



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Προηγμένα Συστήματα Πληροφορικής»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Δίκτυα και Επικοινωνίες σε περιβάλλον Ναυτιλίας Networks and Communication technologies in Marine environments
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Θωμάς Γκέκας
Πατρώνυμο	Γεώργιος
Αριθμός Μητρώου	ΜΠΣΠ/17014
Επιβλέπων	Χρήστος Δουληγέρης, Καθηγητής

Ημερομηνία Παράδοσης

Μάρτιος 2021

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

(υπογραφή)

(υπογραφή)

(υπογραφή)

Χρήστος Δουληγέρης
Καθηγητής

Παναγιώτης Κοτζανικολαού
Αν. Καθηγητής

Δέσποινα Πολέμη
Αν. Καθηγήτρια

Πίνακας περιεχομένων

Ευρετήριο σχημάτων	4
Ευρετήριο πινάκων	5
Περίληψη	5
Abstract	6
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	7
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	7
Κεφάλαιο 2: Σύγχρονες απαιτήσεις και περιβάλλοντα Ναυτιλίας	8
2.1 Απαιτήσεις υπηρεσιών επικοινωνίας στη Ναυτιλία	8
2.2 Περιβάλλοντα επικοινωνίας στη Ναυτιλία	13
2.2.1 Διαχωρισμός με βάση το μέσο διάδοσης	13
2.2.3 Διαχωρισμός με βάση την τοπολογία και την τοποθεσία των δικτύων	14
Κεφάλαιο 3: Διαθέσιμες Τεχνολογίες σήμερα	16
3.2 Ιστορική ανασκόπηση	16
3.2 Δορυφόροι	17
3.3 Maritime Radio (Ασύρματος) και Σύστημα NAVTEX	21
3.4 Κυψελωτά δίκτυα	22
3.5 Δίκτυα WANETs (Wireless Ad Hoc Networks)	23
3.6 High Altitude Platforms (HAP)	24
3.7 Cabled Underwater Observatory System	25
Κεφάλαιο 4: Κατευθύνσεις της Έρευνας	27
4.1 Υβριδικό Μοντέλο δικτύων στη Ναυτιλία	27
4.1.1 Εισαγωγή	27
4.1.2 Ευελιξία στον τρόπο εκπομπής	29
4.1.3 Σενάρια επιλογής καναλιού επικοινωνίας	30
4.1.4 Αρχιτεκτονική του Δικτύου	30
4.1.5 Προσομοίωση του Υβριδικού μοντέλου	31
4.1.6 Υποθαλάσσια Δίκτυα	33
4.2 Δίκτυο LTE - Maritime	34
4.2.1 Αρχιτεκτονική του Δικτύου LTE – Maritime	34
4.2.2 Προσομοίωση – Διεξαγωγή μετρήσεων	36
4.2.3 Αποτελέσματα μετρήσεων	37
4.3 TRITON Project	39

4.3.1 Αρχιτεκτονική του δικτύου	39
4.3.2 Μελέτη αποτελεσματικότητας του Δικτύου	40
4.3.3 Περιγραφή του προσομοιωτή “Maritime Simulator”	40
4.3.4 Πρωτόκολλο δρομολόγησης TRITON MRPT	41
4.3.5 Δυνατότητα Δορυφορικής σύνδεσης	42
4.3.6 Περιγραφή του κόμβου και ανάλυση των μετρήσεων	42
4.4 BLUECOM+ Project	46
4.4.1 Αρχιτεκτονική του Δικτύου	46
4.4.2 Σενάρια προσομοίωσης και αποτελέσματα	48
4.5 MariComm Project	53
4.5.1 Αρχιτεκτονική του Δικτύου	53
4.5.2 Δομή του κόμβου MariStation	55
4.5.3 Λειτουργίες του MariStation	56
4.5.4 Περιγραφή του MariComm Bridge	57
4.5.5 Χαρακτηριστικά της Κεραίας του MariStation	58
4.5.6 Αποτελέσματα μετρήσεων	61
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	64
5.1 Συμπεράσματα	64
5.2 Περιορισμοί έρευνας	64
5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	64
Βιβλιογραφία	65

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1. Οι υπηρεσίες επικοινωνίας στη ναυτιλία και τα χαρακτηριστικά τους [1].....	9
Σχήμα 2. Τυπικές υπηρεσίες επικοινωνιών στη ναυτιλία [1]	10
Σχήμα 3. Διάγραμμα διάδοσης ακτινοβολίας σε αγώγιμο ατμοσφαιρικό στρώμα [21]	13
Σχήμα 4. Η εξέλιξη των δικτύων στη ναυτιλία [1]	17
Σχήμα 5. Inmarsat-4, γεωγραφική κάλυψη [35]	18
Σχήμα 6. Απεικόνιση του Global Xpress στο εγγύς μέλλον [39]	19
Σχήμα 7. Γεωγραφική κάλυψη Global Xpress [35]	19
Σχήμα 8. Απεικόνιση της δομής του δικτύου MARS [21]	26
Σχήμα 9 Άποψη της αρχιτεκτονικής του υβριδικού μοντέλου [21]	28
Σχήμα 10. Σενάριο προσομοίωσης του υβριδικού μοντέλου στη ναυτιλία [67].....	32
Σχήμα 11. Δικτύωση των υποθαλάσσιων δικτύων με το διαδίκτυο στη ναυτιλία [67].....	34
Σχήμα 12. Αρχιτεκτονική του δικτύου LTE – Maritime [20]	35
Σχήμα 13. Το πειραματικό περιβάλλον του δικτύου LTE - Maritime [20].....	36
Σχήμα 14. Τα πειραματικά αποτελέσματα στην ανατολική θάλασσα [20].....	37
Σχήμα 15. Τα πειραματικά αποτελέσματα στη νότια θάλασσα [20]	37
Σχήμα 16. Τα πειραματικά αποτελέσματα στην Κίτρινη θάλασσα [20]	37
Σχήμα 17. Άποψη του δικτύου TRITON [15].....	39
Σχήμα 18. Η δομή του κόμβου, εσωτερικό και εξωτερικό μέρος [15].....	44
Σχήμα 19. Απεικόνιση κόμβου TRITON σε πλοιάριο [15].....	44
Σχήμα 20. Ποσοστό ληφθέντων πακέτων δεδομένων συναρτήσει της απόστασης με και χωρίς εναλλαγή κεραίας [15]	45
Σχήμα 21. Η γενική ιδέα του BLUECOM+ [72].....	47
Σχήμα 22. Η αρχιτεκτονική του BLUECOM+ [72].....	48
Σχήμα 23. Η διεκπεραιωτικότητα συναρτήσει της απόστασης για τη ζεύξη air-air wireless link στις συχνότητες των 500 MHz, 700 MHz, 2,4 GHz και 5 GHz [72]	49
Σχήμα 24. Η διεκπεραιωτικότητα συναρτήσει της απόστασης για τη ζεύξη air-surface wireless link στις συχνότητες των 2,4 GHz και 5 GHz [72].....	50
Σχήμα 25. Η διεκπεραιωτικότητα συναρτήσει της απόστασης για τη ζεύξη air-surface wireless link στις συχνότητες των 800 MHz, 1,8 GHz και 2,6 GHz [72]	51
Σχήμα 26. Η διεκπεραιωτικότητα συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των κόμβων, σε επικοινωνία 3 βημάτων στη συχνότητα των 2,4 GHz [72]	52
Σχήμα 27. Συγκριτική απεικόνιση του MariComm σχετικά με τα δίκτυα επικοινωνίας στη ναυτιλία [11].....	53
Σχήμα 28. Άποψη του δικτύου MariComm [11].....	54
Σχήμα 29. Εννοιολογικό διάγραμμα του δικτύου MariComm [79].....	54
Σχήμα 30. Η δομή του κόμβου MariStation [11].....	55
Σχήμα 31. Διάγραμμα ροής για την εναλλαγή των ρόλων του κόμβου MariStation [79]	57
Σχήμα 32. Η δομή λειτουργίας του του MariComm Bridge [79]	58
Σχήμα 33. Σχηματική περιγραφή των 4 κατευθυντικών κεραιών του MariStation [11]	59
Σχήμα 34. Ολοκληρωμένα πρωτότυπα κεραιών του MariStation [79].....	59
Σχήμα 35. Σύστημα προσανατολισμού κεραιών [11].....	60
Σχήμα 36. Σύστημα προσανατολισμού κεραιών με πληροφορίες θέσης [11].....	60
Σχήμα 37. Τα δομικά μέρη του συστήματος εντοπισμού και προσανατολισμού των κατευθυντικών κεραιών του MariStation [11].....	61
Σχήμα 38. Άποψη του συστήματος κεραιών του MariStation κατά τη διάρκεια μετρήσεων [11]	61

Σχήμα 39. Το περιβάλλον των πειραματικών μετρήσεων [79].....	62
Σχήμα 40. Αποτελέσματα των μετρήσεων [79]	63

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1. Ταξινόμηση υπηρεσιών και ελάχιστος απαιτούμενος ρυθμός δεδομένων [20].....	12
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά τυπικών υποβρυχίων μέσων επικοινωνίας [21]	14
Πίνακας 3. Τα κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων επικοινωνίας στη ναυτιλία [21]	27
Πίνακας 4. Αποτελέσματα προσομοίωσης [67].....	33
Πίνακας 5. Παράμετροι επικοινωνίας και οι τιμές τους [15].....	45
Πίνακας 6. Διάφοροι παράμετροι της επικοινωνίας και οι τιμές τους όπως ορίστηκαν κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων [79]	62

Περίληψη

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες στη θάλασσα επεκτείνονται και αποτελούν βασικό πυλώνα της παγκόσμιας οικονομικής δραστηριότητας στη σημερινή πραγματικότητα. Παράλληλα, τα επιτεύγματα της τεχνολογίας στον κλάδο της πληροφορικής και των δικτύων επικοινωνίας επιφέρουν ραγδαίες

εξελιξείς σε κάθε φάσμα της ανθρώπινης ζωής, με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων, ολοένα αυξανόμενων αναγκών επικοινωνίας καθώς και προϋποθέσεις βελτίωσης των εφαρμογών και συστημάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα στη ναυτιλία. Παρόλα αυτά, η αντιστοίχιση των δυνατοτήτων που προσφέρει η τεχνολογία με τις απαιτήσεις των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία, δεν έχει ακόμα πραγματοποιηθεί. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια έντονη δραστηριότητα στην επιστημονική κοινότητα με σκοπό την ανάπτυξη δικτύων που θα γεφυρώνουν το χάσμα ποιότητας και ταχύτητας επικοινωνίας μεταξύ στεριάς και θάλασσας. Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την λεπτομερή καταγραφή των τεχνολογιών δικτύων και επικοινωνιών που υλοποιούνται ή πρόκειται να υλοποιηθούν σε ναυτιλιακά περιβάλλοντα.

Abstract

Nowadays, the use of the sea as one of the major means for hosting several human activities has expanded rapidly, playing a very important role to World economy. At the same time, the achievements of technology in the field of information technology and communication networks lead to rapid developments in every aspect of human life, which results to the creation of new, ever-

increasing communication needs. Moreover, these achievements could also allow the further improvement of the applications and systems that are used today in shipping. However, there are steps that need to be done towards this direction since the matching of the possibilities offered by the technology with the requirements of the applications used in shipping has not yet been accomplished. In the past few years, there has been intense activity in the scientific community aiming to the development of networks that will bridge the gap regarding the quality and speed of communication between land and sea. The object of this master thesis is the detailed recording of network and communication technologies that are being used now or will be implemented in marine environments in the near future.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την καταγραφή των διαθέσιμων τεχνολογιών δικτύων και επικοινωνίας που βρίσκουν εφαρμογή στη ναυτιλία σήμερα καθώς και τη μελέτη των διαφόρων ερευνητικών εγχειρημάτων που είτε έχουν αναπτυχθεί είτε βρίσκονται σε στάδιο υλοποίησης.

Η ναυτιλία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες δραστηριότητες με αναμφισβήτητη επίδραση στην εξέλιξη της ανθρώπινης κοινωνίας, κάτι που ακόμα και σήμερα στην εποχή της 4^{ης} βιομηχανικής

επανάστασης συνεχίζει να καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη διεθνή οικονομία επηρρέαζοντας άμεσα και έμμεσα κάθε σφαίρα της κοινωνικής πραγματικότητας. Έτσι, λόγω των ολοένα αυξανόμενων αναγκών στη ναυτιλία (μεταφορές προϊόντων, επιβατηγός ναυτιλία, πλατφόρμες εξόρυξης φυσικών πόρων) αλλά και με στόχο την όσο το δυνατόν βέλτιστη ικανοποίηση αυτών, προβάλλει σήμερα επιτακτικά η ανάπτυξη δικτύων επικοινωνίας τα οποία θα μπορούν να υποστηρίξουν κατάλληλα αυτό το σκοπό. Είναι γεγονός ότι η αλματώδης ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών που διακρίνει τα αντιστοιχα δίκτυα επικοινωνίας στην ηπειρωτική χώρα, ανεβάζει πολύ ψηλά τον πήχη για τη ναυτιλία και δείχνει το δύσκολο δρόμο που θα πρέπει να ακολουθήσει η επιστημονική κοινότητα για να γεφυρώσει αυτό το χάσμα.

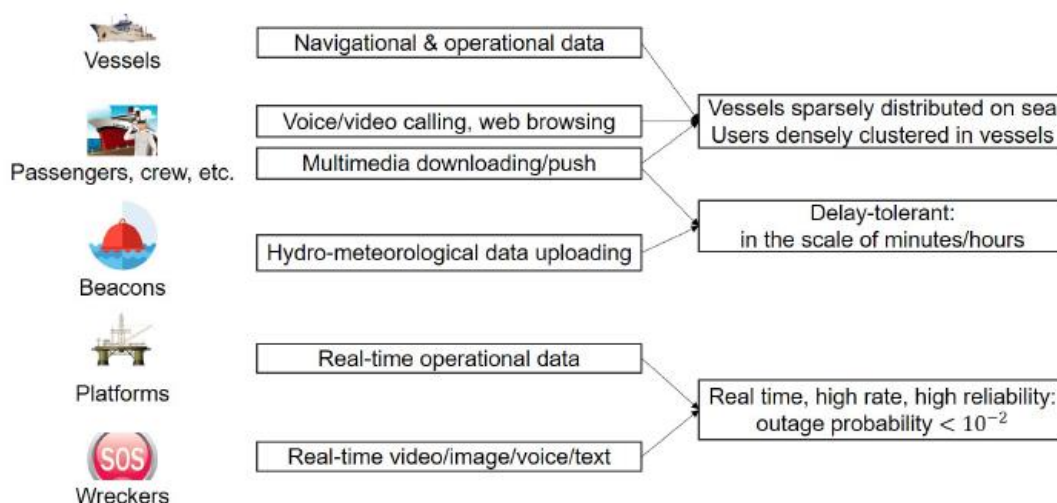
Η δομή της εργασίας περιλαμβάνει 3 βασικά μέρη τα οποία αποτυπώνουν τα παραπάνω, περιγράφοντας αρχικά στο 2^ο κεφάλαιο τις σύγχρονες απαιτήσεις των δικτύων επικοινωνίας, κάνοντας εκτενή αναφορά στις διαθέσιμες τεχνολογίες στο 3^ο κεφάλαιο ενώ τέλος στο 4^ο κεφάλαιο αναλύονται τα σύγχρονα επιστημονικά εγχειρήματα.

Κεφάλαιο 2: Σύγχρονες απαιτήσεις και περιβάλλοντα Ναυτιλίας

2.1 Απαιτήσεις υπηρεσιών επικοινωνίας στη Ναυτιλία

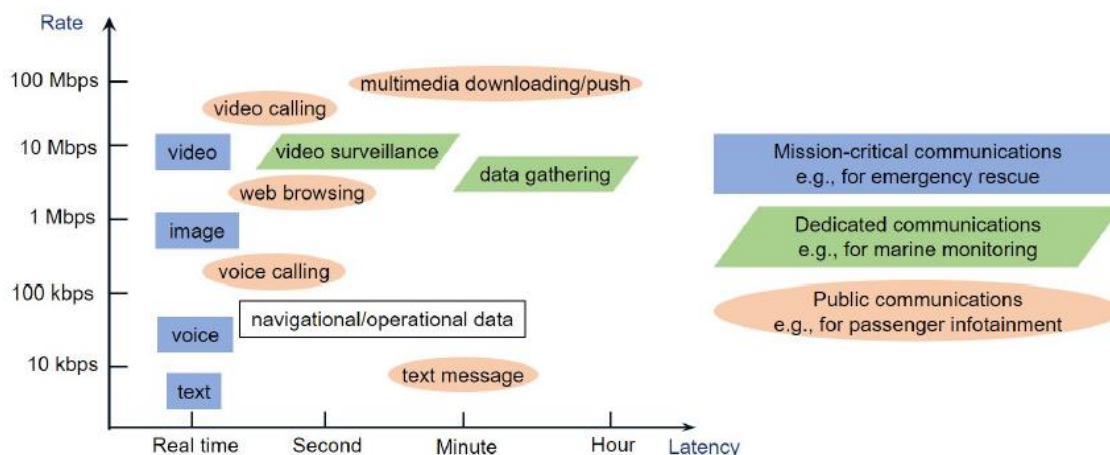
Η ναυτιλία αποτελεί ένα ιδιόμορφο περιβάλλον από τη σκοπιά της επικοινωνίας καθώς περιλαμβάνει χρήστες με τελείως διαφορετικές απαιτήσεις υπηρεσιών. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι απαιτήσεις των διαφόρων υπηρεσιών επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία, σε σχέση με τον αναγκαίο ρυθμό δεδομένων που εξασφαλίζει την εύρυθμη λειτουργία τους.

Κάθε πλεούμενο, ανεξάρτητα από το μέγεθός του και το τομέα που δραστηριοποιείται, θα πρέπει να έχει πρόσβαση σε δεδομένα και υπηρεσίες πλοήγησης, τα οποία είναι απαραίτητα για την ασφαλή κίνηση στη θάλασσα. Επιπλέον, οι επιβάτες και το πλήρωμα επιβατικών, εμπορικών και αλιευτικών πλοίων προσδοκούν πρόσβαση σε υπηρεσίες ψυχαγωγίας και επικοινωνίας ανάλογες με αυτές που απολαμβάνουν στη στεριά, ενώ πληθώρα απομακρυσμένων συστημάτων και αισθητήρων απαιτούν διασύνδεση για την περιοδική αποστολή των δεδομένων που συλλέγουν. Τέλος, για την απρόσκοπτη λειτουργία διαφόρων πλατφορμών εξόρυξης και επιχειρήσεων έρευνας και διάσωσης, απαιτείται αξιόπιστη και υψηλής ταχύτητας επικοινωνία για την αποστολή και λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζονται οι βασικές υπηρεσίες επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία καθώς και τα χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 1. Οι υπηρεσίες επικοινωνίας στη ναυτιλία και τα χαρακτηριστικά τους [1]

Κάθε μια υπηρεσία από αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες απαιτήσεις όσον αφορά την εύρος ζώνης και την ανοχή σε καθυστέρηση. Για παράδειγμα τα δεδομένα που σχετίζονται με την έρευνα και την ασφάλεια διακρίνονται από μεγάλη ευαισθησία σε πιθανές καθυστερήσεις καθώς η αξιοπιστία της επικοινωνίας είναι κρίσιμος παράγοντας για την επιτυχημένη και έγκαιρη διάσωση. Αντίθετα, οι υπηρεσίες ψυχαγωγίας δεν χαρακτηρίζονται από ανοχή στην καθυστέρηση αλλά απαιτούν μεγάλο σχετικά εύρος ζώνης. Παράλληλα, σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό των δικτύων επικοινωνίας στη ναυτιλία αποτελεί η χωρική κατανομή των χρηστών, όπου μεγάλος αριθμός βρίσκεται σε πλοία ή πλατφόρμες που βρίσκονται σε απομακρυσμένα μέρη. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τυπικές υπηρεσίες επικοινωνίας στη ναυτιλία, σε συνάρτηση με τον ρυθμό δεδομένων που απαιτεί η λειτουργία τους και την ευαισθησία τους στην καθυστέρηση.



Σχήμα 2. Τυπικές υπηρεσίες επικοινωνιών στη ναυτιλία [1]

Σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν παραπάνω, μπορούμε να ταξινομήσουμε τις υπηρεσίες επικοινωνιών στη ναυτιλία σε 4 κατηγορίες:

1) Υπηρεσίες πλοήγησης

Με σκοπό την ασφαλή πλοήγηση των πλοίων, την ενθάρρυνση επιστημονικής εποπτείας αλλά και την βελτίωση της αποδοτικότητας των ναυτιλιακών υπηρεσιών, είναι απαραίτητη η πρόσβαση σε ακριβή, πραγματικού χρόνου δεδομένα σχετικά με θαλάσσιους χάρτες και συντεταγμένες πλοίων. Διάφορες μελέτες βρίσκονται σε εξέλιξη για τη βελτίωση των υπηρεσιών πλοήγησης. Ένα παράδειγμα αποτελεί η αξιοποίηση των δορυφόρων του διεθνή οργανισμού Inmarsat για την αποστολή σημάτων επιτήρησης και πλοήγησης με σκοπό κυρίως την αποφυγή εμποδίων κατά τη διάρκεια των δρομολογίων των πλοίων. Στη [2] ερευνητές πρότειναν τη χρήση δορυφορικών συσκευών λήψης AIS (Automatic Identification System - Αυτόματο Σύστημα Αναγνώρισης) με σκοπό την επέκταση της κάλυψης του δικτύου παρακολούθησης στην ανοικτή θάλασσα, ενώ στην [3] εισάγεται αρχιτεκτονική επεξεργασίας παράλληλου σήματος καθώς και κατάλληλοι αλγόριθμοι για δορυφορικά συστήματα AIS για την ελάττωση των συγκρούσεων των πακέτων δεδομένων σε θαλάσσιες περιοχές με αυξημένη κίνηση. Τέλος, στις [4], [5], [6], [7], [8], [9] έχει αναπτυχθεί ένα δίκτυο μεταφοράς το οποίο αξιοποιεί σε μεγάλο βαθμό τα συστήματα GPS (Global Positioning System - Παγκόσμιο Σύστημα Στιγματοθέτηση) και GIS (Geographic Information System - Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών) και άλλες τεχνολογίες.

2) Υπηρεσίες ψυχαγωγίας και ενημέρωσης

Η ενημέρωση, η επικοινωνία με φιλικά και οικογενειακά πρόσωπα αλλά και η ψυχαγωγία αποτελούν σημαντικές ανάγκες του ανθρώπου ενώ ο βαθμός ικανοποίησής τους αποτελεί δείκτη της κοινωνικής προόδου. Οι εκτεταμένες ανθρώπινες δραστηριότητες στη θάλασσα υποδεικνύουν την αναγκαιότητα για πρόσβαση στις υπηρεσίες ψυχαγωγίας και ενημέρωσης, αντίστοιχη με αυτή που οι χρήστες απολαμβάνουν στη στεριά. Οι ιδιομορφίες που παρουσιάζει το περιβάλλον της ναυτιλίας, όπου μεγάλος αριθμός χρηστών βρίσκεται συγκεντρωμένος σε απομακρυσμένα πλοία ή θαλάσσιες πλατφόρμες [10], απαιτεί τον κατάλληλο σχεδιασμό των δικτύων επικοινωνίας. Το αυτόματο σύστημα αναγνώρισης AIS, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της θέσης ενός πλοίου κάθε χρονική στιγμή με σκοπό την εντοπισμένη εκπομπή προς αυτό [11], ενώ στην [12] ερευνητές

προτείνουν μια δομή επικοινωνίας με επίκεντρο το χρήστη και επιλογή κεραιάς με βάση το πρότυπο των κατανεμημένων κεραιών.

3) Υπηρεσίες έρευνας και διάσωσης

Οι πιο κρίσιμες υπηρεσίες επικοινωνίας στη ναυτιλία, τόσο από άποψη μηδενικής ανοχής σε καθυστέρηση αλλά και υψηλής αξιοπιστίας, είναι αυτές που σχετίζονται με την έρευνα και διάσωση στη θάλασσα. Κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος στη ναυτιλία, η διασφάλιση αξιοπιστίας και πραγματικού χρόνου επικοινωνίας, κρίνεται επιτακτική. Δορυφόροι χαμηλής τροχιάς και μη επανδρωμένα αεροσκάφη μπορούν να συμβάλλουν αποτελεσματικά στις επιχειρήσεις, παρέχοντας υπηρεσίες φωνής, εικόνας και βίντεο σε πραγματικό χρόνο [13]. Επιπλέον, η επικοινωνία μεταξύ του πλοίου που βρίσκεται σε κίνδυνο και του πλοίου διάσωσης εξαρτάται άμεσα από το ύψος και τη γωνία των κεραιών τους, παράμετροι που μεταβάλλονται έντονα από τη διακύμανση της θαλάσσιας επιφάνειας. Αυτό οδηγεί σε υποβάθμιση αλλά και σε συχνές διακοπές της επικοινωνίας. Έτσι, με σκοπό το μετριασμό του παραπάνω φαινομένου, διάφορες τεχνικές επιλογής κεραιάς έχουν προταθεί [14], [15].

4) Συλλογή δεδομένων και λήψη πολυμεσικού περιεχομένου

Η τελευταία κατηγορία των υπηρεσιών επικοινωνίας στη ναυτιλία, περιλαμβάνει υπηρεσίες όπως η λήψη πολυμεσικού περιεχομένου και η αποστολή μετεωρολογικών και άλλων παρατηρησιακών δεδομένων, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ανοχή στην καθυστέρηση ενώ για τη χρήση τους απαιτείται ευρυζωνική σύνδεση. Διάφορες μελέτες έχουν εκπονηθεί για το σχεδιασμό και την υλοποίηση αυτών των υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, με βάση την προβλεψιμότητα και την σχετική σταθερότητα των χρηστών στα ναυτικά περιβάλλοντα [16], στις [17], [18] αναλύεται αντίστοιχα ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάλληλο για υπηρεσίες με ανοχή στην καθυστέρηση και τρεις αλγόριθμοι για αποστολή βίντεο με βάση ντετερμινιστική τοπολογία δικτύου.

Περαιτέρω κατηγοριοποίηση των υπηρεσιών επικοινωνίας στη ναυτιλία μπορεί να γίνει σύμφωνα με το MCRP (Maritime Radio Communications Plan) [19], που έχει εκπονήσει η διεθνής ένωση IALA (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities). Έτσι ανάλογα με τον αντικειμενικό σκοπό που εξυπηρετούν κατατάσσονται σε υπηρεσίες ασφάλειας, επιχειρησιακές και εμπορικές. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά μερικές από αυτές καθώς και ο απαιτούμενος ρυθμός δεδομένων για την ομαλή λειτουργία τους.

Service type	Service	Data rate requirement (kbps)
Safety service	Radar/AIS plot	100
	GMDSS data	10
	Mechanical sensors	10
	HD video	1500
	LiDAR	2000
	Infrared camera	1000
	VTS coordination	100
	SAR	100
	Special data gathering	1500
Operational service	Weather data	9.6
	Ship reporting	9.6
	Notifications to coastal States	9.6
	Port arrival notification	9.6
	MIO	100
	Load/discharge coordination	100
	PPU/VTS image	100
	Tug/mooring coordination	100
	Electronic chart updates	100
Commercial service	Korean e-Navigation services	1560
	Voyage orders	9.6
	Commercial port services	9.6
	Operational reports	9.6
	Cargo telemetry	64
	Payments and inventory	64
	VoIP	140
	Passenger internet access	150
	Crew training	9.6
Infotainment	1500	

Πίνακας 1. Ταξινόμηση υπηρεσιών και ελάχιστος απαιτούμενος ρυθμός δεδομένων [20]

Παρατηρούμε ότι οι τυπικές υπηρεσίες έρευνας και διάσωσης όπως είναι οι SAR (Search And Rescue – Έρευνα και διάσωση), AIS και GMDSS (Global Maritime Distress Safety Systems - Παγκόσμιο Ναυτιλιακό Σύστημα Κινδύνου και Ασφάλειας) αλλά και υπηρεσίες σχετικά με απαραίτητες λειτουργίες των πλοίων όπως MIO (Marine Information Overlay) μπορούν να λειτουργήσουν με σχετικά μικρούς ρυθμούς δεδομένων (ως και 100 kbps). Παρόλα αυτά, καθώς ο εξοπλισμός και οι υπηρεσίες βελτιώνονται με την πρόοδο της τεχνολογίας, οι απαιτήσεις για μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων αυξάνονται ανάλογα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το εξελιγμένο σύστημα πλοήγησης “Korean e-Navigation” που έχει αναπτυχθεί για την παροχή ασφαλούς και αποτελεσματικής πλοήγησης σε πλοία που βρίσκονται στα Κορεατικά ύδατα, το οποίο εκτιμάται ότι για την απρόσκοπτη λειτουργία του απαιτούνται περίπου 1,5 Mbps. Επιπλέον, τα πλοία είναι εφοδιασμένα με πληθώρα

αισθητήρων με σκοπό την αποφυγή ατυχημάτων. Για παράδειγμα, η λειτουργία θερμικών καμερών καθώς και η τεχνολογία LiDAR (Light Detection And Ranging) απαιτούν ρυθμό δεδομένων μερικών Mbps. Τέλος, σημαντικό παράγοντα στον τομέα της ναυτιλίας αποτελούν η ενημέρωση και η ψυχαγωγία των πληρωμάτων. Οι υπηρεσίες κοινωνικής δικτύωσης και επικοινωνίας με φιλικά και συγγενικά πρόσωπα αλλά και η πρόσβαση σε οπτικοακουστικό υλικού μέσω διαδικτύου απαιτούν περίπου 1,5 Mbps για ικανοποιητική λειτουργία.

2.2 Περιβάλλοντα επικοινωνίας στη Ναυτιλία

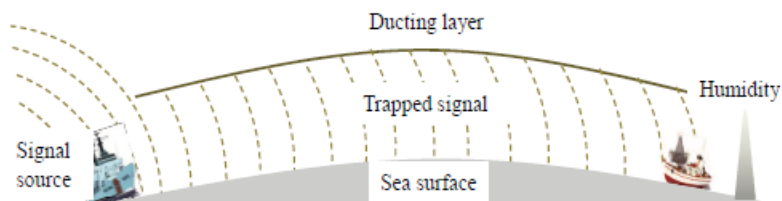
2.2.1 Διαχωρισμός με βάση το μέσο διάδοσης

Λαμβάνοντας υπόψιν το περιβάλλον της ναυτιλίας, μπορούμε να ομαδοποιήσουμε τις τεχνολογίες και τα δίκτυα που αξιοποιούνται για τις ανάγκες της επικοινωνίας, ανάλογα με το μέσο διάδοσης που αυτά χρησιμοποιούν καθώς και με την τοπολογία και τα δομικά μέρη που τα απαρτίζουν.

2.2.1.1 Επικοινωνία πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

Πρόκειται για Η/Μ ακτινοβολία στο ευρύ φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε διάφορες τεχνολογίες, όπως οι δορυφόροι, τα κυψελωτά δίκτυα ($\leq 3G$), WiMAX κ.ά. Παρόλο που οι τεχνολογίες των κυψελωτών δικτύων χρησιμοποιούνται καθολικά για την πρόσβαση στο διαδίκτυο σε ηπειρωτικές περιοχές, η εφαρμογή τους σε περιβάλλοντα ναυτιλίας είναι αντικείμενο επιστημονικής έρευνας καθώς τα ραδιοκύματα απορροφούνται έντονα από τη θάλασσα. Παράλληλα, η συγκέντρωση των χρηστών στα θαλάσσια περιβάλλοντα είναι τελείως διαφορετική συγκριτικά με την ηπειρωτική χώρα, αφού στην πρώτη μεγάλος αριθμός χρηστών εντοπίζεται σε συγκεκριμένα σημεία, όπως σε ένα κρουαζιερόπλοιο. Αυτό καθιστά την επικοινωνία σημείου προς σημείο πιο αποτελεσματική συγκριτικά με την ευρυεκπομπή.

Ωστόσο, η διάδοση Η/Μ κυμάτων από σημείο σε σημείο, και ειδικότερα το φάσμα των ραδιοκυμάτων, επηρεάζεται έντονα από την καμπυλότητα της Γης. Όμως, χάρις στην ύπαρξη ενός αγωγίμου ατμοσφαιρικού στρώματος το οποίο διευκολύνει τη διάδοξη των ραδιοκυμάτων, μετριάζεται η επίδραση της καμπυλότητας της Γης, και έτσι είναι δυνατή η επικοινωνία δύο σημείων που δεν έχουν οπτική επαφή μεταξύ τους.



Σχήμα 3. Διάγραμμα διάδοσης ακτινοβολίας σε αγωγίμο ατμοσφαιρικό στρώμα [21]

Το παραπάνω φαινόμενο οφείλεται στην ύπαρξη μιας περιοχής στην ατμόσφαιρα όπου το ποσοστό υγρασίας παρουσιάζει ραγδαία πτώση, με αποτέλεσμα η διαθλαστικότητα να μειώνεται έντονα με το ύψος. Συναντάται πολύ συχνά σε περιοχές πάνω από τους ωκεανούς αλλά και σε περάκια περιβάλλοντα, ενώ η επίδραση του εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η συχνότητα των Η/Μ κυμάτων, η πόλωση τους, η θέση των κεραιών, και διάφορες ατμοσφαιρικές συθήκες.

Πρόσφατα πειραματικά δεδομένα οδήγησαν στη δημιουργία ζεύξης δύο σημείων σε απόσταση 78km, πετυχαίνοντας ταχύτητα 10Mbps χρησιμοποιώντας κεραιές ύψους 7m από την επιφάνεια της θάλασσας στις συχνότητες των 10,6GHz. Τέλος, έχουν αναπτυχθεί στρατιωτικά συστήματα τα οποία είναι ικανά να δημιουργήσουν επικοινωνία σημείου προς σημείο σε αποστάσεις 500-1000km αξιοποιώντας τις ιδιότητες του προαναφερθέντος αγωγίμου ατμοσφαιρικού στρώματος.

2.2.2.2 Επικοινωνία κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας

Σε αντίθεση με τον αέρα, τα H/M κύματα δεν μπορούν να διαδοθούν ικανοποιητικά κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Συγκεκριμένα, οι ρυθμοί διάδοσης για τα πολύ έως εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας κύματα (VLF, ELF), είναι μόλις 300bps σε αποστάσεις μάλιστα μικρότερες των 50m, ενώ η χρήση υψηλών συχνοτήτων είναι πρακτικά αδύνατη αφού η απορρόφηση αυξάνεται έντονα όσο μεγαλώνει η συχνότητα. Όσον αφορά τα ακουστικά κύματα, μπορούν να επιτύχουν ρυθμούς λίγων kbps σε αποστάσεις μερικών χιλιομέτρων (12~48 kbps στα 2 km), γεγονός όμως που καθιστά τη χρήση τους ανεπαρκή για την υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου σε μεγάλες αποστάσεις. Τέλος, οι ακτίνες μπλε/πράσινου laser μπορούν να αποδώσουν αρκετά μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων σε μικρές αποστάσεις, ενώ λόγω της έντονης απορρόφησης τους από το θαλασσινό νερό αλλά και της ευαισθησίας στα εμπόδια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα τυπικά χαρακτηριστικά των υποθαλάσσιων μέσων επικοινωνίας.

	Achievable transmission rates versus distances						Propagation speed in seawater (km/s)
	50 m	100 m	1 km	2 km	10 km	100 km	
Acoustic waves (kbps)	300		30	12~48 ¹	0.14~15.36[26]	0.3~0.5 ²	1.5
Blue/green laser (Mbps)	10	10~20 ⁴	No report available				33,333
VLF/ELF ³ (bps)	300		3	Negligible			33,333

¹Using MIMO and space time code [27], ²200 km coverage in deep water, ³With assistance of acoustic wave [28]

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά τυπικών υποβρυχίων μέσων επικοινωνίας [21]

2.2.3 Διαχωρισμός με βάση την τοπολογία και την τοποθεσία των δικτύων

Εκτός από το μέσο διάδοσης, σημαντικός παράγοντας με βάση τον οποίο μπορούμε να ορίσουμε τα βασικά περιβάλλοντα στα οποία πραγματοποιείται η επικοινωνία στη ναυτιλία, είναι η τοπολογία των δικτύων και η τοποθεσία των δομικών μερών τους:

2.2.3.1 Νησιά και ακτογραμμές

Οι ακτογραμμές και τα νησιά συνδέονται απευθείας με την ηπειρωτική υποδομή διαδικτύου μέσω οπτικών ινών ή και ασύρματα, επεκτείνοντας έτσι τις υπηρεσίες διαδικτύου στη Ναυτιλία. Έτσι, μέσω των σταθμών βάσης (BS) και των Access Points (AP) που είναι εγκατεστημένοι στην ακτογραμμή ή στα νησιά, γίνεται δυνατή η πρόσβαση στο διαδίκτυο, ενώ η παροχή ενέργειας σε αυτές δεν αποτελεί ουσιαστικό πρόβλημα εφόσον μπορούν να τροφοδοτούνται απευθείας από τους τοπικούς παρόχους ενέργειας. Ακόμα και σε απομακρυσμένα νησιά, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τις ανάγκες λειτουργίας των σταθμών.

2.2.3.2 Θαλάσσια Επιφάνεια

Αρκετά αντικείμενα που βρίσκονται ή κινούνται στην επιφάνεια της θάλασσας, όπως πλοία και μικρότερα πλεούμενα, εξοπλισμένα με συστήματα επικοινωνίας και ικανούς ενεργειακούς πόρους, μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε δομικά μέρη του δικτύου επικοινωνίας στη Ναυτιλία.

Συγκεκριμένα, πληθώρα πλοίων κινούνται καθημερινά σε προκαθορισμένα δρομολόγια σχετικά κοντά στις ακτογραμμές, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ευμετάβλητης και ανισότροπα κατανεμημένης κατανομής χρηστών. Η πρόσβαση στο διαδίκτυο σε αυτά τα περιβάλλοντα μπορεί να εξυπηρετηθεί μέσω σταθμών βάσης (BS - Base Stations) και ασύρματων σημείων πρόσβασης (AP – Access Point) εγκατεστημένων στα πλοία, που διασυνδέονται στο ηπειρωτικό Δίκτυο μέσω των αντίστοιχων BS/AP στις ακτογραμμές ή στα νησιά, ή και μέσω δορυφόρων. Επιπλέον, εκτός των πλοίων και των διάφορων πλεούμενων, μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν ως κόμβοι επικοινωνίας και επέκτασης του Δικτύου, διάφοροι σταθμοί παρατήρησης που διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό και παροχή ενέργειας.

2.2.3.3 Πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

Αρκετά αντικείμενα τα οποία κινούνται ή αιωρούνται στον ουράνιο θόλο ή και πέρα από τα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επέκταση των δικτύων επικοινωνίας στη Ναυτιλία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι δορυφόροι, που αποτελούν το μοναδικό αξιόπιστο διαθέσιμο μέσο για την παροχή υπηρεσιών διαδικτύου στο μεγαλύτερο μέρος της θαλάσσιας επιφάνειας της Γης. Για περιορισμένη κάλυψη σε συγκεκριμένες περιοχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αεροπλάνα, ελικόπτερα, drones και μπαλόνια.

2.2.3.4 Κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας

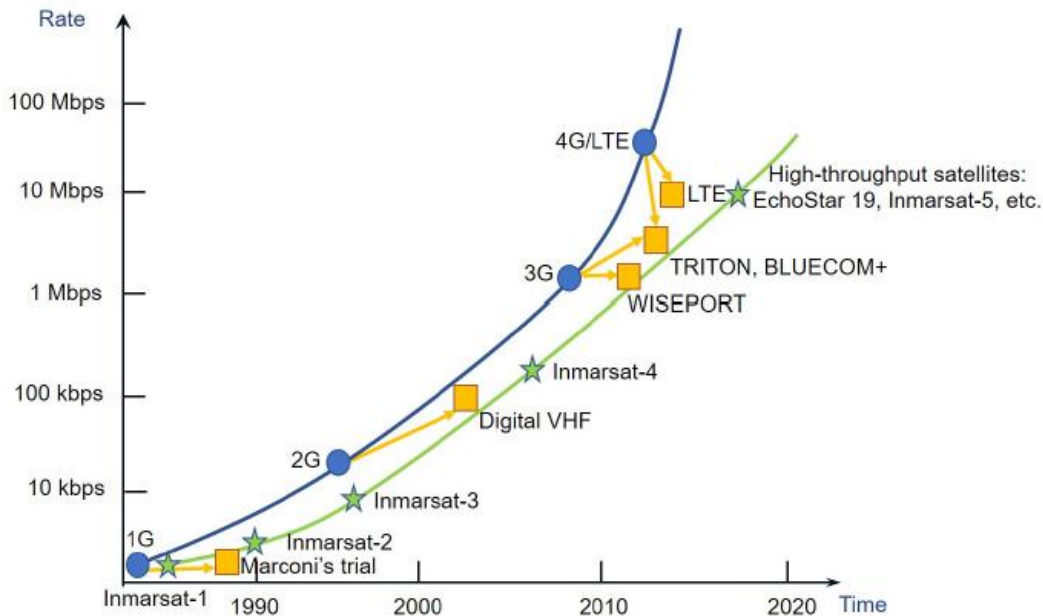
Διάφορα υποθαλάσσια συστήματα παρατήρησης που έχουν αναπτυχθεί ανά τον κόσμο (αναλύονται περαιτέρω στο κεφάλαιο 3.7), τα οποία διακρίνονται από ενεργειακή αυτονομία και μεγάλη επικοινωνιακή δυνατότητα αφού είναι διασυνδεδεμένα με τη στεριά, μπορούν να αποτελέσουν μέρος των δικτύων στη Ναυτιλία. Επιπλέον, υπάρχουν αρκετές υποθαλάσσιες συσκευές και αισθητήρες τα οποία εν δυνάμει μπορούν να συνεισφέρουν στην επέκταση του δικτύου. Όμως, χαρακτηρίζονται από περιορισμένη παροχή ενέργειας, ενώ η θέση τους επηρεάζεται έντονα από τα θαλάσσια κύματα και ρεύματα.

Κεφάλαιο 3: Διαθέσιμες Τεχνολογίες σήμερα

3.2 Ιστορική ανασκόπηση

Κατά το πέρασμα από τον 19^ο στον 20^ο αιώνα, αρχίζει να αναπτύσσεται η τεχνολογία του ασυρμάτου για τις ανάγκες επικοινωνίας στη ναυτιλία. Με πρωτοπόρο των Ιταλό εφευρέτη Γουλιέλμο Μαρκόνι ο οποίος το 1897 έθεσε σε εφαρμογή μια ζεύξη 6 km στο κανάλι του Bristol. Αλληπάλληλες δοκιμές οδήγησαν στο σπουδαίο για την εποχή επίτευγμα της υπερατλαντικής επικοινωνίας (πάνω από 3000 km) χρησιμοποιώντας πομπό 20 kw και κεραία λήψης 150 m [22], [23], [24]. Οι σημαντικές αυτές ανακαλύψεις συγκέντρωσαν το ενδιαφέρον της ναυπηγικής βιομηχανίας στα αναπτυσσόμενα τότε καπιταλιστικά κράτη της Δυτικής Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής. Αυτό αποτέλεσε το έναυσμα για την εγκατάσταση και λειτουργία παράκτιων σταθμών μικρής και μεγάλης εμβέλειας αλλά και την εγκατάσταση στα πλοία με τον κατάλληλο εξοπλισμό για λήψη και αποστολή ραδιοσημάτων. Παράλληλα άρχιζαν να αναπτύσσονται οι υπηρεσίες τηλεγράφου, τηλεφώνου και φαξ, μέσω βραχέων συχνοτήτων ενώ στη συνέχεια έγινε δυνατή η αποστολή δεδομένων μέσω των MF, HF, VHF και UHF συχνοτήτων.

Σήμερα, είναι σε εξέλιξη διάφορες μελέτες και ερευνητικά προγράμματα που εστιάζουν στην ανάπτυξη ευρυζωνικών δικτύων επικοινωνίας στη ναυτιλία, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα σε πολλά από αυτά. Στη Νορβηγία έχει εκπονηθεί το σχέδιο MARCOM, ενώ στην Πορτογαλία το BLUECOM+, με σκοπό την παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης στο διαδίκτυο σε απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές συνδυάζοντας τις τεχνολογίες Wi-Fi, UMTS, GPRS και LTE [25], [26], [27], [28]. Ερευνητές στη Σιγκαπούρη έχουν αναπτύξει το TRITON, ένα ασύρματο δίκτυο πολλαπλών διαδρομών που δημιουργείται από γειτονικά πλοία και άλλα πλεούμενα με σκοπό την κάλυψη εκτεταμένων θαλάσσιων περιοχών [29], [30], [31]. Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται συνοπτικά η εξέλιξη των δικτύων επικοινωνίας στη ναυτιλία από τις αρχές του περασμένου αιώνα έως σήμερα, καθώς και η τάξη μεγέθους του ρυθμού δεδομένων που κάθε μια μπορεί να επιτύχει.



Σχήμα 4. Η εξέλιξη των δικτύων στη ναυτιλία [1]

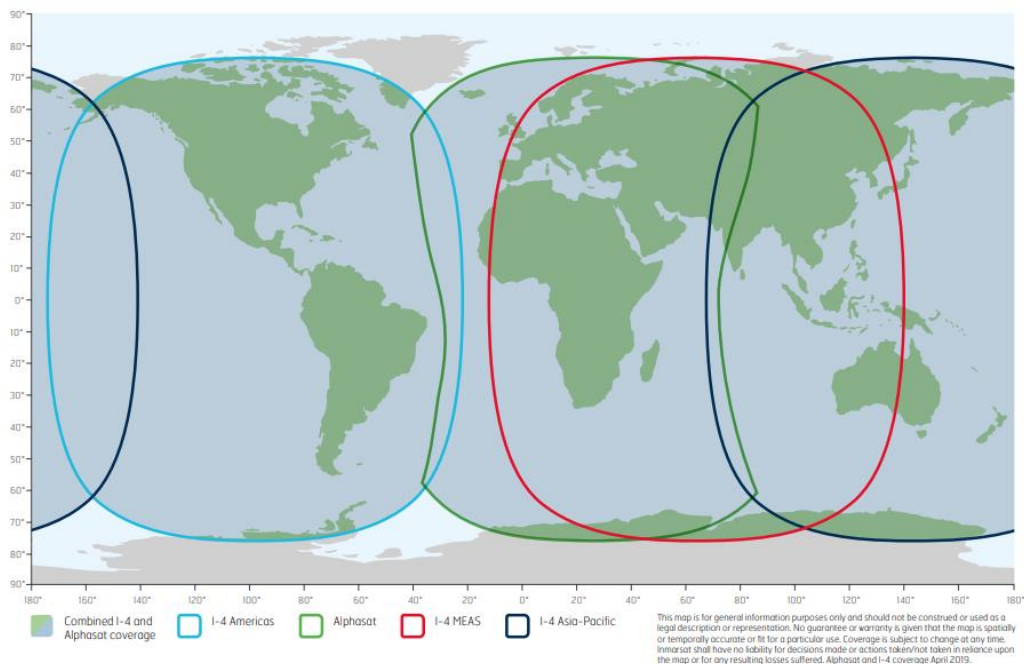
Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική και την τοπολογία τους, τα δίκτυα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία μπορούν να διακριθούν σε δίκτυα δορυφόρων, ακτής, νησιών, πλωτά και αέρος.

3.2 Δορυφόροι

Οι δορυφόροι αποτελούν το δεύτερο πιο ανεπτυγμένο μέσο επικοινωνίας στη Ναυτιλία και το μοναδικό μέχρι σήμερα πάροχο υπηρεσιών Διαδικτύου με ευρεία κάλυψη στους ωκεανούς. Συγκεκριμένα, ο Διεθνής Οργανισμός INMARSAT χρησιμοποιώντας γεωστάσιμους δορυφόρους (GEO) παρέχει υπηρεσίες ομιλίας, δεδομένων IP καθώς και πρόσβασης στο GMDSS. Η πρώτη γενιά (Inmarsat-1) των Inmarsat συστημάτων τέθηκε σε λειτουργία το 1982 και απαρτιζόταν από αρκετούς δορυφόρους και αναμεταδότες διαφόρων εταιρειών και οργανισμών, παρέχοντας κυρίως αναλογικές υπηρεσίες ομιλίας, fax και χαμηλής ταχύτητας μεταφορά δεδομένων [32]. Το 1990 εγκαινιάστηκε η δεύτερη γενιά (Inmarsat-2) τεσσάρων συνολικά δορυφόρων, καθένας από τους οποίους καλύπτει συγκεκριμένο μέρος τη γης μέσω μιας δέσμης (global beam), και προσφέρουν ψηφιακή υπηρεσία ομιλίας, fax και μεταφορά δεδομένων με μεγαλύτερη ταχύτητα συγκριτικά με την 1^η γενιά [33], [34]. Η 3^η γενιά (Inmarsat-3) των Inmarsat δορυφόρων, αποτελείται από 5 δορυφόρους καθένας από τους οποίους εκτός από την global δέσμη, έχει τη δυνατότητα εκπομπής 4 έως 6 περιφερειακών δεσμών, παρέχοντας έτσι υπηρεσίες MPDS (Mobile Packet Data Service) για πρόσβαση στο διαδίκτυο, 8 φορές μεγαλύτερης χωρητικότητας συγκριτικά με την 2^η γενιά.

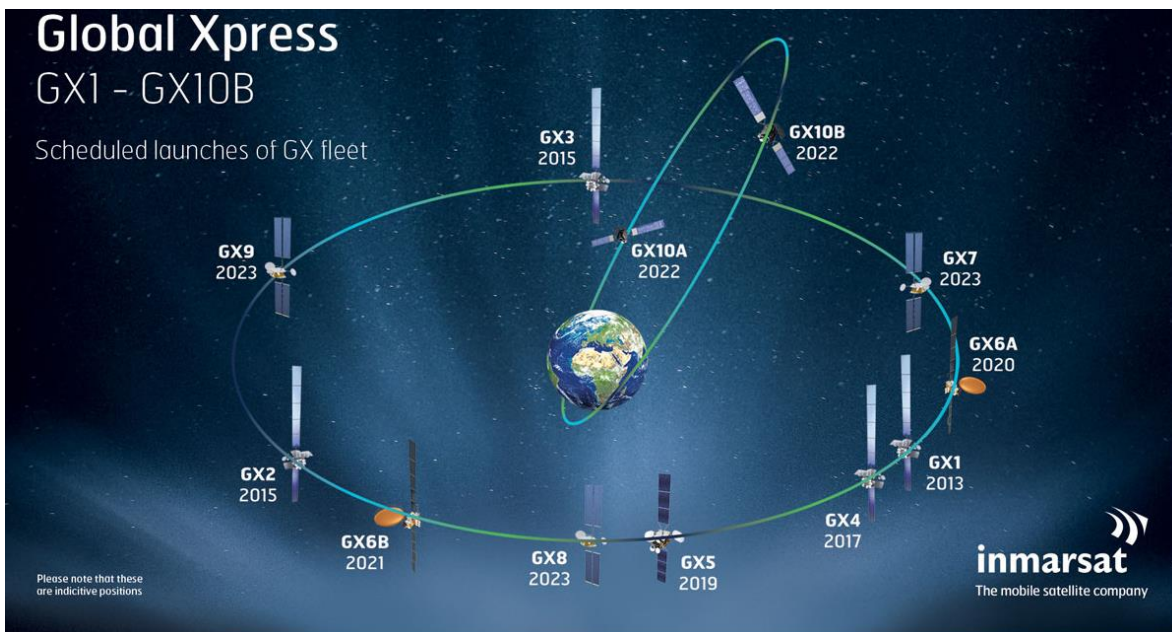


I-4 and Alphasat coverage

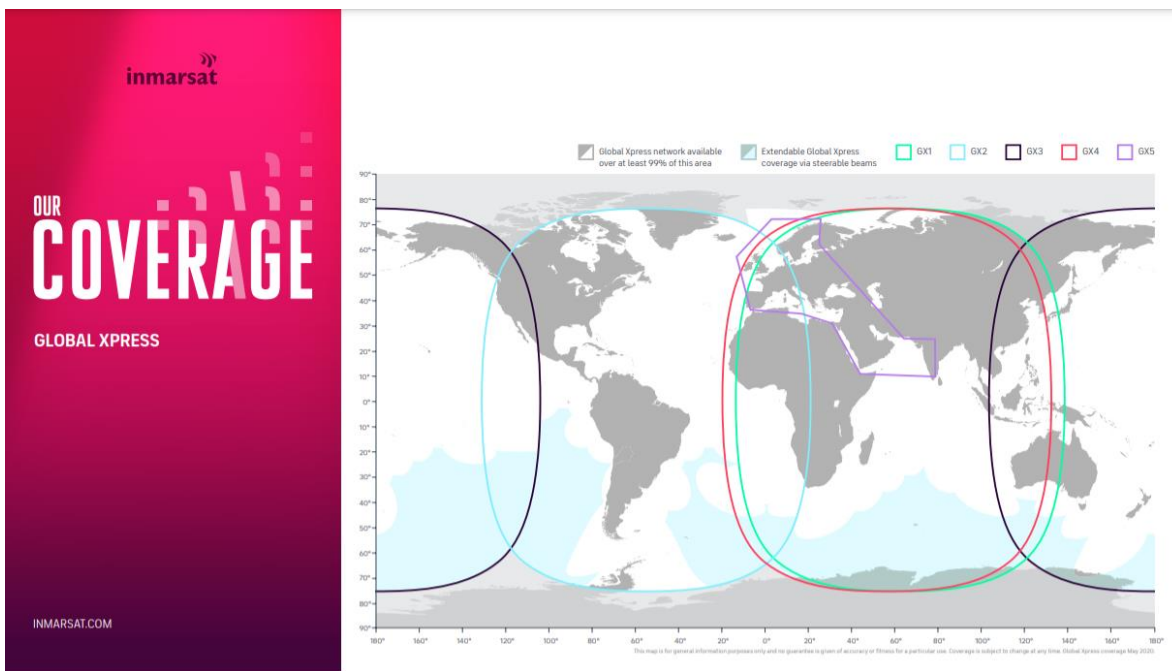


Σχήμα 5. Inmarsat-4, γεωγραφική κάλυψη [35]

Η 4^η γενιά (Inmarsat-4) αποτελείται από 3 δορυφόρους που τέθηκαν σε τροχιά το 2005 ενώ εγγυάται την πρόσβαση στο διαδίκτυο με μέγιστο ρυθμό δεδομένων 492 kbps [36], [37]. Κάθε δορυφόρος μπορεί να παράξει έως 19 περιφερειακές δέσμες ενώ πλέον δίνεται και η δυνατότητα για εκπομπή έως 200 στενότερων δεσμών σημείου (spot beams). Το 2013 ένας ακόμα δορυφόρος, ο Alphasat, προστέθηκε στο στόλο των I-4 δορυφόρων με σκοπό την βελτίωση της κάλυψη περιοχών της Ευρώπης, Αφρικής και Μέσης Ανατολής. Οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες για πιο γρήγορη και αξιόπιστη πρόσβαση στο διαδίκτυο, οδήγησε στην 5^η γενιά των δορυφόρων της Inmarsat, γνωστή και ως Global Xpress, η οποία στοχεύει στην πρόσβαση στο διαδίκτυο παγκοσμίως με ταχύτητες έως 50 Mbps downlink και 5 Mbps uplink [38]. Το Νοέμβριο του 2019 μπήκε σε τροχιά ο 5^{ος} δορυφόρος του στόλου που αποτελείται πλέον από τους GX1-GX5, ενώ στα επόμενα χρόνια θα προστεθούν 2 ακόμα δορυφόροι εγκαινιάζοντας την 6^η γενιά (Inmarsat-6). Τέλος, η επέκταση των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων στην Αρκτική, οδήγησε στην υλοποίηση ενός σχεδίου (GX Arctic) για την επικοινωνιακή κάλυψη της περιοχής πέρα από τον βόρειο παράλληλο στις 65°, με την εκτόξευση των 2 δορυφόρων να έχει προγραμματιστεί για το 2022.



Σχήμα 6. Απεικόνιση του Global Xpress στο εγγύς μέλλον [39]



Σχήμα 7. Γεωγραφική κάλυψη Global Xpress [35]

Εκτός από τους γεωστάσιμους δορυφόρους της Inmarsat, δορυφορικές υπηρεσίες επικοινωνίας προσφέρει και η εταιρεία Iridium, η οποία μέσω ενός δικτύου δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (LEO) παρέχει υπηρεσίες ομιλίας και δεδομένων στο φάσμα συχνοτήτων L, σε παγκόσμια

κλίμακα. Η 2^η γενιά (Iridium-NEXT) του δικτύου άρχισε να υλοποιείται το 2017 και αποτελείται από 66 ενεργούς δορυφόρους σε τροχιά περίπου 781km από την επιφάνεια της Γης, 9 εφεδρικούς οι οποίοι βρίσκονται σε χαμηλότερη τροχιά 666km και μπορούν να τεθούν σε λειτουργία σε περίπτωση βλάβης των ενεργών και 6 δορυφόρων στο έδαφος. Το Iridium-NEXT, προσφέρει υπηρεσίες δεδομένων έως 128 kbps σε κινητά τερματικά και έως 1,5 Mbps για πλοία εφοδιασμένα με το Iridium Pilot marine terminal, ενώ στο άμεσο μέλλον προσδοκείται αύξηση του εύρους ζώνης και μεγαλύτερες ταχύτητες με σκοπό ο ρυθμός μετάδοσης να φτάσει το 1,5 Mbps για κινητά τερματικά και μέχρι 30 Mbps για μεγαλύτερα τερματικά [40].

Η Κίνα έχει αναπτύξει επίσης δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας για εμπορική χρήση. Το 2018 τέθηκε σε λειτουργία το σύστημα Tiantong-1, μέσω του οποίου παρέχονται υπηρεσίες ομιλίας, σύντομων μηνυμάτων και μεταφορά δεδομένων με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 9,6 kbps κυρίως σε περιοχές του Ινδικού και Ειρηνικού Ωκεανού [41]. Το 2018 επίσης, εγκαινιάστηκε ο πρώτος δορυφόρος υψηλής διεκπεραιωτικότητας (high throughput) στη χώρα, το Shijian-13. Αποτελεί ένα ευρυζωνικό σύστημα επικοινωνίας με 26 δέσμες στη Ka συχνότητα, το οποίο χρησιμοποιείται για την κάλυψη θαλάσσιων περιοχών έως 200km από τις ακτές τις Κίνας [42].

Ο EchoStar-19 αποτελεί ένα ακόμα παράδειγμα δορυφόρου υψηλής διεκπεραιωτικότητας, με χωρητικότητα μεγαλύτερη από 200 Gbps και ικανότητα παραγωγής 138 δεσμών για χρήστες και 22 για κόμβους επικοινωνίας. Παρέχει υψηλής ταχύτητας πρόσβαση στο διαδίκτυο για χρήστες στη Βόρεια Αμερική, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν εφεδρική λύση για την κάλυψη έκτακτων επικοινωνιακών αναγκών [43].

Τέλος, δορυφορικές υπηρεσίες επικοινωνίας υψηλών ταχυτήτων (μέχρι και 150 Mbps) και πολύ χαμηλής καθυστέρησης της τάξης των 20-40 ms [44] [45], πρόκειται να επιτύχει στο άμεσο μέλλον η αεροδιαστημική εταιρεία SpaceX. Συγκεκριμένα, η υλοποίηση του δικτύου Starlink το οποίο αποτελείται (μέχρι την ώρα που γράφονται αυτές οι γραμμές [46]) από 1000 και πλέον δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (550 km) και επίγειους πομποδέκτες θα επιφέρει επανάσταση στην ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρων, αφού ο στόλος των 12000 δορυφόρων που πρόκειται να τεθούν σε τροχιά στοχεύει στην πρόσβαση στο διαδίκτυο από κάθε σημείο της κατοικημένης Γης αλλά και στους ωκεανούς μέσω πολύ υψηλών ταχυτήτων. Ήδη βρίσκεται σε λειτουργία το δοκιμαστικό πρόγραμμα beta με το οποίο οι χρήστες έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο με ταχύτητες έως 200 Mbps με μηνιαία συνδρομή και κόστος εξοπλισμού 99 και 499 δολαρίων αντίστοιχα. Από την άλλη μεριά, η ανάπτυξη του δικτύου Starlink έχει δημιουργήσει αντιδράσεις στην επιστημονική κοινότητα, ειδικότερα στον κλάδο της Αστρονομίας, λόγω της φωτορύπανσης που επιφέρει η ύπαρξη πλήθους δορυφόρων σε τόσο κοντινή απόσταση από τη Γη.

Παρόλο που η χρήση δορυφόρων στη Ναυτιλία δίνει λύση στο σημαντικό πρόβλημα της πρόσβασης στο Διαδίκτυο, ειδικότερα σε απομακρυσμένα από τις ακτές σημεία, παρουσιάζει τις εξής αδυναμίες:

- Τη σχετικά μεγάλη καθυστέρηση (~250 ms) που υπεισέρχεται κατά την εκπομπή-λήψη του σήματος μεταξύ δύο σημείων στην επιφάνεια της Γης, λόγω της αναμετάδοσης μέσω του γεωστάσιμου δορυφόρου. Το παραπάνω φαινόμενο της χρονοκαθυστέρησης μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη χρήση δορυφόρων μέσης (*Medium Earth Orbit MEO*) ή και χαμηλής τροχιάς (*Low Earth Orbit LEO*), οι οποίοι, σε αντίθεση με τους γεωστάσιμους δορυφόρους (GEO τροχιάς 35.786 km), περιστρέφονται σε τροχιές 3000-35786 km (MEO) και 200-3000 km (LEO), αντίστοιχα. Παρολαυτά, η αξιοποίηση των δύο τελευταίων προϋποθέτει τη χρήση ιστροπικών κεραιών (*Omni-Directional Antenna*) και όχι κατευθυντικών (*Directional Antenna*) όπως συμβαίνει στην περίπτωση των Γεωστάσιμων δορυφόρων. Αυτό συμβαίνει

διότι η περίοδος περιστροφής των MEO και LEO δορυφόρων δε ταυτίζεται με την περίοδο περιστροφής της Γης με αποτέλεσμα να μη διατηρείται η οπτική επαφή μεταξύ της κεραίας του πλοίου και του δορυφόρου, κάτι που οδηγεί σε σημαντική υποβάθμιση του σήματος.

- Την έντονη εξάρτηση του σήματος από τις καιρικές συνθήκες αλλά και το θαλάσσιο περιβάλλον, με αποτέλεσμα την χαμηλή αξιοπιστία της επικοινωνίας [47], [48], [49], [50].
- Το υψηλό κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης των δορυφόρων αποτελεί το δεύτερο σημαντικό μειονέκτημα στην αξιοποίηση τους ως μέσο επικοινωνίας στη Ναυτιλία. Όπως απεικονίζεται και στον παρακάτω πίνακα το κόστος χρήσης ανά MB και ανά λεπτό ομιλίας είναι σημαντικά μεγαλύτερα από το αντίστοιχο κόστος των κυψελωτών δικτύων στη στεριά. Εξάλλου, πρέπει να συνυπολογιστεί και το κόστος του απαιτούμενου εξοπλισμού στο πλοίο. Για παράδειγμα το κόστος εγκατάστασης του εξοπλισμού για την υπηρεσία Inmarsat Fleet 77 σε ένα πλοίο, αγγίζει τα \$28.000 ενώ η χρήση των υπηρεσιών είναι περίπου \$2,8 ανά λεπτό. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται διάφορες δορυφορικές υπηρεσίες και τα σχετικά κόστη:

Service package	Data rate (kbps)	Per-Megabyte cost (\$)	Per-Phone Minute cost (\$)	Equipment's cost (\$)
Inmarsat FleetBroadband G	≤ 432	0.40~20.85	0.42~1.15	4,700~16,914
Inmarsat MCD-4800-BGAN	448	4.70~6.99	0.98	13,733
Inmarsat FleetPhone Global	2.4	15~50	0.80~0.95	1,899~2,349
Iridium Pilot Global	134	7.41~10.90	0.65~1.22	≥ 4,495

3.3 Maritime Radio (Ασύρματος) και Σύστημα NAVTEX

Ήδη από τις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα αρχίζει να αναπτύσσεται η τεχνολογία του ασυρμάτου στη ναυτιλία. Στις μέρες μας, αυτή αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται καθολικά για την επικοινωνία. Πρόκειται για Η/Μ ακτινοβολία στο φάσμα των VHF (Very High Frequency, 30-300 MHz) από το οποίο για τη ναυτιλία χρησιμοποιείται το τμήμα 156-162.025 MHz. Με αυτόν τον τρόπο, για τις ανάγκες επικοινωνίας στη Ναυτιλία είναι δεσμευμένο ένα φάσμα 6.025 MHz το οποίο χωρίζεται αντίστοιχα σε 50 και 25 kHz κανάλια. Έτσι, καθίσταται εφικτή η μετάδοση και η λήψη αναλογικών σημάτων φωνής σε απόσταση έως και 111 km κατά προσέγγιση. Πλέον, είναι δυνατή και η μετάδοση σημάτων κινδύνου με το πάτημα ενός κουμπιού με ταχύτητα έως και 1.2 kbps με την ανάπτυξη του προτύπου DSC (Digital Selective Calling) το οποίο αναπτύχθηκε ως μέρος του Global Maritime Distress Safety Systems (GMDSS) και επιτρέπει τη μετάδοση προκαθορισμένων ψηφιακών σημάτων.

Με σκοπό να ικανοποιηθεί η ανάγκη δημιουργίας ενός Αυτόματου Συστήματος Αναγνώρισης (AIS) το οποίο θα επιτρέπει την αμοιβαία γνώση της ταυτότητας και της θέσης του κάθε πλοίου καθώς και άλλων χρήσιμων πληροφοριών (λ.χ. λιμένας απόπλου/κατάπλου, φορτίο κ.ά.) έχουν δεσμευτεί κάποια VHF κανάλια (161.975 MHz και 162.025 MHz) για την επικοινωνία με ταχύτητες έως 9,6 kbps. Φυσικά, η ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για ανταλλαγή περισσότερων πληροφοριών τόσο μεταξύ πλοίων όσο και πλοίων με την ακτή, οδήγησε στην προσθήκη επιπλέον VHF καναλιών, ενώ με την ταυτόχρονη αξιοποίηση τεχνικών πολυπλεξίας (OFDM) και του μοντέλου κατανομημένων συστημάτων κεραίας (Distributed Antenna Systems) επιτεύχθηκε ταχύτητα διάδοσης

302.2 kbps. Τέλος, για τις ανάγκες επικοινωνίας εντός των πλοίων χρησιμοποιείται ένα τμήμα 20 MHz του UHF φάσματος μεταξύ 450-470 MHz.

Ένα ακόμα σύστημα επικοινωνίας το οποίο βρίσκει εφαρμογή στη ναυτιλία, είναι το NAVTEX (NAVigational TEleX). Χρησιμοποιεί τις μεσαίες συχνότητες (MF), συγκεκριμένα τα 518 kHz για εκπομπή διεθνών πληροφοριών και τα 490 kHz για τοπικά μηνύματα [51]. Είναι κατάλληλο για επικοινωνία εντός 200 ναυτικών μιλίων (370 km) από την ακτή, ενώ το περιορισμένο εύρος ζώνης επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων με μέγιστο ρυθμό 300 bps. Μέσω του συστήματος NAVTEX, το οποίο αποτελεί συστατικό στοιχείο της Παγκόσμιας Υπηρεσίας Προειδοποίησης Πλοήγησης (WWNWS) καθώς και του GMDSS, μεταδίδονται μηνύματα πλοήγησης, μετεωρολογικών δεδομένων (προβλέψεις και προειδοποιήσεις) καθώς και δεδομένα έκτακτης ανάγκης.

Τέλος, το PACTOR αποτελεί ένα ακόμα σύστημα επικοινωνίας στη ναυτιλία. Χρησιμοποιείται για υπηρεσίες e-mail με μέγιστο ρυθμό δεδομένων 10,5kbps, ενώ λειτουργεί στο HF φάσμα μεταξύ 1 – 30 MHz [52]. Πλέον έχει αναπτυχθεί η 4^η γενιά του συστήματος (PACTOR-IV), η οποία περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τεχνικές κωδικοποίησης, συμπίεσης και μετρίασης της υποβάθμισης του σήματος που προκύπτει από το φαινόμενο πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation).

Όπως είδαμε παραπάνω, η αξιοποίηση του MF, HF και VHF φάσματος και οι διάφορες υπηρεσίες που περιγράφηκαν, παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επικοινωνία στη ναυτιλία και ειδικότερα για σκοπούς ασφάλειας και διάσωσης. Ωστόσο, το περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων που έχει αποδοθεί στη ναυτιλία καθώς και το περιορισμένο εύρος ζώνης δεν επαρκεί για την υποστήριξη και απρόσκοπτη λειτουργία εφαρμογών που απαιτούν ευρυζωνική σύνδεση ή υπηρεσίες δεδομένων πραγματικού χρόνου.

3.4 Κυψελωτά δίκτυα

Η τρίτη κατά σειρά τεχνολογία επικοινωνίας που χρησιμοποιείται στη Ναυτιλία είναι αυτή των κυψελωτών δικτύων. Η γνωστή μας από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τεχνολογία και ειδικότερα οι νεότερες εφαρμογές της, όπως το LTE (Long-Term- Evolution) και το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), παρέχουν υπηρεσίες Διαδικτύου στα λιμάνια και σε θαλάσσιες περιοχές που απέχουν μερικά χιλιόμετρα από τις ακτές. Οι τεχνολογίες αυτές είναι ικανές να προσφέρουν ρυθμούς δεδομένων ακόμα και μερικών εκατοντάδων Mbps με ακτίνα κάλυψης έως και 100km από τις ακτές, σύμφωνα με νεότερες έρευνες.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα δίκτυα ανά τον κόσμο, τα οποία βασιζόμενα στις σύγχρονες τεχνολογίες των κυψελωτών δικτύων κάνουν δυνατή την πρόσβαση στο διαδίκτυο στα ναυτιλιακά περιβάλλοντα, με ταχύτητες συγκρίσιμες με αυτές της ηπειρωτικής χώρας. Για παράδειγμα, το LTE δίκτυο από την εταιρεία Tampnet [53] που παρέχει υπηρεσίες ομιλίας και δεδομένων με ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 2 Mbps downlink και 1 Mbps uplink στη Βόρεια Θάλασσα και στο κόλπο του Μεξικού, σε αποστάσεις έως και 50 km από τις ακτές. Στην Κίνα, έχει αναπτυχθεί ένα δοκιμαστικό TD-LTE δίκτυο, το οποίο έχει πετύχει ρυθμούς έως και 7 Mbps σε αποστάσεις 30 km από τις ακτές της πόλης Qingdao [54]. Επιπλέον με την αξιοποίηση νησιωτικών περιοχών δίνεται η δυνατότητα επέκτασης των ηπειρωτικών κυψελωτών δικτύων σε θαλάσσιες περιοχές. Χαρακτηριστικά

παραδείγματα αποτελούν τα εγχειρήματα για τη βελτίωση και επέκταση του δικτύου 4G, της Verizon στο Rhode Island [55] και στην ευρύτερη περιοχή του Boothbay Harbour, της Huawei στο Long Island της πόλης Shandong και της China Telecom στο νησιωτικό σύμπλεγμα Nansha [56], ενώ στο [20] ερευνητές από τη Νότιο Κορέα έχουν αναπτύξει το δίκτυο LTE-Maritime με σημαντικά αποτελέσματα όπως αναλύεται σε ξεχωριστή επόμενη ενότητα.

Η πλειοψηφία των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στη Ναυτιλία λαμβάνει χώρα σε θαλάσσιες περιοχές κοντά στις ακτογραμμές. Επομένως, η χρήση των κυψελωτών δικτύων παίζει σημαντικό ρόλο στην κάλυψη των τηλεπικοινωνιακών αναγκών της Ναυτιλίας σε αυτές τις περιπτώσεις. Παρολαυτά, οι περιοχές αυτές αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής επιφάνειας των ωκεανών και ως εκ τούτου κυψελωτά δίκτυα δεν μπορούν να αποτελέσουν καθολική λύση του τηλεπικοινωνιακού ζητήματος στη Ναυτιλία. Συγκεκριμένα, ακόμα και αν υποθέσουμε ότι χρησιμοποιώντας την τεχνολογία LTE με ακτίνα κάλυψης 100 km περί των ακτών τότε θα είχαμε μια κάλυψη της τάξης 9,83% της συνολικής θαλάσσιας επιφάνειας.

3.5 Δίκτυα WANETs (Wireless Ad Hoc Networks)

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά τόσο των κυψελωτών δικτύων όσο και γενικά των ασύρματων δικτύων είναι ότι η λειτουργία τους απαιτεί μια δομή σταθμών βάσης (BS) ή Access Point (AP) μέσω των οποίων εγκαθίσταται η επικοινωνία με τα τερματικά. Το παραπάνω, αποτελεί ισχυρό μειονέκτημα για το περιβάλλον της Ναυτιλίας διότι μια τέτοια δομή είναι αρκετά δύσκολο να υλοποιηθεί, ειδικά όσο περισσότερο απομακρυνόμαστε από τις παράκτιες περιοχές.

Η υλοποίηση, λοιπόν, ενός δικτύου μέσα στο οποίο οι τερματικοί σταθμοί θα μπορούσαν να επικοινωνούν απευθείας χωρίς τη διαμεσολάβηση BS/AP, πρόβαλλε επιτακτική για την επιστημονική κοινότητα. Στην κατεύθυνση αυτή, και με σκοπό τη δημιουργία ενός δικτύου επικοινωνίας κατάλληλο για ευμετάβλητα και ασταθή περιβάλλοντα όπως αυτό της Ναυτιλίας, αναπτύχθηκε το WANET, στα πλαίσια του οποίου, κάθε πλοίο ή και εγκατάσταση στη θαλάσσια επιφάνεια επανδρωμένο με τον κατάλληλο εξοπλισμό, μπορεί να αποτελέσει μέρος του δικτύου για απευθείας επικοινωνία τόσο με άλλα πλεούμενα όσο και με τη στεριά.

Πρόσφατες έρευνες έχουν αποδώσει κάποια σημαντικά αποτελέσματα στην εφαρμογή του WANET δικτύου, επεκτείνοντας τη χρήση WiMAX παρέχοντας έτσι ευρυζωνική σύνδεση στο διαδίκτυο χωρίς τη χρήση δορυφόρων στη Μεσόγειο Θάλασσα [57] καθώς και απευθείας επικοινωνία πλοίου με πλοίο και πλοίου με ακτή, με υψηλές ταχύτητες. Τα παραπάνω, χαρακτηρίζονται και ως NANET (Nautical WANET) [58], [59] αφού τα δομικά στοιχεία που απαρτίζουν το δίκτυο βρίσκονται στην επιφάνεια της θάλασσας. Αντίστοιχη, στην Ιαπωνία έχει αναπτυχθεί ένα ad-hoc δίκτυο μεταξύ πλοίων, το οποίο επεκτείνει την κάλυψη των ήδη υπάρχοντων παράκτιων δικτύων ως και 70 km. Χρησιμοποιούνται οι συχνότητες των 27 και 40 MHz και παρέχει υπηρεσίες επικοινωνίας με ρυθμούς 1,2 kbps [60]. Αρκετά καλύτερα αποτελέσματα, σε σχέση με τους ρυθμούς δεδομένων που μπορεί να προσφέρει, παρουσιάζει το πρότζεκτ TRITON [30], [61], [62] στη Σιγκαπούρη το οποίο αναλύεται εκτενέστερα σε επόμενη ενότητα. Πρόκειται για υλοποίηση ενός πλήρως καταναμεμημένου δικτύου όπου κάθε πλεούμενο στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή, αποτελεί κόμβο αυτού, δρομολογώντας την κίνηση προς τους γείτονές του. Λειτουργεί στη συχνότητα των 5.8 GHz και καλύπτει απόστάσεις έως και 27 km από τις ακτές, ενώ προσφέρει ευρυζωνικές υπηρεσίες επικοινωνίας έως 6 Mbps.

Με βάση τα παραπάνω, το δίκτυο WANET μπορεί να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά στις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες επικοινωνίας στη Ναυτιλία, με σκοπό να επεκτείνει την ακτίνα κάλυψης και να βελτιώσει τη απόδοσή τους. Στην κατεύθυνση αυτή κινείται η επιστημονική έρευνα στοχεύοντας στην περαιτέρω επέκταση του WANET δικτύου τόσο στον αέρα όσο και υποθαλάσσια. Συγκεκριμένα, βασιζόμενοι στην ιδέα ότι κάθετι που κινείται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (αεροπλάνο, ελικόπτερο, αερόστατα κ.ά.), μπορεί να αποτελέσει μέρος του δικτύου φέροντας τον κατάλληλο εξοπλισμό, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός AANET (Aeronautic WANET) [63], [64]. Αντίστοιχα, όσον αφορά στην υποθαλάσσια κάλυψη, η δημιουργία UANET (Underwater WANET) [65] θα μπορούσε να διασυνδέει συσκευές χωρίς την ανάγκη δημιουργίας πολύπλοκου δικτύου κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Παρόλα αυτά, η ιδέα των WANET δικτύων εμπεριέχει σημαντικές αδυναμίες που σχετίζονται τόσο με τη μικρή ακτίνα κάλυψης όσο και με την αναξιοπιστία στην απόδοση λόγω της ευμετάβλητης τοπολογίας του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι η απόδοση εξαρτάται από την πυκνότητα και κατανομή των κόμβων στο δίκτυο ενώ υποβαθμίζεται έντονα όσο αυξάνεται ο αριθμός των βημάτων για μια συγκεκριμένη διαδρομή. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ως συμπληρωματική λύση επικοινωνία για το δυναμικό περιβάλλον της ναυτιλίας, παρέχοντας περιστασιακή κάλυψη δικτύου μεγάλης ταχύτητας και χαμηλού κόστους κατασκευής.

3.6 High Altitude Platforms (HAP)

Μία ακόμα εφαρμογή που μπορεί να δώσει σημαντική λύση στο πρόβλημα της επικοινωνίας στη ναυτιλία είναι τα δίκτυα HAP. Πρόκειται για ημιστάσιμες πλατφόρμες στη στρατόσφαιρα, σε ύψος συνήθως 17-22 km από την επιφάνεια της θάλασσας. Η ακτίνα κάλυψής τους σχετίζεται άμεσα με το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται καθώς και τη γωνία ανύψωσης, ενώ μπορεί να φτάσει τα 100 km. Σε πρόσφατες έρευνες επιχειρήθηκε η δημιουργία HAP δικτύου σε ύψος 10 km από την επιφάνεια, χρησιμοποιώντας φάσμα 50 MHz στη συχνότητα των 28 GHz, με αποτέλεσμα την επίτευξη ταχυτήτων downlink μέχρι και 320M bps [66].

Οι πλατφόρμες HAPs είναι κατάλληλες για την κάλυψη ευρείων θαλάσσιων περιοχών σχετικά κοντά στην ακτογραμμή, όπως για παράδειγμα σε περιοχές έως 200 ναυτικά μίλια που αντιστοιχούν στις Α.Ο.Ζ. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή υπηρεσιών διαδικτύου στη Ναυτιλία στις ακόλουθες περιπτώσεις [67]:

- Στιγμιαία αύξηση της ζήτησης των χρηστών για μικρό χρονικό διάστημα σε μια θαλάσσια περιοχή. Το HAP δίκτυο είναι ιδανικό για μία τέτοια περίπτωση καθώς μπορεί να δημιουργηθεί και να απομακρυνθεί άμεσα ανταποκρινόμενο στις εκάστοτε ανάγκες.
- Σαν βραχυπρόθεσμη λύση σε περιπτώσεις όπου τα NANETs και τα CLNs δίκτυα δεν είναι διαθέσιμα. Για παράδειγμα, ένα HAP δίκτυο μπορεί να δημιουργηθεί άμεσα λειτουργώντας για κάποιους μήνες ή και περισσότερο με χρήση της ηλιακής ενέργειας εξυπηρετώντας έτσι τις ανάγκες επικοινωνίας σε ειδικές περιπτώσεις, όπως λ.χ. μια επιστημονική μελέτη.
- Σε περιοχές όπου η χρήση των CLNs δικτύων είναι εξαιρετικά δύσκολη, οι πλατφόρμες HAP αποτελούμενες από μη επανδρωμένα, ηλιακά τροφοδοτούμενα αεροσκάφη μπορούν να παραμείνουν για αρκετά μεγάλο διάστημα στη στρατόσφαιρα αποτελώντας έτσι θεμελιώδη μέρος των επικοινωνιών στη Ναυτιλία.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των HAPs συγκριτικά με τους δορυφόρους είναι μεταξύ άλλων η εύκολη, γρήγορη και αρκετά χαμηλότερου κόστους υλοποίηση καθώς και η αποδοτικότερη επικοινωνία με σαφώς μικρότερη καθυστέρηση διάδοσης [66]. Σε σχέση με τα δίκτυα WANET, οι πλατφόρμες HAP καλύπτουν αρκετά μεγαλύτερες περιοχές, παρέχοντας πιο αξιόπιστη δικτυακή κάλυψη.

Μεταξύ των αδυναμιών που χαρακτηρίζουν τις HAPs, η σημαντικότερη είναι η παροχή ενέργειας. Οι πλατφόρμες HAPs, υστερούν σε αυτόν το τομέα, τόσο συγκριτικά με τους δορυφόρους, όσο και με τα WANET δίκτυα. Συγκεκριμένα, οι πλατφόρμες πρέπει να διατηρούν το σημείο στο οποίο βρίσκονται σε σχέση με τη θαλάσσια επιφάνεια που καλύπτουν, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική κατανάλωση ενέργειας, είτε πρόκειται για balloon platform είτε για aircraft platform. Στην πρώτη περίπτωση η ενέργεια απαιτείται ως αντιστάθμισμα στην επίδραση του ανέμου στη θέση της πλατφόρμας, ενώ στη δεύτερη για την ανάγκη διατήρησης της κυκλικής τροχιάς (που απαιτεί η κάλυψη συγκεκριμένης περιοχής) του αεροσκάφους [66]. Σε αντίθεση με τους δορυφόρους, οι πλατφόρμες HAPs πρέπει να αποθηκεύουν την ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας με σκοπό την ομαλή λειτουργία τους και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη επιπλέον εξοπλισμού, γεγονός που με τη σειρά του αυξάνει ολοένα την κατανάλωση ενέργειας. Επομένως, η αυτονομία των πλατφόρμων και κατεπέκταση η διάρκεια των αποστολών που μπορούν να εξυπηρετήσουν, εξαρτάται άμεσα από την διάρκεια ζωής του εξοπλισμού αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας. Φυσικά, η επιστροφή των HAPs στο έδαφος για συντήρηση είναι δυνατή αλλά αυτό συνεπάγεται την διακοπή των παρεχόμενων υπηρεσιών διαδικτύου στο σημείο ενδιαφέροντος, αυξάνοντας το κόστος υλοποίησης [68].

Μεταξύ των διαφόρων μελετών και ερευνητικών εγχειρημάτων ξεχωρίζει το BLUECOM+. Πρόκειται για δίκτυο που χρησιμοποιεί ιπτάμενα «μπαλόνια» για την επέκταση των ηπειρωτικών δικτύων επικοινωνίας σε απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές. Κάνει χρήση του φάσματος που μένει ανεκμετάλλευτο από την τηλεόραση σε κάθε περιοχή (TV white spaces) και με τη βοήθεια τεχνικών αναμετάδοσης παρέχει, σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων, υπηρεσίες ευρυζωνικής σύνδεσης 3 Mbps σε αποστάσεις έως και 150 km από τις ακτές [69], [70], [71], [72]. Μια ακόμα προσπάθεια ανάπτυξης ανάλογου δικτύου, αποτελεί το Loon Project της Google που ξεκίνησε το 2013. Για την υλοποίηση του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν μπαλόνια υψηλής πίεσης σε ύψος 20 km και φάσμα συχνοτήτων 2,4 GHz και 5,8 GHz. Παρότι το εγχείρημα δεν έχει επεκταθεί για εμπορική εκμετάλλευση, παρείχε έκτακτες λύσεις επικοινωνίας (έως και 10 Mbps) σε πληγείσες από φυσικές καταστροφές περιοχές [73]. Την ίδια χρονιά, ανάλογο σχέδιο εκπονήθηκε από το Facebook, με σκοπό τη δωρεάν πρόσβαση στο διαδίκτυο για χρήστες σε απομονωμένες περιοχές, συμπεριλαμβανομένων και τη ναυτιλία. Το Internet.org project όπως ονομάστηκε, χρησιμοποιεί μη επανδρωμένα αεροσκάφη σε υψόμετρο 55-82km τα οποία επικοινωνώντας μεταξύ τους με laser διαύλους, σχηματίζουν εναέριους σταθμούς βάσης. Μέχρις στιγμής μέσω της συνεργασίας με διάφορους τοπικούς τηλεπικοινωνιακούς παρόχους, αρκετοί άνθρωποι από αναπτυσσόμενες περιοχές της Αφρικής, Ασίας και Λατινικής Αμερικής έχουν πρόσβαση σε συγκεκριμένες διαδικτυακές υπηρεσίες [74]. Παρόλαυτα, το μέλλον του προγράμματος κρίνεται αβέβαιο καθώς τα τελευταία χρόνια έχει επικριθεί για παραβίαση της ουδετερότητας του Διαδικτύου.

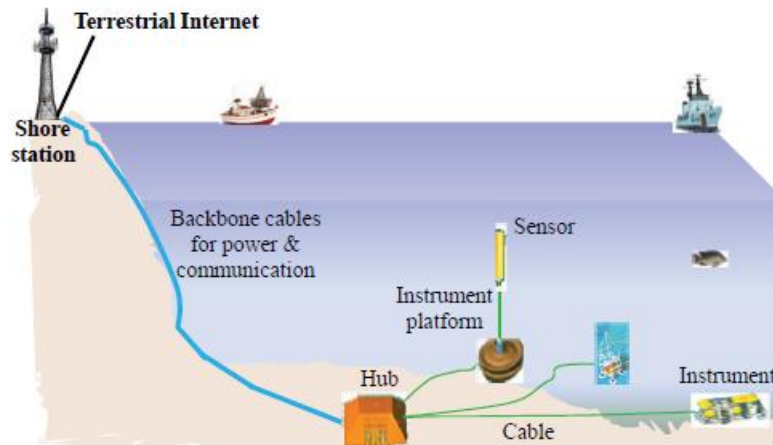
3.7 Cabled Underwater Observatory System

Ένα ακόμα σύστημα επικοινωνίας, σχεδιασμένο για την εξυπηρέτηση ειδικών εφαρμογών και όχι για καθολική στη ναυτιλία, αποτελεί το Cabled Underwater Observatory System [21]. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα υποθαλάσσια συστήματα ανά τον κόσμο, με σκοπό τη συλλογή επιστημονικών δεδομένων,

μετρήσεων, τη μελέτη φαινομένων αλλά και την πρόβλεψη φυσικών καταστροφών. Μεταξύ των πιο διαδεδομένων συστημάτων, μπορούμε να διακρίνουμε το Monterey Accelerated Research System (MARS) στις ΗΠΑ, το Ocean Networks Canada (OCN) στον Καναδά, το Dense Ocean floor Network System for Earthquakes and Tsunamis (DONET) στην Ιαπωνία και το European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory (EMSO) με υποδομές σε αρκετές χώρες της Ευρώπης, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα.

Τα παραπάνω συστήματα χρησιμοποιούν υποβρύχια καλώδια τόσο για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη, με σκοπό την υποστήριξη και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στην υδρόσφαιρα καθώς και διαδραματίζουν ρόλο στα ευρύτερα συστήματα της Γης. Αποτελούνται από υψηλής τεχνολογίας αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας, ΡΗ, αλατότητας, κυκλοφορίας του νερού, κινήσεις του βυθού κ.ά.

Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 8, ένα κεντρικό σημείο (Hub) βρίσκεται σε βάθος 891 m στο κόλπο του Μοντερέυ στη Καλιφόρνια των ΗΠΑ, το οποίο διασυνδέεται μέσω καλωδίων ρεύματος και οπτικής ίνας με έναν παράκτιο κεντρικό σταθμό σε απόσταση 52 km [75]. Στο Hub είναι συνδεδεμένοι μέσω καλωδίων επιπλέον κόμβοι οι οποίοι φέρουν τα κατάλληλα όργανα μέτρησης.



Σχήμα 8. Απεικόνιση της δομής του δικτύου MARS [21]

Κεφάλαιο 4: Κατευθύνσεις της Έρευνας

4.1 Υβριδικό Μοντέλο δικτύων στη Ναυτιλία

4.1.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια περιγράψαμε λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά των σημαντικότερων τεχνολογιών επικοινωνίας, που είτε χρησιμοποιούνται ήδη στη ναυτιλία, είτε βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται συνοπτικά οι σημαντικότερες από αυτές:

	System capacity	Coverage size	System reliability	Safety of infrastructure	Service cost-effectiveness	Underwater coverage
Maritime radio system	Small	Medium	High*	Unsafe in extreme weathers	Medium	No
Mobile cellular network	Large	Small	High		High	No
Wireless ad hoc network	Medium	Small	Low		Very high	Yes
High altitude platform	Large	Medium	High	Safe	High	No
Satellite system	Large	Largest	High	Safe	Low	No
Cabled underwater system	Largest	Medium	Highest	Safe	Low	Yes

Πίνακας 3. Τα κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων επικοινωνίας στη ναυτιλία [21]

Παρατηρούμε ότι καμία από τις παραπάνω τεχνολογίες δεν μπορεί από μόνη της να εξασφαλίσει αξιόπιστες, αποδοτικές και υψηλής ταχύτητας υπηρεσίες διαδικτύου σε περιβάλλοντα ναυτιλίας.

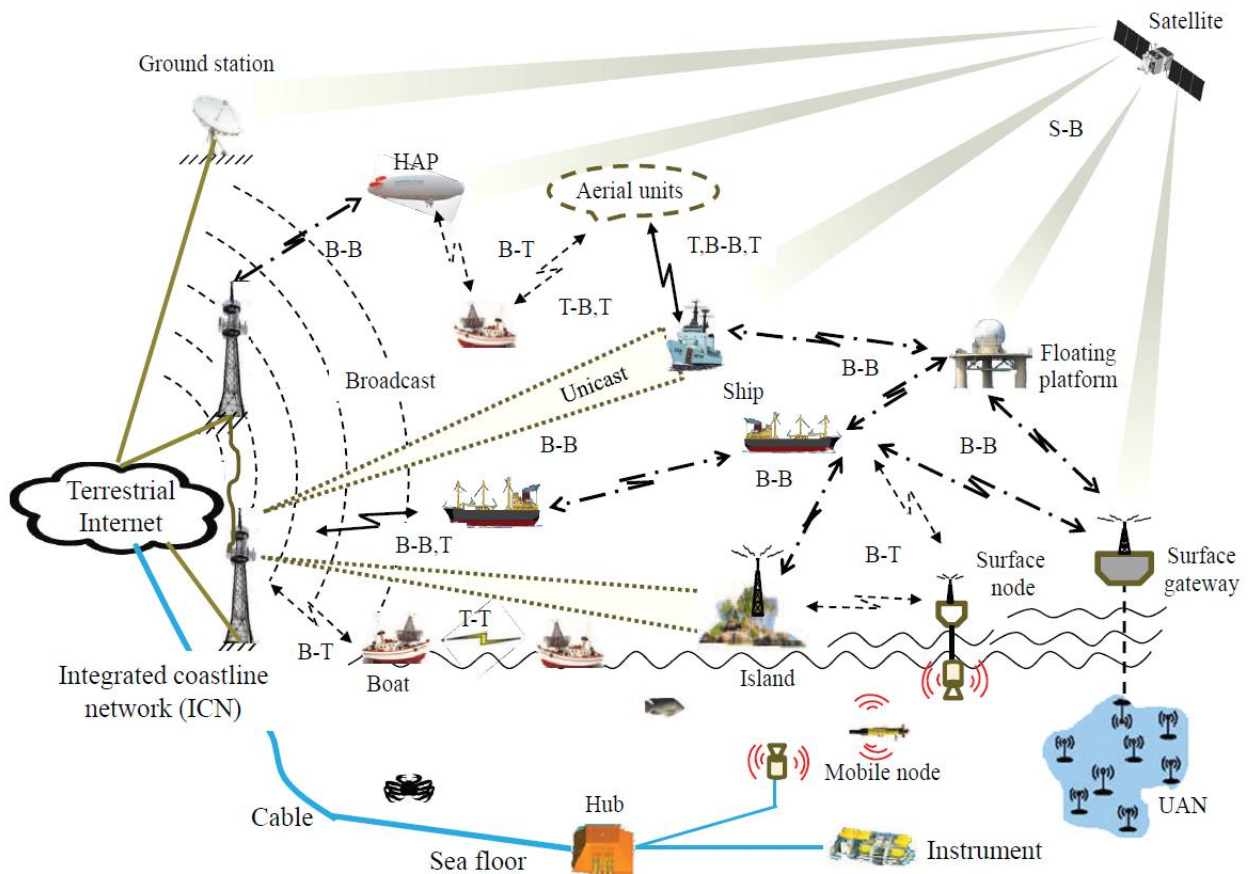
Έτσι, ερευνητές από το Πανεπιστήμιο της Σανγκάης οδηγήθηκαν στην υιοθέτηση ενός υβριδικού μοντέλου στο οποίο κάθε μία από τις τεχνολογίες που περιγράψαμε θα αξιοποιείται κατάλληλα, με σκοπό τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος πρόσβασης στο Διαδίκτυο [68], [67], [76]. Σε αυτό, κεντρικό ρόλο αποτελούν τα δίκτυα στις ακτογραμμές (Coastline Networks, CLNs) τα οποία καλύπτουν θαλάσσιες περιοχές σε μικρή απόσταση από τις ακτές, αλλά με την πλειοψηφία των χρηστών να βρίσκονται εκεί. Κύρια μέρη αυτών είναι τα κυψελωτά δίκτυα και ο ασύρματος.

Η αξιοποίηση αυτών των δικτύων στοχεύει όχι μόνο στην επέκταση των ηπειρωτικών υπηρεσιών Διαδικτύου στις θαλάσσιες περιοχές κοντά στις ακτογραμμές, αλλά και στη βελτίωση των υπηρεσιών Ασύρματου στη Ναυτιλία. Αυτό μπορεί να γίνει κάνοντας χρήση του ευρέως φάσματος των ραδιοκυμάτων που έχει αποδοθεί στα κυψελωτά δίκτυα το οποίο όμως μένει αναξιοποίητο στα θαλάσσια περιβάλλοντα.

Με βάση τα παραπάνω, αναμένεται τα CLN δίκτυα να προσφέρουν υπηρεσίες διαδικτύου χαμηλού κόστους και υψηλής ποιότητας στους χρήστες στο περιβάλλον της Ναυτιλίας, αντίστοιχες με αυτές που απολαμβάνουν οι χρήστες στην ηπειρωτική χώρα. Για τη βελτίωση της ποιότητας των

υπηρεσιών και την επέκταση της κάλυψης των CLN δικτύων, προτείνεται η αξιοποίηση των δικτύων WANETs. Για παράδειγμα, γειτονικά πλοία μπορούν να σχηματίσουν ένα δίκτυο NANET στο οποίο μπορούν να συνδεθούν μικρότερα πλοία και άλλα πλεούμενα που βρίσκονται κοντά. Τα δίκτυα αυτά μπορούν να υποστηρίξουν τις ανάγκες ενδοεπικοινωνίας μεταξύ των κόμβων που τα αποτελούν, καθώς και τη σύνδεση αυτών με τα CLN δίκτυα για την παροχή υπηρεσιών διαδικτύου. Επιπλέον, ο σχηματισμός AANET δικτύων μπορεί να αποτελέσει εφεδρική λύση για κόμβους που βρίσκονται εκτός της εμβέλειας των CLN και WANET δικτύων, με σκοπό τη δημιουργία προσωρινών δικτύων για την συλλογή δεδομένων και υποστήριξη εφαρμογών μη πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση σε συγκεκριμένα θαλάσσια σημεία και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, η δημιουργία HAP δικτύων αποτελεί μια αξιόπιστη λύση και μπορούν έτσι να συνεισφέρουν στο υβριδικό μοντέλο της επικοινωνίας στη Ναυτιλία. Όσον αφορά τη χρήση των δορυφόρων, η οποία αποτελεί τη μοναδική λύση ευρείας κάλυψης επικοινωνίας στη Ναυτιλία μέχρι σήμερα, θα έχει υποστηρικτικό ρόλο στο νέο αυτό μοντέλο. Συγκεκριμένα, οι δορυφόροι θα αποτελούν την τελευταία επιλογή ενός κόμβου για επικοινωνία, όταν όλες οι υπόλοιπες τεχνολογίες δεν θα είναι προσβάσιμες, ενώ η χρήση τους θα περιορίζεται σε έκτακτες καταστάσεις έρευνας και διάσωσης.

Στο σχήμα 9 παρουσιάζεται η δομή του υβριδικού μοντέλου που περιγράφηκε:



Σχήμα 9 Αποψη της αρχιτεκτονικής του υβριδικού μοντέλου [21]

Οι κόμβοι, που αποτελούν δομικά μέρη του παραπάνω μοντέλου, διακρίνονται σε τερματικά (Terminal – T) και σε σταθμούς βάσης (Base Station – B). Η κύρια διαφορά τους εντοπίζεται στο γεγονός ότι τα τερματικά δεν έχουν τη δυνατότητα αναμετάδοσης των σημάτων που λαμβάνουν από άλλους κόμβους, σε αντίθεση με τους σταθμούς βάσης.

Με βάση αυτή τη διάκριση μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τους κύριους διάλους επικοινωνίας, μέσω των οποίων ανταλλάσσονται τα δεδομένα στο περιβάλλον της ναυτιλίας:

Τερματικό – Τερματικό (T – T): Δύο τερματικά επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους, χωρίς τη μεσολάβηση σταθμού βάσης και όταν αυτό απαιτείται. Χαρακτηριστό παράδειγμα η επικοινωνία μεταξύ μικρών πλεούμενων.

Σταθμός βάσης – Τερματικό (B – T): Η τυπική επικοινωνία που χρησιμοποιείται και στα κυψελωτά δίκτυα, επεκτείνεται στη Ναυτιλία. Οι σταθμοί βάσης που βρίσκονται στην ακτογραμμή και σε νησιά χαρακτηρίζονται ως Terrestrial Base Station (TBS), ενώ αυτοί στα μεγάλα πλοία ή σε πλατφόρμες δικτύων HAPs ως Vehicular Base Stations (VBS)

Σταθμός βάσης – Σταθμός βάσης (B – B): Αυτός ο διάυλος επικοινωνίας επιτρέπει την αναμετάδοση των H/M σημάτων μεταξύ των σταθμών βάσης μέσω των εξής συνδυασμών: TBS-TBS, TBS-VBS και VBS-VBS. Η πρώτη ζεύξη μπορεί να είναι ασύρματη ή ενσύρματη ανάλογα με το γεωγραφικό ανάγλυφο και το κόστος εγκατάστασης. Οι δύο επόμενες ζεύξεις ικανοποιούνται μόνο ασύρματα λόγω της ύπαρξης των VBS κόμβων.

Δορυφόρος – Σταθμός βάσης (S – B): Είναι ο διάυλος επικοινωνίας που εξυπηρετεί τη σύνδεση των δορυφόρων τόσο με τους σταθμούς βάσης με σκοπό την πρόσβαση στις υπηρεσίες διαδικτύου στην ηπειρωτική χώρα, όσο και με τα πλοία και άλλα πλεούμενα αντικείμενα στους ωκεανούς.

Υποβρύχιος διάυλος επικοινωνίας: Πρόκειται για υποβρύχια ζεύξη ακουστικών κυμάτων που διασυνδέει τους κόμβους που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η επικοινωνία μεταξύ των παραπάνω κόμβων και αυτών που βρίσκονται στην επιφάνεια της θάλασσας μπορεί να πραγματοποιηθεί με την κατάλληλη μετατροπή των ακουστικών σημάτων σε ηλεκτρικά.

4.1.2 Ευελιξία στον τρόπο εκπομπής

Ανάλογα με την κατανομή των χρηστών αλλά και με τις διαθέσιμες τεχνολογίες στο εκάστοτε θαλάσσιο περιβάλλον, παρέχεται η δυνατότητα επιλογής του τρόπου εκπομπής. Έτσι, είναι δυνατή η αξιοποίηση των χαρακτηριστικών τόσο της ευρυεκπομπής (broadcast) όσο και της εκπομπής προς συγκεκριμένες περιοχές της θάλασσας (point to point) για την επίτευξη βέλτιστης επικοινωνίας. Για παράδειγμα, σε θαλάσσιες περιοχές κοντά στις ακτογραμμές όπου η συγκέντρωση των χρηστών είναι μεγάλη, η επιλογή της ευρυεκπομπής είναι προτιμότερη από την προσανατολισμένη εκπομπή προς συγκεκριμένο σημείο. Αντίστροφα, σε απομακρυσμένα θαλάσσια περιβάλλοντα όπου η συγκέντρωση των χρηστών είναι αραιή και εντοπίζεται κυρίως σε μεμονωμένα πλοία που κινούνται σε προκαθορισμένα δρομολογία, προτείνεται η επιλογή της εντοπισμένης εκπομπής με τη χρήση κατευθυντικών κεραιών.

Συγκεκριμένα, για την επικοινωνία μεταξύ ηπειρωτικού σταθμού βάσης και πλοίου η δημιουργία ζεύξης σημείου προς σημείο, αποτελεί την καλύτερη δυνατή λύση. Η ύπαρξη κατευθυντικών κεραιών τόσο στους TBS όσο και στους VBS σταθμούς βάσης και η διατήρηση της σχετικής τους θέσης είναι αναγκαίοι παράγοντες για την εξασφάλιση της ποιότητας της επικοινωνίας σημείου προς σημείο. Το τελευταίο, απαιτεί την κατάλληλη περιστροφή των κεραιών ανάλογα με την κίνηση του πλοίου. Επιπλέον, για τη βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ των σταθμών βάσης,

προτείνεται η δέσμευση συγκεκριμένου φάσματος με σκοπό τη δημιουργία μοναδικού καναλιού επικοινωνίας, στα πλαίσια ενός πλεγματοειδές δικτύου.

4.1.3 Σενάρια επιλογής καναλιού επικοινωνίας

Καθώς τα πλοία κινούνται στη θαλάσσια επιφάνεια, απομακρύνονται από την περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης και εισέρχονται στην αντίστοιχη ενός άλλου. Η εξασφάλιση της απρόσκοπτης επικοινωνίας των χρηστών απαιτεί την ομαλή μετάβαση (handoff) του σταθμού βάσης στο πλοίο VBS ή των τερματικών (T) από τον προηγούμενο ηπειρωτικό σταθμό βάσης (TBS) στον επόμενο. Το παραπάνω, το οποίο αποτελεί ένα από τα κυριότερα ζητήματα ακόμα και στα κυψελωτά δίκτυα της ηπειρωτικής χώρας, μπορεί να αντιμετωπισθεί σχετικά εύκολα στη ναυτιλία. Αυτό συμβαίνει λόγω της σχετικά μικρής ταχύτητας των πλοίων αλλά και της δυνατότητας γνώσης των γεωγραφικών συντεταγμένων ενός πλοίου κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Με βάση τα παραπάνω, μπορούν να οριστούν οι κανόνες επιλογής καναλιού επικοινωνίας, ως εξής:

Το τερματικό επιλέγει το κανάλι επικοινωνίας με την καλύτερη ποιότητα και το μικρότερο δυνατό κόστος. Για παράδειγμα ένα τερματικό που βρίσκεται μέσα ή κοντά σε πλοίο με εγκατεστημένο σταθμό βάσης (VBS), θα επιλέξει να συνδεθεί με αυτό, αν δεν υπάρχει η δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας με ηπειρωτικό σταθμό βάσης (TBS) ή ο δίαυλος VBS – T παρέχει αρκετά καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας από τον TBS – T, χωρίς φυσικά επιπλέον χρέωση.

Ο δίαυλος VBS – TBS είναι προτιμότερος από την αναμετάδοση σήματος προς ένα TBS μέσω δίαυλου VBS – VBS, αρκεί ο πρώτος να εγγυάται την ύπαρξη αποδεκτής ποιότητας υπηρεσιών.

4.1.4 Αρχιτεκτονική του Δικτύου

Στο διάγραμμα 5 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του υβριδικού δικτύου που περιγράφηκε παραπάνω. Σε αυτό, δομικά μέρη αποτελούν τα ICN και τα NANETs, μέσω των οποίων οι χρήστες στη Ναυτιλία έχουν άμεση πρόσβαση στις ηπειρωτικές υποδομές διαδικτύου. Η επέκταση κάλυψης του δικτύου και η βελτίωση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών γίνεται δυνατή με την αξιοποίηση των HAPs και AANETs. Επιπλέον, μέσω της δυνατότητας σύνδεσης των παραπάνω τεχνολογιών με τους δορυφόρους εξασφαλίζεται η αξιόπιστη και απρόσκοπτη επικοινωνία στη Ναυτιλία, γεγονός κρίσιμο σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Τέλος, είναι δυνατή η διασύνδεση των υποθαλάσσιων δικτύων μέσω των ICN και NANETs με τα υπόλοιπα δίκτυα στη ναυτιλία αλλά και με τις ηπειρωτικές υποδομές διαδικτύου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και θεωρώντας κάθε ένα από τα δίκτυα ως αυτόνομο κόμβο, μπορούμε να χαρακτηρίσουμε το υβριδικό μοντέλο που περιγράψαμε ως ένα κλιμακούμενο WANET δίκτυο. Σε αυτό θα γίνεται προσπάθεια αξιοποίησης κάθε διαθέσιμης τεχνολογίας ενώ παράλληλα θα λαμβάνονται υπόψιν οι απαιτήσεις των εφαρμογών με σκοπό την βέλτιστη επιλογή δικτύου. Μπορούμε να διακρίνουμε τα παρακάτω σενάρια επιλογής:

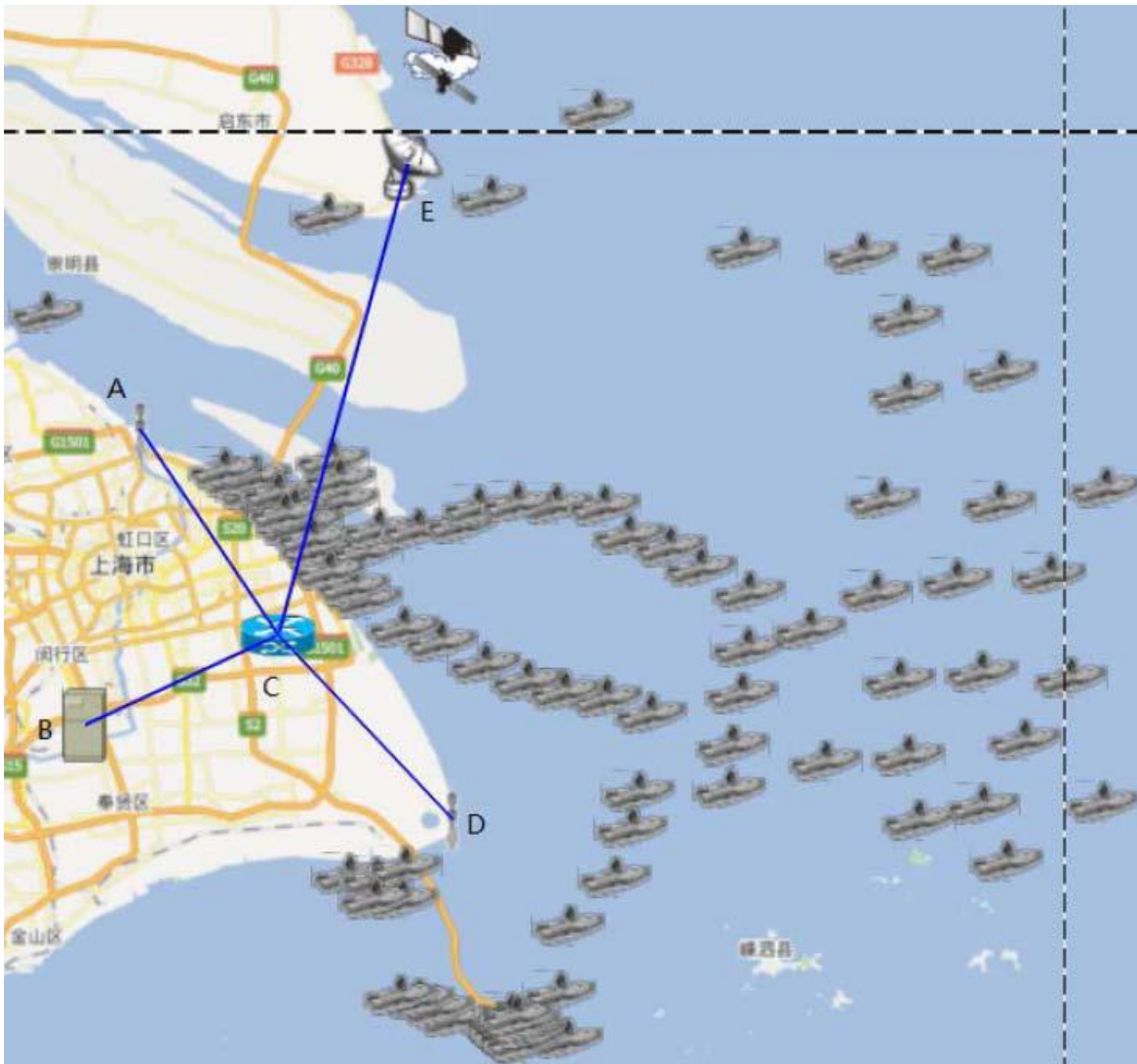
1. Η επιλογή των ICN σταθμών βάσης όταν ένας κόμβος βρίσκεται εντός της εμβέλειάς τους, καθώς αποτελούν την αποδοτικότερη επιλογή.
2. Όταν ο κόμβος βρίσκεται εκτός εμβέλειας ενός ICN και υπάρχει διαθέσιμο NANET δίκτυο, θα επιλέγει αυτό για πρόσβαση στο διαδικτυο.
3. Μέσω δικτύου HAP εφόσον υπάρχει δυνατότητα σχηματισμού δικτύου στην περιοχή.

4. Στην περίπτωση που καμία από τις παραπάνω επιλογές δεν είναι διαθέσιμες και εφόσον οι πληροφορίες που πρέπει να μεταδωθούν δεν είναι ευαίσθητες σε καθυστέρηση και απώλειες, ο κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει τα AANET δίκτυα για πρόσβαση στο διαδίκτυο. Τέλος για την μετάδοση κρίσιμων δεδομένων ή σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, ο κόμβος οδηγείται στη χρήση των δορυφόρων.

Με βάση τα όσα περιγράφηκαν, είναι φανερό ότι η αποτελεσματικότητα του υβριδικού μοντέλου καθώς και η ποιότητα των υπηρεσιών διαδικτύου που θα απολαμβάνουν οι χρήστες στη ναυτιλία εξαρτώνται άμεσα από την σωστή διαχείριση των διαθέσιμων τεχνολογιών αλλά και την βέλτιστη επιλογή τους. Σημαντικό επίσης παράγοντα αποτελεί η δυνατότητα βέλτιστης επιλογής τους από το ίδιο το δίκτυο, χωρίς την ανάγκη συμμετοχής του χρήστη. Τα παραπάνω αποτελούν αντικείμενο έρευνας και βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο.

4.1.5 Προσομοίωση του Υβριδικού μοντέλου

Στο σχήμα 10 παρουσιάζεται μια απλή προσομοίωση που καταδικνύει την επίδραση των διαθέσιμων τεχνολογιών - δικτύων στην απόδοση και την ακτίνα κάλυψης του υβριδικού μοντέλου. Σε αυτό χρησιμοποιήθηκαν δίκτυα ICN, NANET και δορυφόρος για την κάλυψη μιας θαλάσσιας επιφάνειας 85 km^2 , ένα μέρος του λιμανιού της Σανγκάης στην Κίνα.



Σχήμα 10. Σενάριο προσομοίωσης του υβριδικού μοντέλου στη ναυτιλία [67]

Το ICN αποτελείται από 2 σταθμούς βάσης τεχνολογίας IEEE 802.16 που βρίσκονται στα σημεία A,D αντίστοιχα, με μέγιστη ακτίνα κάλυψης τα 50 km περίπου. Το δίκτυο NANET απαρτίζεται από 105 πλοία τα οποία βρίσκονται καταμελημένα στο λιμένα και κινούνται προς συγκεκριμένη κατεύθυνση και με ταχύτητες εντός δοσμένου εύρους, σύμφωνα με ένα στατιστικό μοντέλο ναυτιλιακής κυκλοφορίας πραγματικού χρόνου. Τα πλοία επικοινωνούν με έναν κεντρικό διακομιστή (server), που βρίσκεται στο σημείο B του διαγράμματος, μέσω ενός δρομολογητή στο σημείο C, προσπαθώντας να διατηρούν σταθερό ρυθμό δεδομένων. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης τα δίκτυα CLN, NANET και ο δορυφόρος θέτονται σε λειτουργία διαδοχικά.

Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα διάφορα σενάρια που περιγράψαμε. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για 2 εύρη ταχυτήτων 0 ~ 6 km και 6 ~13 km αντίστοιχα, ενώ το μετρήσιμο μέγεθος είναι ο συνολικός αριθμός πακέτων δεδομένων που λαμβάνει ο διακομιστής στη διάρκεια της προσομοίωσης. Επίσης, υπάρχει διάκριση μεταξύ των

αποτελεσμάτων για τους κόμβους που βρίσκονται στα όρια της θαλάσσιας επιφάνειας που καλύπτει η προσομοίωση και τους συνολικούς.

Boat's speed ranges	0~6 km/s		6~13 km/s	
	Edge nodes	Overall	Edge nodes	Overall
Only CLN	0	896.6	0	97.153
CLN, NANETs	3.741	872.531	2.914	99.196
CLN, NANETs, SAT	7.851	876.641	7.024	103.306

Πίνακας 4. Αποτελέσματα προσομοίωσης [67]

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα για τους απομακρυσμένους κόμβους είναι ενδεικτικά της αμελητέας επίδρασης του ICN δικτύου στην επικοινωνία με τον κεντρικό διακομιστή. Αυτό είναι φυσιολογικό καθώς η απόσταση των κόμβων από τους σταθμούς βάσης είναι μεγάλη, πέρα από τα όρια της ακτίνας δράσης τους. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι δεν υπάρχει ληφθέν πακέτο δεδομένων όταν λειτουργούν μόνο τα ICN δίκτυα. Καθώς προστίθεται το NANET έχουμε μετρήσιμα αποτελέσματα, τα οποία σχεδόν διπλασιάζονται με την λειτουργία του δορυφόρου. Αυτό συμβαίνει διότι οι κόμβοι έχουν πλέον περισσότερες ευκαιρίες να επικοινωνήσουν με το διακομιστή.

Εστιάζοντας στα αποτελέσματα για το σύνολο των κόμβων, διακρίνουμε σημαντική αύξηση σε όλες τις περιπτώσεις. Εδώ η επίδραση του ICN δικτύου είναι αισθητή.

Από την άλλη μεριά, αυξάνοντας το εύρος ταχυτήτων των πλοίων και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι είναι εμφανώς μειωμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα των μικρότερων ταχυτήτων. Αυτό οφείλεται στο ότι η έντονη κινητικότητα των πλοίων επηρεάζει τη λειτουργία του δικτύου NANET, ενώ περισσότερα από αυτά μετακινούνται εκτός της ακτίνας δράσης των σταθμών βάσης ICN με αποτέλεσμα να μη μπορούν να επικοινωνούν μέσω αυτών με το διακομιστή.

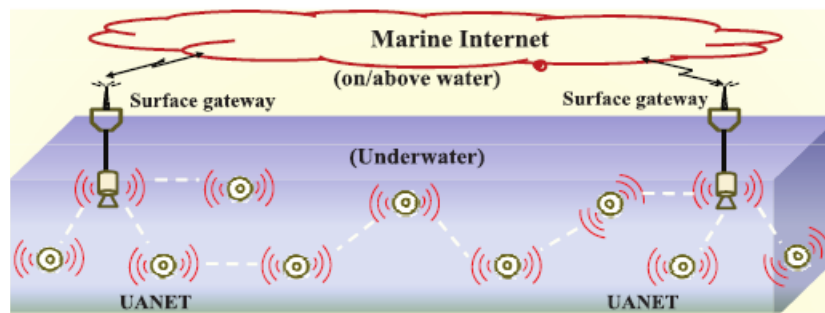
4.1.6 Υποθαλάσσια Δίκτυα

Στο σχήμα 9 που περιγράφεται το υβριδικό μοντέλο, γίνεται αναφορά και στα υποθαλάσσια δίκτυα. Όπως περιγράψαμε και στα προηγούμενα εδάφια, πληθώρα αισθητήρων και άλλων αντικειμένων βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, με τον αριθμό τους ολοένα να αυξάνει καθώς το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of underwater things – IoUT) εξελίσσεται και υποθαλάσσια. Αντικείμενα που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μπορούν να σχηματίσουν υποβρύχια WANETs δίκτυα, γνωστά ως UANETs (Underwater Ad hoc NETworks). Το γεγονός ότι τα δίκτυα αυτά βρίσκονται απομονωμένα μεταξύ τους αλλά και η ανάγκη για πρόσβαση στο καθιστά αναγκαία τη διασύνδεσή τους. Δύο είναι οι βασικές μέθοδοι:

Με χρήση υποθαλάσσιων καλωδίων που εξυπηρετούν τόσο την επικοινωνία όσο και την ενεργειακή κάλυψη των κόμβων που διασυνδεούν. Η μέθοδος αυτή υλοποιείται ήδη σε διάφορα ερευνητικά υποθαλάσσια κέντρα όπως περιγράψαμε προηγούμενα. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της υλοποίησης είναι το υψηλό κόστος και η δυσκολία στην κατασκευή πυκνού δικτύου για την κάλυψη εκτεταμένων υποθαλάσσιων επιφανειών.

Με τη διασύνδεση των δικτύων UANET μέσω πλεούμενων δρομολογητών. Η ζεύξη γίνεται είτε μέσω ακουστικών κυμάτων είτε μέσω ακτίνων μπλέ/πράσινου laser. Τα υποθαλάσσια δίκτυα επικοινωνούν με τα δίκτυα της Ναυτιλίας που περιγράψαμε αποκτώντας έτσι πρόσβαση στο διαδίκτυο. Στο σχήμα 11 παρουσιάζεται συνοπτικά η αρχιτεκτονική της υποθαλάσσιας διασύνδεσης,

για την οποία προτιμάται η τοπολογία αστέρα όπου κάθε UANET δίκτυο χρησιμοποιεί ένα δρομολογητή στην επιφάνεια της θάλασσας.



Σχήμα 11. Δικτύωση των υποθαλάσσιων δικτύων με το διαδίκτυο στη ναυτιλία [67]

Ο δρομολογητής συλλέγει τα δεδομένα από τους διάφορους κόμβους που βρίσκονται εντός της εμβέλειας τους και τα προωθεί στο διαδίκτυο μέσω των διαθέσιμων ναυτιλιακών δικτύων, αλλά και αντίστροφα μπορεί να στέλνει τα δεδομένα προς το UANET δίκτυο που σχετίζεται με αυτόν. Οι κόμβοι που αποτελούν αυτό το δίκτυο μπορούν να απικοινωνούν απευθείας με το δρομολογητή, ενώ για αυτούς που βρίσκονται εκτός της εμβέλειας του είναι απαραίτητη η αναμετάδοση των σημάτων μέσω άλλων κόμβων. Επιπλέον, γειτονικοί δρομολογητές μπορούν να σχηματίσουν ένα ασύρματο καταναμεμημένο δίκτυο, επιτρέποντας σε αρκετά UANETs να διασυνδεθούν μεταξύ τους καλύπτοντας έτσι μεγάλες υποθαλάσσιες ζώνες.

Από τα παραπάνω, είναι φανερό ότι η δεύτερη μέθοδος υλοποιείται πιο εύκολα, έχει μικρότερο κόστος και είναι αρκετά πιο εύελικτη από την πρώτη, με σημαντικό όμως μειονέκτημα την αδυναμία παροχής ενέργειας στα υποθαλάσσια αντικείμενα.

4.2 Δίκτυο LTE - Maritime

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα πρόσφατο ερευνητικό εγχείρημα που λαμβάνει χώρα στη Νότια Κορέα, το οποίο βασίζεται στην επέκταση της τεχνολογίας LTE των κυψελωτών δικτύων και στοχεύει στην επίτευξη ρυθμού δεδομένων της τάξης των Mbps σε ναυτιλιακά περιβάλλοντα για αποστάσεις έως και 100 km από τη στεριά. Πρόκειται για μια έρευνα που βρίσκεται σε εξέλιξη ενώ τα μέχρι στιγμής αποτελέσματα είναι αρκετά ενθαρρυντικά όπως θα δούμε παρακάτω. Εκτιμάται [77] ότι εντός του 2021 το LTE – Maritime θα υποστηρίξει διάφορες υπηρεσίες για την αποφυγή ατυχημάτων και βέλτιστη πλοήγηση.

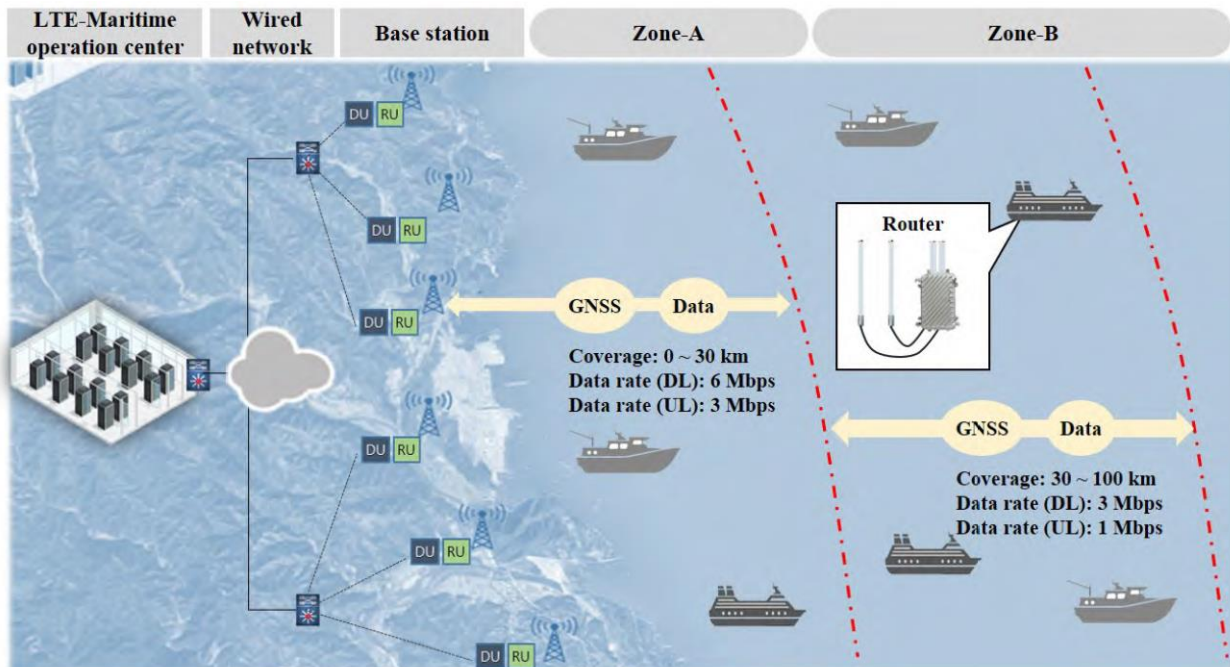
4.2.1 Αρχιτεκτονική του Δικτύου LTE – Maritime

Το δίκτυο LTE – Maritime βασίζεται στην τεχνολογία LTE, η οποία αποτελεί μια από τις πιο ελπιδοφόρες λύσεις στην ανάπτυξη ασύρματων δικτύων στη ναυτιλία. Με τη χρήση της τεχνολογίας αυτής, καθίσταται δυνατή η επίτευξη μεγάλων ρυθμών δεδομένων και χωρητικότητας καθώς και η

αποτελεσματική αξιοποίηση του φάσματος της Η/Μ ακτινοβολίας που αποδίδεται. Επιπλέον, με την προσθήκη διαφόρων τεχνικών όπως MIMO (Multiple Input – Multiple Output) και Carrier Aggregation, τα παραπάνω γίνονται εφικτά ακόμα και σε δυναμικά περιβάλλοντα διάδοσης της ακτινοβολίας, όπως αυτά της ναυτιλίας.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, οδήγησαν τους Κορεάτες ερευνητές στην υλοποίηση δικτύου ενός βήματος (single hop) βασισμένο στη τεχνολογία LTE, όπου τα πλοία επικοινωνούν απευθείας με τους σταθμούς βάσης της στεριάς. Σε αντίθεση με τα LTE κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τα οποία είναι σχεδιασμένα για σχετικά μικρή κάλυψη, στο LTE – Maritime ο στόχος είναι η ακτίνα δράσης να εκτείνεται ως και τα 100 km.

Στο σχήμα 12 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του δικτύου και τα δομικά μέρη που το αποτελούν.



Σχήμα 12. Αρχιτεκτονική του δικτύου LTE – Maritime [20]

Σταθμοί βάσης BS: Είναι εφοδιασμένοι με δρομολογητές και εξοπλισμό Evolved Packet Core (EPC), ενώ βρίσκονται εγκατεστημένοι σε υπερυψωμένα μέρη κατά μήκος των ακτογραμμών για να εξασφαλίζεται η οπτική επαφή με τα πλοία. Κάθε σταθμός βάσης αποτελείται από πολλαπλά στοιχεία ραδιοεκπομπής (Radio Units – RUs) και ψηφιακής επεξεργασίας δεδομένων (Digital Units – DUs). Κάθε RU συνδέεται ενσύρματα με το κέντρο λειτουργίας του δικτύου LTE – Maritime.

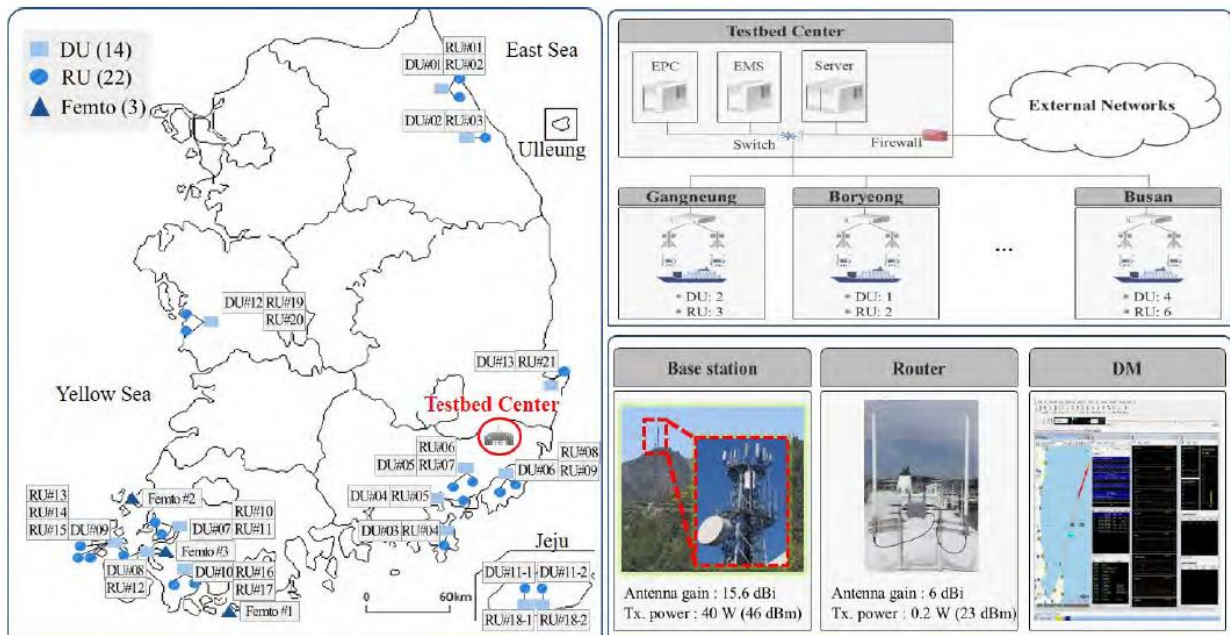
Δρομολογητής (LTE-Maritime router): Στα πλαίσια της υλοποίησης του δικτύου, οι ερευνητές έχουν αναπτύξει ένα δρομολογητή κατάλληλο για τον περιβάλλον της ναυτιλίας, με τον οποίο είναι εφοδιασμένα τα πλοία. Περιλαμβάνει κεραία ύψους 1,2 m και υψηλής ενίσχυσης 6 dBi παρέχοντας καλύτερη επικοινωνία συγκριτικά με τις συμβατικές ασύρματες συσκευές.

Η προσδοκόμενη κάλυψη του δικτύου LTE – Maritime, σε σχέση με τον απαιτούμενο ρυθμό δεδομένων, μπορεί να ταξινομηθεί σε 2 ζώνες A και B όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα. Για τη ζώνη A, η οποία εκτείνεται σε ακτίνα 30 km από τους σταθμούς βάσης, έχει καθοριστεί ο μέσος ρυθμός δεδομένων στα 6 Mbps για (DL) και 3 Mbps uplink (UL). Η ζώνη B, η οποία περιλαμβάνει τις

περιοχές από 30 έως και 100 km , εκτιμάται ότι θα προσφέρει κατά μέσο όρο 3 Mbps downlink και 1 Mbps uplink.

4.2.2 Προσομοίωση – Διεξαγωγή μετρήσεων

Με σκοπό την ποσοτική μέτρηση της απόδοσης του δικτύου LTE – Maritime και την επαλήθευση για τον αν μπορεί να αποτελέσει εφικτή λύση στα πλαίσια της επικοινωνίας στη ναυτιλία, οι Κορεάτες ερευνητές υλοποίησαν ένα πειραματικό περιβάλλον (σχήμα 13) για τη διεξαγωγή μετρήσεων εντός των πλοίων.

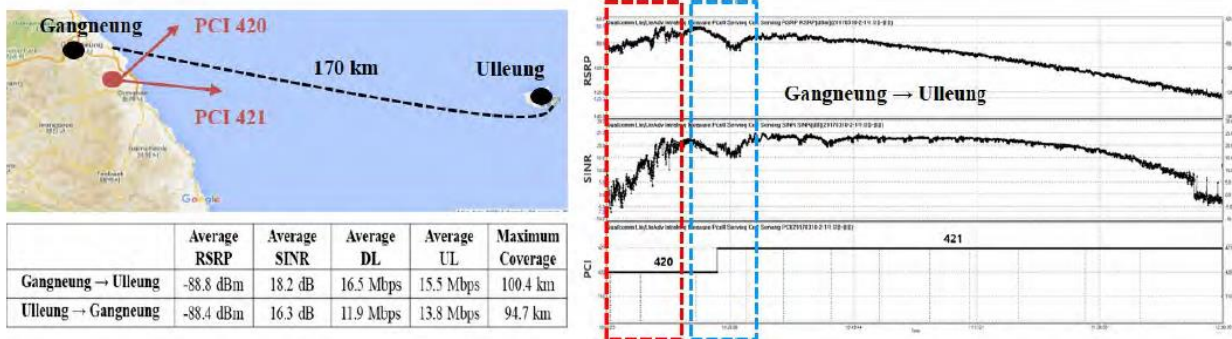


Σχήμα 13. Το πειραματικό περιβάλλον του δικτύου LTE - Maritime [20]

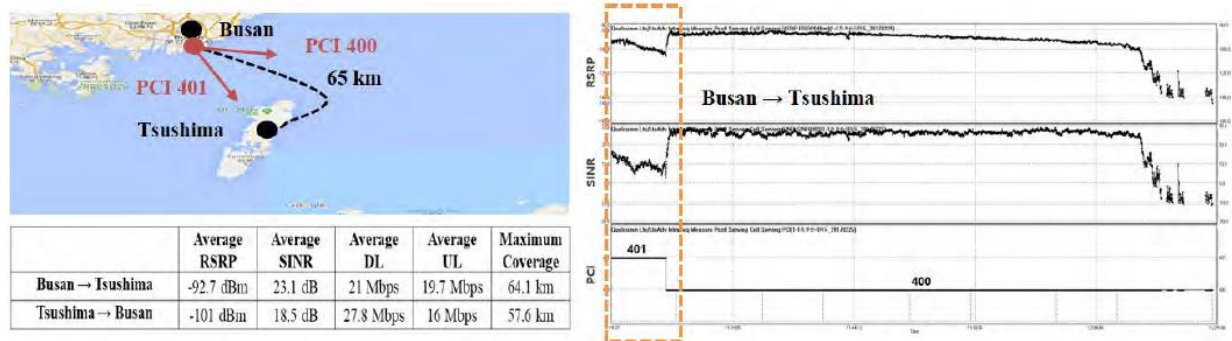
Συνολικά 13 σταθμοί βάσης (BS) βρίσκονται σε σχετικά ορεινές περιοχές κατά μήκος της ακτογραμμής, ενώ συνολικά το δίκτυο απαρτίζεται από 22 μονάδες ραδιοεκπομπής (DU) και 14 ψηφιακής επεξεργασίας δεδομένων (RU). Κάθε σταθμός βάσης συνδεεται μέσω καλωδίων με το κέντρο λειτουργίας που βρίσκεται στην περιοχή Busan και το οποίο αποτελείται από διάφορα συστήματα (EPC, EMS) και εξυπηρετητές (servers). Τα πλοία κινούνται σε προκαθορισμένα δρομολόγια και επικοινωνούν με τους σταθμούς βάσης μέσω των δρομολογητών που είναι εγκατεστημένοι σε αυτά. Για τη μέτρηση της απόδοσης της επικοινωνίας χρησιμοποιούνται φορητοί υπολογιστές που συνδέονται με τους δρομολογητές και μέσω κατάλληλου λογισμικού αναλύουν δεδομένα σχετικά με το RSRP (reference signal received power), SINR (signal to interference and noise ration), διεκπεραιωτικότητα (throughput), PCI (physical cell identity). Για την αποστολή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε δρομολογητής FTP (file transfer protocol server), ενώ οι συχνότητες που δεσμεύτηκαν ήταν 728~738 MHz για uplink και 778~788 MHz downlink αντίστοιχα.

4.2.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

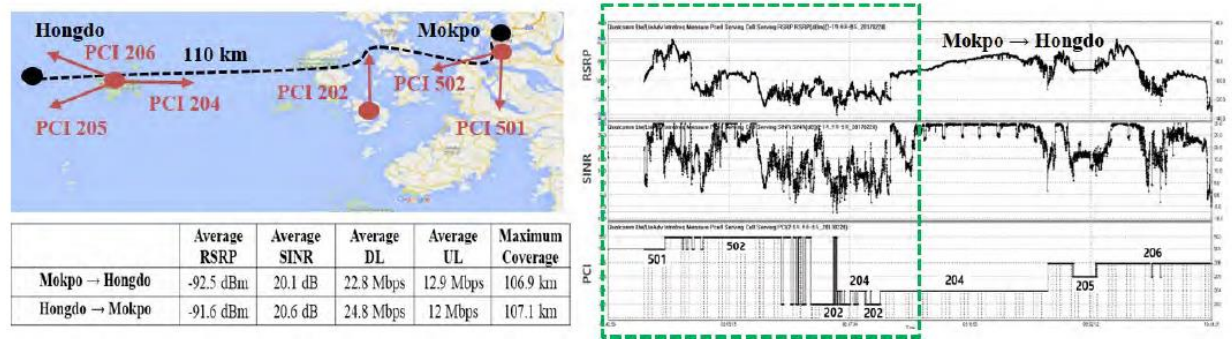
Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για πλοία που ακολουθούν συγκεκριμένα δρομολόγια σε διαφορετικές θαλάσσιες περιοχές γύρω από την Κορέα. Συγκεκριμένα, γίνεται λεπτομερής καταγραφή των αποτελεσμάτων 3 πλοίων που πλέουν απο παράκτιες περιοχές της Κορέας σε νησιά, διασχίζοντας την ανατολική, νότια και Κίτρινη θάλασσα αντίστοιχα.



Σχήμα 14. Τα πειραματικά αποτελέσματα στην ανατολική θάλασσα [20]



Σχήμα 15. Τα πειραματικά αποτελέσματα στη νότια θάλασσα [20]



Σχήμα 16. Τα πειραματικά αποτελέσματα στην Κίτρινη θάλασσα [20]

Τα παραπάνω σχήματα αποτελούνται από 2 μέρη. Στο αριστερό μέρος απεικονίζονται τα δρομολόγια που ακολουθούν τα πλοία στις 3 περιπτώσεις καθώς και πληροφορίες σχετικά με τους σταθμούς βάσης. Παρουσιάζονται επίσης πίνακες με τις μέσες τιμές των μετρήσιμων μεγεθών για τα δρομολόγια μετ'επιστροφής. Στο δεξί μέρος αναλύεται η διακύμανση των 3 μεγεθών (RSRP, SINR, PCI) κατά τη διάρκεια του δρομολογίου.

Τα αποτελέσματα στην ανατολική θάλασσα (σχήμα 14) παρουσιάζουν 3 διαφορετικά μοτίβα. Αρχικά, το πλοίο βρίσκεται στα όρια του λιμανιού και δεν εξασφαλίζεται η απαραίτητη οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης, λόγω διαφόρων εμποδίων αλλά και της παρεμβολής άλλων σημάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι τιμές των RSRP και SINR να αυξάνουν βαθμιαία (κόκκινο πλαίσιο του σχήματος 14). Καθώς το πλοίο απομακρύνεται από το λιμάνι και κατευθύνεται προς το προορισμό του, παρατηρούμε την σταδιακή μείωση των τιμών των 2 μεγεθών. Αυτό συμβαίνει διότι η το σήμα από τη γειτονική κυψέλη γίνεται ολόένα και εντονότερο συγκριτικά με αυτό της κυψέλης που επικοινωνεί το πλοίο. Οι τιμές των RSRP και SINR αρχίζουν να αυξάνονται και πάλι καθώς πραγματοποιείται η μετάβαση από την κυψέλη (με αριθμό PCI) 420 στην 421 (μπλε πλαίσιο στο σχήμα 14). Στην υπόλοιπη διαδρομή και καθώς το πλοίο απομακρύνεται από το σταθμό βάσης που το εξυπηρετεί, παρατηρούμε βαθμιαία μείωση των τιμών των μεγεθών. Η μέση τιμή του ρυθμού δεδομένων κατά τη διάρκεια του δρομολογίου τόσο για DL όσο και για UL είναι μεγαλύτερη των 11Mbps, ενώ η ακτίνα κάλυψης φτάνει τα 100km

Οι μετρήσεις για τη νότιο θάλασσα (σχήμα 15) πραγματοποιήθηκαν σε διεθνές επιβατικό πλοίο που εκτελούσε το δρομολόγιο Busan – Tsushima. Λόγω της γεινίασης με την Ιαπωνία, η ένταση εκπομπής του σταθμού βάσης και η κλίση της κεραίας (antenna tilt) ρυθμιζονταν κατάλληλα (46 – 43 dBm και 0 -10 βαθμών αντίστοιχα) ώστε να μη δημιουργούνται φαινόμενα παρεμβολής. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά στην ανατολική θάλασσα, όταν το πλοίο βρίσκεται στα όρια του λιμανιού της Busan (πορτοκαλί πλαίσιο στο σχήμα 15). Η αύξηση των τιμών των μεγεθών είναι και στην περίπτωση αυτή εμφανής καθώς το πλοίο απομακρύνεται από το λιμάνι ενώ οι υψηλές τιμές παγαιώνονται μετά τη μετάβαση στη κυψέλη 400. Καθώς το πλοίο πλησιάζει στο λιμάνι της νήσου Tsushima, η οπτική επαφή μεταξύ του σταθμού βάσης και του πλοίου χάνεται με αποτέλεσμα το σήμα να εξασθενεί έντονα. Αυτό αποτυπώνεται και στις τιμές των μεγεθών RSRP, SINR όπου η πτώση τους είναι ραγδαία. Όσον αφορά τις μέσες τιμές του ρυθμού δεδομένων, είναι υψηλότερες συγκριτικά με αυτές στην ανατολική θάλασσα κυρίως λόγω της μικρότερης απόστασης του δρομολογίου.

Τέλος, στο σχήμα 16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πλοίου που εκτελούσε το δρομολόγιο Mokro-Hongdo στην Κίτρινη θάλασσα. Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει αρκετά νησιά τα οποία επηρεάζουν τη μετάδοση και λήψη του σήματος. Για τη να μετραστεί η υποβάθμιση της απόδοσης αναπτύχθηκαν αρκετοί σταθμοί βάσης, γεγονός το οποίο οδηγεί σε πολλαπλές μεταβάσεις και σε μεγάλη διακύμανση των τιμών RSRP, SINR (πράσινο πλαίσιο σχήματος 16). Παρά την ιδιαιτερότητα του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, τα αποτελέσματα είναι αρκετά ενθαρρυντικά αφού οι μέσοι ρυθμοί δεδομένων είναι μεγαλύτεροι από 22 Mbps downlink και 12 Mbps uplink, με μέγιστη ακτίνα τα 107 km.

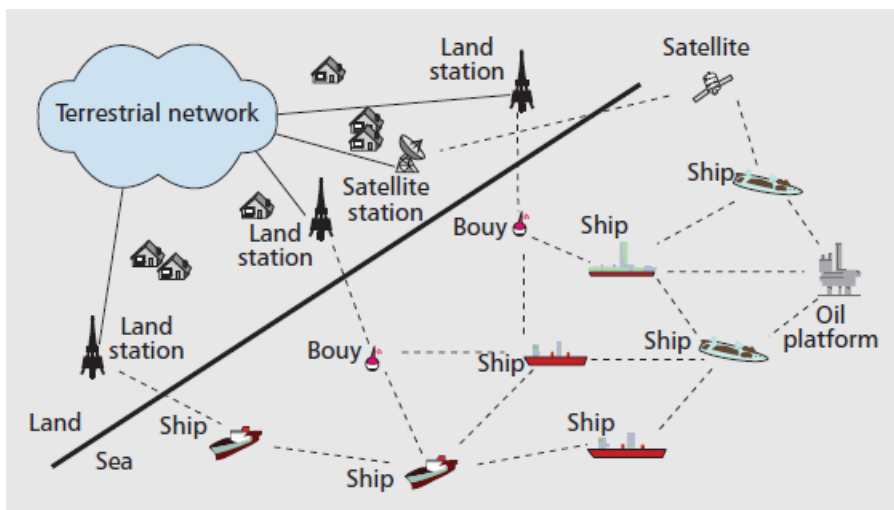
Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι το δίκτυο LTE – Maritime ικανοποιεί τις ανάγκες των χρηστών στη Ναυτιλία για επικοινωνία υψηλών ταχυτήτων σε αποστάσεις έως και 100 km από τις ακτές. Παράλληλα, με την ολοκλήρωση και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των κυψελών που θα απαρτίζει το δίκτυο (ο αριθμός και η τοποθεσία των σταθμών βάσης, η ισχύς μετάδοσης κτλ.) υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης.

4.3 TRITON Project

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το TRITON (TRI-media Telematic Oceanographic Network), ένα ακόμα πρότζεκτ που ξεκίνησε το 2013 με σκοπό την κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων αναγκών για γρήγορη και χαμηλού κόστους επικοινωνία στη ναυτιλία. Πρόκειται για ένα ασύρματο καταναμημένο δίκτυο βασισμένο στο πρωτόκολλο IEEE 802.16 το οποίο οπως θα δούμε και στη συνέχεια μπορεί να υλοποιηθεί και να πετύχει σημαντικά αποτελέσματα σε περιβάλλοντα ναυτιλίας με σχετικά μεγάλη πυκνότητα πλοίων.

4.3.1 Αρχιτεκτονική του δικτύου

Στο σχήμα 17 παρουσιάζεται η γενική εικόνα της αρχιτεκτονικής του δικτύου TRITON. Τα πλοία σχηματίζουν ένα καταναμημένο δίκτυο και συνδέονται στο ηπειρωτικό δίκτυο μέσω σταθμών που βρίσκονται στη στεριά. Διάφορα πλεούμενα αποτελούν επίσης μέρος του δικτύου, λειτουργώντας σαν αναμεταδότες της τηλεπικοινωνιακής κίνησης όπου αυτό απαιτείται.



Σχήμα 17. Αποψη του δικτύου TRITON [15]

Το μοντέλο καταναμημένου δικτύου υπερίσχυσε έναντι άλλων επιλογών για το TRITON, με λόγω δύο πολύ σημαντικών χαρακτηριστικών. Πρώτον, η γεωγραφική κάλυψη του δικτύου επεκτείνεται εύκολα καθώς ο κάθε κόμβος μπορεί να αναμεταδώσει την τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε άλλους. Δεύτερον, η αρχιτεκτονική ενός καταναμημένου δικτύου επιτρέπει την ύπαρξη εναλλακτικών επιλογών δρομολόγησης, γεγονός κρίσιμο σε περιβάλλοντα ναυτιλίας όπου η πιθανότητα για απώλεια ζεύξεων είναι αυξημένη, λόγω της θαλάσσιας κίνησης. Επιπλέον, προτιμήθηκε η υιοθέτηση του IEEE 802.16-2004 MAC συγκριτικά με άλλες αντίστοιχες τεχνολογίες (802.11s και 802.15.5) καθώς είναι βασισμένο στην τεχνική πολύπλεξης TDMA (Time Division Multiplexing), η οποία υποστηρίζει πιο εύκολα εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών (Quality Of Services - QoS), ενώ επιτρέπει και επικοινωνία σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις.

Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ των πλοίων και του ηπειρωτικού δικτύου, με την προϋπόθεση ότι οι θαλάσσιες περιοχές στις οποίες υλοποιείται χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλη πυκνότητα πλοίων. Σε περιοχές όπου εντοπίζεται μικρότερος αριθμός πλοίων και η

σύνδεση με τους παράκτιους σταθμούς μέσω των ζεύξεων του κατανεμημένου δικτύου δεν είναι δυνατή, το τηλεπικοινωνιακό σύστημα που βρίσκεται εγκατεστημένο στο πλοίο μπορεί να επιλέξει τη διασύνδεση μέσω δορυφορικού καναλιού.

4.3.2 Μελέτη αποτελεσματικότητας του Δικτύου

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η επιτυχία ενός κατανεμημένου ασύρματου δικτύου στη θάλασσα εξαρτάται άμεσα από την συνύπαρξη ενός ικανοποιητικού αριθμού πλοίων στην εξεταζόμενη περιοχή. Με σκοπό την επιβεβαίωση αυτού, πραγματοποιήθηκαν μελέτες στην Ανατολική ακτή της Σιγκαπούρης, η οποία αποτελεί μέρος του Πορθμού της Μαλάκκα, την κύρια δίοδο ανάμεσα στον Ινδικό και στον Ειρηνικό ωκεανό.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με βάση πραγματικά στοιχεία κίνησης πλοίων μέσω του συστήματος AIS, που αντλήθηκαν από τις τοπικές αρχές της Σιγκαπούρης. Η υπό μελέτη γεωγραφική περιοχή αποτελείται από ένα ορθογώνιο μήκους 35,3 km και πλάτους 16,7 km, ενώ για τη μετάδοση και τη λήψη των σημάτων χρησιμοποιήθηκε ένα ζεύγος LIBRA 5800 στο φάσμα των 5,8 GHz.

Η μέγιστη ικανή απόσταση, με ανοχή ρυθμού σφαλμάτων (BER – Bit Error Rate) $< 10^{-6}$, προσδιορίζεται στα 8,66 km μεταξύ 2 πλοίων ενώ για την επικοινωνία πλοίου με παράκτιου σταθμού και συγκεκριμένα στο σύμπλεγμα φάρων Bedok της νοτιανατολικής ακτής της Σιγκαπούρης, στα 14,2 km. Τα παραπάνω υπολογίστηκαν με ρυθμό δεδομένων 6 Mbps και επιλογή διαμόρφωσης φάσης BPSK (Binary phase-shift keying).

Η εξαγωγή των παραπάνω αποτελεσμάτων, βασίστηκε στην παραδοχή ότι ένα πλοίο θεωρείται συνδεδεμένο στο δίκτυο εφόσον μπορεί να επικοινωνήσει με τον παράκτιο σταθμό μέσω το πολύ 3 βημάτων. Στη βάση αυτή, τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά καθώς το σύνολο των 44 πλοίων-κόμβων που συμμετείχαν, ήταν συνδεδεμένο στο δίκτυο σε όλη σχεδόν (98,91%) τη διάρκεια των 4 ωρών που διήρκεσαν οι μετρήσεις.

Λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν στα ναυτιλιακά περιβάλλοντα, όπου ο κίνδυνος υποβάθμισης ή ακόμα και απώλειας των καναλιών επικοινωνίας μεταξύ ενός πλοίου και του παράκτιου σταθμού είναι αρκετά μεγάλος, η ύπαρξη εφεδρικών διαδρομών αποτελεί σημαντικό παράγοντα για ένα κατανεμημένο δίκτυο. Η μελέτη που προηγήθηκε, έδειξε ότι κατά μέσο όρο ένα πλοίο διαθέτει περίπου 17 διαφορετικές διαδρομές μέσω των οποίων μπορεί να επικοινωνήσει με το σταθμό στην ακτή. Μάλιστα, περαιτέρω ανάλυση έδειξε ότι για την επικοινωνία αυτή σπάνια απαιτούνται πάνω από 2 διαφορετικοί ενδιάμεσοι κόμβοι, αφού ο μέσος αριθμός βημάτων υπολογίστηκε στο 1,8.

4.3.3 Περιγραφή του προσομοιωτή “Maritime Simulator”

Με σκοπό τη βελτίωση των πρωτοκόλλων MAC και δικτύου αλλά και την μελέτη απόδοσης του δικτύου, η ερευνητική ομάδα του TRITON υλοποίησε το Maritime Simulator με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοιώσεων Qualnet. Μέσω αυτού προσομοιώνεται η εξάρτηση της απολάβη κεραίας από την κίνηση των πλοίων λόγω του κυματισμού της θάλασσας, τις απώλειες διαδρομής και την κατανομή των πλοίων στην υπό μελέτη θαλάσσια περιοχή. Οι 3 βασικές παράμετροι του προσομοιωτή, αποτέλεσαν ξεχωριστό αντικείμενο έρευνας και αναλύονται παρακάτω:

Μοντέλο Θαλάσσιας κίνησης

Όπως περιγράψαμε προηγούμενα, η κίνηση της επιφάνειας της θάλασσας η οποία επιδρά στα πλοία μεταβάλλοντας τη θέση ισοροπίας ως προς τους 2 άξονες που το διαπερνούν, επηρεάζει άμεσα την επικοινωνία οδηγώντας συχνά απώλεια ζεύξεων. Συγκεκριμένα, μετρήσεις που διεξήχθησαν στη Σιγκαπούρη με τον εξοπλισμό LIBRA 5800, οδήγησαν σε αρκετά αυξημένο δείκτη BER για επικοινωνία μεταξύ πλοίων ($4 * 10^{-5}$) και πλοίου με παράκτιο σταθμό (10^{-5}), σε σχέση με το αντίστοιχο δείκτη στη στεριά (10^{-6}).

Με βάση τα παραπάνω λοιπόν έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης της θάλασσας διαταραχής με σκοπό την προσομοίωση της κίνησης των πλοίων και κατά επέκταση τον προσανατολισμό των κεραιών τους. Έτσι, η κατάσταση της επιφάνειας της θάλασσας χαρακτηρίζεται από 3 μεγέθη: το μέσο ύψος (H), το μέσο μήκος κύματος (λ) και τη μέση περίοδο (T) του θαλάσσιου κύματος. Οι διάφοροι συνδυασμοί αυτών ορίζουν 10 καταστάσεις (απο 0 έως 9) στα οποίες μπορεί να βρεθεί η θαλάσσια επιφάνεια. Η υπό μελέτη θαλάσσια περιοχή της ανατολικής ακτής της Σιγκαπούρης κατατάσσεται στην κατάσταση 3 ($H = 0.4\sim 0.9$ m , $\lambda = 6\sim 12$ m, $T = 3.5\sim 4,5$ s).

Ιδιότητες καναλιού επικοινωνίας

Βασική παράμετρο για την υλοποίηση του προσομοιωτή αποτέλεσαν οι ιδιότητες του καναλιού μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Οι ερευνητές συνεκτιμώντας τα διάφορα χαρακτηριστικά της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο θαλάσσιο περιβάλλον καθώς και το γεγονός ότι η επικοινωνία διεξάγεται σε ευρείες θαλάσσιες διαδρομές (όπως η υπό μελέτη περιοχή), κατέληξαν στο εξής συμπέρασμα: Το ραδιο-κανάλι επικοινωνίας για τις θαλάσσιες περιοχές όπου τα κύματα ξεπερνούν το 1 μέτρο (στις οποίες εντάσσονται και οι διαδρομές των πλοίων) και στις συχνότητες κάτω των 7 GHz όπου το θαλασσινό νερό λειτουργεί σαν αγωγός της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (οι τρεις κύριες ζώνες που χρησιμοποιήθηκαν είναι: 1.9 GHz, 2.3 GHz και 5.8 GHz), μπορεί να χαρακτηριστεί ως μοντέλο 2 ακτινών (two-ray model) [31]. Έτσι η ακτινοβολία που καταλήγει στην κεραία του κόμβου αποτελείται από τη συνισταμένη του άμεσα λαμβανόμενου σήματος (Line of Sight - LOS) και του ανακλώμενου από τη θαλάσσια επιφάνεια.

Μοντέλο κυκλοφορίας πλοίων

Η γνώση των δρομολογίων που ακολουθούν τα πλοία σε μία συγκεκριμένη θαλάσσια περιοχή καθώς και πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα και τη θέση τους κάθε στιγμή, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη ενός ασύρματου κατανεμημένου δικτύου. Στα πλαίσια της υλοποίησης του TRITON και λόγω της έλλειψης σχετικής έρευνας στη διεθνή επιστημονική κοινότητα, οι ερευνητές βασιζόμενοι σε στατιστικές κατανομές με στοιχεία που άντλησαν από το σύστημα AIS, ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει μέσω συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας την ταχύτητα των πλοίων και το χρόνο μεταξύ αφίξεων σε συγκεκριμένο σημείο.

4.3.4 Πρωτόκολλο δρομολόγησης TRITON MRPT

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει προηγούμενα, στα πλαίσια ενός κατανεμημένου ασύρματου δικτύου σε περιβάλλον ναυτιλίας, η ύπαρξη διαταραχών στην επικοινωνία με απώλειες ζεύξεων μεταξύ των κόμβων οδηγεί σε συχνές αλλαγές στη δρομολόγηση παρόλο που σπάνια η σύνδεση μεταξύ ενός πλοίου και του παράκτιου σταθμού δεν υπερβαίνει τα 2 βήματα. Έτσι, η ύπαρξη ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης που θα εξασφαλίζει την αξιόπιστη μεταφορά των δικτυακών πακέτων κρίνεται επιβεβλημένη. Καθώς κανένα από τα διαθέσιμα πρωτόκολλα δεν κρίθηκε κατάλληλο για τις ιδιαιτερότητες ενός κατανεμημένου ασύρματου δικτύου σε περιβάλλον ναυτιλίας, οι ερευνητές του

TRITON ανέπτυξαν το MRPT (MAC-based Routing Protocol for TRITON). Πρόκειται για βελτιστοποίηση των ήδη υπαρχόντων πρωτόκολλων δρομολόγησης, προσαρμοσμένο στις ανάγκες του 802.16 κατανεμημένου δικτύου. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του είναι ότι διατηρεί πολλαπλές διαδρομές δρομολόγησης, με δυνατότητα επιλογής της βέλτιστης κάθε στιγμή. Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαδρομής λαμβάνεται υπόψιν τόσο το κόστος όσο η σταθερότητα. Ο αριθμός βημάτων καθορίζει το κόστος της δρομολόγησης, ενώ η ισχύς του σήματος που λαμβάνει η κεραία (Received Signal Strength - RSS) παίζει το ρόλο του ρυθμιστή της σταθερότητας της επικοινωνίας, αφού μια διαδρομή είναι διαθέσιμη για επιλογή εφόσον η τιμή του RSS για αυτήν υπερβαίνει ένα κατώτατο όριο. Έτσι, στην περίπτωση που μια ζεύξη καταρρεύσει, ο κόμβος επιλέγει την αμέσως επόμενη διαθέσιμη ώστε να συνεχιστεί η επικοινωνία. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι το πρωτόκολλο δρομολόγησης MRPT είναι αποδοτικότερο στα πλαίσια ενός ναυτιλιακού περιβάλλοντος, σε σχέση με τυπικά ασύρματα πρωτόκολλα όπως τα OLSW (Optimized Link State Routing Protocol), AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) και AOMDV (Ad hoc on-demand multipath distance vector).

4.3.5 Δυνατότητα Δορυφορικής σύνδεσης

Με σκοπό την διατήρηση αξιόπιστης επικοινωνίας κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες αλλά και τη συμβατότητα με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες επικοινωνίας στη ναυτιλία, αναπτύχθηκε στα πλαίσια του TRITON κατάλληλο ενδιάμεσο λογισμικό (middleware) [78]. Το λογισμικό αυτό παίζει το ρόλο δρομολογητή για τις διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται εντός του πλοίου. Έτσι, ανάλογα με τις διάφορες υπηρεσίες και το εύρος ζώνης που απαιτείται για κάθε εφαρμογή το λογισμικό επιλέγει το δίκτυο που θα χρησιμοποιηθεί, συνεκτιμώντας παράγοντες κόστους και ποιότητας υπηρεσιών. Στην περίπτωση όπου η επικοινωνία από άκρο σε άκρο του ασύρματου κατανεμημένου δικτύου δεν είναι δυνατή λόγω έλλειψης γειτονικών κόμβων ή υποβαθμισμένης ποιότητας καναλιού, γίνεται μετάβαση σε δορυφορικό σύστημα για την εξασφάλιση της συνέχειας της επικοινωνίας. Αυτό προϋποθέτει την εγκατάσταση εντός του πλοίου και του ανάλογου εξοπλισμού για δορυφορική σύνδεση.

4.3.6 Περιγραφή του κόμβου και ανάλυση των μετρήσεων

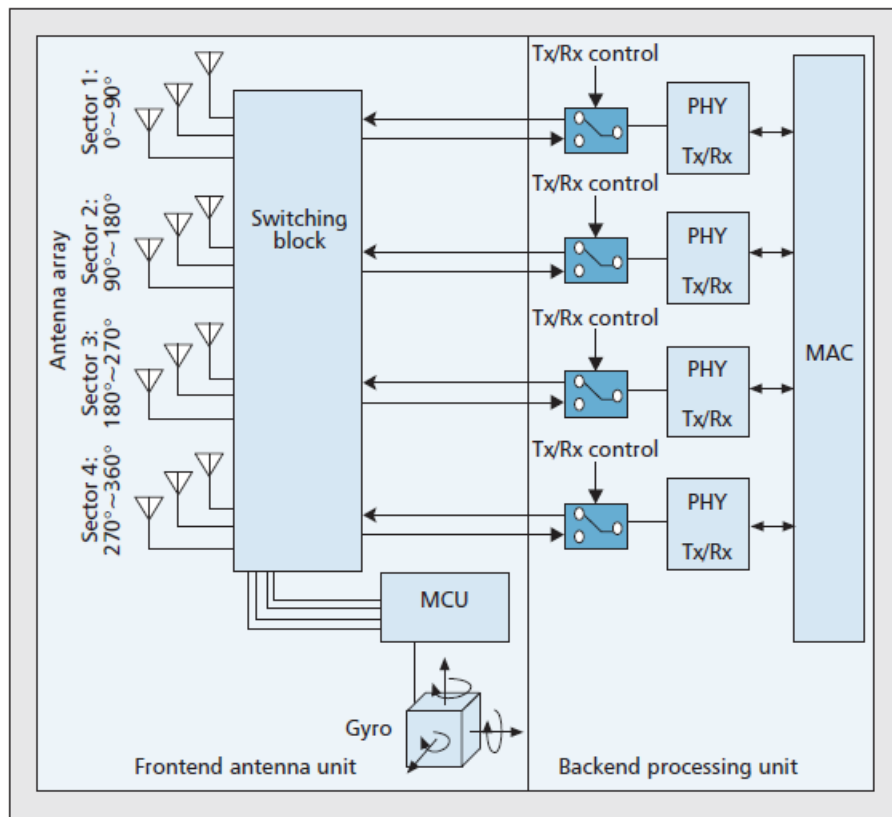
Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε τα δομικά μέρη του κόμβου που υλοποιήθηκε στα πλαίσια του TRITON, ενώ θα αναλυθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έλαβαν χώρα στο πεδίο υπό πραγματικές συνθήκες.

Στο σχήμα 18 παρουσιάζεται η δομή του κόμβου. Διακρίνουμε τις 2 βασικές οντότητες από τις οποίες αποτελείται, τη μονάδα επεξεργασίας και το τμήμα των κεραιών. Η μονάδα επεξεργασίας αποτελείται από ένα υπολογιστικό σύστημα λογισμικού Linux το οποίο υποστηρίζει 4 διεπαφές λήψης/μετάδοσης και επικοινωνεί με το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (MAC). Το τμήμα κεραιών αποτελείται από συστοιχία πομπών, με ικανότητα λήψης και μετάδοσης 360°. Η επικοινωνία στα πλαίσια ενός ασύρματου κατανεμημένου δικτύου, όπου οι κόμβοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, καθιστούν την ικανότητα για λήψη και μετάδοση από και προς όλες τις κατευθύνσεις, κρίσιμο παράγοντα κατασκευής της κεραίας. Αυτό θα μπορούσε εύκολα να υλοποιηθεί με χρήση ισοτροπικών κεραιών, όμως το περιβάλλον μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η αναμετάδοση του σήματος αλλά και η φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δεν το επιτρέπουν, όπου οι ανακλάσεις από τη θαλάσσια επιφάνεια και τα μεταλλικά μέρη του πλοίου εντείνουν την ήδη σημαντική επίδραση του

φαινομένου διπλής ακτίνας. Έτσι, η κεραία που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 4 τομείς καθένας από τους οποίους καλύπτει εύρος 90° προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Κατά τη διάρκεια της λήψης, κάθε τομέας λαμβάνει το προσλαμβανόμενο σήμα το οποίο επξεργάζεται και αποδιαμορφώνει η αντίστοιχη διεπαφή. Κατά την μετάδοση, οι πληροφορίες καθορίζονται από μία μόνο διεπαφή αλλά το σήμα εκπέμπεται και από τους 4 τομείς με σκοπό την ευρυεκπομπή.

Επιπλέον, κάθε τομέας του τμήματος κεραίας αποτελείται από 3 επιμέρους «υποκεραίες», καθεμιά από τις οποίες διακρίνεται από εύρος κάθετης δέσμης 5° . Το στενό εύρος 5° επιλέχθηκε με σκοπό την επίτευξη μεγάλου κέρδους κεραίας, ενώ με την κατάλληλη τοποθέτηση των 3 κεραίων (η μία κάθετα και οι άλλες δύο με απόκλιση $+5^\circ$ αντίστοιχα) επιτυγχάνεται μία συνολική δέσμη εύρους 15° στον κάθετο άξονα. Εδώ υπεισέρχεται ένας καθοριστικός παράγοντας όπως θα δούμε και στα αποτελέσματα των μετρήσεων, η εναλλαγή κεραίας. Μέσω ενός γυροσκόπιου που είναι εγκατεστημένο στο πλοίο, καθορίζεται κάθε στιγμή η γωνία απόκλισης ως προς το επίπεδο της κίνησής του λόγω της κίνησης της θάλασσας. Όταν αυτή η γωνία υπερβεί το φράγμα των ± 5 μοιρών, ενεργοποιείται ο μηχανισμός της εναλλαγής, όπου επιλέγεται (από τις 3 του συγκεκριμένου τομέα) η κεραία με τη μικρότερη κλίση. Πρέπει να τονισθεί ότι τα παραπάνω χαρακτηριστικά βασίζονται για λειτουργία στο συχνότητα των $5,8\text{GHz}$. Το TRITON έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί και στη συχνότητα των $2,8\text{GHz}$, οπότε οι αντίστοιχες τιμές καθορίζονται στις 10° .

Παρόλα αυτά, η αξιοποίηση των δύο τελευταίων προϋποθέτει τη χρήση ισοτροπικών κεραίων (*Omnidirectional Antenna*) και όχι κατευθυντικών (*Directional Antenna*)

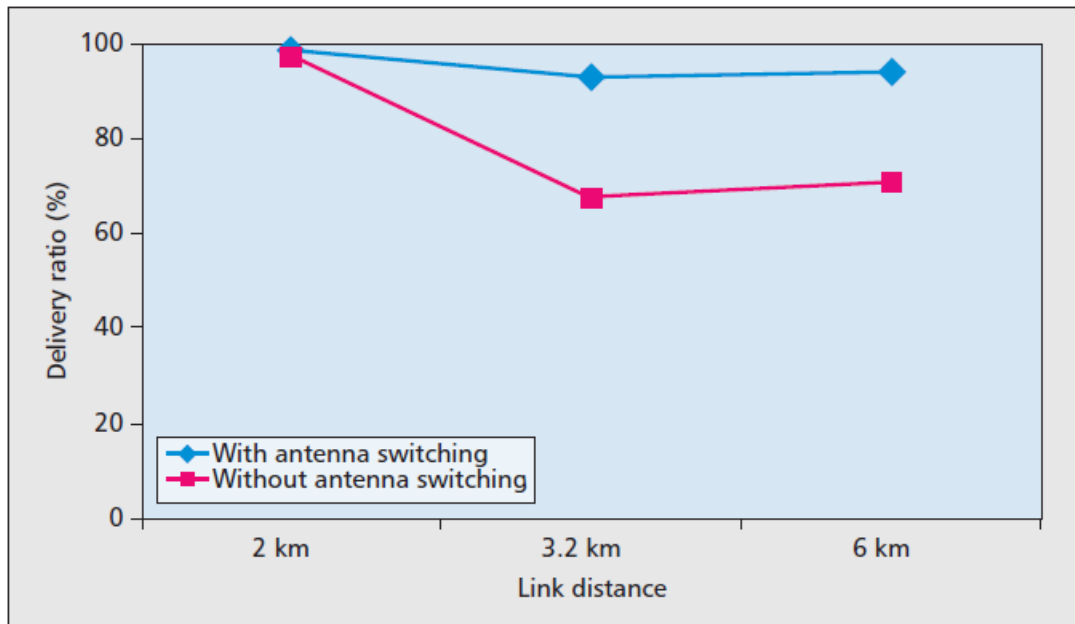


Σχήμα 18. Η δομή του κόμβου, εσωτερικό και εξωτερικό μέρος [15]

Λεπτομερείς μετρήσεις έλαβαν χώρα στη θάλασσα της Σιγκαπούρης με σκοπό τη μελέτη της αποτελεσματικότητας και της απόδοσης του δικτύου. Συγκεκριμένα, τον πρώτο κόμβο αποτέλεσε παράκτιος σταθμός ύψους 8 m στο νησί St.Johns στα νότια της χώρας, ενώ ο δεύτερος κόμβος ήταν εγκατεστημένος σε ύψος 4,5 m σε πλοιάριο (σχήμα 19). Η τοπολογία αυτή αποτέλεσε τη βάση για τη μελέτη της επικοινωνίας ενός βήματος, ενώ οι μετρήσεις περιορίστηκαν στην επικοινωνία 2 βημάτων.

**Σχήμα 19. Απεικόνιση κόμβου TRITON σε πλοιάριο [15]**

Το πλοιάριο εκτελούσε συγκεκριμένα δρομολόγια με σκοπό τη μελέτη σε διάφορες αποστάσεις από το παράκτιο σταθμό. Στο σχήμα 20 παρουσιάζεται το ποσοστό των πακέτων που παραδόθηκαν ανάλογα με την απόσταση των 2 κόμβων, με και χωρίς εναλλαγή κεραίας. Στην απόσταση των 2 km το ποσοστό λαμβανόμενων πακέτων αγγίζει το 99%. Παρατηρούμε ότι με την ενεργοποίηση της εναλλαγής κεραίας τα αποτελέσματα είναι εμφανώς καλύτερα τόσο στα 3,2 km όσο και στα 6km. Αυτό αποδεικνύει την επίπτωση της κίνησης της θαλάσσιας επιφάνειας στην επικοινωνία, αλλά και τον καθοριστικό ρόλο της εναλλαγής κεραίας για τη διατήρηση της επικοινωνίας.



Σχήμα 20. Ποσοστό ληφθέντων πακέτων δεδομένων συναρτήσει της απόστασης με και χωρίς εναλλαγή κεραίας [15]

Τέλος, στον πίνακα 5 παρατηρούμε τους διάφορους παραμέτρους της επικοινωνίας και τις τιμές όπως υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Όπως αναφέραμε και προηγούμενα, οι μετρήσεις συμπεριέλαβαν και επικοινωνία 2 βημάτων (απόσταση μεταξύ παράκτιου σταθμού – 1^{ου} πλοιάριου ίση με 1,3 km και απόσταση μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} πλοιάριου στα 2km), με τα αντίστοιχα αποτελέσματα να είναι αρκετά ενθαρρυντικά, καθώς το συνολικό ποσοστό απωλειών πακέτων δεν ξεπέρασε το 2%, με το μέγεθος τους μάλιστα να ποικίλλει (40, 560 και 1316 bytes) για τις ανάγκες των μετρήσεων.

Parameter	Value
Frequency	5.8 GHz
Bandwidth	20 MHz
Raw data rate	6 Mb/s
Modulation & coding	QPSK 1/2
Transmitter power (EIRP)	4 W
Onshore station antenna height	8 m
Onboard antenna height	4.5 m
Receiver antenna gain	16 dBi
Receiver sensitivity	-83 dBm
Operation mode	Half-duplex

Πίνακας 5. Παράμετροι επικοινωνίας και οι τιμές τους [15]

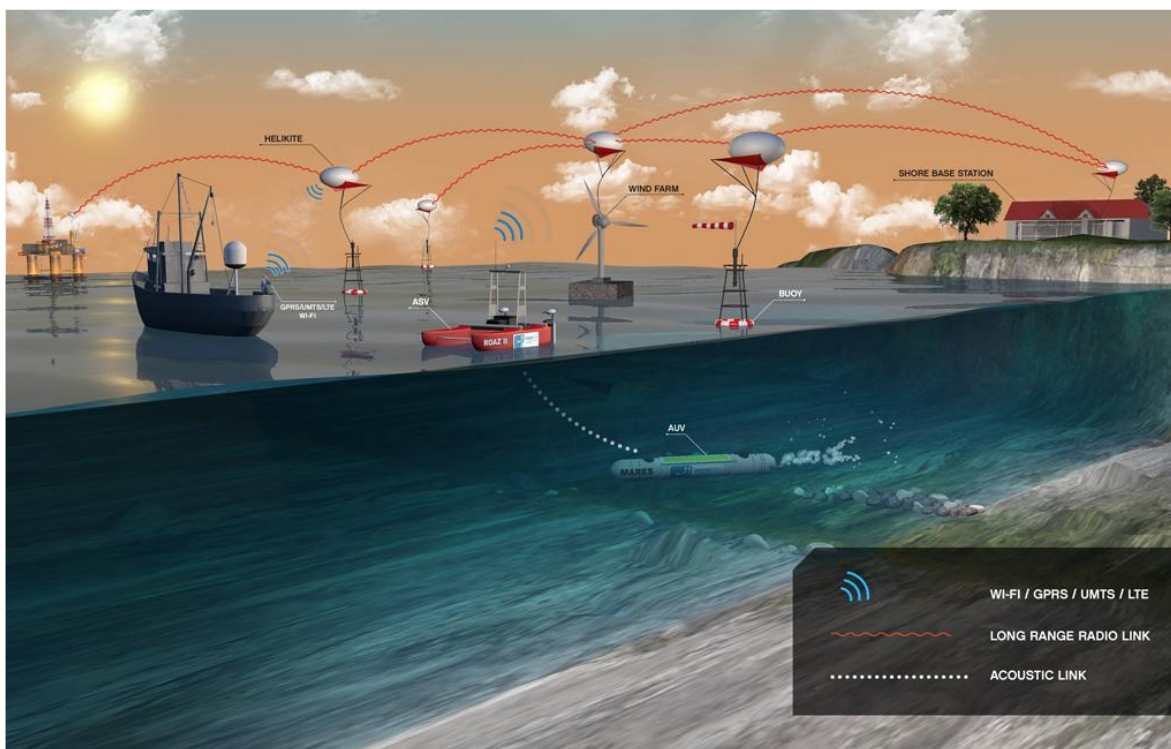
4.4 BLUECOM+ Project

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένα ακόμα εγχείρημα για την παροχή επικοινωνίας σε απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές, το BLUECOM+. Πρόκειται για μια προσπάθεια ερευνητών από το ινστιτούτο INESC TEC του Πανεπιστημίου του Πόρτο, το οποίο βρίσκεται στο στάδιο της υλοποίησης και χρηματοδοτείται από τον σχηματισμό EEA Grants των χωρών Νορβηγίας, Ισλανδίας και Λιχτενστάιν.

Το BLUECOM+ στοχεύει στην ευρυζωνική σύνδεση στο διαδίκτυο, με αποδοτικούς όρους, για απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές χρησιμοποιώντας αιωρούμενα μπαλόνια ως κόμβους για την εγκαθίδρυση επικοινωνίας πολλών βημάτων και αξιοποιώντας ελεύθερες περιοχές του φάσματος συχνοτήτων (White Spaces) που έχει αποδοθεί στην Τηλεόραση. Μάλιστα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι αρκετά ενθαρρυντικά, αφού έδειξαν ότι είναι δυνατή επικοινωνία σε ρυθμούς δεδομένων που φτάνουν το 1 Mbps σε αποστάσεις που ξεπερνούν τα 100 km από την ακτή. Η υλοποίηση στο πεδίο και σε πραγματικές συνθήκες βρίσκεται σε εξέλιξη.

4.4.1 Αρχιτεκτονική του Δικτύου

Η γενική ιδέα του BLUECOM+ παρουσιάζεται στο σχήμα 21. Δομικά μέρη του δικτύου είναι τα Helikites, ένας συνδυασμός από μπαλόνια ηλίου και χαρταετού τα οποία επιτρέπουν την ανύψωσή τους και λειτουργία σε ισχυρούς ανέμους (πάνω από 100 km/ώρα) ενώ αποτελούν το συνδετικό κρίκο μεταξύ των διαφόρων πλεούμενων ή και υποβρύχιων κόμβων και του παράκτιου σταθμού. Έτσι δημιουργείται ένα δίκτυο πολλαπλών βημάτων το οποίο επεκτείνει τη χρήση του διαδικτύου σε θαλάσσιες περιοχές για δεκάδες χιλιόμετρα από τις ακτές, εφόσον το ύψος των μπαλονιών είναι ικανό να αντισταθμίσει την υποβάθμιση του σήματος που υπεισέρχεται στη διάδοση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε θαλάσσια περιβάλλοντα.

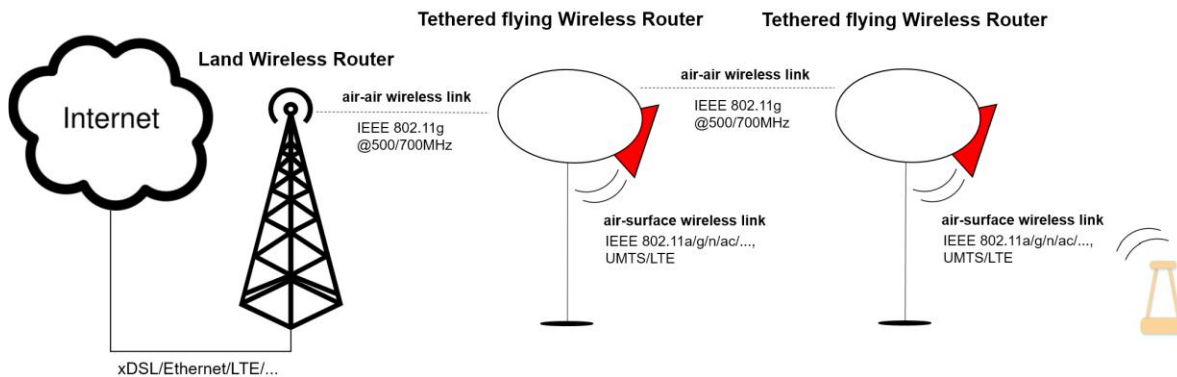


Σχήμα 21. Η γενική ιδέα του BLUECOM+ [72]

Η αρχιτεκτονική αυτή ευνοεί την περαιτέρω επέκταση του δικτύου με την εισαγωγή επιπλέον κόμβων Helikites, ενώ η χρήση των ήδη ανεπτυγμένων τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης που βρίσκουν εφαρμογή στα κυψελωτά δίκτυα (GPRS/UMTS/LTE) αλλά και του WiFi στις συχνότητες των 2,4 και 5 GHz, επιτρέπει την άμεση και εύκολη σύνδεση των χρηστών χωρίς την ανάγκη νέου εξοπλισμού. Επιπρόσθετα, στο σχεδιασμό του δικτύου έχει υπολογιστεί η δυνατότητα διασύνδεσης υποβρυχίων μη επανδρωμένων οχημάτων όπως τα AUVs και ROVs, μέσω πλεύουσων πλατφορμών. Συγκεκριμένα, η ζεύξη μεταξύ τους πραγματοποιείται με ακουστικά κύματα, ενώ οι πλατφόρμες επικοινωνούν απευθείας με τα Helikites και έτσι μπορούν εύκολα να μεταφερθούν δεδομένα από και προς τα υποβρύχια οχήματα σε πραγματικό χρόνο.

Στο σχήμα 22 παρουσιάζεται αναλυτικότερα η αρχιτεκτονική του BLUECOM+. Παρατηρούμε 2 ειδών κόμβων και κατ' επέκταση 2 ειδών καναλιών. Η επικοινωνία μεταξύ του παράκτιου δρομολογητή (Land Wireless Router - LWR) και των αιωρούμενων κόμβων που βρίσκονται στα Helikites (Tethered flying Wireless Router – TWR), όσο και η επικοινωνία μεταξύ 2 TWR, ορίζει τη ζεύξη air-air wireless link η οποία πραγματοποιείται στο φάσμα των 500 και 700 MHz. Η επιλογή των συγκεκριμένων συχνοτήτων έγινε με σκοπό την ελαχιστοποίηση της εξασθένισης του σήματος συνυπολογίζοντας την απόσταση των 2 κόμβων, το ύψος στο οποίο βρίσκονται αλλά και την απώλεια σήματος όπως καθορίζεται από τη ζώνη Fresnel. Ειδικότερα, ο σκοπός είναι η αποφυγή εμποδίων εντός της ζώνης Fresnel (άρα η ελαχιστοποίηση της μέγιστης ακτίνας της), τα οποία θα υποβαθμίσουν το λαμβανόμενο σήμα. Έτσι, υπολογίστηκε ότι οι 2 αυτές ζώνες συχνοτήτων αποτελούν το καλύτερο δυνατό συνδυασμό απόστασης – ύψους, ενώ σημαντικό παράγοντα αποτέλεσε επίσης το γεγονός ότι είναι μέρος του White spaces φάσματος της τηλεόρασης. Όσον αφορά τη ζεύξη τη σύνδεση των χρηστών και των διαφόρων συσκευών με το δίκτυο, ορίζεται η ζεύξη

air-surface wireless link, η οποία πραγματοποιείται μέσω τυπκών πρωτοκόλλων WiFi και κυψελωτών δικτύων όπως περιγράψαμε νωρίτερα.

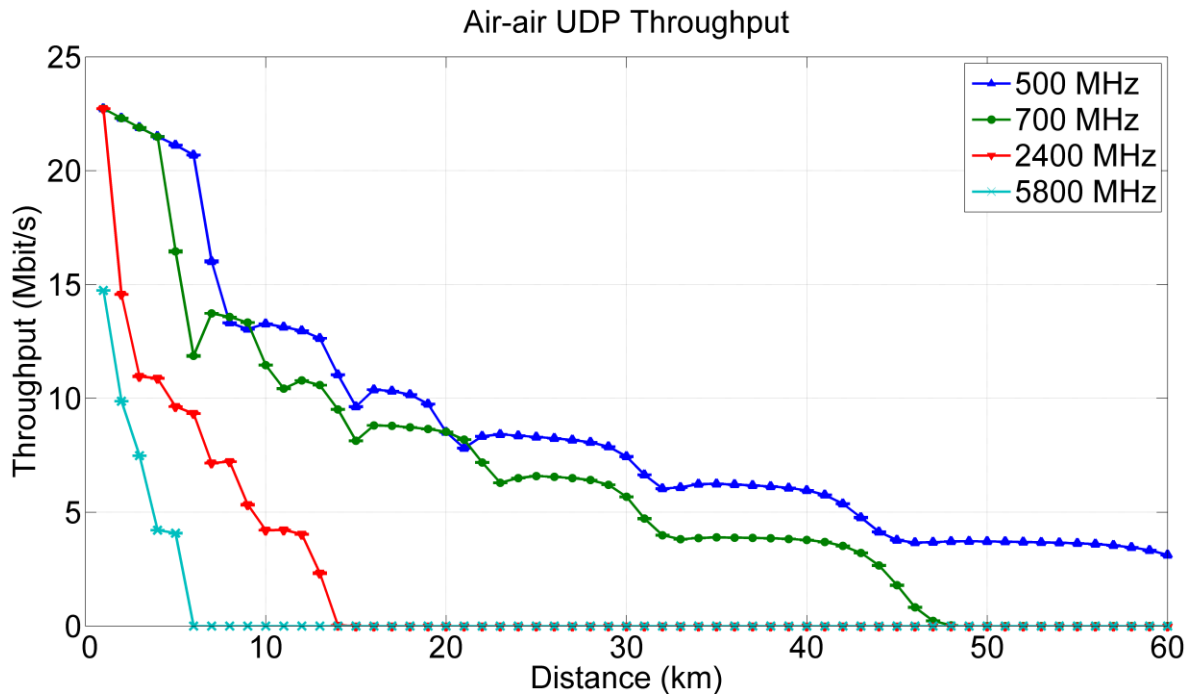


Σχήμα 22. Η αρχιτεκτονική του BLUECOM+ [72]

4.4.2 Σενάρια προσομοίωσης και αποτελέσματα

Προκειμένου να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα του δικτύου BLUECOM+ διεξήχθησαν διάφορα σενάρια προσομοίωσης από την ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου του Πόρτο. Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 3.24 του λογισμικού ns-3, ενώ το ύψος των κόμβων LWR, TWR καθορίστηκε στα 120m από το επίπεδο της θάλασσας. Το μοντέλο διάδοσης της ακτινοβολίας ανοικτού χώρου (free space propagation model) προτιμήθηκε ως τη ζώνη Fresnel, ακολουθούμενο από το μοντέλο διπλής ακτίνας. Τέλος, κάθε σενάριο προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε για 10 επαναλήψεις ενώ το επίπεδο εμπιστοσύνης επιλέχθηκε στο 95%.

Αρχικά μελετήθηκε η διακύμανση της διεκπεραιωτικότητας (throughput) σε σχέση με την απόσταση των 2 κόμβων για τη ζεύξη air-air wireless link και για διάφορες συχνότητες (σχήμα 23).



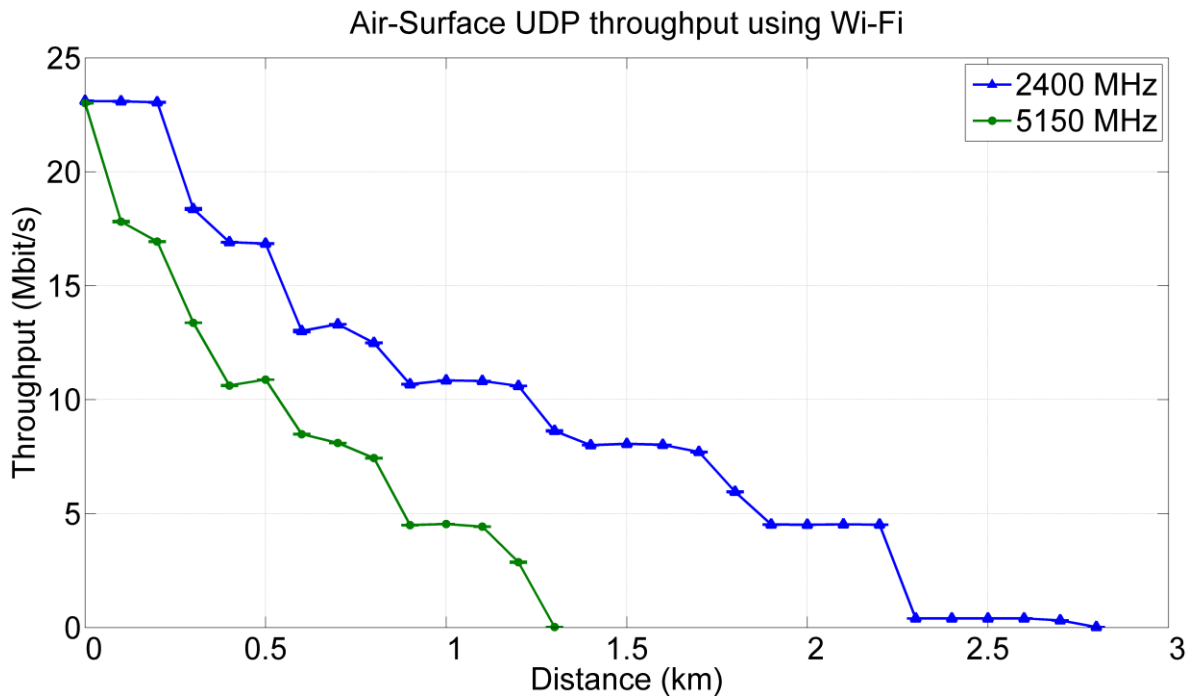
Σχήμα 23. Η διεκπεραιωτικότητα συναρτήσει της απόστασης για τη ζεύξη air-air wireless link στις συχνότητες των 500 MHz, 700 MHz, 2,4 GHz και 5 GHz [72]

Οι διάφοροι παράμετροι καθορίστηκαν ως εξής:

- ενέργεια μετάδοσης 30 dBm
- ενεργειακή απολαβή (κέρδος) 6 dBi
- 20 MHz εύρος καναλιού
- Οι προκαθορισμένες τιμές ευαισθησίας (-96 dBm) του ns-3 προσομοιωτή επιλέχθηκαν για τις συχνότητες των 2400 και 5800 MHz, ενώ η ευαισθησία καθόριστηκε στα -92 dBm και -93 dBm για αυτές των 500 και 700MHz αντίστοιχα.

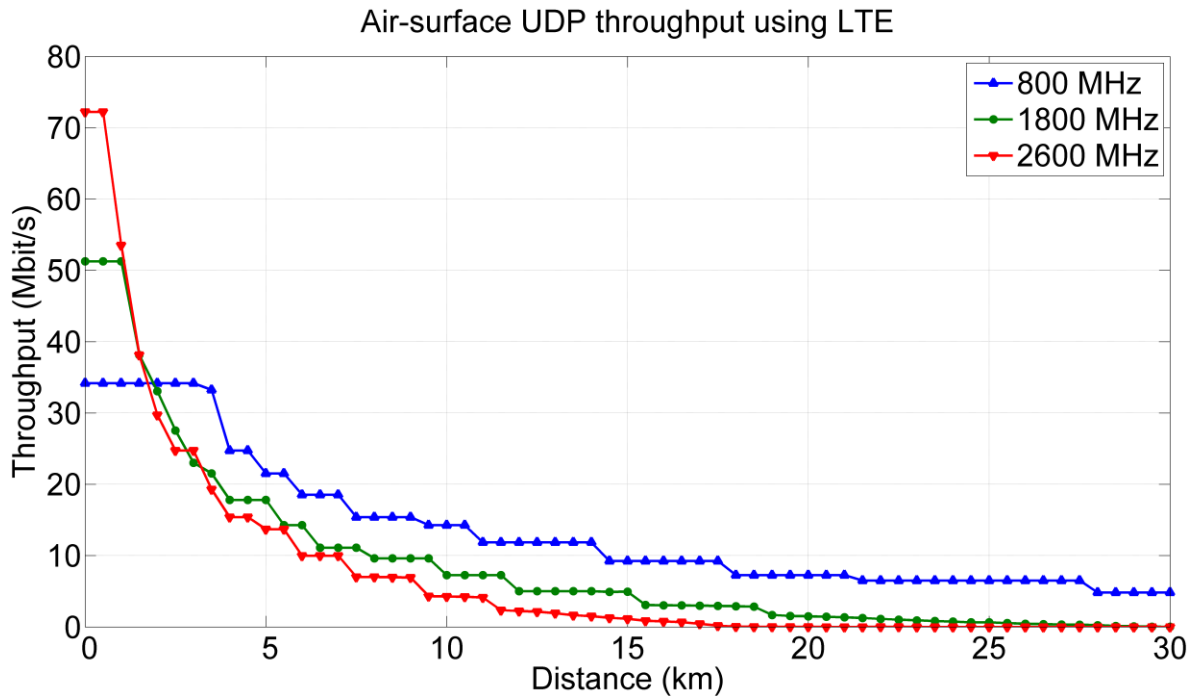
Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των 2 κόμβων, η διεκπεραιωτικότητα φθίνει. Αυτό συμβαίνει για όλες τις συχνότητες με διαφορετικό όμως ρυθμό. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο πιο μεγάλη είναι η μείωση με την αύξηση της απόστασης. Έτσι, παρατηρούμε ότι η μέγιστη απόσταση για τη συχνότητα των 5800 MHz είναι τα 6 km, ενώ για τα 2400 MHz περιορίζεται στα 14 km. Αντίθετα με το τυπικό φάσμα του WiFi, η χρήση των 500 και 700 MHz της τηλεόρασης μπορεί να αποδώσει 3 Mbit/s σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 48 και 60 km αντίστοιχα.

Προχωρώντας στη μελέτη του καναλιού air-surface wireless link θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα δύο προσομοιώσεων, μία για κάθε τεχνολογία πρόσβασης. Αρχίζοντας με τις συχνότητες του WiFi (σχήμα 24) και επιλέγοντας ενέργεια μετάδοσης στα 20 dBm με ισοτροπική κεραία (0 dBi) για του δέκτες στην επιφάνεια της θάλασσας, παρατηρούμε ότι είναι δυνατή η κάλυψη μιας περιοχής σε ακτίνα 1,3 km με τη χρήση της συχνότητας των 5 GHz και πάνω από 2 km με τα 2,4 GHz.



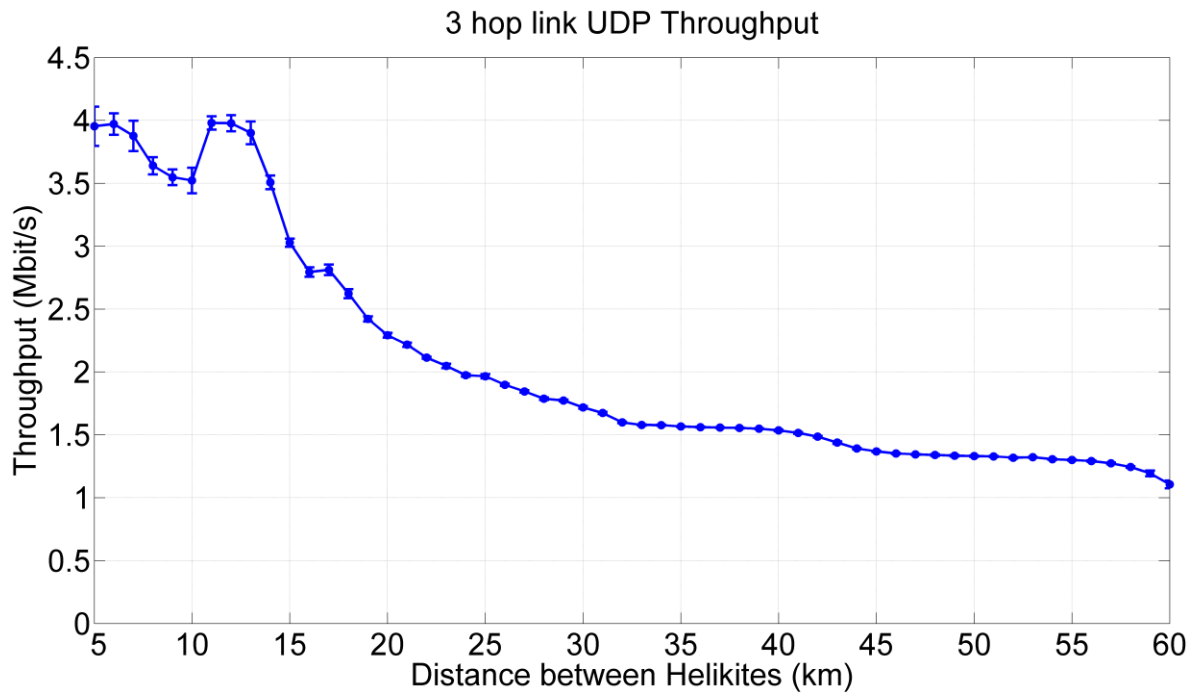
Σχήμα 24. Η διεκπεραιωτικότητα συναρτήσει της απόστασης για τη ζεύξη air-surface wireless link στις συχνότητες των 2,4 GHz και 5 GHz [72]

Στη συνέχεια, αλλάζοντας την τεχνολογία πρόσβασης σε LTE (σχήμα 25) και ρυθμίζοντας την ενέργεια μετάδοσης στα 30 dBm με εύρος καναλιού στα 10, 15 και 20 MHz για τις συχνότητες των 800, 1800 και 2600 MHz αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ TWR κόμβου και τερματικού χρήστη σε αποστάσεις έως τα 30 km. Λαμβάνοντας υπόψιν το παραπάνω και το γεγονός ότι η απόσταση μεταξύ των Helikites είναι περίπου 50 km, υπεισέρχεται ο παράγοντας της επικάλυψης μεταξύ των LTE κυψελών, που θα πρέπει να συυπολογιστεί για τη μελέτη της κινητικότητας εντός του δικτύου.



Σχήμα 25. Η διεκπεραιωτικότητα συναρτήσσει της απόστασης για τη ζεύξη air-surface wireless link στις συχνότητες των 800 MHz, 1,8 GHz και 2,6 GHz [72]

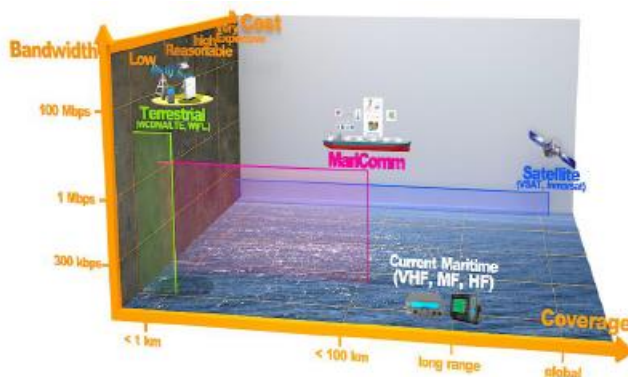
Τέλος, προσομοιώθηκε η επίδραση στη διεκπεραιωτικότητα με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των TWR κόμβων σε περιβάλλον επικοινωνίας 3 βημάτων όπως περιγράφεται στο σχήμα 26. Στο σενάριο αυτό τόσο ο παράκτιος σταθμός LWR όσο και οι 2 TWR κόμβοι βρίσκονται σε ύψος 120 m. Η συχνότητα του διάυλου επικοινωνίας air-air link ορίστηκε στα 500 MHz ενώ για τη ζεύξη air-surface link στα 2,4 GHz του WiFi φάσματος. Στο σχήμα X παρατηρούμε ότι είναι δυνατή η επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων ακόμα και σε αποστάσεις έως και 120 km από την ακτή. Ειδικότερα, για απόσταση 15 km μεταξύ των TWR κόμβων (30 km από την ακτή) είναι δυνατή η πρόσβαση στο διαδίκτυο με ταχύτητα 3 Mbps, στα 50 km από την ακτή η ταχύτητα προσεγγίζει τα 2 Mbps ενώ ακόμα και στα 120 km (60 km μεταξύ των κόμβων) μπορεί να επιτευχθεί ταχύτητα έως 1 Mbps.



Σχήμα 26. Η διεκπεραιωτικότητα συναρτῆσει της απόστασης μεταξύ των κόμβων, σε επικοινωνία 3 βημάτων στη συχνότητα των 2,4 GHz [72]

4.5 MariComm Project

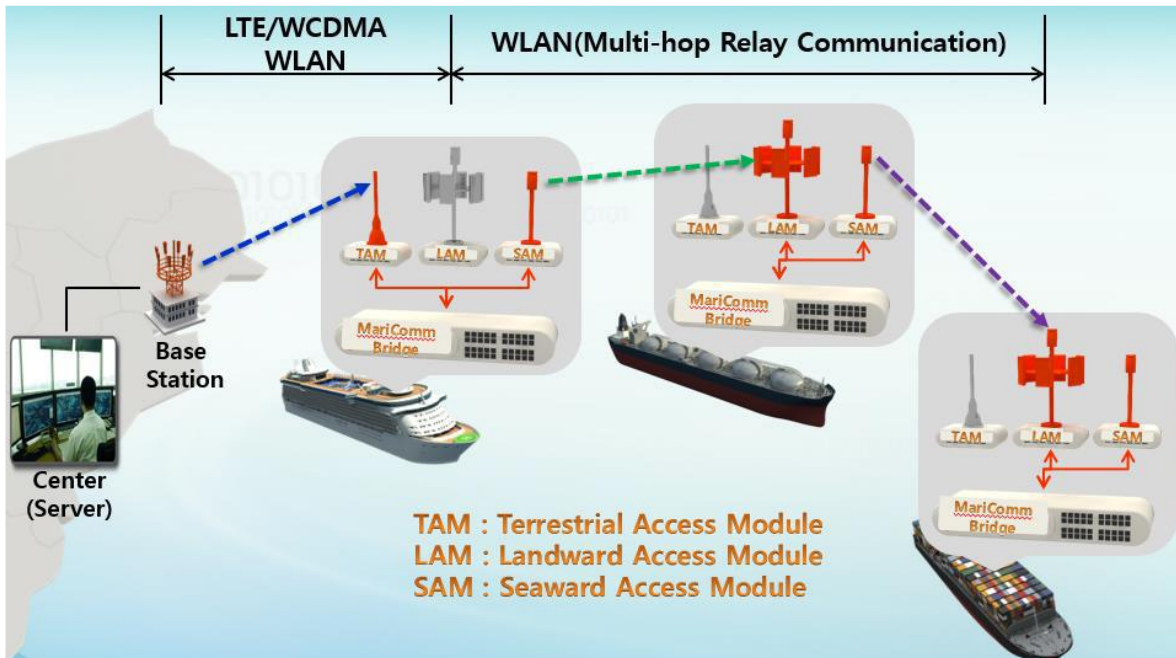
Το MariComm Project αποτελεί μια ακόμα προσπάθεια που στοχεύει στην παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης στο διαδίκτυο για θαλάσσιες περιοχές. Πρόκειται για μια υλοποίηση ερευνητών από διάφορα Πανεπιστήμια της Νοτίου Κορέας, όπου η βασική ιδέα είναι η επέκταση της ασύρματης επικοινωνίας της ηπειρωτικής χώρας (κυβελωτά δίκτυα) σε αποστάσεις έως και 100 km από τις ακτές με ταχύτητα τουλάχιστον 1 Mbps, εφαρμόζοντας τεχνικές πολλαπλής αναμετάδοσης μεταξύ διαφόρων πλοίων-κόμβων.



Σχήμα 27. Συγκριτική απεικόνιση του MariComm σχετικά με τα δίκτυα επικοινωνίας στη ναυτιλία [11]

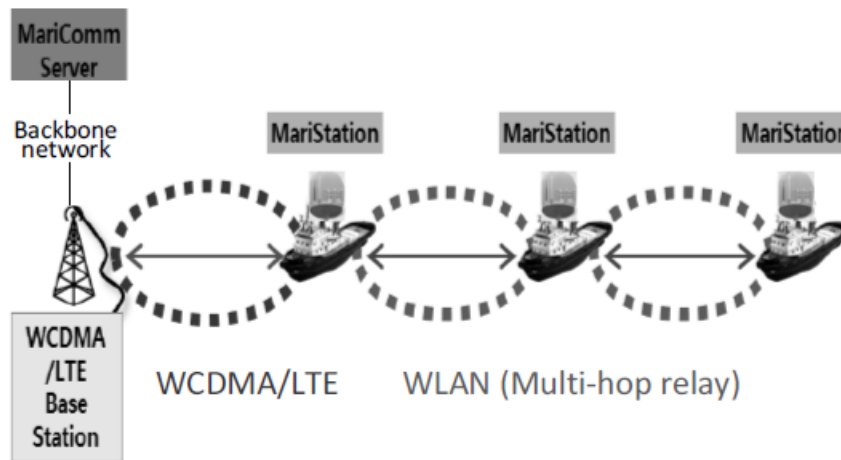
4.5.1 Αρχιτεκτονική του Δικτύου

Στο σχήμα 28 παρουσιάζονται οι 2 βασικές οντότητες από τις οποίες απαρτίζεται το δίκτυο MariComm. Πρόκειται για έναν κεντρικό εξυπηρετητή, το “MariComm server”, ο οποίος βρίσκεται σε παράκτιο σταθμό βάσης σημείο και αναλαμβάνει το ρόλο της διασύνδεσης του δικτύου MariComm με αυτό της ηπειρωτικής χώρας, όπως επίσης και για τους κόμβους MariStation, τα διάφορα πλοία που απαρτίζουν το δίκτυο.



Σχήμα 28. Άποψη του δικτύου MariComm [11]

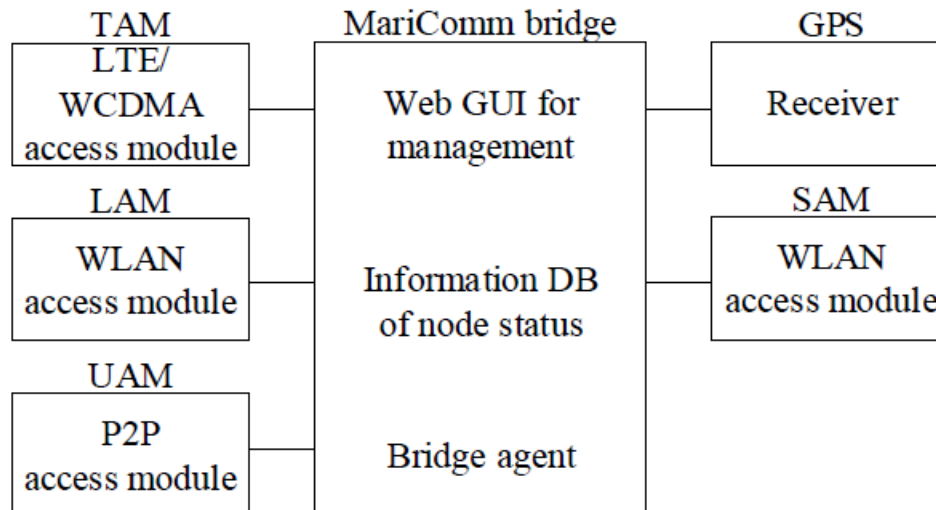
Στο σχήμα 29 παρατηρούμε 2 βασικά κανάλια επικοινωνίας που απορρέουν από την αρχιτεκτονική του δικτύου MariComm. Το πρώτο αφορά την επικοινωνία των κόμβων (MariStation) με τον παράκτιο σταθμό βάσης (MariComm Server) και χρησιμοποιεί την τεχνολογία των κυψελωτών δικτύων (3G και LTE), ενώ το δεύτερο σχετίζεται με την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων-πλοίων τα οποία δημιουργούν ένα ασύρματο δίκτυο (WLAN) πολλαπλών βημάτων.



Σχήμα 29. Εννοιολογικό διάγραμμα του δικτύου MariComm [79]

4.5.2 Δομή του κόμβου MariStation

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η δομή του κόμβου MariStation, ο οποίος αποτελείται από διάφορες διεπαφές που επιτρέπουν την επικοινωνία με τον παράκτιο σταθμό βάσης και τους άλλους κόμβους. Κεντρικό ρόλο στη διαχείριση και τον έλεγχο της επικοινωνίας αλλά και άλλων παραμέτρων όπως η εκτίμηση της ποιότητας του καναλιού επικοινωνίας, παίζει το “MariComm Bridge”. Στην επόμενη παράγραφο θα αναφερθούμε εκτενέστερα στο ρόλο και τις λειτουργίες που επιτελεί.



Σχήμα 30. Η δομή του κόμβου MariStation [11]

Αναλυτικότερα, τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ο κόμβος MariStation:

- 1) **TAM (Terrestrial Access Module):** Επιτρέπει τη σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω των ηπειρωτικών κυψελωτών δικτύων. Περιλαμβάνει κατάλληλους πομποδέκτες και επιτελεί λειτουργίες ελέγχου.
- 2) **SAM (Seaward Access Module):** Η μονάδα αυτή επιτρέπει την αναμετάδοση λειτουργώντας σαν ασύρματο σημείο πρόσβασης για άλλους κόμβους MariStation. Διαχειρίζεται και διαμοιράζει πληροφορίες σχετικές με τη σύνδεση στους μητρικούς κόμβους.
- 3) **LAM (Landward Access Module):** Με τη λειτουργία αυτή γίνεται δυνατή η διασύνδεση στο διαδίκτυο μέσω ενδιάμεσου MariStation. Συγκεκριμένα, το LAM αναζητά στο WLAN δίκτυο για διαθέσιμους κόμβους, εγκαθιδρύει σύνοδο με το αντίστοιχο SAM στον πατρικό MariStation με το οποίο συνδέεται, παρέχοντας έτσι πρόσβαση στο διαδίκτυο στο πλοίο.
- 4) **UAM (Undefined Access Module):** Μέσω του UAM δίνεται η δυνατότητα της απευθείας σύνδεσης του MariStation με παράκτιο σταθμό βάσης

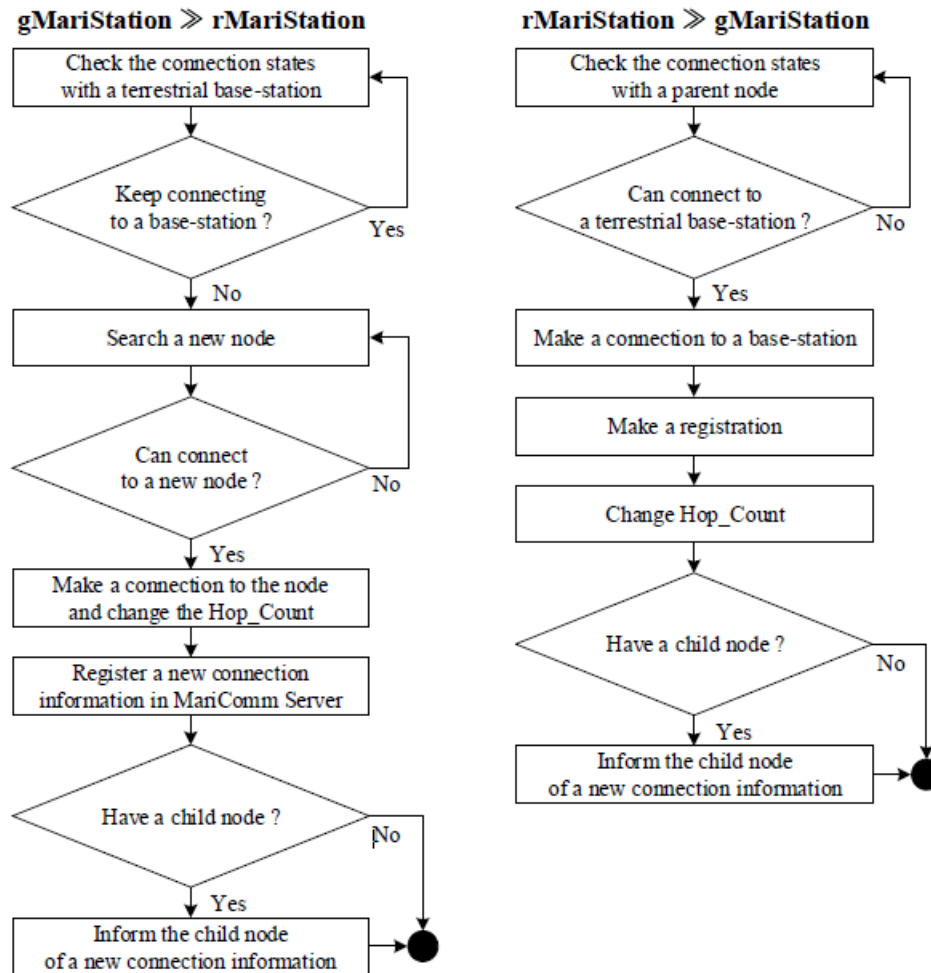
- 5) **GPS (Global Positioning System):** Σύστημα GPS για τον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης του.

4.5.3 Λειτουργίες του MariStation

Ανάλογα με τη δυνατότητα της σύνδεσης με κάποιον παράκτιο σταθμό βάσης, ο κόμβος MariStation επιτελεί διαφορετικό ρόλο. Εφόσον η σύνδεση με κάποιο σταθμό τύπου WCDMA, LTE eNodeB στην ακτογραμμή είναι εφικτή, ο κόμβος παίζει το ρόλο του δρομολογητή “gMariStation” της τηλεπικοινωνιακής κίνησης για άλλα πλοία-κόμβους MariStation. Αν δεν υπάρχει η δυνατότητα απευθείας σύνδεσης, τότε λειτουργεί σαν αναμεταδότης του δικτύου “rMariStation” και μπορεί να επικοινωνήσει με το σταθμό βάσης μέσω άλλων κόμβων MariStations. Η ευελιξία του δικτύου έγκυται στο γεγονός ότι κάθε πλοίο ανάλογα με τις συνθήκες στις οποίες βρίσκεται μπορεί να επιτελέσει καθένα από τους 2 ρόλους.

Καθώς ο κόμβος επιτελεί το ρόλο του ως δρομολογητής, gMariStation, έχει μεταξύ άλλων λειτουργίες DHCP, NAT, WLAN Access Point και WDS (Wireless Distribution System), του ελέγχου των διαφόρων συνδέσεων αλλά και της διατήρησης της επικοινωνίας ενός βήματος μεταξύ των κόμβων. Λειτουργώντας ως απλός αναμεταδότης στα πλαίσια του δικτύου, οι κύριες αρμοδιότητες του rMariStation εντοπίζονται στον έλεγχο της σύνδεσης με διαθέσιμους κόμβους και την επιλογή του πατρικού κόμβου αξιολογώντας παραμέτρους όπως το RSSI (Received Signal Strength Indicator) και των αριθμό βημάτων μέχρι το σταθμό βάσης.

Στο σχήμα 31 απεικονίζεται ένα διάγραμμα ροής στο οποίο παρουσιάζονται οι εναλλαγές των 2 ρόλων ενός MariStation, ανάλογα με τη δυνατότητα σύνδεσης με τον παράκτιο σταθμό βάσης.

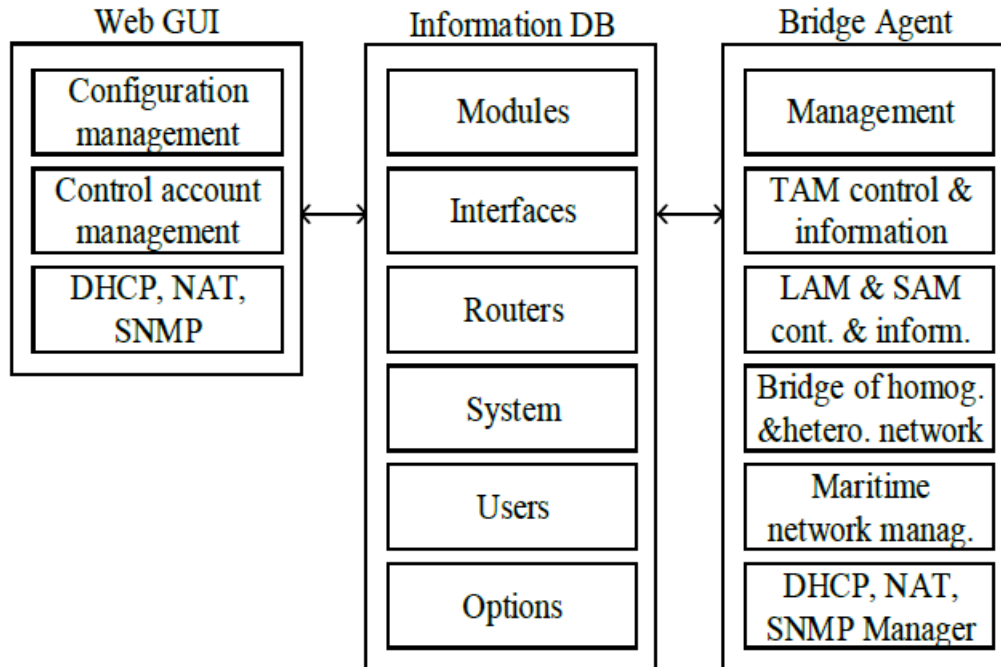


Σχήμα 31. Διάγραμμα ροής για την εναλλαγή των ρόλων του κόμβου MariStation [79]

4.5.4 Περιγραφή του MariComm Bridge

Όπως αναφέραμε προηγούμενα, το MariComm Bridge αποτελεί βασικό μέρος του MariStation αφού ουσιαστικά οργανώνει και καθορίζει το σύνολο των λειτουργιών. Συγκεκριμένα, ελέγχει άμεσα τις λειτουργίες των TAM, SAM και LAM, παρακολουθεί την ποιότητα του σήματος των TAM και LAM μέσω παραμέτρων (RSSI, SNR), διαχειρίζεται το κανάλια επικοινωνίας, επιλέγει τη συχνότητα καναλιού που χρησιμοποιεί το κανάλι της λειτουργίας SAM και τέλος ανταλλάσσει τις απαραίτητες διαχειριστικές πληροφορίες με το MariComm Server στο σταθμό βάσης.

Το σχήμα 32 απεικονίζει τη λειτουργική δομή του MariComm Bridge. Ο τελικός χρήστης μπορεί εύκολα να αλληλεπιδράσει με αυτό μέσω γραφικού περιβάλλοντος (Web GUI), ενώ ο Bridge Agent λειτουργώντας στο παρασκήνιο, επεξεργάζεται τις πληροφορίες και διαχειρίζεται την βάση δεδομένων (Information DB).

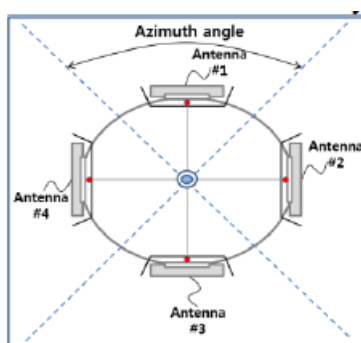


Σχήμα 32. Η δομή λειτουργίας του του MariComm Bridge [79]

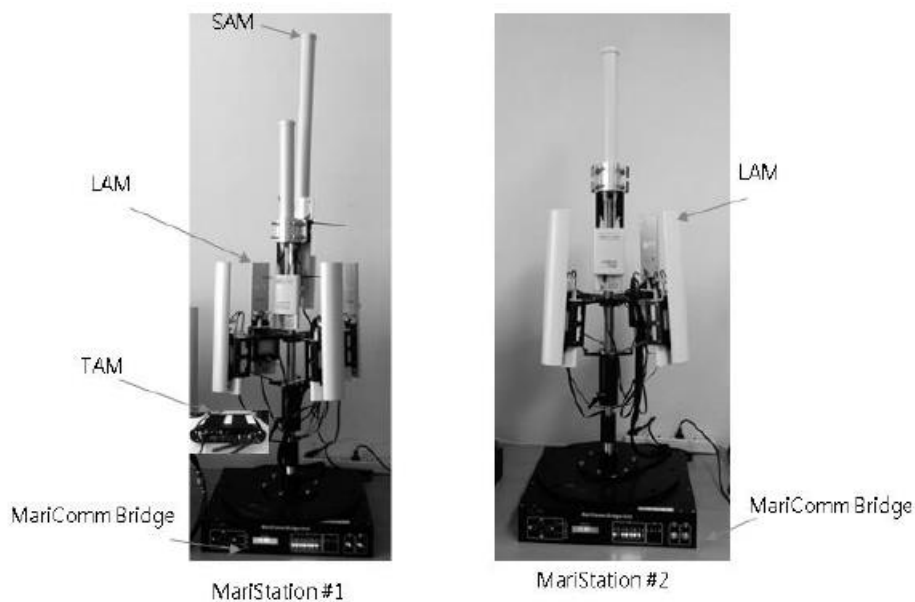
4.5.5 Χαρακτηριστικά της Κεραίας του MariStation

Με στόχο την αντιμετώπιση του προβλήματος της περιορισμένης απόστασης που δύναται να καλύψει η χρήση των UHF συχνοτήτων στη θάλασσα, οι ερευνητές επέλεξαν ένα συνδυασμό από κατευθυντικές και ισοτροπικές κεραίες. Οι πρώτες χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία των MariStation με τους σταθμούς βάσης που βρίσκονται σε καθορισμένα σημεία στην ακτή με σκοπό την επέκταση της απόστασης αλλά και την επαναχρησιμοποίηση του φάσματος. Ταυτόχρονα όμως απαιτείται η συνδυασμένη χρήση ισοτροπικών κεραιών για την αποτελεσματική ευρεκπομπή προς τα άλλα πλοία στο πεδίο της θάλασσας, που ικανοποιεί τον διπλό ρόλο που επιτελούν οι κόμβοι MariStation.

Στο σχήμα 33 παρουσιάζονται οι 4 κατευθυντικές κεραίες του MariStation, οι οποίες καλύπτουν συνολικά αζιμούθιο 360°, ενώ στο σχήμα 34 απεικονίζονται 2 αποτελέσματα εφαρμογής των κεραιών και του συστήματος MariComm Bridge. Διακρίνονται οι διαφορετικές κεραίες που περιγράφηκαν και οι οποίες εξυπηρετούν διαφορετικές λειτουργίες στα πλαίσια του MariStation (TAM, SAM, LAM).

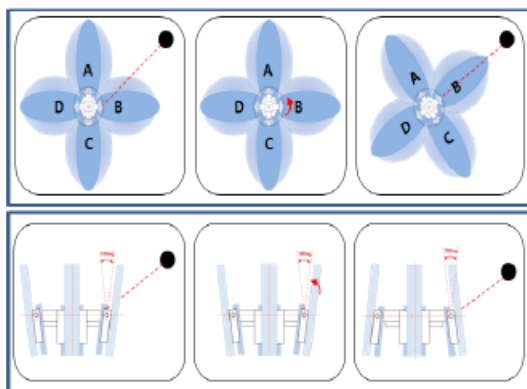


Σχήμα 33. Σχηματική περιγραφή των 4 κατευθυντικών κεραιών του MariStation [11]



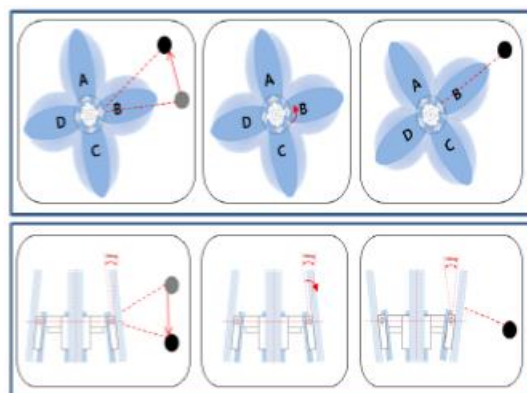
Σχήμα 34. Ολοκληρωμένα πρωτότυπα κεραιών του MariStation [79]

Παράλληλα, με την ανάπτυξη ενός συστήματος εντοπισμού και προσανατολισμού κεραίας το οποίο αξιοποιεί πληροφορίες για τη θέση των πλοίων αλλά και αναλύοντας το λαμβανόμενο σήμα, είναι δυνατή η προσαρμογή του συστήματος κεραιών με σκοπό τη βελτίωση της επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα στρέψης κατά το αζιμουθιακό επίπεδο ούτως ώστε ο ακτινοβολούμενος στόχος να βρίσκεται εντός του κύριου λοβού της δέσμης μίας εκ των κεραιών, αλλά και κατά το επίπεδο ανύψωσης. Στο σχήμα 35 παρουσιάζονται οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα κατά τη διάρκεια νέας συνόδου επικοινωνίας. Αρχικά συγκρίνεται η ισχύς του σήματος που λαμβάνει κάθε μια από τις 4 κεραιές (σημεία A,B,C,D). Έστω ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα ισχύει $B > A > C > D$, άρα το πλοίο βρίσκεται μεταξύ των κεραιών A και B. Στη συνέχεια, προβλέπεται η πιθανή θέση του πλοίου (έστω πιο κοντά στο B) οπότε το σύστημα των κεραιών στρέφεται προς τα αριστερά με σκοπό η κεραία του σημείου B να προσανατολιστεί με το στόχο. Αντίστοιχα, υπολογίζεται και η κλίση της κεραίας



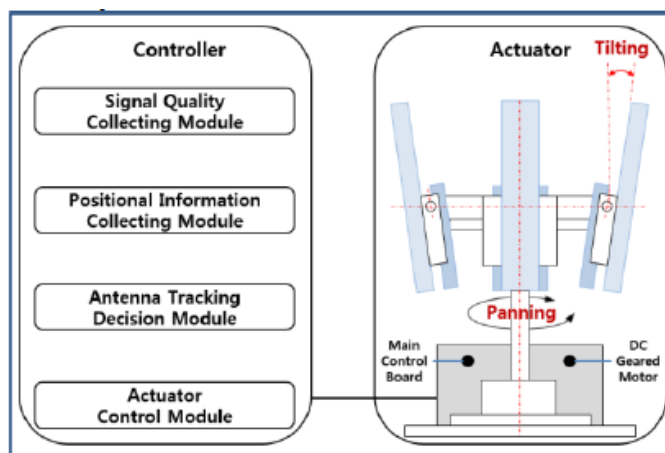
Σχήμα 35. Σύστημα προσανατολισμού κεραιών [11]

Στο σχήμα 36 παρατηρούμε τη διαδικασία διατήρησης της καλύτερης δυνατής σύνδεσης κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας και εν μέσω διαφοροποίησης της σχετικής θέσης των 2 μερών αυτής. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι παρόμοια με αυτά της νέα συνόδου, με τη διαφορά ότι τώρα χρησιμοποιούνται οι ακριβείς πληροφορίες θέσης του πομπού για τον υπολογισμό της στρέψης του συστήματος των κεραιών.



Σχήμα 36. Σύστημα προσανατολισμού κεραιών με πληροφορίες θέσης [11]

Στο σχήματα 37 και 38 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα δομικά μέρη του συστήματος εντοπισμού και προσανατολισμού των κατευθυντικών κεραιών του MariStation καθώς και απεικόνιση πραγματικού συστήματος κατά τη διάρκεια μετρήσεων.



Σχήμα 37. Τα δομικά μέρη του συστήματος εντοπισμού και προσανατολισμού των κατευθυντικών κεραιών του MariStation [11]



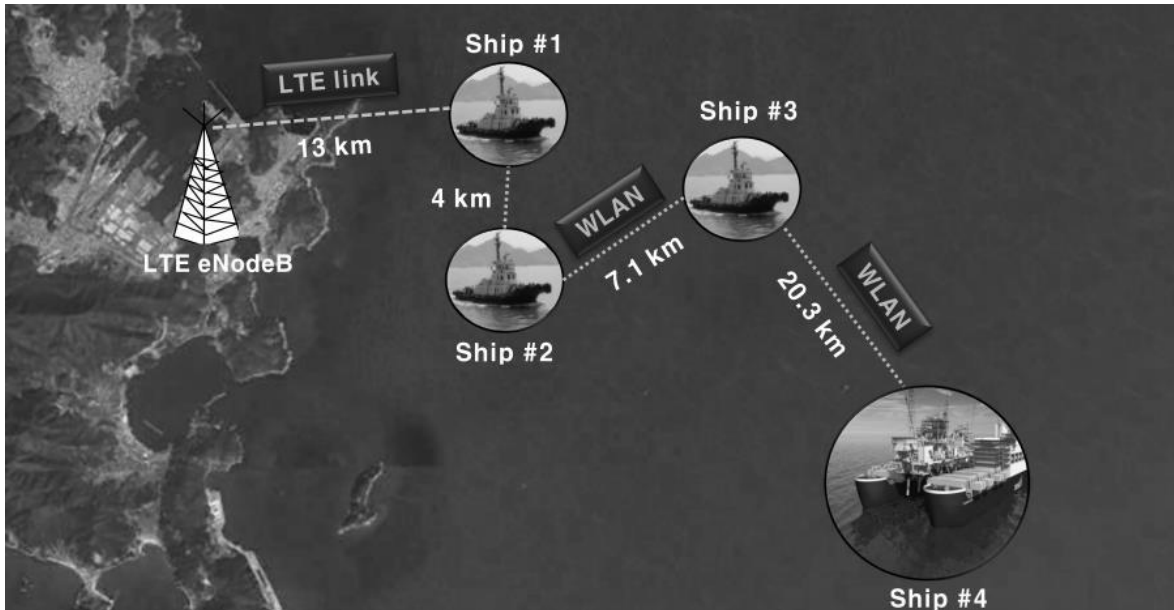
Σχήμα 38. Άποψη του συστήματος κεραιών του MariStation κατά τη διάρκεια μετρήσεων [11]

4.5.6 Αποτελέσματα μετρήσεων

Με σκοπό τη μέτρηση της απόδοσης του δικτύου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές μετρήσεις στη θαλάσσια περιοχή νότια της Κορεατικής χερσονήσου. Μελετήθηκε τόσο η μέγιστη δυνατή απόσταση από τη στεριά με απευθείας σύνδεση του πλοίου με το σταθμό βάσης, όσο και η απόδοση του δικτύου μέσω κόμβων αναμετάδοσης έως και 4 βημάτων. Για τις ανάγκες των μετρήσεων εγκαταστάθηκαν 2 σταθμοί βάσης σε διαφορετικά σημεία της ακτογραμμής, λειτουργώντας σαν ασύρματα σημεία πρόσβασης (WLAN AP1 , WLAN AP2), ενώ η σύνδεση με το ηπειρωτικό κυψελωτό δίκτυο πραγματοποιείται μέσω σταθμού βάσης LTE.

Αρχικά, αναλύονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση της αναμετάδοσης με τη συμμετοχή 4 πλοίων. Το πρώτο από αυτά είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο LTE ενώ τα υπόλοιπα διασυνδέονται μέσω αυτού. Στο σχήμα 39 διακρίνονται τα πλοία, οι αποστάσεις από τον πατρικό κόμβο καθώς και ο τύπος σύνδεσης με αυτόν, ενώ ο πίνακας 6 περιέχει διάφορες παραμέτρους σχετικά με την επικοινωνία μεταξύ των MariStation. Παρατηρούμε ότι ρυθμός δεδομένων 2 Mbps εξασφαλίζεται για

κόμβους που απέχουν μέχρι και 4 βήματα μέσω αναμετάδοσης από το ηπειρωτικό δίκτυο ενώ η μέγιστη απόσταση φτάνει προσθετικά τα 70 km.



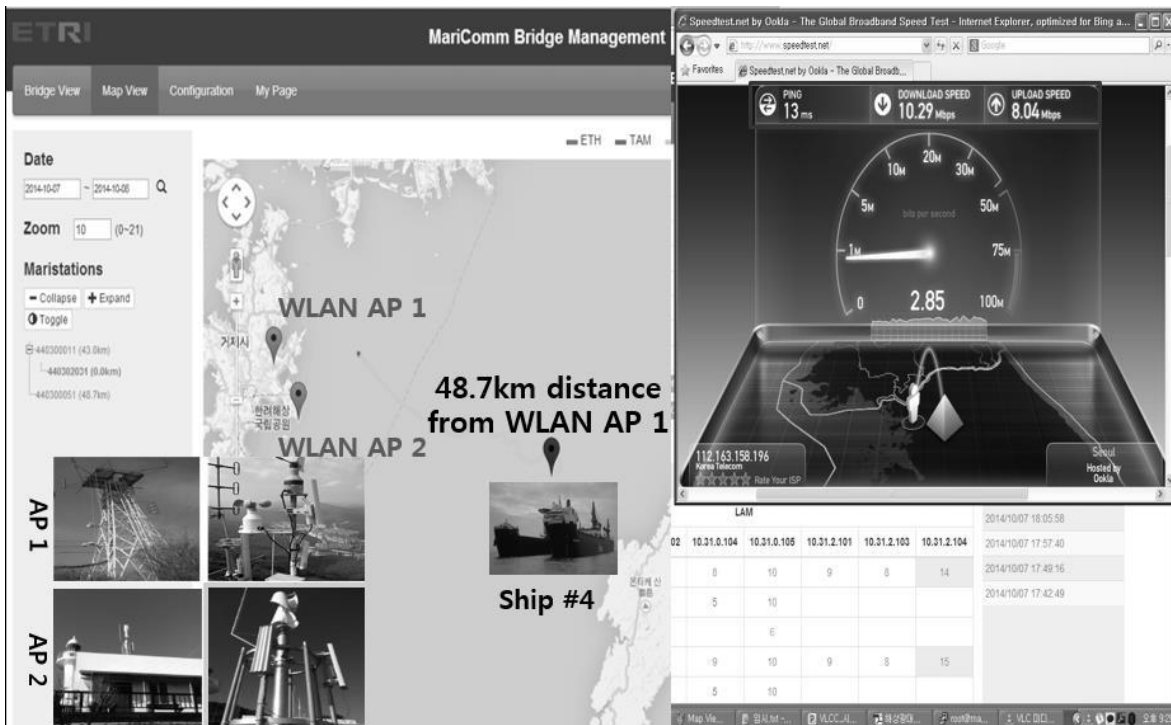
Σχήμα 39. Το περιβάλλον των πειραματικών μετρήσεων [79]

Parameter	MariStation			
	Ship #1	Ship #2	Ship #3	Ship #4
Radio access technology	LTE	WLAN		
Freq. band [MHz]	824 - 894	5,825	5,785	5,765
Channel no.	N/A	CH165	CH157	CH153
Bandwidth	20 MHz			
Max. data rate [Mbps]	7.6	4.7	2.2	2.0
Max. distance to parent node	10 km	20 km	20km	20km

Πίνακας 6. Διάφοροι παράμετροι της επικοινωνίας και οι τιμές τους όπως ορίστηκαν κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων [79]

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ταχύτητας δεδομένων και μέγιστης απόστασης κάλυψης του δικτύου για σύνδεση των 4 πλοίων με τα ασύρματα σημεία πρόσβασης WLAN AP1, WLAN AP2. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 40, το πλοίο #4 διατηρεί σύνδεση στο διαδίκτυο με ρυθμούς δεδομένων 10 και 8 Mbps για downlink και uplink αντίστοιχα, ενώ βρίσκεται σε απόσταση 48 km από τον σταθμό βάσης WLAN AP1.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, το δίκτυο MariComm έχει τη δυνατότητα να εκπληρώσει το στόχο για τον οποίο αναπτύχθηκε, δηλαδή την παροχή ευρυζωνικής σύνδεσης στο διαδίκτυο (τουλάχιστον 1 Mbps) σε αποστάσεις έως και 100 km από τις ακτές, υλοποιώντας λειτουργίες και τεχνικές αναμετάδοσης πολλαπλών βημάτων επικοινωνίας.



Σχήμα 40. Αποτελέσματα των μετρήσεων [79]

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε λεπτομερής καταγραφή των σύγχρονων δικτύων και επικοινωνιών που ήδη χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία είτε βρίσκονται στο στάδιο μελέτης και υλοποίησης. Αναδείχθηκε ο κυρίαρχος ρόλος που επιτελούν τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας για την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο σε απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές, όπως επίσης και το μεγάλο κόστος χρήσης των υπηρεσιών που αποτελεί μέχρι σήμερα τροχοπέδη για την οριστική λύση του προβλήματος της επικοινωνίας στη ναυτιλία. Παράλληλα, τονίσθηκε το γεγονός ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες στη θάλασσα αποτελούν βασικό πυλώνα της οικονομικής ζωής, οι οποίες δημιουργώντας νέες ανάγκες επικοινωνίας αλλά και διευρύνοντας τις ήδη υπάρχουσες καθιστούν επιτακτική την υλοποίηση νέων, αποδοτικότερων και πιο αξιόπιστων τεχνολογιών και δικτύων.

Τα μέχρι σήμερα δεδομένα σχετικά με την εξέλιξη της επιστημονικής έρευνας και τα εγχειρήματα που ήδη έχουν αξιολογηθεί και εφαρμοστεί σε μικρή κλίμακα, δείχνουν ότι κανένα μεμονωμένο δίκτυο ή τεχνολογία δεν μπορεί να προσφέρει αποδοτική και αξιόπιστη πρόσβαση στο διαδίκτυο σε ναυτιλιακά περιβάλλοντα. Καθένα από τα δίκτυα που αναλύθηκαν παραπάνω διακρίνεται από σημαντικά επιμέρους πλεονεκτήματα και βρίσκει εφαρμογή σε συγκεκριμένες θαλάσσιες περιοχές ενώ είναι σχεδιασμένο για την κάλυψη συγκεκριμένων αναγκών και υπηρεσιών.

Με βάση τα παραπάνω, η ανάπτυξη ενός ετερογενούς,συνεργατικού και μεγάλης κλίμακας δυναμικού δικτύου το οποίο θα συνδυάζει αρμονικά όλες τις διαθέσιμες σε κάθε τόπο τεχνολογίες με δυνατότητα εύκολης και γρήγορης εναλλαγής ανάλογα με τις ανάγκες που εξυπηρετεί, φαντάζει αυτή τη στιγμή ως το μέλλον της επικοινωνίας στη ναυτιλία.

5.2 Περιορισμοί έρευνας

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και καταγραφή των σύγχρονων δικτύων και τεχνολογιών επικοινωνίας στη ναυτιλία. Είναι προφανές ότι τα όσα παρουσιάστηκαν στις επιμέρους ενότητες αποτελούν προϊόν λεπτομερούς έρευνας επιστημονικών άρθρων και δημοσιεύσεων, γεγονός που αποτυπώνεται και στη σχετική βιβλιογραφία. Αντικειμενικά, λοιπόν, υπεισέρχεται ο υπεκκειμενικός παράγοντας της προσωπικής κρίσης κατά την επιλογή του καταλληλότερου υλικού καθώς και ο τρόπος παρουσίασης αυτού. Επιπλέον, θα πρέπει να συνυπολογιστεί ότι βρισκόμαστε στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης του συγκεκριμένου τομέα, αφού η στροφή του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας προς τη μελέτη της επικοινωνίας στη ναυτιλία είναι πολύ πρόσφατη.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σίγουρα η παρούσα διατριβή δεν εξάντλησε το σύνολο των διαθέσιμων επιστημονικών άρθρων που θα μπορούσαν να αποτελέσουν πηγή για εμπάθυνση και εμπλουτισμό του περιεχομένου. Παράλληλα, το σύνολο των όσων παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 3 και 4 αποτελούν καρπούς σύγχρονης και εν εξελίξει επιστημονικής έρευνας και εγχειρημάτων. Η παρακολούθηση, μελέτη και καταγραφή των αποτελεσμάτων, μετατροπών και βελτιώσεων των διαφόρων δικτύων και τεχνολογιών είναι αναγκαία για οποιαδήποτε μελλοντική έρευνα στον τομέα αυτό.

Βιβλιογραφία

- [1] T. Wei, W. Feng, Y. Chen, C.-X. Wang, N. Ge and J. Lu, "Hybrid Satellite-Terrestrial Communication Networks for the Maritime Internet of Things: Key Technologies, Opportunities, and Challenges," 2021.
- [2] A. Stove, M. Gashinova, S. Hristov and M. Cherniakov, "Passive maritime surveillance using satellite communication signals," *Trans. Aerospace & Electronic Systems*, vol. 53, no. 6, p. 2987–2997, Dec 2017.
- [3] S. Holsten, "Global maritime surveillance with satellite-based AIS," pp. 1-4, May 2009.
- [4] S. Jayasimha, J. Paladugula, A. V. Gadiraju and M. K. Medam, "Satellite-based AIS receiver for dense maritime zones," *Intern. Conf. Commun. Systems & Networks, Bangalore*, pp. 15-22, Jan 2017.
- [5] J. Urbanski, W. Morgas and C. Specht, "Perfecting the maritime," pp. 1-4, May 2008.
- [6] J. Zhao, T. Yang, H. Feng and J. Li, "Study on wide-band communication," *Cybernetics & Computational Social Systems*, pp. 48-52, July 2017.
- [7] M. S. Choi, M. A. Jeong, S. M. Jeon, J. H. Kim and C. H. Kim, "Ship to shore maritime communication for e-Navigation using IEEE 802.16e," pp. 759-762, October 2013.
- [8] O. J. Rodseth, "A maritime ITS architecture for e-Navigation and e-Maritime: Supporting environment friendly ship transport," p. 1156–1161, October 2011.
- [9] L. Ye and Y. Wang, "Marine navigation services based on COMPASS(Beidou) and GPS," pp. 1-7, October 2012.
- [10] M. Zhou, H. Harada and J. S. Pathmasuntharam, "An analysis model of DoA in maritime environment for ship-to-ship/shore wireless communications," p. 376–380, Oct. 2009.
- [11] H. K. J. C. B. J. a. S. R. D. Yoo, "A novel antenna tracking technique for maritime broadband communication (MariComm) system," p. 225–229, Jul. 2015.
- [12] Y. Xu, "Quality of service provisions for maritime communications based on cellular networks," vol. 5, p. 23881–23890, Oct. 2017.
- [13] J. Tiemann, O. Feldmeier and C. Wietfeld, "Supporting maritimere search and rescue missions through UAS-based wireless localization," pp. 1-6, Dec. 2018.
- [14] G. G. Cruz, L. M. Guzman, M. F. D. Guzman and S. M. Cheng, "Compensation of antenna misalignment using selection diversity for maritime communications," p. 350–355, Oct. 2018.
- [15] J. S. Pathmasuntharam, M. Z. P. Kong, Y. Ge, H. Wang, C. Ang, W. Su and H. Harada, "TRITON: High speed maritime mesh networks," pp. 1-5, Sep. 2008.
- [16] B. Sun, "Marine environmental information service system based on visualization technology," p. 315–318, Dec. 2009.
- [17] S. Ali, J. Qadir and A. Baig, "Routing protocols in delay tolerant networks—a survey," p. 70–75, Oct. 2010.

- [18] T. Yang, H. Liang, N. Cheng, R. Deng and X. Shen, "Efficient scheduling for video transmissions in maritime wireless communication networks," vol. 64, p. 4215–4229, Sep. 2015.
- [19] "Maritime Radio Communications Plan," Dec. 2017.
- [20] W.-S. Shim and S.-W. Jo, "LTE-Maritime: High-Speed Maritime Wireless Communication Based on LTE Technology," pp. 53172 - 53181, April 2019.
- [21] S. Jiang, "Marine Internet for Internetworking in Oceans: A Tutorial," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2019.
- [22] G. Falciassecca and B. Valott, "Guglielmo Marconi: The pioneer of wireless communications," p. 544–546, Sep. 2009.
- [23] J. S. Belrose, "Fessenden and Marconi: their differing technologies and transatlantic experiments during the first decade of this century," p. 32–43, Sep. 1995.
- [24] A. Sinha, S. A. Saoudy and B. P. Sinha, "An investigation of Marconi's transmitter during the 1901 transatlantic experiment," p. 29–32, Aug. 1998.
- [25] R. Campos, T. Oliveira, N. Cruz, A. Matos and J. M. Almeida, "BLUECOM+: Cost-effective broadband communications at remote ocean areas," pp. 1-6, Apr. 2016.
- [26] H. Ferreira, F. Silva, P. Sousa, B. Matias, A. Faria, J. Oliveira, J. M. Almeida, A. Martins and E. Silva, "Autonomous systems in remote areas of the ocean using BLUECOM+ communication network," pp. 1-6, Sep. 2017.
- [27] F. B. Teixeira, T. Oliveira, M. Lopes, C. Leocadio, P. Salazar, J. Ruela, R. Campos and M. Ricardo, "Enabling broadband internet access offshore using tethered balloons: The BLUECOM+ experience," pp. 1-7, Sep. 2017.
- [28] F. B. Teixeira, T. Oliveira, M. Lopes, J. Ruela, R. Campos and M. Ricardo, "Tethered balloons and TV white spaces: A solution for real-time marine data transfer at remote ocean areas," pp. 1-5, Sep. 2016.
- [29] J. S. Pathmasuntharam, P. Kong, M. Zhou, Y. Ge, H. Wang, C. Ang, W. Su and H. Harada, "TRITON: High speed maritime mesh networks," pp. 1-5, Sep. 2008.
- [30] S. Pathmasuntharam, J. Jurianto, P. Kong, Y. Ge, M. Zhou and R. Miura, "High speed maritime ship-to-Ship/Shore mesh networks," pp. 1-6, Jun. 2007.
- [31] M. Zhou, V. D. Hoang, H. Harada, J. S. Pathmasuntharam, H. Wang, P. Kong, C. Ang, Y. Ge and S. Wen, "TRITON: high-speed maritime wireless mesh network," p. 134–142, Nov. 2013.
- [32] V. Spiridonov, "Inmarsat systems and services," p. 45–52, Oct. 1994.
- [33] E. Gambaruto, "Inmarsat Second Generation Satellites for Maritime Communications," pp. 920-925, Sep. 1989.
- [34] D. K. Banks, E. Gambaruto and B. Krinsky, "The Inmarsat second generation communications payload," p. 781–788, Sep. 1989.
- [35] "<https://www.inmarsat.com/en/about/technology/satellites.html>".

- [36] S. W. Wong, "An evaluation of 6.4 kbit/s speech codecs for Inmarsat-M system," p. 629–632, Apr. 1991.
- [37] J. N. a. D. W. L. G. V. Kinal, "INMARSAT integrity channels for global navigation satellite systems," vol. 7, p. 22–25, Aug. 1992.
- [38] P. J. Hadinger, "Inmarsat Global Xpress: The design, implementation, and activation of a global Ka-band network," pp. 1-8, Sep. 2015.
- [39] "<https://www.ukspace.org/global-xpress-to-be-enhanced-with-arctic-capabilities/>".
- [40] K. Sekiguchi, "Iridium contributes to maritime safety," pp. 90-92, Oct. 2016.
- [41] B. C. R. J. T. W. a. L. W. F. Wei, "Research on maritime leapfrog emergency communication coverage technology based on satellite relay," vol. 1087, Sep 2018.
- [42] X. N. Agency, "China launches 1st high-throughput communication satellite," *Available: <http://silkroad.news.cn/20170413/16398.shtml>*, 2017.
- [43] "Spaceflight101: EchoStar 19 Satellite Overview," [Online]. *Available: <http://spaceflight101.com/atlas-v-echostar-19/echostar-19>*, Feb 2019.
- [44] "<https://www.starlink.com/>".
- [45] "<https://www.spacex.com/>".
- [46] "<https://www.space.com/spacex-starlink-18-satellites-launch-rocket-landing>".
- [47] O. Lundberg, "The way ahead for maritime satellite communications," vol. 53, no. 7, pp. 254-256, Jul. 1983.
- [48] T. Aoyagi, K. Suzaki, Y. Suzuki, T. Hirose and T. Sugiyama, "Wave propagation simulations for considering the installation of the maritime mobile satellite communication antennas," p. 346–348, Dec. 2012.
- [49] M. Kuwabara, K. Nishino and H. Sugihara, "Satellite repeater arrangement in a new maritime mobile telephone system," vol. 18, no. 3, p. 116–123, Nov. 1969.
- [50] D. Wright, "International maritime satellite communication," vol. 29, no. 9, pp. 623-626, Sep. 1983.
- [51] S. Lee and J. Lee, "An implementation of NAVTEX application on android mobile device," pp. 1-3, Jun. 2013.
- [52] M. Y. A. Razak, N. Zainal and A. R. M. Sidek, "Performance of 8FSK base on PACTOR I protocol over AWGN channels," pp. 1-5, Sep. 2018.
- [53] Huawei Technologies Co, "North Sea: Worlds First Offshore LTE Network," <https://e.huawei.com/hk/casestudies/global/older/hw>, 2013.
- [54] Ericsson, "Maritime ICT Cloud enables ships to join the Networked Society," *Available: <https://www.ericsson.com/en/pressreleases/2015/1/maritime-ict-cloud-enables-ships-to-join-the-networked-society>*, 2015.
- [55] Verizon Communications Wireless, "Announces 4G LTE Coverage Enhancements in Rhode Island," [Online]. *Available: <https://www.marketscreener.com/VERIZON->*

- COMMUNICATIONSIN-4830/news/Verizon-Communications-Wireless-Announces-4GLTE-Coverage-Enhancements-in-Rhode-Island-20135125, 2015.
- [56] Chinadaily, "Telecoms extend 4G service to Nansha Islands," [Online]. Available: http://www.newsgd.com/news/2016-07/20/content_151841840.htm, 2016.
- [57] V. Friderikos, K. Papadaki, M. Dohler, A. Gkelias and H. Agvhami, "Linked Water," *IEEE Communications Engineer*, pp. 23-27, April/May 2005.
- [58] Y. B. Kim, J. H. Kim, Y. P. Wang and K. H. Chang, "Application scenarios of nautical ad-hoc network for maritime communications," Oct. 2009.
- [59] L. Lambrinos and C. Djouvas, "Creating a maritime wireless mesh infrastructure for real-time applications," pp. 529-532, Dec. 2011.
- [60] T. Yoshikawa, S. Kawasaki, M. Takase, Y. Hiraoka, Y. Takaki, C. Ohta and T. Inoue, "Development of 27MHz/40MHz bands maritime wireless ad-hoc networks," p. 177–182, Jun. 2010.
- [61] J. S. Pathmasuntharam, P. Kong, M. Zhou, Y. Ge, H. Wang, C. Ang, W. Su and H. Harada, "TRITON: High speed maritime mesh networks," pp. 1-5, Sep. 2008.
- [62] M. Zhou, V. D. Hoang, H. Harada, J. S. Pathmasuntharam, H. Wang, P. Kong, C. Ang, Y. Ge and S. Wen, "TRITON: high-speed maritime wireless mesh network," vol. 20, no. 5, pp. 134-142, Nov. 2013.
- [63] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durs, K. Scott, K. Fall and H. Weiss, "Delay-Tolerant Networking Architecture," Apr. 2007.
- [64] K. Karras, T. Kyritsis, M. Amirfeiz and S. Baiotti, "Aeronautical Mobile Ad Hoc Networks," Jun. 2008.
- [65] J.-H. C. D. P. W. a. M. G. J. J. Kong, "Building underwater ad-hoc networks and sensor networks for large scale real-time aquatic applications," vol. 3, pp. 1535-1541, Oct. 2005.
- [66] Tozer and Grace, "High-Altitude Platforms for Wireless Communications," *Electronics & Communication Engineering Journal* 13, 2001.
- [67] S. M. Jiang, "A Possible Development of Marine Internet: A Large Scale Heterogeneous Wireless Network," Aug. 2015.
- [68] S. C. Jiang, F. Liu and S. M. Jiang, "Distance-alignment based adaptive MAC protocol for underwater acoustic networks," *IEEE Wireless Commun. & Networking Conf. (WCNC), Doha, Qatar*, Apr. 2016.
- [69] R. Campos, T. Oliveira, N. Cruz, A. Matos and J. M. Almeida, "BLUECOM+: Cost-effective broadband communications at remote ocean areas," pp. 1-6, Apr. 2016.
- [70] H. Ferreira, F. Silva, P. Sousa, B. Matias, A. Faria, J. Oliveira, J. M. Almeida, A. Martins and E. Silva, "Autonomous systems in remote areas of the ocean using BLUECOM+ communication network," pp. 1-6, Sep. 2017.

- [71] F. B. Teixeira, T. Oliveira, M. Lopes, C. Leocadio, P. Salazar, J. Ruela, R. Campos and M. Ricardo, "Enabling broadband internet access offshore using tethered balloons: The BLUECOM+ experience," pp. 1-7, Sep. 2017.
- [72] F. B. Teixeira, T. Oliveira, M. Lopes, J. Ruela, R. Campos and M. Ricardo, "Tethered balloons and TV white spaces: A solution for real-time marine data transfer at remote ocean areas," *Proc. IEEE Underwater Commun. & Networking Conf., Lercis, Italy*, pp. 1-5, Sep. 2016.
- [73] M. Engel, "Google's Project Loon hovers over the satellite industry," vol. 28, no. 8, p. 3, Aug. 2013.
- [74] M. L. Best, "The Internet that Facebook built," vol. 57, no. 12, pp. 21-23, Dec. 2014.
- [75] "Monterey Bay Aquarium Research Institute, Monterey Accelerated Research System (MARS) Cabled Observatory," <https://www.mbari.org/atsea/cabled-observatory/>.
- [76] G. J. H. L. S. S. C. a. K. W. J. F. Jiang, "A Trust Model based on Cloud Theory in Underwater Acoustic Sensor Networks," *IEEE Trans. Industrial Informatics*, vol. 13, no. 1, pp. 342-350, Feb. 2017..
- [77] "<https://www.mof.go.kr/eng/article/view.do?articleKey=28224&boardKey=41&menuKey=485>".
- [78] P.-Y. K. e. al, "A Performance Comparison of Routing Protocols for Maritime Wireless Mesh Networks," *IEEE WCNC*, Mar. 2008.
- [79] H.-J. Kim, J.-K. Choi, D.-S. Yoo and K.-T. Chong, "Implementation of MariComm bridge for LTE-WLAN maritime heterogeneous relay network," *17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2015.
- [80] S.-W. Jo and W.-S. Shim, "LTE-Maritime: High-Speed Maritime Wireless Communication Based on LTE Technology," 2019.
- [81] J. S. Pathmasuntharam, P. Y. Kong, M. T. Zhou, Y. Ge, H. G. Wang, C. W. Ang, W. Sui and H. Harada, "TRITON: High Speed Maritime Mesh Networks," Sep. 2008.