



ΠΑΝΕΜΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία

Διπλωματική Εργασία

**“Σχεδίαση και ανάπτυξη δικτύου ZIGBEE-MESH
για παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών
σε πλοίο”**

Μάριος Βυθούλκας

«ΜΝΣΝΔ 24008»

Επιβλέπων:

Χρήστος Βαζούρας

Πειραιάς

Απρίλιος 2026

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας των πιθανών συνεπειών αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

«Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίστηκε από τη ΕΔιΕ του ΔΠΜΣ σύμφωνα με τον Κανονισμό Λειτουργίας του ΔΠΜΣ ‘Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία’.

Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

-ΜΕΛΟΣ Α΄: Βαζούρας Χρήστος

-ΜΕΛΟΣ Β΄: Φαφαλιός Μιχαήλ

-ΜΕΛΟΣ Γ΄: Βαρδούλιας Γεώργιος

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.»

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα : «Σχεδίαση και ανάπτυξη δικτύου ZIGBEE-MESH για παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών σε πλοίο», υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων με το Πανεπιστήμιο Πειραιώς όπου με την ολοκλήρωση αυτής πλησιάζει ο τερματισμός του μεταπτυχιακού προγράμματος στην Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία. Στο σημείο αυτό αισθάνομαι την ειλικρινέστατη ανάγκη να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση αυτού μου του εγχειρήματος: Κατ' αρχάς στον επιβλέπων καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας τον Χρήστο Βαζούρα για την συνεχή καθοδήγηση του. Καθώς ως αρωγός με τις ουσιώδεις συμβουλές και την αμέριστη υποστήριξη του, με καθοδήγησε σε όλο το χρονικό διάστημα εκπόνησης την εργασίας . Εν συνεχεία θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, τους συναδέλφους μου και τους συμφοιτητές μου, άτομα αγαπητά και αξιόλογα για εμένα, που με την καθημερινή τους υποστήριξη και την θετική τους σκέψη συνέβαλλαν ο καθένας με το δικό του τρόπο στην εκπλήρωση των στόχων που είχα θέσει. Τέλος επιθυμώ να εκφράσω τα μέγιστα «ευχαριστώ» εκ βάθους καρδιάς στην οικογένεια μου για την βοήθεια και την στήριξη σε όλα τα επίπεδα της ζωής μου καθώς και για την σφυρηλάτηση του χαρακτήρα μου με αξίες, αρχές και ιδέες. Σε όλα αυτά τα άτομα αφιερώνεται αυτή η εργασία.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	03
Πίνακας Περιεχομένων.....	02
1. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	05
1.1 Περιβαλλοντικές Συνθήκες σε Ναυτιλιακό Περιβάλλον.....	05
1.1.1 Παράγοντες που χρήζουν παρακολούθησης.....	05
1.1.2 Επιπτώσεις δυσμενών συνθηκών στο πλήρωμα και στο φορτίο.....	07
1.2 Τεχνολογία ZigBee.....	07
1.2.1 Χαρακτηριστικά του ZigBee.....	07
1.2.2 Συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τεχνολογιών.....	07
1.2.3 Χρήσεις του ZigBee σε βιομηχανικές και ναυτιλιακές εφαρμογές.....	08
1.3 Τοπολογία MESH Δικτύου.....	08
1.3.1 Περιγραφή της τοπολογίας MESH.....	08
1.3.2 Πλεονεκτήματα MESH σε περιβάλλοντα με παρεμβολές και εμπόδια.....	09
1.3.3 Ρόλοι κόμβων: Coordinator, Router, End Device.....	10
2. Ανάλυση Απαιτήσεων Συστήματος.....	10
2.1 Τεχνικές Απαιτήσεις.....	10
2.1.1 Χώροι παρακολούθησης.....	11
2.1.2 Τύποι αισθητήρων που θα ενσωματωθούν.....	11
2.1.3 Πηγές ενέργειας.....	11
2.1.4 ZigBee modules.....	11
2.2 Λογισμικό και Πρωτόκολλα.....	12
2.2.1 Επεξεργασία και αποστολή δεδομένων.....	12
3. Σχεδίαση του ZigBee MESH Δικτύου.....	13
3.1 Τοπολογία και Αρχιτεκτονική Δικτύου.....	13
3.1.1 Ανάλυση χωροθέτησης κόμβων εντός πλοίου.....	13
3.1.2 Διάγραμμα δικτύου	13
3.2 Ρύθμιση Κόμβων ZigBee	14
3.2.1 Διαμόρφωση coordinator	14
3.2.2 Εγκατάσταση και pairing routers και end devices	14
3.3 Επικοινωνία και Ροή Δεδομένων	15
3.3.1 Δομή πακέτων δεδομένων.....	15
3.3.2 Εντοπισμός και διαχείριση αποτυχιών επικοινωνίας.....	15
4. Αξιολόγηση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων, καθώς και πλεονεκτήματα του ZigBee έναντι Άλλων Τεχνολογιών.....	16
4.1 Απόδοση του συστήματος.....	16
4.2 Ανθεκτικότητα σε απώλειες κόμβων.....	16
4.3 Επεκτασιμότητα και ευελιξία δικτύου.....	16
5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	16
5.1 Προτάσεις για βελτίωση.....	17
5.2 Εφαρμογές σε άλλες περιοχές της ναυτιλίας ή της βιομηχανίας.....	17
Βιβλιογραφία.....	18

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην επεξήγηση πως ένα πλοίο μπορεί να λαμβάνει ζωντανά δεδομένα από παράγοντες – χώρους ενδιαφέροντος, ώστε να μπορεί να ερμηνεύει, να προστατεύει γεγονότα και καταστάσεις μέσα από το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου βασισμένου στην τεχνολογία ZigBee με τοπολογία πλέγματος (Mesh). Παραδοσιακά, η επιτήρηση παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η παρουσία επικίνδυνων αερίων και οι μηχανικοί κραδασμοί στο μηχανοστάσιο ή τα αμπάρια φορτίου, βασίζεται σε ενσύρματα συστήματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος εγκατάστασης, πολυπλοκότητα στη συντήρηση και δυσκολία επέκτασης. Στόχος της έρευνας είναι η πρόταση μιας αξιόπιστης, ασύρματης και ενεργειακά αποδοτικής εναλλακτικής λύσης.

Αρχικά αναλύονται όλοι οι παράγοντες ενδιαφέροντος καθώς και οι δυσκολίες που έρχονται με σκοπό την διάδοση της πληροφορίας. Γίνεται ανάλυση του συστήματος ZigBee Mesh και πως αυτό είναι ικανό με χαμηλό σχετικό οικονομικό κόστος να υπερπηδήσει αυτά τα προβλήματα και να φέρει στο χειριστή χαρακτηριστικά εύκολα για την χρήση του και να είναι μόνο συλλέκτης της πληροφορίας και τίποτα παραπάνω, μέσω του προτύπου IEEE 802.15.4, του πρωτοκόλλου δρομολόγησης AODV, το δίκτυο αποκτά την ικανότητα δυναμικής ανακάλυψης εναλλακτικών διαδρομών επικοινωνίας) και self-healing σε περίπτωση που κάποιο φυσικό εμπόδιο διακόψει την οπτική επαφή μεταξύ των κόμβων.

Αν και υπάρχουν αρκετά πομποδέκτες στο εμπόριο που μπορεί να είναι ικανοί αυτή τη χρήση, η διπλωματική στηρίχτηκε στον Π/Δ χαμηλής κατανάλωσης AT86RF230, κατανέμοντας τους ρόλους του Συντονιστή (Coordinator), των δρομολογητών (Routers) και των τερματικών συσκευών (End Devices) με τους αισθητήρες του κάθε χώρου.

Από την αξιολόγηση του σχεδιασμού προκύπτει ότι το δίκτυο ZigBee προσφέρει εξαιρετική αυτονομία για τους απομακρυσμένους αισθητήρες που λειτουργούν με μπαταρία, δραστική μείωση του κόστους υλοποίησης και υψηλό ποσοστό επιτυχούς.

Τέλος, προτείνονται προτάσεις για μελλοντική αξιοποίηση του συστήματος, όπως η ενσωμάτωση αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning) για την προγνωστική συντήρηση του μηχανολογικού εξοπλισμού και η αξιοποίηση τεχνικών συλλογής ενέργειας (energy harvesting), ανοίγοντας τον δρόμο για τη μετάβαση στη νέα εποχή των «Έξυπνων Πλοίων» (Smart Ships).

Λέξεις-κλειδιά: ZigBee, Δίκτυο Πλέγματος (Mesh), Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, Ναυτιλία, Έξυπνο Πλοίο (Smart Ship), IEEE 802.15.4, Προγνωστική Συντήρηση, IoT, MQTT.

Abstract

This thesis focuses on explaining how a ship can receive live data from various factors and areas of interest, enabling it to interpret and safeguard against events and situations through the design and development of a wireless network based on ZigBee technology with a Mesh topology. Traditionally, the monitoring of parameters such as temperature, humidity, the presence of hazardous gases, and mechanical vibrations in the engine room or cargo holds, relies on wired systems. These are characterized by high installation costs, maintenance complexity, and difficulty in expansion. The objective of this research is to propose a reliable, wireless, and energy-efficient alternative solution.

Initially, all factors of interest are analyzed, as well as the difficulties that arise regarding information propagation. An analysis of the ZigBee Mesh system is conducted, demonstrating how it is capable, at a relatively low economic cost, of overcoming these problems. It provides the operator with user-friendly features, allowing them to act solely as an information collector and nothing more. Through the IEEE 802.15.4 standard and the AODV routing protocol, the network acquires the capability of dynamic discovery of alternative communication routes and self-healing in the event that a physical obstacle disrupts the line of sight between the nodes.

Although there are several transceivers on the market that may be capable of this application, this thesis relied on the low-power AT86RF230 transceiver, distributing the roles of the Coordinator, Routers, and End Devices alongside the sensors of each area.

From the evaluation of the design, it is concluded that the ZigBee network offers excellent autonomy for the remote battery-operated sensors, a drastic reduction in implementation costs, and a high success rate.

Finally, proposals for the future utilization of the system are suggested, such as the integration of Machine Learning algorithms for the predictive maintenance of mechanical equipment, and the utilization of energy harvesting techniques, paving the way for the transition into the new era of "Smart Ships".

1. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο 1, θα αναλύσουμε το τι πρέπει να γνωρίζουμε καθώς θα επισημανθούν βασικές έννοιες σχετικά με την Σχεδιάση και την ανάπτυξη ενός δικτύου ZIGBEE-MESH με σκοπό την παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών σε ένα πλοίο. Συγκεκριμένα, θα αναλύσουμε παράγοντες που χρειάζονται παρακολούθηση, επιπτώσεις δυσμενών συνθηκών στο πλήρωμα και στο φορτίο καθώς και τι είναι η τεχνολογία ZIGBEE-MESH τα προτεραιότητα που μπορεί να έχει και την χρήση του σε άλλες εφαρμογές.

1.1 Περιβαλλοντικές Συνθήκες σε Ναυτιλιακό Περιβάλλον

Ένα πλοίο, το οποίο διαχειρίζεται από μια ναυτιλιακή εταιρεία απαρτίζεται από διάφορα είδη εγκαταστάσεων μηχανικών, ηλεκτρονικών, ηλεκτρολογικών καθώς και βοηθητικών μηχανημάτων. Η αξιόπιστη λειτουργία των συστημάτων και η υγεία του πληρώματος εξαρτώνται από τη συνεχή παρακολούθηση συγκεκριμένων παραμέτρων.

1.1.1 Παράγοντες που χρήζουν παρακολούθηση

Παράγοντες που χρήζουν παρακολούθηση σε ένα πλοίο μπορεί να είναι: Εξωτερικοί (δηλ. Μετεωρολογικοί, Ωκεανογραφικοί), Εσωτερικοί (θερμοκρασία, συγκέντρωση αερίων, αερισμός – ποιότητα αέρα και δονήσεις).

Ιδιαίτερη σημασία παίζουν οι μετεωρολογικοί – ωκεανογραφικοί παράγοντες, γιατί θα σημάνουν την σωστή εκμετάλλευση του πλοίου, το χρόνο που θα φτάσουν στο προορισμό τους, για την σωστή αποφυγή ακραίων φαινομένων αλλά και την ασφάλεια του προσωπικού και του φορτίου το οποίο φέρουν.

Συγκεκριμένα, **το Sea State** (κατάσταση θάλασσας) είναι τα κύματα βαρύτητας δημιουργούνται από την πνοή του ανέμου πάνω από την θάλασσα, και από την κίνηση των πλοίων επιφανείας, ή άλλων σωμάτων που κινούνται σε μικρό βάθος. Ο άνεμος είναι βέβαια η κυριότερη αιτία δημιουργίας κυματισμών στη θάλασσα. Η διαταραχή της θάλασσας είναι ανάλογη με την ένταση που έχει άνεμος, και αναφέρεται σαν “κατάσταση της θάλασσας” (sea state). Τα κύματα δεν σταματούν να υπάρχουν αμέσως μόλις σταματήσει ο άνεμος, αλλά συνεχίζουν να μεταδίδονται για αρκετό χρονικό διάστημα, μέχρι που να αποσβεστούν. Η κατάσταση αυτή της θάλασσας αναφέρεται διεθνώς σαν swell. Οι έντονες καταστάσεις θάλασσας προκαλούν καταπονήσεις στο κύτος (hull stress) και επηρεάζουν την ευστάθεια του πλοίου. **Ανεμολογικά Δεδομένα:** Η δύναμη του αληθούς ανέμου μεταβάλλεται ώρα με την ώρα και μπορούμε να την μετράμε με αριθμούς 0-17 της κλίμακας ΜΠΩΦΟΡ, χλμ/ώρα ή σε κόμβους. Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου σχετίζονται άμεσα με την ασφάλεια των χειρισμών, ειδικά κατά την διάρκεια της παραβολής/άπαρσης του πλοίου και στην φόρτωση – εκφόρτωση του φορτίου στο προβλήτα. **ICING- παγοποίηση:** Όταν ένα πλοίο ταξιδεύει κυρίως σε ψυχρά νερά, στη πλωρή του δημιουργείται ένα sea spray, που ορισμένα σταγονίδια νερού θα πέσουν πάνω σε καταστρώματα/ρέλια και κυρίες επιφάνειες. Όταν ο άνεμος είναι αρκετά ψυχρός, δηλ. Κάτω από -20C τότε στιγμιαία τα σταγονίδια νερού γίνονται πάγος, με αποτέλεσμα να αλλάζει το κέντρο βάρους και να μην έχει το πλοίο τη κατάλληλη ευστάθεια για πλοήγηση. **Βαρομετρική Πίεση:** Η ραγδαία πτώση της προμηνύει κακοκαιρία και κυκλώνες. **Ορατότητα:** Ύπαρξη ομίχλης, χιονοπτώσεων ή έντονης βροχής που απαιτούν ειδικά μέτρα ναυσιπλοΐας, όπως είναι επιπλέον φωτισμός του πλοίου, επιπλέον άτομα σε εξωτερικά καταστρώματα, ηχητικά σήματα, μείωση ταχύτητας κτλπ.

Εσωτερικοί παράγοντες είναι αυτοί που αφορούν τα περιφερειακά μέσα του πλοίου για εσωτερική επικοινωνία, καθώς και σε μέρη που αφορούν τα ομαλή διαχείριση του πλοίου.

Πρώτος και κύριος εσωτερικός παράγοντας είναι η **θερμοκρασία- υγρασία** σε μηχανοστάσια και ηλεκτροστάσια. Κατά την διάρκεια του εν πλω/ αλλά και παραμονή σε λιμενές ένα πλοίο μπορεί να συνεχίσει να χρησιμοποιεί τις ηλεκτρομηχανές του, σε περίπτωση που δεν έχει το λιμάνι να του παρέχει τις ανάλογες βοήθειες. Παρόλο που υπάρχουν τα ανάλογα μέσα για την ορθή λειτουργία και ψύξη των συστημάτων ενδέχεται αν τα συστήματα λειτουργούν σε υψηλές επιδόσεις για μεγάλο χρονικό διάστημα να ανεβάσουν υψηλές θερμοκρασίες που οι επιπτώσεις θα επισημανθούν στο κεφάλαιο 1.1.2. **Αέρια & Ποιότητα Αέρα:** Η συγκέντρωση επικίνδυνων αερίων (όπως CO₂, SO_x, NO_x) είναι κρίσιμη καθώς και εύφλεκτων αερίων (LEL). **Δονήσεις (Vibrations):** Μετά πέρατος κάθε ταξιδιού θα πρέπει να γίνονται οι απαραίτητοι έλεγχοι δονήσεων για τυχόν καταπονήσεις σε μηχανές / σκαρί του πλοίου.

1. **Θερμοκρασία & Υγρασία:** Στο μηχανοστάσιο, οι θερμοκρασίες μπορεί να φτάσουν σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα, επηρεάζοντας τη λειτουργία των γεννητριών και των κύριων μηχανών. Αντίστοιχα, στα αμπάρια φορτίου (cargo holds), η υγρασία πρέπει να ελέγχεται αυστηρά για την αποφυγή αλλοίωσης ευπαθών προϊόντων (π.χ. σιτηρά, φάρμακα).
2. **Αέρια & Ποιότητα Αέρα:** Η συγκέντρωση επικίνδυνων αερίων (όπως CO₂, SO_x, NO_x) είναι κρίσιμη, ειδικά σε κλειστούς χώρους εργασίας.
3. **Δονήσεις (Vibrations):** Η συνεχής λειτουργία της μηχανής προκαλεί μηχανικές καταπονήσεις που μπορούν να βλάψουν ευαίσθητο εξοπλισμό.

Αμπάρια και Δεξαμενές Φορτίου (Cargo Holds & Tanks)

- **Θερμοκρασία & Υγρασία:** Απολύτως κρίσιμα για την αποφυγή αλλοίωσης ευπαθών φορτίων (π.χ. αγροτικά προϊόντα) ή ζημιάς από "ιδρώτα του πλοίου" (ship's sweat) / "ιδρώτα του φορτίου" (cargo sweat).
- **Συγκέντρωση Αερίων:** Παρακολούθηση επιπέδων Οξυγόνου (O₂), Μονοξειδίου του Άνθρακα (CO), ή εύφλεκτων αερίων (LEL), ειδικά σε χύδην φορτία που οξειδώνονται ή εκλύουν αέρια (π.χ. άνθρακας, σιτηρά, χημικά).
- **Αερισμός:** Παρακολούθηση της ροής του αέρα στα συστήματα εξαερισμού των κυτών.

Μηχανοστάσιο (Engine Room)

- **Θερμοκρασία Περιβάλλοντος Χώρου:** Η υπερβολική ζέστη μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των μηχανών και των ηλεκτρονικών συστημάτων (control room).
- **Ανίχνευση Καπνού/Αναθυμιάσεων:** Πρόληψη πυρκαγιάς από διαρροές καυσίμων ή λιπαντικών.
- **Ποιότητα Αέρα:** Έλεγχος για διαρροές καυσαερίων εντός του κλειστού χώρου εργασίας.

Χώροι Ενδιαίτησης (Accommodation)

- **Ποιότητα Εσωτερικού Αέρα (HVAC):** Θερμοκρασία, υγρασία και ανανέωση αέρα για τη διασφάλιση της υγείας και της άνεσης του πληρώματος κατά τη διάρκεια πολύμηνων ταξιδιών.

1.1.2 Επιπτώσεις δυσμενών συνθηκών στο πλήρωμα και στο φορτίο

Όσα προαναφέραμε στη προηγούμενη υπο-ενότητα, σε περίπτωση ακραίων συνθηκών θα μπορούσαν να επιφέρουν μεγάλες επιπτώσεις στο ίδιο το πλοίο, στο φορτίο ή ακόμα να θέσει σε κίνδυνο την ζωή του πληρώματος. Οι έντονες καταστάσεις θάλασσας προκαλούν καταπονήσεις στο κύτος (hull stress) και επηρεάζουν την ευστάθεια του πλοίου. Το icing μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνη συσσώρευση πάγου (icing) στα καταστρώματα και τις υπερκατασκευές, αλλοιώνοντας το κέντρο βάρους του πλοίου. Η συγκέντρωση αερίων μπορούν ειδικά σε χύδην φορτία να προκαλέσουν οξείδωση. Η υπερβολική ζέστη μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των μηχανών και των ηλεκτρονικών συστημάτων ή ακόμα και πυρκαγιά ή διαρροές καυσίμων/ λιπαντικών. Επιπλέον η διαχείριση υδάτων ballast water και bilge water θα πρέπει να γίνεται η σωστή παρακολούθηση της αλατότητας και σωστής λειτουργίας των συστημάτων επεξεργασίας και όλοι οι περιορισμοί και έλεγχοι να είναι σύμφωνοι με τους διεθνείς κανόνες IMO.

1.2 Τεχνολογία ZigBee

Τι είναι το ZigBee Mesh; Το ZigBee είναι μια αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου, με τοπολογία πλέγματος το οποίο αποτελείται από συντονιστή, δρομολογητές και τελικές συσκευές. Μοιάζει αρκετά με το παραδοσιακό Wi-Fi, αλλά όπως βλέπουμε και στην υποενότητα 1.2.2, υπάρχουν βασικές διαφορές, όπου το Wi-Fi δεν θα μπορούσε να επικρατήσει στην ναυτιλιακή βιομηχανία σε αντίθεση με το ZigBee.

1.2.1 Χαρακτηριστικά του ZigBee

Το μεγάλο πλεονέκτημα του ZigBee Mesh είναι ότι δεν χρειάζεται να επικοινωνεί με έναν κεντρικό κόμβο, αλλά έχει την δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους οι κόμβοι, μέχρι να φτάσουν στο τελικό τους προορισμό, σε αντίθεση με παράδειγμα με το Wi-Fi, με το οποίο αν απομακρυνθείς από το κεντρικό κόμβο, χάνεται η διασύνδεση σου. Φημίζεται για την ασύρματη επικοινωνία με χαμηλή κατανάλωση και χαμηλού ρυθμού δεδομένων, το οποίο βασίζεται σε PHY – MAC πρότυπο IEEE 802.15.4. Το ZigBee Mesh δίνει έμφαση στην παρακολούθηση – αξιοπιστία – διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Λειτουργεί σε ζώνη ISM (2,4 GHz) παγκοσμίως και μας δίνει την δυνατότητα να έχουμε στην διάθεση μας δεκαέξι (16) κανάλια με ρυθμό δεδομένων έως 250 kbps. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying), η οποία επιτρέπει αποδοτική χρήση του φάσματος και ανθεκτικότητα σε παρεμβολές. Το επίπεδο MAC χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Πριν εκπέμψει, ένας κόμβος "ακούει" το κανάλι για να βεβαιωθεί ότι είναι ελεύθερο, μειώνοντας τις συγκρούσεις δεδομένων.

1.2.2 Συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τεχνολογιών

Το ZigBee Mesh μπορεί να μεταφέρει μικρά πακέτα δεδομένων και να λειτουργεί για χρόνια με απλές μπαταρίες, σε αντίθεση για με το Wi-Fi, που μεταφέρει μεγάλους όγκους δεδομένων και απαιτεί συνεχή παροχή μεγαλύτερης ενέργειας. Το Wi-Fi χρειάζεται κεντρικό hub, ενώ το ZigBee μεταφέρει την πληροφορία από hub σε hub. Σε περίπτωση που το σύστημα κλείσει, δεν χάνει να κάνει το διαμερισμό πληροφοριών, αλλά βρίσκει την γρηγορότερη και καλύτερη διαδρομή για να συνεχίσει την μετάδοση. Το Zigbee είναι συνήθως πιο φθηνό, πιο γρήγορο και υποστηρίζει περισσότερες συσκευές

καθώς εκπέμπει σε συχνότητα 2.4 GHz περνάει πιο εύκολα μέσα από τοίχους και έχει λιγότερες παρεμβολές.

1.2.3 Χρήσεις του ZigBee σε βιομηχανικές και ναυτιλιακές εφαρμογές

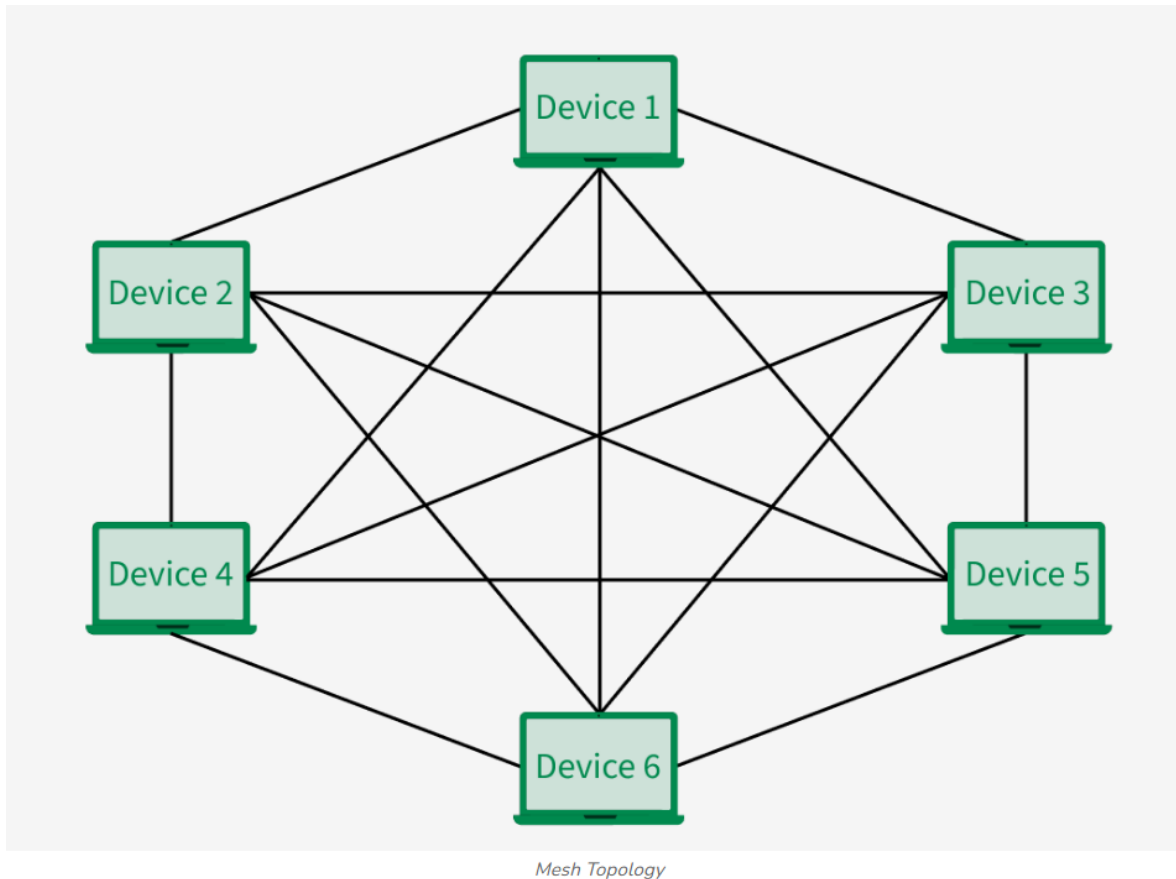
Το να χρησιμοποιήσει μια ναυτιλιακή εταιρεία είναι αρκετά μια αποδοτική και σύγχρονη λύση για την ψηφιοποίηση των πλοίων. Λόγω των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των πλοίων να κυριαρχήσουν άλλα ασύρματα MESH συστήματα είναι αρκετά δύσκολο. Το πλοίο θεωρείται ως ένα εχθρικό περιβάλλον για την ασύρματη μετάδοση πληροφοριών, οπότε μέσω του ZigBee μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ZigBee Mesh στη ναυτιλία, εκμεταλλευόμενο την ικανότητά του για δρομολόγηση πολλαπλών αλμάτων (multi-hop) και την αυτο-ίαση (self-healing). Μπορεί να παρακολουθήσει όλες τις εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες και να 'περάσει' σε ζωντανό χρόνο όλες τις πληροφορίες στην ναυτιλιακή εταιρεία, οπότε θα μπορέσουν να παρθούν γρήγορες αποφάσεις, να αποφευχθούν λάθη, να αυξηθεί την ασφάλεια πληρώματος καθώς και να γίνει απενημέρωση/ απολογισμός και να παρθούν αποφάσεις σχετικά με το τι θα μπορέσει να βελτιωθεί σε επόμενο ταξίδι, έχοντας όλες τις πληροφορίες διαθέσιμες.

1.3 Τοπολογία MESH Δικτύου

Τοπολογία δικτύου είναι η διάταξη διάφορων μέσων σύνδεσης/κόμβων των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Στην Mesh τοπολογία δεν υπάρχει ένας μόνο ένας κεντρικός hub ή μόνο ένας κεντρικός δρόμος, αλλά συνδέονται τα μέσα μεταξύ τους δημιουργώντας ένα δίκτυο επικοινωνίας. Υπάρχει δύο (2) κατηγορίες πλέγματος το Full Mesh κάθε συσκευή είναι συνδεδεμένη με όλες τις υπόλοιπες και η Partial Mesh όπου η καθεμία συσκευή συνδέεται με αυτή που είναι πλησίον της.

1.3.1 Περιγραφή της τοπολογίας MESH

Η τοπολογία πλέγματος (ή αλλιώς mesh topology) είναι ένας τρόπος για να συνδέουμε συσκευές –τις οποίες στα δίκτυα λέμε "κόμβους"– με τέτοιο τρόπο ώστε η καθεμία να επικοινωνεί απευθείας με πολλές άλλες. Σε αντίθεση με το κλασικό μοντέλο όπου τα πάντα περνάνε αναγκαστικά από ένα κεντρικό σημείο (π.χ. ένα router), εδώ το δίκτυο είναι αποκεντρωμένο. Ουσιαστικά, μοιάζει με έναν ιστό αράχνης.



Εικόνα1: MESH Topology

1.3.2 Πλεονεκτήματα MESH σε περιβάλλοντα με παρεμβολές και εμπόδια

Τα πλεονεκτήματα του mesh βρίσκονται σε δύο (2) ιδιότητες:

- **Self-healing:** Σε περίπτωση, που για κάποιο οποιοδήποτε λόγο, χαθεί η σύνδεση από κάποιο κόμβο, η πληροφορία δεν χάνεται, αλλά διαμοιράζεται στους άλλους προκειμένου να μεταφερθεί. Δηλαδή, το δίκτυο καταλαβαίνει αμέσως ότι «έκλεισε ο δρόμος» και στέλνει το σήμα από άλλη διαδρομή σε αρκετά γρήγορο χρονικό διάστημα.
- **Δύναμη μέσα από το πλήθος:** Στο κλασικό Wi-Fi, όσες περισσότερες συσκευές βάζετε, τόσο πιο πολύ το δίκτυο αδυνατεί να το υποστηρίξει. Αντίθετα, στην τοπολογία πλέγματος, όσες περισσότερες συσκευές (routers) προσθέτετε, τόσο πιο δυνατό, γρήγορο και μεγάλο γίνεται το δίκτυο, γιατί δημιουργούνται περισσότεροι διαθέσιμοι δρόμοι.

Σε ένα πλοίο, οι μεταλλικοί τοίχοι εμποδίζουν την απευθείας επικοινωνία. Η τοπολογία Mesh επιτρέπει στο σήμα να "παρακάμψει" τα εμπόδια «πηδώντας» (hopping) από δρομολογητή σε δρομολογητή μέχρι να φτάσει στον προορισμό του, εξασφαλίζοντας υψηλή αξιοπιστία.

1.3.3 Ρόλοι κόμβων: Coordinator, Router, End Device

Ρόλοι Κόμβων (Device Types): Σύμφωνα με το πρότυπο ZigBee, υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι συσκευών:

1. **ZigBee Coordinator (ZC - Συντονιστής):**
 - ο Είναι η "ρίζα" του δικτύου. Υπάρχει μόνο ένας ανά δίκτυο.
 - ο Επιλέγει το κανάλι συχνοτήτων και το PAN ID (Personal Area Network Identifier) για να ξεκινήσει το δίκτυο.
 - ο Διατηρεί τις πληροφορίες ασφαλείας και τα κλειδιά κρυπτογράφησης.
2. **ZigBee Router (ZR - Δρομολογητής):**
 - ο Λειτουργεί ως ενδιάμεσος κόμβος που προωθεί δεδομένα από και προς άλλες συσκευές.
 - ο Επεκτείνει την εμβέλεια του δικτύου.
 - ο Πρέπει να είναι συνεχώς ενεργός (mains powered), καθώς πρέπει να είναι έτοιμος να λάβει δεδομένα ανά πάσα στιγμή.
3. **ZigBee End Device (ZED - Τερματική Συσκευή):**
 - ο Είναι συνήθως οι αισθητήρες.
 - ο Δεν έχουν δυνατότητα δρομολόγησης.
 - ο Μπορούν να μπαίνουν σε κατάσταση ύπνου (sleep mode) για μεγάλα διαστήματα ώστε να εξοικονομούν ενέργεια, ξυπνώντας μόνο για να στείλουν μετρήσεις στον γονικό τους κόμβο (Parent Router/Coordinator).

2. Ανάλυση Απαιτήσεων Συστήματος

2.1 Τεχνικές Απαιτήσεις

Προκειμένου να μπορέσουμε να τοποθέτησουμε ένα MESH σύστημα, για να παρακολουθεί όλους τους παράγοντες του πλοίου, δίχως καμία δυσκολία θα πρέπει να επιλέξουμε κατάλληλο hardware. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία του εγγράφου At86Rf230 Zigbee Transceiver , επιλέγουμε πομποδέκτες που πληρούν τις προδιαγραφές του IEEE 802.15.4. Μια επιλογή ενός τέτοιου πομποδέκτη είναι ο **AT86RF230**. Για τους κόμβους του δικτύου, προτείνεται η χρήση του ολοκληρωμένου κυκλώματος **AT86RF230** της Atmel. Πρόκειται για έναν πομποδέκτη χαμηλής ισχύος 2.4 GHz σχεδιασμένο για εφαρμογές ZigBee. Ο συγκεκριμένος πομποδέκτης μας προσφέρει sensitivity, δηλαδή διαθέτει εξαιρετική ευαισθησία λήψης της τάξης των **-101 dBm**. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να ανιχνεύσει πολύ ασθενή σήματα, κάτι που είναι απαραίτητο στο περιβάλλον του πλοίου όπου οι ανακλάσεις και η εξασθένηση είναι έντονες. Η ισχύς εκπομπής του είναι τέτοια διαμορφωμένη, ώστε να μπορεί να φτάσει ισχύ εξόδου έως και **+3 dBm**, επιτρέποντας ικανοποιητική εμβέλεια με ελάχιστη κατανάλωση. Η κατανάλωση ενέργειας σε κατάσταση λήψης είναι περίπου **15.5 mA** και σε κατάσταση εκπομπής **16.5 mA** (στη μέγιστη ισχύ). Σε κατάσταση sleep, η κατανάλωση πέφτει σε επίπεδα nA (nano-Amperes), εξασφαλίζοντας μακροζωία για τους αισθητήρες μπαταρίας.

2.1.1 Χώροι παρακολούθησης

Όπως προαναφέραμε και στο κεφάλαιο 1.1.1 οι παράγοντες που απαιτούν παρακολούθηση και ενημέρωση είναι η θερμοκρασία, κραδασμοί, κατάσταση θάλασσης, άνεμος, ο αερισμός κτλπ. Οπότε σύμφωνα με τα ανωτέρω, πρέπει οι κόμβοι να λειτουργούν ως Routers σε διαμερισμάτα όπως το μηχανοστάσιο, ηλεκτροστάσιο, αντλιοστάσιο, στις αποθήκες, στα κεντρικά διαμερίσματα του πλοίου, στα αμπάρια του φορτίου και στην γέφυρα. Καθώς με την επιλογή της κάθε εταιρείας μπορεί να θέσει ένα συγκεκριμένο χώρο, που συνηθίζεται να είναι η γέφυρα όπου θα εκτελεστεί η εγκατάσταση του Coordinator που θα συνδέεται με PC για την απεικόνιση.

2.1.2 Τύποι αισθητήρων που θα ενσωματωθούν

Οι τύποι των αισθητήρων που θα πρέπει να εγκαταστηθούν στα διαμερίσματα/χώρους που προαναφέραμε θα πρέπει να είναι τέτοιοι, ώστε να μας δίνουν ζωντανή εικόνα όλες τις πληροφορίες από τους εξωτερικούς-εσωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν το πλοίο. Τέτοιοι είναι οι αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας, που θα βοηθούν στην πρόληψη υπερθέρμανσης των συστημάτων, άρα και στην αποφυγή τυχών βλάβων, προκειμένου το πλοίο να φτάνει έγκαιρα στο προορισμό του. Αισθητήρες αερίων, κυρίως για λόγους ασφαλείας του πληρώματος για τυχών εντοπισμό τοξικών ή εύφλεκτων υλικών σε κλειστούς χώρους (όπως CO, CO₂, SO_x), αλλά και τυχών επιζήμιε στο φόρτιο το οποίο φέρει το πλοίο. Αισθητήρες Δονήσεων (Επιταχυνσιόμετρα) Καταγράφοντας τους κραδασμούς στην κύρια μηχανή, τις γεννήτριες ή τις αντλίες, τροφοδοτούν με δεδομένα το σύστημα για την έγκαιρη διάγνωση ανίχνευση μηχανικών βλαβών (π.χ. χαλάρωση ρουλεμάν), υποστηρίζοντας έτσι ένα μηχανισμό ικανό που θα μπορεί να προβλέψει καταστάσεις.

2.1.3 Πηγές ενέργειας

Για να ορίσουμε την τροφοδοσία των κόμβων σε μια τοπολογία MESH, πρέπει να αναρωτηθούμε το χώρο και το ρόλο που επιτελεί και βρίσκεται η κάθε συσκευή. Στο ναυτιλιακό περιβάλλον, δύο (2) είναι οι κύριοι τρόποι τροφοδοσίας:

A) Τροφοδοσία μέσω μπαταρίας: Δηλαδή οι τερματικοί κόμβοι φέρουν τους αισθητήρες σε αυτόνομες πηγές ενέργειας (μπαταρίες) και η αυτονομία τους μπορεί να ξεπεράσει μέχρι και τα δύο (2) έτη, με το μεγαλύτερο μέρος της λειτουργίας τους να βρίσκεται σε sleep mode. Με απλά λόγια ένας πομποδέκτης **AT86RF230** που τροφοδοτείται από μπαταρία που σε sleep mode καταναλώνει περίπου 20 nA και 'ξυπνά' για ελάχιστα κλάσματα του δευτερολέπτου, μόνο όταν θέλει να εκπέμψει τα δεδομένα της μέτρησης.

B) Τροφοδοσία από το δίκτυο του πλοίου (Routers και Coordinator): Αντίθετα με τους αισθητήρες, οι δρομολογητές (Routers) και ο Συντονιστής (Coordinator) απαιτείται να βρίσκονται σε συνεχή ετοιμότητα λήψης (RX ON state) για να προωθούν τα πακέτα δεδομένων των άλλων κόμβων. Συνεπώς, η λειτουργία τους με μπαταρίες θα ήταν μη βιώσιμη. Οι συσκευές αυτές συνδέονται μόνιμα στην ηλεκτρική παροχή του πλοίου, συνήθως μέσω του κυκλώματος χαμηλής τάσης ή με χρήση μικρών τροφοδοτικών στους πίνακες του μηχανοστασίου και των διαδρόμων.

2.1.4 ZigBee Modules

Σημαντικός παράγοντας για την υλοποίηση του ασύρματου δικτύου είναι η επιλογή της κατάλληλης πλατφόρμας υλικού (hardware module). Πρακτικά, ένα ZigBee module αποτελείται από δύο βασικά υποσυστήματα: έναν μικροελεγκτή (MCU) που αναλαμβάνει την εκτέλεση της στοίβας πρωτοκόλλου (ZigBee stack) και τον χειρισμό των αισθητήρων, και έναν πομποδέκτη ραδιοσυχνότητας (RF Transceiver) που διαχειρίζεται το φυσικό επίπεδο της επικοινωνίας. Αν και στην αγορά υπάρχουν διάφοροι πομποδέκτες που είναι ικανοί να αντεπεξέλθουν στις απαιτήσεις ZigBee, η σχεδίαση έχει γίνει γύρω από τον πομποδέκτη **AT86RF230** της Atmel. Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει τον πλήρη έλεγχο του φυσικού επιπέδου (PHY) και του επιπέδου πρόσβασης (MAC) του προτύπου IEEE 802.15.4. Το module διασυνδέεται με τον κεντρικό μικροελεγκτή του κόμβου μέσω του πρωτοκόλλου SPI (Serial Peripheral Interface). Μέσω αυτής της διασύνδεσης, ο μικροελεγκτής μπορεί να παραμετροποιήσει κρίσιμους καταχωρητές (registers) του πομποδέκτη, ρυθμίζοντας για παράδειγμα την ισχύ εκπομπής (από -17 dBm έως +3 dBm) ανάλογα με τα μεταλλικά εμπόδια του πλοίου, και να διαβάζει τα εισερχόμενα πακέτα από τον Frame Buffer. Η φυσική διάταξη του module περιλαμβάνει επίσης την κεραία 2.4 GHz, η οποία ιδανικά στους δρομολογητές πρέπει να είναι εξωτερική (SMA antenna) για καλύτερη απολαβή (gain) και παράκαμψη των στεγανών θυρών.

2.2 Λογισμικό και Πρωτόκολλα

Η λειτουργία του δικτύου βασίζεται σε μια σειρά από πρωτόκολλα (Protocol Stack) του ZigBee, η οποία δομείται σε επίπεδα πάνω από το hardware. Υπάρχουν τρία (3) επίπεδα που κατανέμεται. Επίπεδο PHY & MAC, επίπεδο Δικτύου και επίπεδο εφαρμογής.

Το Επίπεδο PHY & MAC παρέχεται από το hardware σκέλος του πομποδέκτη AT86RF230. Είναι υπεύθυνο για την μετάδοση, τον έλεγχο σφαλμάτων και την κρυπτοκάλυψη που προσφέρει ο Π/Δ για την ασφάλεια των δεδομένων. **Επίπεδο Δικτύου (NWK Layer):** Υπεύθυνο για τη δρομολόγηση (Routing), τη διευθυνσιοδότηση των νέων συσκευών που μπαίνουν στο δίκτυο και τη διαχείριση της τοπολογίας Mesh. **Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer):** Εδώ ορίζονται τα "Profiles" (Προφίλ) και τα "Clusters". Π.χ χρησιμοποιούμε ένα προφίλ για την θερμοκρασία. Τα δεδομένα οργανώνονται σε πακέτα (frames) που παρέχουν ID για τον κάθε αισθητήρα, τον τύπο της μέτρησης και την τιμή του.

2.2.1 Επεξεργασία και αποστολή δεδομένων

Διαχείριση Δεδομένων: Ο Coordinator θα συλλέγει τα δεδομένα και μέσω σειριακής θύρας (UART/USB) θα τα προωθεί σε εφαρμογή (GUI) στον υπολογιστή της Γέφυρας ή σε οποιοδήποτε άλλο διαμέρισμα έχει ορίσει ο κατασκευαστής, ανάλογα με τις ανάγκες-προτίμηση του πλοίου. Η εφαρμογή θα εμφανίζει ειδοποιήσεις (alarms) αν κάποια τιμή υπερβεί τα ορισμένα όρια ασφαλείας.

Η επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή και του AT86RF230 (πομποδέκτη) επιτυγχάνεται μέσω του SPI. Το AT86RF230 λειτουργεί ως Slave. Τα σήματα που χρησιμοποιούνται είναι:

- **SEL (Slave Select):** Ενεργοποίηση της επικοινωνίας (Active Low).
- **SCLK (Serial Clock):** Ρολόι συγχρονισμού δεδομένων.
- **MOSI (Master Out Slave In):** Γραμμή δεδομένων από MCU προς AT86RF230.
- **MISO (Master In Slave Out):** Γραμμή δεδομένων από AT86RF230 προς MCU.

3. Σχεδίαση του ZigBee MESH Δικτύου

Για να εγκατασταθεί ένα ασύρματο δίκτυο σε πλοίο χρειάζεται ειδική μελέτη, λόγω της μεταλλικής κατασκευής που προέρχεται από χάλυβα και η οποία εμποδίζει τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα προτείνεται ως λύση η εφαρμογή τοπολογίας πλέγματος Mesh.

3.1 Τοπολογία και Αρχιτεκτονική Δικτύου

3.1.1 Ανάλυση χωροθέτησης κόμβων εντός πλοίου

Χωροθέτηση Κόμβων (Node Placement): Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου Zigbee-Mesh χωρίζεται σε τρεις (3) κύριες ζώνες, στην ελέγχου, μεταφοράς και μέτρησης.

1. **Ζώνη Ελέγχου (Γέφυρα/Control Room):** Εδώ τοποθετείται ο **ZigBee Coordinator**. Είναι ο κεντρικός κόμβος που συνδέεται μέσω θύρας (π.χ. USB ή UART) με τον κεντρικό υπολογιστή του πλοίου. Αυτός ο κόμβος εκκινεί το δίκτυο, ορίζει το κανάλι συχνότητας (π.χ. Κανάλι 11 στα 2.405 GHz) και διαχειρίζεται τα κλειδιά ασφαλείας. Είναι το σημείο, όπου ο κάθε χειριστής είναι ικανός να έχει πλήρης επίγνωση των τιμών του κάθε αισθητήρα, οπότε και θα ειδοποιείται κάθε φορά που κάποια τιμή υπερβάνει τα όρια.
2. **Ζώνη Μεταφοράς (Διάδρομοι/Κλιμακοστάσια):** Εδώ τοποθετούνται οι **ZigBee Routers**. Λόγω εξασθένησης σήματος από τα μεταλλικά διαφράγματα, οι Routers τοποθετούνται κοντά σε υδατοστεγείς θύρες ή σε σημεία οπτικής επαφής (Line of Sight - LoS) για να γεφυρώσουν τις αποστάσεις μεταξύ των διαμερισμάτων των αισθητήρων και της ζώνης γέφυρας. Οι Routers λειτουργούν συνεχώς (mains powered).
3. **Ζώνη Μέτρησης (Μηχανοστάσιο/Αμπάρια):** Εδώ τοποθετούνται τα **ZigBee End Devices (ZEDs)**. Αυτοί οι κόμβοι φέρουν τους αισθητήρες (θερμοκρασίας, υγρασίας, δονήσεων). Ρυθμίζονται σε κατάσταση ύπνου (sleep mode) και 'ξυπνούν' περιοδικά βάσει χρονοδιαγράμματος ή συμβάντος για να στείλουν δεδομένα.

3.1.2 Διάγραμμα δικτύου

Αν θα έπρεπε να εντάξουμε σε μια πυραμίδα το διάγραμμα δικτύου ενός Zigbee-Mesh, θα ξεκινήσουμε από τον εγκέφαλο, ο οποίος είναι ο συντονιστής ZigBee Coordinator, ο οποίος βρίσκεται π.χ στη γέφυρα. Είναι το κεντρικό σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης. Από εκεί γίνεται η επιλογή του καναλιού λειτουργίας και η κατανομή των διευθύνσεων στους υπόλοιπους κόμβους. Τα Zigbee Routers, τοποθετούνται σε τέτοια σημεία ώστε να λειτουργούν ως αναμεταδότες, και να ξεπερνούν τα μεταλλικά εμπόδια της ναυπηγικής δομής. Είναι αυτά που είναι υπεύθυνα, που σε περίπτωση η πληροφορία χαθεί από κάποια διαδρομή, θα βρουν άλλη ωστε να μην χαθεί (self-healing).

Και στο τέλος της πυραμίδας βρίσκονται οι τερματικές συσκευές, όπου τοποθετούνται μέσα στα διαμερίσματα ενδιαφέροντος. Μέσα από αυτούς τους κόμβους ενσωματώνουν τους αισθητήρες και σχεδιάζονται έτσι ώστε να επικοινωνούν αποκλειστικά με τον πλησιέστερο δρομολογητή, δίχως να έχουν την ικανότητα να προωθούν δεδομένα άλλων συσκευών. Αυτή η ιεραρχική εξάρτηση αποτυπώνεται στο διάγραμμα ως συνδέσεις τύπου αστέρα (star) στα άκρα του πλέγματος, επιτρέποντας στις τερματικές συσκευές να εισέρχονται σε κατάσταση αναμονής (sleep mode) τον περισσότερο χρόνο. Έτσι, ελαχιστοποιείται ο χρόνος ενεργοποίησης του πομποδέκτη, εξασφαλίζοντας τη μακροβιότητα των μπαταριών τους.

3.2 Ρύθμιση Κόμβων ZigBee

Για να ξεκινήσει να λειτουργεί το δίκτυο MESH πρέπει να δώσει την εντολή ο ZigBee Coordinator, ο οποίος επιλέγει τους βασικούς παραμέτρους λειτουργίας όλου του συστήματος.

3.2.1 Διαμόρφωση coordinator

Διαδικασία Ζεύξης (Association):

Σε πρώτο στάδιο, το επίπεδο δικτύου (NWK layer) του Συντονιστή εκτελεί μια διαδικασία σάρωσης καναλιών (Energy Detect Scan) στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz. Σκοπός της σάρωσης είναι ο εντοπισμός του καναλιού με τον λιγότερο ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο και τις λιγότερες παρεμβολές από άλλα συστήματα του πλοίου (όπως δίκτυα Wi-Fi ή συστήματα Bluetooth του πληρώματος). Εφόσον επιλεγεί το βέλτιστο κανάλι (για παράδειγμα, το κανάλι 11), ο Συντονιστής αποδίδει ένα μοναδικό αναγνωριστικό PAN ID (Personal Area Network Identifier) 16-bit στο δίκτυο. Αυτό το αναγνωριστικό λειτουργεί ως ψηφιακή «υπογραφή» του συγκεκριμένου δικτύου, διασφαλίζοντας ότι οι αισθητήρες δεν θα προσπαθήσουν εσφαλμένα να συνδεθούν σε παρακείμενα ασύρματα δίκτυα

3.2.2 Εγκατάσταση και pairing routers και end devices

.. Από τον Συντονιστή, ακολουθεί η διαδικασία ένταξης των Δρομολογητών (Routers) και των Τερματικών Συσκευών (End Devices). Η διαδικασία ζεύξης (Association) ακολουθεί τις προδιαγραφές του επιπέδου MAC του προτύπου IEEE 802.15.4. Όταν ένας νέος κόμβος (π.χ. ένας αισθητήρας θερμοκρασίας στο μηχανοστάσιο) τροφοδοτηθεί με ενέργεια, εκκινεί μια ενεργή σάρωση (Active Scan), εκπέμποντας αιτήματα (Beacon Requests) στα διαθέσιμα κανάλια. Μόλις λάβει απάντηση (Beacon) από τον Συντονιστή ή από κάποιον ήδη ενταγμένο Δρομολογητή, αποστέλλει ένα αίτημα σύνδεσης (Association Request). Ο γονικός κόμβος (parent node) αξιολογεί το αίτημα και, εφόσον διαθέτει επαρκείς πόρους, απαντά καταχωρώντας τη συσκευή στον τοπικό του πίνακα και αποδίδοντάς της μια μοναδική διεύθυνση δικτύου (Network Address) μήκους 16-bit. Αυτή η σύντομη διεύθυνση (short address) θα χρησιμοποιείται εφεξής για τη δρομολόγηση όλων των πακέτων, αντικαθιστώντας τη μακροσκελή MAC διεύθυνση των 64-bit για λόγους εξοικονόμησης εύρους ζώνης. Σε επίπεδο υλικού (hardware), η ρύθμιση των παραμέτρων πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής SPI μεταξύ του μικροελεγκτή και του πομποδέκτη AT86RF230. Η παραμετροποίηση των κόμβων βασίζεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του πομποδέκτη AT86RF230 και της στοίβας πρωτοκόλλου.

3.3 Επικοινωνία και Ροή Δεδομένων

3.3.1 Δομή πακέτων δεδομένων

Όλη η δομή πακέτων δεδομένων εξαρτώνται από το πομπόδεκτη που εμείς έχουμε ορίσει στο σύστημα μας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το Frame Structure προέρχεται από το Π/Δ AT86RF230 και αποτελείται από το: α) Preamble & SFD, που επιτρέπει στον δέκτη να κλειδώσει στο σήμα, β) Length, το οποίο είναι το μήκος του πακέτου (1 byte) και γ) PHY Service Data Unit, που περιλαμβάνουν το MAC, το ωφέλιμο φορτίο (Payload) και το πεδίο ελέγχου σφαλμάτων. Στη Δρομολόγηση (Routing) χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector). Για παράδειγμα όταν ένας οποιοδήποτε αισθητήρας θέλει να στείλει την πληροφορία του στη γέφυρα, αλλά δεν έχει ‘απευθείας’ διαδρομή διασυνδέσης, τότε στέλνει τα δεδομένα στο πλησιέστερο Router. Το Router μέσω τον πίνακα δρομολογήσης εκπέμπει ένα Route Request, το πλέγμα δέχεται το αίτημα και απαντά με ένα Route Reply, εγκαθιστώντας το μονοπάτι. Σε περίπτωση που είναι ενεργοποιημένα τα Beacons (άρα ο χρόνος διαιρείται σε Superframes, η δομή περιλαμβάνει και τα CAP (Contention Access Period), η περίοδος όπου οι συσκευές ανταγωνίζονται για πρόσβαση στο μέσο με χρήση CSMA-CA. Εδώ στέλνονται τα περισσότερα δεδομένα αισθητήρων και το CFP (Contention Free Period), περίοδος εγγυημένης πρόσβασης (GTS - Guaranteed Time Slots) για εφαρμογές κρίσιμου χρόνου (low latency). Στην εφαρμογή μας, αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σήματα συναγερμού (alarms) π.χ από το μηχανοστάσιο.

3.3.2 Εντοπισμός και διαχείριση αποτυχιών επικοινωνίας

Το ναυτιλιακό περιβάλλον και ειδικότερα στο πλοίο, λόγω των μεταλλικών επιφανειών, των υδατοστεγανών θυρών που ανάπασα στιγμή κλείνουν καθώς και τα πολλαπλά deck και διαδρομές καθιστούν ένα χώρο αφιλόξενο για την επικοινωνία αισθητήρων – coordinator. Για να εξασφαλίσουμε την ορθότητα στην μετάδοση των πληροφοριών-μετρήσεων πρέπει πρώτα να ελέγξουμε ότι ο πομπόδεκτης μας βασίζεται στις μετρικές που εξάγει σε πραγματικό χρόνο. Κατά τη λήψη ενός πλαισίου δεδομένων (frame), το υποσύστημα ελέγχει την ακεραιότητα των λαμβανόμενων bit μέσω της ακολουθίας ελέγχου πλαισίου (Frame Check Sequence - FCS). Εάν το παραγόμενο άθροισμα ελέγχου (CRC) αποκλίνει από το αναμενόμενο λόγω αλλοίωσης του σήματος, το πακέτο απορρίπτεται άμεσα. Παράλληλα, ο πομπόδεκτης αξιολογεί αδιάλειπτα την ποιότητα της ζεύξης παρακολουθώντας τον δείκτη LQI (Link Quality Indication) και την ένδειξη ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (RSSI). Σε επίπεδο πρόσβασης στο μέσο (MAC), όταν ένας κόμβος στένει πληροφορία (δεδομένα) ανάμενει από το σύστημα μια επιστροφή ACKNOWLEDGE σε συγκεκριμέν χρόνο, ώστε να βεβαιωθεί ότι στάλθηκαν όλα ορθά. Σε περίπτωση που δεν λάβει το ACK, ξανά κάνει ενα συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών και αν δεν λάβει απάντηση τότε βγάζει ‘alarm’ στο σύστημα, αναζητώντας άλλη διαδρομή μέσω του Επιπέδου Δικτύου και της ικανότητας του self-healing της τοπολογίας Mesh. Έτσι διαγραφεται η βεβλαμμένη διαδρομή και από τον πίνακα διαδρομών και επαναπροσδιορίζεται καινούργια για το συγκεκριμένο κόμβο. Μέσω αυτής της δυναμικής ανταλλαγής μηνυμάτων, το δίκτυο αναδιαμορφώνεται αυτόματα, παρακάμπτοντας το φυσικό εμπόδιο και εγκαθιδρύοντας ένα νέο μονοπάτι ροής δεδομένων, χωρίς να απαιτείται καμία ανθρώπινη παρέμβαση.

4. Αξιολόγηση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων, καθώς και πλεονεκτήματα του ZigBee έναντι Άλλων Τεχνολογιών

4.1 Απόδοση του συστήματος

Το μεγαλύτερο επίτευγμα και χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος έναντι άλλων, είναι ότι βάσει του datasheet του AT86RF230, η αυτονομία και η διάρκεια ζωής είναι αρκετά μεγάλος. Συγκεκριμένα για λήψη ξοδεύει 15.5 mA, για εκπομπή 16.5 mA και σε sleep mode 20 nA. Αν υποθέσουμε ότι ένας αισθητήρας ‘ξυπνάει’ ανά 10 λεπτά, και κάνει μια μέτρηση διάρκειας 50msec και για να στείλει την πληροφορία χρειάζεται 10msec, τότε ένας πλήρης κύκλος εργασίας του σε θέμα απόδοσης μπαταρίας είναι αρκετά χαμηλός. Αν έχουμε δύο μπαταρίες AA με χωρητικότητα περίπου 2500 mAh, τότε η διάρκεια ζωής του είναι τουλάχιστον 2-3 έτη. Αυτό αποδεικνύει την υπεροχή ενός συστήματος ZigBee Mesh έναντι άλλων τοπολογιών πχ Wi-Fi όπου θα εξαντλούσε τις μπαταρίες του μόλις σε λίγες μέρες.

Πρέπει να γίνει αναφορά επίσης ότι ενώ ένα πλοίο θεωρείται αρκετά αφιλόξενο για οποιοδήποτε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, λόγω του υλικού κατασκευής του το ZigBee Mesh μέσω των χαρακτηριστικών του όπως self-healing, PHY – MAC πρότυπο IEEE 802.15.4, O-QPSK και CSMA-CA.

4.2 Ανθεκτικότητα σε απώλειες κόμβων

Η ποιότητα της ασύρματης ζεύξης στο πλοίο αξιολογείται μέσω του δείκτη **LQI (Link Quality Indication)**. Το AT86RF230 παρέχει μια τιμή LQI για κάθε λαμβανόμενο πακέτο, η οποία βασίζεται στην ισχύ του σήματος (ED - Energy Detection) και στο σηματοθορυβικό λόγο (SNR).

4.3 Επεκτασιμότητα και ευελιξία δικτύου

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μελέτης με εναλλακτικές τεχνολογίες:

1. **Έναντι Bluetooth:** Το ZigBee προσφέρει **μεγαλύτερη εμβέλεια** και κυρίως τη δυνατότητα αυτόματης δρομολόγησης (Mesh) χωρίς πολύπλοκη ρύθμιση, κάτι που το κλασικό Bluetooth δεν υποστηρίζει αποδοτικά σε μεγάλα δίκτυα αισθητήρων.
2. **Έναντι Ενσύρματων:** **Το κόστος εγκατάστασης** (εργατικά, υλικά, τρυπήματα σε μπουλμέδες) μειώνεται κατά περίπου 60-80% με τη χρήση του ασύρματου δικτύου.
3. **Επεκτασιμότητα:** Το δίκτυο ZigBee μπορεί να **υποστηρίξει έως και 65.535 κόμβους θεωρητικά**. Στην πράξη, σε ένα πλοίο μπορούν εύκολα να προστεθούν νέοι αισθητήρες (π.χ. σε νέα φορτία) χωρίς να διακοπεί η λειτουργία του υπάρχοντος συστήματος.

5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

Σκόπος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάλυση όλων των φαινομένων και δεδομένων που θα μπορούσαν να υπάρχουν σε ένα πλοίο και θα επηρρέαζαν τις συνθήκες εργασίας, την άφιξη/απόπλου του ή ακόμα και την υγεία του φορτίου που

φέρει. Σε όλες τις συνθήκες αυτές μέσω της χρήσης ενός προτύπου ZigBee Mesh (IEEE 802.15.4) μπορούμε συλλέξουμε πληροφορίες και να τις παραδώσουμε σε ένα κεντρικό υπολογιστή (π.χ στη γέφυρα) όπου θα μας αναφέρει ζωντανή μετάδοση τιμών και αν βρισκόμαστε εντός ορίων και κατά συνέπεια την ενημέρωση αυτών των τιμών σε μια ναυτιλιακή εταιρεία. Από την διπλωματική προέκυψε ότι απαραίτητη είναι η ασύρματη εφαρμογή λόγω του μεταλλικού περιβάλλοντος ενός πλοίου. Ένας πομποδέκτης τύπου AT86RF230 προσφέρει την κατάλληλη αρμονία μεταξύ της εκπομπής/λήψης και κατανάλωση ενέργειας έναντι άλλων δικτύων. Ακόμα ανάλυσαμε ότι ακόμα για οποιοδήποτε λόγο χαθεί ή βεβλαθεί η διαδρομή επικοινωνίας κόμβου – αισθητήρα – και coordinator το σύστημα λόγω της τοπολογίας Mesh είναι ικανό να σε κλάσματα δευτερολέπτου να βρει καινούργια και την γρηγορότερη διαδρομή και να την αποθήκευσει στην μνήμη του, προκειμένου να μην χαθεί η πληροφορία. Η ασφάλεια και η αξιοπιστία των δεδομένων διασφαλίζονται μέσω των μηχανισμών CSMA-CA και κρυπτογράφησης AES που ενσωματώνει το πρωτόκολλο. Τα ενσύρματα συστήματα παρακολούθησης μπορεί να καταλήξουν να είναι πολύ πιο ακριβά από θέμα κόστους, μεγαλύτερος ο χρόνος εγκατάστασης του και λιγότερα αξιόπιστα σε ένα πλοίο. Μέσω του ZigBee πλέον κάνουμε την μετάβαση στο Smart Ship & Internet of Things, δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης. Συννοίζοντας το πλοίο και κατά επέκταση η ναυτιλιακή εταιρεία περνάει από την ‘αντιδράση της βλάβης’ στην ‘πρόληψη’ και μετά πέρατος του ταξιδιού στην αξιολόγηση και στην δημιουργία για εναλλακτικές στρατηγικές προκειμένου να βελτιστοποιήσουν τις δυνατότητες τους και να μειώσουν το κόστος.

5.1 Προτάσεις για βελτίωση

Προκειμένου να βελτιωθεί το σύστημα ZigBee με τοπολογία Mesh και για να γίνει όλο και πιο ελκυστικό για τα πλοία και τις εταιρείες προτείνεται η πλήρης ενεργειακή αυτονομία. Δηλαδή, μπορούμε να εγκαταλήψουμε πλήρες το sleep mode και την χρήση μπαταριών, αν η ενέργεια που απαιτεί το σύστημα το αντλήσουμε από το ίδιο το ναυτιλιακό περιβάλλον, αξιοποιώντας για παράδειγμα τις μόνιμες μηχανικές δονήσεις του μηχανοστάσιου, καθώς και την χρήση των θερμοηλεκτρικών στοιχείων μεταξύ των σωληνώσεων εξαγωγής καυσαερίων και του περιβάλλοντος χώρου. Μία ακόμη πρόταση είναι η διασύνδεση Cloud (Δ/Φ Internet), ώστε καθώς ενημέρωνεται το πλοίο μέσω του υπολογιστή του Coordinator η ίδια η εταιρεία να ενημέρωται ταυτόχρονα. Επίσης μπορούμε να τοποθετήσουμε στο σύστημα να καταλαβαίνει μέσω από το σύνολο των τιμών του, από διάφορα ταξίδια την πρώιμη κόπωση των μηχανών ή να μπορεί να προβλέψει πότε οποιοδήποτε από τα προαναφερθέντα φαινόμενα είναι low risk, medium, high risk και να ενημερώνει το χρήστη, καθώς και να το ενημερώνει για το πότε πρέπει να γίνει η οποιαδήποτε συντήρηση προκειμένου να αποφευχθούν ατυχήματα και λάθη.

Βιβλιογραφία

1. **IMO (International Maritime Organization). (2022).** *MARPOL Consolidated Edition 2022: Articles, Protocols, Annexes and Unified Interpretations*. London: IMO Publishing.
2. **Thomas, R. E., Murphy, P. M., & Thomas, O. O. (2018).** *Thomas' Stowage: The Properties and Stowage of Cargoes* (8th ed.). Glasgow: Brown, Son & Ferguson.
3. **Frampton, R. M., & Uttridge, P. A. (2017).** *Meteorology for Seafarers* (5th ed.). Glasgow: Brown, Son & Ferguson.
4. **ΘΕΩΡΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ** Γ. Σ. Τριανταφύλλου Καθηγητής Ε.Μ.Π. 2018
5. **Eady, F. (2007).** *Hands-On ZigBee: Implementing 802.15.4 with Microcontrollers*. Newnes (Elsevier).
6. **Atmel Corporation. (2006).** *AT86RF230: ZigBee/IEEE 802.15.4 Transceiver* [Datasheet].
7. **Wang, C., Jiang, T., & Zhang, Q. (Eds.). (2014).** *ZigBee Network Protocols and Applications*. CRC Press (Taylor & Francis Group).
8. **Farahani, S. (2008).** *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Newnes (Elsevier).
9. **Marín-Pérez, R., et al. (2012).** Design and Field Test of a WSN Platform Prototype for Long-Term Environmental Monitoring. *Sensors* (MDPI). (<https://www.mdpi.com/1424-8220/15/4/9481>)
10. MQTT-SN: The Smart Choice for IIoT (Industrial IoT). (<https://www.hivemq.com/blog/mqtt-sn-smart-choice-for-iiot/>)