο ακτινών αντίστοιχα. Τα μοντέλα αυτά όμως εκφράζουν γενικότερα τις απώλειες διάδοσης και δεν είναι κατάλληλα για μία σοβαρή προσέγγιση των απωλειών στα θαλάσσια κανάλια. Για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκε ένα συνδυαστικό μοντέλο το οποίο μπορεί να εκφράσει με ακρίβεια την εξασθένηση του σήματος στις θαλάσσιες επικοινωνίες[8].

Αρχικά, για να υπάρχει ένα μέτρο ώστε να αξιολογηθεί το μοντέλο πραγματοποιήθηκαν δύο σενάρια θαλάσσιας επικοινωνίας. Το πρώτο σενάριο ήταν μία θαλάσσια επικοινωνία ενός σταθμού βάσης με ένα πλοίο σε κοντινή απόσταση, ενώ το δεύτερο σε αρκετά μακρινή. Στα δύο αυτά σενάρια έγινε χρήση σήματος 20MHz στα 2.073GHz.

Πρώτο σενάριο

Έγινε χρήση δύο κατευθυντικών κεραιών λήψης κάθετων πολώσεων με κέρδος 16dBi και 66° εύρος λοβού, τοποθετημένες στην ταράτσα ενός κτηρίου πολύ κοντά στην ακτή. Επίσης κεραία κάθετης πόλωσης ομοιοκατευθυντική με κέρδος 6dBi εγκαταστάθηκε σε πλοίο για την εκπομπή του σήματος κατά τη διάρκεια μίας διαδρομής 15.5km. Στον πίνακα 3 φαίνονται όλες οι μεταβλητές του πειράματος.

Transmitting power at the antenna port	33 dBm
Maximum delay span	10.24 μ s
Delay resolution	50 ns
Doppler resolution	4 Hz
Maximum Doppler shift span	± 128 Hz
RX Antennas beamwidth	$66^\circ (Az.) \times 21^\circ (El.) Approx$
TX antenna height	6.4 m
Lower RX antenna height	21.2 m
RX antenna spacing	1.865 m
Maximum route distance	15.5 km
Temperature	2 $^\circ$ C
Wind speed	2 m/s

Πίνακας 2.3. Παράμετροι πρώτου σεναρίου [8]

Δεύτερο σενάριο

Σε αυτό το σενάριο έγινε πάλι χρήση δύο κατευθυντικών κεραιών λήψης κάθετων πολώσεων με κέρδος 15dBi και 66° εύρος λοβού. Ίδιου τύπου κεραία χρησιμοποιήθηκε για την εκπομπή από το πλοίο με ύψος 9.5m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Τώρα η διαδρομή του πλοίου είναι 45km, με σκοπό την εξέταση του λαμβανόμενου σήματος στις μεγάλες αποστάσεις. Στον πίνακα 4 φαίνονται όλες οι μεταβλητές του δεύτερου σεναρίου.

Transmitting power at the antenna port	27.2 dBm
Maximum delay span	40.96 μ s
Delay resolution	50 ns
Doppler resolution	4, 0.5, 0.25, 0.125, 0.0625 Hz
Maximum Doppler shift span	± 128 Hz
Antennas beamwidth	$66^\circ (Az.) \times 21^\circ (El.) Approx$
TX antenna height	9.5 m
Lower RX antenna height	11.2 m
Spacing between RX antennas	2.9 m
Maximum route distance	45 km
Temperature	[-1, 2] $^\circ$ C
Wind speed	[3, 6] m/s

Πίνακας 2.4. Παράμετροι δεύτερου σεναρίου

Για τα δύο σενάρια οι απώλειες διάδοσης υπολογίστηκαν από την γνωστή εξίσωση:

$$P_{TXloss} = P_{TX} + G_{TX} - P_{RX} + G_{RX} - Loss_{cable} \quad (2.61)$$

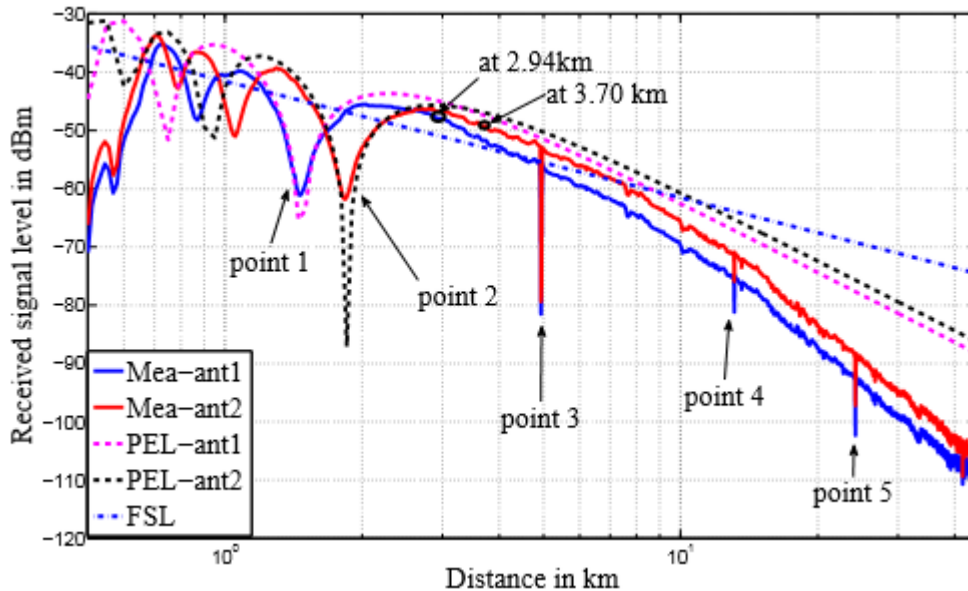
Όπου $Loss_{cable}$ οι απώλειες του καλωδίου από την κεραία του δέκτη στον LNA.[8]

2.8.1 Σύγκριση μετρήσεων με μοντέλο PEL

Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο PEL έχει προταθεί για περιβάλλοντα που το κανάλι μετάδοσης βρίσκεται πάνω από λείο έδαφος, που με τη σειρά του δημιουργεί μία ακτίνα ανάκλασης. Παρόμοιο μπορεί να θεωρηθεί το θαλάσσιο περιβάλλον όπου υπάρχουν ανακλάσεις από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι απώλειες διάδοσης βάσει του PEL δίνονται από την εξής εξίσωση:

$$P_{Loss} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \left|1 + R \cdot \exp(jk \frac{2H_R H_T}{d})\right| \quad (2.62)$$

Όπου λ είναι το μήκος κύματος, k είναι ο κυματαριθμός, R ο συντελεστής ανάκλασης της επιφάνειας της θάλασσας, d η απόσταση μεταξύ των κεραιών και H_R, H_T τα ύψη των κεραιών του δέκτη και του πομπού αντίστοιχα. Η σύγκριση των τιμών των μετρήσεων με το μοντέλο PEL φαίνεται στην εικόνα 21.



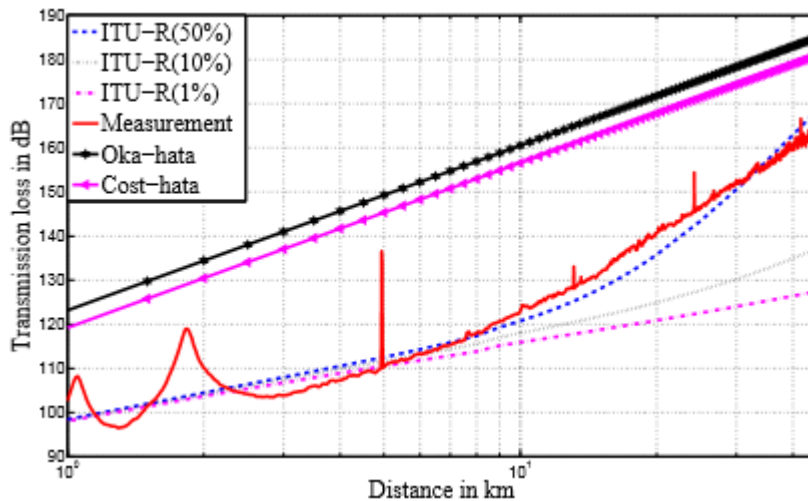
Εικόνα 2.21. Σύγκριση μετρήσεων με το μοντέλο PEL

Αρχικά, στο σημείο 3, 4 και 5 της εικόνας συνέβησαν βαθιές διαλείψεις λόγω των διερχόμενων πλοίων που για αυτές τις στιγμές μπλόκαραν την ζεύξη. Στα σημεία 1,2 όμως οι βαθιές διαλείψεις συνέβησαν διότι η διαφορά της διαδρομής των δύο ακτινών σε αυτές τις αποστάσεις, ισούται με λ , γεγονός που υποδηλώνει ότι οι δύο ακτίνες βρίσκονται εκτός φάσης. Επιπλέον, η διαφορά ανάμεσα στις τιμές των μετρήσεων και σε αυτές του PEL αυξάνεται όταν η επιφάνεια της θάλασσας παρεμβάλει στην πρώτη ζώνη Fresnel. Στο σενάριο που πραγματοποιήθηκε αυτό συμβαίνει στα 2.94km για την δεύτερη κεραιά λήψης και στα 3.7km για την πρώτη. Μόλις η καμπυλότητα της γης αρχίσει να μπλοκάρει την πρώτη ζώνη Fresnel, η απώλειες λόγω περίθλασης καθιστούν όπως παρατηρείται το μοντέλο PEL ακατάλληλο. Οπότε το συγκεκριμένο μοντέλο υπερεκτιμά το σήμα και δεν λαμβάνει υπόψη του όλα τα φαινόμενα που προκαλούν διαλείψεις. Άρα, η κρίσιμη απόσταση είναι εκείνη, στην οποία το μήκος της διαφοράς της διαδρομής των ακτινών ισούται με μισό μήκος κύματος. Μία ακόμα σημαντική παρατήρηση είναι ότι υπάρχει αξιοσημείωτη απόκλιση των μετρήσεων από το μοντέλο PEL στο διάστημα 0-1km, που όμως είναι απόλυτα λογικό γιατί υπάρχουν πολλά αντικείμενα που ανακλούν το σήμα στην ακτή και η πρόβλεψη του σήματος λήψης καθίσταται ιδιαίτερως δύσκολη. Παρ' όλα αυτά, από το 1km και μετά το PEL παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια και ειδικότερα στα σημεία 1 και 2 που προσδιορίζει επαρκώς τις καταστροφικές

διαλείψεις. Επομένως, το PEL μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλο μοντέλο απωλειών διάδοσης για κοντινές θαλάσσιες αποστάσεις.

2.8.2 Σύγκριση μετρήσεων με άλλα μοντέλα απωλειών διάδοσης

Στην εικόνα 22 παρουσιάζεται η σύγκριση των μετρήσεων της λαμβανόμενης ισχύος που προήλθαν από το σενάριο της μακρινής θαλάσσιας απόστασης, με κλασικά εμπειρικά μοντέλα όπως το Okumura-Hata, το COST 231-Hata μοντέλο και το μοντέλο που παρουσιάζεται στην σύσταση ITU-R P.15462.



Εικόνα 2.22. Σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων και διαφόρων εμπειρικών μοντέλων.

Παρατηρείται ότι τα μοντέλα Okumura-Hata και COST 231-Hata έχουν αρκετά μεγάλη απόκλιση από τις μετρήσεις, λογικό αφού έχουν κατασκευαστεί για αστικές περιοχές. Το μόνο μοντέλο που ταιριάζει με τις μετρήσεις είναι εκείνο της σύστασης ITU-R P.15462 για μετρήσεις 50% του χρόνου, που όμως για κοντινές αποστάσεις δεν είναι κατάλληλο αφού αγνοεί τις διαλείψεις που συμβαίνουν.

2.8.3 Παρουσίαση του σχεδόν ντετερμινιστικού συνδυαστικού μοντέλου

Όπως αναλύθηκε το μοντέλο PEL μπορεί να εκφράσει επαρκώς τις κοντινές αποστάσεις στις θαλάσσιες επικοινωνίες, ενώ το μοντέλο της σύστασης ITU-R P.15462 είναι κατάλληλο για τις μακρινές αποστάσεις. Εφόσον το PEL γίνεται ακατάλληλο εξαιτίας των απωλειών περίθλασης λόγω της παρεμβολής της κυρτότητας της γης στην πρώτη ζώνη Fresnel, τότε η κρίσιμη απόσταση θα είναι το σημείο ένωσης των δύο μοντέλων. Το μοντέλο εκφράζεται ως:

Εάν έχουμε $d \leq d_c$ τότε

$$P_{Loss} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 |1 + R \cdot \exp(jk\Delta d)|^2 + A_{offset} \quad (2.63)$$

αλλιώς εάν $d > d_c$ τότε

ITU-R model

Όπου

$$\Delta d = \sqrt{(H_R + H_T)^2 + d^2} - \sqrt{(H_R - H_T)^2 + d^2} \quad (2.64)$$

όπου Δd είναι η διαφορά του μήκους της διαδρομής της LOS και της ανακλώμενης ακτίνας από την επιφάνεια της θάλασσας, ο δείκτης A_{offset} ορίζεται ως μία σταθερά σε dB ανάμεσα στο PEL και στο ITU-R μοντέλο στην κρίσιμη απόσταση. Επίσης στα σημεία 1 και 2 έχουμε στο PEL εντονότερες διαλείψεις εξαιτίας των υποθέσεων που έχουν γίνει στο μοντέλο. Ο δείκτης A_{offset} λοιπόν προστίθεται ώστε το PEL να είναι ισχυρό και για να υπάρχει μια συνέχεια με το εμπειρικό ITU-R μοντέλο. Η κρίσιμη απόσταση δίνεται από:

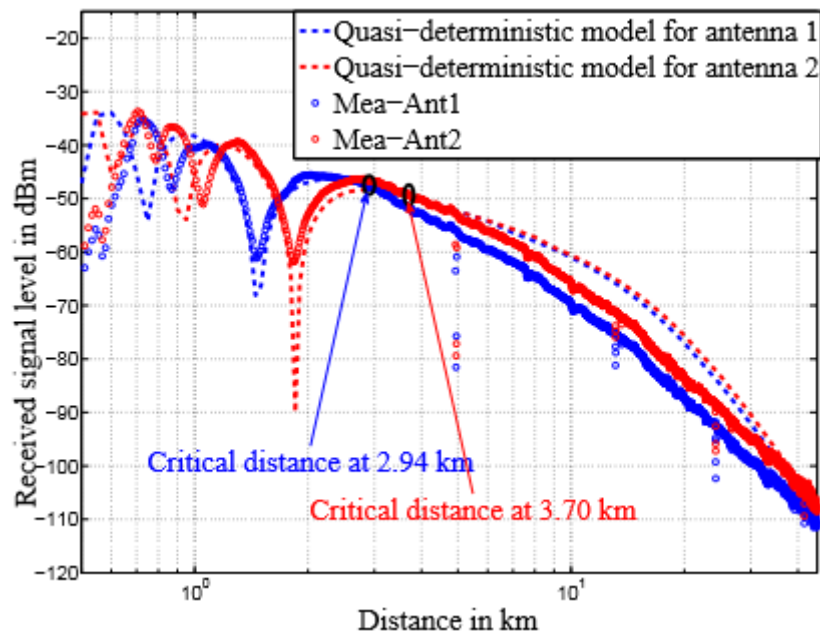
$$\frac{\lambda}{2} = \sqrt{(H_R + H_T)^2 + d_c^2} - \sqrt{(H_R - H_T)^2 + d_c^2} \quad (2.65)$$

Στην πράξη τα ύψη των κεραιών είναι πολύ μικρότερα από την απόσταση πομπού με δέκτη. Επομένως οι εξισώσεις μπορούν να απλοποιηθούν ως εξής:

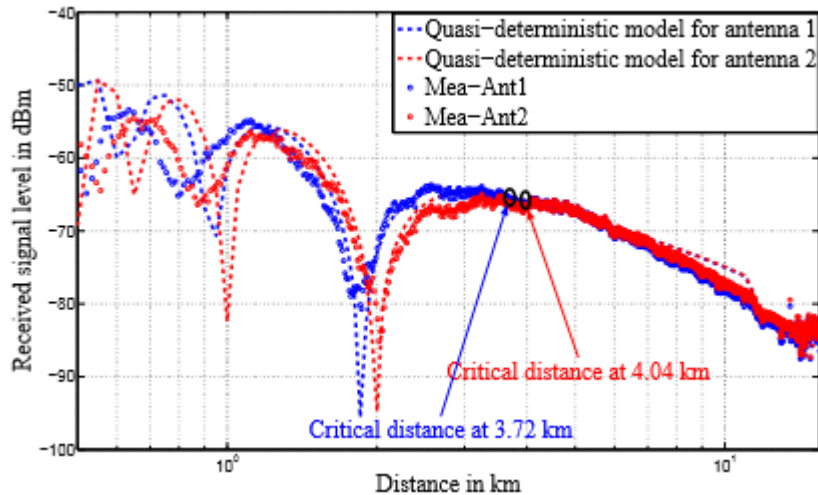
$$\Delta d = \frac{2H_R H_T}{d} \quad (2.66)$$

$$d_c = \frac{4H_R H_T}{\lambda} \quad (2.67)$$

Όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες (23 και 24), το συγκεκριμένο μοντέλο και στις κοντινές αποστάσεις αλλά και στις μακρινές προσεγγίζει επαρκώς τις απώλειες διάδοσης.



Εικόνα 2.23. Σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων του σεναρίου μακρινής απόστασης με το σχεδόν ντετερμινιστικό μοντέλο.



Εικόνα 2.24. Σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων του σεναρίου κοντινής απόστασης με το σχεδόν ντετερμινιστικό μοντέλο.

2.9 Μοντέλο απωλειών σε τροπικές περιοχές

Η ιδιαιτερότητα των τροπικών περιοχών είναι οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε σχέση με τις άλλες περιοχές και συνεπώς ο μεγαλύτερος ρυθμός εξάτμισης του νερού της θάλασσας. Έτσι το στρώμα εξάτμισης έχει μεγαλύτερο ύψος σε αυτές τις περιοχές, παγιδεύοντας και επηρεάζοντας τα ραδιοκύματα και σε μικρότερες αποστάσεις.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα το μοντέλο που ταιριάζει καλύτερα στην διάδοση πάνω από τη θάλασσα είναι το μοντέλο των δύο ακτινών. Για μικρές γωνίες πρόσπτωσης ο συντελεστής ανάκλασης μπορεί να θεωρηθεί -1 και το μοντέλο να απλοποιηθεί σε:

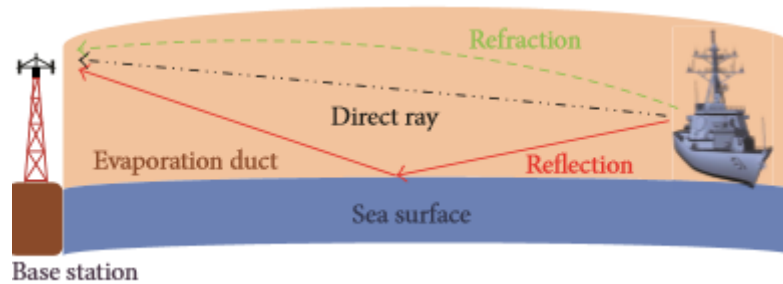
$$PL_{2\text{-ray}} = -10 \log \left\{ \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left[2 \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \right]^2 \right\} \quad (2.68)$$

όπου δίνονται οι απώλειες του μοντέλου δύο ακτινών συναρτήσει του ύψους των κεραιών και του μήκους κύματος. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι ειδικότερα σε τροπικές περιοχές, τα στρώματα εξάτμισης, δηλαδή η επίδραση των υδρατμών, έχουν τεράστια σημασία στο μέγεθος των απωλειών διάδοσης. Αναλύοντας τις μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για χρόνια κοντά στην Σιγκαπούρη, όπου ο δέκτης ήταν στη στεριά κοντά στην ακτή και ο πομπός σε κινούμενο πλοίο, αποδείχθηκε ότι το υδάτινο περιβάλλον ακριβώς πάνω από την θαλάσσια επιφάνεια διαφέρει από το τυπικό περιβάλλον διάδοσης.

2.9.1 Περιβάλλον διάδοσης ακριβώς πάνω από την επιφάνεια του νερού

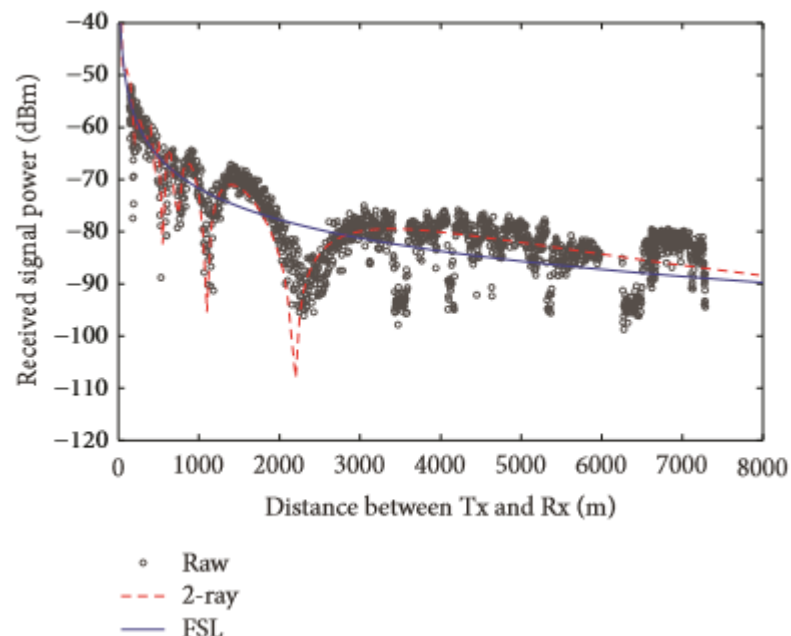
Έγιναν περισσότερες από 20 μετρήσεις στα 5.15 GHz ώστε να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου περιβάλλοντος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην βορειότερη ακτή της Σιγκαπούρης, με ύψος σταθμού βάσης 7.6, 10 και 20m και ύψος κεραιάς πλοίου 3.5m. Από τις έρευνες αναδείχθηκε ότι εκτός των δύο κλασικών ακτινών που έχουν προαναφερθεί, η διάθλαση λόγω του

στρώματος εξάτμισης μπορεί να είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην διάδοση του σήματος (εικόνα 25).



Εικόνα 2.25. Μηχανισμοί διάδοσης για το περιβάλλον κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας.

Το στρώμα αυτό δημιουργείται εξαιτίας της διαφοράς της υγρασίας και εμφανίζεται πάνω από 90% του χρόνου στις τροπικές περιοχές. Επομένως, πρέπει να συμπεριληφθεί η επίδραση του στην ανάλυση των απωλειών διάδοσης. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα της λαμβανόμενης ισχύς, με χρήση κεραίας λήψης 20m. Έχουν σχεδιαστεί και οι απώλειες διάδοσης των μοντέλων FSL και 2-ακτινών ώστε να αναδειχθούν κάποιες παρατηρήσεις. Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι το FSL μοντέλο μπορεί επαρκώς να προσεγγίσει μόνο τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας, ενώ το μοντέλο 2-ακτινών, ειδικά στην απόσταση κάτω των 3km έχει εξαιρετικά αποτελέσματα όπως άλλωστε έχει αναφερθεί και σε παραπάνω ενότητες. Μάλιστα το μοντέλο 2-ακτινών καταφέρνει να προβλέψει ικανοποιητικά την καταστροφική συμβολή των δύο ακτινών.



Εικόνα 2.26. Παράδειγμα λαμβανόμενου σήματος σε σχέση με την απόσταση

Παρ' όλα αυτά, πέρα από τα 3km κανένα μοντέλο δεν μπορεί να προβλέψει τις διαλείψεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διάθλαση που προκαλείται από το

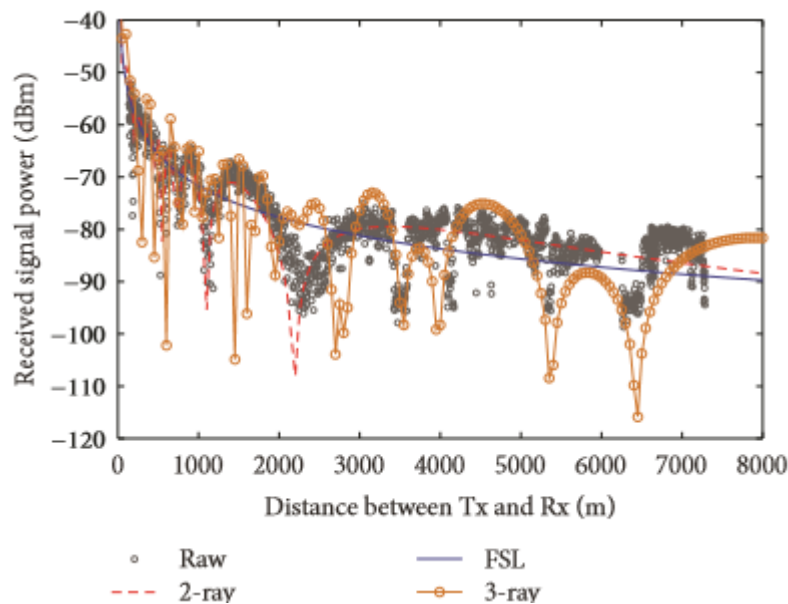
στρώμα εξάτμισης γίνεται σημαντική και δεν γίνεται να αγνοηθεί. Επομένως, εξετάζεται ένα μοντέλο 3-ακτινών (LOS, ανακλώμενη από την επιφάνεια, διαθλώμενη από το στρώμα εξάτμισης) για το περιβάλλον ακριβώς πάνω από την θαλάσσια επιφάνεια. Θεωρώντας το στρώμα οριζόντια ομογενές δημιουργείται μοντέλο 3-ακτινών που εκφράζεται από:

$$L_{3\text{-ray}}(dB) = -10 \log \left\{ \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 [2(1 + \Delta)]^2 \right\} \quad (2.69)$$

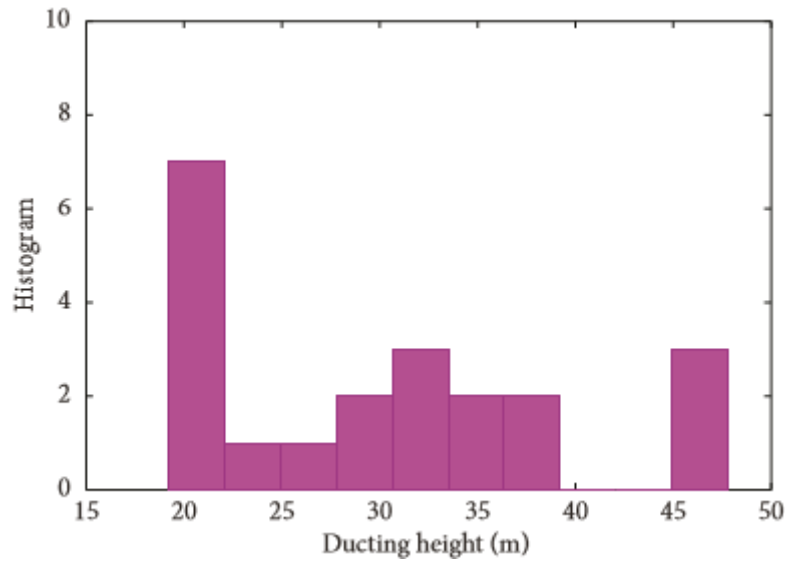
με

$$\Delta = 2 \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \sin \left(\frac{2\pi (h_e - h_t)(h_e - h_r)}{\lambda d} \right) \quad (2.70)$$

όπου h_e το ύψος του στρώματος εξάτμισης στο οποίο οφείλεται η διάθλαση. Στην εικόνα 27 που εμφανίζεται η καμπύλη του μοντέλου 3-ακτινών γίνεται εμφανές ότι το μοντέλο μπορεί να προβλέψει επαρκώς τις απώλειες όταν η απόσταση είναι πάνω από 3km. Άρα στις μεγάλες αποστάσεις στο περιβάλλον ακριβώς πάνω από το νερό πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη την διαθλώμενη ακτίνα. Επίσης, η μεταβλητή που πραγματικά είναι καθοριστική είναι το h_e , το οποίο έχει μετρηθεί εμπειρικά μέσα από πληθώρα ερευνών και παρουσιάζεται στην εικόνα 28. Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι από μία απόσταση και μετά πρέπει να συνυπολογίζεται και η διαθλώμενη ακτίνα εξαιτίας των υδρατμών και ότι στο 86% των περιπτώσεων στις τροπικές περιοχές η παράμετρος h_e κυμαίνεται από 20 έως 40 μέτρα, με μέση τιμή τα 30.5 μέτρα. [9]



Εικόνα 2.27. Σύγκριση μεταξύ των FSL, 2-ακτινών και 3-ακτινών μοντέλων με τις μετρήσεις του πειράματος.



Εικόνα 2.28. Ιστόγραμμα εμπειρικού υπολογισμού του ύψους του στρώματος εξάτμισης στο οποίο συμβαίνει η διάθλαση.

Έτσι γενικότερα θα μπορούσαμε να ορίσουμε ότι :

Εάν έχουμε $d \leq d_c$ τότε

$$L = -10 \log \left\{ \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left[2 \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \right]^2 \right\} \quad (2.71)$$

αλλιώς εάν $d > d_c$ τότε

$$L = -10 \log \left\{ \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 [2(1 + \Delta)]^2 \right\} \quad (2.72)$$

όπου Δ είναι η τιμή που αναφέρθηκε προηγουμένως και $d_c = \frac{4H_R H_T}{\lambda}$ η κρίσιμη απόσταση.[10]

2.10 Μοντέλο απωλειών διάδοσης σε θαλάσσια κανάλια 5G

Όπως και σε όλες τις θαλάσσιες επικοινωνίες, η χρήση του μοντέλου 2-ακτινών και του μοντέλου απωλειών ελευθέρου χώρου (FSL) είναι επιτακτική. Άρα και στην περίπτωση των πολύ υψηλών συχνοτήτων μετάδοσης η ανάλυση πρέπει να ξεκινήσει με τα βασικά μοντέλα, κάνοντας φυσικά πάλι τις βασικές παραδοχές, κυρίως ότι η θάλασσα είναι απόλυτα ήρεμη και ότι ο συντελεστής ανάκλασης είναι -1. Έτσι έχουμε πάλι την έκφραση του απλοποιημένου μοντέλου 2-ακτινών:

$$PL_{2-ray} = -10 \log \left\{ \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left[2 \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \right]^2 \right\} \quad (2.73)$$

όπου δίνονται οι απώλειες του μοντέλου δύο ακτινών συναρτήσει του ύψους των κεραιών και του μήκους κύματος και την βασική εξίσωση του FSL:

$$PL_{FSL} = -27.56 + 20\log(f) + 20\log(d) \quad (2.74)$$

όπου f η συχνότητα σε MHz, d η απόσταση σε μέτρα, PL_{FSL} οι απώλειες διάδοσης σε dB. [11]

2.10.1 Μετρήσεις στις συχνότητες 35GHz και 94GHz

Γενικότερα έχει αποδειχθεί ότι το βασικό στρώμα εξάτμισης που δημιουργείται από τους υδρατμούς τείνει σε συχνότητες πάνω από 3GHz να αυξήσει την ισχύ λήψης. Επιπλέον όπως είδαμε σε προηγούμενες ενότητες υπάρχει μία κρίσιμη απόσταση, d_c , όπου όταν ξεπερνιέται η διαθλώμενη ακτίνα λόγω του στρώματος εξάτμισης πρέπει να συνυπολογίζεται. Για διευκόλυνση επαναλαμβάνεται ο τύπος της κρίσιμης απόστασης:

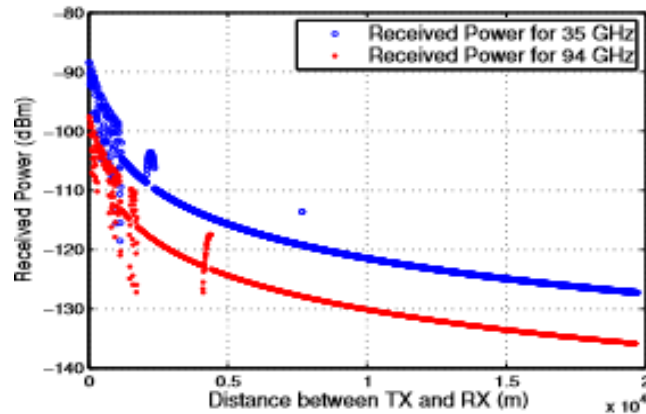
$$d_c = \frac{4H_R H_T}{\lambda} \quad (2.75)$$

Για να δούμε λοιπόν τα φαινόμενα και τους μηχανισμούς διάδοσης στις υψηλές συχνότητες επιλέχθηκαν για τις μετρήσεις οι συχνότητες 35GHz και 94GHz, για το λόγο ότι σε αυτές τις δύο ζώνες οι αξασθενήσεις λόγω νερού και οξυγόνου είναι σχετικά μικρές. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις παραμέτρους του σεναρίου.

Parameter	Value
Carrier Frequency	35 GHz - 94 GHz
Bandwidth	200 MHz
Transmitted Power	23 dBm
Transmitter Height	5 m
Receiver Height	9.7 m
Terrain Dimension	20 km × 1 km
Polarization	Vertical
Antenna Type	Omni Directional
Sea Permittivity	20
Sea Conductivity	81

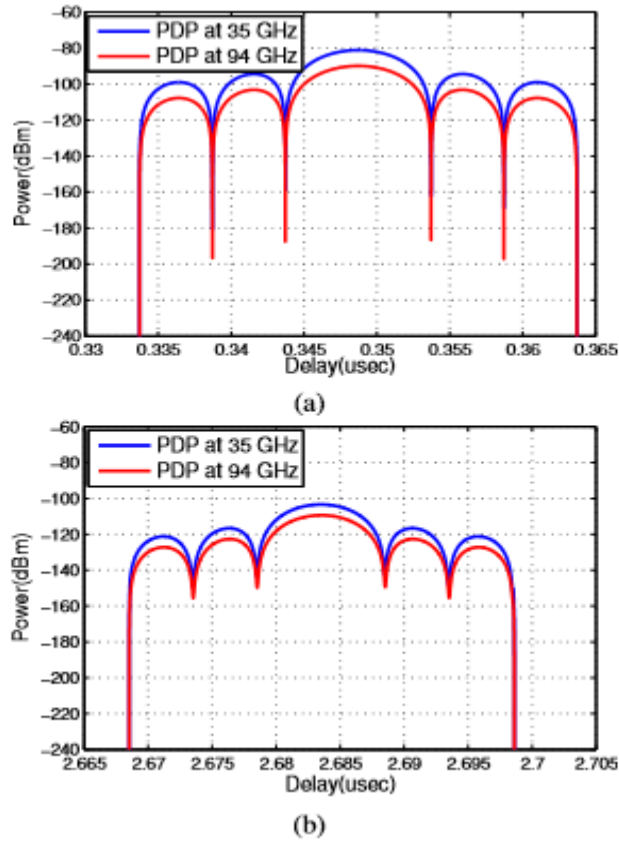
Πίνακας 2.5. Παραμέτρους του σεναρίου

Όπως είναι προφανές στις συχνότητες 35GHz και 94GHz και με τα παραπάνω ύψη κεραιών η κρίσιμη απόσταση θα είναι 23km και 61km αντίστοιχα και αφού στο σενάριο που εξετάζουμε η απόσταση είναι 20km, τότε δεν υπάρχει σοβαρή επίδραση από τη διαθλώμενη ακτίνα. Οι μετρήσεις σε αυτές τις συχνότητες παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.29. Μετρήσεις στις συχνότητες 35GHz και 94GHz

Όπως φαίνεται στην εικόνα το επίπεδο της ισχύος λήψης στα 35GHz είναι 10dB μεγαλύτερο από αυτό των 94GHz, παρ' όλο που η πιθανότητα λήψης της ανακλώμενης ακτίνας σε μεγάλες αποστάσεις είναι μεγαλύτερη στα 94GHz. Επίσης, παρατηρούνται βαθιές διαλείψεις αρχικά και μετά από μία απόσταση, οι απώλειες ακολουθούν μορφή παρόμοια με τις απώλειες ελευθέρου χώρου. Χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν και από την PDP (Power delay profile), σε αποστάσεις 100m και 600m μεταξύ πομπού και δέκτη(εικόνα 30). Στην πραγματικότητα στα 100 μέτρα ο δέκτης δέχεται μόνο την LOS ενώ στα 600 καταφθάνει και η ανακλώμενη ακτίνα. Αυτό όμως δεν διακρίνεται στην εικόνα εφόσον η ανακλώμενη ακτίνα καταφθάνει 0.1nsec μετά την πρώτη. Επιπλέον φαίνεται ότι οι ακτίνες καταφθάνουν στο δέκτη με την ίδια καθυστέρηση και κατεύθυνση και επομένως συμπεραίνεται ότι η διαφορεική λήψη χώρου πάνω από τη θάλασσα για 5G συχνότητες δεν είναι αποδοτική. [11]



Εικόνα 2.30. Προφίλ καθυστέρησης ισχύος σε διαφορετικές συχνότητες σε απόσταση α) 100m και β) 600m.

2.10.2 Προτεινόμενο μοντέλο απωλειών για 5G τεχνολογία στις θαλάσσιες επικοινωνίες.

Το προτεινόμενο μοντέλο είναι ένα τροποποιημένο μοντέλο 2-ακτινών, ώστε να επιτευχθούν τα μηδενικά και τα μέγιστα σημεία σε άλλα σημεία. Επίσης δεν χρειάζεται η υπόθεση της πολύ μικρής γωνίας πρόσπτωσης. Το μοντέλο εκφράζεται από την εξής εξίσωση:

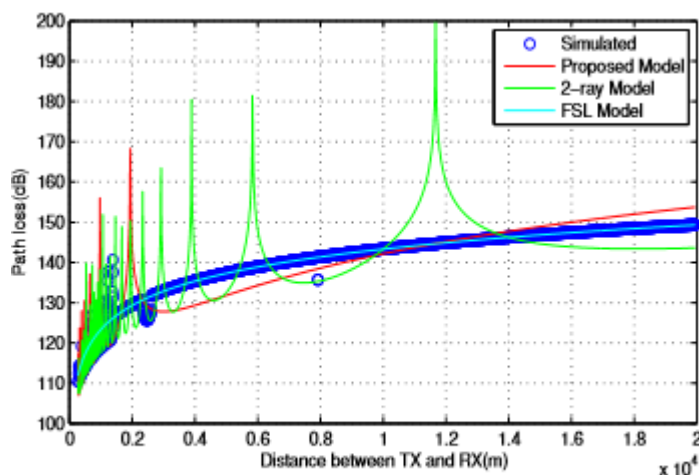
$$L_{m2-ray} = -20 \log \left\{ \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \left| 1 + R \exp \left(j \frac{a 2\pi \Delta d}{\lambda} \right) \right| \right\} \quad (2.76)$$

όπου λ το μήκος κύματος, d η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, $\Delta d = \sqrt{(H_R + H_T)^2 + d^2} - \sqrt{(H_R - H_T)^2 + d^2}$ (2.77) το μήκος της διαδρομής των δύο ακτινών, R ο συντελεστής ανάκλασης ο οποίος εφόσον υποθέσαμε ότι η θάλασσα είναι σε ηρεμία είναι -1. Επιπλέον, a είναι ένας συντελεστής ο οποίος έχει προκύψει ελαχιστοποιώντας το ελάχιστο τετραγωνικό σφάλμα των ερευνών και των προσομοιώσεων. Για 35GHz το a είναι ίσο με 0.17 ενώ για 94GHz είναι 0.06. Όταν βέβαια οι συχνότητες είναι μικρές τότε το μοντέλο γίνεται ίδιο με εκείνο των 2-ακτινών. Το a βρίσκεται από:

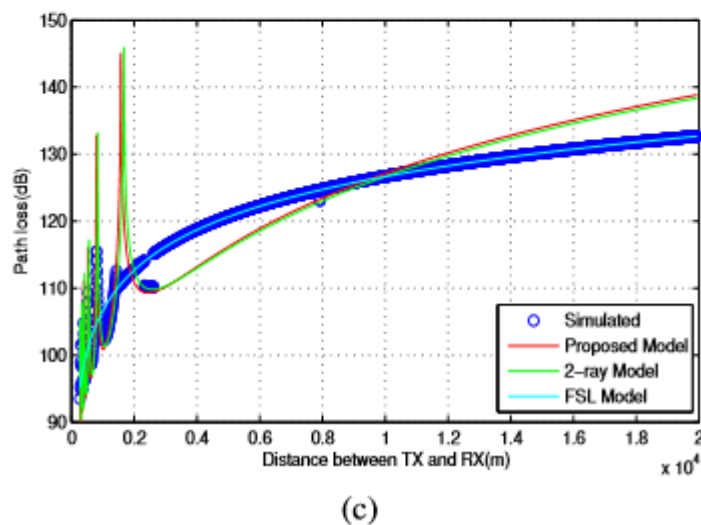
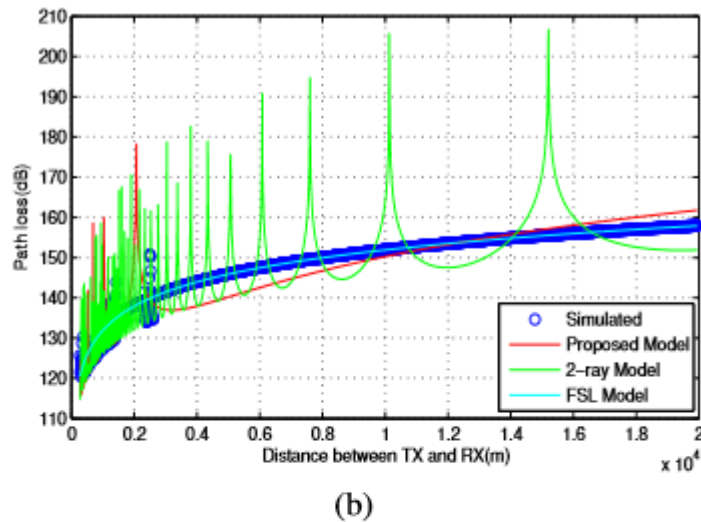
$$a = 1.091 \exp(-0.06256f) + 0.06982 \quad (2.78)$$

όπου η f είναι η συχνότητα σε GHz. Αξιοσημείωτο είναι ότι για συχνότητες μικρότερες από 1GHz το α ισούται με μονάδα. Η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος(RMSE) ανάμεσα στην πραγματική και την υπολογιζόμενη τιμή είναι 0.0434 και άρα επιβεβαιώνει την ακρίβεια του μοντέλου.

Στην εικόνα 31 φαίνονται οι συγκρίσεις των τριών μοντέλων (FSL, 2-ακτινών, προτεινόμενο) με τις μετρήσεις στις συχνότητες 35GHz, 94GHz και 5.15GHz αντίστοιχα. Φαίνεται ότι στις μικρές συχνότητες το μοντέλο των 2-ακτινών είναι αρκετά ακριβές κάτι που όμως δεν συμβαίνει στις υψηλές συχνότητες, όπου το προτεινόμενο μοντέλο δείχνει μία αρκετά καλή προσέγγιση. Αυτό που κυρίως καταφέρνει όπως παρατηρείται είναι να αποφύγει κάποια μέγιστα τα οποία το μοντέλο 2-ακτινών δείχνει λανθασμένα. Τέλος το μοντέλο 2-ακτινών μπορεί να προβλέψει επαρκώς τις διαλείψεις στις υψηλές συχνότητες μόνο σε πολύ κοντινές αποστάσεις (μικρότερες των 2km) και το FSL μπορεί να προβλέψει μόνο την εκθετική αύξηση των απωλειών.



(a)



Εικόνα 2.31. Σύγκριση των τριών μοντέλων (FSL, 2-ακτινών, τροποποιημένο 2-ακτινών) με τις μετρήσεις στις συχνότητες α) 35GHz , β) 94GHz και γ) 5.15GHz.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]: Report ITU-R M.2202, “Maritime broadband wireless mesh networks”.
- [2]: Fang Huang, Yong Bai, Wencai Du, “Maritime radio propagation with the effects of ship motions”, Journal of Communications Vol. 10, No. 5, May 2015.
- [3]: Chee-Wei Ang and Su Wen, “Signal Strength Sensitivity and Its Effects on Routing in Maritime Wireless Networks”, 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), p. 192-199, 14-17 October 2008.
- [4]: Παναγιώτης Γ.Κωπτής, Παντελής-Δανιήλ Μ.Αράπογλου, “Ασύρματες επικοινωνίες”.
- [5]: A. Coker, L. Straatemeier, T. Rogers, P. Valdez, D. Cooksey, and K. Griendling, “Maritime channel modeling and simulation for efficient wideband communications

between autonomous Unmanned Surface Vehicles,” in Oceans-San Diego, 2013, pp. 1–9, IEEE, 2013.

[6]: A. Barrios, “Considerations in the Development of the Advanced Propagation Model (APM) for U.S. Navy Applications”, Proceedings of the IEEE Conference on Radar, 6 pp, 2003.

[7]: Achraf Kessab, Lina Mroueh, Philippe Martins, Serge Hethuin , “Impact of the ITU-R Maritime Propagation on the Dimensioning of a Centralized LTE MANET”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2016) - Track 2 - MAC and Cross Layer Design.

[8]: Kun Yang, Ekman, T., Roste, T., Bekkadal, F., “A quasi-deterministic path-loss propagation model for the open sea environment,” 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), pp.1,5, 3-7 Oct. 2011.

[9]: Yee Hui Lee ,Yu Song Meng, “Key Considerations in the Modeling of Tropical Maritime Microwave Attenuations”, Hindawi Publishing, Corporation International Journal of Antennas and Propagation, 5 March 2015.

[10]: Y. H. Lee, F. Dong, and Y. S. Meng, “Near sea-surface mobile radio wave propagation at 5GHz: measurements and modeling,”Radio engineering , vol.23 ,no.3 ,pp.824–830 ,2014.

[11]: Niloofar Mehrnia ,Mehmet Kemal Ozdemir , “Novel Maritime Channel Models for Millimeter Radiowaves”,IEEE Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2016 24th International Conference.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

3.1 Έννοια συνδεσιμότητας

Γενικότερα η έννοια της συνδεσιμότητας στην θεωρία δικτύων ορίζεται ως η δυνατότητα ύπαρξης τουλάχιστον μίας συνδεδεμένης διαδρομής ανάμεσα σε οποιοδήποτε τυχαίο ζευγάρι κόμβων του δικτύου. Ουσιαστικά η συνδεσιμότητα είναι μία αφηρημένη έννοια που αποτελεί τον πρωταρχικό στόχο της σχεδίασης και λειτουργίας ενός δικτύου του οποίου σκοπός είναι η επικοινωνία μεταξύ των χρηστών του. Εξαιρετικά δύσκολη παραμένει όμως η ποσοτική της αξιολόγηση, αφού καθίσταται αναγκαία η εύρεση ικανοποιητικών δεικτών μέτρησής της, ικανών να προσδιορίσουν με ακρίβεια την έννοια της.

3.2 Συνδεσιμότητα και ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα

Για ένα δίκτυο με κεντρικό διαχειριστή, το οποίο είναι αυστηρά δομημένο, του οποίου οι ρόλοι και οι υποχρεώσεις των κόμβων είναι ξεκάθαρες, η συνδεσιμότητα μπορεί να αξιολογηθεί επαρκώς, ενώ παράλληλα υπάρχει η δυνατότητα αντιμετώπισης των προβλημάτων με την κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του δικτύου. Αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση των αδόμητων ασύρματων πολυβηματικών δικτύων, τα οποία δεν έχουν κεντρικό διαχειριστή με αποτέλεσμα η συνδεσιμότητα και η αντιμετώπιση των προβλημάτων της να γίνονται ιδιαίτερα δύσκολες και πολύπλοκες διαδικασίες. Σε αυτά τα συγκεκριμένα δίκτυα, που όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα αποκτούν εφαρμογή και στις θαλάσσιες επικοινωνίες, οι λειτουργικοί παράμετροι του δικτύου πρέπει να καθοριστούν εξ αρχής. Είναι αναγκαία η εύρεση ενός μοντέλου ικανού να προβλέπει τα χαρακτηριστικά που χρειάζεται το δίκτυο για τη συνεχή συνδεσιμότητα του.

Ο πιο διαδεδομένος λοιπόν τρόπος για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας είναι η εύρεση της πιθανότητας απομόνωσης ενός κόμβου του δικτύου, λόγω του γεγονότος ότι μπορεί να εκτιμηθεί αναλυτικά στις περισσότερες περιπτώσεις λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση του περιβάλλοντος διάδοσης. Ουσιαστικά αυτό σημαίνει ότι υπολογίζεται η πιθανότητα ένας τυχαίος κόμβος του δικτύου να μην μπορεί να επικοινωνήσει με κανέναν άλλον μέσα στο δίκτυο και άρα αυτόματα να χάνεται η συνδεσιμότητα. Αντίστροφα εάν μηδενιστεί αυτή η πιθανότητα, τότε κανένας κόμβος δεν είναι απομονωμένος και άρα η συνδεσιμότητα του δικτύου δεν διαταράσσεται.[1]

Αξίζει να σημειωθεί πάντως ότι στις περισσότερες περιπτώσεις είναι δύσκολος ο υπολογισμός της πλήρους συνδεσιμότητας, ειδικότερα όταν εξετάζονται

δίκτυα μεγάλου αριθμού κόμβων. Για αυτόν ακριβώς το λόγο καταφεύγουμε συνήθως για τον προσδιορισμό της συνδεσιμότητας στην εύρεση μίας μεγάλης συνεκτικής (συνδεδεμένης) ομάδα, η οποία περιέχει όσο το δυνατόν περισσότερους κόμβους του δικτύου και η οποία θα μπορεί να δώσει μία καλή προσέγγιση της συνολικής συνδεσιμότητας. Στην πράξη αυτός ο τρόπος εφαρμόζεται σε περιπτώσεις μη πεπερασμένων δικτύων, δηλαδή για δίκτυα τα οποία δεν είναι γνωστός εξ αρχής ο αριθμός των κόμβων τους. Επίσης, για την εύρεση της κατάλληλης συνεκτικής ομάδας ευρέως διαδεδομένη είναι η θεωρία διήθησης (Percolation theory) [2], η οποία περιγράφει την συμπεριφορά των συνδεδεμένων συμπλεγμάτων (clusters) σε ένα γράφο. Με την χρήση αυτής της θεωρίας έχουν επιτευχθεί αξιόλογα αποτελέσματα στον υπολογισμό της συνδεσιμότητας ασύρματων πολυβηματικών και υβριδικών δικτύων, στην εκτίμηση της επίδρασης των παρεμβολών στην συνδεσιμότητα, καθώς και στον προσδιορισμό της χωρητικότητας του δικτύου συναρτήσει της συνδεσιμότητας. Στην πραγματικότητα στόχος είναι να αναδειχθεί η σχέση που διέπει τον αριθμό των κόμβων του δικτύου με την συνδεσιμότητα ή αντίστοιχα με την απώλεια της.[3]

3.3 Κατασκευή ενός πολυβηματικού δικτύου

Αρχικά θα πρέπει να τονιστούν οι ιδιότητες που κάνουν μοναδικό ένα πολυβηματικό ασύρματο δίκτυο. Η πρώτη βασική ιδιότητα που πηγάζει από την αρχιτεκτονική του δικτύου είναι η τυχαιότητα της τοποθεσίας του εκάστοτε κόμβου και κατ' επέκταση της τοπολογίας του δικτύου. Επίσης, δεν γίνεται σε αυτά τα δίκτυα να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τον αριθμό των κόμβων, εφόσον στην πράξη μιλάμε για περιστασιακά δίκτυα που δημιουργούνται σε χρονικά διαστήματα που συναθροίζονται πολλοί χρήστες σε μία περιοχή. Τέλος, στα συγκεκριμένα δίκτυα υπάρχει ανεξαρτησία ανάμεσα στους κόμβους, αφού η ύπαρξη του ενός δεν επηρεάζει την ύπαρξη του άλλου.

Η μεθοδολογία τυχαίων σημείων Poisson είναι ένας αξιόλογος τρόπος ώστε να δημιουργηθεί ένα τέτοιου είδους δίκτυο και η τοπολογία του. Βασική της αρχή είναι ότι βλέπει κάθε σημείο του χώρου ως ένα πείραμα τύχης, όπου εκτελείτε ένα πείραμα Bernoulli εάν εμφανιστεί κόμβος ή όχι. Όπως είναι γνωστό η πιθανότητα να εμφανιστεί η πλήθος κόμβων ακολουθεί την διωνυμική κατανομή [4]. Σύμφωνα με την Θεωρία Πιθανοτήτων όταν οι ανεξάρτητες δοκιμές τείνουν στο άπειρο, η πιθανότητα εμφάνισης ενός κόμβου είναι πολύ μικρή και ταυτόχρονα το γινόμενο τους να είναι σταθερός αριθμός για παράδειγμα $m \cdot n = \lambda$, τότε η διωνυμική κατανομή προσεγγίζεται με μεγάλη ακρίβεια και από την Poisson κατανομή. Έτσι έχουμε τη ακόλουθη σχέση:

$$P(N = n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} \quad (3.1)$$

Άρα η χωρική κατανομή των κόμβων σε μία περιοχή A_0 θα ακολουθεί Poisson κατανομή με παράμετρο $\lambda = \rho \cdot A_0$ και θα δίνεται από την σχέση[4]:

$$P(N = n) = \frac{(\rho A_0)^n}{n!} e^{-\rho A_0} \quad (3.2)$$

3.4 Poisson Boolean το βασικό μοντέλο συνδεσιμότητας

Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί βάση για τις υλοποιήσεις με σκοπό τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας. Βασίζεται στα τυχαία σημεία Poisson, δηλαδή οι κόμβοι κατανέμονται στον επιλεγμένο χώρο ακολουθώντας μία χωρική Poisson διαδικασία με παράμετρο λ . Το μοντέλο αυτό θεωρεί την περιοχή κάλυψης ως ένα δίσκο με κέντρο τις συντεταγμένες του εκάστοτε κόμβου του δικτύου. Η πυκνότητα των κόμβων του δικτύου και η ακτίνα κάλυψης του κάθε κόμβου είναι τα δύο βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου για αυτό στην βιβλιογραφία συμβολίζεται και ως $B(\lambda, R)$. Επιπλέον όσον αφορά την ακτίνα κάλυψης, το συγκεκριμένο μοντέλο δέχεται και την περίπτωση ο κάθε κόμβος να έχει διαφορετική δυνατότητα εκπομπής και άρα και διαφορετική ακτίνα. Δύο κόμβοι λοιπόν θεωρούνται συνδεδεμένοι μεταξύ τους αν ο καθένας βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης του άλλου, ενώ η περιοχή κάλυψης του δικτύου είναι η ένωση των περιοχών κάλυψης των κόμβων. Τέλος στο μοντέλο Poisson Boolean υπάρχει η δυνατότητα με σωστή ρύθμιση των παραμέτρων λ και της ακτίνας εμβέλειας R να επιτευχθεί εύκολα η συνδεσιμότητα[5].

3.4.1 Υπολογισμός συνδεσιμότητας με την χρήση του Poisson Boolean

Τώρα θα γίνει μία σύντομη περιγραφή της χρήσης του Poisson Boolean μοντέλου στον υπολογισμό της συνδεσιμότητας. Θεωρούμε ένα Poisson Boolean μοντέλο $B(\lambda, R)$ με εμβαδόν A και με πυκνότητα ρ κόμβων ανά επιφάνεια. Ο κάθε κόμβος έχει ακτίνα κάλυψης R και το εμβαδόν της περιοχής εμβέλειας του συμβολίζεται με S . Εφόσον έχουμε κόμβους ομοιόμορφα κατανεμημένους βάσει της διαδικασίας τυχαίων σημείων Poisson, τότε η πιθανότητα να έχει ένας τυχαίος κόμβος k γειτονικούς κόμβους μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια της Poisson κατανομής για την περιοχή S ως εξής:

$$P[N = k] = \frac{(\rho S)^k}{k!} \exp(-\rho S) \quad (3.3)$$

Αν ο κόμβος είναι απομονωμένος (θα έχει μηδενικούς γείτονες άρα $k=0$) τότε η πιθανότητα εκφράζεται ως:

$$P[N = 0] = e^{-\rho S} \quad (3.4)$$

Η παραπάνω πιθανότητα ονομάζεται και πιθανότητα απομόνωσης και συμβολίζεται και ως P_{iso} . Επίσης, εάν πάρουμε το συμπλήρωμα της πιθανότητας απομόνωσης τότε

ουσιαστικά προκύπτει η πιθανότητα ένας κόμβος να είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο και να έχει τουλάχιστον ένα γείτονα με τον οποίο συνδέεται. Η πιθανότητα αυτή αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως πιθανότητα κάλυψης P_{cov} :

$$P_{cov} = 1 - P_{iso} \quad (3.5)$$

Πλέον δίνεται μία σχέση με την βοήθεια των πιθανοτήτων και της ευρύτερης επιστήμης που αποσαφηνίζει την έννοια της συνδεσιμότητας και εντοπίζει πότε ένας κόμβος είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο.

Η παραπάνω ανάλυση έγινε για τον εκάστοτε κόμβο ατομικά και τώρα πρέπει να διευρυνθεί στην περιοχή A του μοντέλου. Αρχικά η συγκεκριμένη περιοχή θεωρείται αρκετά μεγάλη ώστε να μην ισχύουν οι επιδράσεις των συνοριακών κόμβων, ενώ παράλληλα τα ενδεχόμενα ο κάθε κόμβος να είναι απομονωμένος είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Έτσι εάν K το ενδεχόμενο να μην είναι απομονωμένος κανένας κόμβος στην περιοχή A από n κόμβους τότε έχουμε:

$$P[K|N = n] = (1 - P_{iso})^n \quad (3.6)$$

Ενώ αν χρησιμοποιηθεί ο τύπος της ολικής πιθανότητας έχω[4]:

$$P(K) = P(K|A_1)P(A_1) + \dots + P(K|A_n)P(A_n) \quad n = 0, \dots, \infty \quad (3.7)$$

Και συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις με το γεγονός ότι τα ενδεχόμενα ακολουθούν κατανομή Poisson ορίζεται:

$$P(K) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\lambda} \frac{[\lambda(1 - P_{iso})]^n}{n!} = e^{-\lambda P_{iso}} \quad (3.8)$$

Όπου $\lambda = \rho A$. Προκύπτει λοιπόν ότι η πιθανότητα να μην είναι απομονωμένος κανένας κόμβος εξαρτάται από το ρυθμό λ της Poisson κατανομής και κατ' επέκταση από την πυκνότητα των κόμβων στην περιοχή και τον τρόπο που κατανέμονται αλλά και από την πιθανότητα απομόνωσης ατομικά κάθε κόμβου. Από το τελευταίο αποδεικνύεται ότι η συνδεσιμότητα εξαρτάται από την εμβέλεια εκπομπής του κόμβου, αναδεικνύοντας άλλη μια φορά την σημασία της ισχύς εκπομπής και των χαρακτηριστικών του καναλιού στις τηλεπικοινωνίες[6],[7].

Επιπλέον μπορούμε να εισάγουμε και την έννοια του σηματοθορυβικού λόγου:

$$SNR(r) = \frac{P_t}{N} l(r) \quad (3.9)$$

Όπου P_t είναι η ισχύς εκπομπής, N η πυκνότητα ισχύος του λευκού γκαουσιανού θορύβου και $l(r)$ η απόσβεση λόγω διάδοσης στον χώρο. Επίσης από την βιβλιογραφία έχουμε:

$$l(r) = Kr^{-\alpha} \quad (3.10)$$

Όπου α ο γνωστός στις τηλεπικοινωνίες συντελεστής απωλειών και K μια σταθερά που περιλαμβάνει τις παραμέτρους διάδοσης της εξίσωσης του Friss. Ακόμα η πιθανότητα απομόνωσης ενός κόμβου δίνεται και από την ακόλουθη σχέση αν οριστεί $SNR(r)=\gamma_{th}$:

$$P_{iso} = e^{-\rho\pi r^2} = e^{-\rho\pi\left(\frac{KP_t}{N\gamma_{th}}\right)^{\frac{2}{\alpha}}} \quad (3.11)$$

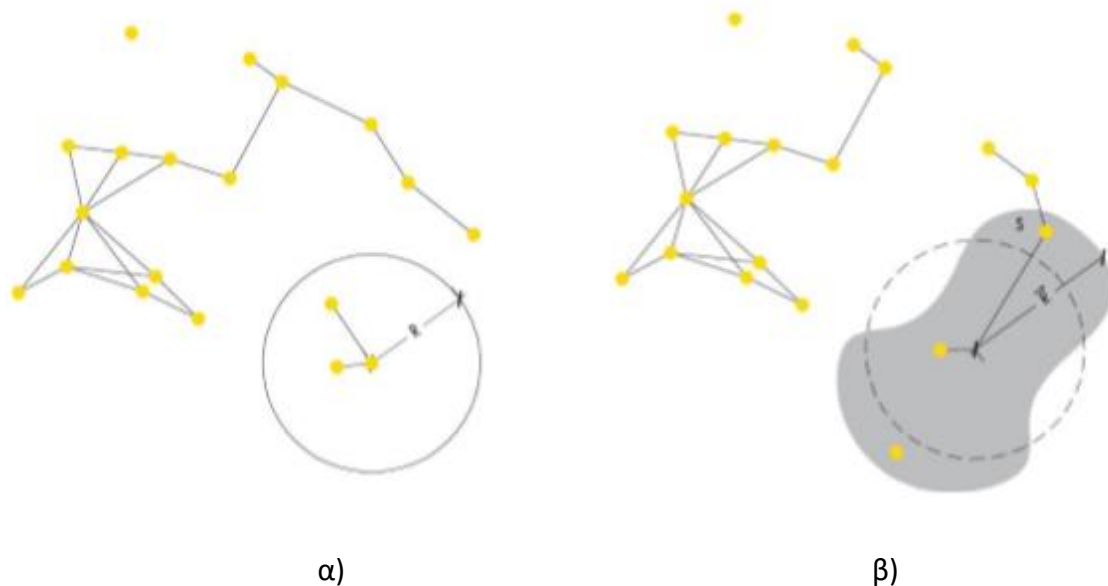
Έτσι η πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος δίνεται από την εξίσωση:

$$P(B) = e^{-\lambda P_{iso}} = e^{-\lambda e^{-\rho\pi\left(\frac{KP_t}{N\gamma_{th}}\right)^{\frac{2}{\alpha}}}} \quad (3.12)$$

Με αυτήν την εξίσωση λοιπόν δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού της συνδεσιμότητας ενός μοντέλου Poisson Boolean, ενώ παράλληλα παρουσιάζεται η επίδραση του τεχνολογικού εξοπλισμού του δικτύου, δηλαδή των κερδών των κεραιών και της ισχύς εκπομπής σε αυτήν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διευκόλυνση του σχεδιασμού του δικτύου και του προσδιορισμού των παραμέτρων του.

3.5 Μοντέλο συνδεσιμότητας που συμπεριλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του καναλιού

Το βασικό μειονέκτημα του μοντέλου Poisson Boolean είναι η υπόθεση ότι η περιοχή κάλυψης του κάθε κόμβου έχει αυστηρά τη μορφή ενός δίσκου. Όπως είναι προφανές κάτι τέτοιο δεν μπορεί να αποτελεί ρεαλιστικό σενάριο ακόμα και με χρήση ομοιοκατευθυντικών κεραιών, παρά μόνο εάν δεν παρεμβάλλονται εμπόδια και αντικείμενα και έχουμε διάδοση ελευθέρου χώρου. Συνήθως η περιοχή κάλυψης έχει ακαθόριστο σχήμα λόγω των εμποδίων, της τυχαιότητας της επίδρασης του σήματος από το κανάλι και των διαλείψεων[8] (εικόνα 1).



Εικόνα 3.1. α) Δίκτυο για ντετερμινιστικό μοντέλο διάδοσης β) Δίκτυο για στοχαστικό μοντέλο διάδοσης

Στην πράξη για να συνδεθούν δύο κόμβοι πρέπει η ισχύς του πομπού να είναι μεγαλύτερη από την ευαισθησία του δέκτη. Αν θεωρήσουμε την ευαισθησία ως κατώφλι τότε ο SNR στον δέκτη πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το κατώφλι αυτό. Άρα ουσιαστικά μπορούμε να θεωρήσουμε ως όριο της περιοχής κάλυψης την καμπύλη στη οποία ο SNR γίνεται ίσος με την τιμή του κατωφλίου. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα σχεδιασμού της περιοχής κάλυψης βάσει της πραγματικής της έννοιας. Έτσι τώρα το εμβαδόν S της περιοχής αποτελεί μία τυχαία μεταβλητή εξαιτίας της ακτίνας R που παύει να είναι σταθερή.

Στο νέο μοντέλο μπορούν να εντοπιστούν δύο κατηγορίες παραμέτρων. Οι ντετερμινιστικές, τις οποίες αποτελούν οι απώλειες διάδοσης και οι στοχαστικές οι οποίες οφείλονται στις διαλείψεις και στην τυχαιότητα του καναλιού. Η ειδοποιός διαφορά των δύο κατηγοριών είναι η αδυναμία προσδιορισμού των στοχαστικών παραμέτρων και η ανάγκη χρήσης στατιστικών μοντέλων. Για αυτό το λόγο, για τον υπολογισμό της περιοχής κάλυψης ενός κόμβου με τυχαία μεταβλητή την ακτίνα κάλυψης R , γίνεται χρήση ενός πολύ χρήσιμου θεωρήματος. Το θεώρημα [9] αναφέρει ότι αν όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι κατανομημένοι με μια ομογενή διαδικασία τυχαίων σημείων Poisson (homogeneous Poisson point field process) παραμέτρου λ στο επίπεδο και η εμβέλεια των κόμβων είναι ίση με R τότε ο αριθμός των γειτονικών κόμβων θα ακολουθεί Poisson κατανομή με παράμετρο $\rho \cdot \pi \cdot E(R^2)$ [10]. Επομένως το παραπάνω θεώρημα βλέπει από διαφορετική οπτική γωνία την περιοχή κάλυψης και η πιθανότητα απομόνωσης μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση:

$$P_{iso} = e^{-\rho\pi E(R^2)} \quad (3.13)$$

Όπου όπως φαίνεται $S = \pi \cdot E(R^2)$ είναι η περιοχή κάλυψης ενώ ο μέσος αριθμός των γειτονικών κόμβων d που επικοινωνούν απευθείας με τον κόμβο είναι:

$$E(d) = \rho\pi \cdot E(R^2) \quad (3.14)$$

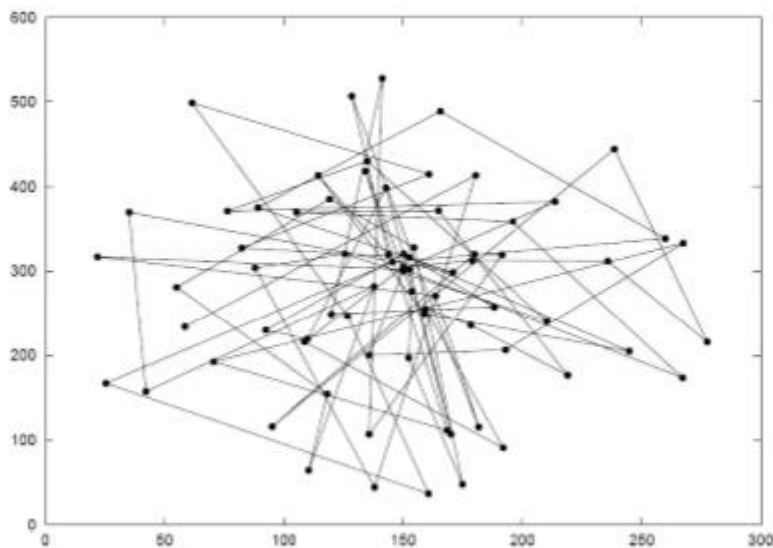
3.6 Βασικά μοντέλα κινητικότητας (Mobility Models)

3.6.1 Τυχαία μοντέλα κινητικότητας (Random-based mobility models)

Βασική ιδιότητα των συγκεκριμένων κινητικών μοντέλων είναι ότι οι κόμβοι που περιγράφονται από αυτά κινούνται εντελώς τυχαία και ανεξάρτητα. Η κατεύθυνση κίνησης, ο προορισμός και η ταχύτητα κάθε κόμβου είναι τυχαία και ανεξάρτητη από τους άλλους. Επίσης, σημαντικό στοιχείο είναι η απουσία μνήμης των μοντέλων, που σημαίνει ότι ο κάθε κόμβος κάθε φορά επιλέγει τυχαία τα χαρακτηριστικά της κίνησης του χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα προγενέστερα.

3.6.1.1 Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου (Random Walk Mobility Model)

Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι από τα πιο βασικά των τυχαίων κινητικών μοντέλων. Διατυπώθηκε μαθηματικά για πρώτη φορά από τον Einstein το 1926[11]. Στο εν λόγω μοντέλο ο κάθε κόμβος επιλέγει την ταχύτητα του και την κατεύθυνση του τυχαία από τα προκαθορισμένα διαστήματα $[speedmin, speedmax]$ και $[0^\circ, 360^\circ]$ αντίστοιχα, τα οποία με τη σειρά τους ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή [12]. Κάθε κίνηση ή μετάβαση στο Μοντέλο Τυχαίου Περιπάτου χαρακτηρίζεται είτε από ένα σταθερό χρονικό διάστημα t είτε από μια σταθερή απόσταση d που διανύεται, στο τέλος της οποίας υπολογίζονται μια νέα τιμή της κατεύθυνσης και μία νέα τιμή της ταχύτητας. Επιπλέον, όταν ένας κόμβος φτάσει στο σύνορο της περιοχής προσομοίωσης ανακλάται πίσω στην περιοχή με μία γωνία που εξαρτάται από την κατεύθυνση άφιξης. Έτσι, ο κόμβος συνεχίζει την πορεία του στην περιοχή προσομοίωσης. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται φαινόμενο συνόρου (border effect) και είναι σημαντικός ο τρόπος που το αντιμετωπίζουν τα μοντέλα κινητικότητας. Βασικό μειονέκτημα του μοντέλου είναι ότι λόγω της έλλειψης μνήμης [13] που το χαρακτηρίζει, παρατηρούνται απότομες μεταβολές της κίνησης που κάνουν την προσομοίωση μη ρεαλιστική. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η κίνηση ενός κόμβου που ξεκινάει από το κέντρο της περιοχής (300m × 600m) προσομοίωσης και ακολουθεί το συγκεκριμένο μοντέλο με χρόνο μετάβασης 60 δευτερόλεπτα.

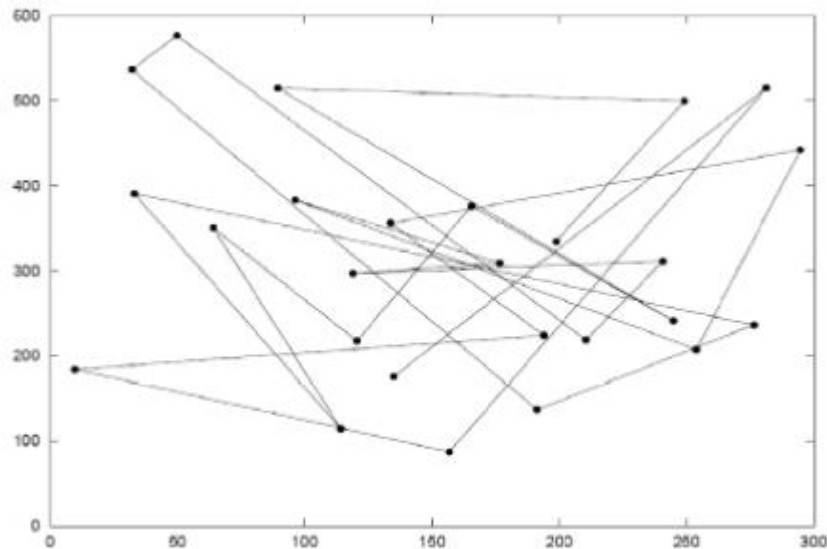


Εικόνα 3.2. Διάγραμμα κίνησης ενός κινητού κόμβου που ακολουθεί το 2-Διαστάσεων Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου (με σταθερό το χρόνο μετάβασης).

3.6.1.2 Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων (Random Waypoint Mobility Model)

Το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Johnson και Maltz [14] και είχε ευρεία εφαρμογή εξαιτίας της απλότητάς του. Η διαφορά με το προηγούμενο είναι ότι αυτό περιλαμβάνει χρόνους παύσης μεταξύ

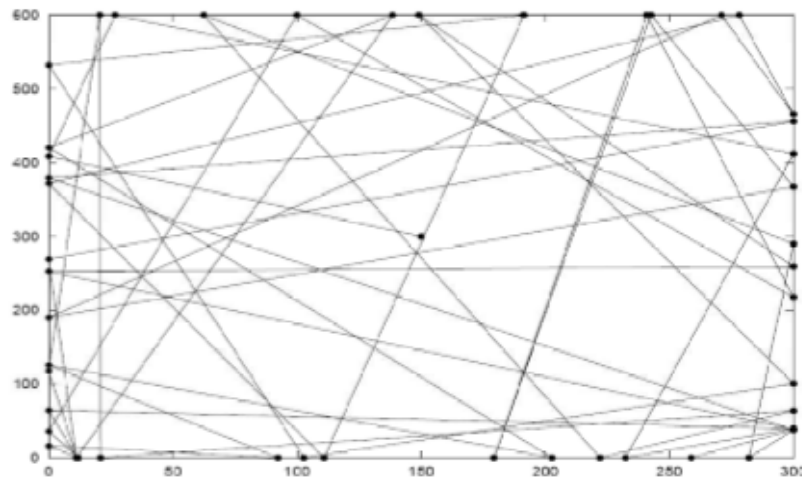
των αλλαγών στην κατεύθυνση και την ταχύτητα [15]. Ουσιαστικά κάθε φορά που τελειώνει το καθορισμένο διάστημα μετάβασης ο κινούμενος κόμβος περιμένει κάποιον χρόνο μέχρι να ξεκινήσει πάλι. Βασικό μειονέκτημα του μοντέλου είναι ότι στην κίνηση πολλών κόμβων, παρατηρείται υψηλή μεταβλητότητα που στα πρώτα δευτερόλεπτα της προσομοίωσης. Η παρακάτω εικόνα δείχνει ένα παράδειγμα ενός κινούμενου κόμβου που ακολουθεί το μοντέλο των τυχαίων στάσεων



Εικόνα 3.3. Διάγραμμα κίνησης ενός κινητού κόμβου που ακολουθεί το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων

3.6.1.3 Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης (Random Direction Mobility Model)

Το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης προτάθηκε από τους Royer, Melliar-Smith και Moser[16]. Προτάθηκε ώστε να αντιμετωπίζει την μη ομοιόμορφη χωρική κατανομή που προαναφέρθηκε αλλά και την τάση των κόμβων στα δύο προηγούμενα μοντέλα να κινούνται κοντά στο κέντρο της περιοχής προσομοίωσης. Στο μοντέλο αυτό ο κόμβος διαλέγει τυχαία κατεύθυνση και ταχύτητα μέχρι το σύνορο της περιοχής προσομοίωσης, όπου κάνει μία παύση και έπειτα συνεχίζει την πορεία του αλλάζοντας κατεύθυνση ώστε να βρίσκεται εντός των ορίων της προσομοίωσης[16]. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της διαδρομής ενός κόμβου που ξεκινάει από το κέντρο. Οι μαύρες τελείες στα σύνορα είναι οι τοποθεσίες που σταμάτησαν οι κόμβοι για να επαναπροσδιορίσουν την κατεύθυνσή και την ταχύτητά τους.



Εικόνα 3.4. Διάγραμμα κίνησης ενός κινητού μοντέλου σύμφωνα με το μοντέλο κινητικότητας τυχαίας κατεύθυνσης.

3.6.2 Μοντέλα κινητικότητας με χρονική εξάρτηση (Mobility models with temporal dependency)

Στην συγκεκριμένη κατηγορία τα μελλοντικά χαρακτηριστικά της κίνησης των κόμβων έχουν άμεση εξάρτηση από την τρέχουσα κατάστασή τους. Παρακάτω θα παρουσιαστούν δύο βασικά μοντέλα με χρονική εξάρτηση.

3.6.2.1 Μοντέλο Κινητικότητας Gauss – Markov (Gauss – Markov Mobility Model)

Το μοντέλο κινητικότητας Gauss – Markov προτάθηκε αρχικά από τους Liang και Haas για την προσομοίωση ενός Προσωπικού Συστήματος Επικοινωνιών (Personal Communication System – PCS), ωστόσο στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε και για την αξιολόγηση πρωτοκόλλων ad hoc δικτύων[17]. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί δύο μεταβλητές όπου καθορίζουν την κίνηση του κόμβου:

$$s_n = as_{n-1} + (1-a)\bar{s} + \sqrt{1-a^2}s_{x_{n-1}} \quad (3.15)$$

$$d_n = ad_{n-1} + (1-a)\bar{d} + \sqrt{1-a^2}d_{x_{n-1}} \quad (3.16)$$

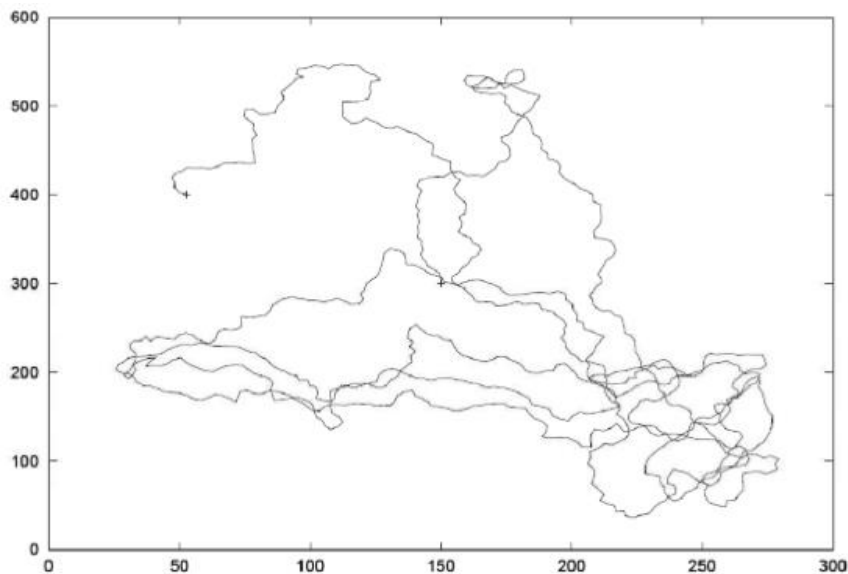
Όπου το s_n είναι η καινούρια ταχύτητα και d_n η καινούρια κατεύθυνση του κινητού κόμβου στο χρονικό διάστημα n , α όπου $0 < \alpha < 1$, είναι η παράμετρος ώστε να εκφράζει την τυχειότητα, \bar{s} και \bar{d} είναι σταθερές που αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης αντίστοιχα, ενώ $s_{x_{n-1}}$ και $d_{x_{n-1}}$ τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την Γκαουσιανή κατανομή. Ουσιαστικά το α είναι η παράμετρος που μας καθορίζει την τυχειότητα που θέλουμε να εφαρμόσουμε και όταν το α έχει μηδενική τιμή τότε έχουμε εντελώς τυχαίες τιμές.

Επίσης η επόμενη θέση του κόμβου προσδιορίζεται από τις αναδρομικές σχέσεις :

$$x_n = x_{n-1} + s_{n-1} \cos d_{n-1} \quad (3.17)$$

$$y_n = y_{n-1} + s_{n-1} \sin d_{n-1} \quad (3.18)$$

Όπου προφανώς ο δείκτης $n-1$ αντιστοιχεί στο $(n-1)$ -οστό χρονικό διάστημα. Στο συγκεκριμένο μοντέλο για να αποφύγουμε το φαινόμενο συνόρου μεταβάλουμε κατάλληλα την τιμή της \bar{d} ώστε η κατεύθυνση του κόμβου να είναι προς το εσωτερικό της περιοχής προσομοίωσης. Η εικόνα παρουσιάζει ένα παράδειγμα ενός διαγράμματος κίνησης ενός κινούμενου κόμβου που ακολουθεί το Μοντέλο Κινητικότητας Gauss-Markov. Η κίνηση αρχίζει από το κέντρο της περιοχής προσομοίωσης, δηλαδή τη θέση (150, 300), και κινείται για 1000 δευτερόλεπτα. Επιπλέον, το χρονικό βήμα είναι 1 δευτερόλεπτο, το α είναι 0.75, ενώ τα $s_{x_{n-1}}, d_{x_{n-1}}$ επιλέγονται από τυχαία κατανομή Gauss με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με ένα. Τέλος το \bar{s} τέθηκε στα 10 m/s και το \bar{d} αρχικά στις 90 μοίρες αφού αργότερα αλλάζει για να μην έχουμε κίνηση εκτός της απαιτούμενης περιοχής.



Εικόνα 3.5. Διάγραμμα κίνησης ενός κινητού κόμβου σύμφωνα με το Μοντέλο Κινητικότητας Gauss – Markov

3.6.2.2 Πιθανοτική εκδοχή του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου (Probabilistic Version of Random Walk Mobility Model)

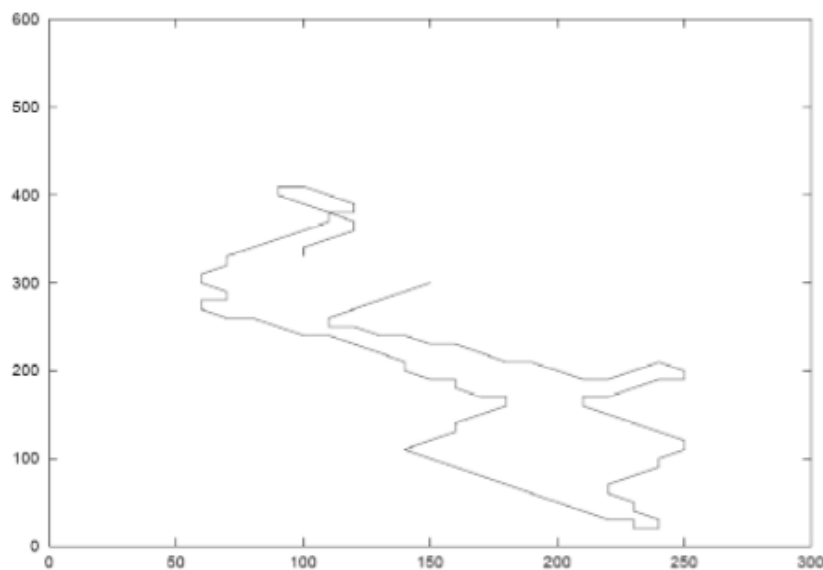
Αυτό το μοντέλο κινητικότητας προτάθηκε από τον Chiang και κάνει χρήση ενός πίνακα πιθανοτήτων για να καθορίσει την επόμενη κίνηση ενός κινητού κόμβου. Γενικότερα περιγράφεται από τρεις καταστάσεις για την x και y θέση, την 0 η οποία αντιστοιχεί στην τρέχουσα θέση, την 1 η οποία μειώνει την συνιστώσα της θέσης (την x ή την y) και την 2 η οποία αυξάνει την συνιστώσα της θέσης[18]. Ο πίνακας που χρησιμοποιείται είναι :

$$P = \begin{pmatrix} p(0,0) & p(0,1) & p(0,2) \\ p(1,0) & p(1,1) & p(1,2) \\ p(2,0) & p(2,1) & p(2,2) \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

Όπου κάθε στοιχείο του πίνακα $p(a,b)$ αντιστοιχεί στην πιθανότητα να έχουμε μετάβαση του κόμβου από την κατάσταση a στην b . Στην πραγματικότητα ο Chiang έκανε χρήση του παρακάτω πίνακα πιθανοτήτων:

$$P1 = \begin{pmatrix} 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0.3 & 0 & 0.7 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η πιθανότητα ο κόμβος να συνεχίσει την ίδια πορεία είναι μεγαλύτερη από ότι να αλλάξει κατεύθυνση. Επίσης, οι τιμές που έχουν οριστεί, αποτρέπουν τις κινήσεις μεταξύ διαφορετικών κατευθύνσεων χωρίς τη μεσολάβηση ενός χρόνου παύσης. Έτσι επιτεύχθηκε μια ρεαλιστικότερη συμπεριφορά της κίνησης των κόμβων, αφού συνήθως η κίνηση των ατόμων ή των οχημάτων για παράδειγμα δεν είναι εντελώς τυχαία και ακαθόριστη αλλά κατά ένα ποσοστό έχει προκαθοριστεί εκ των προτέρων. Παρακάτω παρουσιάζει ένα παράδειγμα κίνησης ενός κόμβου που ακολουθεί την Πιθανοτική Εκδοχή του Μοντέλου Τυχαίου Περιπάτου.



Εικόνα 3.6. Διάγραμμα κίνησης ενός κινητού κόμβου που ακολουθεί την Πιθανοτική Εκδοχή του Τυχαίου Περιπάτου

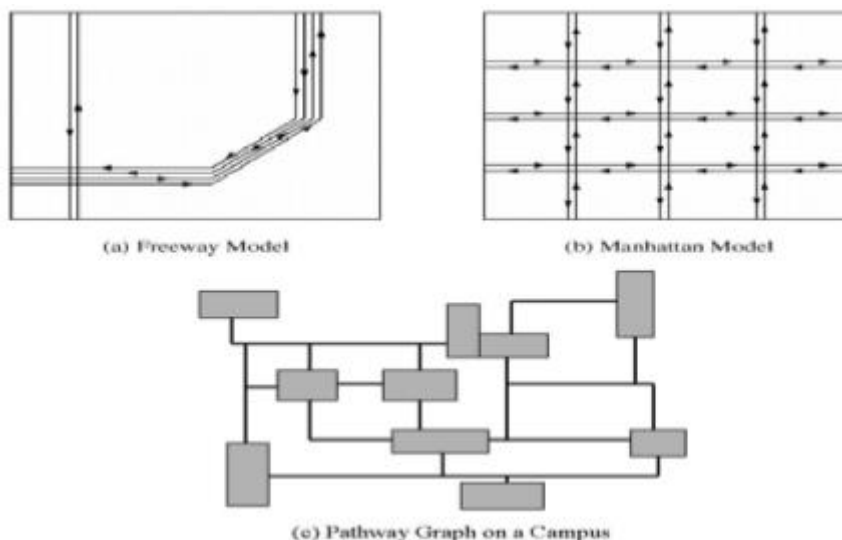
3.6.3 . Μοντέλα Κινητικότητας με Γεωγραφικό Περιορισμό (Mobility models with Geographic Restriction)

Στα προηγούμενα μοντέλα οι κόμβοι είχαν την δυνατότητα να κινούνται σε όλες τις κατευθύνσεις της περιοχής προσομοίωσης τυχαία χωρίς κάποιον περιορισμό. Όμως αυτό που ενδιαφέρει περισσότερο είναι το κάθε μοντέλο να είναι

όσο πιο κοντά γίνεται στην πραγματικότητα. Αυτό λοιπόν που παρατηρείται συνήθως είναι ότι κάθε κόμβος ακολουθεί μία προκαθορισμένη διαδρομή. Για παράδειγμα τα οχήματα ακολουθούν τους δρόμους, ενώ τα πλοία ακολουθούν κάποιες συγκεκριμένες αλλά λιγότερο προκαθορισμένες θαλάσσιες διαδρομές. Άρα ένα μοντέλο με γεωγραφικό περιορισμό είναι αναγκαίο για να περιγράψει τα παραπάνω σενάρια.

3.6.3.1 Μοντέλο Κινητικότητας Μονοπατιού (Pathway Mobility Model)

Στο συγκεκριμένο μοντέλο η κίνηση του κόμβου έχει περιοριστεί σε μονοπάτια του χάρτη που είναι ενσωματωμένος στο πεδίο προσομοίωσης. Αρχικά δημιουργείται ένας γράφος και οι κόμβοι τοποθετούνται τυχαία στις ακμές του γράφου. Στη συνέχεια, επιλέγεται τυχαία ο προορισμός και ο κόμβος ξεκινάει να κινείται προς αυτόν ακολουθώντας την πιο σύντομη διαδρομή [19]. Στον προορισμό, ο κόμβος κάνει παύση για χρονικό διάστημα T και επιλέγει ξανά έναν καινούριο προορισμό για την επόμενη κίνησή του. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το τέλος του χρόνου προσομοίωσης. Η ειδοποιός διαφορά του μοντέλου από τα προηγούμενα είναι ότι πλέον ο κόμβος δεν έχει την δυνατότητα να κινείται σε οποιοδήποτε σημείο και κατεύθυνση αλλά διαλέγει στην τύχη πάλι ποιο μονοπάτι θα ακολουθήσει. Όμοια μοντέλα είναι και τα Freeway και Manhattan [20] τα οποία με τη σειρά τους κάνουν χρήση χαρτών και περιορίζουν την κίνηση των κόμβων σε μονοπάτια.



Εικόνα 3.7. Οι χάρτες και τα μονοπάτια που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα Freeway, Manhattan και Pathway

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] : G. T. Pitsiladis, A. D. Panagopoulos and Ph. Constantinou, “A Spanning Tree-based Connectivity Model in Finite Wireless Networks and Performance under Correlated Shadowing,” *IEEE Commun. Lett.*, vol.16, no.6, pp.842845, June 2012.

- [2]: L. Booth, J. Bruck, M. Franceschetti, and R. Meester, "Continuum percolation and the geometry of wireless networks," *Ann. Appl. Prob.*, vol. 13, no. 2, pp. 722–731, 2003.
- [3]: D. Miorandi and E. Altman, "Coverage and connectivity of ad hoc networks presence of channel randomness," in *Proc IEEE INFOCOM, 24th Annual Joint Conference*, vol. 1, pp 491-502, 13-17 May 2005
- [4]: A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, Boston, Mass, USA, 4th edition, 2002.
- [5]: D. J. Daley and D. Vere-Jones, *An Introduction to the Theory of Point Processes*, Springer, 1988
- [6]: C. Bettstetter, "Mobility modeling in wireless networks: Categorization, smooth movement, and border effects," *ACM Mobile Computing and Commun.*, Rev. 5(3) (2001) 55–67.
- [7]: A. D. Barbour, "Topics in poisson approximation," in *Stochastic Processes: Theory and Methods*, *Handbook of Statistics*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science, 2001.
- [8]: M. Franceschetti, L. Booth, M. Cook, R. Meester, and J. Bruck, "Continuum percolation with unreliable and spread out connections," *Journal of Statistical. Physics*, Vol. 118, Nos ¾, February 2005.
- [9] : J. Orriss and S. K. Barton, "Probability distributions for the number of radio transceivers which can communicate with one another," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 51, no. 4, pp. 676-681, Apr. 2003.
- [10] : D. Miorandi and E. Altman, "Coverage and connectivity of ad hoc networks presence of channel randomness," in *Proc IEEE INFOCOM, 24th Annual Joint Conference*, vol. 1, pp 491-502, 13-17 May 2005.
- [11]: M. Sanchez and P. Manzoni. Anejos: A java based simulator for ad-hoc networks. *Future Generation Computer Systems*, 17(5):573–583, 2001.
- [12]: V. Davies. Evaluating mobility models within an ad hoc network. Master's thesis, Colorado School of Mines, 2000
- [13]: B. Liang and Z. Haas. Predictive distance-based mobility management for PCS networks. In *Proceedings of the Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, March 1999.
- [14]: J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In *Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom98)*, ACM, October 1998.

- [15]: D. Johnson and D. Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In T. Imelinsky and H. Korth, editors, *Mobile Computing*, σελίδες 153–181. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [16]: E. M. Royer, P. M. Melliar-Smith and L. E. Moser. An Analysis of the Optimum Node Density for Ad hoc Mobile Networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Helsinki, Finland, June 2001.
- [17]: V. Tolety. Load reduction in ad hoc networks using mobile servers. Master’s thesis, Colorado School of Mines, 1999.
- [18]: C. Chiang. *Wireless Network Multicasting*. PhD thesis, University of California, Los Angeles, 1998.
- [19]: J. Tian, J. Hahner, C. Becker, I. Stepanov and K. Rothermel. Graph-based Mobility Model for Mobile Ad Hoc Network Simulation, in the *Proceedings of 35th Annual Simulation Symposium*, in cooperation with the IEEE Computer Society and ACM. San Diego, California. April 2002.
- [20]: F. Bai, N. Sadagopan and A. Helmy. Important: a framework to systematically analyze the impact of mobility on performance of routing protocols for ad hoc networks. In *Proceedings of IEEE Information Communications Conference (INFOCOM 2003)*, San Francisco, Apr. 2003.
- [21]: Κυριάκος Σ. Παλαίχωρος, Γεώργιος Π. Χειμωνίδης, “Προσομοίωση μοντέλων κινητικότητας σε κυψελωτά ασύρματα δίκτυα”, Athens July 2008.
- [22]: Γ. Τ. Πιτσιλάδης, “Ανάπτυξη μοντέλων συνδεσιμότητας και αξιολόγηση επίδοσης σε ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς”, Διδακτορική Διατριβή, ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ, Δεκέμβριος 2012.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

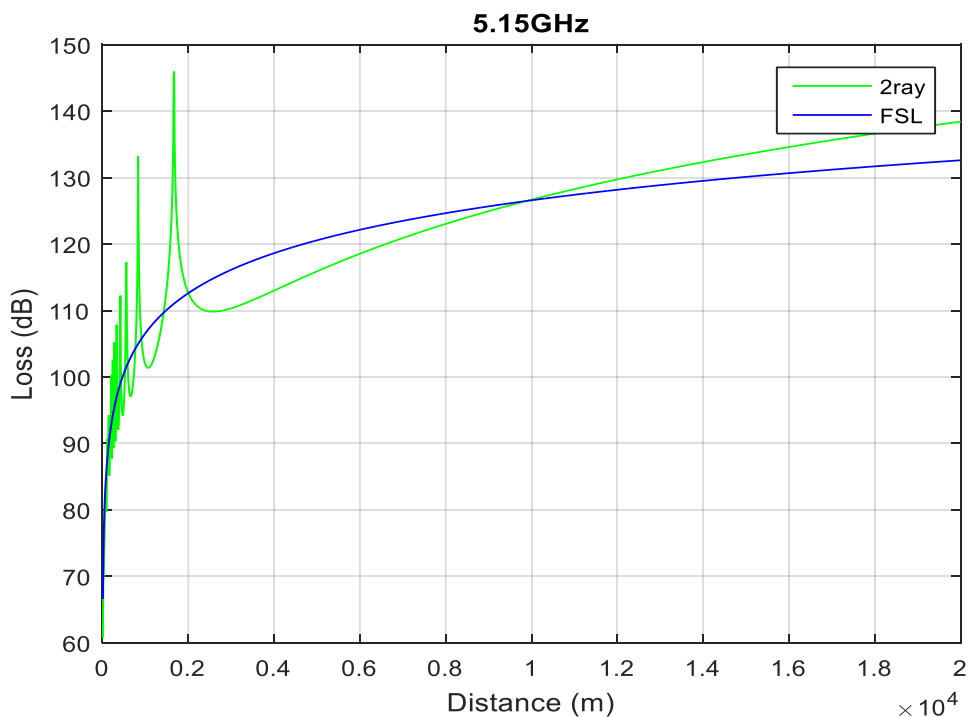
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

4.1 Μοντέλο δύο ακτινών (Βασικό για την ντετερμινιστική προσέγγιση των απωλειών διάδοσης στις θαλάσσιες επικοινωνίες κοντινών αποστάσεων).

Το μοντέλο των δύο ακτινών είναι ουσιαστικά το πιο απλό μοντέλο που ταιριάζει στις θαλάσσιες επικοινωνίες. Κάνουμε χρήση της εξίσωσης (2.73) του δεύτερου κεφαλαίου για τις απώλειες βάσει του μοντέλου 2-ακτινών και της (2.74) για τις απώλειες ελευθέρου χώρου, ώστε να δούμε τις ιδιαιτερότητες των θαλάσσιων επικοινωνιών. Έχει γίνει η υπόθεση ότι γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία ανάκλασης και άρα ο συντελεστής ανάκλασης είναι περίπου ίσος με -1 ενώ η φάση του είναι 180° .

Παράδειγμα 1

Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού h_t	5 m
Ύψος κεραίας δέκτη h_r	9.7 m
Συχνότητα f	5.15 GHz

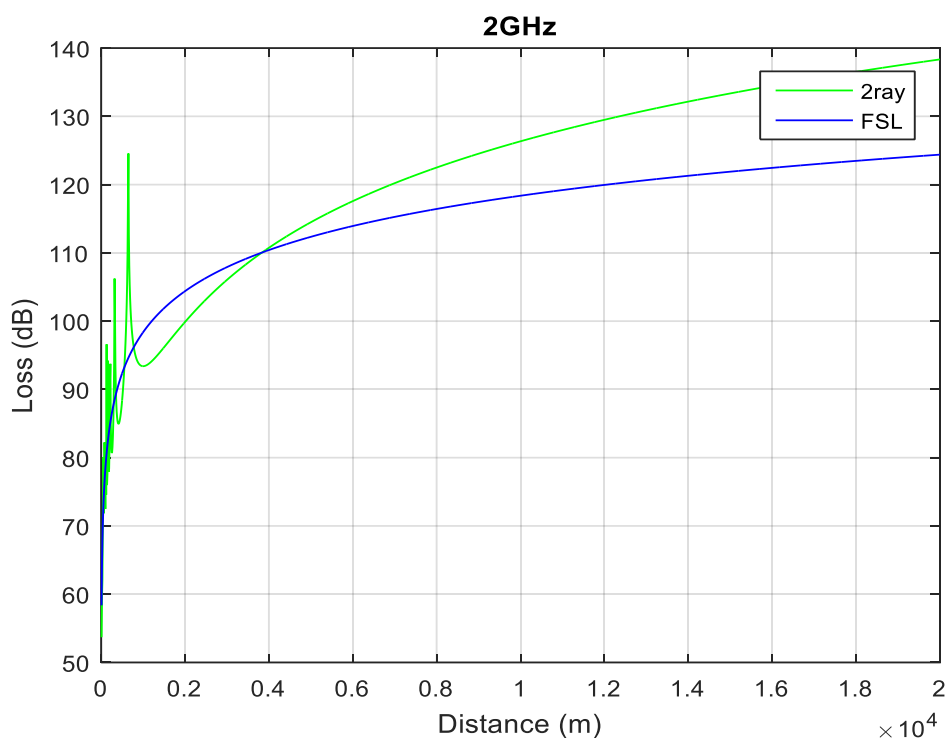


Εικόνα 4.1. Μοντέλο απωλειών διάδοσης δύο ακτινών στα 5.15GHz σε σύγκριση με τις απώλειες ελευθέρου χώρου.

Σχολιασμός: Εδώ παρατηρείται ότι το μοντέλο δύο ακτινών προβλέπει κάποιες έντονες διαλείψεις κυρίως από μία απόσταση και κάτω. Στα 5 GHz αυτή η απόσταση είναι περίπου τα 300m. Αυτό είναι συνέπεια της καταστροφικής άθροισης των δύο ακτινών. Στις απώλειες ελευθέρου χώρου όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1 κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει γιατί δεν λαμβάνεται άλλη ακτίνα και έτσι έχω ομαλές μεταβολές των απωλειών. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, πιο κοντά στην πραγματικότητα στις θαλάσσιες επικοινωνίες είναι το μοντέλο δύο ακτινών, παρ' όλο που στις μετρήσεις παρατηρείται ότι σε μεγάλες αποστάσεις το μοντέλο απωλειών ελευθέρου χώρου (FSL) προσεγγίζει λίγο καλύτερα τις απώλειες.

Παράδειγμα 2

Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού h_t	5 m
Ύψος κεραίας δέκτη h_r	9.7 m
Συχνότητα f	2 GHz



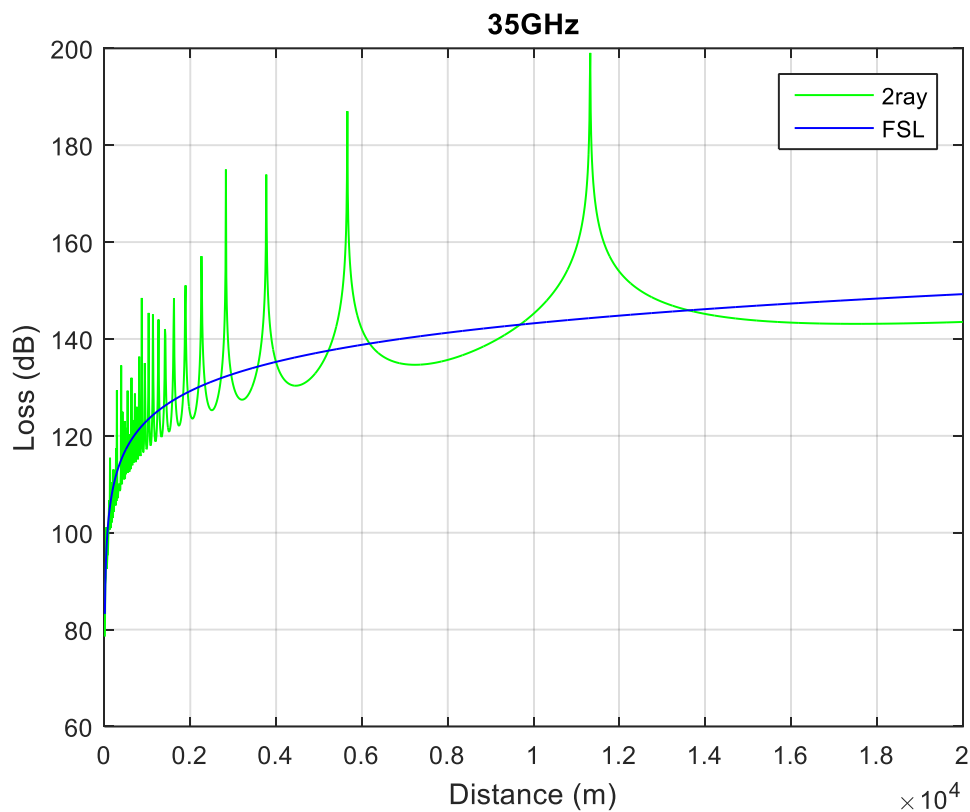
Εικόνα 4.2 . Μοντέλο απωλειών διάδοσης δύο ακτινών στα 2GHz σε σύγκριση με τις απώλειες ελευθέρου χώρου.

Σχολιασμός : Αρχικά όπως είναι λογικό παρατηρούνται μικρότερες διαλείψεις λόγω μικρότερης συχνότητας. Στα 2 GHz λοιπόν παρατηρούνται έντονες διαλείψεις από τα

100m και κάτω. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο ανεβαίνουμε συχνότητα τόσο η απόσταση των έντονων μεταβολών στις απώλειες αυξάνεται.

Παράδειγμα 3

Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού h_t	5 m
Ύψος κεραίας δέκτη h_r	9.7 m
Συχνότητα f	35 GHz



Εικόνα 4.3 . Μοντέλο απωλειών διάδοσης δύο ακτινών στα 35GHz σε σύγκριση με τις απώλειες ελευθέρου χώρου.

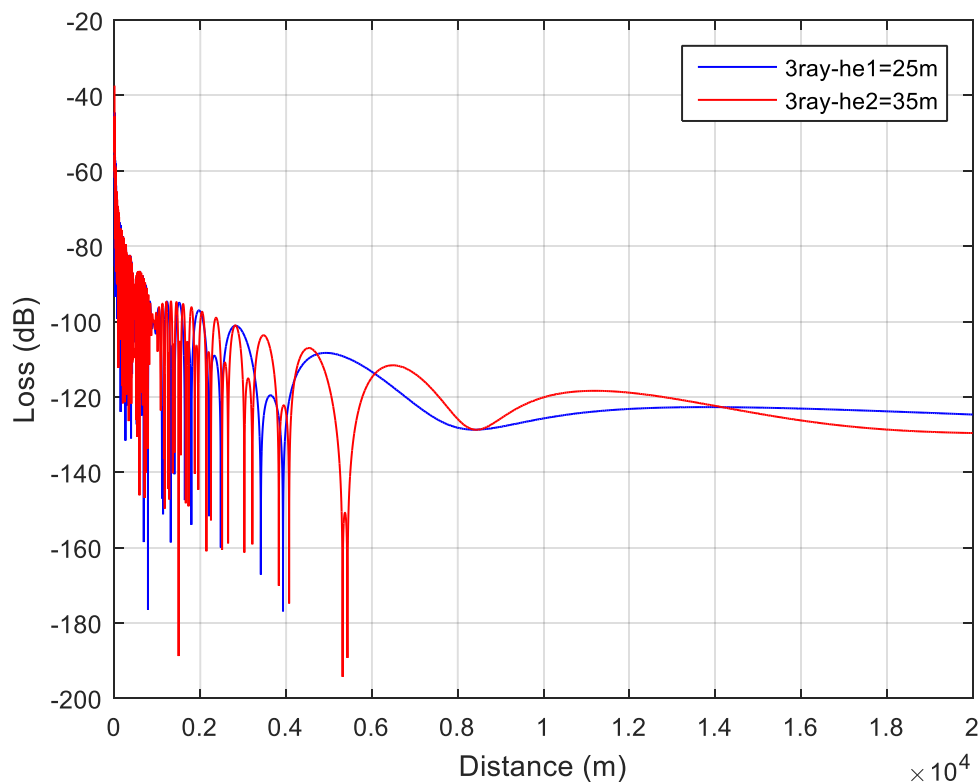
Σχολιασμός : Έγινε επιλογή της συχνότητας των 35 GHz όπου κρίθηκε κατάλληλη για την βάση του 5G στις θαλάσσιες επικοινωνίες και διαπιστώνουμε ότι οι έντονες μεταβολές στις απώλειες συμβαίνουν μέχρι και για 1.3 km. Άρα σωστά αναφέραμε ότι όσο ανεβαίνουμε σε συχνότητα στο θαλάσσιο περιβάλλον τόσο αυξάνονται οι απώλειες αλλά και η απόσταση των έντονων διαλείψεων.

4.2 Μοντέλο τριών ακτινών (επίδραση των υδρατμών και του στρώματος που δημιουργούν).

Το μοντέλο τριών ακτινών είναι ένα μοντέλο που λαμβάνει υπόψη του την ακτίνα που διαθλάται από το στρώμα εξάτμισης. Όπως αναφέρθηκε στο δεύτερο Κεφάλαιο στις τροπικές περιοχές το μοντέλο αυτό είναι αρκετά αποτελεσματικό. Κάνουμε χρήση των εξισώσεων (2.69) και (2.70) για να κατασκευάσουμε το μοντέλο.

Παράδειγμα 1

Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού h_t	3.5 m
Ύψος κεραίας δέκτη h_r	7.6 m
Συχνότητα f	5.15 GHz
Ύψος υδρατμών h_{e1}	25 m
Ύψος υδρατμών h_{e2}	35 m



Εικόνα 4.4 .Μοντέλο απωλειών διάδοσης τριών ακτινών στα 5.15GHz με ύψος στρώματος εξάτμισης 25 και 35 μέτρα αντίστοιχα.

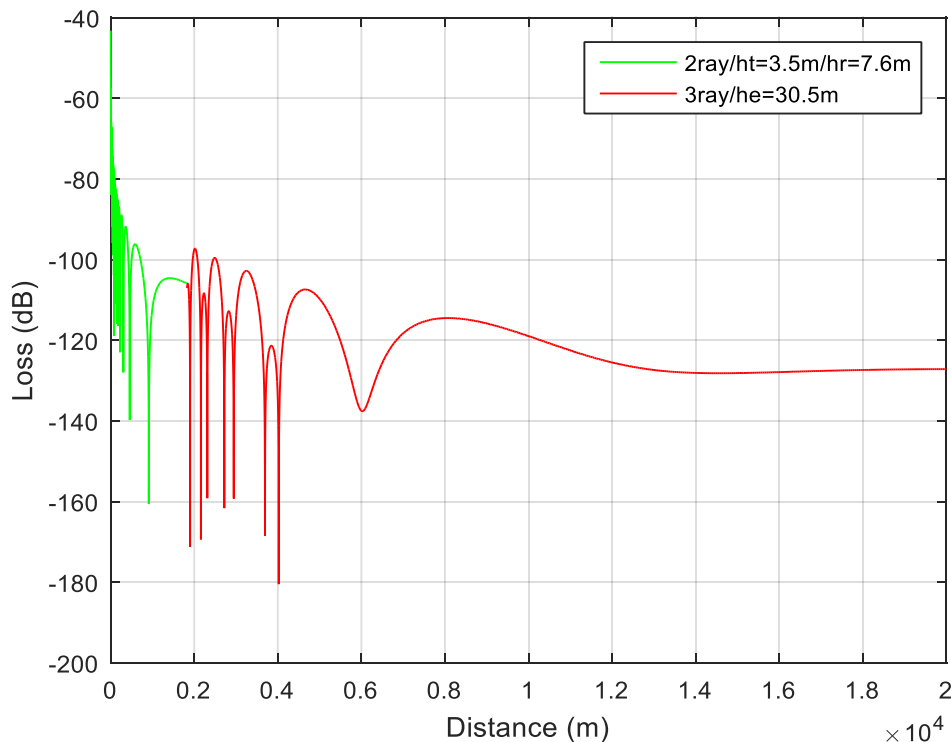
Σχολιασμός: Το ύψος του στρώματος εξάτμισης δηλαδή των υδρατμών όπως παρατηρείται και στην εικόνα 4.4 έχει σημαντικό αντίκτυπο στην διαμόρφωση των έντονων διαλείψεων. Από το ύψος εξαρτάται σε ποια απόσταση και πόσο έντονες είναι οι απώλειες διάδοσης πράγμα που υποδεικνύει την σημασία των υδρατμών

αλλά και την ιδιαιτερότητα των τροπικών περιοχών. Ένα ακόμα σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι στις μακρινές αποστάσεις έχουμε μικρότερες διαλείψεις στο μεγαλύτερο ύψος, αποδεικνύοντας ότι το σήμα κατά κάποιο τρόπο κυματοδηγείται μέσα σε αυτό το στρώμα.

Από διάφορες μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο 2-ακτινών είναι κατάλληλο μέχρι μια κρίσιμη απόσταση όπου η επίδραση της διαθλώμενης ακτίνας δεν έχει σημαντική επίδραση. Μετά την κρίσιμη απόσταση γίνεται χρήση του μοντέλου τριών ακτινών. Η κρίσιμη απόσταση βρίσκεται από την εξίσωση (2.75) του δευτέρου κεφαλαίου.

Παράδειγμα 2

Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού ht	3.5 m
Ύψος κεραίας δέκτη hr	7.6 m
Συχνότητα f	5.15 GHz
Μέσο ύψος υδρατμών he	30.5 m
Κρίσιμη απόσταση dc	1.827 km

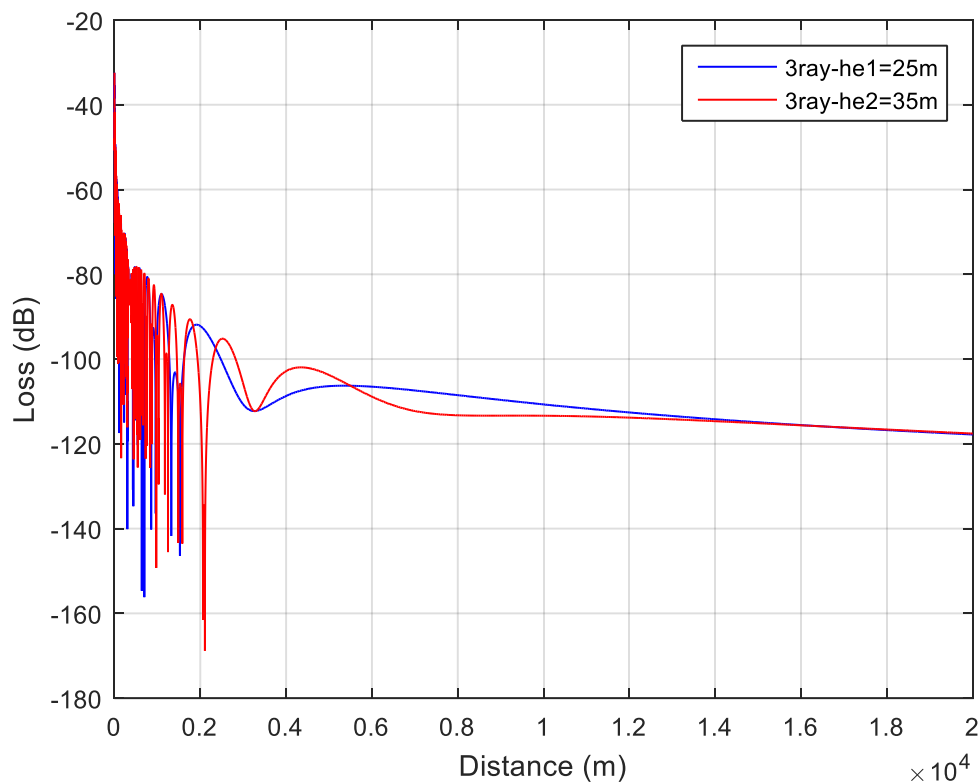


Εικόνα 4.5. Συνδυασμός μοντέλου 2-ακτινών με 3-ακτινών στα 5.15GHz με ύψος στρώματος εξάτμισης 30.5 μέτρα.

Σχολιασμός: Ο συνδυασμός των μοντέλων προβλέπει το μεγαλύτερο ποσοστό έντονων διαλείψεων που προέρχονται από την συμβολή των ακτινών.

Παράδειγμα 3

Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού ht	3.5 m
Ύψος κεραίας δέκτη hr	7.6 m
Συχνότητα f	2 GHz
Ύψος υδρατμών he1	25 m
Ύψος υδρατμών he2	35 m



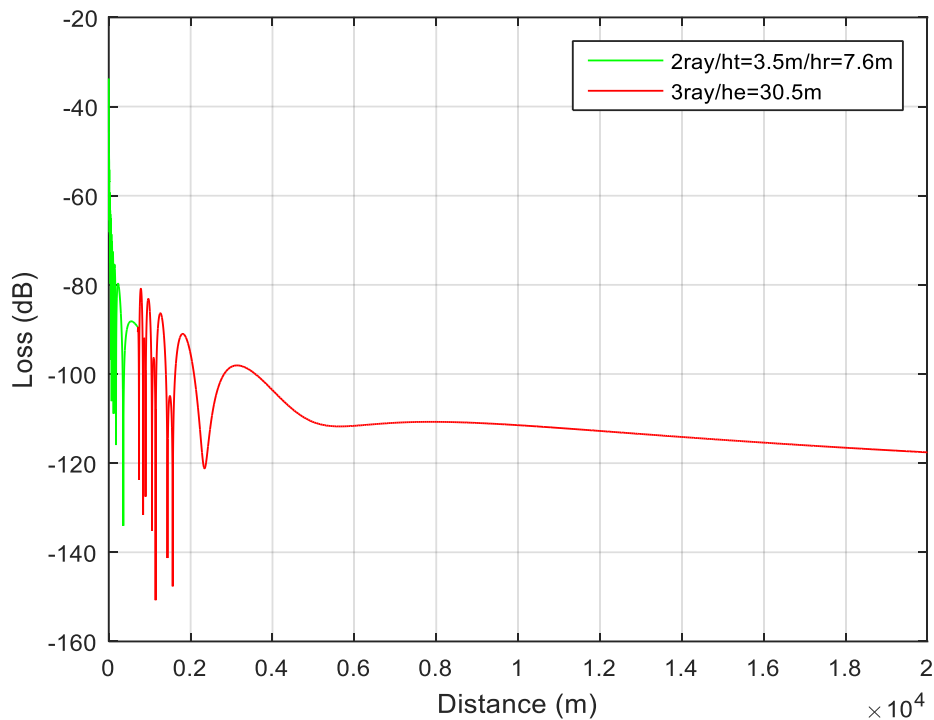
Εικόνα 4.6 . Μοντέλο απωλειών διάδοσης τριών ακτινών στα 2GHz με ύψος στρώματος εξάτμισης 25 και 35 μέτρα αντίστοιχα.

Σχολιασμός: Στα 2 GHz πάλι βλέπουμε την σημασία του ύψους εξάτμισης, ενώ παρατηρούμε μικρότερες απώλειες και μικρότερη απόσταση (400m) στην οποία ομαλοποιούνται οι απώλειες.

Παράδειγμα 4

Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού ht	3.5 m
Ύψος κεραίας δέκτη hr	7.6 m
Συχνότητα f	2 GHz

Μέσο ύψος υδρατμών h_e	30.5 m
Κρίσιμη απόσταση d_c	709.33 m



Εικόνα 4.7 .Συνδυασμός μοντέλου 2-ακτινών με 3-ακτινών στα 2GHz με ύψος στρώματος εξάτμισης 30.5 μέτρα.

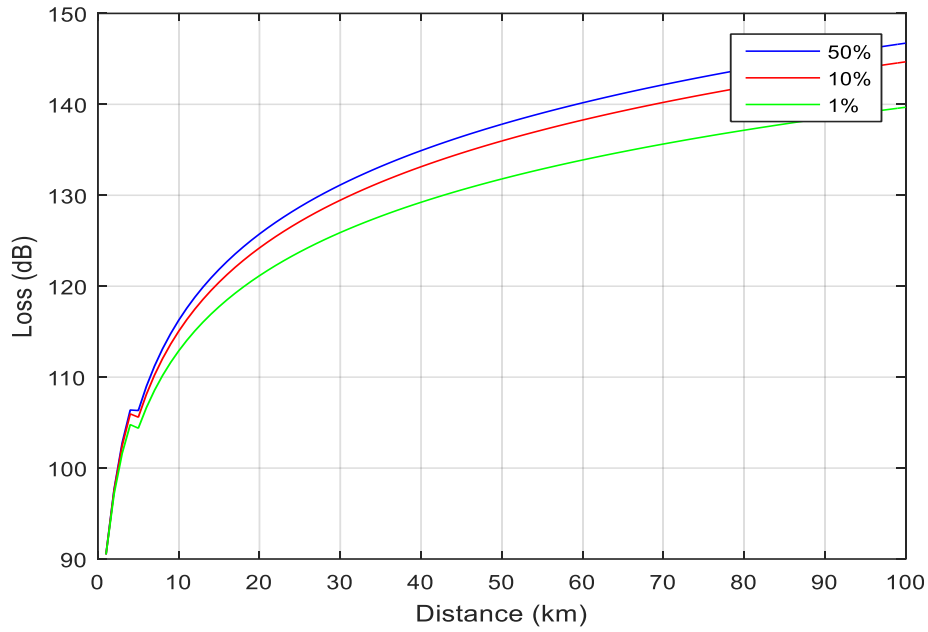
Σχολιασμός: Για μικρότερη συχνότητα η κρίσιμη απόσταση είναι μικρότερη όπως και η απόσταση που χαρακτηρίζεται από έντονες διακυμάνσεις (<300m).

4.3 Γραμμικό μοντέλο απωλειών διάδοσης βασισμένο στο P.1546-2

Για την κατασκευή του μοντέλου κάνουμε χρήση των εξισώσεων του δευτέρου κεφαλαίου (2.57),(2.58),(2.59) και (2.60), αλλά και του πίνακα 2 που παρουσιάστηκε στο δεύτερο Κεφάλαιο.

Παράδειγμα 1

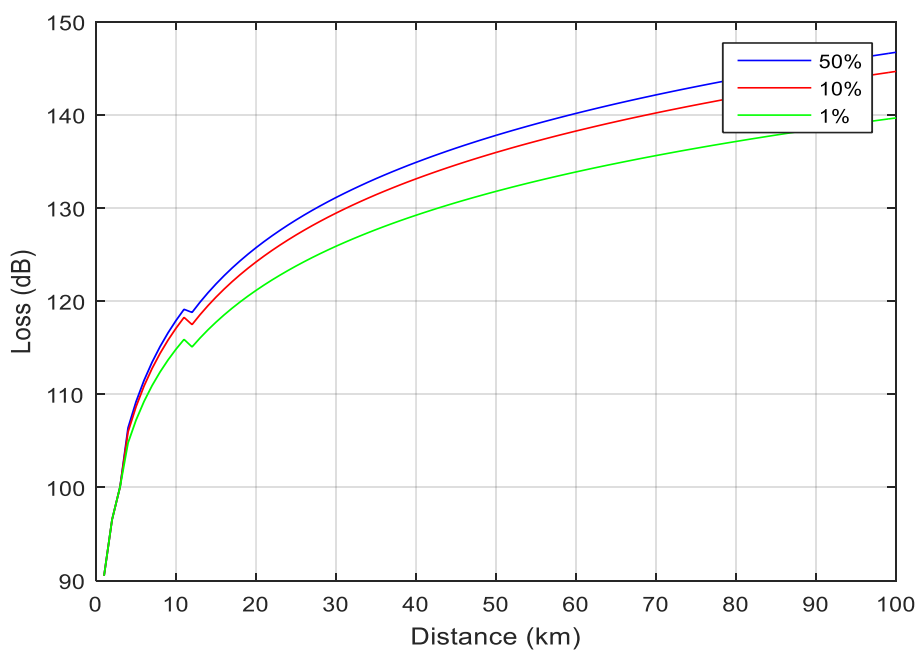
Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού h_t	12 m
Ύψος κεραίας δέκτη h_r	12 m
Συχνότητα f	800 MHz



Εικόνα 4.8 . Γραμμικό μοντέλο απωλειών διάδοσης βασισμένο στο P.1546-2 στα 800MHz για 50%,το 10% και το 1% του χρόνου.

Παράδειγμα 2

Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού h_t	12 m
Ύψος κεραίας δέκτη h_r	12 m
Συχνότητα f	2 GHz



Εικόνα 4.9 . Γραμμικό μοντέλο απωλειών διάδοσης βασισμένο στο P.1546-2 στα 2GHz για 50%, το 10% και το 1% του χρόνου.

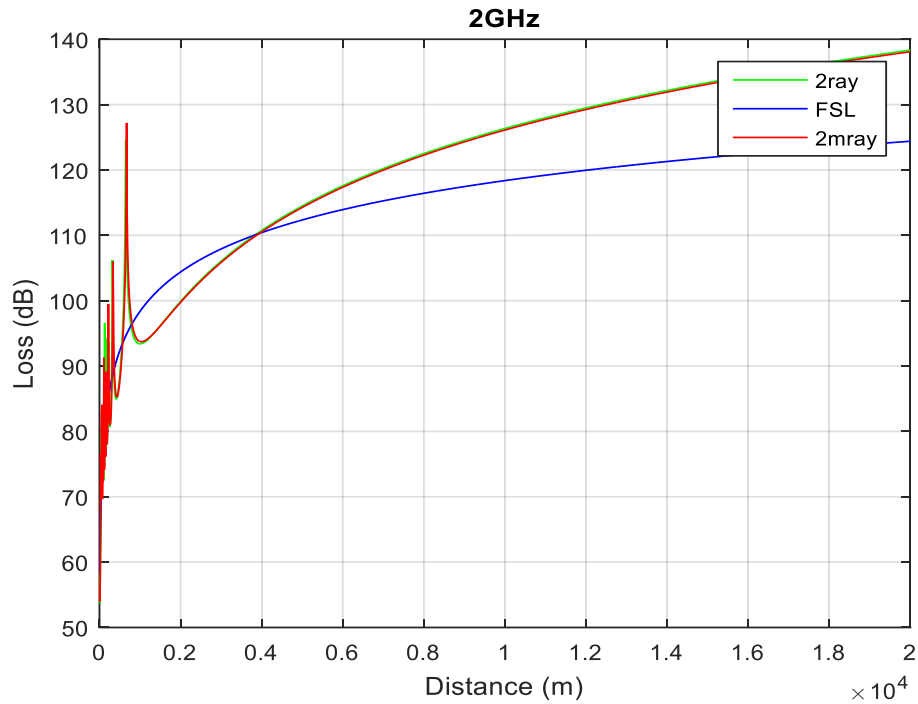
Σχολιασμός: Στο συγκεκριμένο μοντέλο έχουμε κάνει μία γραμμικοποίηση του μοντέλου που προτείνει η σύσταση P.1546-2. Στο παράδειγμα 1 παρατηρούμε τις απώλειες που έχουν προκύψει από μετρήσεις στο 50%, στο 10% και στο 1% του χρόνου. Βλέπουμε ουσιαστικά ότι όσο περισσότερες μετρήσεις έγιναν τόσο μεγαλύτερες απώλειες είχαμε. Επίσης λήφθηκε υπόψη η επίδραση των απωλειών περίθλασης λόγω της παρεμβολής της κυρτότητας της γης στην πρώτη ζώνη Fresnel όπως φαίνεται, αφού από το 1.5km (κρίσιμη απόσταση) και μετά οι απώλειες γίνονται εντονότερες. Το παράδειγμα 2 ανεβάζοντας την συχνότητα στα 2GHz βλέπουμε μια σταθερότητα στις απώλειες στις μακρινές αποστάσεις, πράγμα που αποτελεί μειονέκτημα του μοντέλου. Παρ' όλα αυτά το μοντέλο δείχνει την αναμενόμενη αύξηση της κρίσιμης απόστασης και των απωλειών σε κοντινές αποστάσεις.

4.4 Τροποποιημένο μοντέλο δύο ακτινών για ντετερμινιστική προσέγγιση απωλειών διάδοσης στις θαλάσσιες επικοινωνίες σε συχνότητες που λειτουργεί το 5G.

Κατασκευάζουμε το τροποποιημένο μοντέλο δύο ακτινών με την χρήση των εξισώσεων του δευτέρου κεφαλαίου (2.76),(2.77),(2.78) ενώ παράλληλα το συγκρίνουμε με το FSL μοντέλο και αυτό των 2-ακτινών.

Παράδειγμα 1

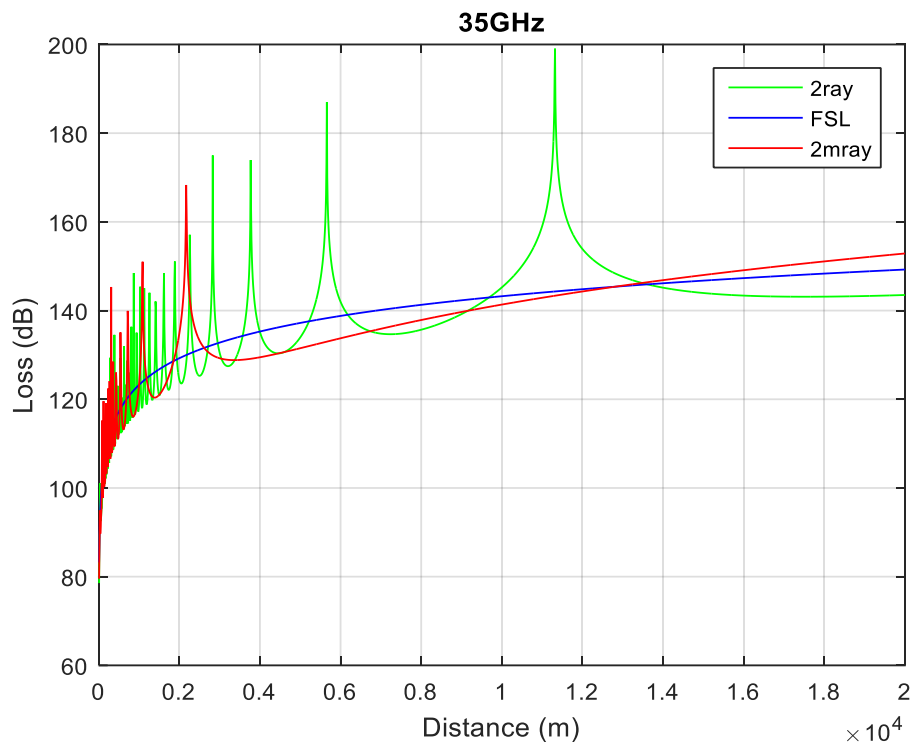
Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού ht	5 m
Ύψος κεραίας δέκτη hr	9.7 m
Συχνότητα f1	2 GHz



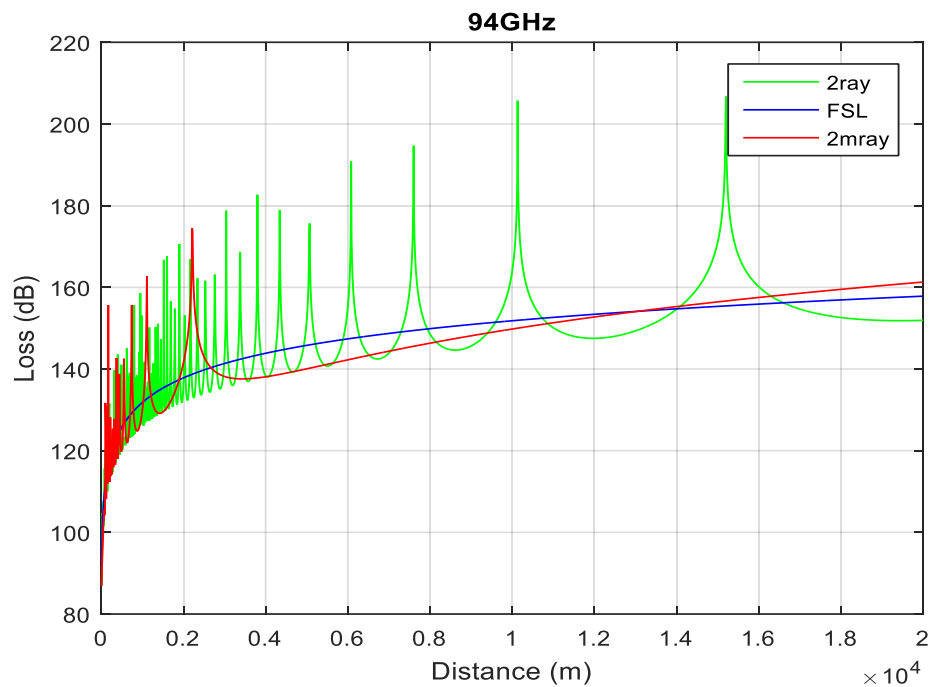
Εικόνα 4.10. Τροποποιημένο μοντέλο δύο ακτινών σε σύγκριση με το απλό μοντέλο 2-ακτινών και τις απώλειες ελευθέρου χώρου για 2GHz.

Παράδειγμα 2

Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού h_t	5 m
Ύψος κεραίας δέκτη h_r	9.7 m
Συχνότητα f_1	35 GHz
Συχνότητα f_2	94 GHz



a)



b)

Εικόνα 4.11. Τροποποιημένο μοντέλο δύο ακτινών σε σύγκριση με το απλό μοντέλο 2-ακτινών και τις απώλειες ελευθέρου χώρου για α) 35GHz και β) 94GHz.

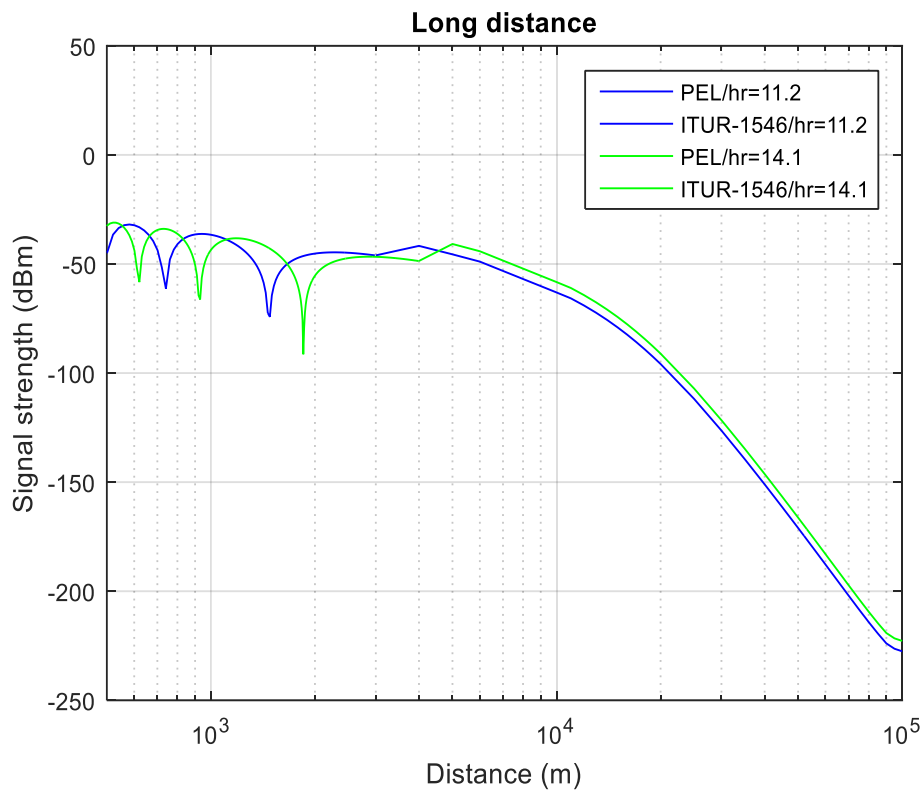
Σχολιασμός: Βλέπουμε αρχικά ότι στα 2GHz έχουμε ταύτιση του μοντέλου με αυτό των δύο ακτινών, γεγονός πολύ σημαντικό αφού όπως προαναφέρθηκε σε αυτές τις συχνότητες το μοντέλο 2-ακτινών είναι το καταλληλότερο. Στις συχνότητες όμως 35GHz και 94GHz όπως φαίνεται στις εικόνες το μοντέλο 2-ακτινών προβλέπει έντονες διαλείψεις μέχρι και πάνω από 1 km. Αυτό δεν συνάδει με τις μετρήσεις και την πραγματικότητα, αντιθέτως το τροποποιημένο μοντέλο προσεγγίζει με ακρίβεια τις απώλειες διάδοσης και δεν εμφανίζει του πρόσθετους μηδενισμούς.

4.5 Σχεδόν ντετερμινιστικό μοντέλο βάσει του P.1546 της ITU-R και του PEL μοντέλου.

Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται στο μοντέλο PEL (Plane Earth Model) και στο μοντέλο της σύστασης της ITU-R P.1546-2. Κάνουμε χρήση της εξίσωσης (2.62) για το μοντέλο PEL και της (2.75) για να βρούμε το σημείο από το οποίο θα αρχίζει η P.1546 και που οι απώλειες θα αντιστοιχούν στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, σύμφωνα και με την εξίσωση (2.61).

Παράδειγμα 1

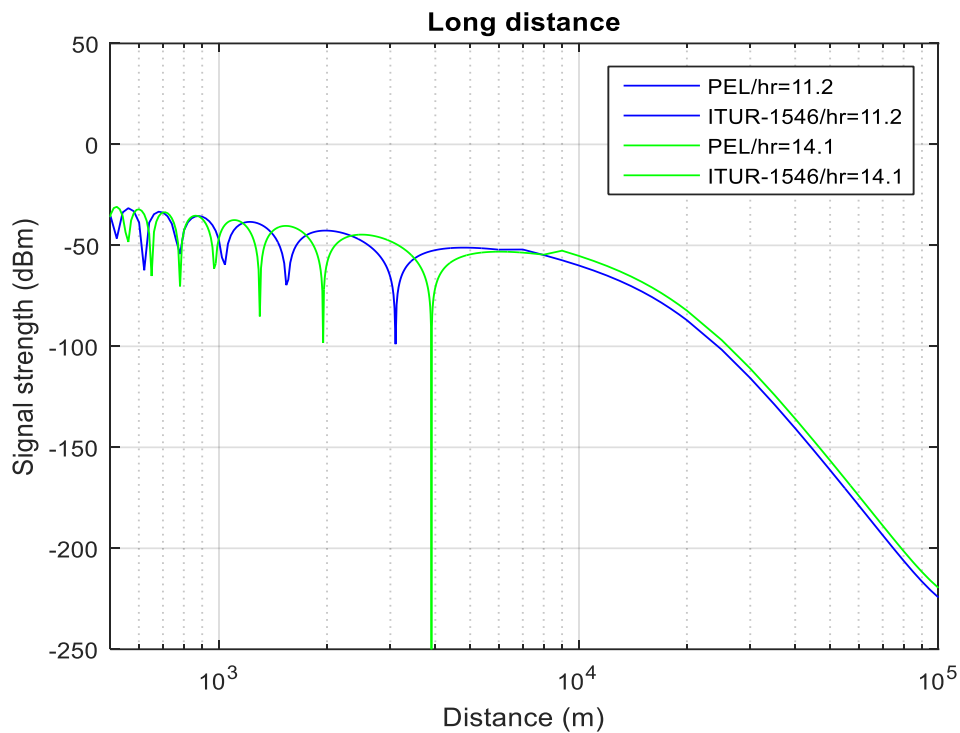
Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού ht	9.5 m
Ύψος κεραίας δέκτη hr1	11.2 m
Ύψος κεραίας δέκτη hr2	14.1 m
Συχνότητα f	2.075 GHz
Κέρδος κεραία πομπού Gt	15dB
Κέρδος κεραία δέκτη Gr	15dB
Ισχύς εκπομπής Pt	27.2dBm
Απώλειες καλωδίου	1 dB



Εικόνα 4.12. Σχεδόν ντετερμινιστικό μοντέλο στα 2.075GHz με ύψος κεραίας δέκτη $hr=11.2\text{m}$ και $hr=14.1\text{m}$ και $ht=10\text{m}$.

Παράδειγμα 2

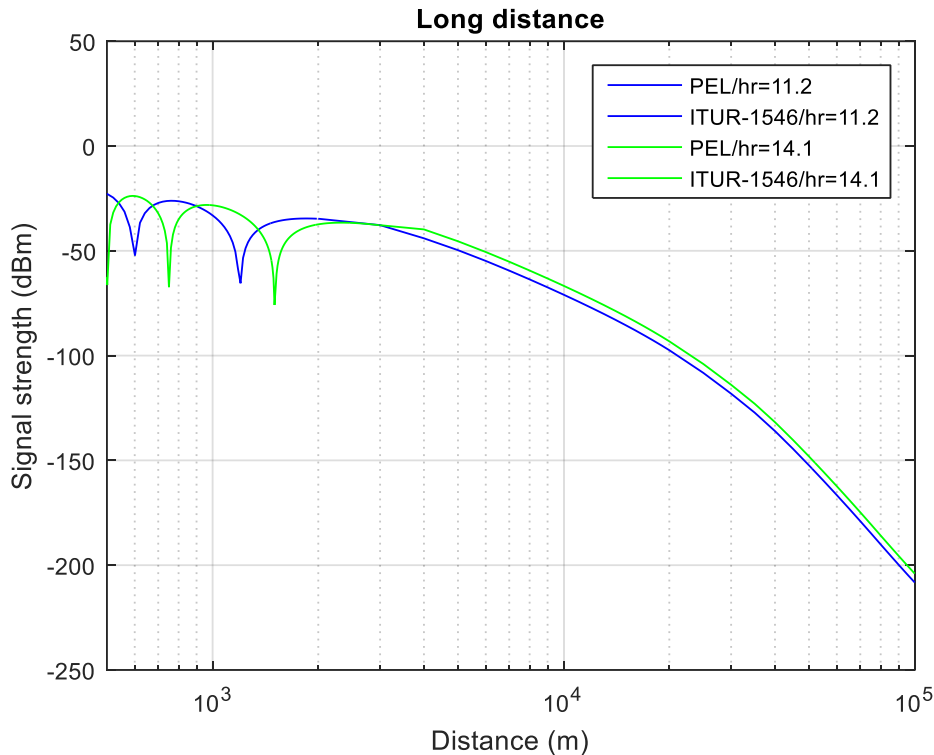
Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού ht	20 m
Ύψος κεραίας δέκτη $hr1$	11.2 m
Ύψος κεραίας δέκτη $hr2$	14.1 m
Συχνότητα f	2.075 GHz
Κέρδος κεραία πομπού Gt	15dB
Κέρδος κεραία δέκτη Gr	15dB
Ισχύς εκπομπής Pt	27.2dBm
Απώλειες καλωδίου	1 dB



Εικόνα 4.13. Σχεδόν ντετερμινιστικό μοντέλο στα 2.075GHz με ύψος κεραίας δέκτη $h_r=11.2\text{m}$ και $h_r=14.1\text{m}$ και $h_t=20\text{m}$.

Παράδειγμα 3

Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού h_t	20 m
Ύψος κεραίας δέκτη h_{r1}	11.2 m
Ύψος κεραίας δέκτη h_{r2}	14.1 m
Συχνότητα f	800 MHz
Κέρδος κεραία πομπού G_t	15dB
Κέρδος κεραία δέκτη G_r	15dB
Ισχύς εκπομπής P_t	27.2dBm
Απώλειες καλωδίου	1 dB



Εικόνα 4.14. Σχεδόν ντετερμινιστικό μοντέλο στα 800MHz με ύψος κεραίας δέκτη $h_r=11.2\text{m}$ και $h_r=14.1\text{m}$ και $h_t=20\text{m}$.

Σχολιασμός: Βλέπουμε τώρα στην εικόνα 4.12 ότι μέχρι την κρίσιμη απόσταση προβλέπονται οι κλασικοί μηδενισμοί και από εκεί και πέρα οι απώλειες αυξάνονται σε μεγάλο βαθμό βάσει των γραφικών παραστάσεων που παρουσιάζονται στην σύσταση που υλοποιήθηκε. Μία άλλη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι όπως είδαμε και σε όλα τα προηγούμενα παραδείγματα, το ύψος των κεραιών καθορίζουν την απόσταση που θα γίνουν οι μηδενισμοί καθώς και την κρίσιμη απόσταση. Έτσι όταν το ύψος της κεραίας του δέκτη είναι 11.2m τότε έχω μηδενισμούς στα 750m και στα 1600m, ενώ όταν έχω ύψος 14.1m οι μηδενισμοί συμβαίνουν στα 600m, 980m και στα 1950m περίπου. Η τελευταία παρατήρηση που μπορούμε διακρίνουμε είναι ότι όταν έχουμε κεραία ύψους 14.2m οι απώλειες είναι μικρότερες στις μεγάλες αποστάσεις, πράγμα που εύκολα ερμηνεύεται αφού για μεγαλύτερου ύψους κεραίες αργεί να εμποδιστεί το 60% της πρώτης ζώνης Fresnel και άρα δεν έχουμε μεγάλες απώλειες.

Στην εικόνα 4.13 παρουσιάζονται οι γραφικές του ίδιου μοντέλου μόνο που τώρα το ύψος της κεραίας του πομπού είναι στα 20m. Βλέπουμε πάλι ότι οι προηγούμενες παρατηρήσεις ισχύουν. Αυτό που αλλάζει είναι οι αποστάσεις των μηδενισμών καθώς και ο αριθμός τους αφού τώρα πριν το κρίσιμο σημείο έχουμε περισσότερους μηδενισμούς. Επίσης όπως είναι λογικό έχουμε και μεγαλύτερη κρίσιμη απόσταση, άρα οι απώλειες μεγαλώνουν κατακόρυφα σε μεγαλύτερη απόσταση από ότι στην προηγούμενη δοκιμή.

Τέλος στην εικόνα 4.14 παρουσιάζονται οι γραφικές του μοντέλου κατεβάζοντας την συχνότητα στα 800MHz με ύψος κεραίας πομπού στα 20m πάλι. Αυτό που διαπιστώνεται είναι ότι οι μηδενισμοί είναι λιγότεροι, σε διαφορετικά σημεία και ότι το κρίσιμο σημείο είναι μικρότερο από ότι προηγουμένως. Άρα στις μικρότερες συχνότητες η καθαρότητα της πρώτης ζώνης Fresnel εμποδίζεται γρηγορότερα, αλλά όπως βλέπουμε στη 4.14 έχουμε τα πλεονεκτήματα των μικρότερων απωλειών σε μικρές και σε πολύ μεγάλες αποστάσεις(100km).

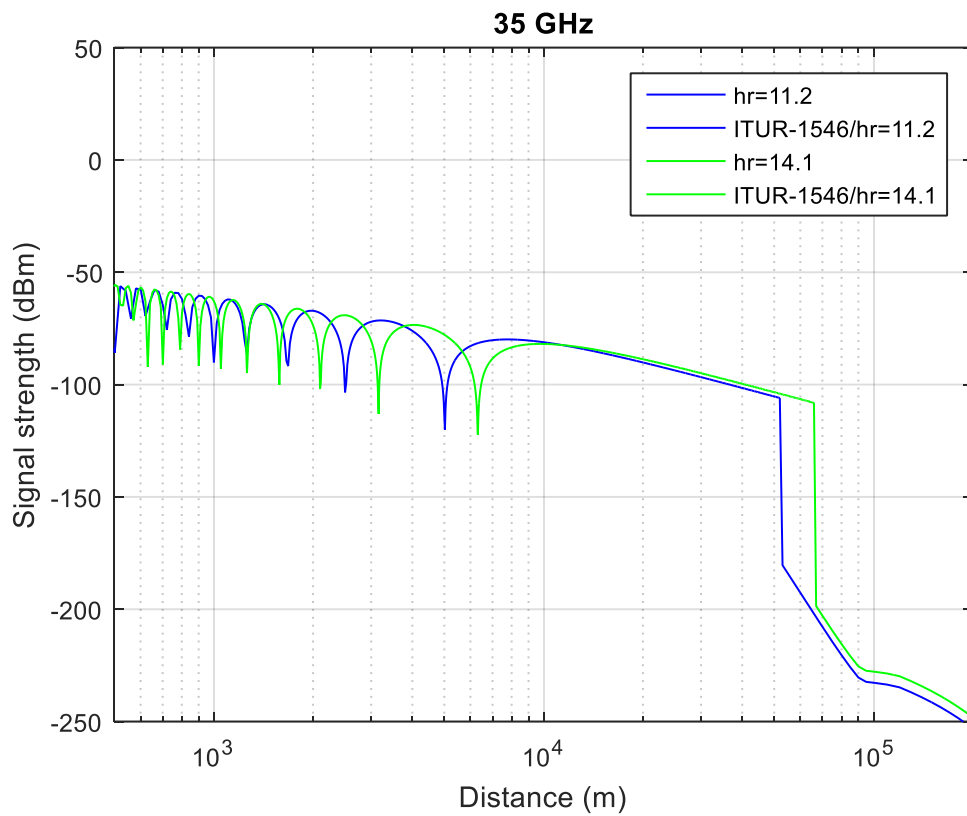
4.6 Προσπάθεια συνδυασμού μοντέλων

4.6.1 P.1546-2 σε συνδυασμό με το τροποποιημένο μοντέλο 2-ακτινων. (Για 5G)

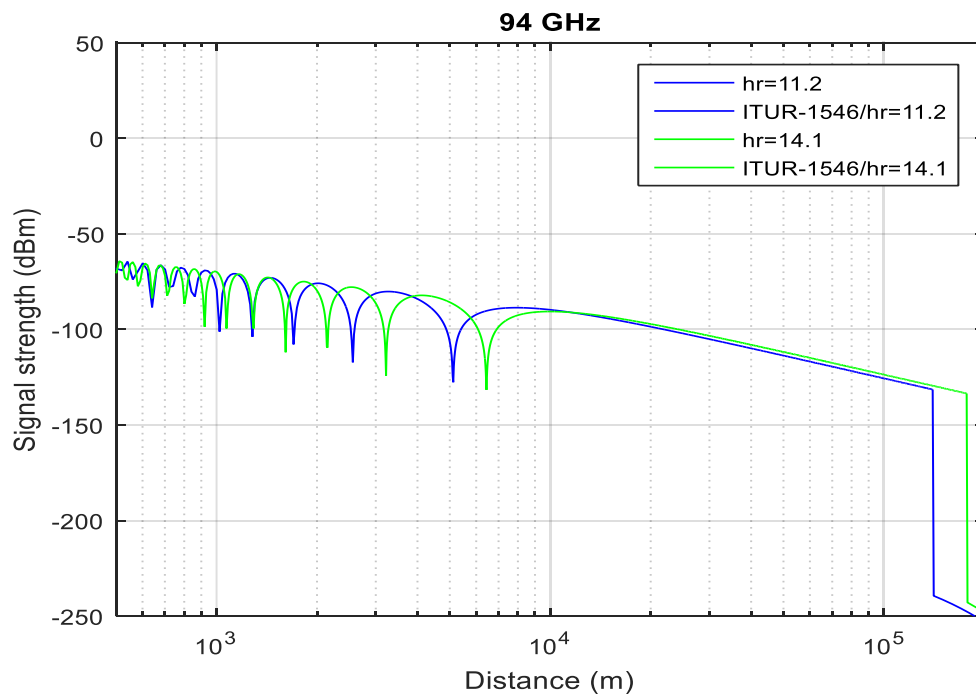
Τώρα θα συνδυαστεί το τροποποιημένο μοντέλο δύο ακτινών με αυτό της σύστασης της P.1546-2. Με αυτό τον συνδυασμό θα επιτευχθεί καλύτερη προσέγγιση στις υψηλές συχνότητες στις μικρές αποστάσεις. Στις μεγάλες αποστάσεις θα χρησιμοποιηθεί αυτό της σύστασης, που όμως οι μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί είναι μέχρι 2GHz και έχουν όριο μέχρι τα 3GHz. Άρα στα 35GHz γίνεται νέα δοκιμή και έχω το παρακάτω σχεδιάγραμμα. Γίνεται χρήση των εξισώσεων (2.76), (2.77),(2.78),(2.75) καθώς και του μοντέλου που προτείνεται στην σύσταση.

Παράδειγμα 1

Παράμετροι	Τιμές
Ύψος κεραίας πομπού ht	10 m
Ύψος κεραίας δέκτη hr1	11.2 m
Ύψος κεραίας δέκτη hr2	14.1 m
Συχνότητα f1	35 GHz
Συχνότητα f2	94 GHz
Κέρδος κεραία πομπού Gt	15dB
Κέρδος κεραία δέκτη Gr	15dB
Ισχύς εκπομπής Pt	27.2dBm
Απώλειες καλωδίου	1 dB



Εικόνα 4.15. Συνδυασμός του τροποποιημένου μοντέλου 2-ακτινών με το προτεινόμενο μοντέλο από της σύστασης P.1546-2 της ITU-R στα 35GHz.



Εικόνα 4.16. Συνδυασμός του τροποποιημένου μοντέλου 2-ακτινών με το προτεινόμενο μοντέλο από της σύστασης P.1546-2 της ITU-R στα 94GHz.

Σχολιασμός: Εδώ επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα των προηγούμενων δοκιμών. Παρατηρείται ότι στα 35GHz και τα 94GHz όπως έχουμε καταλήξει από πριν, έχουμε περισσότερους μηδενισμούς από τις μικρότερες συχνότητες της προηγούμενης ενότητας και γενικότερα μεγαλύτερες κρίσιμες αποστάσεις. Αυτό που καταφέρνει το εν λόγω μοντέλο είναι να μην υποτιμά τις απώλειες πέρα από το κρίσιμο σημείο.

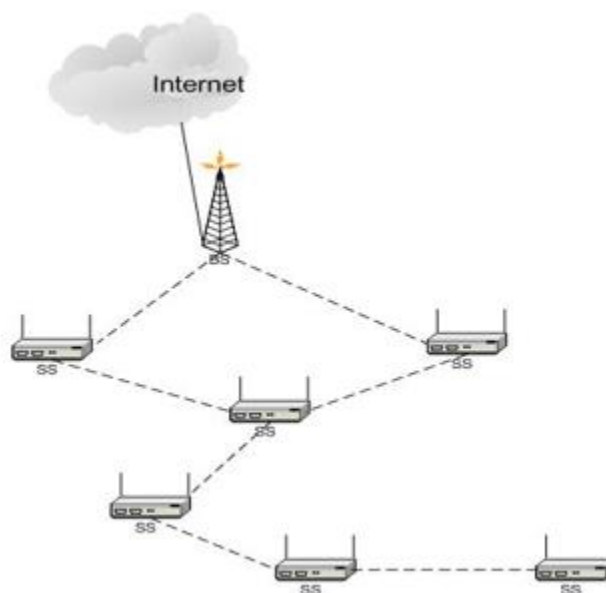
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESH NETWORKS) ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

5.1 Χαρακτηριστικά πρωτοκόλλων

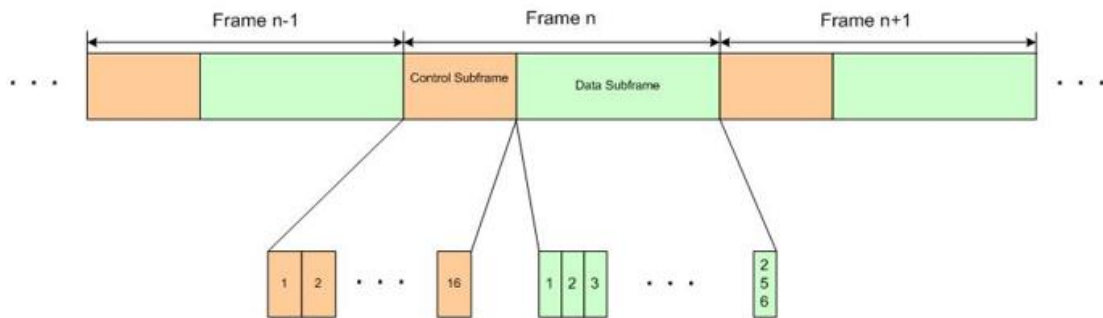
Το πρότυπο IEEE 802.16-2004 έχει σχεδιαστεί για ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση μεγάλης εμβέλειας. Χρησιμοποιεί ένα σχήμα βασισμένο σε TDMA στο MAC επίπεδο και ένα βασισμένο σε OFDM στο φυσικό επίπεδο. Στο MAC επίπεδο το IEEE 802.16d υποστηρίζει δύο λειτουργίες, τη λειτουργία σημείου-προς-πολλών σημείων (PMP) και τη λειτουργία ενός δικτύου πλέγματος (mesh networks). Πιο συγκεκριμένα στα δίκτυα PMP, ο σταθμός των συνδρομητών (SS) συνδέεται με τον σταθμό βάσης απευθείας και οι συνδρομητικοί σταθμοί δεν έχουν άμεση επικοινωνία. Από την άλλη, στα δίκτυα πλέγματος όπως έχει αναφερθεί και στο πρώτο Κεφάλαιο, οι κόμβοι δηλαδή οι σταθμοί των συνδρομητών έχουν την δυνατότητα, υπό την προϋπόθεση ότι βρίσκονται αρκετά κοντά, να επικοινωνούν δίχως την παρέμβαση ή τον συντονισμό ενός σταθμού βάσης. Επίσης, ένας SS δεν χρειάζεται να είναι στην εμβέλεια του σταθμού βάσης, αφού σε αυτήν την αρχιτεκτονική τα δεδομένα μεταδίδονται από κόμβο σε κόμβο, γιατί στα δίκτυα πλέγματος δίνεται η δυνατότητα σε κάθε κόμβο να επεξεργάζεται και να προωθεί τα πακέτα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δομείτε ουσιαστικά ένα πολυβηματικό δίκτυο.

Η PMP δομή είναι κατάλληλη για τις κυψελωτές επικοινωνίες και κατ' επέκταση για την κινητή τηλεφωνία, ενώ τα δίκτυα πλέγματος για επικοινωνίες χωρίς υποδομές. Στην εικόνα 5.1 φαίνεται ένα δίκτυο πλέγματος. Όπως είναι λογικό η εγκατάσταση σταθμών βάσεων στην θάλασσα είναι αδύνατη και για το λόγο αυτό τα δίκτυα πλέγματος ή πολυβηματικά δίκτυα είναι τα πιο αποτελεσματικά δίκτυα για τις θαλάσσιες επικοινωνίες[1].



Εικόνα 5.1 Δίκτυο πλέγματος

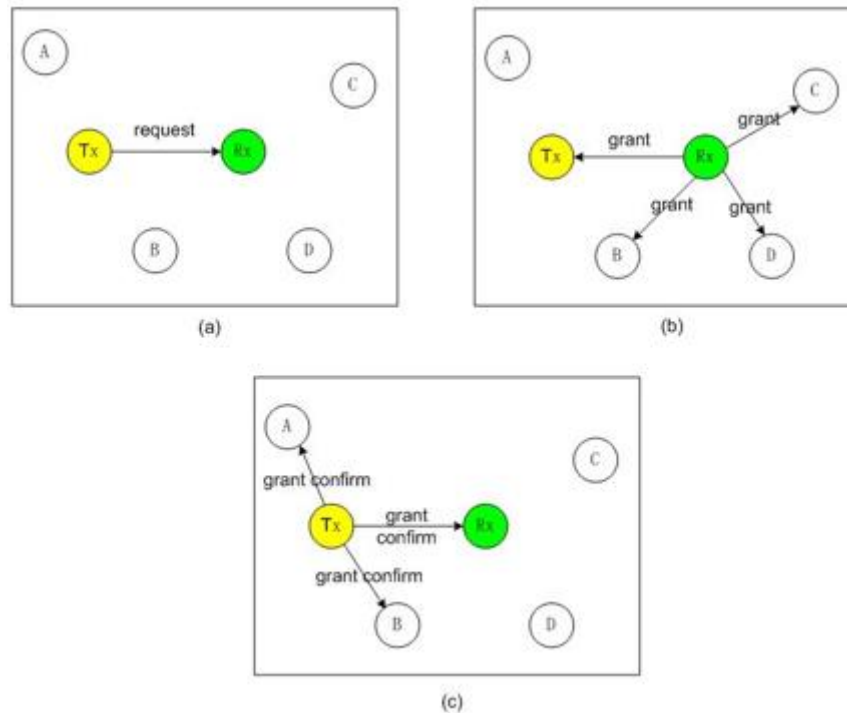
Επίσης στα δίκτυα πλέγματος βάσει του προτύπου IEEE 802.16d, ο χρόνος του καναλιού TDMA διαιρείται σε πλαίσια ισοδύναμου μήκους. Το μήκος του πλαισίου μπορεί να είναι 10 ms ή 20 ms. Κάθε πλαίσιο χωρίζεται περαιτέρω σε ένα μικρότερο πλαίσιο ελέγχου και ένα δεδομένων. Η εικόνα 5.2 δείχνει τη δομή πλαισίου ενός δικτύου πλέγματος.



Εικόνα 5.2 Το πλαίσιο ενός δικτύου πλέγματος[1]

Το υποπλαίσιο ελέγχου χρησιμοποιείται για την μετάδοση μηνυμάτων ελέγχου και δημιουργείται με πρωταρχικό σκοπό την αποφυγή συγκρούσεων των πακέτων. Ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση ενός προκαθορισμένου αλγόριθμου γνωστού ως αλγόριθμο επιλογής πλέγματος (mesh election). Αντίθετα το υποπλαίσιο δεδομένων χωρίζεται σε 256 μικρές υποδοχές και ο χρόνος μετάδοσης για κάθε πακέτο δεδομένων χρειάζεται να δεσμευτεί πριν την αποστολή. Η δέσμευση του χρόνου μετάδοσης δεδομένων γίνεται συνήθως μέσω ενός κεντρικού ή κατακευθμένου αλγόριθμου[1].

Στην πρώτη περίπτωση, ο SS αρχικά στέλνει μηνύματα στον σταθμό βάσης που ανήκει ώστε να δεσμεύσει εύρος ζώνης. Στη συνέχεια, ο σταθμός βάσης στέλνει τους διαθέσιμους πόρους χρονικών θυρίδων στους αντίστοιχους κόμβους. Με αυτό το κεντρικό σύστημα διαχείρισης, η δέσμευση πόρων γίνεται με την χρήση πολλών βημάτων, αφού χρειάζονται να παρέμβουν πολλοί κόμβοι για την ανταλλαγή πληροφοριών. Βασικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου τρόπου λειτουργίας είναι ότι η διάθεση του εύρους ζώνης υπόκεινται σε καθυστερήσεις, εάν για παράδειγμα οι SS που στέλνουν τα αιτήματα για το εύρος ζώνης είναι αρκετά μακριά από τον σταθμό βάσης. Στην δεύτερη περίπτωση όπου το σύστημα δεν είναι κεντρικό αλλά κατακευθμένο, οι κόμβοι ανταλλάσσουν μια ειδική λίστα (bitmap) διαθέσιμων πόρων μέσω μηνυμάτων ελέγχου. Με βάση τις πληροφορίες κατανομής των πόρων, χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός τριών αποστολών για την αποφυγή συγκρούσεων και παρεμβολών στη μετάδοση δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση λύνει το βασικό πρόβλημα της τυχαίας συνάντησης τερματικού, που συναντάμε συχνά στο περιβάλλον των ασύρματων επικοινωνιών. Στην εικόνα 5.3 παρουσιάζεται ο μηχανισμός της αποστολής και λήψης τριών κατευθύνσεων που αναφέρθηκε.



Εικόνα 5.3 Η τριών-κατευθύνσεων 'χειραψία'.

Σε αυτήν ο αποστολέας στέλνει αρχικά αιτήματα για την απόκτηση εύρους ζώνης, ο παραλήπτης στην συνέχεια κατανέμει τους πόρους σύμφωνα με τον bitmap και στέλνει πίσω τους δεσμευμένους πόρους. Μετά ο πομπός αναμεταδίδει τους πόρους που δεσμεύτηκαν στους γείτονές τους για την ενημέρωσή τους ώστε να αποφευχθούν συγκρούσεις και παρεμβολές. Όλοι οι γείτονες που λαμβάνουν την επιβεβαίωση επιχορήγησης πόρων ή την επιχορήγηση ενημερώνουν το bitmap τους.

Η επιλογή της χρήσης κεντρικής ή διανεμημένης διαχειριστικής δομής εξαρτάται από το βάθος του δέντρου δρομολόγησης. Εάν το δέντρο είναι μικρό δηλαδή έχουμε λίγα βήματα, τότε το συγκεντρωτικό μοντέλο είναι καλύτερο και πιο αποτελεσματικό. Από την άλλη πλευρά, εάν το δέντρο είναι μεγάλο, τότε ένα κατανεμημένο σχήμα είναι μια καλύτερη επιλογή, καθώς η καθυστέρηση λόγω των συγκεντρωτικών μηνυμάτων ελέγχου μπορεί να είναι μεγάλη και αποτελεί τροχοπέδη για την αποτελεσματική επικοινωνία.

Το πρότυπο IEEE 802.16-2004 γενικά έχει ορίσει δύο προφίλ επιπέδου φυσικού στρώματος βασισμένα στο OFDM και OFDMA αντίστοιχα. Το προφίλ με την OFDM διαμόρφωση χρησιμοποιεί ένα σταθερό FFT μέγεθος 256, ενώ εκείνο του OFDMA υποστηρίζει μέγεθος 2.048 FFT. Στο 802.16d προτείνεται κατάλληλο μοντέλο για τις σταθερές ασύρματες επικοινωνίες και στο 802.16e δίνεται η αναβαθμισμένη έκδοση με OFDMA και ικανότητα χρήσης διαφορετικών συχνοτήτων ώστε να υποστηρίζεται η κινητικότητα των κόμβων. Τα βασικά χαρακτηριστικά των προτεινόμενων μοντέλων του IEEE 802.16 φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Βασικά χαρακτηριστικά μοντέλων του IEEE 802.16e

FFT length	128	512	1024	2048
System Bandwidth (MHz)	1.25	5	10	20
Symbol Duration (μ s)	102.86	102.86	102.86	102.86
Number of OFDM symbols (5ms)	48	48	48	48

5.2 Προσομοιώσεις

Παρακάτω θα πραγματοποιηθούν κάποιες προσομοιώσεις για να βγούν κάποια συμπεράσματα για τα μοντέλα απωλειών που υλοποιήθηκαν, κάνοντας χρήση του μοντέλου κινητικότητας τυχαίων στάσεων και του μοντέλου τυχαίας κατεύθυνσης. Επίσης τα πλοία κατανεμήθηκαν στον χώρο της προσομοίωσης με την βοήθεια της μεθοδολογία των τυχαίων σημείων Poisson[4].

5.2.1 Προσομοιώσεις με χρήση μοντέλου τυχαίων στάσεων

Σενάριο 1

Μοντέλο τυχαίων στάσεων και χρήση quasi μοντέλου[2].

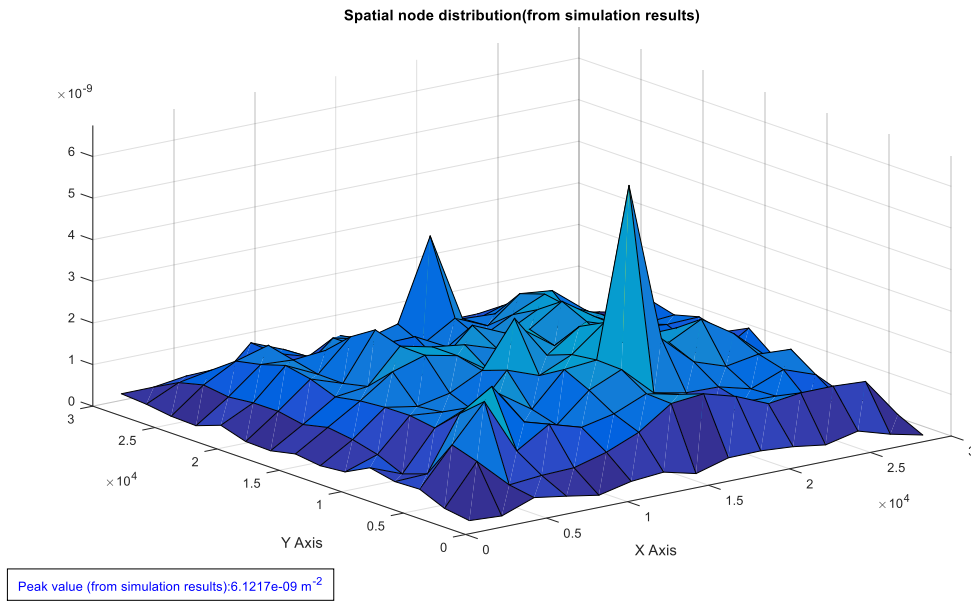
Παράμετροι

Πίνακας 5.2 παράμετροι πρώτου σεναρίου

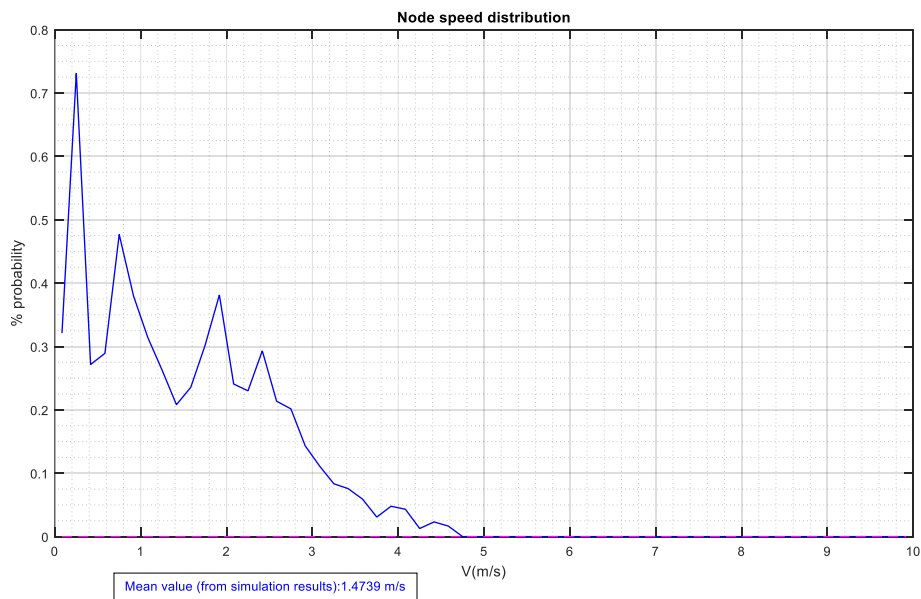
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0 , 30.000] x [0 , 30.000] m^2
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0 , 5] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[0, 10] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100.000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1

Κατώφλι (threshold)	-40 dBm
Συχνότητα (f)	2 GHz
Ύψος κεραίας πομπού (ht)	10 m
Ύψος κεραίας δέκτη (hr)	11.2 m

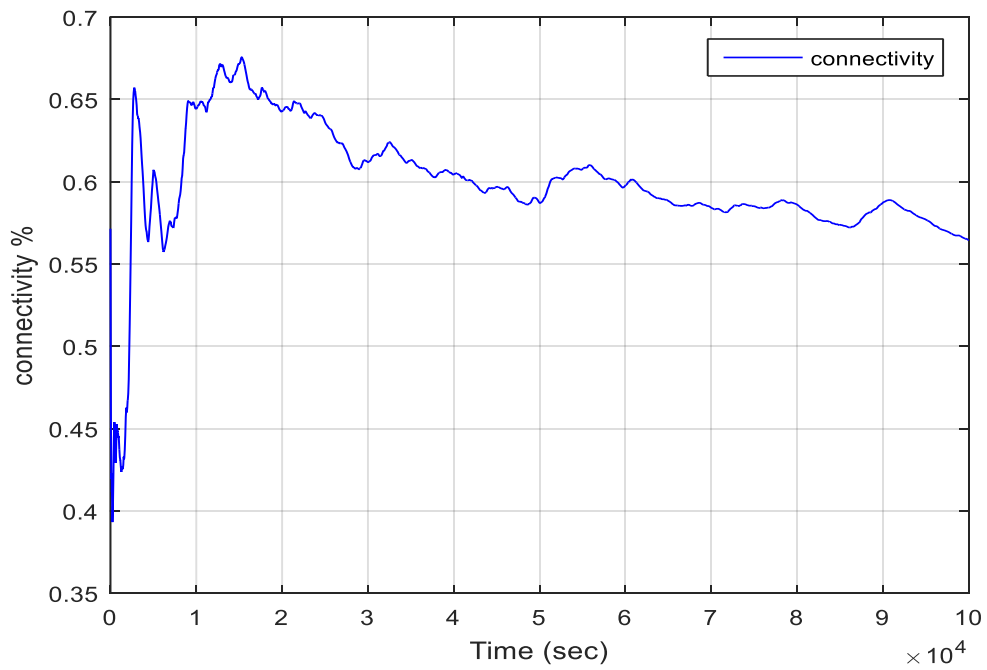
Αποτελέσματα



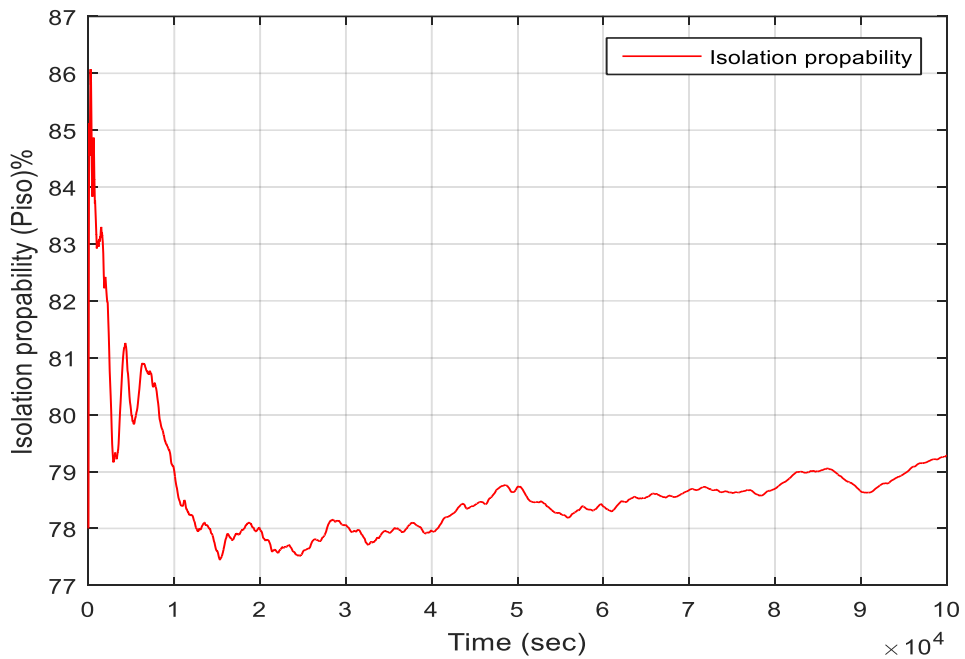
Σχήμα 5.4 Χωρική κατανομή των πλοίων



Σχήμα 5.5 Κατανομή ταχύτητας των πλοίων



Σχήμα 5.6 Καμπύλη συνδεσιμότητα (connectivity)



Σχήμα 5.7 Καμπύλη της πιθανότητας απομόνωσης πλοίου

Σχολιασμός

Στο σχήμα 5.4 αρχικά έχουμε την χωρική κατανομή των κόμβων δηλαδή των πλοίων στον τετραγωνικό χώρο που ορίσαμε (διαστάσεις $30.000 \times 30.000 \text{ m}^2$) στην διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως είναι λογικό κάνοντας χρήση του μοντέλου τυχαίων στάσεων για την κίνηση των πλοίων, τα πλοία τείνουν να περνάνε από το κέντρο του πεδίου. Αυτό αποδεικνύεται και στην προσομοίωση αφού βλέπουμε ότι η χωρική κατανομή έχει μεγαλύτερη τιμή στις θέσεις κοντά στο κέντρο.

Όσον αφορά την ταχύτητα των πλοίων έγινε χρήση της Report ITU-R M.2202 [1] όπου δίνει μία κανονική κατανομή ταχύτητας πλοίων, βάσει μετρήσεων που έγιναν από τις αρχές της Σιγκαπούρης. Στο σχήμα 5.5 φαίνονται ουσιαστικά οι ταχύτητες των πλοίων που και ποιες εμφανίστηκαν περισσότερο στην προσομοίωση. Εδώ να αναφέρουμε ότι εμφανίστηκαν οι μικρές τιμές περισσότερο, γιατί από την κατανομή είχαμε και αρνητικές τιμές στις οποίες πήραμε το μέτρο τους. Παρατηρείται λοιπόν ότι η ταχύτητα των πλοίων κυμάνθηκε από 1-5 m/s.

Αρχικά έγινε χρήση του κατωφλίου -40 dBm, δηλαδή υποθέτουμε ότι ο δέκτης σε κάθε πλοίο έχει ευαισθησία -40 dBm. Αν λοιπόν η ισχύς σήματος του δέκτη είναι παραπάνω από -40 dBm τότε το πλοίο έχει τη δυνατότητα της επικοινωνίας με το πλοίο που εκπέμπει. Το συγκεκριμένο νούμερο με τα ύψη και τα κέρδη των κεραιών, την ισχύ εκπομπής και το μοντέλο απωλειών που υλοποιήθηκε δίνει πολύ μικρή συνδεσιμότητα και αποτυπώνει αδυναμία δημιουργίας ενός πολυβηματικού δικτύου πλέγματος (mesh networks). Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6, η συνδεσιμότητα (connectivity) προσεγγίζει το 0.56451% άρα ουσιαστικά δεν υφίσταται επικοινωνία μεταξύ των 50 πλοίων. Επίσης όπως φαίνεται σε καμία στιγμή της προσομοίωσης δεν πέρασε το 0.7%.

Επιπλέον στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η συνολική πιθανότητα απομόνωσης των κόμβων του δικτύου. Όπως φαίνεται στο σχήμα η πιθανότητα μετά τα 1000 δευτερόλεπτα κυμαίνεται στα 78%-79.5%. Αυτό υποδεικνύει ότι κατά την διάρκεια της προσομοίωσης τα περισσότερα πλοία δεν συνδέονταν με κανένα γειτονικό τους. Άρα με ευαισθησία δέκτη -40dBm και με τις απώλειες με χρήση του σχεδόν ντετερμινιστικού μοντέλου της σύστασης P.1546 της ITU-R και του PEL μοντέλου, δεν υφίσταται επαρκές δίκτυο.

Σενάριο 2

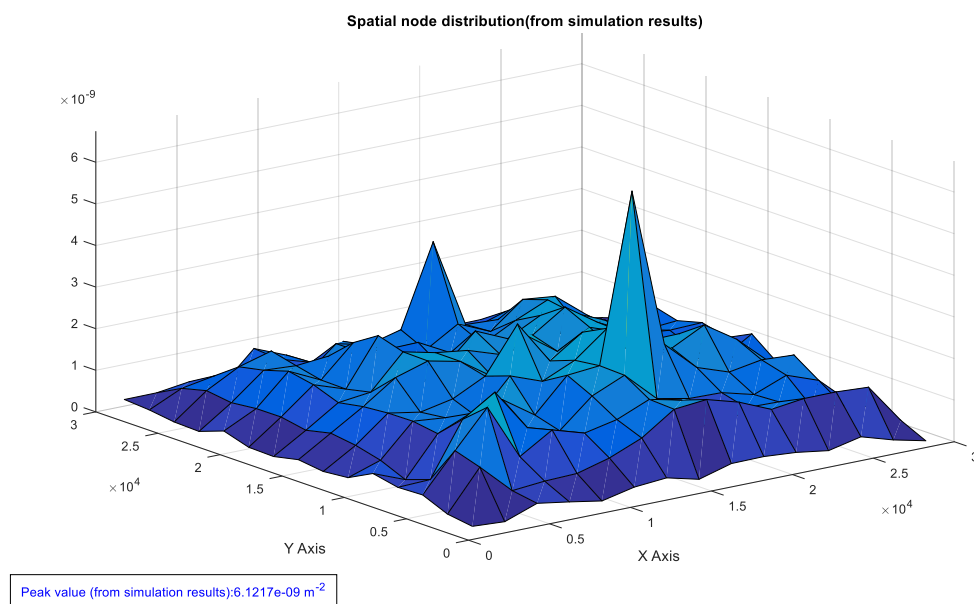
Μοντέλο τυχαίων στάσεων και χρήση quasi μοντέλου.

Παράμετροι

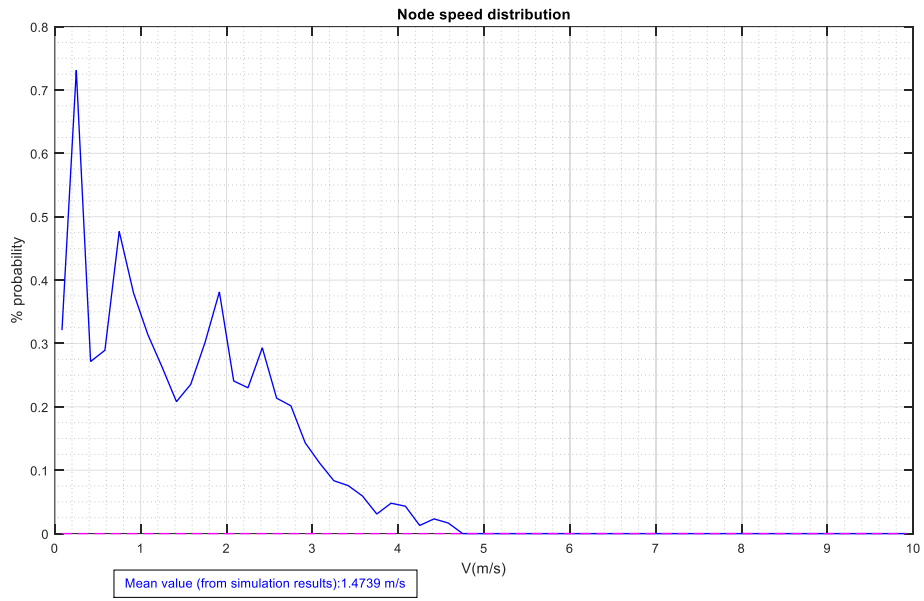
Πίνακας 5.3 παράμετροι δεύτερου σεναρίου

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0 , 30.000] x [0 , 30.000] m^2
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0 , 5] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[0, 10] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100.000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1
Κατώφλι (threshold)	-50 dBm
Συχνότητα (f)	2 GHz
Ύψος κεραίας πομπού (ht)	10 m
Ύψος κεραίας δέκτη (hr)	11.2 m

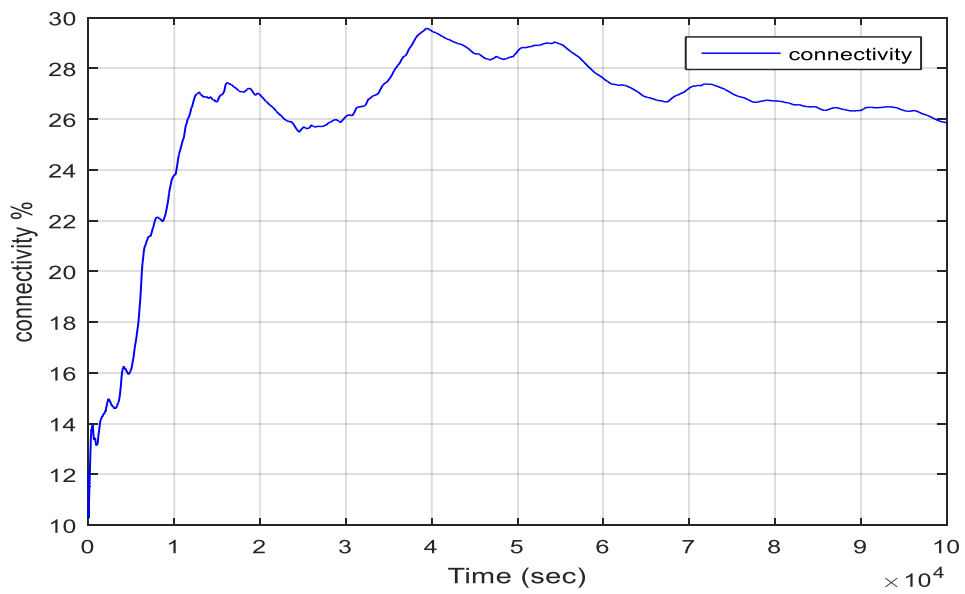
Αποτελέσματα



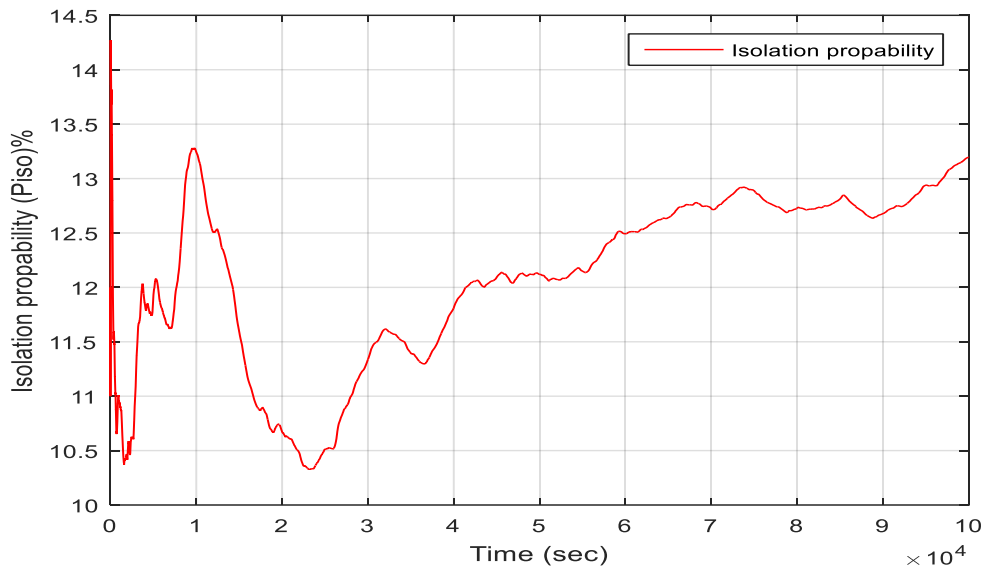
Σχήμα 5.8 Χωρική κατανομή των πλοίων



Σχήμα 5.9 Κατανομή ταχύτητας των πλοίων



Σχήμα 5.10 Καμπύλη συνδεσιμότητας (connectivity)



Σχήμα 5.11 Καμπύλη της πιθανότητας απομόνωσης πλοίου

Σχολιασμός

Στο σχήμα 5.8 και πάλι έχουμε την χωρική κατανομή των πλοίων κατά την προσομοίωση με ανώτατο σημείο στα $6.1217e^{-09} m^{-2}$ περίπου στο κέντρο της προσομοίωσης καθώς έγινε χρήση του μοντέλου τυχαίων στάσεων.

Στο σχήμα 5.9 έγινε χρήση πάλι της πρότασης της Report ITU-R M.2202 για τις ταχύτητες των πλοίων με αποτέλεσμα να έχουμε μία μέση τιμή 1.4749 m/s και γενικότερα να έχουμε ένα εύρος τιμών από 1-5 m/s.

Σε αυτήν την προσομοίωση κάναμε χρήση κατωφλίου -50dBm. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.10 η συνδεσιμότητα κυμαίνεται κάπου ανάμεσα στο 26-27% και καταλήγει στο 25.8561%. Στην αρχή η συνδεσιμότητα είχε μικρές τιμές λόγω της αραιής κατανομής των 50 πλοίων, όμως μετέπειτα εξαιτίας της συγκέντρωσης των πλοίων προς το κέντρο κυρίως, είχαμε καλύτερα αποτελέσματα. Προφανώς βέβαια ένα ποσοστό της τάξης 26-27% δεν είναι γενικά πολύ ικανοποιητικό.

Στο σχήμα 5.11 φαίνεται ότι η πιθανότητα απομόνωσης ενός πλοίου σταθεροποιείται στο εύρος 12.5-13.5% συνολικά. Σε κάποιες στιγμές είχαμε και αποτελέσματα κάτω του 10%, δηλαδή υπήρξαν κάποια διαστήματα που ελάχιστα πλοία απομονώνονταν εντελώς.

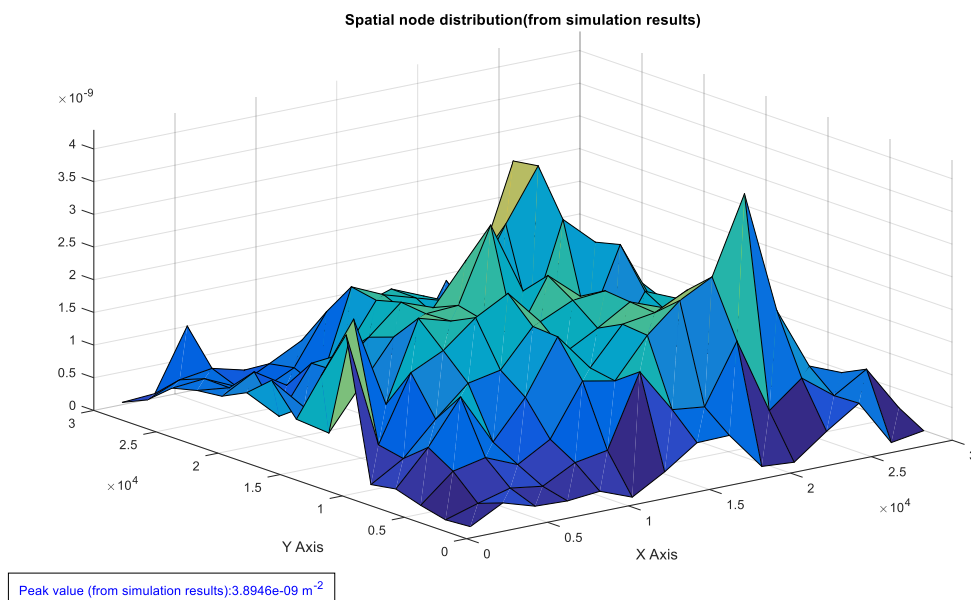
Σενάριο 3

Μοντέλο τυχαίων στάσεων και χρήση του μοντέλου τριών ακτινών (τροπικές περιοχές).

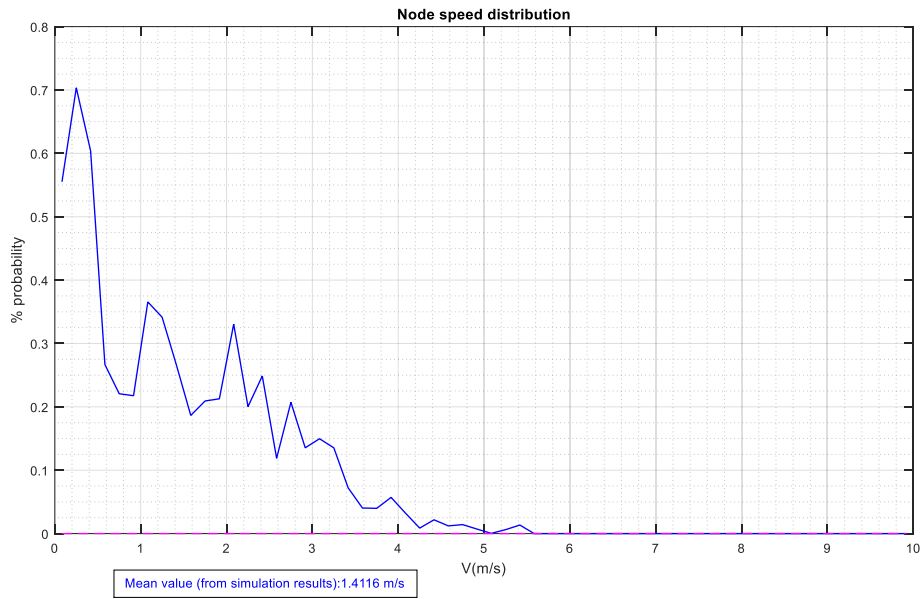
Παράμετροι

Πίνακας 5.4 παράμετροι τρίτου σεναρίου

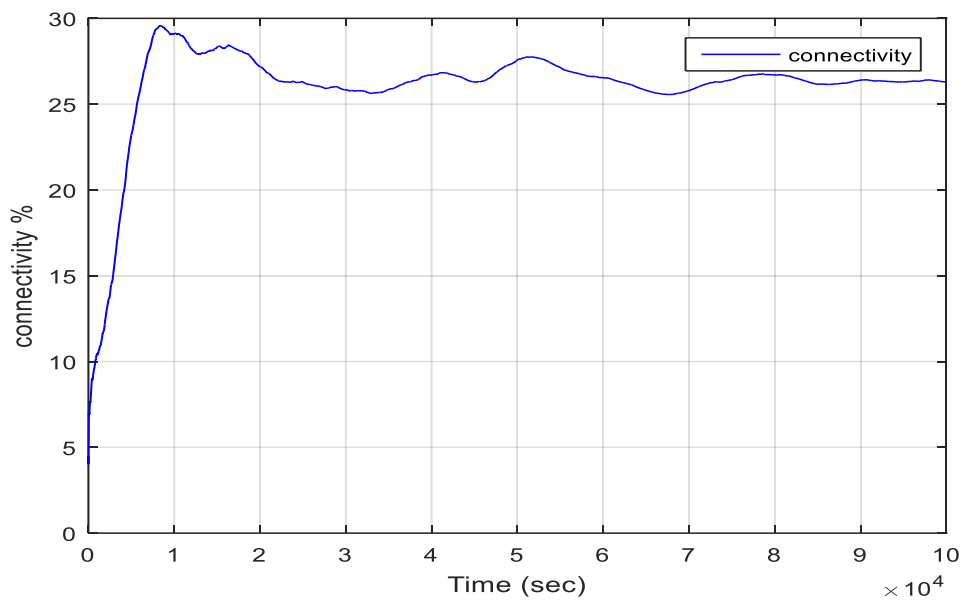
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0 , 30000] x [0 , 30000] m^2
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0 , 5] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[0 , 10] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100.000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1
Κατώφλι (threshold)	-40 dBm
Συχνότητα (f)	2 GHz
Ύψος κεραίας πομπού (ht)	10 m
Ύψος κεραίας δέκτη (hr)	11.2 m

Αποτελέσματα

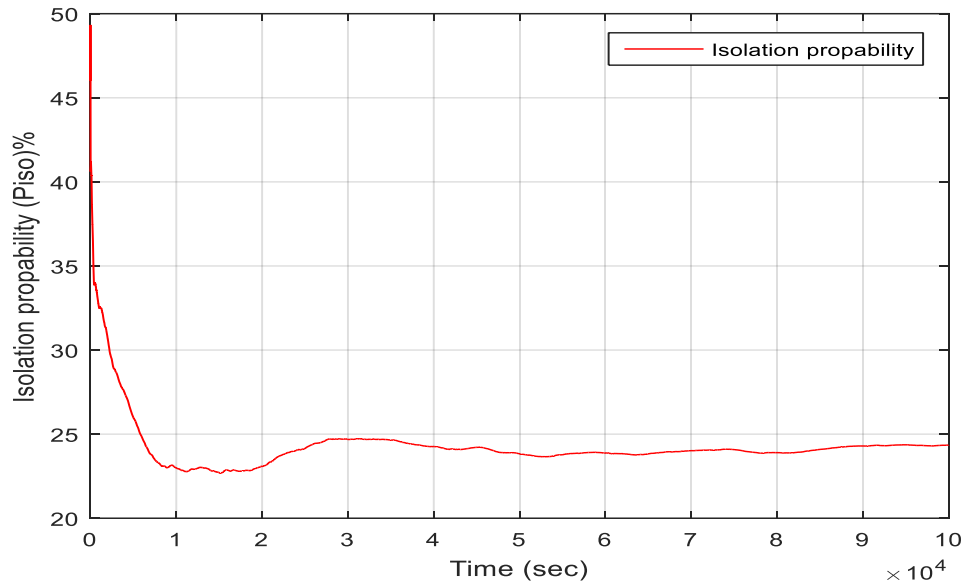
Σχήμα 5.12 Χωρική κατανομή των πλοίων



Σχήμα 5.13 Κατανομή ταχύτητας των πλοίων



Σχήμα 5.14 Καμπύλη συνδεσιμότητα (connectivity)



Σχήμα 5.15 Καμπύλη της πιθανότητας απομόνωσης πλοίου

Σχολιασμός

Στο σχήμα 5.12 βλέπουμε την χωρική κατανομή των πλοίων κατά την προσομοίωση. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση είχαμε μέγιστο $3.8846e-09 \text{ m}^{-2}$ κοντά στο κέντρο. Γενικότερα βέβαια οι εμφανίσεις των πλοίων κατανεμήθηκαν λίγο πιο ομαλά από τις προηγούμενες προσομοιώσεις.

Στο σχήμα 5.13 δεν έχουμε αλλάξει κάτι από τις προηγούμενες προσομοιώσεις και έτσι έχουμε μία περίπου ίδια μέση ταχύτητα 1.4116 m/s .

Τώρα έχουμε κάνει χρήση άλλου μοντέλου απωλειών που ταιριάζει στις τροπικές περιοχές και περιλαμβάνει την επίδραση των υδρατμών. Πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρήθηκε ότι το στρώμα των υδρατμών έχει ύψος 30.5 m που είναι η μέση τιμή του ύψους των μετρήσεων που έχουν γίνει. Το κατώφλι ορίστηκε -40 dBm . Από το σχήμα 5.14 βλέπουμε την συνδεσιμότητα να κυμαίνεται στο εύρος 26-30% και εν τέλει να καταλήγει στο 26.2906%. Βλέπουμε μία βελτίωση κυρίως ως προς τις άλλες μετρήσεις που δεν χρησιμοποιούσαν το μοντέλο που συνάδει στα τροπικά περιβάλλοντα.

Επίσης στο σχήμα 5.15 βλέπουμε την πιθανότητα απομόνωσης να σταθεροποιείται περίπου στο 24.3525%. Η καμπύλη εμφανίζεται ομαλότερη από ότι προηγουμένως.

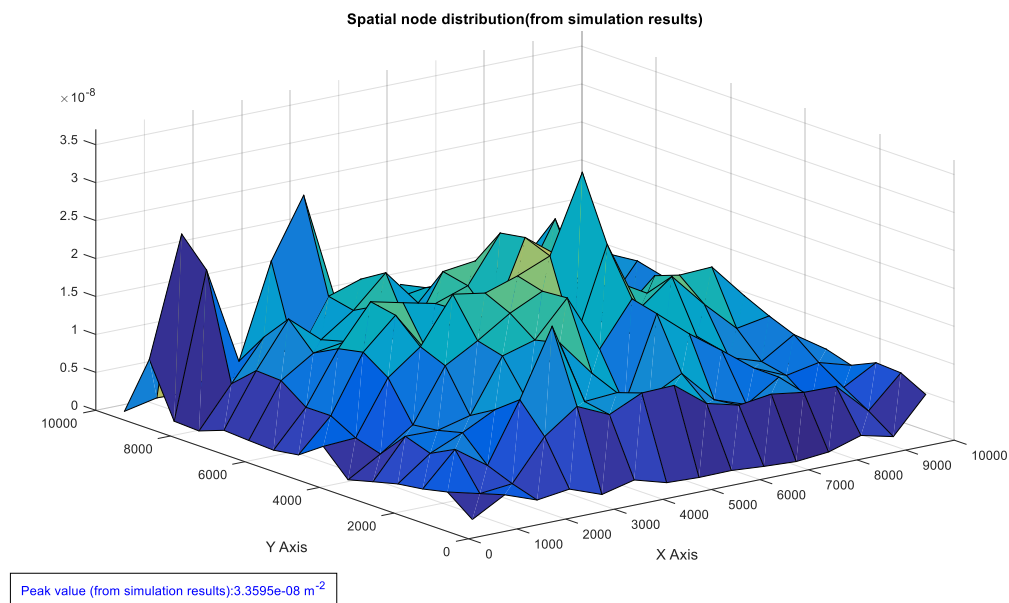
Σενάριο 4

Μοντέλο τυχαίων στάσεων και χρήση τροποποιημένου μοντέλου σε συνδυασμό με το μοντέλο της σύστασης της ITUR-1546 [3]. (5G)

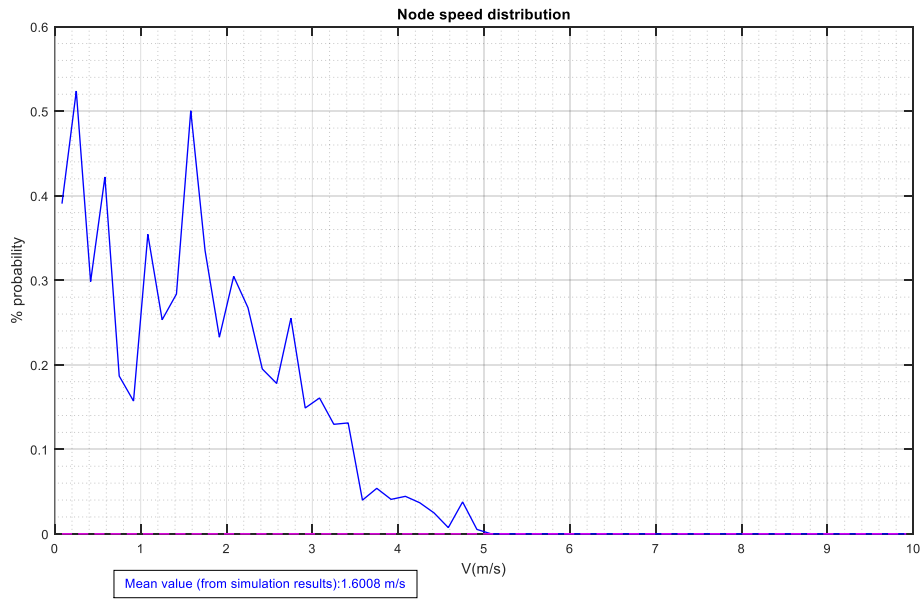
Παράμετροι

Πίνακας 5.5 παράμετροι τέταρτου σεναρίου

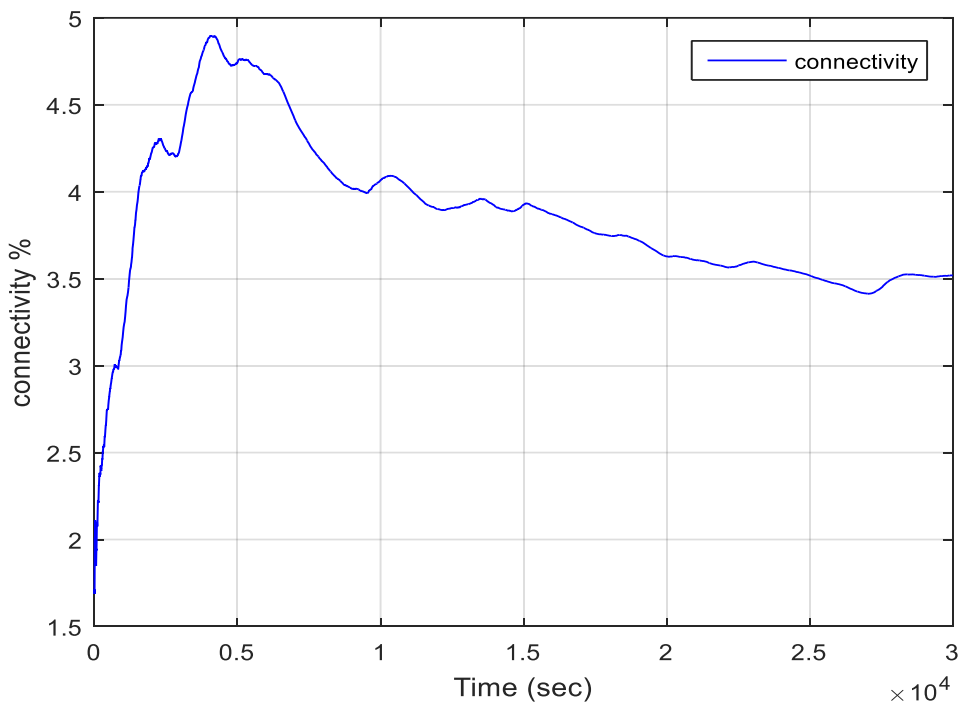
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0 , 10000] x [0 , 10000] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0 , 5] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[0 , 10] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	30.000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1
Κατώφλι (threshold)	-60 dBm
Συχνότητα (f)	35 GHz
Ύψος κεραίας πομπού (ht)	10 m
Ύψος κεραίας δέκτη (hr)	11.2 m

Αποτελέσματα

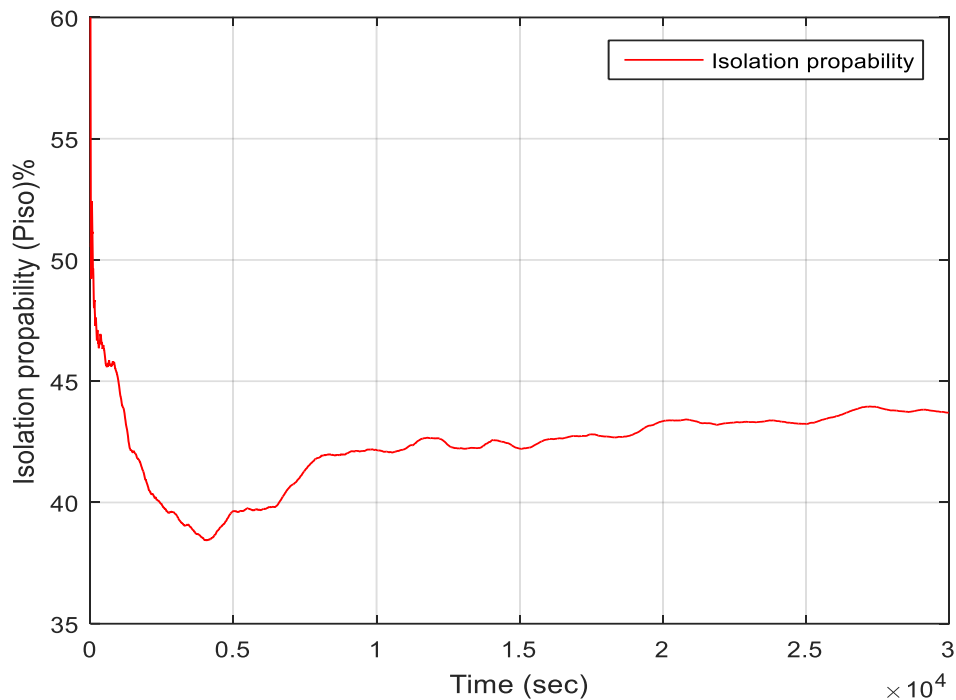
Σχήμα 5.16 Χωρική κατανομή των πλοίων



Σχήμα 5.17 Κατανομή ταχύτητας των πλοίων



Σχήμα 5.18 Καμπύλη συνδεσιμότητα (connectivity)



Σχήμα 5.19 Καμπύλη της πιθανότητας απομόνωσης πλοίου

Σχολιασμός

Στην εικόνα 5.16 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των πλοίων με μέγιστο $3.3595e-08 m^{-2}$. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση βλέπουμε μία κίνηση πλοίων και προς την αριστερή άκρη του τετραγωνικού χωρίου που έχουμε ορίσει, αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι η συγκεκριμένη προσομοίωση ήταν μικρότερη χρονικά.

Επίσης στο σχήμα 5.17 φαίνεται η κατανομή των ταχυτήτων των πλοίων. Η μέση τιμή συγκλίνει στα 1.6m/s ενώ έχουμε εύρος 0.2 - 5 m/s.

Για την συνδεσιμότητα αναλύουμε το σχήμα 5.18. Η τιμή της μετά το πέρας της προσομοίωσης είναι 3.5191% παρ'όλο που έχουμε κατώφλι στα -60dBm και έχουμε μειώσει την κάθε πλευρά της περιοχής που εξετάζουμε σε 10 km.

Όσον αφορά την πιθανότητα απομόνωσης ενός πλοίου μέσω του σχήματος 5.19, διακρίνουμε ότι μετά το πέρας της προσομοίωσης η τιμή της είναι 43.7041 % η οποία είναι ιδιαίτερα υψηλή πράγμα λογικό αφού μιλάμε για επικοινωνία σε συχνότητα 35GHz.

5.2.2 Προσομοιώσεις με χρήση μοντέλου τυχαίας κατεύθυνσης

Σενάριο 5

Μοντέλο τυχαίας κατεύθυνσης και χρήση quasi model[2].

Σενάριο 6

Μοντέλο τυχαίας κατεύθυνσης και χρήση του μοντέλου τριών ακτινών (τροπικές περιοχές).

Σενάριο 7

Μοντέλο τυχαίας κατεύθυνσης και χρήση τροποποιημένου μοντέλου σε συνδυασμό με το μοντέλο της σύστασης της ITUR-1546 [3].

Σενάριο 8

Μοντέλο τυχαίας κατεύθυνσης και χρήση quasi model.

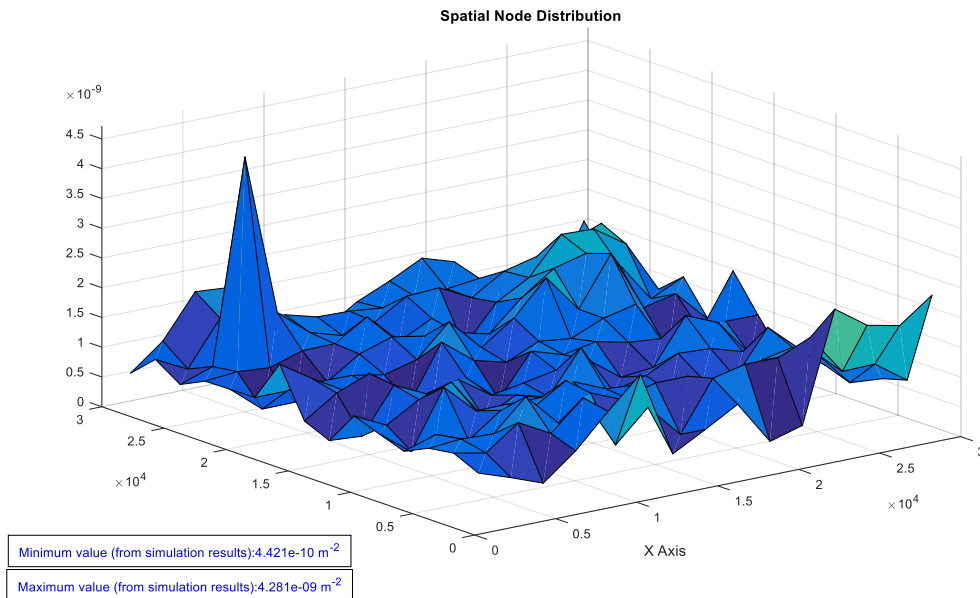
Παράμετροι

Πίνακας 5.6 παράμετροι πέμπτου,έκτου,έβδομου και όγδοου σεναρίου

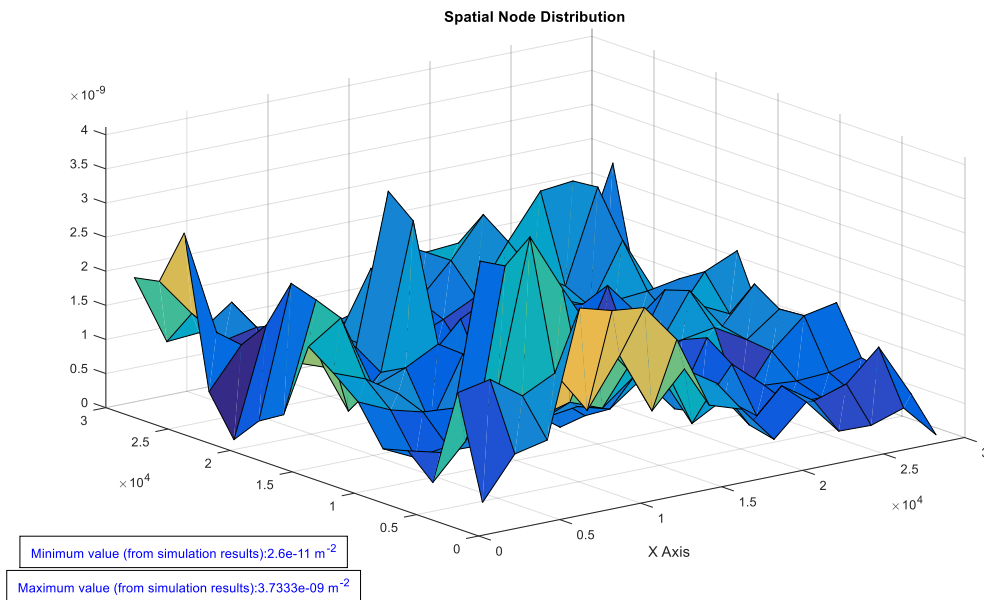
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ 5ης	ΤΙΜΕΣ 6ης	ΤΙΜΕΣ 7ης	ΤΙΜΕΣ 8ης
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 30000] x [0, 30000] m ²	[0, 30000] x [0, 30000] m ²	[0, 10000]x [0, 10000] m ²	[0, 30000]x [0, 30000] m ²
Όρια μήκους διαδρομής [minL, maxL]	[0, 42426] m	[0, 42426] m	[0, 14142] m	[0,42426]m
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[0,10] m/s	[0,10] m/s	[0,10] m/s	[0,10] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50	50	50	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100.000s	30.000s	30.000s	30.000s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1	1	1	1
Κατώφλι (threshold)	-60 dBm	-45 dBm	-60 dBm	-60dBm
Συχνότητα (f)	2 GHz	2 GHz	35 GHz	5.15GHz
Ύψος κεραίας πομπού (ht)	10 m	10 m	10 m	10 m
Ύψος κεραίας δέκτη (hr)	11.2 m	11.2 m	11.2 m	11.2 m

Αποτελέσματα

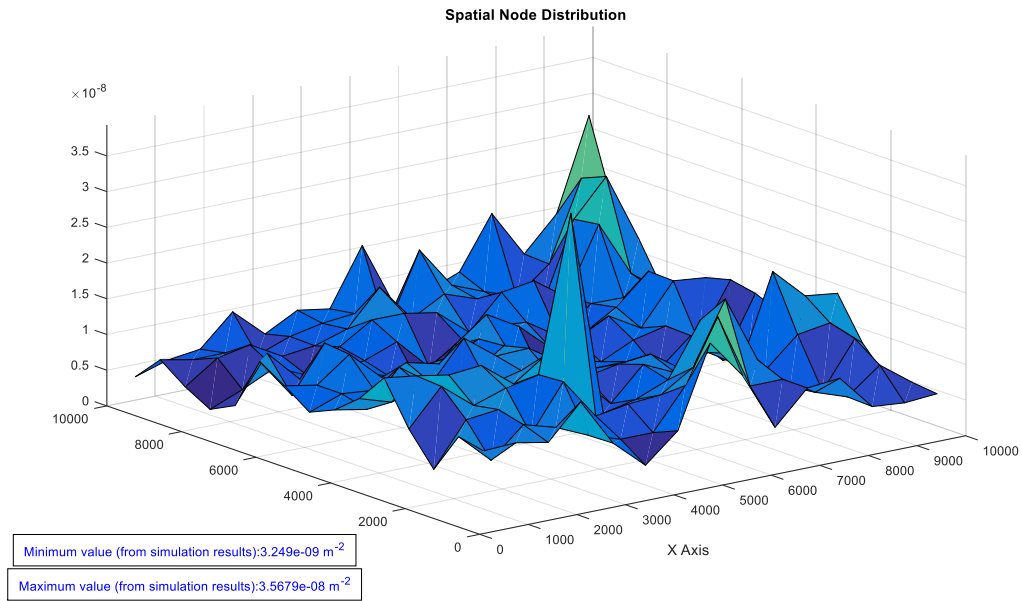
Χωρικές κατανομές πλοίων



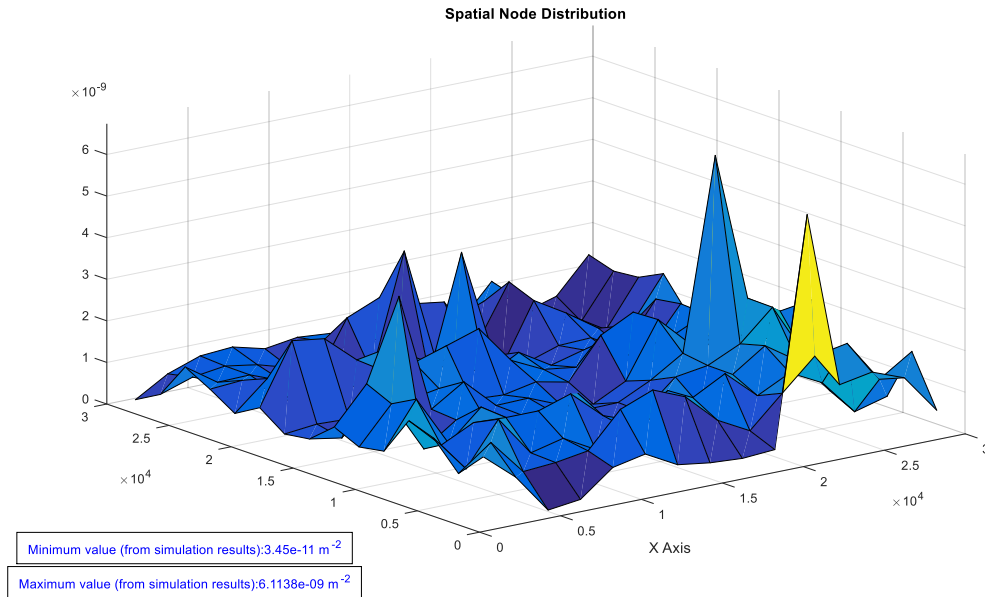
Σχήμα 5.20 Χωρική κατανομή των πλοίων (5^{ης} προσομοίωσης)



Σχήμα 5.21 Χωρική κατανομή των πλοίων (6^{ης} προσομοίωσης)



Σχήμα 5.22 Χωρική κατανομή των πλοίων (7^{ης} προσομοίωσης)

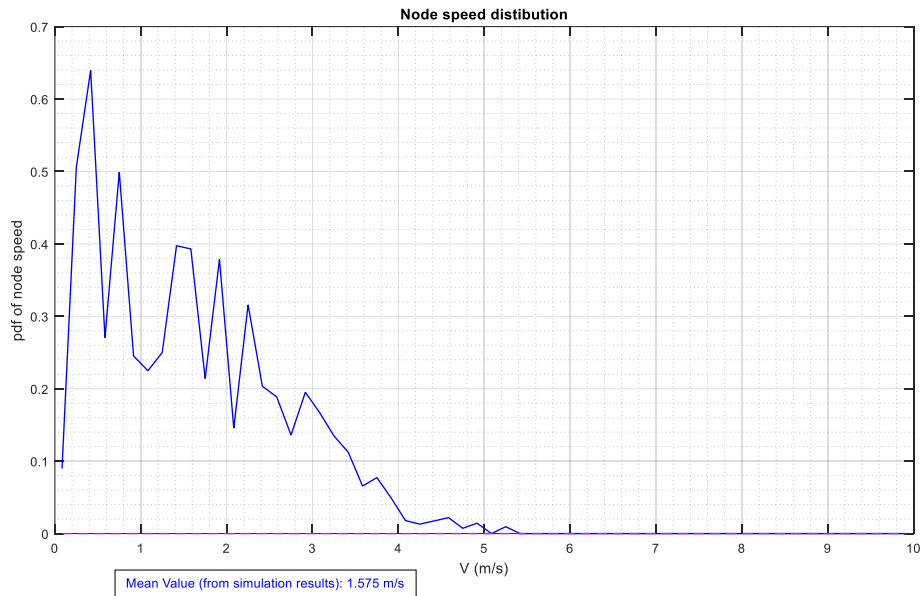


Σχήμα 5.23 Χωρική κατανομή των πλοίων (8^{ης} προσομοίωσης)

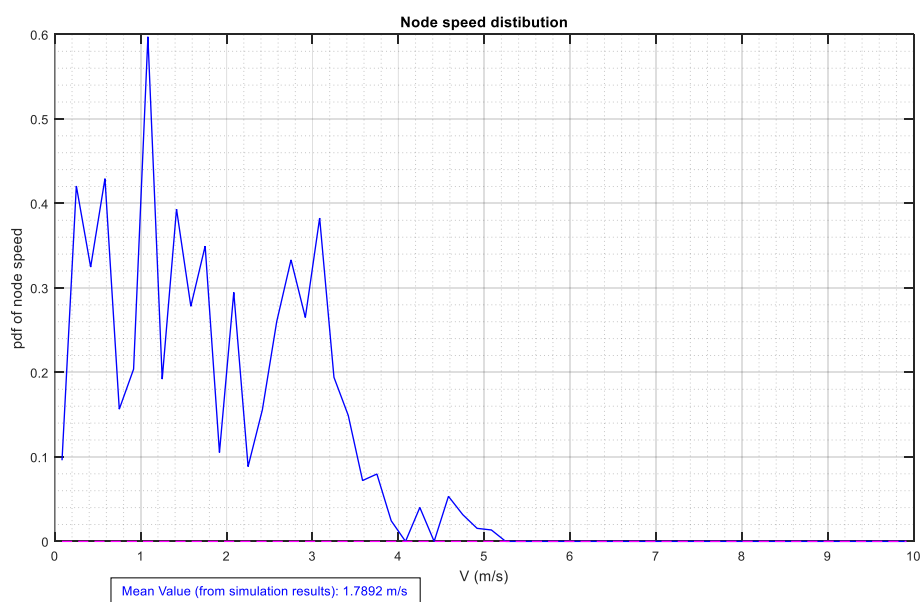
Σχολιασμός

Στα σχήματα 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 παρουσιάζονται οι χωρικές κατανομές των πλοίων των τελευταίων τεσσάρων σεναρίων (προσομοιώσεων). Το κοινό χαρακτηριστικό των τεσσάρων σχημάτων είναι ότι πλέον λόγω της χρήσης του μοντέλου κινητικότητας τυχαίας κατεύθυνσης δεν έχουμε την συγκέντρωση των πλοίων στο κέντρο της εξεταζόμενης περιοχής, αλλά μία πιο ομαλή κατανομή των πλοίων στο χώρο. Τα μέγιστα είναι αντίστοιχα $4.281e-09$, $3.7333e-09$, $3.5679e-08$ και $6.1138e-09 \text{ m}^{-2}$.

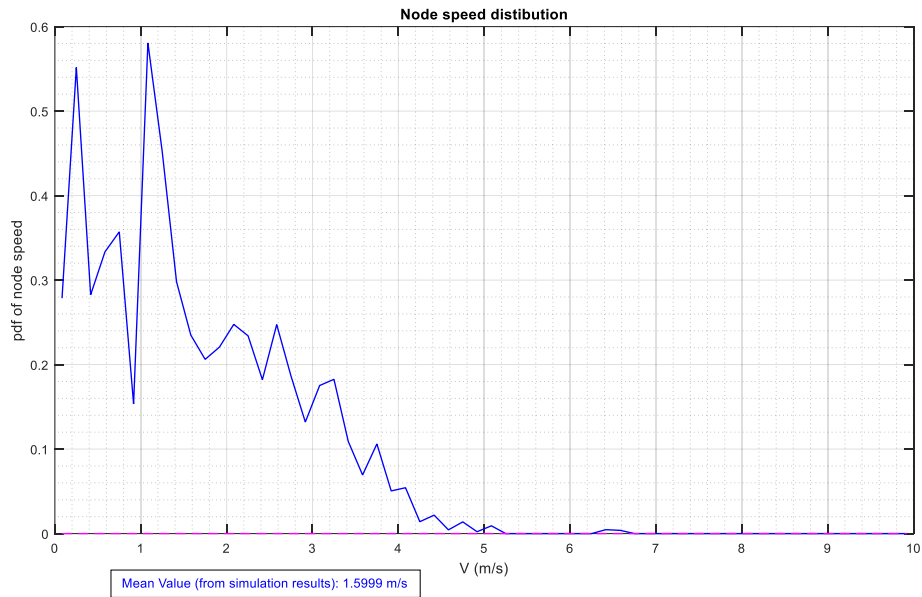
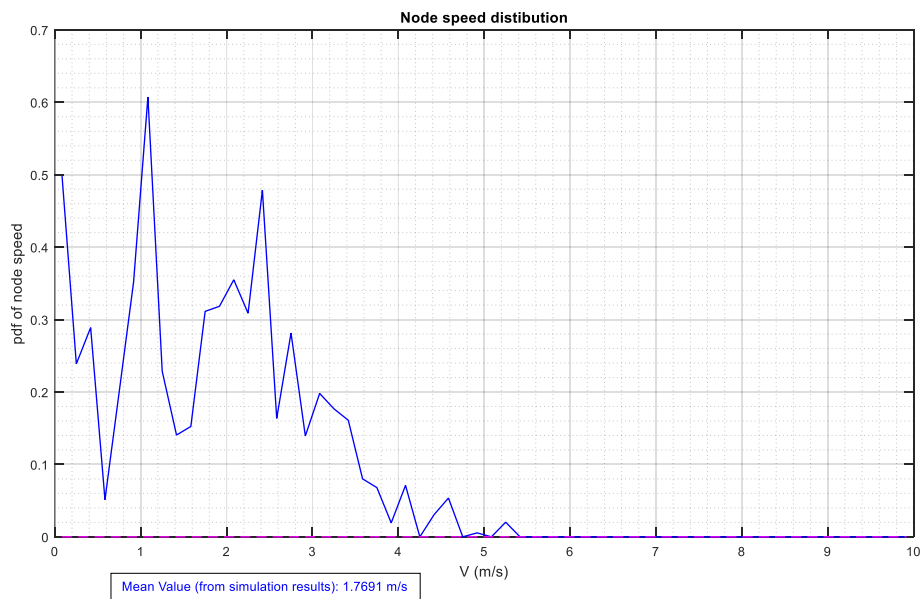
Κατανομές ταχύτητας πλοίων



Σχήμα 5.24 Κατανομή ταχύτητας των πλοίων (5^{ης} προσομοίωσης)



Σχήμα 5.25 Κατανομή ταχύτητας των πλοίων (6^{ης} προσομοίωσης)

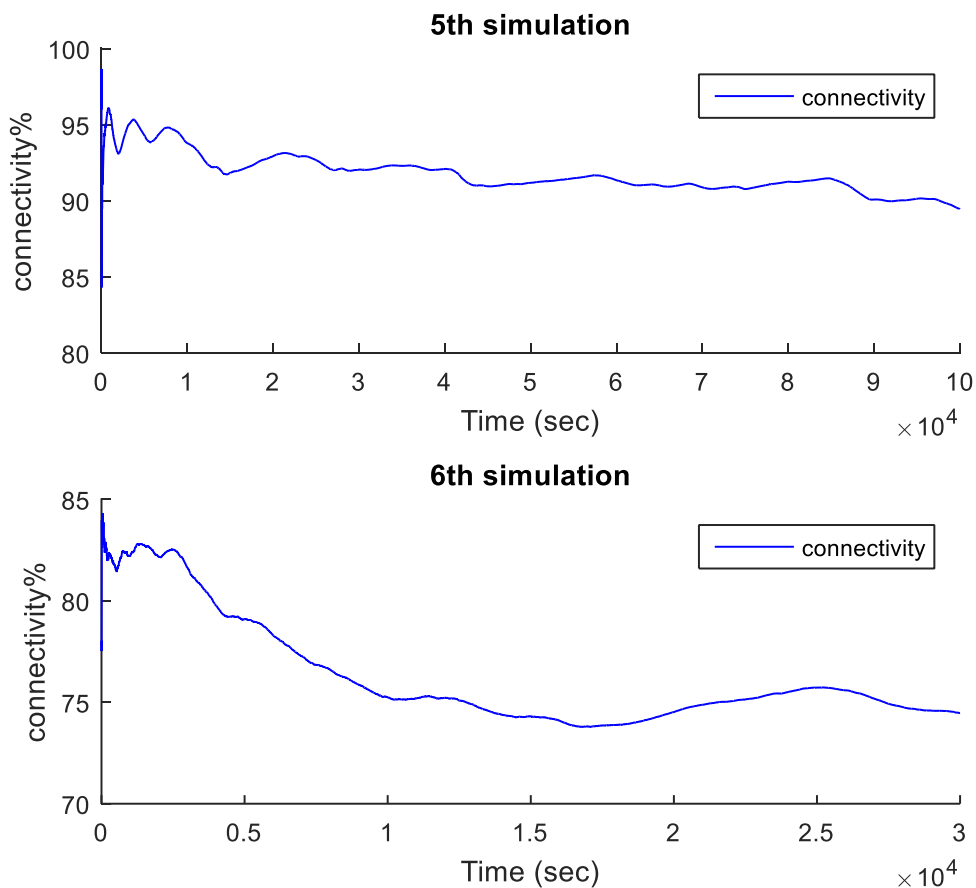
Σχήμα 5.26 Κατανομή ταχύτητας των πλοίων (7^{ης} προσομοίωσης)Σχήμα 5.27 Κατανομή ταχύτητας των πλοίων (8^{ης} προσομοίωσης)

Σχολιασμός

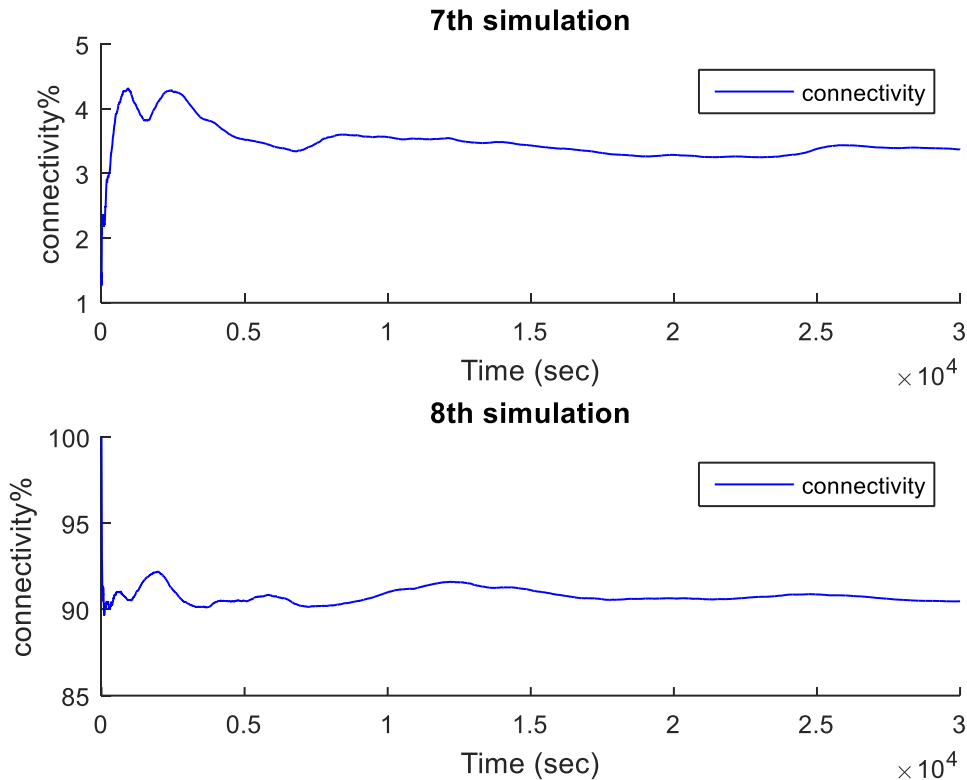
Στα σχήματα 5.24-5.27 έχουμε τις κατανομές των ταχυτήτων των τεσσάρων τελευταίων προσομοιώσεων. Διακρίνουμε ότι το εύρος ταχυτήτων είναι από 0.3 – 5 m/s με μία τάση να εμφανίζονται περισσότερο οι τιμές κάτω των 2m/s, για αυτό το λόγο οι μέση τιμή κάθε προσομοίωσης είναι 1.575m/s , 1.7892m/s , 1.5999m/s και

1.7691m/s αντίστοιχα για την πέμπτη, την έκτη, την έβδομη και την όγδοη προσομοίωση. Αυτό όπως εξηγήθηκε οφείλεται στην κατανομή που χρησιμοποιήθηκε και στην επιλογή να πάρουμε το μέτρο των μικρών αρνητικών ταχυτήτων που εμφανίστηκαν.

Καμπύλες συνδεσιμότητας



Σχήμα 5.28 Καμπύλες συνδεσιμότητας (connectivity) (5^{ης} και 6^{ης} προσομοίωσης)

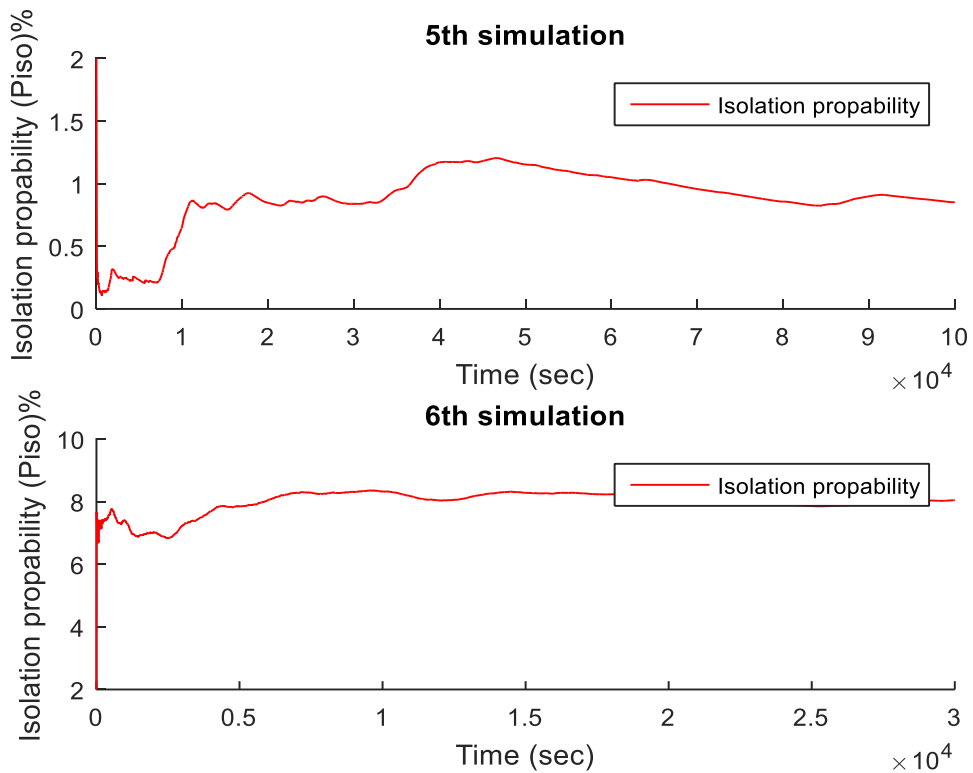


Σχήμα 5.29 Καμπύλες συνδεσιμότητας (connectivity) (7^{ης} και 8^{ης} προσομοίωσης)

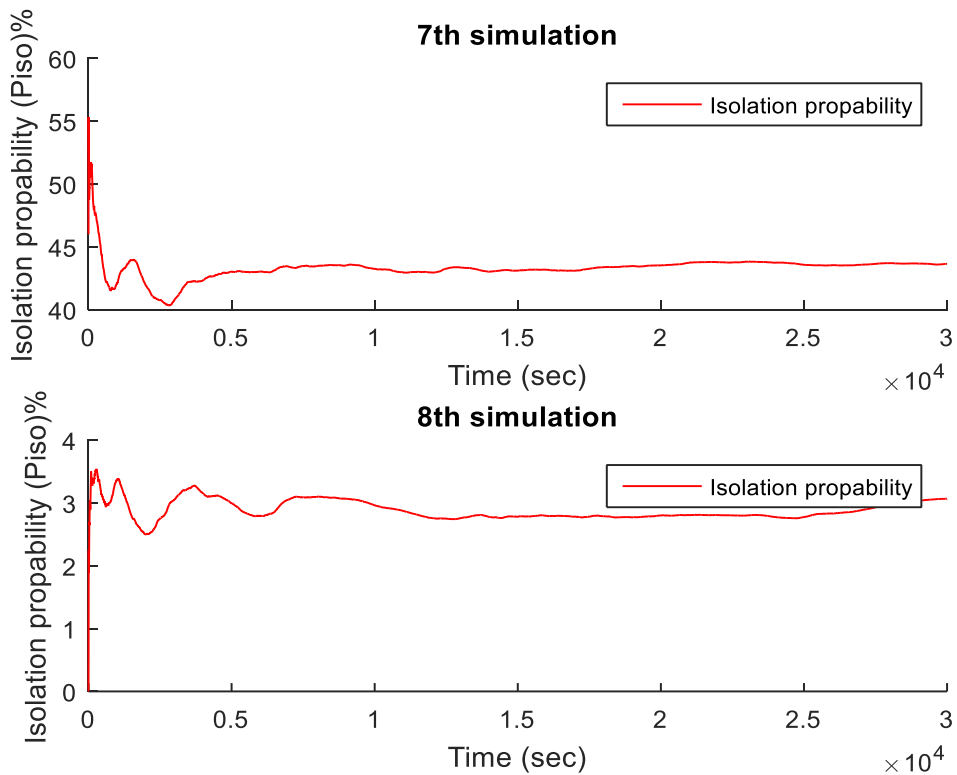
Σχολιασμός

Στα σχήματα 5.28 , 5.29 παρατηρούμε τις καμπύλες συνδεσιμότητας των προσομοιώσεων που έγιναν με χρήση του μοντέλου κινητικότητας τυχαίας κατεύθυνσης. Στην πέμπτη προσομοίωση η συνδεσιμότητα αγγίζει το 89.467% έχοντας υποθέσει ότι είμαστε σε περιοχή με εύκρατο κλίμα, με κατώφλι στα -60dBm στα 2GHz. Άρα με αυτές τις παραμέτρους για 50 πλοία φαίνεται ότι μπορούμε να έχουμε ένα αρκετά καλό δίκτυο. Τώρα όσον αφορά την έκτη προσομοίωση, το κατώφλι ορίστηκε στα -45dBm και εφαρμόσαμε το μοντέλο απωλειών για τις τροπικές περιοχές στα 2GHz. Η συνδεσιμότητα άγγιξε το 74.4636% παρά το γεγονός ότι είχαμε 15dBm διαφορά από την προηγούμενη προσομοίωση, καταδεικνύοντας για άλλη μια φορά ότι στις τροπικές περιοχές το σήμα κυματοδηγείται και μειώνονται οι απώλειες. Στο σχήμα 5.29 έχουμε την έβδομη προσομοίωση στην οποία μειώσαμε την εξεταζόμενη περιοχή σε 10km, ορίσαμε το κατώφλι στα -60dBm και ανεβάσαμε την συχνότητα στα 35GHz. Το αποτέλεσμα ήταν η συνδεσιμότητα μετά το πέρας της προσομοίωσης να έχει την τιμή 3.3706% και σε όλη την διάρκεια να έχουμε μικρές τιμές της. Τέλος στην όγδοη προσομοίωση είχαμε κατώφλι -60dBm, θεωρήσαμε εύκρατη περιοχή στα 5GHz και επιτεύχθηκε συνδεσιμότητα 90.4699%.

Καμπύλες πιθανότητας απομόνωσης πλοίου



Σχήμα 5.30 Καμπύλες πιθανότητας απομόνωσης πλοίου(5^{ης} και 6^{ης} προσομοίωσης)



Σχήμα 5.31 Καμπύλες πιθανότητας απομόνωσης πλοίου(7^{ης} και 8^{ης} προσομοίωσης)

Σχολιασμός

Στα σχήματα 5.30, 5.31 παρουσιάζονται οι καμπύλες της πιθανότητας απομόνωσης των πλοίων στις τελευταίες τέσσερις προσομοιώσεις. Στην πέμπτη προσομοίωση έχω 0.85138 % πολύ λογικό αφού η συνδεσιμότητα είναι σε υψηλά επίπεδα. Στην έκτη προσομοίωση η τιμή της πιθανότητας προσεγγίζει το 8.0479 % ενώ στην έβδομη το 43.6481 % που είναι απόλυτα λογικό αφού στα 35GHz οι απώλειες είναι τεράστιες. Τέλος στην όγδοη βλέπουμε ότι στα 5GHz έχουμε $P(iso)=3.0656$ % άρα τα πλοία που έμειναν για λίγο αποκομμένα ήταν ελάχιστα με το συγκεκριμένο κατώφλι.

5.3 Συμπεράσματα προσομοιώσεων

Στην παράγραφο αυτή, σκοπός είναι να παρουσιαστούν συγκεντρωτικά τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα διαφορετικά σενάρια προσομοιώσεων.

- Για το σχεδόν ντετερμινιστικό συνδυαστικό μοντέλο που συνδυάζει το μοντέλο PEL και τις εμπειρικές μετρήσεις που προκύπτουν από την σύσταση της ITU-R P.1546-2 μπορούμε να εξάγουμε κάποια σημαντικά συμπεράσματα. Αρχικά για να έχουμε ένα ικανοποιητικό πολυβηματικό δίκτυο στα 2GHz ο δέκτης του πλοίου πρέπει να έχει ευαισθησία περίπου στα -60 dBm, όπου στις προσομοιώσεις η συνδεσιμότητα αγγίζει το 90% και η πιθανότητα απομόνωσης κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές. Το μοντέλο αυτό όμως έχει και δύο περιορισμούς αφού οι μετρήσεις που έχουν γίνει αφορούν περιοχές με εύκρατο κλίμα και λειτουργεί με μεγάλη ακρίβεια μέχρι τα 3GHz. Όταν ανεβήκαμε συχνότητα στα 5GHz παρατηρήσαμε ότι πάλι με -60dBm έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα παρ' όλο που είχαμε μία λογική αύξηση της πιθανότητας απομόνωσης. Η αύξηση δεν ήταν πολύ μεγάλη, ούτε η μείωση της συνδεσιμότητας, και αυτό οφείλεται και στον περιορισμό που προαναφέραμε, αφού οι απώλειες στις μακρινές αποστάσεις θεωρήθηκαν λίγο μικρότερες από αυτές που έπρεπε. Αυτά βέβαια όσον αφορά περιοχές με εύκρατο κλίμα.
- Για το μοντέλο τριών ακτινών που περιλαμβάνει την επίδραση των υδρατμών και άρα χρησιμοποιείται για την προσομοίωση τροπικών περιοχών έχουμε τα εξής συμπεράσματα. Αρχικά το πιο σημαντικό αποτέλεσμα είναι ότι στις τροπικές περιοχές έχουμε μικρότερες απώλειες. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι με αυτό το μοντέλο και τις ίδιες παραμέτρους έχουμε καλύτερα αποτελέσματα στην συνδεσιμότητα. Εδώ βέβαια οι μεταδόσεις θεωρητικά έγιναν στα 2GHz, που είναι κάτω από το όριο των 10GHz. Αυτό έχει σημασία γιατί στις συχνότητες πάνω από 10GHz πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η

επίδραση του πολύ βροχερού κλίματος που επικρατεί στις περιοχές αυτές. Επίσης το μοντέλο έδειξε το φαινόμενο της κυματοδήγησης του σήματος με αποτέλεσμα σε ευαισθησίες της τάξης των -60dBm του δέκτη να έχουμε εξαιρετικά αποτελέσματα, με διάδοση του σήματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τις εύκρατες περιοχές.

- Για το τροποποιημένο μοντέλο σε συνδυασμό με το μοντέλο της σύστασης της ITUR-1546 προέκυψαν σημαντικά αποτελέσματα. Στις παραμέτρους των προηγούμενων μοντέλων ,δηλαδή -60dBm κατώφλι, μειώνοντας τις αποστάσεις των πλοίων περίπου στο ένα τρίτο, το μοντέλο έδειξε τεράστιες απώλειες και αδυναμία σύνδεσης των πλοίων αφού η συνδεσιμότητα κυμάνθηκε στο 4% και η πιθανότητα στο 43%. Οι προσομοιώσεις έγιναν στα 35GHz αφού το μοντέλο έχει υλοποιηθεί να προσεγγίζει τις απώλειες στις υψηλές συχνότητες (5G). Άρα για τη χρήση τέτοιων συχνοτήτων θέλουμε πολύ μεγάλη πυκνότητα πλοίων σε μικρές αποστάσεις. Επιπλέον το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε κοντινές αποστάσεις. Το μειονέκτημα του είναι ότι σε πολύ μεγάλες αποστάσεις υποτιμά τις απώλειες, όπως έδειξαν οι προσομοιώσεις.
- Το μοντέλο κινητικότητας τυχαίας κατεύθυνσης είναι καταλληλότερο μοντέλο για την κίνηση και την χωρική κατανομή των πλοίων από ότι το μοντέλο τυχαίων στάσεων. Κυρίως η διαφορά εντοπίζεται στην τάση του μοντέλου τυχαίων στάσεων να οδηγεί τα πλοία στο κέντρο της προσομοίωσης, πράγμα που δεν συμβαδίζει με την πραγματική κίνηση των πλοίων, αλλά και στις μικρές παύσεις που κάνει που δεν εντοπίζονται στην κίνηση των πλοίων.

BIBLIOΓΡΑΦΙΑ

- [1] Report ITU-R M.2202, "Maritime broadband wireless mesh networks".
- [2] Kun Yang, Ekman, T., Roste, T., Bekkadal, F., "A quasi-deterministic path-loss propagation model for the open sea environment," 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), pp.1,5, 3-7 Oct. 2011.
- [3] Niloofar Mehrnia ,Mehmet Kemal Ozdemir , "Novel Maritime Channel Models for Millimeter Radiowaves",IEEE Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2016 24th International Conference.
- [4] J. F. C. Kingman, Poisson Processes, Oxford University Press, 1993

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1 Πιθανές μελλοντικές έρευνες

Όπως είδαμε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, έγινε μία προσπάθεια να υλοποιηθούν κάποια σενάρια επικοινωνίας μεταξύ πλοίων, με τη χρήση διαφορετικών μοντέλων απωλειών ικανών να αποσαφηνίσουν τα φαινόμενα του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Κάποιες ίσως μελλοντικές έρευνες που θα βοηθούσαν τις θαλάσσιες επικοινωνίες είναι οι εξής:

- Περισσότερες πραγματικές μετρήσεις πεδίου σε θάλασσες σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, καθώς επίσης και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (να ληφθεί υπόψη η παράμετρος της εποχής ή του μήνα) ώστε να αποκτήσουμε καλύτερη και πληρέστερη εικόνα για τις ιδιαιτερότητες των επικοινωνιών πάνω σε αυτές.
- Περισσότερες μετρήσεις και έρευνες πάνω από την συχνότητα των 2 GHz ώστε να δούμε εάν έχουμε την δυνατότητα της χρησιμοποίησης του εν λόγω φάσματος. Αυτό ισχύει και τις συχνότητες του 5G (35GHz και 94GHz).
- Μελέτη και στοχαστικά μοντέλα κίνησης των πλοίων και στατιστικές κατανομές των ταχυτήτων των πλοίων και στον τρόπο που κινούνται. Ουσιαστικά δεν υπάρχει ρεαλιστικό μοντέλο κινητικότητας για τα πλοία, πράγμα που μειώνει την ακρίβεια των τωρινών προσομοιώσεων. Τα πρώτα αποτελέσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι όμως αξιόπιστα.
- Υλοποίηση της κίνησης του πλοίου λόγω θαλάσσιων κυμάτων. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 η κίνηση που μας ενδιαφέρει είναι εκείνη στον άξονα z. Άρα υπάρχει η ανάγκη εύρεσης μοντέλου που να περιλαμβάνει τις απώλειες του σήματος εξαιτίας της ταραγμένης θαλάσσιας επιφάνειας.
- Επίσης υπάρχει ανάγκη δημιουργίας μοντέλου απωλειών που να συνδυάζει και την σκέδαση της ανακλώμενης ακτίνας πάνω στην ταραγμένη θαλάσσια επιφάνεια, λαμβάνοντας υπόψη και τις θαλάσσιες καταστάσεις που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.
- Μετρήσεις σε τροπικές περιοχές σε συχνότητα πάνω από 10GHz ώστε να μετρηθεί και η επίδραση των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (π.χ. βροχή).