

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών  
[www.uniwa.gr](http://www.uniwa.gr)  
Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244  
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
Department of Electrical & Electronics Engineering  
[www.uniwa.gr](http://www.uniwa.gr)  
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece  
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα

Master of Science in  
Internetworked Electronic Systems

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ασύρματο δίκτυο επικοινωνίας μικρού εύρους ζώνης μεγάλης εμβέλειας για  
τον απομακρυσμένο έλεγχο και την παρακολούθηση  
των αυτοματισμών πλοίου,  
βασισμένο στην τεχνολογία LoRa



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Σκαρβέλης Νικόλαος, Α.Μ. 0023  
Επιβλέπων: Παπαγέωργας Παναγιώτης, Καθηγητής

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών  
[www.uniwa.gr](http://www.uniwa.gr)  
Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244  
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
Department of Electrical & Electronics Engineering  
[www.uniwa.gr](http://www.uniwa.gr)  
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece  
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα

Master of Science in  
Internetworked Electronic Systems

## MSc Thesis

### Narrow bandwidth long range wireless communication network for ship monitoring and control applications based on LoRa technology



Student: Skarvelis Nikolaos, Reg. Nr. 0023

MSc Thesis Supervisor: Papageorgas Panagiotis, Professor

ATHENS-EGALEO, MARCH 2019

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Παπαγέωργα Παναγιώτη, καθώς και στον συνεργάτη του κ. Πυρομάλη Δημήτριο για την υποστήριξή τους κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το σύνολο των καθηγητών και του προσωπικού του Μεταπτυχιακού Προγράμματος “Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα” του τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. για τις γνώσεις που μετέδωσαν κατά την διάρκεια της φοίτησής μου αλλά και για το σύνολο του έργου τους.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους φίλους, συμφοιτητές και την Ειρήνη Χειράκη για την ηθική και ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για τη στήριξη και την δύναμη που μου δίνουν να συνεχίζω και να εκπληρώνω τους στόχους που θέτω στην ζωή μου.

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί αύξηση του ενδιαφέροντος για την υιοθέτηση αναδυόμενων τεχνολογιών ασύρματης μετάδοσης δεδομένων στη Ναυτιλία. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η πειραματική διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας στο πλοίο μιας τεχνολογίας μικρού εύρους ζώνης, μεγάλης εμβέλειας, της αποκαλούμενης LoRa (Long Range). Αρχικά, σκιαγραφείται η πολυπλοκότητα της δομής του πλοίου, ώστε να γίνουν αντιληπτές οι δυσκολίες που εμπεριέχονται στην επικοινωνία μέσω καλωδίων τόσο σε επίπεδο εγκατάστασής τους όσο και σε οικονομικό. Στη συνέχεια, γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σε παλαιότερες προσπάθειες επίτευξης ασύρματης επικοινωνίας στα πλοία. Στο πλαίσιο της απομακρυσμένης αυτής επικοινωνίας, αναλύεται η έννοια του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT) και η επέκτασή του στη Ναυτιλία ως Internet of Marine Things (IoMT) για την κάλυψη των παραπάνω αναγκών. Αναπτύσσεται εκτεταμένα το θεωρητικό υπόβαθρο της LoRa, δίνοντας έμφαση στην κρίσιμη για το πλοίο ασφάλεια της μετάδοσης δεδομένων, η οποία στην τεχνολογία LoRa είναι ιδιαίτερα ισχυρή. Ακολουθεί περιγραφή των δυο πειραμάτων που διεξήχθησαν, το ένα σε ναυπηγείο κατά τη διάρκεια της επισκευής του πλοίου και το δεύτερο 9 μήνες αργότερα κατά τη διάρκεια του sea trial, με στόχο την αξιολόγηση της ποιότητας επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων (end nodes). Παρατίθενται, έπειτα, τα αποτελέσματα των εν λόγω πειραμάτων, κατόπιν επεξεργασίας ώστε να αξιολογηθεί η επικοινωνία μεταξύ των δύο nodes με βάση την ισχύ του ληφθέντος σήματος (RSSI), το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) και το επί τοις εκατό ποσοστό των ληφθέντων πακέτων δεδομένων (% PDR).

### Λέξεις – Κλειδιά:

LoRa (Long Range), Διαδίκτυο των Πραγμάτων, Διαδίκτυο των Πραγμάτων στη Ναυτιλία, ισχύς ληφθέντος σήματος, λόγος σήματος προς θόρυβο, επί τοις εκατό ποσοστό των ληφθέντων πακέτων δεδομένων, αισθητήρες, ενεργοποιητές, ασφάλεια LoRa, Ασύρματο Δίκτυο, Αυτοματισμοί Πλοίου.

## Abstract

In recent years the interest in adopting novel wireless Maritime data transmission has peaked. The subject of the present thesis is the experimental investigation of the feasibility of data transmission in ships with LoRa, a narrow bandwidth long range wireless communication technology. The thesis begins with a description of the ship's structural complexity in order to emphasize the disadvantages of using wired communication technologies for sensing and control when compared with wireless technologies taking into account the difficulties in installation modification, maintenance and the overall cost. In the chapters that follow, early attempts for the achievement of wireless communication on board are reported. In the context of using wireless communication, technologies for sensing and actuation, the concept of Internet of Things (IoT) and its extension to Maritime as Internet of Marine Things (IoMT) is presented. LoRa's theoretical background is then thoroughly analyzed, emphasizing the data security that is critical to the ship. In the following part of this study, the two experiments which have been carried out, one at the shipyard during ship repair and the other nine months later during sea trial with main objective the evaluation of the quality of communication between two nodes (end nodes) is described. Finally, the results of these experiments are presented by evaluating the communication between the two nodes based on the received signal strength (RSSI), the signal to noise ratio (SNR) and the percentage of the received data packets (% PDR).

### **Keywords:**

LoRa (Long Range), Internet of Things (IoT), Internet of Marine Things (IoMT), RSSI, SNR, % PDR, sensors, actuators, security of LoRa, Wireless Network, Ship Automation.

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή και αιχμή της τεχνολογίας (State of the Art).....	12
2. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και οι εφαρμογές του.....	19
2.1 Η έννοια του Internet of Things .....	19
2.2 Εφαρμογές του Internet of Things (IoT).....	23
2.3 Internet of Marine Things (IoMT) .....	25
2.4 Τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης LPWAN.....	31
3. Ανάλυση της τεχνολογίας LoRa .....	36
3.1 Επισκόπηση τεχνολογίας LoRa και πρωτοκόλλου LoRaWAN .....	36
3.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της τεχνολογίας LoRaWAN .....	47
3.3 Σύγκριση πρωτοκόλλου LoRaWAN και πρωτοκόλλου Zigbee .....	50
3.4 Ασφάλεια της ασύρματης επικοινωνίας στα πλοία και της LoRa.....	53
4. Ανάλυση πειραματικού μέρους .....	60
4.1 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.....	60
4.2 Περιγραφή του περιβάλλοντος των πειραμάτων .....	64
4.3 Ανάλυση διεξεχθέντος πειράματος .....	65
4.4 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων.....	71
4.5 Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων και ανάλυση αποτελεσμάτων.....	72
4.5.1 Πείραμα 1 <sup>ο</sup> (Φεβρουάριος 2018).....	72
4.5.2 Πείραμα 2 <sup>ο</sup> (Νοέμβριος 2018) .....	82
4.5.3 Σύγκριση κοινών ζευγών σημείων μεταξύ Πειράματος 1 και Πειράματος 2.....	90
5. Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές .....	93
Παράρτημα Α.....	101
Παράρτημα Β .....	105
Παράρτημα Γ.....	106

## Λίστα εικόνων

Εικόνα 1: Mark Weiser (1952-1999), ο πατέρας του Διαδικτύου .....	19
Εικόνα 2: : Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων [25].....	21
Εικόνα 3: Οι συνδεδεμένες στο ίντερνετ συσκευές και η μελλοντική εξέλιξη [27].....	22
Εικόνα 4: Οι "έξυπνες " εφαρμογές του IoT [34].....	24
Εικόνα 5: Ένα τυπικό δωμάτιο ελέγχου της μηχανής (Engine Control Room, ECR) .....	26
Εικόνα 6: Ένα τυπικό δωμάτιο ελέγχου φορτίου (Cargo Control Room, CCR) .....	27
Εικόνα 7: Μία τυπική γέφυρα (Bridge) .....	28
Εικόνα 8: Internet of Marine Things (IoMT) [38].....	29
Εικόνα 9: Η μεταλλική δομή του πλοίου (Εάν δεν είναι δική σου η φωτογραφία να προστεθεί αναφορά) .....	30
Εικόνα 10: Σύγκριση LAN, LPWAN και Cellular Network [39].....	31
Εικόνα 11: Το DNA του IoT: Τεχνολογία LoRa.....	33
Εικόνα 12: Παγκόσμιος χάρτης με τις ραδιοσυχνότητες της LoRa [42] .....	33
Εικόνα 13: Σύγκριση πλεονεκτημάτων των τεχνολογιών Sigfox, LoRa, NB-IoT [15] .....	34
Εικόνα 14: Οι προδιαγραφές των τεχνολογιών LPWAN.....	35
Εικόνα 15: Τα 7 επίπεδα μοντέλου αναφοράς διασύνδεσης ανοικτών συστημάτων (Open System Interconnection, OSI) [44].....	37
Εικόνα 16: Κωδικοποίηση του σήματος πληροφορίας (αριστερά) σε φέρον σήμα (δεξιά) χρησιμοποιώντας διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας (FSK).....	38
Εικόνα 17: Απεικόνιση του up-chirp (επάνω) και του down-chirp (κάτω) με βάση την τεχνική Chirp Spread Spectrum .....	40
Εικόνα 18: Ένα πραγματικό σήμα όπως διαμορφώνεται στη LoRa: φαίνεται η αρχή του μηνύματος, που αποτελείται από μία σειρά από up-chirps ακολουθούμενα από δύο down-chirps και το κωδικοποιημένο μήνυμα.....	40
Εικόνα 19: Παλμός chirp για τη μονάδα και παλμός chirp για το μηδέν και παράδειγμα ενός κωδικοποιημένου μηνύματος (1001) ως παλμοί chirps [42].....	41
Εικόνα 20: Ένα παραγόμενο upchirp στη διαμόρφωση LoRa (στα 125 KHz), με τον παράγοντα συχνότητας SF να λαμβάνει τιμές από 7 έως και 12 [42] .....	42
Εικόνα 21: Η δομή του πλαισίου (frame) της LoRa [29] .....	43
Εικόνα 22: Απεικόνιση αρχιτεκτονικής αστέρα [49] .....	46
Εικόνα 23: Τα κλειδιά NwkSKey και AppSKey που διαθέτει ένα LoRaWAN δίκτυο για την επίτευξη ασφαλούς επικοινωνίας [49].....	56
Εικόνα 24: Η μέθοδος ενεργοποίησης της τελικής συσκευής OTAA (Over-The-Air-Activation) [40] .....	57
Εικόνα 25: : Η μέθοδος ενεργοποίησης της τελικής συσκευής ABP (Activation-By-Personalisation) [40].....	59
Εικόνα 26: Το LoRa module που χρησιμοποιήθηκε (Nucleo pack, P-NUCLEO-LRWAN1) .....	60

Εικόνα 27: Η πίσω όψη (αριστερά) και η μπροστινή όψη (δεξιά) της πλακέτας NUCLEO-L073RZ .....	61
Εικόνα 28: Ρύθμιση του προγράμματος CoolTerm για την καταγραφή των μεταδιδόμενων πακέτων.....	63
Εικόνα 29: Το πλοίο διεξαγωγής των πειραμάτων κατά την διάρκεια επιχείρησης στη θάλασσα .....	64
Εικόνα 30: Απεικόνιση του module 1 συνδεδεμένο με το Laptop στο Cargo Control Room (CCR) .....	66
Εικόνα 31: Οι θέσεις του module 1(κόκκινο) και του module 2 (μπλε) στο πρώτο πείραμα.....	68
Εικόνα 32: Οι θέσεις του module 1(κόκκινο) και του module 2 (μπλε) στο δεύτερο πείραμα.....	70
Εικόνα 33: Το Engine Control Room (ECR) του πλοίου .....	75
Εικόνα 34: : Το Main Engine Room (MER) του πλοίου .....	77
Εικόνα 35: Το κατάστρωμα (Deck) του πλοίου με κατεύθυνση βλέψης προς την πλώρη .....	78
Εικόνα 36: Το κατάστρωμα του πλοίου (Deck) του πλοίου με κατεύθυνση βλέψης προς την πρύμνη.....	79
Εικόνα 37: Το module SX1276 τεχνολογίας LoRa της εταιρείας Semtech [62] .....	94



## Λίστα πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση των τεχνολογιών LoRa και Zigbee [50] .....	50
Πίνακας 2: Η Μέση τιμή του RSSI (σε dBm) και του SNR (σε db) και η Απόσταση σε μέτρα (m) μεταξύ των δυο modules για το Πείραμα 1 .....	72
Πίνακας 3: Το ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) για κάθε πειραματική μέτρηση	80
Πίνακας 4: Η Μέση τιμή του RSSI (σε dBm) και του SNR (σε db) και η Απόσταση σε μέτρα (m) μεταξύ των δυο modules για το Πείραμα 2 .....	83
Πίνακας 5: Το ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) για κάθε πειραματική μέτρηση	88

## Λίστα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Η μέση τιμή του RSSI (dBm) για κάθε ζεύγος σημείων.....	73
Διάγραμμα 2: Η μέση τιμή του SNR (db) για κάθε ζεύγος σημείων.....	75
Διάγραμμα 3: Η μέση τιμή του RSSI (dBm) και του SNR (db) σε σχέση με την απόσταση για κάθε ζεύγος σημείων .....	76
Διάγραμμα 4: Οι τιμές του ποσοστού των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) για κάθε πειραματική μέτρηση.....	81
Διάγραμμα 5: Το ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) συναρτήσει του RSSI (dBm).....	82
Διάγραμμα 6: Η μέση τιμή του RSSI (dBm) για κάθε ζεύγος σημείων.....	83
Διάγραμμα 7: : Η μέση τιμή του SNR (db) για κάθε ζεύγος σημείων.....	84
Διάγραμμα 8: Η μέση τιμή του RSSI (dBm) και του SNR (db) σε σχέση με την απόσταση (m) για κάθε ζεύγος σημείων .....	85
Διάγραμμα 9: Το σύνολο των τιμών RSSI (dBm) και SNR (db) συναρτήσει του χρόνου (s) για τη μέτρηση μεταξύ Bridge-ECR.....	87
Διάγραμμα 10: Οι τιμές του ποσοστού των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) για κάθε πειραματική μέτρηση.....	88
Διάγραμμα 11: Το ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) συναρτήσει του RSSI (dBm) .....	89
Διάγραμμα 12: Συνδυαστικό διάγραμμα των RSSI (dBm), SNR (db), %PDR στα σημεία ECR-Steering Room στα Πειράματα 1 και 2.....	90
Διάγραμμα 13: : Συνδυαστικό διάγραμμα των RSSI (dBm), SNR (db), %PDR στα σημεία ECR-Fortail Shaft στα Πειράματα 1 και 2.....	91
Διάγραμμα 14: : Συνδυαστικό διάγραμμα των RSSI (dBm), SNR (db), %PDR στα σημεία ECR-Bildge στο Πείραμα 1 και % PDR στο Πείραμα 2 .....	92

## Πίνακας Ακρωνυμίων-Συντομογραφιών

SAN: Ship Area Network, Δίκτυο επικοινωνίας στο πλοίο
ER: Engine Room, Μηχανοστάσιο
M2M: Machine to Machine, Μηχανή με Μηχανή
IMO: International Maritime Organization, Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας
IEC: International Electro-technical Commission, Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή
ECR: Engine Control Room, Δωμάτιο Ελέγχου της κύριας Μηχανής
WSN: Wireless Sensor Network, Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων
LAN: Local Area Network, Τοπικό Δίκτυο
WAP: Wireless Access Point, Ασύρματο Σημείο Πρόσβασης
MER: Main Engine Room, Μηχανοστάσιο
PLC: Power Line Communication, Επικοινωνία Γραμμής Ρεύματος
IoT: Internet of Things, Διαδίκτυο των Πραγμάτων
IoMT: Internet of Marine Things, Διαδίκτυο των Πραγμάτων στη Ναυτιλία
LPWAN: Low Power Wide Area Network, Δίκτυο Χαμηλής Ισχύος Ευρείας Κάλυψης
LoRa: Long Range, Μεγάλης Εμβέλειας
IDC: International Data Corporation, Διεθνής Οργανισμός Δεδομένων
IP address: Internet Protocol address, διεύθυνση διαδικτυακού πρωτοκόλλου
LNG: Liquefied Natural Gas, Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο
CCR: Cargo Control Room, Δωμάτιο Ελέγχου του Φορτίου
ISO: International Organization for Standardization, Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης
CRC: Cyclic Redundancy Check, Κυκλική ανίχνευση σφαλμάτων
CSS: Chirp Spread Spectrum
MAC: Media Access Control, Έλεγχος Πρόσβασης στο Μέσο
MIC: Message Integrity Code, Κώδικας γνησιότητας μηνύματος
LoRaWAN: Long Range Wide Area Network
AES: Advanced Encryption Standard, Προηγμένο Πρότυπο Κρυπτογράφησης
AppKey: Application Key, Κλειδί Εφαρμογής
NwkSKey: Network Session Key, Κλειδί συνόδου δικτύου
AppSKey: Application Session Key, Κλειδί συνόδου εφαρμογής

OTAA: Over-The-Air-Activation

ABP: Activation-By-Personalisation

SNR: Signal-to-Noise Ratio, λόγος ισχύος σήματος προς θόρυβο

RSSI: Received Signal Strength Indicator, Δείκτης ισχύος ληφθέντος σήματος

N: Noise, Θόρυβος

dBm: Decibel per miliwatt

db: decibel

PDR: Packet Delivery Ratio, Ποσοστό Ληφθέντων Πακέτων

## 1. Εισαγωγή και αιχμή της τεχνολογίας (State of the Art)

Η εξέλιξη της τεχνολογίας, σε συνδυασμό με τη βιομηχανική ανάπτυξη και τις ολοένα αυξανόμενες και μεταλλασσόμενες ανθρώπινες ανάγκες, συνετέλεσαν στη δημιουργία πολλών διαφορετικών τύπων πλοίων, τα οποία διαχωρίζονται με βάση το μέγεθός τους, τη μορφή τους, τη δομική κατασκευή τους, το μέσο πρόωσης και κυρίως το σκοπό και την αποστολή, που εξυπηρετούν. Τα πλοία είναι σύνθετες κατασκευές, που περιέχουν περισσότερα από εκατό ενσωματωμένα πολύπλοκα συστήματα, τα οποία συνδέονται δομικά, μηχανικά, ηλεκτρικά, υδραυλικά, πνευματικά και ηλεκτρονικά είτε μεταξύ τους είτε μεμονωμένα με το πλοίο. Όλα τα διαφορετικά είδη πλοίων έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό· απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία τους αποτελεί η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ αισθητήρων, ενεργοποιητών και άλλων στοιχείων αυτοματισμού μέσω ενός δικτύου επικοινωνίας.

Ένα τυπικό δίκτυο επικοινωνίας στο πλοίο (Ship Area Network, SAN) επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ μιας ποικιλίας συσκευών και οργάνων, τον έλεγχο συστημάτων μέσω αισθητήρων και τη λήψη και επεξεργασία κρίσιμων δεδομένων/πληροφοριών για την εξασφάλιση της ασφάλειας και της ορθής πλοήγησης [1]. Οι προαναφερθείσες λειτουργίες λαμβάνουν χώρα σε πολλά μέρη του πλοίου, από το μηχανοστάσιο (Main Engine Room, MER) μέχρι τη γέφυρα (Bridge), καθώς και μεταξύ του υπεύθυνου προσωπικού και του καπετάνιου, αλλά και εκτός του πλοίου μέχρι το γραφείο του πλοιοκτήτη. Για την ανταλλαγή δεδομένων από τη μια συσκευή στην άλλη (Machine to Machine communication, M2M) έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες μέθοδοι επικοινωνίας σε όλο τον κόσμο. Οι μέθοδοι αυτές διαχωρίζονται σε ενσύρματες και ασύρματες.

Με βάση τα διεθνή πρότυπα, όπως αυτά ορίζονται από το Διεθνή Οργανισμό Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization, IMO) και από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electro-technical Commission, IEC), η παραδοσιακή ιεραρχία ενός δικτύου επικοινωνίας στο πλοίο, βασίζεται σε ενσύρματα δίκτυα, όπως ειδικές συνδέσεις και συνδέσεις δικτύων αισθητήρων [2]. Τα ενσύρματα δίκτυα αυτά βασίζονται σε διάφορα πρωτόκολλα, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι τα εξής: Ethernet, RS232, RS485, IEEE1394 και USB (Universal Serial Bus).

Χωρίς την ύπαρξη του δικτύου επικοινωνίας SAN θα ήταν αδύνατη η οποιαδήποτε επιχείρηση του πλοίου (Ship Operation), αφού μέσω αυτού πραγματοποιείται η επιτήρησή του (monitoring). Το αυτόματο σύστημα επιτήρησης (automatic monitoring system) βασίζεται στη λήψη και αποθήκευση των δεδομένων που συλλέγουν οι

αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι κατά μήκος ολόκληρου του πλοίου [3]. Για το monitoring του πλοίου μέσω ενσύρματων δικτύων απαιτείται κατά την κατασκευή του να συνδεθούν καλώδια από τους πολυάριθμους αισθητήρες έως το Engine Control Room (ECR) και από εκεί σε άλλα καίρια σημεία του πλοίου. Επίσης, τόσο σε περίπτωση επισκευών όσο και σε περίπτωση προσθήκης νέου εξοπλισμού απαιτείται η εγκατάσταση νέων καλωδιώσεων, γεγονός ακόμη πιο δύσκολο σε ένα ήδη δομημένο πλοίο.

Παρότι οι ναυπηγοί προχωρούν σε εξελιγμένες ιδέες σχεδιασμού πλοίων, τα υπερβολικά εκτεταμένα μήκη των καλωδίων που απαιτούνται για το monitoring του πλοίου παραμένουν μια τεχνολογική πρόκληση. Εκτός από το υψηλό κόστος της δρομολόγησης των καλωδίων κατά τη διάρκεια της κατασκευής, τα καράβια αντιπροσωπεύουν ένα σύνθετο και σκληρό περιβάλλον στο οποίο τα χιλιόμετρα καλωδίων που χρησιμοποιούνται, είναι ευάλωτα σε βλάβες και φθορές από αίτια όπως η θερμότητα, η υγρασία και τοξικοί παράγοντες [4]. Καθώς τα καλώδια είναι ευάλωτα σε τέτοιες συνθήκες, με αποτέλεσμα να αστοχούν, η ελάττωση έως και η οριστική εξάλειψη των ενσύρματων επικοινωνιών, θα βελτιώσει σημαντικά την αξιοπιστία των μηχανικών συστημάτων ελέγχου στο πλοίο, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης [5].

Τα πλοία και οι υπεράκτιες κατασκευές αποτελούν δυσχερές περιβάλλον για τη διάδοση ασύρματων σημάτων. Εξαιτίας της ιδιαιτερότητας του χάλυβα να αντανακλά τα σήματα σε υψηλή ραδιοσυχνότητα κατά τη διάρκεια ασύρματης επικοινωνίας στον ίδιο χώρο ή και μεταξύ διαφορετικών διαμερισμάτων του πλοίου, το μεταδιδόμενο σήμα δεν ακολουθεί μια μοναδική διαδρομή, αλλά διακλαδίζεται. Επιπλέον, ο χάλυβας όντας μονωτής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία αντανακλά, μειώνει σημαντικά το βαθμό διείσδυσης του σήματος. Εντούτοις, η τροχοπέδη αυτή υπερπηδάται από την ύπαρξη μη χαλύβδινων στοιχείων στα διαφράγματα του πλοίου, όπως επισφραγίσεις καταπακτών, ανθρωποθυρίδες και καλωδιακές διελεύσεις.

Έπειτα από την εμφάνιση της τεχνολογίας ασύρματων αισθητήρων, ερευνητικές, βιομηχανικές και ακαδημαϊκές ομάδες, ξεκίνησαν να διερευνούν τη σκοπιμότητα του WSN να αντικαταστήσει το τρέχον ενσύρματο σύστημα επιτήρησης (monitoring system) στο πλοίο. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) έχουν κερδίσει την παγκόσμια προσοχή τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα με τον πολλαπλασιασμό της τεχνολογίας μικρο-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS) η οποία έχει διευκολύνει την ανάπτυξη έξυπνων αισθητήρων (smart sensors). Ένας έξυπνος αισθητήρας μπορεί να δώσει

πληροφορίες για το περιβάλλον, να μετρήσει και να στείλει δεδομένα ασύρματα στη μονάδα ελέγχου για περαιτέρω επεξεργασία και αποφάσεις.

Περιορισμό για τους ασύρματους αισθητήρες αποτελεί η διάδοση του σήματος περιβάλλοντα με μεγάλη απορρόφηση του RF σήματος αλλά και η πηγή τροφοδοσίας του αισθητήρα, η οποία όμως στην περίπτωση του πλοίου είναι σταθερή και διαθέσιμη στα περισσότερα σημεία. Εφαρμόζοντας την τεχνολογία αυτή στο περιβάλλον του πλοίου αντιμετωπίζονται δυσκολίες και προκλήσεις διαφορετικές σε σχέση με τα υπάρχοντα, κλασικά, ενσύρματα συστήματα. Η μεταλλική δομή, το δυναμικό περιβάλλον (συχνή κίνηση προσώπων, αντικειμένων και εμπορευμάτων) και ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος των εκάστοτε συστημάτων επηρεάζουν έντονα την ποιότητα σύνδεσης μεταξύ των αισθητήριων κόμβων (sensor nodes) και των πυλών (gateways), επομένως είναι απαραίτητο να γίνεται μελέτη για το που θα τοποθετηθούν μέσα στο πλοίο προκειμένου να παρέχεται η καλύτερη δυνατή συνδεσιμότητα δικτύου [6].

Αναφερόμενοι στις έρευνες αυτές, είναι πολύ σημαντική η ανασκόπηση σε παλαιότερες προσπάθειες επίτευξης ασύρματης επικοινωνίας αισθητήρων στο πλοίο.

Το έτος 2000, ο Mokole και οι συνεργάτες του διεξήγαγαν μία μελέτη σκοπιμότητας ασύρματης επικοινωνίας στο πλοίο, χρησιμοποιώντας ασύρματους διαποδιαμορφωτές (modems) διαθέσιμους στα εμπορικά καταστήματα που λειτουργούσαν σε ραδιοσυχνότητες από 800 MHz έως και 3 GHz [3]. Η μελέτη αυτή επιβεβαίωσε ότι η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ γειτονικών διαμερισμάτων είναι εφικτή, ακόμα και όταν οι υδατοστεγείς πόρτες είναι επισφραγισμένες.

Μόλις ένα χρόνο αργότερα, το 2001, ο Estes και η ομάδα του διεξήγαγαν μετρήσεις σε διάφορα πλοία του πολεμικού ναυτικού προκειμένου να εξακριβωθεί το κατά πόσο είναι εφικτή η επικοινωνία μέσα σε ένα διαμέρισμα του πλοίου, αλλά και μεταξύ διαφορετικών διαμερισμάτων του. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι οι μπουλμέδες (δηλαδή τα διαφράγματα, bulkheads) του πλοίου μειώνουν σε σημαντικό βαθμό την ισχύ των λαμβανόμενων σημάτων και πιο συγκεκριμένα, κατά 20-30 dB (decibel), αλλά η επικοινωνία μεταξύ δύο ή τριών μπουλμέδων φάνηκε ότι είναι εφικτή. Η ομάδα απέδωσε το αποτέλεσμα αυτό στην παρουσία ενός αριθμού μη-χαλύβδινων στοιχείων στους μπουλμέδες, όπως παραδείγματος χάριν αγωγών, που επέτρεψαν τη διάδοση του σήματος μέσω αυτών [7].

Το 2002, προτάθηκε από τον Schwartz και τους συνεργάτες του ένα σύστημα παρακολούθησης (monitoring system) με ασύρματους αισθητήρες που συνδέονταν με

το Τοπικό Δίκτυο (Local Area Network, LAN) του πλοίου μέσω Ασύρματων Σημείων Πρόσβασης (Wireless Access Points, WAPs) που λειτουργούσαν με το πρωτόκολλο 802.11. Το εν λόγω σύστημα επικυρώθηκε επιτυχώς σε πολλαπλά πλοία του πολεμικού ναυτικού, συμπεριλαμβανομένου του USS Monterey και του ex-USS Shadwell [8].

Ενδιαφέρουσα ήταν η πρόταση του Ploeger το 2003 για ένα ασύρματο σύστημα παρακολούθησης του πλοίου αποτελούμενο από κόμβους συλλογής δεδομένων, το οποίο ονόμασαν ICHM (Intelligent Components Health Monitor). Οι εν λόγω κόμβοι ήταν δυνατό να συλλέγουν δεδομένα από αναλογικούς αισθητήρες μεταδίδοντάς τα ασύρματα, μέσω Bluetooth σε μια κεντρική βάση αποθήκευσης [9].

Το 2004, ο Takahashi έκανε λόγο για χρήση αισθητήρων για ασύρματο monitoring σε δεξαμενόπλοια μεταφοράς πετρελαίου. Οι ασύρματοι αισθητήρες που κατασκευάζονταν από την Dust Networks εγκαθίσταντο σε όλη την έκταση πετρελαιοφόρων πλοίων, ιδιαίτερα σε κρίσιμες περιοχές που παρουσίαζαν μηχανικά προβλήματα ή δομικές αδυναμίες. Πιο συγκεκριμένα, η εγκατάστασή τους έγινε στις κυρίως μηχανές των πλοίων, έτσι ώστε να ανιχνεύονται τυχόν ασυνήθιστες δονήσεις που δεν θα ανιχνεύονταν διαφορετικά από το πλήρωμα και έτσι αυτό να ειδοποιείται. Η ευρέως γνωστή εταιρεία BP (British Petroleum) χρησιμοποίησε τους συγκεκριμένους αισθητήρες, τόσο στις παράκτιες πλατφόρμες της όσο και στα δεξαμενόπλοιά της ώστε να παρακολουθεί την σωστή λειτουργία τους [10].

Το 2006 ο Talukdar και οι συνεργάτες του εισήγαγαν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στο οποίο λάμβανε χώρα μεταφορά δεδομένων μεταξύ αισθητήρων που ήταν διάσπαρτα κατανεμημένοι κατά μήκος του κύτους του πλοίου. Η μεταφορά δεδομένων γινόταν μέσω ακουστικών σημάτων και σε απόσταση έως και 50 πόδια (15,24 μέτρα) [10].

Ακόμη μια προσπάθεια επίτευξης ασύρματης επικοινωνίας αισθητήρων στο πλοίο πραγματοποιήθηκε το 2007 από την εταιρεία Memsic χρησιμοποιώντας το σύστημα Micasz, που συμμορφώνεται με το πρότυπο IEEE 802.15.4. Αναλυτικότερα, το σύστημα αυτό αποτελείται από κόμβους αισθητήρων (sensor nodes), ο καθένας από τους οποίους αποτελείται από έναν επεξεργαστή, μία εσωτερική μνήμη, έναν πομποδέκτη που λειτουργεί σε συχνότητα 2,4 GHz, δύο μπαταρίες 2A και έναν πίνακα αισθητήρων (sensor board). Η μεταφορά δεδομένων πραγματοποιείται με ρυθμό έως και 250 kbps. Οι ενσωματωμένοι αισθητήρες μετρούν θερμοκρασία, υγρασία, βαρομετρική πίεση, περιβάλλον φως (ambient light), καθώς και επιτάχυνση. Το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει 12 κόμβους αισθητήρων και μία πύλη (gateway), η οποία είναι συνδεδεμένη με έναν υπολογιστή με καλώδιο USB [3]. Το 2007 επίσης ο P. Bu-Geun και οι συνεργάτες του,



πραγματοποίησαν μετρήσεις με την τεχνολογία Zigbee έχοντας εγκαταστήσει ένα μικρό WSN μεταξύ της κύριας μηχανής (MER) και της αίθουσας ελέγχου της μηχανής (ECR) [11].

Η τεχνολογία (πρωτόκολλο επικοινωνίας) Zigbee είναι μια από τις πιο σημαντικές και πρωτοποριακές ασύρματες τεχνολογίες που βρίσκουν εφαρμογή στο πλοίο, γεννήθηκε το 1998. Η εν λόγω τεχνολογία προτυποποιήθηκε το 2003 και αξιολογήθηκε το 2006.

Λόγω του περιορισμού της ασύρματης επικοινωνίας που δημιουργούν οι ενισχυμένοι χαλύβδινοι τοίχοι του πλοίου, τόσο ο Park το 2008 όσο και ο Paik το 2010, οι οποίοι υπήρξαν και συνεργάτες, υποστήριξαν ότι δεν είναι εφικτό να λειτουργεί στο πλοίο αποκλειστικά ασύρματη επικοινωνία χωρίς την ύπαρξη καλωδιώσεων [10]. Έτσι, πρότειναν ένα σύστημα παρακολούθησης που συνδυάζει τεχνολογία Zigbee με τεχνολογία Επικοινωνίας Γραμμής Ρεύματος (Power Line Communication, PLC).

Επιπλέον, το 2009 ο Paik διεξήγαγε μια σειρά πειραμάτων χρησιμοποιώντας πρωτόκολλο Zigbee προκειμένου να γίνει αξιολόγηση της απόδοσης της ασύρματης επικοινωνίας στο πλοίο. Τα πειράματα αυτά περιλάμβαναν επικοινωνία μεταξύ μιας καμπίνας και του διαδρόμου, κατά μήκος του διαδρόμου και μεταξύ διαφορετικών επιπέδων με ανοιχτή και κλειστή την πόρτα εισόδου, όπως επίσης, και στο Engine Room, τα οποία στέφθηκαν με επιτυχία. Επιπρόσθετα ο Pilsak το 2009 κατά την διαδικασία επισκευής του πλοίου, πραγματοποίησε δοκιμές σε ένα ακόμη δίκτυο ασύρματων αισθητήρων στο μηχανοστάσιο του [12].

Το 2011 ο H. Kdouh και οι συνεργάτες του πρότειναν ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων με χρήση Zigbee σε ένα πλοίο που ήταν αγκυροβολημένο στο λιμάνι, με εφαρμογή στο χώρο της μηχανής [13]. Η ίδια ομάδα ερευνητών το 2012, ένα χρόνο αργότερα δηλαδή, πραγματοποίησαν μια σειρά επιτυχημένων πειραμάτων σε πλοίο τύπου φέρρυ με το όνομα «Armorique», κατά τη διάρκεια της επιχείρησης του εκτελώντας διαδρομή από το Roscoff της Γαλλίας στο Plymouth του Ηνωμένου Βασιλείου. Στο πείραμα αυτό έγιναν μετρήσεις σημείο προς σημείο κάνοντας χρήση του προτύπου IEEE 802.15.4, το οποίο έχει σχεδιαστεί για χαμηλή ταχύτητα δεδομένων, μικρή απόσταση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (low data rate, short distance, low power consumption) και λειτουργούσε στα 2,4 GHz χρησιμοποιώντας για μετάδοση πακέτων δύο πρωτόκολλα Zigbee της εταιρείας Silicon Laboratories [6].

Ο Carlos Perez - Garido και οι συνεργάτες του το 2014 επιβεβαίωσαν με την χρήση του IEEE 802.15.4/Zigbee ασύρματου δικτύου ότι είναι το κατάλληλο για σύνδεση

αισθητήρων αερίου για το σύστημα πυρανίχνευσης του πλοίου. Το δίκτυο κρίθηκε το καταλληλότερο, για την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και τις εγγενείς δυνατότητες επιβίωσης του δικτύου. Παρόλο που τα μεταλλικά στοιχεία παρεμπόδιζαν σημαντικά την ασύρματη μετάδοση, σε μερικές από τις δοκιμές επιτεύχθηκε επικοινωνία σε αποστάσεις άνω των πενήντα (50) μέτρων, χωρίς οπτική επαφή (Line-of-sight) [14].

Σήμερα, με την εκρηκτική ανάπτυξη της τεχνολογίας του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT), ο αριθμός των πρακτικών εφαρμογών που δημιουργείται είναι εκθετικά αυξανόμενος και βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων της ασφάλειας, της παρακολούθησης προσωπικών αντικειμένων, της γεωργίας, των έξυπνων μετρήσεων, έξυπνων πόλεων, έξυπνων σπιτιών και της ναυτιλίας. Οι εφαρμογές του IoT έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως η μεγάλη απόσταση, ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η μείωση του κόστους. Οι ευρέως διαδεδομένες μικρής εμβέλειας ασύρματες τεχνολογίες όπως Zigbee, Bluetooth, WiFi και οι λοιπές WSN τεχνολογίες, δεν μπορούν να ανταποκριθούν σε σενάρια που απαιτούν μετάδοση μεγάλης εμβέλειας. Ως εκ τούτου, οι απαιτήσεις των εφαρμογών IoT οδήγησαν στην εμφάνιση μιας νέας τεχνολογίας ασύρματων επικοινωνιών: χαμηλής ισχύος δίκτυο ευρείας ζώνης, γνωστής ως LPWAN (Low Power Wide Area Network) [15]. Παρόλο που τα LPWAN έχουν πολλά κοινά με τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs), υπάρχουν μερικές κρίσιμες διαφορές. Η κυριότερη διαφορά είναι ότι σε αντίθεση με τα WSN που συνήθως χρησιμοποιούν τοπολογία πλέγματος, οι σύγχρονες τεχνολογίες LPWAN απαιτούν τη δημιουργία πυλών (που αναφέρονται ως σταθμοί βάσης) για την εξυπηρέτηση μιας τελικής συσκευής. Οι συσκευές αυτές επικοινωνούν απευθείας με μία ή περισσότερες πύλες. Ανάλογα με την τεχνολογία, η περιοχή κάλυψης μιας μόνο πύλης μπορεί να κυμαίνεται από εκατοντάδες μέτρα έως δεκάδες χιλιόμετρα και μπορεί να περιλαμβάνει χιλιάδες ή ακόμα και εκατομμύρια τελικές συσκευές [16].

Παράλληλα, τη θεωρία της αναγκαιότητας ύπαρξης καλωδιώσεων ως μέρος της ασύρματης επικοινωνίας ήρθε να καταρρίψει και η τεχνολογία LoRa (Long Range, Μεγάλης Εμβέλειας), που είναι μια τεχνολογία χαμηλής ισχύος ευρείας ζώνης (Low-Power Wide-Area). Αναπτύχθηκε από την start-up εταιρεία Cycleo το 2009 στην Grenoble της Γαλλίας και εξαγοράστηκε τρία χρόνια αργότερα από τη Semtech (USA, 2012). Το 2015 η LoRa προτυποποιήθηκε από την LoRa – Alliance και αυτή τη στιγμή αναπτύσσεται σε σαράντα δύο χώρες και παραμένει υπό ανάπτυξη σε άλλες χώρες λόγω της επένδυσης σε εφαρμογές της από εταιρείες τηλεφωνίας όπως η Bouygues και η Orange στη Γαλλία, η KPN στην Ολλανδία, και η Fastnet στην Νότια Αφρική.

Τη συγκεκριμένη θεωρία πρεσβεύει και η πρόσφατη έρευνα του Fan Gui και των συναδέλφων του, που πραγματοποιήθηκε στην Κίνα το 2018, όπου κάνοντας χρήση στο πλοίο ενός εξελιγμένου πομποδέκτη (transceiver chip) για την τεχνολογία LoRa, το SX1276/8 της εταιρείας Semtech, πραγματοποίησαν επιτυχημένα πειράματα επίτευξης ασύρματης επικοινωνίας σε αυτό [17].

Οι βασιζόμενες στο IoT προσπάθειες επικοινωνίας που αναφέρθηκαν πρωτίτερα θα μπορούσαν να θεωρηθούν αρκετές να υποστηρίξουν την ευρεία εξάπλωση τέτοιων τεχνολογιών στο πλοίο. Ωστόσο, η διείσδυσή τους στον κόσμο της ναυτιλίας γίνεται με εξαιρετικά αργούς ρυθμούς. Ποια είναι τα εμπόδια που καθυστερούν τη διάδοση και εξάπλωσή τους; Η απάντηση δίνεται με νέα ερώτηση: Είναι αρκετή μόνο η ύπαρξη των τεχνολογιών αυτών; Η ερώτηση αυτή αποτελεί τροφή για σκέψη ώστε να προκύψουν νέα ερωτήματα: είναι όλες οι ασύρματες λύσεις ικανές να διαπεράσουν με επιτυχία πολύπλοκες χαλύβδινες κατασκευές όπως το εσωτερικό του πλοίου; Από αυτές που είναι ικανές, το κόστος όχι μόνο λειτουργίας τους αλλά και εγκατάστασης και συντήρησής τους τις καθιστά ωφέλιμη επένδυση για τις ναυτιλιακές επιχειρήσεις; Κι αν μια τεχνολογία πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις, διαθέτει αρκετή ασφάλεια ώστε να μην τίθεται σε κίνδυνο η επιχείρηση του πλοίου; Ανάμεσα στην πληθώρα των τεχνολογιών που προσπαθούν να επικρατήσουν, η LoRa κατοχυρώνοντας όλα τα παραπάνω είναι ίσως η μοναδική που μπορεί να εδραιωθεί ως η προεξάρχουσα τεχνολογία για την ασύρματη επικοινωνία στο πλοίο.

Σκοπό της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτελεί η μελέτη της καινοτόμου αυτής τεχνολογίας και η διεξαγωγή πειραμάτων σε πλοίο (σε πραγματικές συνθήκες) χρησιμοποιώντας την ως μέσο ασύρματης επικοινωνίας. Η LoRa ήρθε να επισκιάσει όλες τις άλλες τεχνολογίες επικοινωνίας στο πλοίο και αυτό θα αποδειχθεί στο πόνημα αυτό μέσω της ανάλυσης της LoRa σε θεωρητικό επίπεδο, αλλά κυρίως μέσω της συλλογής και επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων.

## 2. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και οι εφαρμογές του

### 2.1 Η έννοια του Internet of Things

Ο πολλαπλασιασμός και η εξέλιξη των διαδικτυωμένων συστημάτων και των ενσωματωμένων συσκευών οδήγησε στη δημιουργία του *Διαδικτύου των Πραγμάτων* (*Internet of Things, IoT*) [18]. Ο πατέρας του IoT θεωρείται ότι είναι ο Mark Weiser (Εικόνα 1), ο οποίος ήταν επικεφαλής τεχνολόγος του Xerox PARC, μία εταιρεία έρευνας και ανάπτυξης στο Palo Alto της California. Ο Weiser το 1988 για να περιγράψει αυτό που σήμερα αποκαλείται «Διαδίκτυο των Πραγμάτων» εισήγαγε τον όρο Πανταχού Παρούσα Υπολογιστική (Ubiquitous Computing) [19].



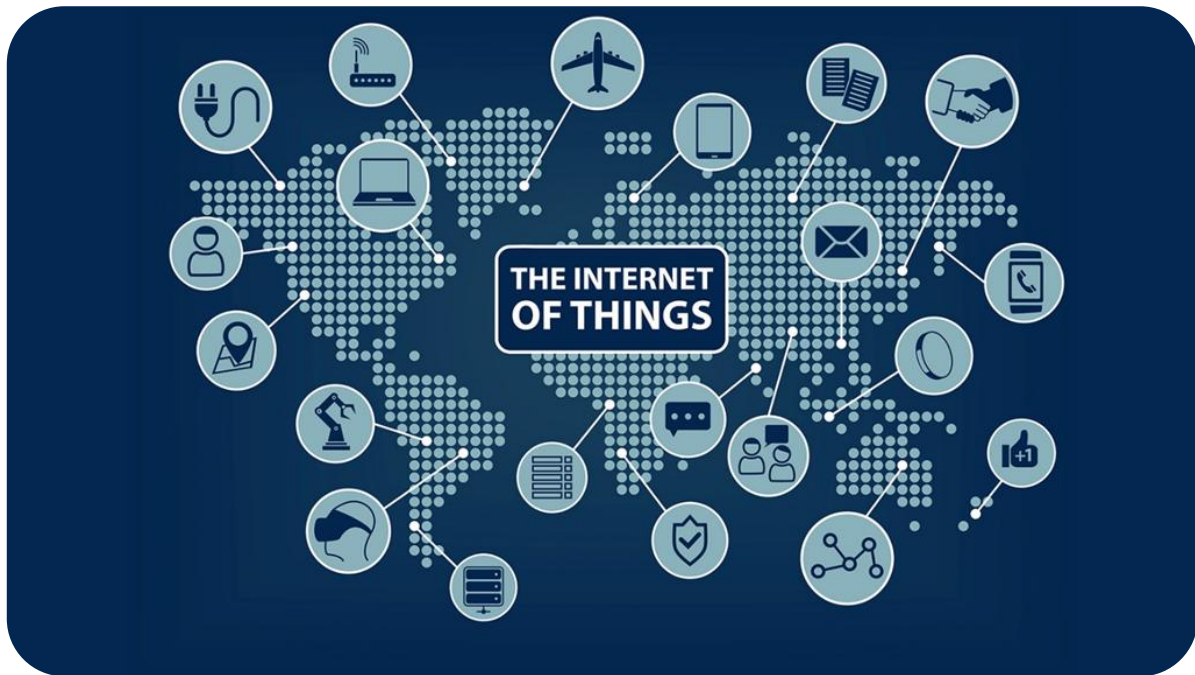
*Εικόνα 1: Mark Weiser (1952-1999), ο πατέρας του Διαδικτύου των Πραγμάτων, [20].*

Ο Weiser, επηρεασμένος από διάφορους ανθρωπιστικούς τομείς, εκτός της πληροφορικής, συνέθεσε τη δική του ξεχωριστή οπτική για το πώς πρέπει να είναι οι υπολογιστές και το διαδίκτυο, μέσα από τη δημοσίευσή του με τίτλο *The Computer for the 21st Century*, στο επιστημονικό περιοδικό *Scientific American*, το 1991. Η δημοσίευση ανοίγει με την πρόταση «Οι πιο βαθιές τεχνολογίες είναι αυτές που εξαφανίζονται. Υφαίνονται μόνες τους στο ύφασμα της καθημερινής ζωής έως ότου δε διακρίνονται από αυτή» (*“The most profound technologies are those that disappear. They weave themselves into the fabric of everyday life until they are indistinguishable from it”*). Υποστηρίζει ότι η πληροφορική πρέπει να ενσωματωθεί στην καθημερινή ζωή και το

ανθρώπινο περιβάλλον, αντί να δημιουργεί ένα νέο δικό της κόσμο. Ο υπολογιστής, ακόμα και όταν είναι φορητός ή έχει ήχο και γραφικά, δεν είναι παρά ένα κουτί, κάτι ξεχωριστό από το περιβάλλον. Σύμφωνα με την άποψη του Weiser, οι υπολογιστές είναι χρήσιμοι, μόνο όταν υπηρετούν το ήδη υπάρχον περιβάλλον και για να γίνει αυτό, το κέντρο της πληροφορικής δεν πρέπει να είναι ο υπολογιστής, αλλά ο άνθρωπος. Παρομοιάζει την κατάσταση με τους κινητήρες, όπου κάποτε υπήρχε ένας ανά εργοστάσιο, ενώ πλέον ένα απλό αμάξι περιέχει πάνω από 20. Αναφέρει πως αν και φαντάζει απίθανο να υπάρχουν εκατοντάδες υπολογιστές σε ένα δωμάτιο, το ίδιο απίθανο φάνταζε κάποτε να διατρέχουν εκατοντάδες Volt σε καλώδια μέσα στους τοίχους ενός δωματίου, κάτι που σήμερα θεωρείται δεδομένο και «αόρατο» [21].

Ο όρος «Internet of Things» γεννήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '90 από τον επιχειρηματία Kevin Ashton, ο οποίος είναι ένας από τους ιδρυτές του Auto-ID Center στο MIT και ήταν ο πρώτος που κατάφερε να κάνει διαχείριση και σύνδεση μιας γραμμής παραγωγής αντικειμένων που ταυτοποιούνται με τη χρήση ραδιοσυχνοτήτων (RFID-tagged) ή με γραμμοκώδικα (barcoded items), προσφέροντας έτσι περισσότερη αποτελεσματικότητα και υποβάλλοντας τις επιχειρήσεις σε διαδικασία ελέγχου και λογοδοσίας [22]. Πιο συγκεκριμένα, ο εν λόγω όρος πρωτο-χρησιμοποιήθηκε σε μια παρουσίαση του Ashton πίσω στο 1999 και έμελλε να επικρατήσει. Την ίδια χρονιά, ο Gershenfeld (1999) δημοσίευσε έργο με τίτλο «Όταν τα πράγματα ξεκινούν να σκέφτονται», στο οποίο αποτυπωνόταν το όραμα του για την εξέλιξη του Παγκόσμιου Ιστού ως «μια δομή στην οποία τα πράγματα (things) χρησιμοποιούν το διαδίκτυο ώστε να μη χρειάζεται να το κάνουν οι άνθρωποι» [23].

*Το διαδίκτυο των πραγμάτων λοιπόν, αφορά στη δυνατότητα σύνδεσης αντικειμένων καθημερινής χρήσης (οχήματα, πλοία, οικιακές συσκευές), τα οποία περιέχουν ενσωματωμένα ηλεκτρονικά συστήματα, λογισμικά, αισθητήρες, στο ίντερνετ ή σε κάποιο άλλο δίκτυο με σκοπό την ανάληψη δράσεων για τη βελτίωση της ανθρώπινης ζωής, με ή χωρίς άμεση ανθρώπινη παρέμβαση. Δηλαδή, δίνεται η δυνατότητα σε διατάξεις, οι οποίες ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους αδιάκοπα κάνοντας χρήση κατάλληλων πρωτοκόλλων επικοινωνίας, να ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσω του Διαδικτύου, να αποθηκεύουν και να επαναφέρουν δεδομένα, να ενημερώνουν το υλικολογισμικό τους (firmware), δημιουργώντας ένα έξυπνο συνεχώς συνδεδεμένο στο Διαδίκτυο περιβάλλον [24] (Εικόνα 2).*

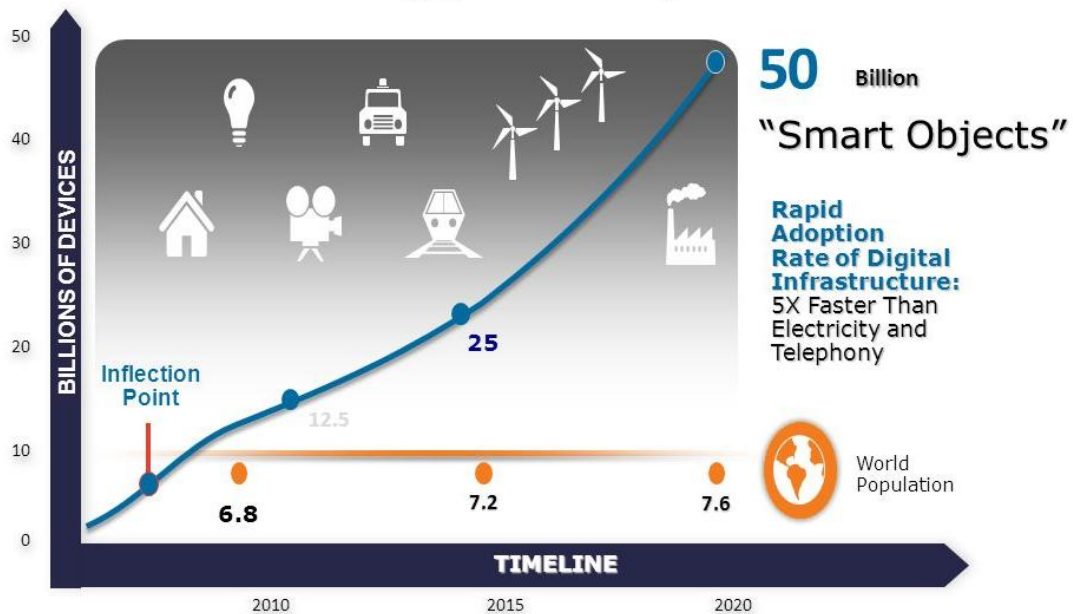


*Εικόνα 2: : Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, [25].*

Η ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στο “Internet” και στο “Internet of Things” (IoT), είναι ότι στο δεύτερο υπάρχει «λιγότερο από όλα» διαθέσιμο σε μια συσκευή ή δίκτυο συσκευών, λιγότερη μνήμη, μικρότερη ισχύς επεξεργασίας, μικρότερο εύρος ζώνης και άλλα, όπως φυσικά και λιγότερη διαθέσιμη ενέργεια. Αυτή η ανάγκη του «να γίνονται περισσότερα με λιγότερους πόρους» αναδύθηκε είτε γιατί τα «πράγματα» δουλεύουν με μπαταρία και η μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής της είναι προτεραιότητα, είτε γιατί ο αριθμός τους θα είναι τεράστιος. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Δεδομένων (International Data Corporation (IDC)) και την Παγκόσμια Πρόγνωση του Ιντερνετ των Πραγμάτων 2015 -2020 (Worldwide Internet of Things Forecast, 2015–2020) υπολογίζεται ότι 30 δισεκατομμύρια αυτόνομες συσκευές θα έχουν διασυνδεθεί μέχρι το 2020). Μια άλλη εκτίμηση προβλέπει περίπου 1000 συσκευές ανά άτομο μέχρι το 2025 [26]. Μία τρίτη πηγή αναφέρει ότι ο αριθμός των συνδεδεμένων στο ίντερνετ συσκευών το 2011 ξεπέρασε σε αριθμό τον παγκόσμιο πληθυσμό των ανθρώπων και προβλέπει έως το 2020 το άθροισμα των εν λόγω συσκευών να κυμαίνεται μεταξύ 26 και 50 δισεκατομμύρια (Εικόνα 3) [27, 28].

Αυτό οδηγεί στα όρια την εφαρμοσιμότητα παραδοσιακών κυψελωτών δικτύων καθώς και κάποιες τεχνολογίες, όπως παραδείγματος χάριν το WiFi, λόγω των απαιτήσεων ενέργειας και κλίμακας μεγεθών [29].

# Market Opportunity



Εικόνα 3: Οι συνδεδεμένες στο Internet συσκευές και η μελλοντική εξέλιξη, [27].

Ως «πράγματα» ορίζονται αντικείμενα τα οποία μπορούν να ενσωματωθούν σε δίκτυα επικοινωνίας και συσχετίζουν πληροφορίες τόσο με στατικό τρόπο όσο και με δυναμικό. Ένα έξυπνο αντικείμενο είναι ένα φυσικό αντικείμενο στο οποίο ένας επεξεργαστής, σύστημα αποθήκευσης δεδομένων, σύστημα αισθητήρων και τεχνολογία δικτύου είναι ενσωματωμένα [30]. Ορισμένα έξυπνα αντικείμενα μπορούν, επίσης, να επηρεάσουν το περιβάλλον τους μέσω ενεργοποιητών. Καταρχάς, όλα τα φυσικά αντικείμενα μπορούν να μετατραπούν σε έξυπνα αντικείμενα, για παράδειγμα συμβατικά αντικείμενα καθημερινής χρήσης όπως στυλό, ρολόγια χειρός (υπάρχουν πολυάριθμα μοντέλα ρολογιών χειρός με αισθητήρες και επεξεργαστές, για τη μέτρηση του καρδιακού ρυθμού ή για τον προσδιορισμό της γεωγραφικής θέσης), ή αυτοκίνητα (πιο πρόσφατα, αυτόνομα αυτοκίνητα). Σε ένα βιομηχανικό πλαίσιο, θα μπορούσε να είναι μια μηχανή ή το προϊόν που θα καταστεί έξυπνο. Τα έξυπνα αντικείμενα μπορούν να είναι οπουδήποτε. Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχει σχεδόν κανένας περιορισμός όσον αφορά στους τομείς ηλεκτρονικών συσκευών, οικιακών, ιατρικών συσκευών, στις κάμερες και σε όλα τα είδη αισθητήρων και συσκευών συλλογής δεδομένων όπου οι περισσότερες έξυπνες συσκευές πλέον διαθέτουν διεπαφή χρήστη (user interface) και δυνατότητα αλληλεπίδρασης και επικοινωνίας με το περιβάλλον και με άλλες. [30]



Η ικανότητα των έξυπνων αντικειμένων να επικοινωνούν με άλλα αντικείμενα καθώς και με το περιβάλλον τους είναι η επιτομή του κορμού του IoT. Συνυφασμένο με αυτό είναι η ιδέα ότι συγκεκριμένες πληροφορίες μπορούν να ληφθούν από οποιοδήποτε δικτυωμένο έξυπνο αντικείμενο, το οποίο μοναδικά ταυτοποιείται και εντοπίζεται και μπορεί να διαθέτει τη δική του ιστοσελίδα, δηλαδή τη δική του προσωπική διεύθυνση IP.

Η πορεία του Internet of Things από την ανάδυσή του το 1999 έως και σήμερα είναι εκθετικά ανοδική και με γνώμονα την απλούστευση της ζωής του ανθρώπινου είδους έχει ήδη υπέρογκες δυνατότητες για τις οποίες δεν τίθεται κανένας περιορισμός. Η εξέλιξη του «Διαδικτύου των Πραγμάτων» έχει συντελέσει στη δημιουργία ολοένα και περισσότερων πρακτικών εφαρμογών όχι μόνο στη Βιομηχανία αλλά και στη Ναυτιλία. Για την υλοποίηση αυτών των πρακτικών εφαρμογών απαιτείται χρήση διαφορετικών κάθε φορά τεχνολογιών, αφού ο εκάστοτε κλάδος έχει μοναδικές ανάγκες και απαιτήσεις [31]. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων παρέχει την καλύτερη δυνατή λύση για τις υποβόσκουσες απαιτήσεις των συνεχώς αυξανόμενων σε αριθμό αλλά και καθημερινά εξελισσόμενων με ραγδαίο ρυθμό συσκευών.

## **2.2 Εφαρμογές του Internet of Things (IoT)**

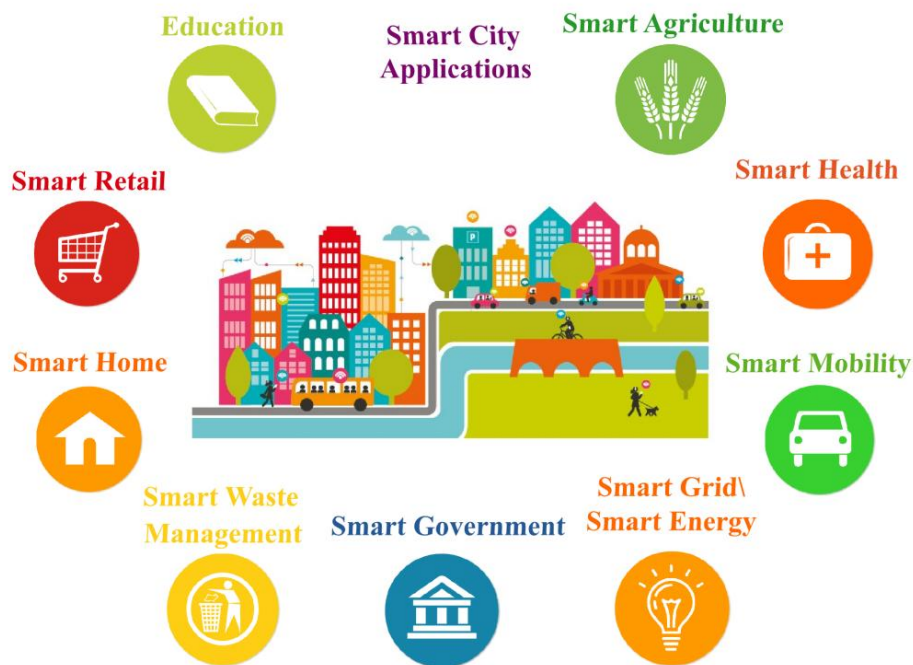
Όταν τελικά υπερπηδήθηκε το κατώφλι του να συνδέονται στο διαδίκτυο αντικείμενα περισσότερα από ό,τι ο ανθρώπινος πληθυσμός, ένα τεράστιο παράθυρο άνοιξε που έδωσε την ευκαιρία να δημιουργηθούν εφαρμογές τέτοιου είδους σε τομείς όπως ο αυτοματισμός και η μηχανή προς μηχανή επικοινωνία. Μία από τις εν λόγω εφαρμογές αναφέρεται ως το «έξυπνο σπίτι». Ένα έξυπνο σπίτι, δηλαδή, έχει συνείδηση για ό,τι συμβαίνει μέσα σε αυτό και είναι σε θέση να αντιμετωπίσει επαρκώς θέματα ασφαλείας μέσω πολύπλοκων συστημάτων για την ανίχνευση πυρκαγιάς, κλοπής ή παράνομης εισόδου [32].

Οι δυνατότητες των εφαρμογών του IoT δεν περιορίστηκαν, όμως, στα έξυπνα σπίτια, αλλά εξαπλώθηκαν σε ολόκληρες πόλεις, οι οποίες ονομάστηκαν «έξυπνες πόλεις», δημιουργώντας, έτσι, αστικές περιοχές με βιώσιμη ανάπτυξη και υψηλή ποιότητα ζωής. Αναπόσπαστο κομμάτι των έξυπνων πόλεων αποτελεί η «έξυπνη μετακίνηση» (smart mobility), η οποία περιλαμβάνει ευφυείς αυτοκινητόδρομους και συστήματα πλοήγησης με προειδοποιητικά μηνύματα και εκτροπές κατεύθυνσης



ανάλογα με τις κλιματικές αλλαγές ή την κυκλοφοριακή συμφόρηση ή τυχόν ατύχημα ή κάποιο άλλο απροσδόκητο γεγονός (Εικόνα 4).

Η χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων στα πλαίσια της βιομηχανίας αλλά και της γεωργίας (smart agriculture) γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη. Έτσι, επιτρέπεται η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο (in real time) παραμέτρων τόσο ειδικών για την κάθε κατηγορία όπως ποιότητα εσωτερικού αέρα, αδιάκοπη και ορθή λειτουργία της γραμμής παραγωγής όσον αφορά στη βιομηχανία, έλεγχος συνθηκών μικροκλίματος των θερμοκηπίων και αλμυρότητας εδάφους όσον αφορά στη γεωργία όσο και γενικών φυσικών ποσοτήτων, όπως θερμοκρασία και υγρασία για αμφότερες τις κατηγορίες [32, 33].



Εικόνα 4: Οι "έξυπνες" εφαρμογές του IoT, [34].

Κοινό στόχο των παραπάνω τομέων αποτελεί η εξοικονόμηση και η διαχείριση ενέργειας, η οποία μέσω του Διαδικτύου των Πραγμάτων έχει φθάσει σε βέλτιστα επίπεδα, δημιουργώντας έτσι το πεδίο των «Έξυπνων Δικτύων» (Smart Grid).

### 2.3 Internet of Marine Things (IoMT)

Η ραγδαία ανάπτυξη που σημειώνεται στη βιομηχανία της Ναυτιλίας έχει ως αποτέλεσμα η δομή των σημερινών πλοίων να είναι αξιοσημείωτα μεγαλύτερης κλίμακας και πολυπλοκότητας. Αυτό έχει ως συνεπακόλουθο η επικοινωνία και η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του Engine Control Room (ECR) και κάθε άλλου σημείου του πλοίου να είναι πλέον άκρως απαιτητική και αδιάβλητης σημασίας.

Το θέμα της επικοινωνίας, όμως, ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του πλοίου και την επιχείρησή του, αφού διαφέρουν και οι εκάστοτε απαιτήσεις. Πιο συγκεκριμένα, τα εμπορικά πλοία μεταφέρουν διαφόρων ειδών φορτία, όπως containers, κορμούς, ορυκτά, ακατέργαστα έλαια και υγροποιημένο φυσικό αέριο (liquefied natural gas, LNG). Τα στρατιωτικά πλοία επιχειρούν σε περιπτώσεις περιπολίας, μάχης, μεταφοράς και υποστήριξης των στρατιωτικών δυνάμεων της στεριάς επομένως πρέπει να έχουν ευελιξία στο χειρισμό πλοήγησής τους, που είναι απαραίτητο για να φέρνουν εις πέρας τις αποστολές τους. Τα επιβατηγά και τα κρουαζιερόπλοια πρέπει να προσφέρουν άνεση και ποιότητα ταξιδιού στους επιβάτες τους, με γνώμονα φυσικά πάντα την ασφάλεια. Επιπλέον, καθ' όλη τη διάρκεια που το πλοίο βρίσκεται σε επιχείρηση στη θάλασσα, είναι απαραίτητο να παρέχεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη άνεση και ασφάλεια, τόσο στο πλήρωμα όσο και στους επιβάτες, χωρίς όμως να διακυβεύεται η αποδοτικότητα της επιχείρησης [11].

Παρόλο που το επίπεδο των αυτοματισμών καθώς και της ασφάλειας στα πλοία που κατασκευάζονται τα τελευταία χρόνια έχει φθάσει σε υψηλά επίπεδα, η πλειοψηφία των ναυτιλιακών επιχειρήσεων μέχρι στιγμής αρνείται να αξιοποιήσει το μέγιστο των δυνατοτήτων αυτών των τεχνολογιών ώστε να αποφύγει περαιτέρω αύξηση του κόστους κατασκευής. Ένα κομμάτι των τεχνολογικών δυνατοτήτων και της εξέλιξης των αυτοματισμών αφορά πλέον στην ασύρματη επικοινωνία των ηλεκτρονικών συστημάτων και την ασύρματη μεταφορά δεδομένων μεταξύ αυτών, τόσο στο μηχανοστάσιο (Main Engine Room, MER) και από εκεί απευθείας στο δωμάτιο ελέγχου της μηχανής (Engine Control Room, ECR) όσο και από το ECR στο CCR (Cargo Control Room), καθώς και μεταξύ της γέφυρας (Bridge) και άλλων καίριων σημείων του πλοίου.

Η επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ του ECR, του CCR, της γέφυρας και άλλων σημείων του πλοίου είναι άκρως απαραίτητη, διότι οι χώροι αυτοί διαδραματίζουν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο για τη λειτουργία του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, το δωμάτιο

ελέγχου της μηχανής (ECR) (που φαίνεται στην Εικόνα 5) είναι η καρδιά του πλοίου και βρίσκεται μέσα στο μηχανοστάσιο. Πάντα υπάρχει ένα άτομο εκεί που επιβλέπει τις ενδείξεις στους υπολογιστές που έρχονται από τα διάφορα μέρη του μηχανοστασίου, αλλά και από όλο το πλοίο μέσω των αισθητήρων. Στο ECR γίνεται παρακολούθηση της κύριας μηχανής, των ηλεκτρομηχανών και του βοηθητικού λέβητα και λέβητα καυσαερίων, ανίχνευση καπνού ή πυρκαγιάς, μείωση στροφών και αυτόματη κράτηση της κύριας μηχανής, αυτόματο απενεργοποίηση του βοηθητικού λέβητα, αυτόματη κράτηση των ηλεκτρομηχανών και βοηθητικών μηχανημάτων, καταγραφή μετρήσεων, παραγγελμάτων και συμβάντων, έλεγχος κινήσεων της κύριας μηχανής που γίνεται από την γέφυρα, καθώς και έλεγχος ταχύτητας του πλοίου. Φυσικά και οποιαδήποτε άλλη εργασία πρέπει να γίνει γίνεται από εκεί. Για παράδειγμα, το πλοίο έχει απέραντα δίκτυα και χιλιάδες μέτρα από σωλήνες που μεταφέρουν πετρέλαιο, λάδι, νερό, ατμό, νερά αποχέτευσης και πολλά άλλα. Όπως επίσης και πολλές δεξαμενές αποθήκευσης. Όλα αυτά δεν γίνονται πλέον χειροκίνητα, αλλά αυτόματα από το δωμάτιο ελέγχου [35]. Στο ECR, λοιπόν, γίνεται επίβλεψη όλου του πλοίου.



*Εικόνα 5: Ένα τυπικό δωμάτιο ελέγχου της μηχανής (Engine Control Room, ECR), [36].*

Το δωμάτιο ελέγχου φορτίου (Cargo Control Room, CCR) (Εικόνα 6) είναι ο χώρος του πλοίου όπου το υπεύθυνο προσωπικό παρακολουθεί και ελέγχει τη φόρτωση και εκφόρτωση του απαραίτητου φορτίου. Ο εξοπλισμός του CCR δίνει τη δυνατότητα στο υπεύθυνο προσωπικό να ελέγχει τις αντλίες του φορτίου (cargo pumps) και τις αντλίες αδειάσματος (stripping pumps), να ελέγχει και να παρακολουθεί τις θέσεις των βαλβίδων, να παρακολουθεί τα επίπεδα των υγρών φορτίων στις δεξαμενές και άλλα [37].

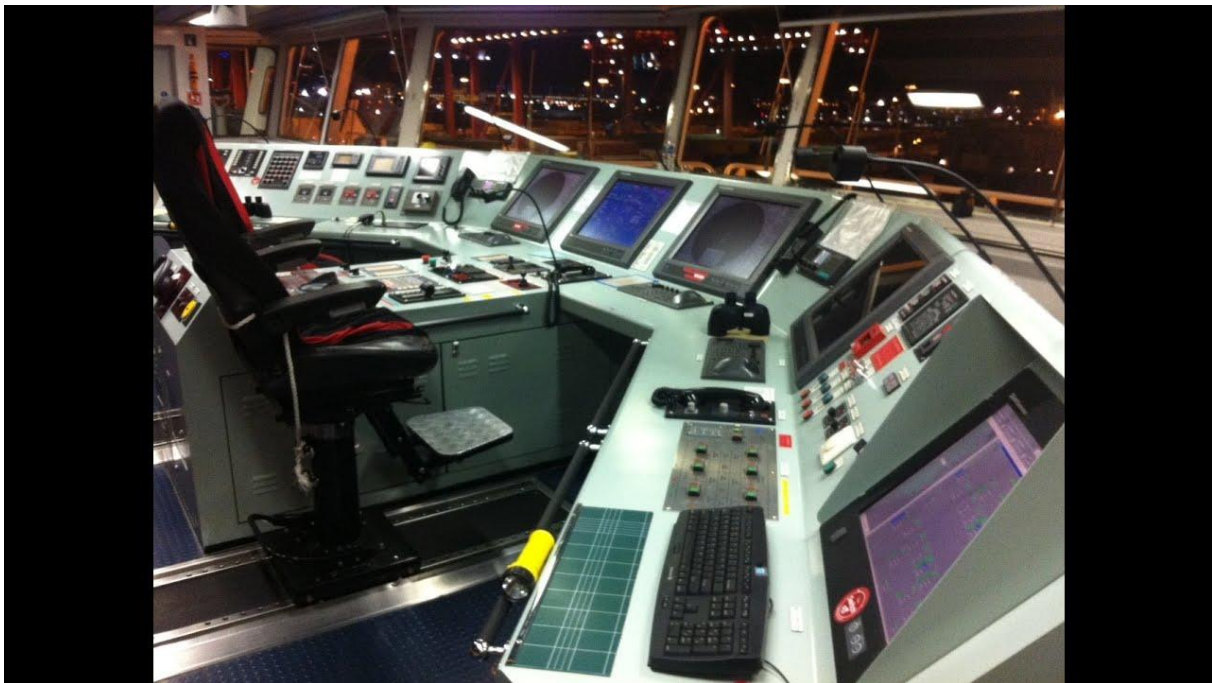


*Εικόνα 6: Ένα τυπικό δωμάτιο ελέγχου φορτίου (Cargo Control Room, CCR), [36].*

Η γέφυρα (**Bridge**) (που φαίνεται στην Εικόνα 7) είναι ο πλέον νευραλγικός χώρος του πλοίου. Σε αυτήν λαμβάνουν χώρα οι σημαντικότερες και ζωτικότερες επιχειρήσεις του πλοίου. Η παγκόσμια ναυτιλιακή κοινότητα έχει αναγνωρίσει τη σπουδαιότητα της εργονομίας της γέφυρας, και έχει θεσπίσει κανονισμούς μέσα από τις διεθνείς συμβάσεις (SOLAS, Safety of Life at Sea) [38] που αφορούν στον ηλεκτρονικό



και γενικό εξοπλισμό και έχει εκδώσει οδηγίες για τον εργονομικό σχεδιασμό της γέφυρας με το παγκόσμιο θεσμικό της όργανο (IMO guidelines – MSC CIRC. 982) και τον Παγκόσμιο Οργανισμό Τυποποίησης (International Organization of Standardization –ISO 8468). Με τη συμμετοχή της σύγχρονης τεχνολογίας, αναπτύχθηκαν στη γέφυρα σύγχρονα ναυτιλιακά ηλεκτρονικά συστήματα με στόχο την συγκέντρωση των απαραίτητων πληροφοριών στους αξιωματικούς γέφυρας σε όλο το φάσμα των επιχειρήσεων των πλοίων. Δρομόμετρα (δηλαδή τα ναυτιλιακά εκείνα όργανα που μετράνε την ταχύτητα του πλοίου), βυθόμετρα, ηλεκτρονικοί χάρτες και άλλα αποτελούν μέρος των ηλεκτρονικών συστημάτων που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ασφαλέστερη πλοήγηση, καθώς και στην ευκολότερη λειτουργία και διαχείριση της γέφυρας του πλοίου [39].



*Εικόνα 7: Μία τυπική γέφυρα (Bridge), [40].*

Με την ανάλυση των παραπάνω αναδεικνύεται η ζωτική σημασία των χώρων αυτών για την διαχείριση του πλοίου και ως επέκταση την αναγκαιότητα για δημιουργία μιας νέας διάταξης επικοινωνίας, η οποία επιτρέπει παράλληλα με την ενσύρματη ανταλλαγή δεδομένων, οι ηλεκτρονικές συσκευές/αισθητήρες και οι λοιποί ναυτιλιακοί αυτοματισμοί να επικοινωνούν και ασύρματα. Με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί για το Internet of Things και με γνώμονα την ανάγκη δημιουργίας της νέας αυτής διάταξης, γεννήθηκε το Internet of Marine Things (IoMT).



Εικόνα 8: Internet of Marine Things (IoMT), [41].

Καθώς αναδύονται ολοένα και περισσότερες εφαρμογές του IoT, τα συστήματα αυτοματισμού στα πλοία αναμένεται να είναι αναπόσπαστο κομμάτι της εικόνας του Internet of Things (Εικόνα 8). Ως εκ τούτου, γίνονται προσπάθειες για να προσδιοριστούν τα πρωτόκολλα, οι προδιαγραφές (standards), η αρχιτεκτονική καθώς και οι τεχνολογίες συλλογής και ανάλυσης δεδομένων που απαρτίζουν το Internet of Marine Things.

Τα συστήματα παρακολούθησης όλων των ενδείξεων στο πλοίο (Shipboard Monitoring) είναι δυνατό να αποτελούνται από μερικές χιλιάδες αισθητήρες (sensors) και ενεργοποιητές (actuators). Για το λόγο αυτό, παρόλο που η πρόοδος της Ναυπηγικής έχει συντελέσει στη δημιουργία καινοτόμων και ιδιαίτερα περίπλοκων σχεδίων, η γιγαντιαία έκταση των καλωδίων που είναι απαραίτητα για τη σύνδεση όλων των παραπάνω με το σύνολο των μονάδων ελέγχου (control units) που είναι κατανομημένες από άκρη σε άκρη του πλοίου, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός πλοίου αποτελεί ένα τεχνολογικό στοίχημα [5]. Επίσης, με τη χρήση καλωδίων τόσων

χιλιομέτρων αυξάνεται δραματικά τόσο το κόστος κατασκευής ενός πλοίου όσο και το βάρος του, επομένως ένα σύστημα παρακολούθησης με ασύρματους αισθητήρες (Wireless Sensor Network Monitoring, WSNM) επιτρέπει τη μείωση του κόστους κατασκευής αλλά και συντήρησης, καθώς και του αριθμού των απαραίτητων εγκατεστημένων καλωδίων. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) έχουν κερδίσει παγκόσμια προσοχή τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα με τον πολλαπλασιασμό της τεχνολογίας μικρό-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS) η οποία έχει διευκολύνει την ανάπτυξη έξυπνων αισθητήρων. Οι έξυπνοι αισθητήρες είναι μικρές συσκευές που αποτελείται από έναν ή περισσότερους αισθητήρες, μνήμη, επεξεργαστή, τροφοδοτικό και μονάδα ραδιοσυχνότητας.










Παρόλα αυτά, ένα WSN επί του πλοίου λειτουργεί σε ένα «τραχύ» και υπό αντίξοες συνθήκες περιβάλλον. Για την κατασκευή ενός πλοίου κόβονται ή συγκολλώνται μεταξύ τους πολλές και διαφόρων μεγεθών πλάκες από ατσάλι ώστε να σχηματίσουν ένα μπλοκ (δομικό στοιχείο) και η κατασκευή ολοκληρώνεται ενώνοντας όλα τα μπλοκ μεταξύ τους. Αυτό όμως σημαίνει ότι το πλοίο στην ουσία είναι μια υπερμεγέθης δομή που αποτελείται κυρίως από ατσάλι [13]. Ως εκ τούτου, η μεταλλική δομή του μπουλμέ και των υδατοστεγών θυρών του πλοίου (Εικόνα 9) θέτουν σημαντικούς περιορισμούς στην ασύρματη επικοινωνία, τους οποίους νέα πρωτόκολλα επικοινωνίας καλούνται να υπερπηδήσουν.



*Εικόνα 9: Η μεταλλική δομή του πλοίου, [42].*

## 2.4 Τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης LPWAN

Τα χαμηλής ισχύος ασύρματα δίκτυα (Low Power Wide Area Network, LPWAN) σχεδιάστηκαν κυρίως για τη δικτύωση μηχανής προς μηχανή (machine to machine, M2M) και χρησιμοποιούνται ήδη ευρέως για υπηρεσίες, όπως παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων, παρακολούθηση βιομηχανικού εξοπλισμού και συλλογή δεδομένων από έξυπνους μετρητές. Σύμφωνα με τον Jim Mottish, επικεφαλής ερευνητή της Machina Research, μέχρι το 2022 το LPWAN θα είναι η κυρίαρχη μορφή της ασύρματης ευρυζωνικής σύνδεσης για το M2M. Το LPWAN ή LPN (Low Power Network) είναι ένα είδος δικτύου ασύρματης επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας, σχεδιασμένο να επιτρέπει απομακρυσμένη επικοινωνία σε απόσταση δέκα έως σαράντα χιλιομέτρων (10-40 km) σε αγροτικές περιοχές και ενός έως πέντε χιλιομέτρων (1-5 km) σε κατοικημένες περιοχές, χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων μεταξύ των συνδεδεμένων αντικειμένων, όπως αισθητήρων που λειτουργούν με μπαταρία. Τα δίκτυα LPWA αντιπροσωπεύουν μια νέα τάση στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών, σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να ενεργοποιούν τις δυνατότητες του IoT, καθώς μία τεχνολογία δεν μπορεί να εξυπηρετήσει όλες τις προβλεπόμενες εφαρμογές και τους τομείς του διαδικτύου, [15].

	<b>Local Area Network</b> Short Range Communication	<b>Low Power Wide Area</b> (LPWAN) Internet of Things	<b>Cellular Network</b> Traditional M2M
	<b>40%</b>	<b>45%</b>	<b>15%</b>
	Well established standards In building	Low power consumption Low cost Positioning	Existing coverage High data rate
	Battery Live Provisioning Network cost & dependencies	High data rate Emerging standards	Autonomy Total cost of ownership
	 		  

Εικόνα 10: Σύγκριση LAN, LPWAN και Cellular Network, [43].



Στις αρχές του 2013 οι Low Power Wide Area Network τεχνολογίες δεν είχαν εμφανιστεί, παρόλα αυτά η ταχύτατη εξέλιξη της αγοράς του IoT επέτρεψε στην LPWAN να γίνει μια από τις πιο ανεπτυγμένες κατηγορίες στο διαδίκτυο. Έχουν προκύψει πολλές τεχνολογίες LPWAN τόσο στο αδειοδοτημένο όσο και στο μη αδειοδοτημένο εύρος ζώνης συχνοτήτων, οι σημαντικότερες μεταξύ αυτών των αναδυόμενων τεχνολογιών που ηγούνται στο χώρο του LPWAN είναι οι SigFox, NB-IoT, LoRa, και LTE-M [31].

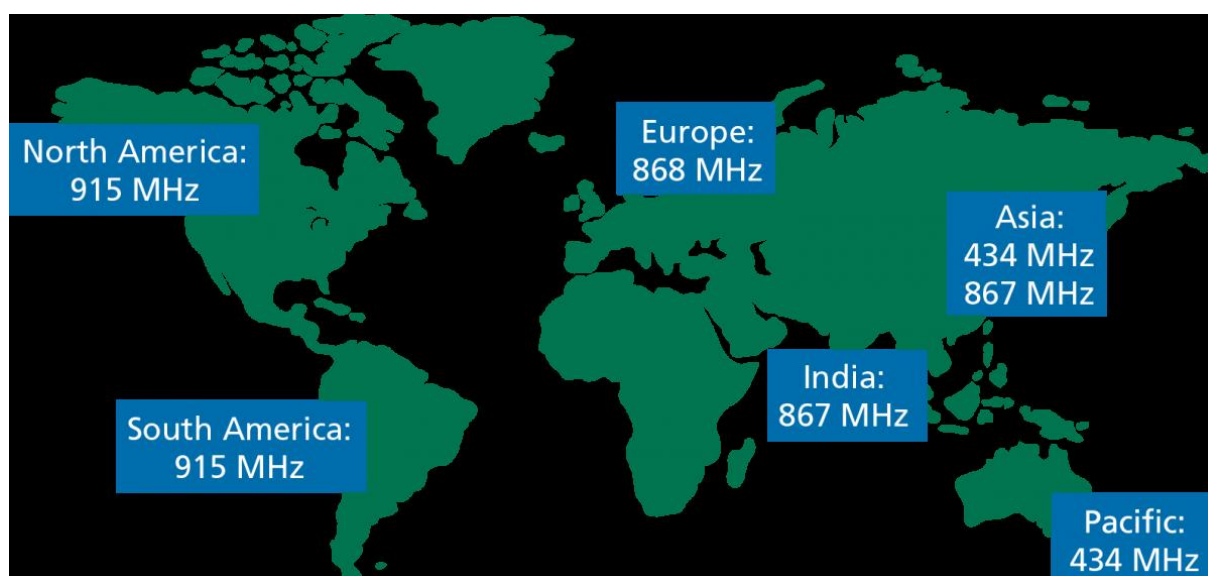
Η **Sigfox** είναι μια start – up εταιρεία η οποία ανέπτυξε μια LPWAN τεχνολογία το 2010 στην Toulouse της Γαλλίας, δίνοντας της ως όνομα, το όνομα της εταιρείας. Λειτουργεί και εμπορεύεται τη δική της λύση IoT σε 31 χώρες και παραμένει υπό εξέλιξη παγκοσμίως λόγω της συνεργασίας με διάφορους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων. Η Sigfox χρησιμοποιεί μη εξουσιοδοτημένες ζώνες ISM (Industrial, Scientific, and Medical) όπως η 868 MHz στην Ευρώπη, 915 MHz στη Βόρεια Αμερική και 433 MHz στην Ασία. Επειδή χρησιμοποιεί μια τεχνική διαμόρφωσης Ultra-Narrow Bandwidth (UNB) η οποία καλείται Διαφοροποιημένη δυαδική μετατόπιση φάσης (Differential Binary Phase Shift Keying, DBPSK), πολλές συσκευές μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους σε μεγάλο εύρος, από 10 έως 50 χιλιόμετρα, με χαμηλή κατανάλωση ρεύματος, χαμηλό κόστος υλικών και εύκολη εφαρμογή. Ωστόσο, αυτή η τεχνική διαμόρφωσης έχει και μερικά μειονεκτήματα. Λόγω του μικρού εύρους ζώνης, η μέγιστη ανερχόμενη ζεύξη που μπορεί να επιτευχθεί είναι μόλις 100 bps (bits per second) [15].

Άλλη μια ευρέως διαδεδομένη μεγάλης εμβέλειας τεχνολογία είναι η **LoRa**, που είναι ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα μεγάλης εμβέλειας, μικρού εύρους ζώνης, που αποτελεί το DNA του Διαδικτύου των πραγμάτων (Εικόνα 11).



Εικόνα 11: Το DNA του IoT: Τεχνολογία LoRa [44].

Το LoRaWAN αποτελεί ένα επίπεδο δικτύωσης (MAC Layer) ανοιχτού προτύπου, το οποίο διαχειρίζεται μια σύμπραξη εταιρειών, η LoRa Alliance [45]. Ωστόσο, δεν είναι πραγματικά ανοιχτού υλικού, δεδομένου ότι το υπάρχον Ολοκληρωμένο Κύκλωμα (IC) πομποδέκτη για την υλοποίηση μιας πλήρους στοίβας LoRaWAN είναι διαθέσιμο μόνο μέσω της Semtech. Στην Ευρώπη η LoRa χρησιμοποιείται στη μη εξουσιοδοτημένη ζώνη των 868 MHz (ή κάποιες φορές και στη ζώνη των 433 MHz ή 169 MHz), στην Ασία στην ζώνη των 434 MHz ή και 867 MHz και στην Αμερική στη ζώνη των 915 MHz [46] (Εικόνα 12).

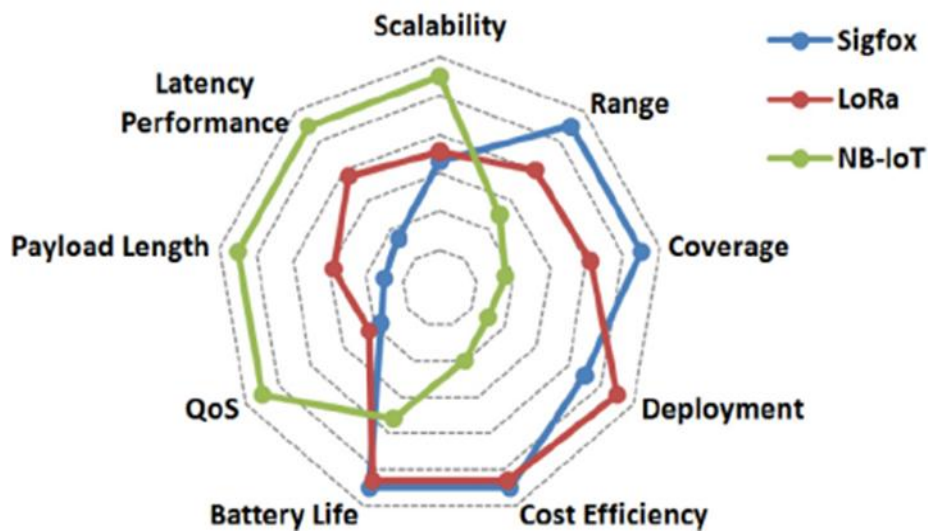


Εικόνα 12: Παγκόσμιος χάρτης με τις ραδιοσυχνότητες της LoRa [47].

Τον Ιούνιο του 2016 η 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP) εισήγαγε το πρωτόκολλο **NB-IoT**. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του νέου πρωτοκόλλου είναι η συμβατότητά του με τα παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα. Χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες με το LTE (Long Term Evolution), το οποίο καθιστά απαραίτητη την άδεια για την χρήση του. Η διαμόρφωσή του είναι η QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), ενώ παρέχει ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 200Kbps. Η υλοποίηση του NB-IoT μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας το υπάρχον δίκτυο κινητής τηλεφωνίας [48]. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του NB-IoT είναι ότι η ζωή της μπαταρίας μπορεί να αγγίζει

ακόμη και τα δέκα (10) χρόνια, εφόσον η μέγιστη εκπομπή καθημερινά δεν ξεπερνάει τα διακόσια (200) bytes.

Η παρακάτω εικόνα συνοψίζει τα διαφορετικά πλεονεκτήματα που έχει η καθεμιά από τις τεχνολογίες που προαναφέρθηκαν (Sigfox, LoRa, NB-IoT) σε σχέση με διάφορους παράγοντες του Διαδικτύου των Πραγμάτων, όπως χρόνος καθυστέρησης των δεδομένων (Latency Performance), δυνατότητα επέκτασης (Scalability), εύρος (Range), κάλυψη (Coverage), ανάπτυξη (Deployment), σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας (cost efficiency), διάρκεια ζωής μπαταρίας (Battery Life), Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS), μέγεθος ωφέλιμου φορτίου (payload length).



Εικόνα 13: Σύγκριση πλεονεκτημάτων των τεχνολογιών Sigfox, LoRa, NB-IoT [15].

Το **LTE-M** γνωστό και ως LTE Cat M1 είναι ο απλουστευμένος όρος της βιομηχανίας για το LTE-MTC, ένα πρότυπο LPWA που έχει δημιουργηθεί και αυτό επίσης από την 3GPP. Θεωρείται ως μία από τις πρώτες γενιές τεχνολογιών LPWA, όπου αξιοποιεί τα υπάρχοντα δίκτυα LTE επιτρέποντας εξαιρετικά αποδοτική συνδεσιμότητα με εκτεταμένη κάλυψη σε εσωτερικούς και υπόγειους χώρους. Μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της συσκευής επιτρέποντας αποδοτική συνδεσιμότητα σε πολλές ζώνες GSM, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για πολλαπλές μονάδες και παραλλαγές [15]. Συγκριτικά με τα υπόλοιπα LTE δίκτυα, το εύρος ζώνης του είναι πιο

πλατύ αν και προσφέρει μειωμένη κάλυψη. Το LTE-M έχει σχεδιαστεί για τη συχνή μετάδοση δεδομένων με χαμηλότερη ταχύτητα από ό, τι συμβαίνει με τα δίκτυα 4G. Το πλεονέκτημα του LTE-M είναι ότι μπορεί να παρέχει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο.

	LoRa	Sigfox	NB-IoT	LTE-M
<b>Frequency</b>	Europe: 868 MHz. US: 902 MHz. China: 779 MHz	Europe: 868 MHz. US: 902 MHz	Europe: 868 MHz. US: 902 MHz. China: 779 MHz	Europe: 868 MHz. US: 902 MHz. China: 779 MHz
<b>Range</b>	Max. 16 km	Max. 40 km	Max. 40 km	Max. 100 km
<b>Pros</b>	Coverage in the wilderness and underground	Low energy consumption	Strong signal, low energy consumption and excellent security	Larger bandwidth, 1 Mbps per second. Twice the bandwidth of LoRa
<b>Cons</b>	No direct connection between devices	Small quantities of data	At the moment, relatively expensive compared to other LPWAN technologies	At the moment, relatively expensive compared to other LPWAN technologies and expected to be more expensive than NB-IoT in the future
<b>Examples*</b>	A trap that signals when an animal is caught in it. A sensor that measures the aridity of the soil, so a farmer knows when to use his sprinklers	A water or gas pipe that can be opened or shut remotely	A light that turns green when a parking spot is available and red when it is occupied. An app in your car tells you exactly where the available spaces are	Smart meters, mobile payment terminals and fleet management that requires more data traffic than NB-IoT

*Εικόνα 14: Οι προδιαγραφές των τεχνολογιών LPWAN [49].*

## 3. Ανάλυση της τεχνολογίας LoRa

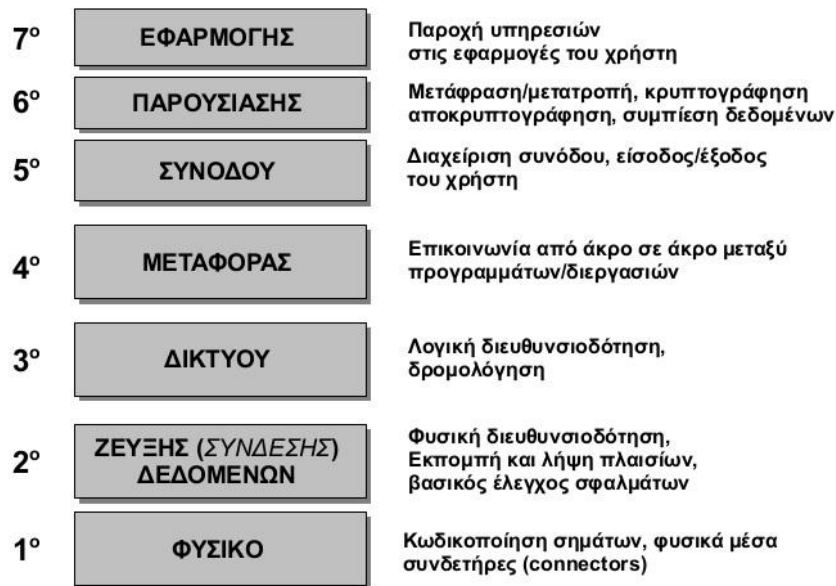
### 3.1 Επισκόπηση τεχνολογίας LoRa και πρωτοκόλλου LoRaWAN

Η LoRa είναι μια φυσικού επιπέδου ασύρματη τεχνολογία που προωθείται από την LoRa Alliance και λειτουργεί σε ζώνη χωρίς άδεια κάτω από 1GHz για επικοινωνία μακρινών αποστάσεων.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία χωρίζεται σε δυο μέρη, στο LoRa που είναι το φυσικό επίπεδο και στο πρωτόκολλο επικοινωνίας που βασίζεται στο φυσικό επίπεδο, το LoRaWAN. Το LoRaWAN ορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας και την αρχιτεκτονική του συστήματος για το δίκτυο, ενώ το φυσικό επίπεδο LoRa επιτρέπει τη σύνδεση επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας. Ακόμη, χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική αστέρα μεγάλης εμβέλειας στην οποία οι πύλες αναμεταδίδουν τα μηνύματα μεταξύ των τελικών κόμβων και του πυρήνα μέσω του δικτύου.

Από τεχνικής άποψης λοιπόν, το πρωτόκολλο LoRaWAN αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: το *φυσικό επίπεδο* (physical layer), το *επίπεδο ζεύξης* (link layer) και την *αρχιτεκτονική δικτύου* (network architecture), τα οποία αποτελούν τα τρία πρώτα επίπεδα το μοντέλου αναφοράς Ανοιχτής Διασύνδεσης Συστημάτων (OSI) (Εικόνα 15). Το OSI, γνωστό και ως μοντέλο των 7 επιπέδων, υποδιαιρεί τις λειτουργίες ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε μια «κατακόρυφη» στοίβα από επίπεδα, για το καθένα από τα οποία μπορεί να οριστεί κάποιο πρωτόκολλο σε μια συγκεκριμένη υλοποίηση.

Μοντέλο αναφοράς  
διασύνδεσης ανοικτών συστημάτων (OSI)  
(ISO/IEC7498-1:1994)



*Εικόνα 15: Τα 7 επίπεδα μοντέλου αναφοράς διασύνδεσης ανοικτών συστημάτων (Open System Interconnection, OSI) [50]*

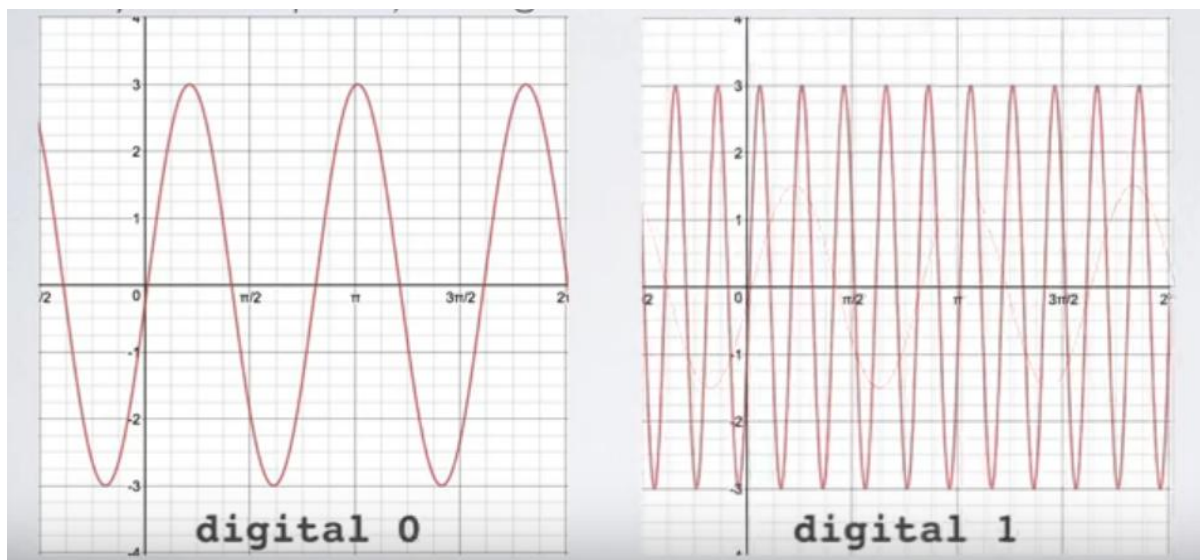
➤ **Φυσικό επίπεδο (physical layer)**

Με βάση, λοιπόν, το μοντέλο OSI το πρώτο επίπεδο του πρωτοκόλλου LoRaWAN είναι το φυσικό (που εκφράζει τη δυαδική μετάδοση σήματος μέσω του φυσικού μέσου), το οποίο αποτελεί ουσιαστικά την κωδικοποίηση της ψηφιακής ή αναλογικής πληροφορίας σε φέρον σήμα (carrier signal), διαδικασία η οποία ονομάζεται διαμόρφωση. Το σήμα που προκύπτει είναι το διαμορφωμένο σήμα (modulated signal), το οποίο, συνήθως, έχει ημιτονοειδή μορφή. Η πληροφορία βρίσκεται στη μορφή ενός σήματος βασικής ζώνης (baseband signal), χαρακτηριστικό του οποίου είναι ότι το φάσμα του ξεκινάει από πολύ χαμηλές συχνότητες και εκτείνεται ως μια μέγιστη συχνότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα μέσα μετάδοσης επιτρέπουν τη διάδοση του σήματος πληροφορίας σε περιοχή συχνοτήτων διαφορετική από την βασική ζώνη. Κατά συνέπεια, για αποτελεσματική χρήση των ιδιοτήτων του μέσου μετάδοσης απαιτείται η μετατόπιση του σήματος από τη βασική ζώνη συχνοτήτων σε μια άλλη ζώνη κατάλληλη προς μετάδοση στο συγκεκριμένο μέσο.



Η διαμόρφωση μπορεί να πραγματοποιηθεί εφαρμόζοντας την πληροφορία σε καθεμιά από τις τρεις βασικές παραμέτρους του φέροντος σήματος: το πλάτος, τη συχνότητα και τη φάση. Όταν η πληροφορία που κωδικοποιείται στο φέρον σήμα είναι αναλογική, χρησιμοποιούνται τα εξής βασικά σχήματα διαμόρφωσης: διαμόρφωση κατά πλάτος (Amplitude Modulation, AM), διαμόρφωση κατά συχνότητα (Frequency Modulation, FM) και διαμόρφωση κατά φάση (Phase Modulation, PM). Όταν η πληροφορία που κωδικοποιείται στο φέρον σήμα είναι ψηφιακή, τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται είναι η διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους (Amplitude Shift Keying, ASK), η διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας (Frequency Shift Keying, FSK) και η διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (Phase Shift Keying, PSK). Στη διαμόρφωση κατά πλάτος (AM) και μετατόπισης πλάτους (ASK) μεταβάλλεται μόνο το πλάτος, στη διαμόρφωση κατά συχνότητα (FM) και μετατόπισης συχνότητας (FSK) μεταβάλλεται μόνο η συχνότητα και στη διαμόρφωση κατά φάση (PM) και μετατόπισης φάσης (PSK) μόνο η φάση.

Για παράδειγμα, για την κωδικοποίηση μίας ψηφιακής πληροφορίας (δηλαδή 1101100111100101...) χρησιμοποιώντας τη διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας (FSK), το αρχικό σήμα μετατρέπεται σε φέρον σήμα μεταβάλλοντας αποκλειστικά τη συχνότητα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 16).



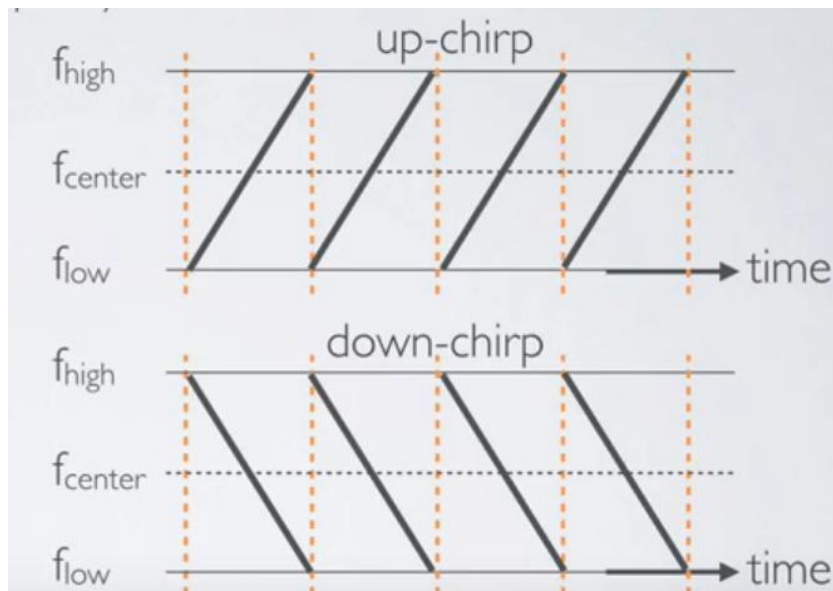
*Εικόνα 16: Κωδικοποίηση του σήματος πληροφορίας (αριστερά) σε φέρον σήμα (δεξιά) χρησιμοποιώντας διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας (FSK)*

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, το διαμορφωμένο σήμα (δεξιά) έχει υψηλότερη συχνότητα από το σήμα πληροφορίας (αριστερά). Το φέρον σήμα αντιπροσωπεύει τη μονάδα (digital 1), ενώ το αρχικό σήμα αντιπροσωπεύει το μηδέν (digital 0).

Η διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας (FSK) χρησιμοποιούταν από αρκετές ασύρματες τεχνολογίες του παρελθόντος, διότι είναι μια αποτελεσματική διαμόρφωση για την επίτευξη μετάδοσης πληροφορίας με χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Η LoRa χρησιμοποιεί μια διαμόρφωση που διατηρεί τα ίδια χαρακτηριστικά χαμηλής ισχύος με τη διαμόρφωση FSK, αλλά αυξάνει σημαντικά το εύρος επικοινωνίας και είναι γνωστή ως CSS διαμόρφωση (Chirp Spread Spectrum). Η Chirp Spread Spectrum είναι μία τεχνική διασποράς φάσματος, με την οποία ένα σήμα που δημιουργείται με ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης διασκορπίζεται σκόπιμα στην περιοχή συχνοτήτων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός σήματος με μεγαλύτερο εύρος ζώνης [51]. Η CSS διαμόρφωση αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1940 για εφαρμογές με χρήση ραντάρ (radar) [52] και έκτοτε χρησιμοποιούταν για δεκαετίες κυρίως για στρατιωτικές εφαρμογές και εφαρμογές διαστημικής επικοινωνίας, λόγω της μεγάλης εμβέλειας και της ανθεκτικότητάς της στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές [43].

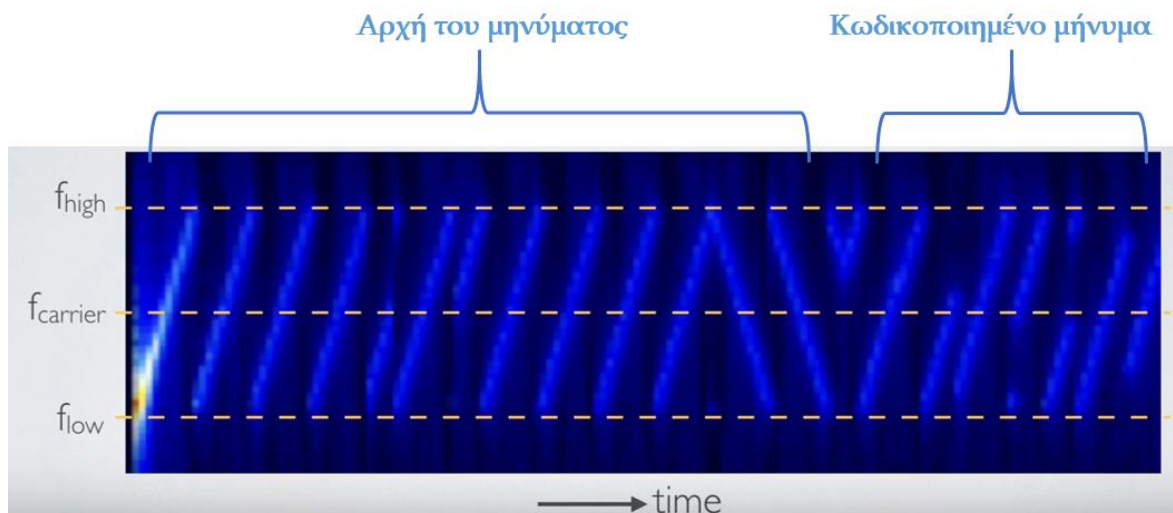
Η τεχνική Chirp Spread Spectrum χρησιμοποιεί ημιτονοειδές σήμα, του οποίου η συχνότητα αυξάνεται και μειώνεται ανάλογα με τον χρόνο. Αντίστοιχα ο χρόνος αυτός μεταφράζεται σε μετατόπιση συχνότητας στην έξοδο της ανάλυσης FFT (Fast Fourier Transform). Έτσι το σύστημα γνωρίζοντας την μετατόπιση συχνότητας αλλά και την βασική συχνότητα Chirp (Compressed High Intensity Radar Pulse) [53], είναι δυνατό να αποδιαμορφώσει τα δεδομένα. Ένα chirp (ή αλλιώς σήμα σάρωσης) είναι ένα σήμα στο οποίο η συχνότητα αυξάνεται (up-chirp) ή μειώνεται (down-chirp) με το χρόνο, όπως αποτυπώνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 17).





Εικόνα 17: Απεικόνιση του up-chirp (επάνω) και του down-chirp (κάτω) με βάση την τεχνική Chirp Spread Spectrum

Αυτά τα σήματα χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά κρυπτογραφημένων μηνυμάτων. Παρακάτω απεικονίζεται ένα πραγματικό σήμα όπως διαμορφώνεται στη LoRa (Εικόνα 18).

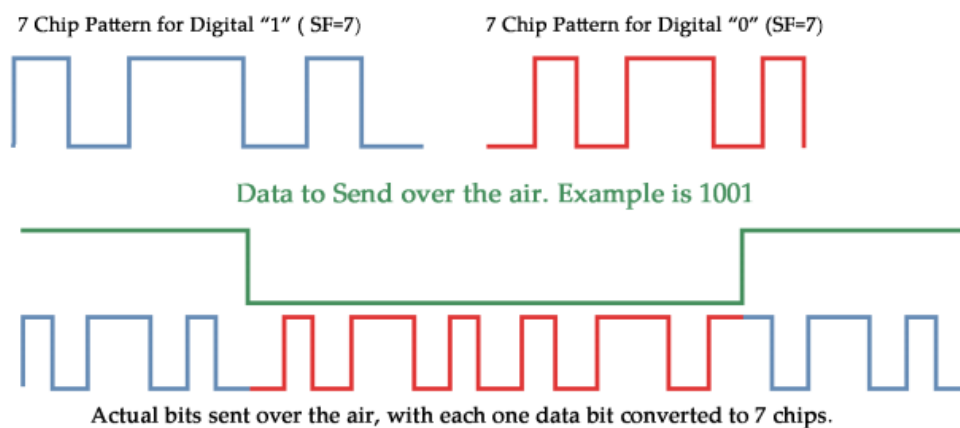


Εικόνα 18: Ένα πραγματικό σήμα όπως διαμορφώνεται στη LoRa: φαίνεται η αρχή του μηνύματος, που αποτελείται από μία σειρά από up-chirps ακολουθούμενα από δύο down-chirps και το κωδικοποιημένο μήνυμα

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στη διαμόρφωση LoRa είναι ο παράγοντας διασποράς (Spreading Factor, **SF**). Η παράμετρος αυτή ορίζεται ως ο λόγος του ρυθμού του σήματος chip ( $R_{chip}$ ) προς το ρυθμό του συμβόλου ( $R_s$ ), δηλαδή:

$$SF = \frac{R_{chip}}{R_s} \quad (1)$$

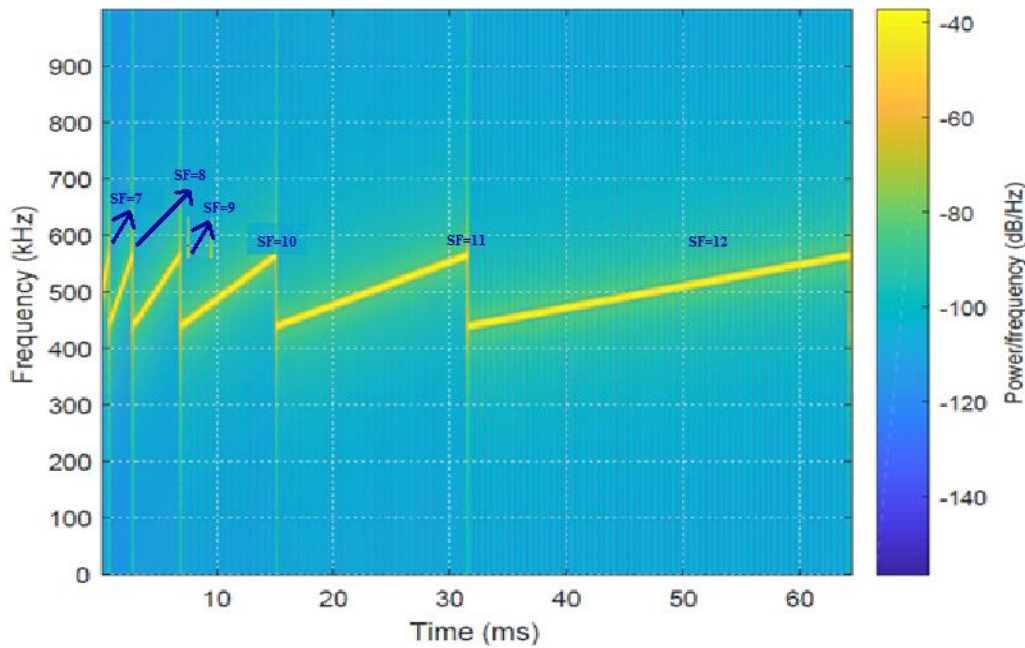
Ως chip ορίζεται ο ορθογώνιος παλμός σε μία δυαδική ακολουθία, πλάτους +1 ή -1, που πολλαπλασιάζεται με μία ακολουθία δεδομένων και με μία κυματομορφή για να σχηματιστεί το μεταδιδόμενο σήμα (Εικόνα 19). Επομένως, chip είναι η ακολουθία των bits του κωδικοποιημένου μηνύματος και λέγεται chip ώστε να μη συγχέεται με τα bits του μηνύματος.



Εικόνα 19: Παλμός chip για τη μονάδα και παλμός chip για το μηδέν και παράδειγμα ενός κωδικοποιημένου μηνύματος (1001) ως παλμοί chips [47]

Ο παράγοντας διασποράς ουσιαστικά αποτελεί τον αριθμό των κωδικοποιημένων bits (σήμα chip) ανά σύμβολο\* και λαμβάνει τιμές μεταξύ 7 και 12. Είναι υπεύθυνος για τη διάρκεια του συμβόλου LoRa, επομένως, υποθέτοντας ότι χρησιμοποιείται καθορισμένο εύρος ζώνης, κάθε αύξηση του παράγοντα διασποράς κατά μία μονάδα έχει ως αποτέλεσμα διπλάσια αύξηση της διάρκειας συμβόλου, όπως αποτυπώνεται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 20).

\*Σύμβολο είναι ένας παλμός (μια κυματομορφή). Η συσκευή-πομπός τοποθετεί σύμβολα στο κανάλι με έναν καθορισμένο και γνωστό ρυθμό συμβόλου (symbol rate) και ο δέκτης είναι υπεύθυνος για την ανίχνευση της αλληλουχίας των συμβόλων ώστε να αναδομεί τα μεταδιδόμενα δεδομένα.



Εικόνα 20: Ένα παραγόμενο *chirp* στη διαμόρφωση *LoRa* (στα 125 KHz), με τον παράγοντα συχνότητας *SF* να λαμβάνει τιμές από 7 έως και 12 [47].

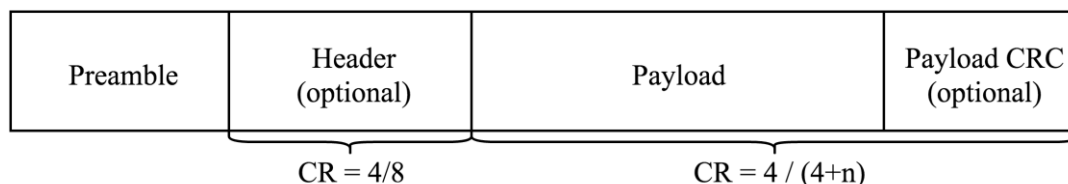
Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια του συμβόλου, τόσο πιθανότερη είναι η αξιόπιστη μεταφορά της πληροφορίας, αφού το διαμορφωμένο σήμα έχει υψηλότερη ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και θόρυβο. Κατά συνέπεια, αύξηση του παράγοντα διασποράς αυξάνει την ευαισθησία του δέκτη και μεγαλώνει την ακτίνα κάλυψης του συστήματος επικοινωνίας. Θα πρέπει, όμως, να ληφθεί επίσης υπόψιν ότι όσο περισσότερα σύμβολα αποστέλλονται τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα μετάδοσης λανθασμένης πληροφορίας, καθώς και ύπαρξης τυχόν συγκρούσεων. Ως εκ τούτου, είναι προτιμότερη η αποστολή μηνυμάτων μικρής έκτασης, όταν επιλέγεται μεγάλος παράγοντας διασποράς [47].

Όπως συμβαίνει και με άλλες μεθόδους διασποράς φάσματος, το ραδιοφωνικό φάσμα που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του σήματος χρησιμοποιεί όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης για να εκπέμψει ένα σήμα, καθιστώντας το ισχυρό απέναντι στο θόρυβο. Ακόμη επειδή τα *chirps* χρησιμοποιούν μια ευρεία ζώνη του φάσματος, το φάσμα εξάπλωσης *chirp* είναι επίσης ανθεκτικό σε διαφυγή πολλαπλών διαδρομών, ακόμα και όταν λειτουργεί σε πολύ χαμηλή ισχύ. Εντούτοις, διαφέρει από την διασπορά φάσματος με άμεση ακολουθία (Direct Sequence, DSSS) ή με τη διασπορά φάσματος εναλλαγής συχνοτήτων (Frequency Hopping, FHSS) στο ότι δεν προσθέτει κανένα ψεύτικο στοιχείο για να το διακρίνει από τον θόρυβο στο κανάλι, αντ' αυτού εξαρτάται από την γραμμική

φύση του chirp pulse. Τέλος, το φάσμα διασποράς είναι ανθεκτικό στο φαινόμενο Doppler\*, το οποίο είναι χαρακτηριστικό στις εφαρμογές κινητών ραδιοσυχνοτήτων [51]. Επομένως, λόγω της CSS διαμόρφωσης του σήματος, δημιουργείται ένα σήμα που έχει χαμηλά επίπεδα θορύβου, είναι ανθεκτικό στις υψηλές παρεμβολές και δύσκολο να εντοπιστεί.

\*Το φαινόμενο Doppler είναι η παρατηρούμενη αλλαγή στη συχνότητα και το μήκος κύματος ενός κύματος από παρατηρητή που βρίσκεται σε σχετική κίνηση με την πηγή των κυμάτων. Ονομάστηκε έτσι προς τιμήν του αυστριακού φυσικού Christian Doppler, που το πρότεινε το 1842.

Η δομή του πλαισίου του φυσικού επιπέδου της LoRa (physical frame format), η οποία αποτυπώνεται στην Εικόνα 21 που ακολουθεί, αρχίζει με ένα προοίμιο (preamble). Το προοίμιο ξεκινά με μία ακολουθία από συνεχή upchirps που καλύπτουν ολόκληρη την ζώνη συχνοτήτων. Τα τελευταία δύο upchirps κωδικοποιούν μια λέξη συγχρονισμού (sync word). Αυτή η λέξη συγχρονισμού μεγέθους ενός byte χρησιμοποιείται για τη διαφοροποίηση των δικτύων LoRa που χρησιμοποιούν τις ίδιες ζώνες συχνοτήτων. Μια συσκευή που είναι ρυθμισμένη με μια συγκεκριμένη λέξη συγχρονισμού θα σταματήσει να «ακούει» μια μετάδοση εάν η αποκωδικοποιημένη λέξη συγχρονισμού δεν είναι η ίδια. Η κύρια χρήση του προοιμίου λοιπόν, είναι ο σωστός συγχρονισμός του δέκτη με την εισερχόμενη ροή δεδομένων. Η λέξη συγχρονισμού ακολουθείται από δύο και  $\frac{1}{4}$  downchirps, για διάρκεια 2.25 συμβόλων. Η συνολική διάρκεια του προοιμίου μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 10.25 και 65539.25 σύμβολα.



Εικόνα 21: Η δομή του πλαισίου (frame) της LoRa [29].

Μετά το προοίμιο, υπάρχει προαιρετικά μια κεφαλίδα (header). Όταν αυτή είναι παρούσα, μεταδίδεται με ρυθμό κώδικα (code rate, CR)\*  $\frac{4}{8}$ . Η κεφαλίδα υποδεικνύει το μέγεθος του φορτίου (payload) σε bytes (το οποίο περιέχει τα κωδικοποιημένα δεδομένα), το ρυθμό κώδικα που χρησιμοποιείται για το τερματισμό του κώδικα και την ύπαρξη ή μη ενός κυκλικού ελέγχου πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check, CRC, που είναι μια τεχνική ανίχνευσης σφαλμάτων κατά τη διάρκεια μετάδοσης ή αποθήκευσης δεδομένων) για το payload μήκους 16-bit στο τέλος του frame. Η κεφαλίδα

περιλαμβάνει επίσης ένα CRC που επιτρέπει στον αποδέκτη να απορρίπτει πακέτα με λανθασμένες κεφαλίδες. Το μέγεθος του payload αποθηκεύεται κάνοντας χρήση ενός byte, περιορίζοντας έτσι το συνολικό του μέγεθος σε μόλις 255 bytes. Το payload αποστέλλεται μετά την κεφαλίδα και στο τέλος του πλαισίου βρίσκεται ένα προαιρετικό CRC [29].

➤ ***Επίπεδο ζεύξης (link layer)***

Το δεύτερο επίπεδο του μοντέλου OSI είναι το επίπεδο ζεύξης, το οποίο παρέχει τη φυσική διευθυνσιοδότηση (MAC Addresses) και είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του μέσου μετάδοσης και του πότε μπορούν να εκπεμφθούν δεδομένα σε αυτό και αποτελείται από το υποεπίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο (Media Access Control, MAC) και το υποεπίπεδο Λογικού Ελέγχου της Ζεύξης (Logical Link Control, LLC) [50]. Το LoRAWAN είναι ένα Media Access Control πρωτόκολλο.

Οι τελικοί κόμβοι στο δίκτυο LoRAWAN διαφοροποιούνται σε κλάσεις ανάλογα με τις ικανότητές τους. Κάθε κλάση αποτελεί μια σύγκριση της λαμβανόμενης πληροφορίας του δικτύου από την πύλη (downlink network communication) με την διάρκεια ζωής της μπαταρίας του τελικού κόμβου ή τελικής συσκευής.

Οι τελικές συσκευές στην κλάση A υποστηρίζουν αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ μιας συσκευής και μιας πύλης. Τα μηνύματα προς αποστολή (από την συσκευή στον διακομιστή) μπορούν να σταλούν οποιαδήποτε στιγμή είναι απαραίτητη η επικοινωνία (σε τυχαία χρονικά διαστήματα, τύπου ALOHA [54]). Η συσκευή στη συνέχεια ανοίγει δυο παράθυρα λήψης (downlink) σε καθορισμένους χρόνους (1 δευτερόλεπτο και 2 δευτερόλεπτα) μετά την μετάδοση προς ζεύξη με τον διακομιστή. Εάν ο διακομιστής δεν ανταποκρίνεται σε κανένα από αυτά τα παράθυρα λήψης, η επόμενη δυνατότητα θα είναι μετά την επόμενη μετάδοση προς ζεύξη. Ο διακομιστής μπορεί να ανταποκριθεί είτε στο πρώτο παράθυρο είτε στο δεύτερο παράθυρο λήψης.

\*Ο ρυθμός κώδικα (code rate) είναι ο λόγος  $k/n$ , όπου  $k$  ο ρυθμός των εισερχόμενων δεδομένων στον κωδικοποιητή (σε bits/sec) και  $n$  ο ρυθμός των δεδομένων που εξέρχονται από τον κωδικοποιητή (σε bits/sec).

Η κλάση A είναι η πλέον κατάλληλη για αισθητήρες που τροφοδοτούνται με μπαταρία, καθώς:

- Είναι ενεργειακά πιο αποδοτική και αυξάνει την διάρκεια ζωής της μπαταρίας

- Όλες οι συσκευές στο δίκτυο LoRaWAN υποστηρίζουν αυτήν την κλάση
- Η λήψη είναι διαθέσιμη μόνο όταν ο αισθητήρας μεταδίδει

Οι συσκευές κλάσης B επεκτείνουν την κλάση A προσθέτοντας σε προγραμματισμένη ώρα παράθυρα λήψης, κατά την διάρκεια λήψης μηνυμάτων από το διακομιστή. Χρησιμοποιώντας συγχρονισμένα σήματα που μεταδίδονται από την πύλη, οι συσκευές ανοίγουν περιοδικά τα παράθυρα.

Η κλάση B είναι κατάλληλη για τελικές συσκευές με χρονοδιάγραμμα λήψης δεδομένων, αφού:

- Ανοίγουν επιπλέον παράθυρα λήψης κατά την προγραμματισμένη ώρα λήψης από τον διακομιστή
- Λαμβάνουν περιοδικά σήματα από την πύλη σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές

Τέλος οι συσκευές κλάσης C δεν διατηρούν ανοιχτά μόνο δύο παράθυρα παραλαβής, όπως γίνεται στην κλάση A, αλλά ανοίγουν επιπλέον ένα συνεχές παράθυρο λήψης μέχρι την ολοκλήρωση της μετάδοσης. Αυτό επιτρέπει συνεχή επικοινωνία, αλλά καταναλώνει πολλές φορές περισσότερη ενέργεια από τις συσκευές κλάσης A.

Η κλάση C είναι κατάλληλη για τελικές συσκευές που διατηρούν ανοιχτές τις υποδοχές λήψης, διότι:

- Κρατούν ανοιχτά συνεχώς τα παράθυρα λήψης

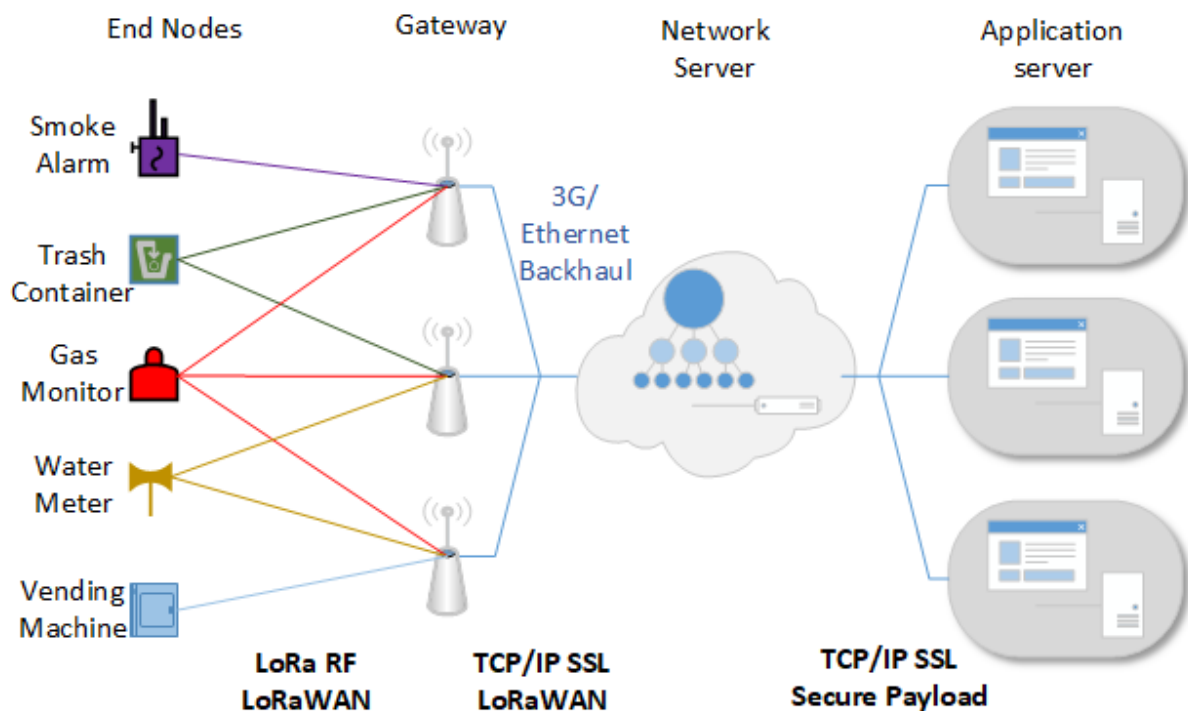
Το κύριο χαρακτηριστικό της κάθε κλάσης αποτελεί το λόγο ονομασίας της κάθε μιας. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη κλάση το A αντιπροσωπεύει το ALL, διότι και όλες οι κλάσεις συσκευών (κλάση B, κλάση C) μπορούν να συμπεριφερθούν όπως η κλάση A. Το B στη δεύτερη κλάση σημαίνει Beacon, αφού το κύριο χαρακτηριστικό αυτής είναι η περιοδική μετάδοση σημάτων (Beacon transmission). Τέλος, ο λόγος για τον οποίο η κλάση C ονομάστηκε έτσι είναι ότι το σήμα μεταδίδεται συνεχόμενα (C: Continuous).

### ➤ Αρχιτεκτονική δικτύου (network architecture)



Η αρχιτεκτονική δικτύου αποτελεί το τρίτο επίπεδο του μοντέλου αναφοράς OSI και παρέχει τη λογική διευθυνσιοδότηση με ενιαίο και μοναδικό τρόπο για όλη την έκταση των διασυνδεδεμένων μεταξύ τους δικτύων.

Η LoRa χρησιμοποιεί τοπολογία αστέρα (star topology), στην οποία οι πύλες (Gateways, GW) κάνουν αδιάκοπτη μεταφορά πληροφοριών μεταξύ του διακομιστή δικτύου (Network Server, NS) και των τελικών συσκευών (End Nodes, EN) όπως αντικατοπτρίζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 22).



Εικόνα 22: Απεικόνιση αρχιτεκτονικής αστέρα [55]

Οι τελικές συσκευές χρησιμοποιούν LoRa για να επικοινωνούν με τις πύλες και με τη σειρά τους οι πύλες χρησιμοποιούν πρωτόκολλο διαδικτύου (Internet Protocol, IP) όπως Ethernet, 3G, WiFi και άλλα, για να επικοινωνούν με το διακομιστή δικτύου. Η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών και των πυλών εξαπλώνεται σε διαφορετικά κανάλια συχνοτήτων και ο ρυθμός μεταφοράς των δεδομένων καθορίζεται ανάλογα με το εύρος επικοινωνίας (communication range) και τη διάρκεια του μηνύματος [55]. Η επιλογή αυτή (του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων και του καναλιού συχνοτήτων) πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό ADR (Adaptive Data Rate), ο οποίος

είναι ένας μηχανισμός που βελτιστοποιεί το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων και την κατανάλωση της ενέργειας στο δίκτυο [45].

Ένα LoRaWAN δίκτυο αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Την **τελική συσκευή (End-Device, ED)**, η οποία μπορεί να είναι οτιδήποτε λαμβάνει και στέλνει δεδομένα. Δεν υπάρχει συγκεκριμένος ορισμός για την τελική συσκευή, αλλά συνήθως είναι αισθητήρας (sensor), ανιχνευτής (detector), ενεργοποιητής (actuator) και οποιοδήποτε άλλο όργανο ή σύστημα που ανιχνεύει ή ελέγχει κάποια παράμετρο.
- Την **πύλη (Gateway, GW)**, η οποία ονομάζεται, επίσης, δρομολογητής (modem) ή σημείο πρόσβασης (access point). Χρησιμοποιείται για να προωθεί μηνύματα από/προς (*uplink/downlink*) την τελική συσκευή και το διακομιστή δικτύου. Στο δίκτυο LoRaWAN, οι τελικές συσκευές δεν είναι συνδεδεμένες με την πύλη, αντίθετα κάθε πληροφορία που λαμβάνει η πύλη από την τελική συσκευή παραδίδεται στο διακομιστή δικτύου.
- Τον **διακομιστή δικτύου (Network Server, NS)**, ο οποίος είναι το πιο νοήμον μέρος του δικτύου LoRaWAN. Είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση (monitoring) της πύλης και της τελικής συσκευής, για τη συγκέντρωση των εισερχόμενων δεδομένων, για την προώθηση εισερχόμενων μηνυμάτων στον αντίστοιχο διακομιστή εφαρμογής, για την αφαίρεση των διπλών μηνυμάτων που λαμβάνονται από μία τελική συσκευή μέσω πολλαπλών πυλών, για την επιλογή της καταλληλότερης πύλης με βάση την υψηλότερη τιμή της ισχύος του λαμβανόμενου μηνύματος (Received Signal Strength, RSS), καθώς και για την προσωρινή αποθήκευση μηνυμάτων μέχρις ότου η επιθυμητή τελική συσκευή «ξυπνήσει».
- Τον **διακομιστή εφαρμογής (Application Server, AS)**, ο οποίος αντιπροσωπεύει την εφαρμογή η οποία αναλύει τα μηνύματα που λαμβάνονται από μία τελική συσκευή. Για παράδειγμα, σε μία εφαρμογή συστήματος ψύξης, εάν η θερμοκρασία υπερβεί τους 25° C, μπορεί να αποφασίσει να ανοίξει τον κλιματισμό προκειμένου να τη μειώσει.

### 3.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της τεχνολογίας LoRaWAN

## Πλεονεκτήματα

- ✚ Χρησιμοποιεί αισθητήρες χαμηλής ισχύος και η περιοχή που καλύπτει είναι ευρεία, της τάξης των χιλιομέτρων
- ✚ Λειτουργεί σε συχνότητες χωρίς άδεια, άρα δεν υπάρχει κόστος αδειοδότησης για τη χρήση της τεχνολογίας αυτής
- ✚ Αφού λειτουργεί σε χαμηλή ισχύ, οι συσκευές έχουν μεγάλη ζωή μπαταρίας οι μπαταρίες των αισθητήρων μπορούν να διαρκέσουν από 2 έως 5 χρόνια
- ✚ Μία μόνο πύλη δικτύου LoRa σχεδιάζεται για να εξυπηρετήσει χιλιάδες τερματικές συσκευές (end devices) ή κόμβους (nodes)
- ✚ Είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί λόγω της απλής αρχιτεκτονικής της
- ✚ Χρησιμοποιείται ευρέως για εφαρμογές του IoT και M2M
- ✚ Μεγαλύτερο μέγεθος φορτίου (100 bytes) συγκριτικά με αυτό της SigFox, για παράδειγμα, που είναι 12 bytes
- ✚ Είναι μία «ανοιχτή» τεχνολογία (ανοιχτή συνεργασία και ανοιχτό πρότυπο)
- ✚ Δεν υφίσταται περιορισμός στον αριθμό των μηνυμάτων που μεταφέρονται ανά ημέρα (ενώ στη SigFox μπορούν να μεταφερθούν έως 140 μηνύματα την ημέρα)
- ✚ Έχει ανοικτή προσέγγιση και όχι ιδιόκτητη (όπως η SigFox)
- ✚ Το μικρό εύρος ζώνης (low bandwidth) την καθιστά ιδανική για πρακτικές εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων με λιγότερα δεδομένα ή και με μεταφορές δεδομένων διακοπτόμενες
- ✚ Η μεγάλη της εμβέλεια επιτρέπει λύσεις όπως εφαρμογές «έξυπνης πόλης»
- ✚ Έχει χαμηλά κόστη συνδεσιμότητας (connectivity costs)
- ✚ Είναι ασύρματη, εύκολη να εγκατασταθεί και είναι πολύ γρήγορα έτοιμη για χρήση
- ✚ Έχει δύο επίπεδα ασφάλειας: ένα επίπεδο για το δίκτυο και ένα για την εφαρμογή με κρυπτογράφηση AES (Advanced Encryption Standard)
- ✚ Επιτυγχάνεται με αυτή πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία (bi-directional communication)
- ✚ Υποστηρίζεται από τη CISCO, την IBM και από 500 άλλες εταιρίες-μέλη της LoRa Alliance

## Μειονεκτήματα

- ✚ Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεταφορά δεδομένων μεγάλου φορτίου (data payload), το φορτίο της περιορίζεται στα 100 bytes
- ✚ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνεχή παρακολούθηση (real time monitoring) μόνο με χρήση τελικών συσκευών κλάσης C
- ✚ Δεν αποτελεί ιδανική επιλογή για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο (real time applications) που απαιτούν μικρή καθυστέρηση μεταφοράς δεδομένων (latency) και έχουν συγκεκριμένο όριο για τις υπάρχουσες διακυμάνσεις (jitter)
- ✚ Η ταχύτατη εξάπλωση των τεχνολογιών LPWAN, και ειδικότερα της LoRaWAN, προκαλεί προβλήματα «συνύπαρξης»
- ✚ Επειδή λειτουργεί σε ανοιχτή συχνότητα, είναι πιθανή η ύπαρξη παρεμβολών στη συχνότητα αυτή και ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων μπορεί να είναι χαμηλός, [56].

### 3.3 Σύγκριση πρωτοκόλλου LoRaWAN και πρωτοκόλλου Zigbee

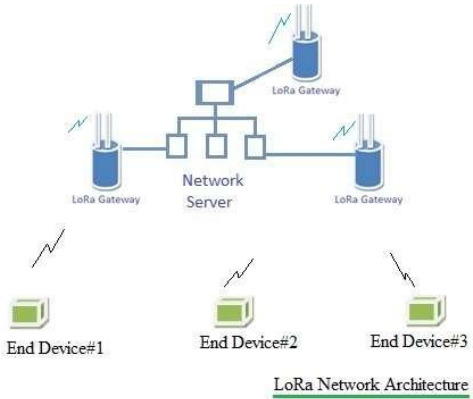
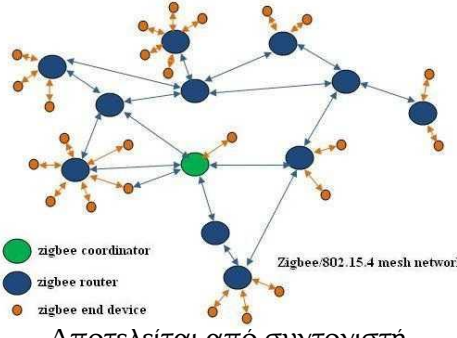

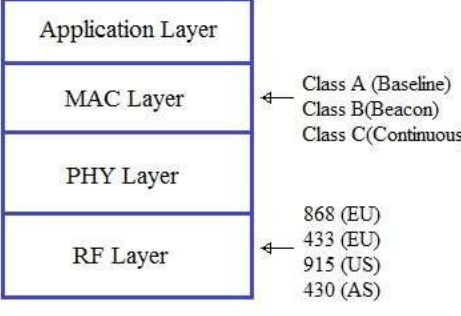
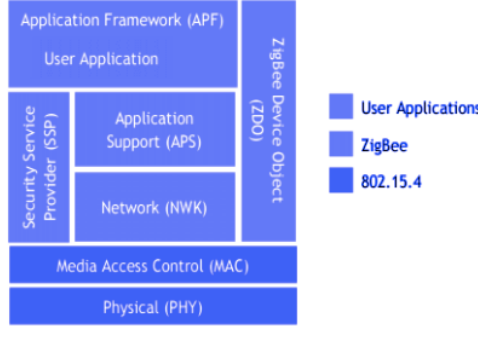
Στη παρούσα φάση, το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται ευρέως για την επίτευξη του monitoring των πλοίων είναι το Zigbee. Το Zigbee είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο που λειτουργεί στα 2,4 GHz το οποίο βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4. Θεωρείται πολύ καλή λύση για εφαρμογές ελέγχου βιομηχανίας και παρακολούθηση (industrial automation and monitoring), δίκτυα αισθητήρων (sensor network), αυτοματισμούς κτιρίων (building automation) είτε για επαγγελματική, είτε για οικιακή χρήση. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα του να χρησιμοποιεί αξιόπιστα, ευρείας κλίμακας δίκτυα πλέγματος, ενώ παράλληλα το κόστος και η κατανάλωση ισχύος κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Το πρωτόκολλο Zigbee είναι ένα δίκτυο πλέγματος (mesh network), στο οποίο κάθε κόμβος δρα ως ένας τελικός κόμβος ή ως ένας αναμεταδότης. Τα δεδομένα ταξιδεύουν από κόμβο σε κόμβο μέχρις ότου φτάσουν στον δρομολογητή (router). Όπως και το LoRaWAN, έτσι και το Zigbee είναι σχεδιασμένο για εφαρμογές μετάδοσης δεδομένων με σχετικά χαμηλό ρυθμό.

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας στον οποίο αντικατοπτρίζεται με σαφήνεια οι διαφορές όπως και κάποιες ομοιότητες των δύο πρωτοκόλλων (Πίνακας 1).

*Πίνακας 1: Σύγκριση των τεχνολογιών LoRa και Zigbee [56]*

	<b>LoRa</b>	<b>Zigbee</b>
Ζώνες συχνότητας	863 έως 870 MHz, 902 έως 928 MHz, 779 έως 787 MHz	868MHz, 915 MHz, 2450 MHz
Απόσταση κάλυψης	2-5 Km (αστικές περιοχές), 15 Km (περιοχές εκτός πόλεων)	10 έως 100 μέτρα
Κατανάλωση ισχύος	χαμηλότερη από αυτή στη Zigbee	χαμηλή
Τεχνική διαμόρφωση	διαμόρφωση LoRa (διαμόρφωση CSS)	Χρησιμοποιεί τεχνική DSSS για μετατροπή των bits σε chips
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	0.3 έως 22 Kbps (διαμόρφωση LoRa)	20 kbps (868 MHz) , 40Kbps (915 MHz) , 250 kbps (2450 MHz)

<p>Αρχιτεκτονική Δικτύου</p>	 <p style="text-align: center;">LoRa Network Architecture</p> <p style="text-align: center;">Αποτελείται από πύλη LoRa, διακομιστές (servers) και τερματικές συσκευές (end devices or end nodes or end points)</p>	 <p style="text-align: center;">Zigbee/802.15.4 mesh network</p> <p style="text-align: center;">Αποτελείται από συντονιστή (coordinator), δρομολογητές (routers) και τερματικές συσκευές (end devices)</p>									
<p>Δομή Πλαισίου (Frame Structure)</p>	<p style="text-align: center; color: red;">LoRa Frame Format</p>  <table border="1" data-bbox="917 996 1412 1041" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2">SHR</th> <th colspan="2">PHR</th> <th rowspan="2">PHY PAYLOAD</th> </tr> <tr> <th>Preamble</th> <th>SFD</th> <th>Frame length</th> <th>Reserved</th> </tr> </thead> </table>	SHR		PHR		PHY PAYLOAD	Preamble	SFD	Frame length	Reserved	
SHR		PHR		PHY PAYLOAD							
Preamble	SFD	Frame length	Reserved								
<p>Επίπεδα πρωτοκόλλου (Protocol stack)</p>											
<p>Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer)</p>	<p>Χρησιμοποιεί σχήμα διαμόρφωσης (modulation scheme) και έχει ικανότητες διόρθωσης σφαλμάτων, προσθέτει προοίμιο (<b>preamble</b>) για συγχρονισμό και χρησιμοποιεί PHY header CRC, καθώς και CRC πλήρους πλαισίου (entire frame CRC)</p>	<p>Υφίστανται δύο φυσικά επίπεδα, 868/915 MHz (χρησιμοποιεί BPSK, μορφοποίηση παλμού υπερψωμένου συνημιτόνου (raised cosine pulse shaping) και 2450 MHz (χρησιμοποιεί OQPSK, μορφοποίηση παλμού μισού ημιτονοειδούς κύματος (half sine wave pulse shaping))</p>									
<p>Εφαρμογές</p>	<p>Χρησιμοποιείται ως δίκτυο ευρείας</p>	<p>Χρησιμοποιείται ως ασύρματο δίκτυο προσωπικής περιοχής χαμηλού</p>									



	περιοχής (Wide Area Network)	ρυθμού (LR-WPAN, Low Rate Wireless Personal Area Network)
Πρότυπο (Standard)	IEEE 802.15.4g, LoRa Alliance	IEEE 802.15.4, Zigbee Alliance

Όπως παρουσιάζεται στον παραπάνω πίνακα, η τεχνολογία LoRa λειτουργεί σε ζώνες συχνοτήτων που δεν ξεπερνούν τα 1000 MHz (1 GHz), ενώ η Zigbee λειτουργεί μέχρι και σε 2.4 GHz. Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά τους σχετικά με την μέγιστη δυνατή απόσταση που καλύπτουν, η οποία για τη μεν Zigbee είναι τα 100 μέτρα, σε αντίθεση με την LoRa που φτάνει τις τάξεις των χιλιομέτρων. Πιο συγκεκριμένα, σε κατοικημένες περιοχές (urban areas) καλύπτει απόσταση έως και 5 km, ενώ σε μη κατοικημένες (suburban areas) έως και 15 km. Όσον αφορά στην κατανάλωση ισχύος, αμφότερες οι τεχνολογίες λειτουργούν σε χαμηλές τιμές, η LoRa, όμως, σε ακόμη χαμηλότερες.

Παρόλο που ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (bit rate, δηλαδή ο αριθμός των bits που μεταδίδονται ανά δευτερόλεπτο) στη Zigbee ξεκινάει από τα 20 kbps και φτάνει τα 250 kbps, τιμές που ξεπερνούν κατά πολύ το μέγιστο της LoRa που είναι τα 22 kbps, αυτό κατ' ουσίαν δε φέρει την Zigbee σε πλεονεκτική θέση, καθώς τη μέγιστη ροή δεδομένων την επιτυγχάνει αποκλειστικά στα 2450 MHz, συχνότητα με την οποία σε ένα πλοίο δεν μπορούν να καλυφθούν μεγάλες αποστάσεις.

Στο κομμάτι της αρχιτεκτονικής δικτύου, είναι εμφανές ότι υπερτερεί η LoRa με την τοπολογία αστέρα, συγκριτικά με την Zigbee που έχει αρχιτεκτονική δικτύου πλέγματος (Mesh topology), αφού στη τελευταία τα δεδομένα φτάνουν στο τελικό αποδέκτη μόνο μετά τη διέλευσή τους από το σύνολο των κόμβων, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, κάτι που στη LoRa δε συμβαίνει, καθώς οι τερματικές συσκευές ή κόμβοι δε συνδέονται με συγκεκριμένες πύλες, αυξάνοντας έτσι κατά πολύ την διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η αρχιτεκτονική πλέγματος αποτελείται από τον συντονιστή (coordinator) ο οποίος είναι υπεύθυνος για την διαχείριση και αποθήκευση των πληροφοριών, τους δρομολογητές (routers) όπου είναι ενδιάμεσες συσκευές που δρουν ως πύλες προκειμένου τα δεδομένα να περνούν μέσα από αυτές και τέλος τις τερματικές συσκευές οι οποίες είναι υπεύθυνες για να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα, χωρίς να εκτελούν καμία άλλη ενέργεια.

Όσον αφορά στη δομή του πλαισίου, η LoRa, όπως έχει προαναφερθεί στο παρόν πόνημα, αποτελείται από ένα προοίμιο (preamble), μία προαιρετική κεφαλίδα

(header), το φορτίο (payload) και έναν προαιρετικό κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check, CRC). Η δομή του πλαισίου Zigbee όπως διαμορφώνεται στο φυσικό επίπεδο (και απεικονίζεται στον παραπάνω πίνακα) αποτελείται από τρία μέρη, την κεφαλίδα συγχρονισμού SHR, την κεφαλίδα φυσικού επιπέδου PHR και το φορτίο (payload). Το SHR χωρίζεται στο προοίμιο (preamble), που χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό των πομποδεκτών και στο «SFD», που δηλώνει το τέλος του πεδίου συγχρονισμού και την αρχή του πακέτου δεδομένων. Το PHR προσδιορίζει το μέγεθος του πακέτου. Τέλος, το Payload είναι το πεδίο του πλαισίου που αποτελείται από τα πακέτα που προστέθηκαν από κάθε επίπεδο.

Το επίπεδο MAC στη Zigbee εξασφαλίζει τη διασύνδεση των ανώτερων επιπέδων με το φυσικό. Είναι το επίπεδο που ελέγχει άμεσα το PHY. Οι αρμοδιότητές του είναι η παραγωγή των beacons, ο συγχρονισμός των συσκευών στο εισερχόμενο beacon, να επιτρέπει τη σύνδεση και την αποσύνδεση μεταξύ των συσκευών στα ZigBee δίκτυα, να υποστηρίζει τις παραμέτρους ασφαλείας του πρωτοκόλλου και άλλες.

### **3.4 Ασφάλεια της ασύρματης επικοινωνίας στα πλοία και της LoRa**

Στον κόσμο του σήμερα, η παραβίαση της ασφάλειας δεν γίνεται μόνο με φυσικό τρόπο. Ιστορικά, από τη στιγμή που ένα πλοίο αναχωρούσε από το λιμάνι, ήταν πλήρως απομονωμένο και οι ενδεχόμενοι κίνδυνοι περιορίζονταν μόνο σε ανθρώπινο λάθος ή σε κάποια μηχανική βλάβη. Με την ένταξη νέων υποδομών στο πλοίο που κατέστησαν δυνατή την απομακρυσμένη επικοινωνία του με εγκαταστάσεις στη στεριά, το πλοίο εισήχθη σε έναν νέο και αυξανόμενο υποσχόμενο κόσμο: την ψηφιακή εποχή [57].

Η ψηφιοποίηση έχει ανοίξει έναν νέο ορίζοντα στον τομέα της επικοινωνίας, αλλά ταυτόχρονα ελλοχεύει προκλήσεις και νέους κινδύνους. Οι νέοι «εχθροί» που γεννήθηκαν με την ραγδαία εξέλιξη της επικοινωνίας, χαρακτηρίζονται από ένα κλίμα αβεβαιότητας, καθώς σε ενδεχόμενη έκθεση σε αυτούς, το πρώτο απαραίτητο βήμα που είναι ο εντοπισμός τους συνήθως είναι εξαιρετικά δύσκολο και χρονοβόρο, όπως αντίστοιχα και η τιθάσευσή τους. Αυτή η μετακίνηση της επικοινωνίας από το χαρτί και τη «φωνή» στην ψηφιακή και αυτοματοποιημένη ανταλλαγή πληροφοριών δημιουργεί νέες απαιτήσεις όσον αφορά στην επαλήθευση της ταυτότητας του αποστολέα, στον έλεγχο της ακεραιότητας των μηνυμάτων, όπως, επίσης, και στην εχεμύθεια όταν αυτή απαιτείται. Για την επιτυχημένη υιοθέτηση αυτής της «τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης», η ασύρματη επικοινωνία στο πλοίο θα πρέπει να διαθέτει την ύψιστη

δυνατή ασφάλεια ώστε να διασφαλίζεται η πιστότητα των δεδομένων που γεννούν οι τελικές συσκευές όπως οι αισθητήρες, των ανθρώπων που επεξεργάζονται τα δεδομένα αυτά, καθώς και των αλγορίθμων που τα αναλύουν και τα ερμηνεύουν.

Κατά τα τελευταία έτη λοιπόν, η ασφάλεια στη θάλασσα αποτελεί έναν από τους κυριότερους στόχους του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας (International Maritime Organization, IMO). Ο Διεθνής Κώδικας Διαχείρισης Ασφάλειας (International Safety Management Code, ISM) και ο Διεθνής Κώδικας Ασφαλούς Εγκατάστασης των Λιμανιών και Πλοίων (International Ship and Port Facility Security Code, ISPS) δημιουργήθηκαν για την ασφάλεια του πλοίου τόσο εν πλω όσο και κατά την επιχείρηση μέσα στο λιμάνι, καθώς και του εργασιακού περιβάλλοντος που περιλαμβάνει και το προσωπικό στη στεριά.

Η ασφάλεια της επικοινωνίας στο πλοίο αποτελεί ζήτημα μείζονος σημασίας, αφού ενδεχόμενη υποκλοπή πληροφοριών ή δεδομένων σχετικών με την επιχείρησή του ή με κάποια λειτουργία του γενικότερα μπορεί να οδηγήσει σε κάποιο ατύχημα, ακόμα και θανατηφόρο, σε κάποια περιβαλλοντική καταστροφή και μπορεί, φυσικά, να διακυβεύσει την επιχείρησή του. Επιπλέον, τυχόν διαρροή πληροφοριών θα έπληττε και τη ναυτιλιακή εταιρεία στην οποία ανήκει το πλοίο, καθώς θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα οικονομική ζημία, αλλά και να κηλιδωθεί η φήμη της εταιρείας [57].

Η LoRa είναι μια τεχνολογία της οποίας το επίπεδο ασφάλειας είναι αξιοσημείωτα υψηλό και μάλιστα παρέχει ασφάλεια σε δυο επίπεδα: ένα σε επίπεδο δικτύου (network) και ένα σε επίπεδο εφαρμογής (application). Η ασφάλεια σε επίπεδο δικτύου διασφαλίζει τη γνησιότητα του τελικού κόμβου στο δίκτυο και η ασφάλεια σε επίπεδο εφαρμογής κατοχυρώνει ότι ο χειριστής δεν έχει πρόσβαση στις προς μετάδοση πληροφορίες.

Το LoRaWAN ορίζει έναν αριθμό ταυτοποιητών (identifiers) για τις συσκευές. Η κάθε τελική συσκευή ταυτοποιείται μοναδικά από έναν ταυτοποιητή μήκους 64-bit που καλείται ταυτοποιητής συσκευής **DevEUI** (Device Identifier), ο οποίος είναι ήδη ενσωματωμένος από τους κατασκευαστές. (Το EUI είναι συντόμευση του Extended Unique Identifier (Εκτεταμένη Μοναδική Ταυτότητα) μήκους 64-bit και χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση των στοιχείων του δικτύου).

Ένας άλλος ταυτοποιητής, ο ονομαζόμενος ταυτοποιητής εφαρμογής **AppEUI** (μήκους, επίσης, 64-bit) (Application Identifier) ταυτοποιεί μοναδικά τον διακομιστή εφαρμογής (Application Server) [52]. Επιπλέον, για την επικοινωνία απαραίτητη είναι και η διεύθυνση συσκευής (Device Address, **DevAddr**). Η τελευταία αποτελεί έναν

μοναδικό 32-bit ταυτοποιητή μοναδικό για κάθε δίκτυο. Η διεύθυνση συσκευής είναι αντίστοιχη μιας IP διεύθυνσης σε ένα δίκτυο TCP/IP και είναι κοινή μεταξύ της τελικής συσκευής, του διακομιστή δικτύου και του διακομιστή εφαρμογής [55].

Η ασφάλεια στη LoRa επιτυγχάνεται με το **Προηγμένο Πρότυπο Κρυπτογράφησης (Advanced Encryption Standard, AES)**, που χρησιμοποιεί κλειδιά 128, 192 ή 256-bit [52]. Ως κρυπτογράφηση ορίζεται η διαδικασία κωδικοποίησης της πληροφορίας με τέτοιο τρόπο ώστε να εμποδίζει την ανάγνωσή της από μη εξουσιοδοτημένα μέρη. Μόνο όποιος έχει το "κλειδί" της κρυπτογράφησης μπορεί να διαβάσει την αρχική πληροφορία. Η ισχύς της κρυπτογράφησης συχνά ταυτίζεται με το μήκος του κλειδιού (bits) και τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης που χρησιμοποιείται. Η AES είναι μια από τις πιο ασφαλείς μεθόδους κρυπτογράφησης και θεωρείται πρακτικά άθραυστη, αφού ένα κλειδί 128-bit μπορεί να έχει πάνω από 300.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 (3x10<sup>35</sup>) πιθανούς συνδυασμούς και έτσι, ο μεγαλύτερος υπερυπολογιστής αυτή τη στιγμή στον κόσμο (που μπορεί να εκτελέσει 33.86 τετράκις εκατομμύρια υπολογισμούς το δευτερόλεπτο) θα χρειαζόταν περίπου 250 δισεκατομμύρια χρόνια για να ελέγξει όλους τους συνδυασμούς του κλειδιού AES-128 [58].

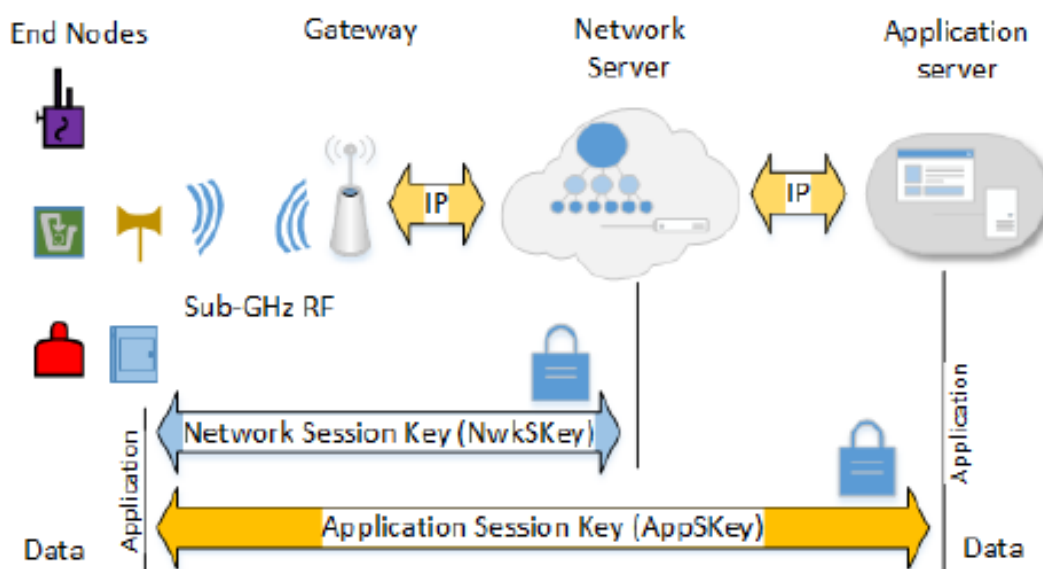
Για να επιτευχθεί η ασφάλεια και η ακεραιότητα των εισερχόμενων και εξερχόμενων μηνυμάτων (πακέτων) μεταξύ της τελικής συσκευής και της πύλης και να αποτραπεί ενδεχόμενη ανάγνωση από το διακομιστή δικτύου μηνυμάτων που ανήκουν σε άλλο δίκτυο ή άλλο σύστημα, η LoRaWAN χρησιμοποιεί ένα κλειδί μήκους *128-bit*, το κλειδί εφαρμογής (Application Key, **AppKey**), το οποίο παράγει δύο διαφορετικά κλειδιά συνόδου (session keys):

- Το **κλειδί συνόδου δικτύου** (Network Session Key, **NwksKey**) είναι ένα 128-bit κλειδί, μοναδικό για κάθε διακομιστή δικτύου (Network Server) και χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση του μηνύματος που αποστέλλεται από την τελική συσκευή (End Node) έως τον διακομιστή δικτύου (Network Server), όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 23). Το NwksKey είναι κοινό και στην τελική συσκευή και στο διακομιστή δικτύου, προκειμένου να παραχθεί ο κώδικας γνησιότητας μηνύματος (Message Integrity Code, MIC\*), ο οποίος με τη σειρά του «υπογράφει» την πληροφορία που αποστέλλεται ώστε να επαληθεύει ο διακομιστής δικτύου την ταυτότητα του αποστολέα.

\*Ο όρος MIC (message integrity code) είναι ταυτόσημος με τον όρο MAC (message authentication code). Κάθε φορά που αναλύεται κάποιου είδους επικοινωνία, όπως στην

παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται ο όρος MIC αντί του MAC προκειμένου να μην συγχέεται με το Media Access Control που συντομογραφικά γράφεται MAC.

- Το *κλειδί συνόδου εφαρμογής* (Application Session Key, **AppSKey**), που έχει, επίσης, μήκος 128-bit, είναι μοναδικό για κάθε διακομιστή εφαρμογής (Application Server) και κρυπτογραφεί ολόκληρο το μήνυμα σε ολόκληρη τη διαδικασία της αποστολής από την τελική συσκευή στο διακομιστή εφαρμογής (Εικόνα 23). Αυτό το κλειδί ο διακομιστής δικτύου δεν το γνωρίζει. Όταν το εισερχόμενο μήνυμα φτάνει στο διακομιστή εφαρμογής αυτός χρησιμοποιεί το AppSKey για να το αποκρυπτογραφήσει. Δηλαδή, το AppSKey είναι παρόμοιο με το NwkSKey, αλλά αυτό χρησιμοποιείται τόσο για την κρυπτογράφηση όσο και για την αποκρυπτογράφηση του μηνύματος. Επιπλέον, το AppSKey κρυπτογραφεί μόνο το φορτίο (payload) του πλαισίου (frame) της LoRa, ενώ το NwkSKey κρυπτογραφεί το συνολικό πλαίσιο το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 23 της παρούσας εργασίας [52].



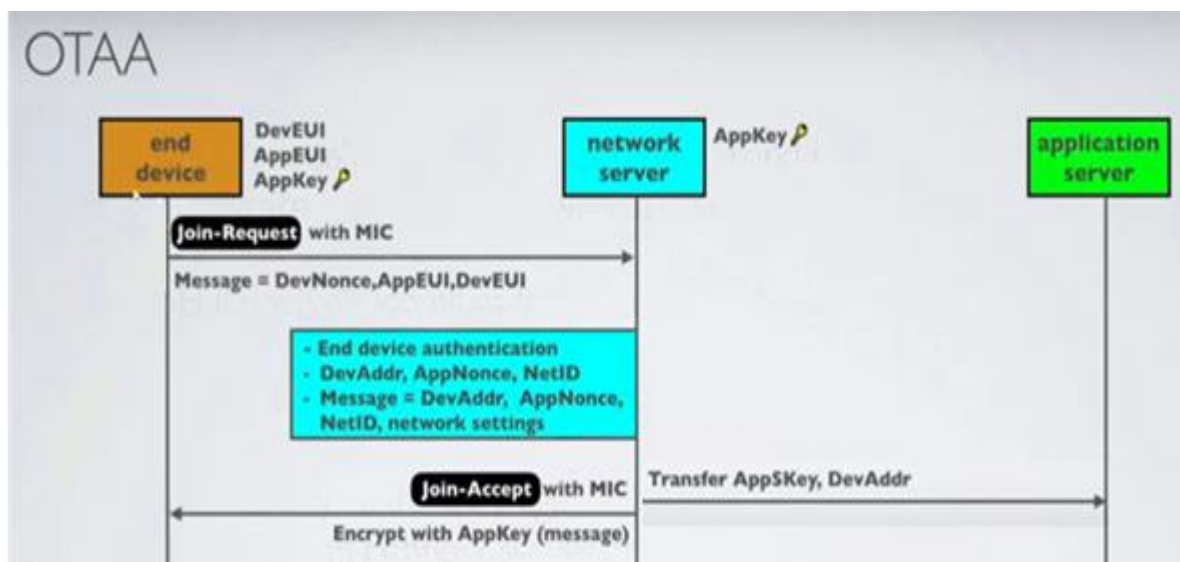
Εικόνα 23: Τα κλειδιά συνόδου *NwkSKey* και *AppSKey* που διαθέτει ένα LoRaWAN δίκτυο για την επίτευξη ασφαλούς επικοινωνίας [55]

Τα δύο αυτά κλειδιά σε συνδυασμό με έναν ταυτοποιητή, έχουν έναν ακόμη σημαντικό ρόλο. Χρησιμοποιούνται για να ενεργοποιηθεί μια συσκευή προκειμένου αυτή να συμμετάσχει σε ένα LoRaWAN δίκτυο, καθώς αν δεν είναι ενεργοποιημένη δεν μπορεί. Επομένως, η τελική συσκευή για να ενεργοποιηθεί χρησιμοποιεί το κλειδί

συνόδου δικτύου (NwkSKey), το κλειδί συνόδου εφαρμογής (AppSKey) και τη διεύθυνση συσκευής (DevAddr) [55]. Η εν λόγω ενεργοποίηση μπορεί να γίνει με δυο διαφορετικές μεθόδους:

- **Over-The-Air-Activation (OTAA)**

Πριν πραγματοποιηθεί η ενεργοποίηση με τη μέθοδο αυτή, η τελική συσκευή (End Device) πρέπει να γνωρίζει και να αποθηκεύει το DevEUI, το AppEUI και το AppKey (Εικόνα 24). Ο διακομιστής δικτύου (Network Server) αποθηκεύει το AppKey, που είναι ίδιο με το AppKey της τελικής συσκευής. Μια τελική συσκευή πρέπει να ακολουθεί αυτή τη διαδικασία ενεργοποίησης κάθε φορά που επιχειρεί να συνδεθεί (join) σε ένα νέο δίκτυο ή σε περίπτωση απώλειας των πληροφοριών των κλειδιών περιόδου. Η **OTAA** αποτελεί την πιο ασφαλή μέθοδο ενεργοποίησης, αφού κάθε φορά που η συσκευή συνδέεται στο δίκτυο παράγεται ένα κλειδί συνόδου δικτύου (NwkSKey) αποκλειστικά για αυτή τη συσκευή. Αυτό κάνει δυνατή την περιήγηση της συσκευής ανάμεσα σε δίκτυα LoRaWAN διαφορετικών παρόχων. Η διαδικασία ενεργοποίησης OTAA ξεκινάει με την αποστολή ενός μηνύματος αιτήματος σύνδεσης (Join-Request message). Το μήνυμα αυτό περιλαμβάνει το DevEUI, το AppEUI και DevNonce της τελικής συσκευής. Το DevNonce είναι μια τυχαία τιμή η οποία εντοπίζεται από τον διακομιστή δικτύου και χρησιμεύει στην απόρριψη οποιουδήποτε αιτήματος σύνδεσης με μη έγκυρη DevNonce τιμή. Αυτός ο μηχανισμός αποτρέπει τις επιθέσεις επαναληπτικής εκτέλεσης (replay attacks).



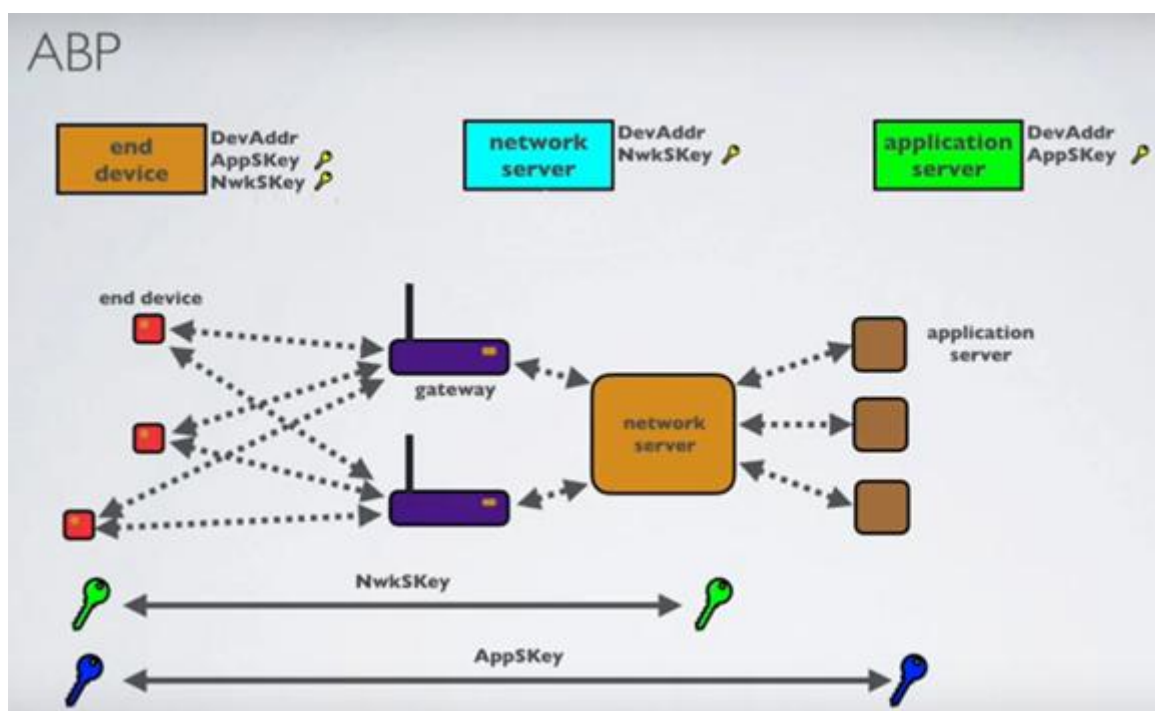
Εικόνα 24: Η μέθοδος ενεργοποίησης της τελικής συσκευής OTAA (Over-The-Air-Activation) [45]





- **Activation-By-Personalisation (ABP)**

Η δεύτερη μέθοδος ενεργοποίησης είναι η ABP (Activation-By-Personalisation). Με τη διαδικασία αυτή η τελική συσκευή συνδέεται απευθείας σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο χωρίς την αποστολή αιτήματος σύνδεσης (Join-Request). Το DevAddr, NwkSKey και το AppSKey βρίσκονται εξ αρχής αποθηκευμένα στην τελική συσκευή (Εικόνα 25). Ως εκ τούτου δεν παράγεται κανένα νέο κλειδί, αλλά τα μηνύματα κρυπτογραφούνται απευθείας χρησιμοποιώντας τα ήδη υπάρχοντα κλειδιά. Αν τα κλειδιά αποκρυπτογραφηθούν από κάποιον «εισβολέα» μπορεί να αποκρυπτογραφηθεί και το σύνολο της επικοινωνίας μεταξύ της τελικής συσκευής, της πύλης και του διακομιστή δικτύου.



Εικόνα 25: : Η μέθοδος ενεργοποίησης της τελικής συσκευής ABP (Activation-By-Personalisation) [45]

## 4. Ανάλυση πειραματικού μέρους

### 4.1 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε

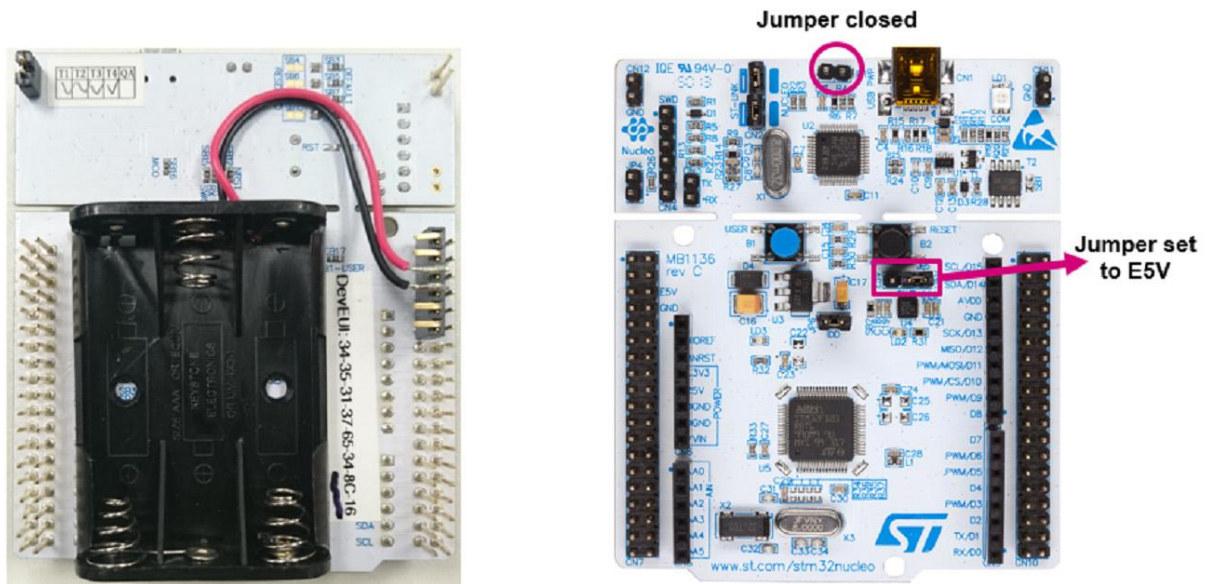
Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν δύο LoRa modules ταυτόσημα. Τα modules είναι ένα πακέτο (Nucleo pack, P-NUCLEO-LRWAN1) που αποτελείται από μια αναπτυξιακή πλακέτα (development board) της εταιρείας STMicroelectronics, την NUCLEO – LO73RZ, στην οποία ήταν προσαρμοσμένη μια LoRa πλακέτα επέκτασης (RF expansion board) της εταιρείας Semtech τύπου SX1272MB2DAS. Στα modules προσαρμόζεται επίσης μια sub-gigahertz κεραία της εταιρείας SMA. Η πλακέτα επέκτασης περιλαμβάνει τον πομποδέκτη χαμηλής ισχύος SX1272 που διαθέτει το μόντεμ Long Range (LoRa). Αυτό το μόντεμ παρέχει διαμόρφωση LoRa υψηλής απόδοσης καθώς και διαμόρφωση OOK και FSK. Είναι βελτιστοποιημένο για χρήση στις ζώνες 868 MHz και 915 MHz και η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι τα 20 dBm. Το P-NUCLEO-LRWAN1 παρέχει υποστήριξη για αμφίδρομες τελικές συσκευές στα πρωτόκολλα Class-A, Class-B και Class-C και για ενεργοποίηση τελικής συσκευής είτε με την μέθοδο (OTAA) είτε με την μέθοδο (ABP).



*Εικόνα 26: Το LoRa module που χρησιμοποιήθηκε (Nucleo pack, P-NUCLEO-LRWAN1)*

Η πλακέτα NUCLEO-L073RZ ενσωματώνει έναν MCU STM32L073RZ μικροελεγκτή 32 bit που βασίζεται στη σειρά ARM® Cortex® -M0 και με μνήμη Flash 192 Kbyte, SRAM 20 Kbyte, οι οποίοι έχουν ιδιαίτερη αρχιτεκτονική, ώστε να υπάρχει η λιγότερη δυνατή δαπάνη ενέργειας.

Ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει την πλακέτα NUCLEO-L073RZ συνδέοντας την σε υπολογιστή μέσω καλωδίου USB ή με μια θήκη μπαταριών για 3 x αλκαλικές μπαταρίες AAA ή AA [59]



Εικόνα 27: Η πίσω όψη (αριστερά) και η μπροστινή όψη (δεξιά) της πλακέτας NUCLEO-L073RZ

Τα πλεονεκτήματα χρήσης του συγκεκριμένου microcontroller μπορούν να συμπυχθούν παρακάτω:

- Παρέχει πολλές δυνατότητες για χρήση εξωτερικών components, λόγω των 64 pin headers που έχει
- Είναι συμβατό με πλήθος ενσωματωμένων λειτουργικών συστημάτων (embedded OS), όπως το βασικό ARM®mbed αλλά και άλλα όπως το FreeRTOS.
- Υπάρχει η δυνατότητα πολλαπλής διαφορετικής τροφοδοσίας ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει USB VBUS ή εξωτερική τροφοδοσία
- Υπάρχουν δωρεάν πολλές βιβλιοθήκες HAL, οι οποίες μάλιστα έχουν κοινά χαρακτηριστικά με όλες τις σειρές STM32 ARM Cortex MCUs. Το γεγονός αυτό,

καθιστά τον κώδικα του ενός MCU συμβατό με κάθε άλλο μικρό-υπολογιστή της σειράς

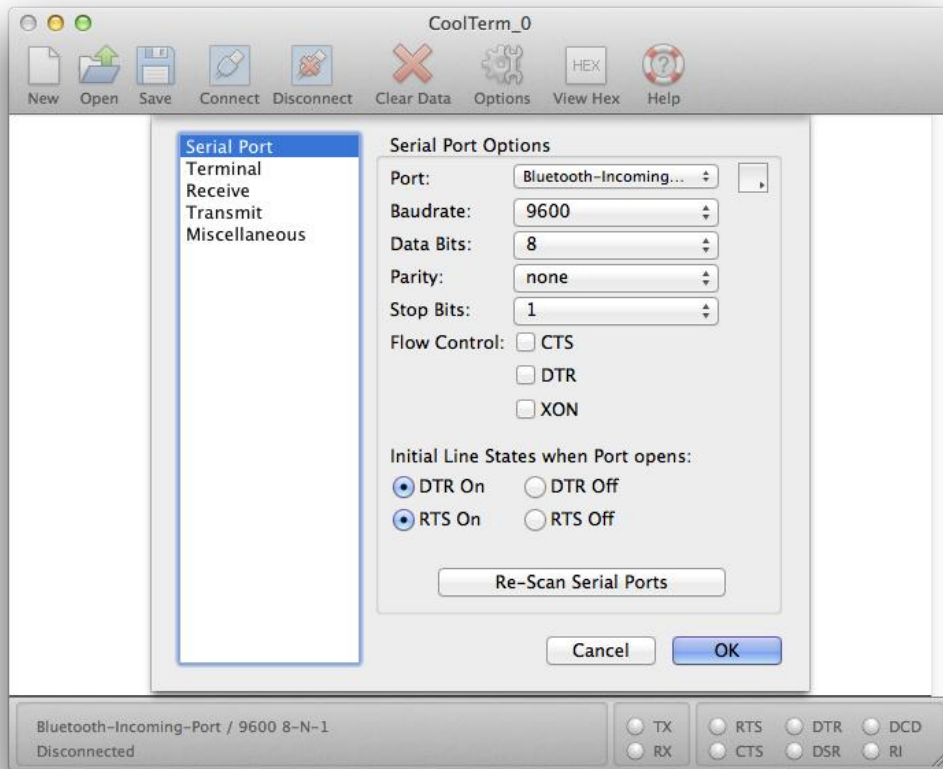
- Διατίθενται πολλαπλά Toolchains, τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει ο σχεδιαστής, είτε επί πληρωμής όπως οι IAR, keil®: MDK-ARM, είτε δωρεάν όπως οι SW4STM32, TrueSTUDIO. Τέλος, υπάρχει ένας online cross-compiler από την ίδια την ARM® που παράγει τα binary files για τον MCU

Για τις ανάγκες του πειράματος και για τη μέγιστη διεισδυτικότητα του σήματος στο «σκληρό» περιβάλλον του πλοίου στα modules έγιναν οι εξής ρυθμίσεις:

- Frequency (Συχνότητα): 868 MHz
- Bandwidth (Εύρος Ζώνης): 125 kHz
- Spreading Factor (Παράγοντας Διασποράς): 12
- Output Power (Ισχύς Εξόδου): 20 dBm
- Code rate (Ρυθμός Κωδικοποίησης): 4/5
- Preamble Length (Μήκος Προοιμίου): 8
- CRC: Enabled

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων παρατίθεται στο Παράρτημα Α.

Επίσης, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, μέσω του laptop και συγκεκριμένα μέσω του προγράμματος CoolTerm, πραγματοποιούταν η εκκίνηση μετάδοσης των πακέτων μεταξύ των δύο modules και η καταγραφή τους. Το πρόγραμμα αυτό είναι πολύ απλό και κατανοητό, κατάλληλο για όλα τα λειτουργικά συστήματα υπολογιστών και στην πράξη λειτουργεί ως μια σειριακή πόρτα για την σύνδεση των δυο modules.



*Εικόνα 28: Ρύθμιση του προγράμματος CoolTerm για την καταγραφή των μεταδιδόμενων πακέτων.*



## 4.2 Περιγραφή του περιβάλλοντος των πειραμάτων

Στα πλαίσια διεξαγωγής της παρούσας πτυχιακής εργασίας, έλαβαν χώρα δύο σειρές πειραμάτων στο ίδιο πλοίο, το Glory (Εικόνα 29), έτους κατασκευής 2011. Το Πείραμα 1 πραγματοποιήθηκε σε ναυπηγείο κατά τη διάρκεια προγραμματισμένης επισκευής της κύριας μηχανής του αλλά και των αυτοματισμών του, ενώ το Πείραμα 2 κατά τη διάρκεια του Sea Trial. Το πλοίο είναι πετρελαιοφόρο (VLCC, very large crude carrier) διαστάσεων 333.17 m x 60 m, ύψους 70 m, μεικτού βάρους 160135 τόνων και χωρητικότητας 317441 τόνων.



*Εικόνα 29: Το πλοίο διεξαγωγής των πειραμάτων κατά την διάρκεια επιχείρησης στη θάλασσα*

Το εσωτερικό του πλοίου εκτός των δεξαμενών, όπου και εκτελέστηκε το μεγαλύτερο μέρος των πειραμάτων, όπως σκιαγραφείται στο σχέδιο της εικόνας 31, έχει ως εξής: Το μηχανοστάσιο (Main Engine Room), που χαρακτηριστικά φαίνεται στις εικόνες 31 και 32, είναι ο χώρος μέσα στον οποίο βρίσκονται και λειτουργούν οι κύριες μηχανές και λοιπές βοηθητικές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για την πρόωση του πλοίου. Στο χαμηλότερο επίπεδό του εντοπίζονται οι σεντίνες (Bildge), στις οποίες καταλήγουν αναμεμιγμένα νερό, λάδι και πετρέλαια που απορρέουν από τα συστήματα. Στα αμέσως επόμενα δύο επίπεδα (επίπεδο 4 και επίπεδο 3) βρίσκεται η κύρια μηχανή, οι ηλεκτρομηχανές, το ECR, όπως και άλλα μικρότερα συστήματα είτε ηλεκτρονικά είτε πνευματικά ή υδραυλικά. Ένα επίπεδο πάνω από τις σεντίνες και προς τα πρύμα

βρίσκεται ο άξονας της κινητήριας προπέλας και το σημείο αυτό ονομάζεται Foretail Shaft. Συνεχίζοντας στο χώρο του μηχανοστασίου, στο επόμενο επίπεδο (επίπεδο 2) βρίσκονται οι λέβητες (καζάνια, boilers) όπως και το steering room (ναυτική ορολογία: τιμονάκι, μηχανισμός πηδαλίου). Να σημειωθεί ότι όλος ο χώρος του Engine Room αποτελείται από «παχύ» ατσάλι και αλουμίνιο κατά κύριο λόγο και κατά τη διάρκεια του πρώτου πειράματος η κύρια μηχανή, οι ηλεκτρομηχανές και άλλοι λοιπών αυτοματισμοί ήταν εκτός λειτουργίας, καθώς το πλοίο βρισκόταν σε ναυπηγείο για επισκευή, ενώ στη 2η περίπτωση όλα τα συστήματα ήταν σε λειτουργία, αφού τα πειράματα εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής πλεύσης (sea trial).

Αφήνοντας το μηχανοστάσιο και με ανοδική κατεύθυνση, το πλοίο αποτελείται από το επίπεδο 1, το οποίο βρίσκεται στο ύψος του καταστρώματος και ακολουθούν τα επίπεδα A, B, C, D, F\*, τα λεγόμενα ενδιαιτήματα (Accommodation), στα οποία υπάρχουν όλα τα δωμάτια για τη διαμονή και εξυπηρέτηση του πληρώματος (κουζίνα, καπνιστήριο, υπνοδωμάτια, γραφεία αξιωματικών πληρώματος) όπως και το Cargo Control Room (CCR). Ο υψηλότερος κλειστός χώρος στη μέση του πλοίου (στο μεσόστεγο) είναι η γέφυρα (Bridge), που χρησιμοποιείται για τη διακυβέρνηση του πλοίου.

Στο πλωριό μέρος του πλοίου εντοπίζεται το κάσσαρο (Forecastle), η κατασκευή του οποίου αρχίζει από το ακραίο σημείο της πλώρης και εκτείνεται προς τα πρύμα και συνήθως έχει ύψος τουλάχιστο ενός καταστρώματος (ενός επιπέδου). Πάνω σε αυτό είναι τοποθετημένα τα βαρούλκα άγκυρας και σχοινιών πρόσδεσης, οι ανέμες με τα σχοινιά ή τα σύρματα πρόσδεσης, οι οδηγοί σχοινιών και άλλα. Εσωτερικά του Forecastle συναντάται το Bosun room, ένα διαμέρισμα του πλοίου στο οποίο φυλάσσονται εργαλεία και σχοινιά πρόσδεσης. Στο ενδιάμεσο τμήμα μεταξύ του ενδιαιτήματος και του κάσσαρου συναντώνται οι δεξαμενές φορτίου του πλοίου (Cargo Tanks).

\*Στην πράξη σήμερα έχει επικρατήσει η ταξινόμηση των επιπέδων να γίνεται με βάση των γραμμάτων του αγγλικού αλφαβήτου, οπότε και κάθε επίπεδο χαρακτηρίζεται από ένα γράμμα (A, B, C και ούτω καθεξής).

### 4.3 Ανάλυση διεξχθέντος πειράματος

Τα δυο LoRa modules, που όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα, αποτελούν τους κόμβους-τελικές συσκευές (nodes-end devices). Το ένα εξ αυτών αποτελούσε τον πομπό (module 1) και ήταν μόνιμα συνδεδεμένο με το φορητό

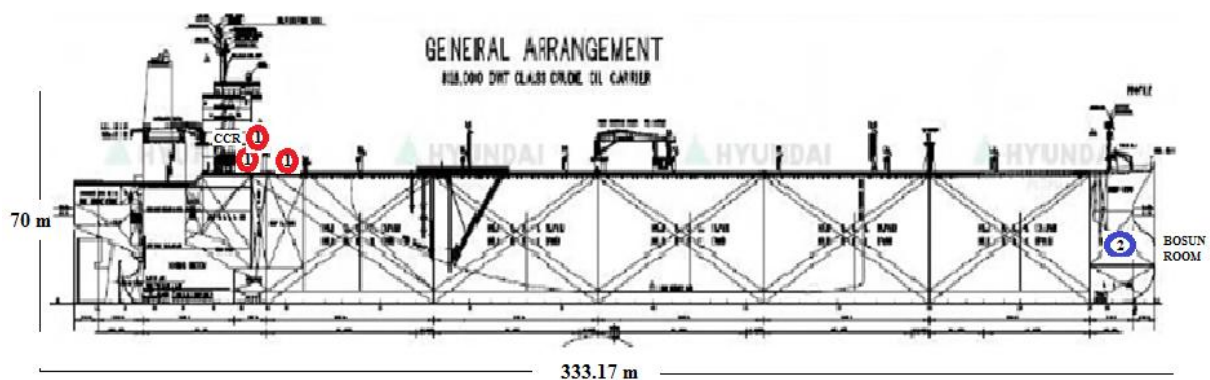
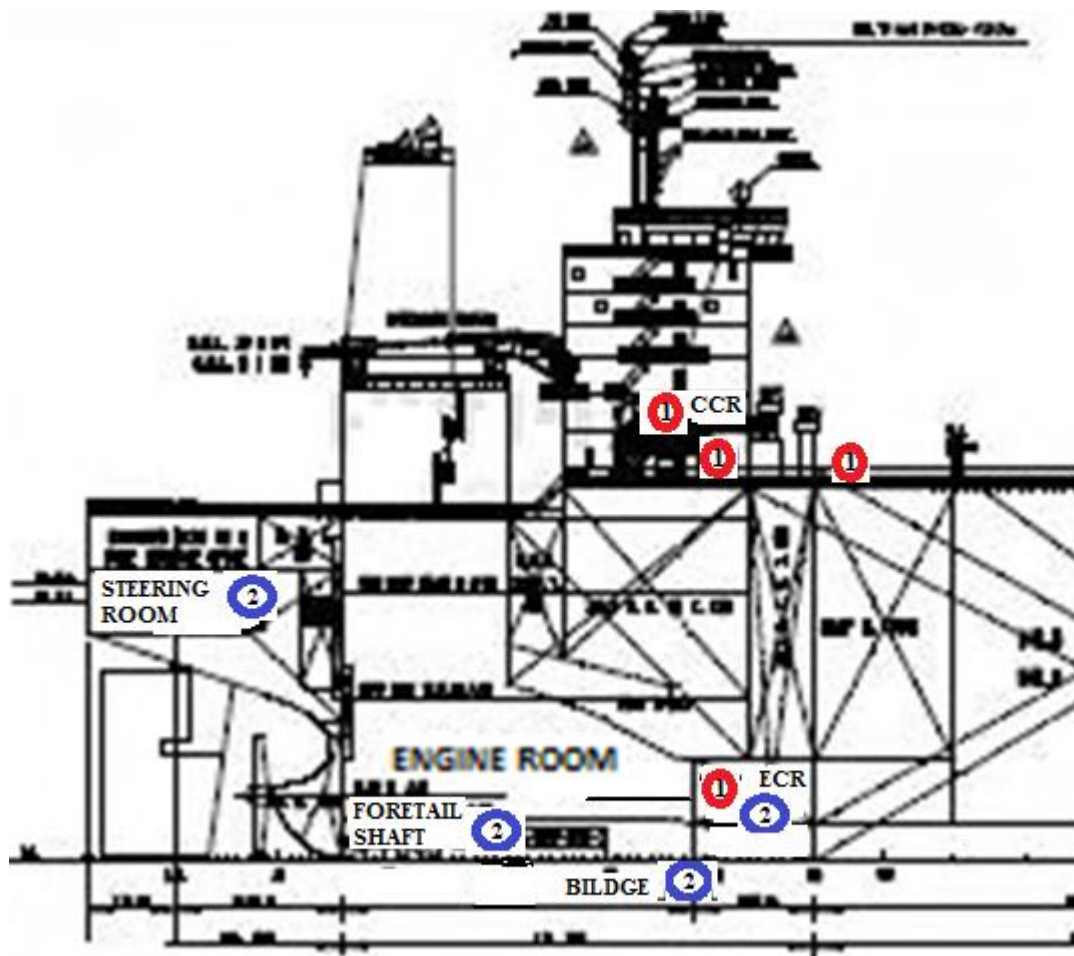
υπολογιστή (laptop)(όπως φαίνεται στην Εικόνα 30 όπου το module 1 είναι συνδεδεμένο με το laptop βρίσκεται στο Cargo Control Room) στο οποίο «έτρεχε» το πρόγραμμα της σύνδεσης και καταγραφής των πακέτων, ενώ το άλλο αποτελούσε τον δέκτη (module 2), ο οποίος έπαιρνε τροφοδοσία από ένα power bank.



*Εικόνα 30: Απεικόνιση του module 1 συνδεδεμένο με το Laptop στο Cargo Control Room (CCR)*

Τα δύο modules τοποθετούνταν σε διάφορα καίρια σημεία του πλοίου (Εικόνα 31). Το module 1 τοποθετήθηκε σε πρώτη φάση στο Engine Control Room (ECR) και ο δέκτης αρχικά στο ίδιο επίπεδο (επίπεδο 3) εξωτερικά του ECR σε απόσταση περίπου 8 μέτρων από αυτό, με μοναδικό σκοπό να διαπιστωθεί αν είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ τους για αυτό η μέτρηση που καταγράφηκε δεν αποθηκεύτηκε. Αφού η επικοινωνία επιβεβαιώθηκε ότι ήταν εφικτή, για την πρώτη μέτρηση το module 2 μετακινήθηκε στο χώρο του Steering Room, που απέχει από το ECR περίπου 20 μέτρα. Στη συνέχεια, ο δέκτης μετακινήθηκε στο σημείο του Foretail shaft (επίπεδο 4) και των σεντινών (Bildge) (ένα επίπεδο κάτω) όπου και πραγματοποιήθηκαν άλλες μετρήσεις. Η

επόμενη φάση των πειραμάτων αφορούσε στην επικοινωνία των κόμβων μεταξύ του Cargo Control Room (επίπεδο Β) και άλλων καίριων σημείων του πλοίου, δηλαδή του ECR (επίπεδο 3) και του εσωτερικού του κάσσαρου, δηλαδή το Bosun room, τα οποία μεταξύ τους βρίσκονται σε απόσταση περίπου 295 m. Το πείραμα ολοκληρώθηκε με τον κόμβο 1 να βρίσκεται εκτός του CCR και συγκεκριμένα στο κατάστρωμα (deck, επίπεδο 1) σε δύο διαφορετικά σημεία του (που απέχαν μεταξύ τους περίπου 10 μέτρα) και τον κόμβο 2 στο Bosun room, απόσταση περίπου 295 m και 285 m αντίστοιχα.

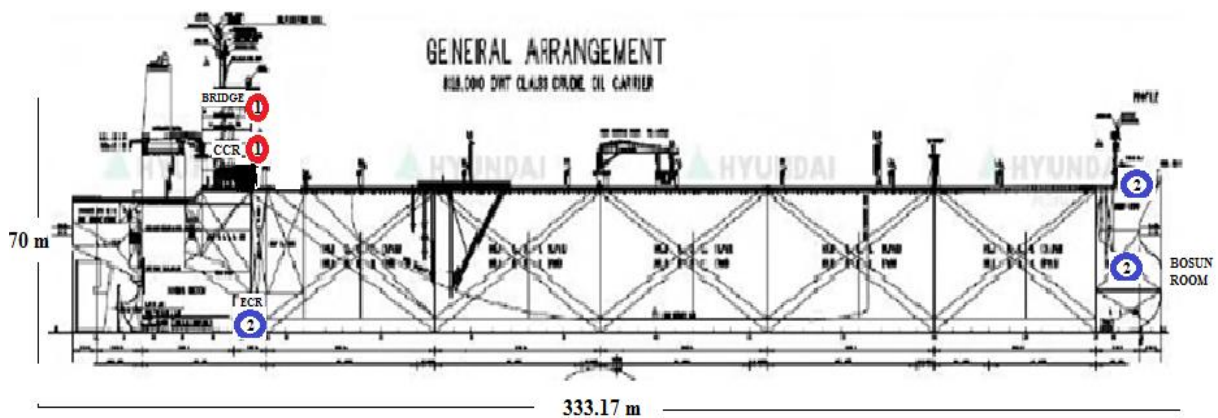
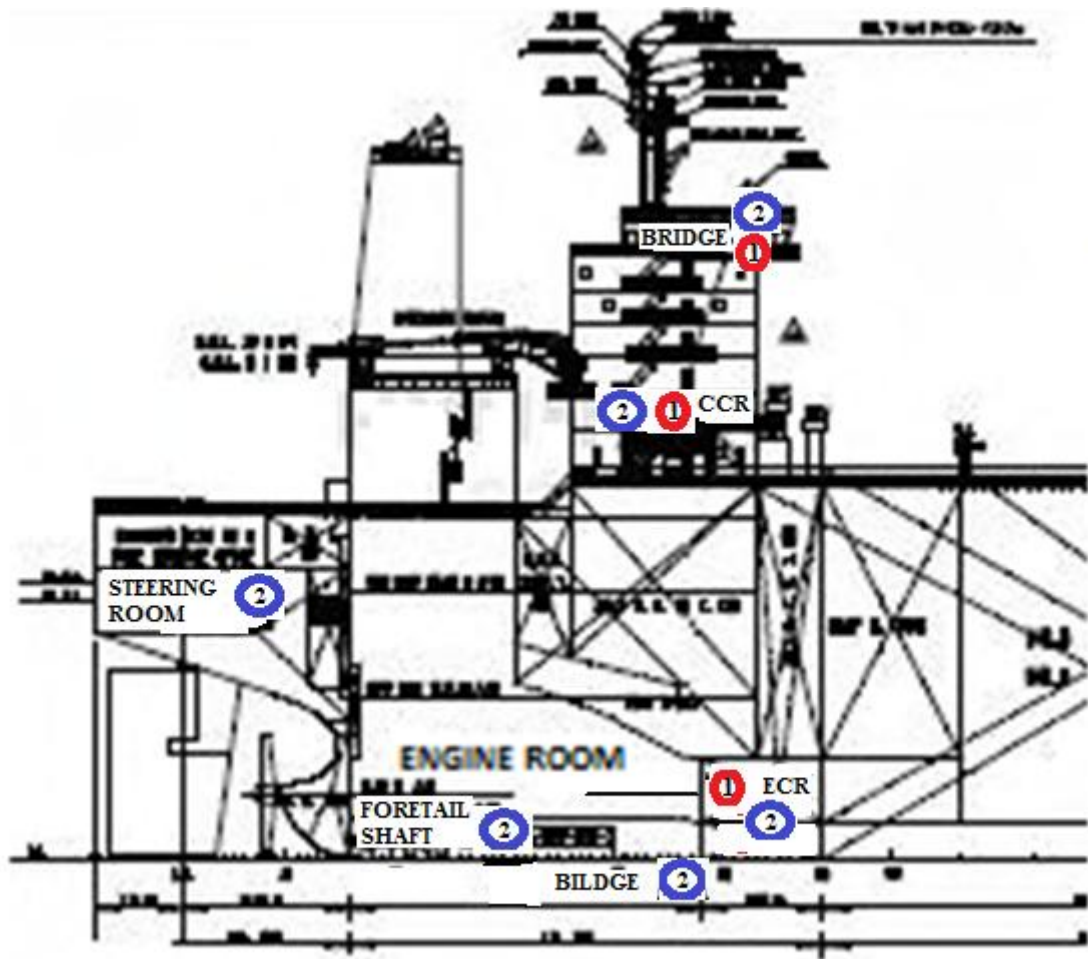


Εικόνα 31: Οι θέσεις του module 1(κόκκινο) και του module 2 (μπλε) στο πρώτο πείραμα

Παρόλο που με τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων θα μπορούσαν να εξαχθούν ικανοποιητικά συμπεράσματα για την επικοινωνία της τεχνολογίας LoRa, τα πειράματα δεν περιορίστηκαν σε μια μόνο μέτρηση. Επαναλήφθηκαν οι ίδιες μετρήσεις με τον ίδιο εξοπλισμό στο ίδιο πλοίο, 9 μήνες αργότερα: η 1η πραγματοποιήθηκε τον Φεβρουάριο του 2018 και η 2η τον Νοέμβριο του ίδιου έτους. Στόχος της 2ης μέτρησης ήταν η σύγκριση της επαναληψιμότητας των ίδιων πειραμάτων. Εκτός από τις μετρήσεις που ήταν κοινές σε αμφότερα τα πειράματα, πραγματοποιήθηκαν και άλλες μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία του πλοίου (Εικόνα 32).

Το module 1 τοποθετήθηκε, όπως και στο πρώτο πείραμα, αρχικά στο Engine Control Room και έγινε προσπάθεια επίτευξης επικοινωνίας με το module 2 να βρίσκεται στο Steering Room (επίπεδο 2), στις σεντίνες και έπειτα στο Foretail shaft. Στη συνέχεια των πειραμάτων δόθηκε έμφαση στην επικοινωνία του κόμβου 1 στο CCR με τον κόμβο 2 τοποθετημένο αρχικά σε διπλανό δωμάτιο (μεσοτοιχία) στον ίδιο όροφο και έπειτα σε ανώτερα και κατώτερα επίπεδα και πιο συγκεκριμένα, στο κατώτατο σημείο του Bosun room, στη θύρα εισόδου του Bosun room και στη γέφυρα (Bridge). Τέλος ο κόμβος 1 τοποθετήθηκε στη γέφυρα (Bridge) και ο κόμβος 2 την πρώτη φορά στο κατώτατο σημείο του Bosun room και στη συνέχεια στο Engine Control Room.





Εικόνα 32: Οι θέσεις του module 1 (κόκκινο) και του module 2 (μπλε) στο δεύτερο πείραμα

#### 4.4 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

Το πρόγραμμα που αναλύθηκε πρωτίτερα κατέγραφε τις μετρήσεις σε 3 στήλες: Στην πρώτη εμφανιζόταν *ο αριθμός των πακέτων* που προωθήθηκαν επιτυχώς από τον κόμβο 1 στον κόμβο 2, στη δεύτερη *το RSSI* (Received Signal Strength Indicator) σε dBm και στη τρίτη *το SNR* (Signal-to-Noise Ratio) σε dB. Ο αριθμός των μεταδιδόμενων πακέτων κυμαινόταν από 1 έως και 200 και στην περίπτωση που κανένα πακέτο δεν έφτανε στο προορισμό του, το πρόγραμμα εμφάνιζε την ένδειξη «acknowledge not received».

Το RSSI (Δείκτης ισχύος ληφθέντος σήματος) είναι ένα μέγεθος που αναπαριστά την σχετική ποιότητα του ληφθέντος σήματος από την συσκευή που λειτουργεί ως δέκτης. Η μονάδα μέτρησής του είναι το dBm (decibel-milliwatts), δηλαδή ντεσιμπέλ (dB) με αναφορά σε ένα milliwatt. Το RSSI λαμβάνει τιμές στην αρνητική κλίμακα. Πιο συγκεκριμένα το module P-NUCLEO-LRWAN1 της εταιρείας STMicroelectronics που χρησιμοποιήθηκε στα Πειράματα 1 και 2 λαμβάνει τιμές από -137 dBm έως 0 dBm [60]. Η τιμή -137 dBm αντιστοιχεί στο όριο ευαισθησίας του module που χρησιμοποιήθηκε. Όσο υψηλότερο είναι το RSSI (δηλαδή όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι η τιμή του) τόσο δυνατότερο είναι το σήμα.

Ο θόρυβος (N, Noise) αποτελεί κάθε σήμα που είναι διαφορετικό από το «επιθυμητό» σήμα, που στην προκειμένη περίπτωση εκπέμπεται από τον κόμβο (πομπό) 1. Το επίπεδο θορύβου δηλαδή είναι το μέγεθος της παρεμβολής στο ασύρματο σήμα. Μετριέται σε dBm όπως και το RSSI και κυμαίνεται από 0 έως -120. Εξετάζοντας αυτή την τιμή, αν η τιμή είναι πιο κοντά στο -120 (μείον 120) είναι καλύτερη, διότι αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ελάχιστη ή καμία παρέμβαση.

Το SNR (Signal-to-Noise Ratio) είναι ο λόγος της ισχύος του σήματος (RSSI) προς την ισχύ του θορύβου (N). Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται από την εξίσωση

$$SNR = \frac{RSSI}{N} \quad (2)$$

Με βάση την παραπάνω εξίσωση, το SNR θα έπρεπε να είναι αδιάστατο μέγεθος. Στην πραγματικότητα, όμως, μετριέται σε db (decibel). Αφού τόσο ο αριθμητής όσο και ο παρονομαστής λαμβάνουν αρνητικές τιμές, ο λόγος σήματος-θορύβου λαμβάνει μόνο θετικές τιμές. Γενικά θεωρείται ότι σήμα με τιμές SNR από 10-15 db είναι πολύ χαμηλό, 15-25 db είναι μέτριο, από 25-40 db καλό έως πολύ καλό και με τιμές μεγαλύτερες των

40 db εξαιρετικό. Τιμές SNR μικρότερες των 10 db υποδηλώνουν μη ύπαρξη σύνδεσης [61]. Όσο μεγαλύτερο είναι το SNR τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα σήματος. Μεγάλη τιμή του SNR υποδηλώνει ότι το ωφέλιμο σήμα επηρεάζεται δύσκολα από το σήμα θορύβου.

Οι μετρήσεις που κατεγράφησαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων στο πρόγραμμα CoolTerm, δηλαδή ο αριθμός των πακέτων, το RSSI (Received Signal Strength Indicator) σε dBm και το SNR (Signal-to-Noise Ratio) σε db παρουσιάζονται στους Πίνακες I- XI, οι οποίοι παρατίθενται στο Παράρτημα I. Δεν περιλαμβάνονται πίνακες για την προσπάθεια επίτευξης επικοινωνίας μεταξύ *Deck-Bottom of Bosun Room* και *CCR- Bottom of Bosun Room* για το Πείραμα 1 και μεταξύ *ECR-Bildge*, *CCR- Bottom of Bosun Room* και *CCR-Gate of Bosun Room* για το Πείραμα 2, καθώς δεν ήταν δυνατή η επικοινωνία και έτσι στο πρόγραμμα CoolTerm εμφανίστηκε το μήνυμα “ACK NOT RECEIVED” (Acknowledge not received). Για τις μετρήσεις των πινάκων I-XI υπολογίστηκε στο πρόγραμμα Excel η Μέση τιμή του RSSI και του SNR.

## 4.5 Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων και ανάλυση αποτελεσμάτων

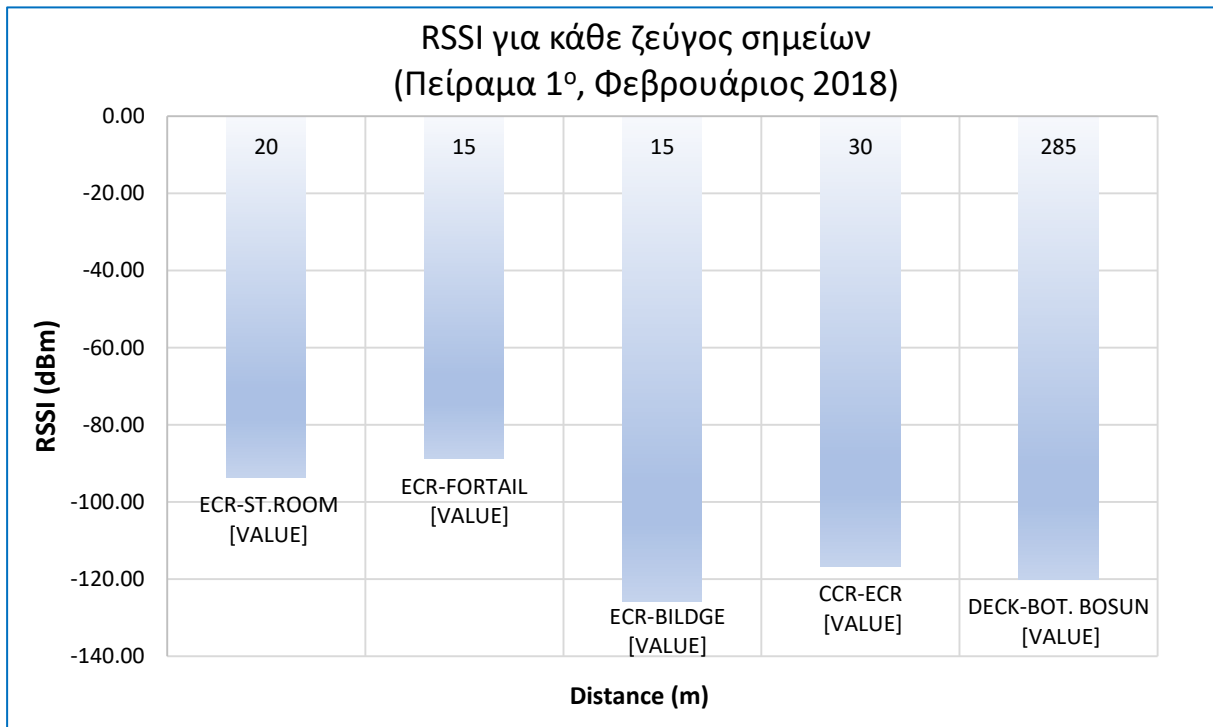
### 4.5.1 Πείραμα 1<sup>ο</sup> (Φεβρουάριος 2018)

Οι μετρήσεις του πειράματος 1 που πραγματοποιήθηκε τον Φεβρουάριο του 2018 σε ναυπηγείο κατά την επισκευή του πλοίου και ήταν επιτυχής επεξεργάστηκαν στο Excel και η Μέση τιμή του RSSI και του SNR για κάθε διαφορετική μέτρηση παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

*Πίνακας 2: Η Μέση τιμή του RSSI (σε dBm) και του SNR (σε db) και η Απόσταση σε μέτρα (m) μεταξύ των δυο modules για το Πείραμα 1*

<b>ΖΕΥΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ</b>	<b>Μέση τιμή RSSI (dBm)</b>	<b>Μέση τιμή SNR (db)</b>	<b>Απόσταση (m)</b>
<b>ECR-STEERING ROOM</b>	-93,55	27,09	20
<b>ECR-FORTAIL SHAFT</b>	-88,80	24,31	15
<b>ECR-BILDGE</b>	-125,82	58,64	15
<b>CCR-ECR</b>	-116,68	18,75	30
<b>DECK-BOTTOM OF BOSUN</b>	-120,07	47,64	285

Από τις τιμές του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 2) κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα 1, 2, 3 που παρατίθενται παρακάτω.



*Διάγραμμα 1: Η μέση τιμή του RSSI (dBm) για κάθε ζεύγος σημείων*

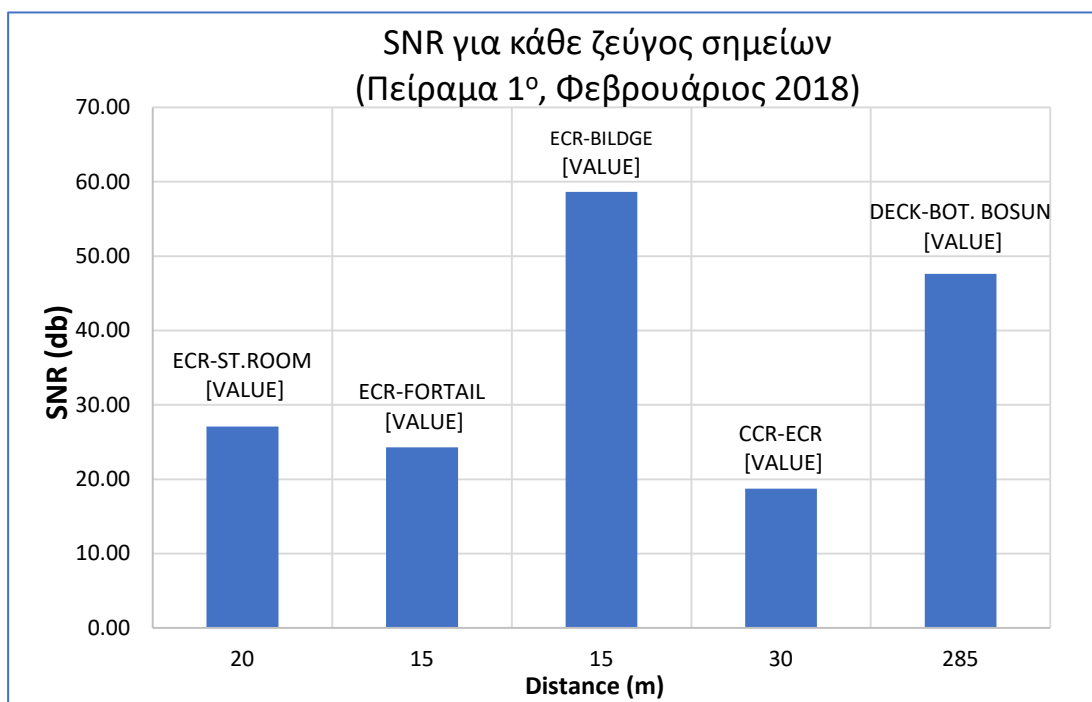
Στο παραπάνω διάγραμμα (Διάγραμμα 1) παρουσιάζεται η τιμή του RSSI για κάθε σημείο που η επικοινωνία στο πλοίο ήταν επιτυχής. Παρατηρώντας τη δεύτερη και τρίτη στήλη του διαγράμματος, φαίνεται ότι παρόλο που η επικοινωνία επετεύχθη μεταξύ σημείων που απείχαν ίση απόσταση (15 m), η ισχύς του σήματος RSSI έχει μεγάλη διαφορά. Αυτό υποδεικνύει ότι το σήμα της επικοινωνίας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση. Με βάση τη μέγιστη απόσταση κάλυψης της LoRa (σε αστική περιοχή) που είναι 5 χιλιόμετρα, θεωρητικά θα αναμενόταν σε αποστάσεις όπως 15 μέτρα να επιτυγχάνεται επικοινωνία με πολύ καλές τιμές του RSSI. Στην πραγματικότητα, όμως, η δοκιμή ολοκληρώθηκε με πολύ διαφορετικές τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι για την επικοινωνία δεν παίζει ρόλο μόνο η απόσταση αλλά και το περιβάλλον όπου διεξάγεται το πείραμα, το οποίο στην περίπτωση του πλοίου είναι εξαιρετικά «τραχύ».

Το γεγονός, λοιπόν, ότι οι μετρήσεις που απεικονίζονται **στη δεύτερη και τρίτη στήλη του Διαγράμματος 1**, παρόλο που η επικοινωνία έγινε και στις δύο μεταξύ ίσων αποστάσεων, στα 15 μέτρα, έχουν τιμές RSSI που διαφέρουν κατά απόλυτη τιμή 37,02 dBm, εξηγείται με βάση το φαινόμενο **Line of Sight** (οπτική επαφή). Δηλαδή, σε κανένα από τα δύο αυτά σημεία δεν υπήρχε ανεμπόδιση οπτική επαφή του module 1 με το module 2, καθώς μεταξύ τους παρεμβάλλονταν τμήματα του πλοίου. Το module 1 και

στις δύο δοκιμές βρισκόταν στο Engine Control Room και το module 2 στη μία μέτρηση βρισκόταν στον άξονα της μηχανής στο Foretail Shaft σε απόσταση 15 μέτρα διαγώνια προς τα κάτω, ενώ στη δεύτερη μέτρηση βρισκόταν στην ίδια απόσταση αλλά κάθετα προς τα κάτω στις σεντίνες (Bildge) της μηχανής όπου ως επίπεδο βρίσκεται πιο χαμηλά από το Foretail Shaft. Η χαμηλότερη κατά 37,02 dBm τιμή RSSI στη δεύτερη περίπτωση ήταν αναμενόμενη, αφού όπως φαίνεται στην Εικόνα 31, το σήμα για να «φτάσει» στο module 2 στις σεντίνες έπρεπε να διαπεράσει δύο επίπεδα από ισχυρό χάλυβα χωρίς να υπάρχει κάποια δίοδος όπως στην πρώτη περίπτωση. Η ισχύς του σήματος μειώνεται όταν το σήμα περνάει μέσα από τοίχους και άλλα αντικείμενα (στην προκειμένη περίπτωση χάλυβα, μπουλμέ, σκάλες και δωμάτια). Για αυτούς τους λόγους, η μέτρηση εμφανίζει τόσο χαμηλή μέση τιμή RSSI, όμως αυτό δεν εγείρει κάποιον προβληματισμό, καθώς το συγκεκριμένο σημείο αποτελεί δευτερεύουσας για την επικοινωνία σημασίας σημείο. Το συγκεκριμένο πείραμα, όμως, πραγματοποιήθηκε επί τούτου με σκοπό να διαπιστωθεί εάν είναι δυνατή η επικοινωνία στο πιο «harsh» σημείο του πλοίου.

Στο σημείο αυτό, δε γίνεται σύγκριση των μετρήσεων στα υπόλοιπα σημεία, καθώς το RSSI δεν αποτελεί επαρκές κριτήριο για την ποιότητα της επικοινωνίας και οι λόγοι αυτού θα εξηγηθούν παρακάτω στην παρούσα εργασία.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μέση τιμή του SNR για κάθε πείραμα, δηλαδή ο λόγος της ισχύος του σήματος προς το θόρυβο.





*Διάγραμμα 2: Η μέση τιμή του SNR (db) για κάθε ζεύγος σημείων*

Αρχικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το SNR ως μέγεθος αποτελεί πιο αξιόπιστο κριτήριο για την ποιότητα της επικοινωνίας, διότι περιλαμβάνει εκτός από το RSSI και τον θόρυβο (N). Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η χαμηλότερη μέση τιμή SNR αντιστοιχεί στην επικοινωνία μεταξύ Cargo Control Room (CCR) και Engine Control Room (ECR) (*4<sup>η</sup> Στήλη*). Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού όπως παρατηρείται στην Εικόνα 31, το σήμα μεταδίδεται κάθετα διαμέσου πολλών επιπέδων του Main Engine Room (MER) και του ενδαιτημάτων (Accommodation).

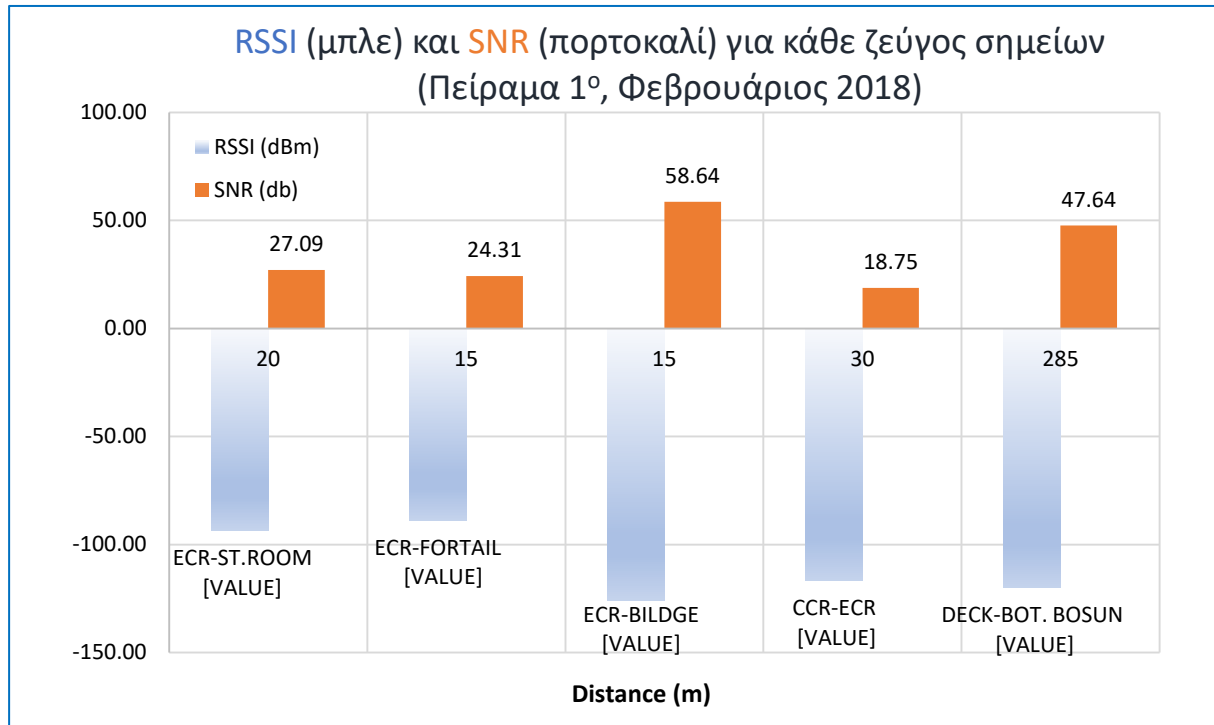


*Εικόνα 33: Το Engine Control Room (ECR) του πλοίου*

Η υψηλότερη μέση τιμή του SNR παρατηρείται στο πείραμα μεταξύ ECR-Bildge (*3<sup>η</sup> Στήλη*) και αν λαμβανόταν υπόψιν μόνο αυτό, θα εξαγόταν το συμπέρασμα ότι στην περίπτωση αυτή επετεύχθη η βέλτιστη επικοινωνία. Αυτό, όμως, δεν συμβαίνει (αφού



όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ισχύς του σήματος στην περίπτωση αυτή έχει τρομερά χαμηλή τιμή), διότι εκτός από το SNR πρέπει να λαμβάνεται ταυτόχρονα υπόψιν και το RSSI. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα θα αναλυθούν με βάση το διάγραμμα που ακολουθεί, στο οποίο ενσωματώνονται το Διάγραμμα 1 και Διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 3: Η μέση τιμή του RSSI (dBm) και του SNR (db) για κάθε ζεύγος σημείων

Όσον αφορά στο SNR της **3<sup>ης</sup> Στήλης**, αντί να λαμβάνει μια πολύ χαμηλή τιμή λόγω του εξαιρετικά χαμηλού RSSI, συμβαίνει το αντίθετο, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3. Ο παράγοντας που προκαλεί αυτήν την «ανισορροπία» μεταξύ SNR και RSSI είναι ο θόρυβος, ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση είναι ελάχιστος, διότι οι μηχανές του πλοίου στο Πείραμα 1 ήταν κλειστές αφού αυτό επισκευαζόταν στο Ναυπηγείο.

Για το πείραμα μεταξύ CCR-ECR (**4<sup>η</sup> Στήλη**) αναφέρθηκε πρωτύτερα ότι η επικοινωνία δεν ήταν ικανοποιητική με βάση το SNR του διαγράμματος 2. Αυτό επιβεβαιώνεται παρατηρώντας το Διάγραμμα 3, καθώς το RSSI έχει εξίσου χαμηλή τιμή.

Η **πρώτη στήλη** του παραπάνω διαγράμματος δείχνει ότι η επικοινωνία μεταξύ ECR-Steering Room δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητική, αφού αμφότερες οι τιμές του RSSI ήταν χαμηλές και του SNR μέτριες. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο ότι και τα δύο

σημεία βρίσκονται μέσα στο Main Engine Room (σε διαφορετικά επίπεδα), το οποίο, όπως μπορεί να διακρίνει κανείς από την Εικόνα 34, αποτελείται από παχύ στρώμα χάλυβα και άλλων υλικών, καζάνια, σιδερένιες σκάλες, την κύρια μηχανή και τις ηλεκτρομηχανές και άλλα υποσυστήματα του πλοίου.



Εικόνα

34: : Το Main Engine Room (MER) του πλοίου

Στο πείραμα μεταξύ του καταστρώματος και του κατώτερου επιπέδου του bosun room (*5<sup>η</sup> Σπήλη*), το RSSI έχει υπερβολικά χαμηλή τιμή, ενώ το SNR πολύ υψηλή.

Επομένως, ο θόρυβος είναι μηδαμινός, καθώς η μέτρηση εκτελέστηκε στο εξωτερικό περιβάλλον του πλοίου, όπου δεν υπήρχε κάτι να προκαλεί ιδιαίτερο θόρυβο. Ο πομπός ήταν τοποθετημένος σε ύψος 30 εκατοστά από το επίπεδο του καταστρώματος και ο δέκτης στο πάτωμα του Bosun Room. Ανάμεσα στον πομπό και τη θύρα για το bosun room και κατά μήκος του καταστρώματος βρίσκονται όλες οι απαραίτητες σωληνώσεις και κατασκευές για τη φόρτωση και εκφόρτωση του πλοίου (Εικόνες 35, 36) γι' αυτό η ισχύς του σήματος είναι τόσο χαμηλή, όπως και εξαιτίας της πολύ μεγάλης απόστασης μεταξύ module 1 και module 2 (285 m).



*Εικόνα 35: Το κατάστρωμα (Deck) του πλοίου με κατεύθυνση βλέψης προς την πλώρη*





*Εικόνα 36: Το κατάστρωμα του πλοίου (Deck) του πλοίου με κατεύθυνση βλέψης προς την πρύμνη*

Το RSSI δεν αποτελεί επαρκές κριτήριο για την ποιότητα της επικοινωνίας, αφού πολλές έρευνες έχουν ταξινομήσει τα ασύρματα δίκτυα χαμηλής ισχύος σε τρεις διακριτές «περιοχές» συνδεσιμότητας: περιοχή σύνδεσης, περιοχή αποσύνδεσης και μεταβατική περιοχή. Στην περιοχή σύνδεσης, το μεταδιδόμενο σήμα είναι, συνήθως, καλής ποιότητας, σταθερό και συμμετρικό. Αντιθέτως, η περιοχή αποσύνδεσης πρακτικά δεν παρουσιάζει συνδέσεις για επικοινωνία και η μεταβατική περιοχή χαρακτηρίζεται από την παρουσία μη αξιόπιστων και ασύμμετρων μεταδιδόμενων σημάτων (**Asymmetric Links**). Δυστυχώς, η μεταβατική περιοχή είναι πολύ συχνά σημαντική σε μέγεθος, όπως και στις περιπτώσεις που αφορούν στο δίκτυο αισθητήρων, ειδικά στο πλοίο και ένας μεγάλος αριθμός συνδέσεων στο δίκτυο αυτό μπορεί να είναι αναξιόπιστο [62]. Επιπροσθέτως, το RSSI δεν αποτελεί δείκτη της ισχύος του σήματος για τα ληφθέντα πακέτα, αλλά της ισχύος του σήματος που υπάρχει στο κανάλι (channel) σε κάποια συγκεκριμένη στιγμή. Ως αποτέλεσμα, όταν υπάρχουν

παρεμβάλλοντα σήματα, αυτά προκαλούν ενίσχυση του RSSI, αλλά αυτό δεν αντιστοιχεί σε αυξημένη ισχύ του σήματος για τα πακέτα που αποστέλλονται [63].

Επομένως τα αποτελέσματα αναλύονται όχι μόνο με βάση τις τιμές RSSI και SNR αλλά και με βάση το **PDR (Packet Delivery Ratio)**, το οποίο ορίζεται από τη σχέση [64]:

$$\% PDR = \frac{Packets\ received}{Packets\ sent} \times 100 \quad (3)$$

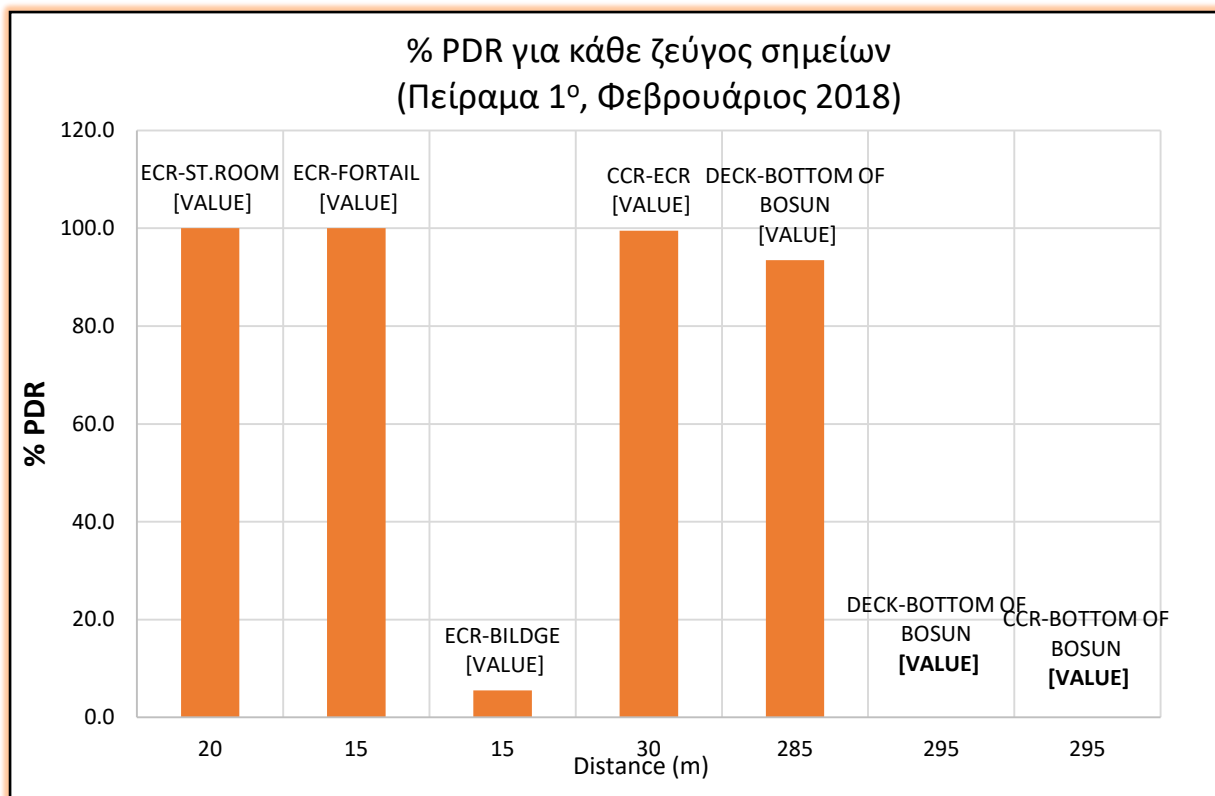
Όπως φαίνεται και από τη σχέση (3), το % PDR δείχνει το ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν (Packets received) από τα 200 συνολικά πακέτα που έστειλε ο πομπός (Packets sent).

Με βάση τη σχέση αυτή λοιπόν, έγινε υπολογισμός των τιμών % PDR για όλες τις μετρήσεις που έλαβαν χώρα στο πλοίο, ακόμα και γι' αυτές στις οποίες η επικοινωνία δεν ήταν επιτυχής και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 3: Το ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) για κάθε ζεύγος σημείων για το Πείραμα 1*

ΖΕΥΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ	Μέση τιμή RSSI (dBm)	Μέση τιμή SNR (db)	Απόσταση (m)	Packets Lost	%PDR
ECR-STEERING ROOM	-93,55	27,09	20	0	100
ECR-FORTAIL SHAFT	-88,80	24,31	15	0	100
ECR-BILDGE	-125,82	58,64	15	189	5,5
CCR-ECR	-116,68	18,75	30	1	99,5
DECK-BOTTOM OF BOSUN ROOM	-120,07	47,64	285	13	93,5
DECK-BOTTOM OF BOSUN ROOM	-	-	295	200	0
CCR-BOTTOM OF BOSUN ROOM	-	-	295	200	0

Με βάση τις τιμές της 4ης και 6ης Στήλης του παραπάνω πίνακα, κατασκευάστηκε το ακόλουθο διάγραμμα:

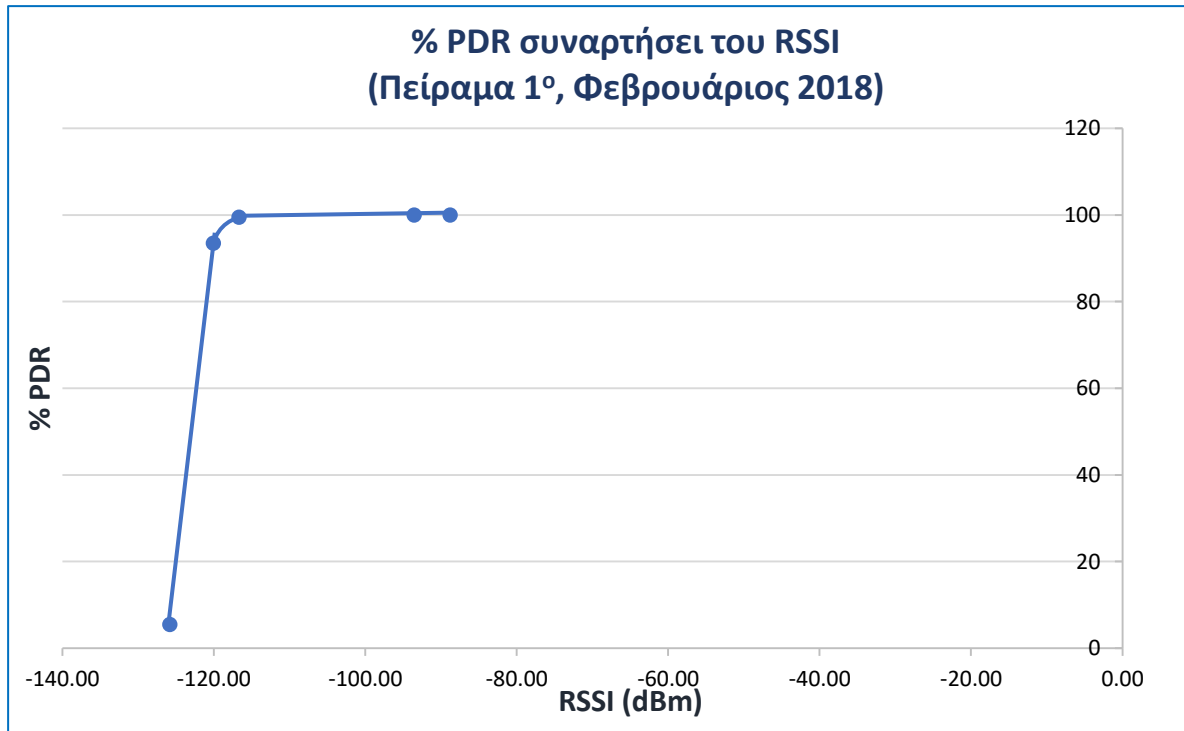


*Διάγραμμα 4: Οι τιμές του ποσοστού των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) για κάθε ζεύγος σημείων*

Στο Διάγραμμα 4 φαίνεται ότι για τις μετρήσεις όπου επετεύχθη επικοινωνία (1<sup>η</sup> - 5<sup>η</sup> Στήλη), το ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικό έως τέλειο, με μοναδική εξαίρεση την μέτρηση ECR-Bildge (3<sup>η</sup> Στήλη), όπου το ποσοστό αυτό είναι μόλις 5,5 %. Στην 3<sup>η</sup> μέτρηση, δηλαδή, από τα 200 πακέτα που στάλθηκαν μόνο τα 11 ελήφθησαν. Αυτό συνέβη διότι η συγκεκριμένη μέτρηση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αφορά στο πιο «harsh» σημείο ολόκληρου του πλοίου. Οι **δύο τελευταίες στήλες** του Διαγράμματος αφορούν τα σημεία όπου δεν επετεύχθη επικοινωνία και γι' αυτό το PDR είναι μηδενικό. Αυτό πιθανόν συνέβη γιατί το σήμα δεν κατάφερε να διαπεράσει την μεταλλική δομή του πλοίου κάτι το οποίο είναι λογικό διότι κοιτάζοντας ξανά το **Διάγραμμα 3, στη 5<sup>η</sup> Στήλη** (απόσταση 285 m) η Μέση τιμή του RSSI είναι ήδη πολύ μικρή, επομένως προσθέτοντας σε αυτή την απόσταση 10 μέτρα ακόμη το αναμενόμενο είναι να μην επιτυγχάνεται καν σύνδεση.



Από τις τιμές RSSI και τις τιμές του % PDR του Πίνακα 3, κατασκευάστηκε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 5: Το ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) συναρτήσεως του RSSI (dBm)

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 5, φαίνεται ότι το σύνολο των σημείων του σχηματίζουν το αγγλικό γράμμα «L» ανάποδα. Αυτό πρόκειται για το «τυπικό L» που εμπεριέχεται σε όλες τις βιβλιογραφικές πηγές σε διάγραμμα του % PDR ως προς RSSI [65, 63]. Το «επίπεδο γωνίας», το γνωστό από την βιβλιογραφία «knee leveling» [63], στο παρόν διάγραμμα αποτυπώνεται περίπου στα -110 dBm. Αφού προέκυψε το αναμενόμενο εικονιζόμενο αποτέλεσμα, διασφαλίζεται η εγκυρότητα του πειράματος.

#### 4.5.2 Πείραμα 2° (Νοέμβριος 2018)

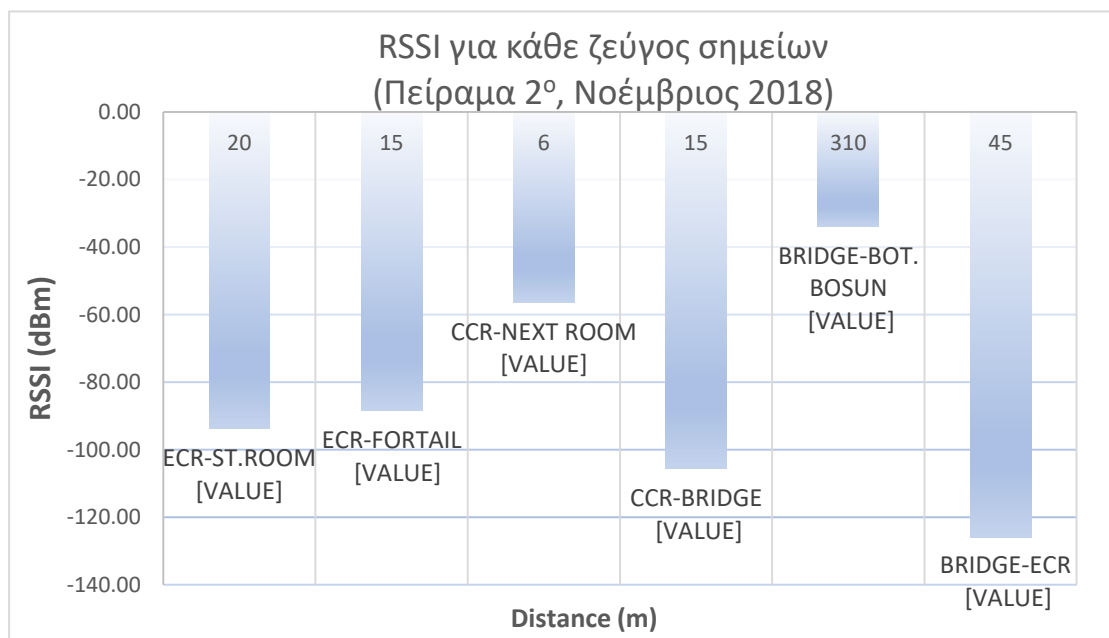
Οι μετρήσεις του πειράματος 2 που πραγματοποιήθηκε τον Νοέμβριο του 2018 εν πλω κατά την διαδικασία του sea trial του πλοίου επεξεργάστηκαν στο Excel και η Μέση τιμή του RSSI και του SNR για κάθε διαφορετική μέτρηση παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 4: Η Μέση τιμή του RSSI (σε dBm) και του SNR (σε db) και η Απόσταση σε μέτρα (m) μεταξύ των δυο modules για το Πείραμα 2

ΖΕΥΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ	Μέση τιμή RSSI (dBm)	Μέση τιμή SNR (db)	Απόσταση (m)
ECR-STEERING ROOM	-93,75	25,34	20
ECR-FORTAIL SHAFT	-88,39	23,71	15
CCR-NEXT ROOM	-56,37	28,75	6
CCR-BRIDGE	-105,55	16,12	15
BRIDGE-BOTTOM OF BOSUN	-33,86	24,43	310
BRIDGE-ECR	-126,09	53,60	45

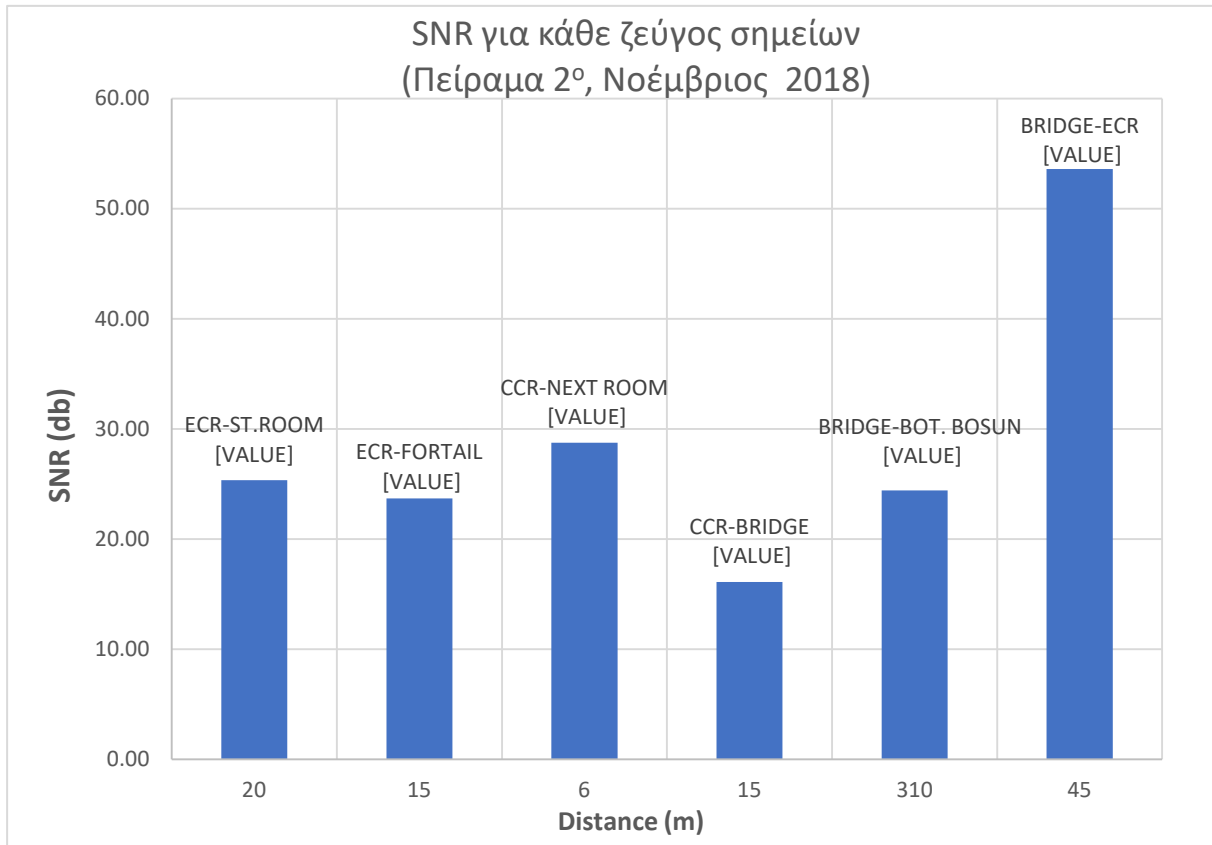
Από τις τιμές του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 4) κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα 6, 7, 8, που παρατίθενται παρακάτω.

Συγκριτικά με το 1ο Πείραμα, επαναλήφθηκαν οι δυο πρώτες μετρήσεις που αφορούν στο μηχανοστάσιο του πλοίου (Main Engine Room) και στη συνέχεια έγιναν μετρήσεις σε άλλα καίρια σημεία του πλοίου, που στο σύνολο τους καλύπτουν την επικοινωνία σε όλο το πλοίο.



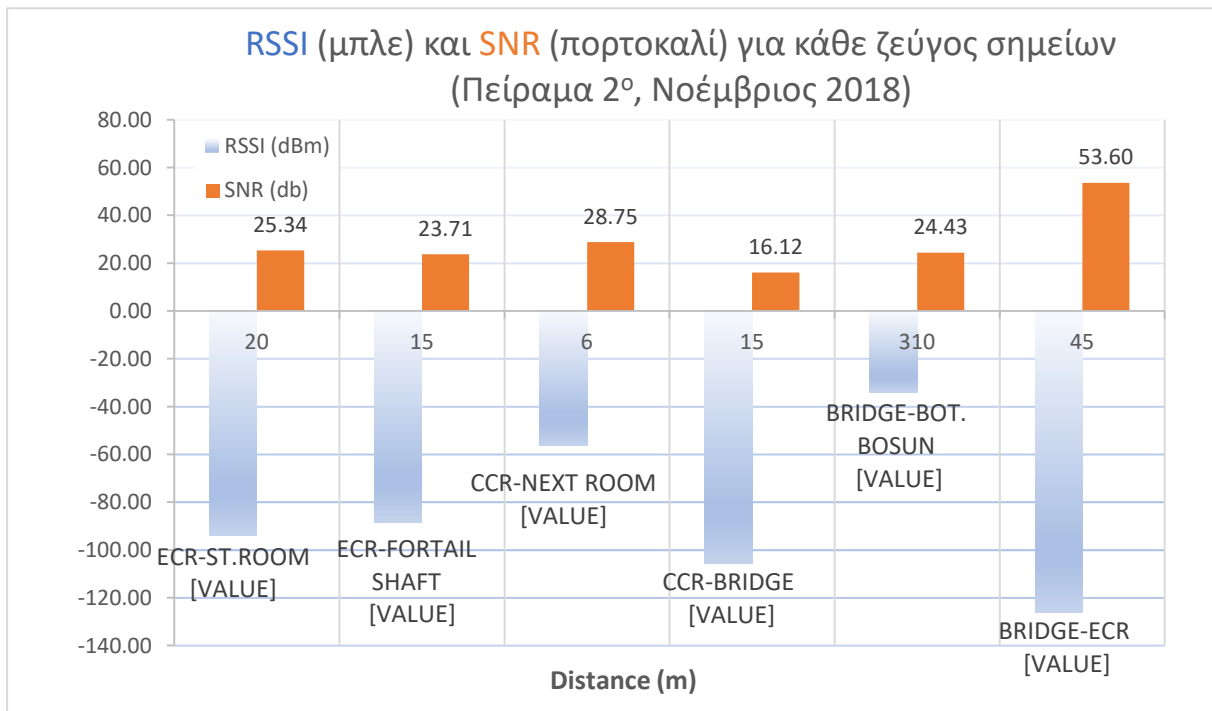
Διάγραμμα 6: Η μέση τιμή του RSSI (dBm) για κάθε ζεύγος σημείων

Όπως στο Διάγραμμα 1, έτσι και στο Διάγραμμα 6, παρατηρείται η Μέση τιμή RSSI για κάθε μέτρηση. Η καλύτερη Μέση τιμή RSSI του διαγράμματος είναι αυτή της 5<sup>ης</sup> Στήλης. Η ανάλυσή της, όμως, όπως και των υπόλοιπων τιμών, δε θα γίνει στο σημείο αυτό, αλλά με βάση το συνδυαστικό διάγραμμα RSSI-SNR (Διάγραμμα 8), αφού, όπως εξηγήθηκε πρωτύτερα, το RSSI δεν είναι από μόνο του επαρκές για αξιόπιστα συμπεράσματα.



Διάγραμμα 7: : Η μέση τιμή του SNR (db) για κάθε ζεύγος σημείων

Στο Διάγραμμα 7 παρατηρούνται οι τιμές του μέσου SNR για κάθε μέτρηση του Πειράματος 2. Άξια περαιτέρω μελέτης είναι ιδιαίτερα η μέτρηση για το ζεύγος σημείων CCR-Next Room (**3<sup>η</sup> Στήλη**), όπου λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των δύο modules (μόλις 6 m), αναμενόταν υψηλότερη τιμή SNR. Η μελέτη του σημείου αυτού γίνεται στο Διάγραμμα 8, όπου παράλληλα με την SNR τιμή παρατηρείται και το RSSI για κάθε μέτρηση.



Διάγραμμα 8: Η μέση τιμή του RSSI (dBm) και του SNR (db) για κάθε ζεύγος σημείων

Όπως αναφέρθηκε και πρωτίτερα, στη μέτρηση της **5<sup>ης</sup> Στήλης (Διάγραμμα 6)** διακρίνεται η καλύτερη Μέση τιμή RSSI τόσο στο Πείραμα 2 όσο και στις μετρήσεις ολόκληρης της πειραματικής έρευνας. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του module P-NUCLEO-LRWAN1, το RSSI κυμαίνεται από -137dBm έως 0 dBm, έτσι αυτόματα διαπιστώνεται ότι το -33,86 dBm της συγκεκριμένης μέτρησης είναι εξαιρετικά καλή τιμή και υποδηλώνει ένα πολύ ισχυρό σήμα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, διότι το σήμα κατά κύριο λόγο «κινείται» στον αέρα χωρίς ενδιάμεσα εμπόδια από το υψηλότερο επίπεδο όπου πραγματοποιήθηκε η μέτρηση (τη Γέφυρα) στο κατώτατο σημείο του Bosun Room, το οποίο απέχει κατά ύψος από την γέφυρα 30 μέτρα (Εικόνες 32, 36). Αξιοσημείωτο είναι ότι το ισχυρότερο σήμα καταγράφηκε στη μεγαλύτερη απόσταση (310 m), αφού σύμφωνα με τη θεωρία για τις ασύρματες επικοινωνίες, εάν η απόσταση μεταξύ του αποστολέα και του δέκτη είναι πολύ μεγάλη, το σήμα μπορεί να μειωθεί σε ένα μη αναγνώσιμο σήμα ή μπορεί να μην φτάσει στο δέκτη καθόλου. Όσον αφορά στο SNR, με τόσο καλή τιμή RSSI αναμενόταν αυτό να είναι αντίστοιχα πολύ καλό. Αυτό όμως δε συνέβη, διότι άλλη μια παράμετρος που επηρεάζει το σήμα είναι παρεμβολή από άλλες πηγές (κυρίως πηγές που στέλνουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων), όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση, το WiFi που «διατρέχει» το μεσόστεγο του πλοίου και κυρίως τη Γέφυρα. Ένα σήμα μπορεί επίσης να αντανακλάται στο έδαφος ή σε αντικείμενα,

προκαλώντας το ίδιο σήμα να φτάσει στον δέκτη πολλές φορές, σε κάθε όμως περίπτωση ελαφρώς μετατοπισμένο στο χρόνο από ό,τι το άλλο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάδοση πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation) και προκαλεί τον δέκτη να καταγράφει τα πρόσθετα σήματα ως θόρυβο, καθιστώντας το σήμα λιγότερο σαφές [66, 67]. Το εν λόγω φαινόμενο ίσως είναι η αιτία που ο θόρυβος στη περίπτωση αυτή είναι τόσο αυξημένος που εξαιτίας του το SNR λαμβάνει τόσο απροσδόκητα μειωμένη τιμή.

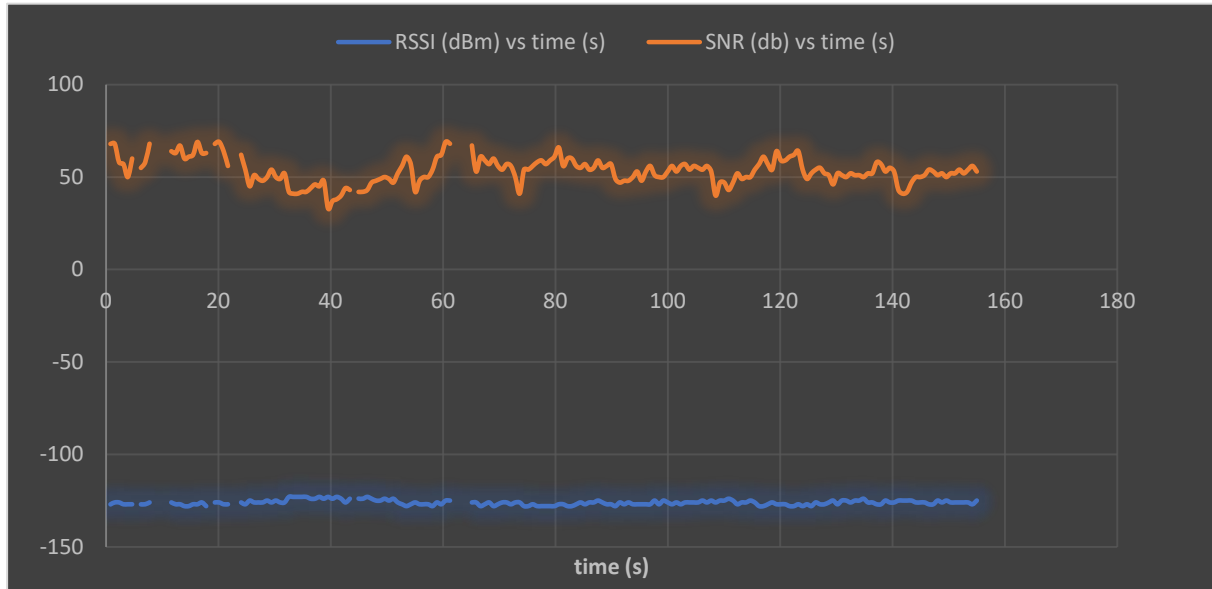
Για την **1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> Στήλη** τόσο το RSSI όσο και το SNR εμφανίζουν μέτριες τιμές τόσο στο Πείραμα 2 όσο και στο Πείραμα 1 και αφού αφορούν στα ίδια σημεία, οι λόγοι που συμβαίνει αυτό έχουν ήδη αναλυθεί.

Στη μέτρηση της **3<sup>ης</sup> Στήλης**, (CCR-Next Room) ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε διπλανά δωμάτια του ενδιατημάτος του πλοίου με την κοινή πόρτα μεταξύ τους ανοιχτή. Η μέτρηση αυτή έχει ενδιαφέρον, καθώς ενώ το RSSI είναι πολύ ισχυρό (-56,37 dBm) που είναι λογικό για την μόλις 6 μέτρα απόστασή τους, το SNR είναι μικρό, προφανώς λόγω θορύβου.

Το αποτέλεσμα της μέτρησης στη **4<sup>η</sup> Στήλη** είναι αρκετά μέτριο, καθώς και τα δύο μεγέθη (RSSI, SNR) είναι μικρά. Το προκύπτον SNR θεωρείται λογικό γιατί η μέτρηση της 3<sup>ης</sup> Στήλης έδειξε ότι υπάρχει θόρυβος στην επικοινωνία με το CCR, επομένως θόρυβος υπάρχει και στη παρούσα μέτρηση (CCR-Bridge). Το RSSI εμφανίζει αυτή τη χαμηλή τιμή λόγω της μεταλλικής δομής στη μεταξύ τους απόσταση και του δυναμικού περιβάλλοντος στη Γέφυρα (συχνή κίνηση προσώπων και αντικειμένων).

Η καλύτερη μέση τιμή SNR φαίνεται στην **6<sup>η</sup> Στήλη** του Διαγράμματος 8, που παραδόξως αντιστοιχεί στην χειρότερη μέση τιμή RSSI ολόκληρης της πειραματικής έρευνας. Το RSSI είναι λογικό να είναι τόσο χαμηλό, καθώς ο πομπός απέχει από τον δέκτη 9 ορόφους (45 m) και το σήμα προσπαθεί να διαπεράσει κάθετα τη «solid» δομή του πλοίου. Το SNR είναι τόσο καλό γιατί προφανώς δεν υπάρχει ιδιαίτερος θόρυβος (N).

Αναλύοντας εκτενέστερα την πειραματική μέτρηση της 6<sup>ης</sup> Στήλης (Bridge-ECR), κατασκευάστηκε διάγραμμα με το σύνολο των τιμών RSSI (dBm) και SNR (db) συναρτήσει του χρόνου (s) (Διάγραμμα 9), αφού στη μέτρηση αυτή (και μόνο) γινόταν καταγραφή των μεταδιδόμενων πακέτων σε πραγματικό χρόνο (real time packet delivery). Ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκε για τη μετάδοση των πακέτων ήταν **155 δευτερόλεπτα (s)**.



*Διάγραμμα 9: Το σύνολο των τιμών RSSI (dBm) και SNR (db) συναρτήσει του χρόνου (s) για τη μέτρηση μεταξύ Bridge-ECR*

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρείται ότι το RSSI παραμένει σχετικά σταθερό ως προς το χρόνο, με τιμές που αποκλίνουν ελάχιστα από τα -126 dBm ενώ το SNR εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις με minimum τιμή 33 db και maximum τιμή 82 db. Επίσης, φαίνεται χαρακτηριστικά στο γράφημα του SNR συναρτήσει του χρόνου (πορτοκαλί γραμμή) ότι η καταγραφή του SNR διακόπηκε σε αρκετές χρονικές στιγμές και αυτό οφείλεται στο ότι αρκετά από τα πακέτα που εστάλησαν δεν παραδόθηκαν (dropped packets). Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η μετάδοση των πακέτων σε αυτή την πειραματική μέτρηση ολοκληρώθηκε σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από ό,τι σε όλες τις υπόλοιπες μετρήσεις και αυτό είναι λογικό καθώς το σήμα έπρεπε να διαπεράσει 9 επίπεδα του πλοίου (45 m).

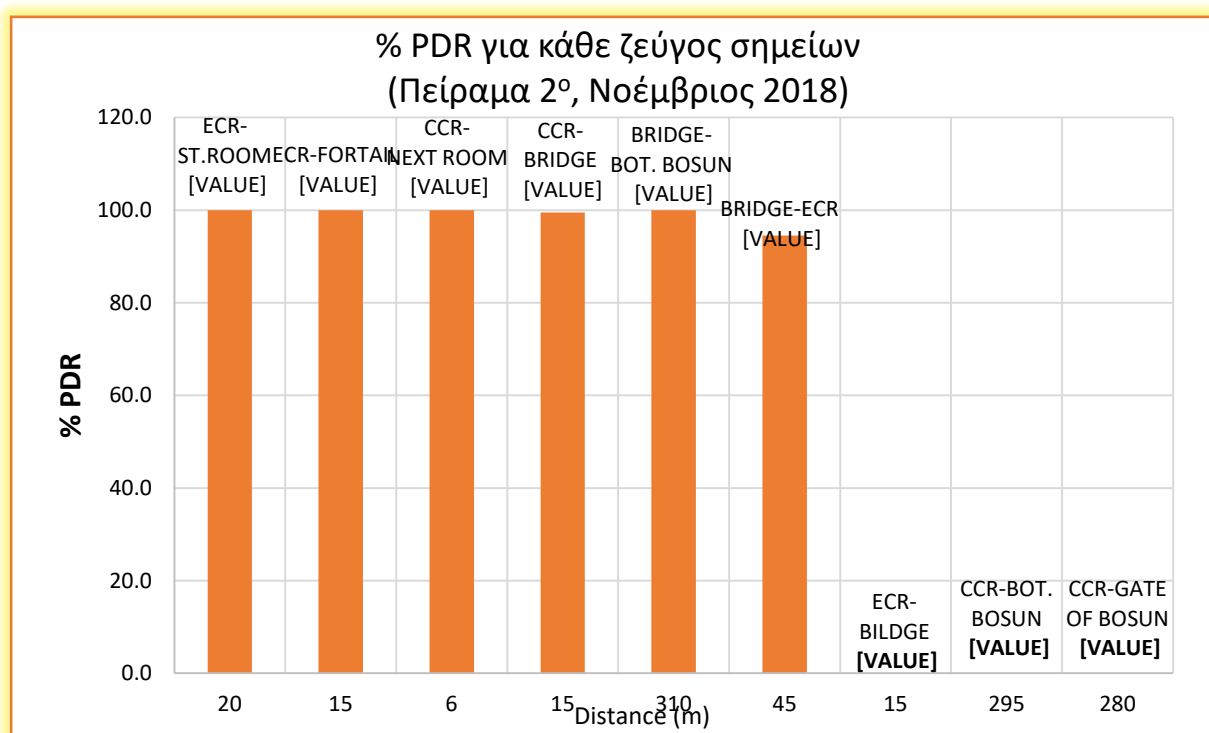
Με βάση τη σχέση (3) της παρούσας εργασίας υπολογίστηκε το % PDR για όλες τις μετρήσεις που έλαβαν χώρα στο Πείραμα 2 και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.



Πίνακας 5: Το ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) για κάθε ζεύγος σημείων για το Πείραμα 2

ΖΕΥΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ	Μέση τιμή RSSI (dBm)	Μέση τιμή SNR (db)	Απόσταση (m)	Packets Lost	%PDR
ECR-STEERING ROOM	-93,75	25,34	20	0	100
ECR-FORTAIL SHAFT	-88,39	23,71	15	0	100
CCR-NEXT ROOM	-56,37	28,75	6	0	100
CCR-BRIDGE	-105,55	16,12	15	1	99,5
BRIDGE-BOTTOM OF BOSUN	-33,86	24,43	310	0	100
BRIDGE-ECR	-126,09	53,60	45	11	94,5
ECR-BILDGE	-	-	15	200	0
CCR-BOTTOM OF BOSUN	-	-	295	200	0
CCR-GATE OF BOSUN	-	-	280	200	0

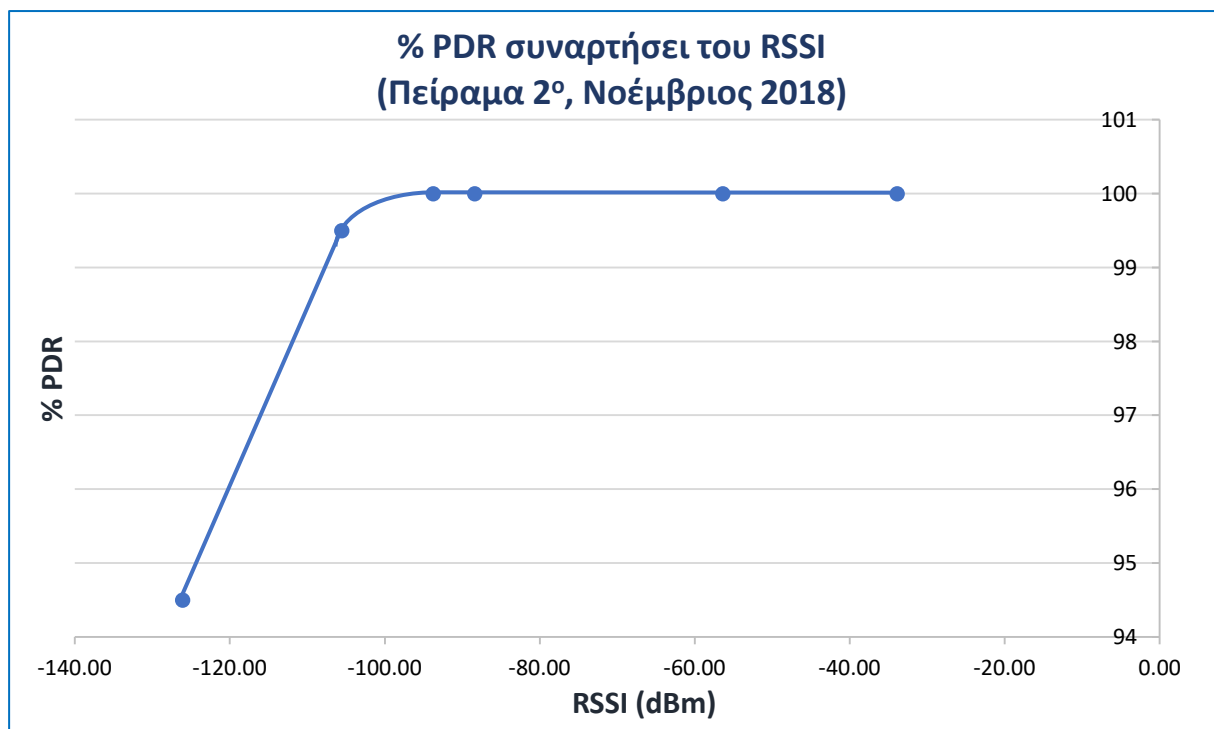
Με βάση τις τιμές της 4ης και 6ης Στήλης του παραπάνω πίνακα, κατασκευάστηκε το ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 10: Οι τιμές του ποσοστού των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) για κάθε ζεύγος σημείων

Όσον αφορά στις στήλες 1, 2, 3, 5 το PDR τους είναι 100%, δηλαδή ελήφθησαν και τα 200 πακέτα. Στη μέτρηση της 4<sup>ης</sup> Στήλης έχει χαθεί μόνο ένα πακέτο, κάτι που δεν επηρεάζει την επικοινωνία ιδιαίτερα, αφού τα υπόλοιπα 199 πακέτα έφτασαν στο δέκτη. Δεν μπορεί να ειπωθεί το ίδιο για την μέτρηση της 6<sup>ης</sup> Στήλης, διότι τα dropped packets ήταν 11 στο σύνολο. Αυτό σε συνδυασμό με την ακραία χαμηλή τιμή του RSSI (Διάγραμμα 8) υποδηλώνει ότι η επικοινωνία δεν ήταν ικανοποιητική παρόλο που το SNR ήταν εξαιρετικό. Οι υπόλοιπες τιμές του παραπάνω διαγράμματος αφορούν στις μετρήσεις όπου δεν επετεύχθη η επικοινωνία. Για τη μέτρηση του ECR-Bildge ισχύει ότι αναφέρθηκε στο Πείραμα 1 για το ίδιο δύσκολο «harsh» σημείο. Όπως στο Πείραμα 1, στη μέτρηση CCR-Bottom of Bosun Room δεν επετεύχθη επικοινωνία, έτσι και στο Πείραμα 2 στο ίδιο σημείο, αλλά και στο CCR-Gate of Bosun Room η επικοινωνία ήταν μηδενική για τους ίδιους λόγους.

Από τις τιμές RSSI και τις τιμές του % PDR του Πίνακα 5, δημιουργήθηκε το Διάγραμμα 11:

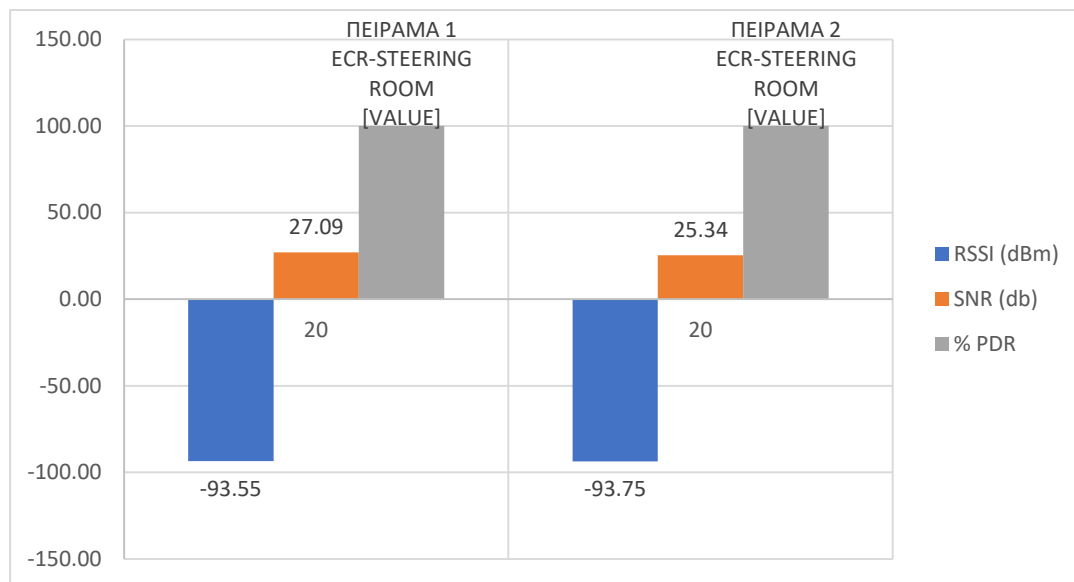


Διάγραμμα 11: Το ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν (% PDR) συναρτήσεως του RSSI (dBm)

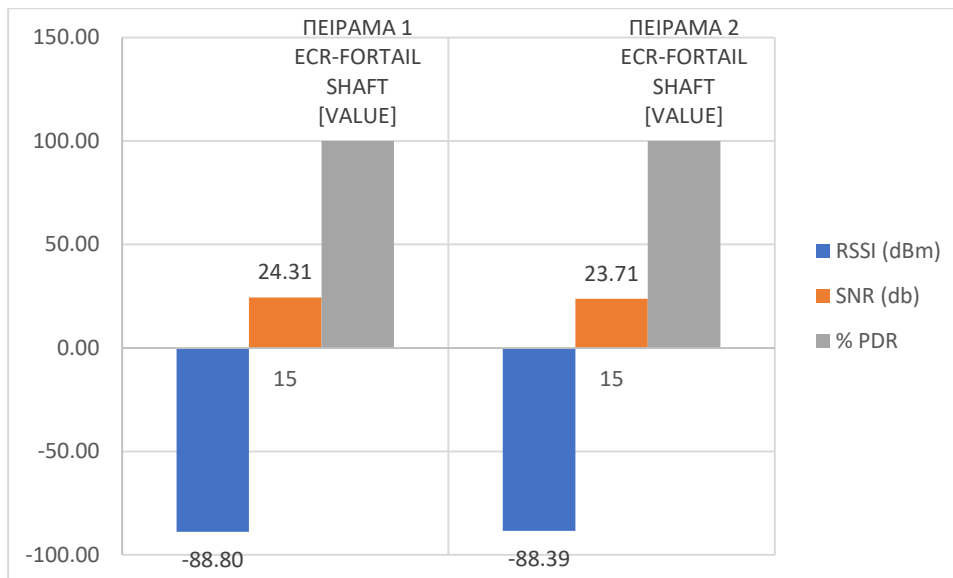
Όπως και στο Διάγραμμα 5, έτσι και σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται το χαρακτηριστικό γράμμα «L» που συμφωνεί με τη βιβλιογραφία [65, 63]. Το «knee leveling» στην περίπτωση αυτή παρατηρείται περίπου στα -93 dBm. Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, λοιπόν, εξάγεται το συμπέρασμα ότι όταν το RSSI λαμβάνει τιμές πάνω από το «knee leveling», το οποίο αντιστοιχεί στον ουδό ευαισθησίας του chip 1272 (chip's sensitivity threshold), οι συνδέσεις (links) εμφανίζουν τις ίδιες (πολύ καλές) αποδόσεις παράδοσης πακέτων (packet delivery performances).

#### 4.5.3 Σύγκριση κοινών ζευγών σημείων μεταξύ Πειράματος 1 και Πειράματος 2

Για τη σύγκριση των μετρήσεων που ήταν κοινές στα πειράματα 1 και 2 κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα.

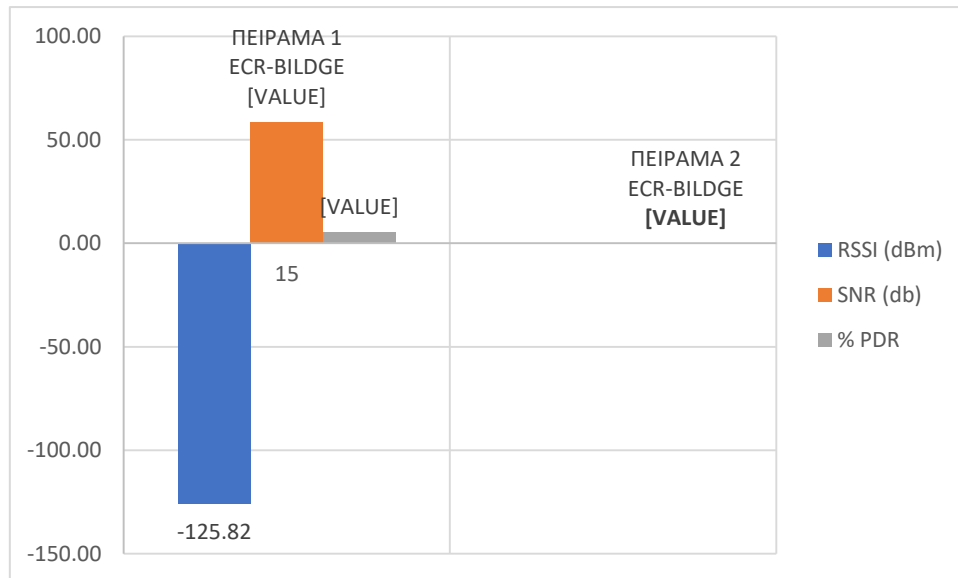


Διάγραμμα 12: Συνδυαστικό διάγραμμα των RSSI (dBm), SNR (db), %PDR στα σημεία ECR-Steering Room στα Πειράματα 1 και 2



Διάγραμμα 13: : Συνδυαστικό διάγραμμα των RSSI (dBm), SNR (db), %PDR στα σημεία ECR-Fortail Shaft στα Πειράματα 1 και 2

Παρατηρώντας τα Διαγράμματα 12 και 13, φαίνεται ότι τόσο στη μέτρηση μεταξύ ECR-Steering Room (Διάγραμμα 12) όσο και στη μέτρηση μεταξύ ECR-Fortail Shaft (Διάγραμμα 13), οι τιμές **RSSI** μεταξύ των Πειραμάτων 1 (Φεβρουάριος 2018) και 2 (Νοέμβριος 2018) είναι *σχεδόν ίδιες*. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, γιατί δεν άλλαξε κάτι σε σχέση με τα σημεία και την απόσταση (m) ή τη δομή του πλοίου. Όσον αφορά στο **SNR**, παρατηρείται μια μικρή αλλαγή από το Πείραμα 1 στο Πείραμα 2 και πιο συγκεκριμένα, οι τιμές του είναι *μικρότερες στο Πείραμα 2*. Το γεγονός ότι το SNR προέκυψε μικρότερο στο Πείραμα 2 και στα δυο ζεύγη σημείων (ECR-Steering Room, ECR-Fortail Shaft) και μάλιστα, η διαφορά είναι σχεδόν ίδια (κατά 1,75 db μικρότερη στο ECR-Steering Room και κατά 0,60 db στο ECR-Fortail Shaft), αποδεικνύει την **επαναληψιμότητα** των πειραματικών μετρήσεων και έτσι διασφαλίζεται η **πιστότητα** των πειραμάτων. Η μείωση του SNR οφείλεται στη διαφορά στο θόρυβο μέσα στο χώρο του μηχανοστασίου κατά τη διάρκεια του Πειράματος 2, διότι το πλοίο στο πείραμα αυτό βρισκόταν σε sea trial και κατά τη διαδικασία αυτή, η κύρια μηχανή του πλοίου και τουλάχιστον μια ηλεκτρομηχανή βρίσκονται πάντα σε λειτουργία, ενώ στο Πείραμα 1 ήταν εκτός λειτουργίας, αφού αμφότερες επισκευάζονταν. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας αύξησης του θορύβου στο μηχανοστάσιο στο Πείραμα 2 είναι η *δόνηση* που προκαλείται από τη λειτουργία των μηχανών και από την κίνηση του πλοίου στη θάλασσα.



*Διάγραμμα 14: : Συνδυαστικό διάγραμμα των RSSI (dBm), SNR (db), %PDR στα σημεία ECR-Bildge στο Πείραμα 1 και % PDR στο Πείραμα 2*

Στο Διάγραμμα 14 φαίνεται ότι η επικοινωνία μεταξύ ECR και σεντινών στο Πείραμα 1 ήταν πρακτικά ανύπαρκτη, αφού αμφότερα το RSSI και το % PDR έχουν εξαιρετικά χαμηλές τιμές και στο πείραμα που έγινε εννέα μήνες μετά, δεν επετεύχθη καν. Το κοινό αυτό αποτέλεσμα αποδεικνύει απόλυτα την **επαναληψιμότητα** των δύο σειρών πειραμάτων.

## 5. Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές

Στο πόνημα αυτό, μελετήθηκε μέσω πειραμάτων που διεξήχθησαν σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους η ασύρματη επικοινωνία στο πλοίο μεταξύ δύο κόμβων, χρησιμοποιώντας την μικρού εύρους ζώνης, μεγάλης εμβέλειας, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας τεχνολογία LoRa. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ταυτόσημα nodes της εταιρείας STmicroelectronics (P-NUCLEO-LRWAN1), τα οποία τοποθετήθηκαν σε καίρια σημεία του πλοίου που είχαν επιλεγεί και έγινε καταγραφή της ισχύος του ληφθέντος σήματος (RSSI), του λόγου της ισχύος σήματος προς το θόρυβο (SNR) και του ποσοστού των ληφθέντων πακέτων (% PDR). Τα αποτελέσματα αυτά των μετρήσεων επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν με διαγραμματικές απεικονίσεις.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έδειξε ότι μεταξύ των περισσότερων σημείων του πλοίου η επικοινωνία ήταν επιτυχής, παρά τη μεταλλική κατασκευή του, τόσο στο πρώτο πείραμα κατά τη διάρκεια της επισκευής του πλοίου στο ναυπηγείο με κλειστές τις μηχανές όσο και στο δεύτερο πείραμα κατά τη διαδικασία του sea trial με τις κύριες μηχανές και πλήθος άλλων συστημάτων σε λειτουργία, που συντελούσαν σε ενίσχυση του θορύβου (N). Αυτό συνεπάγεται ότι *η λειτουργία ενός δικτύου ασύρματης επικοινωνίας βασιζόμενο στην τεχνολογία LoRa στο πλοίο είναι εφικτή*. Υπήρχαν, όμως, και σημεία στα οποία η επικοινωνία έλαβε μεν χώρα, αλλά είτε η ισχύς του ληφθέντος σήματος δεν ήταν ικανοποιητική είτε δεν παραδόθηκε το σύνολο των πακέτων που απεστάλη, όπως και κάποια άλλα σημεία στα οποία η επικοινωνία ήταν ανύπαρκτη.

Ως λύση για βελτίωση της επικοινωνίας στα σημεία όπου είναι απαραίτητο προτείνεται η προσθήκη ενός ακόμη κόμβου (End Node), που να λειτουργεί ως αναμεταδότης. Στα σημεία που η απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων είναι μεγάλη, ο αναμεταδότης θα «μοιράζει» την εν λόγω απόσταση μετάδοσης του σήματος και παράλληλα θα ενισχύει το σήμα και στα σημεία που το σήμα αδυνατεί να διαπεράσει την ατσάλινη δομή του πλοίου θα το βοηθά να φτάνει στον προορισμό του και με ικανοποιητική, μάλιστα, ισχύ. Άλλη μια προτεινόμενη λύση είναι η αντικατάσταση των modules που χρησιμοποιήθηκαν με κάποιο νεότερο μοντέλο τεχνολογίας LoRa με βελτιωμένα χαρακτηριστικά, όπως μειωμένο κατώφλι ανίχνευσης σήματος (αυξημένη ευαισθησία). Αυτό το νεότερο μοντέλο θα μπορούσε να είναι βασισμένο σε κάποιο από τους SX1276/77/78/79 (Εικόνα 37) πομποδέκτες της εταιρείας Semtech, οι οποίοι δεν παρέχουν επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας (long range communication) όπως ο SX1272 που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν πείραμα, αλλά πολύ μεγάλης εμβέλειας (ultra-long



range communication), με υψηλό δείκτη ανθεκτικότητας σε παρεμβολές, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας.



*Εικόνα 37: Το module SX1276 τεχνολογίας LoRa της εταιρείας Semtech [44]*

Για τη μελλοντική λειτουργία ασύρματου δικτύου επικοινωνίας τεχνολογίας LoRa στο πλοίο, κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή εκτενέστερης πειραματικής έρευνας. Προτείνεται επανάληψη των πειραμάτων στα ίδια σημεία αλλά και σε επιπρόσθετα σημεία, προκειμένου να μελετηθεί η επικοινωνία στο σύνολο της έκτασης του πλοίου. Στο πείραμα που διεξήχθη ελέγχθηκε η μετάδοση δεδομένων προς τη μια μόνο κατεύθυνση (μονόδρομη επικοινωνία), δηλαδή από τον πομπό (node 1) προς τον δέκτη (node 2). Η άλλη περίπτωση θα ήταν να υπάρχει αμφίδρομη επικοινωνία πομπού και δέκτη (bidirectional communication), στην οποία τόσο ο δέκτης όσο και ο πομπός να μπορούν να στέλνουν δεδομένα. Η μονόδρομη επικοινωνία είναι ικανή να καλύψει ασύρματα δίκτυα που περιλαμβάνουν μόνο αισθητήρες, καθώς ο αισθητήρας απλώς αποστέλλει στον πομπό την μέτρηση που «διαβάζει», ενώ στην αμφίδρομη είναι δυνατό να προστεθούν στο σύστημα και ενεργοποιητές (actuators), κάτι πολύ σύνηθες και αναγκαίο σχεδόν σε όλα τα αυτοματοποιημένα συστήματα. Στην περίπτωση, λοιπόν, που είναι επιθυμητό να προστεθούν ενεργοποιητές σε ένα ασύρματο δίκτυο *LoRa*, θεωρείται αναγκαία η επανάληψη της πειραματικής έρευνας, με ουσιαστική διαφορά ότι τα δεδομένα θα πρέπει να μεταδίδονται αμφίδρομα. Προτείνεται, επίσης, επέκταση των πειραμάτων και σε άλλους τύπους πλοίων, καθώς ο κάθε τύπος έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες, άρα και διαφορετικές ανάγκες και απαιτήσεις. Επιπλέον, μια

διεξοδικότερη πειραματική μελέτη χρήζει μετάδοσης μεγαλύτερου πλήθους πακέτων από τα 200 που αποστέλλονταν στο πείραμα της παρούσας εργασίας.

Η LoRa μπορεί, λοιπόν, να βρει εφαρμογή στους αυτοματισμούς του πλοίου και πιο συγκεκριμένα σε οποιοδήποτε σύστημα που χρησιμοποιεί αισθητήρες, δημιουργώντας έτσι ένα χαμηλής ισχύος, μεγάλης εμβέλειας ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Μια από τις χρήσιμες εφαρμογές που μπορεί να έχει είναι η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο (real time monitoring) της θερμοκρασίας των καυσαερίων της μηχανής. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας των καυσαερίων είναι μείζονος σημασίας, διότι η απόκλιση (προς μεγαλύτερες τιμές) από το φυσιολογικό εύρος τιμών της, που είναι 400-600 °C, αποτελεί ένδειξη μη ορθής λειτουργίας της κύριας μηχανής, που μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε ξαφνικό «shut down» της μηχανής, κάτι εξαιρετικά επικίνδυνο.

Συμπερασματικά, η υιοθέτηση της τεχνολογίας LoRa στα πλοία, θα συντελέσει στην ελαχιστοποίηση της πολυπλοκότητας που δημιουργείται από τη χρήση καλωδίων ή οπτικών ινών και στη μείωση αχρείαστων παροχικών καλωδίων, καθώς ολόκληρο το σύστημα της καινοτόμου αυτής τεχνολογίας λειτουργεί με μπαταρία. Έτσι, ακόμη και σε περίπτωση καταστροφικής βλάβης σε οποιοδήποτε διαμέρισμα του πλοίου, που θα μπορούσε να προκαλέσει ακόμη και διακοπή λειτουργίας των ηλεκτρομηχανών, άρα διακοπή ρεύματος στο πλοίο (black out), οι πληροφορίες θα είναι δυνατόν να μεταδίδονται κανονικά και απρόσκοπτα. Ένα ακόμη προτέρημα της LoRa είναι η εύκολη προσαρμογή της σε οποιοδήποτε υπάρχον αυτοματοποιημένο σύστημα αισθητήρων του πλοίου, καθιστώντας το αυτόματα ασύρματο. Το γεγονός αυτό θα διευκολύνει κατά πολύ τη μελλοντική συντήρηση ή επισκευή του συστήματος, καθώς η αντικατάσταση των αισθητήρων θα γίνεται σε ελάχιστο χρόνο, χωρίς δυσκολίες και μελέτη για το «πού» και «πώς» θα περαστούν τα καλώδια από την πηγή του συστήματος έως το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα. Επιπροσθέτως, με τη χρήση ασύρματων αισθητήρων θα είναι δυνατή η λήψη πληροφοριών από σημεία που τα καλώδια δεν είναι οικονομικά συμφέρον να προσεγγίσουν. Κάτι εξίσου μείζονος σημασίας είναι ότι κατά την επισκευή ενός συστήματος ή την εγκατάσταση νέου, η ύπαρξη ασύρματου δικτύου θα συνεπάγεται σημαντική μείωση ενδεχόμενων μηχανικών βλαβών, διότι δεν είναι διόλου σπάνιο φαινόμενο σε παλαιότερα κυρίως πλοία, να μην υπάρχουν διαθέσιμα τα ηλεκτρολογικά σχέδια, με αποτέλεσμα να καταστρέφονται ή να κόβονται γραμμές άλλων συστημάτων, αφού κανείς δε γνωρίζει ότι διατρέχουν τα σημεία όπου γίνεται η επισκευή ή η εγκατάσταση. Για τους παραπάνω και πολλούς ακόμη λόγους το Internet

of Marine Things μέσω της LoRa είναι σημαντικό να υπάρχει στη ναυτιλία. Καιρός, λοιπόν, να καλωσορίσουμε την LoRa στα πλοία μας.

## Βιβλιογραφία

- [1] J. Kim, «Technology Trend and Research Strategies of IT based Ship-building Total Solutions,» *IT SoC Magazine: Industry Trend*, pp. 40-47, 2008.
- [2] S. Krile, D. Kezi και F. Dimc, «NMEA Communication Standard for Shipboard Data Architechture,» *International Journal of Maritime Science & Technology*, τόμ. 60, pp. 68-81, 2013.
- [3] H. Kdouh, G. Zaharia, C. Brousseau, H. Farhat, G. Grunfelder και G. El Zein, «Application of Wireless Sensor Network for the Monitoring Systems of Vessels,» σε *InTech. Wireless Sensor Networks*, Renne, France, 2012, pp. 285-308.
- [4] A. R. Swartz, A. T. Zimmerman , J. P. Lynch, J. Rosario, T. Brady, L. Salvino και K. H. Law, «Hybrid Wireless Hull Monitoring System for Naval Combat Vessels,» 2010.
- [5] J. P. Lynch και K. J. Loh, «A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring,» *The Shock and Vibration Digest*, pp. 92-126, 2006.
- [6] H. Kdouh, G. Zaharia, C. Brousseau, G. Grunfelder, H. Farhat και G. ElZein, «Wireless Sensor Network on Board Vessels,» Rennes, France, 2012.
- [7] D. R. Estes, T. Welch, A. Sarkady και A. H. Withesel, «Application of Wireless Sensor Network for the Monitoring Systems of Vessels,» σε *Proceedings of the IEEE Military Communications Conference* , Virginia, USA, 2001.
- [8] G. Schwartz, «Reliability and Survivability in the Reduced Ship's Crew by Virtual Presence System,» σε *Proceedings of the IEEE International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN'02)*, Bethesda, Maryland, USA, 2002.
- [9] R. Ploeger, W. Newton, A. Rabiner και R. Lally, «Wireless e-diagnostics reduces workload and improves shipboard quality of life,» Oceana Sensor Technologies, 2003.
- [10] S. Liu, B. Xing, B. Li και M. Gu, «Ship information system: overview and research trends,» 2014.
- [11] B.-G. Paik, S.-R. Cho, B.-J. Park, D. Lee, J.-H. Yun και B.-D. Bae, «Employment of Wireless Sensor Networks for Full-Scale Ship Application,» σε *International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing*, Taipei, Taiwan, 2007.
- [12] T. Pilsak, T. Schröder, J. Eichmann και T. Haseborg, «Field Test of a Wireless Sensor Network Inside the Engine Room of a Vessel,» *Proceedings of the Workshop on Self-Organizing Wireless Sensors and Communication Networks*, 29 October 2009.
- [13] H. Kdouh, G. Zaharia, C. Brousseau, E. Z. G. και G. Grunfelder, «ZigBee-Based Sensor Network for Shipboard Environments,» σε *ISSCS 2011 - International Symposium on Signals, Circuits and Systems*, Iasi, Romania, 2011.
- [14] C. Perez-Garrido, F. J. González-Castaño, D. Chaves-Diéguez και P. S. Rodríguez-Hernández, «Wireless Remote Monitoring of Toxic Gases in Shipbuilding,» *Online Sensor*, Basel, 2014.
- [15] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel και F. Meyer, «A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT,» ScienceDirect, Vandoeuvre, 54506, France, 2017.
- [16] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, M. Pettissalo, J. Janhunen και J. Iinatti, «Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage,» *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2017.

- [17] F. Gui, Y. Yin και A. Lu, «Research on Ship Wireless Communication,» σε *IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC 2018)*, China, 2018.
- [18] S. Yao, Y. Zhao, A. Zhang, S. Hu, C. Zhang, H. Shao, L. Su και T. Abdelzaher, «Deep Learning for the Internet of Things,» *COMPUTER PUBLISHED BY THE IEEE COMPUTER SOCIETY*, pp. 34-41, 2018.
- [19] «wespeakiot,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [<https://www.wespeakiot.com/meet-the-men-who-invented-iot/>].
- [20] «dcdither.wordpress,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [<https://dcdither.wordpress.com/2016/08/04/first-blog-post/>].
- [21] M. Weiser, «The Computer for the 21st Century,» *Scientific American Ubicomp*, 1991.
- [22] K. Ashton, «The "Internet of Things" thing: in the real world, things matter more than ideas,» *RFID Journal*, 2009.
- [23] Gershenfeld και A. Neli, *When things start to think*, New York: New York : Henry Holt, 1999.
- [24] M. Kontraros, «Smart Lighting with enhanced services, applications with Intelligent and weather adaptive lighting in street light, based on local Wireless Sensor Networking technology and narrow bandwidth – long range networks for remote control,» Athens, Greece, 2017.
- [25] «ITPRO,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [<https://www.itpro.co.uk/cloud-computing/28037/what-is-iot>].
- [26] A. Sangiovanni-Vincitelli, A. Zeng, H. Di-Natale και M. Marwedel, *Embedded Systems Development*, New York: Springer Science+Business Media , 2014.
- [27] O. Vermesan και P. Friess, *Internet of Things Applications - From Research and Innovation to Market Deployment*, River Publishers, 2014.
- [28] D. Schoder, «Introduction to the Internet of Things».
- [29] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen και W. M. Townsley, «A Study of LoRa: Long Range & Low Power,» *Sensors*, 2016.
- [30] Q. F. Hassan, *Internet of Things A to Z*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons , 2018.
- [31] R. S. Sinha, Y. Wei και S.-H. Hwang, «A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT,» ScienceDirect, Republic of Korea, 2017.
- [32] . A. Μούρτου και A. Κυράνας, «Internet of Things,» Athens, Greece, 2016.
- [33] D. Piromalis, K. Arvanitis, S. Mitilneos και P. Papageorgas, «Low-Power Narrow-Band Communication Technologies for Long-Range Precision Agriculture applications at Regional Level,» *Sustainability*, 2017.
- [34] «xtendiot,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [<https://www.xtendiot.com/>].
- [35] I. ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ, «ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΩΣΗ ΕΝΟΣ ΠΛΟΙΟΥ,» Athens, Greece, 2013.
- [36] «ships.fish.hokudai,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [[http://ships.fish.hokudai.ac.jp/en/?page\\_id=85](http://ships.fish.hokudai.ac.jp/en/?page_id=85)].
- [37] «Revolvy,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [<https://www.revolvy.com/page/Cargo-control-room>].
- [38] «IMO,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [[http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx)].
- [39] «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΓΕΝΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ CONTROL

- ROOM ΣΕ ΕΝΑ ΠΛΟΙΟ,» XANIA, 2017.
- [40] «alp.lib,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://alp.lib.sun.ac.za/handle/123456789/2052>.
- [41] «SeaNews,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://seanews.co.uk/features/internet-of-things-iot-in-the-shipping-industry/>.
- [42] «Ship-seller,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ship-seller.com/>.
- [43] LoRa® Alliance Technical Marketing Workgroup, «A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™,» LoRa® Alliance, San Ramon, CA, 2015.
- [44] «Semtech,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.semtech.com/lora/why-lora>.
- [45] LoRaAlliance, «<https://lora-alliance.org/lorawan-for-developers>,» LoRaWAN Specification,, 2016. [Ηλεκτρονικό].
- [46] M. Aernouts, R. Berkvens , K. V. Vlaenderen και M. Weyn, «Sigfox and LoRaWAN Datasets for Fingerprint Localization in Large Urban and Rural Areas,» *Data Descriptor*, 2018.
- [47] Ν. Παπαδημητρίου και Α. Σταρίδης, «Ανάπτυξη δικτύου χαμηλής ισχύος και ευρείας περιοχής κάλυψης LoRa για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς,» Thessaloniki, Greece, 2018.
- [48] I. Dogas, «Development of a long range - narrow band wireless sensor node for precision applications in Agriculture,» Athens, Greece, 2017.
- [49] «medium,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://medium.com>.
- [50] «Pliroforiki-edu,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pliroforiki-edu.gr/unit/ch020201-montelo-diasindesis-anoikton-systimaton-osi/>.
- [51] Κ. Κ. Τζωρτζάκης, «Σχεδίαση και υλοποίηση ασύρματου συστήματος μετάδοσης δεδομένων βασισμένο στο πρωτόκολλο LoRa,» Athens, Greece, 2017.
- [52] Aras, Emeckcan, G. S. Ramachandran, P. Lawrence και D. Hughes, «Exploring The Security Vulnerabilities of LoRa,» σε *2017 3rd IEEE International Conference on Cybernetics (CYBCONF)*, Exeter, UK, 2017.
- [53] H. Mroue, A. Nasser, B. Parrein, S. Hamrioui, E. Motta-Cruz και G. Rouyer, «Analytical and Simulation study for LoRa Modulation,» 2018.
- [54] N. Abramson, «The Aloha System: Final Technical Repor,» Honolulu, HI, USA, 1974.
- [55] W. Ayoub, A. E. Samhat, F. Nouvel, M. Mroue και J.-C. Prevoet, «Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and Supported Mobility,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, pp. 1-21, 23 October 2018.
- [56] «RF Wireless World,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/LoRa-vs-Zigbee.html>.
- [57] S. Lagouvardou, «Maritime Cyber Security: concepts, problems and models,» Department of Management Engineering, Technical University of Denmark, 2018.
- [58] «[www.pcsteps.gr/](http://www.pcsteps.gr/),» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pcsteps.gr/16634>.
- [59] STM Electronics, «STM32 Nucleo pack for LoRa® technology and high-performance FSK/OOK RF transceiver modem,» 2016.
- [60] Semtech Corporation, «WIRELESS & SENSING PRODUCTS, DATASHEET: SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver,» Semtech, 2017.
- [61] «wireless-nets,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.wireless-nets.com/resources/tutorials/define\\_SNR\\_values.html](http://www.wireless-nets.com/resources/tutorials/define_SNR_values.html).
- [62] Z. Zamalloa και Β. KRISHNAMACHARI, «An Analysis of Unreliability and Asymmetry in



Low-Power Wireless Links,» p. 34, June 2007.

- [63] M. Rondinone, J. Ansari, J. Riihijarvi και P. Mahonen, «Designing a reliable and stable link quality metric for wireless sensor networks,» *Proceedings of the workshop on Real-world wireless sensor networks*, pp. 6-10, 2008.
- [64] D. Rojas και J. Barrett, «Experimental Analysis of a Wireless Sensor Network in a Multi-Chamber Metal Environment,» Nimbus Centre, 2016.
- [65] K. Srinivasan, P. Dutta, A. Tavakoli και P. Levis, «An empirical study of low-power wireless,» *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, τόμ. 6, p. 16, 2010.
- [66] J. Eriksson και J. S. Andersen, «Investigating the practical performance of the LoRaWAN technology,» 30 ECTS | Computer Technology, 2017.
- [67] J. Kurose και K. Ross, *Computer networking : a top-down approach*, 5th επιμ., Pearson Education, 2013.

## Παράρτημα Α

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι ο παρακάτω:

### Network Settings

```
#####  
#####  
  
#ifndef __SX1272_CONF_H__  
#define __SX1272_CONF_H__  
  
#define RF_FREQUENCY  
868100000 // Hz  
#define TX_OUTPUT_POWER 20  
// 14 dBm  
#define LORA_BANDWIDTH 0  
// [0: 125 kHz,1: 250 kHz,2: 500 kHz,3: Reserved]  
#define LORA_SPREADING_FACTOR 12 //  
[SF7..SF12]  
#define LORA_CODINGRATE 1  
// [1: 4/5,2: 4/6,3: 4/7,4: 4/8]  
#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8 //  
Same for Tx and Rx  
#define LORA_SYMBOL_TIMEOUT 5 //  
Symbols  
#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false  
#define LORA_FHSS_ENABLED false  
#define LORA_NB_SYMB_HOP 4  
#define LORA_IQ_INVERSION_ON false  
#define LORA_CRC_ENABLED true  
#define RX_TIMEOUT_VALUE 3500  
// in ms  
#define BUFFER_SIZE  
1 // Define the payload size here  
  
#endif //__SX1272_CONF_H__
```

### Master Initialization

```
#####  
#####  
  
    RadioEvents.TxDone = OnTxDone;  
    RadioEvents.RxDone = OnRxDone;  
    RadioEvents.RxError = OnRxError;  
    RadioEvents.TxTimeout = OnTxTimeout;  
    RadioEvents.RxTimeout = OnRxTimeout;
```

```

    Radio.Init(&RadioEvents);
    Radio.SetChannel(RF_FREQUENCY);
    Radio.SetTxConfig(MODEM_LORA, TX_OUTPUT_POWER, 0,
LORA_BANDWIDTH,
                                LORA_SPREADING_FACTOR,
LORA_CODINGRATE,
                                LORA_PREAMBLE_LENGTH,
LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,
                                LORA_CRC_ENABLED, LORA_FHSS_ENABLED,
LORA_NB_SYMB_HOP,
                                LORA_IQ_INVERSION_ON, 2000);
    Radio.SetRxConfig(MODEM_LORA, LORA_BANDWIDTH,
LORA_SPREADING_FACTOR,
                                LORA_CODINGRATE, 0,
LORA_PREAMBLE_LENGTH,
                                LORA_SYMBOL_TIMEOUT,
LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON, 0,
                                LORA_CRC_ENABLED, LORA_FHSS_ENABLED,
LORA_NB_SYMB_HOP,
                                LORA_IQ_INVERSION_ON, true);

```

Slave Initialization

```

#####
#####

```

```

    RadioEvents.TxDone = OnTxDone;
    RadioEvents.RxDone = OnRxDone;
    RadioEvents.RxError = OnRxError;
    RadioEvents.TxTimeout = OnTxTimeout;
    RadioEvents.RxTimeout = OnRxTimeout;
    Radio.Init(&RadioEvents);
    Radio.SetChannel(RF_FREQUENCY);
    Radio.SetTxConfig(MODEM_LORA, TX_OUTPUT_POWER, 0,
LORA_BANDWIDTH,
                                LORA_SPREADING_FACTOR,
LORA_CODINGRATE,
                                LORA_PREAMBLE_LENGTH,
LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,
                                LORA_CRC_ENABLED, LORA_FHSS_ENABLED,
LORA_NB_SYMB_HOP,
                                LORA_IQ_INVERSION_ON, 2000);
    Radio.SetRxConfig(MODEM_LORA, LORA_BANDWIDTH,
LORA_SPREADING_FACTOR,
                                LORA_CODINGRATE, 0,
LORA_PREAMBLE_LENGTH,
                                LORA_SYMBOL_TIMEOUT,
LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON, 0,
                                LORA_CRC_ENABLED, LORA_FHSS_ENABLED,
LORA_NB_SYMB_HOP,

```

```

                                LORA_IQ_INVERSION_ON, true);
Radio.Rx(RX_TIMEOUT_VALUE);

```

Loop

```

#####
#####

```

```

while(1){
    switch(State){
        case RX:
            if((Buffer[0] == 0xF0) && !test_flag){
                test_flag = 1;
                Buffer[0] = 0xFF;
                counter = 200 + 1;
                Radio.Send(Buffer, 1);
            }
            State = LOWPOWER;
            break;
        case TX:
            if((counter > 0)){
                Buffer[0] = counter;
                printf("Sending data %i\n", counter);
                Radio.Send(Buffer, 1);
            }
            else{
                test_flag = 0;
                Radio.Rx(RX_TIMEOUT_VALUE);
            }
            State = LOWPOWER;
            break;
        case RX_TIMEOUT:
        case RX_ERROR:
            if(!test_flag && (counter == 0)){
                Radio.Rx(RX_TIMEOUT_VALUE);
            }
            State = LOWPOWER;
            break;
        case TX_TIMEOUT:
            printf("ERROR - TX_TIMEOUT\n");
            State = LOWPOWER;
            break;
        case LOWPOWER:
            break;
    }
}

```

Event Handlers

```

#####
#####

```

```

void OnTxDone(void) {
    Radio.Sleep();
    counter--;
    State = TX;
}

void OnRxDone(uint8_t *payload, uint16_t size, int16_t rssi,
int8_t snr) {
    Radio.Sleep();
    if(size == 1) {
        memcpy(Buffer, payload, 1);
        State = RX;
    }
    else {
        State = LOWPOWER;
    }
}

void OnTxTimeout(void) {
    Radio.Sleep();
    State = TX_TIMEOUT;
}

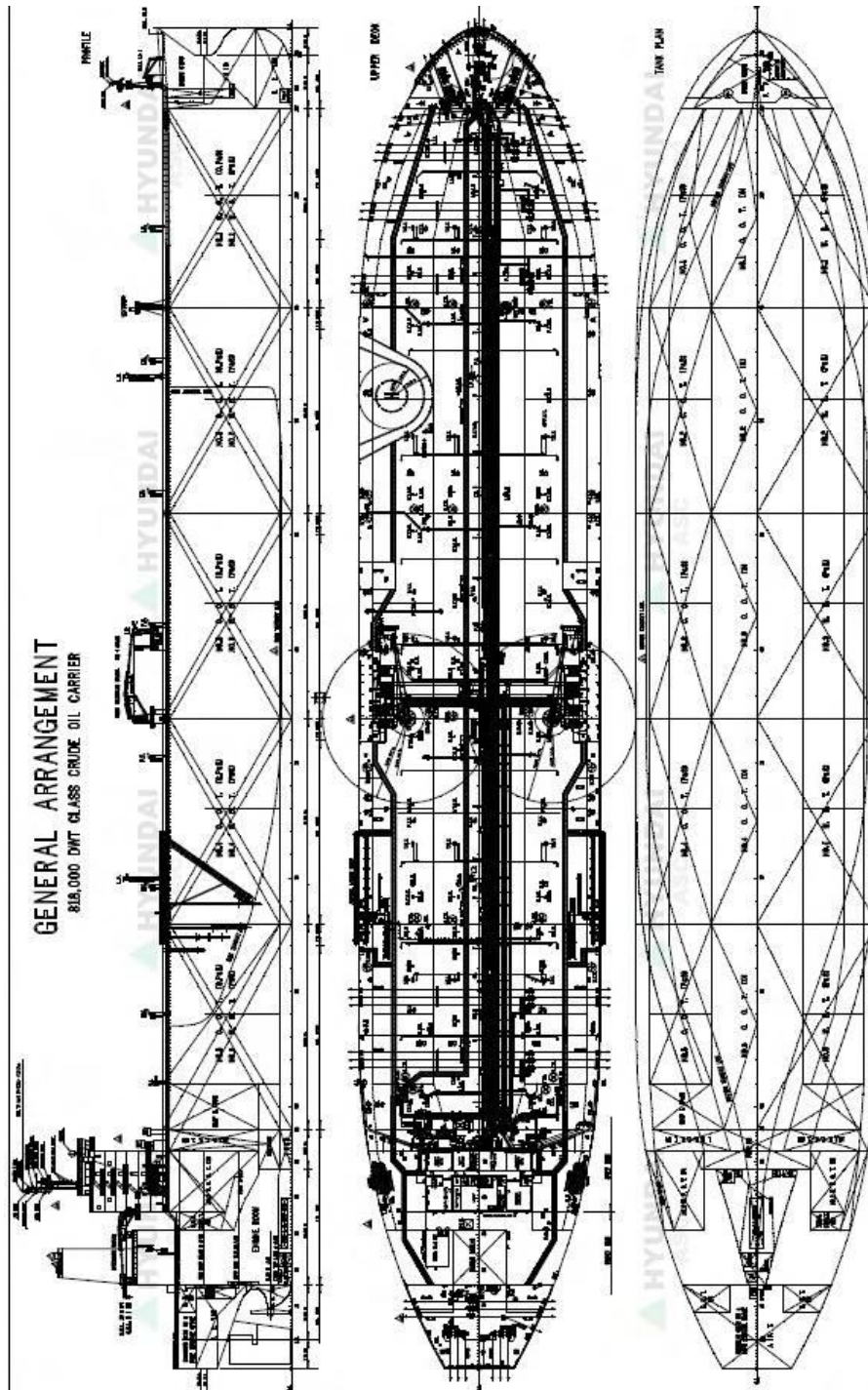
void OnRxTimeout(void) {
    Radio.Sleep();
    State = RX_TIMEOUT;
}

void OnRxError(void) {
    Radio.Sleep( );
    State = RX_ERROR;
}

```

## Παράρτημα Β

Οι κατόψεις του πλοίου Glory όπου έλαβαν χώρα τα πειράματα της παρούσας εργασίας είναι οι εξής:





## Παράρτημα Γ

Οι πειραματικές μετρήσεις των RSSI και SNR που ελήφθησαν για την προσπάθεια αποστολής των πακέτων από το module 1 στο module 2 σε κάθε ζεύγος σημείων καταγράφονται στους παρακάτω πίνακες.

### Πείραμα 1

<b>Πίνακας I: ECR-STEERING ROOM (Απόσταση 20 m)</b>		
	<b>RSSI (dBm)</b>	<b>SNR (dB)</b>
<b>1</b>	-93	31
<b>2</b>	-93	30
<b>3</b>	-93	30
<b>4</b>	-93	30
<b>5</b>	-92	30
<b>6</b>	-93	28
<b>7</b>	-93	28
<b>8</b>	-93	30
<b>9</b>	-92	31
<b>10</b>	-92	30
<b>11</b>	-93	30
<b>12</b>	-95	27
<b>13</b>	-97	28
<b>14</b>	-97	49
<b>15</b>	-97	20
<b>16</b>	-97	24
<b>17</b>	-97	23
<b>18</b>	-97	23
<b>19</b>	-97	31
<b>20</b>	-97	24
<b>21</b>	-100	24
<b>22</b>	-97	23
<b>23</b>	-98	25
<b>24</b>	-98	25
<b>25</b>	-100	25
<b>26</b>	-98	54
<b>27</b>	-98	23
<b>28</b>	-100	21
<b>29</b>	-101	21

<b>30</b>	-98	24
<b>31</b>	-99	25
<b>32</b>	-100	31
<b>33</b>	-94	28
<b>34</b>	-100	29
<b>35</b>	-94	28
<b>36</b>	-97	30
<b>37</b>	-99	23
<b>38</b>	-97	26
<b>39</b>	-93	30
<b>40</b>	-100	26
<b>41</b>	-100	28
<b>42</b>	-97	25
<b>43</b>	-99	24
<b>44</b>	-99	29
<b>45</b>	-98	25
<b>46</b>	-93	24
<b>47</b>	-94	25
<b>48</b>	-94	55
<b>49</b>	-95	24
<b>50</b>	-94	27
<b>51</b>	-100	27
<b>52</b>	-100	39
<b>53</b>	-100	22
<b>54</b>	-101	22
<b>55</b>	-102	25
<b>56</b>	-90	24
<b>57</b>	-92	25
<b>58</b>	-94	25
<b>59</b>	-94	27
<b>60</b>	-92	28
<b>61</b>	-92	27
<b>62</b>	-92	28
<b>63</b>	-92	26
<b>64</b>	-91	27
<b>65</b>	-90	27
<b>66</b>	-91	27
<b>67</b>	-92	27
<b>68</b>	-90	27
<b>69</b>	-90	26
<b>70</b>	-90	28
<b>71</b>	-91	27
<b>72</b>	-91	27

<b>73</b>	-90	25
<b>74</b>	-91	26
<b>75</b>	-91	25
<b>76</b>	-91	25
<b>77</b>	-91	25
<b>78</b>	-91	28
<b>79</b>	-92	23
<b>80</b>	-92	26
<b>81</b>	-92	26
<b>82</b>	-92	24
<b>83</b>	-92	55
<b>84</b>	-92	25
<b>85</b>	-91	24
<b>86</b>	-91	27
<b>87</b>	-91	24
<b>88</b>	-92	29
<b>89</b>	-93	55
<b>90</b>	-92	25
<b>91</b>	-92	27
<b>92</b>	-92	25
<b>93</b>	-91	25
<b>94</b>	-92	26
<b>95</b>	-91	26
<b>96</b>	-91	24
<b>97</b>	-92	26
<b>98</b>	-92	27
<b>99</b>	-91	26
<b>100</b>	-91	26
<b>101</b>	-93	28
<b>102</b>	-93	28
<b>103</b>	-92	25
<b>104</b>	-98	23
<b>105</b>	-91	24
<b>106</b>	-93	24
<b>107</b>	-88	30
<b>108</b>	-90	28
<b>109</b>	-91	25
<b>110</b>	-90	28
<b>111</b>	-88	31
<b>112</b>	-90	28
<b>113</b>	-88	31
<b>114</b>	-91	28
<b>115</b>	-88	27

<b>116</b>	-87	32
<b>117</b>	-90	28
<b>118</b>	-95	26
<b>119</b>	-92	28
<b>120</b>	-88	29
<b>121</b>	-91	26
<b>122</b>	-94	24
<b>123</b>	-93	27
<b>124</b>	-90	26
<b>125</b>	-91	25
<b>126</b>	-91	24
<b>127</b>	-91	25
<b>128</b>	-91	25
<b>129</b>	-91	25
<b>130</b>	-91	23
<b>131</b>	-92	24
<b>132</b>	-90	26
<b>133</b>	-92	21
<b>134</b>	-92	35
<b>135</b>	-88	27
<b>136</b>	-88	28
<b>137</b>	-90	27
<b>138</b>	-91	28
<b>139</b>	-90	27
<b>140</b>	-91	27
<b>141</b>	-91	25
<b>142</b>	-91	34
<b>143</b>	-92	24
<b>144</b>	-93	30
<b>145</b>	-92	24
<b>146</b>	-92	27
<b>147</b>	-93	30
<b>148</b>	-94	25
<b>149</b>	-93	28
<b>150</b>	-93	31
<b>151</b>	-94	27
<b>152</b>	-94	26
<b>153</b>	-95	26
<b>154</b>	-95	23
<b>155</b>	-95	23
<b>156</b>	-96	25
<b>157</b>	-96	24
<b>158</b>	-94	26

<b>159</b>	-95	25
<b>160</b>	-95	27
<b>161</b>	-95	26
<b>162</b>	-95	27
<b>163</b>	-95	26
<b>164</b>	-95	27
<b>165</b>	-95	26
<b>166</b>	-95	28
<b>167</b>	-93	31
<b>168</b>	-93	29
<b>169</b>	-94	30
<b>170</b>	-95	26
<b>171</b>	-95	26
<b>172</b>	-96	24
<b>173</b>	-95	26
<b>174</b>	-97	22
<b>175</b>	-95	25
<b>176</b>	-95	26
<b>177</b>	-94	27
<b>178</b>	-95	31
<b>179</b>	-94	26
<b>180</b>	-95	24
<b>181</b>	-95	26
<b>182</b>	-96	19
<b>183</b>	-95	26
<b>184</b>	-94	25
<b>185</b>	-96	22
<b>186</b>	-94	28
<b>187</b>	-94	25
<b>188</b>	-94	27
<b>189</b>	-91	23
<b>190</b>	-92	28
<b>191</b>	-94	25
<b>192</b>	-93	26
<b>193</b>	-92	26
<b>194</b>	-91	26
<b>195</b>	-92	31
<b>196</b>	-95	23
<b>197</b>	-93	28
<b>198</b>	-95	24
<b>199</b>	-93	32
<b>200</b>	-94	27

<b>Πίνακας II: ECR-FORETAIL SHAFT(Απόσταση 15 m)</b>		
	<b>RSSI (dBm)</b>	<b>SNR (dB)</b>
<b>1</b>	-86	31
<b>2</b>	-86	23
<b>3</b>	-88	26
<b>4</b>	-87	27
<b>5</b>	-86	24
<b>6</b>	-81	26
<b>7</b>	-91	25
<b>8</b>	-84	32
<b>9</b>	-85	26
<b>10</b>	-88	25
<b>11</b>	-87	26
<b>12</b>	-86	27
<b>13</b>	-85	25
<b>14</b>	-84	25
<b>15</b>	-86	26
<b>16</b>	-90	26
<b>17</b>	-86	23
<b>18</b>	-84	25
<b>19</b>	-85	25
<b>20</b>	-92	29
<b>21</b>	-94	31
<b>22</b>	-87	26
<b>23</b>	-84	29
<b>24</b>	-88	25
<b>25</b>	-84	24
<b>26</b>	-85	30
<b>27</b>	-87	24
<b>28</b>	-86	25
<b>29</b>	-83	25
<b>30</b>	-80	32
<b>31</b>	-83	29
<b>32</b>	-82	25
<b>33</b>	-93	23
<b>34</b>	-83	32
<b>35</b>	-90	25
<b>36</b>	-91	23
<b>37</b>	-95	24
<b>38</b>	-97	32
<b>39</b>	-95	31
<b>40</b>	-87	23



41	-92	27
42	-87	25
43	-87	24
44	-90	23
45	-87	25
46	-88	22
47	-86	32
48	-87	26
49	-86	23
50	-90	26
51	-90	24
52	-90	25
53	-87	26
54	-88	22
55	-88	18
56	-88	23
57	-86	24
58	-86	23
59	-88	19
60	-87	23
61	-86	24
62	-81	26
63	-91	25
64	-84	25
65	-85	22
66	-88	25
67	-87	26
68	-86	27
69	-85	25
70	-84	25
71	-86	26
72	-90	25
73	-86	23
74	-84	25
75	-85	22
76	-92	25
77	-94	24
78	-87	19
79	-84	25
80	-88	22
81	-84	24
82	-85	25
83	-87	24

<b>84</b>	-85	26
<b>85</b>	-88	23
<b>86</b>	-85	27
<b>87</b>	-84	30
<b>88</b>	-84	25
<b>89</b>	-85	27
<b>90</b>	-84	26
<b>91</b>	-83	25
<b>92</b>	-82	24
<b>93</b>	-83	23
<b>94</b>	-80	22
<b>95</b>	-87	28
<b>96</b>	-85	24
<b>97</b>	-88	15
<b>98</b>	-97	26
<b>99</b>	-92	19
<b>100</b>	-87	12
<b>101</b>	-94	15
<b>102</b>	-92	15
<b>103</b>	-85	24
<b>104</b>	-93	19
<b>105</b>	-92	21
<b>106</b>	-87	22
<b>107</b>	-91	19
<b>108</b>	-90	25
<b>109</b>	-92	27
<b>110</b>	-93	25
<b>111</b>	-90	23
<b>112</b>	-91	25
<b>113</b>	-90	25
<b>114</b>	-86	24
<b>115</b>	-86	23
<b>116</b>	-85	25
<b>117</b>	-84	24
<b>118</b>	-82	21
<b>119</b>	-88	21
<b>120</b>	-95	22
<b>121</b>	-91	21
<b>122</b>	-87	22
<b>123</b>	-95	25
<b>124</b>	-85	27
<b>125</b>	-90	31
<b>126</b>	-87	31

<b>127</b>	-93	29
<b>128</b>	-91	19
<b>129</b>	-91	18
<b>130</b>	-91	23
<b>131</b>	-91	22
<b>132</b>	-91	24
<b>133</b>	-91	27
<b>134</b>	-92	22
<b>135</b>	-90	25
<b>136</b>	-92	24
<b>137</b>	-92	31
<b>138</b>	-88	31
<b>139</b>	-88	31
<b>140</b>	-98	31
<b>141</b>	-96	23
<b>142</b>	-92	29
<b>143</b>	-90	25
<b>144</b>	-90	25
<b>145</b>	-90	24
<b>146</b>	-92	25
<b>147</b>	-92	21
<b>148</b>	-93	25
<b>149</b>	-93	23
<b>150</b>	-95	19
<b>151</b>	-96	17
<b>152</b>	-99	19
<b>153</b>	-93	19
<b>154</b>	-92	18
<b>155</b>	-88	20
<b>156</b>	-91	19
<b>157</b>	-93	19
<b>158</b>	-91	22
<b>159</b>	-91	20
<b>160</b>	-91	31
<b>161</b>	-91	20
<b>162</b>	-93	35
<b>163</b>	-90	23
<b>164</b>	-91	20
<b>165</b>	-88	27
<b>166</b>	-90	31
<b>167</b>	-90	26
<b>168</b>	-90	27
<b>169</b>	-90	25

<b>170</b>	-91	24
<b>171</b>	-92	22
<b>172</b>	-92	18
<b>173</b>	-87	28
<b>174</b>	-90	24
<b>175</b>	-92	23
<b>176</b>	-90	24
<b>177</b>	-97	14
<b>178</b>	-99	5
<b>179</b>	-94	16
<b>180</b>	-88	26
<b>181</b>	-90	23
<b>182</b>	-93	19
<b>183</b>	-97	18
<b>184</b>	-96	15
<b>185</b>	-91	22
<b>186</b>	-91	24
<b>187</b>	-88	26
<b>188</b>	-92	21
<b>189</b>	-93	22
<b>190</b>	-90	27
<b>191</b>	-86	27
<b>192</b>	-84	31
<b>193</b>	-82	30
<b>194</b>	-80	25
<b>195</b>	-87	26
<b>196</b>	-90	24
<b>197</b>	-92	23
<b>198</b>	-94	35
<b>199</b>	-94	27
<b>200</b>	-90	35

<b>Πίνακας III: ECR-Σεντίνες (Απόσταση 15 m)</b>		
	<b>RSSI (dBm)</b>	<b>SNR (dB)</b>
<b>1</b>	-125	53
<b>2</b>	-125	55
<b>3</b>	-127	62
<b>4</b>	-127	59
<b>5</b>	-125	55
<b>6</b>	-126	59
<b>7</b>	-125	56
<b>8</b>	-124	52

<b>9</b>	-125	59
<b>10</b>	-127	73
<b>11</b>	-128	62
<b>12</b>		
<b>13</b>		
<b>14</b>		
<b>15</b>		
<b>16</b>		
<b>17</b>		
<b>18</b>		
<b>19</b>		
<b>20</b>		
<b>21</b>		
<b>22</b>		
<b>23</b>		
<b>24</b>		
<b>25</b>		
<b>26</b>		
<b>27</b>		
<b>28</b>		
<b>29</b>		
<b>30</b>		
<b>31</b>		
<b>32</b>		
<b>33</b>		
<b>34</b>		
<b>35</b>		
<b>36</b>		
<b>37</b>		
<b>38</b>		
<b>39</b>		
<b>40</b>		
<b>41</b>		
<b>42</b>		
<b>43</b>		
<b>44</b>		
<b>45</b>		
<b>46</b>		
<b>47</b>		
<b>48</b>		
<b>49</b>		
<b>50</b>		
<b>51</b>		

52		
53		
54		
55		
56		
57		
58		
59		
60		
61		
62		
63		
64		
65		
66		
67		
68		
69		
70		
71		
72		
73		
74		
75		
76		
77		
78		
79		
80		
81		
82		
83		
84		
85		
86		
87		
88		
89		
90		
91		
92		
93		
94		



<b>95</b>		
<b>96</b>		
<b>97</b>		
<b>98</b>		
<b>99</b>		
<b>100</b>		
<b>101</b>		
<b>102</b>		
<b>103</b>		
<b>104</b>		
<b>105</b>		
<b>106</b>		
<b>107</b>		
<b>108</b>		
<b>109</b>		
<b>110</b>		
<b>111</b>		
<b>112</b>		
<b>113</b>		
<b>114</b>		
<b>115</b>		
<b>116</b>		
<b>117</b>		
<b>118</b>		
<b>119</b>		
<b>120</b>		
<b>121</b>		
<b>122</b>		
<b>123</b>		
<b>124</b>		
<b>125</b>		
<b>126</b>		
<b>127</b>		
<b>128</b>		
<b>129</b>		
<b>130</b>		
<b>131</b>		
<b>132</b>		
<b>133</b>		
<b>134</b>		
<b>135</b>		
<b>136</b>		
<b>137</b>		

<b>138</b>		
<b>139</b>		
<b>140</b>		
<b>141</b>		
<b>142</b>		
<b>143</b>		
<b>144</b>		
<b>145</b>		
<b>146</b>		
<b>147</b>		
<b>148</b>		
<b>149</b>		
<b>150</b>		
<b>151</b>		
<b>152</b>		
<b>153</b>		
<b>154</b>		
<b>155</b>		
<b>156</b>		
<b>157</b>		
<b>158</b>		
<b>159</b>		
<b>160</b>		
<b>161</b>		
<b>162</b>		
<b>163</b>		
<b>164</b>		
<b>165</b>		
<b>166</b>		
<b>167</b>		
<b>168</b>		
<b>169</b>		
<b>170</b>		
<b>171</b>		
<b>172</b>		
<b>173</b>		
<b>174</b>		
<b>175</b>		
<b>176</b>		
<b>177</b>		
<b>178</b>		
<b>179</b>		
<b>180</b>		

<b>181</b>		
<b>182</b>		
<b>183</b>		
<b>184</b>		
<b>185</b>		
<b>186</b>		
<b>187</b>		
<b>188</b>		
<b>189</b>		
<b>190</b>		
<b>191</b>		
<b>192</b>		
<b>193</b>		
<b>194</b>		
<b>195</b>		
<b>196</b>		
<b>197</b>		
<b>198</b>		
<b>199</b>		
<b>200</b>		

<b>Πίνακας IV:CCR-ECR (Απόσταση 30 m)</b>		
	<b>RSSI (dBm)</b>	<b>SNR (dB)</b>
<b>1</b>	-118	26
<b>2</b>	-119	26
<b>3</b>	-117	23
<b>4</b>	-117	15
<b>5</b>	-114	5
<b>6</b>	-115	5
<b>7</b>	-117	12
<b>8</b>	-116	10
<b>9</b>	-114	6
<b>10</b>	-115	10
<b>11</b>	-113	6
<b>12</b>	-120	25
<b>13</b>	-118	21
<b>14</b>	-119	23
<b>15</b>	-120	25
<b>16</b>	-120	31
<b>17</b>	-120	28
<b>18</b>	-116	17
<b>19</b>	-111	1

<b>20</b>	-115	12
<b>21</b>	-109	10
<b>22</b>	-115	9
<b>23</b>	-115	12
<b>24</b>	-114	10
<b>25</b>	-117	19
<b>26</b>	-124	53
<b>27</b>	-125	34
<b>28</b>	-127	44
<b>29</b>	-128	55
<b>30</b>	-121	29
<b>31</b>	-111	4
<b>32</b>	-105	18
<b>33</b>	-111	8
<b>34</b>	-104	25
<b>35</b>	-105	20
<b>36</b>	-108	17
<b>37</b>	-105	8
<b>38</b>	-110	6
<b>39</b>	-118	21
<b>40</b>	-121	35
<b>41</b>	-119	27
<b>42</b>	-118	20
<b>43</b>	-118	20
<b>44</b>	-117	18
<b>45</b>	-114	9
<b>46</b>	-120	31
<b>47</b>	-118	21
<b>48</b>	-115	15
<b>49</b>	-115	19
<b>50</b>	-117	23
<b>51</b>	-118	27
<b>52</b>	-119	31
<b>53</b>	-113	11
<b>54</b>	-116	10
<b>55</b>	-113	1
<b>56</b>	-114	5
<b>57</b>	-112	0
<b>58</b>	-117	14
<b>59</b>	-117	10
<b>60</b>	-92	28
<b>61</b>	-112	4
<b>62</b>	-114	11

<b>63</b>	-117	19
<b>64</b>	-114	4
<b>65</b>	-116	15
<b>66</b>	-117	17
<b>67</b>	-118	22
<b>68</b>	-115	13
<b>69</b>	-117	18
<b>70</b>	-118	20
<b>71</b>	-120	28
<b>72</b>	-116	14
<b>73</b>	-119	24
<b>74</b>	-116	17
<b>75</b>	-113	9
<b>76</b>	-117	17
<b>77</b>	-118	24
<b>78</b>	-121	33
<b>79</b>		
<b>80</b>	-117	8
<b>81</b>	-118	15
<b>82</b>	-119	20
<b>83</b>	-116	15
<b>84</b>	-116	12
<b>85</b>	-116	13
<b>86</b>	-117	15
<b>87</b>	-112	3
<b>88</b>	-116	15
<b>89</b>	-116	14
<b>90</b>	-118	22
<b>91</b>	-118	22
<b>92</b>	-118	23
<b>93</b>	-117	23
<b>94</b>	-115	12
<b>95</b>	-112	6
<b>96</b>	-120	28
<b>97</b>	-113	6
<b>98</b>	-114	8
<b>99</b>	-115	19
<b>100</b>	-113	8
<b>101</b>	-114	10
<b>102</b>	-113	8
<b>103</b>	-112	4
<b>104</b>	-116	8
<b>105</b>	-120	24

<b>106</b>	-112	0
<b>107</b>	-112	2
<b>108</b>	-110	10
<b>109</b>	-109	11
<b>110</b>	-114	7
<b>111</b>	-115	13
<b>112</b>	-119	27
<b>113</b>	-116	13
<b>114</b>	-116	13
<b>115</b>	-120	30
<b>116</b>	-125	49
<b>117</b>	-114	10
<b>118</b>	-123	43
<b>119</b>	-117	19
<b>120</b>	-116	17
<b>121</b>	-124	45
<b>122</b>	-122	39
<b>123</b>	-118	20
<b>124</b>	-117	21
<b>125</b>	-122	37
<b>126</b>	-114	2
<b>127</b>	-115	7
<b>128</b>	-116	11
<b>129</b>	-116	8
<b>130</b>	-114	6
<b>131</b>	-122	28
<b>132</b>	-116	11
<b>133</b>	-127	54
<b>134</b>	-116	13
<b>135</b>	-115	10
<b>136</b>	-117	17
<b>137</b>	-113	4
<b>138</b>	-116	12
<b>139</b>	-118	21
<b>140</b>	-123	41
<b>141</b>	-122	39
<b>142</b>	-115	13
<b>143</b>	-117	21
<b>144</b>	-123	40
<b>145</b>	-120	31
<b>146</b>	-126	53
<b>147</b>	-116	17
<b>148</b>	-115	14



<b>149</b>	-115	17
<b>150</b>	-116	4
<b>151</b>	-120	26
<b>152</b>	-117	13
<b>153</b>	-117	12
<b>154</b>	-119	22
<b>155</b>	-117	15
<b>156</b>	-115	11
<b>157</b>	-117	17
<b>158</b>	-119	20
<b>159</b>	-118	21
<b>160</b>	-119	25
<b>161</b>	-118	23
<b>162</b>	-118	26
<b>163</b>	-119	27
<b>164</b>	-120	26
<b>165</b>	-121	34
<b>166</b>	-121	35
<b>167</b>	-122	38
<b>168</b>	-120	30
<b>169</b>	-120	29
<b>170</b>	-118	23
<b>171</b>	-118	23
<b>172</b>	-123	41
<b>173</b>	-119	28
<b>174</b>	-120	21
<b>175</b>	-117	14
<b>176</b>	-116	8
<b>177</b>	-117	17
<b>178</b>	-118	22
<b>179</b>	-120	26
<b>180</b>	-118	18
<b>181</b>	-120	27
<b>182</b>	-121	35
<b>183</b>	-124	46
<b>184</b>	-119	25
<b>185</b>	-112	2
<b>186</b>	-117	17
<b>187</b>	-119	24
<b>188</b>	-116	17
<b>189</b>	-115	14
<b>190</b>	-114	9
<b>191</b>	-113	7

<b>192</b>	-116	15
<b>193</b>	-115	14
<b>194</b>	-117	16
<b>195</b>	-116	18
<b>196</b>	-113	2
<b>197</b>	-120	23
<b>198</b>	-117	11
<b>199</b>	-116	10
<b>200</b>	-117	15

<b>Πίνακας V: DECK-BOTTOM OF BOSUN ROOM (Απόσταση 285 m)</b>		
	<b>RSSI (dBm)</b>	<b>SNR (dB)</b>
<b>1</b>	-119	39
<b>2</b>	-120	41
<b>3</b>	-120	41
<b>4</b>	-120	68
<b>5</b>	-127	68
<b>6</b>	-126	69
<b>7</b>	-124	61
<b>8</b>	-126	69
<b>9</b>	-124	61
<b>10</b>	-124	69
<b>11</b>	-123	55
<b>12</b>		
<b>13</b>		
<b>14</b>	-124	61
<b>15</b>	-124	62
<b>16</b>	-123	55
<b>17</b>	-119	42
<b>18</b>	-117	36
<b>19</b>	-117	60
<b>20</b>	-118	24
<b>21</b>	-118	29
<b>22</b>	-118	25
<b>23</b>	-117	26
<b>24</b>	-123	45
<b>25</b>	-122	46
<b>26</b>	-120	36
<b>27</b>	-120	43
<b>28</b>	-124	52
<b>29</b>	-121	47

<b>30</b>	-123	49
<b>31</b>	-122	50
<b>32</b>	-120	41
<b>33</b>	-121	45
<b>34</b>	-120	43
<b>35</b>	-122	50
<b>36</b>	-120	50
<b>37</b>	-120	49
<b>38</b>	-121	47
<b>39</b>	-119	51
<b>40</b>	-119	50
<b>41</b>	-119	42
<b>42</b>	-117	36
<b>43</b>	-117	60
<b>44</b>	-118	24
<b>45</b>	-118	29
<b>46</b>	-118	25
<b>47</b>	-117	26
<b>48</b>	-123	45
<b>49</b>	-124	55
<b>50</b>	-126	69
<b>51</b>	-124	61
<b>52</b>	-124	60
<b>53</b>	-120	50
<b>54</b>	-120	49
<b>55</b>	-121	47
<b>56</b>	-119	51
<b>57</b>	-119	50
<b>58</b>	-117	26
<b>59</b>	-123	45
<b>60</b>	-124	55
<b>61</b>	-126	69
<b>62</b>	-124	61
<b>63</b>		
<b>64</b>		
<b>65</b>	-124	55
<b>66</b>	-124	60
<b>67</b>	-123	55
<b>68</b>	-119	42
<b>69</b>	-117	36
<b>70</b>	-117	60
<b>71</b>	-118	24
<b>72</b>	-118	45

<b>73</b>	-119	40
<b>74</b>	-119	45
<b>75</b>	-120	50
<b>76</b>	-119	52
<b>77</b>	-118	40
<b>78</b>	-119	45
<b>79</b>	-121	50
<b>80</b>	-122	52
<b>81</b>		
<b>82</b>	-119	45
<b>83</b>	-118	52
<b>84</b>	-119	50
<b>85</b>	-121	47
<b>86</b>	-119	51
<b>87</b>	-119	50
<b>88</b>	-117	45
<b>89</b>	-123	45
<b>90</b>	-124	55
<b>91</b>	-122	69
<b>92</b>	-117	55
<b>93</b>	-118	24
<b>94</b>	-118	45
<b>95</b>	-119	55
<b>96</b>	-119	45
<b>97</b>	-120	50
<b>98</b>	-119	52
<b>99</b>	-118	40
<b>100</b>	-119	45
<b>101</b>	-121	50
<b>102</b>	-122	52
<b>103</b>	-120	50
<b>104</b>	-120	49
<b>105</b>	-121	47
<b>106</b>	-119	51
<b>107</b>	-119	50
<b>108</b>	-119	42
<b>109</b>	-117	36
<b>110</b>	-117	60
<b>111</b>	-118	30
<b>112</b>	-118	29
<b>113</b>	-118	25
<b>114</b>	-117	26
<b>115</b>	-123	45

<b>116</b>	-124	55
<b>117</b>	-122	69
<b>118</b>	-117	55
<b>119</b>	-118	24
<b>120</b>		
<b>121</b>	-119	55
<b>122</b>	-119	45
<b>123</b>	-120	47
<b>124</b>	-119	52
<b>125</b>	-118	40
<b>126</b>	-119	45
<b>127</b>	-121	50
<b>128</b>	-122	49
<b>129</b>	-120	50
<b>130</b>	-120	49
<b>131</b>	-118	45
<b>132</b>	-119	55
<b>133</b>	-119	45
<b>134</b>	-120	50
<b>135</b>	-119	52
<b>136</b>	-118	40
<b>137</b>	-119	45
<b>138</b>	-121	50
<b>139</b>	-122	52
<b>140</b>	-120	50
<b>141</b>	-120	49
<b>142</b>	-121	47
<b>143</b>	-122	46
<b>144</b>	-120	36
<b>145</b>	-120	55
<b>146</b>	-121	52
<b>147</b>	-121	47
<b>148</b>	-123	49
<b>149</b>	-122	50
<b>150</b>	-120	41
<b>151</b>		
<b>152</b>		
<b>153</b>	-122	50
<b>154</b>	-120	50
<b>155</b>	-120	49
<b>156</b>	-119	52
<b>157</b>	-118	40
<b>158</b>	-119	45

<b>159</b>	-121	50
<b>160</b>	-122	52
<b>161</b>	-120	50
<b>162</b>		
<b>163</b>	-121	47
<b>164</b>	-122	46
<b>165</b>	-120	36
<b>166</b>	-120	55
<b>167</b>	-121	52
<b>168</b>	-121	47
<b>169</b>	-120	49
<b>170</b>	-117	45
<b>171</b>	-118	47
<b>172</b>	-118	44
<b>173</b>	-118	47
<b>174</b>	-119	45
<b>175</b>	-118	47
<b>176</b>	-119	45
<b>177</b>		
<b>178</b>	-119	40
<b>179</b>		
<b>180</b>	-120	50
<b>181</b>	-119	52
<b>182</b>	-118	40
<b>183</b>	-119	45
<b>184</b>	-121	50
<b>185</b>	-122	52
<b>186</b>	-118	55
<b>187</b>		
<b>188</b>	-118	52
<b>189</b>	-119	50
<b>190</b>	-121	47
<b>191</b>	-119	51
<b>192</b>	-120	50
<b>193</b>	-118	50
<b>194</b>	-118	50
<b>195</b>	-119	49
<b>196</b>		
<b>197</b>	-118	50
<b>198</b>	-118	50
<b>199</b>	-119	49
<b>200</b>	-117	42



## Πείραμα 2

<b>Πίνακας VI: ECR-STEERING ROOM (Απόσταση 20 m)</b>		
	<b>RSSI (dBm)</b>	<b>SNR (dB)</b>
<b>1</b>	-93	31
<b>2</b>	-93	30
<b>3</b>	-93	30
<b>4</b>	-93	30
<b>5</b>	-92	30
<b>6</b>	-93	28
<b>7</b>	-94	28
<b>8</b>	-93	31
<b>9</b>	-93	30
<b>10</b>	-92	30
<b>11</b>	-93	11
<b>12</b>	-95	27
<b>13</b>	-97	18
<b>14</b>	-97	21
<b>15</b>	-97	20
<b>16</b>	-97	22
<b>17</b>	-97	23
<b>18</b>	-97	21
<b>19</b>	-97	22
<b>20</b>	-100	24
<b>21</b>	-97	23
<b>22</b>	-98	25
<b>23</b>	-98	21
<b>24</b>	-100	25
<b>25</b>	-98	22
<b>26</b>	-98	23
<b>27</b>	-97	25
<b>28</b>	-101	21
<b>29</b>	-99	25
<b>30</b>	-98	22
<b>31</b>	-99	23
<b>32</b>	-100	20
<b>33</b>	-100	13
<b>34</b>	-94	25
<b>35</b>	-94	28
<b>36</b>	-94	27
<b>37</b>	-97	26
<b>38</b>	-93	26
<b>39</b>	-93	30
<b>40</b>	-95	23
<b>41</b>	-99	23
<b>42</b>	-95	25

<b>43</b>	-98	23
<b>44</b>	-100	20
<b>45</b>	-100	23
<b>46</b>	-101	24
<b>47</b>	-102	21
<b>48</b>	-104	13
<b>49</b>	-101	22
<b>50</b>	-101	18
<b>51</b>	-104	13
<b>52</b>	-105	11
<b>53</b>	-99	22
<b>54</b>	-94	27
<b>55</b>	-96	22
<b>56</b>	-94	25
<b>57</b>	-94	27
<b>58</b>	-92	28
<b>59</b>	-92	27
<b>60</b>	-92	28
<b>61</b>	-92	26
<b>62</b>	-91	27
<b>63</b>	-90	27
<b>64</b>	-91	27
<b>65</b>	-92	27
<b>66</b>	-90	27
<b>67</b>	-90	26
<b>68</b>	-90	28
<b>69</b>	-91	27
<b>70</b>	-91	27
<b>71</b>	-90	25
<b>72</b>	-91	26
<b>73</b>	-91	25
<b>74</b>	-91	25
<b>75</b>	-91	25
<b>76</b>	-91	28
<b>77</b>	-92	23
<b>78</b>	-92	26
<b>79</b>	-92	26
<b>80</b>	-92	24
<b>81</b>	-92	25
<b>82</b>	-92	25
<b>83</b>	-91	25
<b>84</b>	-91	27
<b>85</b>	-91	24
<b>86</b>	-92	29
<b>87</b>	-93	23
<b>88</b>	-92	25
<b>89</b>	-92	27
<b>90</b>	-92	25

<b>91</b>	-91	25
<b>92</b>	-92	26
<b>93</b>	-91	26
<b>94</b>	-91	24
<b>95</b>	-92	26
<b>96</b>	-92	27
<b>97</b>	-91	26
<b>98</b>	-91	26
<b>99</b>	-93	28
<b>100</b>	-93	28
<b>101</b>	-92	25
<b>102</b>	-98	23
<b>103</b>	-91	24
<b>104</b>	-93	24
<b>105</b>	-88	30
<b>106</b>	-90	28
<b>107</b>	-91	25
<b>108</b>	-90	28
<b>109</b>	-90	30
<b>110</b>	-90	28
<b>111</b>	-88	31
<b>112</b>	-91	28
<b>113</b>	-88	27
<b>114</b>	-87	32
<b>115</b>	-90	28
<b>116</b>	-95	26
<b>117</b>	-92	28
<b>118</b>	-88	29
<b>119</b>	-91	26
<b>120</b>	-94	24
<b>121</b>	-93	27
<b>122</b>	-90	26
<b>123</b>	-93	25
<b>124</b>	-91	24
<b>125</b>	-91	25
<b>126</b>	-91	25
<b>127</b>	-91	25
<b>128</b>	-91	23
<b>129</b>	-92	24
<b>130</b>	-90	26
<b>131</b>	-92	21
<b>132</b>	-92	24
<b>133</b>	-88	27
<b>134</b>	-88	28
<b>135</b>	-90	27
<b>136</b>	-91	28
<b>137</b>	-90	27
<b>138</b>	-91	27

<b>139</b>	-91	25
<b>140</b>	-91	24
<b>141</b>	-92	25
<b>142</b>	-93	30
<b>143</b>	-92	24
<b>144</b>	-92	27
<b>145</b>	-93	30
<b>146</b>	-94	25
<b>147</b>	-93	28
<b>148</b>	-93	31
<b>149</b>	-94	27
<b>150</b>	-94	26
<b>151</b>	-95	26
<b>152</b>	-95	23
<b>153</b>	-95	23
<b>154</b>	-96	25
<b>155</b>	-96	24
<b>156</b>	-94	26
<b>157</b>	-95	25
<b>158</b>	-95	27
<b>159</b>	-95	26
<b>160</b>	-95	27
<b>161</b>	-95	26
<b>162</b>	-95	27
<b>163</b>	-95	26
<b>164</b>	-95	28
<b>165</b>	-93	31
<b>166</b>	-93	29
<b>167</b>	-94	30
<b>168</b>	-95	26
<b>169</b>	-96	25
<b>170</b>	-96	24
<b>171</b>	-95	26
<b>172</b>	-97	22
<b>173</b>	-95	25
<b>174</b>	-95	26
<b>175</b>	-94	27
<b>176</b>	-95	24
<b>177</b>	-94	26
<b>178</b>	-95	24
<b>179</b>	-95	26
<b>180</b>	-96	19
<b>181</b>	-95	26
<b>182</b>	-94	25
<b>183</b>	-96	22
<b>184</b>	-94	28
<b>185</b>	-94	25
<b>186</b>	-94	27

<b>187</b>	-91	23
<b>188</b>	-92	28
<b>189</b>	-94	25
<b>190</b>	-93	26
<b>191</b>	-92	26
<b>192</b>	-91	26
<b>193</b>	-92	31
<b>194</b>	-95	23
<b>195</b>	-93	28
<b>196</b>	-95	24
<b>197</b>	-93	27
<b>198</b>	-94	27
<b>199</b>	-98	25
<b>200</b>	-98	21

<b>Πίνακας VII: ECR-FORETAIL SHAFT (Απόσταση 15 m)</b>		
	<b>RSSI (dBm)</b>	<b>SNR (dB)</b>
<b>1</b>	-84	29
<b>2</b>	-86	28
<b>3</b>	-86	27
<b>4</b>	-91	26
<b>5</b>	-82	28
<b>6</b>	-83	30
<b>7</b>	-90	24
<b>8</b>	-85	26
<b>9</b>	-83	30
<b>10</b>	-93	19
<b>11</b>	-90	23
<b>12</b>	-85	24
<b>13</b>	-83	29
<b>14</b>	-83	29
<b>15</b>	-83	27
<b>16</b>	-83	30
<b>17</b>	-84	29
<b>18</b>	-85	27
<b>19</b>	-84	27
<b>20</b>	-85	28
<b>21</b>	-82	29
<b>22</b>	-83	29
<b>23</b>	-83	29
<b>24</b>	-87	24
<b>25</b>	-87	29
<b>26</b>	-90	20
<b>27</b>	-91	20
<b>28</b>	-86	27
<b>29</b>	-83	30
<b>30</b>	-80	24

<b>31</b>	-83	25
<b>32</b>	-82	26
<b>33</b>	-93	25
<b>34</b>	-83	26
<b>35</b>	-90	26
<b>36</b>	-91	22
<b>37</b>	-95	14
<b>38</b>	-97	13
<b>39</b>	-95	15
<b>40</b>	-87	29
<b>41</b>	-92	18
<b>42</b>	-87	23
<b>43</b>	-87	27
<b>44</b>	-90	23
<b>45</b>	-87	28
<b>46</b>	-88	22
<b>47</b>	-86	22
<b>48</b>	-87	26
<b>49</b>	-86	23
<b>50</b>	-90	29
<b>51</b>	-90	24
<b>52</b>	-90	28
<b>53</b>	-87	26
<b>54</b>	-88	27
<b>55</b>	-88	27
<b>56</b>	-88	23
<b>57</b>	-86	24
<b>58</b>	-86	23
<b>59</b>	-88	26
<b>60</b>	-87	27
<b>61</b>	-86	24
<b>62</b>	-81	26
<b>63</b>	-91	25
<b>64</b>	-84	28
<b>65</b>	-85	26
<b>66</b>	-88	25
<b>67</b>	-87	26
<b>68</b>	-86	27
<b>69</b>	-85	25
<b>70</b>	-84	25
<b>71</b>	-86	26
<b>72</b>	-90	26
<b>73</b>	-86	23
<b>74</b>	-84	25
<b>75</b>	-85	25
<b>76</b>	-92	18
<b>77</b>	-94	24
<b>78</b>	-87	26

<b>79</b>	-84	29
<b>80</b>	-88	25
<b>81</b>	-84	24
<b>82</b>	-85	30
<b>83</b>	-87	24
<b>84</b>	-85	30
<b>85</b>	-88	23
<b>86</b>	-85	27
<b>87</b>	-84	30
<b>88</b>	-84	25
<b>89</b>	-85	26
<b>90</b>	-84	26
<b>91</b>	-83	29
<b>92</b>	-82	30
<b>93</b>	-83	29
<b>94</b>	-80	25
<b>95</b>	-87	27
<b>96</b>	-85	24
<b>97</b>	-88	24
<b>98</b>	-97	6
<b>99</b>	-92	19
<b>100</b>	-87	26
<b>101</b>	-94	15
<b>102</b>	-92	15
<b>103</b>	-85	29
<b>104</b>	-93	19
<b>105</b>	-92	21
<b>106</b>	-87	25
<b>107</b>	-91	25
<b>108</b>	-90	25
<b>109</b>	-92	16
<b>110</b>	-93	17
<b>111</b>	-90	23
<b>112</b>	-91	25
<b>113</b>	-90	25
<b>114</b>	-86	24
<b>115</b>	-86	23
<b>116</b>	-85	25
<b>117</b>	-84	24
<b>118</b>	-82	30
<b>119</b>	-88	26
<b>120</b>	-95	10
<b>121</b>	-91	21
<b>122</b>	-87	27
<b>123</b>	-95	15
<b>124</b>	-85	27
<b>125</b>	-90	23
<b>126</b>	-87	24

<b>127</b>	-93	23
<b>128</b>	-84	24
<b>129</b>	-86	29
<b>130</b>	-85	23
<b>131</b>	-85	26
<b>132</b>	-82	32
<b>133</b>	-84	27
<b>134</b>	-84	27
<b>135</b>	-86	25
<b>136</b>	-93	24
<b>137</b>	-87	24
<b>138</b>	-83	29
<b>139</b>	-92	23
<b>140</b>	-98	13
<b>141</b>	-96	16
<b>142</b>	-92	18
<b>143</b>	-90	25
<b>144</b>	-90	25
<b>145</b>	-90	28
<b>146</b>	-92	21
<b>147</b>	-92	21
<b>148</b>	-93	20
<b>149</b>	-93	23
<b>150</b>	-95	19
<b>151</b>	-96	17
<b>152</b>	-99	1
<b>153</b>	-93	19
<b>154</b>	-92	18
<b>155</b>	-88	25
<b>156</b>	-91	19
<b>157</b>	-93	19
<b>158</b>	-91	22
<b>159</b>	-91	20
<b>160</b>	-91	20
<b>161</b>	-91	20
<b>162</b>	-93	15
<b>163</b>	-90	23
<b>164</b>	-91	20
<b>165</b>	-88	27
<b>166</b>	-90	24
<b>167</b>	-90	26
<b>168</b>	-90	27
<b>169</b>	-90	25
<b>170</b>	-91	24
<b>171</b>	-92	22
<b>172</b>	-92	18
<b>173</b>	-87	28
<b>174</b>	-90	24



<b>175</b>	-92	23
<b>176</b>	-90	24
<b>177</b>	-97	14
<b>178</b>	-99	5
<b>179</b>	-94	16
<b>180</b>	-88	26
<b>181</b>	-90	23
<b>182</b>	-93	19
<b>183</b>	-97	18
<b>184</b>	-96	15
<b>185</b>	-91	22
<b>186</b>	-91	24
<b>187</b>	-88	26
<b>188</b>	-92	21
<b>189</b>	-93	22
<b>190</b>	-90	17
<b>191</b>	-86	27
<b>192</b>	-84	31
<b>193</b>	-82	30
<b>194</b>	-80	25
<b>195</b>	-87	29
<b>196</b>	-90	24
<b>197</b>	-92	23
<b>198</b>	-94	14
<b>199</b>	-94	21
<b>200</b>	-90	29

<b>Πίνακας VIII:CCR- NEXT ROOM (Απόσταση 6 m)</b>		
	<b>RSSI (dBm)</b>	<b>SNR (dB)</b>
<b>1</b>	-54	25
<b>2</b>	-54	24
<b>3</b>	-54	22
<b>4</b>	-56	31
<b>5</b>	-53	21
<b>6</b>	-54	25
<b>7</b>	-53	24
<b>8</b>	-53	26
<b>9</b>	-54	29
<b>10</b>	-59	27
<b>11</b>	-58	28
<b>12</b>	-54	27
<b>13</b>	-58	29
<b>14</b>	-56	28
<b>15</b>	-54	28
<b>16</b>	-58	28
<b>17</b>	-60	27
<b>18</b>	-60	26

19	-60	28
20	-60	26
21	-59	27
22	-59	24
23	-59	24
24	-59	27
25	-59	27
26	-59	24
27	-59	26
28	-59	27
29	-56	25
30	-65	28
31	-58	31
32	-64	27
33	-57	26
34	-57	28
35	-56	27
36	-53	27
37	-53	27
38	-52	25
39	-52	28
40	-54	25
41	-53	25
42	-53	26
43	-54	24
44	-52	28
45	-53	23
46	-54	23
47	-53	25
48	-52	27
49	-52	28
50	-54	27
51	-56	28
52	-59	25
53	-67	24
54	-57	26
55	-63	32
56	-57	29
57	-59	25
58	-57	27
59	-56	29
60	-59	27
61	-58	26
62	-54	30
63	-57	28
64	-60	24
65	-58	29
66	-57	29

<b>67</b>	-56	32
<b>68</b>	-56	31
<b>69</b>	-56	30
<b>70</b>	-56	29
<b>71</b>	-54	31
<b>72</b>	-56	31
<b>73</b>	-54	32
<b>74</b>	-54	31
<b>75</b>	-54	29
<b>76</b>	-56	30
<b>77</b>	-56	29
<b>78</b>	-56	31
<b>79</b>	-56	33
<b>80</b>	-56	33
<b>81</b>	-56	33
<b>82</b>	-56	33
<b>83</b>	-56	33
<b>84</b>	-57	28
<b>85</b>	-57	29
<b>86</b>	-58	28
<b>87</b>	-57	31
<b>88</b>	-56	29
<b>89</b>	-54	32
<b>90</b>	-54	25
<b>91</b>	-53	25
<b>92</b>	-54	29
<b>93</b>	-56	27
<b>94</b>	-56	28
<b>95</b>	-58	28
<b>96</b>	-57	30
<b>97</b>	-59	27
<b>98</b>	-58	27
<b>99</b>	-58	27
<b>100</b>	-56	27
<b>101</b>	-58	29
<b>102</b>	-56	30
<b>103</b>	-54	20
<b>104</b>	-57	28
<b>105</b>	-59	29
<b>106</b>	-60	26
<b>107</b>	-61	30
<b>108</b>	-59	25
<b>109</b>	-60	26
<b>110</b>	-61	30
<b>111</b>	-60	23
<b>112</b>	-60	24
<b>113</b>	-61	30
<b>114</b>	-61	31

<b>115</b>	-60	29
<b>116</b>	-64	28
<b>117</b>	-59	27
<b>118</b>	-57	28
<b>119</b>	-54	26
<b>120</b>	-56	29
<b>121</b>	-60	27
<b>122</b>	-57	31
<b>123</b>	-53	27
<b>124</b>	-52	25
<b>125</b>	-52	26
<b>126</b>	-53	24
<b>127</b>	-56	27
<b>128</b>	-54	24
<b>129</b>	-53	25
<b>130</b>	-56	29
<b>131</b>	-58	25
<b>132</b>	-57	30
<b>133</b>	-57	31
<b>134</b>	-58	26
<b>135</b>	-58	29
<b>136</b>	-58	29
<b>137</b>	-58	27
<b>138</b>	-56	31
<b>139</b>	-57	32
<b>140</b>	-57	27
<b>141</b>	-54	31
<b>142</b>	-56	33
<b>143</b>	-58	27
<b>144</b>	-57	29
<b>145</b>	-56	34
<b>146</b>	-56	35
<b>147</b>	-56	32
<b>148</b>	-56	33
<b>149</b>	-56	34
<b>150</b>	-56	33
<b>151</b>	-56	32
<b>152</b>	-56	34
<b>153</b>	-56	34
<b>154</b>	-56	32
<b>155</b>	-56	30
<b>156</b>	-56	31
<b>157</b>	-56	34
<b>158</b>	-56	35
<b>159</b>	-56	32
<b>160</b>	-56	32
<b>161</b>	-56	32
<b>162</b>	-56	31

163	-56	34
164	-56	36
165	-56	31
166	-54	32
167	-56	33
168	-56	33
169	-56	31
170	-54	30
171	-54	30
172	-54	32
173	-56	28
174	-56	34
175	-56	31
176	-56	32
177	-56	34
178	-56	33
179	-56	33
180	-56	32
181	-56	33
182	-56	32
183	-56	31
184	-56	32
185	-54	29
186	-56	32
187	-54	31
188	-54	31
189	-54	26
190	-56	26
191	-54	32
192	-54	29
193	-54	32
194	-54	29
195	-56	33
196	-56	30
197	-54	28
198	-54	28
199	-54	28
200	-64	28

<b>Πίνακας ΙΧ:CCR-BRIDGE (Απόσταση 15 m)</b>		
	<b>RSSI (dBm)</b>	<b>SNR (dB)</b>
<b>1</b>	-103	25
<b>2</b>	-104	19
<b>3</b>	-104	21
<b>4</b>	-104	23
<b>5</b>	-103	21

<b>6</b>	-107	16
<b>7</b>	-108	14
<b>8</b>	-104	17
<b>9</b>	-105	14
<b>10</b>	-105	14
<b>11</b>	-105	19
<b>12</b>	-103	21
<b>13</b>	-108	10
<b>14</b>	-107	13
<b>15</b>	-109	6
<b>16</b>	-107	11
<b>17</b>	-108	11
<b>18</b>	-110	6
<b>19</b>	-103	27
<b>20</b>	-102	22
<b>21</b>	-105	22
<b>22</b>	-104	23
<b>23</b>	-104	24
<b>24</b>	-105	22
<b>25</b>	-104	17
<b>26</b>	-105	20
<b>27</b>	-103	23
<b>28</b>	-102	23
<b>29</b>	-103	20
<b>30</b>	-101	21
<b>31</b>	-104	15
<b>32</b>	-100	23
<b>33</b>	-100	21
<b>34</b>	-99	25
<b>35</b>	-104	19
<b>36</b>	-100	21
<b>37</b>	-104	19
<b>38</b>	-103	20
<b>39</b>	-102	18
<b>40</b>	-101	19
<b>41</b>	-99	21
<b>42</b>	-99	24
<b>43</b>	-98	30
<b>44</b>	-98	28
<b>45</b>	-103	25
<b>46</b>	-102	25
<b>47</b>	-101	20
<b>48</b>	-104	22

49	-107	13
50	-103	24
51		
52	-104	22
53	-103	24
54	-104	19
55	-105	18
56	-104	21
57	-105	17
58	-107	16
59	-108	14
60	-108	11
61	-110	3
62	-109	4
63	-110	1
64	-108	7
65	-109	5
66	-108	9
67	-108	7
68	-107	10
69	-108	8
70	-107	11
71	-102	26
72	-105	19
73	-104	21
74	-103	24
75	-103	23
76	-104	21
77	-104	24
78	-105	22
79	-102	26
80	-104	21
81	-104	19
82	-103	23
83	-104	22
84	-103	24
85	-103	21
86	-103	25
87	-103	23
88	-103	25
89	-104	22
90	-103	20
91	-104	21

<b>92</b>	-105	19
<b>93</b>	-107	15
<b>94</b>	-104	21
<b>95</b>	-104	25
<b>96</b>	-104	22
<b>97</b>	-107	20
<b>98</b>	-108	14
<b>99</b>	-107	18
<b>100</b>	-104	21
<b>101</b>	-107	20
<b>102</b>	-104	21
<b>103</b>	-104	19
<b>104</b>	-104	21
<b>105</b>	-109	11
<b>106</b>	-107	10
<b>107</b>	-104	21
<b>108</b>	-105	15
<b>109</b>	-105	16
<b>110</b>	-104	17
<b>111</b>	-102	24
<b>112</b>	-102	21
<b>113</b>	-101	22
<b>114</b>	-101	23
<b>115</b>	-108	13
<b>116</b>	-103	18
<b>117</b>	-103	21
<b>118</b>	-105	13
<b>119</b>	-108	15
<b>120</b>	-108	12
<b>121</b>	-112	4
<b>122</b>	-108	19
<b>123</b>	-103	20
<b>124</b>	-104	24
<b>125</b>	-107	18
<b>126</b>	-107	18
<b>127</b>	-107	20
<b>128</b>	-107	16
<b>129</b>	-108	20
<b>130</b>	-104	15
<b>131</b>	-103	24
<b>132</b>	-104	20
<b>133</b>	-101	23
<b>134</b>	-107	16



<b>135</b>	-104	18
<b>136</b>	-104	19
<b>137</b>	-105	16
<b>138</b>	-105	17
<b>139</b>	-104	16
<b>140</b>	-105	14
<b>141</b>	-105	13
<b>142</b>	-103	17
<b>143</b>	-102	18
<b>144</b>	-102	18
<b>145</b>	-103	16
<b>146</b>	-108	11
<b>147</b>	-109	0
<b>148</b>	-115	9
<b>149</b>	-109	8
<b>150</b>	-112	1
<b>151</b>	-110	4
<b>152</b>	-112	1
<b>153</b>	-114	7
<b>154</b>	-109	12
<b>155</b>	-109	7
<b>156</b>	-107	12
<b>157</b>	-111	6
<b>158</b>	-111	2
<b>159</b>	-113	11
<b>160</b>	-114	11
<b>161</b>	-112	7
<b>162</b>	-114	16
<b>163</b>	-112	5
<b>164</b>	-114	10
<b>165</b>	-110	2
<b>166</b>	-110	2
<b>167</b>	-110	5
<b>168</b>	-109	6
<b>169</b>	-108	8
<b>170</b>	-109	8
<b>171</b>	-110	1
<b>172</b>	-109	5
<b>173</b>	-110	4
<b>174</b>	-107	6
<b>175</b>	-108	14
<b>176</b>	-109	9
<b>177</b>	-109	10

<b>178</b>	-110	9
<b>179</b>	-111	1
<b>180</b>	-108	13
<b>181</b>	-110	11
<b>182</b>	-109	11
<b>183</b>	-109	10
<b>184</b>	-109	9
<b>185</b>	-109	8
<b>186</b>	-117	17
<b>187</b>	-103	19
<b>188</b>	-101	22
<b>189</b>	-102	21
<b>190</b>	-100	21
<b>191</b>	-103	15
<b>192</b>	-103	17
<b>193</b>	-101	16
<b>194</b>	-101	17
<b>195</b>	-102	19
<b>196</b>	-102	19
<b>197</b>	-102	17
<b>198</b>	-103	16
<b>199</b>	-103	17
<b>200</b>	-104	19

<b>Πίνακας Χ: BRIDGE-BOTTOM OF BOSUN ROOM (Απόσταση 310 m)</b>		
	<b>RSSI (dBm)</b>	<b>SNR (dB)</b>
<b>1</b>	-34	30
<b>2</b>	-33	31
<b>3</b>	-34	31
<b>4</b>	-34	30
<b>5</b>	-33	28
<b>6</b>	-34	27
<b>7</b>	-33	25
<b>8</b>	-33	26
<b>9</b>	-33	26
<b>10</b>	-33	26
<b>11</b>	-33	26
<b>12</b>	-32	25
<b>13</b>	-33	25
<b>14</b>	-33	23
<b>15</b>	-33	26
<b>16</b>	-33	24

<b>17</b>	-33	21
<b>18</b>	-33	28
<b>19</b>	-33	28
<b>20</b>	-33	27
<b>21</b>	-33	24
<b>22</b>	-33	25
<b>23</b>	-33	27
<b>24</b>	-33	24
<b>25</b>	-33	25
<b>26</b>	-33	27
<b>27</b>	-33	26
<b>28</b>	-33	26
<b>29</b>	-33	24
<b>30</b>	-33	23
<b>31</b>	-33	24
<b>32</b>	-33	27
<b>33</b>	-33	23
<b>34</b>	-33	24
<b>35</b>	-33	28
<b>36</b>	-33	24
<b>37</b>	-33	20
<b>38</b>	-33	25
<b>39</b>	-33	27
<b>40</b>	-33	23
<b>41</b>	-33	22
<b>42</b>	-33	23
<b>43</b>	-33	21
<b>44</b>	-33	23
<b>45</b>	-33	26
<b>46</b>	-33	25
<b>47</b>	-33	25
<b>48</b>	-33	23
<b>49</b>	-33	28
<b>50</b>	-33	23
<b>51</b>	-33	24
<b>52</b>	-33	27
<b>53</b>	-33	27
<b>54</b>	-33	23
<b>55</b>	-33	22
<b>56</b>	-33	25
<b>57</b>	-33	25
<b>58</b>	-33	24
<b>59</b>	-33	24

<b>60</b>	-33	25
<b>61</b>	-33	23
<b>62</b>	-33	21
<b>63</b>	-33	26
<b>64</b>	-33	25
<b>65</b>	-33	22
<b>66</b>	-33	23
<b>67</b>	-33	24
<b>68</b>	-33	25
<b>69</b>	-33	23
<b>70</b>	-33	23
<b>71</b>	-33	24
<b>72</b>	-33	28
<b>73</b>	-33	23
<b>74</b>	-33	26
<b>75</b>	-33	25
<b>76</b>	-33	26
<b>77</b>	-33	25
<b>78</b>	-33	25
<b>79</b>	-33	26
<b>80</b>	-33	24
<b>81</b>	-33	25
<b>82</b>	-33	25
<b>83</b>	-33	26
<b>84</b>	-33	22
<b>85</b>	-33	24
<b>86</b>	-33	26
<b>87</b>	-33	23
<b>88</b>	-33	23
<b>89</b>	-33	25
<b>90</b>	-33	24
<b>91</b>	-33	23
<b>92</b>	-33	26
<b>93</b>	-33	25
<b>94</b>	-33	27
<b>95</b>	-33	22
<b>96</b>	-33	27
<b>97</b>	-33	24
<b>98</b>	-33	22
<b>99</b>	-33	27
<b>100</b>	-33	23
<b>101</b>	-33	24
<b>102</b>	-33	26

<b>103</b>	-33	27
<b>104</b>	-33	25
<b>105</b>	-33	25
<b>106</b>	-33	24
<b>107</b>	-33	25
<b>108</b>	-33	23
<b>109</b>	-33	23
<b>110</b>	-33	29
<b>111</b>	-33	27
<b>112</b>	-33	24
<b>113</b>	-33	24
<b>114</b>	-33	22
<b>115</b>	-33	25
<b>116</b>	-33	27
<b>117</b>	-33	27
<b>118</b>	-33	24
<b>119</b>	-36	15
<b>120</b>	-33	21
<b>121</b>	-33	27
<b>122</b>	-33	25
<b>123</b>	-33	24
<b>124</b>	-33	27
<b>125</b>	-34	25
<b>126</b>	-33	27
<b>127</b>	-34	25
<b>128</b>	-33	24
<b>129</b>	-34	24
<b>130</b>	-33	26
<b>131</b>	-34	25
<b>132</b>	-33	23
<b>133</b>	-36	15
<b>134</b>	-42	42
<b>135</b>	-33	27
<b>136</b>	-39	17
<b>137</b>	-33	22
<b>138</b>	-43	33
<b>139</b>	-36	15
<b>140</b>	-37	11
<b>141</b>	-34	7
<b>142</b>	-34	9
<b>143</b>	-36	11
<b>144</b>	-34	3
<b>145</b>	-34	7

<b>146</b>	-36	8
<b>147</b>	-35	4
<b>148</b>	-35	10
<b>149</b>	-34	7
<b>150</b>	-34	5
<b>151</b>	-35	16
<b>152</b>	-35	9
<b>153</b>	-34	12
<b>154</b>	-35	11
<b>155</b>	-34	22
<b>156</b>	-35	14
<b>157</b>	-34	13
<b>158</b>	-35	25
<b>159</b>	-35	26
<b>160</b>	-35	29
<b>161</b>	-35	30
<b>162</b>	-35	31
<b>163</b>	-35	30
<b>164</b>	-35	28
<b>165</b>	-35	29
<b>166</b>	-35	31
<b>167</b>	-35	31
<b>168</b>	-35	28
<b>169</b>	-35	30
<b>170</b>	-35	30
<b>171</b>	-35	29
<b>172</b>	-35	30
<b>173</b>	-35	30
<b>174</b>	-35	29
<b>175</b>	-35	29
<b>176</b>	-35	30
<b>177</b>	-35	29
<b>178</b>	-35	30
<b>179</b>	-35	28
<b>180</b>	-35	31
<b>181</b>	-35	28
<b>182</b>	-35	28
<b>183</b>	-35	30
<b>184</b>	-35	30
<b>185</b>	-35	29
<b>186</b>	-35	27
<b>187</b>	-36	27
<b>188</b>	-35	29

<b>189</b>	-35	29
<b>190</b>	-35	31
<b>191</b>	-35	30
<b>192</b>	-35	32
<b>193</b>	-35	29
<b>194</b>	-35	27
<b>195</b>	-35	29
<b>196</b>	-36	30
<b>197</b>	-35	32
<b>198</b>	-35	29
<b>199</b>	-35	29
<b>200</b>	-47	28

<b>Πίνακας XI:BRIDGE-ECR (Απόσταση 45 m)</b>		
	<b>RSSI (dBm)</b>	<b>SNR (dB)</b>
<b>1</b>	-127	68
<b>2</b>	-126	68
<b>3</b>	-126	58
<b>4</b>	-127	57
<b>5</b>	-127	50
<b>6</b>	-127	60
<b>7</b>		
<b>8</b>	-127	55
<b>9</b>	-127	58
<b>10</b>	-126	68
<b>11</b>		
<b>12</b>		
<b>13</b>	-127	76
<b>14</b>		
<b>15</b>	-126	64
<b>16</b>	-127	63
<b>17</b>	-127	67
<b>18</b>	-128	60
<b>19</b>	-128	61
<b>20</b>	-127	62
<b>21</b>	-127	69
<b>22</b>	-126	63
<b>23</b>	-128	63
<b>24</b>		
<b>25</b>	-126	68
<b>26</b>	-126	69
<b>27</b>	-127	64

<b>28</b>	-127	56
<b>29</b>		
<b>30</b>		
<b>31</b>	-126	62
<b>32</b>	-127	54
<b>33</b>	-125	45
<b>34</b>	-126	51
<b>35</b>	-126	49
<b>36</b>	-126	48
<b>37</b>	-125	50
<b>38</b>	-126	54
<b>39</b>	-125	50
<b>40</b>	-126	49
<b>41</b>	-126	52
<b>42</b>	-123	42
<b>43</b>	-123	41
<b>44</b>	-123	41
<b>45</b>	-123	42
<b>46</b>	-123	42
<b>47</b>	-124	44
<b>48</b>	-124	46
<b>49</b>	-123	45
<b>50</b>	-124	48
<b>51</b>	-123	33
<b>52</b>	-124	37
<b>53</b>	-123	38
<b>54</b>	-124	40
<b>55</b>	-126	44
<b>56</b>	-124	43
<b>57</b>		
<b>58</b>	-124	42
<b>59</b>	-124	42
<b>60</b>	-123	43
<b>61</b>	-124	47
<b>62</b>	-125	48
<b>63</b>	-125	49
<b>64</b>	-124	50
<b>65</b>	-125	49
<b>66</b>	-124	47
<b>67</b>	-126	52
<b>68</b>	-127	56
<b>69</b>	-128	61
<b>70</b>	-127	57



<b>71</b>	-126	42
<b>72</b>	-127	48
<b>73</b>	-127	50
<b>74</b>	-127	50
<b>75</b>	-128	54
<b>76</b>	-126	61
<b>77</b>	-127	62
<b>78</b>	-125	69
<b>79</b>	-125	68
<b>80</b>		
<b>81</b>		
<b>82</b>	-126	82
<b>83</b>		
<b>84</b>	-126	67
<b>85</b>	-126	53
<b>86</b>	-128	61
<b>87</b>	-127	59
<b>88</b>	-126	57
<b>89</b>	-128	60
<b>90</b>	-127	56
<b>91</b>	-126	54
<b>92</b>	-126	57
<b>93</b>	-127	56
<b>94</b>	-126	50
<b>95</b>	-126	41
<b>96</b>	-128	54
<b>97</b>	-128	54
<b>98</b>	-127	56
<b>99</b>	-128	58
<b>100</b>	-128	59
<b>101</b>	-128	57
<b>102</b>	-128	59
<b>103</b>	-128	61
<b>104</b>	-127	66
<b>105</b>	-127	56
<b>106</b>	-128	60
<b>107</b>	-128	60
<b>108</b>	-127	56
<b>109</b>	-126	55
<b>110</b>	-127	57
<b>111</b>	-126	54
<b>112</b>	-126	55
<b>113</b>	-125	59

<b>114</b>	-126	55
<b>115</b>	-127	56
<b>116</b>	-127	57
<b>117</b>	-128	49
<b>118</b>	-126	47
<b>119</b>	-127	48
<b>120</b>	-126	48
<b>121</b>	-127	50
<b>122</b>	-127	53
<b>123</b>	-127	48
<b>124</b>	-127	53
<b>125</b>	-127	56
<b>126</b>	-125	51
<b>127</b>	-127	50
<b>128</b>	-125	50
<b>129</b>	-126	53
<b>130</b>	-127	56
<b>131</b>	-126	53
<b>132</b>	-127	56
<b>133</b>	-126	57
<b>134</b>	-126	54
<b>135</b>	-126	56
<b>136</b>	-126	55
<b>137</b>	-125	54
<b>138</b>	-126	56
<b>139</b>	-125	53
<b>140</b>	-126	40
<b>141</b>	-125	47
<b>142</b>	-125	47
<b>143</b>	-124	43
<b>144</b>	-125	47
<b>145</b>	-127	52
<b>146</b>	-126	49
<b>147</b>	-126	50
<b>148</b>	-125	50
<b>149</b>	-126	54
<b>150</b>	-128	57
<b>151</b>	-128	61
<b>152</b>	-127	57
<b>153</b>	-126	54
<b>154</b>	-127	64
<b>155</b>	-127	59
<b>156</b>	-127	59

<b>157</b>	-128	61
<b>158</b>	-128	62
<b>159</b>	-127	64
<b>160</b>	-128	54
<b>161</b>	-127	49
<b>162</b>	-128	52
<b>163</b>	-126	54
<b>164</b>	-127	55
<b>165</b>	-127	52
<b>166</b>	-126	51
<b>167</b>	-125	46
<b>168</b>	-127	52
<b>169</b>	-125	51
<b>170</b>	-125	50
<b>171</b>	-126	52
<b>172</b>	-125	51
<b>173</b>	-125	51
<b>174</b>	-124	50
<b>175</b>	-126	52
<b>176</b>	-126	52
<b>177</b>	-127	58
<b>178</b>	-127	57
<b>179</b>	-125	53
<b>180</b>	-126	55
<b>181</b>	-126	53
<b>182</b>	-125	43
<b>183</b>	-125	41
<b>184</b>	-125	42
<b>185</b>	-125	47
<b>186</b>	-126	50
<b>187</b>	-126	50
<b>188</b>	-126	51
<b>189</b>	-127	54
<b>190</b>	-127	53
<b>191</b>	-125	51
<b>192</b>	-126	52
<b>193</b>	-125	50
<b>194</b>	-126	52
<b>195</b>	-126	52
<b>196</b>	-126	54
<b>197</b>	-126	52
<b>198</b>	-126	54
<b>199</b>	-127	56

200	-125	53
-----	------	----

---