



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ
ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ
ΝΑΥΣΙΠΛΟΪΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ**

ΜΑΡΙΑ ΚΟΥΛΤΟΥΚΗ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

ΔΡ. ΘΕΟΦΙΛΟΣ ΧΡΥΣΙΚΟΣ

ΔΙΔΑΣΚΩΝ – ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Λαμία 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

STUDY OF BROADBAND DESIGN FOR THE
INTERNET OF THINGS IN MARITIME
COMMUNICATIONS

MARIA KOULTOUKI

FINAL THESIS

ADVISOR

DR. THEOFILOS CHRYSIKOS

TUTOR – ASSOCIATE UNIVERSITY OF THESSALY

Lamia 2023

«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.

2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.

3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια

4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: 06/03/2023

Ο – Η Δηλ.

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το θαλάσσιο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) αναφέρεται στη χρήση συνδεδεμένων συσκευών και αισθητήρων σε πλοία και άλλα θαλάσσια περιουσιακά στοιχεία για τη συλλογή, μετάδοση και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, της ασφάλειας και της βιωσιμότητας των ναυτιλιακών επιχειρήσεων.

Ορισμένα παραδείγματα εφαρμογών του ναυτιλιακού IoT περιλαμβάνουν:

Παρακολούθηση της κατάστασης: Αισθητήρες IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της κατάστασης κρίσιμου εξοπλισμού σε ένα πλοίο, όπως μηχανές και γεννήτριες. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό πιθανών βλαβών πριν από την εμφάνισή τους, επιτρέποντας την προληπτική συντήρηση.

Παρακολούθηση φορτίου: Οι αισθητήρες IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της θέσης και της κατάστασης του φορτίου καθώς αυτό κινείται μέσω της αλυσίδας εφοδιασμού. Αυτό μπορεί να βελτιώσει την ορατότητα και να μειώσει τον κίνδυνο κλοπής ή καταστροφής του φορτίου.

Περιβαλλοντική παρακολούθηση: Οι αισθητήρες IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία της θάλασσας, ο καιρός και η ποιότητα του νερού. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση των ναυτιλιακών διαδρομών και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των θαλάσσιων εργασιών.

Παρακολούθηση σκαφών: Οι αισθητήρες IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της θέσης και της κίνησης των πλοίων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό μπορεί να βελτιώσει την ασφάλεια, επιτρέποντας τον καλύτερο συντονισμό της κυκλοφορίας σε πολυσύχναστες πλωτές οδούς.

Συνολικά, το ναυτιλιακό IoT έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στον τρόπο λειτουργίας της ναυτιλιακής βιομηχανίας, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα.

Το πρώτο κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας πραγματοποιεί μία εισαγωγή στο θαλάσσιο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Τα κεφάλαια 2 και 3 εστιάζουν στους μηχανισμούς ράδιο-διάδοσης και στα μοντέλα πρόβλεψης απωλειών διαδρομής με βάση αυτούς τους μηχανισμούς ράδιο-διάδοσης. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρέχουμε προσομοιώσεις MATLAB και καταλήγουμε σε σημαντικά ποσοτικά και ποιοτικά ευρήματα για τον ευρυζωνικό σχεδιασμό υλοποίησης του θαλάσσιου Διαδικτύου των Πραγμάτων με χρήση υποδομής επίγειου μικροκυματικού 5G.

ABSTRACT

The maritime Internet of Things (IoT) refers to the use of connected devices and sensors on ships and other marine assets to collect, transmit and analyze data in real time. This data can be used to improve the efficiency, safety and sustainability of maritime operations.

Some examples of maritime IoT applications include:

Condition monitoring: IoT sensors can be used to monitor the status of critical equipment on a ship, such as engines and generators. This data can be used to identify potential failures before they occur, allowing for preventative maintenance.

Cargo monitoring: IoT sensors can be used to monitor the location and status of cargo as it moves through the supply chain. This can improve visibility and reduce the risk of cargo theft or damage.

Environmental monitoring: IoT sensors can be used to monitor environmental conditions such as sea temperature, weather and water quality. This data can be used to optimize shipping routes and reduce the environmental impact of maritime operations.

Vessel monitoring: IoT sensors can be used to monitor the position and movement of ships in real time. This can improve safety by allowing better coordination of traffic on busy waterways.

Overall, maritime IoT has the potential to revolutionize the way the shipping industry operates, improving efficiency, safety and sustainability.

The first chapter of the thesis provides an introduction to the maritime IoT. Chapters 2 and 3 focus on radio propagation mechanisms and path loss prediction models based on these radio propagation mechanisms. In Chapter 4, we provide MATLAB simulations and conclude significant quantitative and qualitative findings for the broadband implementation planning of the maritime Internet of Things using 5G microwave terrestrial infrastructure.

Table of Contents

<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>	i
<u>ABSTRACT</u>	ii
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u>	1
Εισαγωγή.....	1
1.1 Το ναυτιλιακό τοπίο IoT την επόμενη δεκαετία.....	1
(Ενότητα 1.1).....	1
1.2 Ορατότητα εν πλω.....	2
(Ενότητα 1.2).....	2
1.3 Από την ορατότητα στη λήψη έξυπνων αποφάσεων.....	4
(Ενότητα 1.3).....	4
(Ενότητα 1.4).....	5
(Ενότητα 1.5).....	7
(Ενότητα 1.6).....	9
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u>	11
(Εισαγωγή).....	11
(Ενότητα 2.1).....	13
(Ενότητα 2.2).....	18
(Ενότητα 2.3).....	23
(Ενότητα 2.4).....	26
(Ενότητα 2.5.1) Πρόκληση ενεργειακής απόδοσης για το θαλάσσιο σύστημα IoT	34
(Ενότητα 2.5.2) Ταυτόχρονος σχεδιασμός υλικού κεραίας και συστήματος	36
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u>	41
(Ενότητα 3.1).....	41
(Ενότητα 3.2).....	41
(Ενότητα 3.2.1).....	41
(Ενότητα 3.2.2).....	42
(Ενότητα 3.2.3).....	43
(Ενότητα 3.3).....	44
(Ενότητα 3.4).....	46
(Ενότητα 3.5).....	49
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>	52
(Ενότητα 4.1).....	52
<u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Το ναυτιλιακό τοπίο IoT την επόμενη δεκαετία

(Ενότητα 1.1)

Η ναυτιλιακή βιομηχανία εξελίσσεται. Τα πιο έξυπνα πλοία, η έξυπνη παρακολούθηση φορτίου, η αυτοματοποίηση και ένα πλήθος περιθωριακών τεχνολογιών αρχίζουν να επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο δραστηριοποιούνται οι πλοιοκτήτες. Όλα αυτά θα ενωθούν για να διαμορφώσουν νέα πρότυπα κατά την επόμενη δεκαετία [1.1].

Πολλές από αυτές τις νέες ψηφιακές λύσεις, οι οποίες κυμαίνονται από τις λέξεις "big data" και "blockchain" μέχρι τις πιο κυριολεκτικές λέξεις "drones", "ρομποτική" και "αυτόνομα συστήματα", προσφέρουν εναλλακτικές λύσεις που αλλάζουν τα δεδομένα στον παραδοσιακό τρόπο λειτουργίας. Οι ναυτιλιακές επιχειρήσεις αυτοματοποιούν σταθερά τις λειτουργίες, αντιμετωπίζουν προληπτικά τη συντήρηση, βελτιώνουν την ασφάλεια και αναπτύσσουν μεγαλύτερη ορατότητα σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. Επιπλέον, για ορισμένους ναυτιλιακούς γίγαντες, η αυξημένη συνδεσιμότητα κατέστησε δυνατή την εξερεύνηση και την εξέλιξη. Αντί να περιορίζονται στη μεταφορά εμπορευμάτων από τη μία τοποθεσία στην άλλη, η τεχνολογία του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης να γίνουν παγκόσμιοι ειδικοί στα logistics και πρωτοπόροι σε αναδυόμενους τομείς. Για την υπόλοιπη βιομηχανία με πιο μετριοπαθείς φιλοδοξίες, οι δαπανηρές αναποτελεσματικότητες περιορίζονται ή καταργούνται εντελώς [1.2].

Όλα αυτά είναι επίκαιρα. Το λειτουργικό κόστος, οι γεωπολιτικοί κίνδυνοι και οι εντάσεις στο εμπόριο έρχονται στο προσκήνιο. Υπάρχει επίσης το μικρό ζήτημα της τήρησης των στόχων του IMO για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, μια πρόκληση που απαιτεί συνεργασία και καινοτομία σε ολόκληρη τη βιομηχανία. Το να βρεθεί κανείς απροετοίμαστος από αυτές τις εξελίξεις δεν αποτελεί επιλογή για τους πλοιοκτήτες. Αντίθετα, η παλίρροια των αναδυόμενων τεχνολογιών αξιοποιείται. Η Maersk Line διαθέτει μια καθιερωμένη λύση συνδεδεμένων εμπορευματοκιβωτίων- τη OOCL συνεργάζεται με τη Microsoft για την υιοθέτηση της τεχνητής νοημοσύνης για τον εξορθολογισμό των λειτουργιών. Η Cargotec και η Orange Business Services ανακοίνωσαν μια παγκόσμια συνεργασία συνδεσιμότητας. Η CMA CGM συνεργάζεται με τη γαλλική νεοσύστατη εταιρεία Traxens για να προσθέσει μεγαλύτερη ορατότητα στην εφοδιαστική της αλυσίδα με τη χρήση τεχνολογίας IoT. Οι προηγμένες τεχνολογίες όπως οι τεχνολογίες περιθωρίου, συμπεριλαμβανομένων των μη επανδρωμένων αεροσκαφών και του blockchain, κερδίζουν έδαφος [1.3].

1.2 Ορατότητα εν πλω

(Ενότητα 1.2)

Με τη συνδεσιμότητα IoT προκύπτει ένας τεράστιος όγκος δεδομένων από τα οποία μπορούν να αντληθούν πληροφορίες. Αυτό συμβαίνει σε κάθε επίπεδο της ναυτιλιακής βιομηχανίας, από τα επιμέρους εξαρτήματα του μηχανοστασίου ενός πλοίου μέχρι τα εμπορευματοκιβώτια, τη διαχείριση του στόλου και τα συνδεδεμένα λιμάνια.

Η παγκόσμια συνδεσιμότητα του IoT φέρνει σταδιακά σε επαφή όλα αυτά τα διαφορετικά στοιχεία. Και με τη σειρά τους, οι ναυτιλιακές εταιρείες διαθέτουν περισσότερα δεδομένα από ποτέ σχετικά με τις λειτουργίες και το περιβάλλον εργασίας τους, καθώς και μια πληθώρα νέων ευκαιριών και εσόδων που βασίζονται σε δεδομένα.

Το πιο προφανές όφελος της συνδεσιμότητας του IoT έγκειται στο πώς μπορεί να μεταμορφώσει τις καθημερινές λειτουργίες στη θάλασσα, στο λιμάνι, ως μέρος ενός ευρύτερου δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας. Τα προβλήματα μπορούν να εντοπιστούν άμεσα, ο χρόνος διακοπής λειτουργίας μπορεί να μειωθεί και οι διαδικασίες μπορούν να εκσυγχρονιστούν, αλλάζοντας το πρόσωπο της ναυτιλιακής βιομηχανίας όπως την ξέρουμε.

Πουθενά αυτό δεν είναι πιο σαφές από ό,τι στο λιμάνι του Ρότερνταμ, όπου λαμβάνεται και αναλύεται μια ατελείωτη ροή πληροφοριών σχετικά με τα πλοία που βρίσκονται στον ντόκο, τους γερανούς στο ναυπηγείο και τα μεμονωμένα εμπορευματοκιβώτια. Οι φορείς εκμετάλλευσης του λιμανιού έχουν πλέον μεγαλύτερη διαφάνεια από οποιονδήποτε άλλο ναυτιλιακό κόμβο στον κόσμο.

Το αποτέλεσμα είναι ότι τα ζητήματα επιλύονται γρήγορα. Ο ανώτερος διευθυντής πληροφορικής του τερματικού σταθμού MVII Rudy Muller ισχυρίστηκε όταν άνοιξε το λιμάνι ότι "το τμήμα πληροφορικής βγήκε από το υπόγειο στον κύριο όροφο".

Και αποδείχθηκε ότι είχε δίκιο τρία χρόνια αργότερα. Ο τερματικός σταθμός λειτουργεί τώρα σε πλήρη δυναμικότητα και οι χειριστές του διακινούν 25-50% περισσότερα εμπορευματοκιβώτια ανά ώρα από οποιονδήποτε άλλο ανταγωνιστή του στη βόρεια Ευρώπη.

Το λιμάνι συνεργάστηκε επίσης με την IBM για τη δημιουργία ενός "ψηφιακού δίδυμου", ενός ακριβούς ψηφιακού αντιγράφου των λειτουργιών του, το οποίο αντικατοπτρίζει την κίνηση και την κατάσταση των πλοίων, τις υποδομές, τις καιρικές συνθήκες και τα υδάτινα δεδομένα. Αυτό το δίδυμο σύστημα επιτρέπει την εκτέλεση δοκιμαστικών σεναρίων σε περιβάλλον χωρίς κίνδυνο, ενώ μακροπρόθεσμα θα βοηθήσει τους χειριστές να περιορίσουν τις αναποτελεσματικότητες.

Όσον αφορά την ορατότητα του φορτίου, η απομακρυσμένη διαχείριση εμπορευματοκιβωτίων της Maersk είναι μεταξύ των ηγετών της αγοράς. Με την απλή προσθήκη ενός μόντεμ, μιας ασύρματης κάρτας SIM και μιας δορυφορικής σύνδεσης, οι τεχνικοί της Maersk μπορούν να εντοπίσουν τη θέση και τις λειτουργικές λεπτομέρειες οποιουδήποτε από τα 270.000 ψυκτικά εμπορευματοκιβώτια της σε όλο τον κόσμο.

Αυτά τα εμπορευματοκιβώτια χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ευπαθών προϊόντων από το Α στο Β και, ως εκ τούτου, απαιτούν εξειδικευμένα περιβάλλοντα και στενή παρακολούθηση. Με τη συνδεσιμότητα IoT, οι χειριστές αποφεύγουν να βρεθούν απροετοίμαστοι σε περίπτωση που προκύψει κάποιο πρόβλημα. Μαθαίνουν για τα ζητήματα εγκαίρως για να σώσουν την κατάσταση.

Οι αριθμοί μιλούν από μόνοι τους. Η Maersk δαπανούσε 200 εκατ. δολάρια ΗΠΑ κάθε χρόνο για τη φυσική επιθεώρηση των εμπορευματοκιβωτίων. Η εταιρεία πλήρωνε επίσης εκατομμύρια σε αποζημιώσεις σε πελάτες που ταλαιπωρήθηκαν από κατεστραμμένα φορτία. Με τη συνδεσιμότητα IoT, αυτή η σπατάλη και οι δαπάνες μπορούν και θα αποτελέσουν παρελθόν.

Το τελικό όφελος της αυξημένης προβολής; Όταν τα μεμονωμένα εμπορευματοκιβώτια διαθέτουν ψηφιακή ταυτότητα, οι πελάτες λαμβάνουν μια πιο ομαλή, πιο εξατομικευμένη εξυπηρέτηση. Η αυξημένη διαφάνεια της αλυσίδας εφοδιασμού σημαίνει ότι δεν χρειάζεται πλέον να συσκευάζεται ένα εμπορευματοκιβώτιο, να στέλνεται στην άλλη άκρη του κόσμου και να παραμένει στο σκοτάδι μέχρι να φτάσει στον προορισμό του.

Η συνδεσιμότητα της Maersk υποστηρίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον πάροχο δικτύου Ericsson. Και δεν είναι οι μόνοι που συνεργάζονται με παγκόσμιους παρόχους συνδεσιμότητας για να βοηθήσουν τους πελάτες να παρακολουθούν το φορτίο. Στα τέλη του 2017, η φινλανδική Cargotec υπέγραψε συμφωνία με την Orange Business Services για την ανάπτυξη ενός παγκόσμιου δικτύου χειρισμού.

Είναι πιθανό ότι περισσότερες από αυτές τις συνεργασίες θα καρποφορήσουν τους επόμενους μήνες και χρόνια, καθώς οι ναυτιλιακές εταιρείες επιδιώκουν να επωφεληθούν από την προστιθέμενη αξία που προσφέρει η διαρκώς παρούσα συνδεσιμότητα.

Εν μέρει αυτές οι συνεργασίες θα δημιουργηθούν από ανάγκη. Οι ναυτιλιακοί ηγέτες δεν διαθέτουν την απαιτούμενη τεχνογνωσία ή υποδομή για τη δημιουργία ενός παγκόσμιου δικτύου συνδεσιμότητας. Αυτό ήταν σίγουρα η περίπτωση της Cargotec [1.1].

«Η Orange Business Services διαθέτει τεχνογνωσία στην παγκόσμια κινητή συνδεσιμότητα», δήλωσε εκπρόσωπος της φινλανδικής εταιρείας. «Κανένας παίκτης στην αγορά δεν διαθέτει όλες τις απαραίτητες γνώσεις και δυνατότητες στο εσωτερικό του».

1.3 Από την ορατότητα στη λήψη έξυπνων αποφάσεων

(Ενότητα 1.3)

Οι όγκοι δεδομένων που παράγονται από τη συνδεσιμότητα IoT μπορούν να παρέχουν ορατότητα εκεί που προηγουμένως δεν υπήρχε. Αλλά η αξιοποίησή τους και η μετατροπή τους σε αξιοποιήσιμη νοημοσύνη είναι ένα εντελώς διαφορετικό θέμα .

Σε αυτό το σημείο υπεισέρχεται η Τεχνητή Νοημοσύνη, η οποία αναγνωρίζει μοτίβα, συνδέει διαφορετικά σημεία δεδομένων και κατευθύνει προληπτικά τις λειτουργίες ώστε τα πλοία να κινούνται και να αποφέρουν κέρδη.

Η τεχνητή νοημοσύνη εισέρχεται στη ναυτιλιακή σκηνή με τις γνωστές μορφές της προγνωστικής ανάλυσης και της προληπτικής συντήρησης. Η πρόβλεψη και η πρόληψη μηχανικών βλαβών πριν από την εμφάνισή τους είναι μια ανεκτίμητη ικανότητα. Αλλά είναι από την ευρύτερη ανάλυση της TN που οι πλοιοκτήτες πρόκειται να επωφεληθούν περισσότερο τα επόμενα χρόνια.

Αξιοποιώντας δεδομένα από μια όλο και πιο συνδεδεμένη παγκόσμια αλυσίδα εφοδιασμού και άλλες εξωτερικές μεταβλητές, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να καθοδηγήσει τους καπετάνιους των πλοίων ώστε να λαμβάνουν πιο κερδοφόρες αποφάσεις με βάση τις καιρικές συνθήκες, τους χρόνους φόρτωσης στα λιμάνια, τη συμφόρηση των δρομολογίων και άλλα.

Τον Απρίλιο, η Microsoft συνεργάστηκε με την OOCL, προσφέροντας δυνατότητες τεχνητής νοημοσύνης στη ναυτιλιακή εταιρεία με έδρα το Χονγκ Κονγκ σε μια αναβάθμιση 15 εβδομάδων, η οποία, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του επικεφαλής πληροφορικής της OOCL, Steve Siu, θα εξοικονομεί στη ναυτιλιακή εταιρεία περίπου 10 εκατ. δολάρια ΗΠΑ κάθε χρόνο. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι δύο εταιρείες ανακοίνωσαν στη συνέχεια μια συνεργασία E&A (Exploration and appraisal – εξερεύνηση και εκτίμηση) διάρκειας 18 μηνών, η οποία θα εφαρμόσει τη μηχανική μάθηση σε όλες τις ναυτιλιακές και δικτυακές λειτουργίες της OOCL.

Η αποτελεσματικότητα των ναυτιλιακών εργασιών εξαρτάται από ένα ρευστό μείγμα διαφορετικών μερών και μεταβλητών. Τα πράγματα μπορούν να αλλάξουν σε μια στιγμή, και η τεχνητή νοημοσύνη που μπορεί να προσαρμοστεί σε αυτές τις αλλαγές αντικειμενικά σε σχεδόν πραγματικό χρόνο προσφέρει ένα προφανές πλεονέκτημα έναντι των ασταθών ανθρώπινων υπεύθυνων στελεχών για τη λήψη αποφάσεων.

Η Microsoft διαθέτει τεχνογνωσία στη βαθιά και ενισχυτική μάθηση, έναν τύπο τεχνητής νοημοσύνης που χρησιμοποιεί αλγορίθμους προσαρμοσμένους σε στόχους για την επίτευξη ενός στόχου. Στη ναυτιλιακή βιομηχανία, ο στόχος αυτός

μπορεί να είναι κάτι κοντά στη "συνολική αποδοτικότητα". Η συνεργασία θέτει την OOCL στην πρώτη γραμμή της τελευταίας έρευνας και ανάπτυξης της TN, αξιοποιώντας στο έπακρο τους εμπειρογνώμονες της Microsoft και την αποδεδειγμένη επικύρωση του επιχειρηματικού αντίκτυπου στη διαδικασία.

Η υιοθέτηση της τεχνητής νοημοσύνης και όλων όσων την συνοδεύουν αποτελεί πρόκληση που είναι το κλειδί για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Η υιοθέτηση της μηχανικής μάθησης, του υπολογιστικού νέφους και της ανάλυσης ακμών απαιτούν όλα έναν βαθμό αναμόρφωσης της υποδομής, εξειδικευμένη τεχνογνωσία και, αναπόφευκτα, συνεργασία με εξωτερικούς συνεργάτες για να αποκομίσουν τα οφέλη.

Ως εκ τούτου, είναι πιθανό ότι τα επόμενα χρόνια θα δούμε περαιτέρω συνεργασίες μεταξύ ειδικών της τεχνολογίας και των μεγαλύτερων φορέων της ναυτιλιακής βιομηχανίας, καθώς οι δυνατότητες τεχνητής νοημοσύνης θα αναπτύσσονται περαιτέρω.

Ο κ. Siu υποστηρίζει ότι αυτές οι συμπράξεις είναι ζωτικής σημασίας για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της ναυτιλιακής βιομηχανίας [1.1].

«Η πραγματική κατανόηση και η ενσωμάτωση της επιχείρησης ενός οργανισμού, της εμπειρίας του χρήστη και της τεχνολογίας με το όραμα και τη στρατηγική του είναι τα κλειδιά για την επιτυχία του ψηφιακού μετασχηματισμού», λέει .

«Καμία εταιρεία δεν μπορεί να κυριαρχήσει σε όλες τις τεχνολογίες και τις γνώσεις που απαιτούνται για την προώθηση της καινοτομίας». Αντίθετα, επισημαίνει: «Η συνεργασία με εμπειρογνώμονες τεχνολογίας και ενδιαφερόμενους φορείς καλλιεργεί την καινοτομία και επιταχύνει την ευέλικτη ανάπτυξη».

«Η ναυτιλιακή βιομηχανία βρίσκεται σε ένα κρίσιμο στάδιο μετασχηματισμού με τεχνολογίες όπως η τεχνητή νοημοσύνη... Χαιρόμαστε που βλέπουμε περισσότερη συνεργασία και δέσμευση μέσω συμπράξεων σε αυτές τις αναδυόμενες τεχνολογίες».

1.4 Μη επανδρωμένα αεροσκάφη: παρακολούθηση εκπομπών και επανάσταση στη συντήρηση

(Ενότητα 1.4)

Από τις μεταφορές έως τις κατασκευές και τις υπεράκτιες πλατφόρμες πετρελαίου και φυσικού αερίου, η τεχνολογία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών έχει αντίκτυπο σε πολλούς κλάδους που χρειάζονται δεδομένα σε κλίμακα, απαιτούν τακτικές επιθεωρήσεις και ενέχουν ένα στοιχείο κινδύνου για τα συνεργεία συντήρησης.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι εφαρμόσιμοι στη ναυτιλιακή βιομηχανία, όπου ο χρόνος διακοπής λειτουργίας έχει άμεσο αντίκτυπο στα αποτελέσματα και το λειτουργικό κόστος αυξάνεται.

Ένα σημαντικό στοιχείο για την αύξηση του κόστους αυτού είναι η στελέχωση με προσωπικό. Έτσι, είναι αυτονόητο ότι κάθε τεχνολογία που μπορεί να αυτοματοποιήσει ή να επιταχύνει τις εργασίες μειώνοντας παράλληλα το απαιτούμενο ανθρώπινο δυναμικό θα είναι ευπρόσδεκτη.

Εδώ είναι που τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη έρχονται στο προσκήνιο με πιο έξυπνες και ασφαλείς επιθεωρήσεις βασικών υποδομών. Για τους πλοιοκτήτες, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη παρέχουν έναν νέο τρόπο επεξεργασίας και βελτιστοποίησης των επιθεωρήσεων των αμπαριών φορτίου, συλλέγοντας δεδομένα με ταχύτητα χωρίς να θέτουν σε κίνδυνο τα μέλη του πληρώματος. Και το κάνουν αυτό προσθέτοντας παράλληλα περισσότερη αντικειμενικότητα στη διαδικασία. Το βιντεοσκοπημένο υλικό μπορεί να αναπαραχθεί και να αναλυθεί. Τα λάθη θα αποτελέσουν σιγά σιγά παρελθόν, χωρίς να χρειάζεται να στηριζόμαστε στην ανάκληση και την υποκειμενικότητα.

Επειδή η τεχνολογία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών εξελίσσεται τόσο γρήγορα, οι ναυτιλιακές εταιρείες μπορούν να επωφεληθούν από την υψηλότερη ποιότητα εναέριου βίντεο από ποτέ, από αυτοματοποιημένες έρευνες και από εξελιγμένη όραση υπολογιστή. Με πιο απλά λόγια: ασφαλείς, γρήγορες επιθεωρήσεις, τροφοδοσία βίντεο υψηλής ευκρίνειας και αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο.

Και καθώς εξελίσσονται οι συνοδευτικές τεχνολογίες, όπως η προγνωστική ανάλυση και η μηχανική μάθηση, οι αυτόνομες εναέρια πλατφόρμες θα μπορούσαν να κάνουν το επόμενο βήμα: να χειρίζονται τις διαδικασίες επιθεώρησης από την αρχή μέχρι το τέλος, να παρακολουθούν την ακεραιότητα των ζωτικών δομών όλο το εικοσιτετράωρο, να αναλύουν τα δεδομένα άμεσα και να αποτρέπουν την κλιμάκωση μικρών ζητημάτων και τη διακοπή της λειτουργίας.

Εκτός από την ανανέωση των συμβατικών μεθόδων επιθεώρησης και επισκευής, η τεχνολογία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών υιοθετείται για να βοηθήσει τις ναυτιλιακές εταιρείες να τηρούν τους στόχους των εκπομπών. Αρκετοί φορείς εκμετάλλευσης, συμπεριλαμβανομένης της Explicit της Δανίας και της Martek Marine του Ηνωμένου Βασιλείου, αναπτύσσουν εναέρια πλατφόρμες ικανές να πετούν μέσα σε πίδακες εκπομπών για να "μυρίσουν" τον άνθρακα και το θείο που αναδύεται από τις μηχανές ενός πλοίου.

Η τεχνολογία έχει ήδη υιοθετηθεί για σκοπούς επιβολής του νόμου από τη Νορβηγική Ναυτιλιακή Αρχή σε συνεργασία με την ακτοφυλακή. Οι αξιωματούχοι μπορούν να αξιολογούν εξ αποστάσεως τις εκπομπές των πλοίων σε 30 λεπτά - μειώνοντας την προηγούμενη διαδικασία που διαρκούσε μια ολόκληρη ημέρα.

«Αν και είναι γνωστή ως μια κάπως συντηρητική βιομηχανία, έχουμε διαπιστώσει ότι οι περισσότεροι πλοιοκτήτες είναι ανοιχτοί και δεκτικοί στη χρήση της τεχνολογίας drone», δήλωσε η Talisa Gill της Martek Marine.

«Όπου υπάρχει προσοχή, υπάρχει καλός λόγος. Οι πλοιοκτήτες συχνά λαμβάνουν ιδέες εξοικονόμησης χρόνου και χρημάτων, για να διαπιστώσουν ότι η πραγματικότητα δεν ανταποκρίνεται στο όνειρο».

Ωστόσο, η Martek Marine διαπίστωσε ότι τόσο η καλή φήμη όσο και η αποδεδειγμένη επιτυχία σε συνεργασία με ναυτιλιακούς πελάτες βοήθησαν στην οικοδόμηση εμπιστοσύνης στις έννοιες και τα προϊόντα της, τα οποία περιλαμβάνουν τη χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών για οπτικές επιθεωρήσεις στο εσωτερικό των αμπαριών και την υποστήριξη της αποξήρασης.

Τα επόμενα χρόνια, η κ. Gill αναμένει ότι η χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών θα πολλαπλασιαστεί σε ολόκληρο τον κλάδο. «Τα drones με μεγαλύτερη χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου και εμβέλεια λειτουργίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον ανεφοδιασμό των πλοίων σε υπεράκτιες περιοχές, ενώ βραχυπρόθεσμα αναμένουμε να τα δούμε να χρησιμοποιούνται για επικίνδυνες εργασίες πρόσβασης στο εσωτερικό των πλοίων, για την παρακολούθηση των εκπομπών, την ασφάλεια και την έρευνα και διάσωση».

Η χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών στη ναυτιλιακή βιομηχανία ανοίγει την πόρτα στην καινοτομία σε τεράστια κλίμακα. Η τεχνολογία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών - που καλύπτει τα πάντα, από τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας έως την όραση του υπολογιστή - θα συνεχίσει να αναπτύσσεται και, το σημαντικότερο, οι κανονισμοί σχετικά με την πλήρως αυτόνομη πτήση θα μειωθούν, καθώς οι ανησυχίες για την ασφάλεια θα αμβλύνονται.

1.5 Δημιουργώντας κύματα: blockchain

(Ενότητα 1.5)

Η αλυσίδα μπλοκ (blockchain) γίνεται γρήγορα το αναπόφευκτο τεχνολογικό σύνθημα της εποχής μας. Αν και πολλές από τις εφαρμογές και τις υπό υιοθεσία πρακτικές της δεν είναι καθόλου πειστικές, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι διαθέτει μεγάλες δυνατότητες όσον αφορά την οργάνωση και την εξασφάλιση ενός πολύπλοκου δικτύου συναλλαγών.

Ο συνδυασμός της κρυπτογραφικής ασφάλειας και της αποκεντρωμένης αποθήκευσης δεδομένων - διαμορφώνοντας ένα αμετάβλητο αρχείο των γεγονότων - θα μπορούσε κάλλιστα να αποδειχθεί τόσο μετασχηματιστική τεχνολογία όσο και το διαδίκτυο.

Όλα αυτά εξηγούν γιατί η ναυτιλιακή βιομηχανία διερευνά το blockchain και τις πιθανές εφαρμογές του σε όλο το οικοσύστημα φορτίου.

Στις αρχές του έτους, η Maersk και η IBM συνεργάστηκαν για τη δημιουργία μιας κοινής επιχείρησης αφιερωμένης στη διερεύνηση των δυνατοτήτων του blockchain στο παγκόσμιο εμπόριο. Αλλού, τον Μάρτιο, μια κοινοπραξία αποτελούμενη από τις AB InBev, Accenture, APL, Kuehne + Nagel και έναν ευρωπαϊκό τελωνειακό οργανισμό ολοκλήρωσε με επιτυχία τις δοκιμές μιας λύσης blockchain.

Υπάρχει επίσης ασιατικό ενδιαφέρον. Η Hyundai Merchant Marine της Νότιας Κορέας δοκίμασε πέρυσι μια παρόμοια λύση blockchain με τη βοήθεια της Samsung.

Η φιλοδοξία; Να εξαλειφθεί η ανάγκη για εκτυπωμένα έγγραφα αποστολής, σε μια κίνηση που θα μπορούσε να εξοικονομήσει εκατοντάδες εκατομμύρια δολάρια κάθε χρόνο στον κλάδο των εμπορευματικών μεταφορών και της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Απέναντι στα πιο καθιερωμένα ονόματα ανταγωνίζεται το CargoX, μια νεοσύστατη επιχείρηση τη Fintech με έδρα τη Σλοβενία, με μια λύση που υπόσχεται ήδη να διευκολύνει τα "μεγαλύτερα σημεία πόνου" στην παγκόσμια εφοδιαστική αλυσίδα.

Το CargoX προσφέρει μια αυτοματοποιημένη φορτωτική που βασίζεται στην αλυσίδα μπλοκ, η οποία αντικαθιστά τη συμβατική και δαπανηρή διαδικασία που βασίζεται στο χαρτί με μια συναλλαγή που ανταγωνίζεται την ηλεκτρονική τραπεζική από άποψη ταχύτητας και αποτελεσματικότητας.

Η έξυπνη φορτωτική της εταιρείας μπορεί να δημιουργηθεί γρήγορα, να μεταφερθεί από τον διαμεταφορέα στον εξαγωγέα, στον εισαγωγέα και, τέλος, στον πράκτορα απελευθέρωσης στο λιμάνι προορισμού.

Η πρώτη επίσημη έξυπνη φορτωτική εκδόθηκε από την CargoX στις 27 Ιουλίου 2018.

Ο αγώνας για την τέλεια χωρίς χαρτί ναυτιλία βρίσκεται σε εξέλιξη. Ο τελικός στόχος θα μπορούσε να μεταμορφώσει το παγκόσμιο εμπόριο: ένας κόσμος στον οποίο το φορτίο θα διασχίζει τα σύνορα, ενώ οι έλεγχοι και οι κοινοποιήσεις θα είναι αυτοματοποιημένοι και θα καταγράφονται για την ανίχνευση και την παρακολούθηση ολόκληρης της αλυσίδας εφοδιασμού.

1.6 Η μεγάλη πρόκληση: πραγματική αυτονομία και πλοία χωρίς πλήρωμα

(Ενότητα 1.6)

Υπήρξε μια εποχή που οι γίγαντες του ναυτιλιακού κόσμου έβλεπαν με επιφύλαξη τη φουτουριστική προοπτική των πλήρως αυτόνομων πλοίων.

Φαίνεται όμως όλο και περισσότερο ότι αποτελούν το τελικό παιχνίδι των τεχνολογιών IoT, της τεχνητής νοημοσύνης και των αυτόνομων συστημάτων στη ναυτιλία.

Αν ρωτήσετε τη Rolls-Royce, οι μειώσεις του πληρώματος θα μπορούσαν να ξεκινήσουν ήδη από το 2020, καθώς τα επίπεδα αυτοματοποίησης αυξάνονται και οι χειριστές αρχίζουν να αναλαμβάνουν τον έλεγχο των πλοίων από τη στεριά. Μέχρι το 2025, η εταιρεία προβλέπει την παρουσία τηλεχειριζόμενων μη επανδρωμένων παράκτιων σκαφών. Μέχρι το 2035 - σε μόλις 12 χρόνια από τώρα - η Rolls-Royce αναμένει ότι οι ωκεανοί μας θα φιλοξενούν πλήρως αυτόνομα φορτηγά πλοία χωρίς πλήρωμα.

Έτσι, είναι λογικό ότι, μαζί με τη Google, ο ειδικός σε θέματα ισχύος, πρόωσης και κινητήρων έχει αρχίσει να αναπτύσσει τεχνητή νοημοσύνη με επίγνωση της κατάστασης, η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει τον προάγγελο ενός αυτοματοποιημένου καπετάνιου.

Ωστόσο, δύο νορβηγικές εταιρείες εργάζονται σε ένα εντελώς πιο φιλόδοξο χρονοδιάγραμμα. Η εταιρεία παραγωγής γεωργικών εφοδίων Yara International και η κατασκευάστρια εταιρεία συστημάτων καθοδήγησης Kongsberg κατασκευάζουν επί του παρόντος το Yara Birkeland, ένα ηλεκτρικό σκάφος αξίας 25 εκατ. δολαρίων, ικανό να λειτουργεί με πλήρη αυτονομία.

Το πρωτοποριακό αυτόνομο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με χημικά και λιπάσματα, εκτιμάται ότι θα μειώνει την κυκλοφορία 40.000 οδικών φορτίων ετησίως, επρόκειτο να τεθεί σε υπηρεσία ως επανδρωμένο πλοίο μέσα στο 2018, όμως τελικά έκανε το παρθενικό του ταξίδι το Νοέμβριο του 2021, ενώ προτού ξεκινήσουν οι απομακρυσμένες επιχειρήσεις με τηλεχειρισμό θα πρέπει να λειτουργεί για δύο τουλάχιστον έτη ακόμα ως επανδρωμένο.

Ο IMO έκανε τους τελευταίους μήνες το σημαντικό βήμα να συμφωνήσει έναν ορισμό για το τι συνιστά ένα αυτόνομο πλοίο. Η επόμενη κίνηση θα είναι η δημιουργία ενός κανονιστικού πλαισίου για τη λειτουργία τους.

Τα οφέλη θα είναι τεράστια. Ανεξάρτητα από το αν τροφοδοτούνται ή όχι με ηλεκτρική ενέργεια, τα πλοία χωρίς πλήρωμα θα λειτουργούν ως μέρος ενός ευρύτερου συνδεδεμένου οικοσυστήματος, λαμβάνοντας αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο με βάση μια ροή δεδομένων από άλλα πλοία, λιμάνια, καιρικές συνθήκες και

πολλά άλλα. Αλλά προς το παρόν, παρά τις προόδους στην αυτόνομη τεχνολογία, είναι πιθανό ότι οι ανησυχίες σχετικά με την ευθύνη, την ασφάλεια και την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο θα περιορίσουν την ευρεία υιοθέτηση.

Ίσως τα πλοία χωρίς πλήρωμα να ξεκινούν από τα μικρά: στο λιμάνι και όχι να διασχίζουν τους ωκεανούς. Για παράδειγμα, η Λιμενική Αρχή της Σιγκαπούρης επιβεβαίωσε τα σχέδιά της για την ανάπτυξη αυτόνομων πλοίων που θα βοηθούν στις καθημερινές λιμενικές εργασίες.

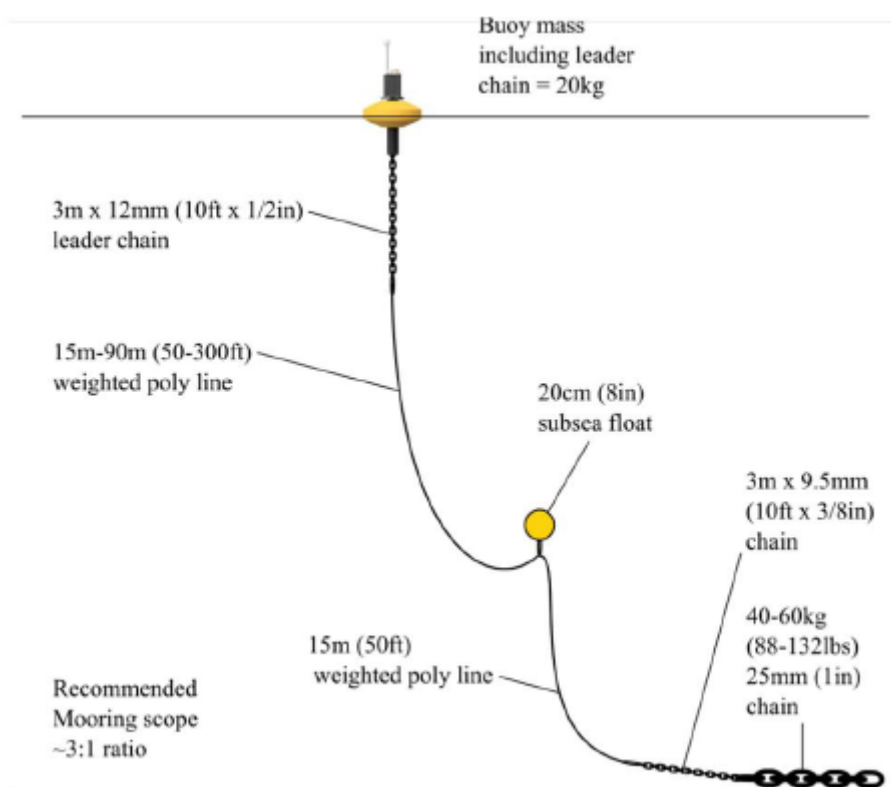
Όποιο και αν είναι το χρονοδιάγραμμα για τα πλοία χωρίς πλήρωμα, δεν υπάρχει αμφιβολία για την όρεξη για καινοτομία. Η παλίρροια γυρίζει. Όλες αυτές οι αναδυόμενες τεχνολογίες είναι έτοιμες να μεταμορφώσουν τη ναυτιλιακή βιομηχανία τα επόμενα χρόνια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΡΑΔΙΟΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

(Εισαγωγή)

Μια ολοένα και πιο δημοφιλής συσκευή ΜΙοΤ είναι η νέα γενιά συμπαγών, ανθεκτικών και εύχρηστων σηματοδότηρων, όπως οι CoastScout της MarineLabs [2.1], που μετρά, καταγράφει και μεταδίδει πολύτιμα δεδομένα ωκεάνιου κύματος για μια ποικιλία θαλάσσιων εφαρμογών, όπως η θαλάσσια ασφάλεια, η διαχείριση λιμένων, η ωκεάνια μηχανική, κατασκευές κ.λπ. Πραγματικός ή σχεδόν πραγματικός χρόνος μετάδοσης των δεδομένων κύματος από αυτές τις σηματοδότες παρέχει μια σημαντικά υψηλότερη πυκνότητα δειγματοληψίας του ωκεανού από ό,τι σε εποχή πριν από την εποχή των ΙοΤ και, ως εκ τούτου, επιτυγχάνεται μια πιο ολοκληρωμένη και ακριβής εικόνα της δυναμικής των ωκεανών. Καθώς αυτές οι σηματοδότες συνήθως αναπτύσσονται κοντά στην ακτή (σε απόσταση 2 ή 3 χιλιομέτρων από την ακτογραμμή), οι κυψελοειδείς επικοινωνίες μεταξύ της σηματοδότης και των χερσαίων πύργων κινητής τηλεφωνίας στην ακτή είναι μια φυσική επιλογή.



(α)



(β)

(γ)

Σχήμα 2.1 Χρήση έξυπνων σηματοδούρων[2.1]

Το σχήμα 2.1(α) δείχνει τον σημαντήρα και το σύστημα πρόσδεσης που είναι έτοιμα για εγκατάσταση στον Ειρηνικό Ωκεανό σε βάθος 35 μέτρων στο νησί Βανκούβερ στον Καναδά [2.1(30)]. Η σηματοδούρα (ενσωματωμένη με ηλιακούς συλλέκτες) κατέχει διάμετρο 60 cm και η μάζα της που περιλαμβάνει μια σταθμισμένη αλυσίδα 3 m × 12 mm, είναι 15 kg. Η σταθμισμένη πολυγραμμή έχει εύρος μήκους από 15 έως 90 m με υποθαλάσσιο πλωτήρα στο άκρο του που συνδέει ένα άλλο σταθμισμένο πολύγραμμο 15 m και 3 m × 9,5 mm αλυσίδα και σταθμισμένη αλυσίδα 25 mm βάρους 40-60 κιλών. Τα Σχ. 2.1(β) και 2.1(γ) απεικονίζουν την αναπτυγμένη σηματοδούρα στα παράκτια ύδατα του Ειρηνικού το γαλήνια και κυματιστά νερά, αντίστοιχα. Η μετάδοση δεδομένων από αυτές τις σηματοδούρες στην ξηρά αντιμετωπίζει σημαντικά περισσότερες προκλήσεις από τις χερσαίες εφαρμογές. Λειτουργούν σε σκληρά ωκεάνια περιβάλλοντα, η παροχή ενέργειας είναι περιορισμένη, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων η αξιοπιστία και οι απαιτήσεις είναι υψηλές, και τα ρυθμικά ωκεάνια κύματα εμποδίζουν την τη διαδρομή ραδιομετάδοσης τακτικά .

Ένα κανάλι επικοινωνίας κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας μοντελοποιείται ως ο συνδυασμός της διαδρομής LoS (Line of Sight), της διαδρομής κατοπτρικής ανάκλασης και διάχυτες διαδρομές ανάκλασης λόγω της σκέδασης της θαλάσσιας επιφάνειας. Μεταξύ αυτών, το LoS είναι ο πιο σημαντικός σύνδεσμος ,ενώ η κατοπτρική διαδρομή με χαμηλότερη ισχύ μπορεί να προσθέσει επικοδομητικά ή καταστροφικά ανάλογα με τη διαφορά μήκους κύματος της διαδρομής και τον συντελεστή ανάκλασης. Οι διάχυτες διαδρομές είναι πάντα τυχαίες ασυνεχείς συνιστώσες με ακόμη μικρότερη συνολική ισχύ. Ένα μοντέλο δύο κυμάτων με ισχύ διάχυσης (TWDP – Two Wave with Diffusion Power) για επίγεια διάδοση χιλιοστομετρικών κυμάτων θεωρείται ότι μπορεί να εφαρμοστεί για το κανάλι κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας στο [2.2]. Αυτά τα μοντέλα λειτουργούν αρκετά καλά για ήρεμες καταστάσεις θάλασσας, όπως αποδεικνύεται από τις μετρήσεις στο [2.3] για τη φέρουσα συχνότητα 5,2 GHz, τον πομπό ύψος κεραίας

πομπού 7 m, ύψος κεραίας δέκτη 32,9 m, εύρος ζώνης 100 MHz και απόσταση έως 10 km.

Σε δυσχερείς καταστάσεις στη θάλασσα ή αν υπάρχει χαμηλό ύψος στην κεραία της συσκευής, το μεταβλητό ύψος της επιφάνειας της θάλασσας μπορεί να φτάσει σε ψηλότερο σημείο από αυτό της διαδρομής LoS. Η ανάκλαση και η σκέδαση σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν και να μοντελοποιηθούν. Σε αυτή την ενότητα, αναλύουμε την παρεμπόδιση του φαινομένου LoS από τα κύματα, το οποίο για να γίνει περιλαμβάνει τη μελέτη της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο θαλασσινό νερό και τη στατική αλληλεπίδραση του θαλάσσιου κύματος και της διάδοσης του LOS.

2.1 Εξασθένηση ραδιοκυμάτων από το θαλασσινό νερό

(Ενότητα 2.1)

Η προσέλευση των ραδιοσημάτων στο θαλασσινό νερό διερευνάται εξετάζοντας την ικανότητα διείσδυσης του ραδιοκύματος στο θαλασσινό νερό. Σε αυτή την ενότητα, υιοθετούμε το μοντέλο της ITU (International Telecommunication Union) [2.4] για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας της γης συμπεριλαμβανομένου του γλυκού νερού, του θαλασσινού νερού, του πάγου, του εδάφους, της φυτοκάλυψης, κτλ. Το βάθος διείσδυσης δ ορίζεται ως το βάθος στο οποίο το πλάτος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας πέφτει στο $1/e$ της αρχικής τιμής στην επιφάνεια σε ένα ομογενές μέσο σύνθετης σχετικής διαπερατότητας $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ και δίνεται από τη σχέση [2.4].

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{(\epsilon'_r)^2 + (\epsilon''_r)^2} - \epsilon'_r}} \quad (2.1)$$

όπου λ είναι το μήκος ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε μέτρα. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο γλυκού νερού από την ITU, η σύνθετη σχετική διαπερατότητα, $\epsilon_{pw} = \epsilon'_{pw} - j\epsilon''_{pw}$, είναι μια συνάρτηση που εξαρτάται από τη συχνότητα f_{GHz} και τη θερμοκρασία T ($^{\circ}C$), όπως δίδεται από τη σχέση [2.1]:

$$\epsilon'_{pw} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_1}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_\infty}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \epsilon_\infty \quad (2.2)$$

$$\epsilon''_{pw} = \frac{(f_{GHz}/f_1)(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{(f_{GHz}/f_2)(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} \quad (2.3)$$

όπου:

$$\epsilon_s = 77.6 + 103.3\theta \quad (2.4)$$

$$\epsilon_1 = 0.0671\epsilon_s \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{\infty} = 3.52 - 7.52\Theta \quad (2.6)$$

$$\Theta = \frac{300}{T + 273.15} - 1 \quad (2.7)$$

και f_1 και f_2 είναι οι συχνότητες χαλάρωσης Debye που εκφράζονται ως εξής :

$$f_1 = 20.2 - 146.4\Theta + 316\Theta^2 \text{ (GHz)} \quad (2.8)$$

$$f_2 = 39.8f_1 \text{ (GHz)} \quad (2.9)$$

Επιπλέον, η σύνθετη σχετική διαπερατότητα του θαλασσινού (αλμυρού) νερού είναι συνάρτηση της συχνότητας f_{GHz} , της θερμοκρασίας T ($^{\circ}\text{C}$) και της περιεκτικότητας σε αλάτι S (g/kg ή ppt) και μπορεί να προκύψει ως εξής [2.4(32)]:

$$\varepsilon_{sw} = \varepsilon'_{sw} - j\varepsilon''_{sw} \quad (2.10)$$

$$\varepsilon'_{sw} = \frac{\varepsilon_{ss} - \varepsilon_{1s}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{1s})^2} + \frac{\varepsilon_{1s} - \varepsilon_{\infty s}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{2s})^2} + \varepsilon_{\infty s} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon''_{sw} = \frac{(f_{\text{GHz}}/f_{1s})(\varepsilon_{ss} - \varepsilon_{1s})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{1s})^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_{2s})(\varepsilon_{1s} - \varepsilon_{\infty s})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{2s})^2} + \frac{18\sigma_{sw}}{f_{\text{GHz}}} \quad (2.12)$$

Όπου:

$$\varepsilon_{ss} = \varepsilon_s \exp(-3.56417 \times 10^{-3}S + 4.74868 \times 10^{-3}S + 1.15574 \times 10^{-5}TS) \quad (2.13)$$

$$f_{1s} = f_1(1 + S(2.39357 \times 10^{-3} - 3.13530 \times 10^{-5}T + 2.52477 \times 10^{-7}T^2)) \text{ (GHz)} \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_{\infty s} = \varepsilon_s \exp(-3.56417 \times 10^{-3}S + 4.74868 \times 10^{-3}S + 1.15574 \times 10^{-5}TS) \quad (2.15)$$

$$f_{2s} = f_2(1 + S(-1.99723 \times 10^{-2} + 1.81176 \times 10^{-4}T)) \times \text{ (GHz)} \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_{\infty s} = \varepsilon_{\infty}(1 + S(-2.04265 \times 10^{-3} + 1.57883 \times 10^{-4}T)) \quad (2.17)$$

Οι τιμές των ε_s , ε_1 , ε_∞ , f_1 και f_2 λαμβάνονται από τις (4)-(9). Επιπλέον, η σ_{sw} δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_{sw} = \sigma_{35} R_{15} R_{T15} \left(\frac{S}{m} \right) \quad (2.18)$$

$$\sigma_{35} = 2.903602 + 8.607 \times 10^{-2}T + 4.738817 \times 10^{-4}T^2 - 2.991 \times 10^{-6}T^3 + 4.3047 \times 10^{-9}T^4 \quad (2.19)$$

$$R_{15} = S \left(\frac{37.5109 + 5.45216S + 1.4409 \times 10^{-2}S^2}{1004.75 + 182.283S + S^2} \right) \quad (2.20)$$

$$R_{T15} = 1 + \frac{\alpha_0(T - 15)}{\alpha_1 + T} \quad (2.21)$$

$$\alpha_0 = \frac{6.9431 + 3.2841S - 9.9486 \times 10^{-2}S^2}{84.850 + 69.024S + S^2} \quad (2.22)$$

$$\alpha_1 = 49.843 - 0.2276S + 0.198 \times 10^{-2}S^2 \quad (2.23)$$

Όταν $S = 0$ (για γλυκό νερό), οι (2.11) και (2.12) εκφυλίζονται στις (2.2) και (2.3). Από την άλλη πλευρά, θεωρώντας το ξηρό πάγο που αποτελείται από γλυκό νερό (≤ 0 °C), το σύνθετο σχετικό διαπερατότητας, $\varepsilon_{ice} = \varepsilon'_{ice} - j\varepsilon''_{ice}$, έχει το πραγματικό μέρος ε'_{ice} που γράφεται ως:

$$\varepsilon'_{ice} = 3.1884 + 0.00091T \quad (2.24)$$

η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας T και ανεξάρτητη της συχνότητας f_{GHz} . Το φανταστικό μέρος ε''_{ice} είναι συνάρτηση της T και της συχνότητας f_{GHz} δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon''_{ice} = \frac{A}{f_{GHz}} + Bf_{GHz} \quad (2.25)$$

όπου έχουμε επιπλέον:

$$A = (0.00504 + 0.0062\theta) \exp(-22.1\theta) \quad (2.26)$$

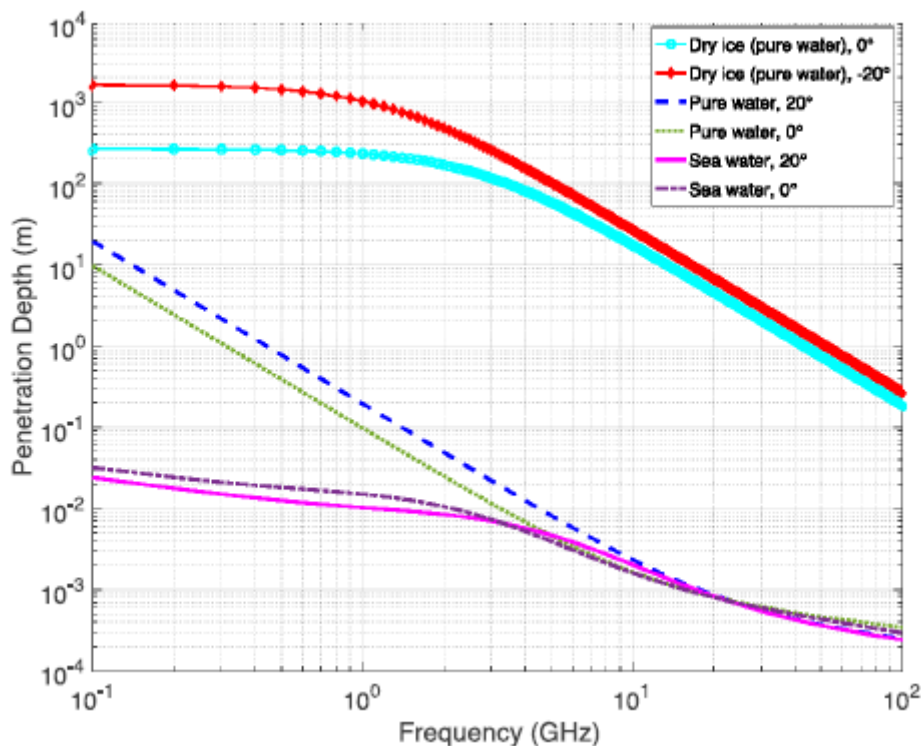
$$B = \frac{0.0207}{T + 273.15} \frac{\exp(-\tau)}{(\exp(-\tau) - 1)^2} + 1.16 \times 10^{-11} f_{GHz}^2 + \exp(-9.963 + 0.0372T) \quad (2.27)$$

$$\tau = \frac{335}{T + 273.15} \quad (2.28)$$

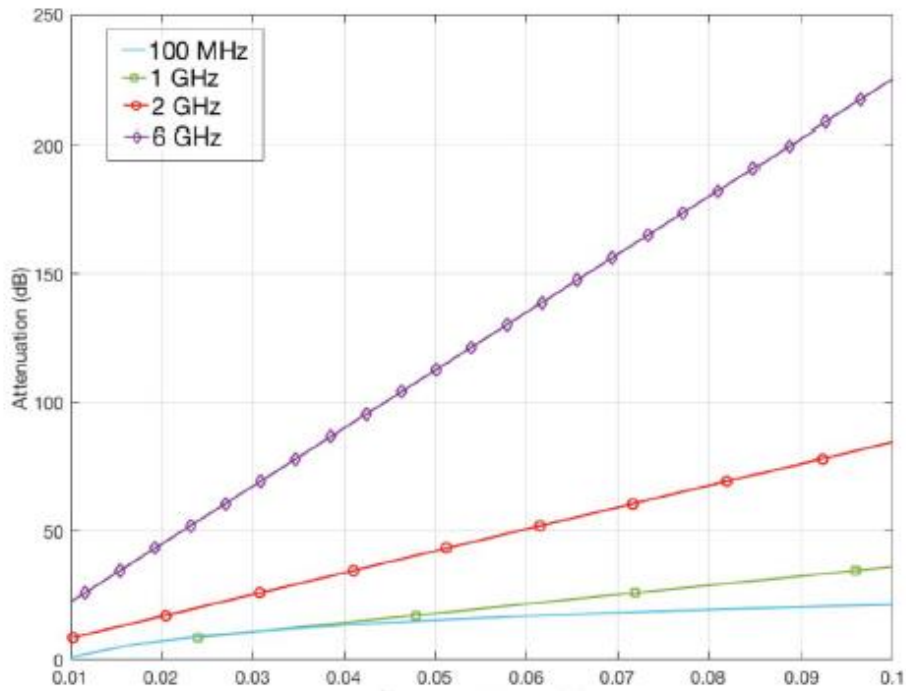
$$\tau = \frac{300}{T + 273.15} - 1 \quad (2.29)$$

Τέλος, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις, τα βάθη διείσδυσης της διάδοσης των ραδιοκυμάτων από 100 MHz έως 100 GHz για το γλυκό νερό, για το θαλασσινό νερό (35 ppt – μέση αλατότητα του ωκεανού) και για τον ξηρό πάγο σε διάφορες θερμοκρασίες, απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2.

Όπως παρατηρήθηκε, το θαλασσινό νερό στους 20 °C έχει ως αποτέλεσμα το μικρότερο βάθος διείσδυσης (δηλαδή την πιο σημαντική εξασθένηση) για συχνότητες κάτω των 3 GHz, ενώ ο ξηρός πάγος σε -20 °C παρουσιάζει τη μικρότερη εξασθένηση για τις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν. Στο 1 GHz, το βάθος διείσδυσης του θαλασσινού νερού και του ξηρού πάγου είναι 0,01 και 1000 m, αντίστοιχα .

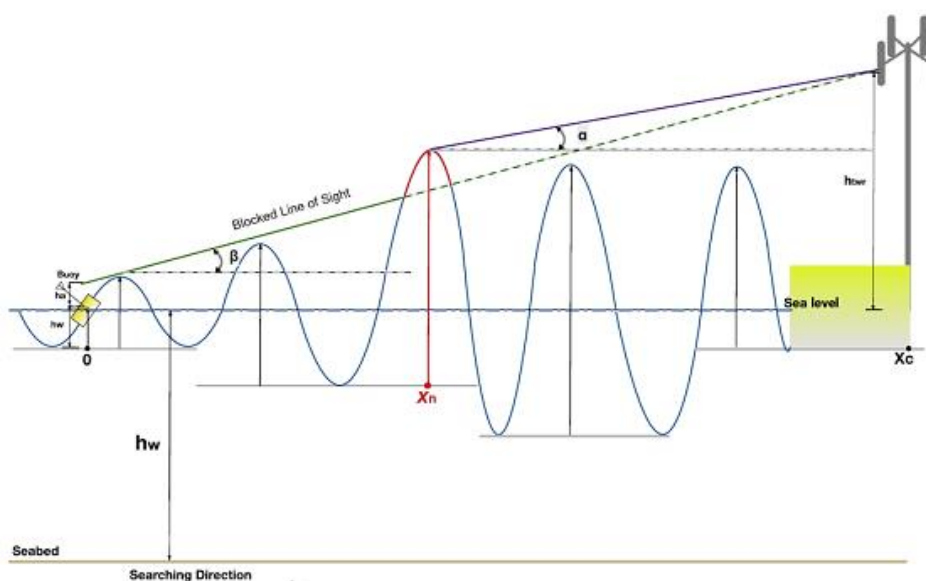


Σχήμα 2.2 Βάθη διείσδυσης διαφόρων τύπων επιφανειών για διάδοση ραδιοκυμάτων πάνω από 100 MHz έως 100 GHz [2.1]



Σχήμα 2.3 Εξασθένηση ραδιοκυμάτων από το θαλασσινό νερό ως συνάρτηση του πάχους [2.1]

Με βάση τα προσομοιωμένα βάθη διείσδυσης, η εξασθένηση του ραδιοκύματος ως συνάρτηση του πάχους του θαλασσίου νερού για τις συχνότητες ενδιαφέροντος του φορέα, όπως 100 MHz, 1 GHz, 2 GHz και 6 GHz, προσομοιώνεται περαιτέρω και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3. Το θαλασσινό νερό πάχους περίπου 0,1 m μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερο από 34 και 78 dB εξασθένησης στα 1 και 2 GHz, αντιστοίχως. Με άλλα λόγια, μία τόσο μεγάλη εξασθένηση μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή της επικοινωνίας ή επιδείνωση των ζεύξεων επικοινωνίας όταν τα κύματα του ωκεανού εμποδίζουν τα μονοπάτια επικοινωνίας.



Σχήμα 2.4 Απεικόνιση επικοινωνίας από σηματούρα με ξηρά παρουσία θαλάσσιων κυμάτων [2.1]

Το Σχήμα 2.4 απεικονίζει μια επικοινωνία μεταξύ σημαντήρων και ξηράς μέσω της θάλασσας, όταν κύματα του ωκεανού σημαντικού πάχους (σε σχέση με το μήκος κύματος του κύματος του ωκεανού) παρεμβάλλονται μεταξύ της κεραίας της σημαδούρας και του πύργου κινητής τηλεφωνίας και η διαδρομή LoS παρεμποδίζεται σημαντικά. Επιπροσθέτως, καθώς η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας μεταβάλλεται δυναμικά και ενεργοποιεί και απενεργοποιεί την επικοινωνία LoS, μια λεπτομερής μελέτη που περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση των κυμάτων του ωκεανού είναι απαραίτητη.

2.2 Μοντελοποίηση κυμάτων σε παράκτια και ωκεάνια ύδατα

(Ενότητα 2.2)

Ο πραγματικός μηχανισμός της ρευστοδυναμικής του ωκεάνιου κύματος και το μεταβαλλόμενο ύψος της επιφάνειας του σε ένα εξαιρετικά δυναμικό περιβάλλον του ωκεανού είναι πολύ περίπλοκος. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να διερευνήσουμε με πόση ακρίβεια το επιφανειακό υψόμετρο του θαλασσινού νερού μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου μέσω στατιστικής μοντελοποίησης. Όσον αφορά την παραγωγή θαλάσσιων κυμάτων, υπάρχει υψηλός βαθμός συσχέτισης μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και του ύψους των κυμάτων. Όσον αφορά την κατάσταση κύματος, υπάρχουν κυρίως τέσσερις τύποι γνωστοί ως:

1. Θάλασσες εκκίνησης
2. Αναπτυσσόμενες θάλασσες
3. Πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες
4. Παρακμάζουσες θάλασσες

Για την ανάλυση των κυματικών φασμάτων, η μέθοδος Pierson-Moskowitz (P-M) εισήχθη το 1964 από την υπεράκτια βιομηχανία ως φάσμα με μία παράμετρο για πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες, στον Βόρειο Ατλαντικό που δημιουργούνται από τοπικούς ανέμους [2.5]. Ωστόσο, το φάσμα P-M είναι περιορισμένο για ανάλυση, δεδομένου ότι η ανάγκη του για πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες είναι πολύ περιοριστική [2.6]. Το φάσμα δύο παραμέτρων, φάσμα Bretschneider, επίσης γνωστό ως φάσμα ISSC [που αντιπροσωπεύεται από το σημαντικό ύψος κύματος (SWH - significant wave height) και τη μέση περίοδο [2.7] είναι το μοντέλο φάσματος που συνιστάται για συνθήκες κύματος στον ανοικτό ωκεανό που δίνονται από [2.5], [2.6]:

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{\omega^5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right) \text{ in } \text{m}^2/(\text{rad}/\text{s}) \quad (2.30)$$

όπου H_s είναι το SWH σε μέτρα, η επίσης γνωστή $H_{1/3}$, ορίζεται παραδοσιακά ως το μέσο ύψος κύματος (από την κοιλάδα έως την κορυφή), του υψηλότερου τρίτου των κυμάτων, και ω_p είναι η διαμορφωτική (μέγιστη) γωνιακή συχνότητα σε rad/s.

Επιπλέον, η περίοδος αιχμής, $T_p = 2\pi/\omega_p$. Για ένα κανονικό, μονοχρωματικό ωκεάνιο κύμα πλάτους A , γωνιακής συχνότητας ω και σταθεράς φάσης ε , η ανύψωση της επιφάνειας του κινούμενου ωκεανού $\eta(t)$ μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$\eta(x, y, t) = \Re\{A \exp(j * (-kx \cos \theta - ky \sin \theta + \omega t + \varepsilon))\} \quad (2.31)$$

όπου θ είναι η διεύθυνση διάδοσης του κύματος από τον άξονα x . Για την περίπτωση όπου $\varepsilon = 0$, και δεν λαμβάνεται υπόψη η κατευθυντικότητα όταν η κατεύθυνση διάδοσης του ωκεανού είναι κάθετη στην ακτή [2.2.4(37)], η (2.31) επαναδιατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \eta(x, t) &= \Re\{A \exp(j * (-kx + \omega t))\} \\ &= A \cos(\omega t - kx). \end{aligned} \quad (2.32)$$

Εάν παρατηρηθεί η μεταβολή της επιφάνειας του νερού στην αρχή (επίσης η θέση της σηματοδύρας) κάνοντας $x = 0$, έχουμε:

$$\eta(0, t) = A \cos(\omega t) \quad (2.33)$$

Να σημειωθεί ότι το πραγματικό ωκεάνιο κύμα αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό N_f συνιστωσών συχνότητας. Επομένως, το ωκεάνιο κύμα είναι το άθροισμα των ωκεάνιων κυμάτων όλων των συνιστωσών συχνότητας που δίνονται από [2.5(33)]:

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^{N_f} a_i \cos(2\pi f_i t + k_i x + \alpha_i) \quad (2.34)$$

όπου a_i , $k_i = [2\pi/\lambda_i]$, και a_i είναι το πλάτος, ο αριθμός των κυμάτων και η φάση για την i -οστή συνιστώσα συχνότητας f_i . Στα επαρκώς βαθιά νερά, όπου το βάθος νερού $h_w > 0,3\lambda$ [2.8], k_i δίνεται από τη σχέση $k_i = \omega_i^2 / g$, όπου g είναι η σταθερά βαρύτητας. Επιπλέον, κάθε αντίστοιχη συνιστώσα πλάτους a_i ακολουθεί την κατανομή Rayleigh με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function PDF) που δίνεται από:

$$p_a(a_i) = \frac{\pi a_i}{2 \mu_i^2} \exp\left(-\frac{\pi a_i^2}{4 \mu_i^2}\right) \text{ for } a_i \geq 0 \quad (2.35)$$

όπου $\mu_i = E\{a_i\}$ είναι η αναμενόμενη τιμή του πλάτους και a_i είναι η φάση ομοιόμορφα κατανομημένη μεταξύ 0 και 2π με PDF:

$$p_\alpha(\alpha_i) = \frac{1}{2\pi} \text{ for } 0 < \alpha_i \leq 2\pi \quad (2.36)$$

Επιπλέον, το αναμενόμενο πλάτος μ_i κάθε συχνότητας συνιστώσας μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [2.1(30)], [2.2.4(37)]:

$$\mu_i = \sqrt{2 \cdot S_\eta(\omega_i) \cdot \Delta\omega} \quad (2.37)$$

όπου $S_\eta(\omega_i)$ είναι το φάσμα των κυμάτων του ωκεανού που μπορεί να λαμβάνεται χρησιμοποιώντας την (30), και $\Delta\omega$ είναι το εύρος του διαστήματος συχνοτήτων του φάσματος $S_\eta(\omega)$. Επομένως, στη θέση της σηματοδύρας, δηλαδή, $x = 0$, έχουμε:

$$\eta(0, t) = \sum_{i=1}^{N_f} a_i \cos(\omega_i t + \alpha_i) \quad (2.38)$$

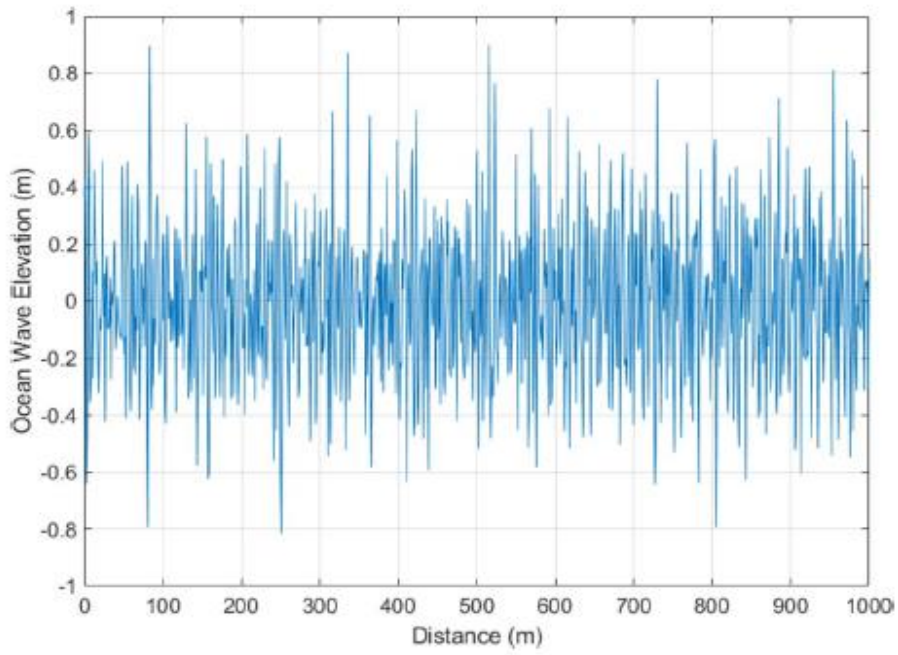
Επιπροσθέτως, σε οποιαδήποτε άλλη θέση, π.χ. x_p , έχουμε επίσης:

$$\eta(x_p, t) = \sum_{i=1}^{N_f} a_i \cos(\omega_i t + k_i x_p + \alpha_i) \quad (2.39)$$

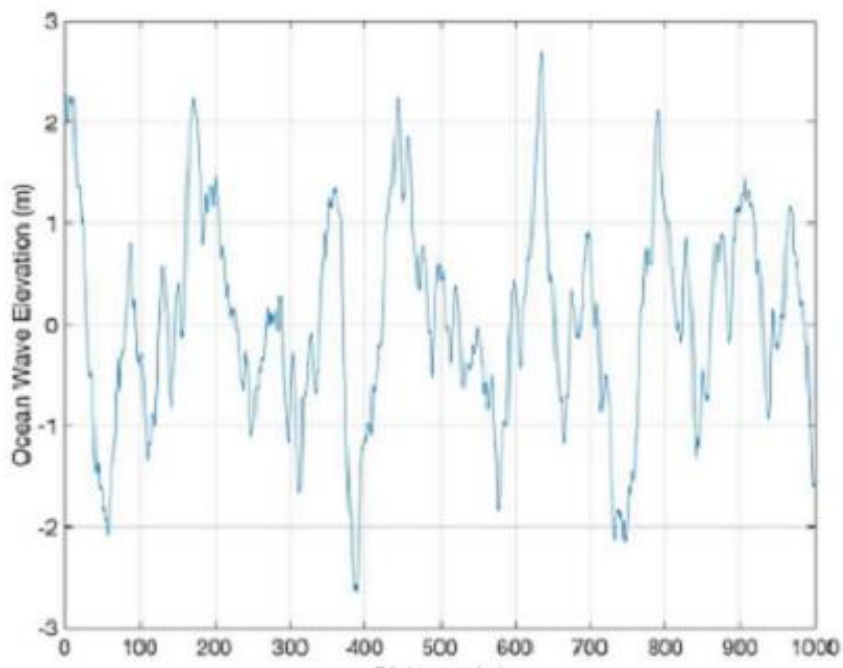
Κατά συνέπεια, μόλις οριστεί ο συνδυασμός των (H_s, T_p) , χρησιμοποιώντας τις (2.35)-(2.39), μπορούμε να προσομοιώσουμε τη χρονική μεταβολή του κύματος του ωκεανού σε οποιαδήποτε θέση μεταξύ του σημαντήρα και του πύργου κινητής τηλεφωνίας στο πεδίο του χρόνου, με το ρυθμιζόμενο χρονικό διάστημα ως ρυθμιζόμενη ανάλυση.

Ειδικότερα, σύμφωνα με τα ιστορικά στοιχεία, δοκιμής πεδίου και της εμπειρίας στην ωκεανομηχανική, το παραγόμενο a_i και το α_i από μία τυχαία υλοποίηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση, για παράδειγμα, θαλάσσιου κύματος διάρκειας 1 λεπτού. Στη συνέχεια, νέα a_i και α_i παράγονται από μια νέα τυχαία υλοποίηση κάθε 1 λεπτό για να μιμηθούν τα πραγματικά παράκτια κύματα.

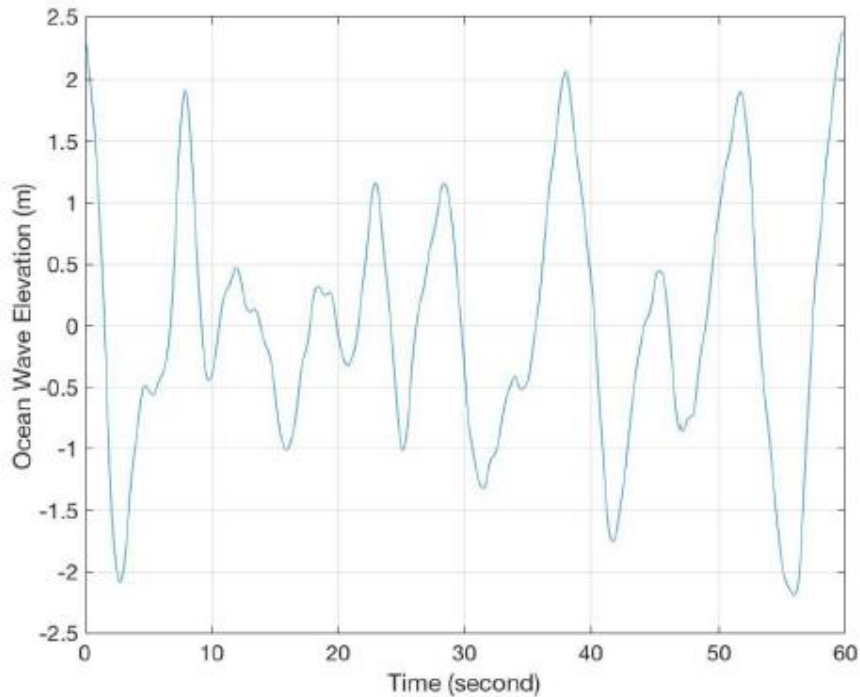
Ως παραδείγματα, τα ωκεάνια κύματα σε απόσταση μεγαλύτερη των 1000 μέτρων σε ορισμένες χρονικές στιγμές δημιουργούνται και απεικονίζονται για δύο συνδυασμούς (H_s, T_p) , αντίστοιχα. Στο Σχήμα 2.5, όπου το H_s είναι 1 m και το T_p είναι 2 s, σε μία χρονική στιγμή κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσής του, η ανύψωση του ωκεάνιου κύματος (Ocean Wave Elevation OWE) κυμαίνεται μεταξύ -0,8 και +1 m, ενώ στο Σχήμα 2.6, το OWE κυμαίνεται μεταξύ -3,6 και +3,2 m για (H_s, T_p) στα (4 m, 10 s). Επιπλέον, εάν καθορίσουμε το σημείο παρατήρησης στη θέση του σημαντήρα, η OWE για περίοδο 1 λεπτού απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.5 Ανύψωση ωκεάνιου κύματος σε απόσταση για (H_s, T_p) στα (1 m, 2 s)
[2.1]



Σχήμα 2.6 Ανύψωση ωκεάνιου κύματος σε απόσταση για (H_s, T_p) στα (4 m, 10 s)
[2.1]



Σχήμα 2.7 Ανύψωση ωκεάνιου κύματος σε περίοδο 1 min για (H_s, T_p) στα (4 m, 10 s) [2.1]

Συνοψίζοντας, η κίνηση και η κινητικότητα στο περιβάλλον του ωκεανού μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις συνθήκες επικοινωνίας. Συνήθως, όταν εμφανίζεται ένας ωκεάνιος κυματοθραύστης μεταξύ της σηματοδότης και του πύργου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, η επικοινωνία LoS δεν είναι διαθέσιμη στις κυψελοειδείς συχνότητες ενδιαφέροντος, λόγω της πολύ ισχυρής εξασθένησης που προκαλείται από την απώλεια της διεύθυνσης. Ωστόσο, η κατοπτρική διαδρομή ή άλλες μη-LoS (NLoS) διάχυτες διαδρομές, σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να εξακολουθούν να υπάρχουν. Αλλά είναι δύσκολο να χαρακτηρίσουμε τέτοιες NLoS επικοινωνίες και να διεξάγουμε την ποσοτική ανάλυση, λόγω του δυναμικού περιβάλλοντος του ωκεανού και των περίπλοκων σεναρίων ανάκλασης και σκέδασης των ωκεάνιων κυμάτων.

Επιπλέον, δεδομένου ότι οι εν λόγω συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών (MPC-Multipath Components) μπορεί να είναι πολύ τυχαίες και αναξιόπιστες, η λαμβανόμενη ισχύς στο σταθμό βάσης πύργου είναι απρόβλεπτη. Επομένως, για τη σκοπιμότητα της ανάλυσης και την αξιοπιστία της πρακτικής ανάπτυξης, όταν ο αποκλεισμός των ωκεάνιων κυμάτων συμβαίνει, δεν υπάρχει ούτε πραγματική LoS ούτε αποτελεσματικές επικοινωνίες NLoS μεταξύ της σηματοδότης και του πύργου.

Από την άλλη πλευρά, αξίζει να αναφερθεί ότι το φαινόμενο του αγωγού που προκαλείται από τη μεταβολή της διαθλαστικότητας (λόγω της μεταβολής της ατμοσφαιρικής πίεσης, της θερμοκρασίας κ.λπ.) σε διαφορετικά ύψη του της ατμόσφαιρας [2.2 (20)] περιλαμβάνει τον αγωγό εξάτμισης που μπορεί να αξιοποιηθεί για θαλάσσιες επικοινωνίες Beyond LoS (B-LoS).

Επιπλέον, ο αγωγός εξάτμισης πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας έχει ένα ύψος εμφάνισης γύρω στα 10-20 m (το πολύ 40 m) και μπορεί να παγιδεύσει τα EM (electromagnetic) κύματα μεταξύ του στρώματος του αγωγού και της επιφάνειας της θάλασσας, γεγονός που μπορεί να επιτρέψει στα σήματα να ταξιδέψουν πάνω από τον οριζοντα χωρίς ιστροπική εξάπλωση [2.9]. Επιπλέον, ο αγωγός εξάτμισης σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με το κλίμα, την εποχή και άλλες ειδικές γεωγραφικές συνθήκες. Για παράδειγμα, στις ισημερινές και τροπικές περιοχές, η πιθανότητα εμφάνισης είναι τόσο υψηλή όσο 90%. Σε ένα ακόμη πείραμα επικοινωνίας που διεξήχθη στο Great Barrier Reef της Αυστραλίας, οι ατμοσφαιρικοί αγωγοί μπορούν να συνδέσουν μια ζεύξη 78 χιλιομέτρων στα 10,5 GHz με ταχύτητα 10 Mb/s και 80% του χρόνου [2.10]. Ωστόσο, ο αγωγός εξάτμισης με δυνατότητα B-LoS κανάλια επιδεικνύουν διάφορα βασικά χαρακτηριστικά, όπως:

- 1) Η ζώνη X (8,0-12,0 GHz) είναι πιο ευνοϊκή από άλλες ζώνες για την ενίσχυση του συνδέσμου επικοινωνίας
- 2) μόνο η μετάδοση εντός μιας συγκεκριμένης ζώνης γωνίας μπορεί να παγιδευτεί στο στρώμα αγωγού.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε αυτήν την παράγραφο, οι ζώνες συχνοτήτων κάτω των 6 GHz (π.χ. LTE Band (Long Term Evaluation) 1/4 και χαμηλές/μεσαίες ζώνες 5G) και οι σηματοδότες αναπτύσσονται κατά μήκος της παράκτιας γραμμής του Ειρηνικού (πάνω από το 48° βόρειο γεωγραφικό πλάτος), η πιθανότητα εμφάνισης του αγωγού εξάτμισης είναι μάλλον μικροσκοπική και ως εκ τούτου, δεν θα ληφθεί υπόψη στην παρούσα παράγραφο.

Κατά συνέπεια, το πιθανοτικό μοντέλο καναλιού LoS παίζει ένα κρίσιμο ρόλο στο πεδίο εφαρμογής της παρούσας εργασίας, και μπορεί να ληφθεί με βάση τη μοντελοποίηση των ωκεάνιων κυμάτων, η οποία δείχνει ότι η πιθανότητα επικοινωνίας LoS, P_{LoS} είναι συνάρτηση της (H_s, T_p) . Προκειμένου να διευκολυνθούν οι ενεργειακά αποδοτικές επικοινωνίες MIoT, το πρώτο βήμα είναι να ληφθούν τα στατιστικά στοιχεία της επικοινωνίας LoS σε διάφορα ωκεάνια περιβάλλοντα.

2.3 Πιθανότητα LoS και συνεχής διάρκεια LoS

(Ενότητα 2.3)

Χρησιμοποιώντας τη μοντελοποίηση των ωκεάνιων κυμάτων, μπορούμε να δημιουργήσουμε πολλές υλοποιήσεις κυμάτων μέσω προσομοιώσεων. Μια γεωμετρική συνθήκη μπορεί να διατυπωθεί και να εξεταστεί για κάθε υλοποίηση για να καθοριστεί αν αυτή η συγκεκριμένη κυματομορφή μπλοκάρει τη σύνδεση LoS μεταξύ της σηματοδότης και της κεραιάς του πύργου κινητής τηλεφωνίας.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, όταν η επικοινωνία LoS απενεργοποιείται από έναν αποκλεισμό ωκεάνιου κύματος που εμφανίζεται στο x_n , υπάρχει $\beta > \alpha$, όπου β είναι η γωνία μεταξύ του LoS και της οριζόντιας στάθμης της θάλασσας και α είναι η γωνία της γραμμής που συνδέει την επιφάνεια της θάλασσας στο $x = x_n$ και την κεραία του πύργου κινητής τηλεφωνίας, σε σχέση με τη στάθμη της θάλασσας. Αυτή η σχέση οδηγεί στα ακόλουθα κριτήρια αποκλεισμού των κυμάτων:

$$\frac{h_{\text{twr}} - (\eta(0, t) + h_a)}{d} > \frac{h_{\text{twr}} - \eta(x_n, t)}{d - x_n} \quad (2.40)$$

όπου h_a είναι το πραγματικό ύψος της κεραίας της σηματοδούρας και αυτό μετράται κάθετα από τη στάθμη της θάλασσας, h_{twr} είναι το ύψος του πύργου κινητής τηλεφωνίας, d είναι η απόσταση μεταξύ της σηματοδούρας και του πύργου κινητής τηλεφωνίας, x_n είναι η οριζόντια θέση που εμποδίζεται το ωκεάνιο κύμα και $\eta(0, t)$ και $\eta(x_n, t)$ είναι το υψόμετρο της επιφάνειας του ωκεανού στη θέση της σηματοδούρας και του μπλοκαρίσματος του ωκεάνιου κύματος, αντίστοιχα.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4, $d = x_c$, $h_a = L_a \sin \beta_a$, L_a είναι η φυσική διάσταση της κεραίας και β_a είναι η γωνία κλίσης που σχηματίζεται μεταξύ της κεραίας και της στάθμης της θάλασσας. Λαμβάνοντας υπόψη τη $L_a \cos \beta_a \ll x_c$, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η κεραία της σηματοδούρας και η σηματοδούρα βρίσκονται στην ίδια οριζόντια αρχή.

Αλγόριθμος 1 Εντοπισμός του πλησιέστερου εμποδίου ωκεάνιου κύματος και ανάλυση της μέσης πιθανότητας επικοινωνίας LoS.

Input: (H_s, T_p) , H_{twr} , h_a , d and N_{rp}
Output: P_{LoS} , statistical distribution of continuous LoS communications with μ_{CLoS} and σ_{CLoS}

- 1: Generate wave number k_i for each frequency component ω_i by setting $k_i := \omega_i^2/g$; set $N_a := 0$; set $N_f :=$ number of frequency components;
- 2: **while** $N_a < N_{\text{rp}}$ **do**
- 3: **for** $t = 0 : \Delta t : T$ (T is the period of one realization for the ocean wave, 60 s, Δt is set to 0.1 s) **do**
- 4: Set $\mu_i := \sqrt{2 \cdot S_\eta(\omega_i) \cdot \Delta \omega}$
 Set $a_i := \text{raylrnd}(\mu_i)$
 Set $\alpha_i := \text{rand}(1, N_f) \times 2 \times \pi$
 $\eta(0, t) = \sum_{i=1}^{N_f} a_i \cos(\omega_i + k_i x + \alpha_i)$
 $\eta(x_n, t) = \sum_{i=1}^{N_f} a_i \cos(\omega_i + k_i x_n + \alpha_i)$
- 5: **for** $x_n = 1 : d$ (search the blocker in current time instance) **do**
- 6: **if** $\frac{h_{\text{twr}} - (\eta(0, t) + h_a)}{d} > \frac{h_{\text{twr}} - \eta(x_n, t)}{d - x_n}$ **then**
- 7: record the distance $d_{\text{blk}} = x_n$ and height of the blocker
 break
- 8: **end if**
- 9: **end for**
- 10: **end for**
- 11: $N_a := N_a + 1$
 regenerate a realization set of a_i and α_i randomly
- 12: **end while**

Ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για τον εντοπισμό του εμποδίου του πλησιέστερου ωκεάνιου κύματος και την ανάλυση της μέσης πιθανότητας LoS και των στοχαστικών τμημάτων CLoS συνοψίζονται στον αλγόριθμο 1, όπου N_{rp} υποδηλώνει τον αριθμό (>1000) των εκτελεσμένων τυχαίων υλοποιήσεων κάθε μία από τις οποίες προσομοιώνει τη δυναμική επιφάνεια ωκεανού μεταξύ της σημαδούρας και του πύργου, εντός ενός χρονικού παραθύρου μήκους T . Η χρονική ανάλυση (βήμα) t πρέπει να είναι να είναι πολλές φορές μικρότερη από το αντιστρόφως ανάλογο του μεγαλύτερου συστατικού συχνότητας f_N (1,5 Hz), εξασφαλίζοντας ότι τα αποτελέσματα της υψηλής ακριβείας προσομοίωσης μπορούν να διατηρηθούν χωρίς να χρειάζεται απαιτητική υπολογιστική ικανότητα. Μέσα σε μια τυχαία υλοποίηση, για κάθε χρονική στιγμή, η αναζήτηση μπλοκαρίσματος εκτελείται στην απόσταση μεταξύ της σημαδούρας και του πύργου, ενώ η θέση και το ύψος του φραγμού των ωκεάνιων κυμάτων επίσης καταγράφονται. Για το χρονικό παράθυρο μήκους T , δημιουργούνται και αναζητούνται συνολικά στιγμιότυπα κύματος $N = T/\Delta t$ μεταξύ της σημαδούρας και του πύργου. Μετά από αυτό, τα a_i και a_i αναγεννώνται για να πάρουμε μια ακόμη υλοποίηση, και ένα σύνολο από N_{rp} υλοποιήσεις εκτελούνται για να ληφθούν στατιστικά συνεπή αποτελέσματα.

Ο δυναμικός αποκλεισμός κυμάτων οδηγεί σε διακοπόμενες συνδέσεις LoS. Για να ποσοτικοποιήσουμε, συμβολίζουμε τα τμήματα CLoS εντός ενός T δευτερολέπτου με χρονικά διαστήματα t_1, t_2, \dots, t_M , και τα τμήματα συνεχούς μπλοκαρισμένου LoS (BLoS) με χρονική διάρκεια $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_M$. Η συνολική διάρκεια του χρόνου LoS ορίζεται ως εξής $T_{LoS} = \sum_{m=1}^M t_m$. Η πιθανότητα επικοινωνίας LoS, P_{LoS} υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{LoS} = \frac{T_{LoS}}{T} = \frac{\sum_{m=1}^M t_m}{T} \quad (2.41)$$

και $P_{BLoS} = 1 - P_{LoS}$. Κατά την προσομοίωση, ο P_{LoS} υπολογίζεται κατά μέσο όρο σε όλες τις υλοποιήσεις N_{rp} .

Για το χαρακτηρισμό της στατιστικής συμπεριφοράς της διάρκειας CLoS, t_{CLoS} , ορίζουμε N διαστήματα για τη διάρκεια T , όπου το k ιστό δοχείο εκτείνεται (t^{k-1}, t^k) και $t^k = k\Delta t$, $k = 1, \dots, N$. Η καταμέτρηση του ιστογράμματος στο k ιστό bin για το t_{CLoS} , h_k , δίνεται από τη σχέση:

$$h_k = \sum_{m=1}^M I(t_m \in (t^{k-1}, t^k]) \quad (2.42)$$

όπου $I(\cdot)$ είναι η συνάρτηση δείκτη που επιστρέφει την τιμή 1 εάν πληρείται η συνθήκη του εσωτερικού συνόλου, αλλιώς την τιμή 0. Το ιστόγραμμα του BLoS μπορεί να ληφθεί με παρόμοιο τρόπο.

Ορίζουμε επίσης μια παράμετρο P^{kT} , που είναι το ποσοστό του χρόνου που καταλαμβάνεται από τμήματα CLoS μήκους t^k επί της συνολικής διάρκειας του LoS, που γράφεται ως εξής:

$$P_T^k = \frac{h_k t^k}{\sum_{i=1}^N h_i t^i} \quad (2.43)$$

όπου $\sum_{i=1}^N h_i t^i$ είναι ο συνολικός χρόνος διάρκειας LoS T_{LoS} . Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε την υπό συνθήκη συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CCDF - conditional complementary cumulative distribution function) της διάρκειας CLoS για να χαρακτηρίσουμε την υπό συνθήκη πιθανότητα η διάρκεια CLoS να είναι μεγαλύτερη από ένα κατώτατο όριο. Αυτό βοηθά στην πράξη να εκτιμηθεί το ποσοστό επιτυχίας της μετάδοσης των πακέτων δεδομένων με ένα συγκεκριμένο μήκος πακέτου. Αυτό είναι:

$$F(t^k | LoS) = P(t_{CLoS} \geq t^k | LoS) = \frac{\sum_{i=k}^N h_i}{\sum_{i=1}^N h_i} \quad (2.44)$$

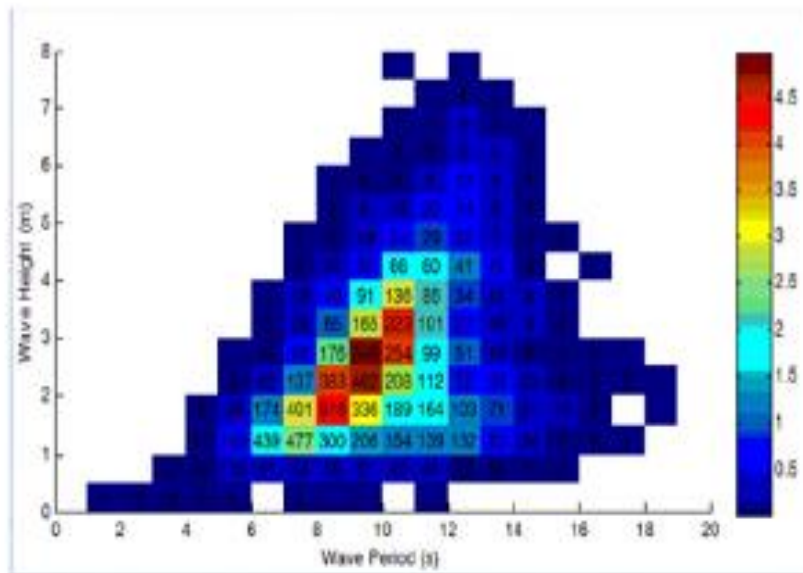
Τέλος, ας υποθέσουμε ότι το ελάχιστο χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων σε ένα σύστημα επικοινωνιών είναι T_h , η πιθανότητα απώλειας LoS ώστε να αποτύχει αυτή η μετάδοση λόγω της δυναμικής των θαλάσσιων κυμάτων μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} P_{out}(T_h) &= P_{BLoS} + P_{LoS} P(t_{CLoS} < T_h | LoS) \\ &= P_{BLoS} + P_{LoS} (1 - F(T_h | LoS)) \end{aligned} \quad (2.45)$$

2.4 Αριθμητική ανάλυση

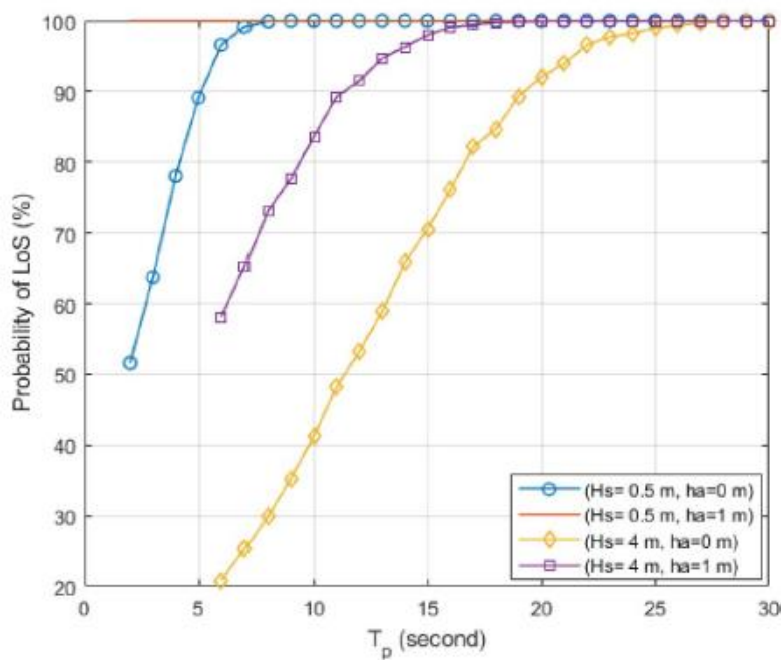
(Ενότητα 2.4)

Μεταξύ των παραμέτρων εισόδου, οι H_{twr} , h_a και d μπορούν να θεωρηθούν ως παράμετροι σχεδιασμού, ενώ οι (H_s, T_p) περιγράφουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ειδικότερα, το πραγματικό ύψος της κεραίας h_a είναι άμεσα σχετικό με το σχεδιασμό και την απόδοση του συστήματος MIoT. Η απόσταση μεταξύ της σημαδούρας και του πύργου, d , είναι επίσης ενδιαφέρουσα για διερεύνηση, δεδομένου ότι επηρεάζει άμεσα τη στρατηγική ανάπτυξης. Η επιλογή των συνδυασμών (H_s, T_p) καθοδηγείται από τα ιστορικά δεδομένα μετρήσεων που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.8, ένα διάγραμμα διασποράς των κυμάτων που εμφανίζονται σε ένα πλήρες έτος στο Tofino, BC, Καναδάς [2.8].



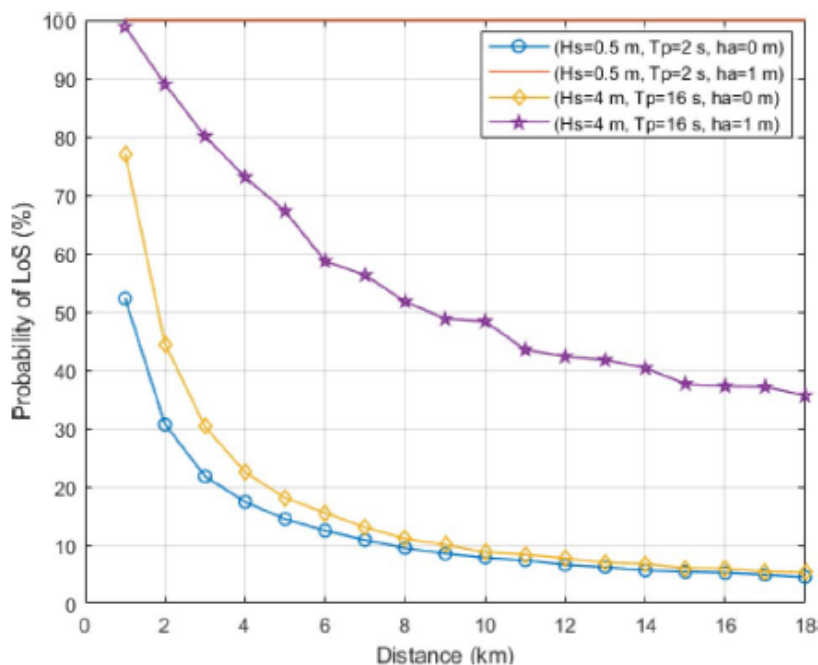
Σχήμα 2.8 Διασπορά των κυμάτων που εμφανίζονται στη διάρκεια ενός έτους στο Tofino, BC, Καναδάς [2.1]

Όταν το πλάτος ενός κύματος φτάσει ένα κρίσιμο επίπεδο στο οποίο μεγάλα ποσά κυματικής ενέργειας μετατρέπονται σε τυρβώδη κινητική ενέργεια, συμβαίνει το φαινόμενο της θραύσης του κύματος. Σε αυτό το σενάριο, τα απλά φυσικά μοντέλα που περιγράφουν τη δυναμική των κυμάτων που υποθέτουν γραμμική συμπεριφορά καθίστανται άκυρα. Επομένως, όλες οι περιπτώσεις με το $H_s > 0,8T_p$ απορρίπτονται και δεν προσομοιώνονται και ως εκ τούτου, το T_p ξεκινά με 2 και 6 s στα 0,5 και 4 m, αντίστοιχα.



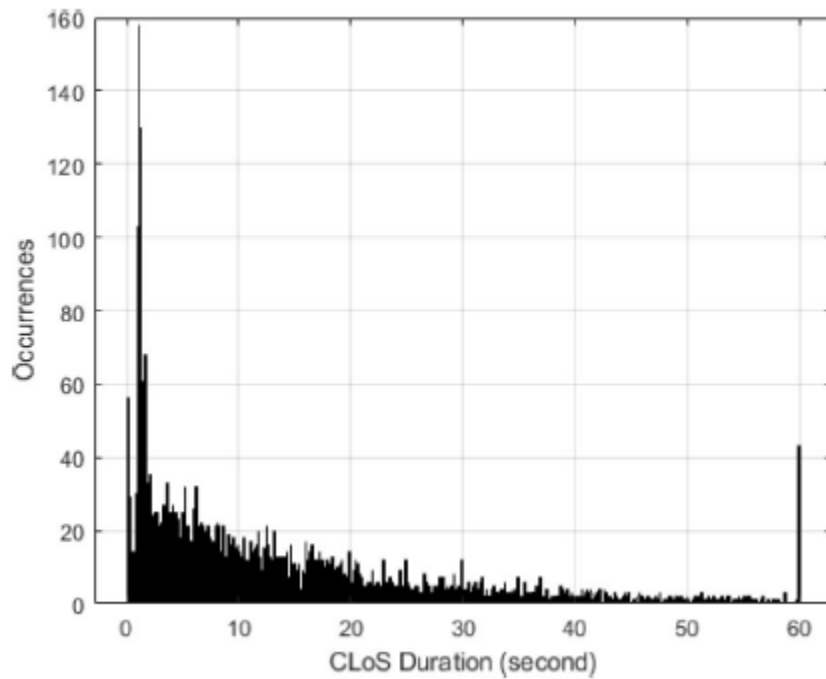
Σχήμα 2.9 Πιθανότητα επικοινωνίας LoS μέσω T_p για H_s στα 0,5 και 4 m, όταν το πραγματικό ύψος της κεραιάς είναι 0 και 1 m αντίστοιχα [2.1]

Στην προσομοίωσή μας, το T ορίζεται σε 60 s και το Δt είναι 0,1 s . Για κάθε συνδυασμό του σεναρίου δοκιμής, τουλάχιστον 1000 πραγματοποιήσεις εκτελέστηκαν για να προκύψουν στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα ενδιαφέροντος. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.9, η πιθανότητα LoS επικοινωνίας πάνω από το T_p για το H_s στα 0,5 και 4 m παρουσιάζεται, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι το P_{LoS} αυξάνεται με το T_p για όλα τα σεναρία . Επιπλέον, η αύξηση του πραγματικού ύψους της κεραίας μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την P_{LoS} . Για παράδειγμα, για (H_s, T_p) συνδυασμό (0,5 m, 2 s), η P_{LoS} σχεδόν διπλασιάζεται από 50% σε 100% όταν αυξάνεται το h_a από 0 σε 1 m . Επιπλέον, P_{LoS} αυξάνεται από 22% σε 58% στην αρχική τιμή του T_p όταν το h_a αλλάζει από 0 σε 1 m. Για άλλους συνδυασμούς (H_s, T_p) , μπορεί επίσης να παρατηρηθεί σημαντική βελτίωση όταν το ύψος της κεραίας αυξάνεται. Το Σχήμα 2.10 δείχνει ότι η LoS πιθανότητα μειώνεται με την απόσταση, ενώ μια υψηλότερη κεραία μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την P_{LoS} , ιδίως σε μεγάλες αποστάσεις .

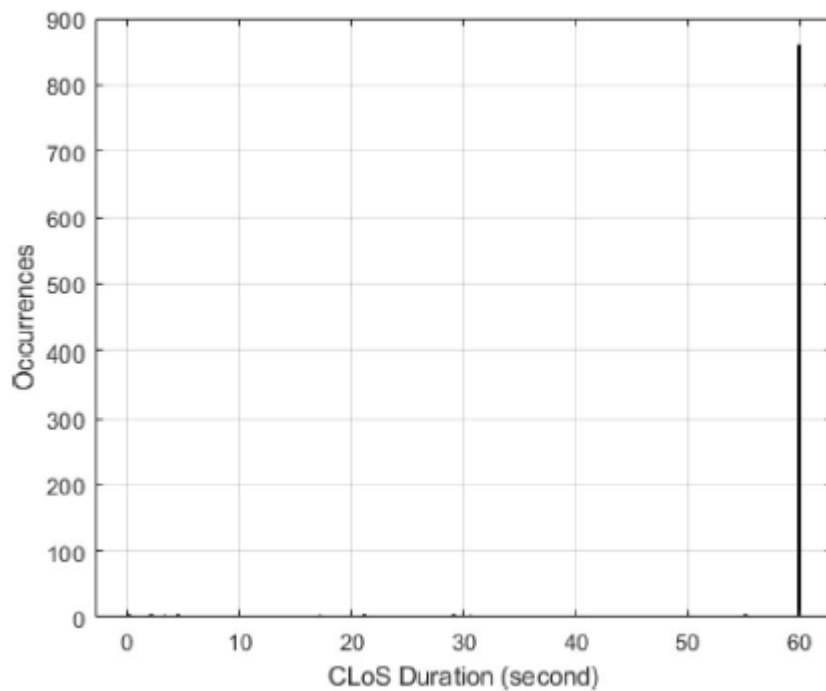


Σχήμα 2.10 Πιθανότητα επικοινωνίας LoS σε απόσταση (H_s, T_p) στα (0,5 m, 2s) και (4 m, 16 s) όταν το πραγματικό ύψος κεραίας h_a είναι 0 και 1 m αντίστοιχα [2.1]

Εκτός από την πιθανότητα LoS, ο χαρακτηρισμός της CLoS παρέχει πολλές πληροφορίες για τον ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό του συστήματος και του πρωτοκόλλου, όπως η συσκευασία και η τμηματοποίηση των δεδομένων, ο προγραμματισμός της μετάδοσης κ.λπ. , για την αύξηση του βαθμού επίδοσης των ριπών δεδομένων και τη μείωση της επαναμετάδοσης . Η αναμετάδοση είναι μια σημαντική πηγή απορρόφησης ενέργειας.



Σχήμα 2.11 Εμφάνιση της διάρκειας CLoS για (H_s, T_p, h_a) στα $(0,12 \text{ m}, 2 \text{ s}, 0 \text{ m})$ [2.1]



Σχήμα 2.12 Εμφάνιση της διάρκειας CLoS για (H_s, T_p, h_a) στα $(0,67 \text{ m}, 2,8 \text{ s}, 0,8 \text{ m})$ [2.1]

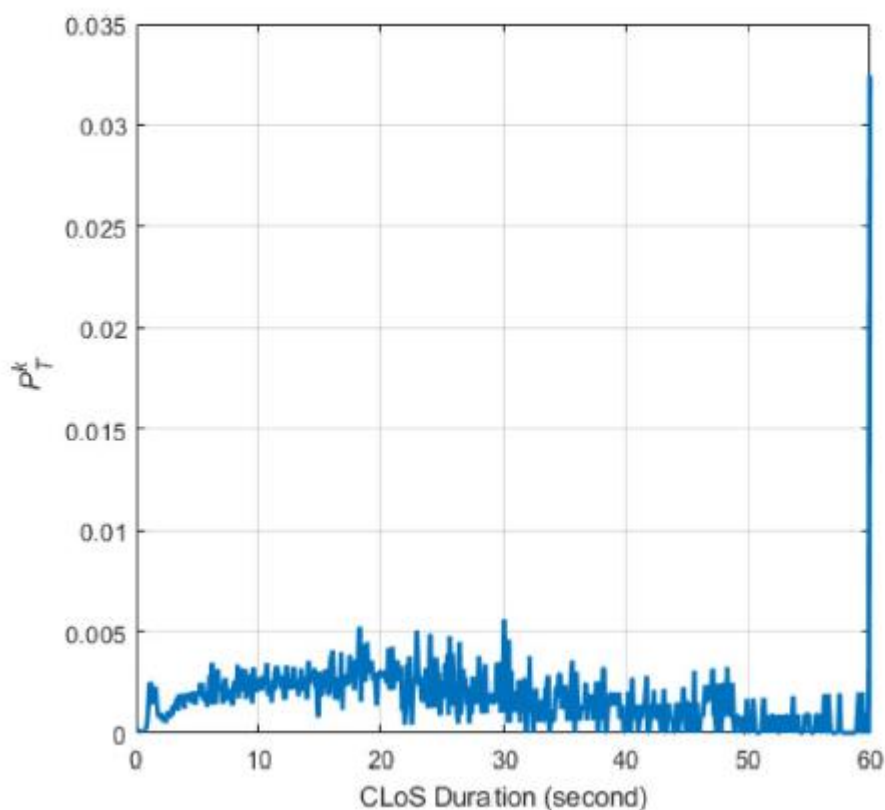
Τα Σχήματα 2.11 και 2.12 δείχνουν την εμφάνιση της διάρκειας CLoS σε διαφορετικούς συνδυασμούς H_s και T_p . $H_s = 0,12 \text{ m}$ και $T_p = 2 \text{ s}$ είναι οι μέσες τιμές του συνόλου δεδομένων μετρήσεων 41 ημερών και 20 ωρών, από το MarineLabs CoastScout κοντά στο Tofino, BC, στον Καναδά, το 2019. Το πραγματικό ύψος της κεραίας $h_a = 0 \text{ m}$. Δεδομένου ότι η χρονική ανάλυση του

CLoS είναι 0,1 s και $T = 60$ s, υπάρχουν 600 δοχεία CLoS που κυμαίνονται από 0,1 s διάρκεια CLoS έως 60 s διάρκεια CLoS.

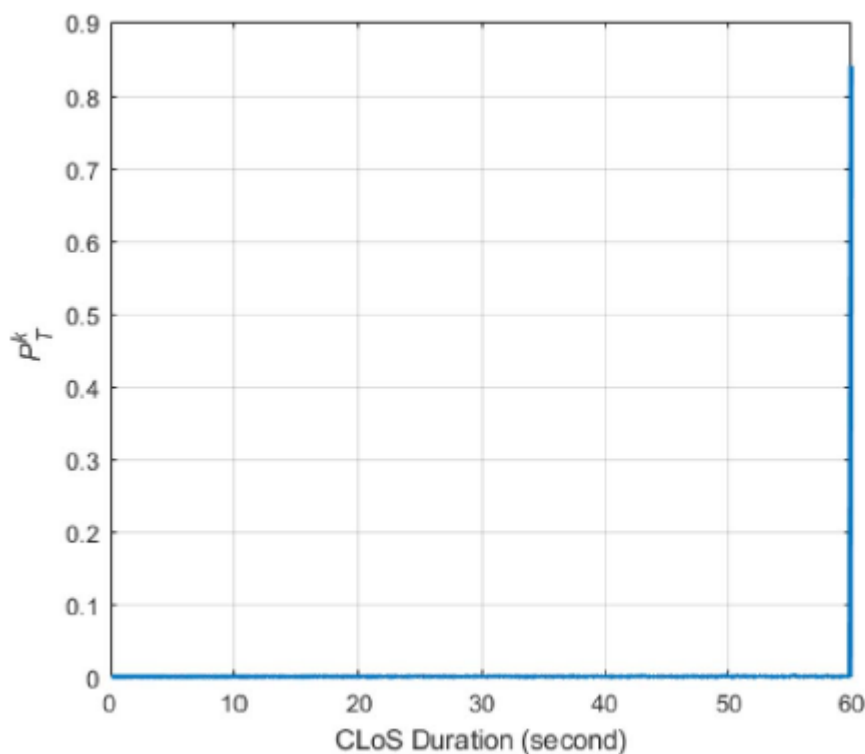
Το ανώτερο όριο περιορίζεται στο εξεταζόμενο χρονικό παράθυρο, αλλά μπορεί να επεκταθεί με τη χρήση ενός μεγάλου T . Στην πράξη, η επιλογή του T μπορεί να καθορίζεται από την επιθυμητή διάρκεια CLoS που μπορεί να ολοκληρώσει τη μετάδοση πακέτων δεδομένων. Σύμφωνα με το αριθμητικό αποτέλεσμα που βασίζεται σε 1000 τυχαίες υλοποιήσεις, υπάρχουν 158/130/103/68/61/56 τμήματα CLoS που διαρκούν για 1,1/1,2/1,0/1,6/1,4/0,1 s, αντιστοίχα. Επιπλέον, υπάρχουν 43 τμήματα CLoS διάρκειας 60 δευτερολέπτων. Η μέση τιμή του CLoS χρονικού διαστήματος μ_{CLoS} είναι 12,98 s ενώ η τυπική απόκλιση σ_{CLoS} είναι 13,07 s. Η πιθανότητα LoS για αυτή την περίπτωση, P_{LoS} , είναι 98,59%.

Στο Σχήμα 2.12, το H_s έχει οριστεί σε 0,67 m, η μέγιστη τιμή από το ίδιο σύνολο δεδομένων μέτρησης. Για (H_s, T_p, h_a) στο (0,67 m, 2,8 s, 0,8 m), υπάρχουν 859 επικοινωνίες CLoS που διαρκούν για 60 s. Η μέση τιμή του χρονικού παραθύρου CLoS μ_{CLoS} είναι 51,37 s ενώ η τυπική απόκλιση σ_{CLoS} είναι 17,09 s, και η P_{LoS} είναι 99,92%. Σε αυτόν τον συνδυασμό, το h_a είναι λίγο υψηλότερο από το H_s .

Το ποσοστό του χρόνου, P_T^k , που καταλαμβάνεται από το CLoS είναι ίσο με $t^k = k\Delta t$ επί του συνολικού χρόνου LoS απεικονίζεται στα Σχήματα 2.13 και 2.14, για δύο συνδυασμούς δοκιμών στα (0,12 m, 2 s, 0 m) και (0,67 m, 2,8 s, 0,8 m), αντιστοίχα.



Σχήμα 2.13 P_T^k για (H_s, T_p, h_a) στα $(0,12 \text{ m}, 2 \text{ s}, 0 \text{ m})$ [2.1]



Σχήμα 2.14 P_T^k για (H_s, T_p, h_a) στα $(0,12 \text{ m}, 2,8 \text{ s}, 0,8 \text{ m})$ [2.1]

Ο πίνακας 2.1 συνοψίζει τα αποτελέσματα CLoS για περισσότερους συνδυασμούς . Εκτός από τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της διάρκειας του CLoS, η γ_{CLoS} αντιπροσωπεύει την πιο πιθανή διάρκεια CLoS η οποία είναι t^k που αντιστοιχεί στο υψηλότερο h_k . Στο σενάριο, όπου ο συνδυασμός (H_s, T_p, h_a) ορίζεται σε $(0,12 \text{ m}, 1 \text{ s}, 0 \text{ m})$, υπάρχουν 443/213/56/55/18/11 τμήματα CLoS που διαρκούν για 0,8/1,9/2,7/3,4/20,2/60 s, αντιστοιχα. Το P_{LoS} είναι 98,591%, με μ_{CLoS} και σ_{CLoS} ίσα με 9,61 και 10,78 s, αντιστοιχα . Επιπλέον, όταν το h_a ορίζεται περαιτέρω σε 0,1 m ή $(H_s, T_p, h_a) = (0,12 \text{ m}, 1 \text{ s}, 0,1 \text{ m})$, η P_{LoS} βελτιώνεται στο 99,999%. Στατιστικά, υπάρχουν 1/1/998 τμήματα CLoS που διαρκούν για 3,9/22,6/60 s, αντιστοιχα. Όπως παρατηρείται από αυτόν τον πίνακα, οι μικρότερες T_p ή υψηλότερες H_s έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερες τιμές των μ_{CLoS} και σ_{CLoS} , και ελαφρώς χειρότερη P_{LoS} . Επίσης, όταν το h_a είναι κοντά στο H_s , και τα δύο P_{LoS} και μ_{CLoS} θα βελτιωθούν σημαντικά.

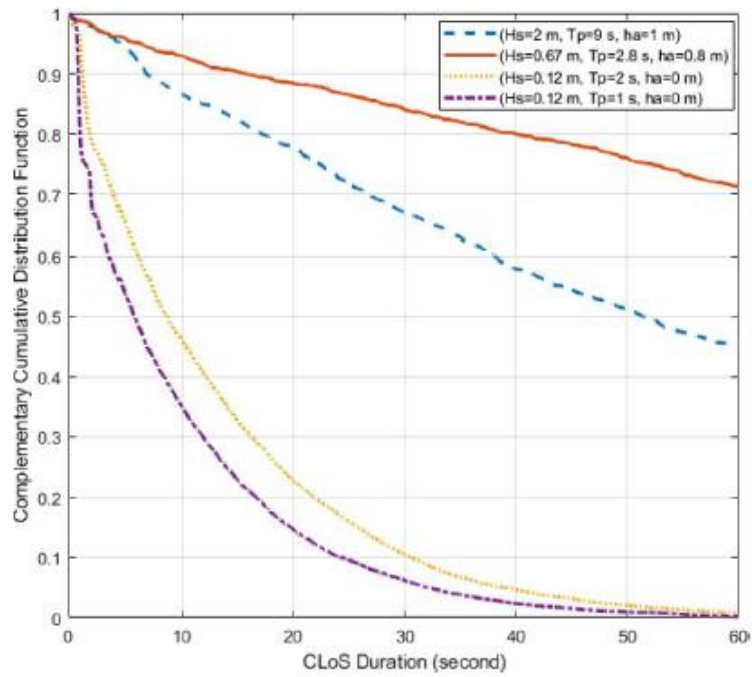
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΚΕΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΩΝ ΓΙΑ ΝΑΥΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ [2.1]

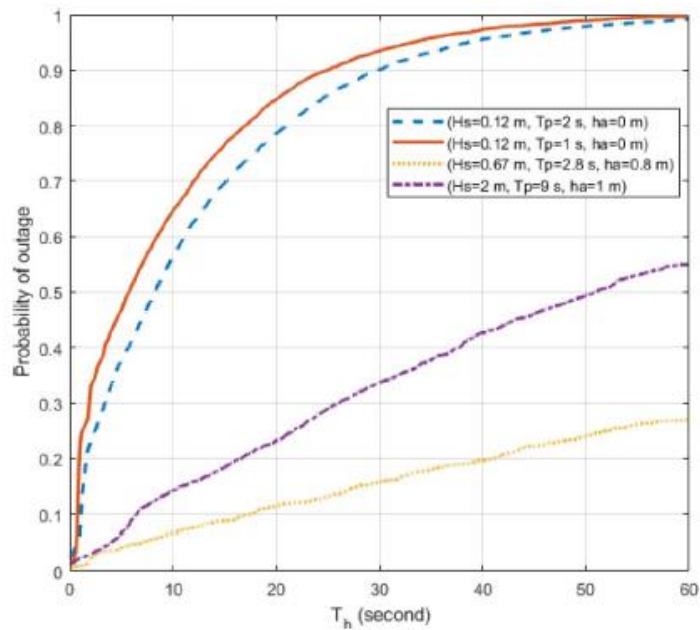
$H_s(\mathbf{m})$	$T_p(\mathbf{s})$	$h_a(\mathbf{m})$	P_{LoS}	$\mu_{CLOs}(\mathbf{s})$	$\sigma_{CLOs}(\mathbf{s})$	$\gamma_{CLOs}(\mathbf{s})$
0.12	2	0	98.595%	12.98	13.07	1.1
0.12	1	0	98.591%	9.61	10.78	0.8
0.12	1	0.1	99.999%	59.88	2.25	60.0
0.24	2	0	81.40%	1.742	1.626	0.9
0.67	2.8	0.4	95.48%	7.87	9.16	0.1
0.67	2.8	0.8	99.92%	51.37	17.09	60.0
2	9	1	99.24%	41.21	21.07	60.0
4	10	1	84.22%	8.78	7.88	4.6
6	14	1	83.46%	10.55	8.94	6.1

Η υπό συνθήκη CCDF της διάρκειας CLoS απεικονίζεται στο Σχήμα 2.15 για τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς (H_s , T_p , h_a) σε (2 m, 9 s, 1 m), (0,67 m, 2,8 s, 0,8 m), (0,12 m, 2 s, 0 m) και (0,12 m, 1 s, 0 m), αντίστοιχα. Όπως παρατηρήθηκε, η αύξηση του αποτελεσματικού ύψους της κεραίας μπορεί να διευρύνει σημαντικά τη διάρκεια του CLoS. Η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας LoS για τέσσερις συνδυασμούς (H_s , T_p , h_a) απεικονίζεται στο Σχήμα 2.16, χρησιμοποιώντας την (45). Να σημειωθεί ότι όλα αυτά τα αποτελέσματα βασίζονται στη ρύθμιση του χρονικού παραθύρου $T = 60$ s.

Ένα μεγαλύτερο T μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν χρειάζεται. Δεδομένης μιας επιθυμητής πιθανότητας διακοπής λειτουργίας LoS, η T_h λαμβάνεται από τις καμπύλες του Σχήματος 2.16 και από αυτόν τον αριθμό το μήκος πακέτου δεδομένων μπορεί να εκτιμηθεί και να σχεδιαστεί ώστε να ταιριάζει με το T_h . Επομένως, ο συνετός σχεδιασμός του πακέτου δεδομένων μπορεί να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας LoS και συνεπώς να αυξήσει την απόδοση των επικοινωνιών και την ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος.



Σχήμα 2.15 Η υπό συνθήκη CCDF της διάρκειας CLoS για (H_s, T_p, h_a) σε τέσσερις συνδυασμούς αντιστοιχα [2.1]



Σχήμα 2.16 Η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας LoS για συνδυασμούς των (H_s, T_p, h_a) στα $(0,12 \text{ m}, 2 \text{ s}, 0 \text{ m})$, $(0,12 \text{ m}, 1 \text{ s}, 0 \text{ m})$, $(2 \text{ m}, 9 \text{ s}, 1 \text{ m})$ και $(0,67 \text{ m}, 2,8 \text{ s}, 0,8 \text{ m})$ [2.1]

2.5 Σχεδιασμός συστημάτων ενεργειακά αποδοτικών θαλάσσιων IoT

(Ενότητα 2.5.1) Πρόκληση ενεργειακής απόδοσης για το θαλάσσιο σύστημα IoT

Τα προαναφερθέντα και αναλυθέντα χαρακτηριστικά των θαλάσσιων επικοινωνιών μπορούν να φέρουν μαζί τους προκλήσεις για την υιοθέτηση των κυψελοειδών επικοινωνιών. Το μπλοκάρισμα των ωκεάνιων κυμάτων προκάλεσε διακοπή των επικοινωνιών LoS , η οποία μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα διάφορα κρίσιμα ζητήματα για τις κυψελοειδείς επικοινωνίες IoT της σημαδούρας. Πρώτον, οι αναστολές των ωκεάνιων κυμάτων προκαλούν την απώλεια της άμεσης επικοινωνίας μεταξύ του σημαντήρα και του πύργου όταν ικανοποιείται το κριτήριο αποκλεισμού. Ειδικότερα, η αποτυχημένη μετάδοση uplink από τη σημαδούρα στον πύργο αυξάνει τις επαναληπτικές προσπάθειες μετάδοσης και, συνεπώς, την καθυστέρηση.

Επιπροσθέτως, η αναμετάδοση μπορεί να καταναλώσει σημαντική ισχύ και να υποβαθμίσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Από τη μία πλευρά, ο(οι) ενισχυτής(ες) ισχύος στο άκρο του πομπού του UE (user equipment) (στην προκειμένη περίπτωση της σημαδούρας) μπορεί να χρειαστεί να λειτουργήσει, μαζί με την/τις κεραία(ες) της σημαδούρας, σε ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ (EIRP- effective isotropic radiated power) τουλάχιστον 20 dBm μέγιστης ισχύος εξόδου (23 dBm σε άλλη κατηγορία ισχύος) . Από την άλλη πλευρά, η υποστήριξη της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας ενός φέροντος (SC-FDMA-single-carrier frequency-division multiple access-) και σχήματα διαμόρφωσης 16-QAM(Quadrature-amplitude-modulation) για ανερχόμενη ζεύξη σε LTE Cat (categories). Ο M1 (που χρησιμοποιείται ευρέως από το κυψελοειδές IoT) μπορεί να προκαλέσει μεγάλη αναλογία κορυφής προς μέση προστιθέμενη ισχύ (PAPR- Peak-to-Average Power Ratio –μετράται σε decibels) περίπου στα 6 dB[2.11]. Λαμβάνοντας περαιτέρω υπόψη την απώλεια παρεμβολής του/των διακόπτη/διακοπών RF (radio frequency), οι κυψελοειδείς PAs(power amplifier) μπορεί να απαιτούν ένα επιπλέον headroom¹ 7 dB ή ισοδύναμη ισχύς αιχμής 27 dBm (decibel-milliwatts)², η οποία μπορεί να μειώσει περαιτέρω τη μέση απόδοση προστιθέμενης ισχύος (PAE- power-added efficiency -) και να δημιουργήσει σοβαρότερες δυσκολίες σχεδιασμού PA για τις κρίσιμες προδιαγραφές, όπως ο λόγος ισχύος διαρροής γειτονικού καναλιού (ACLR - adjacent channel leakage power ratio -) και το σφάλμα διανύσματος σφάλματος

¹ Το Headroom είναι ο διαθέσιμος χώρος σε dB (ντεσιμπέλ) μεταξύ του πιο δυνατού επιπέδου αιχμής -peak (μεταβατικά) και των 0 dBFS (decibels σε πλήρη κλίμακα). Είναι ένα buffer που αφήνεις αχρησιμοποίητο.

² είναι μια μονάδα στάθμης που χρησιμοποιείται για να υποδείξει ότι ένα επίπεδο ισχύος εκφράζεται σε ντεσιμπέλ (dB) με αναφορά σε ένα milliwatt (mW). Χρησιμοποιείται σε δίκτυα επικοινωνίας ραδιοφώνου, μικροκυμάτων και οπτικών ινών ως βολικό μέτρο απόλυτης ισχύος λόγω της ικανότητάς του να εκφράζει τόσο μεγάλες όσο και πολύ μικρές τιμές σε σύντομη μορφή. Το dBW είναι μια παρόμοια μονάδα, που αναφέρεται σε ένα watt (1.000 mW).

(EVM - error vector magnitude -). Η σχέση της μέγιστης ισχύος PA κατανάλωσης και της EIRP του UE είναι

$$EIRP_{UE} = P_{PA,DC} * PAE + P_{PA,IN} - IL_{RF} + G_{ANT} - P_{PBO} \quad (2.46)$$

όπου $P_{PA,DC}$ είναι η συνολική κατανάλωση συνεχούς ισχύος του αυτόνομου PA, $P_{PA,IN}$ είναι η ισχύς RF εισόδου, IL_{RF} (insertion loss of the RF) είναι η εισαγωγή απώλειας του διακόπτη RF, G_{ANT}^3 (antenna gain) είναι το κέρδος της κεραίας και P_{PBO} (power backoff)⁴ είναι το backoff ισχύος του PA . Σύμφωνα με την πρακτική εφαρμογή σεναρίων, είναι λογικό να υποθέσουμε, $G_{ANT} = 0$ dBi, ($P_{PBO} = 6$ dB, $IL_{RF} = 1$ dB, $P_{PA,IN} = 0$ dBm).

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη την τελευταία λέξη της τεχνολογίας PAE που καταδεικνύεται στις υπάρχουσες εργασίες, π.χ., σχεδιασμός PA Doherty [2.11], PA CMOS με νέα class-G για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του Cat. Ο M1 και NB-IoT [2.12] (NarrowBand), και ο σχεδιασμός PA με τη βοήθεια της τεχνικής envelope tracking⁵ (ET) [2.13], ένα ανώτερο όριο PAE ορίζεται στο 40%. Η συνολική κατανάλωση ισχύος συνεχούς ρεύματος, $P_{PA,IN}$, υπολογίζεται έτσι σε 1253 και 2500 mW, για 20 και 23 dBm EIRP, αντίστοιχα.

Επιπλέον, το υπόλοιπο 60% της κατανάλωσης ενέργειας θα μετατραπεί συγκεκριμένα σε, ισχύς σε ανεπιθύμητες συχνότητες (αρμονικά ή διασταυρούμενα προϊόντα), θερμική ενέργεια κλπ. Παρόλο που το σύστημα PA(s) συνεισφέρει σε ένα σημαντικό μεγάλο μέρος, η συνολική κατανάλωση ισχύος της κυψελοειδούς μονάδας IoT μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη. Η μετασχηματισμένη θερμική ενέργεια μπορεί επίσης να προκαλέσει δυνητικά μηχανικά ζητήματα στο σφραγισμένο δωμάτιο μιας συμπαγούς συσκευής IoT.

Όσον αφορά το επίπεδο του ασύρματου συστήματος, οι διακοπές μετάδοσης και τα αιτήματα αναμετάδοσης θα έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερη ισχύ κατανάλωσης και, συνεπώς, σε χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση, η οποία μειώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και αυξάνει το κόστος συντήρησης για τη σηματοδότηση. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα κύματος που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο στη σηματοδότηση και τα αναλυτικά εργαλεία που παρουσιάζονται σε αυτήν την εργασία μπορούν να βοηθήσουν το σχεδιασμό του πρωτοκόλλου για προσαρμοστικό μέγεθος πακέτων δεδομένων και χρονομετρημένο προγραμματισμό της μετάδοσης σύμφωνα

³ Το κέρδος ή το «απόλυτο κέρδος» ορίζεται ως «ο λόγος της έντασης της ακτινοβολίας σε μια δεδομένη κατεύθυνση προς την ένταση της ακτινοβολίας που θα παραγόταν εάν η ισχύς που δέχεται η κεραία ακτινοβολούσε ιστροπικά». Συνήθως αυτή η αναλογία εκφράζεται σε ντεσιμπέλ σε σχέση με ένα ισότροπο θερμαντικό σώμα (dBi).

⁴ Το Power Backoff σε έναν ενισχυτή είναι ένα επίπεδο ισχύος κάτω από το σημείο κορεσμού στο οποίο ο ενισχυτής θα συνεχίσει να λειτουργεί στη γραμμική περιοχή ακόμα κι αν υπάρχει μια ελαφρά αύξηση στο επίπεδο ισχύος εισόδου.

⁵ Η τεχνολογία παρακολούθηση φακέλου (ET envelope tracking) περιγράφει μια προσέγγιση στο σχεδιασμό ενισχυτή ραδιοσυχνοτήτων (RF) στην οποία η τάση τροφοδοσίας που εφαρμόζεται στον ενισχυτή ισχύος ραδιοσυχνοτήτων ρυθμίζεται συνεχώς για να διασφαλίζεται ότι ο ενισχυτής λειτουργεί με μέγιστη απόδοση για την ισχύ που απαιτείται σε κάθε στιγμή μετάδοσης.

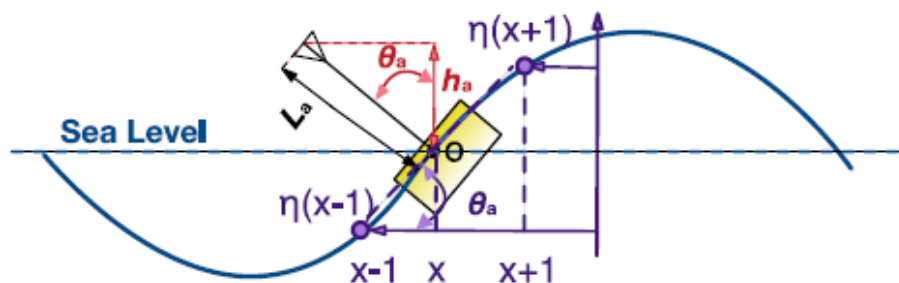
με τις κυματικές συνθήκες. Επιπλέον, οι τεχνικές μείωσης της καθυστέρησης, όπως η εφαρμογή μικρού χρονικού διαστήματος μετάδοσης (TTI- transmission time interval -) και ημι-διαρκούς χρονοπρογραμματισμού μπορούν δυνητικά να εφαρμοστούν σε narrowband 4G LTE [2.14].

Προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η διάρκεια ζωής και η ενεργειακή απόδοση των συσκευών IoT, μια αλλαγή από παραδοσιακή πρόσβαση στο μέσο (MAC⁶- medium access control -) σε κατά απαίτηση αφύπνιση και λειτουργία του πομπού Radio (WuR⁷- Wake-up Radio -) έχει εξεταστεί στην έκδοση 3GPP 16 [2.15], [2.16].

(Ενότητα 2.5.2) Ταυτόχρονος σχεδιασμός υλικού κεραίας και συστήματος

Με βάση την προηγούμενη έρευνα και ανάλυση, η αύξηση του πραγματικού ύψους της κεραίας μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την πιθανότητα επικοινωνίας LoS και να αυξήσει τις μέσες τιμές της διάρκειας CLoS . Επομένως, η ενεργειακή απόδοση του συστήματος που είναι ευθέως ανάλογη του PLoS θα βελτιωθεί επίσης όταν το h_a αυξάνεται. Από την άλλη πλευρά, η τοποθέτηση της κεραίας και το διάγραμμα ακτινοβολίας επηρεάζουν την ποιότητα της επικοινωνίας σε ένα δυναμικό ωκεάνιο περιβάλλον. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να τα χαρακτηρίσουμε μέσω έρευνας υλικού και αριθμητικής ανάλυσης.

Πρώτον, η εγκατάσταση και τοποθέτηση της κεραίας κινητής τηλεφωνίας έξω και πάνω από το κύριο σώμα της σημαδούρας ευνοείται, αν και πιθανότατα οδηγεί σε ορισμένες μηχανικές και σχεδιαστικές προκλήσεις.



Σχήμα 2.17 Μοντελοποίηση της θέσης της κεραίας μιας συσκευής MIoT (σημαδούρας) σε δυναμικό ωκεάνιο περιβάλλον [2.1]

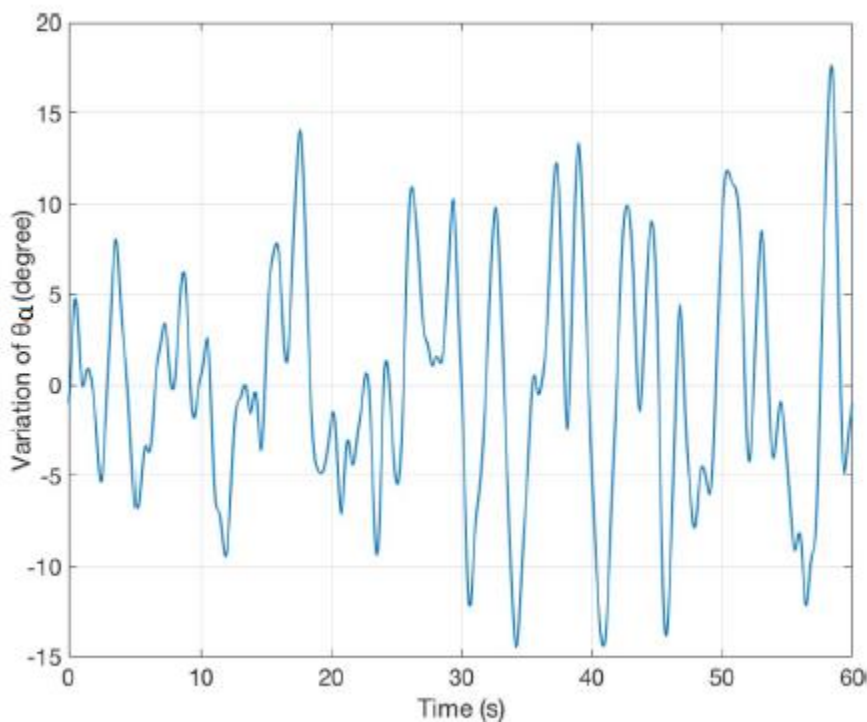
⁶ Ο έλεγχος πρόσβασης πολυμέσων (MAC) είναι ένα υπόστρωμα του επιπέδου σύνδεσης δεδομένων (DLL-data link layer-) στο μοντέλο αναφοράς δικτύου OSI(open system interconnection) επτά επιπέδων. Η MAC είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση πακέτων δεδομένων προς και από την κάρτα διεπαφής δικτύου και προς και από άλλο κανάλι κοινής χρήσης από απόσταση. Η βασική λειτουργία του MAC είναι να παρέχει έναν μηχανισμό διευθυνσιοδότησης και πρόσβασης καναλιού έτσι ώστε κάθε κόμβος που είναι διαθέσιμος σε ένα δίκτυο να μπορεί να επικοινωνεί με άλλους κόμβους που είναι διαθέσιμοι στο ίδιο ή σε άλλα δίκτυα.

⁷ Το Wake up Radio αποτελείται από βασικά κυκλώματα για το σχήμα επικοινωνίας κατ' απαίτηση. Το WuR χειρίζεται την αποστολή και τη λήψη μηνυμάτων αφύπνισης που ενεργοποιούν την κύρια μονάδα επεξεργασίας ή τον πομπό του απαιτούμενου κόμβου.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.17, υποθέτουμε ότι η σημαδούρα (με ακτίνα κάτω από 1 m) συνεχώς ημιβυθίζεται στο νερό του ωκεανού με μια κεραία φυσικής διάστασης L_a ξεχωρίζει από το σημείο "Ο". Μεταξύ της κεραίας και της στάθμης της θάλασσας σχηματίζεται μια χρονικά μεταβαλλόμενη γωνία. Μέσω της χάραξης μιας βοηθητικής εφαπτομένης γραμμής κατά μήκος του σημείου Ο που έχει οριζόντιο συντονισμό x με μονάδα μέτρου, η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κεραίας και της κατακόρυφης γραμμής της στάθμης της θάλασσας, θ_a (επίσης η κλίση της εφαπτομένης γραμμής) μπορεί να είναι προσεγγιστικά ως εξής:

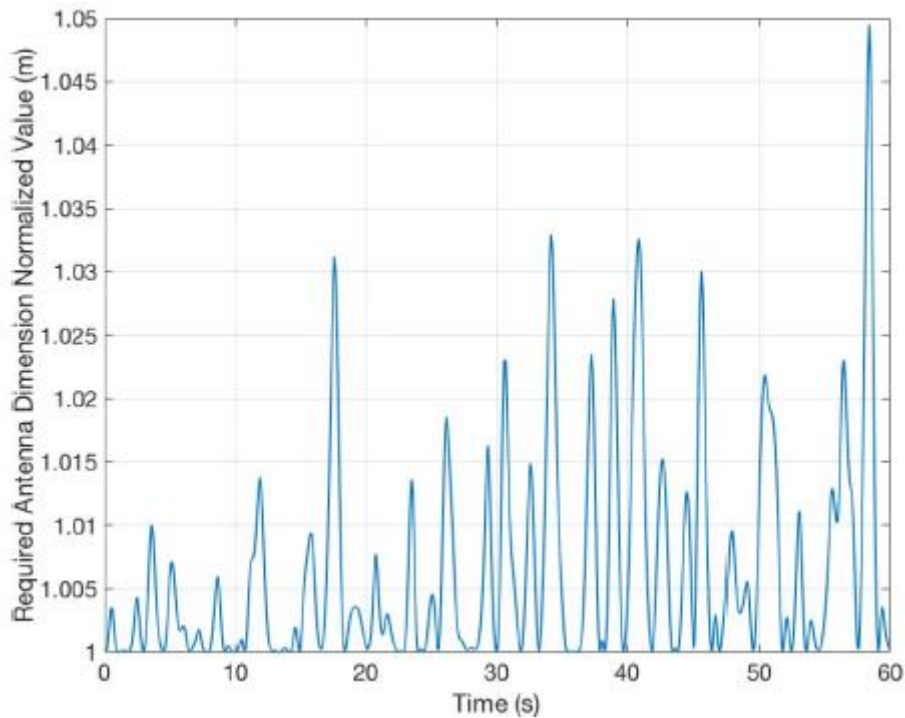
$$\theta_a = \tan^{-1} \left(\frac{\eta(x+1) - \eta(x-1)}{2} \right) \quad (2.47)$$

όπου $\eta(x)$ αντιπροσωπεύει το υψόμετρο της επιφάνειας . Η διακύμανση των θ_a με την πάροδο του χρόνου μπορεί να χαρακτηριστεί για διάφορες συνθήκες ωκεάνιου κύματος μέσω λειπομερούς αριθμητικής ανάλυσης.



Σχήμα 2.18 Η διακύμανση του θ_a με την πάροδο του χρόνου για τον συνδυασμό των κυμάτων του ωκεανού στα (H_s, T_p) στα (10 m , 13 s) [2.1]

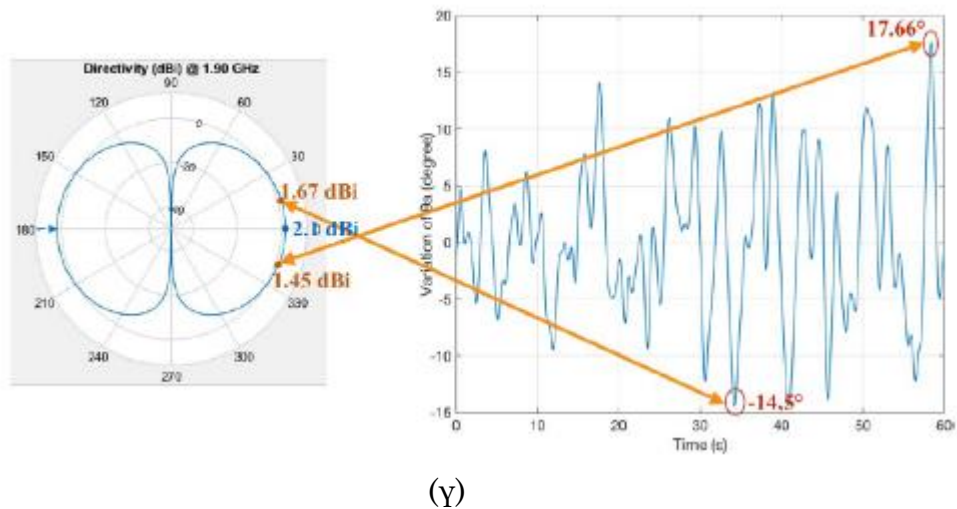
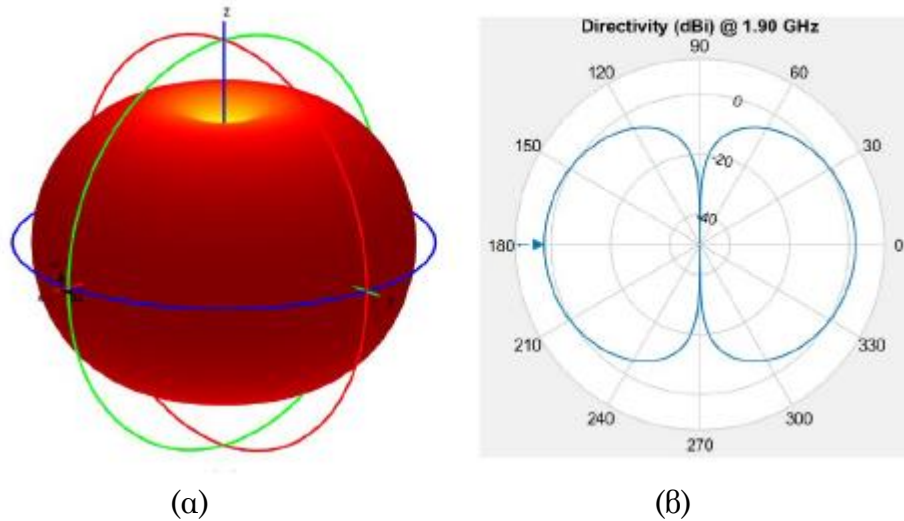
Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.18, στο ακραίο σενάριο (πολύ σπάνιο) όταν το ωκεάνιο κύμα έχει πολύ μεγάλο H_s στα 10 m, το μέγιστο θ_a καταγράφεται στα $17,66^\circ$. Επιπλέον, μέσω της σχέσης $L_a = h_a/\cos(\theta_a)$, οι επιπτώσεις της μεταβολής του θ_a στην διάσταση της κεραίας μπορούν να αποδειχθούν.



Σχήμα 2.19 Απαιτούμενη (κανονικοποιημένη) διάσταση κεραίας για το συνδυασμό ωκεάνιου κύματος (H_s, T_p) στα (10 m , 13 s) [2.1]

Το Σχήμα 2.19 δείχνει την πραγματική απαιτούμενη κανονικοποιημένη διάσταση της κεραίας (σε σύγκριση με την αρχική διάσταση της κεραίας όταν η θ_a είναι μηδέν) για μια περίοδο T . Λόγω της χρονικής μεταβολής του θ_a , το απαιτούμενο L_a μεταβάλλεται επίσης σημαντικά, με μέγιστη τιμή 1,049 m που εντοπίζεται στα 58,4 s. Επιπλέον, όταν ο συνδυασμός (H_s, T_p) τίθεται περαιτέρω σε (1 m, 2 s), που μπορεί να είναι μια πιο συχνά παρατηρούμενη περίπτωση, ένα μέγιστο θ_a των $9,338^\circ$ παρατηρείται, το οποίο μεταφράζεται σε απαιτούμενη (κανονικοποιημένη) διάσταση κεραίας 1,013 m.

Επιπλέον, η μεταβολή θ_a πρέπει να αντιστοιχιστεί στη μεταβολή του κέρδους της κεραίας και της ζεύξης μέσω του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας. Γενικά, αρκετές υποψήφιες κεραίες που είναι σχεδόν ομοιοκατευθυντικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κυψελοειδή επικοινωνία της σημαδούρας, όπως Dipole, Monopole, Bowtie, κλπ. Πάρτε την κάθετα πολωμένη διπολική κεραία που λειτουργεί στο κέντρο σε συχνότητα 1,9 GHz (LTE Band 1 uplink) για παράδειγμα, τα τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας και ανύψωσης απεικονίζονται στα Σχήματα 20(α) και (β). Το Σχήμα 20(γ) δείχνει την απεικόνιση μεταξύ της γωνίας κλίσης της κεραίας και του κέρδους ακτινοβολίας. Ενώ η μέγιστη κατευθυντικότητα της κεραίας είναι 2,1 dBi, το μέγιστο θ_a των $17,66^\circ$ μπορεί να οδηγήσει σε 1,45 dBi κατευθυντικότητα. Επιπροσθέτως, η κατευθυντικότητα κυμαίνεται μεταξύ 1,45 και 2,1 dBi σε ολόκληρη τη μεταβολή του θ_a .



Σχήμα 2.20 Διπολική κεραία (α) μοτίβο 3-D ακτινοβολίας, (β) υψομετρική κατευθυντικότητα και (γ) αντιστοίχιση μεταξύ κέρδους κεραίας και της διακύμανσης $\Delta\theta_a$ (°) όταν ο συνδυασμός (H_s , T_p) είναι ίσος με (10 m , 13 s) [2.1]

Αρκετοί άλλοι τύποι κεραιών και συνδυασμοί ερευνώνται και συνοψίζονται στον Πίνακα 2.2. Οι αναφερόμενες κεραιές έχουν όλες συμμετρικά σχεδόν ομοιοκατευθυντικά διαγράμματα ακτινοβολίας.

Ειδικότερα, η BiCone κεραία έχει συγκριτικά χαμηλό κέρδος με επίπεδη διακύμανση αλλά καταλαμβάνει το μεγαλύτερο εύρος ζώνης μεταξύ όλων και μπορεί να εξεταστεί για πολυζωνικές υποστηριζόμενες κυψελοειδείς εφαρμογές IoT. Αξίζει να αναφερθεί ότι ορισμένες μη καταχωρημένες κεραιές, όπως οι κεραιές Yagi- Uda, Vivaldi, κ.λπ., έχουν επίσης διερευνηθεί αλλά κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δεν είναι ιδανικές υποψήφιες λόγω του ασύμμετρου διαγράμματος ακτινοβολίας (ισχυρές μόνο σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση ή ημισφαίριο).

Τέλος, με βάση τα προηγούμενα και νέα (κεραία και συστήματα hardware) σχέδια έχουν αναπτυχθεί, αντίστοιχα, τα αποτελέσματα των δοκιμών και η ανάλυση των δεδομένων έδειξαν ότι η αύξηση του ύψους της κεραίας μπορεί να καταπολεμήσει το πρόβλημα αποκλεισμού LoS και να βελτιώσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ [2.1]

$H_s(\mathbf{m})$	$T_p(\mathbf{s})$	$\text{Max}\Delta\theta_a(^{\circ})$	Antenna Type	Max. $L_a(\mathbf{m})$	Directivity (dBi)
10	13	17.66	Dipole	1.049	2.1 – 1.45
1	2	9.338	Dipole	1.013	2.1 – 1.91
10	13	17.66	Monopole	1.049	0.89 – 1.18
10	13	17.66	Bowtie	1.049	1.43 – 1.94
10	13	17.66	BiCone	1.049	0.56 – 0.66

Επιπλέον, η επιλογή του κατάλληλου τύπου κεραίας ανάλογα με την ακτινοβολία και η ρύθμιση του ύψους της κεραίας με βάση την ισορροπία μεταξύ της μηχανικής σταθερότητας της σηματοδούρας και της ασύρματης αποδοτικότητας, είναι ο βασικός παράγοντας ενεργοποίησης ολόκληρου του συστήματος .

Συνοψίζοντας, το δυναμικό ωκεάνιο περιβάλλον μπορεί να προκαλέσει δραματική αλλαγή της θέσης της κεραίας και, συνεπώς, της χρονικής μεταβολής του κέρδους της κεραίας. Δεδομένου ότι η μεταβολή της κατευθυντικότητας μεταφράζεται άμεσα στη μεταβολή του υπολογισμού της ζεύξης επικοινωνίας, η επιλογή και η τοποθέτηση των κατάλληλων κεραιών παίζει καθοριστικό ρόλο. στην εξασφάλιση πιο αξιόπιστων θαλάσσιων επικοινωνιών και τη διευκόλυνση της υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΡΑΔΙΟ-ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΕΡΑΝ ΟΠΤΙΚΗΣ ΕΠΑΦΗΣ (Beyond-Line-of-Sight)

3.1 Εισαγωγή

(Ενότητα 3.1)

Με την υψηλή ζήτηση των θαλάσσιων δραστηριοτήτων, οι τεχνολογίες θαλάσσιων επικοινωνιών έχουν αναπτυχθεί ραγδαία. Λόγω της πολυπλοκότητας του θαλάσσιου περιβάλλοντος και της στενής κάλυψης δικτύου στους ωκεανούς, υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης των θαλάσσιων επικοινωνιών.

Έτσι, περισσότερη ερευνητική προσοχή θα πρέπει να επικεντρωθεί στα θαλάσσια συστήματα επικοινωνιών. Αν και η ευρύτερη κάλυψη των θαλάσσιων επικοινωνιών μπορεί να επιτευχθεί με δορυφόρους, είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί ένα αποτελεσματικό μοντέλο καναλιού, ώστε να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω έρευνα των θαλάσσιων επικοινωνιών σχετικά με την αβεβαιότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος [3.1].

3.2 Μοντέλα θαλάσσιων καναλιών

(Ενότητα 3.2)

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα σύστημα θαλάσσιων επικοινωνιών, είναι απαραίτητο να εξεταστούν τα μοντέλα θαλάσσιων καναλιών, τα οποία έχουν διερευνηθεί στα [3.2]-[3.6]. Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα μοντέλα θαλάσσιων καναλιών. Στη συνέχεια, εστιάζουμε στα τρία κύρια μοντέλα που έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις ασύρματες διαδόσεις στη θάλασσα.

3.2.1 Μοντέλο απωλειών διαδρομής ελεύθερου χώρου

(Ενότητα 3.2.1)

Σε γενικές γραμμές, η απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου είναι το βασικότερο μοντέλο καναλιού σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Η απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου αναφέρεται στην απώλεια της ισχύος του ηλεκτρομαγνητικού σήματος σε

μια διαδρομή οπτικής επαφής μέσω ελεύθερου χώρου (συνήθως αέρα) χωρίς ανάκλαση ή περίθλαση που προκαλείται από κοντινά εμπόδια [3.4].

Οι Reyes και Mariscal [3.7] έχουν αναλύσει σε βάθος την απώλεια διαδρομών ελεύθερου χώρου.

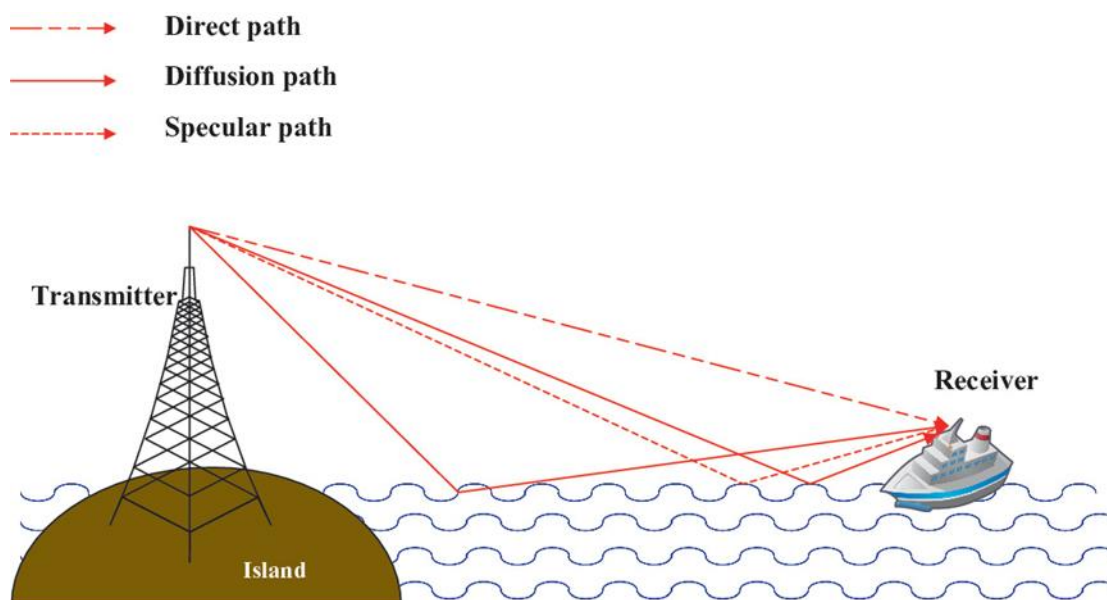
Σε αυτή τη βάση, οι W. Wang κ.α. πρότειναν την απώλεια διαδρομής των άπειρων κυκλωμάτων πλοίου-εδάφους σε περιβάλλον λιμένα ανάλογα με τη γεωμετρία στο [3.8].

3.2.2 Μοντέλο διάδοσης πολλαπλών ακτινών

(Ενότητα 3.2.2)

Το φαινόμενο πολλαπλών ακτινών δημιουργείται όταν τα ασύρματα σήματα διαδίδονται στην επιφάνεια της θάλασσας. Ο δέκτης λαμβάνει τα σήματα από διαφορετικές διαδρομές που προκαλούνται από την ανάκλαση στην επιφάνεια της θάλασσας και τη διάθλαση στην ατμόσφαιρα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, οι διαδρομές διάδοσης του θαλάσσιου σήματος περιλαμβάνουν την άμεση διαδρομή, την κατοπτρική διαδρομή και τη διαδρομή διάχυτης ανάκλασης. Όλα αυτά αποτελούν το μοντέλο διάδοσης πολλαπλών διαδρομών στην επιφάνεια της θάλασσας.



Σχήμα 3.1 Μοντέλο ράδιο-διάδοσης πολλαπλών ακτινών [3.1]

Οι Cao και Jiang [3.9] δημιούργησαν ένα μοντέλο διάδοσης δύο μονοπατιών και ένα μοντέλο διάδοσης τριών μονοπατιών με Ka-band στην επιφάνεια της θάλασσας,

δείχνοντας ότι το μοντέλο τυχαίου καναλιού γέφυρας είναι χρήσιμο για το μοντέλο διάδοσης πολλαπλών διαδρομών με Ka-band στην επιφάνεια της θάλασσας.

Ένα κατοπτρικό μονοπάτι ανάκλασης θα εμφανιστεί στην επιφάνεια της θάλασσας όταν η επιφάνεια της θάλασσας είναι αχιβάδα χωρίς κύματα. Και η τραχιά επιφάνεια της θάλασσας μπορεί να δημιουργήσει ταυτόχρονα ένα μονοπάτι ανάκλασης διάχυσης με κύματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

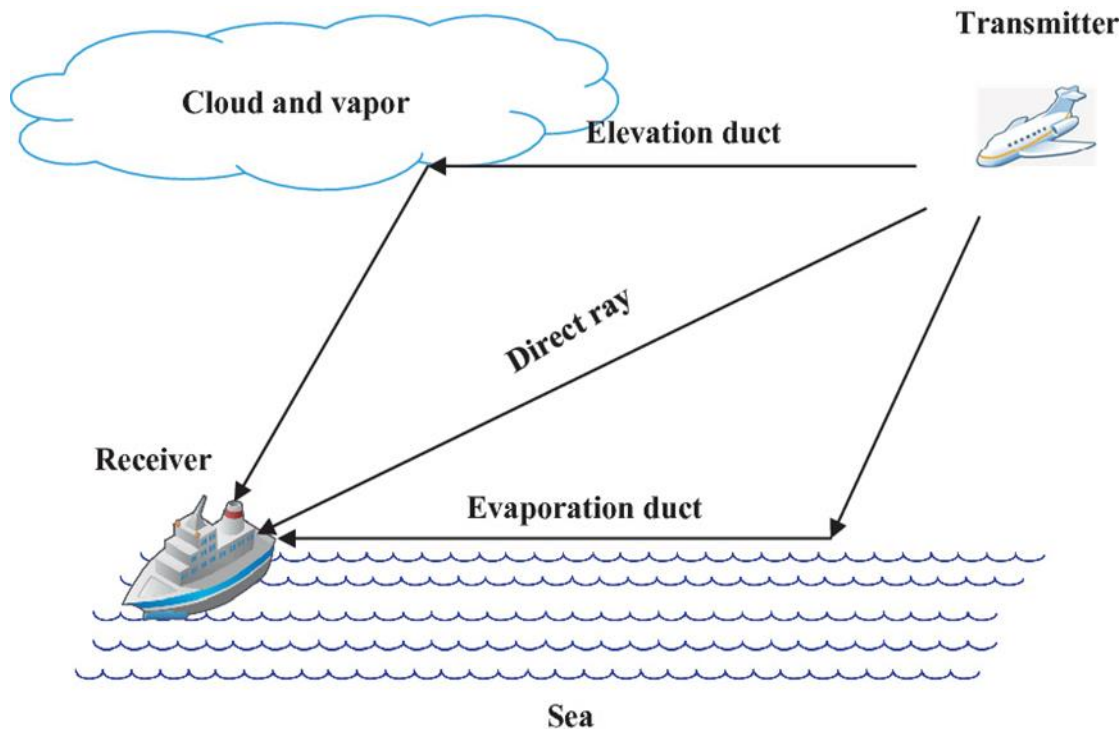
Οι Durgin κ.ά. [3.10] πρότειναν ένα μοντέλο δύο κυμάτων με ισχύ διάχυσης (TWDP) για να περιγράψουν την ανάκλαση διάχυσης με τη μάζα των συνιστωσών πολλαπλών διαδρομών. Λόγω της τεράστιας έκτασης των ωκεανών, οι θαλάσσιες επικοινωνίες πραγματοποιούνται συνήθως υπό πολύπλοκες συνθήκες καναλιού. Επιπλέον, η ακτίνα της γης, η τραχύτητα της επιφάνειας της θάλασσας και περισσότερα σκάφη προκαλούν παρεμβολές και φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών [3.4]. Επομένως, η διάδοση πολλαπλών διαδρομών στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι επίσης σημαντική και θα πρέπει να λαμβάνεται προσεκτικά υπόψη στον μετέπειτα σχεδιασμό των θαλάσσιων ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας.

3.2.3 Επιδράσεις αγωγών

(Ενότητα 3,2.3)

Στις θαλάσσιες ασύρματες επικοινωνίες, η βροχόπτωση και τα σύννεφα είναι σημαντικοί παράγοντες για την απώλεια ασύρματων επικοινωνιών στη θάλασσα. Για τη διάδοση των ραδιοκυμάτων, τα φαινόμενα αγωγών είναι αναγνωρισμένη μέθοδος διάδοσης που μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Όταν οι υδρατμοί μειώνονται ή η θερμοκρασία αυξάνεται, ο αγωγός τείνει να σχηματίζεται γρήγορα καθώς αυξάνεται το ύψος πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Τα φαινόμενα αγωγών περιλαμβάνουν τον αγωγό εξάτμισης και τον αγωγό ανύψωσης.

Ο αγωγός εξάτμισης υπάρχει σχεδόν πάντα, ως αποτέλεσμα της υγρασίας στη θάλασσα. Όταν το υψόμετρο αυξάνεται στα 600-3000 m, ο αγωγός ανύψωσης αρχίζει να εμφανίζεται με την αλλαγή της υγρασίας, της πίεσης και της θερμοκρασίας στην τροπόσφαιρα [3.12]. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται οι δύο κύριες μορφές φαινομένων αγωγών.



Σχήμα 3.2 Τα αποτελέσματα των αγωγών εξάτμισης και των υπερυψωμένων αγωγών [3.1]

Τα αποτελέσματα των αγωγών έχουν διερευνηθεί στις εργασίες [3.10]-[3.13]. Οι G.D. Durgin κ.ά. μελέτησαν την ύπαρξη φαινομένων αγωγών που μπορούν να προκαλέσουν ενίσχυση του σήματος και βελτίωση της διάδοσης των ναυτικών ασυρμάτων στο [3.10]. Σε αυτή τη βάση, οι E.Dinc κ.α. εισήγαγαν τους λόγους για το σχηματισμό των φαινομένων αγωγιμότητας στο [3.13] και πρότειναν ένα μοντέλο καναλιού των φαινομένων αγωγιμότητας με παραβολική εξίσωση και οπτική ακτινών.

Γενικά, λόγω της πολυπλοκότητας των θαλάσσιων περιβαλλόντων, τα φαινόμενα αγωγών είναι ευεργετικά για τη θαλάσσια ραδιοδιάδοση.

Έτσι, τα φαινόμενα αγωγών είναι επίσης τα πιο χαρακτηριστικά μοντέλα καναλιών των θαλάσσιων περιβαλλόντων.

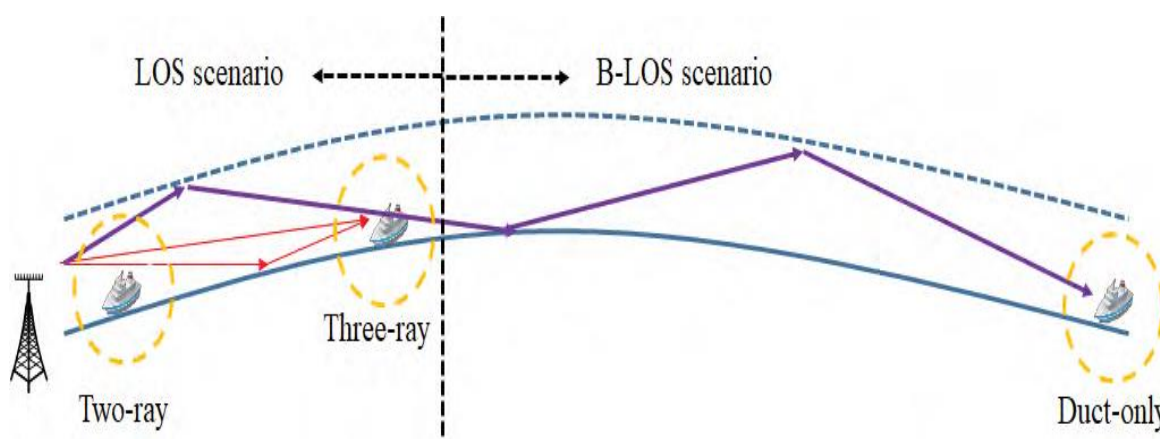
3.3 Ράδιο - διάδοση Beyond-Line-of-Sight (B-LOS)

(Ενότητα 3.3)

Η μετάδοση Beyond-Line-of-Sight (B-LOS) είναι δυνατή στις θαλάσσιες επικοινωνίες χάρη στο φαινόμενο του αγωγού πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ως μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την επίτευξη αποστολής μεγάλων αποστάσεων και υψηλής ασφάλειας, η μετάδοση B-LOS με χρήση του φαινομένου ducting έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή στις στρατιωτικές επικοινωνίες.

Για τα σήματα X-band, η εμβέλεια επικοινωνίας μπορεί να επεκταθεί δραματικά έως και 1000 km με τη βοήθεια του στρώματος αγωγού [3.13]. Στο προηγούμενο

υποκεφάλαιο, έχει αποδειχθεί ότι μια τρίτη ακτίνα από το στρώμα αγωγού μπορεί να εισάγει επιπλέον μηδενισμούς στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος.



Σχήμα 3.3 Απεικόνιση των συνδέσεων καναλιών κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, οι οποίες εξαρτώνται από την τοποθεσία [3.3]

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3, όταν οι διαδρομές LOS και ανάκλασης εξαφανίζονται σε μεγάλη απόσταση Tx-Rx, δηλαδή πέρα από το dLOS, το ασύρματο κανάλι βασίζεται αποκλειστικά στη ραδιοδιάδοση στο στρώμα αγωγού. Για την καλύτερη κατανόηση του θαλάσσιου καναλιού B-LOS, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως εργαλεία διάδοσης κυμάτων, π.χ. τα AREPS και PETOOL [3.12], για την επίλυση της προσέγγισης της παραβολικής εξίσωσης (PE) της κυματικής εξίσωσης Helmholtz με αριθμητικά μέσα [3.12].

Έχουμε:

$$d_{LOS} = \sqrt{h_t^2 + 2h_t R} + \sqrt{h_r^2 + 2h_r R} \quad (3.1)$$

όπου h_t και h_r είναι τα ύψη των κεραιών Tx και Rx, και R είναι η ακτίνα της Γης.

Οι απώλειες διαδρομής μπορούν να προκύψουν ανάλογα με την επίλυση των PE. Η θεμελιώδης θεωρία της μεθόδου PE και μια σειρά εφαρμογών της βρίσκονται στις εργασίες [3.14]-[3.17]. Αν και η μέθοδος PE μπορεί να επιλύσει αποτελεσματικά το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης και να εκτιμήσει την ένταση του πεδίου σε οποιαδήποτε ενδιαφέρουσα θέση, δεν μπορεί να περιγράψει τα χαρακτηριστικά διάδοσης στο πεδίο της χωρικής ή της καθυστέρησης, δηλαδή την AOA/AOD και την εξάπλωση καθυστέρησης.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, εισάγεται η μέθοδος οπτικής ακτίνων (RO), ή αλλιώς οπτική ανίχνευση ακτίνων (ORT), για την εύρεση της τροχιάς κάθε ακτίνας με την επίλυση της εξίσωσης του Snell [3.14]-[3.17]. Η μέθοδος ORT αποκαλύπτει περισσότερες λεπτομέρειες διάδοσης με κόστος την υψηλότερη

υπολογιστική πολυπλοκότητα. Στην πράξη, οι μέθοδοι PE και ORT μπορούν να συνδυαστούν για να παρέχουν ακριβέστερη περιγραφή του καναλιού [3.18], [3.19].

Αρκετά βασικά χαρακτηριστικά έχουν αναφερθεί για το θαλάσσιο κανάλι B-LOS μέσω μετρήσεων ή προσομοιώσεων: 1) Η ικανότητα μετάδοσης B-LOS εξαρτάται από τη συχνότητα φέροντος, όπου έχει αποδειχθεί ότι η ζώνη X είναι προτιμότερη.

Στο [3.20], οι ερευνητές δημιούργησαν μια υψηλής ταχύτητας μικροκυματική σύνδεση B-LOS που λειτουργεί στα 10,5 GHz στην Αυστραλία και καταγράφηκε απώλεια διαδρομής 141 dB σε απόσταση 80 km, ενώ τα σήματα της ζώνης C (4-8 GHz) παρουσίασαν περίπου 30 dB υψηλότερη απώλεια διαδρομής στην ίδια απόσταση.

Το φαινόμενο αυτό επιβεβαιώθηκε και από τις προσομοιώσεις με τη χρήση του PETOOL. 2) Μόνο η εκπομπή εντός ενός συγκεκριμένου εύρους γωνιών, δηλαδή το εύρος δέσμης παγίδευσης όπως δηλώνεται στο [3.12], μπορεί να παγιδευτεί στο στρώμα αγωγού, ενώ τα ραδιοκύματα που εκπέμπονται εκτός αυτού του εύρους θα διαδοθούν στην ατμόσφαιρα. Η μέγιστη και η ελάχιστη γωνία παγίδευσης είναι συμμετρικές και δίνονται από [3.12]:

$$\theta_{max/min}^T = \pm \sqrt{2 \left(\frac{1}{n(0)} \frac{\partial n}{\partial z} + \frac{1}{R} \right) (h_t - h_e)} \quad (3.2)$$

όπου n είναι ο ατμοσφαιρικός δείκτης διάθλασης, ο οποίος είναι συνάρτηση του z , του κατακόρυφου ύψους. $n(0)$ είναι μια σταθερή τιμή αναφοράς, R είναι η ακτίνα της γης, h_t και h_e είναι τα ύψη της κεραίας Tx και του στρώματος αγωγού, αντίστοιχα. Με h_t 27 m και h_e 40 m, οι υπολογιζόμενες γωνίες παγίδευσης είναι πολύ στενές ($0,266^\circ$) [3.12], γεγονός που επιβάλλει υψηλές απαιτήσεις στο σχεδιασμό διαμόρφωσης δέσμης Tx.

Στη συνέχεια, ακολουθούμε παρόμοια δομή και συνεχίζουμε να εισάγουμε τις διαλείψεις μεγάλης και μικρής κλίμακας στο κανάλι B-LOS.

3.4 Μοντέλα απώλειας διαδρομής

(Ενότητα 3.4)

Καθώς η απόσταση Tx-Rx αυξάνεται και υπερβαίνει την απόσταση της πρώτης ζώνης Fresnel, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος θα έχει απότομη πτώση ακόμη

και αν υπάρχει διαδρομή LOS, δηλαδή $d < d_{LOS}$. Για αποστάσεις κοντά στο όριο $d \sim d_{LOS}$ έχουμε το μοντέλο των τριών ακτινών, όπου [3.3]:

$$L(h_t, h_f, h_e, d) = -10 \log_{10} \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 (2(1 + \Delta))^2 \right) \quad (3.3)$$

$$\Delta = 2 \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \sin \left(\frac{2\pi (h_e - h_t)(h_e - h_r)}{\lambda d} \right) \quad (3.4)$$

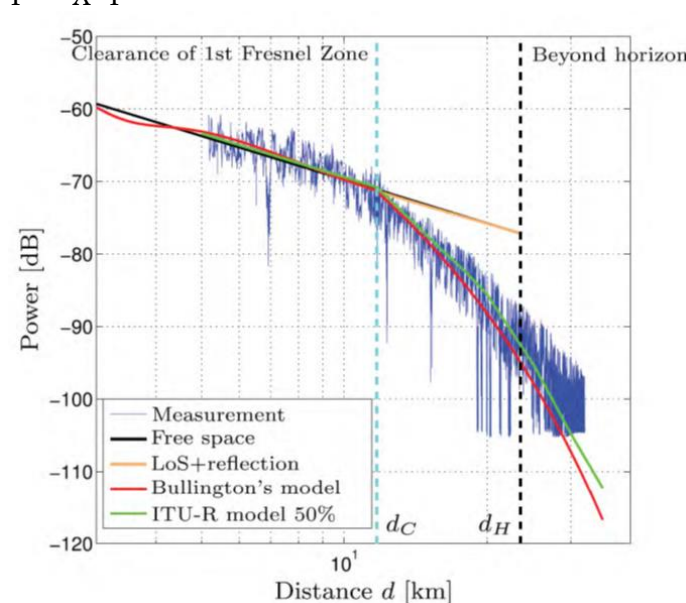
Όπου h_e είναι το ενεργό ύψος του αγωγού εξάτμισης.

Σημειώνουμε ότι οι βυθίσεις ηλεκτρομαγνητικής κάλυψης που υπολογίζονται από την (3.4) εμφανίζονται μόνο στην περιοχή αποστάσεων (d_0, d_{break}) όπου $d_0 = h_t$ και d_{break} ίσο με:

$$d_{break} = \frac{4h_r h_t}{\lambda} \quad (3.5)$$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, το μοντέλο ITU ταιριάζει καλά με τα μετρούμενα δεδομένα και εξακολουθεί να διατηρεί την ακρίβειά του για τη διάδοση transhorizon, ενώ τόσο το μοντέλο ελεύθερου χώρου όσο και το μοντέλο δύο ακτινών υπερεκτιμούν τη λαμβανόμενη ισχύ σε αυτή την περιοχή [3.8].

Σημειώνουμε ότι η θερμοκρασία του νερού τη στιγμή της μέτρησης ήταν μόνο 6°C και είναι απίθανο να υπάρχει αγωγός εξάτμισης. Σε αυτή την περίπτωση, η απώλεια διαδρομής στην περιοχή του υπερχειλίου είναι πολύ υψηλότερη από εκείνη του ελεύθερου χώρου.



Σχήμα 3.4 Μετρηθείσα απώλεια διαδρομής σε σύγκριση με τα θεωρητικά και εμπειρικά μοντέλα [3.8]. Παρατηρείται εμφανής μείωση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος πέραν της απομάκρυνσης της 1ης ζώνης Fresnel. Ρύθμιση παραμέτρων Συχνότητα φέροντος: 5,2 GHz- εύρος ζώνης: 120 MHz- ισχύς εκπομπής: 43 dBm- ύψος κεραίας Tx: επί του οκάφους, 16 m- ύψος κεραίας Rx: 6 m [3.3]

Με την παρουσία αγωγού εξάτμισης, η απώλεια διαδρομής μπορεί να είναι χαμηλότερη από εκείνη του ελεύθερου χώρου χάρη στο φαινόμενο παγίδευσης των κυμάτων. Υπό την ιδανική υπόθεση με ομοιόμορφα κατανεμημένο στρώμα αγωγού (δηλαδή σταθερό ύψος στρώματος) και επίπεδη επιφάνεια της θάλασσας, ο εκθέτης απώλειας διαδρομής υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το PETOOL ως 1,2087 στο [3.13]. Η τιμή είναι μικρότερη από 2 (ο εκθέτης του ελεύθερου χώρου), καθώς το φαινόμενο παγίδευσης του στρώματος αγωγού εμποδίζει την ισχύ του σήματος να διαδοθεί μέσω της ατμόσφαιρας.

Σε αντίθεση με τις ιδανικές παραδοχές, οι συνθήκες διάθλασης του στρώματος αγωγού δεν είναι ομοιόμορφες και εξαρτώνται από το εύρος στην πράξη. Εκτός αυτού, η επιφάνεια της θάλασσας είναι τραχιά σύμφωνα με τις ρεαλιστικές συνθήκες των θαλάσσιων κυμάτων. Αυτά οδηγούν σε έναν υψηλότερο πραγματικό εκθέτη απώλειας διαδρομής από τη θεωρητική τιμή [3.13], και είναι τυχαίος παρά σταθερός.

Οι Dinc και Akan [3.12] έλαβαν τις παραμέτρους του λογαριθμικού μοντέλου απώλειας διαδρομής στο με βάση το PETOOL. Λαμβάνοντας υπόψη πρακτικές παραμέτρους όπως το ύψος Tx (h_t), το ύψος Rx (h_r), το ύψος αγωγού (h_e), την αντοχή του αγωγού (Δm) και τη συχνότητα φέροντος (f), οι παράμετροι δίνονται από [3.12]:

$$\begin{aligned} PL(d_0) &= \alpha_A + \beta_A \Delta h + \kappa_A h_e + \xi_A f + \rho_A \Delta m + \sigma_{\Delta A} x, \\ n &= \alpha_n + \xi_n f^2 + \rho_n \Delta m + \sigma_{\Delta n} y, \end{aligned} \quad (3.5)$$

όπου Δh h_t h_r , και α , β , κ , ξ , σ είναι οι συντελεστές που προκύπτουν μέσω της πολυμεταβλητής ανάλυσης παλινδρόμησης. Σημειώστε ότι η τυχαιότητα εισάγεται στις παραμέτρους απώλειας διαδρομής μέσω των x και y , οι οποίες είναι τυχαίες γκαουσιανές μεταβλητές με μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία διακύμανση.

Εκτός αυτού, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η εξασθένιση σκιών (σε dB) στη διάδοση με αγωγούς ταιριάζει καλύτερα στην κατανομή log-Weibull, οι παράμετροι της οποίας μπορούν να ληφθούν ομοίως μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης.

Πρόσφατα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της απώλειας διαδρομής στο στρώμα του αγωγού εξάτμισης. Στο [3.21], παρατηρήθηκε η τιμή του εκθέτη απώλειας διαδρομής 2,1 για τη συχνότητα φορέα 10,4 GHz, η οποία είναι ελαφρώς υψηλότερη από την απώλεια διαδρομής στον ελεύθερο χώρο. Στο [3.22], η απώλεια

διαδρομής μοντελοποιείται ως η απώλεια διαδρομής του ελεύθερου χώρου πολλαπλασιασμένη με έναν παράγοντα τροποποίησης.

Έχει αποδειχθεί στο [3.22] ότι όταν η απόσταση Tx-Rx είναι σχετικά μικρή, η μετρούμενη ισχύς σήματος μειώνεται ακολουθώντας παρόμοια τάση του μοντέλου απώλειας διαδρομής ελεύθερου χώρου, ενώ παρατηρείται μεγαλύτερη απώλεια διαδρομής όσο ο δέκτης απομακρύνεται. Αν και το φαινόμενο παγίδευσης που παρέχεται από τη μετάδοση μέσω αγωγών αναμένεται να ενισχύσει τη λαμβανόμενη ισχύ, οι πρακτικές μετρήσεις αποκάλυψαν ότι πρόσθετες απώλειες μπορεί να προκληθούν από μη ιδανικούς παράγοντες, όπως ο χαμηλός συντελεστής ανάκλασης που προκαλείται από το τραχύ θαλάσσιο περιβάλλον και από την απώλεια διάθλασης που προκαλείται από τη μη ομοιόμορφη κατανομή του στρώματος του αγωγού. Μια διεξοδική ανασκόπηση των πρόσφατων επιτευγμάτων των μετρήσεων και της ανάλυσης παραπέμπεται στο [98].

3.5 Διαλείψεις μικρής κλίμακας

(Ενότητα 3.5)

Για να κατανοήσουμε την εξασθένιση μικρής κλίμακας στο θαλάσσιο κανάλι B-LOS, είναι απαραίτητο να χαρακτηρίσουμε πρώτα τη διάδοση πολλαπλών διαδρομών εντός του στρώματος αγωγού. Για το σκοπό αυτό, προτιμάται η μέθοδος ORT για την εκτίμηση των πιθανών προσερχόμενων ακτινών σε ένα δεδομένο σημείο. Με την προσέγγιση της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης σε διαφορετικές κατευθύνσεις με διακριτές ακτίνες, η μέθοδος ORT είναι σε θέση να προσομοιώσει το κανάλι αθροίζοντας όλες τις εισερχόμενες ακτίνες σε μια δεδομένη θέση.

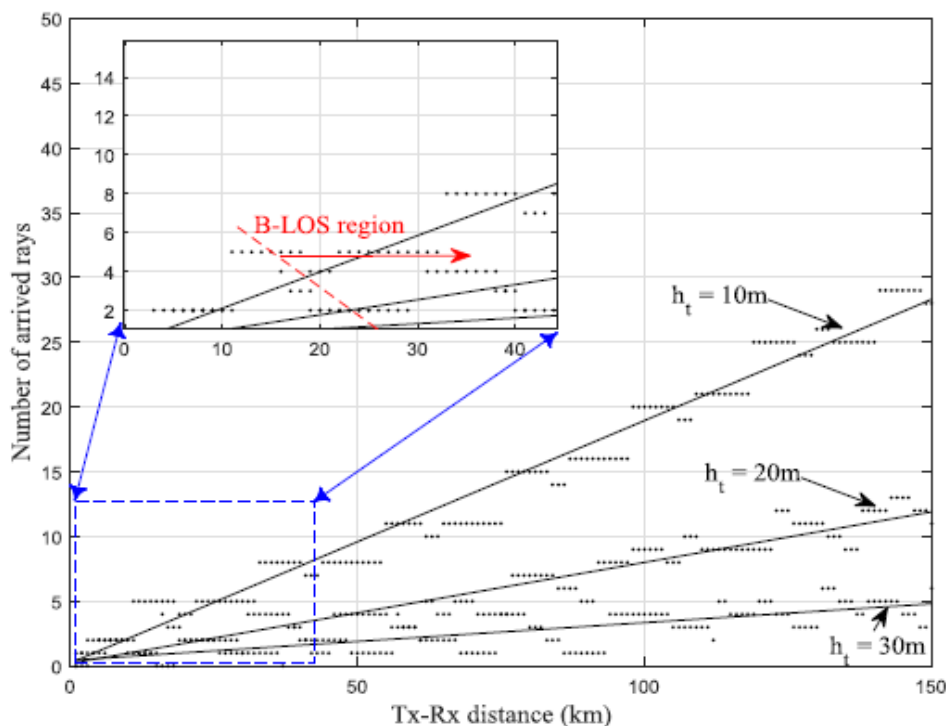
Έχουμε επίσης ένα πακέτο ανίχνευσης ακτινών βασισμένο στο Matlab [3.23], ενώ το μοντέλο βασίζεται σε ορισμένες ιδανικές παραδοχές, όπως η ανεξάρτητη από την εμβέλεια διαθλαστικότητα. Οι Zhao και Yang [3.24] σχεδίασαν ένα εργαλείο εντοπισμού ακτινών 2D οπτικοποίησης (Ray-VT) για να συλλάβουν τους ρεαλιστικούς παράγοντες του περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης της εξαρτώμενης από το εύρος διαθλαστικότητας και των αυθαιρέτων εδαφών.

Η προτεινόμενη μέθοδος ORT συγκρίθηκε με τις προσεγγίσεις που βασίζονται σε PE. Ενώ η συνοχή έχει αποδειχθεί στην κατανομή της ισχύος του πεδίου, η μέθοδος ORT μπορεί να παρέχει επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τις πιθανές τροχιές ακτινών μεταξύ πομπού και δέκτη και, αντίστοιχα, τις AOA/AODs και τα spreads καθυστέρησης. Λεπτομερείς συγκρίσεις μεταξύ των μεθόδων που βασίζονται στην ORT και την PE μπορούν να βρεθούν στο [3.14].

Η θεμελιώδης θεωρία της ORT αναφέρεται σε πρώιμες συνεισφορές, όπως το [3.25], και έχει τροποποιηθεί ειδικά για τη θαλάσσια μοντελοποίηση διάδοσης B-

LOS στο [3.26]. Αντί να υπεισεέλθουμε στις λεπτομέρειες της μεθόδου ORT, επικεντρωνόμαστε στα στατιστικά στοιχεία καναλιού του καναλιού αγωγού B-LOS και επισημαίνουμε στη συνέχεια μερικά βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν με τη χρήση της ORT.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για τη διάδοση του στρώματος αγωγού είναι ότι ο αριθμός των πολλαπλών διαδρομών αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την απόσταση Tx-Rx, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 Αριθμός των διαδρομών άφιξης συναρτήσει της απόστασης Tx-Rx (με προσομοιώσεις ORT). Ρύθμιση παραμέτρων Συχνότητα φέροντος: 10 GHz- ύψος κεραίας Tx: 10/20/30 m- ύψος κεραίας Rx: 20 m- ύψος στρώματος αγωγού: 40 m. [3.3]

Όταν η απόσταση Tx-Rx είναι μικρή, υπάρχει μόνο ένας περιορισμένος αριθμός συνιστωσών πολλαπλών διαδρομών. Το εκτεταμένο μοντέλο Saleh-Valenzuela (S-V) μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να χρειάζεται να γνωρίζουμε την ακριβή γεωμετρία μετάδοσης [3.27]. Απαιτεί μόνο τις πληροφορίες για ορισμένες φυσικές παραμέτρους, όπως η AOA/AOD, η καθυστέρηση και το σύνθετο κέρδος κάθε συνιστώσας πολλαπλών διαδρομών, ενώ η κατανομή αυτών των παραμέτρων μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται με τη χρήση ORT.

Από τη σκοπιά της στατιστικής μοντελοποίησης, όταν η απόσταση Tx-Rx είναι ακριβώς πέρα από το dLOS, μπορεί να υπάρχει ένα κυρίαρχο μονοπάτι μαζί με πολλαπλά ασθενή μονοπάτια. Για την περίπτωση αυτή, πρόσφατες μετρήσεις έχουν παρατηρήσει ότι η αντιστοιχη εξασθένιση μικρής κλίμακας μπορεί απλά να

μοντελοποιηθεί με την κατανομή Rician [3.28]. Από την άλλη πλευρά, ο αριθμός των συνιστωσών πολλαπλών μονοπατιών γίνεται μεγάλος καθώς αυξάνεται η απόσταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Έτσι, η εξασθένιση μικρής κλίμακας μπορεί απλά να προσεγγιστεί από την κατανομή Rayleigh όταν η απόσταση Tx-Rx είναι μεγάλη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

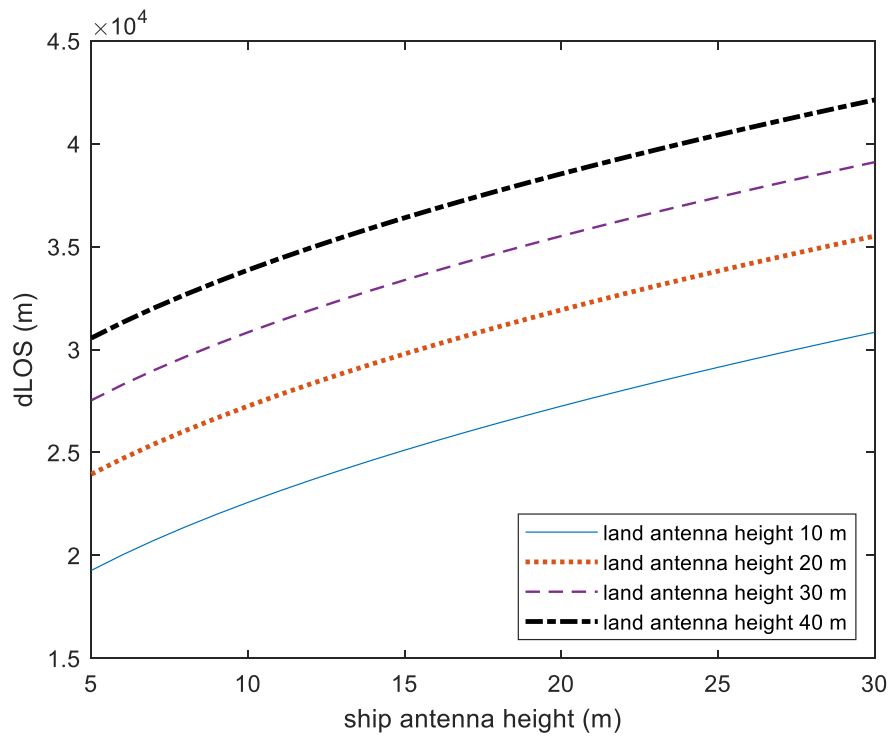
(Ενότητα 4.1)

Στο κεφάλαιο αυτό που φέρει τον τίτλο σενάριο εργασίας παρουσιάζουμε τις καινοτόμες προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε σε περιβάλλον MATLAB με σκοπό την διαλεύκανση ζητημάτων με τα όρια των παραμέτρων d_{Los} και d_{break} καταρχάς, και στην συνέχεια με τον προσδιορισμό, με χρήση του μοντέλου τριών ακτινών, της ευρυζωνικής επίδοσης ενός συστήματος 5G για το όριο της LOS ράδιο-διάδοσης, δηλαδή ανάμεσα στο διάστημα ($dbreak$, $dLOS$). Αυτό μας απασχολεί για να δούμε ποια είναι η οριακή απόδοση του επίγειου ευρυζωνικού συστήματος 5G που «τροφοδοτεί» με ψηφιακή ροή δεδομένων ένα ναυσιπλοϊκό IoT σε ένα πλοίο [4.1].

Θεωρούμε πως το επίγειο αυτό δίκτυο 5G έχει έναν Σταθμό Βάσης στο λιμάνι με απαραίτητο ύψος πύργου κεραιάς για να επικοινωνεί με το πλοίο. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στο front-end για επικοινωνία με το πλοίο είναι η QAM-16, με συγκεκριμένες απαιτήσεις E_b/N_0 ίσες με 16 dB[4.2]. Επίσης θεωρούμε πως το εύρος ζώνης που δεσμεύεται για το επίγειο μικροκυματικό 5G είναι 100 MHz [4.3] με κεντρική φέρουσα συχνότητα τα 3,5 GHz [4.4]. Εξετάζουμε αυτό το “worst-case” section της LOS ράδιο-διάδοσης καθώς εκτιμούμε πως, στα πλαίσια μελλοντικής μελέτης, τεκμηριωθεί για το Beyond-Line-of-Sight η ανάγκη μίας μεταγωγής σε δορυφορικό 5G, στα πλαίσια ενός hybrid-terrestrial-satellite-broadband-connectivity για maritime IoT [4.5].

Οι πρώτες προσομοιώσεις αφορούν στις παραμέτρους $dLOS$ και $dbreak$. Η σημασία αυτών των προσομοιώσεων έγκειται σε «κενά» που υπάρχουν στην υφιστάμενη βιβλιογραφία αναφορικά με τις οριοθετήσεις των τιμών αυτών, που επιδρούν στην αξιόπιστη τεκμηρίωση των περιοχών ράδιο-διάδοσης όπως ορίστηκαν στα δύο προηγούμενα κεφάλαια.

Εκκινούμε λοιπόν με την συγκεκριμενοποίηση του d_{LOS} για ρεαλιστικές τιμές υψών κεραιάς για ένα μεγάλο εύρος που αφορά και καράβια μεγαλύτερου βεληνεκούς. Έχουμε:



Σχήμα 4.1 Τιμές της παραμέτρου dLOS για συνδυασμούς υψών κεραιών σταθμού βάσης 5G (land antenna) και κεραιάς δέκτη στο καράβι (ship antenna)

Παρατηρούμε ότι:

min: 1.927e+04

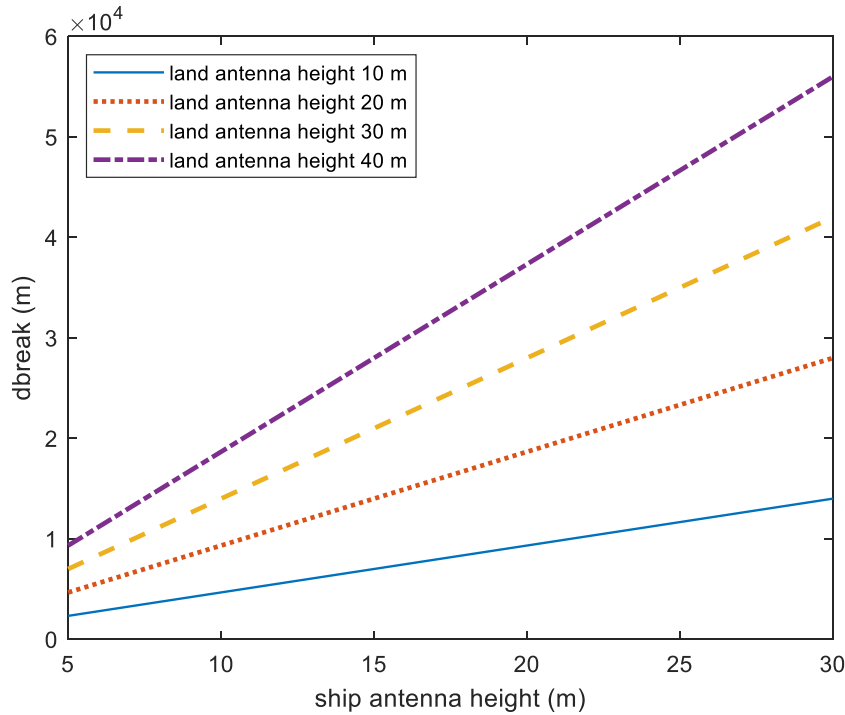
max: 3.084e+04

mean: 2.583e+04

Δηλαδή το εύρος d_LOS κινείται μεν στις αναμενόμενες τάξεις χιλιομέτρων όπως μας υποδεικνύει η βιβλιογραφία αλλά με διαφοροποιήσεις και κυρίως με αύξηση τις τιμές όσο αυξάνεται το ύψος της κεραιάς πάνω στο πλοίο.

Θα δούμε στην συνέχεια ποιες επιπτώσεις μπορεί να έχει αυτό εξετάζοντας την παράμετρο d_break για το κανάλι των 3,5 GHz συγκεκριμένα που είναι η κεντρική φέρουσα συχνότητα του μικροκυματικού επίγειου δικτύου 5G.

Έχουμε:

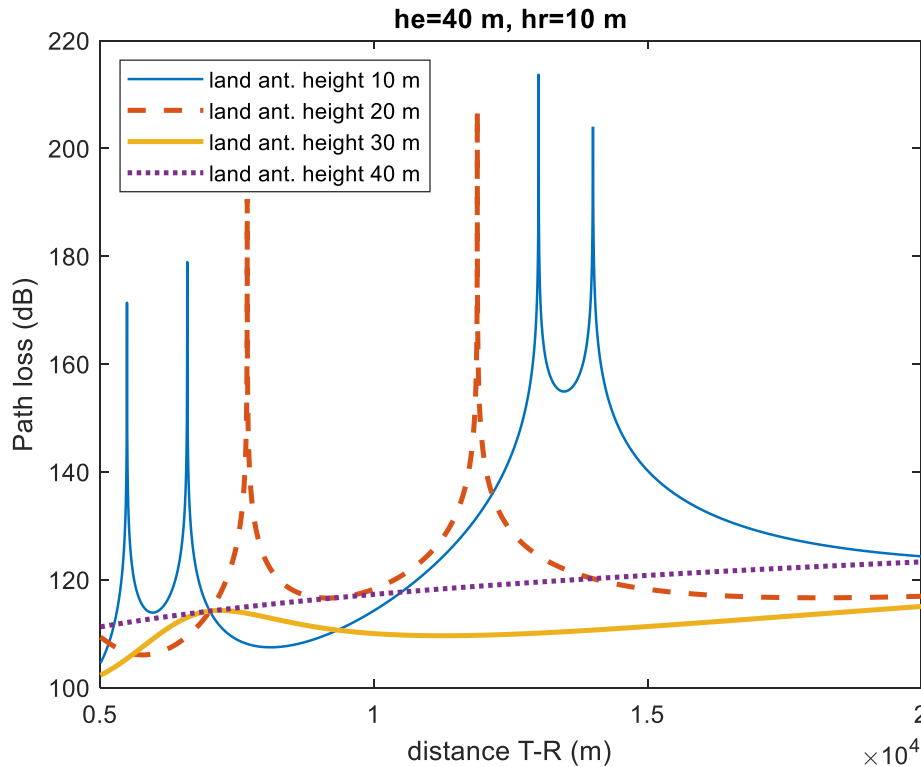


Σχήμα 4.2 Τιμές της παραμέτρου d_{LOS} για συνδυασμούς υψών κεραιών σταθμού βάσης 5G (land antenna) και κεραιάς δέκτη στο καράβι (ship antenna) για $f=3,5$ GHz

Από τα παραπάνω προκύπτει ένα πολύ σημαντικό εύρημα: καθώς αυξάνεται το h_t , οι τιμές του d_{break} φθάνουν και υπερβαίνουν ακόμη και τις τιμές του d_{LOS} στα αντίστοιχα σενάρια (h_t, h_r), υπερβαίνοντας έτσι το άνω όριο της διάδοσης LOS (διάδοση δύο ακτίνων μέχρι το d_{break} , διάδοση τριών ακτίνων πέρα από το d_{break} και μέχρι το d_{LOS}). Έτσι, σε τέτοιες περιπτώσεις, το d_{LOS} θα πρέπει να λειτουργεί ως άνω όριο και το d_{break} ταυτίζεται με το d_{LOS} , καθιστώντας έτσι τη διάδοση σύμφωνη με το μοντέλο δύο ακτίνων (βέλτιστο σενάριο).

Η επόμενη προσομοίωση αφορά στο διάστημα (d_{break} , d_{LOS}) που όπως προαναφέραμε αποτελεί το ακροτελεύτιο της LOS περιοχής. Θεωρούμε ένα σταθερό ύψος κεραιάς δέκτη στο πλοίο ίσο με 10 μέτρα, ύψος αγωγού 40 μέτρα (μέγιστη τιμή σύμφωνα με την βιβλιογραφία) και μεταβαλλόμενο ύψος κεραιάς Σταθμού Βάσης 5G στην στεριά (land antenna height) από 10 έως 40 μέτρα.

Έχουμε:



Σχήμα 4.3 Απώλειες διαδρομής (path loss) για απόσταση 5 έως 20 χιλιομέτρων για ύψος κεραίας πλοίου ίσο με 10 μέτρα, ενεργό ύψος αγωγού ίσο με 40 μέτρα και μεταβαλλόμενο ύψος κεραίας ΣΒ 5G στην στεριά

Τα ευρήματα του Σχήματος 4.3 είναι πολύ σημαντικά καθώς βλέπουμε πως η «αναμενόμενη» συμπεριφορά των μοντέλου τριών ακτίνων με τις βυθίσεις ηλεκτρομαγνητικής κάλυψης συμβαίνει μόνο στις περιπτώσεις που το ύψος του ΣΒ στο λιμάνι (στεριά) είναι πολύ μικρότερο του ύψους του αγωγού (duct layer). Όσο μεγαλώνει το ύψος της κεραίας ΣΒ στο λιμάνι, τείνουμε και τελικά καταλήγουμε σε ένα μοντέλο που παραπέμπει στο free space path loss model.

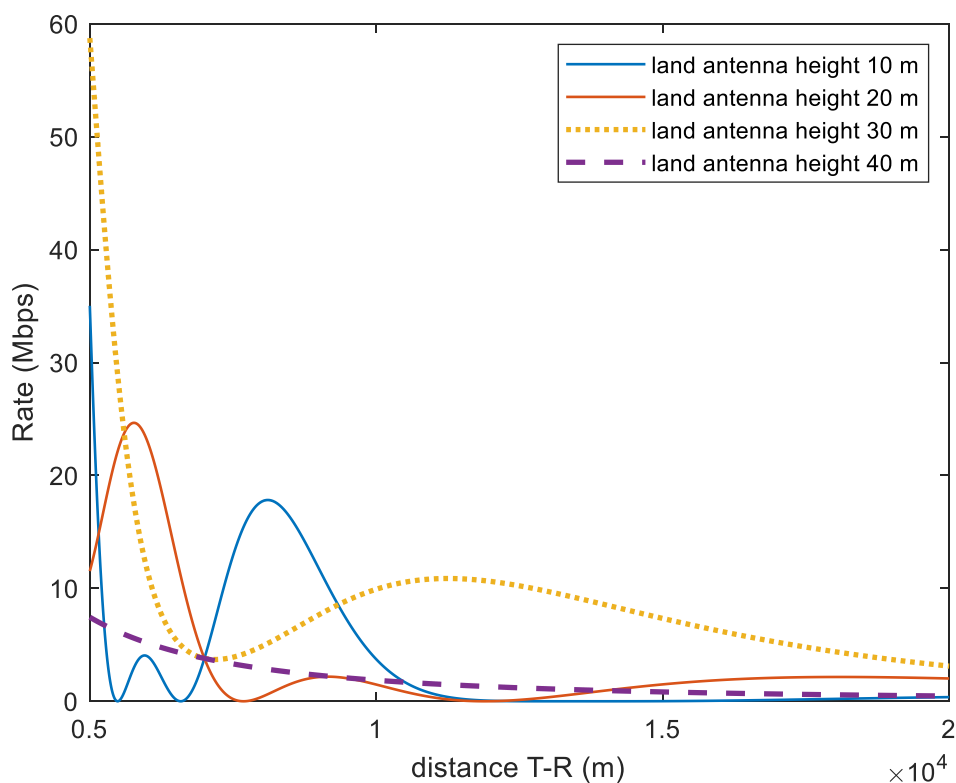
Πέραν αυτού, παρατηρούμε ότι σε αυτές τις δύο περιπτώσεις, έχουμε μικρότερες απώλειες όταν το ύψος της κεραίας ΣΒ στο λιμάνι είναι μεν συγκρίσιμο/πλησιάζει στο ύψος του αγωγού, αλλά παραμένει και πιο «κοντά» στο ύψος της κεραίας του δέκτη στο καράβι. Επαναληπτικές προσομοιώσεις με μεταβολή των παραμέτρων επιβεβαιώνουν τα παραπάνω ευρήματα.

Στην συνέχεια εξετάζουμε την επίδραση αυτών των τιμών των απωλειών διαδρομής στην παρεχόμενη ευρυζωνικότητα από την κεραία ΣΒ 5G στο πλοίο. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε ενεργό ισοτροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ, δηλαδή ολική

ισχύ εκπομπής (total effective isotropically radiated power, EIRP) ίση με 24 dBm [4.4] και στάθμη θορύβου ίση με -92 dBm για εύρος ζώνης 100 MHz [4.6]. Με βάση τις απαιτήσεις E_b/N_o της QAM-16, παράγουμε τα τελικά αποτελέσματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.4.

Σημειώνουμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$R_s = \left(\frac{S/N}{E_b/N_o} \right) \times B \quad (4.1)$$



Σχήμα 4.4 Παροχή ευρυζωνικότητας από επίγειο σταθμό βάσης 5G σε πλοίο με ύψος κεραιάς δέκτη 10 μέτρα, για ενεργό ύψος αγωγού 40 μέτρα, για εύρος ζώνης 100 MHz γύρω από φέρουσα συχνότητα 3,5 GHz και τεχνική διαμόρφωσης QAM-16 για ρεαλιστικές τιμές θορύβου στο επίγειο μικροκυματικό κανάλι

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία, επικεντρωθήκαμε στη μελέτη του MIoT με τη χρήση τεχνολογιών κυψελοειδούς επικοινωνίας τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτικές προοπτικές . Με ενδελεχή έρευνα και ανάλυση της διάδοσης ραδιοκυμάτων σε στοχαστικά ωκεάνια κύματα, ιδιαίτερα της κυματικής παρεμπόδισης της σύνδεσης επικοινωνίας LoS μεταξύ μιας σημαδούρας και ενός χερσαίου σταθμού βάσης, προτείναμε ένα σύνολο αναλύσεων εργαλείων και αλγορίθμων για τον προσδιορισμό της πιθανότητας LoS, την κατανομή της διάρκειας CLoS και την πιθανότητα διακοπής LoS, χρησιμοποιώντας υπάρχοντα μοντέλα ωκεάνιων κυμάτων.

Αυτά τα εργαλεία μπορούν να βοηθήσουν στο σχεδιασμό ενός υψηλής απόδοσης και ενεργειακά αποδοτικού MIoT συστήματος. Η κριτική ανάλυση της κεραίας σε συνθήκες κύματος έχει οδηγήσει σε προτάσεις σχετικά με τη διάσταση και την πρόβλεψη της απόδοσης της κεραίας.

Παρατηρούμε με βάση τα ευρήματα στο σενάριο εργασίας πως η ευρυζωνική συνδεσιμότητα στις παρυφές της LOS διάδοσης δεν ξεπερνούν τα 10 Mbps για συμβατικές τιμές EIRP στο επίγειο μικροκυματικό δίκτυο 5G. Ένα πρώτο αντίμετρο που προτείνεται είναι η δημιουργία διαμόρφωσης δέσμης με αύξηση του EIRP για αντιμετώπιση αυτού του άνω ορίου ευρυζωνικής ταχύτητας από τον ΣΒ προς το πλοίο.

Οι μελλοντικές εργασίες περιλαμβάνουν εκστρατείες μέτρησης για σημαδούρες για την καλύτερη κατανόηση του LoS και της επιφανειακής σκέδασης του καναλιού επικοινωνίας σε μεγάλα ωκεάνια κύματα, ποσοτική ανάλυση της πιθανότητας διακοπής επικοινωνίας υπό NLoS, σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων, χαρακτηρισμό των επιδόσεων των θαλάσσιων επικοινωνιών, υπολογισμό ακμών για MIoT, συστήματα MIoT με τη βοήθεια της μηχανικής μάθησης, κλπ.

Βιβλιογραφία

- [1.1] Group, W. (2019). Digitalization of Shipping: When to Start? Retrieved August 26, 2019 from China Port Network: <http://www.chinaports.com/portlspnews/15921>
- [1.2] Huang, X. (2006). A Probe into the Construction of the Basic Platform of Digital Port. *Port Technology*, 09, 14-16.
- [1.3] Kvamstad-Lervold, B. (2017). 9 PATHS INTO THE MARITIME FUTURE. Retrieved FEBRUARY 2017 from SINTEF Ocean AS.
- [2.1] Huo, Y., Dong, X., & Beatty, S. (2020). Cellular communications in ocean waves for maritime internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(10), 9965-9979.
- [2.2] S. J. Beatty, C. Hiles, and B. Bocking, “Validation of a Compact Wave Measurement Buoy With Rotational Motion Tests and Field Measurements Off the Pacific Coast of British Columbia”, Canada MarineLabs, Victoria, BC, Canada, Aug. 2018. (Online). Available: <https://marinelabs.io/mwave-wp/>
- [2.3] W. Wang et al., “Propagation channel at 5.2 GHz in baltic sea with focus on scattering phenomena,” in *Proc. 9th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, 2015, pp. 1–5.
- [2.4] “Electrical Characteristics of the Surface of the Earth, Document ITU Recommendation ITU-R P. 527–5”. Aug. 2019 (Online). Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-5-201908-I!!PDF-E.pdf
- [2.5] L. H. Holthuijsen, “Waves in Oceanic and Coastal Waters”. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2007.
- [2.6] A. H. Techet, “13.42 lecture: Ocean waves spring 2005,” in *MIT OceanEngineering*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2007.
- [2.7] American Bureau of Shipping.”Selecting Design Wave by Long Term Stochastic Method”. [Online]. Available: https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-andguides/current/offshore/238_Guidance_Notes_on_selecting_Design_Wave_by_Long_Term_Stochastic_Method/Long_Term_Design_Wave_GN_e.pdf
- [2.8] S. J. Beatty, “Analysis and Development of a Three Body Heaving Wave Energy Converter”, Univ. Victoria, Victoria, BC, Canada, 2009.
- [2.9] G. Kazdaridis, P. Symeonidis, I. Zographopoulos, T. Korakis, K. Klun, and N. Kovac, “On the development of energy-efficient communications for marine monitoring deployments,” in *Proc. 13th Int. Conf. Adv. Technol. Syst. Services Telecommun. (TELSIKS)*, 2017, pp. 271–274.
- [2.10] G. S. Woods, A. Ruxton, C. Huddleston-Holmes and G. Gigan, “High-capacity, long-range, over ocean microwave link using the evaporation duct,” *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 323–330, Jul. 2009.

- [2.11] Y. Yin, L. Xiong, Y. Zhu, B. Chen, H. Min and H. Xu, “A compact dual-band digital polar Doherty power amplifier using parallel-combining transformer,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 54, no. 6, pp. 1575–1584, Jun. 2019.
- [2.12] E. Bechthum et al., “A CMOS polar single-supply class-G SCPA for LTE NB-IoT and Cat-M1,” in *Proc. IEEE 44th Eur. Solid-State Circuits Conf. (ESSCIRC)*, Dresden, Germany, 2018, pp. 30–33.
- [2.13] F. Balteanu, “Linear front end module for 4G/5G LTE advanced applications,” in *Proc. 48th Eur. Microw. Conf. (EuMC)*, Madrid, Spain, 2018, pp. 251–254.
- [2.14] Z. Amjad, A. Sikora, J. Lauffenburger, and B. Hilt, “Latency reduction in narrowband 4G LTE networks,” in *Proc. 15th Int. Symp. Wireless Commun. Syst. (ISWCS)*, 2018, pp. 1–5.
- [2.15] P. Masek, M. Stusek, K. Zeman, R. Drapela, A. Ometov and J. Hosek, “Implementation of 3GPP LTE Cat-M1 technology in NS-3: System simulation and performance,” in *Proc. 11th Int. Congr. Ultra Mod. Telecommun. Control Syst. Workshops (ICUMT)*, 2019, pp. 1–7.
- [2.16] A. Frøythlog et al., “Ultra-low power wake-up radio for 5G IoT,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 3, pp. 111–117, Mar. 2019.
- [3.1] Lin, B., Li, J., ZhenWang, Kang, T. (2021). Wireless Channel Models for Maritime Communications. In: Liang, Q., Wang, W., Liu, X., Na, Z., Li, X., Zhang, B. (eds) *Communications, Signal Processing, and Systems. CSPA 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 654. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8411-4_266.
- [3.2] Balkees S, Sasidhar PAK, Rao S (2015) A survey based analysis of propagation models over the sea. In: *International conference on advances in computing*, pp 69–75
- [3.3] Wang J, Zhou H, Li Y, Sun Q et al (2018) Wireless channel models for maritime communications. *J IEEE Access* 6:68070–68088
- [3.4] Habib A, Moh S (2019) Wireless channel models for over-the-sea communication: a comparative study. *J Appl Sci* 9(3):443–474
- [3.5] Mo H, Chen B, Shen C (2012) Radio propagation prediction model for maritime mobile communication. *Kuala Lumpur*, pp 1–5
- [3.6] Habib A, Moh S (2018) A survey on channel models for radio propagation over the sea surface. In: *Information systems for enhanced public safety and security*, pp 137–139
- [3.7] Reyes JC, Mariscal LA (2014) 5.8 GHz propagation of low-height wireless links in sea port scenario. *J Electron Lett* 50(9):710–712

- [3.8] Wang W, Jost T, Raulefs R (2015) Large scale characteristics of ship-to-land propagation at 5.2 GHz in harbor environment. In: Vehicular technology conference, pp 1–5
- [3.9] Cao X, Jiang T (2014) Research on sea surface Ka-band stochastic multipath channel modelling. In: Asia-Pacific conference on antennas and propagation, pp 675–678
- [3.10] Durgin GD, Rappaport TS, de Wolf DA (2002) New analytical model and probability density functions for fading in wireless communications. *J IEEE Trans Commun* 50(6):1005–1015
- [3.11] Lee YH, Meng YS (2011) Analysis of ducting effects on air-to-ground propagation channel over sea surface at C-band. *J Radio Eng*, pp 1678–1681
- [3.12] Dinc E, Akan OB (2015) Channel model for the surface ducts: large-scale path-loss, delay spread, and AOA. *J IEEE Trans* 63(6):2728–2738
- [3.13] Dinc E, Akan OB (2014) Beyond-line-of-sight communications with ducting layer. *J IEEE Trans* 52(10):37–43
- [3.14] I. Sirkova, "Brief review on pe method application to propagation channel modeling in sea environment," *Open Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 19_38, Mar. 2012.
- [3.15] R. Akbarpour and A. R. Webster, "Ray-tracing and parabolic equation methods in the modeling of a tropospheric microwave link," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 11, pp. 3785_3791, Nov. 2005.
- [3.16] P. Zhang, L. Bai, Z. Wu, and L. Guo, "Applying the parabolic equation to tropospheric groundwave propagation: A review of recent achievements and significant milestones," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 31_44, Jun. 2016.
- [3.17] N. E. Lentini and E. E. Hackett, "Global sensitivity of parabolic equation radar wave propagation simulation to sea state and atmospheric refractivity structure," *Radio Sci.*, vol. 50, no. 10, pp. 1027_1049, Oct. 2015.
- [3.18] A. E. Barrios, K. Anderson, and G. Lindem, "Low altitude propagation effects_ A validation study of the advanced propagation model (APM) for mobile radio applications," *IEEE Trans. Antennas. Propag.*, vol. 54, no. 10, pp. 2869_2877, Oct. 2006.
- [3.19] 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 *Proc. OCEANS*, San Diego, CA, USA, Sep. 2013, pp. 1_9.
- [3.20] G. S. Woods, A. Ruxton, C. Huddleston-Holmes, and G. Gigan, "High capacity, long-range, over ocean microwave link using the evaporation duct," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 323_330, Jul. 2009.

- [3.21] K. S. Zaidi, V. Jeoti, M. Drieberg, A. Awang, and A. Iqbal, "Longrange mobile communication over sea utilizing evaporation duct," in *Proc. Progr. Electromagn. Res. Symp. Fall (PIERS-FALL)*, Singapore, Nov. 2017, pp. 846_850.
- [3.22] A. S. Kulesa *et al.*, "The tropical air-sea propagation study (TAPS)," *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, vol. 98, no. 3, pp. 517_537, Mar. 2017.
- [3.23] L. Sevgi, "A ray-shooting visualization Matlab package for 2D groundwave propagation simulations," *IEEE Antennas. Propag. Mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 140_145, Apr. 2004.
- [3.24] X. Zhao and P. Yang, "A simple two-dimensional ray-tracing visual tool in the complex tropospheric environment," *Atmosphere*, vol. 8, no. 2, p. 35, Feb. 2017.
- [3.25] K. R. Schaubach, N. J. Davis, and T. S. Rappaport, "A ray tracing method for predicting path loss and delay spread in microcellular environments," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC)*, May 1992, pp. 932_935.
- [3.26] X. Shen, J. Austin, and E. Vilar, "Modelling enhanced spherical diffraction and troposcattering on a transhorizon path with the aid of the parabolic equation and ray tracing methods," in *Proc. IEE Colloq. Common Model. Techn. Electromagn. Wave Acoustic Wave Propag.*, London, U.K., Mar. 1996, pp. 1_7.
- [3.27] A. A. M. Saleh and R. A. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 5, no. 2, pp. 128_137, Feb. 1987.
- [3.28] Q. Zhang, K. Yang, Y. Shi, and X. Yan, "Oceanic propagation measurement in the northern part of the south China sea," in *Proc. OCEANS*, Shanghai, China, Apr. 2016, pp. 1_4.