



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΛΙΜΝΩΝ ΚΑΙ ΓΛΥΚΩΝ
ΥΔΑΤΩΝ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΙΟΤ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΙΟΤΟΠΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΝΤΕΛΑΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

ΘΕΟΦΙΛΟΣ ΧΡΥΣΙΚΟΣ

ΔΙΔΑΣΚΩΝ-ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ

Λαμία 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΛΙΜΝΩΝ ΚΑΙ ΓΛΥΚΩΝ
ΥΔΑΤΩΝ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΙΟΤ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΙΟΤΟΠΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΝΤΕΛΑΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

ΘΕΟΦΙΛΟΣ ΧΡΥΣΙΚΟΣ

ΔΙΔΑΣΚΩΝ-ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ

Λαμία 2025



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

BROADBAND STUDY IN LAKE AND FRESHWATER ENVIRONMENTS FOR AN IOT HABITAT MONITORING SYSTEM

GEORGIOS PANTELAKIS

FINAL THESIS

ADVISOR

THEOFILOS CHRYSIKOS
Tutor

Lamia 2025

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

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων Συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.
3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια
4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: 20.../...10.../2025.....

Ο Δηλών
Γεώργιος Παντελάκης

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία διερευνά τις επιλογές ευρυζωνικής συνδεσιμότητας για ένα σύστημα παρακολούθησης οικοτόπων μέσω του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) που λειτουργεί σε περιβάλλοντα λιμνών και γλυκού νερού.

Το Κεφάλαιο 1 εισάγει το πρόβλημα και προωθεί τη συνεχή, χαμηλής ισχύος ανίχνευση οικολογικών δεικτών (π.χ. θερμοκρασία, pH, διαλυμένο οξυγόνο, θολότητα) και υδρολογικής ασφάλειας (επίπεδα, ροή, προειδοποιήσεις πλημμύρας).

Το Κεφάλαιο 2 παρέχει μια γενική επισκόπηση του IoT και πλαισιώνει το Marine Internet of Things (MIoT) για τα εσωτερικά ύδατα, δίνοντας έμφαση στα αρχιτεκτονικά δομικά στοιχεία (αισθητήρες, πύλες, ανάλυση edge/cloud), τους ενεργειακούς περιορισμούς και τις λειτουργικές απαιτήσεις (βαθμονόμηση, ενημερώσεις OTA, ποιότητα δεδομένων).

Το Κεφάλαιο 3 εστιάζει τη μελέτη στο σχεδιασμό συνδέσεων MIoT και τυποποιεί τα μοντέλα καναλιών που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγησή μας: (i) διάδοση RF πάνω από το νερό με εφέ δύο ακτίνων για συνδεσιμότητα επιφάνειας/ακτής, (ii) απώλεια υποβρύχιας ακουστικής μετάδοσης που συνδυάζει γεωμετρική διάδοση και απορρόφηση για ισχυρή υποβρύχια εμβέλεια, και (iii) υποβρύχια οπτική εξασθένιση Beer–Lambert με γεωμετρική σύζευξη για σύντομες ριπές υψηλού ρυθμού.

Το κεφάλαιο 4 εφαρμόζει αυτά τα μοντέλα στο MATLAB για να ποσοτικοποιήσει τα εφικτά εύρη, τους ρυθμούς δεδομένων και τους προϋπολογισμούς ισχύος σε αντιπροσωπευτικά σενάρια. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι: η αύξηση του ύψους της κεραίας συχνά αποφέρει μεγαλύτερα κέρδη RF από την αύξηση της ισχύος, οι ακουστικές συνδέσεις ανταλλάσσουν ρυθμό με εύρος με προβλέψιμο τρόπο μέσω της επιλογής συχνότητας και οι οπτικές συνδέσεις επιτρέπουν μεταφορές Mbit/s σε μικρές αποστάσεις σε καθαρά νερά, αλλά είναι πολύ ευαίσθητες στην ευθυγράμμιση και τη θολότητα.

Η εργασία ολοκληρώνεται με οδηγίες σχεδιασμού για πολυεπίπεδες εφαρμογές MIoT που συνδυάζουν RF backhaul, ακουστική αντοχή και οπτικές εκκενώσεις, μαζί με συστάσεις για βαθμονόμηση πεδίου, ενεργειακή ουδετερότητα και επεκτάσιμες λειτουργίες, ακολουθούμενες από μια συγκεντρωμένη βιβλιογραφία.

ABSTRACT

This thesis investigates broadband connectivity options for an Internet-of-Things (IoT) habitat monitoring system operating in lake and freshwater environments.

Chapter 1 introduces the problem space and motivates persistent, low-power sensing for ecological indicators (e.g., temperature, pH, dissolved oxygen, turbidity) and hydrological safety (levels, flow, flood alerts).

Chapter 2 provides a general overview of IoT and frames the Marine Internet of Things (MIoT) for inland waters, emphasizing architectural building blocks (sensors, gateways, edge/cloud analytics), energy constraints, and operational requirements (calibration, OTA updates, data quality).

Chapter 3 focuses the study on MIoT link design and formalizes the channel models used in our evaluation: (i) over-water RF propagation with two-ray effects for surface/shore connectivity, (ii) underwater acoustic transmission loss combining geometric spreading and absorption for robust submerged reach, and (iii) underwater optical Beer–Lambert attenuation with geometric coupling for short, high-rate bursts.

Chapter 4 implements these models in MATLAB to quantify feasible ranges, data rates, and power budgets across representative scenarios. Results show that: raising antenna height often yields larger RF gains than increasing power; acoustic links trade rate for range predictably via frequency choice; and optical links enable Mbit/s transfers at short distances in clear water but are highly sensitive to alignment and turbidity.

The thesis concludes with design guidelines for layered MIoT deployments that combine RF backhaul, acoustic persistence, and optical burst offloads, alongside recommendations for field calibration, energy neutrality, and scalable operations, followed by a consolidated bibliography.

.

Table of Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ABSTRACT	III
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.1 MARINE INTERNET OF THINGS	2
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ	4
2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ	4
2.2 ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΛΙΜΝΕΣ ΚΑΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΥΔΑΤΑ	6
2.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΖΟΥΝ ΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΙΟΤ...9	
2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΙΟΤ ΓΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ (ΠΟΤΑΜΙΑ, ΛΙΜΝΕΣ) ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ	10
2.5 Το ΙΟΤ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΈΞΥΠΝΩΝ ΠΟΛΕΩΝ/ΈΞΥΠΝΟΥ ΚΟΣΜΟΥ	13
2.6 ΣΥΣΚΕΥΕΣ LoRAWAN	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 MARINE INTERNET OF THINGS (MIOT)	18
3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	18
3.2 ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΧΡΗΣΗΣ	19
3.2.1 ΔΙΚΤΥΟ ΠΛΩΤΗΡΩΝ LoRAWAN ΓΙΑ ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ (ΠΟΤΑΜΟΣ CLYDE, ΑΥΣΤΡΑΛΙΑ)	19
3.2.2 LoRA ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ: ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ	20
3.2.3 ΣΤΑΘΜΟΙ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΕ ΛΙΜΝΕΣ (ΜΙΚΡΟΚΟΜΒΟΙ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ) ...	21
3.2.4 ΈΞΥΠΝΕΣ ΑΓΚΥΡΟΒΟΛΗΜΕΝΕΣ ΣΗΜΑΔΟΥΡΕΣ (ΠΥΛΕΣ LoRAWAN ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ)..	22
3.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΓΙΑ ΜΙΟΤ	22
3.3.1 RF ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΝΕΡΟ	22
3.3.2 ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ	23
3.3.3 ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	28
4.1 ΣΕΝΑΡΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	28
4.2 ΚΩΔΙΚΕΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	29
4.2.1 OVER-WATER RF TWO-RAY PATH LOSS + LoRA LINK BUDGET	29
4.2.2 UNDERWATER ACOUSTIC PATH LOSS, SNR, AND CAPACITY	32
4.2.3 UNDERWATER OPTICAL (BEER-LAMBERT) + BER FOR OOK	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	35
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή

1.1 Marine Internet of Things

Το Marine Internet of Things (M²IoT) εφαρμόζει τις αρχές του IoT σε λίμνες, ποτάμια, εκβολές ποταμών και παράκτιες ζώνες, όπου η ανίχνευση και η ενεργοποίηση πρέπει να λειτουργούν εν μέσω των περιορισμών που επιβάλλει το νερό: μεταβλητή διάδοση, βιολογική ρύπανση, δυσμενείς καιρικές συνθήκες και περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι. Οι τυπικοί στόχοι περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού σε πραγματικό χρόνο (θερμοκρασία, pH, διαλυμένο οξυγόνο, θολότητα, χλωροφύλλη-α), την τηλεμετρία πλημμυρών και υδρολογικών δεδομένων (ύψος, ροή, κυματισμός), τη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων και ασφάλειας (σημάνσεις, κλειδαριές, γέφυρες) και τη βελτιστοποίηση της υδατοκαλλιέργειας. Αρχιτεκτονικά, τα συστήματα M²IoT συνδυάζουν αισθητήρες χαμηλής ισχύος και αγκυροβολημένες σηματοδότες με επεξεργασία ακμής, ασφαλή backhaul σε cloud ή αίθουσες ελέγχου και λειτουργίες κύκλου ζωής (ενημερώσεις OTA, βαθμονόμηση, QA δεδομένων). Η πρόκληση —και η ευκαιρία— είναι να ταιριάξουμε κάθε κρίκο αυτής της αλυσίδας με το φυσικό μέσο που πρέπει να διανύσει, διατηρώντας παράλληλα την ισχύ, το κόστος και την αξιοπιστία εντός των λειτουργικών ορίων.

Η μελέτη πολλαπλών μεθόδων ασύρματης συνδεσιμότητας είναι απαραίτητη, καθώς καμία τεχνολογία δεν καλύπτει όλα τα θαλάσσια περιβάλλοντα και απαιτήσεις. Το Over-water RF (π.χ. LoRaWAN, ιδιωτικό LTE/5G, Wi-Fi πάνω από το νερό) υπερέρχει στην επιφανειακή και παράκτια backhaul, προσφέροντας εμβέλεια χιλιομέτρων και χαμηλό επαναλαμβανόμενο κόστος, αλλά είναι ευαίσθητο σε παρεμβολές δύο ακτίνων και στο ύψος της κεραίας. Η υποβρύχια ακουστική είναι το βασικό μέσο για τις υποβρύχιες επικοινωνίες: αντέχει στη θολότητα και στις γεωμετρίες εκτός οπτικής επαφής και καλύπτει δεκάδες έως χιλιάδες μέτρα, αλλά ανταλλάσσει την εμβέλεια με τη διακίνηση δεδομένων λόγω της απορρόφησης που εξαρτάται από τη συχνότητα και του θορύβου του περιβάλλοντος. Οι υποβρύχιες οπτικές ζεύξεις καλύπτουν την αντίθετη θέση — σύντομες, υψηλής ταχύτητας εκπομπές στο μπλε-πράσινο παράθυρο — ιδανικές για την πρόσδεση AUV ή την εκφόρτωση δεδομένων, αλλά εξαρτώνται από τη διαύγεια του νερού, την ευθυγράμμιση και τον προσεκτικό οπτικό σχεδιασμό. Η κατανόηση του πού κάθε μέθοδος ευδοκίμει (και αποτυγχάνει) επιτρέπει στους μηχανικούς να συνθέσουν πολυεπίπεδα δίκτυα κατάλληλα για την αποστολή, αντί να επιβάλλουν μια λύση που ταιριάζει σε όλες τις περιπτώσεις.

1.2 Σκοπός και δομή της πτυχιακής εργασίας

Μια αυστηρή συγκριτική προσέγγιση — προϋπολογισμοί συνδέσεων, μοντέλα καναλιών και απλά πρωτότυπα MATLAB για RF δύο ακτίνων, ακουστική διάδοση και απορρόφηση και οπτικό Beer–Lambert με γεωμετρική σύζευξη — μετατρέπει αυτή την ποικιλομορφία σε πλεονέκτημα. Με μερικές μετρήσεις συγκεκριμένες για κάθε τοποθεσία (σάρωση ύψους ιστού για RF, ring εμβέλειας για ακουστική, δοκιμές ευθυγράμμισης ποιότητας/πεδίου για οπτική), οι σχεδιαστές μπορούν να βαθμονομήσουν μοντέλα με ακρίβεια μερικών dB και να προβλέψουν την κάλυψη, τους ρυθμούς δεδομένων και τις ενεργειακές ανάγκες πριν προχωρήσουν στην αγορά υλικού.

Το αποτέλεσμα είναι μια προβλέψιμη, αναβαθμίσιμη δομή MIoT: RF για συνδεσιμότητα πόλης-ακτής, ακουστική για σταθερή υποβρύχια εμβέλεια και οπτική για υψηλής αξίας εκρήξεις — κάθε μία επιλεγμένη σκόπιμα, εξοπλισμένη για παρατηρησιμότητα και συντονισμένη για να παρέχει αξιόπιστη, χαμηλής ισχύος ανίχνευση σε εσωτερικά ύδατα.

Αυτή η συγκριτική προσέγγιση και μελέτη αποτελεί τον βασικό σκοπό της παρούσης πτυχιακής εργασίας. Έτσι λοιπόν, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζουμε μία γενική επισκόπηση του Διαδικτύου των Πραγμάτων και των βασικών εννοιών του Marine Internet of Things (MioT) συγκεκριμένα. Στο Κεφάλαιο 3 εξειδικεύουμε την μελέτη μας στο MioT και αναφέρουμε τα βασικά μοντέλα καναλιού που θα μελετήσουμε στο σενάριο εργασίας που πραγματοποιείται σε περιβάλλον MATLAB και που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4. Τέλος, παραθέτουμε συμπεράσματα και βιβλιογραφία.

και να σχηματίζουν μοτίβα δεδομένων, με σκοπό να τα μεταδώσουν μέσω της εφαρμογής του internet.

- **Εφαρμογές IoT:** Μια εφαρμογή Internet of Things είναι μια συλλογή συσκευών και λογισμικών που λαμβάνουν και στέλνουν δεδομένα. Είναι κατασκευασμένη να χρησιμοποιεί μηχανική μάθηση και τεχνητή νοημοσύνη. Έτσι αναλύει κατάλληλα τα δεδομένα και λαμβάνει τις σωστές αποφάσεις οι οποίες «μεταφέρονται» πίσω στην συσκευή IoT και αυτή ανταποκρίνεται έξυπνα στα inputs που δέχεται.
- **User Interface (UI):** Κάθε συσκευή που επικοινωνεί με τον χρήστη, πρέπει να διαθέτει, επιπλέον, το κατάλληλο UI που θα επιτρέψει την επικοινωνία αυτή. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιούμε μια εφαρμογή σε smart συσκευή δεν αλληλεπιδρούμε με τον κώδικα που βρίσκεται “πίσω από αυτή”, αλλά με οτιδήποτε βρίσκεται “μπροστά από αυτή” και ονομάζεται User Interface.

Ως λογικό επακόλουθο, μια τόσο σπουδαία τεχνολογία με πάμπολλες, δυνητικά, προεκτάσεις, διαρκώς αναπτυσσόμενη, μπορεί να είναι χρήσιμη σε διάφορους εργασιακούς και επιστημονικούς κλάδους όπως: στις κατασκευές, στις αυτοκινητοβιομηχανίες, στις μεταφορές, στην υγεία, στον δημόσιο τομέα και σε πάρα πολλούς ακόμη. Τα οφέλη μια τέτοιας τεχνολογίας έχουν αναρίθμητες αποχρώσεις. Αυτά που διακρίνονται ως τα πιο σημαντικά είναι τα εξής:

- **Καινοτομία:** Μέσω της συλλογής δεδομένων από τους χρήστες με διάφορα χαρακτηριστικά, όπως δημογραφικά ή συμπεριφορικά, μπορούν να δημιουργήσουν στοχευμένες ενέργειες προώθησης προϊόντων ή υπηρεσιών. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η εταιρεία TESLA, η οποία αξιοποιεί τα δεδομένα των χρηστών με τέτοιο τρόπο, ώστε τα συστήματα αυτόματης οδήγησης που διαθέτει να βελτιώνονται αυτόματα συνεχώς.
- **Ασφάλεια:** Με συνεχή παρακολούθηση των ψηφιακών της υποδομών, μια επιχείρηση μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοσή της και να μειώσει όποιους κινδύνους μπορεί να αντιμετωπίζει.
- **Πρόβλεψη αποτελεσμάτων:** Η συλλογή δεδομένων, σύγχρονων και προτερόχρονων, μπορεί να συμβάλει στην πρόβλεψη πιθανών αποτελεσμάτων μελλοντικά.[1]



Εικόνα 2.2 IoT και περιπτώσεις χρήσης [1]

2.2 Διαδίκτυο των Πραγμάτων σε λίμνες και εσωτερικά ύδατα

Η επανάσταση που έχει φέρει το IoT, όπως είναι λογικό, έχει επεκταθεί και στο τομέα της παρακολούθησης και διαχείρισης των υδάτινων πόρων προσφέροντας για μια ακόμη φορά πρωτοποριακές λύσεις. Μέσω του IoT μας δίνεται η δυνατότητα για τη συνεχή παρακολούθηση λιμνών, ποταμών και άλλων υδάτινων πόρων σε πραγματικό χρόνο. Η τοποθέτηση έξυπνων αισθητήρων και η σύνδεσή τους με ασύρματες τεχνολογίες δικτύου/επικοινωνίας μας δίνει νέες δυνατότητες τόσο για την παρακολούθηση όσο και για την προστασία των υδάτινων πόρων [4].



Εικόνα 2.3 IoT για υδάτινες εφαρμογές [4]

Τα σύγχρονα συστήματα IoT για την παρακολούθηση των υδάτινων πόρων αποτελούνται από μια συγκεκριμένη αρχιτεκτονική διασφαλίζοντας έτσι την σωστή και αποτελεσματική λειτουργία τους.



Εικόνα 2.4 Αισθητήρας pH [4]



Εικόνα 2.5 Αισθητήρας θερμοκρασίας [4]



Εικόνα 2.6 Αισθητήρας υγρασίας εδάφους [4]

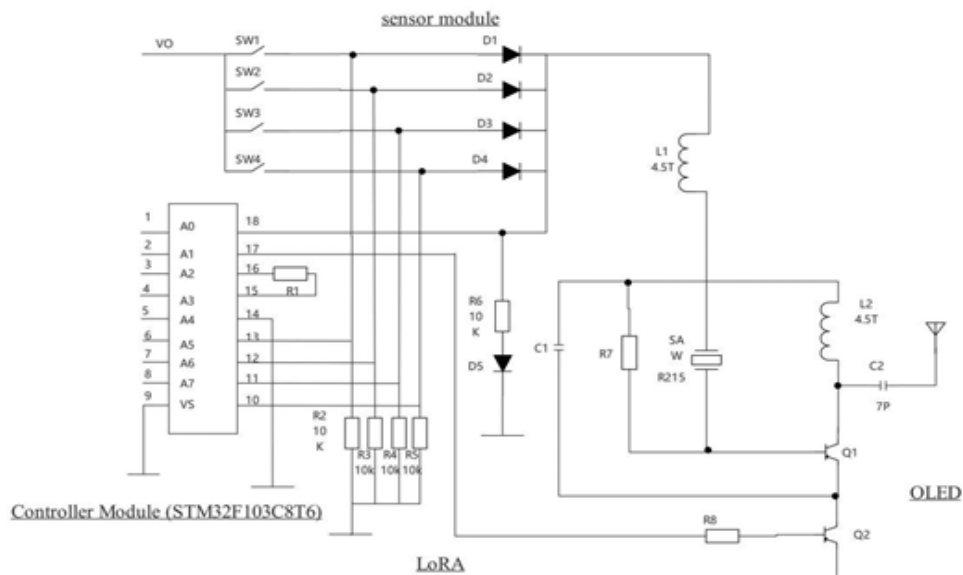
Αρχιτεκτονική Συστήματος

Ένα σύστημα παρακολούθησης του νερού έχει ορισμένα κύρια στοιχεία:

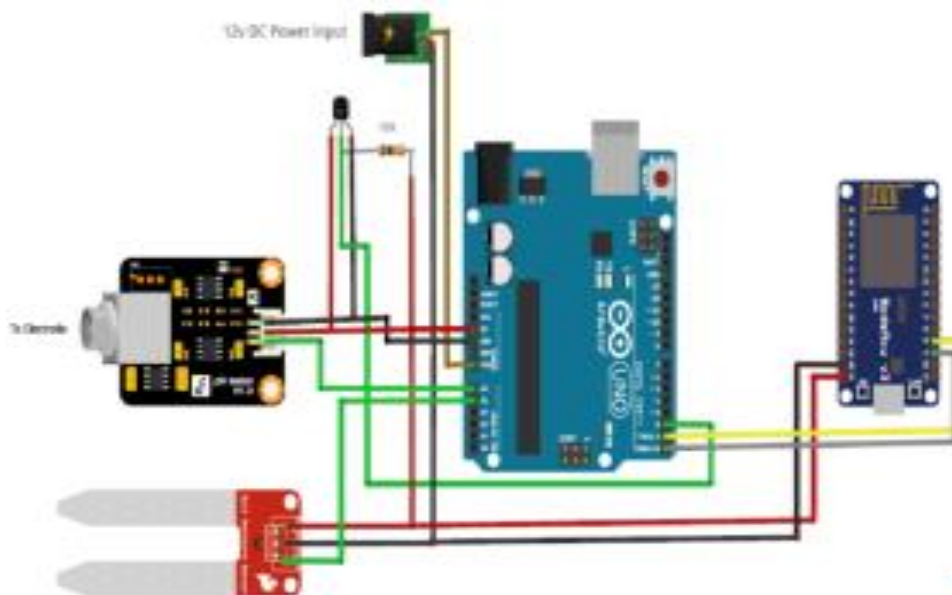
- **Αισθητήρες και Συσκευές Μέτρησης:** Αποτελούν την ραχοκοκαλιά του συστήματος καθώς είναι αρμόδια για την μέτρηση κρίσιμων παραμέτρων για το νερό όπως για παράδειγμα του pH, της θερμοκρασίας, της υγρασίας του εδάφους και της θολότητας. Οι αισθητήρες και γενικά οι συσκευές μέτρησης με την χρήση των κατάλληλων ηλεκτρονικών και του σωστού προγραμματισμού έχουν την δυνατότητα να μεταδίδουν σε κάποια υπηρεσία cloud αλλά και να αποθηκεύουν τοπικά τα δεδομένα τους (π.χ. SDcard).
- **Κόμβος Ελεγκτή:** Ο ελεγκτής είναι αρμόδιος για την λήψη πληροφοριών από τους αισθητήρες και τις συσκευές για τον υπολογισμό και την ανάλυση των δεδομένων, τη μετάδοση των επεξεργασμένων αποτελεσμάτων, καθώς και τον έλεγχο της οθόνης του συστήματος και του κόμβου επικοινωνίας.
- **Οθόνη:** Η οθόνη επιτρέπει στους χρήστες να οπτικοποιούν τις διάφορες μετρήσεις που λαμβάνουν.
- **Μονάδα Ασύρματης Επικοινωνίας:** συλλέγει και μεταδίδει τα δεδομένα, μέσω ενός ασύρματου δικτύου επικοινωνίας (όπως WiFi, LoRa) σε cloud. Με αυτόν τον τρόπο, τόσο η οθόνη όσο και

το ελεγκτής μπορούν να καταγράφουν και να παρατηρούν τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

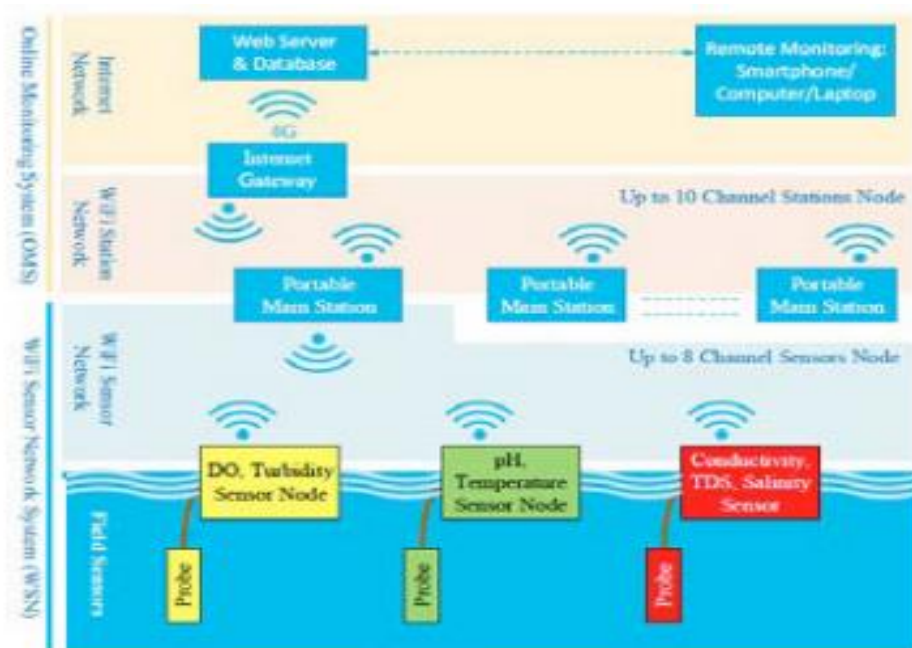
- **Σύστημα Τροφοδοσίας:** Ο ρόλος του συστήματος τροφοδοσίας είναι να παρέχει σταθερή και μακράς διάρκειας τροφοδοσία για ολόκληρο το σύστημα, με απώτερο σκοπό την διασφάλιση της κανονικής λειτουργίας όλων των εξαρτημάτων του [2]-[5].



Εικόνα 2.7 Διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου για LoRa [2]



Εικόνα 2.8 Διάγραμμα κυκλώματος συστήματος παρακολούθησης ποιότητας νερού βασισμένο στο IoT [4]



Εικόνα 2.9 Πλήρες σχήμα συστήματος MIoT. Στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική κάθε δεξαμενή νερού είναι συνδεδεμένη με ένα σύνολο αισθητήρων ικανών να μετρούν παραμέτρους όπως pH, θερμοκρασία και θολότητα [3]

2.3 Περιβαλλοντικές Προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι αισθητήρες IoT

Αυτή την δεδομένη χρονική στιγμή, περισσότεροι από 21,5 δισεκατομμύρια αισθητήρες IoT είναι συνδεδεμένοι παγκοσμίως και αυτοί εκτιμάται ότι το 2030 θα σπάσουν το φράγμα των 40 δισεκατομμυρίων. Υπάρχουν όμως διάφοροι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση, την ευαισθησία και την αξιοπιστία αυτών των τόσο απαραίτητων συστημάτων [6].

Ορισμένοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν τους αισθητήρες IoT είναι οι εξής [6]:

- **Βιορύπανση:** Το φαινόμενο αυτό προκύπτει όταν συσσωρεύονται διάφοροι μικροοργανισμοί στην επιφάνεια του αισθητήρα. Με την πάροδο του χρόνου, διαταράσσεται η ευαισθησία του αισθητήρα καθώς επίσης παρατηρείται παραμόρφωση των δεδομένων και παρεμπόδιση στην επικοινωνία με το υπόλοιπο δίκτυο.
- **Διάβρωση:** Η χρόνια έκθεση σε αλμυρό νερό μπορεί να προκαλέσει διάβρωση καταστρέφοντας τα ηλεκτρονικά μέρη και το περίβλημα των αισθητήρων.
- **Ζημία από πίεση:** Σε βαθιά ύδατα, οι αισθητήρες έρχονται αντιμέτωποι με τεράστιες πιέσεις που ενδέχεται να

παραμορφώσουν ή και να καταστρέψουν διάφορα κρίσιμα εξαρτήματα αν αυτά δεν σφραγιστούν σωστά.

- **Παρεμβολές Σήματος:** Η υποβρύχια επικοινωνία δικτύου είναι επιρρεπής σε παρεμβολές σήματος λόγω περιβαλλοντικής ευαισθησίας, συμπεριλαμβανομένων των αντανάκλασεων, των εμποδίων και των διακυμάνσεων της αλατότητας στο νερό. Αυτό διαταράσσει τη μετάδοση δεδομένων και επηρεάζει την ακρίβεια σε πραγματικό χρόνο σε όλα τα συστήματα IoT.
- **Περιορισμοί μπαταρίας:** Η περιορισμένη χωρητικότητα της μπαταρίας αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στις απομακρυσμένες αναπτύξεις αισθητήρων IoT όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες άμεσες πηγές ενέργειας.

2.4 Εφαρμογές του IoT για παρακολούθηση επιφανειακών υδάτινων σωμάτων (ποτάμια, λίμνες) σε πραγματικό χρόνο

Για την απομακρυσμένη παρακολούθηση και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο όλων των περιβαλλοντικών παραμέτρων των υδάτων το Open ELIoT (Environmental IoT) προσφέρει μια ολοκληρωμένη και οικονομική λύση.

Μέσω αυτής της τεχνολογίας μας παρέχονται σαφείς και στον σωστό χρόνο πληροφορίες για φαινόμενα που χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης όπως πλημμύρες, ξηρασίες και ρύπανση των υδάτων.

Πρόκειται λοιπόν, για ένα πολύτιμο εργαλείο με απώτερο σκοπό την λήψη σωστών και έγκαιρων μέτρων αντιμετώπισης των παραπάνω φαινομένων για την προστασία της δημόσιας υγείας και την εξοικονόμηση δημόσιου χρήματος [7]-[9].



Εικόνα 2.10 Σταθμός παρακολούθησης υδάτων από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) [7]

Λόγω της κλιματικής αλλαγής, του ανεπαρκούς σχεδιασμού για τις πλημμύρες και τις μη αποτελεσματικής διαχείρισης των υδάτων, οι ζημιές από φυσικές και ανθρώπινες καταστροφές, όπως πλημμύρες, ξηρασίες και ρύπανση έχουν αυξηθεί αισθητά. Σύμφωνα με το UNISDR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (2015) περίπου το 90% των φυσικών καταστροφών σχετίζονται με το νερό.

Στην Ευρώπη ο απολογισμός των πλημμυρών και των καταιγίδων κατά την χρονική περίοδο 1998-2009, μέσω 213 καταγεγραμμένων γεγονότων, ήταν τραγικός καθώς στοίχησε την ζωή σε 1126 ανθρώπους και προκάλεσε οικονομικές απώλειες ύψους 96 δισεκατομμυρίων ευρώ.



Εικόνα 2.11 Τοποθέτηση αισθητήρα για την παρακολούθηση υδάτων από την εταιρία EXMACHINA [8]

Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως αν έχουμε ένα σύστημα Open ELIoT για την παρακολούθηση και την ανάλυση δεδομένων υδάτινων πόρων μπορούμε να προβλέψουμε και να αποφύγουμε ένα μεγάλο ποσοστό από διάφορες καταστροφές. Μας δίνεται η δυνατότητα δηλαδή, σε πραγματικό χρόνο να πάρουμε αποφάσεις με σκοπό την προστασία της ανθρώπινης ζωής αλλά και την αποφυγή της καταστροφής του περιβάλλοντος.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως στην Ελλάδα το Open ELIoT παρέχει ήδη ζωντανά δεδομένα για τρία ποτάμια [7]-[9].



Εικόνα 2.12 Δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από τα 3 ποτάμια στην Ελλάδα που παρέχει το Open ELIoT [8]

2.5 Το IoT και η χρήση του για την δημιουργία Έξυπνων Πόλεων/Έξυπνου κόσμου

Το LoRaWAN συνδυάζει κάλυψη σε κλίμακα χιλιομέτρων με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για διάχυτη ανίχνευση και ενεργοποίηση σε πόλεις και, κατ' επέκταση, για εφαρμογές «έξυπνου κόσμου» σε ευρείες περιοχές. Λειτουργώντας σε ζώνες ISM κάτω των GHz, οι ζεύξεις LoRaWAN είναι ανθεκτικές σε μεγάλες αποστάσεις και παρουσιάζουν καλή εμβέλεια σε εσωτερικούς χώρους σε σύγκριση με τις ραδιοεπικοινωνίες υψηλότερης συχνότητας.

Αν και κανένα ασύρματο σύστημα δεν μπορεί να «διαπεράσει μαγικά» κάθε τοίχο, οι μακρές χρονικές διαρκείες των κυματομορφών του LoRaWAN και η διάδοση κάτω από το GHz γενικά μεταφράζονται σε καλύτερη διείσδυση σε κοινά δομικά υλικά (σκυρόδεμα, τούβλα, γυψοσανίδες) και λιγότερες πύλες για ισοδύναμη κάλυψη. Το αποτέλεσμα είναι μια πρακτική διαδρομή προς την πυκνή τηλεμετρία σε κλίμακα πόλης με πολυετή διάρκεια ζωής της μπαταρίας στις συσκευές πεδίου.

Τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν:

- Έξυπνα κτίρια. Συνεχής τηλεμετρία και έλεγχος για ανίχνευση κινδύνων (καπνός, αέριο, διαρροές νερού), βελτιστοποίηση φωτισμού (ρύθμιση φωτισμού ανάλογα με την παρουσία και το φως της ημέρας) και εποπτεία HVAC (απομακρυσμένες ρυθμίσεις θερμοκρασίας/υγρασίας, παρακολούθηση διάρκειας ζωής φίλτρων). Η λειτουργία Class-A του LoRaWAN υποστηρίζει αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης που τροφοδοτούνται από μπαταρία, ενώ οι ελεγκτές που τροφοδοτούνται από το δίκτυο μπορούν να χρησιμοποιούν Class-C για σχεδόν συνεχή downlink, ώστε να επιτρέπουν τον έλεγχο του φωτισμού ή του εξαερισμού.



Εικόνα 2.13 Έξυπνα κτίρια [10]

- Έξυπνα σπίτια. Ένα ευρύ οικοσύστημα συσκευών — έξυπνες κλειδαριές, ανιχνευτές διαρροών και παγετού, οθόνες παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και της ενέργειας, μηχανισμοί φωτισμού και περσίδων — επωφελείται από τη μεγάλη εμβέλεια (που φτάνει σε υπόγεια/γκαράζ) και τις σπάνιες, αποτελεσματικές ανερχόμενες συνδέσεις. Η αναφορά βάσει συμβάντων (π.χ. άνοιγμα/κλείσιμο πόρτας, ανίχνευση διαρροής) διατηρεί τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, ενώ εξακολουθεί να υποστηρίζει έγκαιρες ειδοποιήσεις και αυτοματισμούς.



Εικόνα 2.14 Έξυπνα σπίτια [10]

- Έξυπνο λιανικό εμπόριο. Το LoRaWAN μπορεί να υποστηρίξει την ασφάλεια καταστημάτων (αισθητήρες πορτών/παραθύρων, ετικέτες περιουσιακών στοιχείων), την ανάλυση εντός καταστημάτων (μετρητές επισκεψιμότητας, αισθητήρες θερμοκρασίας ψυκτικής αλυσίδας) και την έξυπνη διαχείριση ενέργειας (υπομέτρηση, κατάσταση ψυκτικών συστημάτων, ανταπόκριση στη ζήτηση για HVAC/φωτισμό). Τα χαμηλά επαναλαμβανόμενα κόστη και οι εύκολες αναβαθμίσεις είναι ελκυστικά για την εγκατάσταση σε πολλαπλές τοποθεσίες, όπου κάθε υποκατάστημα χρειάζεται μια σειρά ανθεκτικών αισθητήρων συνδεδεμένων σε έναν κεντρικό πίνακα ελέγχου [10].

Πέρα από αυτά, οι πόλεις χρησιμοποιούν συνήθως το LoRaWAN για έξυπνο πάρκινγκ, ανίχνευση στάθμης πλήρωσης κάδων απορριμμάτων, έλεγχο φωτισμού δρόμων, παρακολούθηση περιβάλλοντος/ποιότητας αέρα, τηλεμετρία πλημμυρών και αποχέτευσης και μέτρηση παροχών (νερό/αέριο). Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας —μικρά ωφέλιμα φορτία, μεγάλη εμβέλεια, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, χαμηλό συνολικό κόστος— αντιστοιχούν άμεσα σε αυτές τις περιπτώσεις χρήσης.

Δύο σχεδιαστικές σημειώσεις διατηρούν τις εφαρμογές ισχυρές σε μεγάλη κλίμακα: (1) Το LoRaWAN είναι εστιασμένο στην ανερχόμενη ζεύξη από τη σχεδίασή του, οπότε προγραμματίστε σπάνια, συμπαγή μηνύματα και χρησιμοποιήστε τις κατερχόμενες ζεύξεις με φειδώ.

(2) Η απόδοση είναι σκόπιμα χαμηλή, οπότε δεν είναι κατάλληλη για δεδομένα υψηλής ταχύτητας (ήχος/βίντεο). Στην πράξη, πολλές αρχιτεκτονικές «έξυπνων πόλεων» συνδυάζουν το LoRaWAN στην άκρη του αισθητήρα με κυψελοειδές/οπτικό backhaul στις πύλες, δημιουργώντας ένα οικονομικά αποδοτικό δίκτυο ανίχνευσης σε όλη την πόλη.

2.6 Συσκευές LoRaWAN

Οι τερματικές συσκευές (κόμβοι) LoRaWAN είναι αισθητήρες/ενεργοποιητές χαμηλής ισχύος που χρησιμοποιούν LoRa (chirp spread spectrum) σε ζώνες ISM κάτω του GHz για να στέλνουν μικρά, σπάνια φορτία σε μία ή περισσότερες πύλες, οι οποίες αναμεταδίδουν την κίνηση σε έναν διακομιστή δικτύου/εφαρμογής. Η συμπεριφορά MAC και συσκευών (τάξεις, σύνδεση, ασφάλεια, εντολές MAC) τυποποιείται από την LoRa Alliance, καθιστώντας εφικτή τη διαλειτουργικότητα μεταξύ πολλαπλών προμηθευτών και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας για πολλά χρόνια για εφαρμογές IoT ευρείας περιοχής [11].

Ένας τυπικός κόμβος ενσωματώνει:

- **MCU/SoC** (Cortex-M0+/M3/M4 ή RISC-V) που υποστηρίζει βαθύ ύπνο στην περιοχή μA .
- **Πομποδέκτη/SoC LoRa** (π.χ. οικογένεια Semtech SX126x) που παρέχει προγραμματιζόμενους συντελεστές εξάπλωσης και εύρη ζώνης.
- **Αισθητήρες front-end** (περιβαλλοντικοί, βιομηχανικοί 4–20 mA/0–10 V, GNSS κ.λπ.)
- **Υποσύστημα τροφοδοσίας** (πρωτογενές Li-SOCl₂ ή επαναφορτιζόμενο + ηλιακό/υπερπυκνωτής) με ρυθμιστές χαμηλού IQ
- **I/O** (I²C/SPI/UART και συχνά RS-485/Modbus για αισθητήρες brownfield)
- Στοιχεία **εφαρμοστικότητας** (περίβλημα IP65–IP68, πλαστικά ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία, μεμβράνες που αναπνέουν, συμμορφωτική επιστρώση). Οι οδηγοί συσκευών και τα σχέδια αναφοράς της Semtech αποτελούν μια καλή βάση για τη διάταξη RF, τη χρονική ρύθμιση και τις συμβιβαστικές λύσεις σχεδιασμού χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας [12].

Κατηγορίες συσκευών και συμπεριφορά χρονισμού

- **Κατηγορία Α (προεπιλογή):** Ευκαιρία downlink που ενεργοποιείται από uplink μέσω δύο σύντομων παραθύρων λήψης (RX1/RX2) μετά από κάθε uplink — *χαμηλότερη ισχύς; τα downlinks πρέπει να προγραμματίζονται αμέσως μετά από ένα uplink* [11].
- **Κατηγορία Β:** Προσθέτει «ringslots» συγχρονισμένα με το δίκτυο-beacon, επιτρέποντας περιοδική διαθεσιμότητα downlink με μέτριο ενεργειακό κόστος [11].
- **Κατηγορία C:** Το παράθυρο RX είναι ανοιχτό σχεδόν συνεχώς (εκτός από κατά τη διάρκεια του TX) — κατάλληλο για ενεργοποιητές ή στόχους FUOTA όπου η ισχύς είναι άφθονη [11].

Οι λεπτομέρειες λειτουργίας (σχέδια καναλιών, μέγιστο EIRP, όρια παραμονής/λειτουργίας και μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου εφαρμογής ανά ρυθμό δεδομένων) ορίζονται από τις περιφερειακές παραμέτρους. Για παράδειγμα, στο EU863-870 (EU868) πολλές υποζώνες διέπονται από έναν κύκλο λειτουργίας 1 % και τυπικό EIRP κόμβου περίπου ~14 dBm. Στο US915/AU915, ισχύουν κανόνες χρόνου παραμονής και καναλοποίησης αντί για κύκλο λειτουργίας. Προσαρμόζουμε πάντα τα διαστήματα μηνυμάτων και τις επιβεβαιώσεις για να τηρούνται τόσο το τοπικό σχέδιο όσο και η χωρητικότητα της πύλης [13].

Ο ρυθμός δεδομένων LoRaWAN (DR) αντιστοιχεί στον συντελεστή διασποράς και στο εύρος ζώνης: χαμηλότερος DR (υψηλότερος SF) παρέχει μεγαλύτερη εμβέλεια

αλλά μεγαλύτερο χρόνο μετάδοσης. Το ADR (Adaptive Data Rate) επιτρέπει στο δίκτυο να βελτιστοποιεί μια στατική ή αργά κινούμενη συσκευή προς τον χαμηλότερο χρόνο μετάδοσης DR που εξακολουθεί να διατηρεί περιθώριο, μειώνοντας τις συγκρούσεις και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Για κινητούς κόμβους, περιορίζουμε το ADR για να αποφεύγεται η αστάθεια [14]. Τα μέγιστα byte ωφέλιμου φορτίου της εφαρμογής εξαρτώνται από την περιοχή και το DR (οι πίνακες RP αναφέρουν N ανά DR) [13].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Marine Internet of Things (MIoT)

3.1 Γενική επισκόπηση και αρχές σχεδιασμού

Το Marine Internet of Things (MIoT) επεκτείνει τις έννοιες του IoT σε εσωτερικά ύδατα — λίμνες, ταμιευτήρες, ποτάμια, υγράτοπους, εκβολές ποταμών — όπου η ανίχνευση, η τηλεμετρία και η ενεργοποίηση πρέπει να λειτουργούν αξιόπιστα παρά τις προκλήσεις διάδοσης που προκαλούνται από το νερό, τη βιολογική ρύπανση, τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες και τους περιορισμένους πόρους ενέργειας [15].

Οι τυπικοί στόχοι περιλαμβάνουν τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του νερού (θερμοκρασία, pH, διαλυμένο οξυγόνο, θολότητα, χλωροφύλλη-α), της υδρολογίας (ύψος, ροή, κύματα), των περιουσιακών στοιχείων και της ασφάλειας (σηράγγες, προβλήτες, πύλες πλημμύρας) και της υδατοκαλλιέργειας (υγεία αποθεμάτων, συναγερμοί διαλυμένου οξυγόνου), με τροφοδοσία δεδομένων σε πίνακες ελέγχου αποφάσεων και πολιτικές αυτοματοποίησης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο [15]-[16].

Οι αρχιτεκτονικές είναι συνήθως ετερογενείς: οι επιφανειακοί κόμβοι και οι πύλες ακτής επικοινωνούν μέσω RF πάνω από το νερό (π.χ. LoRaWAN, κινητή τηλεφωνία, ιδιωτικό LTE/5G), ενώ τα βυθισμένα όργανα συνδέονται χρησιμοποιώντας υποβρύχια ακουστική (για εμβέλεια/ανθεκτικότητα) ή υποβρύχια οπτική (για σύντομες εκπομπές υψηλής ταχύτητας). Η τροφοδοσία κυριαρχείται από ηλιακή ενέργεια + μπαταρία σε σημαντήρες και κύκλους λειτουργίας μακράς νάρκης σε αισθητήρες. Οι αγκυροβολημένοι σημαντήρες λειτουργούν ως πύλες περιφέρειας που συγκεντρώνουν, προ-φιλτράρουν και προωθούν δεδομένα στο cloud ή σε αίθουσες ελέγχου στις εγκαταστάσεις [15].

Ο σχεδιασμός βασίζεται σε τέσσερις πυλώνες.

- (i) Προϋπολογισμός ζεύξης και επιλογή καναλιού. Χρησιμοποιήστε μοντέλα δύο ακτίνων για RF πάνω από το νερό, προκειμένου να κατανοήσετε τις εξαρτώμενες από την απόσταση εξασθνήσεις και τον κρίσιμο ρόλο του ύψους της κεραίας. Για υποβρύχιες ζεύξεις, ξεκινώντας με μοντέλα διάδοσης και απορρόφησης για την ακουστική και Beer–Lambert για τις οπτικές διαδρομές [15],[22]-[25].
- (ii) Ενέργεια και κύκλος λειτουργίας. Εξισορροπούμε τους ρυθμούς δειγματοληψίας με την εποχική ηλιακή απόδοση, υιοθετούμε αναφορές βάσει συμβάντων και προγραμματίζουμε τις κατερχόμενες ζεύξεις με φειδώ (σχεδιασμός με επίκεντρο τις ανερχόμενες ζεύξεις).
- (iii) Ικανότητα λειτουργίας στο πεδίο. Προδιαγράφουμε περιβλήματα IP65–IP68, πλαστικά ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία, καλωδιακούς

οφιγκτήρες θαλάσσιας ποιότητας, αντιρρυπαντικά (υαλοκαθαριστήρες/χαλκό) και συντηρήσιμες ρουτίνες βαθμονόμησης ανιχνευτών.

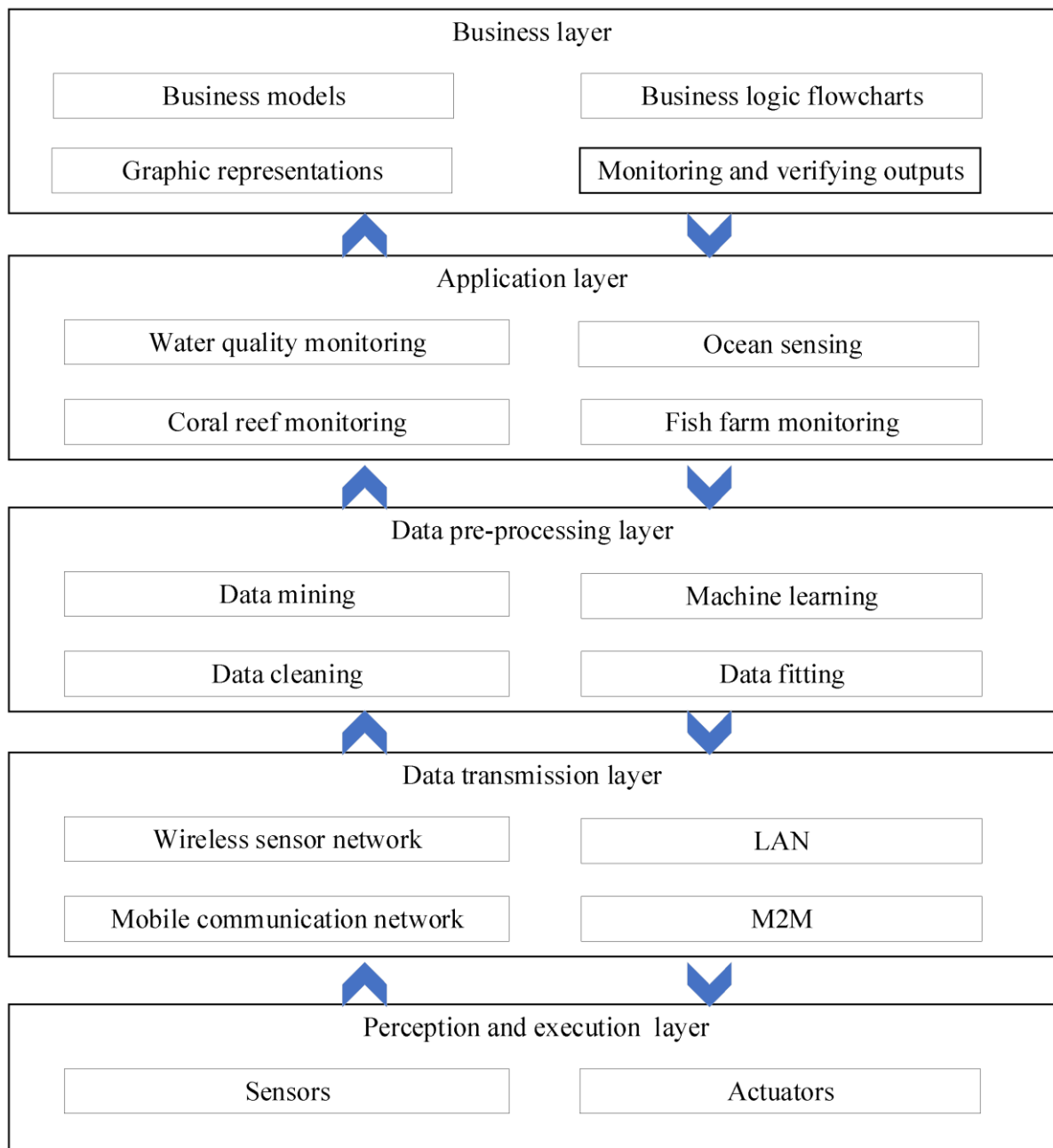
- (iv) Δεδομένα και λειτουργίες. Εφαρμογή ποιοτικού ελέγχου (έλεγχος εύρους, de-spiking), φορτία με εκδόσεις, ασφαλείς ενημερώσεις OTA και παρατηρησιμότητα (RSSI/SNR, τηλεμετρία μπαταρίας). Με αυτές τις πρακτικές, τα συστήματα MIoT μπορούν να προσφέρουν αξιοπιστία σε πολλές εποχές, να παρέχουν έγκαιρες προειδοποιήσεις (π.χ. επιβλαβείς ανθίσεις φυκιών) και να μειώνουν το κόστος της χειροκίνητης δειγματοληψίας, βελτιώνοντας παράλληλα την χωροχρονική κάλυψη [16].

3.2 Μελέτες περιπτώσεων χρήσης

3.2.1 Δίκτυο πλωτών LoRaWAN για υδατοκαλλιέργειες (ποταμός Clyde, Αυστραλία)

Μια σειρά από πλεούμενα με δυνατότητα LoRaWAN που τοποθετήθηκαν σε έναν ποταμό εκβολής μεταδίδουν ατμοσφαιρικές και θαλάσσιες μεταβλητές (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, άνεμος, θερμοκρασία νερού, δείκτες αλατότητας) στους αγρότες μέσω πινάκων ελέγχου σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, επιδεικνύοντας πρακτικά μεγέθη ωφέλιμου φορτίου, αναφορές με γνώμονα τον κύκλο λειτουργίας και εμβέλεια επιφάνειας πολλών χιλιομέτρων με ζεύξεις sub-GHz πάνω από υφάλμυρο νερό [17]. Αυτή η εφαρμογή είναι διδακτική για:

- Μηχανική ωφέλιμου φορτίου: συνοπτικά, δυαδικά πλαίσια τηλεμετρίας (δεκάδες byte) που αντιστοιχίζονται σε LoRaWAN DR που ελαχιστοποιούν τον χρόνο μετάδοσης διατηρώντας παράλληλα την ανάλυση.
- Τοποθέτηση πύλης και ύψος κεραίας: η ανύψωση του ιστού στην ακτή βελτίωσε την κάλυψη και μείωσε τα κενά δύο ακτίνων. Η απόσταση Fresnel πάνω από το νερό ήταν πιο σημαντική από την ισχύ μετάδοσης [17].
- Λειτουργία και ισχύς: οι σημαδούρες με ηλιακή ενέργεια και συντηρητικά διαστήματα αναφοράς πέτυχαν αυτονομία από εποχή σε εποχή. Το φίλτράρισμα άκρων μείωσε τις περιττές ανερχόμενες ζεύξεις (π.χ. υστέρηση σε μεταβλητές που αλλάζουν αργά).
- Αποτέλεσμα: οι χειριστές απέκτησαν έγκαιρη υποστήριξη λήψης αποφάσεων (π.χ. προγράμματα σίτισης, ενεργοποιητές αερισμού), ενώ το σύνολο δεδομένων επέτρεψε την ανάλυση ιστορικών τάσεων για τη συμμόρφωση με τις περιβαλλοντικές απαντήσεις και τη διαχείριση κινδύνων [17].



Εικόνα 3.1 Κοινή πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική για εφαρμογές παρακολούθησης και προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος με βάση το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) [15]

3.2.2 LoRa πάνω από θαλασσινό νερό: εμπειρικές δοκιμές πεδίου

Πολλαπλές μετρήσεις πεδίου αξιολόγησαν τις ζεύξεις LoRa point-to-point απευθείας πάνω από θαλασσινό νερό, χαρακτηρίζοντας την εμβέλεια για διαδρομές με οπτική επαφή (LOS) και μερικώς παρεμποδισμένες διαδρομές και ποσοτικοποιώντας την επίδραση της τοποθέτησης της κεραίας κοντά στην επιφάνεια του νερού [18],[19]. Βασικά συμπεράσματα που αντλούμε:

- Συμπεριφορά δύο ακτίνων στην ύπαιθρο: η ληφθείσα ισχύς παρουσιάζει διακυμάνσεις που εξαρτώνται από την απόσταση και βαθιά εξασθένηση. Μικρές αλλαγές (π.χ. αύξηση του ύψους του ιστού κατά 1-2 m) μπορούν να αποδώσουν μεγάλα οφέλη κάλυψης, αντανakλώντας τη θεωρία των δύο ακτίνων [18]-[24].
- Στιβαρό: οι ζεύξεις sub-GHz ταξιδεύουν πολύ πάνω από το νερό, αλλά η ομίχλη, τα ψεκάσματα και οι συνθήκες των κυμάτων μεταβάλλουν την αποτελεσματική ανάκλαση και μπορούν να προκαλέσουν γρήγορη εξασθένηση. Προγραμματίζουμε περιθώρια εξασθένησης και εφεδρικές πύλες για συνέχεια [18].
- Συνέπεια στο σχεδιασμό: αξιολογούμε τις καμπύλες σχεδιασμού RF με μια ελαφριά δοκιμή εμβέλειας (καταγραφή RSSI/SNR κατά μήκος της διαδρομής ενός σκάφους) και, στη συνέχεια, ρυθμίζουμε τα όρια ύψους/DR/ADR ανάλογα πριν από την κλιμάκωση [18],[19].

3.2.3 Σταθμοί χαμηλού κόστους σε λίμνες (μικροκόμβοι ηλιακής ενέργειας)

Ένα αναπαραγώγιμο πρότυπο για μικρές λίμνες χρησιμοποιεί μικροελεγκτές ηλιακής ενέργειας με αισθητήρες χαμηλού κόστους (pH, DO, EC/TDS, θολότητα). Τα δεδομένα αποθηκεύονται τοπικά και μεταδίδονται μέσω ασύρματου δικτύου μικρής εμβέλειας ή LoRaWAN σε μια πύλη στην ακτή, εξισορροπώντας το κόστος, την ακρίβεια και τη συντήρηση [20]. Αυτό το πρότυπο είναι ιδανικό όταν ο προϋπολογισμός είναι περιορισμένος ή οι τοποθεσίες είναι πολλές:

- Υλικό: αισθητήρες εμπορευμάτων με τεκμηριωμένη απόκλιση και κυτβαθμονόμησης πεδίου, περιβλήματα ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες, αρθρωτές καλωδιώσεις αισθητήρων για αντικατάσταση.
- Ισχύς και λειτουργία: τα επιθετικά προγράμματα αναστολής λειτουργίας και η αναφορά βάσει συμβάντων (π.χ. συναγερμοί κατωφλίου θολότητας) παρατείνουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Τα ταμπλό cloud υποστηρίζουν τον ποιοτικό έλεγχο και τις ειδοποιήσεις.
- Αποτελέσματα: τα έργα παρουσιάζουν επιστημονικά χρήσιμες χρονοσειρές με ένα κλάσμα του κόστους των παραδοσιακών σταθμών, κατάλληλες για διδασκαλία, παρακολούθηση της κοινότητας και πιλοτικά προγράμματα έγκαιρης προειδοποίησης [20].

3.2.4 Έξυπνες αγκυροβολημένες σηματοδούρες (πύλες LoRaWAN στη θάλασσα)

Πρόσφατες εργασίες περιγράφουν αγκυροβολημένες σηματοδούρες που ενσωματώνουν μηχανική σταθερότητα, ανανεώσιμη ενέργεια, στοίβες αισθητήρων και LoRaWAN backhaul, λειτουργώντας συχνά ως τοπικοί συλλέκτες για πολλαπλούς κοντινούς αισθητήρες [21]. Οι τεχνικές παρατηρήσεις περιλαμβάνουν [22]:

- Παράλληλος σχεδιασμός μηχανικής και ισχύος: το σχήμα του σκάφους της σηματοδούρας, η στρατηγική αγκυροβολήσης και η ηλιακή γεωμετρία διαστασιοποιούνται μαζί. Η ενεργειακή ουδετερότητα κατά τη διάρκεια της χειρότερης ακτινοβολίας του μήνα είναι βασική απαίτηση.
- Edge computing: η προ-επεξεργασία στη σηματοδούρα (de-spiking, averaging) περιορίζει τις ανερχόμενες ζευξείς και βελτιώνει την ποιότητα των δεδομένων. Η υποστήριξη FUOTA επιτρέπει απομακρυσμένες διορθώσεις.
- Επικοινωνίες: LoRaWAN από την πλευρά του αισθητήρα. Κυψελοειδής, δορυφορική ή μικροκυματική backhaul upstream. Αυτή η υβριδική προσέγγιση παρέχει ορατότητα από την πόλη προς τη θάλασσα με διαχειρισμό OPEX.

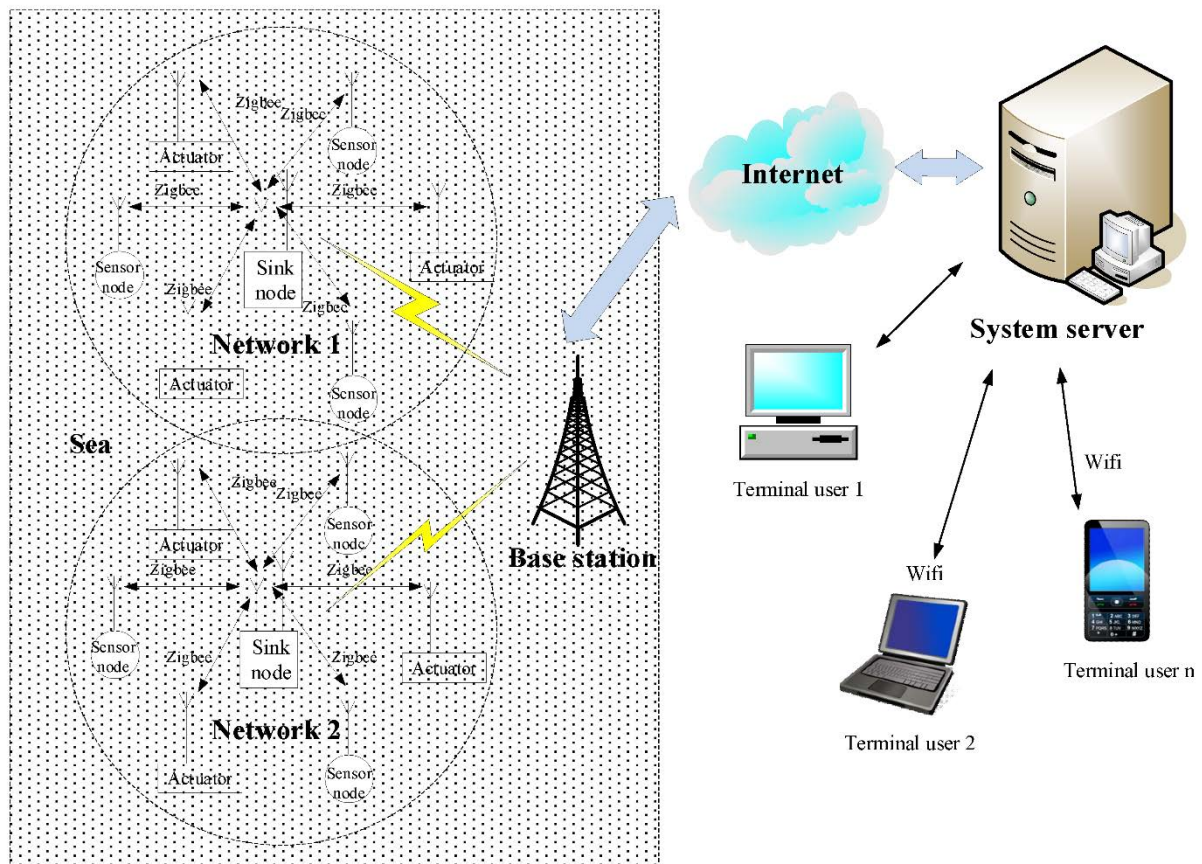
3.3 Μοντέλα καναλιών για MIoT

3.3.1 RF πάνω από το νερό

Σε ανοιχτά νερά με καθαρή οπτική επαφή, το μοντέλο δύο ακτίνων (άμεση + καθρέφτη θαλάσσια αντανάκλαση) καταγράφει τη συμπεριφορά πρώτης τάξης: το ληφθέν πεδίο είναι το διανυσματικό άθροισμα μιας άμεσης διαδρομής και μιας ανακλώμενης διαδρομής με αναστροφή φάσης κοντά στην επίπεδη πρόσπτωση [22].

Αυτό δημιουργεί περιοδικές εξασθενίσεις ανάλογα με την απόσταση, των οποίων οι θέσεις είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στο ύψος των κεραιών. Τα πρακτικά βήματα σχεδιασμού είναι [22],[23]:

- (i) υπολογισμός της απώλειας ελεύθερου χώρου,
- (ii) προσθήκη του όρου παρεμβολής δύο ακτίνων χρησιμοποιώντας τα πραγματικά ύψη των ιστών,
- (iii) σάρωση του ρυθμού δεδομένων και κωδικοποίηση για τον καθορισμό περιθωρίων, (iv) επαλήθευση με δοκιμή μικρής εμβέλειας.



Εικόνα 3.2 Κοινή φυσική αρχιτεκτονική συστημάτων παρακολούθησης και προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος με βάση το IoT [15]

Ο κώδικας RF MATLAB του Κεφαλαίου 4 απεικονίζει τις διακυμάνσεις της απώλειας διαδρομής και το περιθώριο ζεύξης σε σχέση με την απόσταση, καθιστώντας προφανές πώς μια μικρή αύξηση του ύψους μπορεί να μετατοπίσει τα κενά πέρα από την περιοχή εξυπηρέτησης.

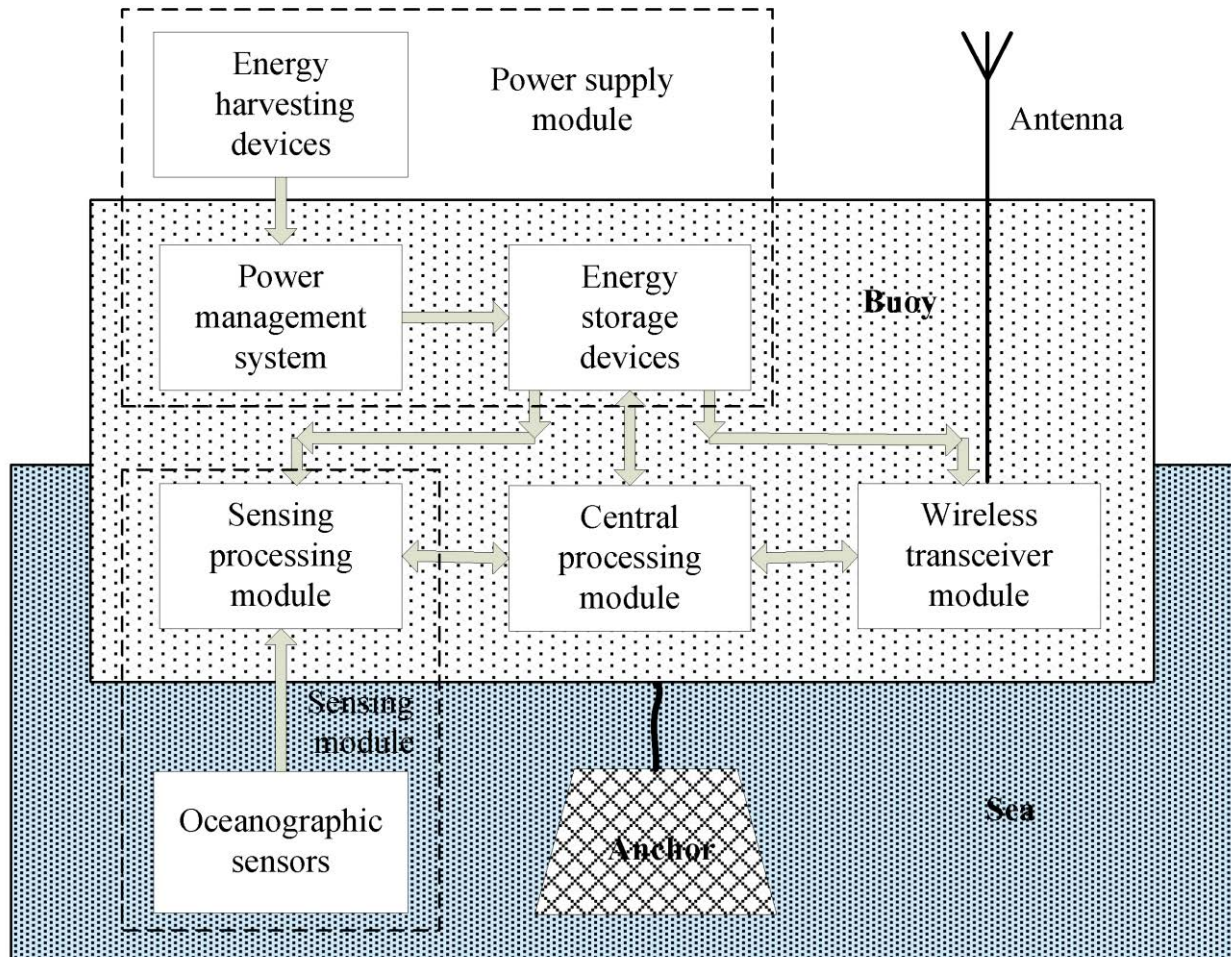
3.3.2 Υποβρύχια ακουστική επικοινωνία

Οι ακουστικές ζεύξεις υπακούουν στη γεωμετρική διάδοση + απορρόφηση. Η απώλεια μετάδοσης (TL) μοντελοποιείται (dB) ως:

$$TL(r, f) \approx 10k \log_{10} r + \alpha(f)r \quad (1)$$

όπου $k \in [1, 2]$ επιτρέπει την μετάβαση από κυλινδρική σε σφαιρική διάδοση και $\alpha(f)$ είναι η απορρόφηση που εξαρτάται από τη συχνότητα (π.χ. Thorp ή Francois–Garrison). Οι χαμηλότερες συχνότητες ευνοούν την εμβέλεια σε βάρος του εύρους ζώνης, ενώ οι υψηλότερες συχνότητες ευνοούν τη διακίνηση δεδομένων σε μικρότερη εμβέλεια. Ο θόρυβος του περιβάλλοντος (ναυτιλία, άνεμος, θερμική) θέτει ένα κατώτατο όριο που ποικίλλει ανάλογα με την τοποθεσία και την εποχή.

Ο κώδικας MATLAB ακουστικής του Κεφαλαίου 4 επιτρέπει τη σάρωση των f , k και εμβέλειας για την ανάγνωση των τάσεων SNR και χωρητικότητας, παρέχοντας έγκαιρη καθοδήγηση για την επιλογή μόντεμ, ρυθμούς συμβόλων και γεωμετρία αποστολής πριν από την ανίχνευση ακτίνων ή τις δοκιμές στη θάλασσα [24].



Εικόνα 3.3 Γενική αρχιτεκτονική ενός κόμβου αισθητήρα παρακολούθησης marine περιβάλλοντος [15]

3.3.3 Υποβρύχια οπτική επικοινωνία

Η υποβρύχια οπτική ασύρματη επικοινωνία (UOWC) αξιοποιεί το μπλε-πράσινο παράθυρο ($\sim 450\text{--}520\text{ nm}$), όπου το νερό παρουσιάζει συγκριτικά χαμηλή εξασθένηση, για να παρέχει δεκάδες μέτρα με ταχύτητες Mbit/s υπό ευνοϊκές συνθήκες διαύγειας. Η απώλεια ισχύος πρώτης τάξης ακολουθεί τον νόμο Beer–Lambert. Η απόδοση καθορίζεται από τη γεωμετρική σύζευξη (απόκλιση δέσμης και διάφραγμα δέκτη), τον τύπο του νερού (απορρόφηση $a(\lambda)$ και σκέδαση $b(\lambda)$) και τον θόρυβο του δέκτη (shot + θερμικός + περιβαλλοντικός). Ο στόχος αυτής της ενότητας είναι να περιγράψει ένα ισχυρό μοντέλο που θα ενταχθεί στον κώδικα του Κεφαλαίου 4 και μπορεί να επεκταθεί στις μετρήσεις του χώρου μας [25]–[27].

Διάδοση και οπτική του νερού

Μοντελοποιούμε την εξασθένηση με τον συντελεστή απόσβεσης

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (2)$$

Για μια παράλληλη σύνδεση μήκους διαδρομής L στο μήκος κύματος λ , ο νόμος Beer–Lambert δίνει τη μεταφορά ισχύος:

$$P_r^{(BL)} = P_t \exp [-c(\lambda)L] \quad (3)$$

Σε πολλές ροές εργασιών σχεδιασμού, οι κατηγορίες νερού Jerlon παρέχουν ονομαστικές τιμές $c(\lambda)$ για το μέγεθος της πρώτης τάξης εύρους. Στη συνέχεια, ανταλλάσσουμε τα φάσματα που έχουν μετρηθεί στον χώρο (π.χ. AC-S ή πίνακες αναζήτησης) για ακρίβεια [25].

Γεωμετρική σύζευξη (ακτίνα, σημείο και διάφραγμα)

Ας υποθέσουμε ότι ο πομπός έχει γωνία απόκλισης θ (ακτίνα) και ο δέκτης έχει κυκλικό διάφραγμα ακτίνας r_a . Αγνοώντας προς το παρόν τη διάθλαση και την κακή ευθυγράμμιση, η ακτίνα του σημείου της ακτίνας σε απόσταση L είναι

$$w(L) = L\theta \quad (4)$$

έτσι η απόδοση συλλογής του δέκτη (υποθέτοντας ομοιόμορφη ακτινοβολία σε όλο το σημείο) είναι προσεγγιστικά ίση με:

$$\eta_{\text{geom}}(L) \approx \min\left(1, \frac{\pi r_a^2}{\pi w(L)^2}\right) = \min\left(1, \frac{r_a^2}{L^2 \theta^2}\right) \quad (5)$$

Συνδυάζοντας τον νόμο Beer–Lambert και τη γεωμετρία, η λαμβανόμενη οπτική ισχύς γίνεται

$$P_r = P_t \eta_{\text{tx}} \eta_{\text{rx}} \eta_{\text{geom}}(L) \exp [-c(\lambda)L] \quad (6)$$

όπου $\eta_{\text{tx}}, \eta_{\text{rx}}$ είναι οι οπτικές αποδόσεις του πομπού/δέκτη (απώλειες παραθύρου, φίλτρου, φακού).

Σφάλμα στόχευσης και jitter. Εάν η γωνιακή κακή ευθυγράμμιση μοντελοποιείται ως γκαουσιανή κατανομή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση σ_θ , μια συνήθης προσέγγιση είναι η εφαρμογή ενός συντελεστή απώλειας στόχευσης $\eta_{\text{pt}} \in (0,1)$ στον γεωμετρικό όρο:

$$P_r \leftarrow P_t \eta_{\text{tx}} \eta_{\text{rx}} \eta_{\text{geom}}(L) \eta_{\text{pt}} e^{-c(\lambda)L} \quad (7)$$

Για στενές δέσμες, η η_{pt} μπορεί να κυριαρχήσει. Οι ζεύξεις τύπου docking συχνά προτιμούν μέτρια απόκλιση για να ανταλλάξουν μερικά dB γεωμετρικής απώλειας με ανθεκτικότητα στο jitter.

Φωτοανίχνευση δέκτη και SNR

Με ευαισθησία R (A/W), εύρος ζώνης οπτικού φίλτρου B (Hz) και συνολική φασματική πυκνότητα ρεύματος θορύβου:

$$N_0 (A^2 / Hz) \quad (8)$$

το ηλεκτρικό SNR στη συσκευή απόφασης (ενσωμάτωση και απόρριψη) μπορεί να προσεγγιστεί με:

$$SNR \approx \frac{(RP_r)^2}{N_0 B} \quad (9)$$

Εάν ο φωτισμός του περιβάλλοντος (π.χ. ηλιακό φως) είναι καλός, χωρίζουμε το N_0 σε τμήματα shot και thermal.

Για μέση οπτική ισχύ περιβάλλοντος P_b και φορτίο ηλεκτρονίου q , έχουμε:

$$N_{0, \text{shot}} \approx 2q(RP_r + RP_b), N_{0, \text{th}} \approx \frac{4kT}{R_L} \quad (10)$$

όπου R_L είναι η αντίσταση φορτίου, k η σταθερά Boltzmann και T η θερμοκρασία. Τα στενά οπτικά φίλτρα ζώνης διέλευσης μειώνουν το P_b και συνεπώς το $N_{0, \text{shot}}$ [25].

BER για απλές διαμορφώσεις (OOK, PPM)

Για On–Off Keying (OOK) με μη συνεπή (ενέργεια) ανίχνευση σε πρόσθετο θόρυβο, μια κοινή τεχνική προσέγγιση για μη κωδικοποιημένο BER είναι:

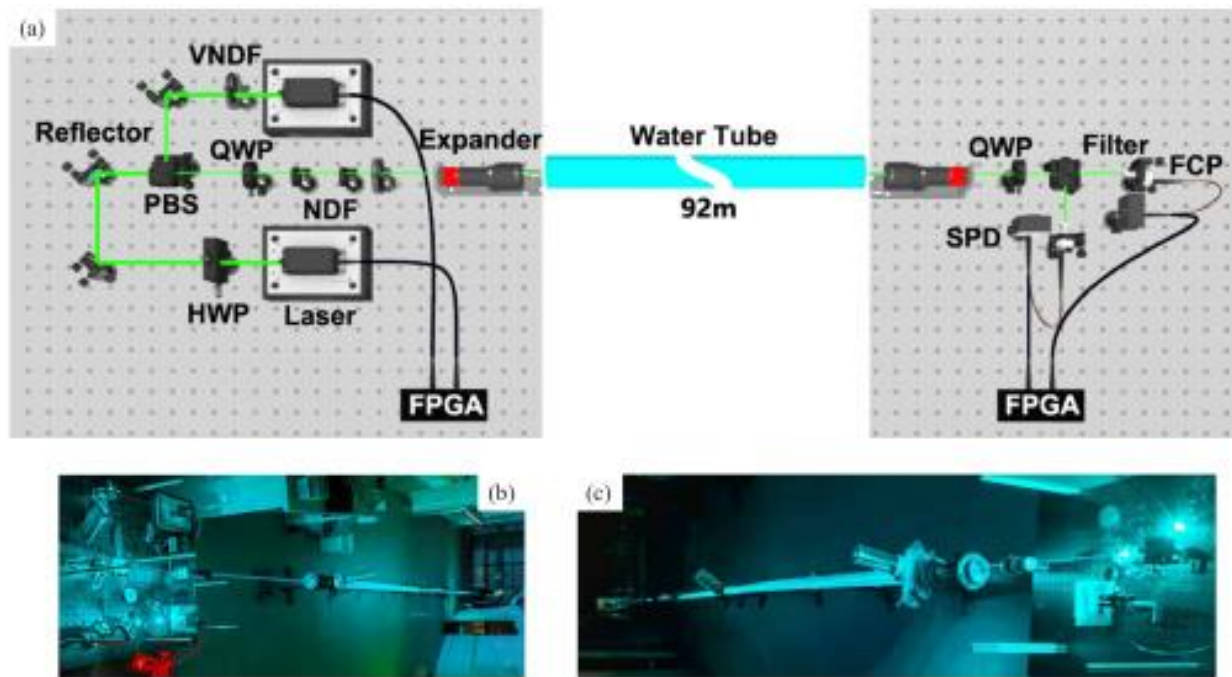
$$BER_{\text{OOK}} \approx Q(\sqrt{SNR}) \quad (11)$$

με $Q(\cdot)$ τη συνάρτηση ουράς Gauss. Για την M-ary Pulse-Position Modulation (PPM)—που συχνά προτιμάται σε οπτικές ζεύξεις για λόγους ενεργειακής απόδοσης—η προσέγγιση (σύμβολα ίσης ενέργειας, ιδανικός συγχρονισμός) ισούται με:

$$BER_{\text{PPM}} \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR}{2}} \right) \quad (12)$$

για δυαδική PPM.

Για σύνηθες M , το σφάλμα συμβόλου κλιμακώνεται με $\log_2 M$ και όρια απόφασης, αλλά το OOK παραμένει μια χρήσιμη βάση αναφοράς για τον αρχικό υπολογισμό μεγέθους [25-27].



Εικόνα 3.4 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος πειράματος UWOC με βάση τη διαμόρφωση πολυπλεξίας πόλωσης και την ανίχνευση μέτρησης φωτονίων: (α) Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης, (β) Πειραματικό διάγραμμα του άκρου του πομπού, (γ) Πειραματικό διάγραμμα του άκρου του δέκτη [27]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Σενάριο εργασίας

4.1 Σενάρια υλοποίησης

Το σενάριο RF δύο ακτίνων πάνω από το νερό είναι ένας συμπαγής τρόπος για να διερευνήσουμε πώς το ύψος της κεραίας, η συχνότητα και το εύρος διαμορφώνουν τις ζεύξεις σε λίμνες/ακτές (π.χ. LoRa/LoRaWAN στα 868 MHz). Πάνω από ήρεμα νερά, το λαμβανόμενο πεδίο είναι το διανυσματικό άθροισμα μιας άμεσης διαδρομής και μιας αντανάκλασης στην επιφάνεια της θάλασσας. Αυτή η παρεμβολή δημιουργεί «κυματισμούς» που εξαρτώνται από την απόσταση με βαθιά κενά.

Σχεδιάζοντας τόσο την απώλεια διαδρομής όσο και το περιθώριο ζεύξης, μπορούμε να δούμε αμέσως πώς η ανύψωση ενός ιστού σηματοδύρας από 1-3 m σε 5-8 m ωθεί το πρώτο κενό πιο μακριά και συχνά ξεκλειδώνει μερικά επιπλέον χιλιόμετρα κάλυψης. Αντιμετωπίζουμε τον συντελεστή ανάκλασης που εμφανίζεται ως ένα σημείο εκκίνησης: για τεχνικές εκτιμήσεις, αυτό είναι αρκετό-για το σχεδιασμό, το βελτιώνουμε με τη διαπερατότητα της θάλασσας, τη γωνία πρόσπτωσης και την τραχύτητα της επιφάνειας (άνεμος/κατάσταση της θάλασσας).

Εάν βρισκόμαστε κοντά σε γκρεμούς, κυματοθραύστες ή μεγάλα σκάφη, αναμένουμε επιπλέον πολλαπλές διαδρομές που δεν καταγράφονται από την απλή διπλή ακτίνα — το χρησιμοποιούμε ως εργαλείο σχεδιασμού πρώτης τάξεως και στη συνέχεια το επαληθεύουμε με μια γρήγορη δοκιμή εμβέλειας και καταγραφή RSSI.

Το σενάριο υποβρύχιας ακουστικής εφαρμόζει το κανονικό μοντέλο διάδοσης και απορρόφησης (Thorp) και το μεταφέρει σε SNR και καμπύλη χωρητικότητας τύπου Shannon. Αυτή είναι η σωστή αφαίρεση για να αποφασίσουμε «ποια κεντρική συχνότητα και εύρος ζώνης θα επιλέξουμε για το σμήνος AUV ή τους αισθητήρες του θαλάσσιου πυθμένα;»

Οι χαμηλότερες συχνότητες εξασφαλίζουν εμβέλεια με κόστος τη χωρητικότητα-οι υψηλότερες συχνότητες εξασφαλίζουν χωρητικότητα με κόστος την εμβέλεια-ακριβώς αυτό που θα δείξει το διάγραμμα καθώς μεταβάλλουμε την συχνότητα από ~8 kHz έως ~40 kHz.

Ο συντελεστής διάδοσης $k \in [1,2]$ μάς επιτρέπει να μετακινηθούμε από κυλινδρικές προς σφαιρικές συνθήκες (τα ρηχά κανάλια συχνά βρίσκονται γύρω στο 1,3–1,6). Για αριθμούς επιπέδου αποστολής, αντικαθιστούμε τον θόρυβο του placeholder με ένα φάσμα με βάση την καμπύλη Wenz και λαμβάνουμε υπόψη τις απώλειες ορίου, το Doppler (κίνηση πλατφόρμας) και τις πολλαπλές διαδρομές που μεταβάλλονται με τον χρόνο. Η τρέχουσα μορφή είναι ιδανική για γρήγορες αντισταθμίσεις και για τον προσδιορισμό του περίπου επιπέδου πηγής, του εύρους ζώνης του διαμορφωτή και των εμβέλειων αποστολής πριν από την εκτέλεση ενός πλήρους ray-tracer ή θαλάσσιας δοκιμής.

Το υποβρύχιο οπτικό (UOWC) σενάριο εκφράζει την εξασθένηση Beer–Lambert και στη συνέχεια δείχνει πώς η ληφθείσα οπτική ισχύς μεταφράζεται σε μια καμπύλη ΟΟΚ BER. Είναι πιο χρήσιμο όταν εξετάζουμε σύντομα άλματα υψηλής ταχύτητας — πρόσδεση AUV, εκφόρτωση δεδομένων ή μεταφορές «burst» οργάνων — ιδιαίτερα σε καθαρά νερά (Jerlov I/II) και μπλε-πράσινα μήκη κύματος (~450–520 nm). Η επίδειξη χρησιμοποιεί ονομαστικές σταθερές εξασθένησης και απλοποιημένο ηλεκτρικό SNR.

Στην πράξη, αυτοί οι τρεις κώδικες καλύπτουν τα κύρια αρχέτυπα συνδέσεων IoT σε λίμνες/θάλασσες: (i) RF στην/πάνω από την επιφάνεια, (ii) ακουστική κάτω από την επιφάνεια για μεγάλη εμβέλεια και ανθεκτικότητα, και (iii) οπτική κάτω από την επιφάνεια για σύντομες εκπομπές υψηλής απόδοσης. Συνεπώς, τα χρησιμοποιούμε ως ρυθμιστές για να κάνουμε γρήγορες προσομοιώσεις (ύψος κεραίας, συχνότητα, εύρος ζώνης, τύπος νερού), να δημιουργούμε εσωτερικά διαγράμματα σχεδιασμού και να ορίζουμε τις προσδοκίες για τις δοκιμές πεδίου.

Η δέουσα μεθοδολογία είναι:

- (1) να εκτελέσουμε τα σενάρια για να οριοθετήσουμε τα εφικτά εύρη/διακίνηση δεδομένων,
- (2) να πραγματοποιήσουμε μια σύντομη δοκιμή με έναν σημαντήρα και έναν βυθισμένο κόμβο για να μετρήσουμε το RSSI/TL σε σχέση με τις καμπύλες,
- (3) να συντονίσουμε τις παραμέτρους (συντελεστής εξάπλωσης, μοντέλο ανάκλασης, εξασθένηση $c(\lambda)$, θόρυβος) έως ότου τα διαγράμματα ταιριάζουν με την πραγματικότητα εντός ~3–6 dB και
- (4) να κλειδώσουμε τα περιθώρια (εξασθένηση, καιρός/εποχικότητα, επιδράσεις βιολογικής ρύπανσης) πριν από την κλιμάκωση. Μόλις βαθμονομηθούν, τα ίδια σενάρια γίνονται τα εργαλεία πρόβλεψης και επαλήθευσης για την επιλογή τοποθεσίας, την απόσταση των πυλών και τα παράθυρα συντήρησης.

4.2 Κώδικες υλοποίησης

4.2.1 Over-water RF two-ray path loss + LoRa link budget

Ο ΚΩΔΙΚΑΣ-1 έχει ως εξής:

```
function demo_overwater_lora_two_ray()  
% Two-ray path loss over water + simple LoRa link margin  
% Assumes flat sea, effective reflection |Gamma|~0.6 with pi phase flip.  
% You can refine Gamma using sea permittivity & roughness if needed.  
  
fc = 868e6; % Hz (EU LoRa)  
lambda = physconst('LightSpeed')/fc;  
ht = 5; hr = 3; % antenna heights (m) above sea
```

```

d = linspace(100, 30000, 300); % link distance (m)
Gamma = -0.6; % effective reflection coefficient (phase ~ pi)

% Two-ray field sum
phi = 2*pi*(sqrt(d.^2 + (ht+hr).^2) - sqrt(d.^2 + (ht-hr).^2))/lambda; % path
diff
Erel = 1 + Gamma.*exp(-1j*phi); % normalized complex field
PL2ray = -20*log10(abs(Erel)) + fspl(d, fc); % dB

% LoRa link budget (example)
Pt_dBm = 14; % EIRP dBm (typical EU)
Gt = 2; Gr = 2; % dBi
NF = 6; % dB
BW = 125e3; % Hz
T = 290; kB = 1.38e-23;
N0_dBmHz = 10*log10(kB*T*1000); % dBm/Hz
N_dBm = N0_dBmHz + 10*log10(BW) + NF; % dBm
SF = 10; % spreading factor (7-12)
SNRmin_dB = -7.5 + (12-SF); % rough LoRa SNR req vs SF
RxSens_dBm = N_dBm + SNRmin_dB;

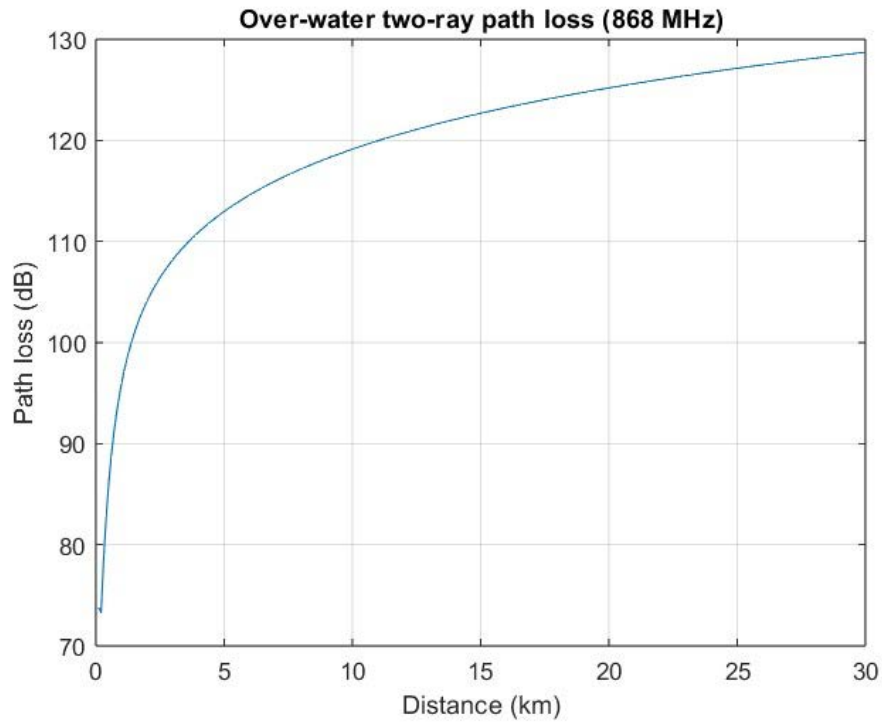
Pr_dBm = Pt_dBm + Gt + Gr - PL2ray; % received power
Margin_dB = Pr_dBm - RxSens_dBm;

figure; plot(d/1000, PL2ray); grid on
xlabel('Distance (km)'); ylabel('Path loss (dB)');
title('Over-water two-ray path loss (868 MHz)');

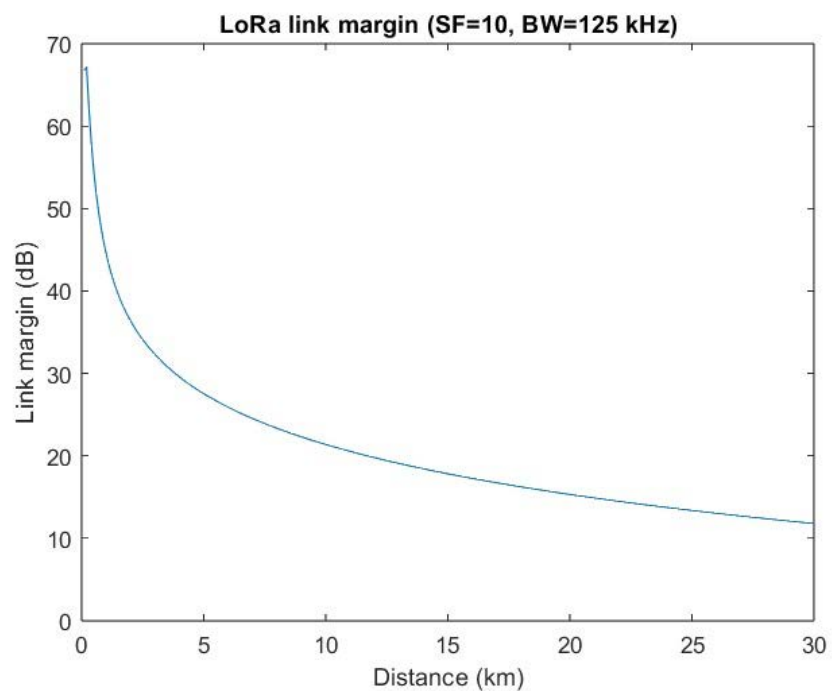
figure; plot(d/1000, Margin_dB); yline(0, '--');
xlabel('Distance (km)'); ylabel('Link margin (dB)');
title(sprintf('LoRa link margin (SF=%d, BW=125 kHz)', SF));
end

function L = fspl(d, fc)
% Free-space path loss in dB; d in m, fc in Hz
lambda = physconst('LightSpeed')/fc;
L = 20*log10(4*pi*d/lambda);
end

```



Εικόνα 4.1 Απώλεια διαδρομής ως προς την απόσταση για μικροκυματική υπέργεια RF ζεύξη



Εικόνα 4.2 Περιθώριο ζεύξης (dB) για LoRa εφαρμογή σε υπέργεια RF ζεύξη

4.2.2 Underwater acoustic path loss, SNR, and capacity

Ο ΚΩΔΙΚΑΣ-2 έχει ως εξής:

```
function demo_underwater_acoustics()
% Transmission loss = spreading + absorption (Thorp)
f = 20e3; % Hz (typical for short-range comms)
r = linspace(50, 5000, 200); % m
k = 1.5; % spreading factor (1=cyl, 2=sph)
Abs_dB_per_km = thorp_absorption(f); % dB/km
TL_dB = 10*k*log10(r) + (Abs_dB_per_km/1000).*r;

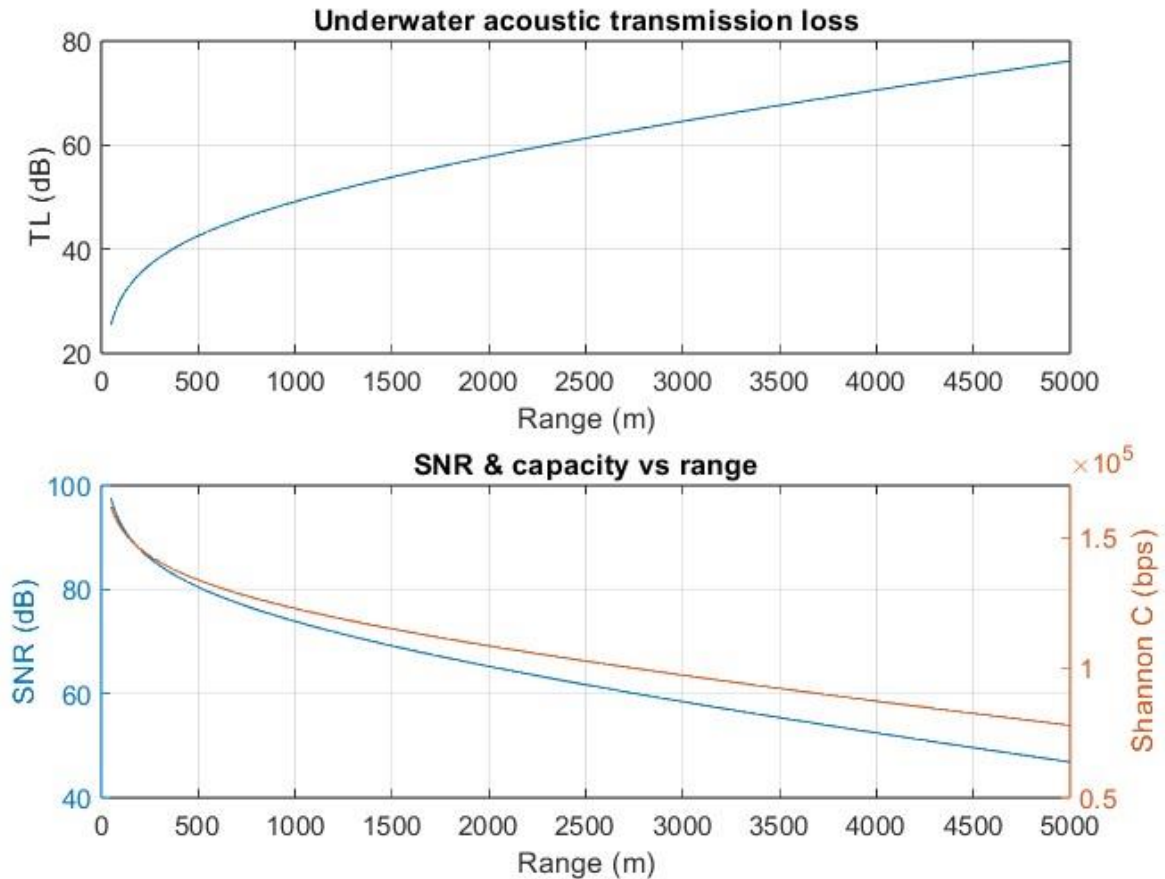
% Simple SNR with white noise density N0 and Rx bandwidth B
B = 5e3; % Hz
N0 = 1e-16; % W/Hz (placeholder)
Pt = 1; % W (acoustic source power proxy)
GtGr_dB = 0; % directivity gains

Pr_W = Pt .* 10.^(-(TL_dB - GtGr_dB)/10); % W
N_W = N0 * B;
SNR = 10*log10(Pr_W./N_W);
C_bps = B .* log2(1 + 10.^(SNR/10));

figure; subplot(2,1,1);
plot(r, TL_dB); grid on; xlabel('Range (m)'); ylabel('TL (dB)');
title('Underwater acoustic transmission loss');

subplot(2,1,2);
yyaxis left; plot(r, SNR); ylabel('SNR (dB)'); grid on
yyaxis right; plot(r, C_bps); ylabel('Shannon C (bps)');
xlabel('Range (m)'); title('SNR & capacity vs range');
end

function a_dBkm = thorp_absorption(f_Hz)
% Thorp absorption (sea water), f in Hz; valid ~few kHz-hundreds kHz
f = f_Hz/1000; % kHz
a_dBkm = 0.11*(f.^2./(1+f.^2)) + 44*(f.^2./(4100+f.^2)) + 2.75e-4*f.^2 +
0.003;
end
```



Εικόνα 4.3 Υποβρύχια μετάδοση σε ακουστικές συχνότητες: υπολογισμός απωλειών και προσδιορισμός SNR και χωρητικότητας ως προς την απόσταση (εμβέλεια)

4.2.3 Underwater optical (Beer–Lambert) + BER for OOK

Ο ΚΩΔΙΚΑΣ-3 έχει ως εξής:

```
function demo_underwater_optical()
% Beer-Lambert attenuation with Jerlov-type coefficients + robust BER plot
lambda_nm = 470; % blue region
c = jerlov_c(lambda_nm, 'I'); % 1/m, Jerlov Type I (clear ocean)
L = linspace(1,120,200); % m

Pt = 10e-3; % 10 mW optical power
Pr = Pt .* exp(-c.*L); % received optical power (no pointing loss)

% Receiver & BER (choose demo-friendly noise so BER spans ~1e-6..1e-1)
R = 0.5; % A/W responsivity
B = 10e6; % 10 Mbps OOK
No = 1e-12; % A2/Hz (raised from 1e-22 to avoid underflow)
SNR = (R*Pr).^2 ./ (No*B); % electrical SNR (approx)
```

```

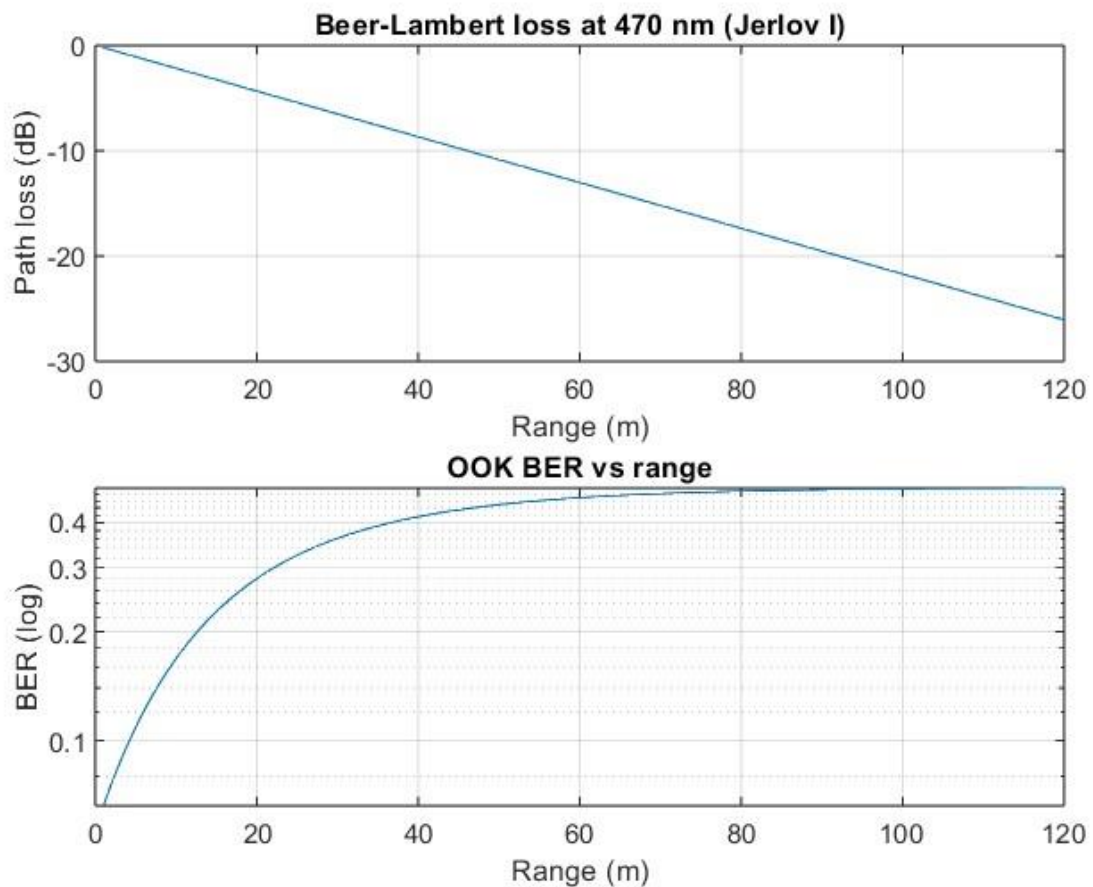
% BER for OOK (Q-function). Clamp to avoid exact zeros in semilogy.
BER = qfunc(sqrt(SNR));
BER = max(BER, 1e-12); % plotting floor only

figure; subplot(2,1,1);
plot(L,10*log10(Pr/Pt)); grid on
xlabel('Range (m)'); ylabel('Path loss (dB)');
title(sprintf('Beer-Lambert loss at %d nm (Jerlov I)',lambda_nm));

subplot(2,1,2);
semilogy(L, BER); grid on
xlabel('Range (m)'); ylabel('BER (log)');
title('OOK BER vs range');
end

function c = jerlov_c(~, typeStr)
% Rough nominal attenuation (1/m). Replace with measured spectra for research
use.
switch upper(typeStr)
case 'I', c = 0.05; % clear ocean
case 'II', c = 0.12; % coastal
case 'III', c = 0.25; % turbid
otherwise, c = 0.12;
end
end

```



Εικόνα 4.4 Υποβρύχια οπτική μετάδοση – απώλειες Beer-Lambert και υπολογισμός BER ως προς την απόσταση (εμβέλεια)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, οι κώδικες που υλοποιήσαμε στο MATLAB για τα 3 σενάρια διάδοσης, RF πάνω από το νερό, υποβρύχια ακουστική διάδοση και υποβρύχια οπτική διάδοση, περιγράφουν ένα σύνολο εργαλείων ασύρματης συνδεσμολογίας για λίμνες και ποτάμια με τα εξής ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά:

- Επιφάνεια/backhaul (RF, LoRa/Wi-Fi/κυψελοειδές): ιδανικό για τηλεμετρία χαμηλής ταχύτητας σε κλίμακα χιλιομέτρων από σημαντήρες και παράκτια μέσα. Έχει περιορισμό ύψους πριν από τον περιορισμό ισχύος: το μοντέλο δύο ακτίνων δείχνει ότι μικρές αυξήσεις του ιστού μπορούν να μετακινήσουν τα σημεία μηδενικής καταστροφικής παρεμβολής εκτός της περιοχής κάλυψης, προσφέροντας συχνά μεγαλύτερη κάλυψη από ό,τι η προσθήκη ισχύος μετάδοσης.
- Υποβρύχια διάδοση με ισχυρή εμβέλεια (ακουστική): ιδανική για δεκάδες έως χιλιάδες μέτρα σε μέτριους ρυθμούς μετάδοσης, ανεκτική στη θολότητα και την έλλειψη οπτικής επαφής. Η εμβέλεια επιτυγχάνεται με χαμηλότερη συχνότητα (υψηλότερη ποινή απορρόφησης σε υψηλό f), ενώ η απόδοση επιτυγχάνεται με υψηλότερο εύρος ζώνης — δεν μπορούμε να έχουμε και τα δύο χωρίς να αυξήσουμε την ισχύ της πηγής.
- Υποβρύχια διάδοση, σύντομη και γρήγορη (οπτική): ο μόνος πρακτικός τρόπος για να επιτύχουμε Mbit/s υποβρύχια — αλλά μόνο για σύντομα άλματα σε καθαρά νερά και καλή ευθυγράμμιση. Η απόδοση είναι εκθετικά ευαίσθητη στον τύπο του νερού και στην κατεύθυνση.

Μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική MIoT που συνδυάζει RF πάνω από το νερό για backhaul επιφάνειας/ακτής, ακουστική διάδοση με υποβρύχια εμβέλεια και οπτική για σύντομες ριπές υψηλής ταχύτητας, δεν περιορίζεται στο να καλύπτει τα σημερινά κενά συνδεσιμότητας, αλλά δημιουργεί ένα επαναλήψιμο σχέδιο αναφοράς για τα εσωτερικά ύδατα.

Μόλις βαθμονομήσουμε τα τρία μοντέλα με μια γρήγορη δοκιμή (σάρωση ύψους για RF, ring εμβέλειας για ακουστική, έλεγχοι πιέσινας/πεδίου για οπτική), μπορούμε να παραμετροποιήσουμε νέες λίμνες και ποτάμια με προβλέψιμο κόστος, ενέργεια και αξιοπιστία. Αυτό μειώνει το σχεδιαστικό ρίσκο, επιταχύνει την αδειοδότηση και την προμήθεια και, κυρίως, επιτρέπει σε μικρές ομάδες να επεκτείνουν τα δίκτυα από μερικές σηματοδότες σε υφάσματα ανίχνευσης σε ολόκληρη τη λεκάνη χωρίς να επανασχεδιάζουν κάθε φορά τη στοίβα.

Καθώς συσσωρεύονται σύνολα δεδομένων, τα μοντέλα ML που έχουν εκπαιδευτεί σε σήματα πολλαπλών εποχών και πολλαπλών τρόπων (επιφανειακά + υποβρύχια) βελτιώνουν τις προβλέψεις και την ανίχνευση ανωμαλιών, αυξάνοντας την αξία με την πάροδο του χρόνου.

Τέλος, αυτή η προσέγγιση υποστηρίζει την ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα σε μεγάλη κλίμακα. Οι ενεργειακά ουδέτερες σηματοδούρες, οι αισθητήρες μακράς διάρκειας και το αραιό backhaul διατηρούν το OPEX χαμηλό και το αποτύπωμα άνθρακα μικρό, καθιστώντας την κάλυψη όλο το χρόνο προσιτή για δήμους, επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και ερευνητικές συνέργειες.

Τα υβριδικά backhaul (LoRaWAN και κινητά/δορυφορικά) παρέχουν ομαλή υποβάθμιση κατά τη διάρκεια καταιγίδων, ενώ οι πρακτικές ανοιχτών δεδομένων ενθαρρύνουν την κοινοτική επιστήμη και τη διαυπηρεσιακή συνεργασία. Εν ολίγοις, ταιριάζοντας κάθε μέσο με αυτό που κάνει καλύτερα —και βασίζοντας το σχεδιασμό σε απλά, επικυρωμένα μοντέλα— μπορούμε να δημιουργήσουμε μια ανθεκτική, αναβαθμίσιμη υποδομή για την επόμενη δεκαετία του Marine IoT: καλύτερη περιβαλλοντική διαχείριση, ασφαλέστερες πλωτές οδοί και ταχύτερη, τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Τι Είναι το Internet of Things (IoT) και Πώς Λειτουργεί.
<https://bigblue.academy/gr/internet-of-things-iot>
- [2] Design and realization of a water quality monitoring system based on the Internet of Things.
<https://iwaponline.com/wpt/article/19/9/3538/104555/Design-and-realization-of-a-water-quality>
- [3] Chowdury, Mohammad Salah Uddin, et al. "IoT based real-time river water quality monitoring system." *Procedia computer science* 155 (2019): 161-168.
- [4] Lakshmikantha, Varsha, et al. "IoT based smart water quality monitoring system." *Global Transitions Proceedings* 2.2 (2021): 181-186.
- [5] Veda, Parthiban, et al. "Aquatic Conservation Monitoring for River and Lake Ecosystems with IoT and Cloud Computing." *2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*. IEEE, 2024.
- [6] How IoT Ocean Sensors are Calibrated and Validated in Harsh Environments.
<https://sinay.ai/en/how-iot-ocean-sensors-are-calibrated-and-validated-in-harsh-environments/>
- [7] Σύστημα IoT παρακολούθησης επιφανειακών υδάτων από ΕΛΚΕΘΕ και Ex Machina.
<https://www.openeliot.com>
- [8] Case study: Environmental IoT (ELIoT).
<https://exm.gr/case-study-environmental-iot/>
- [9] UNISDR annual report 2015
<https://www.undrr.org/publication/unisdr-annual-report-2015>
- [10] Εσωτερική τοποθέτηση λύσεις βασισμένες στο Lorawan.
<https://www.mokolora.com/el/>
- [11] Arasteh, Hamidreza, et al. "Iot-based smart cities: A survey." *2016 IEEE 16th international conference on environment and electrical engineering (EEEIC)*. IEEE, 2016.
- [12] Syed, Abbas Shah, et al. "IoT in smart cities: A survey of technologies, practices and challenges." *Smart Cities* 4.2 (2021): 429-475.
- [13] Rajab, Husam, and Tibor Cinkelr. "IoT based smart cities." *2018 international symposium on networks, computers and communications (ISNCC)*. IEEE, 2018.
- [14] Mehmood, Yasir, et al. "Internet-of-things-based smart cities: Recent advances and challenges." *IEEE Communications Magazine* 55.9 (2017): 16-24.
- [15] Xu, Guobao, Yanjun Shi, Xueyan Sun, and Weiming Shen. 2019. "Internet of Things in Marine Environment Monitoring: A Review" *Sensors* 19, no. 7: 1711.
<https://doi.org/10.3390/s19071711>
- [16] Ooko, Samson Otieno, Laura Cheptegei, and Simon M. Karume. "Application of machine learning for real-time water quality monitoring in developing countries: A review." *Sustainable Futures* 10 (2025): 100984.
- [17] Bates, Harvey, Matthew Pierce, and Allen Benter. 2021. "Real-Time Environmental Monitoring for Aquaculture Using a LoRaWAN-Based IoT Sensor Network" *Sensors* 21, no. 23: 7963. <https://doi.org/10.3390/s21237963>

- [18] Jovalekic N, Drndarevic V, Pietrosevoli E, Zennaro IDAM. Experimental Study of LoRa Transmission over Seawater. *Sensors* (Basel). 2018 Aug 29;18(9):2853. doi: 10.3390/s18092853. PMID: 30158501; PMCID: PMC6163321.
- [19] Taamté, Jacob Mbarndouka, et al. "Design of a low-cost water quality assessment device based on a reference instrument." *Urban Water Journal* 22.4 (2025): 397-418.
- [20] Lal, Kartikay, et al. "Low-cost IoT based system for lake water quality monitoring." *Plos one* 19.3 (2024): e0299089.
- [21] Majumder, Arnas, et al. "Buoys for marine weather data monitoring and LoRaWAN communication." *Ocean Engineering* 313 (2024): 119521.
- [22] d'Orey, Pedro M., et al. "Assessing short-range Shore-to-Shore (S2S) and Shore-to-Vessel (S2V) WiFi communications." *Computer Networks* 249 (2024): 110505.
- [23] Xu, Tianxin, Daokun Ma, Wei Fang, and Yujie Huang. 2025. "Experimental Study on the Propagation Characteristics of LoRa Signals in Maize Fields" *Electronics* 14, no. 11: 2156. <https://doi.org/10.3390/electronics14112156>
- [24] Morozs, Nils, et al. "Channel modeling for underwater acoustic network simulation." *IEEE Access* 8 (2020): 136151-136175.
- [25] Waduge, Tharuka Govinda, Boon-Chong Seet, and Kay Vopel. 2024. "Optimal Signal Wavelengths for Underwater Optical Wireless Communication under Sunlight in Stratified Waters" *Journal of Sensor and Actuator Networks* 13, no. 5: 54. <https://doi.org/10.3390/jsan13050054>
- [26] Tian R, Wang T, Shen X, Zhu R, Jiang L, Lu Y, Lu H, Song Y, Zhang P. 108 m Underwater Wireless Optical Communication Using a 490 nm Blue VECSEL and an AOM. *Sensors* (Basel). 2024 Apr 19;24(8):2609. doi: 10.3390/s24082609. PMID: 38676226; PMCID: PMC11055070.
- [27] Gai, Lei, et al. "Underwater wireless optical communication employing polarization multiplexing modulation and photon counting detection." *Optics Express* 30.24 (2022): 43301-43316.