

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING

Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα

Department of Electrical & Electronics Engineering
Master of Science in
Internetworked Electronic Systems

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη ασύρματου δικτύου αισθητήρων βασισμένο σε τεχνολογίες LPWAN για εφαρμογές στη ναυτιλία.

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Ιωάννης Αναστασίου
Επιβλέπων : Παναγιώτης Παπαγέωργας, Καθηγητής

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2022

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα

UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING

Department of Electrical & Electronics Engineering
Master of Science in
Internetworked Electronic Systems

MSc Thesis

Wireless sensor network study based on LPWAN technologies for shipping applications.

Student: Ioannis Anastasiou, 46

MSc Thesis Supervisor: Panagiotis Papageorgas, Professor

ATHENS-EGALEO, FEBRUARY 2022

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση και αξιολόγηση ασύρματου δικτύου αισθητήρων, το οποίο βασίζεται σε τεχνολογίες δικτύων ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (*Low Power Wide Area Network, LPWAN*) για εφαρμογές στην ναυτιλία.

Αρχικά, διερευνήθηκαν οι ανάγκες που έχουν προκύψει τα τελευταία χρόνια για αυτοματοποίηση και παρακολούθηση των πλοίων. Τέτοιες ανάγκες είναι η μείωση των ρυπογόνων εκπομπών, με άμεση απαίτηση τη στενή παρακολούθηση της συμπεριφοράς ενός πλοίου, η βελτιστοποίηση της απόδοσης των πλοίων με στόχο την καλύτερη συντήρησή τους, αλλά και η βελτιστοποίηση της διαδρομής του ταξιδιού, αυξάνοντας την ασφάλεια του πληρώματος και μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος.

Στην συνέχεια, μελετήθηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες της ασύρματης τεχνολογίας *LoRa* και του πρωτοκόλλου επικοινωνίας *LoRaWAN* σε περιβάλλον πλοίου και ειδικότερα σε δεξαμενόπλοιο. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η ασύρματη κάλυψη του χώρου ενός πλοίου, η βέλτιστη χωροδιάταξη και η δυνατότητα λειτουργίας των ασύρματων αισθητήρων με μπαταρία με γνώμονα την κατανάλωση ισχύος.

Για τη μελέτη αυτή δημιουργήθηκε ένα μοντέλο το οποίο έχει ως στόχο να προσεγγίσει το περιβάλλον του πλοίου και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του σε σχέση με το μέγεθός του και τα υλικά κατασκευής του. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε με το εργαλείο προσομοίωσης *NS3* όπου εισήχθησαν όλες οι απαραίτητες εξισώσεις και παράμετροι.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: *LoRa simulation, LoRaWAN, LPWAN, Marine Environmental Pollution, NS3, Shipping, Spread Spectrum.*

ABSTRACT

This MSc thesis concerns the investigation and the evaluation of the wireless network sensors for shipping applications, which is based on Low Power Wide Area Network (LPWAN) technologies.

At first, we investigated the recently needs for the automation and monitoring of ships. Especially, we focused on the reduction of pollutant emissions, with the immediate requirement of close monitoring of a ship's behavior, and on the optimization of ship performance in order to be better maintained, too. Furthermore, we studied the optimization of the voyage, increasing the safety of the crew and reducing the cost at the same time.

Then, the technical characteristics and capabilities of LoRa wireless technology and the LoRaWAN communication protocol in a ship environment and in particular in a tanker ship were studied. Specifically, we analyzed the wireless coverage of a ship's space, the optimal layout and the possibility of wireless sensors operating with battery based on power consumption.

Finally, for this study a model was created which aims to approach the environment of the ship and its special characteristics in relation to its size and construction materials. This model was developed with the NS3 simulation tool where all the necessary equations and parameters were introduced.

KEYWORDS: *Environmental Pollution, LoRa, LoRaWAN, LPWAN, NS3, Shipping, Spread Spectrum.*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση της μεταπτυχιακής εργασίας μου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κύριο Π. Παπαγέωργα και τον υποψήφιο διδάκτορα Ν. Μονιό για τις παρατηρήσεις και επισημάνσεις τους.

Επίσης, θα ήθελα εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην σύζυγό μου για όλη τη στήριξη και τη συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ-ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ-ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

Binary Phase Shift Keying – BFSK
Cargo Tank – CT
Chirp Spread Spectrum – CSS
Compressed Natural Gas – CNG
Data Collection Systems – DCS
Direct Sequence Spread Spectrum Signal – DSSS
Engine Control Room – ECR
Engine Room – ER
European Environment Agency – EEA
European Maritime Safety Agency – EMSA
European Maritime Transport Environmental Report – EMTER
Frequency Division Multiple Access – FDMA
Frequency Shift Keying – FSK
Heavy Fuel Oil – HFO
Industrial, Scientific and Medical – ISM
International Convention for the Prevention of Pollution from Ships – MARPOL
International Maritime Organization – IMO
Internet of Things – IoT
Liquefied Biio Gas – LBG
Liquefied Petroleum Gas – LPG
Liquefied Natural gas – LNG
Low Power Wide Area Network– LPWAN
Machine to Machine – M2M
Medium Acces Control – MAC
Monitoring, Reporting and Verification – MRV
Phase Shift Keying - PSK
Quadrature Phase Shift Keying – QPSK
Signal to Noise Ratio – SNR

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	Εισαγωγή.....	11
1.1	Θαλάσσιες μεταφορές και περιβαλλοντικό αποτύπωμα.....	11
1.2	Μέθοδοι μείωσης περιβαλλοντικών ρύπων.....	13
1.3	Βελτιστοποίηση κατανάλωσης καυσίμου.....	13
1.4	Συλλογή δεδομένων.....	15
2	Low Power Wide Area Network.....	16
2.1	Πεδίο εφαρμογών των LPWAN.....	16
2.2	Σχεδιασμός LPWAN.....	17
2.2.1	Βασικές παράμετροι σχεδιασμού.....	17
2.2.2	Τεχνικές και μέθοδοι υλοποίησης.....	18
2.2.3	Σύγκριση LPWA τεχνολογιών.....	22
3	Η τεχνολογία LoRa και το δίκτυο LoRaWAN.....	24
3.1	LoRa physical layer.....	24
3.1.1	Συστήματα Διάχυσης Φάσματος.....	24
3.1.2	Διαμόρφωση LoRa.....	27
3.1.3	Το δίκτυο LoRaWAN.....	32
4	Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	36
4.1	Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω αγωγίμων και μονωτικών υλικών.....	36
4.2	Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε εσωτερικό χώρο.....	39
5	Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πλοίων.....	42
5.1	Υλικά κατασκευής.....	42
5.2	Δομή εμπορικών πλοίων.....	43
6	Προσομοίωση ασύρματου δικτύου LoRaWAN σε περιβάλλον δεξαμενόπλοιου.....	50
6.1	Πρόγραμμα προσομοίωσης NS3.....	50
6.2	LoRaWAN Module.....	51
6.3	Μοντελοποίηση του καναλιού.....	51
6.4	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	59
7	Συμπεράσματα.....	68
	Βιβλιογραφία.....	70

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Figure 1: Subsystems on board ships that produce water pollution.....	12
Figure 2: Power vs Speed Curve for difference conditions.....	14
Figure 3: Data Rate vs Range.....	16
Figure 4: Narrowband vs Spread Spectrum Modulation.....	18
Figure 5: Star and Mesh topology.....	20
Figure 6: LPWAN Node Architecture.....	21
Figure 7: Model of spread spectrum digital communication channel.....	24
Figure 8: Data input spreading process.....	25
Figure 9: Δύο διαφορετικά σύμβολα α_1 (πράσινο) και α_2 (πορτοκαλί), όπως μεταβάλλονται κατά την διάρκεια του χρόνου.....	27
Figure 10: Μία αλληλουχία από upchirps και downchirps τα οποία συνθέτουν ένα πακέτο LoRa.....	31
Figure 11: Τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα πακέτο δεδομένων LoRa.....	31
Figure 12: Η αρχιτεκτονική του δικτύου LoRaWAN.....	33
Figure 13: Παράμετροι και περιορισμοί λειτουργίας σύμφωνα με το πρωτόκολλο LoRaWAN και τους κανονισμούς για διάφορες γεωγραφικές περιοχές.....	34
Figure 14: Η δομή του πακέτου δεδομένων σύμφωνα με το πρωτόκολλο LoRaWAN.....	35
Figure 15: Electromagnetic wave incident on a material boundary.....	36
Figure 16: Indoor Electromagnetic Wave Propagation.....	40
Figure 17: Oil Tanker (upper side view and down top view) [32].....	44
Figure 18: Container Ship[26].....	44
Figure 19: Bulk Carrier Ship[32].....	45
Figure 20: Superstructure [26].....	46
Figure 21: Engine Room[32].....	47
Figure 22: Cargo Hold[26].....	48
Figure 23: NS3 Basic Model.....	50
Figure 24: Side view (Starboard). Layout of the nodes, where the three different positions of the gateway are shown in yellow. End Devices located in the accommodation and the engine room are shown in red. Scale 1:100.....	57

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Chart 1: Μεταβολή της ευαισθησίας στον δέκτη για διαφορετικές τιμές Coding Rate. (SF =7, BW =125KHz, 13 byte payload).....	30
Chart 2: Packet Delivery Ratio for three different gateway position without <i>End Devices</i> in Cargo Tank and Duty Cycle limitation.....	60
Chart 3: Packet Delivery Ratio for three different gateway position without Duty Cycle limitation.....	61
Chart 4: Packet Delivery Ratio for three different gateway position with Duty Cycle limitation.....	63
Chart 5: Packet Delivery Ratio for three different gateway position without Duty Cycle limitation.....	63
Chart 6: The total <i>energy</i> consumption for each End Device. Gateway located at bridge.....	65
Chart 7: The total <i>energy</i> consumption for each End Device. Gateway located at Cargo Control Room.....	65
Chart 8: The total <i>energy</i> consumption for each End Device. Gateway located at Engine Control Room.....	66
Chart 9: Average <i>energy</i> consumption for different application time periods.....	67

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΕΔΙΩΝ

Drawing 1:General view (Starboard).....	56
Drawing 2:Transverse section. Layout of the nodes, where the three different positions of the gateway are shown in yellow. End Devices located in the accommodation and the engine room are shown in red and nodes in the cargo tanks are shown in blue. Scale 1:100.....	57
Drawing 3: Side view (Starboard). The layout of the End Devices, where the three different positions of the gateway are shown in yellow, the nodes located in the accommodation and the engine room are shown in red. Scale 1:100.....	58

1 Εισαγωγή

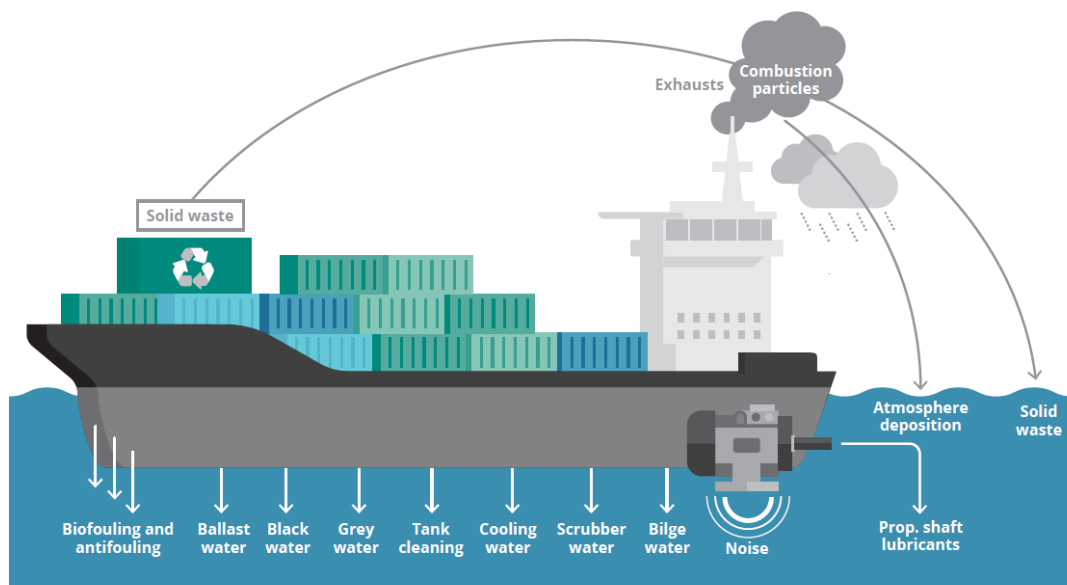
1.1 Θαλάσσιες μεταφορές και περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Οι θαλάσσιες μεταφορές ήδη διαδραματίζουν κομβικό ρόλο στο εμπόριο και την οικονομία σε παγκόσμιο επίπεδο ως βασικό κομμάτι της διεθνούς αλυσίδας εφοδιασμού, λόγω της αυξανόμενης ζήτησης σε πρωτογενείς πόρους και μεταφορές εμπορευματοκιβωτίων. Τα εμπορικά πλοία έχουν ως έργο τη μεταφορά αγαθών σε διάφορα μέρη της γης μέσω των ωκεανών, με το μικρότερο δυνατό κόστος. Η ναυτιλία είναι υπεύθυνη για το 90% της μεταφοράς των προϊόντων παγκοσμίως[1]. Εν όψει λοιπόν της ολοένα και αυξανόμενης ανάπτυξης του ναυτιλιακού τομέα (που αποτελεί το 77% των εξαγωγών της Ευρώπης), τις τελευταίες δεκαετίες έχουν ληφθεί μέτρα βάσει ευρωπαϊκών και διεθνών οδηγιών για την άμβλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που επιφέρει η ναυτιλιακή δραστηριότητα. Αυτό το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των θαλάσσιων μεταφορών αποτελεί μία μεγάλη πρόκληση για την επίτευξη της βιωσιμότητας αυτού του τομέα και την μελλοντική ευημερία των οικοσυστημάτων στις θαλάσσιες και παράκτιες περιοχές.

Η ανάγκη για αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανόνες και διεθνή πρότυπα ασφάλειας στη ναυτιλία πηγάζει από το μεγάλο αρνητικό αντίκτυπο των ρύπων που παράγουν τα πλοία, σύμφωνα με την έκθεση European Maritime Transport Environmental Report - EMTER της European Maritime Safety Agency - EMSA και του European Environment Agency - EEA[2]. Οι οδηγίες αυτές είναι καταγεγραμμένες στη Διεθνή Σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από πλοία, International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL, 1973) και στις επεκτάσεις αυτής [3]. Επιγραμματικά, οι βασικές επιπτώσεις της ναυτιλίας στο περιβάλλον, εκτός από την άμεση απόρριψη απορριμμάτων από τα πλοία στη θάλασσα προέρχονται από: τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, την ατμοσφαιρική ρύπανση, τον παραγόμενο υποθαλάσσιο θόρυβο, την εμφάνιση μη-αυτόχθονων ειδών και την πετρελαϊκή μόλυνση.

Συγκεκριμένα, η έκθεση EMTER δείχνει πως τα πλοία παράγουν παγκοσμίως το 13,5% του συνόλου των αερίων του θερμοκηπίου κατά μέσο όρο ετησίως, ποσοστό που αντιστοιχεί σε 140 εκατομμύρια τόνους αερίων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO₂ (μόλις 1% κάτω από τις αερομεταφορές). Επιπρόσθετα, οι εκπομπές του διοξειδίου του θείου SO₂ (που θεωρείται ατμοσφαιρικός ρύπος) ανέρχονται σε 1,6 εκατομμύρια τόνους ετησίως, περίπου δηλαδή το 16% των παγκόσμιων εκπομπών από την διεθνή ναυτιλία. Επιπροσθέτως, τα πλοία ως αποτέλεσμα διαδικασιών καύσης, προώθησης, παραγωγής και μετατροπής ενέργειας εκπέμπουν οξειδία του αζώτου (NO_x) σε ποσοστό 22% ετησίως επί των γενικών ρύπων όλων των τομέων μεταφοράς παγκοσμίως. Επίσης, παράγουν μονοξείδιο του άνθρακα (CO) σε ποσοστό 24% και αιωρούμενα σωματίδια 9%, τα οποία επηρεάζουν το 40% των Ευρωπαίων καθώς ζουν σε απόσταση μικρότερη των 50χλμ από τη θάλασσα. Οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου δεν ρυπαίνουν μόνο την ατμόσφαιρα, αλλά μολύνουν και το θαλάσσιο περιβάλλον, τροποποιώντας τη διαδικασία όξυνσης του νερού και τα ποσοστά των θρεπτικών ουσιών και του οξυγόνου[2][4].

Επίσης, στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα προστίθενται και τα επίπεδα υποβρύχιου θορύβου, τα οποία εντός της τελευταίας δετίας έχουν υπερδιπλασιαστεί, γεγονός που οφείλεται στη χρήση της προπέλας κυρίως των πολλών πλέον tankers, containers και επιβατηγών πλοίων. Η συνέπεια αυτού του θορύβου είναι η πιθανή απώλεια ακοής στα θαλάσσια είδη και οι επιβλαβείς εναλλαγές στη συμπεριφορά τους. Ακόμη, οι θαλάσσιες μεταφορές ευθύνονται για το ήμισυ των μη-αυτόχθονων ειδών που εισήχθησαν στα ευρωπαϊκά ύδατα τα τελευταία 70 χρόνια, με άμεση επιρροή στους τοπικούς οικοτόπους και στα αυτόχθονα είδη, ιδίως των Μεσογειακών οικοσυστημάτων. Οι οργανισμοί μεταφέρονται κυρίως μέσω του υδάτινου έρματος (ballast water) σε ποσοστό 25% και της ρύπανσης της γάστρας του πλοίου (hull fouling) σε ποσοστό 22% και μόλις εγκατασταθούν σε έναν νέο βιότοπο αυτά τα μη-αυτόχθονα είδη ενδέχεται να αλλοιώσουν το τοπικό οικοσύστημα. Τέλος, στον αρνητικό αντίκτυπο, προστίθεται και η διαρροή πετρελαίου καθώς η ποσότητα του πετρελαίου που μεταφέρεται δια θαλάσσης αυξάνεται ραγδαία τα τελευταία 30 χρόνια και άρα αυξάνεται και ο κίνδυνος ατυχημάτων και εμφάνισης πετρελαιοκηλίδων. Οι πετρελαιοκηλίδες είναι από τις πιο ανησυχητικές πηγές θαλάσσιας ρύπανσης, καθώς είναι δύσκολο να καθαριστούν. Η πετρελαϊκή μόλυνση της τελευταίας δεκαετίας, αγγίζει το 17% της παγκόσμιας υδάτινης ρύπανσης, καθώς μόλις 8 μεγάλα πετρελαιοφόρα προκάλεσαν σοβαρή ρύπανση, εκ των οποίων μόνο τα 3 εντοπίστηκαν σε ύδατα εντός ΕΕ [2]. Στην εικόνα 1[5] καταγράφονται όλοι οι τρόποι με τους οποίους ένα πλοίο μπορεί να μολύνει την θάλασσα.



Source: SHEBA project (2018).

Figure 1: Subsystems on board ships that produce water pollution

Η πρόκληση για τον εντοπισμό όλων των παραγόντων ρύπανσης των θαλάσσιων μεταφορών και η μετάβαση σε μια βιώσιμη ασφαλή “γαλάζια οικονομία” σίγουρα θα γίνει αξιοποιώντας στο έπακρο προηγμένες ψηφιακές τεχνολογίες και

καινοτόμες λύσεις. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει κάθε κρίκος αυτής της διεθνούς εφοδιαστικής αλυσίδας, από τους φορτωτές έως τα λιμάνια, από τα ναυπηγεία έως τον χρηματοοικονομικό τομέα, να στοχεύει προς την βιωσιμότητα, προσπαθώντας να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ναυτιλίας. Ο περιβαλλοντικά βιώσιμος τομέας της ναυσιπλοΐας αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις, αλλά ταυτοχρόνως και επενδύσεις σε παγκόσμιο επίπεδο.

1.2 Μέθοδοι μείωσης περιβαλλοντικών ρύπων

Για τη μείωση των ρύπων, που παράγονται από τη κύρια μηχανή του πλοίου αλλά και από τις βοηθητικές μηχανές παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες που βασίζονται σε μία ή περισσότερες τεχνολογίες. Μία επιλογή είναι η χρήση καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο σε ποσοστό τέτοιο όπου να είναι συμβατά με τους κανονισμούς που ισχύουν. Μία άλλη επιλογή είναι η χρήση καυσίμου χαμηλότερης ποιότητας (HFO – Heavy Fuel Oil) που όμως θα συνοδεύεται με την εγκατάσταση διατάξεων για τον καθαρισμό των καυσαερίων (scrubber). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο το υγροποιημένο αέριο (LNG – Liquefied Natural gas) όπου μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση της ποσότητας του καυσίμου και μείωση των εκπομπών επιβλαβών αερίων στο περιβάλλον. Ακόμη, οι μηχανικοί σχεδιάζουν μηχανές οι οποίες στο μέλλον θα λειτουργούν με καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον όπως είναι το Liquefied Petroleum Gas – LPG, το Compressed Natural Gas – CNG, τα βιοκαύσιμα (Liquefied Bio Gas – LBG) και το υδρογόνο. Επίσης, γίνεται προσπάθεια για την εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε πλοία, με την χρήση ηλιακής και αιολικής ενέργειας[6]. Η επιλογή της τεχνολογίας που θα υιοθετηθεί και θα εφαρμοστεί σε ένα πλοίο ή σε έναν στόλο πλοίων εξαρτάται από πάρα πολλούς παράγοντες όπως, περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς, οικονομικούς και τεχνικούς. Για την επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας, οι μηχανικοί των ναυτιλιακών εταιριών καλούνται να συλλέξουν όλες τις παραπάνω πληροφορίες, να τις αναλύσουν και να αποφασίσουν ποια τεχνολογία είναι η καταλληλότερη για το συγκεκριμένο πλοίο ή στόλο[6]. Η επιλογή αυτή είναι ένα πολυπαραγοντικό πρόβλημα και με την υιοθέτηση της μιας ή της άλλης τεχνολογίας δεν σημαίνει ότι έχει επιτευχθεί η μείωση των καυσαερίων στα επιθυμητά επίπεδα. Για τον λόγο αυτό όπως αναφέρεται και στις επόμενες παραγράφους, η συλλογή δεδομένων σχετικά με τις εκπομπές καυσαερίων είναι επιβεβλημένη.

1.3 Βελτιστοποίηση κατανάλωσης καυσίμου

Πάνω από το 50% των λειτουργικών εξόδων ενός πλοίου οφείλεται στην κατανάλωση καυσίμων και για τον λόγο αυτό οι ναυτιλιακές εταιρίες κάνουν χρήση καυσίμων χαμηλού κόστους και χαμηλής ποιότητας[7]. Παρόλο, που η απόδοση ως προς την κατανάλωση καυσίμου είναι πιο αποδοτική σε σχέση με άλλους τρόπους μεταφοράς, η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα, η οποία ανέρχεται στο 3% της παγκόσμιας παραγωγής έχει θεωρηθεί πολύ υψηλή[1]. Για την μείωση της κατανάλωσης

του καυσίμου και την αποδοτική χρήση του έχουν εκπονηθεί πολλές μελέτες. Οι μελέτες αυτές έχουν στόχο την εύρεση μοντέλων τα οποία προβλέπουν την βέλτιστη διαδρομή και την ταχύτητα του πλοίου σε όλη την διάρκεια ενός ταξιδιού. Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί βασίζονται σε μετεωρολογικές προβλέψεις και σε μοντέλα τα οποία περιγράφουν τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή. Οι πληροφορίες αυτές σε συνδυασμό με τα δεδομένα που λαμβάνονται από το πλοίο και γνωρίζοντας την συμπεριφορά του σκάφους έχουν ως αποτέλεσμα την εξαγωγή συμπερασμάτων για την βέλτιστη πορεία του [8]. Η ρύπανση της γάστρας του πλοίου είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου της κύριας μηχανής, διότι όσο αυξάνεται η ρύπανση αυξάνεται και η αντίσταση που δέχεται το πλοίο, με αποτέλεσμα για να φτάσει στην επιθυμητή ταχύτητα να απαιτείται μεγαλύτερη ισχύ. Σημειώνεται, ότι το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει στο πλοίο μείωση ταχύτητας έως και 86% [9]. Λόγω του ότι δεν είναι δυνατή η καταγραφή της ρύπανσης της γάστρας άμεσα με κάποιο αισθητήρα η διάταξη μετρήσεις, αλλά μόνο με άμεση οπτική παρατήρηση, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι οι οποίες προσπαθούν να προσεγγίσουν το μέγεθος της ρύπανσης μέσω έμμεσων μετρήσεων. Η πιο γνωστή μέθοδος είναι αυτή η οποία βασίζεται στην καμπύλη κατανάλωσης καυσίμου και της ταχύτητας του πλοίου. Το πλοίο κατά την έξοδο του από το ναυπηγείο ακολουθεί μια σειρά δοκιμών (Sea Trials) όπου και καταγράφεται η καμπύλη κατανάλωσης ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα του. Η σύγκριση της καμπύλης αυτής με την καμπύλη που παράγεται από μετρήσεις κατά την διάρκεια του ταξιδιού δείχνει την αύξηση της ρύπανσης της γάστρας. Εισάγοντας στα μοντέλα αυτά και άλλες παραμέτρους όπως είναι οι καιρικές συνθήκες, η γωνία πηδαλίου και το βυθίσματα μπορούν να παραχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα. Έτσι, γνωρίζοντας την κατάσταση της γάστρας, μπορεί να εκτιμηθεί ποια είναι η βέλτιστη ταχύτητα για τις υπάρχουσες συνθήκες και αν το πλοίο είναι απαραίτητο να καθαριστεί ή μπορεί να συνεχίσει να ταξιδεύει. Στην εικόνα 2 εμφανίζεται ένα διάγραμμα ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα. Η πρώτη καμπύλη αναπαριστά ένα πλοίο σε ιδανικές καιρικές συνθήκες με καθαρή γάστρα. Στη δεύτερη καμπύλη παρατηρούμε την αύξηση της ισχύος της μηχανής για τις ίδιες στροφές όπου αυτό μεταφράζεται σε άσχημες καιρικές συνθήκες, ενώ η γάστρα του πλοίου δεν είναι καθαρή.

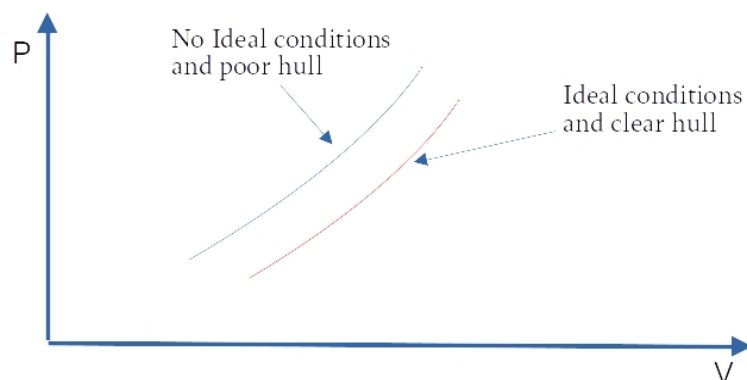


Figure 2: Power vs Speed Curve for difference conditions

1.4 Συλλογή δεδομένων

Ο Διεθνής Ναυτικός Οργανισμός (IMO-International Maritime Organization) και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν εκδώσει οδηγίες όπου ονομάζονται Data Collection Systems - DCS και Monitoring, Reporting and Verification - MRV αντίστοιχα. Οι οδηγίες αυτές αναφέρονται σε μια σειρά μετρήσεων, οι οποίες θα πρέπει να καταγράφονται και να αποστέλλονται με ευθύνη του πλοιοκτήτη στους παραπάνω οργανισμούς, έτσι ώστε να υποδεικνύουν ότι η λειτουργία των πλοίων εναρμονίζεται με τις οδηγίες τους. Οι οργανισμοί αυτοί αποθηκεύουν τα δεδομένα αυτά, έτσι ώστε μελλοντικά να αναλυθούν και να παρθούν οι κατάλληλες αποφάσεις σχετικά με την μείωση των εκπομπών. Τα συστήματα συλλογής δεδομένων είναι απαραίτητα για την παρακολούθηση και αξιολόγηση της ποιότητας του καυσίμου που καταναλώνουν τα πλοία κατά την διάρκεια του ταξιδιού.

Η μείωση του κόστους των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, η αύξηση των δυνατοτήτων τους και το όλο και μικρότερο μέγεθός τους, δίνει σήμερα τη δυνατότητα στους μηχανικούς ενσωματωμένων συστημάτων, μεγάλη ευελιξία στη σχεδίαση νέων προϊόντων. Τις δύο τελευταίες δεκαετίες η αύξηση των ηλεκτρονικών συσκευών για οικιακή, αλλά και βιομηχανική χρήση, οι οποίες έχουν ενσωματωμένο τουλάχιστον έναν επεξεργαστή, είναι ραγδαία. Η τεχνογνωσία των συστημάτων αυτών μεταφέρεται και στην ναυτιλία, καθώς υπάρχει όλο και μεγαλύτερη ανάγκη για αυτοματοποίησης.

Οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι αυτές που έχουν δώσει την δυνατότητα στις ναυτιλιακές εταιρίες να σχεδιάζουν ασφαλέστερα και με μικρότερο κόστος ταξίδια από ότι στο παρελθόν. Η μείωση λοιπόν του κόστους και η αύξηση της ταχύτητας των δορυφορικών επικοινωνιών έδωσαν το έναυσμα για την ανάπτυξη νέων καινοτόμων τεχνολογιών. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία αναπτύσσονται δεκαετίες τώρα για την βιομηχανία, εισάγονται πλέον και στο χώρο της ναυτιλίας.

Η ναυτιλία εισέρχεται στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση γνωστή ως Shipping Industry ή Cybershipping. Με την είσοδο της αυτή στην ψηφιακή εποχή ανακύπτουν και κάποιες προκλήσεις, στις οποίες θα πρέπει να δοθούν άμεσα λύσεις. Ένα βασικό θέμα που προκύπτει είναι η διαχείριση και η αποθήκευση του μεγάλου όγκου δεδομένων όπου θα συλλέγονται από μια πλειάδα αισθητήρων από κάθε ένα πλοίο. Επίσης, για την ανάλυση των δεδομένων απαιτείται η δημιουργία νέων τμημάτων με εξειδικευμένο προσωπικό. Ακόμη, η ποιότητα των δεδομένων είναι πολύ σημαντική καθώς μπορεί να ληφθούν εσφαλμένα δεδομένα. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε κατά την συλλογή των δεδομένων από έναν προβληματικό αισθητήρα ή κατά την διάρκεια της μεταφοράς και της αποθήκευσης των δεδομένων. Η χρήση αυτών των δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα κατά την ανάλυση τους. Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής για το έτος 2016 τα μη έγκυρα δεδομένα εκτιμάται ότι κόστισαν 3.1 τρισεκατομμύρια. Η ανάγκη λοιπόν για αξιόπιστα συστήματα συλλογής δεδομένων είναι πολύ μεγάλη.

2 Low Power Wide Area Network

2.1 Πεδίο εφαρμογών των LPWAN

Οι τεχνολογίες δικτύων χαμηλής κατανάλωσης ισχύος μεγάλης εμβέλειας (Low Power Wide Area - LPWA) έχουν ως στόχο, να καλύψουν εφαρμογές όπου οι παραδοσιακές τεχνολογίες μεγάλου εύρους ζώνης αποτυγχάνουν. Το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT) ανέδειξε νέες περιοχές εφαρμογών και ταυτόχρονα απαίτησε την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών με νέα χαρακτηριστικά. Το ένα τέταρτο από το σύνολο των 30 δισεκατομμυρίων συσκευών IoT αναμένεται να συνδεθούν στο διαδίκτυο μέσω LPWA δικτύων. Οι τεχνολογίες ασύρματων δικτύων οι οποίες αναπτύχθηκαν τις προηγούμενες δεκαετίες δεν εξυπηρετούν τις νέες ανάγκες των ασύρματων δικτύων αισθητήρων ειδικά για θέματα μαζικής ανάπτυξης και τις ανάγκες επικοινωνίας M2M μεταξύ κόμβων-αντικειμένων. Οι τεχνολογίες όπως οι Z-Wave, Bluetooth και Zig-Bee είναι μικρής εμβέλειας ενώ οι τεχνολογίες τοπικών ασύρματων δικτύων (Wireless Local Area Network-WLAN) όπως το Wi-Fi καταναλώνουν μεγάλη ισχύ και τα δίκτυα κυψέλης όπως το GSM έχουν αυξημένη πολυπλοκότητα ανάπτυξης και μεγάλο κόστος κατασκευής και συντήρησης ειδικά με αναφορά στο μοντέλο των SIM καρτών που χρησιμοποιήθηκε σε επίπεδο Business Model [10]. Στην εικόνα 3 [11] εμφανίζεται η θέση των LPWA τεχνολογιών σε σχέση με άλλες κατηγορίες δικτύων, όπου είναι ξεκάθαρο ότι οι τεχνολογίες LPWA στοχεύουν στην μεγάλης εμβέλειας ασύρματη κάλυψη.

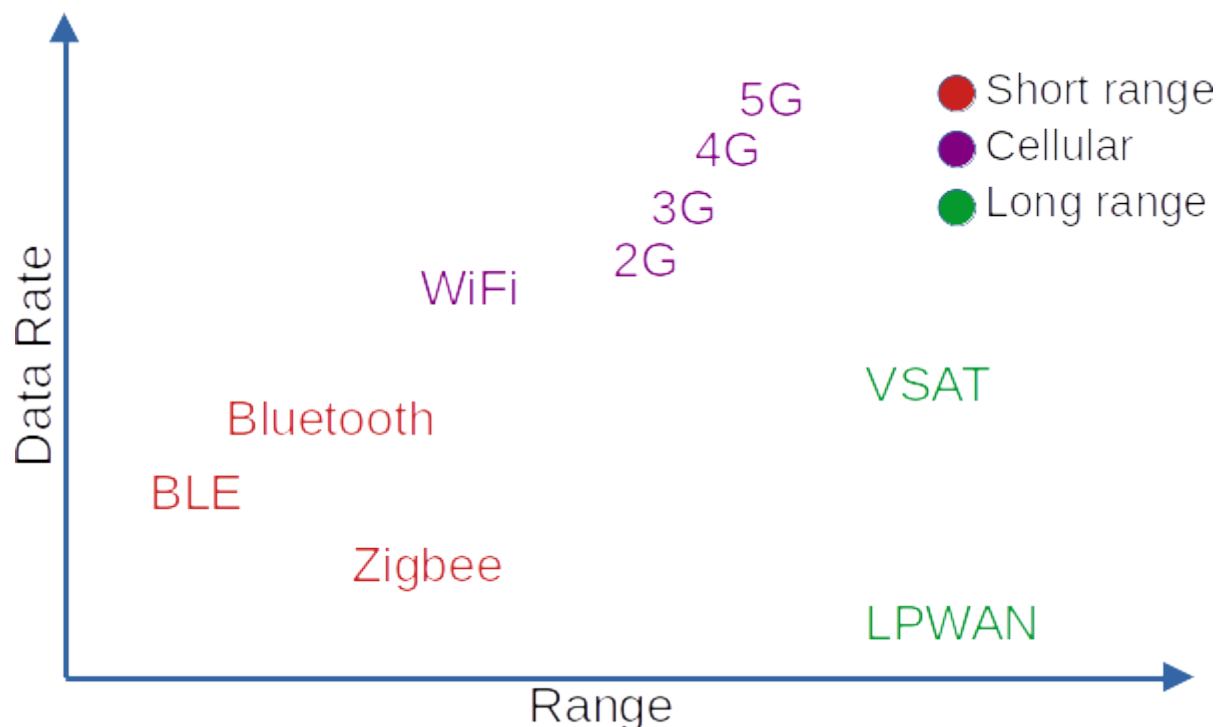


Figure 3: Data Rate vs Range

Με “κόστος” το μειωμένο ρυθμό αποστολής δεδομένων, της τάξεως των μερικών δεκάδων kbit, στόχος των LPWA δικτύων είναι η ασύρματη κάλυψη μεγάλης εμβέλειας, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος και σίγουρα το μικρό κόστος κατασκευής. Συνήθως, τα δίκτυα αυτά σχεδιάζονται για να καλύψουν εφαρμογές με μεγάλο πλήθος συσκευών, ενώ ο χρόνος απόκρισής τους είναι σχετικά μεγάλος. Αυτό τα καθιστά ακατάλληλα για βιομηχανικούς αυτοματισμούς όπου ο χρόνος απόκρισης πρέπει να είναι μικρότερος από 10 ms[10].

Παρόλα αυτά παραμένει ένας μεγάλο πλήθος εφαρμογών όπου τα δίκτυα αυτά αποτελούν την βέλτιστη λύση όπως:

- Smart Grid and Smart metering (Έξυπνο δίκτυο και έξυπνοι μετρητές)
- Home Automation and safety (Οικιακός αυτοματισμός και ασφάλεια)
- Alarm sensors (Αισθητήρες συναγερμού)
- Low bandwidth sensing and actuation (Αισθητήρες και ενεργοποιητές χαμηλού εύρου ζώνης)
- Agriculture (Γεωργία)
- Smart City (Έξυπνη πόλη)
- Logistics (Εφοδιαστική)
- Industrial Assets Monitoring (Παρακολούθηση βιομηχανικού εξοπλισμού)
- Personal IoT Applications (Προσωπικές εφαρμογές)

2.2 Σχεδιασμός LPWAN

2.2.1 Βασικές παράμετροι σχεδιασμού

Η σχεδίαση των LPWA δικτύων βασίζεται σε τρία κύρια χαρακτηριστικά, τα οποία είναι το κόστος ανάπτυξης και κατασκευής, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η μεγάλη έκταση ασύρματης κάλυψης. Απαιτείται ο ακριβής και προσεκτικός καθορισμός διαφόρων παραμέτρων καθώς αυτές αλλάζουν σημαντικά με την εκάστοτε εφαρμογή, όπως περιγράφονται παρακάτω.

Το πλήθος των συσκευών, η **επεκτασιμότητα** του δικτύου, η δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας και ο ρυθμός αποστολής των δεδομένων καθορίζουν την χωρητικότητα του καναλιού της ασύρματης επικοινωνίας.

Τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του πεδίου εφαρμογής του δικτύου καθορίζουν την **εμβέλεια κάλυψης**. Δηλαδή, αν το δίκτυο βρίσκεται εφαρμογή σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο, σε πυκνοκατοικημένες ή αγροτικές περιοχές, ακόμη και κάτω από το έδαφος ή το νερό. Με τις έως τώρα διαθέσιμες LPWA τεχνολογίες η μέγιστη ακτίνα κάλυψης δεν ξεπερνά τις μερικές δεκάδες χιλιόμετρα.

Η βελτιστοποίηση της απόδοσης ως προς την **κατανάλωση ενέργειας** είναι μια ακόμη παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν. Το κριτήριο εδώ είναι ο χρόνος ζωής της μπαταρίας. Για παράδειγμα εφαρμογές στις οποίες η πρόσβαση στις συσκευές είναι περιορισμένη ίσως και αδύνατη μετά την εγκατάσταση. Επίσης, η συχνότητα αποστολής των πακέτων είναι ακόμη ένας σημαντικός παράγοντας.

Αν και οι τεχνολογίες LPWA χρησιμοποιούν μικρό εύρος ζώνης και δεν στοχεύουν σε εφαρμογές όπου ο χρόνος απόκρισης δεν είναι κρίσιμος, η καθυστέρηση παραλαβής του σήματος (**Latency**) από τον δέκτη πρέπει να συνεκτιμάται κατά τον σχεδιασμό.

Το **κόστος** κατασκευής ανά μονάδα συσκευής και λειτουργίας του δικτύου καθώς και η σχέση του κόστους συναρτήσει του μεγέθους του, συνυπολογίζονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται συνολικά χαμηλό κόστος για την ανάπτυξή του.

Επίσης, **ειδικά χαρακτηριστικά** όπως είναι η απαίτηση για επεξεργαστική ισχύ, η συνδεσιμότητα σε επίπεδο διεπαφής και η καταλληλότητα για ειδικά περιβάλλοντα (π.χ. συνθήκες εξωτερικού χώρου, αντιακρηκτικά περιβάλλοντα) πρέπει να προσμετρούνται[12].

2.2.2 Τεχνικές και μέθοδοι υλοποίησης

Για την επίτευξη της **μεγάλης εμβέλειας** ασύρματης κάλυψης οι περισσότερες τεχνολογίες χρησιμοποιούν χαμηλότερες συχνότητες εκπομπής σήματος. Στις μικρότερες συχνότητες η μείωση της ισχύς από τα διάφορα εμπόδια είναι μικρότερη σε σχέση με άλλες τεχνολογίες (π.χ. Wi Fi, LTE, GSM) οι οποίες λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες. Οι τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται έχουν ως στόχο την επίτευξη link budget περίπου 150dB και ευαισθησία στον δέκτη -130dBm. Δύο είναι οι βασικές κατηγορίες διαμόρφωσης που επιτυγχάνουν τα παραπάνω κριτήρια, οι τεχνικές στενού εύρους ζώνης (Narrowband) και διάχυσης φάσματος (Spread Spectrum)[10]. Η απεικόνιση αυτών των δύο τεχνικών φαίνεται στην εικόνα 4.

Η τεχνική διαμόρφωσης **Narrowband** συνήθως διατηρεί ένα εύρος ζώνης (Band Width) πολύ χαμηλό μικρότερο από 25KHz. Λόγω του μικρού και στενού εύρους ζώνης, δίνεται μια φυσική ανοσία στο δίκτυο κατά του θορύβου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μικρή πολυπλοκότητα του πομποδέκτη (transceiver) και την μείωση της επεξεργαστικής ισχύος για την κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση του σήματος. Μάλιστα, κάποιες τεχνολογίες λειτουργούν με πολύ στενό εύρος ζώνης της τάξεως των λίγων εκατοντάδων Hz, αλλά αυτό βέβαια έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη μείωση του ρυθμού αποστολής των δεδομένων (Data Rate)[10].

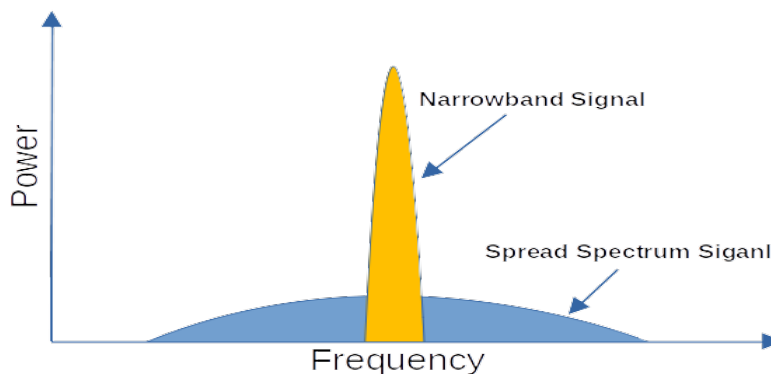


Figure 4: Narrowband vs Spread Spectrum Modulation.

Οι τεχνικές **διάχυτου φάσματος** (Spread Spectrum) αναπτύχθηκαν αρχικά για στρατιωτικές εφαρμογές, καθώς παρουσιάζουν ένα ισχυρό πλεονέκτημα ασφάλειας έναντι των υποκλοπών. Ένα σύστημα επικοινωνίας διάχυτου φάσματος, χρησιμοποιεί γεννήτριες που παράγουν ψευδοτυχαίες ακολουθίες από ψηφία (bit) στον εκπομπό και στον δέκτη για την διάχυση και αποδιάχυση του σήματος πληροφορίας αντίστοιχα. Για την σωστή αποδιαμόρφωση, απαιτείται ο συγχρονισμός της ψευδοτυχαίας ακολουθίας μεταξύ πομπού και δέκτη. Συνήθως, αυτό επιτυγχάνεται με την αποστολή συγκεκριμένης αλληλουχίας ψηφίων πριν την αποστολή του σήματος πληροφορίας[13].

Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές διάχυσης φάσματος είναι η **άμεσης ακολουθίας** (Direct Sequence - DS) και **μεταπήδησης συχνότητας** (Frequency Hopped). Η πρώτη τεχνική διαμορφώνει το σήμα πληροφορίας μεταβάλλοντας την φάση και χρησιμοποιώντας την τεχνική διαμόρφωσης ολίσθησης φάσης (Phase Shift Keying - PSK). Η δεύτερη τεχνική μεταβάλλει ψευδοτυχαία την συχνότητα του φέροντος σήματος και χρησιμοποιεί την τεχνική διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Shift Keying – FSK) [13].

Από το μέγεθος του ασύρματου δικτύου και ειδικότερα από το πλήθος των συνδεδεμένων συσκευών και την ακτίνα κάλυψης μπορεί κανείς να σχεδιάσει την αρχιτεκτονική του δικτύου. Οι πιο διαδεδομένες τοπολογίες ασύρματων δικτύων είναι η τοπολογία πλέγματος (Mesh Topology) και η τοπολογία αστέρα (Star Topology). Η απεικόνιση αυτών των δύο τοπολογιών φαίνεται στην εικόνα 5.

Στην **τοπολογία πλέγματος**, τα πακέτα πληροφορίας μπορούν να μεταδοθούν από συσκευή σε συσκευή μέχρι να φτάσουν στον τελικό δέκτη. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα της εύκολης επέκτασης του δικτύου. Επίσης, δίνει την δυνατότητα της κάλυψης περιοχών του δικτύου όπου μεσολαβούν εμπόδια μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτό επιτυγχάνεται προσθέτοντας σε κάποιες ή και όλες τις συσκευές του δικτύου την λειτουργία του αναμεταδότη (Router). Παρόλα αυτά η συνεχής λειτουργία κάποιων συσκευών οι οποίες επιβαρύνονται σημαντικά με το έργο της αναμετάδοσης μπορεί να μειώσει σημαντικά το χρόνο ζωής της μπαταρίας και κατεπέκταση να αυξήσει το κόστος συντήρησης του.

Στην **τοπολογία αστέρα**, όλες οι συσκευές συνδέονται απευθείας στον τελικό αποδέκτη του πακέτου πληροφορίας. Συγκρινόμενη, με την τοπολογία πλέγματος η τοπολογία αστέρα έχει μικρότερη πολυπλοκότητα και μικρότερο κόστος ανάπτυξης. Επίσης, είναι δυνατός ο υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας με μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτό συμβαίνει διότι είναι γνωστό το πόσα πακέτα θα στείλει μια συσκευή σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, ενώ η τυχαία αναδρομολόγηση των πακέτων στην τοπολογία πλέγματος προσθέτει ένα ακόμη παράγοντα αβεβαιότητας.

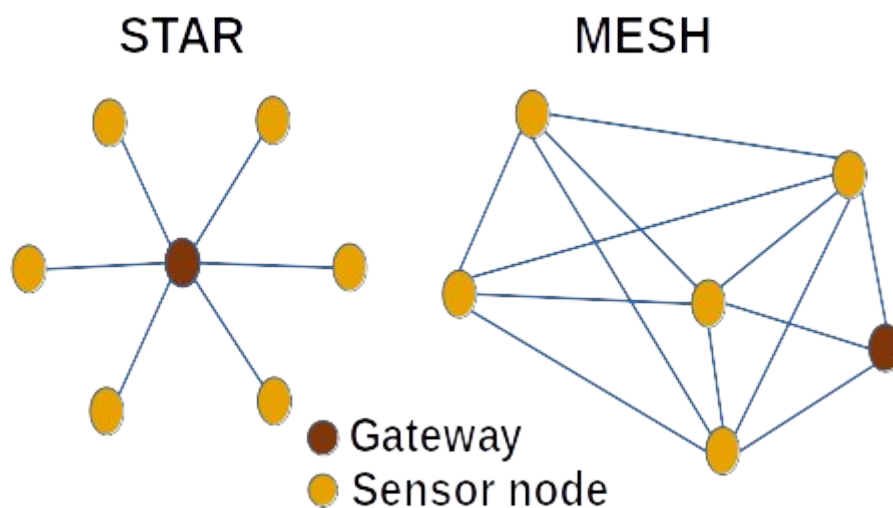


Figure 5: Star and Mesh topology.

Όπως σε όλα τα ενσωματωμένα συστήματα χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, έτσι και για την ανάπτυξη ασύρματων συσκευών χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, σημαντική παράμετρος είναι ο **κύκλος λειτουργίας (Duty Cycle)**. Τρεις είναι οι καταστάσεις λειτουργίας όπου οι μικροεπεξεργαστές καταναλώνουν ενέργεια. Η ενεργή κατάσταση (active mode), όπου η κεντρική μονάδα επεξεργασίας(CPU) είναι σε λειτουργία και επεξεργάζεται δεδομένα. Η κατάσταση αναμονής (standby mode or sleep mode), όπου η κεντρική μονάδα επεξεργασίας είναι σε αδράνεια όπως και κάποια ή όλα τα περιφερειακά. Η κατάσταση αφύπνισης (wakeur mode) είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των δύο προηγούμενων καταστάσεων. Το συνολικό άθροισμα των τριών ισχύων που καταναλώνονται σε κάθε μία από αυτές τις καταστάσεις μας δίνει την συνολική ισχύ που καταναλώνεται σε κάθε κύκλο επεξεργασίας.

Στην συνολική αυτή ισχύ, πρέπει να προστίθεται και η ισχύς που καταναλώνει ο πομποδέκτης, η οποία είναι πολλαπλάσια από αυτή που καταναλώνει ένας μικροεπεξεργαστής χαμηλής ισχύος. Την περισσότερη ισχύ ο πομποδέκτης την καταναλώνει κατά την διάρκεια της εκπομπής και πολύ λιγότερη κατά την διάρκεια της λήψης. Επίσης, ο κύκλος λειτουργίας χρησιμοποιείται για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του δικτύου και η χρήση του μόνο από κάποιους χρήστες. Έτσι, επιβάλλονται κάποια όρια στους χρήστες από τους διαχειριστές των δικτύων για την ισοκατανομή της χωρητικότητας του καναλιού.

Την τελευταία δεκαετία έχουν προταθεί πολλά πρωτόκολλα τα οποία αφορούν τον έλεγχο προσπέλασης μέσου (Medium Acces Control – MAC) για ασύρματα δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης, αλλά κανένα από αυτά δεν έχει καταφέρει να υπερισχύσει. Αυτό συμβαίνει γιατί το καθένα από αυτά έχει σχεδιαστεί και βελτιστοποιηθεί με βάση μια μικρή ομάδα εφαρμογών. Οι διάφορες ομάδες εφαρμογών έχουν μεγάλες διαφορές στα χαρακτηριστικά τους, όπως είναι τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και η διαθέσιμη πηγή ενέργειας, αλλά και σε φυσικό επίπεδο, η διεπαφή μεταξύ ασύρματης συσκευής και αισθητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για κάποια εφαρμογή δύσκολα να μπορεί να εφαρμοστεί και σε κάποια άλλη. Τα πρωτόκολλα αυτού του επιπέδου τείνουν να είναι όσο το δυνατόν απλούστερα για τους ασύρματους κόμβους (End Devices). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση της

καταναλισκόμενη ισχύος, αφήνοντας για τον coordinator τις πιο σύνθετες διεργασίες και τον συντονισμό του δικτύου. Πολύ διαδεδομένα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων όπως είναι το LoRaWAN και το SigFox βασίζονται στο πρωτόκολλο ALOHA. Η απλότητα αυτού του πρωτοκόλλου έχει ως αποτέλεσμα η πολυπλοκότητα στην σχεδίαση και κατασκευή του δέκτη να μένει μικρή.

Το gateway επωμίζοντας την εκτέλεση των πιο σύνθετων εργασιών, έχει και μεγαλύτερο **κόστος** κατασκευής. Παρόλα αυτά, το πλήθος των συσκευών που συνδέονται σε αυτό είναι από μερικές εκατοντάδες έως και χιλιάδες συσκευές. Επίσης, η λειτουργία του δικτύου σε ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων μειώνει δραματικά το κόστος λειτουργίας. Όμως η δραματική αύξηση των συσκευών σε ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί μελλοντικά να υποβαθμίσει την λειτουργία του.

Ένας πομποδέκτης για εφαρμογές LPWAN, πληρεί όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά ενός ενσωματωμένου συστήματος χαμηλής κατανάλωσης. Η σχεδίαση του απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση, όπου όλα τα μέρη από τα οποία αποτελείται πρέπει να υποστηρίζουν βασικές παραμέτρους όπως, την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και το χαμηλό κόστος κατασκευής. Ακόμα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως η ευκολία διασύνδεσης και η εγκατάσταση του, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος στο οποίο θα τοποθετηθεί. Στο σχήμα 6 εμφανίζονται τα μέρη ενός ασύρματου κόμβου μετρήσεων[14].

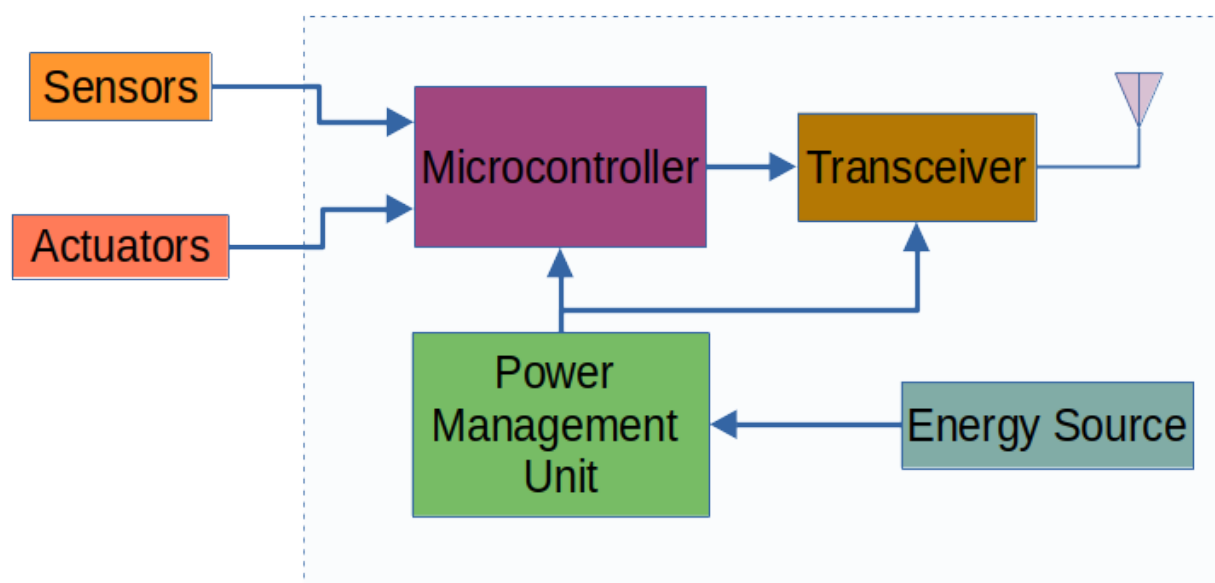


Figure 6: LPWAN Node Architecture.

2.2.3 Σύγκριση LPWA τεχνολογιών

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω παραμέτρους ο σχεδιαστής ενός LPWA δικτύου έχει να επιλέξει ανάμεσα σε διάφορες τεχνολογίες, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί την τελευταία δεκαετία.

Η τεχνολογία **SIGFOX** την οποία έχει αναπτύξει η ομώνυμη εταιρεία, χρησιμοποιεί ένα πολύ στενό εύρος ζώνης (Ultra Narrow Band) συχνοτήτων για την μετάδοση των πακέτων. Το στενό εύρος ζώνης παρέχει μεγάλη ανοσία από τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, μεγάλη ευαισθησία στον δέκτη και πολύ μικρό κόστος κατασκευής στον ασύρματο κόμβο. Το κόστος του κόμβου μπορεί να είναι μικρότερο από 2 ευρώ, ενώ ο σταθμός βάσης (base station) μπορεί να φτάσει τα 4000 ευρώ. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί την ελεύθερη ζώνη συχνοτήτων (Industrial, Scientific and Medical – ISM), όπου δεν χρειάζεται αδειοδότηση για την εκπομπή σημάτων και η διαμόρφωση του μεταδιδόμενου σήματος είναι δυαδική διαμόρφωση ολίσθησης φάσης (Binary Phase Shift Keying – BPSK). Επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα είναι η πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας. Ο βασικός περιορισμός ενός ασύρματου δικτύου SIGFOX είναι ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που δεν ξεπερνά τα 100 bps και ο περιορισμός των πακέτων αποστολής από έναν πομπό που μπορεί να φτάσει έως και τα 140 πακέτα των 12 byte[11].

Η τεχνολογία **NB-IoT** έχει αναπτυχθεί από το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) οι οποία ενσωματώνεται στις τεχνολογίες κυψέλης (cellular) LTE και GSM. Δίνεται η δυνατότητα σύνδεσης περισσότερων από εκατό χιλιάδων συσκευών σε κάθε κυψέλη, όπου το κόστος κάθε συσκευής που συνδέεται στο δίκτυο είναι περίπου 20 ευρώ, ενώ το κόστος εγκατάσταση ενός σταθμού (base station) φτάνει τις 15000 ευρώ. Επίσης, υπάρχει ένα επιπλέον κόστος για την αγορά άδειας χρήσης μιας ζώνης συχνοτήτων, όπου ανέρχεται στις μερικές εκατοντάδες εκατομμυρίων ευρώ για ένα εύρος συχνοτήτων της τάξης του 1 MHz. Για την μετάδοση της πληροφορίας χρησιμοποιείται μια στενή ζώνη συχνοτήτων (Narrowband) 200KHz ως μια θυρίδα ενός δικτύου LTE ή GSM. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιεί είναι Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) και Frequency Division Multiple Access (FDMA), για την αποστολή σημάτων προς τον σταθμό βάσης με μέγιστο ρυθμό αποστολής 200kbps. Ενώ για την λήψη μηνυμάτων γίνεται χρήση της ορθογώνιας FDMA διαμόρφωσης (OFDMA) με μέγιστο ρυθμό αποστολής 20kbps. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μπορεί να φτάσει τα δέκα έτη αποστέλλοντας ημερησίως ένα μέσο όρο 200 μηνυμάτων[11].

Η εταιρεία Semtech ανέπτυξε πομποδέκτες οι οποίοι λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων ISM και χρησιμοποιεί διάχυση φάσματος για την μετάδοση της πληροφορίας. Συγκεκριμένα, κάνει χρήση της διαμόρφωσης Chirp Spread Spectrum - CSS που είχε αναπτυχθεί ήδη από το 1940 για στρατιωτικές εφαρμογές. Με αυτή την διαμόρφωση, επιτυγχάνεται ένα υψηλό ποσοστό ανοχής στον θόρυβο και επιπρόσθετη ασφάλεια έναντι κακόβουλων επιθέσεων σε φυσικό επίπεδο. Το κόστος κατασκευής των ασύρματων κόμβων δεν ξεπερνά τα 5 ευρώ, ενώ για κάθε gateway που εγκαθίσταται τα 100 ευρώ. Η τεχνολογία αυτή ονομάστηκε LoRa και υιοθετήθηκε από την LoRa Alliance. Η LoRa Alliance είναι μια συνεργασία εταιρειών, που ως στόχο έχουν την ανάπτυξη LPWA δικτύων μεγάλης κλίμακας που βασίζονται στο πρωτόκολλο

επικοινωνίας LoRaWAN. Στον πίνακα 1 εμφανίζονται τα διάφορα χαρακτηριστικά των τριών πιο διαδεδομένων πρωτοκόλλων[11].

Table 1: Σύγκριση LPWAN πρωτοκόλλων.

	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT
Modulation	CSS	BPSK	QPSK
Frequency	SUB GHz ISM bands	UB GHz ISM bands	LTE frequency bands
Bandwidth	250 and 125 kHz	100Hz	200 kHz
Maximum Data Rate	50 kbps	100 bps	200 kbps
Maximum payload	243 bytes	12 bytes (uplink), 4 bytes (downlink)	1600 bytes
Range	5 km (urban), 20 km (rural)	10 km (urban), 40 km (rural)	1 km (urban), 10 km (rural)
Encryption	AES 128b	Not supported	LTE encryption
Allow private network	Yes	No	No

3 Η τεχνολογία LoRa και το δίκτυο LoRaWAN

Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύεται ο τρόπος μετάδοσης της πληροφορίας σε ένα δίκτυο LoRaWAN και τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LoRa.

3.1 LoRa physical layer

Όπως αναφέρεται και στην ενότητα 2.2.3, η διαμόρφωση του σήματος πληροφορίας της τεχνολογίας LoRa, βασίζεται στην τεχνική διάχυσης φάσματος. Συγκεκριμένα, η τεχνική αυτή ονομάζεται Chirp Spread Spectrum (CSS) και έχει ιδιότητες τέτοιες που τις δίνουν μεγάλη ανοχή στον θόρυβο, καταναλώνοντας ταυτόχρονα μικρή ισχύ για την εκπομπή της πληροφορίας σε μεγάλες αποστάσεις.

3.1.1 Συστήματα Διάχυσης Φάσματος

Δύο είναι τα βασικά χαρακτηριστικά για την μετάδοση της πληροφορίας μέσω ενός καναλιού προσθετικού λευκού Γκαουσιανού θορύβου, τα οποία είναι δυνατόν να μεταβληθούν έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτά είναι το εύρος ζώνης του καναλιού και η ισχύς εκπομπής.

Η κωδικοποίηση της μεταδιδόμενης πληροφορίας μέσω ενός ενθόρυβου καναλιού, μειώνει την πιθανότητα σφάλματος στον δέκτη, δίνοντας την δυνατότητα μείωσης της εκπεμπόμενης ισχύος από τον πομπό. Το τίμημα για την αύξηση της αξιοπιστίας (reliability), δηλαδή της επικοινωνίας χωρίς σφάλματα, είναι η αύξηση του εύρους ζώνης, καθώς για την κωδικοποίηση χρησιμοποιούνται επιπρόσθετα ψηφία πληροφορίας. Κατά παρόμοιο τρόπο οι τεχνικές διαμόρφωσης διάχυσης φάσματος προσθέτουν ψευδοτυχαίες ακολουθίες ψηφίων, με αποτέλεσμα την αύξηση της ευαισθησίας στον δέκτη, την μείωση της πιθανότητας σφάλματος και της εκπεμπόμενης ισχύος, αλλά και την αύξηση του εύρους ζώνης. Στο σχήμα 7 [13] απεικονίζεται ένα τυπικό διάγραμμα ενός συστήματος διάχυσης φάσματος.

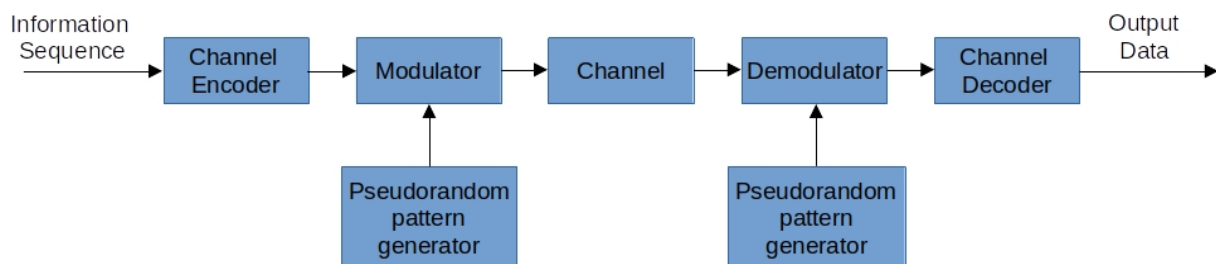


Figure 7: Model of spread spectrum digital communication channel.

Η ψευδοτυχαία ακολουθία που παράγεται από την γεννήτρια συνδυάζεται με το διαμορφωμένο κατά φάση σήμα, το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι ένα σήμα το οποίο ονομάζεται σήμα άμεσης ακολουθίας διάχυτου φάσματος (Direct Sequence Spread Spectrum Signal – DSSS). Το παραγόμενο αυτό σήμα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο

του ρυθμού του αρχικού διαμορφωμένου σήματος. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται και chip sequence, καθώς ο κάθε παλμός της ψευδοτυχαίας ακολουθίας ονομάζεται chip και η χρονική διάρκεια του T_c , διάρκεια chip. Στην εικόνα 8a, απεικονίζεται το σήμα εισόδου στον διαμορφωτή, το οποίο πολλαπλασιάζεται με το ψευδοτυχαίο σήμα 8b και ως αποτέλεσμα έχει την ακολουθία της εικόνας 8c. Το μέγεθος της διάχυσης του σήματος εξαρτάται από το πλήθος των chips ανα ψηφίο πληροφορίας. Το αντίστροφο της χρονικής διάρκειας ενός chip (T_{chip}), ονομάζεται ρυθμός chip και συμβολίζεται με R_C και προσεγγιστικά αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης του σήματος. Ο λόγος μεταξύ του ρυθμού R_C και R_b , συχνά συναντάται σε λογαριθμική μορφή και ονομάζεται διαδικασία ενίσχυσης (processing gain – G_p).

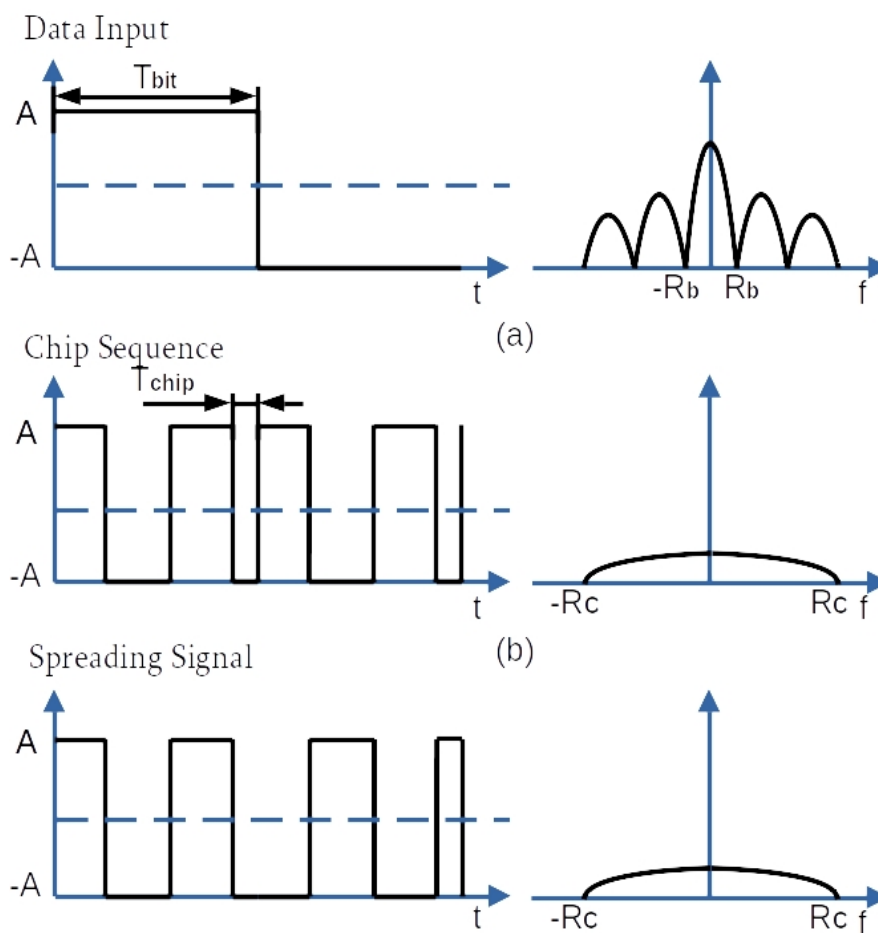


Figure 8: Data input spreading process.

$$G_p = 10 \log_{10} \left(\frac{R_C}{R_b} \right) \quad (1)$$

Όπου:

$$R_C = 1/T_{\text{chip}} \text{ και } R_b = 1/T_{\text{bit}}$$

Η χωρητικότητα ενός ψηφιακού καναλιού AWGN σύμφωνα με τον Shannon εκφράζεται από την σχέση:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2)$$

Όπου:

C = η χωρητικότητα του καναλιού σε bit/s

B = το εύρος ζώνης σε Hz

S = η μέση τιμή της λαμβανόμενης ισχύος

N = η μέση τιμή της ισχύος σε του θορύβου

S/N = ο λόγος μεταξύ της λαμβανόμενης ισχύος και του θορύβου είναι γνωστός ως SNR (Signal to Noise Ratio)

Αλλάζοντας την βάση του λογαρίθμου στην εξίσωση 2 σε φυσικό λογάριθμο η σχέση παίρνει τη μορφή:

$$C = B \frac{\ln \left(1 + \frac{S}{N} \right)}{\ln 2} = C = 1.44 B \ln \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3)$$

Για εφαρμογές όπου το SNR είναι πολύ μικρότερο από την μονάδα η εξίσωση 3 μπορεί να γραφεί:

$$C = 1.44 B \frac{S}{N} \quad (4)$$

Από την εξίσωση 3, άμεσα μπορεί να συμπεράνει κανείς, ότι για ένα δεδομένο κανάλι για το οποίο είναι γνωστός ο λόγος του σήματος ως προς τον θόρυβο, για να αυξηθεί η χωρητικότητα στο κανάλι επικοινωνίας, πρέπει να αυξηθεί και το εύρος ζώνης B.

Η τεχνολογία LoRa χρησιμοποιεί μια τεχνική διαμόρφωσης διάχυσης φάσματος, για να επιτύχει για μια σχετικά μικρή χωρητικότητα καναλιού, μεγάλη ανοσία ως προς το θόρυβο[15].

3.1.2 Διαμόρφωση LoRa

Η διαμόρφωση της τεχνολογίας LoRa ονομάζεται Chirp Spread Spectrum. Είναι M – αδική ψηφιακή διαμόρφωση, όπου κάθε M κυματομορφή την οποία παράγει ο διαμορφωτής, είναι ένα σήμα το οποίο ονομάζεται chirp. Είναι μια διαμόρφωση συνεχούς φάσης (Continuous Phase) χωρίς μνήμη, διότι η εκπομπή ενός συμβόλου δεν εξαρτάται από τα σύμβολα που έχουν προηγηθεί, ούτε από τα επόμενα [16].

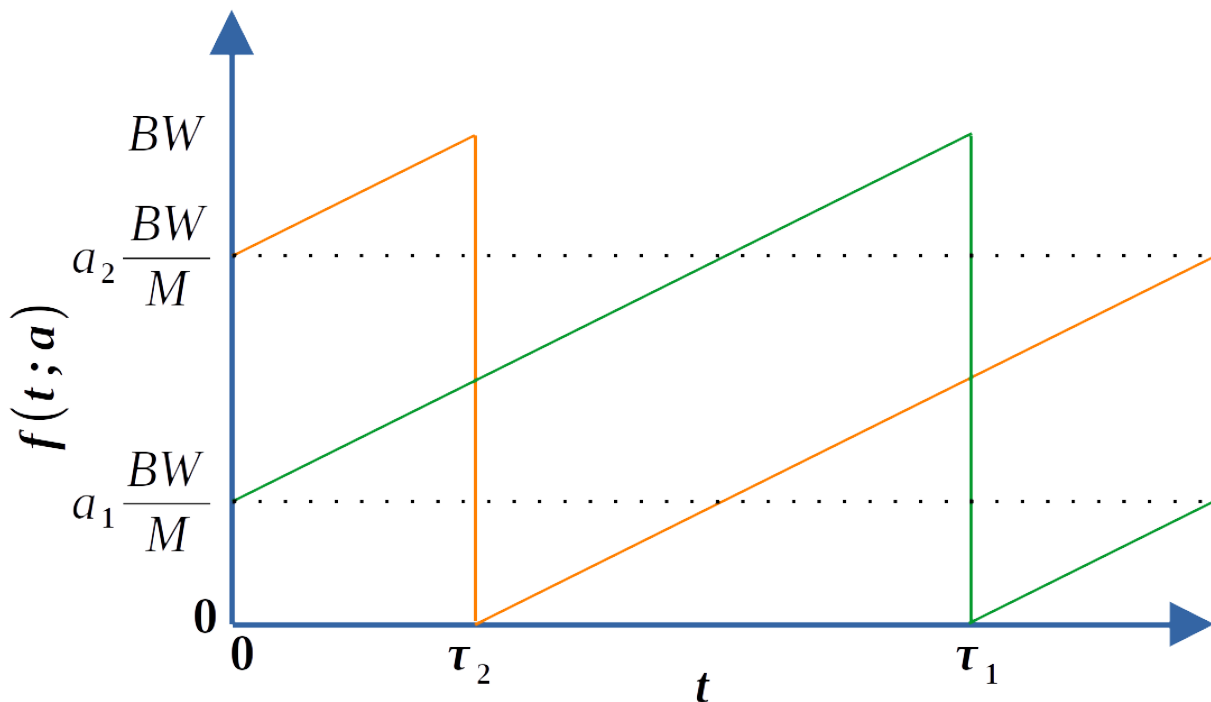


Figure 9: Δύο διαφορετικά σύμβολα α_1 (πράσινο) και α_2 (πορτοκαλί), όπως μεταβάλλονται κατά την διάρκεια του χρόνου.

Το σήμα αυτό μεταβάλλεται ως προς την συχνότητα κατά την διάρκεια του χρόνου από $f_0 - BW/2$ έως $f_0 + BW/2$ για κάθε διαφορετικό σύμβολο M, όπου **BW** **συμβολίζεται το εύρος ζώνης**. Η μεταβολή της συχνότητας είναι γραμμική και αυξάνεται έως ότου πάρει την μέγιστη τιμή $f_0 + B/2$, όπου και “αναπηδά” στην τιμή $f_0 - BW/2$. Στο σχήμα ένα απεικονίζονται δύο διαφορετικά σύμβολα α_1 (πράσινο) και α_2 (πορτοκαλί), όπως μεταβάλλονται κατά την διάρκεια του χρόνου. Τα δύο αυτά σήματα έχουν το ίδιο συντελεστή διάχυσης SF. Αυτή η διαδικασία μαθηματικά μπορεί να περιγραφεί ως αριθμητική υπολοίπων (modulo B).

Το πλήθος των συμβόλων εξαρτάται από έναν ακέραιο αριθμό ο οποίος ονομάζεται παράγοντας διάχυσης (**Spreading Factor – SF**). σε ένα δίκτυο LoRa, ο παράγοντας διάχυσης SF, είναι μια από τις βασικές παραμέτρους οι οποία μπορεί να μεταβληθεί ανάλογο με τις συνθήκες θορύβου στο κανάλι εκπομπής, έτσι ώστε να αυξήσει την αξιοπιστία κατά την μετάδοση.

Ο ρυθμός μετάδοσης R_b , εξαρτάται από τις δύο παραπάνω παραμέτρους και από την χρονική **διάρκεια του συμβόλου, T_s** :

$$R_b = \frac{1}{T_s} \log_2 M = \frac{SF}{T_s} = BW \frac{SF}{2^{SF}} \quad (5)$$

Η φασματική απόδοση της διαμόρφωσης δίνεται από το αντίστροφο του λόγου μεταξύ του ρυθμού R_c και του ρυθμού R_b από την εξίσωση 6:

$$\text{Φασματική απόδοση} = \frac{R_b}{R_c} = \frac{R_b}{BW} = \frac{SF}{2^{SF}} \quad \text{bit/s/Hz} \quad (6)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορεί να δοθεί η μεταβολή της συχνότητας του σήματος στο πεδίο του χρόνου από την σχέση:

$$f(t, a) = a \frac{BW}{M} + \frac{BW}{T_s} t = a \frac{BW}{T_s} t - BW u(t - \tau_a) \quad 0 \leq t < T_s, \quad [0, BW] \quad a \in 0, 1, \dots \quad (7)$$

Όπου: aB/M = η αρχική συχνότητα η οποία εξαρτάται από το εκάστοτε σύμβολο.

τ_a = χρονική σταθερά η οποία περιγράφει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η συχνότητα αρχίζει να μεταβάλλεται γραμμικά έως το σημείο όπου παίρνει την μέγιστη τιμή της.

$$\tau_a = T_s \left(1 - \frac{a}{M}\right) \quad (8)$$

Για την βέλτιστη διαχείριση και την μείωση τις κατανάλωσης ενέργειας, ανάλογα με το περιβάλλον του δικτύου, ένας πομποδέκτης LoRa μπορεί να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά της εκπομπής σύμφωνα με τις παρακάτω παραμέτρους.

Οι δύο παράμετροι, ο συντελεστής διάχυσης-SF και το εύρος ζώνης-BW, έχουν αναλυθεί στις προηγούμενες παραγράφους. Σε αυτό το σημείο θα αναφερθεί ότι, οι τιμές που μπορεί να πάρει η παράμετρος SF είναι από 6 έως 12. Σε κάθε περίπτωση, η αύξηση του SF αυξάνει την απόστασή εκπομπής, όμως ταυτόχρονα, αυξάνει και τον χρόνο μετάδοσης του σήματος από τον πομπό προς τον δέκτη (Time on Air – ToA), Στον πίνακα 2 καταγράφονται οι τιμές ευαισθησίας στον δέκτη και της διάρκειας αποστολής για διαφορετικές τιμές του συντελεστή διάχυσης SF [17]. Οι τιμές αυτές αναφέρονται στους πομποδέκτες SX1272/3/6/7/8 της εταιρίας Semtech. Η αύξηση του αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού των πακέτων αποστολής. Για κάθε αύξηση του SF κατα μια μονάδα, ο χρόνος αποστολής διπλασιάζεται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας στον πομπό.

Table 2: Μεταβολή της διάρκειας εκπομπής και της ευαισθησίας στον δέκτη για διαφορετικές τιμές του συντελεστή διάχυσης SF. CR =2, BW =250KHz

SF	Time on air [ms]	Sensitivity[dBm]
12	528.4	-134
10	132.1	-129
8	39.2	-124

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές επιλογές για το εύρος ζώνης-BW 125KHz, 250KHz και 500KHz. Η αύξηση του εύρους ζώνης δίνει την δυνατότητα μεγαλύτερου ρυθμού αποστολής, όμως εμπεριέχει περισσότερο θόρυβο με αποτέλεσμα την μείωση της ευαισθησίας (sensitivity) στον δέκτη. Στον πίνακα 3 καταγράφονται οι τιμές ευαισθησίας στον δέκτη και της διάρκειας αποστολής για τις τρεις διαφορετικές τιμές του εύρους ζώνης BW. Οι τιμές αυτές αναφέρονται στους πομποδέκτες SX1272/3/6/7/8 της εταιρίας Semtech[17].

Table 3: Μεταβολή της διάρκειας εκπομπής και της ευαισθησίας στον δέκτη για διαφορετικές τιμές του συντελεστή διάχυσης SF. CR =2, BW =250KH

SF	Time on air [ms]	Sensitivity[dBm]
12	528.4	-134
10	132.1	-129
8	39.2	-124

Για την μείωση του σφάλματος λόγο θορύβου, χρησιμοποιείται μια μέθοδος διόρθωσης σφαλμάτων η οποία βασίζεται σε τεχνικές Forword Error Correction – FEC. Στο πακέτο αποστολής προστίθενται bits πληροφορίας τα οποία δίνουν την δυνατότητα στον δέκτη, να διόρθωση ένα ποσοστό των εσφαλμένων bits. Υπάρχουν 4 διαφορετικές τιμές οι οποίες καθορίζουν το βαθμό διόρθωσης που μπορεί να επιτευχθεί, οι τιμές αυτές αναφέρονται ως Codind Rate – CR. Στο διάγραμμα 1 απεικονίζονται 4 διαφορετικές καμπύλες, οι οποίες δίνουν την μεταβολή της ευαισθησίας στον δέκτη για τις 4 διαφορετικές τιμές CR = 4/5, 4/6, 4/7 και 4/8, για σταθερές τιμές SF = 7, BW = 125KHz και αριθμό αποστολής byte 13. Βέβαια, και σε αυτή την περίπτωση αυξάνοντας τα bit πληροφορίας, αυξάνεται η διάρκεια εκπομπής[18].

Sensitivity as a Function of Code Rate

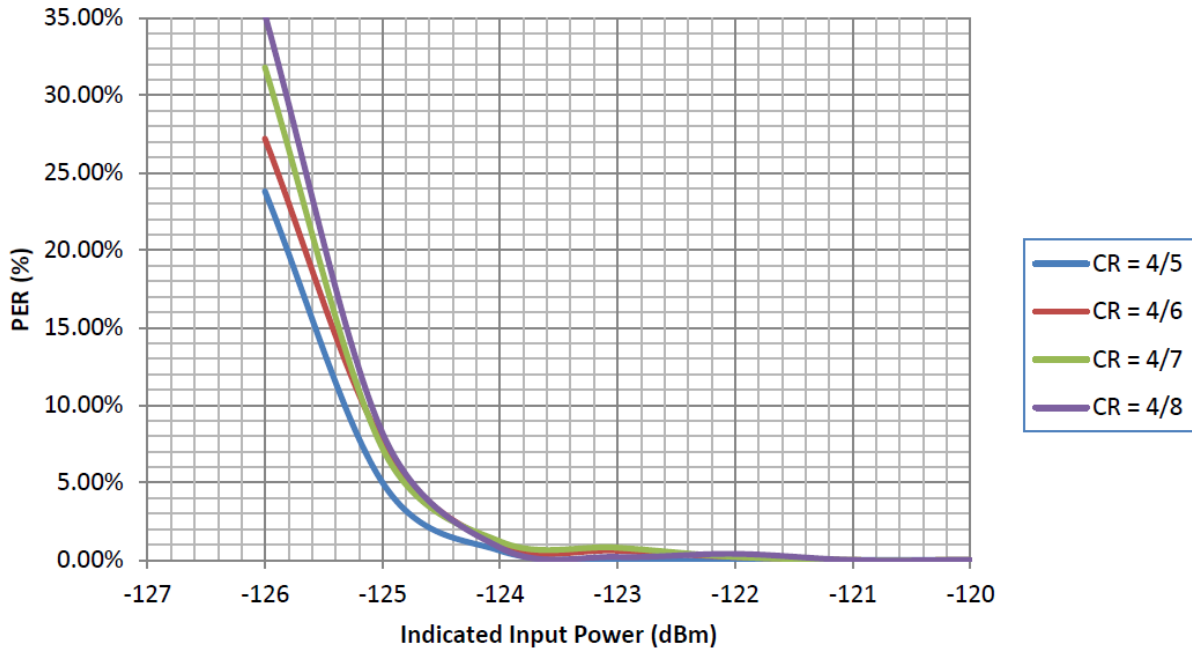


Chart 1: Μεταβολή της ευαισθησίας στον δέκτη για διαφορετικές τιμές Coding Rate. (SF =7, BW =125KHz, 13 byte payload)

Το πακέτο αποστολής ξεκινάει με μια σειρά συμβόλων τα οποία ονομάζονται **Preambles** για τον συγχρονισμό του δέκτη με τον εκπομπό (εικόνα 10 [17]). Τα σύμβολα αυτά μεταβάλλονται γραμμικά σε όλο το εύρος ζώνης BW και ονομάζονται upchirps, καθώς η συχνότητα είναι σταθερά αυξητική έως την μέγιστη τιμή του εύρους ζώνης. Επίσης, στο τέλος της αλληλουχίας αυτής, εμπεριέχεται και μια λέξη η οποία αποτελείται από δύο bytes, οι οποία ονομάζεται λέξη συγχρονισμού Sync Word. Η λέξη αυτή χρησιμοποιείται για την διαφοροποίηση μεταξύ των διαφόρων δικτύων LoRa. Έπειτα από την λέξη συγχρονισμού ακολουθούν δύο και ένα τέταρτο downchirps, όπου η συχνότητα μειώνεται σταθερά κατά την διάρκεια του χρόνου [17].

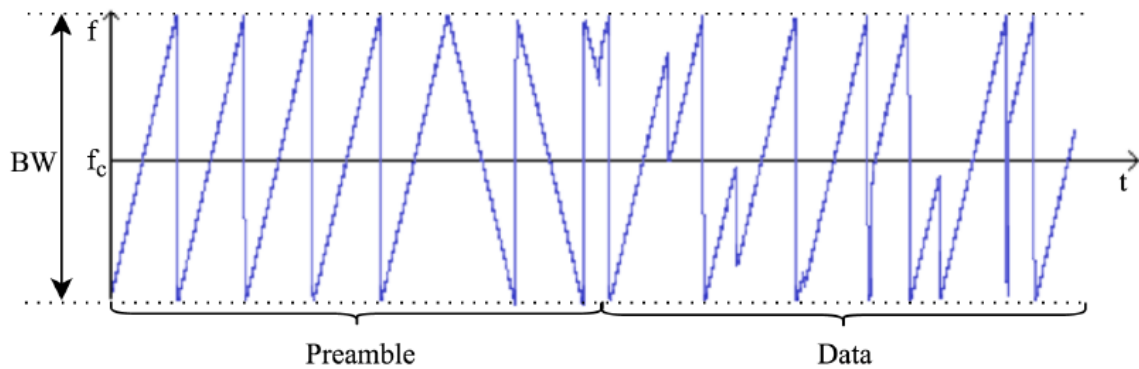


Figure 10: Μία αλληλουχία από upchirps και downchirps τα οποία συνθέτουν ένα πακέτο LoRa.

Έπειτα, αν επιλεγθεί η λειτουργία **explicit mode**, ακολουθεί η κεφαλίδα **Header**, οι οποία είναι προαιρετική στην περίπτωση όπου το δίκτυο δεν επιβάλλει την χρήση του. Ο Header μεταφέρει την πληροφορία στον δέκτη, σχετικά με το μέγεθος που έχουν τα ωφέλιμα δεδομένα, την τιμή CR για την διόρθωση των σφαλμάτων και το αν στο τέλος το πακέτο περιέχει cyclic redundancy check – CRC[17].

Στην περίπτωση όπου επιλεγεί η λειτουργία **implicit mode**, ο Header παραλείπεται, και ακολουθούν τα ωφέλιμα δεδομένα πληροφορίας (**Payload**). Στο τέλος του πακέτου, αφού έχει σταλεί η πληροφορία από τον Header, αποστέλεται ένα 16bit CRC. Στην εικόνα 11 απεικονίζονται τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα πακέτο LoRa όπως περιγράφονται παραπάνω [17].

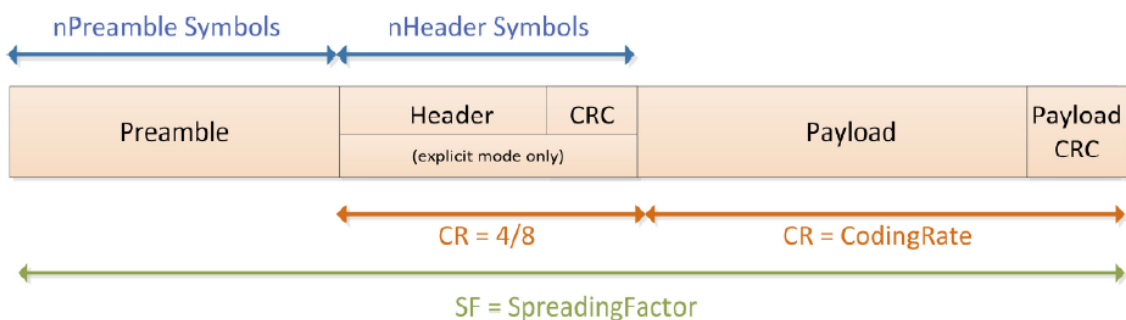


Figure 11: Τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα πακέτο δεδομένων LoRa.

Ο χρόνος μετάδοσης του σήματος από τον πομπό προς τον δέκτη (Time on Air – ToA) μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά και εξαρτάται από το μέγεθος των δεδομένων προς αποστολή (payload), το εύρος ζώνης – BW, το μέγεθος του CR και τον συντελεστή διάχυσης – SF.

Η χρονική διάρκεια του Preamble δίνεται από την σχέση 9 [17]:

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25) T_{sym} \quad (9)$$

Όπου:

$n_{preamble}$ = Το πλήθος των preamble συμβόλων.

Από την εξίσωση 10 μπορεί να υπολογιστεί το πλήθος των συμβόλων που αποτελούν το payload και το Header [17]:

$$payloadSymbNB = 8 + \max\left(\text{ceil}\left(\frac{8 PL - 4 SF + 28 + 16 - 20 H}{4(SF - 2 DE)}\right)(CR + 4), 0\right) \quad (10)$$

Όπου:

PL = Το πλήθος των bytes που αποτελούν το payload.

H = Όταν το Header περιλαμβάνεται στο πακέτο τότε το H = 0, αλλιώς H = 1.

DE = Όταν το ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης είναι ενεργοποιημένος είναι ίσο με 1, αλλιώς είναι ίσο με 0.

CR = Coding Rate το οποίο παίρνει τιμές από 1 έως 4.

Γνωρίζοντας το πλήθος των συμβόλων (payloadSymbNB) και την χρονική διάρκεια των κάθε συμβόλου από την σχέση 11 μπορεί να υπολογιστεί ο χρονική διάρκεια του payload:

$$T_{payload} = payloadSymbNB * T_{sym} \quad (11)$$

Ο διάρκεια αποστολής ολόκληρου του πακέτου δίνεται από την σχέση :

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \quad (12)$$

3.1.3 Το δίκτυο LoRaWAN

Στην ενότητα 2.2.3, αναφέρθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου LoRaWAN και έγινε σύγκριση σε σχέση με άλλα LPWAN δίκτυα. Στις επόμενες παραγράφους δίνονται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις παραμέτρους επικοινωνίας του πρωτοκόλλου, και τα συστατικά που περιλαμβάνει για την ανάπτυξη του.

Τα **δομικά στοιχεία** από τα οποία αποτελείται ένα δίκτυο LoRaWAN είναι (εικόνα 12 [19]):

Οι συσκευές οι οποίες συλλέγουν την πληροφορία από κάποιο αισθητήρα ή κάποια ηλεκτρονική διάταξη μετρήσεων και την αποστέλλουν ασύρματα στο Gateway

ονομάζονται **EndDevices**. Στην εικόνα 6 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική μιας τέτοιας συσκευής, όπου στα δίκτυα αισθητήρων αναφέρεται και ως End Node.

Οι συσκευές που αναφέρονται στο δίκτυο ως **Gateway**, αναλαμβάνουν τη συλλογή των πακέτων από τις συσκευές EndDevices και την προώθηση τους μέσω ενσύρματου δικτύου στον Network Server.

Ο **Network Server** επιφορτίζεται με την συλλογή όλων των πακέτων από όλα τα Gateway. Επίσης, συλλέγει δεδομένα τα οποία αφορούν την ποιότητα επικοινωνίας στο δίκτυο και στέλνει πληροφορίες για την βελτιστοποίηση της. Στον Network Server εγκαθίσταται μια εφαρμογή οι οποίοι δίνει πρόσβαση στα δεδομένα σε άλλες εφαρμογές τα οποία έχουν συλλεχθεί, η εφαρμογή αυτή ονομάζεται **Application Service**.

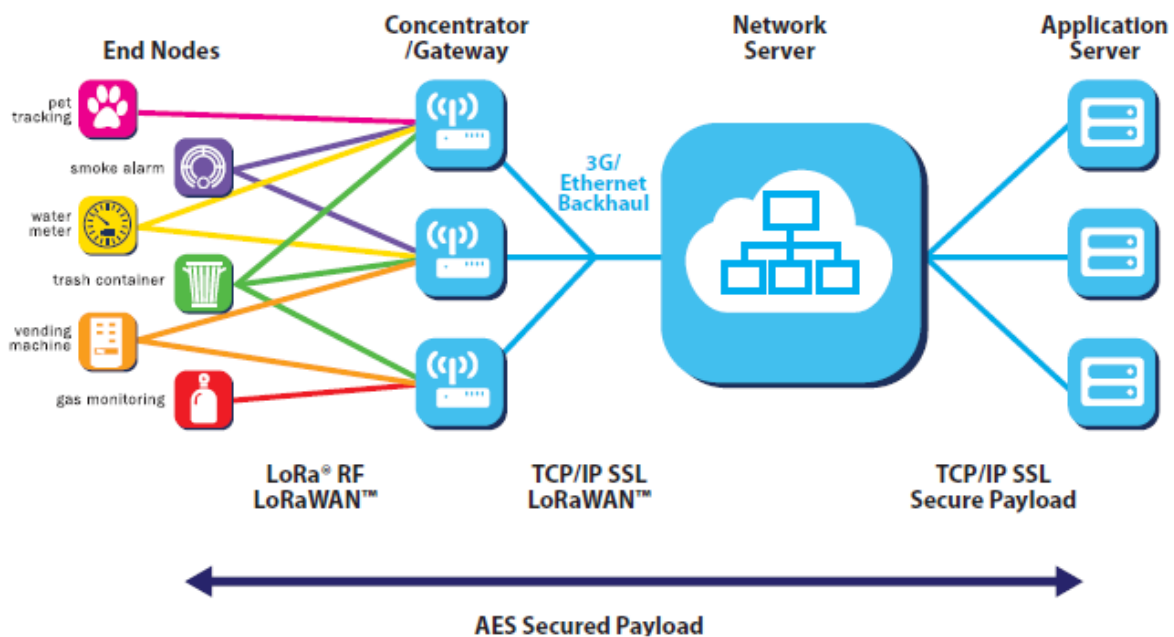


Figure 12: Η αρχιτεκτονική του δικτύου LoRaWAN.

Το πρωτόκολλο LoRaWAN προσφέρει τρεις διαφορετικούς τρόπους (Class A, Class B και Class C) επικοινωνίας, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση ως προς την κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με την εφαρμογή.

Η **Class A** επιτρέπει αμφίδρομη επικοινωνία για τις EndDevices και βασίζεται στο πρωτόκολλο ALOHA. Όταν μια συσκευή EndDevice στείλει κάποιο πακέτο στο δίκτυο (uplink), τότε ακολουθούν δύο χρονικά παράθυρα όπου η συσκευή αυτή αναμένει να λάβει πληροφορίες από το δίκτυο (downlink). Όπως για παράδειγμα, η επιβεβαίωση λήψης του πακέτου από τον Network Server, η μείωση της ισχύος εκπομπής και η αλλαγή Spreading Factor – SF. Το πλεονέκτημα αυτής της επικοινωνίας, με αυτήν την κλάση, είναι η πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το μειονέκτημα είναι ο μεγάλος περιορισμός στην αμφίδρομη επικοινωνία και συγκεκριμένα από το Network Server προς τις EndDevices[19].

Στην **Class B** τα παράθυρα επικοινωνίας ως προς τον δέκτη είναι περισσότερα. Οι EndDevices ανοίγουν παράθυρα για την λήψη σήματος σε προγραμματισμένες χρονικές περιόδους. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια σημάτων (beacons) που στέλνονται από το gateway έτσι ώστε μια EndDevice να συγχρονιστεί και να αρχίσει να λαμβάνει πακέτα.

Στην **Class C** οι τελικές συσκευές είναι συνεχώς σε αναμονή για να συγχρονιστούν με το gateway και δεν λαμβάνουν μόνο κατά την χρονική διάρκεια της αποστολής.

Δίκτυα LoRaWAN έχουν αναπτυχθεί σε πολλές χώρες παγκοσμίως. Το πρωτόκολλο καθορίζει διάφορες παραμέτρους και περιορισμούς για κάθε γεωγραφική περιοχή. Στην εικόνα 13 [19] φαίνονται οι διάφορες παράμετροι όπως είναι το εύρος ζώνης λειτουργίας και η ισχύς εκπομπής για διαφορετικές περιοχές.

	Europe	North America	China	Korea	Japan	India
Frequency band	867-869MHz	902-928MHz	470-510MHz	920-925MHz	920-925MHz	865-867MHz
Channels	10	64 + 8 + 8	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee
Channel BW Up	125/250kHz	125/500kHz				
Channel BW Dn	125kHz	500kHz				
TX Power Up	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)				
TX Power Dn	+14dBm	+27dBm				
SF Up	7-12	7-10				
Data rate	250bps- 50kbps	980bps-21.9kbps				
Link Budget Up	155dB	154dB				
Link Budget Dn	155dB	157dB				

Figure 13: Παράμετροι και περιορισμοί λειτουργίας σύμφωνα με το πρωτόκολλο LoRaWAN και τους κανονισμούς για διάφορες γεωγραφικές περιοχές.

Η διαμόρφωση του πακέτου σε φυσικό επίπεδο (**PHY layer**) και ελέγχου προσπέλασης μέσου (MAC layer) απεικονίζεται στην εικόνα 14. Το πακέτο ξεκινά με την αλληλουχία συγχρονισμού - Preamble, στην συνέχεια ακολουθεί η κεφαλίδα - Header, τα δεδομένα πληροφορίας - Payload και τέλος τα byte για την επιβεβαίωση της σωστής λήψης του πακέτου - CRC.

Μέσα στο **PHYPayload** περιέχεται το **MACPayload** το οποίο περιέχει πληροφορίες για σχετικά με την έκδοση του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται και των τύπο των μηνυμάτων.

Στο **MACPayload** περιέχονται το Frame Header - FHDR, το Frame Port - Fport και το Frame Payload - FRMPayload, τα δύο τελευταία Frame είναι προαιρετικά.

Το **Frame Header** περιλαμβάνει την διεύθυνση της τελικής συσκευής (short end-device-address - DevAddr), τα Frame control - Fctrl και Frame counter - Fcnt τα οποία χρησιμοποιούνται για την επιβεβαίωση της λήψης του πακέτου και των αριθμών των

Frame bits που απομένουν για αποστολή, επίσης περιλαμβάνουν 2 bits για την υλοποίηση του αλγορίθμου Adaptive Data Rate - ADR. Τέλος, περιέχει το Frame Options - FOpts το οποίο μεταφέρει MAC εντολές [20] [21].

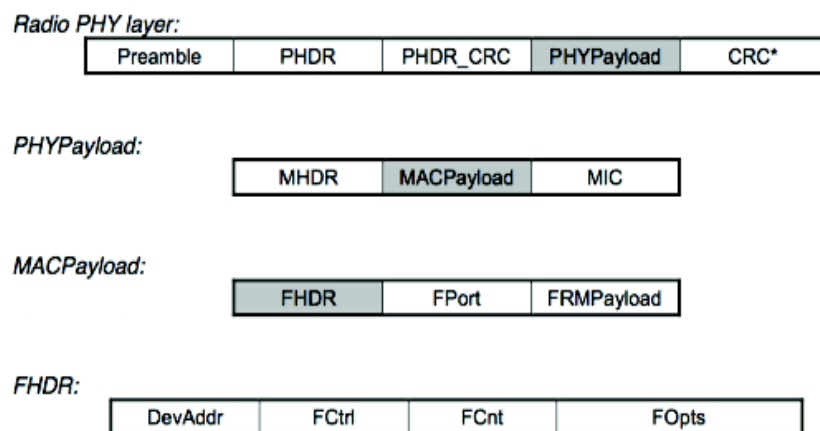


Figure 14: Η δομή του πακέτου δεδομένων σύμφωνα με το πρωτόκολλο LoRaWAN.

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας LoRaWAN, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο ο οποίος ονομάζεται Adaptive Data Rate – ADR για να μειώσει την κατανάλωση ισχύος στις τελικές συσκευές (End-Devices). Ο αλγόριθμος παίρνει ως δοδομένο την λαμβανόμενη στάθμη ισχύος, από την τελική συσκευή έως το gateway, και αναλόγως αν η ισχύς είναι χαμηλή ή υψηλή, τότε αυξάνει ή μειώνει τον συντελεστή διάχυσης SF αντίστοιχα [21].

4 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

4.1 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω αγωγίμων και μονωτικών υλικών

Μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές μελέτες σχετικά με την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε εσωτερικούς χώρους, όπως κατοικίες, γραφεία, βιβλιοθήκες και εργοστάσια. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πλοίων όμως, διαφέρουν πολύ από αυτά των παραπάνω κτιρίων. Μόνο κάποιες μελέτες που αφορούν εργοστάσια μπορούν να προσομοιάσουν το περιβάλλον ενός πλοίου, ενώ λίγες μελέτες έχουν γίνει σε περιβάλλον πλοίου[22]. Όπως αναλύεται σε επόμενες παραγράφους τα πλοία κατασκευάζονται κυρίως από μέταλλο. Επίσης, στο εσωτερικό τους περιλαμβάνουν μηχανήματα, συσκευές και σωληνώσεις επίσης από μέταλλο. Γι' αυτό κρίνεται σκόπιμο σε αυτό το σημείο να γίνει μια αναφορά στην διάδοση των κυμάτων μέσω των υλικών.

Όπως είναι γνωστό, τα υλικά κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ως προς τη συμπεριφορά τους στα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία: τους αγωγούς, όπως είναι τα μέταλλα και τους μονωτές, όπως είναι τα πλαστικά. Όταν ένα επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια, ένα μέρος της ισχύος του κύματος θα απορροφηθεί, ένα άλλο μέρος θα ανακλαστεί και ένα μέρος του θα περάσει μέσα από αυτό ή θα απορροφηθεί (εικόνα 15). Το ποσοστό της ισχύος του προσπίπτοντος κύματος που θα ανακλαστεί, θα απορροφηθεί και θα περάσει μέσα από την επιφάνεια εξαρτάται από το μήκος κύματος του, την πόλωση του, τη γωνία πρόσπτωσης, το υλικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας.

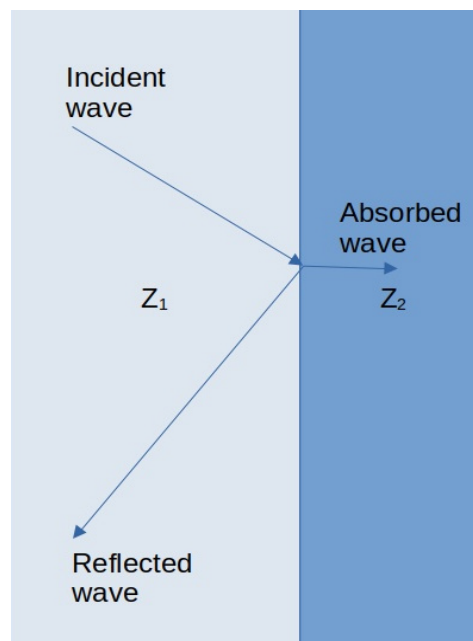


Figure 15: Electromagnetic wave incident on a material boundary.

Γνωρίζουμε ότι, για επίπεδα κύματα η χαρακτηριστική αντίσταση (intrinsic impedance) στον **κενό χώρο** ισούται με[23]

$$Z = \sqrt{(\mu/\epsilon)} = 377 \ \Omega \quad (13)$$

όπου:

μ = η διαπερατότητα του υλικού σε H/m

ϵ = η αγωγιμότητα του υλικού σε S/m

ενώ για κάθε μέσο,

$$Z = \sqrt{\left(\frac{j\omega * \mu_r}{\sigma + j\omega\epsilon}\right)} \ \Omega \quad (14)$$

όπου:

ω = η κυκλική συχνότητα σε rad/sec

μ_r = η σχετική διαπερατότητα του υλικού σε H/m

σ_r = η σχετική ειδική αγωγιμότητα του υλικού σε S/m

Για **διηλεκτρικά υλικά** όπου ισχύει $\sigma \ll j\omega\epsilon$ η χαρακτηριστική αντίσταση είναι ανεξάρτητη από την συχνότητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και είναι ίση με[23]:

$$Z = \sqrt{\left(\frac{\mu_r}{\epsilon_r}\right)} \ (\Omega) \quad (15)$$

Η χαρακτηριστική αντίσταση σε **αγώγιμα μέσα** είναι:

$$Z = \sqrt{\left(\frac{\omega\mu_r}{2\sigma_r}\right)} \ (\Omega) \quad (16)$$

όπου $\sigma \gg j\omega\epsilon$

Στις αγώγιμες μεταλλικές επιφάνειες ενδιαφέρων παρουσιάζει το **βάθος διείσδυσης** δ (skin depth). Το βάθος διείσδυσης είναι η απόσταση που ταξιδεύει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα μέσα σε μια αγώγιμη επιφάνεια μέχρι το πλάτος του να μειωθεί κατά έναν παράγοντα $1/e$ και υπολογίζεται από τον τύπο[23]:

$$\delta = 1 \frac{1}{\pi f \mu_r \sigma_r} \text{ (meters)} \quad (17)$$

όπου:

f = η συχνότητα του κήματος σε Hz

Ένα επίπεδο κύμα το οποίο προσπίπτει πάνω σε μια ατσάλινη επιφάνεια με συχνότητα 1MHz θα διεισδύσει σε αυτή 0.00762mm ενώ ένα κύμα με συχνότητα 1GHz θα διεισδύσει 0.001016mm.

Η ισχύς που απορροφάται δίνεται από την σχέση[23]:

$$A = 3.34 t \sqrt{(f \mu_r \sigma_r)} \text{ (dB)} \quad (18)$$

όπου:

t = το πάχος της επιφάνειας σε inches

Για παράδειγμα, η ισχύς που θα απορροφηθεί από μια επιφάνεια από ατσάλι (SAE1045) πάχους 0.1mm με σχετική διαπερατότητα 1000 H/m, σχετική ειδική αγωγιμότητα 0.1 S/m και συχνότητα 1MHz είναι:

$$A = 3.34 t \sqrt{(10^6 \cdot 1000 \cdot 0.1)} = 131 \text{ dB} \quad (19)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ένα πολύ λεπτό φύλλο από ατσάλι επαρκεί για να σταματήσει την μετάδοση του κύματος από την μια πλευρά της επιφάνειας στην άλλη.

Το υπόλοιπο ποσοστό της ισχύος που δεν απορροφάται ανακλάται από την μεταλλική επιφάνεια. Η ισχύς του κύματος που θα ανακλαστεί από την επιφάνεια δίνεται από την σχέση[23]:

$$R = 20 \log\left(\frac{94.25}{|Z|}\right) \text{ (dB)} \quad (20)$$

που:

$|Z|$ = το μέτρο εμπέδησης της ανακλαστικής επιφάνειας

Η ισχύς του κύματος που θα ανακλαστεί από μια ατσάλινη επιφάνεια με[23]

$$|Z| = 3.68 (10^{(-5)}) \sqrt{(f)} \quad (21)$$

και για συχνότητα 1MHz είναι:

$$R = 20 \log\left(\frac{94.25}{|Z|}\right) \Rightarrow R = 20 * \log(94.25/0.368) = 48 \text{ dB} \quad (22)$$

Στην διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, σημαντική είναι και η συνεισφορά των ανοιγμάτων στις μεταλλικές επιφάνειες. Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια όπου περιέχει ένα άνοιγμα, το κύμα αυτό περιθλάται [Seybold 1.2.2.1]. Στην ειδική περίπτωση όπου το προσπίπτον κύμα έχει το διπλάσιο μήκος από το άνοιγμα, τότε το τελευταίο είναι ένας ιδανικός ακτινοβολητής[23].

4.2 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε εσωτερικό χώρο

Υπάρχουν πέντε διαφορετικά είδη διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο χώρο μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Αυτά είναι η άμεση μετάδοση του κύματος πάνω σε μια νοητή γραμμή όπου δεν υπάρχουν εμπόδια (Line of Sight-LOS), και στην περίπτωση που υπάρχουν εμπόδια (Non Line of Sight), γίνεται μέσω ανάκλασης (reflection), περίθλασης (diffraction), διάχυσης (scattering) και διάθλασης (refraction) (διαμέσου των επιφανειών διαφόρων υλικών). Στο σχήμα 16 εμφανίζονται οι διάφοροι τρόποι μετάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μεταξύ πομπού και δέκτη μέσα σε ένα κλειστό χώρο (Indoor propagation). Η συμβολή όλων των παραπάνω μηχανισμών έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός καναλιού διαλείψεων. Ένα **κανάλι διαλείψεων** περιγράφεται από την εξασθένηση λόγω τις απόστασης και των αντικειμένων που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη, όπως είναι οι εξωτερικοί και εσωτερικοί τοίχοι, τα έπιπλα, τα μηχανήματα και το είδος του κτιρίου στο οποίο διαδίδεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Σε ένα κανάλι διαλείψεων η μέση τιμή της ισχύος μεταβάλλεται με αργούς ρυθμούς, λόγω της μεταβολής της σχετικής θέσης μεγάλων αντικειμένων και της αυξομείωσης της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη. Η μεταβολή αυτή αναφέρεται ως σκίαση (Shadow Fading) και είναι μη επιλεκτική ως προς τη συχνότητα. Ενώ, με την ονομασία πολύοδη εξασθένηση (Multipath fading), περιγράφονται οι γρήγορες και συνεχής αλλαγές στην ισχύ του σήματος. Οι αλλαγές αυτές οφείλονται στη μεταβολή της φάσης του σήματος που προκύπτουν από μικρές αλλαγές είτε των αντικειμένων που βρίσκονται στο χώρο, είτε της θέσης του πομπού και του δέκτη[24].

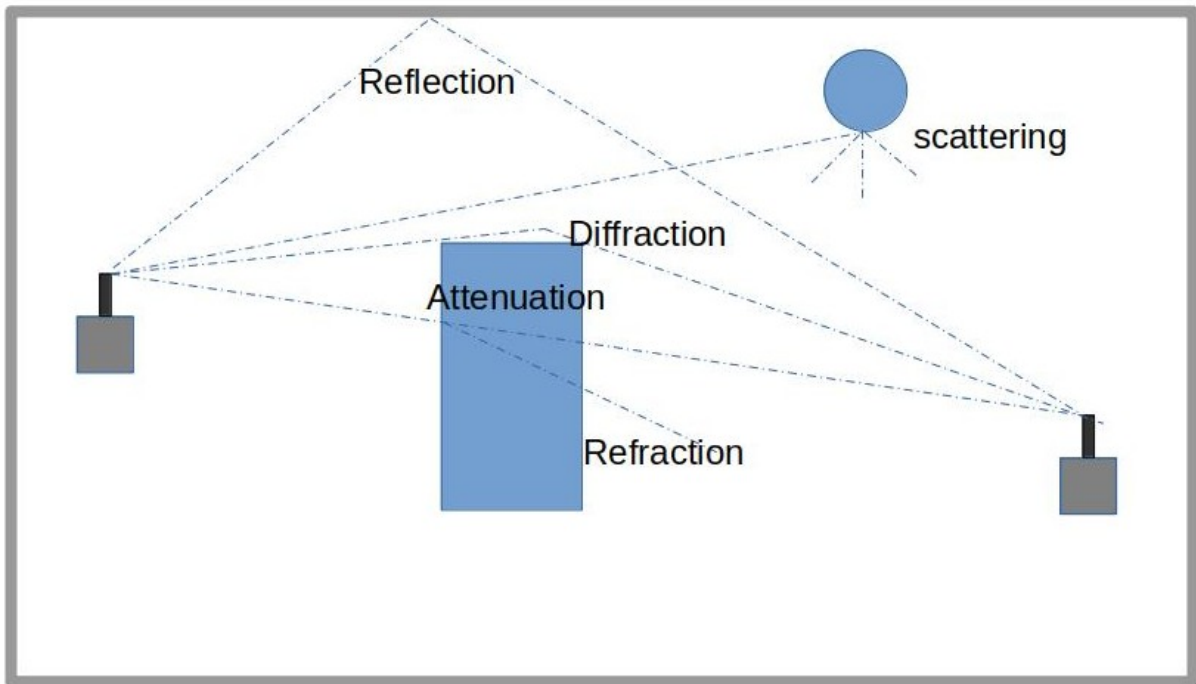


Figure 16: Indoor Electromagnetic Wave Propagation

Για την ασύρματη κάλυψη των εσωτερικών χώρων έχουν αναπτυχθεί **δύο διαφορετικές μέθοδοι**. Η μια μέθοδος βασίζεται στις εξισώσεις του Maxwell και στη γεωμετρική οπτική. Η μέθοδος αυτή απαιτεί λεπτομερή απεικόνιση του υπό εξέταση χώρου ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, αλλά και των υλικών από τα οποία αποτελείται. Η μέθοδος αυτή έχει αυξημένη πολυπλοκότητα και η υπολογιστική ισχύς αυξάνεται γρήγορα σε σχέση με τις διαστάσεις του χώρου. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Ray-Tracing. Η άλλη μέθοδος, χρήση της οποίας γίνεται στην παρούσα εργασία, βασίζεται στα γενικά χαρακτηριστικά του χώρου και κυρίως σε εμπειρικά δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά αναλύονται στατιστικά με στόχο τη δημιουργία μοντέλων, που περιγράφουν μέσω μαθηματικών εξισώσεων τη μεταβολή της μέσης λαμβανόμενης ισχύος σε σχέση με την μεταβολή της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη.

Η ισχύς που λαμβάνει ο δέκτης δίνεται από την σχέση[24]:

$$Pr = \frac{Po}{d^N} \quad (23)$$

όπου:

Po = η λαμβανόμενη ισχύς στον δέκτη σε απόσταση ενός μέτρου από τον πομπό.

d = η απόσταση μεταξύ δέκτη και πομπού.

N = συντελεστής που εξαρτάται από το υλικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου.

Η σχέση αυτή σε dB είναι:

$$10 \log(P_r) = 10 \log(P_o) - 10 N \log(d) \quad (dB) \quad (24)$$

Οι απώλειες σε dB σε απόσταση ενός μέτρου είναι:

$$L_o = 10 \log(P_t) - 10 \log(P_o) \quad (dB) \quad (25)$$

Οπότε, οι συνολικές απώλειες σε dB δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$L_{total} = L_o + 10 N \log(d) \quad (dB) \quad (26)$$

Για μια συγκεκριμένη διάταξη πομπού και δέκτη, όπου είναι γνωστή η ενίσχυση της κεραίας του εκπομπού G_t και του δέκτη G_r , η σχέση μεταξύ πομπού και δέκτη δίνεται από τον τύπο [24]:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (27)$$

όπου:

P_t = Η εκπεμπόμενη ισχύς από τον πομπό.

P_r = Η λαμβανόμενη ισχύς στον δέκτη.

G_t = Η ενίσχυση της κεραίας του πομπού.

G_r = Η ενίσχυση της κεραίας του δέκτη.

d = η απόσταση μεταξύ δέκτη και πομπού.

Με την βοήθεια των δύο παραπάνω εξισώσεων υπολογίζεται η κάλυψη του συστήματος για ένα συγκεκριμένο χώρο. Επίσης, με βάση τις εξισώσεις αυτές έχουν αναπτυχθεί και άλλα περισσότερο ακριβή μοντέλα. Δύο από τα πιο διαδεδομένα είναι το μοντέλο της ITU για εσωτερικούς χώρους και το μοντέλο απωλειών Log-Distance.

Το μοντέλο της ITU συμπεριλαμβάνει και τη μείωση της ισχύος όταν ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε διαφορετικά πατώματα, για εφαρμογές σε πολυώροφα κτίρια. Επίσης, προσθέτει έναν ακόμη παράγοντα απωλειών που αφορά τη συχνότητα διάδοσης του σήματος. Η σχέση για το μοντέλο απωλειών διαδρομής της ITU δίνεται από [25]:

$$L_{total} = 20 \log(f) + N \log(d) + L_{floor}(n) - 28 \quad (dB) \quad (28)$$

όπου:

N = ο συντελεστής απωλειών ισχύος λόγο απόστασης

f = η συχνότητα σε MHz

d = η απόσταση σε μέτρα

$L_{floor}(n)$ = οι απώλειες ισχύος μεταξύ των ορόφων,
 n = είναι το πλήθος των ορόφων που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη.

Το μοντέλο απωλειών Log-Distance περιλαμβάνει μια επιπλέον παράμετρο, η οποία αναπαριστά το φαινόμενο της σκίασης (Shadowing), και δίνεται από την εξίσωση[25]:

$$L_{total} = P_L(d_o) + N \log\left(\frac{d}{d_o}\right) + X_s \quad (dB) \quad (29)$$

Όπου:

$P_L(d_o)$ = οι απώλειες σε σχέση με μια τιμή αναφοράς, (συνήθως σε απόσταση ενός μέτρου)

$N/10$ = ο συντελεστής απωλειών ισχύος λόγω απόστασης

X_s = η Γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση σε dB

5 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πλοίων

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται τα δομικά στοιχεία ενός πλοίου, έτσι ώστε να γίνουν κατανοητές οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει η σχεδίαση και η ανάπτυξη ενός WSN στο περιβάλλον αυτό.

5.1 Υλικά κατασκευής

Τα περισσότερα μέρη του πλοίου κατασκευάζονται από **ατσάλι/χάλυβα** (steel). Όλα τα είδη χάλυβα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μερών ενός πλοίου, δημιουργούνται με τήξη σιδηρομεταλλεύματος για την παραγωγή χυτοσιδήρου. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ατσάλι το οποίο περιέχει 92-97% σίδηρο, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό είναι άνθρακας, πυρίτιο, μαγγάνιο, θείο και φώσφορος. Γενικά, το ατσάλι που χρησιμοποιείται μπορεί να θεωρηθεί κράμα σιδήρου και άνθρακα, όπου το ποσοστό του άνθρακα κυμαίνεται περίπου από 0.1% για ήπιους χάλυβες έως 1.8% για ορισμένους σκληρότερους. Τόσο το θείο όσο και ο φώσφορος στον ήπιο χάλυβα διατηρούνται στο ελάχιστο (λιγότερο από 0.05%). Οι νηογνώμονες είχαν θεσπίσει αρχικά διαφορετικές προδιαγραφές για το χάλυβα. Ωστόσο, το 1959, οι μεγάλες εταιρείες συμφώνησαν να τυποποιήσουν τις απαιτήσεις του προκειμένου να μειώσουν στο ελάχιστο τις απαιτούμενες ποιότητες χάλυβα.

Σήμερα υπάρχουν πλέον πέντε διαφορετικές ποιότητες χάλυβα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εμπορικών πλοίων και συχνά αναφέρονται ως χάλυβες IACS. Οι ποιότητες αυτές κατηγοριοποιούνται στις κλάσεις A, B, C, D και E. Η κλάση A είναι ένας συνηθισμένος ήπιος χάλυβας σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Lloyd's Register και χρησιμοποιείται γενικά στη ναυπηγική βιομηχανία. Η κλάση B είναι

καλύτερης ποιότητας ήπιος χάλυβας από την κλάση A και χρησιμοποιείται όπου απαιτούνται παχύτερες πλάκες στις πιο κρίσιμες περιοχές. Οι βαθμοί C, D και E διαθέτουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά, ενώ ο βαθμός C ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του American Bureau of Shipping. Οι απαιτήσεις του Lloyd's Register για χάλυβες βαθμών A, B, C και E βρίσκονται στο Κεφάλαιο 3 των κανόνων της Lloyd's για την κατασκευή, τη δοκιμή και την πιστοποίηση υλικών[26]. Τέλος, σημειώνεται ότι και τα μέρη των πολεμικών πλοίων κατασκευάζονται από ατσάλι [27].

5.2 Δομή εμπορικών πλοίων

Τα σύγχρονα εμπορικά πλοία κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το είδος της εργασίας που εκτελούν ή το είδος του φορτίου που μεταφέρουν. Στην λίστα που ακολουθεί αναφέρονται τα επιβατηγά πλοία και τα φορτηγά ποντοπόρα πλοία, στα οποία εκτός από τον χώρο που αποθηκεύεται το φορτίο οι άλλοι χώροι παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες[28]:

- Επιβατηγά
- Πορθμεία (Ferry Boats)
- Μεταφοράς τροχοφόρων οχημάτων (Ro-Ro)
- Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων (Container Ships)
- Μεταφοράς σκόρπιου φορτίου (Bulk Carriers)
- Μεταφοράς μικτού φορτίου
- Δεξαμενόπλοια, Πετρελαιοφόρα
- Υγροποιημένων αερίων (LNG και PNG)
- Πλοία ψυγεία

Επίσης, τα εμπορικά πλοία κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με την ποσότητα του φορτίου που μπορούν να μεταφέρουν. Χαρακτηριστικά αναφέρονται τα μεγέθη των πετρελαιοφόρων πλοίων, των μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και μεταφοράς σκόρπιου φορτίου.

Τα πετρελαιοφόρα πλοία ταξινομούνται σε κατηγορίες [29]:

- ULCC (Ultra-Large Crude Carrier) με χωρητικότητα από 320.000 έως 550.000 τόνους και μέγιστο μήκος 415m.
- VLCC (Very Large Crude Carrier) με χωρητικότητα από 200.000 έως 320.000 τόνους και μέγιστο μήκος 330m.
- Suezmax με χωρητικότητα περίπου 150.000 τόνους και μήκος έως 270m.

- Aframax με χωρητικότητα από 80.000 έως 120.000 τόνους και μήκος περίπου 240m.
- Paramax με χωρητικότητα από 50.000 έως 80.000 τόνους και μήκος από 200m έως 250m.
- Handysize/Handymax με χωρητικότητα μέχρι 50 τόνους και μήκος μέχρι 200m.

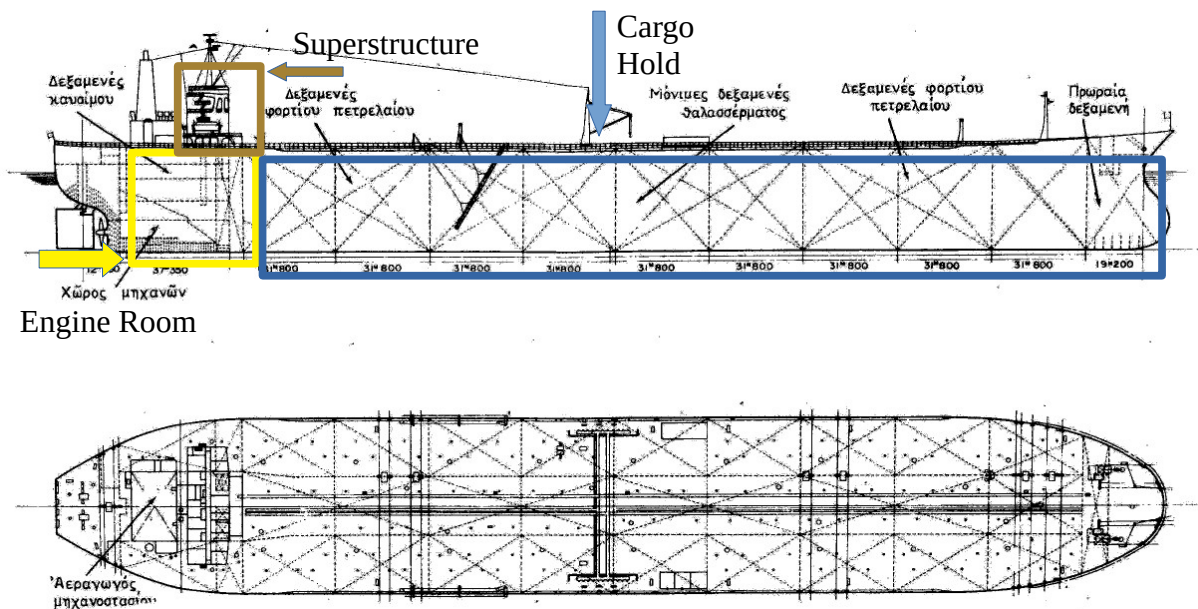


Figure 17: Oil Tanker (upper side view and down top view) [32].

Στην εικόνα 17 εμφανίζεται ένα πλοίο μεταφοράς πετρελαίου.

Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων σήμερα φτάνουν έως τα 400 m και ταξινομούνται σε [26]:

- Ultra-large με χωρητικότητα πάνω από 14.000 TEU.
- Post Panamax με συνήθη χωρητικότητα μεταξύ 5.500-8.000 TEU.
- New Panamax με χωρητικότητα έως και 12.000 TEU.
- Feeder με χωρητικότητα μερικών εκατοντάδων TEU.

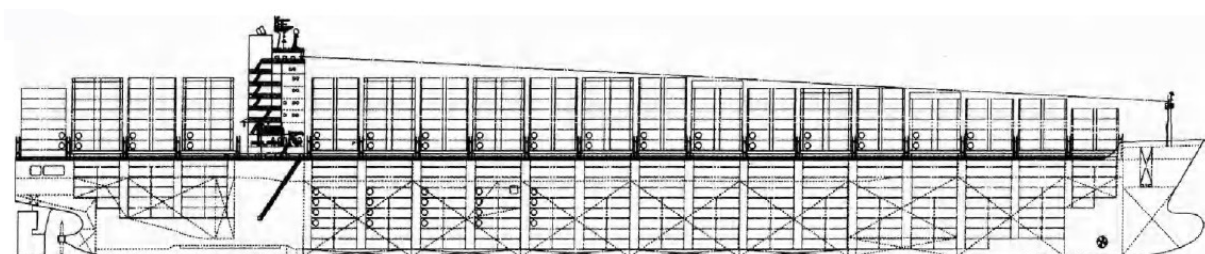


Figure 18: Container Ship[26]

Τα πλοία μεταφοράς σκόρπιου φορτίου ταξινομούνται σε [26]:

- Capesize με χωρητικότητα πάνω από 80.000 τόνους και με μέγιστη χωρητικότητα 365.000 τόνους.
- Panamax με μέγεθος ίδιο με τα πετρελαιοφόρα πλοία.
- Handymax με χωρητικότητα από 35.000 έως 60.000 τόνους.

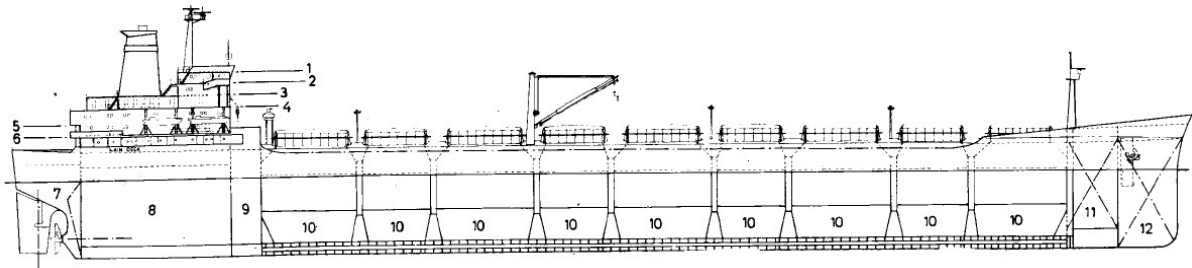


Figure 19: Bulk Carrier Ship[32]

Όλα τα είδη των εμπορικών πλοίων που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να χωρισθούν σε τρία διαφορετικά μέρη: το μηχανοστάσιο Engine Room, το χώρο της υπερκατασκευής (Superstructure) και το χώρο φορτίου (Cargo Hold). Αυτός ο διαχωρισμός είναι απαραίτητος για την καλύτερη περιγραφή της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, διότι οι χώροι αυτοί παρουσιάζουν διαφορές ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Οι επιφάνειες που συναντώνται, σχεδόν εξολοκλήρου είναι μεταλλικές, με εξαίρεση τον χώρο της υπερκατασκευής.

Η υπερκατασκευή (συχνά αναφέρεται και ως accommodation) περιλαμβάνει τους χώρους ενδιαίτησης όπου διαμένει το πλήρωμα, τον χώρο ελέγχου φορτοεκφόρτωσης και τον χώρο ναυσιπλοΐας στο υψηλότερο επίπεδο (Navigation Deck), όπου μεγάλο μέρος της επιφάνειας των τοίχων καλύπτεται από γυαλί. Αλλά και σε αυτή την περίπτωση οι τοίχοι, το δάπεδο και οι οροφές είναι κατασκευασμένα από μέταλλο. Ακόμη, στους χώρους αυτούς υπάρχουν έπιπλα από ξύλο, ύφασμα και πλαστικό. Οι χώροι ενδιαίτησης είναι απομονωμένοι από τον χώρο του μηχανοστασίου και τους χώρους του φορτίου. Επίσης, σύμφωνα με τον κανονισμό, δεν επιτρέπεται να υπάρχουν απευθείας ανοίγματα σε υπνοδωμάτια από μαγειρεία, αποθήκες, χώρους στεγνώματος ή κοινόχρηστους χώρους υγιεινής. Το μέρος ενός διαφράγματος που χωρίζει τέτοια μέρη από υπνοδωμάτια και εξωτερικά διαφράγματα πρέπει να είναι αποτελεσματικά κατασκευασμένο από χάλυβα ή άλλη εγκεκριμένη ουσία και να είναι υδατοστεγές και στεγανό από αέριο [30] [31].

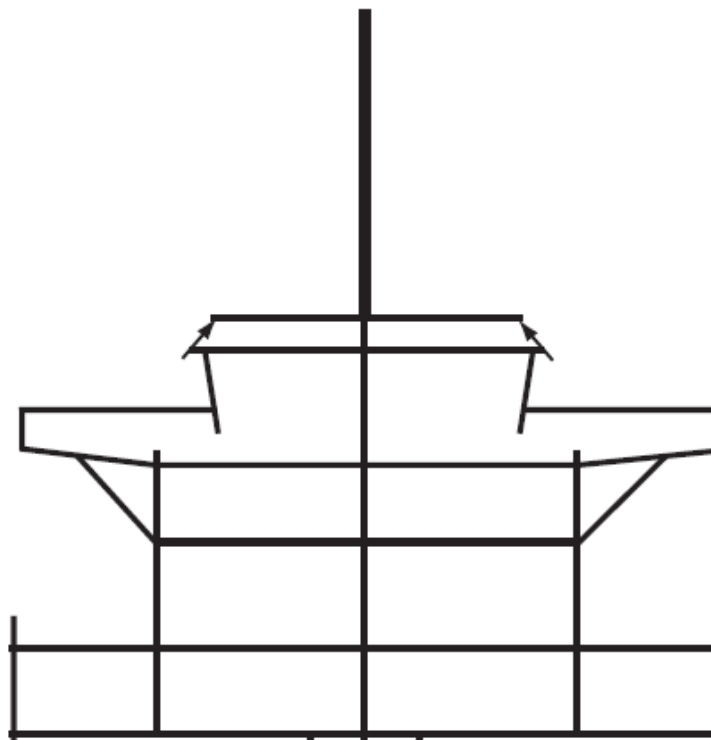


Figure 20: Superstructure [26]

Το **μηχανοστάσιο** (εικόνα 21 [32]) περιλαμβάνει την κύρια μηχανή και βοηθητικά μηχανήματα, όπως ηλεκτρογεννήτριες, αντλίες, εναλλακτήρες θερμότητας, αεροσυμπιεστές, φυγοκεντρικοί διαχωριστές και το πηδάλιο. Επίσης, σε αυτό βρίσκονται τα δίκτυα για την μεταφορά των ρευστών, δηλαδή το σύνολο των σωληνώσεων για τη μεταφορά υγρών, αερίων και ατμού, τα οποία διατρέχουν όλο τον χώρο του μηχανοστασίου. Οι περισσότεροι σωλήνες είναι κατασκευασμένοι από μαλακό χάλυβα (mild steel). Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ο χυτοσίδηρος (cast-iron), χαλκός (copper), το ανοξείδωτο ατσάλι (stainless steel) και ελαστικά (rubber) ή συνθετικά υλικά από πλαστικό (PVC)[33]. Ο χώρος του μηχανοστασίου αποτελείται από τρία διαφορετικά επίπεδα, (decks) ίσως και περισσότερα ανάλογα με τον τύπο του πλοίου. Τα τρία αυτά επίπεδα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός μεγάλου ανοίγματος, στο οποίο εκτίνεται η κύρια μηχανή. Ο χώρος αυτός πλαισιώνεται από τα διαμερίσματα του καυσίμου, τον χώρο πηδαλιούχησης, το μηχανουργείο, τον χώρο καθαρισμού καυσίμου της κύριας μηχανής και των ηλεκτρογεννητριών, τον χώρο αποθήκευσης ανταλλακτικών εξαρτημάτων και διατάξεων και τον χώρο ελέγχου του μηχανοστασίου. Όλα τα παραπάνω διαμερίσματα διαχωρίζονται από μεταλλικούς τοίχους κατασκευασμένους από ατσάλι. Τα διαμερίσματα αυτά είναι στεγανοποιημένα μεταξύ τους, όπως και οι πόρτες.

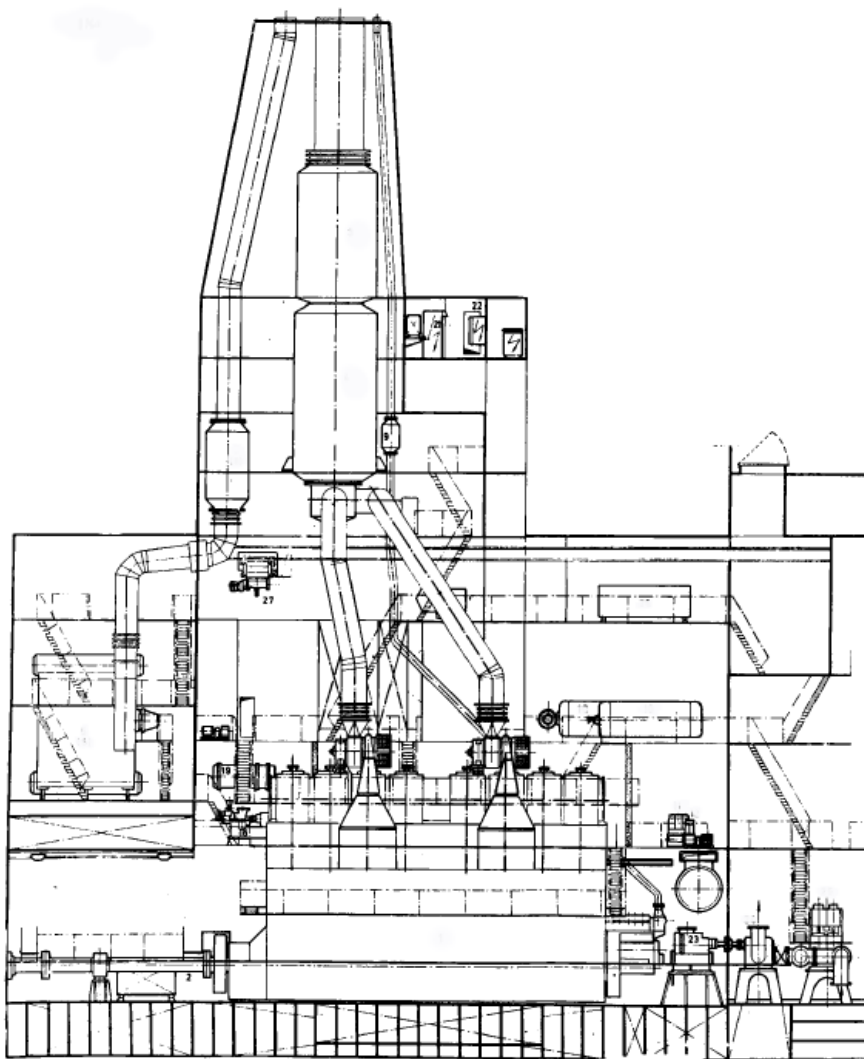


Figure 21: Engine Room[32]

Παρότι, ο χώρος του μηχανοστασίου και ο χώρος της υπερκατασκευής έχουν μικρές χωροταξικές διαφορές μεταξύ των διαφόρων τύπου εμπορικών πλοίων, (π.χ. πετρελαιοφόρα και μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων) αυτό δεν συμβαίνει και για τον χώρο του φορτίου. Τα χαρακτηριστικά του **χώρου του φορτίου** ως προς τις ανακλαστικές και απορροφητικές επιφάνειες μεταβάλλονται ανάλογα με το αν το πλοίο είναι έμφορτο ή κενό φορτίου. Στο [34] παρουσιάζονται εμπειρικά μοντέλα τα οποία έχουν εξαχθεί μέσω μετρήσεων σε στοίβες εμπορευματοκιβωτίων και αποδεικνύουν ότι η διάδοση του σήματος είναι δυνατή ακόμη και όταν οι αισθητήρες βρίσκονται μέσα στο μεταλλικό περίβλημα του κιβωτίου. Επίσης, υπολογίζονται και οι συντελεστές εξασθένησης για συχνότητες 900MHz, 1850MHz και 2100MHz. Τα πλοία μεταφοράς σκόρπιου φορτίου έχουν μελετηθεί στο [35] όπου μέσω μετρήσεων[24] και προσομοιώσεων καταδεικνύεται ότι ο χώρος του φορτίου παρουσιάζει χαρακτηριστικά κυματοδηγού. Επίσης, και εδώ υπολογίζεται ο συντελεστής εξασθένησης της ισχύος.

Σημαντικό ρόλο στην μετάδοση του σήματος έχουν οι καταπακτές (hatches) φορτοεκφόρτωσης. Οι μεταλλικές επιφάνειες που καλύπτουν τα ανοίγματα αυτά μπορεί να είναι από ατσάλι, αλλά στα σημεία που εφάπτονται με τα ανοίγματα του καταστρώματος τοποθετείται ελαστικό για στεγανοποίηση [26], αποτελώντας μια διέξοδο για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Στην περίπτωση όμως ενός πετρελαιοφόρου πλοίου, η τοποθέτηση αισθητήρων στο εσωτερικό των δεξαμενών καθίσταται αρκετά δυσκολότερη, επειδή οι δεξαμενές έχουν κάποια στρόγγυλα μικρά ανοίγματα στεγανοποιημένα στο κύριο κατάστρωμα [26], με αποτέλεσμα τη μεγάλη μείωση ισχύος του σήματος.

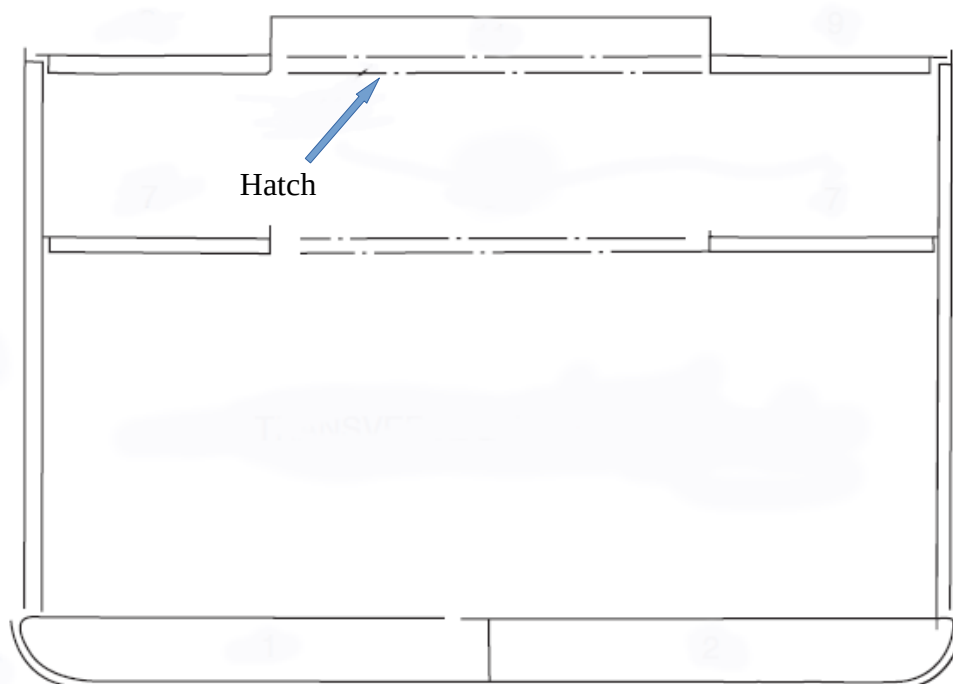


Figure 22: Cargo Hold[26]

Στο κύριο κατάστρωμα (Main Deck) συναντάται το μεγαλύτερο πάχος τοίχου, το οποίο δεν είναι σε όλο το μήκος του ίδιο. Λόγω των μεγαλύτερων διαμήκη τάσεων κάμψης που εμφανίζονται στην περιοχή του μεσαίου επιπέδου, το μεγαλύτερο πάχος πλάκας καταστρώματος διατηρείται πάνω από το 40% του μήκους του και βρίσκεται στη μέση του πλοίου και φτάνει στο ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος στα άκρα του πλοίου. Άλλες αυξήσεις πάχους μπορεί να προκύψουν όταν μεταφέρονται μεγάλα φορτία καταστρώματος, όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθούν περονοφόρα ανυψωτικά οχήματα ή άλλα τροχοφόρα οχήματα. Στα καταστρώματα εκτός από το κατάστρωμα αντοχής, η διακύμανση στο πάχος της πλάκας είναι παρόμοια. Το ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος του κύριου καταστρώματος είναι 15mm [36], και συγκεκριμένα για

ένα πετρελαιοφόρο πλοίο είναι 40mm[26]. Σύμφωνα με τον Lloyd's το ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος των δαπέδων μεταξύ των καταστρωμάτων της υπερκατασκευής εξαρτάται από το μήκος του πλοίου. Για παράδειγμα, για ένα πλοίο μήκους 250m το ελάχιστο πάχος κατασκευής είναι 12,5mm[26]. Σε κάθε περίπτωση όμως το πάχος δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 6mm. Το ελάχιστο πάχος για τις δεξαμενές πετρελαίου είναι 7.5mm και για τις δεξαμενές έρματος (Ballast Tank) είναι 9mm[36].

Σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή, οι χώροι διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο εσωτερικό ενός πλοίου μπορούν να μοντελοποιηθούν ως μεταλλικά κουτιά με ανοίγματα. Όπως επεξηγείται και στην παράγραφο 3.1, μια πολύ λεπτή επιφάνεια από ατσάλι (μικρότερη από ένα χιλιοστό) είναι αρκετή για να απορροφήσει ή να ανακλάσει πλήρως ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Η διέλευση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δεν είναι εφικτή μέσω των τοίχων, καθώς καμία επιφάνεια δεν έχει πάχος λιγότερο από 5mm. Ως ανοίγματα για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να θεωρηθούν οι πόρτες στο εσωτερικό ή εξωτερικό μέρος του πλοίου. Οι πόρτες αυτές είναι κατασκευασμένες από ατσάλι, όπου περιμετρικά εφαρμόζονται ελαστικά υλικά για την στεγανοποίηση τους[26]. Οι περισσότερες ενισχυμένες πόρτες βρίσκονται μεταξύ των χώρων του μηχανοστασίου και μεταξύ των καταστρωμάτων (decks). Ακόμη, η διάδοση των κυμάτων είναι εφικτή διαμέσου ανοιγμάτων των τοίχων όπου περνάν καλωδιώσεις ή σωληνώσεις. Τα ανοίγματα αυτά στεγανοποιούνται με μη αγώγιμα υλικά και είναι της τάξεως των λίγων δεκάδων εκατοστών. Μετρήσεις έχουν δείξει ότι το σήμα μειώνεται κατά 25 dB όταν αυτό διαδίδεται μέσω μιας υδατοστεγούς πόρτας που είναι κλειστή [37][35][38]. Συγκεκριμένα, **το κύμα διαθλάται διαμέσου του ελαστικού στεγανοποίησης της πόρτας, ενώ στις υπόλοιπες επιφάνειες, της πόρτας και των τοίχων όπου είναι μεταλλικές, ανακλάται ή απορροφάται.**

Τέλος, η επικοινωνία μεταξύ των καταστρωμάτων είναι δυνατή και σχετικές μελέτες έχουν δείξει ότι η καλύτερη θέση τοποθέτησης του πομπού και του δέκτη είναι κοντά στο κλιμακοστάσιο [39]. Αν οι πόρτες μεταξύ των καταστρωμάτων είναι κλειστές και ο δέκτης ή ο πομπός απομακρυνθούν από το κλιμακοστάσιο, τότε η ισχύς του σήματος μειώνεται πολύ γρήγορα ανάλογα πάντα και με τη συχνότητα του σήματος. Στην περιοχή συχνοτήτων των 2.4GHz η επικοινωνία μεταξύ δύο διαδοχικών καταστρωμάτων δεν είναι εύκολα εφικτή [39], ενώ για τις περιοχές συχνοτήτων των 868MHz και 400MHz μπορεί να επιτευχθεί επικοινωνία μεταξύ περισσότερων από δύο καταστρωμάτων.

6 Προσομοίωση ασύρματου δικτύου LoRaWAN σε περιβάλλον δεξαμενόπλοιου

6.1 Πρόγραμμα προσομοίωσης NS3

Για την προσομοίωση του LoRaWAN δικτύου με πρωταρχικό ερώτημα την ασύρματη κάλυψη ενός εμπορικού πλοίου, έγινε χρήση του λογισμικού NS3. Το λογισμικό αυτό είναι ανοικτού κώδικα το οποίο διατίθεται για την ανάπτυξη εφαρμογών και για ερευνητικούς σκοπούς. Έχει αναπτυχθεί στην γλώσσα προγραμματισμού C++. Ο χρήστης μπορεί να κάνει χρήση και της γλώσσας Python, όμως αυτή δεν υποστηρίζει όλες τις δυνατότητες. Αν και αρχικός στόχος του είναι η κάλυψη πρωτοκόλλων δικτύων του διαδικτύου, έχουν αναπτυχθεί από τους χρήστες αρκετά πρωτόκολλα που δεν βασίζονται σε αυτό. Δεν παρέχει κάποιο γραφικό περιβάλλον, είναι μια συλλογή από βιβλιοθήκες, οι οποίες μπορούν να συνεργαστούν με άλλα λογισμικά για την εμφάνιση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Έχει αναπτυχθεί για λειτουργικά συστήματα Linux και MacOS και ο χρήστης πρέπει να είναι εξοικειωμένος με χρήση της γραμμής εντολών (Command Line). Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζεται η αρχιτεκτονική πάνω στην οποία βασίζεται η ανάπτυξη ενός μοντέλου, όπου η διαδρομή της επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων (Nodes) μπορεί να είναι αμφίδρομη. Κάθε κόμβος αποτελείται από μια εφαρμογή (Application), η οποία συνδέεται μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας (Protocol Stack) με την “κάρτα δικτύου” (NetDevice) που αναπαριστά την διεπαφή μεταξύ των δύο κόμβων. Οι δύο αυτοί κόμβοι επικοινωνούν μέσω του καναλιού (Channel), το οποίο μοντελοποιεί το φυσικό μέσο μετάδοσης για ενσύρματες ή ασύρματες επικοινωνίες.

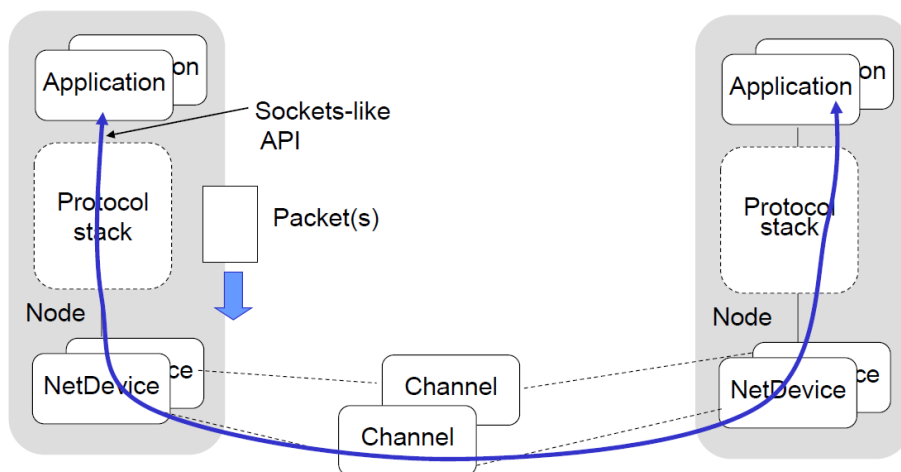


Figure 23: NS3 Basic Model

6.2 LoRaWAN Module

Για την προσομοίωση του LoRaWAN δικτύου με πρωταρχικό ερώτημα την ασύρματη κάλυψη ενός εμπορικού πλοίου, έγινε η χρήση του LoRaWAN Module[40] του λογισμικού προσομοίωσης NS3. Το module αυτό περιλαμβάνει δύο βασικά μοντέλα:

- Το μοντέλο LoRa PHY layer, που αφορά τα χαρακτηριστικά του υλικού (LoRa Chips) για την επικοινωνία σε φυσικό επίπεδο.
- Το μοντέλο LoRaWAN MAC layer, που περιγράφει την επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη.

Δύο τύποι συσκευών υπάρχουν στο μοντέλο αυτό, όπως καθορίζεται και από το πρωτόκολλο επικοινωνίας LoRaWAN. Τις **End Device (ED)** συσκευές που έχουν μοντελοποιηθεί σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του πομποδέκτη της εταιρείας Semtech SX1272 και τις συσκευές **Gateway (GW)** με βάση τον πομποδέκτη SX1301, οι οποίες υλοποιούνται με τις κλάσεις *LoraPhy* και *LoraMac*.

Το φυσικό επίπεδο υλοποιείται με τη βοήθεια των κλάσεων *EndDeviceLoraPhy* και *GatewayLoraPhy*. Στο επίπεδο αυτό λαμβάνονται υπόψιν δύο βασικοί παράγοντες. Η ευαισθησία (Sensitivity) του δέκτη και η ορθογωνιότητα (Orthogonality) μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων που φτάνουν ταυτόχρονα στον δέκτη (δηλαδή στο Gateway), έτσι ώστε να αποκριθεί αν το πακέτο έχει ληφθεί σωστά.

Το MAC Layer μοντελοποιείται με τις κλάσεις *EndDeviceLoRaWANMac*, *ClassAEndDeviceLoRaWANMac* και *GatewayLoRaWANMac*. Στο επίπεδο αυτό δίνεται η δυνατότητα εγκατάστασης μιας εφαρμογής “Network Server” σε μια από τις συσκευές, η οποία διαχειρίζεται το σύνολο του δικτύου. Τονίζεται επίσης ότι το module αυτό λαμβάνει υπόψιν την παράλληλη λήψη σημάτων, την ευαισθησία του δέκτη, αλλά και τις ανοχές του δικτύου σε σχέση με τις παρεμβολές (interference) μεταξύ των πακέτων.

6.3 Μοντελοποίηση του καναλιού

Το μοντέλο του καναλιού συντίθεται από τις τέσσερις παρακάτω κλάσεις.

1. Building
2. MobilityBuildingInfo
3. BuildingsPropagationLossModel
4. HybridBuildingsPropagationLossModel

Η κλάση **Building** χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός ή περισσότερων κτιρίων. Στο εσωτερικό των κτιρίων μπορεί να περιέχονται ένας ή και περισσότεροι πομποδέκτες. Τα βασικά χαρακτηριστικά της κλάσης αυτής είναι:

- Boundaries: Όπου καθορίζεται το μέγεθος του κτιρίου στις τρεις διαστάσεις.
- BuildingType: Το είδος του κτιρίου (π.χ. office)
- SetExtWallsType: Ο τύπος των εξωτερικών τοίχων ανάλογα με το υλικό κατασκευής
- Nfloors: Το πλήθος των ορόφων του κτιρίου.

- NroomsX: Το πλήθος των δωματίων ως προς των άξονα x.
- NroomsY: Το πλήθος των δωματίων ως προς των άξονα y.

Κατασκευάστηκαν τρία διαφορετικά κτίρια (buildings). Το ένα κτίριο αντιπροσωπεύει το μηχανοστάσιο (Engine Room-er) του πλοίου, το άλλο τον χώρο ενδιαίτησης (accommodation-acc) και το τρίτο τις δεξαμενές φορτίου (Cargo Tank-ct). Στην κλάση Building προστέθηκαν δύο επιπλέον τύποι τοίχων. Ο τύπος SteelWall40mm αντιπροσωπεύει τους εξωτερικούς τοίχους του πλοίου και το κατάστρωμα. Ο τύπος SteelWall12_5mm αντιπροσωπεύει τους εξωτερικούς τοίχους του χώρου ενδιαίτησης και τον χώρο του μηχανοστασίου. Οι τιμές απωλειών εξασθένησης από τους εσωτερικούς τοίχους έχουν επιλεγεί σύμφωνα με την ανάλυση των δύο παραπάνω κεφαλαίων.

Η κλάση **MobilityBuildingInfo** εντοπίζει αν ένας κόμβος βρίσκεται εντός ενός κτιρίου και σε ποιο κτίριο βρίσκεται. Η κλάση αυτή συνεργάζεται με την κλάση **BuildingsPropagationLossModel** και υπολογίζει τη συμπεριφορά των κόμβων μεμονωμένα, αλλά και σε σχέση με τους άλλους κόμβους. Επιπλέον, εφαρμόζει το φαινόμενο shadowing, το οποίο δημιουργείται από τα διάφορα αντικείμενα που βρίσκονται μεταξύ πομπού και δέκτη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε μοντέλο διάδοσης από τις βιβλιοθήκες του NS3, αλλά μέχρι στιγμής το μοντέλο το οποίο συμπεριλαμβάνει τις περισσότερους παραμέτρους για την προσομοίωση μοντέλων εσωτερικού χώρου είναι το BuildingsPropagationLossModel.

Η κλάση **HybridBuildingsPropagationLossModel** ουσιαστικά περιέχει τα τρία παρακάτω μοντέλα:

1. OkumuraHataPropagationLossModel (OH) (at frequencies > 2.3 GHz substituted by Kun2600MhzPropagationLossModel)
2. ItuR1411LosPropagationLossModel
ItuR1411NlosOverRooftopPropagationLossModel (I1411)
3. ItuR1238PropagationLossModel (I1238)

Η κλάση επιλέγει ένα από τα τρία παραπάνω μοντέλα έχοντας ως κριτήριο την θέση του κόμβου στον χώρο, αν είναι μέσα ή έξω από ένα κτίριο και την απόστασή του από τον δέκτη. Στην παρούσα προσομοίωση έγιναν αλλαγές στον κώδικα, έτσι ώστε τα διαφορετικά κτίρια να αντιμετωπίζονται σαν να είναι ένα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται το μοντέλο ItuR1238 σε κάθε περίπτωση.

Το **ItuR1238 Propagation Loss Model** περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση

$$L_{total} = 20 \log(f) + N \log d + L_f(n) - 28 \quad (dB) \quad (30)$$

Όπου:

- N = ο συντελεστής απωλειών ισχύος λόγω απόστασης
- f = η συχνότητα σε MHz
- d = η απόσταση σε μέτρα
- L_{floor}(n) = οι απώλειες ισχύος λόγω των ορόφων,

n είναι το πλήθος των ορόφων που παρεμβάλλονται μεταξύ του πομπού και του δέκτη.

Το **Buildings Propagation Loss Model** προσφέρει πρόσθετα χαρακτηριστικά σχετικά με τη διάδοση των κυμάτων σε κτίρια. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα ακόλουθα:

- External Wall Loss (EWL)
Αυτό το στοιχείο μοντελοποιεί τις απώλειες διείσδυσης λόγω των εξωτερικών τοίχων του κτιρίου.
- Internal Walls Loss (IWL)
Αυτό το στοιχείο μοντελοποιεί τις απώλειες διείσδυσης λόγω των εσωτερικών τοίχων εντός του ίδιου κτιρίου.

Η συνολική απώλεια η οποία οφείλεται στην παρουσία τοίχων, υπολογίζεται υποθέτοντας ότι κάθε εσωτερικός τοίχος έχει σταθερή απώλεια διείσδυσης L_{siw} και προσεγγίζει τον αριθμό των τοιχωμάτων που διαπερνιούνται από το σήμα, υπολογίζοντας την απόσταση του Μανχάταν (σε αριθμό δωματίων) μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Αν οι μεταβλητές x_1 , y_1 , x_2 και y_2 είναι ο αριθμός των δωματίων κατά μήκος του άξονα x και y αντίστοιχα για τους κόμβους 1 και 2, η συνολική απώλεια L_{IWL} υπολογίζεται ως:

$$L_{IWL} = L_{siw} (|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|) \quad (31)$$

- Height Gain Model (HG)
- Shadowing Model

Το φαινόμενο σκίασης μοντελοποιείται σύμφωνα με την log-normal κατανομή, η οποία μεταβάλλεται με βάση την τυπική απόκλιση συναρτήσει της σχετικής θέσης μεταξύ πομπού και δέκτη. Για κάθε ζευγάρι κόμβων δημιουργείται μια τυχαία μεταβλητή η οποία μένει σταθερή κατά την διάρκεια όλης της προσομοίωσης. Η μέση τιμή λόγω της απώλειας σκίασης είναι πάντα 0dB και η διακύμανση περιγράφεται από τα τρία παρακάτω μοντέλα.

Outdoor:

$$X_o = N(\mu_o, \sigma_o^2) \quad , \quad \sigma_o = 7 \text{ dB} \quad (32)$$

Indoor:

$$X_i = N(\mu_i, \sigma_i^2) \quad , \quad \sigma_i = 10 \text{ dB} \quad (33)$$

External walls penetration:

$$X_{EWP} = N(\mu_{EWP}, \sigma_{EWP}^2), \quad \sigma_{EWP} = 5 \text{ dB} \quad (34)$$

Στην περίπτωση όπου ο ένας κόμβος βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο και ο άλλος σε εσωτερικό, τότε υπολογίζεται η τυπική απόκλιση ως το άθροισμα των τετραγώνων τις τυπικής απόκλισης του κόμβου που βρίσκεται εσωτερικά και του κόμβου που βρίσκεται εξωτερικά. Οπότε η διακύμανση μιας κατανομής που προκύπτει από το άθροισμα δύο ανεξάρτητων κανονικών κατανομών είναι το άθροισμα των διακυμάνσεών τους.

$$\begin{aligned} X &\sim N(\mu, \sigma^2) \text{ και } Y \sim N(\nu, \tau^2) \\ Z = X + Y &\sim Z(\mu + \nu, \sigma^2 + \tau^2) \\ \Rightarrow \sigma_{io} &= \sqrt{(\sigma_o^2 + \sigma_w^2)} \end{aligned} \quad (35)$$

Οπότε, σύμφωνα με τα παραπάνω η εξίσωση εξασθένησης της ισχύος του σήματος διαμορφώνεται ανάλογα με το σημείο στο οποίο βρίσκεται ο δέκτης και ο πομπός ως εξής:

$$ItuR1238(a, b) = 20 \log(f) + 10 n \log(d) + L_f(n) - 28 + X_\sigma \text{ (dB)} \quad (36)$$

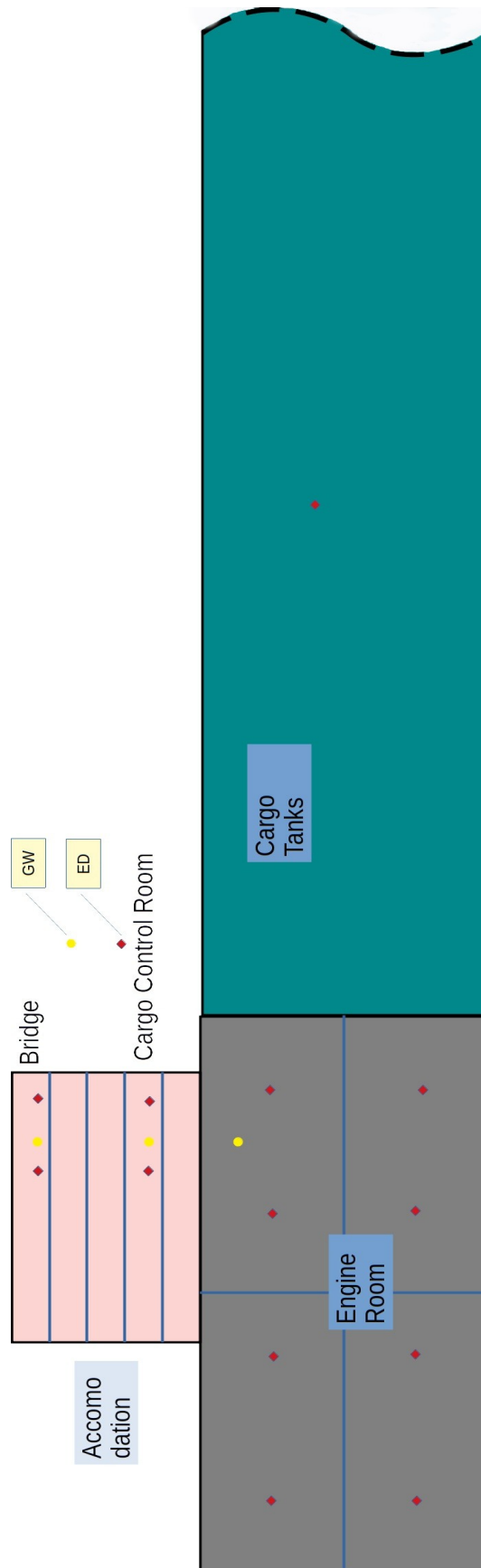
όπου:

- Internal Walls Loss = 20 dB
- External Walls Loss = Καθορίζεται από την κλάση δημιουργίας του εκάστοτε building.
- Δημιουργήθηκαν τρεις νέοι τύποι κτιρίων Accommodation (ac), EngineRoom (er), και CargoTank (ct).
- $f = 868000000.0$
- n = Path loss exponent καθορίζεται ανάλογα με το σημείο που βρίσκεται ο κόμβος.
- Στην περίπτωση που ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται και οι δύο στο Engine Room ή και οι δύο στο Cargo Tank τότε:
Ltotal ItuR1238 + InternalWallsLoss με συντελεστή $n=1.6$
- Στην περίπτωση που ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται και οι δύο στο Accommodation τότε:

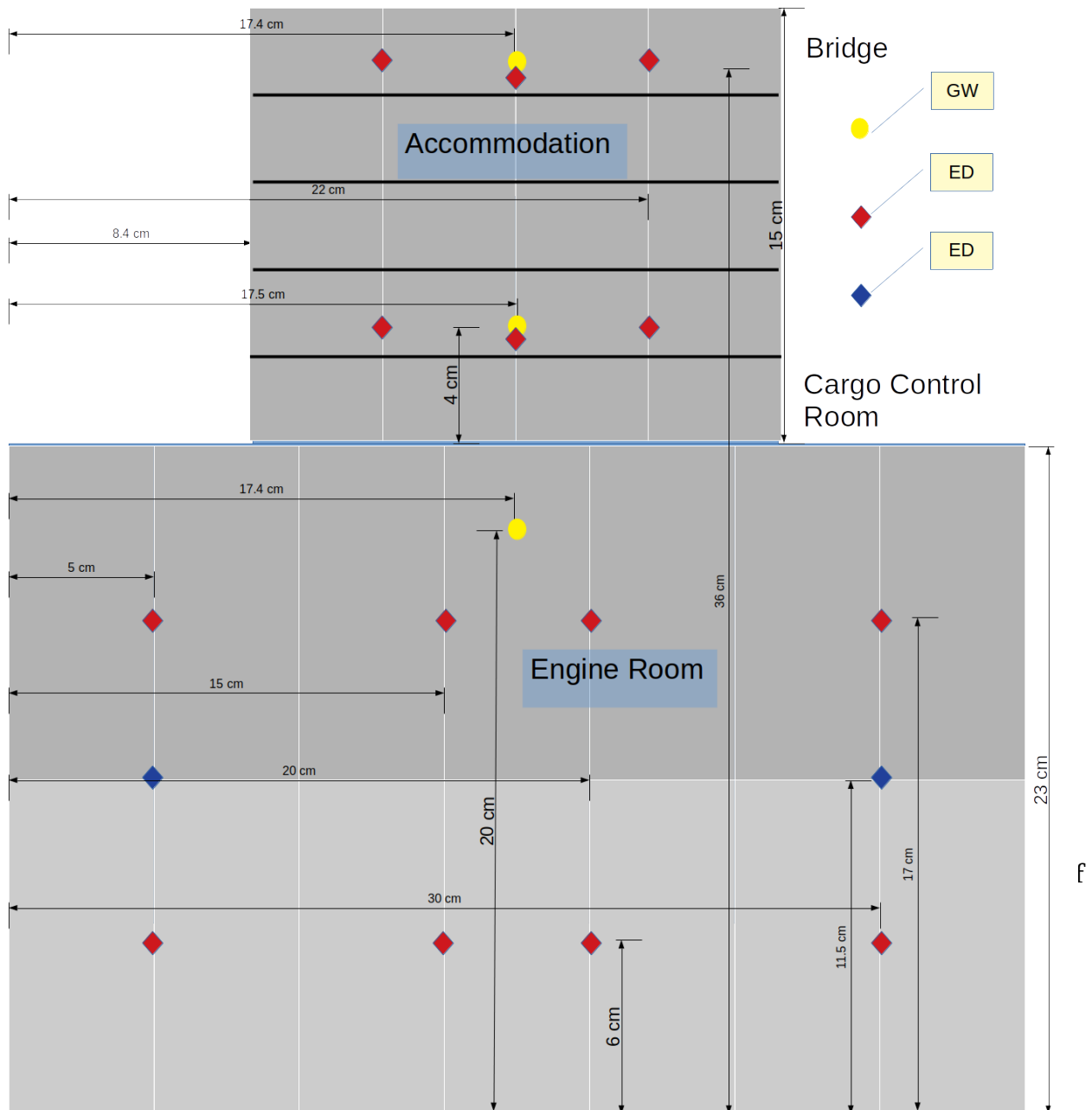
$L_{total} = I_{tuR1238} + InternalWallsLoss$ με συντελεστή $n=2.2$

- Στην περίπτωση που ο πομπός και ο δέκτη βρίσκονται σε δύο διαφορετικά κτίρια στο Engine Room στο CargoTank τότε:
 $loss = I_{tuR1238} (a, b) + InternalWallsLoss (a1, b1) + ExternalWallLoss (a1) + ExternalWallLoss (b1)$
με συντελεστή $n=1.6$ (μέση τιμή για τους δύο χώρους 1.9)
- Στην περίπτωση που ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε δύο διαφορετικά κτίρια στο Engine Room και στο Accommodation ή στο CargoTank και στο Engine Room τότε:
 $loss = I_{tuR1238} (a, b) + InternalWallsLoss (a1, b1) + ExternalWallLoss (a1) + ExternalWallLoss (b1)$
με συντελεστή $n=1.9$ (μέση τιμή για τους δύο χώρους 1.9)

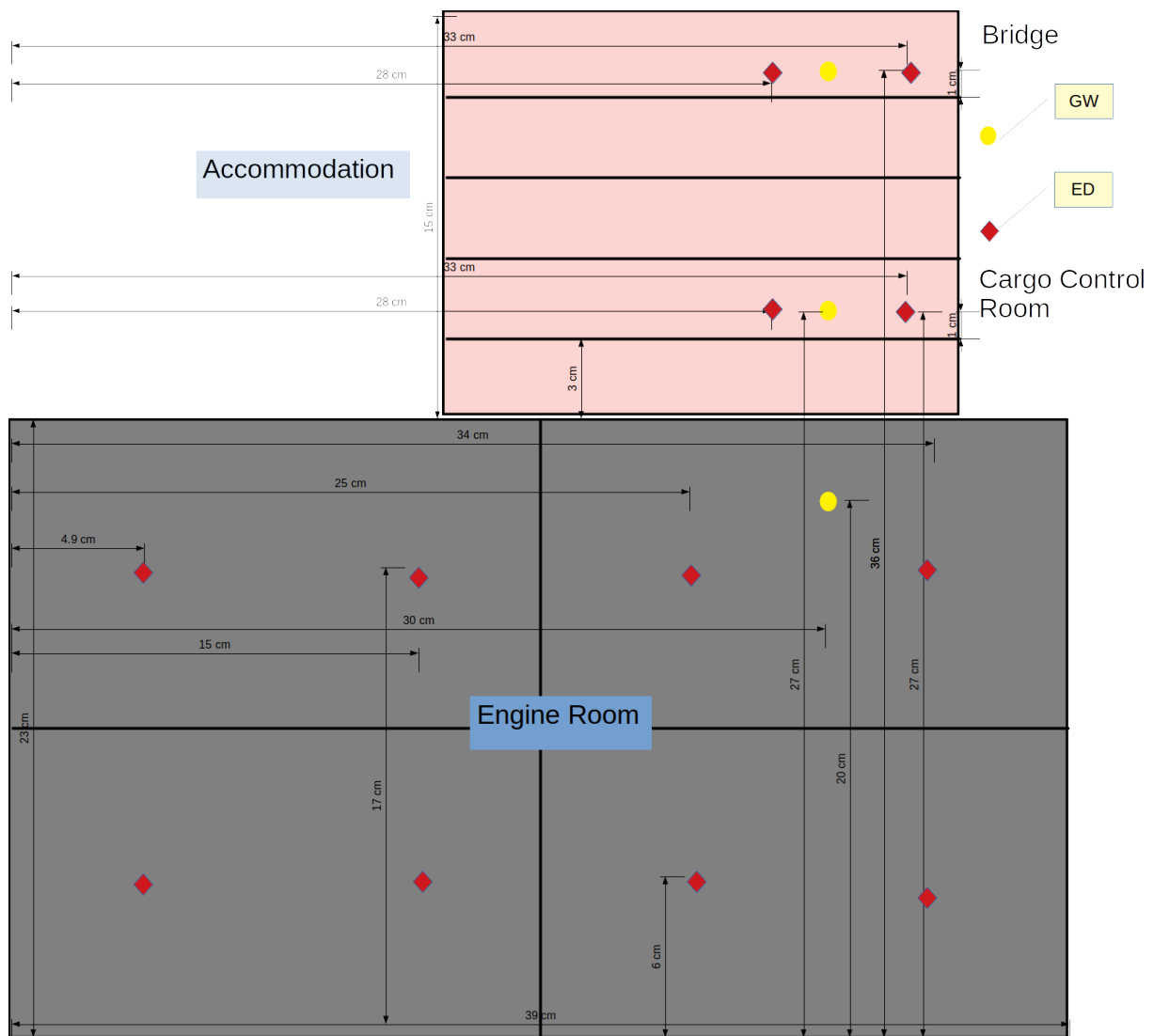
Στη συνέχεια έγιναν τρεις προσομοιώσεις για τρεις διαφορετικές θέσεις του gateway. Σε αυτά τα τρία σημεία του πλοίου είναι δυνατή η πρόσβαση στο ενσύρματο δίκτυο (vessel backbone network). Σε αυτά τα σημεία επίσης μπορεί να τοποθετηθεί και ο Server. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζεται η διάταξη των κόμβων, όπου με κίτρινο απεικονίζονται οι τρεις διαφορετικές θέσεις του gateway, με κόκκινο οι κόμβοι που βρίσκονται στο χώρο ενδιαίτησης και του μηχανοστασίου ενώ με μπλε οι κόμβοι που βρίσκονται στις δεξαμενές φορτιού.



Drawing 1: General view (Starboard).



Drawing 2: Transverse section. Layout of the nodes, where the three different positions of the gateway are shown in yellow. End Devices located in the accommodation and the engine room are shown in red and nodes in the cargo tanks are shown in blue. Scale 1:100



Drawing 3: Side view (Starboard). The layout of the End Devices, where the three different positions of the gateway are shown in yellow, the nodes located in the accommodation and the engine room are shown in red. Scale 1:100

6.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στον πίνακα 4 εμφανίζονται οι βασικές παράμετροι του δικτύου και στον πίνακα 5 τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τρεις διαφορετικές θέσεις του Gateway.

Table 4: Βασικές παράμετροι του δικτύου.

Gateway Position	Number of End Devices	Number of Gateways	Application Time Period	Simulation Time
Bridge	47	1	60 sec	3600 sec
CCR	47	1		
ECR	47	1		

Table 5: Αποτελέσματα προσομοίωσης.

Packets Sent	Received	Interfered	No More Receivers	Under Sensitivity	Lost Because TX
2501	2334	34	0	133	0
2766	2689	55	0	22	0
2766	2684	60	0	22	0

Σε όλες τις περιπτώσεις, τα χαμένα πακέτα που δεν λαμβάνονται λόγω του ότι στον κόμβο φτάνει χαμηλή ισχύς (under sensitivity), οφείλεται στον κόμβο που βρίσκεται στο μπροστινό άκρο του πλοίου (cargo tanks). Αυτό οφείλεται όχι μόνο στην απόσταση, αλλά και στα εσωτερικά τοιχώματα των δεξαμενών του φορτίου.

Παρατηρήθηκε ότι ο κόμβος στην θέση ($x=15.0$, $y=5.0$, $z=17.0$) λόγω του μεγάλου χρόνου που απαιτείται για την αποστολή του σήματος στον αέρα (Time on air), δεν προλαβαίνει να στείλει όλα τα πακέτα, αλλά στέλνει μόνο 22. Εφόσον, η περίοδος αποστολής είναι 60sec και ο χρόνος προσομοίωσης 3600sec, ο συνολικός αριθμός των πακέτων που θα έπρεπε να σταλεί είναι 60 πακέτα. Αυτό οφείλεται στον περιορισμό που θέτει το πρωτόκολλο έτσι ώστε να μην υπερφορτώνεται το κανάλι (Duty cycle). Στο διάγραμμα 2 εμφανίζεται η απόδοση του δικτύου και συγκεκριμένα παρουσιάζεται το ποσοστό των πακέτων που παραλήφθηκαν με επιτυχία σε σχέση με το σύνολο των πακέτων που στάλθηκαν συνολικά από όλους τους κόμβους (Packet Delivery Ratio – PDR).

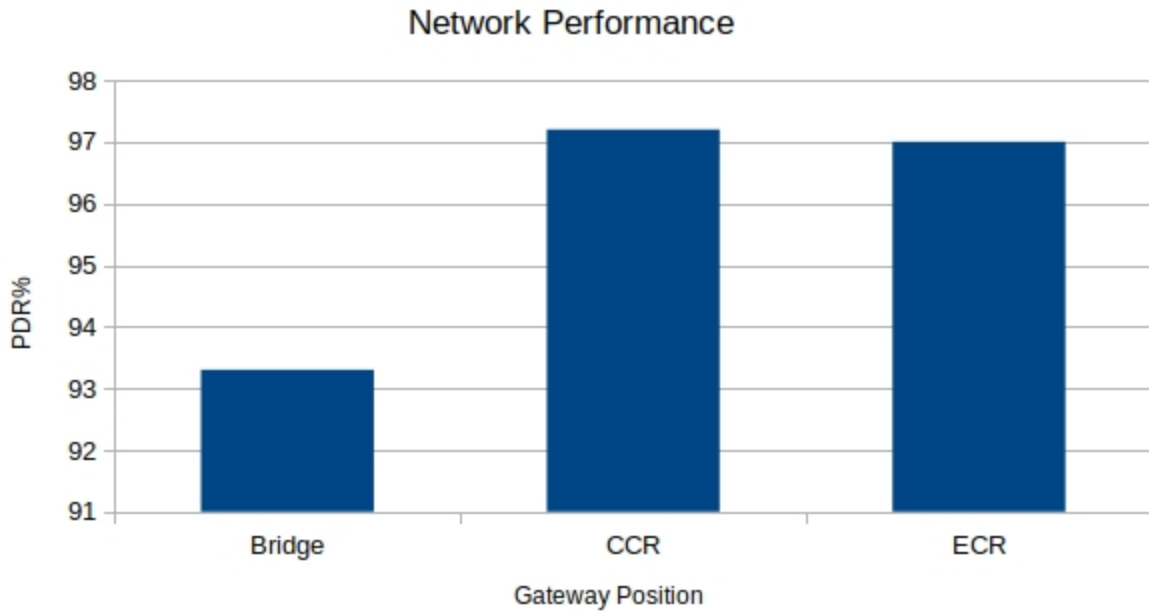


Chart 2: Packet Delivery Ratio for three different gateway position without End Devices in Cargo Tank and Duty Cycle limitation.

Η συγκεκριμένη εφαρμογή αφορά ένα ιδιωτικό δίκτυο, όπου ο χρήστης του καναλιού είναι ένας. Για αυτό τον λόγο η παράμετρος Duty Cycle μηδενίστηκε έτσι ώστε ο χρόνος αποστολής των πακέτων να είναι ανεξάρτητος από τον περιορισμό που θέτει το πρωτόκολλο για λόγους ισοκατανομής της χωρητικότητας του καναλιού για όλους τους χρήστες. Στον πίνακα 6 και στο διάγραμμα 3 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις ίδιες παραμέτρους του δικτύου και τις τρεις διαφορετικές θέσεις του Gateway, χωρίς τον περιορισμό του Duty Cycle.

Table 6: Αποτελέσματα προσομοίωσης (χωρίς τον περιορισμό του Duty Cycle).

Packets Sent	Received	Interfered	No More Receivers	Under Sensitivity	Lost Because TX
2820	2434	26	0	360	0
2820	2677	83	0	60	0
2820	2709	51	0	60	0

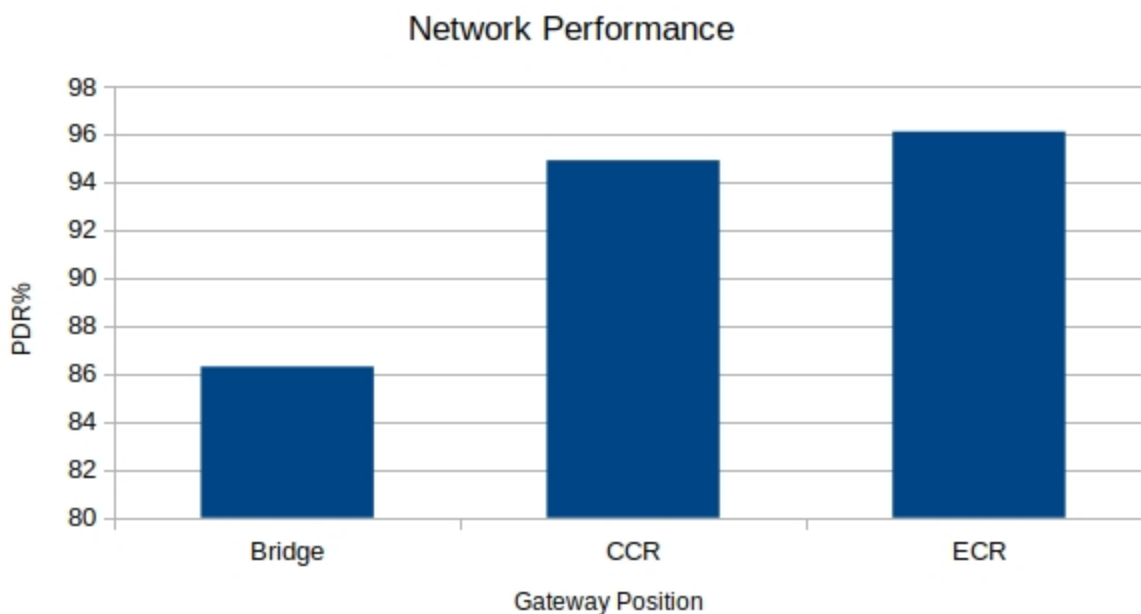


Chart 3: Packet Delivery Ratio for three different gateway position without Duty Cycle limitation.

Παρατηρείται, ότι χωρίς τον περιορισμό του Duty Cycle το PDR έχει μειωθεί. Αυτό οφείλεται στους απομακρυσμένους κόμβους, όπου η ισχύς που φτάνει στο gateway είναι πολύ μικρή, έτσι ώστε να καταφέρει να αποκωδικοποιήσει το σήμα (under sensitivity). Επιπρόσθετα, τα πακέτα που αποστέλλονται τελικά με επιτυχία έχουν αυξηθεί και αυτό κυρίως φαίνεται στην περίπτωση όπου το gateway βρίσκεται στην γέφυρα. Στην περίπτωση αυτή, δύο κόμβοι λόγω του περιορισμού που θέτει το Duty Cycle στέλνουν μόνο 22 πακέτα ο καθένας και κάνοντας άρση του περιορισμού αυτού ο κάθε κόμβος εν τέλει στέλνει 60 πακέτα. Θα περίμενε κανείς με την αύξηση των πακέτων να αυξηθούν και τα χαμένα πακέτα λόγω παρεμβολών μεταξύ των πακέτων, όμως κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται λόγω του μικρού αριθμού κόμβων. Σε κάθε περίπτωση η βέλτιστη θέση για το gateway είναι στο Engine Control Room.

Για την επιβεβαίωση του προηγούμενου ισχυρισμού εκτελέστηκε μια προσομοίωση χωρίς τους κόμβους που βρίσκονται στον χώρο του Cargo Tank, τα αποτελέσματά τις φαίνονται στους πίνακες 7, 8 και 9 και στα διαγράμματα 4 και 5.

Table 7: Βασικές παράμετροι του δικτύου για τις τρεις διαφορετικές θέσεις του gateway χωρίς τους κόμβους στον χώρο του Cargo Tank.

Gateway Position	Number of End Devices	Number of Gateways	Application Time Period	Simulation Time
Bridge	44	1	60 sec	3600sec
CCR	44	1		
ECR	44	1		

Table 8: Αποτελέσματα προσομοίωσης (με τον περιορισμό του Duty Cycle).

Packets Sent	Received	Interfered	No More Receivers	Under Sensitivity	Lost Because TX
2435	2308	61	0	66	0
2640	2527	113	0	0	0
2642	2561	63	0	0	0

Table 9: Αποτελέσματα προσομοίωσης (χωρίς τον περιορισμό του Duty Cycle).

Packets Sent	Received	Interfered	No More Receivers	Under Sensitivity	Lost Because TX
2640	2362	98	0	180	0
2640	2527	113	0	0	0
2640	2566	74	0	0	0

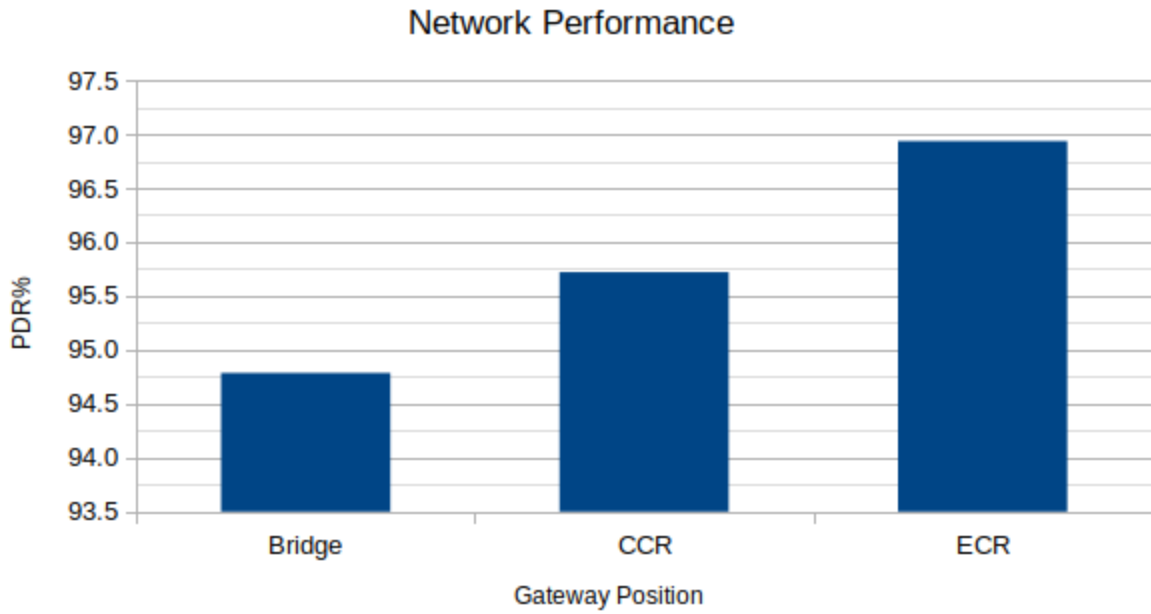


Chart 4: Packet Delivery Ratio for three different gateway position with Duty Cycle limitation.

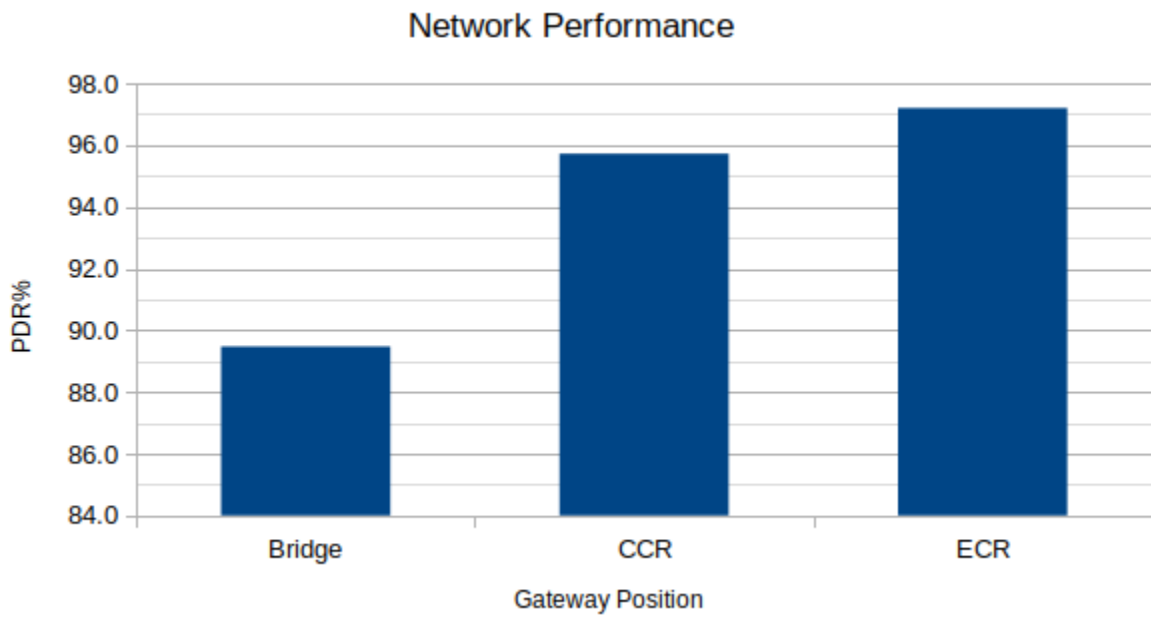


Chart 5: Packet Delivery Ratio for three different gateway position without Duty Cycle limitation.

Στα διαγράμματα 4 και 5 παρατηρείται η αύξηση του PDR όταν το gateway βρίσκεται στους χώρους του μηχανοστασίου (ECR) και του χώρου ελέγχου του φορτίου (CCR), ενώ έχει αρθεί ο περιορισμός του Duty Cycle. Η μείωση του PDR όταν το gateway βρίσκεται στο χώρο της γέφυρας (Bridge), οφείλεται και πάλι σε κόμβους οι οποίοι δεν καλύπτονται από το δίκτυο (Under Sensitivity = 180), με αποτέλεσμα να χάνονται όλα τα πακέτα. Σε αυτό το σημείο βλέπουμε ότι η τοποθέτηση του gateway στον χώρο ελέγχου του μηχανοστασίου πλεονεκτεί έναντι των άλλων δύο τοποθεσιών.

Στην συνέχεια, προστέθηκε ένα μοντέλο για τη κατανάλωση ενέργειας. Το μοντέλο αυτό δίνει την δυνατότητα υπολογισμού της κατανάλωσης ενέργειας για κάθε κόμβο. Αρχικά, ορίζεται η χωρητικότητα της πηγής σε Joule και η τάση λειτουργίας σε Volt. Έπειτα, καθορίζονται οι τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας για κάθε κόμβο. Ορίζονται δύο καταστάσεις αδράνειας (standby mode και sleep mode) όπου ο πομποδέκτης είτε είναι σε μεταβατικό στάδιο μεταξύ εκπομπής και κατάστασης αδράνειας, είτε δεν εκπέμπει. Δηλαδή, μια κατάσταση όπου ο πομποδέκτης εκπέμπει πακέτα (Tx mode) και μια κατάσταση όπου ο πομποδέκτης λαμβάνει (Rx mode). Οι καταστάσεις αυτές και αντίστοιχα το ρεύμα που καταναλώνεται είναι οι παρακάτω:

- Standby mode current = 0.0014 A
- Tx mode current = 0.028 A
- Sleep mode current = 0.0000015 A
- Rx mode current = 0.0112 A

Στα επόμενα διαγράμματα 6, 7 και 8 φαίνονται τα αποτελέσματα της συνολικής κατανάλωσης ρεύματος για κάθε κόμβο, για τα τις τρεις διαφορετικές τοποθεσίες του gateway. Οι παράμετροι προσομοίωσης του δικτύου απεικονίζονται στον πίνακα 4.

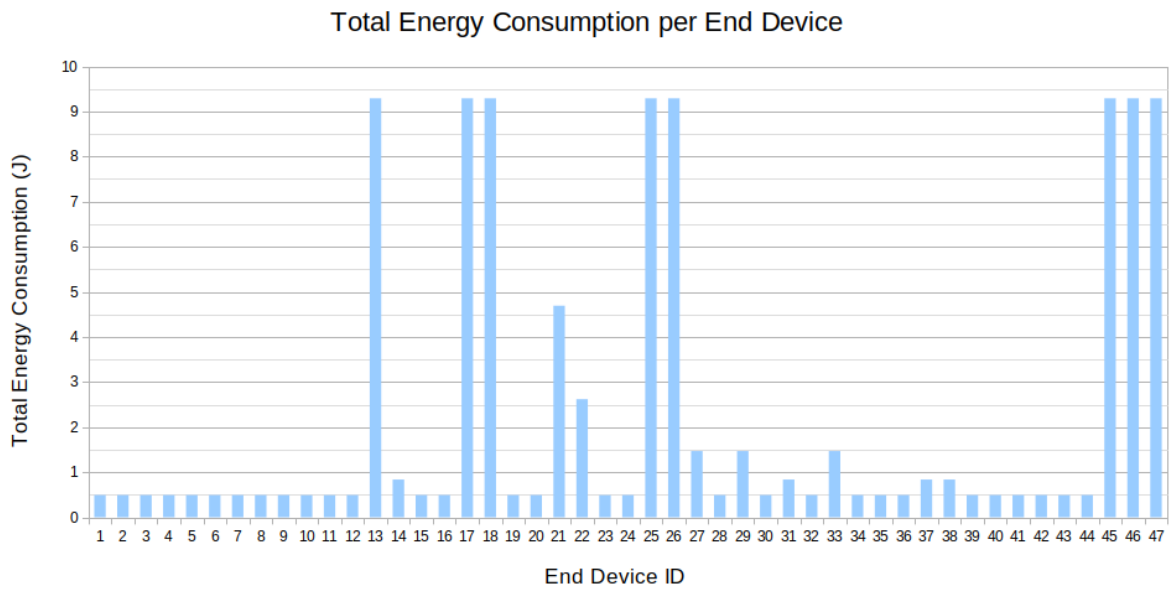


Chart 6: The total energy consumption for each End Device. Gateway located at bridge.

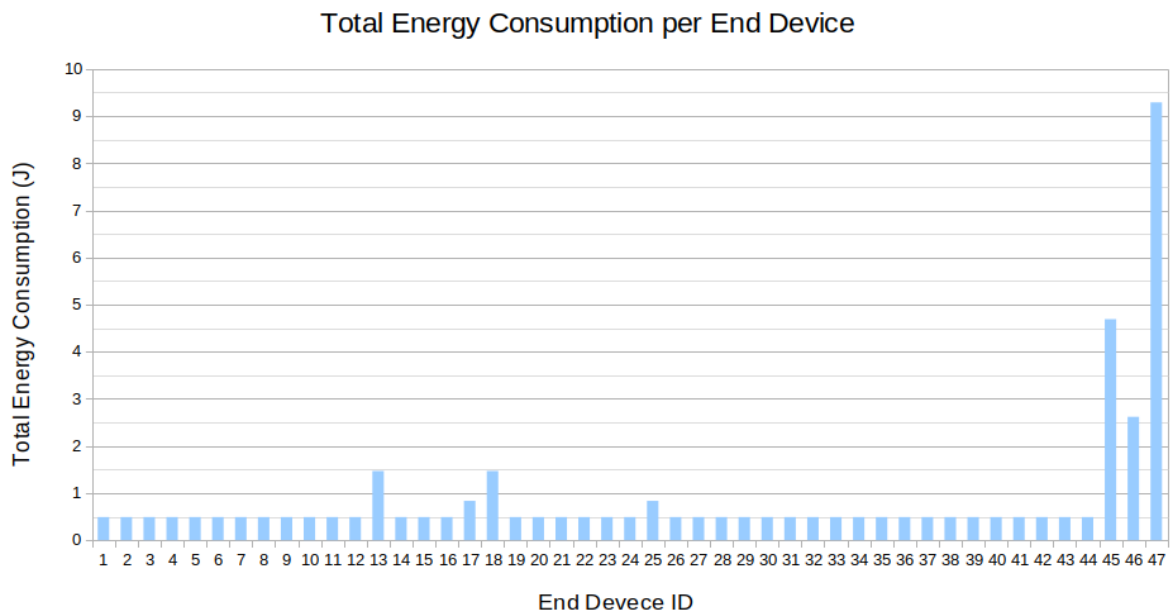


Chart 7: The total energy consumption for each End Device. Gateway located at Cargo Control Room.

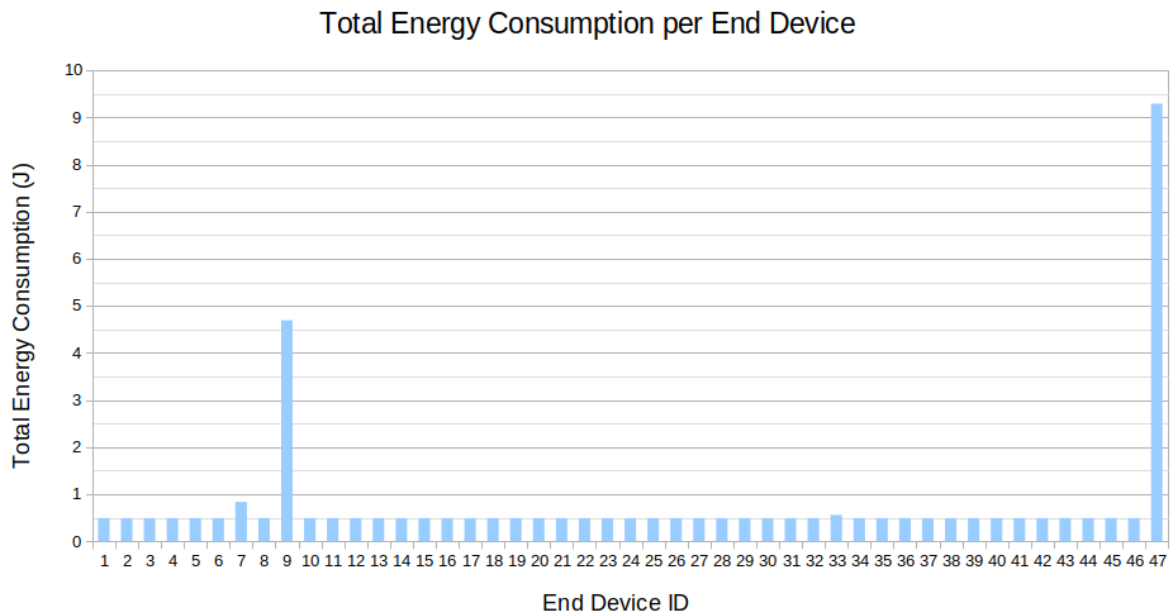


Chart 8: The total energy consumption for each End Device. Gateway located at Engine Control Room.

Η αύξηση της κατανάλωσης ρεύματος οφείλεται στη συνεχόμενη επανεκπομπή των πακέτων με μέγιστο Spreading Factor ($SF = 12$). Αυτό κυρίως οφείλεται στη θέση στην οποία βρίσκεται ο κόμβος, δηλαδή εξαρτάται από την απόσταση, αλλά και από τους τοίχους, οι τους ορόφους που μεσολαβούν μεταξύ του gateway και του εκάστοτε κόμβου. Το μέγιστο συνολικό ρεύμα το καταναλώνει ο κόμβος 47, ο οποίος βρίσκεται στο μπροστινό άκρο του χώρου του φορτίου και δεν μπορεί να επικοινωνήσει με το Gateway, έτσι συνεχώς βρίσκεται στην κατάσταση αποστολής η οποία έχει την μέγιστη κατανάλωση (Tx mode current = 0.028 A).

Το επόμενο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της μέσης κατανάλωσης 43 End Devices (σύμφωνα με τις παραμέτρους του πίνακα 7, ενώ το gateway βρίσκεται στο ECR) σε σχέση με την περίοδο αποστολής των πακέτων (Application Time Period). Παρατηρείτε ότι η αύξηση της κατανάλωσης ρεύματος είναι εκθετική, αυτό οφείλεται στην αύξηση των παρεμβολών μεταξύ των πακέτων που φτάνουν σχεδόν ταυτόχρονα στον ίδιο δέκτη. Κυρίως όμως οφείλεται στο ότι οι κόμβοι παραμένουν σε κατάσταση αποστολής (Tx mode) για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Energy Consumption vs Application Period Time

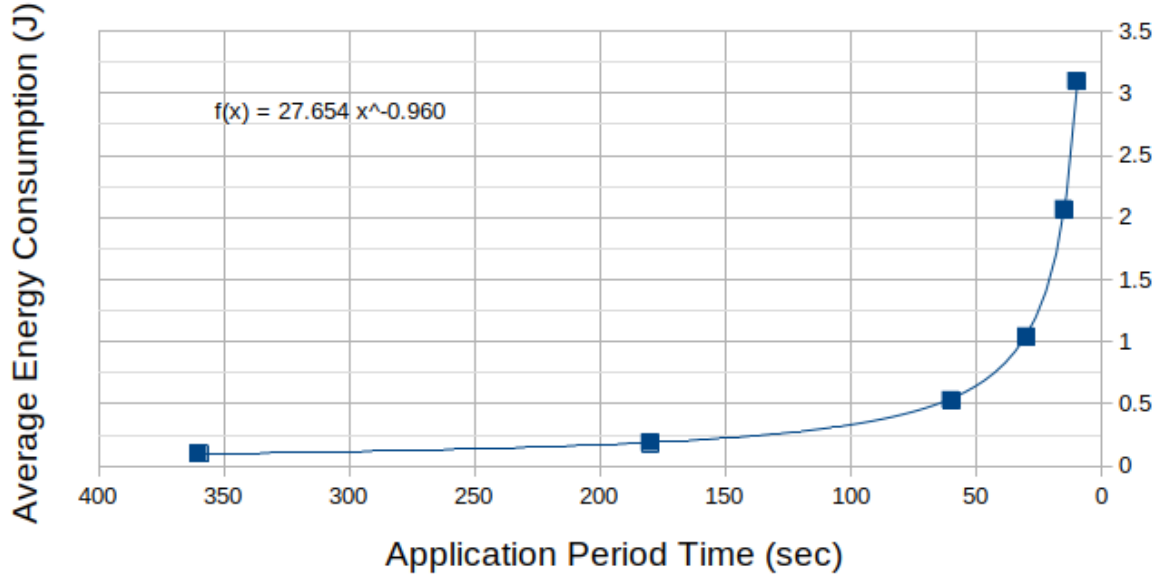


Chart 9: Average energy consumption for different application time periods

7 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με όλα όσα αναφέρθηκαν σε αυτή την εργασία, προκύπτει ότι η ναυτιλία και οι θαλάσσιες μεταφορές έχουν να επιτελέσουν ένα σημαντικό ρόλο στην μεταφορά εμπορευμάτων παγκοσμίως. Παράλληλα όμως απαιτείται η βέλτιστη διαχείριση των καυσίμων και η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, έτσι ώστε να είναι βιώσιμος και ασφαλής ο τομέας αυτός.

Οι νέες τεχνολογίες που αναπτύσσονται στον κλάδο της ενέργειας, όπως οι ανανεώσιμες μορφές, και στον κλάδο της πληροφορικής όπως η δυνατότητα διαχειρίσεις όλο και μεγαλύτερου όγκου δεδομένων με όλο και μεγαλύτερες ταχύτητες θα κατευθύνουν τις κοινωνίες σε ένα καλύτερο αύριο. Η μείωση του κόστους των ασύρματων επικοινωνιών σε συνδυασμό με την πληθώρα αισθητήρων, ήδη διαδραματίζουν ένα σημαντικό ρόλο σε πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς στην στεριά. Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στον κλάδο της ναυτιλίας και να συμβάλλουν καθοριστικά στη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Συγκεκριμένα, η τεχνολογία LoRa που μελετήθηκε σε αυτή την εργασία έχει τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία της επιτρέπουν την ανάπτυξη ενός εκτεταμένου ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Οποσδήποτε, μπορεί να καλύψει τις ανάγκες όλων των μετρήσεων που απαιτούνται σήμερα από τους παγκόσμιους φορείς και οργανισμούς που εκδίδουν τους κανονισμούς που διέπουν την ναυτιλία και να συνδράμει στην μείωση των ρύπων. Επίσης, μπορεί να συμβάλει στην μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου και κατ' επέκταση του κόστους του ταξιδιού. Ακόμη, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την συντήρηση των μηχανών του πλοίου δίνοντας την δυνατότητα στους μηχανικούς, εντός αλλά και εκτός του πλοίου, μια πληρέστερη εικόνα για την κατάστασή του.

Η ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου LoRa μέσα στον χώρο του πλοίου δεν είναι μεγάλη, καθώς οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων και του gateway είναι μικρές σε σχέση με άλλες εφαρμογές όπου το δίκτυο μπορεί να εκτείνεται και αρκετά χιλιόμετρα. Παρόλα αυτά, η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι μια πρόκληση, λόγω των υλικών κατασκευής του. Η ζεύξη μεταξύ διαφορετικών ορόφων και δωματίων στο πλοίο, επιτυγχάνεται μόνο μέσω ανοιγμάτων όπως επισημάνθηκε στο κεφάλαιο 4 και 5.

Από τα αποτελέσματα της προσημείωσης γίνεται φανερό ότι, η ασύρματη κάλυψη του πλοίου μπορεί να επιτευχθεί κατά το μεγαλύτερο μέρος του ακόμη και με την εγκατάσταση μόνο ενός gateway. Σε χώρους όπως είναι η δεξαμενές αποθήκευσης φορτίου η ζεύξη καθίσταται αδύνατη, παρόλα αυτά σε νεόχτιστα πλοία μπορεί να προβλεφθεί η εγκατάσταση κεραίας έξω από τα τοιχώματα των δεξαμενών. Η αρχιτεκτονική του δικτύου βάση των αποτελεσμάτων αυτής της μελέτης είναι αρκετά σημαντική όχι μόνο για την καλύτερη και αδιάλειπτη επικοινωνία των ασύρματων αισθητήρων με τον κόμβο, αλλά και για την μείωση της κατανάλωσης του κάθε κόμβου. Αυτό γίνεται αντιληπτό, διότι η αύξηση της συχνότητας αποστολής των δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα την εκθετική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι με την βοήθεια της καμπύλης που εμφανίζεται στο διάγραμμα 9 μπορεί να εξαχθεί ένα συμπέρασμα κατά πόσο είναι εφικτό σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή οι ασύρματοι αισθητήρες να λειτουργήσουν με μπαταρία. Διότι καθαρυστικό ρόλο για την ποιότητα των αποτελεσμάτων από τα δεδομένα που συλλέγονται έχει η συχνότητα δειγματοληψίας του εκάστοτε μετρούμενου μεγέθους.

Τέλος, για την βελτίωση των παραπάνω αποτελεσμάτων απαιτούνται περισσότερες μετρήσεις, καθώς αυτές είναι πολύ περιορισμένες, σε περισσότερα πλοία, έτσι ώστε οι παράμετροι που εισάγονται στο μοντέλο αυτό να είναι περισσότερο ακριβείς.

Βιβλιογραφία

- [1] K. Q. Bui and L. P. Perera, “The Compliance Challenges in Emissions Control Regulations to Reduce Air Pollution from Shipping,” *Ocean. 2019 - Marseille, Ocean. Marseille 2019*, vol. 2019-June, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1109/OCEANSE.2019.8867420.
- [2] “European Maritime Transport Environmental Report 2021 — European Environment Agency.” <http://www.emsa.europa.eu/emter> (accessed Jan. 16, 2022).
- [3] “IMO and its role in protecting the world’s oceans.” <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/oceans-default.aspx> (accessed Jan. 16, 2022).
- [4] “EU maritime transport: first environmental impact report acknowledges good progress towards sustainability and confirms that more effort is needed to prepare for rising demand — European Environment Agency.” <https://www.eea.europa.eu/highlights/eu-maritime-transport-first-environmental> (accessed Jan. 16, 2022).
- [5] European Environment Agency and European Maritime Safety Agency, *European Maritime Transport Environmental Report 2021*. 2021.
- [6] M. A. Fun-sang Cepeda, N. N. Pereira, S. Kahn, and J. D. Caprace, “A review of the use of LNG versus HFO in maritime industry,” *Mar. Syst. Ocean Technol.*, vol. 14, no. 2–3, pp. 75–84, 2019, doi: 10.1007/s40868-019-00059-y.
- [7] B. Lin and C. Y. Lin, “Compliance with international emission regulations: Reducing the air pollution from merchant vessels,” *Mar. Policy*, vol. 30, no. 3, pp. 220–225, 2006, doi: 10.1016/j.marpol.2005.01.005.
- [8] A. Orlandi, A. Cappugi, R. Mari, F. Pasi, and A. Ortolani, “Meteorological navigation by integrating metocean forecast data and ship performance models into an ecdis-like e-navigation prototype interface,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 5, 2021, doi: 10.3390/jmse9050502.
- [9] M. P. Schultz, “Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering,” *Biofouling*, vol. 23, no. 5, pp. 331–341, 2007, doi: 10.1080/08927010701461974.

- [10] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low Power Wide Area Networks: An Overview,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [11] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT,” *2018 IEEE Int. Conf. Pervasive Comput. Commun. Work. PerCom Work. 2018*, pp. 197–202, 2018, doi: 10.1109/PERCOMW.2018.8480255.
- [12] B. Chaudhari and M. Zennaro, *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, Academic P. 2020.
- [13] J. G. Proakis and M. Salehi, *Communication System Engineering*. 2002.
- [14] K. L. Tsai, F. Y. Leu, I. You, S. W. Chang, S. J. Hu, and H. Park, “Low-Power AES Data Encryption Architecture for a LoRaWAN,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 146348–146357, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2941972.
- [15] Semtech, “LoRa Modulation Basics AN1200.22,” *App Note*, no. May, pp. 1–26, 2015, [Online]. Available: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>.
- [16] M. Chiani and A. Elzanaty, “On the LoRa Modulation for IoT: Waveform Properties and Spectral Analysis,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 5, pp. 8463–8470, 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2919151.
- [17] Semtech Corporation, “SX1272/3/6/7/8 LoRa Modem Design Guide, AN1200.13,” no. July, p. 9, 2013, [Online]. Available: <https://www.rs-online.com/>.
- [18] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, “A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 9, pp. 1–18, 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [19] T. M. Workgroup, “A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™ What is it?,” no. November, 2015, [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawantm>.
- [20] D. Magrin, “Network level performances of a LoRa system [Thesis],” 2016.
- [21] LoRa Alliance Technical Committee, “LoRaWAN 1.1 Specification,” *LoRaWAN 1.1 Specif.*, no. 1.1, p. 101, 2017, [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawantm-specification-v11>.
- [22] T. S. Rappaport and C. D. McGillem, “UHF Fading in Factories,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 7, no. 1, pp. 40–48, 1989, doi: 10.1109/49.16842.

- [23] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*. 2554.
- [24] P. KAVEH and A. H. LEVESQUE, *Networks Wireless Information*, Second Edi. A JOHN WILEY & SONS, INC.
- [25] J. S. Seybold, *Introduction to RF Propagation*. 2005.
- [26] D. J. Eyres and G. J. Bruce, *Ship Construction*. 2012.
- [27] P. G. Hadden, “Selection of materials for a modern warship,” *Mater. Des.*, vol. 10, no. 5, pp. 235–240, 1989, doi: 10.1016/S0261-3069(89)80060-3.
- [28] D. D. Georgiou and Mylona, *Ναυτιλιακές Γνώσεις*. Eugenides Foundation, 2554.
- [29] “Tanker | ship | Britannica.” <https://www.britannica.com/technology/tanker> (accessed Nov. 29, 2020).
- [30] ILO, “Mlc 2006,” *Int. Marit. Organ.*, vol. Part A, pp. 1–112, 2006.
- [31] Bereau Veritas, “Design and Construction of Crew Accommodation in respect of Title 3 of Maritime Labour Convention 2006 January 2017 Guidance Note,” *Bereau Verit.*, vol. 33, no. January, 2017.
- [32] E. N. Ζωγραφάκη, *Στοιχεία Ναυπηγίας.pdf*, 1st ed. ΑΘΗΝΑ: ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ, 2002.
- [33] ΙΩΑΝΝΗ Κ. ΔΑΓΚΙΝΗ and ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ Ι. ΓΛΥΚΑ, *Βοηθητικά Μηχανήματα Πλοίων*, 2nd ed. ΑΘΗΝΑ: ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ, 2017.
- [34] E. Tanghe, W. Joseph, P. Ruckebusch, L. Martens, and I. Moerman, “Intra-, inter-, and extra-container path loss for shipping container monitoring systems,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 11, no. 1, pp. 889–892, 2012, doi: 10.1109/LAWP.2012.2210694.
- [35] X. H. Mao and Y. H. Lee, “UHF propagation along a cargo hold on board a merchant ship,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 1, pp. 22–30, 2013, doi: 10.1109/TWC.2012.121112.110675.
- [36] Germanischer Lloyd, “Rules for Classification and Construction: Ship Technology - Bridge Arrangement and Equipment on Seagoing Ships,” 2012.
- [37] H. Kdouh *et al.*, “Double directional characterisation of radio wave propagation through metallic watertight doors on board ships,” *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 6, pp. 307–309, 2012, doi: 10.1049/el.2012.0310.

- [38] D. R. J. Estes, T. B. Welch, A. A. Sarkady, and H. Whitesel, "Shipboard radio frequency propagation measurements for wireless networks," *Proc. - IEEE Mil. Commun. Conf. MILCOM*, vol. 1, pp. 247–251, 2001, doi: 10.1109/milcom.2001.985798.
- [39] H. Kdouh, H. Farhat, G. Zaharia, C. Brousseau, G. Grunfelder, and G. El Zein, "Performance analysis of a hierarchical shipboard Wireless Sensor Network," *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, pp. 765–770, 2012, doi: 10.1109/PIMRC.2012.6362886.
- [40] "ns-3: src/lorawan Directory Reference." https://signetlabdei.github.io/lorawan-docs/html/dir_1fa77e9b4d98a3b702d3db2d326dbbf0.html (accessed Mar. 13, 2022).