



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη Συνύπαρξης Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και Δικτύων Wi-Fi σε Πραγματικό Περιβάλλον

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρηστίνα Α. Μακρή

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη Συνύπαρξης Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και Δικτύων Wi-Fi σε Πραγματικό Περιβάλλον

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρηστίνα Α. Μακρή

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Ιούλιο του 2011.

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Παναγιώτης Κοττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....
Χρηστίνα Α. Μακρή

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Χρηστίνα Μακρή, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη συνύπαρξης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSNs) και των δικτύων Wi-Fi σε συνθήκες πραγματικού περιβάλλοντος. Η μελέτη αυτή έγινε πειραματικά με την διεξαγωγή του πειράματος σε χώρο του εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων. Η επεξεργασία των μετρήσεων κατέδειξε την ύπαρξη παρεμβολών στο δίκτυο των ασύρματων αισθητήρων.

Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν οι παρεμβολές που καταγράφηκαν για δύο διαφορετικές θέσεις του Wi-Fi, και το συμπέρασμα ήταν ότι η μείωση της απόστασης μεταξύ του Wi-Fi με το WSN αυξάνει τον αριθμό των πακέτων που ο δέκτης του WSN δεν μπορεί να λάβει .

Βέβαια, προηγουμένως έχει παρουσιαστεί μια ανάλυση σε θεωρητικό επίπεδο για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και το λειτουργικό σύστημα TinyOS, το οποίο χρησιμοποιούν οι αισθητήρες. Επιπλέον, μελετώνται τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που διέπουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (IEEE 802.15.4) και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN (IEEE 802.11).

Λέξεις Κλειδιά

Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αισθητήρες, IEEE 802.15.4, ασύρματα τοπικά δίκτυα, Wi-Fi, IEEE 802.11, ad-hoc δίκτυα, TinyOS, NesC, συνύπαρξη, παρεμβολές, ρυθμός απωλειών πακέτων PLR

Abstract

The scope of this thesis was to study the coexistence of wireless sensor networks (WSNs) and Wi-Fi networks in real environment. This study was experimental with the experiment in the laboratory of Wireless Telecommunications. The processing of measurements showed the existence of interference in the wireless sensor network.

Specifically, presented the interference recorded for two different position of the Wi-Fi and it was concluded that the reduction of distance between Wi-Fi with WSN increases the number of packet that the base-mote of WSN can not receive.

Of course, previously presented an analysis at the theoretical level for wireless sensor networks and operating system TinyOS, which use sensors. Moreover, studied communication protocols that regulate WSNs (IEEE 802.15.3) and wireless local networks WLAN (IEEE 802.11).

Key Words

Wireless sensor networks, sensors, IEEE 802.15.4, wireless local networks, Wi-Fi, IEEE 802.11, ad-hoc networks, TinyOS, NesC, coexistence, interference, packet loss ratio PLR

Ευχαριστήριο Σημείωμα

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Χρήστο Καψάλη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της διπλωματικής και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό το επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα.

Ακόμη, ευχαριστώ την Τερψιχόρη Βελιβασάκη, υποψήφια διδάκτορα Ε.Μ.Π, για το ενδιαφέρον που έδειξε, τις πολύτιμες παρατηρήσεις της και την σημαντική συνεισφορά της κατά την εκπόνηση της εργασίας. Όπως επίσης, ευχαριστώ την συνάδελφο Άννα Αναστασοπούλου για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά την εκτέλεση του πειραματικού μέρους της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου.

Θα ήθελα να αναφέρω ότι η εργασία αυτή αφιερώνεται στην οικογένειά μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.....	19
Εισαγωγή.....	19
1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.....	19
1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	20
Κεφάλαιο 2.....	23
Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων WSNs – Wireless Sensor Networks.....	23
2.1 Περιγραφή Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	23
2.2 Σημαντικές Ιδιότητες των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	24
2.3 Διαφοροποίηση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων από τα υπόλοιπα Ad-hoc Δίκτυα.....	24
2.4 Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	26
2.5 Συνοπτική περιγραφή των εφαρμογών.....	27
2.5.1 Περιβαλλοντικές εφαρμογές.....	27
2.5.2 Γεωργία.....	28
2.5.3 Οικιακοί αυτοματισμοί.....	28
2.5.4 Υγειονομική και φαρμακευτική περίθαλψη.....	29
2.5.5 Επιτήρηση μηχανών και βιομηχανικές εφαρμογές.....	31
2.5.6 Έλεγχος μεταφορών και συγκοινωνιών.....	32
2.5.7 Εφαρμογές ασφαλείας.....	32
Κεφάλαιο 3.....	33
Θέματα Αρχιτεκτονικής στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων - WSNs.....	33
3.1 Αρχιτεκτονική Ασύρματου Κόμβου (Hardware και Software).....	33
3.1.1 Μικροεπεξεργαστής.....	34
3.1.2 Μνήμη.....	34
3.1.3 Πομποδέκτης.....	34
3.1.4 Αισθητήρες και Ενεργοποιητές.....	34
3.1.5 Πηγή ενέργειας.....	35
3.2 Χαρακτηριστικά Στοιχεία και Δείκτες των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	35
3.2.1 Χρόνος Ζωής.....	35
3.2.2 Δυνατότητα Αίσθησης.....	36
3.2.3 Δυνατότητα Επεξεργασίας Δεδομένων.....	36
3.2.4 Κάλυψη και Επεκτασιμότητα.....	37
3.2.5 Είδη Παράταξης Κόμβων.....	37
3.2.6 Συντήρηση.....	37
3.2.7 Localization.....	38
3.2.8 Ασφάλεια.....	38
3.2.9 Δυνατότητα Επικοινωνίας.....	38
3.3 Τοπολογία στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	39
3.4 Αρχιτεκτονική στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	41
3.4.1 Το Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer).....	42
3.4.2 Το Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων (Data Link Layer).....	42

3.4.3 Το Επίπεδο Δικτύου (Network Layer)	43
3.4.4 Το Επίπεδο Μεταφοράς (Transport Layer).....	44
3.4.5 Το Επίπεδο Εφαρμογών (Application Layer).....	44
3.5 Δρομολόγηση στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	44
3.6 Μέσα Μετάδοσης των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	45
Κεφάλαιο 4.....	47
Τα Πρότυπα της Οικογένειας του IEEE 802.15.....	47
4.1 Γενικά.....	47
4.2 Πρότυπο IEEE 802.15.4.....	49
4.2.1 Το Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer) του 802.15.4.....	53
4.2.2 Το Υπο-επίπεδο Ελέγχου Προσπέλασης στο Μέσο Μετάδοσης (MAC-Media Access Control) του 802.15.4.....	54
4.2.3 Η Δομή του Πλαισίου του 802.15.4.....	56
4.3 ZigBee.....	59
4.3.1 Τα Επίπεδα του Πρωτοκόλλου ZigBee.....	59
4.3.2 Η Δομή του Πλαισίου του ZigBee στο Επίπεδο Δικτύου.....	61
4.4 Πλεονεκτήματα Χρήσης του IEEE 802.15.4 και ZigBee.....	62
Κεφάλαιο 5.....	63
Τα Πρότυπα της Οικογένειας του IEEE 802.11.....	63
5.1 Γενικά.....	63
5.2 Παραλλαγές του Πρωτοκόλλου 802.11.....	66
5.2.1 Το Πρωτόκολλο 802.11a.....	66
5.2.2 Το Πρωτόκολλο 802.11b.....	66
5.2.3 Το Πρωτόκολλο 802.11c.....	67
5.2.4 Το Πρωτόκολλο 802.11e.....	67
5.2.5 Το Πρωτόκολλο 802.11f.....	67
5.2.6 Το Πρωτόκολλο 802.11g.....	67
5.2.7 Το Πρωτόκολλο 802.11h.....	67
5.2.8 Το Πρωτόκολλο 802.11i.....	67
5.2.9 Το Πρωτόκολλο 802.11n.....	68
5.2.10 Το Πρωτόκολλο 802.11y.....	68
5.3 Το Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer) του 802.11.....	68
5.4 Το Υπο-επίπεδο Ελέγχου Προσπέλασης στο Μέσο Μετάδοσης (MAC-Mac Access Control) του 802.11.....	72
5.5 Η Δομή των Πακέτων του 802.11.....	74
5.5.1 Η Δομή των Πακέτων του 802.11b.....	75
5.5.2 Η Δομή των Πακέτων του 802.11g.....	76
Κεφάλαιο 6.....	79
Πλατφόρμες Ασύρματων Αισθητήρων	79
6.1 Γενικά.....	79
6.2 Κατηγορίες Πλατφορμών.....	79
6.3 Μερικά Παραδείγματα Πλατφορμών.....	81
6.4 Διάφορες Αρχιτεκτονικές Πλατφορμών.....	85
6.5 Η Εξέλιξη στο Υλικό και Λογισμικό των Πλατφορμών.....	86
6.6 Το Κατάλληλο Λειτουργικό Σύστημα των Πλατφορμών.....	88
Κεφάλαιο 7.....	89
Το Λειτουργικό Σύστημα TinyOS	89
7.1 Γενικά.....	89
7.2 Απαιτήσεις Σχετικά με την Σχεδίαση Λειτουργικών Συστημάτων για WSNs.....	89

7.3	Επισκόπηση του TinyOS.....	90
7.4	Ιστορικά Στοιχεία και Εξέλιξη του TinyOS.....	90
7.5	Η Γλώσσα NesC.....	91
7.5.1	Commands- Εντολές.....	93
7.5.2	Events- Γεγονότα.....	93
7.5.3	Tasks - Διεργασίες.....	93
7.6	Το Μοντέλο των Συστατικών – Component-Based Model.....	94
7.7	Η Αρχιτεκτονική του TinyOS.....	94
7.8	Τα Συστατικά – Components του TinyOS.....	95
7.9	Ο Χρονοπρογραμματισμός στο TinyOS – Scheduler.....	96
7.10	Η Επικοινωνία στο TinyOS.....	97
7.11	Ενεργά Μηνύματα – Active Messages.....	98
7.12	Διεπαφές– Interfaces.....	99
7.13	Δομοστοιχεία– Modules.....	99
7.14	Διαρθρώσεις– Configurations.....	100
Κεφάλαιο 8	.....	101
	Ο Ασύρματος Αισθητήρας IRIS-XM2110	101
8.1	Γενικά.....	101
8.2.1	Ο Μικροελεγκτής Atmel ATmega 1281	104
8.2.2	Σύνδεση με Υπολογιστή.....	105
8.2.3	Τροφοδοσία και Κατανάλωση Ενέργειας.....	106
8.2.4	Κεραία.....	107
8.2.5	Ο Πομποδέκτης Atmel AT86RF230.....	108
8.3	Τυπικές Συνθήκες Λειτουργίας της Μονάδας IRIS-XM2110.....	110
Κεφάλαιο 9	.....	113
	Πειραματική Ανάλυση των Παρεμβολών των WLAN σε 802.15.4 IRIS-XM2110 Motes.....	113
	.....	113
9.1	Εισαγωγικά.....	113
9.2	Οι Μονάδες και τα Όργανα του Πειράματος.....	114
9.3	Προετοιμασία και Διεξαγωγή του Πειράματος.....	119
9.4	Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις των Μετρήσεων του Πειράματος.....	124
Κεφάλαιο 10	.....	135
	Επίλογος.....	135
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	.....	137

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	26
Εικόνα 2: Ανάπτυξη WSN για την παρακολούθηση της πανίδας.....	27
Εικόνα 3: Εγκατάσταση αισθητήρα για τον έλεγχο της υγρασίας του εδάφους.....	28
Εικόνα 4: Ασύρματος και απομακρυσμένος έλεγχος σπιτιού με χρήση αισθητήρων.....	29
Εικόνα 5: Εφαρμογές των WSNs στον τομέα της υγείας.....	30
Εικόνα 6: Βαλβίδα εκτόνωσης για την ανίχνευση διαρροών.....	31
Εικόνα 7: Σηματοδότηση σιδηροδρόμων με τη χρήση WSN.....	32
Εικόνα 8: Δίκτυο πυρανίχνευσης με τη χρήση WSN.....	32
Εικόνα 9: Βασική δομή ασύρματου κόμβου-αισθητήρα.....	33
Εικόνα 10: Μοντέλο Επικοινωνίας Δικτύων Αισθητήρων.....	39
Εικόνα 11: Είδη τοπολογιών WSNs.....	40
Εικόνα 12: Τα επίπεδα-layers στα WSNs.....	42
Εικόνα 13: Το ασύρματο εύρος του IEEE 802.....	47
Εικόνα 14: Αρχιτεκτονική του 802.15.4.....	48
Εικόνα 15: Αρχιτεκτονική συσκευής ενός LR-WPAN.....	49
Εικόνα 16: Τα κανάλια συχνοτήτων για το πρωτόκολλο 802.15.4.....	50
Εικόνα 17: Τοπολογία αστέρα.....	51
Εικόνα 18: Τοπολογία peer-to-peer.....	52
Εικόνα 19: Τοπολογία cluster – tree.....	52
Εικόνα 20: Δομή πακέτων του φυσικού επιπέδου του 802.15.4.....	54
Εικόνα 21: Σχηματική διάταξη του πλαισίου Beacon.....	57
Εικόνα 22: Σχηματική διάταξη του πλαισίου Δεδομένων - Data Frame.....	57
Εικόνα 23: Σχηματική διάταξη του πλαισίου Επιβεβαίωσης – Ack frame.....	58
Εικόνα 24: Σχηματική διάταξη του πλαισίου Ελέγχου – Command frame.....	59
Εικόνα 25: Στοιβά του πρωτοκόλλου ZigBee.....	61
Εικόνα 26: Μορφή του πλαισίου NWK του ZigBee.....	61
Εικόνα 27: Επίπεδα Λειτουργίας 802.11.....	64
Εικόνα 28: Παράδειγμα ενός WLAN.....	64
Εικόνα 29: Infrastructure mode.....	65
Εικόνα 30: Ad-hoc mode.....	65
Εικόνα 31: Τα κανάλια λειτουργίας του Wi-Fi 802.11b/g.....	66
Εικόνα 32: Η χρονική αναπαράσταση της FHSSS.....	69
Εικόνα 33: Δειγματοληψία του καναλιού και συγχρονισμός με τη βοήθεια της preamble ακολουθίας.....	70
Εικόνα 34: Η χρονική αναπαράσταση και το φάσμα ενός σήματος πριν και μετά την DSSS.....	71
Εικόνα 35: Η φασματική αναπαράσταση της τεχνικής OFDM.....	72
Εικόνα 36: Το πρόβλημα του «κρυμμένου» τερματικού για το Wi-Fi.....	73
Εικόνα 37: Χρήση των πλαισίων RTS και CTS στο CSMA/CA.....	74
Εικόνα 38: Η δομή του πακέτου του υπο-επιπέδου MAC του 802.11.....	75
Εικόνα 39: Διαμόρφωση του 802.11 με DSSS και κώδικα Barker.....	76
Εικόνα 40: Δομές πακέτων του 802.11b.....	76
Εικόνα 41: Μορφή πακέτου του 802.11g για OFDM.....	77
Εικόνα 42: Δομές πακέτων του 802.11g για DSSS-OFDM.....	77
Εικόνα 43: Η Μονάδα Spec.....	81

Εικόνα 44: Η Μονάδα Mica2.....	82
Εικόνα 45: Η Μονάδα Tmote-sky.....	82
Εικόνα 46: Η πλατφόρμα iMote της intel.....	83
Εικόνα 47: Η πλατφόρμα Stargate της Crossbow.....	83
Εικόνα 48: Η Μονάδα BT-Node.....	84
Εικόνα 49: Η μονάδα IRIS.....	84
Εικόνα 50: Δομή μιας εφαρμογής σε NesC.....	92
Εικόνα 51: Η στοίβα αρχιτεκτονικής του TinyOS.....	95
Εικόνα 52: Σχεδιάγραμμα μια εφαρμογής και των components.....	96
Εικόνα 53: Στοίβα Επικοινωνίας στο TinyOS.....	98
Εικόνα 54: Ο αισθητήρας IRIS-XM2110.....	101
Εικόνα 55: Ο μικροελεγκτής ATmega 1281.....	104
Εικόνα 56: IRIS-XM2110 (άνω όψη).....	105
Εικόνα 57: IRIS-XM2110 (κάτω όψη).....	105
Εικόνα 58: Διάγραμμα τροφοδοτικού του IRIS-XM2110.....	106
Εικόνα 59: Διάγραμμα της μονάδας IRIS-XM2110.....	107
Εικόνα 60: Ο πομποδέκτης AT86RF230.....	109
Εικόνα 61: Το διάγραμμα του AT86RF230.....	110
Εικόνα 62: Η αίθουσα EMC του εργαστηρίου.....	113
Εικόνα 63: Τα κανάλια του 802.11 και του 802.15.4 στην ζώνη συχνοτήτων ISM των 2.4 GHz.....	114
Εικόνα 64: Ο Spectrum Analyzer Agilent E4403B.....	115
Εικόνα 65: Η κεραία Aaronia HyperLog 7060.....	116
Εικόνα 66: Ο δρομολογητής Cisco WAP4410N.....	117
Εικόνα 67: Ο υπολογιστής Sony Vaio VPCP11KX-B.....	117
Εικόνα 68: Ο υπολογιστής DELL LATITUDE D620.....	118
Εικόνα 69: Ο IRIS-XM2110 Base-mote.....	118
Εικόνα 70: Ο IRIS-XM2110 Sender-mote.....	119
Εικόνα 71: Εκτέλεση της εντολής javanet.tinyos.tools.Listen –common serial@/dev/ttyUSB1:57600 χρησιμοποιώντας το script με τιμές παραμέτρων 20 5 10 στο terminal.....	121
Εικόνα 72: Η πειραματική διάταξη με τον παρεμβολέα στη κοντινή θέση.....	122
Εικόνα 73: Η πειραματική διάταξη με τον παρεμβολέα στη μακρινή θέση.....	123
Εικόνα 74: Το διάγραμμα της ισχύος του Wi-Fi σε μW στη συχνότητα λειτουργίας του, 2.412 GHz, στην κοντινή και μακρινή θέση συναρτήσει του χρόνου σε min.....	124
Εικόνα 75: Το διάγραμμα του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR του WSN συναρτήσει της απόστασης πομπού και δέκτη χωρίς Wi-Fi traffic.....	126
Εικόνα 76: Το διάγραμμα του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR του WSN συναρτήσει της απόστασης πομπού και δέκτη με Wi-Fi traffic στη μακρινή θέση.....	127
Εικόνα 77: Το διάγραμμα του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR του WSN συναρτήσει της απόστασης πομπού και δέκτη με Wi-Fi traffic στην κοντινή θέση.....	128
Εικόνα 78: Τα διαγράμματα του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR του WSN σε συνάρτηση με την απόσταση του πομπού για την εκάστοτε θέση και κατάσταση του Wi-Fi.....	129
Εικόνα 79: Ιστόγραμμα της συχνότητας εμφάνισης του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR χωρίς την παρουσία του Wi-Fi.....	130
Εικόνα 80: Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rayleigh.....	131
Εικόνα 81: Ιστόγραμμα της συχνότητας εμφάνισης του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR με το Wi-Fi στη μακρινή θέση.....	132
Εικόνα 82: Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Κανονικής κατανομής.....	132
Εικόνα 83: Ιστόγραμμα της συχνότητας εμφάνισης του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR με το Wi-Fi στην κοντινή θέση.....	133

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Τα τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των τεσσάρων κατηγοριών των WSNs.....	80
Πίνακας 2: Σημαντικές πλατφόρμες δικτύων αισθητήρων οργανωμένες ανά κατηγορία συσκευών.....	87
Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα IRIS-XM2110.....	103
Πίνακας 4: Η εξέλιξη των μικροελεγκτών.....	104
Πίνακας 5: Οι απαιτήσεις ρεύματος του αισθητήρα υπό διάφορες λειτουργίες.....	106
Πίνακας 6: Τυπικές συνθήκες λειτουργίας του αισθητήρα IRIS-XM2110.....	111

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξη της τεχνολογίας των αισθητήρων άνοιξε εντελώς νέα πεδία για τις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές. Η συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής έδωσε ώθηση στον αυτοματισμό και την επιστημονική παρατήρηση. Επιπλέον, οι δυνατότητες των αισθητήρων έδωσαν το κίνητρο για να διερευνηθεί η προοπτική της καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων τους από απόσταση, εκμεταλλεύοντας την παράλληλη ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών. Η συγχώνευση της τεχνολογίας των αισθητήρων, των υπολογιστικών μικροσυσκευών και των ασύρματων επικοινωνιών οδήγησε σε μία νέα καινοτομία, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSNs).

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) αποτελούν σήμερα ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας στον τομέα των Ασύρματων Επικοινωνιών, δεδομένου του εκτενούς εύρους εφαρμογών που μπορούν να υποστηρίξουν. Συνιστούν μία νέα τάξη υπολογιστικών συστημάτων, που διευρύνει την ανθρώπινη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με το φυσικό περιβάλλον.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) μαζί με τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) είναι μεταξύ των πιο εφαρμοσμένων ασύρματων τεχνολογιών που λειτουργούν στη βιομηχανική, ιατρική και επιστημονική συχνότητα των 2.4 GHz (ISM band). Η διευρυνόμενη χρήση όλων των παραπάνω τεχνολογιών στην ίδια ζώνη συχνοτήτων περιλαμβάνει υπολογίσιμα προβλήματα συνύπαρξης, που επηρεάζει κατά κόρον τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εξαιτίας της χαμηλής ισχύος μετάδοσης που έχουν. Η λειτουργία κάτω από μία συγκεκριμένη συχνότητα δεν εγγυάται την προστασία από τις υπόλοιπες παρεμβαλλόμενες συσκευές, συνεπώς η νέα γενιά των WSNs, θα πρέπει σχεδιάζεται με την ικανότητα ευελιξίας της κεντρικής συχνότητας λειτουργίας τους και αυτορρυθμισής τους ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών, ο κύριος όγκος των παρεμβολών στα WSNs έχει καταδειχθεί ότι οφείλεται στα WLAN. Έτσι, πολλές εργασίες προτείνουν διάφορους τρόπους συνύπαρξης μεταξύ των πρωτοκόλλων του 802.15.4 και του 802.11 για την αποφυγή των συγκρουόμενων πακέτων στην ίδια συχνότητα μετάδοσης.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θα παρουσιαστούν τα πρωτόκολλα επικοινωνίας των WLAN και WSNs σε θεωρητικό επίπεδο, θα γίνει αναφορά σε μερικές από τις βασικές πλατφόρμες των αισθητήρων και θα μελετηθούν οι παρεμβολές των WLAN 802.11 στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων 802.15.4 σε πειραματικό επίπεδο. Θα γίνει προσπάθεια να συσχετιστεί η παρεμβολή του WLAN με το ρυθμό απωλειών πακέτων (Packet Loss Ratio - PLR) της μετάδοσης του WSN.

Κεφάλαιο 1

1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Στη βάση λοιπόν του αντικειμένου μελέτης, η εργασία ακολουθεί την παρακάτω δομή:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια συνοπτική αναφορά στα βασικά πλεονεκτήματα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, παρατίθενται οι διαφορές τους από τα υπόλοιπα «παραδοσιακά» Ad-hoc δίκτυα και παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένες εφαρμογές τους.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας και οργάνωσης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Αρχικά, παρατίθενται η βασική αρχιτεκτονική ενός ασύρματου κόμβου, στη συνέχεια καταγράφονται τα χαρακτηριστικά και οι δείκτες των WSNs, η αρχιτεκτονική τους, οι βασικές αρχές σχεδιασμού τόσο της τοπολογίας όσο και της δρομολόγησή τους ενώ γίνεται και αναφορά στα μέσα μετάδοσής τους.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά πρωτόκολλα του προτύπου IEEE 802.15. Δίνεται έμφαση στο πρότυπο 802.15.4 των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, περιγράφοντας το φυσικό επίπεδο, το υπο-επίπεδο ελέγχου προσπέλασης στο μέσο μετάδοσης και τη δομή του πλαισίου του. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο πρωτόκολλο ZigBee, παρουσιάζοντας τα επίπεδα αυτού του πρωτοκόλλου και τη δομή του πλαισίου του. Στο τέλος, γίνεται και συνοπτική αναφορά στα πλεονεκτήματα χρήσης των δύο αυτών πρωτοκόλλων.

Στο Κεφάλαιο 5 μελετάται το πρωτόκολλο IEEE 802.11. Παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφορες παραλλαγές των προτύπων της οικογένειας του IEEE 802.11 καθώς και το φυσικό επίπεδο και το υπο-επίπεδο ελέγχου προσπέλασης στο μέσο μετάδοσης ενώ γίνεται και αναφορά στη δομή των πακέτων του 802.11 με έμφαση στη δομή των πακέτων του 802.11b και του 802.11g.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται οι κυριότερες πλατφόρμες που έχουν αναπτυχθεί για την υποστήριξη των WSN, κατηγοριοποιημένες ανάλογα με την εφαρμογή που υλοποιούν και τις δυνατότητές τους ενώ γίνεται και αναφορά στην εξέλιξη του υλικού και του λογισμικού τους.

Στο Κεφάλαιο 7 περιγράφεται το λογισμικό TinyOS που είναι απαραίτητο για τη λειτουργία των κόμβων του WSN. Το TinyOS είναι ένα λειτουργικό σύστημα ειδικά σχεδιασμένο για ασύρματα ενσωματωμένα συστήματα και είναι αυτό που χρησιμοποιεί η μονάδα που θα συμμετέχει στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Εν συντομία περιγράφονται η ιστορία και η εξέλιξή του ενώ γίνεται και αναφορά στην γλώσσα προγραμματισμού NesC, στην οποία είναι γραμμένες οι βιβλιοθήκες και εφαρμογές του TinyOS. Περιγράφονται τέλος, η οργανωτική δομή του TinyOS και ο τρόπος υλοποίησης των υπηρεσιών επικοινωνίας.

Στο Κεφάλαιο 8 περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας IRIS-XM2110 που χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Περιγράφονται συνοπτικά ο μικροελεγκτής της Atmel ATmega 1282, η σύνδεση με υπολογιστή, η κεραία της συσκευής, η τροφοδοσία της ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη λειτουργία του ενσωματωμένου πομποδέκτη Atmel AT86RF230. Αναφορά γίνεται τέλος, στις τυπικές συνθήκες λειτουργίας της μονάδας IRIS-XM2110.

Στο Κεφάλαιο 9 περιγράφονται τα όργανα και οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση του πειράματος καθώς και η προετοιμασία που χρειάστηκε για την εκτέλεση του πειράματος. Γίνεται η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας ενώ καταγράφονται και οι μετρήσεις του πειράματος μέσω διαγραμμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία τους και εξάγονται ορισμένα βασικά συμπεράσματα από αυτά.

Στο Κεφάλαιο 10 γίνεται μια σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας ενώ παρουσιάζονται και οι προοπτικές που προκύπτουν για περαιτέρω διερεύνηση .

Κεφάλαιο 2

Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων WSNs – Wireless Sensor Networks

2.1 Περιγραφή Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Η πρόοδος στις ασύρματες επικοινωνίες, στον ενσωματωμένο υπολογισμό (*embedded computing*), στα VLSI κυκλώματα χαμηλής κατανάλωσης και κυρίως στην τεχνολογία των ηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS – Micro Electro Mechanical Systems) έχουν συντελέσει στην ανάπτυξη πολυ-λειτουργικών αισθητήρων (smart sensors) χαμηλής ισχύος και κόστους για να μπορούν να παραχθούν και να παραταχθούν σε μεγάλο αριθμό με αποτέλεσμα οι πόροι τους να είναι εξαιρετικά περιορισμένοι όσον αφορά την ενέργεια, τη μνήμη, το εύρος ζώνης επικοινωνίας και την υπολογιστική τους ικανότητα. Επίσης, είναι μικρού μεγέθους και ενεργειακά αυτόνομοι, αποτελούνται από επιμέρους τμήματα αίσθησης, επεξεργασίας δεδομένων και επικοινωνίας και είναι ικανοί να αντιδρούν σε μεταβολές φυσικών φαινομένων του περιβάλλοντος. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να επικοινωνήσουν σε σχετικά μικρές αποστάσεις μεταξύ τους και έχουν τη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας.

Τα WSNs αποτελούν μια σημαντική αναβάθμιση των απλών αισθητήρων και χρησιμοποιούνται κυρίως για την παρατήρηση και τον έλεγχο του φυσικού περιβάλλοντος σε περιπτώσεις που είναι δύσκολη η πρόσβαση. Συνήθως, τα WSNs είναι ad-hoc δίκτυα, που αποτελούνται από έναν κεντρικό αποδέκτη και μερικές δεκάδες ή και εκατοντάδες μικρούς περιφερειακούς κόμβους-αισθητήρες. Οι κόμβοι αυτοί έχουν την ικανότητα να επεξεργάζονται τα πρωτογενή δεδομένα και να μοιράζονται την πληροφορία που οι ίδιοι επεξεργάστηκαν με τους γειτονικούς κόμβους. Στόχος του δικτύου, ανεξαρτήτως τοπολογίας και πρωτοκόλλων, είναι η ροή δεδομένων από τον κεντρικό αποδέκτη προς τους κόμβους και αντιστρόφως.

Προκύπτει λοιπόν ότι κάθε WSN συμπεριφέρεται σαν ένα κεντροποιημένο σύστημα με τους κόμβους να είναι κατανεμημένοι και συνεργαζόμενοι ` πιο συγκεκριμένα, σαν ένα σύστημα βάσης δεδομένων, το οποίο χρησιμοποιεί ένα δίκτυο με περιορισμένους πόρους στοχεύοντας στη συλλογή δεδομένων και στην καταγραφή συμβάντων.

2.2 Σημαντικές Ιδιότητες των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Η εξάπλωση αυτής της τεχνολογίας και η ευρεία γκάμα των εφαρμογών της οφείλεται όχι μόνο στην επινοητικότητα των χρηστών της αλλά και στα πλεονεκτήματα και τις ιδιότητες που αυτή παρουσιάζει.

Οι βασικές ιδιότητες των WSN συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

- ο Η ύπαρξη πολλών κόμβων-αισθητήρων σε ένα δίκτυο, η οποία προσφέρει υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας και υψηλή ανάλυση αφού λαμβάνονται περισσότερες μετρήσεις.
- ο Το χαμηλό κόστος κυρίως λόγω έλλειψης καλωδίωσης.
- ο Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.
- ο Η δυνατότητα αυτο-οργάνωσής τους χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης.
- ο Η ανάπτυξη της ασύρματης δικτύωσης.
- ο Η αυξημένη χωρική πυκνότητα της διάταξης τους, η οποία παρέχει μεγαλύτερη ανοχή σε σφάλματα.
- ο Η δυνατότητα λειτουργίας τους σε ακραίες συνθήκες λόγω της εξέλιξης των μικροηλεκτρικών συστημάτων.
- ο Η μεγάλη ποικιλία των τύπων των αισθητήρων αφού είναι διαθέσιμοι θερμικοί, μαγνητικοί, σεισμικοί, οπτικοί αισθητήρες, αισθητήρες ακουστικών συχνοτήτων και πολλοί άλλοι.
- ο Επικοινωνία περιορισμένου βεληνεκούς και multi-hop δρομολόγηση.
- ο Συχνά μεταβαλλόμενη τοπολογία εξαιτίας της εξασθένησης του σήματος και της αστοχίας των κόμβων.

2.3 Διαφοροποίηση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων από τα υπόλοιπα Ad-hoc Δίκτυα

Οι εφαρμογές των WSNs απαιτούν τη χρήση ασύρματης ad-hoc δικτύωσης για να μπορέσουν να υλοποιηθούν. Αν και τα ασύρματα ad-hoc δίκτυα και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά, όπως ο αυτόνομος τρόπος λειτουργίας κάθε κόμβου, η έλλειψη σταθερής υποδομής του δικτύου και η δυνατότητα αυτό-οργάνωσής τους, τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των «παραδοσιακών» ασύρματων ad-hoc δικτύων δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις εφαρμογές των WSNs.

Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των παρακάτω βασικών διαφορών μεταξύ τους:

- Τα «κοινά» ad-hoc δίκτυα σχεδιάζονται με κριτήριο την μεγιστοποίηση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσιών (QoS – Quality of Service) και την αποδοτικότερη αξιοποίηση του εύρους

ζώνης και όχι την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, αφού η ανάπτυξη αυτών των δικτύων γίνεται σε περιβάλλον με εφικτή την ανθρώπινη επέμβαση και έτσι την αντικατάσταση της πηγής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, τα WSNs σχεδιάζονται με κριτήριο τη βέλτιστη και αποδοτική χρήση της ενέργειας τροφοδότησής τους σε βάρος του QoS για την επίτευξη χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και συνεπώς τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής τους, αφού αναπτύσσονται ως επί το πλείστον σε περιβάλλοντα χωρίς τη δυνατότητα ανθρώπινης παρέμβασης, παρά μόνο κατά την εκκίνηση και αρχικοποίηση του συστήματος.

- Σε ένα «κοινό» ad-hoc δίκτυο οι κόμβοι του αντιμετωπίζονται σαν αυτοτελείς μονάδες, όπου η συνδεσμολογία και η εξυπηρέτησή τους επιτυγχάνεται μέσω του δικτύου. Ο χρήστης συνδέεται με έναν κόμβο ή ένα σύνολο κόμβων και μέσω αυτού απαιτεί κάποια υπηρεσία από έναν άλλο κόμβο και έτσι αλληλεπιδρά άμεσα με τον εξυπηρετητή ή χρήστη στο άλλο άκρο της επικοινωνίας. Έτσι, στην περίπτωση των «παραδοσιακών» ad-hoc δικτύων, αυτά αντιμετωπίζονται ως μέσο διασύνδεσης ξεχωριστών τμημάτων. Αντιθέτως, τα WSNs, όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή του κεφαλαίου, προσεγγίζουν περισσότερο τη λειτουργία των κατανεμημένων συστημάτων αφού ο χρήστης τους επιθυμεί τις πληροφορίες και τις παραμέτρους μιας δυναμικής φυσικής διαδικασίας, οι οποίες εξάγονται από τη συνεργασία όλων των κόμβων-αισθητήρων μαζί και όχι από τον κάθε κόμβο μεμονωμένα. Τα WSNs, δηλαδή λειτουργούν ως μία ενιαία οντότητα που παρέχει στο χρήστη τις υπηρεσίες πληροφοριών.
- Οι κόμβοι των «συμβατικών» ad-hoc δικτύων έχουν ελευθερία κινήσεως, ενώ η τοπολογία ενός WSN παρουσιάζει πολύ αργή μεταβολή. Συνήθως, σε εφαρμογές των WSNs κάποιοι κόμβοι είναι στατικοί και οι υπόλοιποι κινούμενοι.
- Τα περισσότερα «κοινά» ad-hoc δίκτυα χρησιμοποιούν την επικοινωνία από σημείο σε σημείο (point to point) ενώ οι κόμβοι-αισθητήρες βασίζονται κυρίως σε επικοινωνίες ευρυεκπομπής (broadcast communication).
- Ο αριθμός των κόμβων σε ένα «παραδοσιακό» ad-hoc δίκτυο είναι συνήθως μικρός ή μέσος με σχετικά χαμηλή πυκνότητα διάταξής τους, ενώ σε ένα WSN είναι αρκετά μεγαλύτερος με υψηλή πυκνότητα διάταξης.
- Στα «κοινά» ad-hoc δίκτυα η αποστολή δεδομένων γίνεται με υψηλό ρυθμό, ενώ οι κόμβοι-αισθητήρες στα WSNs αποστέλλουν τα δεδομένα με χαμηλό ρυθμό και είναι επιρρεπείς σε σφάλματα και αποτυχίες.
- Στα WSNs, σε αντίθεση με τα τυπικά δίκτυα επικοινωνιών, τα δεδομένα των αισθητήρων μεταφέρονται από πολλαπλές πηγές σε ένα κεντρικό σημείο, το σταθμό βάσης (base station).
- Οι κόμβοι-αισθητήρες των WSNs έχουν περιορισμένη ισχύ, μνήμη και υπολογιστική ικανότητα.
- Στα «παραδοσιακά» ad-hoc δίκτυα η διεύθυνσιодότηση των κόμβων γίνεται με ένα παγκόσμιο αναγνωριστικό ταυτότητας (global ID) ενώ στα WSNs επειδή ο αριθμός των αισθητήρων είναι μεγάλος δεν υπάρχει γενικό αναγνωριστικό ταυτότητας. Αυτό συνεπάγεται την μη αποτελεσματική εφαρμογή των κλασσικών πρωτοκόλλων που βασίζονται στο IP (Internet Protocol) στα δίκτυα αισθητήρων.

2.4 Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα WSNs εφαρμόστηκαν αρχικά για τη «συλλογή δεδομένων» από περιβάλλοντα όπου ήταν δύσκολο να υφίσταται ανθρώπινη παρουσία και έπειτα χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό συμβάντων ή θέσεων, όπως κινούμενων αντικειμένων ή σεισμικών δραστηριοτήτων. Η τρίτη και αναδυόμενη εφαρμογή τους βρίσκεται μεταξύ των άλλων δύο και είναι η λεγόμενη «ανίχνευση καταστάσεων». Σε αυτή την περίπτωση τα WSNs καταγράφουν συγκεκριμένα συμβάντα και τιμές στο χώρο από την παρακολούθηση των οποίων είναι δυνατή η αξιολόγηση των τιμών και ο προσδιορισμός καταστάσεων.

Μεγάλη κινητικότητα παρατηρείται τη σημερινή εποχή γύρω από τις εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρέχουν και των χαρακτηριστικών τους που τα κάνουν κατάλληλα για χρήση σε όλο και περισσότερους τομείς, όπου τα κλασσικά δίκτυα δεν μπορούν να ανταποκριθούν. Οι αισθητήρες έχουν άπειρες εφαρμογές και ελάχιστες πλέον συσκευές δε χρησιμοποιούν κάποιας μορφής αισθητήρα. Μερικά από τα επιστημονικά και βιομηχανικά πεδία στα οποία ενδείκνυται η χρήση των WSNs, όπως παρουσιάζονται και στη Εικόνα 1, είναι:

- Περιβαλλοντικές εφαρμογές
- Γεωργία
- Οικιακοί αυτοματισμοί
- Υγειονομική και φαρμακευτική περίθαλψη
- Επιτήρηση μηχανών και βιομηχανικές εφαρμογές
- Έλεγχος μεταφορών και συγκοινωνιών
- Εφαρμογές ασφαλείας



Εικόνα 1: Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

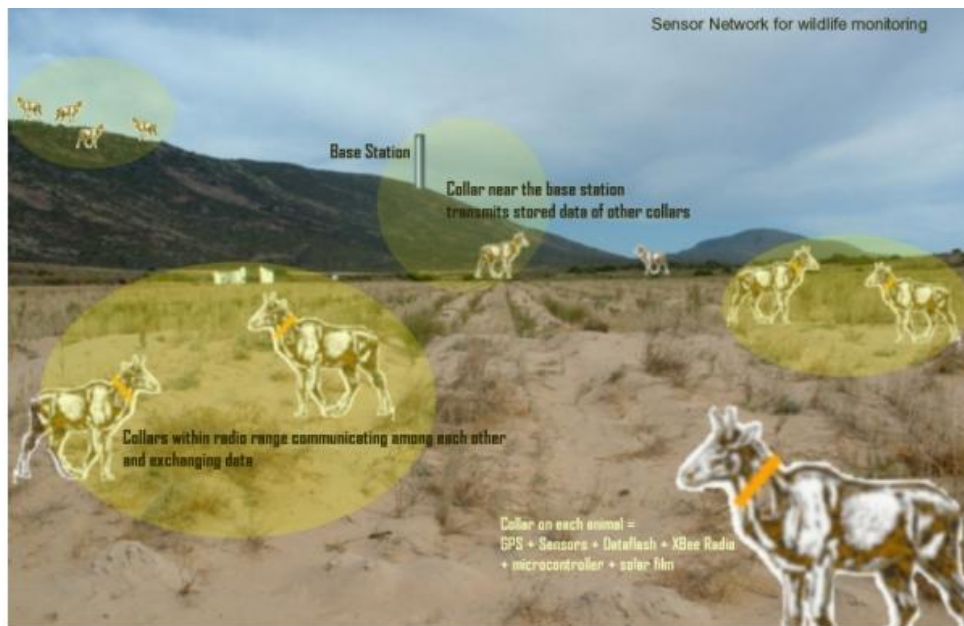
2.5 Συνοπτική περιγραφή των εφαρμογών

2.5.1 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Η επίβλεψη και η ανίχνευση των περιβαλλοντικών συνθηκών γίνεται με την καταγραφή της εξέλιξης ενός οικοσυστήματος. Αυτό είναι δυνατό μέσω των WSNs, αφού μπορούν να επιβλέψουν ένα οικοσύστημα, να καταγράψουν τη βιοποικιλότητα, τη σύσταση του εδάφους, να κάνουν γεωφυσική μελέτη κ.ά.. Υπάρχουν, συνεπώς, διάφορες εφαρμογές που σχετίζονται με το περιβάλλον και ανάλογα με την εφαρμογή διαφοροποιείται και ο τύπος του αισθητήρα που χρησιμοποιείται.

Για εφαρμογές μετεωρολογικής έρευνας και μελέτης της ρύπανσης, χρησιμοποιούνται αισθητήρες βροχόπτωσης, στάθμης νερού και αισθητήρες μέτρησης φυσικών παραμέτρων, όπως θερμοκρασία, ατμοσφαιρική πίεση, υγρασία και άλλες. Ακόμα, υπάρχουν τύποι αισθητήρων για την παρατήρηση και καταγραφή του ζωικού βασιλείου και της μετακίνησης των πτηνών κατά τις περιόδους της μετανάστευσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Μία τέτοια διαδεδομένη οικολογική εφαρμογή είναι αυτή του Πανεπιστημίου του Princeton που ανέπτυξε το πρόγραμμα “Zebnet” με το οποίο παρακολουθείται η μετανάστευση, η συνύπαρξη με άλλα είδη και η νυχτερινή συμπεριφορά των πληθυσμών ζέμπρας στην Αφρική, χρησιμοποιώντας ένα ad-hoc δίκτυο-WSN με το κατάλληλο εύρος ζώνης και ισχύ επεξεργασίας.

Στις περιβαλλοντικές εφαρμογές σημαντικό ρόλο έχει παίξει η χρήση ειδικών προστατευτικών θηκών που βοηθούν στην τοποθέτηση των αισθητήρων σε ακραία και επικίνδυνα περιβάλλοντα όπου δε θα μπορούσε να βρεθεί ο άνθρωπος. Επιπλέον, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι κόμβοι των WSN μπορούν να εκτείνονται σε μεγάλο εύρος και να καλύπτουν μεγάλες περιοχές που είναι δύσβατες για τον άνθρωπο αλλά και για τα μέσα που χρησιμοποιεί για την πυρόσβεση, τα κάνει ιδανικά για την πρόληψη και την άμεση ειδοποίηση των αρμόδιων αρχών.

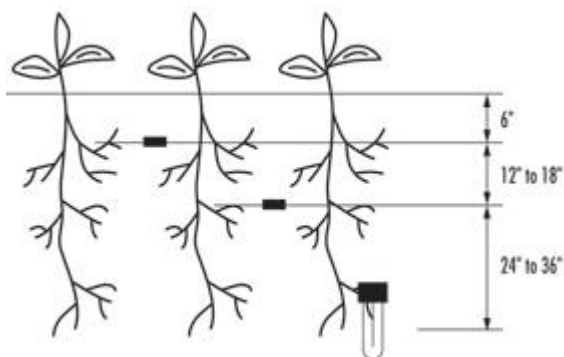


Εικόνα 2: Ανάπτυξη WSN για την παρακολούθηση της πανίδας

2.5.2 Γεωργία

Στις γεωργικές εφαρμογές η χρήση των WSNs συνδέεται με τον εκσυγχρονισμό της παραγωγής και σχετίζεται με την υποστήριξη εφαρμογών ακριβείας για την ορθολογική ρίψη λιπασμάτων, νερού κ.ά. στις φυτείες όποτε και όπου είναι απαραίτητο στην αναγκαία ποσότητα.

Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι η ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων για την άρδευση καλλιεργειών με στόχο τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου (integrated) συστήματος υποβοήθησης λήψης αποφάσεων ικανό να συνδράμει προς την κατεύθυνση της αποδοτικότερης χρήσης των υδάτινων πόρων και συνεπώς στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς και στην βελτίωση της ποιότητας των καλλιεργειών, στα πλαίσια της φιλοσοφίας της “Γεωργίας Ακριβείας” (Precision Agriculture). Πιο συγκεκριμένα, το εν λόγω σύστημα, βάσει των μετρήσεων (data acquisition) της υγρασίας του εδάφους και της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας που λαμβάνει από το εγκατεστημένο στον αγρό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, της μετεωρολογικής πρόβλεψης και των χαρακτηριστικών του αγρού (π.χ. τύπος σπαρτών, τύπος εδάφους, τεχνική άρδευσης κ.ά.) επιτρέπει στον καλλιεργητή να γνωρίζει την ποσότητα νερού που απαιτείται για τη βέλτιστη άρδυσή του ανά περιοχή του αγρού (χωρική παραλλακτικότητα), πετυχαίνοντας έτσι εξοικονόμηση φυσικών πόρων και καλύτερη ποιότητα παραγωγής.



Εικόνα 3: Εγκατάσταση αισθητήρα για τον έλεγχο της υγρασίας του εδάφους

2.5.3 Οικιακοί αυτοματισμοί

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, έξυπνοι αισθητήριοι κόμβοι και μηχανισμοί κίνησης μπορούν να εμφυτευτούν σε συσκευές, όπως ηλεκτρικές σκούπες, φούρνοι μικροκυμάτων και ψυγεία. Αυτοί οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να αλληλεπιδρούν ο ένας με τον άλλον καθώς και με ένα εξωτερικό δίκτυο μέσω του Διαδικτύου ή ενός δορυφόρου, επιτρέποντας στους τελικούς χρήστες να διαχειρίζονται τις οικιακές συσκευές τους από όπου βρίσκονται είτε τοπικά είτε απομακρυσμένα.

Ο σχεδιασμός ενός έξυπνου περιβάλλοντος μπορεί να έχει είτε μια ανθρωποκεντρική προοπτική είτε μια τεχνοκεντρική. Στην περίπτωση της ανθρωποκεντρικής προσέγγισης, ένα έξυπνο περιβάλλον πρέπει να προσαρμοστεί στις ανάγκες των τελικών χρηστών σε ό,τι αφορά στις δυνατότητες εισόδου και εξόδου. Ενώ στην τεχνοκεντρική προσέγγιση, νέες τεχνολογίες υλικού, δικτυακές λύσεις και ενδιάμεσες συσκευές πρέπει να αναπτυχθούν. Οι αισθητήριοι

κόμβοι μπορούν να εμφυτευτούν στην επίπλωση και σε οικιακές συσκευές και μπορούν να επικοινωνούν ο ένας με τον άλλον καθώς και με τον εξυπηρετητή του δωματίου. Ο εξυπηρετητής δωματίου μπορεί επίσης να επικοινωνεί με εξυπηρετητές από άλλα δωμάτια για να μαθαίνει για τις υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρουν π.χ. εκτύπωση, σάρωση και αποστολή και λήψη φαξ. Οι εξυπηρετητές αυτές των δωματίων μπορούν να ενσωματωθούν με υπάρχουσες εμφυτευμένες συσκευές ώστε να γίνουν αυτό-οργανωτικοί, αυτό-ρυθμιζόμενοι, και προσαρμοζόμενοι σε θεωρητικά μοντέλα. Ένα άλλο παράδειγμα έξυπνου περιβάλλοντος είναι η «εργαστηριακή κατοικία» στο Ινστιτούτο τεχνολογίας της Georgia. Οι υπολογισμοί και η αίσθηση σε αυτό το περιβάλλον πρέπει να είναι αξιόπιστοι, συνεχείς και διαφανείς.



Εικόνα 4: Ασύρματος και απομακρυσμένος έλεγχος σπιτιού με χρήση αισθητήρων

2.5.4 Υγειονομική και φαρμακευτική περίθαλψη

Στον τομέα της υγείας και της φαρμακευτικής, η χρήση των ασύρματων αισθητήρων είναι ξεχωριστή καθώς και δύσκολη αφού σχετίζεται με το ανθρώπινο σώμα. Συνεπώς, εκτός της πολυπλοκότητας είναι αναγκαία και η εκμηδένιση των όποιων επιπτώσεων από την εφαρμογή τους με αποτέλεσμα την πιο «αργή» ανάπτυξή του σε σχέση με τους άλλους τομείς.

Επίσης, στον τομέα της Ιατρικής δεν χρησιμοποιείται ο όρος WSNs αλλά ο όρος BSN (Body Sensor Area Network) ή pPAN (patient Personal Area Network) και αυτό συμβαίνει όχι μόνο λόγω της κατηγορίας των εφαρμογών αλλά και επειδή υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις στα δίκτυα που σχετίζονται με τον τρόπο συγκρότησης, το υπό εξέταση αντικείμενό τους και τις ιδιότητές τους.

Η ανάπτυξη των προσωπικών δικτύων που αφορούν στην τηλειατρική παρακολούθηση του ανθρώπινου σώματος είναι μία μεγάλη πρόκληση του μέλλοντος, καθώς το ανθρώπινο σώμα είναι επί της ουσίας ένα μικρής κλίμακας περιβάλλον και απαιτεί διάφορους τύπους παρακολούθησης και συχνότητων. Η χρήση αυτών των δικτύων επιτυγχάνει μέσω της τηλειατρικής την κατά το δυνατόν αποδέσμευση του ασθενούς-χρήστη από τους νοσοκομειακούς περιορισμούς. Έτσι, μπορεί να επιτευχθεί ένα καλύτερο επίπεδο ζωής και πιο φθηνό κόστος ιατρικής περίθαλψης.

Ένα τυπικό Wireless Body Area Network (WBAN) αποτελείται από έναν αριθμό από οικονομικές, ελαφριές και μικροσκοπικές πλατφόρμες αισθητήρων, καθεμία από τις οποίες περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους φυσιολογικούς αισθητήρες, όπως αισθητήρες κίνησης, ηλεκτροκαρδιογραφήματα (ECG), ηλεκτρομυογραφήματα (EMG) και

Κεφάλαιο 2

ηλεκτροεγκεφαλογραφήματα (EEG). Χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας εφαρμογής αποτελεί η περιπατητική (ambulatory) παρακολούθηση της δραστηριότητας του χρήστη. Οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν πάνω στο σώμα σαν μικροσκοπικά, ευφυή αυτοκόλλητα, ενσωματωμένα στο ρουχισμό ή εμφυτευμένα κάτω από το δέρμα ή τους μύες.

Ένα Body Area Network (BAN) ορίζεται επίσημα από την IEEE 802.15 σαν «ένα» πρότυπο επικοινωνίας βελτιστοποιημένο για χαμηλής ισχύος συσκευές και λειτουργία πάνω, μέσα ή γύρω από το ανθρώπινο σώμα αλλά δεν περιορίζεται μόνο σε ανθρώπους. Με άλλα λόγια, ένα BAN είναι ένα σύστημα από συσκευές σε κοντινή γειτνίαση με το ανθρώπινο σώμα, που συνεργάζονται για το όφελος του χρήστη.

Το WBAN ή BAN αποτελείται από κινητούς και συμπαγείς διεπικοινωνούντες αισθητήρες, που μπορούν είτε να φορεθούν είτε να εμφυτευτούν στο ανθρώπινο σώμα και παρακολουθούν ζωτικές σωματικές παραμέτρους και κινήσεις. Αυτές οι συσκευές, οι οποίες επικοινωνούν με ασύρματες τεχνολογίες, εκπέμπουν δεδομένα από το σώμα σε έναν οικείο σταθμό βάσης, από όπου τα δεδομένα μπορούν να προωθηθούν σε ένα νοσοκομείο, κλινική ή οπουδήποτε αλλού, σε πραγματικό χρόνο. Η τεχνολογία WBAN βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο και ερευνάται ευρέως. Η τεχνολογία, από τη στιγμή που θα γίνει αποδεκτή και θα υιοθετηθεί, αναμένεται να αποτελέσει σημαντική εξέλιξη στην ιατρική περίθαλψη, οδηγώντας στην πραγματοποίηση των ιδεών της τηλεϊατρικής.

Μερικές από τις κατηγορίες των εφαρμογών που συναντώνται σήμερα και παραδείγματα που έχουν προταθεί από Πανεπιστήμια ή από διάφορες εταιρείες είναι:

- ◆ Επίβλεψη για την εξάπλωση ιού σε περιοχή προσβεβλημένη από τον ιό.
- ◆ Απομακρυσμένη κατ' οίκον παρακολούθηση σε περιπτώσεις χρόνιων παθήσεων ή ηλικιωμένων ατόμων.
- ◆ Χρήση BSN στην εντατική ή στην μετεγχειρητική περίοδο για την παρακολούθηση της πορείας του ασθενούς.
- ◆ Συστήματα καταγραφής κρίσιμων βιοσημάτων για την έγκαιρη και απομακρυσμένη παρακολούθηση έτσι ώστε να μπορούν να γίνουν αντιληπτές διάφορες ασθένειες ή δυσλειτουργίες και να επιτευχθεί η παρακολούθηση των ορίων κάποιων ουσιών στο ανθρώπινο σώμα.



Εικόνα 5: Εφαρμογές των WSNs στον τομέα της υγείας

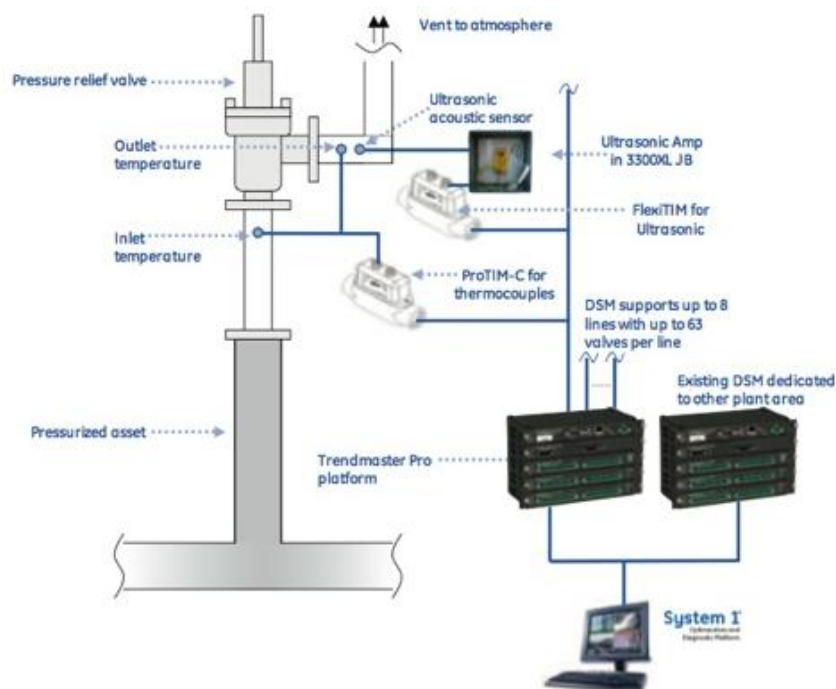
2.5.5 Επιτήρηση μηχανών και βιομηχανικές εφαρμογές

Ο έλεγχος των συστημάτων και των εφαρμογών στις βιομηχανίες παίζει σημαντικό ρόλο στην ορθή λειτουργία της παραγωγής και την ασφάλεια του προσωπικού. Το περιβάλλον, στο οποίο πραγματοποιείται μια διεργασία μπορεί να είναι επικίνδυνο για τον άνθρωπο, όπως εξαιτίας της θερμοκρασίας, τοξικότητας κ.ά. ή να είναι αδύνατο να παραβρεθεί, όπως για παράδειγμα, αν είναι η διεργασία στο εσωτερικό των μηχανών. Έτσι, οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της κατάστασης της μηχανής προσδιορίζοντας τα επίπεδα λίπανσης ή την ένταση της δόνησής της καθώς και να εισαχθούν σε περιοχές δυσπρόσιτες από τον άνθρωπο, όπως σε υπόγειες παραγωγικές διαδικασίες.

Εκτός από τον έλεγχο των μηχανών, η μεγάλη ανάπτυξη των WSNs παρουσιάζεται σε υπόγειες παραγωγικές διαδικασίες, οι οποίες, για προφανείς λόγους, είναι αρκετά επικίνδυνες και δύσκολες στο χειρισμό. Ακόμη, όσο οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις επεκτείνονται και τα σημεία ελέγχου πληθαίνουν, τα κλασικά ενσύρματα συστήματα ελέγχου δεν είναι πλέον αποδοτικά. Έτσι, την επιτήρηση των μηχανών και την προληπτική συντήρηση αναλαμβάνουν σιγά σιγά τα WSNs.

Μερικές τέτοιες εφαρμογές είναι η χρήση των WSNs σε διυλιστήρια για την καταγραφή της θερμότητας στα διάφορα στάδια της διεργασίας, όπου ο έλεγχος της παραγωγής γίνεται με την εκπομπή ειδικών σημάτων συναγερμών, όταν η θερμοκρασία είναι εκτός επιθυμητού επιπέδου καθώς και σε γεωτρήσεις για τη μέτρηση των μη φυσιολογικών δονήσεων και την προειδοποίηση των μηχανών σε πιθανή επερχόμενη βλάβη του εξοπλισμού.

Τέλος, μια σημαντική εφαρμογή των WSNs είναι ο έλεγχος των διαφόρων υπογείων αγωγών είτε πρόκειται για αποχετευτικούς, υδρευτικούς αγωγούς είτε δεξαμενές και αγωγούς φυσικού αερίου.

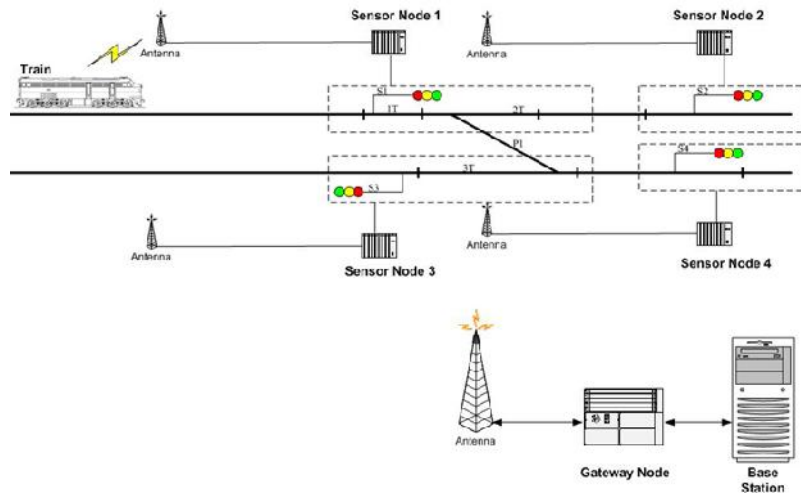


Εικόνα 6: Βαλβίδα εκτόνωσης για την ανίχνευση διαρροών

2.5.6 Έλεγχος μεταφορών και συγκοινωνιών

Η αξιοποίηση των WSNs μπορεί να συμβάλει στον τομέα των μεταφορών και συγκοινωνιών. Τα δίκτυα των αισθητήρων μπορούν να ελέγχουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την κυκλοφορία των οχημάτων και των έξυπνων λεωφόρων ώστε να προωθηθεί η ασφαλής οδήγηση, να μειωθούν τα ατυχήματα και να ελέγχονται τα όρια ταχύτητας.

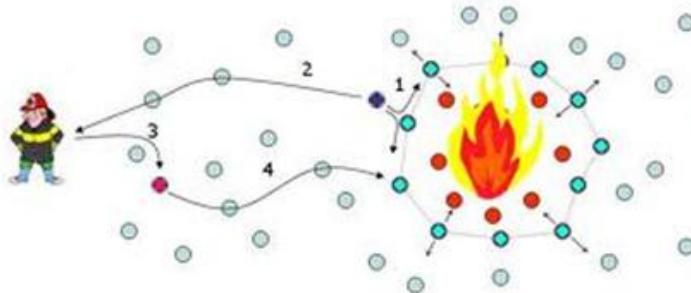
Η συνεργασία των δικτύων GPS για τα οχήματα με τον εξοπλισμού WSNs, είναι ικανή να οδηγήσει στην υλοποίηση πολλών χρήσιμων εφαρμογών για το χρήστη, όπως η αυτόματη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των μεμονωμένων οχημάτων για διάφορες συνθήκες, όπως τις συνθήκες οδήγησης και περιβάλλοντος, που πρωτοσυναντά ο προπορευόμενος.



Εικόνα 7: Σηματοδότηση σιδηροδρόμων με τη χρήση WSN

2.5.7 Εφαρμογές ασφαλείας

Στην κατηγορία αυτών των εφαρμογών ανήκει η παρακολούθηση χώρων για λόγους ασφαλείας και η ενημέρωση κάποιας εποπτεύουσας εφαρμογής όπου μέσω των κόμβων των WSNs γίνεται ενημέρωση για την εκδήλωση ενός περιστατικού ενδιαφέροντος όπως για παράδειγμα την εκδήλωση μιας πυρκαγιάς ή την παραβίαση ενός χώρου. Ακόμη, η χρήση των WSNs για τη μέτρηση των παραμέτρων της επιτάχυνσης και της καταγραφής της θέσης συνίσταται σε εφαρμογές που σχετίζονται με την επίβλεψη δεμάτων, κιβωτίων και άλλων αντικειμένων.



Εικόνα 8: Δίκτυο πυρανίχνευσης με τη χρήση WSN

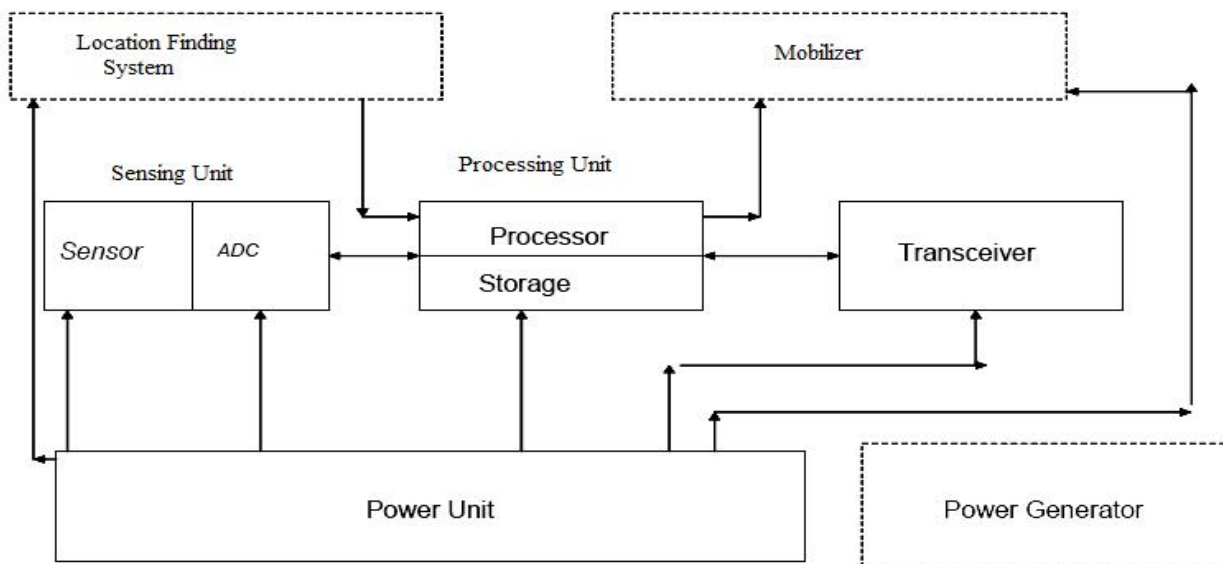
Κεφάλαιο 3

Θέματα Αρχιτεκτονικής στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων – WSNs

3.1 Αρχιτεκτονική Ασύρματου Κόμβου (Hardware και Software)

Αν και οι κόμβοι από δίκτυο σε δίκτυο μπορεί να έχουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά, αφού αυτό εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή, ωστόσο όλοι αποτελούνται από τέσσερα βασικά μέρη, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 9:

- μικροεπεξεργαστή
- μνήμη
- πομποδέκτη
- αισθητήρες και ενεργοποιητές
- πηγή ενέργειας



Εικόνα 9: Βασική δομή ασύρματου κόμβου-αισθητήρα

Κεφάλαιο 3

3.1.1 Μικροεπεξεργαστής

Ο μικροεπεξεργαστής είναι ο πυρήνας του κόμβου, ο οποίος δέχεται τα δεδομένα από τους υπόλοιπους κόμβους, τα επεξεργάζεται και αποφασίζει για το πότε και πού θα τα στείλει, καθορίζοντας τη συμπεριφορά των ενεργοποιητών. Βέβαια, για την επιλογή του κατάλληλου επεξεργαστή, σημαντική παράμετρος είναι η δυνατότητα να απενεργοποιείται, όταν δεν εκτελεί κάποια λειτουργία (sleep mode), και η κατανάλωση ενέργειας.

3.1.2 Μνήμη

Μια ορισμένη ποσότητα μνήμης απαιτείται για να αποθηκεύσει τα προγράμματα και τα ενδιάμεσα αποτελέσματα. Τρία είδη μνήμης μπορεί να διαθέτει ο κάθε κόμβος του δικτύου: Μία RAM για την αποθήκευση των μετρήσεων και των λαμβανόμενων πακέτων, μία ROM για την αποθήκευση του κώδικα της εφαρμογής και μία EEPROM για την καταχώρηση συνήθως των δεδομένων που δε διακινούνται σε τακτά διαστήματα.

3.1.3 Πομποδέκτης

Η ύπαρξη του πομποδέκτη σε κάθε κόμβο είναι αναγκαία για την αμφίδρομη επικοινωνία των κόμβων. Ως επί το πλείστον, πομπός και δέκτης βρίσκονται στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα και η επικοινωνία είναι half-duplex. Εκτός από την περίπτωση της απλής μετάδοσης στο φυσικό μέσο, οι περισσότεροι πομποδέκτες αναλαμβάνουν και τις εργασίες των πρωτοκόλλων επικοινωνίας, μειώνοντας έτσι το φόρτο εργασίας του επεξεργαστή.

3.1.4 Αισθητήρες και Ενεργοποιητές

Οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές (actuators) αποτελούν την πραγματική διεπαφή με το φυσικό κόσμο, δηλαδή είναι συσκευές που μπορούν να παρατηρούν ή να ελέγχουν φυσικές παραμέτρους του περιβάλλοντος.

Οι αισθητήρες, οι οποίοι είναι δυνατόν να υπάρξουν στο κύκλωμα του κόμβου, μπορούν να χωριστούν σε τρία είδη:

- Παθητικοί – Ομοιοκατευθυντικοί: Μετρούν ένα φυσικό μέγεθος προς όλες τις κατευθύνσεις χωρίς να επεμβαίνουν στο περιβάλλον. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να ανατροφοδοτούνται από το ίδιο το περιβάλλον, όπως για παράδειγμα από ηλιακά κύτταρα.
- Παθητικοί – Κατευθυντικοί: Μετρούν ένα φυσικό μέγεθος μόνο σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση ή γωνία, όπως για παράδειγμα μία κάμερα.
- Ενεργητικοί: Μετρούν ένα φυσικό μέγεθος, αφού προηγηθεί κάποια ενέργεια με την παρέμβασή τους στο περιβάλλον, όπως για παράδειγμα οι αισθητήρες σεισμικών δονήσεων.

Οι ενεργοποιητές χωρίζονται και αυτοί σε κατηγορίες αλλά στα WSNs εκτελούν μία απλή εργασία, όπως το άνοιγμα και κλείσιμο ενός διακόπτη.

3.1.5 Πηγή ενέργειας

Το μέγεθος της πηγής ενέργειας εξαρτάται από την εφαρμογή του WSN. Έτσι, η μονάδα ενέργειας είναι δυνατόν να υποστηρίζεται από μία μονάδα εξαγωγής και μία παραγωγής ενέργειας από το περιβάλλον, όπως οι ηλιακές κυψέλες. Βέβαια, μπορεί ο κάθε κόμβος να παίρνει ενέργεια από διάφορους τύπους μπαταριών, όπως για παράδειγμα στην παρούσα εργασία, κάθε κόμβος τροφοδοτείται από δύο μπαταρίες τύπου AA.

3.2 Χαρακτηριστικά Στοιχεία και Δείκτες των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Για να αξιολογηθεί μία αρχιτεκτονική δικτύων αισθητήρων έχουν οριστεί δείκτες και χαρακτηριστικά που αποτελούν τους επιθυμητούς στόχους κατά τη σχεδίαση και αναφέρονται στη συνολική απόδοση του δικτύου.

Οι δείκτες και τα χαρακτηριστικά αυτά είναι:

1. Χρόνος Ζωής
2. Δυνατότητα Αίσθησης
3. Δυνατότητα Επεξεργασίας Δεδομένων
4. Κάλυψη και Επεκτασιμότητα
5. Είδος Παράταξης
6. Συντήρηση
7. Localization
8. Ασφάλεια
9. Δυνατότητα Επικοινωνίας

3.2.1 Χρόνος Ζωής

Στις περισσότερες περιπτώσεις των WSNs, η λειτουργία των κόμβων εξαρτάται από μία περιορισμένη πηγή ενέργειας, συνήθως μπαταρίες, όπου η προσεκτική διαχείριση της ενέργειάς τους παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση του δικτύου για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος ζωής είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο της ποιότητας λειτουργίας, δηλαδή εάν υπάρχει υψηλή κατανάλωση ενέργειας, τότε το δίκτυο θα έχει καλύτερη απόδοση, αλλά μικρότερο χρόνο ζωής. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής καθορίζεται η εξισορρόπησή τους.

Κεφάλαιο 3

3.2.2 Δυνατότητα Αίσθησης

Η έννοια της αίσθησης αναφέρεται σε όρους όπως η έκθεση (exposure) – χρόνος έκθεσης και απόσταση κόμβου, η προσαρμογή (calibration) και η κάλυψη (sensing coverage). Μολονότι η λειτουργία της αίσθησης εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής, οι κόμβοι εκτελούν κάποιες γενικές λειτουργίες:

- ◆ καθορισμό της τιμής μιας παραμέτρου, όπως θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση, σε μία δεδομένη τοποθεσία σε ένα σύνολο θέσεων μέσω διαφορετικών αισθητήρων, καθένας με δικό του ρυθμό δειγματοληψίας και δυναμική περιοχή τιμών.
- ◆ αντίληψη γεγονότων και εκτίμηση των παραμέτρων τους, όπως ανίχνευση οχήματος από διασταύρωση και εκτίμηση της ταχύτητάς του.
- ◆ ανίχνευση αντικειμένων και πιθανότητα κατηγοριοποίησής τους, όπως ανίχνευση εισβολής στην παρατηρούμενη από το δίκτυο περιοχή και αναγνώριση του είδους ενός οχήματος.

Οι αισθητήρες ανάλογα με τη δυνατότητα αίσθησης που διαθέτουν, μπορούν να ταξινομηθούν σε:

1. Ενεργητικές συσκευές, που τείνουν να είναι υψηλής ενέργειας συστήματα όπως ραντάρ και σόναρ.
2. Παθητικές συσκευές, συνήθως χαμηλής ενέργειας, όπως αισθητήρες μέτρησης σεισμικών δονήσεων και θερμοκρασίας.

Επιπλέον, ανάλογα με τη συγκέντρωση των απαιτούμενων δεδομένων της εφαρμογής τα WSNs μπορούν να χαρακτηριστούν, ως:

- Συνεχή, όταν οι κόμβοι συλλέγουν δεδομένα αδιαλείπτως.
- Απόκρισης (Reactive), όταν συλλέγουν δεδομένα που αφορούν συγκεκριμένα γεγονότα ή αποκρίνονται στην απαίτηση ενός παρατηρητή.
- Περιοδικά, όταν συλλέγουν δεδομένα σύμφωνα με τις συνθήκες που καθορίζει η εφαρμογή.

3.2.3 Δυνατότητα Επεξεργασίας Δεδομένων

Ο επεξεργαστής και η μνήμη ενός ασύρματου κόμβου διαμορφώνουν την υπολογιστική ικανότητα, η οποία είναι προγραμματιζόμενη και εκτελεί βασικούς υπολογισμούς επεξεργασίας σήματος και πιθανότατα διεργασίες συσχέτισης δεδομένων.

Πιθανές διεργασίες είναι:

- Data fusion, η οποία συνδυάζει ένα ή περισσότερα πακέτα δεδομένων που έχουν ληφθεί από διαφορετικούς αισθητήρες για τη δημιουργία ενός μοναδικού πακέτου και οδηγεί στη μείωση της μεταδιδόμενης ποσότητας δεδομένων και συνεπώς της καταναλισκόμενης ενέργειας.
- Συμπίεση δεδομένων.
- Επεξεργασία ασφάλειας.

Σε κάποια δίκτυα, η επεξεργασία των δεδομένων εφαρμόζεται από τον κάθε κόμβο σε αντίθεση με την ιεραρχική αρχιτεκτονική επεξεργασίας που υλοποιείται σε άλλα δίκτυα.

3.2.4 Κάλυψη και Επεκτασιμότητα

Η έννοια της κάλυψης στην περίπτωση των δικτύων αισθητήρων έχει διπλή έννοια, χωρική κάλυψη και κάλυψη εμβέλειας. Η χωρική κάλυψη αναφέρεται στις σχετικές θέσεις και αποστάσεις των κόμβων ώστε να προσφέρουν ακριβείς μετρήσεις και δεδομένα, ενώ η κάλυψη εμβέλειας αναφέρεται στο γεωμετρικό χώρο, όπου είναι δυνατή η συλλογή δεδομένων που αφορούν παραμέτρους του περιβάλλοντος.

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των δικτύων των αισθητήρων αποτελεί η επεκτασιμότητα. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο κυμαίνεται από λίγους αισθητήρες έως μερικές εκατοντάδες αισθητήρων.

3.2.5 Είδη Παράταξης Κόμβων

Κατά την ανάπτυξη ενός δικτύου αισθητήρων, ο σχεδιαστής του στοχεύει στην επίτευξη της επιθυμητής κάλυψης με έναν ελάχιστο αριθμό κόμβων και στην εξασφάλιση ενός αποδεκτού επιπέδου ποιότητας κόστους, αξιοπιστίας και επεκτασιμότητας της εφαρμογής, γι' αυτό και η παράταξη (deployment) των κόμβων αποτελεί βασικό ζήτημα για δίκτυα αισθητήρων.

Έτσι, ανάλογα με την εφαρμογή οι στρατηγικές παράταξης των κόμβων αισθητήρων χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Προκαθορισμένη τυποποιημένη παράταξη
- Τυχαία παράταξη
- Αυτορυθμιζόμενη παράταξη
- Προσαρμοσμένη παράταξη

3.2.6 Συντήρηση

Η λειτουργία της συντήρησης προσφέρει ανίχνευση αποτυχιών ή μείωση της απόδοσης του δικτύου, εκκινεί διαδικασίες διάγνωσης και επανορθώνει προβληματικές λειτουργίες. Χρησιμοποιείται σαν όρος σε δίκτυα WSNs που έχουν τη δυνατότητα να αυτοπροσδιοριστούν, αυτοπροστατευτούν και επανέλθουν χωρίς να είναι σημαντική η ανθρώπινη παρέμβαση.

Η συντήρηση διακρίνεται στους ακόλουθους τύπους:

- Corrective, όπου το σύστημα προσαρμόζεται στις αλλαγές.
- Adaptive, στον τύπο αυτό το σύστημα οφείλει να προσαρμοστεί στις μεταβολές.
- Preventive, εδώ το σύστημα αναμένει την επίδραση των αλλαγών.
- Proactive, όπου το σύστημα πρέπει να επεμβαίνει την κατάλληλη στιγμή για την αποφυγή αρνητικών συμβάντων.

Κεφάλαιο 3

3.2.7 Localization

Τα WSNs, σύμφωνα με μία κατηγοριοποίησή τους μπορούν να διακριθούν σε δομημένα ή μη δομημένα.

Ένα δομημένο WSN αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων, εκ των οποίων μέρος ή το σύνολο τοποθετούνται με προσχεδιασμένο τρόπο. Επιπλέον, με αυτή τη δομή είναι δυνατή η χρήση λιγότερων κόμβων σε συγκεκριμένες θέσεις για δεδομένη περιοχή κάλυψης και πλεονεκτεί σε συντήρηση και κόστος διαχείρισης.

Από την άλλη πλευρά, σε ένα μη δομημένο WSN υπάρχει ένα πυκνό σύνολο κόμβων που ενδέχεται να είναι τυχαία τοποθετημένοι στο πεδίο αίσθησης. Η τυχαία τοποθέτηση των κόμβων δεν επιτρέπει την εκ των προτέρων γνώση της θέσης τους και έτσι μπορεί να εμφανιστούν ακάλυπτες περιοχές. Το πρόβλημα του καθορισμού της θέσης της ονομάζεται localization και μερικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται γι' αυτό είναι το σύστημα GPS και οι beacon κόμβοι. Η τελευταία μέθοδος χρησιμοποιεί περιοδικά beacons – σήματα φάρους για την ανίχνευση της θέσης.

3.2.8 Ασφάλεια

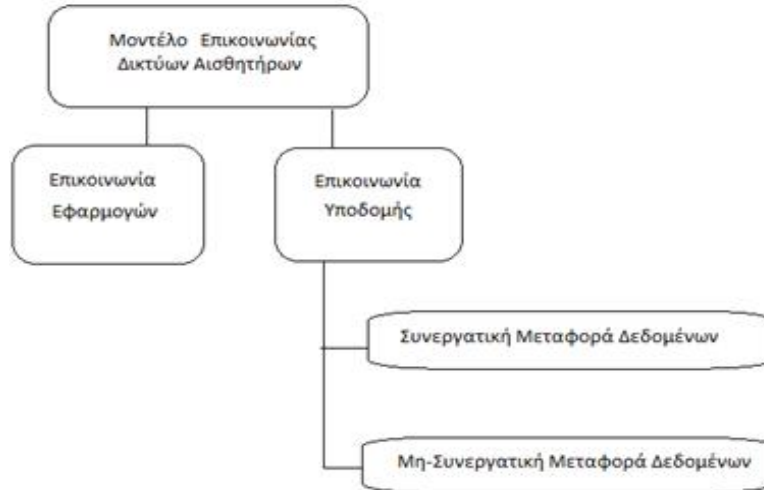
Τα WSNs πρέπει να είναι σε θέση να κρατούν την πληροφορία που συλλέγουν κρυφή από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Θα πρέπει λοιπόν το σύστημα να μπορεί να διατηρεί τη μυστικότητα του χρησιμοποιώντας τεχνικές κρυπτογράφησης και αυθεντικότητας. Βέβαια, η χρήση των μηχανισμών αυτών επιδρά αρνητικά στην κατανάλωση ενέργειας και στο διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου.

3.2.9 Δυνατότητα Επικοινωνίας

Σε ένα WSN η επικοινωνία μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 10:

- επικοινωνία υποδομής, όπου η επικοινωνία είναι απαραίτητη για τον καθορισμό (configuration), τη διατήρηση και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου, ενώ ενδέχεται να μεταβάλλεται συχνά, η τοπολογία και ο προσδιορισμός του.
- επικοινωνία εφαρμογών, που σχετίζεται με τη μεταφορά των δεδομένων που καταγράφηκαν, με σκοπό την ενημέρωση του εκάστοτε ενδιαφερομένου για το φαινόμενο που παρακολουθείται.

Εδώ τα μοντέλα που κυριαρχούν είναι η συνεργατική και η μη-συνεργατική μέθοδος μεταφοράς δεδομένων.



Εικόνα 10: Μοντέλο Επικοινωνίας Δικτύων Αισθητήρων

Ανάλογα με το αν χρησιμοποιούμε κάποιο από τα δύο μοντέλα του επιπέδου επικοινωνίας εφαρμογών, είτε τη συνεργατική μέθοδο μεταφοράς δεδομένων, όπου απαιτείται η συνεργασία μεταξύ των διαφορετικών κόμβων του δικτύου, είτε τη μη-συνεργατική, όπου δεν απαιτείται η συνεργασία τους για τη μεταφορά των δεδομένων είτε ο συνδυασμός και των δύο, τότε διακρίνονται μερικές μορφές επικοινωνίας σε ένα WSN, όπως η άμεση σύνδεση (direct connected WSN), η peer-to-peer multi-hop, η επίπεδη ad-hoc multi-hop και η cluster-based multi-hop επικοινωνία.

3.3 Τοπολογία στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Οι κόμβοι-αισθητήρες που απαρτίζουν ένα WSN χωρίζονται σε πηγές (sources) και αποδέκτες (sinks). Ως πηγή θεωρείται κάθε συσκευή που συμμετέχει στο δίκτυο παρέχοντας πληροφορίες, ενώ αποδέκτης η συσκευή που ζητά πληροφορίες. Συνεπώς, σε κάθε WSN όλοι οι κόμβοι αποτελούν πηγές, ενώ υπάρχουν τρεις εναλλακτικές όσον αφορά τον αποδέκτη. Μία περίπτωση είναι ο αποδέκτης να είναι ένας κόμβος του δικτύου, όπως οι υπόλοιποι, ενώ μία άλλη περίπτωση είναι ο αποδέκτης να είναι μία οντότητα που είναι εκτός του δικτύου των αισθητήρων, όπως για παράδειγμα ένας φορητός υπολογιστής, ο οποίος αλληλεπιδρά με το δίκτυο αναζητώντας πληροφορίες όταν είναι απαραίτητο. Η τρίτη περίπτωση είναι ο αποδέκτης να έχει το ρόλο ενός gateway, ο οποίος προωθεί τις πληροφορίες σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο.

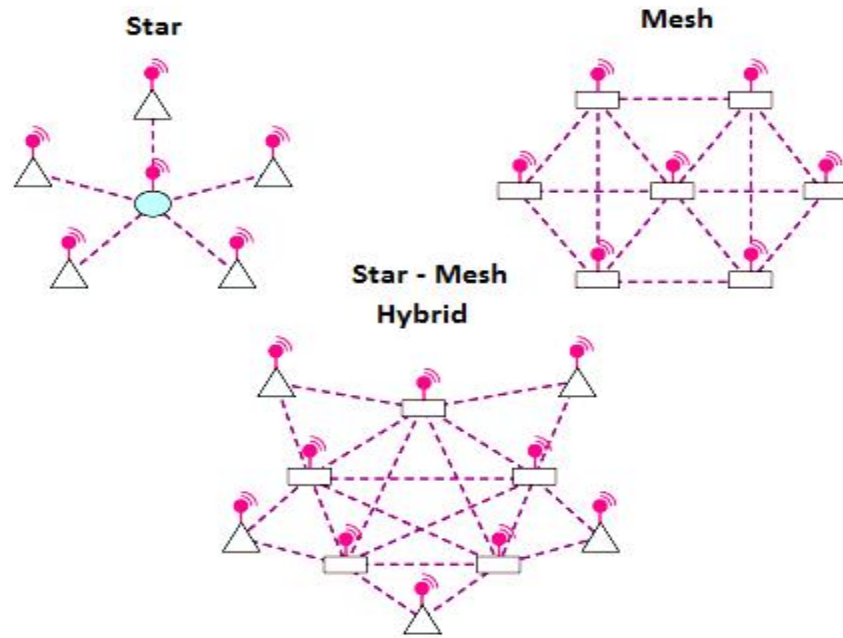
Οι κόμβοι του WSN, πηγές και αποδέκτες, μπορούν να συνδυαστούν για το σχηματισμό τριών ειδών τοπολογίας:

- τοπολογία star, η οποία αποτελείται από ένα κεντρικό αποδέκτη και περιφερειακούς κόμβους-πηγές τοποθετημένους γύρω του.
- τοπολογία peer-to-peer (mesh), όπου ένας κόμβος-πηγή έχει τη δυνατότητα να επικοινωνήσει με κάθε γείτονά του, σε αντίθεση με την τοπολογία αστέρα. Εδώ, όλοι οι κόμβοι μπορούν να

Κεφάλαιο 3

επικοινωνήσουν μεταξύ τους ακόμη και αν δε βρίσκονται εντός εμβέλειας, χρησιμοποιώντας multi-hop μηνύματα και να υπάρχουν περισσότεροι του ενός αποδέκτες.

- τοπολογία star-mesh (υβριδική - hybrid), όπου ο κεντρικός αποδέκτης υπάρχει, αλλά το δίκτυο εξαπλώνεται σε μορφή δέντρου, όπου τα κλαδιά του είναι κόμβοι-πηγές που παίζουν το ρόλο τοπικών συντονιστών και κόμβοι-φύλλα (end-points) που λειτουργούν όπως στην τοπολογία αστέρα. Ακόμη, το δίκτυο έχει σαφή ιεράρχηση των κόμβων σε αντίθεση με την τοπολογία peer-to-peer όπου το δίκτυο είναι ομότιμο.



Εικόνα 11: Είδη τοπολογιών WSNs

Είναι προφανές λοιπόν ότι η ύπαρξη ενός μεγάλου αριθμού κόμβων-αισθητήρων με δύσκολη την πρόσβαση και παρακολούθησή τους απαιτεί τον έλεγχο της τοπολογίας. Η τοπολογία βέβαια εξαρτάται από μη ελεγχόμενους παράγοντες, όπως ο θόρυβος, οι παρεμβολές και ο καιρός, αλλά και από ελεγχόμενους παράγοντες, όπως η ενέργεια εκπομπής και η κατευθυντικότητα της κεραίας. Η πυκνότητα ενός δικτύου αισθητήρων μπορεί να φθάνει και τους 20 κόμβους ανά κυβικό μέτρο, κάτι που σίγουρα δυσκολεύει ακόμα περισσότερο τη διαχείριση της τοπολογίας. Έτσι, η διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου αισθητήρων εξετάζεται σε τρεις φάσεις:

1. Φάση πριν την εγκατάσταση και φάση τοποθέτησης επιπλέον κόμβων

Σε αυτό το στάδιο οι κόμβοι μπορούν να τοποθετηθούν είτε μαζικά είτε ένας ένας στο χώρο. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να εγκατασταθούν με τους εξής τρόπους:

- να τοποθετηθούν ένας ένας από έναν άνθρωπο ή ένα ρομπότ.
- να ριφθούν από ένα καταπέλτη, όπως από το κατάστρωμα ενός πλοίου.
- να βρίσκονται σε ένα βλήμα πυροβολικού το οποίο εκρήγνυται και τους διασπείρει στην

περιοχή.

- να ριφθούν από αεροπλάνο.

Παρ' όλα αυτά, η αρχική εγκατάσταση πρέπει να πληροί ορισμένα βασικά κριτήρια, όπως η μείωση του κόστους της εγκατάστασης, η αύξηση της ευελιξίας τοποθέτησης και η αντοχή σε σφάλματα.

2. Φάση μετά την εγκατάσταση

Μετά την εξάπλωση των κόμβων, οι αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου των αισθητήρων μπορεί να οφείλονται:

▶ σε αλλαγές που σχετίζονται με τους ίδιους τους κόμβους, όπως:

- αλλαγή θέσης
- δυσλειτουργία
- διαθέσιμη ενέργεια
- δυνατότητα επικοινωνίας

▶ στην εμφάνιση ορισμένων γεγονότων, όπως:

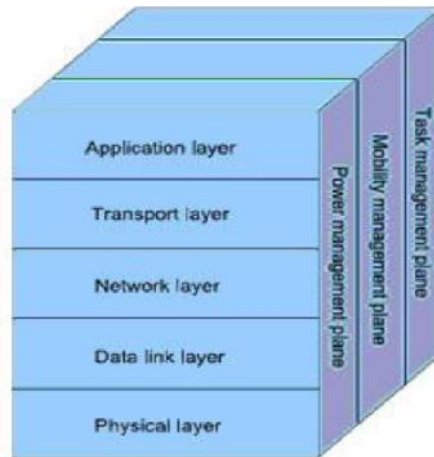
- η στατική εγκατάσταση των κόμβων-αισθητήρων
- συχνές αποτυχίες λόγω έλλειψης ενέργειας ή καταστροφής
- κίνηση των κόμβων
- δολιοφθορές

3. Φάση τοποθέτησης επιπλέον κόμβων

Η εγκατάσταση νέων κόμβων οποιαδήποτε χρονική στιγμή είτε για να αντικαταστήσει κόμβους του δικτύου που παρουσιάζουν δυσλειτουργία είτε λόγω αλλαγών στον αρχικό σκοπό για τον οποίο εγκαταστάθηκαν. Η προσθήκη τους δημιουργεί την ανάγκη επαναδιοργάνωσης του δικτύου και προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συχνές αλλαγές της τοπολογίας χρειάζονται ειδικά σχεδιασμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

3.4 Αρχιτεκτονική στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η αρχιτεκτονική του δικτύου των ασύρματων αισθητήρων απαιτεί την ύπαρξη, έστω και σε απλουστευμένη μορφή, ενός φυσικού επιπέδου (Physical Layer), ενός υπο-επιπέδου MAC και ενός επιπέδου ζεύξης (Link Layer) πρωτοκόλλων.



Εικόνα 12: Τα επίπεδα-layers στα WSNs

3.4.1 Το Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer)

Το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για την επιλογή της συχνότητας, την παραγωγή συχνότητας μετάδοσης, την ανίχνευση σήματος, τη διαμόρφωσή του και για την κρυπτογράφηση των δεδομένων.

Η διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση του ψηφιακού σήματος εκτελείται από τον πομποδέκτη και δεν πρέπει να είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη προκειμένου να υλοποιείται από hardware χαμηλού κόστους και κατανάλωσης με όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα.

Για τη μετάδοση των σημάτων, ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται τεχνικές εξάπλωσης φάσματος, οι οποίες ονομάζονται έτσι επειδή το βασικό στοιχείο της λειτουργίας τους έγκειται στο γεγονός ότι οι εκπεμπόμενες κυματομορφές καταλαμβάνουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης (bandwidth) από ότι πραγματικά χρειάζεται για τη μετάδοση των δεδομένων. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται για διάφορους λόγους και ο βασικότερος θεωρείται ότι είναι η μείωση των παρεμβολών από άλλα σήματα, καθώς το σήμα δεν μεταδίδεται σε μια μόνο συχνότητα. Άλλοι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιήθηκαν κατά καιρούς τέτοιες τεχνικές είναι η ασφάλεια από υποκλοπές του σήματος, η αντίσταση στην εξασθένηση του σήματος, καθώς και η δυνατότητα χρήσης του μέσου από πολλές συσκευές ταυτόχρονα (multiple access).

3.4.2 Το Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων (Data Link Layer)

Το πρωτόκολλο του επιπέδου ζεύξης χρησιμοποιείται προκειμένου να μεταφέρει ένα δεδομένογράμμα ή πακέτο επάνω σε μία ζεύξη. Ορίζει τη μορφή των πακέτων που ανταλλάσσονται ανάμεσα στους κόμβους, στα άκρα της ζεύξης, καθώς και τις ενέργειες που γίνονται από αυτούς τους κόμβους όταν στέλνουν και λαμβάνουν αυτά τα πακέτα. Οι μονάδες δεδομένων που ανταλλάσσονται από ένα πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης ονομάζονται πλαίσια (frames) και συνεπώς οι ενέργειες που γίνονται από αυτά τα πρωτόκολλα κατά την αποστολή και λήψη τους είναι η ανίχνευση σφάλματος, η αναμετάδοση, ο έλεγχος ροής και η τυχαία πρόσβαση. Το πρωτόκολλο αυτό σε ένα ασύρματο multi-hop και αυτο-οργανούμενο δίκτυο αισθητήρων, έχει ως στόχους τη δημιουργία της υποδομής του δικτύου και το δίκαιο και αποδοτικό διαχωρισμό των πόρων επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

Οι δύο γνωστές μέθοδοι για τον έλεγχο σφαλμάτων (error control) είναι η εμπροσθόδοτη (χωρίς επαλήθευση) διόρθωση σφάλματος (Forward Error Correction-FEC) και ο έλεγχος σφαλμάτων με αυτόματη αίτηση επανάληψης (Automatic Repeat Request-ARQ). Η χρησιμότητα του ARQ σε multi-hop δίκτυα αισθητήρων είναι περιορισμένη από το επιπλέον κόστος ενέργειας αναμετάδοσης και το overhead. Από την άλλη, η πολυπλοκότητα αποκωδικοποίησης του FEC είναι μεγαλύτερη αφού απαιτείται η ενσωμάτωση ικανοτήτων error control. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, οι απλοί κώδικες error control με μικρή πολυπλοκότητα κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης παρουσιάζονται ως οι καλύτερες λύσεις στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

3.4.3 Το Επίπεδο Δικτύου (Network Layer)

Οι τεχνικές δρομολόγησης των «παραδοσιακών» ad-hoc συνήθως δεν ταιριάζουν στις απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Μια από τις αρμοδιότητες του network layer είναι να παρέχει διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα (πχ. άλλα δίκτυα αισθητήρων ή το διαδίκτυο).

Το επίπεδο αυτό των δικτύων αισθητήρων σχεδιάζεται με ορισμένες αρχές:

- Πρέπει να διαχειρίζεται αποδοτικά τα διαθέσιμα ποσά ενέργειας τους.
- Πρέπει να είναι δεδομενο-κεντρικό (data-centric).
- Η συνάθροιση των δεδομένων είναι χρήσιμη μόνο όταν δεν εμποδίζεται η συνεργασία μεταξύ των κόμβων αισθητήρων.
- Σε ένα ιδανικό δίκτυο αισθητήρων, οι διευθύνσεις των κόμβων είναι βασισμένες στην ιδιότητα (attribute-based) με αποτέλεσμα οι κόμβοι να μη γνωρίζουν την ακριβή τοποθεσία τους.

Τα energy-efficient δρομολόγια αναζητούνται είτε με βάση τη διαθέσιμη εναπομένουσα ενέργεια σε κάθε κόμβο (available power - PA) είτε με την ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση των δεδομένων μέσω των δρομολογίων.

Οι πιο γνωστοί αλγόριθμοι για την επιλογή του πιο αποδοτικού δρομολογίου όσον αφορά την ενέργεια είναι:

- **Maximum PA route**, επιλέγεται το δρομολόγιο το οποίο έχει τη μεγαλύτερη συνολική εναπομένουσα ενέργεια, η οποία υπολογίζεται με το άθροισμα της εναπομένουσας ενέργειας του κάθε κόμβου ο οποίος ανήκει στο συγκεκριμένο δρομολόγιο.
- **Minimum energy (ME) route**, επιλέγεται το δρομολόγιο το οποίο απαιτεί την ελάχιστη ενέργεια για τη μεταφορά των πακέτων μεταξύ των κόμβων.
- **Minimum hop route (MH)**, επιλέγεται το δρομολόγιο το οποίο θα έχει τον ελάχιστο αριθμό hops μέχρι το κόμβο που θα λάβει τα δεδομένα.
- **Maximum minimum PA note route**, επιλέγεται το δρομολόγιο του οποίου η ελάχιστη εναπομένουσα ενέργεια θα είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη εναπομένουσα ενέργεια των υπολοίπων δρομολογίων.

Κεφάλαιο 3

3.4.4 Το Επίπεδο Μεταφοράς (Transport Layer)

Το επίπεδο αυτό είναι χρήσιμο κυρίως όταν το σύστημα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο ή σε άλλα εξωτερικά δίκτυα. Μια προσέγγιση παρόμοια με αυτήν του TCP μπορεί να φανεί χρήσιμη για την επικοινωνία με άλλου είδους δίκτυα όπως το διαδίκτυο. Η επικοινωνία μεταξύ κόμβων του δικτύου δεν μπορεί να υποστηριχθεί με πρωτόκολλα των οποίων η προσέγγιση είναι παρόμοια με του πρωτοκόλλου TCP, λόγω της περιορισμένης μνήμης που διαθέτουν οι κόμβοι αισθητήρων.

3.4.5 Το Επίπεδο Εφαρμογών (Application Layer)

Αν και έχουν ερευνηθεί πολλές περιοχές εφαρμογών για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, δεν συμβαίνει το ίδιο με την έρευνα των πρωτοκόλλων για το επίπεδο εφαρμογής, με αποτέλεσμα ο αριθμός αυτών των πρωτοκόλλων να είναι περιορισμένος.

Μερικά από τα πρωτόκολλα αυτού του επιπέδου που ερευνούνται είναι:

- Sensor Management Protocol (SMP)
- Task Assignment and Data advertisement Protocol (TADAP)
- Sensor Query and Data Dissemination Protocol (SQDDP)

3.5 Δρομολόγηση στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Αρκετοί είναι οι αλγόριθμοι δρομολόγησης που έχουν αναπτυχθεί για τα WSNs και οι μηχανισμοί τους λαμβάνουν υπόψιν τους τα χαρακτηριστικά των δικτύων, τις απαιτήσεις της αρχιτεκτονικής και των εφαρμογών. Επειδή σε ένα WSN υπάρχει ο περιορισμός της ενέργειας και οι ξαφνικές αλλαγές της κατάστασης του κάθε κόμβου στην τοπολογία του δικτύου είναι σημαντική η λειτουργία εύρεσης και διατήρησης της διαδρομής.

Για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης έχουν προταθεί οι τεχνικές:

- Συσσώρευση δεδομένων (Data aggregation)
- Επεξεργασία εντός του δικτύου (In-network processing)
- Ομαδοποίηση (Clustering)
- Εκχώρηση διαφορετικών ρόλων σε κάθε κόμβο (Role assignment)
- Μέθοδοι βασισμένες στα δεδομένα (Data-centric)

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης κατηγοριοποιούνται:

- ▶ ανάλογα με τη δομή του δικτύου σε:

- Ενιαία (Flat), εδώ όλοι οι κόμβοι έχουν τον ίδιο ρόλο.
 - Ιεραρχικά (Hierarchical), τα οποία στοχεύουν στην ομαδοποίηση των κόμβων με στόχο την μείωση στη κατανάλωση ενέργειας.
 - Βασισμένα στην τοποθεσία (Location-based), όπου εκμεταλλεύονται τις πληροφορίες των θέσεων των κόμβων για τη μετάδοση των δεδομένων στο σωστό αποδέκτη .
- ανάλογα με τη λειτουργία τους σε:
- Πολλαπλών διαδρομών (Multipath),
 - Αντλησης πληροφοριών (Query)
 - Διαπραγμάτευση (Negotiation)
 - Ποιότητα υπηρεσίας (QoS)
 - Συνεκτικά (Coherent)
- ανάλογα με το τρόπο που ο αποστολέας βρίσκει τη διαδρομή για τον παραλήπτη σε:
- proactive, όπου όλες οι δυνατές διαδρομές υπολογίζονται και αποθηκεύονται σε πίνακες δρομολόγησης (routing tables) εκ των προτέρων και χρησιμοποιούνται κάθε φορά που γίνεται μετάδοση. Αυτά τα πρωτόκολλα είναι ιδανικά για δίκτυα με στατική τοπολογία.
 - reactive, όπου η αναζήτηση διαδρομής είναι δυναμική αφού γίνεται μόνο κάθε φορά που υπάρχει ανάγκη μετάδοσης. Είναι κατάλληλα για δίκτυα με μεταβαλλόμενη τοπολογία.
 - hybrid, τα οποία είναι συνδυασμός των δύο παραπάνω ιδεών.

3.6 Μέσα Μετάδοσης των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Σε ένα WSN οι κόμβοι-αισθητήρες συνδέονται μέσω του ασύρματου μέσου. Οι συνδέσεις αυτού του είδους πραγματοποιούνται με τη βοήθεια των ραδιοσυχνοτήτων, υπέρυθρων ή οπτικών μέσων. Το επιλεγμένο μέσο μετάδοσης του κάθε δικτύου θα πρέπει να είναι διαθέσιμο παγκοσμίως ώστε να είναι εφικτή η παγκόσμια χρήση τους.

Στις ασύρματες ζεύξεις ευρέως χρησιμοποιούμενη ζώνη συχνοτήτων είναι η ISM Band (Industrial Scientific Medical Band), η οποία προσφέρεται χωρίς άδεια χρήσης στις περισσότερες χώρες.

Ως επί το πλείστον τα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούν την επικοινωνία, η οποία γίνεται μέσω ραδιοσυχνοτήτων και μερικές χαρακτηριστικές περιπτώσεις αυτών είναι:

- Το μAPS που χρησιμοποιεί πομπό συμβατό με Bluetooth στα 2.4 GHz με έναν ενσωματωμένο πολυπλέκτη συχνοτήτων.
- Η αρχιτεκτονική WINS που χρησιμοποιεί ραδιοσυχνότητες μεταξύ των κόμβων.
- Ένας αισθητήρας χαμηλής ενέργειας που χρησιμοποιεί πομποδέκτη ραδιοσυχνότητας ενός

Κεφάλαιο 3

καναλιού, το οποίο βρίσκεται σε συχνότητα λειτουργίας στα 916 MHz.

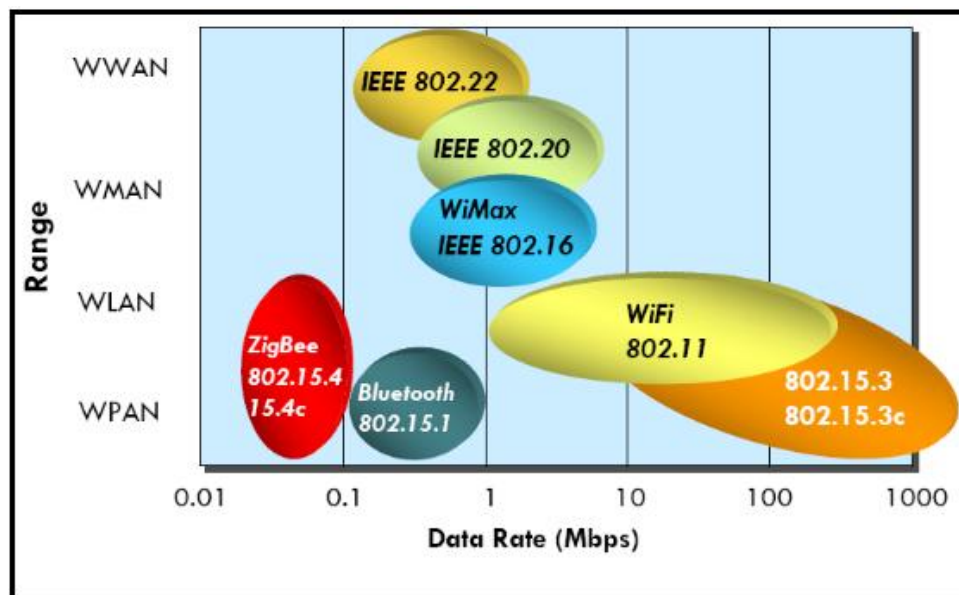
Άλλος τρόπος επικοινωνίας των δικτύων αισθητήρων είναι η χρήση υπερύθρων για την οποία δεν απαιτείται άδεια χρήσης και είναι και ανθεκτική στις παρεμβολές από ηλεκτρικές συσκευές. Βέβαια, σημαντικό μειονέκτημα αυτού του τρόπου σύνδεσης είναι η απαίτηση για οπτική επαφή των επικοινωνούντων κόμβων και έτσι δε χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Κεφάλαιο 4

Τα Πρότυπα της Οικογένειας του IEEE 802.15

4.1 Γενικά

Το πρότυπο IEEE 802.15 αποτελεί την 15^η ομάδα εργασίας του IEEE 802, η οποία επικεντρώνεται στα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPANs) με περιοχή κάλυψης λιγότερη των 10 μέτρων και γι' αυτό αποτελούν την ιδανικότερη λύση για τη σχεδίαση WSNs. Το προσωπικό δίκτυο (PAN), το οποίο χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση συσκευών που βρίσκονται σε μικρή απόσταση, μπορεί να είναι είτε ενσύρματο με υπολογιστικούς διαύλους είτε ασύρματο (WPAN). Το πρότυπο επικοινωνίας για τα προσωπικά δίκτυα ή για τα ασύρματα δίκτυα μικρών αποστάσεων είναι το 802.15. Το IEEE 802.15 περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές ομάδες διεργασιών, όπως το 802.15.1 για το Bluetooth, το 802.15.2 για τη συνύπαρξη του WPAN με άλλες ασύρματες συσκευές που λειτουργούν χωρίς άδεια, το 802.15.3 για υψηλού ρυθμού WPAN και το 802.15.4 για χαμηλού ρυθμού WPAN πάνω στο οποίο βασίζεται το ZigBee. Το ZigBee δεν είναι το IEEE 802.15.4 ούτε το IEEE 802.15.4 είναι το ZigBee, αλλά ένα πρωτόκολλο δικτύωσης που υποστηρίζεται αποκλειστικά από την ZigBee Alliance, και χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων που προδιαγράφονται στο IEEE 802.15.4.



Εικόνα 13: Το ασύρματο εύρος του IEEE 802

Κεφάλαιο 4

Όλα τα επίπεδα δικτύου και εφαρμογών έρχονται να «πατήσουν» πάνω στο 802.15.4 πρωτόκολλο ή και άλλα πρωτόκολλα που ελέγχουν το φυσικό (PHY) επίπεδο και το υπο-επίπεδο Ελέγχου Προσπέλασης στο Μέσο Μετάδοσης (MAC-Medium Access Control) στην περιοχή των 2.4 GHz.

Μερικά από αυτά τα πρότυπα είναι:

- WirelessHart

Το πρότυπο WirelessHart παρέχει ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας για μετρήσεις διεργασιών και εφαρμογές ελέγχου, στηρίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 για λειτουργία χαμηλής ισχύος στα 2.4 GHz και είναι συμβατό με όλες τις υπάρχουσες συσκευές, εργαλεία και συστήματα. Το πρότυπο αυτό διαθέτει αξιοπιστία, ασφάλεια και ενεργειακή αποδοτικότητα.

- ISA100

Το ISA100 είναι σχεδιασμένο για ασύρματη επίβλεψη χαμηλού ρυθμού και εφαρμογές διεργασιών αυτοματισμού. Επίσης, καθορίζει τα χαρακτηριστικά του OSI μοντέλου και της διαχείρισης της ασφάλειας και του συστήματος. Το πρότυπο αυτό επικεντρώνεται στη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, στη σθεναρότητα και τη συμβατότητα με άλλες συσκευές.

- 6LoWPAN

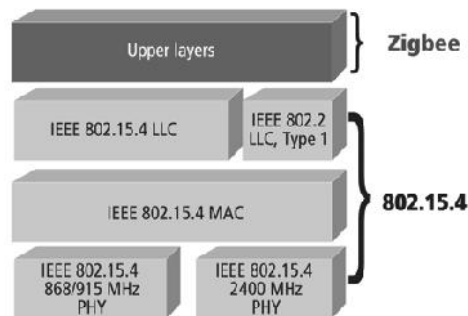
Το 6LoWPAN επιτρέπει την IPv6 επικοινωνία πακέτων σε ένα IEEE 802.15.4. Ακόμη, το πρότυπο αυτό παρέχει όλα τα πλεονεκτήματα της IP επικοινωνίας και διαχείρισης. Χρησιμοποιείται ένα επίπεδο προσαρμογής δεδομένου ότι το μέγεθος των IP πακέτων είναι μεγαλύτερο από αυτό ενός IEEE 802.15.4 πλαισίου.

- IEEE 802.150.3

Το IEEE 802.150.3 αποτελεί ένα πρότυπο τόσο PHY επιπέδου όσο και MAC υπο-επιπέδου για δεδομένα υψηλού ρυθμού σε ένα WPAN. Υποστηρίζει την πραγματικού χρόνου ροή δεδομένων μουσικής και video. Επίσης, το πρότυπο αυτό λειτουργεί στα 2.4 GHz με ταχύτητες δεδομένων που κυμαίνονται από 11 έως 55 Mbps.

- Wibree

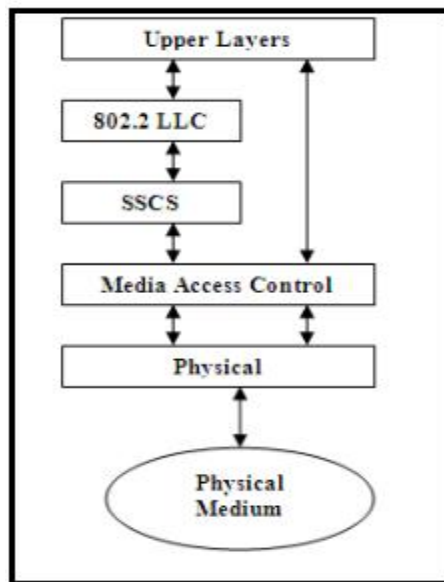
Το Wibree συνιστά ένα πρωτόκολλο ασύρματης τεχνολογίας επικοινωνίας με συσκευές χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, μετάδοσης περιορισμένου βεληνεκούς και χαμηλού κόστους. Επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ μικρών συσκευών τροφοδοτούμενων με μπαταρία και συσκευών Bluetooth. Ακόμη, το πρότυπο αυτό λειτουργεί στα 2.4 GHz παρέχοντας ρυθμό δεδομένων 1 Mbps για αποστάσεις μεταξύ 5 και 10 m.



Εικόνα 14: Αρχιτεκτονική του 802.15.4

4.2 Πρότυπο IEEE 802.15.4

Το IEEE 802.15.4 είναι ένα πρότυπο που ορίζει το φυσικό επίπεδο και τον έλεγχο πρόσβασης μέσου (MAC) για ασύρματα προσωπικά δίκτυα μικρής εμβέλειας και χαμηλής ταχύτητας (LR-WPANs) που σχηματίζονται από σταθερές ή κινούμενες συσκευές, τροφοδοτούμενες από μπαταρίες ή κάποια άλλη πηγή περιορισμένης ενέργειας και ολοκληρώθηκε στις αρχές του 2003. Τα Low-Rate WPANs χαρακτηρίζονται από μικρό αριθμό καθηκόντων, χαμηλό κόστος, μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και υποστήριξη για μεγάλο αριθμό κόμβων. Η αρχιτεκτονική κάθε LR-WPAN (Low Rate – Wireless Personal Network), στην κατηγορία των οποίων ανήκουν και τα WSNs, κατηγοριοποιείται σε μία σειρά από επίπεδα (layers), τα οποία διευκολύνουν τη μελέτη και το σχεδιασμό του δικτύου και προτυποποιούνται από μία σειρά πρωτοκόλλων. Αποτελείται από το φυσικό επίπεδο, το οποίο περιλαμβάνει έναν πομποδέκτη για τις ράδιο-συχνότητες μαζί με κάποιους μηχανισμούς ελέγχου χαμηλού επιπέδου, και το επίπεδο MAC, το οποίο παρέχει μηχανισμούς πρόσβασης στο φυσικό κανάλι, όπως το CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) για πρόσβαση στο κανάλι μέσω του φυσικού μέσου. Η πρόσβαση στο υπο-επίπεδο MAC γίνεται μέσω του Logical Link Control (LLC) και του υπο-στρώματος σύγκλισης ειδίου ως προς την υπηρεσία (Specific Convergence Sublayer-SSCS). Κάθε επίπεδο επιτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες και παρέχει υπηρεσίες μόνο στο υπερκείμενο επίπεδό του.



Εικόνα 15: Αρχιτεκτονική συσκευής ενός LR-WPAN

Αρχικά τα LR-WPANs σχηματίζονταν από κοντινές ζεύξεις έως και 75 m αλλά πλέον υπάρχει η δυνατότητα αύξησης της εμβέλειας της επικοινωνίας εις βάρος όμως του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων.

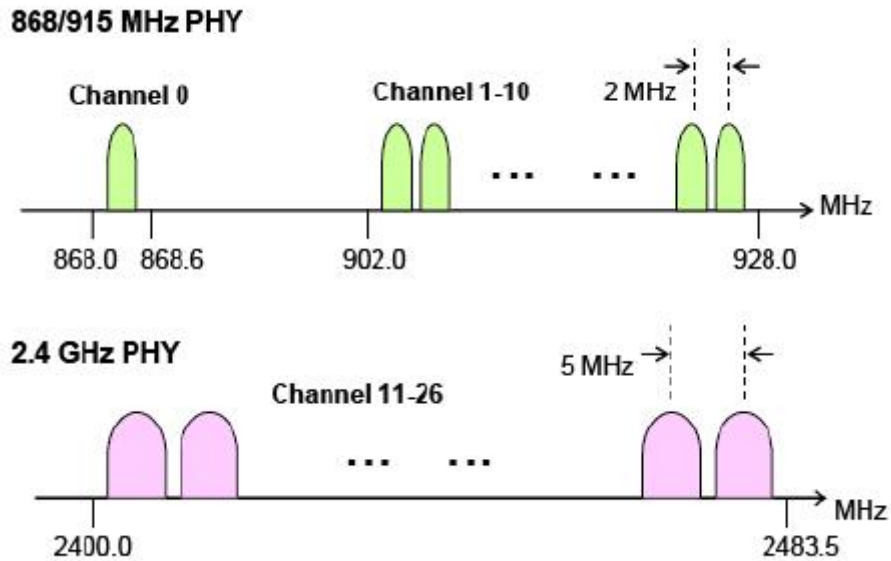
Οι ασύρματες ζεύξεις υπό την επίβλεψη του προτύπου 802.15.4 μπορούν να λειτουργήσουν σε τρεις ISM (Industrial Scientific Medical) ζώνες συχνοτήτων με ρυθμούς δεδομένων:

- 250 Kbps στη ζώνη των 2.4 GHz με κωδικοποίηση O-QPSK

Κεφάλαιο 4

- 40 Kbps στη ζώνη των 915 MHz με κωδικοποίηση BPSK
- 20 Kbps στη ζώνη των 868 MHz με κωδικοποίηση BPSK

Στο πρωτόκολλο 802.15.4 εκχωρούνται συνολικά 27 κανάλια εκ των οποίων 16 κανάλια ανήκουν στη ζώνη των 2.4 GHz, 10 κανάλια στη ζώνη των 915 MHz και 1 κανάλι στη ζώνη των 868 MHz. Η ζώνη των 2.4 GHz αποτελεί την πιο διαδεδομένη ζώνη συχνοτήτων, που είναι και η κοινή ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας με τα υπόλοιπα ασύρματα δίκτυα άρα και επικάλυψης. Σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων εκτελέστηκαν και οι πειραματικές μετρήσεις αυτής της εργασίας με Crossbow iris motes που χρησιμοποιούν αυτή την περιοχή συχνοτήτων.



Εικόνα 16: Τα κανάλια συχνοτήτων για το πρωτόκολλο 802.15.4

Η κεντρική συχνότητα (F_c) αυτών των καναλιών ορίζεται ως εξής:

$$F_c = \left. \begin{array}{l} 868.3 \text{ MHz} , \kappa = 0 \\ 906 + 2(\kappa - 1) \text{ MHz}, \kappa = 1, 2, \dots, 10 \\ 2405 + 5(\kappa - 11) \text{ MHz}, \kappa = 11, 12, 13, \dots, 26 \end{array} \right\}$$

Η περιοχή κάλυψης δεν είναι αυστηρά καθορισμένη, καθώς τα χαρακτηριστικά διάδοσης είναι δυναμικά και μεταβαλλόμενα. Μικρές μεταβολές της θέσης και της κατεύθυνσης πιθανόν να έχουν άμεση επίπτωση στην ισχύ ή την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Οι αλλαγές αυτές προκύπτουν, είτε μια συσκευή είναι στατική είτε κινείται, εξαιτίας των κινούμενων αντικειμένων που παρεμβάλλονται και επιδρούν άμεσα στη ζεύξη μεταξύ πομπού και δέκτη.

Το βασικότερο συστατικό των δικτύων που χρησιμοποιούν το πρότυπο 802.15.4 είναι η συσκευή ή κόμβος.

Υπάρχουν δύο είδη κόμβων:

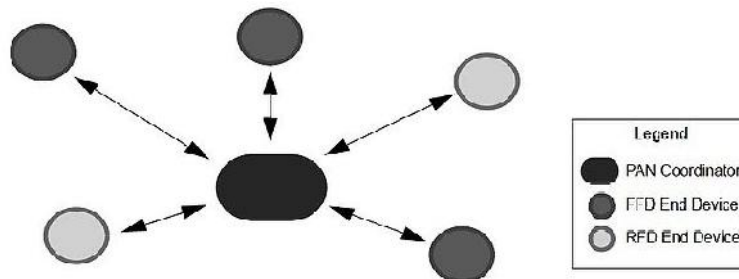
- Συσκευή πλήρους λειτουργίας (Full-Function Device – FFD)
- Συσκευή μειωμένης λειτουργίας (Reduced-Function Device – RFD)

Ένα δίκτυο περιέχει τουλάχιστον έναν κόμβο FFD, ο οποίος λειτουργεί σαν κεντρικός συντονιστής του δικτύου. Ο κόμβος FFD μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κεντρικός συντονιστής ενός προσωπικού δικτύου (Personal Area Network – PAN coordinator), είτε ως τοπικός συντονιστής σε οποιαδήποτε περιοχή του δικτύου ή ως απλή συσκευή. Το δίκτυο αποτελείται από κόμβους FFD, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν με οποιονδήποτε κόμβο που βρίσκεται εντός της εμβέλειας τους, και από κόμβους RFD, οι οποίοι μπορούν να επικοινωνούν μόνο με τον πλησιέστερο κόμβο FFD ή τον έναν κεντρικό κόμβο FFD συντονιστή, ο οποίος είναι συνήθως συνδεδεμένος με έναν υπολογιστή ή κάποιο άλλο δίκτυο. Οι κόμβοι RFD προορίζονται για απλές εργασίες, ενώ οι κόμβοι FFD αποτελούν το βασικό κορμό του δικτύου. Οι κόμβοι ορίζονται είτε με μία 64bit IEEE διεύθυνση είτε μία 16bit «μικρή» διεύθυνση κατά τη διάρκεια της συσχέτισης. Συνεπώς, ένα δίκτυο σύμφωνα με το πρότυπο 802.15.4 μπορεί να υποστηρίξει μέχρι $2^{16} - 1 = 65536 - 1 = 65535$ κόμβους με την διεύθυνση 0xFFFF να αποτελεί τη διεύθυνση ευρυεκπομπής (broadcast address).

Το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 υποστηρίζει τρεις βασικές τοπολογίες:

- Τοπολογία αστέρα

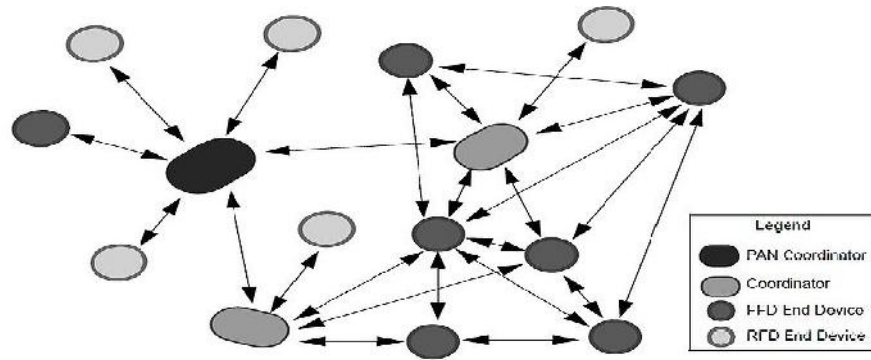
Στην τοπολογία αστέρα η συσκευή FFD, μετά την πρώτη ενεργοποίησή της, μπορεί να εγκαθιδρύσει το δίκτυό της και να λειτουργεί ως PAN coordinator. Με την επιλογή ενός PAN Identifier, που είναι μοναδικό για κάθε δίκτυο εντός της περιοχής εκπομπής, όλα τα δίκτυα αστέρα λειτουργούν ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα δίκτυα αστέρα σε τρέχουσα λειτουργία.



Εικόνα 17: Τοπολογία αστέρα

- Τοπολογία peer-to-peer (mesh)

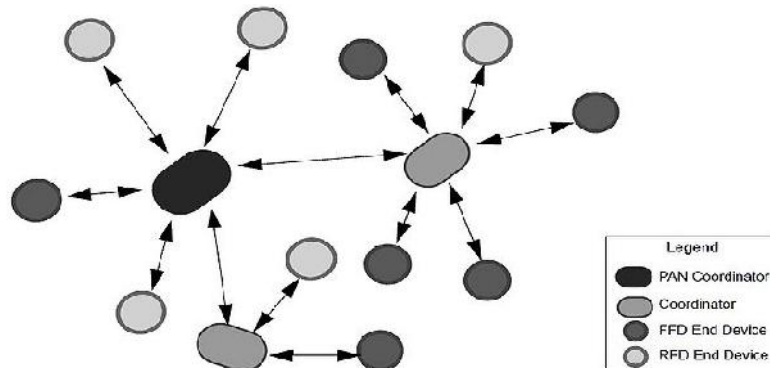
Στην peer-to-peer τοπολογία κάθε συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με κάθε άλλη που βρίσκεται στην περιοχή εκπομπής της, καθώς και να εξαχθούν επιπρόσθετες τοπολογίες όπως η cluster tree μορφή. Μια συσκευή ορίζεται ως PAN coordinator, η οποία μπορεί να αποτελεί την πρώτη συσκευή που επικοινωνεί στο δίκτυο.



Εικόνα 18: Τοπολογία peer-to-peer

➤ Τοπολογία Cluster – tree

Η τοπολογία αυτή αποτελεί μία ειδική περίπτωση της τοπολογίας peer-to-peer. Οι περισσότερες συσκευές αυτής της τοπολογίας είναι συσκευές FFD, ενώ μία συσκευή RFD μπορεί να συνδεθεί μόνο όταν είναι στο τέλος της διακλάδωσης του cluster, αφού έχει τη δυνατότητα να επικοινωνήσει μόνο με μια συσκευή FFD κάθε φορά. Η κάθε συσκευή FFD έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει σαν συντονιστής και να παρέχει συγχρονισμό σε άλλες συσκευές καθώς και σε άλλους συντονιστές. Ως καθολικός PAN coordinator του δικτύου, ο οποίος καταναλώνει τους περισσότερους υπολογιστικούς πόρους από κάθε άλλη συσκευή, μπορεί να λειτουργήσει μόνο ένας συντονιστής. Ο PAN coordinator σχηματίζει την πρώτη ομάδα – cluster, της οποίας αποτελεί το cluster head – CLH της ομάδας με το cluster identifier – CID να λαμβάνει την τιμή 0, επιλέγει ένα αχρησιμοποίητο PAN identifier και μεταδίδει ευρέως ακολουθίες δεδομένων σε γειτονικές συσκευές. Μια συσκευή, που είναι υποψήφια για σύνδεση, όταν λάβει μια ακολουθία δεδομένων μπορεί να απαιτήσει να συνδεθεί στο δίκτυο μέσω του CLH και αν ο PAN coordinator της επιτρέψει, τότε θα προστεθεί η συσκευή ως child στη λίστα των γειτόνων του. Εν συνεχεία, η συσκευή αυτή θα προσθέσει το CLH ως parent στη λίστα γειτόνων της και θα ξεκινήσει η μετάδοση περιοδικών ακολουθιών (periodic beacons). Αν η σύνδεση αυτή δεν είναι εφικτή, τότε η συσκευή θα αναζητήσει άλλο CLH –parent που ανήκει σε άλλο cluster του δικτύου. Βασικό πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η ευρεία κάλυψη μιας περιοχής, ενώ μειονέκτημά της είναι η χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης των μηνυμάτων.



Εικόνα 19: Τοπολογία cluster – tree

4.2.1 Το Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer) του 802.15.4

Το φυσικό επίπεδο παρέχει την υπηρεσία PHY data service και την PHY management service, που αλληλεπιδρά με την οντότητα διαχείρισης του φυσικού επιπέδου (Physical Layer Management Entity – PLME).

Το πρότυπο 802.15.4 καθορίζει ως επιτρεπόμενη τεχνική μετάδοσης του φυσικού επιπέδου την τεχνική εξάπλωσης φάσματος συνεχούς ακολουθίας DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) με διαμόρφωση BPSK (Binary Phase Shift Keying) ή OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying).

Οι βασικές λειτουργίες και υπηρεσίες που υλοποιούνται από το PHY επίπεδο του 802.15.4 είναι:

- Ενεργοποίηση και Απενεργοποίηση του Πομποδέκτη (transceiver), όπου αυτός τίθεται σε μία από τις τρεις καταστάσεις: εκπομπή, λήψη και sleeping.
- Ανίχνευση Ενέργειας (Energy Detection – ED) στο τρέχον κανάλι, η οποία είναι μια εκτίμηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος.
- Κατανομή Εγγυημένων Χρονοθυρίδων (Guaranteed Time Slots - GTSs)
- Έλεγχος Αδράνειας Καναλιού (Clear Channel Assessment - CCA) για πολλαπλή πρόσβαση χρησιμοποιώντας ED ή ανίχνευση φέροντος σήματος (Carrier Sense mode) ή και συνδυασμό και των δύο. Σε κατάσταση ED το μέσο θεωρείται κατειλημμένο αν ανιχνευθεί επίπεδο ενέργειας πάνω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι (threshold), ενώ σε κατάσταση ανίχνευσης φέροντος το μέσο θεωρείται κατειλημμένο αν ανιχνευθεί σήμα με τη διαμόρφωση και τα spreading χαρακτηριστικά του προτύπου 802.15.4. Στη συνδυασμένη κατάσταση, απαιτούνται αμφότερες οι προαναφερθείσες συνθήκες να λαμβάνονται υπόψιν για το αν το μέσο είναι κατειλημμένο ή όχι.
- Ένδειξη Ποιότητας Ζεύξης (Link Quality Indication – LQI) για τα ληφθέντα πακέτα, όπου πραγματοποιείται αυτή η μέτρηση για κάθε πακέτο που λαμβάνεται. Η μέτρηση της ισχύος ή/και της ποιότητας μιας ζεύξης, μέσω της οποίας μεταφέρεται ένα πακέτο, γίνεται με τη χρήση του ED του λήπτη, ένα ποσοστό σήματος προς θόρυβο, ή ένα συνδυασμό αυτών. Βέβαια, ο τρόπος υπολογισμού του LQI από το 802.15.4 δεν καθορίζεται πλήρως, αφήνοντας το σχεδιαστή να εισάγει το δικό του ανάλογα με τους πόρους που διαθέτει, τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Επιλογή συχνότητας καναλιού, αφού οι ασύρματες ζεύξεις μπορούν να λειτουργήσουν σε 27 διαφορετικά κανάλια υπό το πρότυπο 802.15.4 και έτσι το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη μετάθεση του πομποδέκτη σε ένα συγκεκριμένο κανάλι.
- Αποστολή και λήψη δεδομένων, η οποία και είναι η πιο βασική λειτουργία του φυσικού επιπέδου, εφαρμόζοντας τεχνικές διαμόρφωσης και spreading.
- Δομή των πακέτων του φυσικού επιπέδου, όπου η επικεφαλίδα συγχρονισμού SHR (Synchronization Header) αποτελείται από το preamble σήμα που χρησιμεύει για το συγχρονισμό και από το πεδίο που υποδηλώνει το τέλος του πεδίου συγχρονισμού SFD (Start-Of-frame Delimiter), που καθορίζει το τέλος του πεδίου SHR και την αρχή του υπόλοιπου πακέτου. Η επικεφαλίδα φυσικού επιπέδου PHR (PHY Header) αποτελείται από 8 bits και περιέχει πληροφορίες για το μήκος του πλαισίου. Το τμήμα δεδομένων του φυσικού επιπέδου (PHY Payload) είναι αυτό που ακολουθεί στο τέλος και περιλαμβάνει και το πλαίσιο MAC, το

Κεφάλαιο 4

οποίο είναι μεταβλητού μήκους.

Octets : 4	1	1	variable	
Preamble	SFD	Frame length (7 bits)	Reserved (1 bit)	PSDU
SHR		PHR		PHY payload

Εικόνα 20: Δομή πακέτων του φυσικού επιπέδου του 802.15.4

4.2.2 Το Υπο-επίπεδο Ελέγχου Προσπέλασης στο Μέσο Μετάδοσης (MAC-Media Access Control) του 802.15.4

Το MAC υπο-επίπεδο εξασφαλίζει τη διασύνδεση των ανώτερων επιπέδων με το φυσικό, δηλαδή είναι το επίπεδο που δρα ως διεπαφή μεταξύ του υπο-επιπέδου ελέγχου λογικής σύνδεσης (LLC) και του PHY Layer. Το πρωτόκολλο ελέγχου προσπέλασης στο μέσο παρέχει διευθυνσιοδότηση και μηχανισμούς ελέγχου προσπέλασης του καναλιού, το οποίο καθιστά δυνατή την επικοινωνία μεταξύ των τερματικών ή των κόμβων του δικτύου. Το υπο-επίπεδο MAC εξομοιώνει ένα δικατευθυντήριο κανάλι επικοινωνίας σε δίκτυο πολλών σημείων, όπου το κανάλι μπορεί να παρέχει υπηρεσίες μονοεκπομπής (unicast), πολυεκπομπής (multicast) ή ευρυεκπομπής (broadcast).

Το MAC υπο-επίπεδο παρέχει την υπηρεσία MAC data service και την MAC management service, που διασυνδέονται με την οντότητα διαχείρισης του MAC (MAC Layer Management Entity – MLME) και την υπηρεσία πρόσβασης σημείου (Service Access Point - SAP).

Οι βασικές αρμοδιότητες που υλοποιούνται από το MAC υπο-επίπεδο του 802.15.4 είναι:

- * Η διαχείριση του beacon
- * Η πρόσβαση στο διαθέσιμο κανάλι
- * Η διαχείριση των εγγυημένων χρονοθυρίδων (Guaranteed Time Slots – GTS)
- * Η επιβεβαίωση των μεταδιδόμενων frames
- * Η αναγνώριση της μεταφοράς των frames

Το πρότυπο 802.15.4 μπορεί να λειτουργήσει είτε σε non-beacon-enabled mode είτε σε beacon-enabled mode. Στην πρώτη περίπτωση, η οποία είναι ιδανική για δίκτυα τοπολογίας αστέρα, υποστηρίζονται δίκτυα πολλαπλών βημάτων (multi-hop), όπου μια ομάδα κόμβων είναι μονίμως ενεργή και αναμεταδίδει μηνύματα που δημιουργήθηκαν από άλλους κόμβους χαμηλής κατανάλωσης. Στην non-beacon λειτουργία, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος CSMA χωρίς χρονοθυρίδες (un-slotted) και δεν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός RTS (Ready To Send) / CTS (Clear To Send), αφού το μέγεθος των πλαισίων του 802.15.4 είναι μικρό. Υπάρχει όριο στον αριθμό των αποσύρσεων που γίνονται, για την αποφυγή αέναης απόσυρσης (backoff), στην οποία ο χρόνος απόσυρσης του CSMA αυξάνεται εκθετικά χωρίς όρια, και μόλις φτάσει στο μέγιστο αυτό όριο δημιουργείται μια αναφορά αποτυχίας πρόσβασης στο κανάλι (channel access failure) από το MAC και αποστέλλεται στο ανώτερο επίπεδο της στοίβας. Στην άλλη περίπτωση

λειτουργίας, την beacon-enabled mode, ο χρόνος του καναλιού διαιρείται σε υπερ-πλαίσια (super-flames), όπου οριοθετούνται από τους συντονιστές της ομάδας κατά την εκπομπή beacons. Στα πλαίσια μιας ομάδας, όλες οι επικοινωνίες, γίνονται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου υπερ-πλαισίου, η διάρκεια του οποίου ονομάζεται διάρκεια υπερ-πλαισίου (Super-frame Duration – SD). Βέβαια, ο συντονιστής μπορεί να απενεργοποιήσει την εκπομπή των beacons και έτσι να μην χρησιμοποιήσει τη δομή του υπερ-πλαισίου. Εφόσον είναι επιθυμητό, οι αισθητήρες να έχουν χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, στα super-flames υπάρχει ένα συνιστώμενο διάστημα εντός του οποίου ο coordinator δεν δέχεται πακέτα. Έτσι, όλες οι πληροφορίες πρέπει να μεταδοθούν στο ενεργό διάστημα ενώ ο coordinator «πέφτει για ύπνο» (sleep) όλο το υπόλοιπο διάστημα. Συνεπώς, το super-flame αποτελείται από ένα ενεργό και ανενεργό τμήμα, όπου το πρώτο υποδιαιρείται σε σχισμές σταθερού μήκους και αποτελείται από μία περίοδο ανταγωνισμού πρόσβασης (Contention Access Period – CAP), στην οποία οι κόμβοι ανταγωνίζονται για την πρόσβαση στο μέσο χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο slotted CSMA-CA, και μία περίοδο πρόσβασης χωρίς ανταγωνισμό, στην οποία οι κόμβοι μεταδίδουν τα δεδομένα τους χωρίς διαμάχη και σε εγγυημένες χρονικές «σχισμές» (Guaranteed Time Slots – GTS), τις οποίες διαθέτει και διαχειρίζεται ο PAN coordinator.

Το MAC υπο-επίπεδο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Πολλαπλής Πρόσβασης με Ανίχνευση Φέροντος και Αποφυγή Συγκρούσεων (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – CSMA/CA) για την επιλογή της χρονικής στιγμής που θα εκπέμψει μια συσκευή ή θα τεθεί σε αναμονή για τη λήψη ενός πακέτου.

Χρησιμοποιούνται δύο τύποι προσπέλασης, οι οποίοι αναφέρθηκαν ονομαστικά πιο πάνω, ανάλογα με τη διαμόρφωση του καναλιού :

- Un-slotted μορφή του αλγορίθμου, που είναι διαδομένη σε δίκτυα με απενεργοποιημένη την εκπομπή beacons και με πρόβλεψη της ανίχνευσης του καναλιού πριν την μετάδοση. Έτσι, μια συσκευή σε κάθε εκπομπή δεδομένων, πρέπει να περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα περιόδων backoff. Σε περίπτωση αδράνειας του καναλιού αρχίζει η μετάδοση, ενώ στην περίπτωση που είναι απασχολημένο ακολουθείται ένας τυχαίος αλγόριθμος backoff και έπειτα εκπέμπει. Κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, δεν ανιχνεύει το κανάλι και στέλνει την ακολουθία δεδομένων ολόκληρη, η οποία μπορεί να χαθεί λόγω παρεμβολών.

- Slotted μορφή του αλγορίθμου, που χρησιμοποιείται από δίκτυα με ενεργοποιημένη την εκπομπή beacons. Οι χρονοσχισμές απόσυρσης ευθυγραμμίζονται με την αρχή εκπομπής του πλαισίου beacon και όταν ένας κόμβος επιθυμεί να εκπέμψει στη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού του καναλιού, εντοπίζει το όριο της επόμενης θυρίδας και περιμένει τυχαίο χρόνο. Αν το κανάλι είναι κατειλημμένο, θα πρέπει να περιμένει για ένα τυχαίο αριθμό από θυρίδες και να ξαναδοκιμάσει για την πρόσβασή του στο κανάλι, ενώ αν είναι ελεύθερο περιμένει για το επόμενο όριο της θυρίδας και έπειτα εκπέμπει.

Κεφάλαιο 4

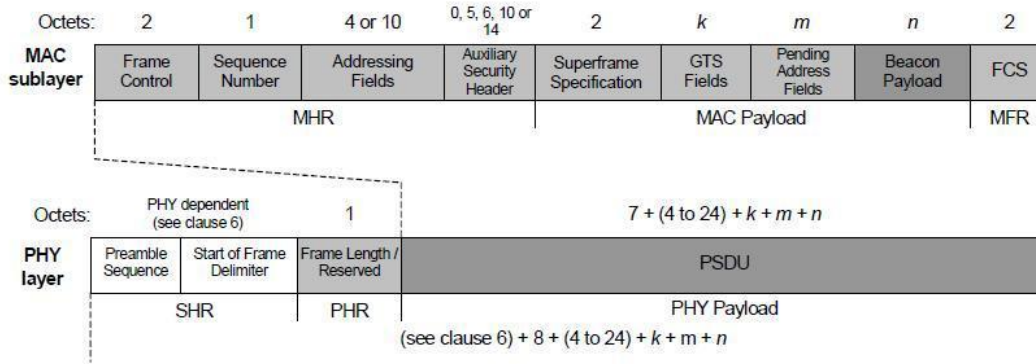
4.2.3 Η Δομή του Πλαισίου του 802.15.4

Τα πλαίσια του 802.15.4, στη γενική τους μορφή, αποτελούνται από:

- * Τα bytes του φυσικού επιπέδου, που περιλαμβάνουν το 40bit προοίμιο (preamble), δηλαδή τα bits συγχρονισμού που βοηθούν το δέκτη να ξεχωρίσει το 802.15.4 πακέτο από το θορυβώδες περιβάλλον, και το μήκος πλαισίου.
- * Την κεφαλίδα του MAC υπο-επιπέδου (MHR) που περιλαμβάνει το πεδίο για τον έλεγχο πλαισίου, για πληροφορίες διεύθυνσης, για παραμέτρους δικτύου και τέλος, το πεδίο για τον αριθμό ακολουθίας του πακέτου (sequence number).
- * Το περιεχόμενο του πακέτου, δηλαδή ένα μεταβλητό data payload.
- * Το πλαίσιο τέλους του MAC υπο-επιπέδου (MFR), δηλαδή την ακολουθία ελέγχου που επιτρέπει στο δέκτη να αντιληφθεί τη μεταβίβαση του πακέτου χωρίς σφάλματα (Frame Check Sequence – FCS).

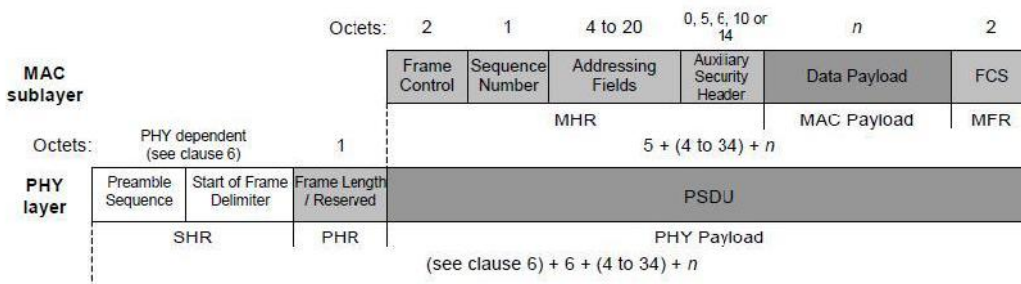
Υπάρχουν τέσσερις δομές πλαισίων του δικτύου 802.15.4 ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο προορίζονται:

- Η δομή για πλαίσιο beacon (Beacon Frame), το οποίο προέρχεται από το εσωτερικό υπόστρωμα του MAC. Ένας συντονιστής μπορεί να μεταδώσει πλαίσια beacons δικτύου σε ένα δίκτυο που επιτρέπεται η αποστολή τους. Το ωφέλιμο φορτίο του MAC περιέχει την προδιαγραφή του super-frame, τα πεδία GTS, την εν αναμονή διεύθυνση (pending address) και το ωφέλιμο φορτίο του beacon, το οποίο είναι προκαθορισμένο με μία επικεφαλίδα MAC (MHR) και επισυνάπτεται με το MFR (MAC footer). Το MHR περιλαμβάνει το πεδίο πλαισίου ελέγχου του MAC (MAC control frame field), τον αριθμό σειράς του beacon (Beacon Sequence Number - BSN), τα πεδία διευθύνσεων (addressing fields) και προαιρετικά τη βοηθητική κεφαλίδα ασφαλείας (security header). Το MFR περιλαμβάνει ένα πλαίσιο ελέγχου σειράς 16 bits (Frame Check Sequence - FCS). Το MHR μαζί με το ωφέλιμο φορτίο του MAC και το MFR σχηματίζουν ένα MAC πλαίσιο beacon (MAC Protocol Data Unit - MPDU). Το πλαίσιο αυτό περνά στο φυσικό επίπεδο, ως η φυσική μονάδα δεδομένων υπηρεσίας (PHY Service Data Unit - PSDU), η οποία καθίσταται το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου. Το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου είναι προκαθορισμένο μαζί με την κεφαλίδα συγχρονισμού (SHR) και περιέχει την ακολουθία προοιμίου (Preamble Sequence), το πεδίο της αρχής του διαχωριστή του πλαισίου (Start-of-Frame Delimiter), καθώς και τη φυσική κεφαλίδα (PHR), που περιλαμβάνει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του φυσικού επιπέδου σε bytes. Το SHR, PHR και το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου από κοινού σχηματίζουν το πακέτο του φυσικού επιπέδου (PHY Protocol Data Unit - PPDU).



Εικόνα 21: Σχηματική διάταξη του πλαισίου Beacon

■ Η δομή για πλαίσιο δεδομένων (Data Frame), το οποίο προέρχεται από τα ανώτερα επίπεδα. Το ωφέλιμο φορτίο δεδομένων περνά στο εσωτερικό υπόστρωμα του MAC και αναφέρεται ως MAC μονάδα δεδομένων υπηρεσίας (MSDU). Το ωφέλιμο φορτίο του MAC προκαθορίζεται μαζί με ένα MHR και επισυνάπτεται με ένα MFR. Το MHR περιλαμβάνει το πεδίο του MAC ελέγχου πλαισίου (MAC control frame field), τον αριθμό σειράς των δεδομένων (DSN), τα πεδία διευθύνσεων (addressing fields) και προαιρετικά την βοηθητική κεφαλίδα ασφαλείας (security header). Το MFR περιλαμβάνει ένα πλαίσιο σειράς ελέγχου αποτελούμενο από 16 bits (Frame Check Sequence - FCS). Το MHR μαζί με το ωφέλιμο φορτίο του MAC και το MFR σχηματίζουν ένα MAC πλαίσιο δεδομένων (MPDU). Το MAC πλαίσιο δεδομένων περνά στο φυσικό επίπεδο, ως η φυσική μονάδα δεδομένων υπηρεσίας (PSDU), η οποία καθίσταται το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου. Το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου είναι προκαθορισμένο μαζί με την κεφαλίδα συγχρονισμού (SHR), και περιέχει την ακολουθία προοιμίου (Preamble Sequence) και το πεδίο αρχής του διαχωριστή του πλαισίου (Start-of-Frame Delimiter), καθώς και τη φυσική κεφαλίδα (PHR), που περιλαμβάνει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του φυσικού επιπέδου σε bytes. Η ακολουθία του προοιμίου και τα δεδομένα SFD ενεργοποιούν τον παραλήπτη ώστε να επιτυγχάνει συγχρονισμό συμβόλων. Το SHR, PHR και το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου από κοινού σχηματίζουν το πακέτο του φυσικού επιπέδου (PPDU).

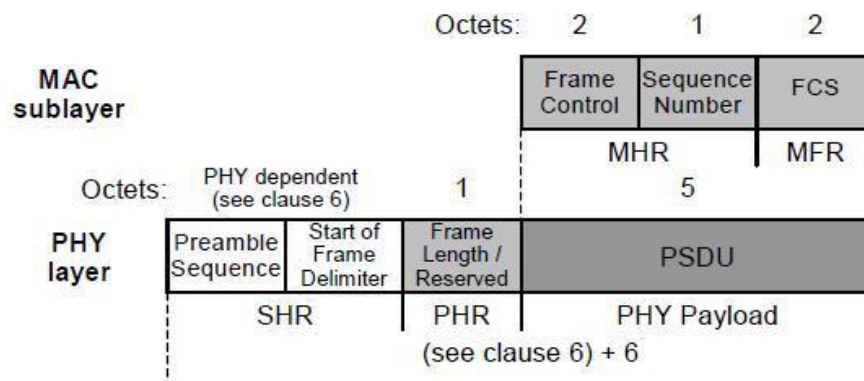


Εικόνα 22: Σχηματική διάταξη του πλαισίου Δεδομένων - Data Frame

■ Η δομή για πλαίσιο επιβεβαίωσης (Acknowledge Frame), το οποίο προέρχεται από το εσωτερικό υπόστρωμα του MAC. Το πλαίσιο επιβεβαίωσης δημιουργείται από ένα MHR και ένα MFR, ενώ δεν περιέχει ωφέλιμο φορτίο MAC. Το MHR περιλαμβάνει το πεδίο ελέγχου πλαισίου

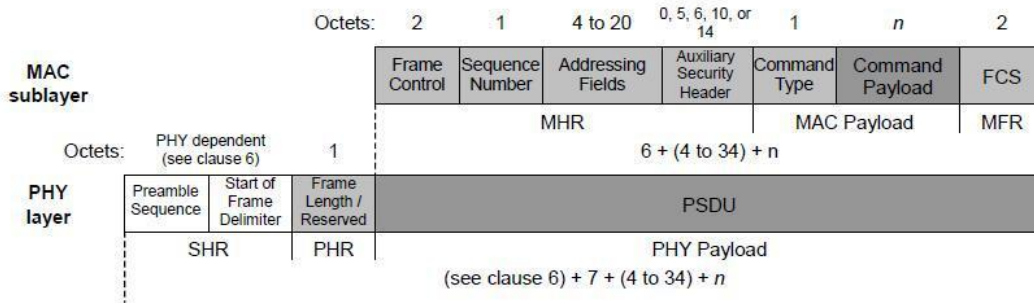
Κεφάλαιο 4

(MAC control frame field) και τον αριθμό σειράς των δεδομένων (DSN). Το MFR περιλαμβάνει ένα πλαίσιο σειράς ελέγχου αποτελούμενο από 16 bits (Frame Check Sequence - FCS). Το MHR μαζί με το MFR σχηματίζουν ένα MAC πλαίσιο επιβεβαίωσης (MPDU). Το MAC πλαίσιο επιβεβαίωσης περνά στο φυσικό επίπεδο, ως η φυσική υπηρεσιακή μονάδα δεδομένων (PSDU), η οποία καθίσταται το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου. Το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου είναι προκαθορισμένο μαζί με την κεφαλίδα συγχρονισμού (SHR), και περιέχει την ακολουθία προοιμίου (Preamble Sequence) και το πεδίο αρχής του διαχωριστή του πλαισίου (Start-of-Frame Delimiter), καθώς και τη φυσική κεφαλίδα (PHR), που περιλαμβάνει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του φυσικού επιπέδου σε bytes. Το SHR, PHR και το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου από κοινού σχηματίζουν το πακέτο του φυσικού επιπέδου (PPDU).



Εικόνα 23: Σχηματική διάταξη του πλαισίου Επιβεβαίωσης – Ack frame

- Η δομή για πλαίσιο εντολής (Command Frame), το οποίο προέρχεται από το εσωτερικό υπόστρωμα του MAC. Το ωφέλιμο φορτίο MAC περιέχει το πεδίο τύπος εντολής (Command Type) και το ωφέλιμο φορτίο εντολής. Το ωφέλιμο φορτίο του MAC προκαθορίζεται μαζί με ένα MHR και επισυνάπτεται με ένα MFR. Το MHR περιλαμβάνει το πεδίο του MAC ελέγχου πλαισίου (MAC control frame field), τον αριθμό σειράς των δεδομένων (DSN), τα πεδία διευθύνσεων (addressing fields) και προαιρετικά τη βοηθητική κεφαλίδα ασφαλείας (security header). Το MFR περιλαμβάνει ένα πλαίσιο σειράς ελέγχου αποτελούμενο από 16 bits (Frame Check Sequence - FCS). Το MHR μαζί με το ωφέλιμο φορτίο του MAC και το MFR σχηματίζουν ένα MAC πλαίσιο εντολής (MPDU). Το MPDU περνά στο φυσικό επίπεδο, ως η φυσική υπηρεσιακή μονάδα δεδομένων (PSDU), η οποία καθίσταται το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου. Το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου είναι προκαθορισμένο μαζί με την κεφαλίδα συγχρονισμού (SHR), και περιέχει την ακολουθία προοιμίου (Preamble Sequence) και το πεδίο αρχής του διαχωριστή του πλαισίου (Start-of-Frame Delimiter), καθώς και τη φυσική κεφαλίδα (PHR), που περιλαμβάνει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του φυσικού επιπέδου σε bytes. Η ακολουθία του προοιμίου και τα δεδομένα SFD ενεργοποιούν τον παραλήπτη ώστε να επιτυγχάνει συγχρονισμό συμβόλων. Το SHR, PHR και το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου από κοινού σχηματίζουν το πακέτο του φυσικού επιπέδου (PPDU).



Εικόνα 24: Σχηματική διάταξη του πλαισίου Ελέγχου – Command frame

4.3 ZigBee

Πολλές φορές κυριαρχεί λανθασμένα η αντίληψη ότι το πρότυπο 802.15.4 και το ZigBee είναι ταυτόσημα. Το ZigBee αποτελεί επέκταση της στοίβας πρωτοκόλλων του 802.15.4, καθώς υλοποιεί τα επίπεδα δικτύου και εφαρμογών, βασιζόμενο στις υπηρεσίες που παρέχουν το φυσικό επίπεδο και το MAC υπο-επίπεδο του 802.15.4.

Η ZigBee Alliance είναι μια κοινή ομάδα πολλών μεγάλων εταιρειών, η οποία ανέπτυξε το πρωτόκολλο ZigBee ως ένα πρότυπο χαμηλού κόστους, πολύ χαμηλής κατανάλωσης, αμφίδρομης και ασύρματης επικοινωνίας. Οι πρώτες προδιαγραφές του ZigBee επικυρώθηκαν στα τέλη του 2004. Το ZigBee είναι το όνομα της προδιαγραφής για μια συλλογή υψηλού επιπέδου επικοινωνιακών πρωτοκόλλων που στοχεύει στις εφαρμογές ράδιο-συχνοτήτων και σε πιο απλή και οικονομική τεχνολογία σε σχέση με άλλα WPANs, όπως το Bluetooth.

Το IEEE 802.15.4 επικεντρώνεται στα δύο χαμηλότερα επίπεδα της στοίβας του πρωτοκόλλου, ενώ το ZigBee συγκεντρώνεται στην παροχή των πιο υψηλών επιπέδων για τη λειτουργικότητα των δεδομένων δικτύωσης και για υπηρεσίες ασφαλείας. Το πρωτόκολλο ZigBee υποστηρίζει τις τρεις βασικές τοπολογίες του IEEE 802.15.4.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, η δυνατότητα να υποστηρίξει μέχρι 254 συσκευές σε τοπολογία αστέρα και η γρήγορη επαναφορά των συσκευών από κατάσταση sleep. Το δίκτυο ZigBee είναι πολλαπλής πρόσβασης, αφού όλες οι συσκευές έχουν ισότιμη πρόσβαση στο μέσο επικοινωνίας και υπάρχουν δύο τύποι μηχανισμών πολλαπλής πρόσβασης. Αυτοί οι τύποι αναφέρθηκαν και στην περίπτωση του προτύπου 802.15.4 και είναι ο μηχανισμός με λειτουργία beacon, όπου οι συσκευές επιτρέπεται να εκπέμπουν μόνο σε προκαθορισμένες χρονοθυρίδες, και η λειτουργία non-beacon, στην οποία όλες οι συσκευές μπορούν να εκπέμπουν οποιαδήποτε χρονική στιγμή, εφόσον το κανάλι είναι ελεύθερο.

4.3.1 Τα Επίπεδα του Πρωτοκόλλου ZigBee

Το πρωτόκολλο Zigbee καθορίζει τα υψηλότερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων, από το επίπεδο δικτύου και πάνω. Η στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee βρίσκεται στο πάνω μέρος του

Κεφάλαιο 4

φυσικού επιπέδου και του MAC υπο-επιπέδου, που έχουν καθοριστεί από το πρότυπο IEEE 802.15.4.

Η στοιβή πρωτοκόλλων ορίζει τα ακόλουθα επίπεδα:

1. Επίπεδο Δικτύου - ZigBee Network Layer (NWK)

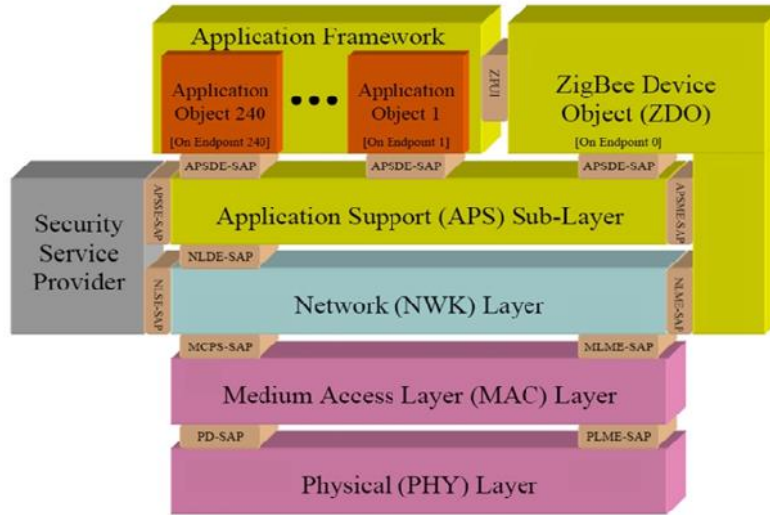
Το NWK επίπεδο αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ των δύο προτύπων, του 802.15.4 και του ZigBee, καθώς εξασφαλίζει τη σωστή λειτουργία του MAC υπο-επιπέδου και παρέχει τις κατάλληλες υπηρεσίες στο επίπεδο εφαρμογών, μέσω των μονάδων NLDE – SAP (Network Layer Data Entity - Service Access Point) και NLME – SAP (Network Layer Management Entity - Service Access Point). Το επίπεδο αυτό περιέχει όλες τις τοπολογίες δικτύωσης, που παρέχονται από τη συγκεκριμένη τεχνολογία και είναι υπεύθυνο για την οργάνωση και παροχή δρομολόγησης σε ένα multi-hop δίκτυο, που βασίζεται στη λειτουργία του IEEE 802.15.4. Επιπλέον, αρμοδιότητα του NWK επιπέδου είναι η σωστή διατήρηση της επικοινωνίας μεταξύ των συνδεδεμένων συσκευών του δικτύου και η ανίχνευση της λειτουργίας γειτονικών δικτύων, ώστε να αποφευχθεί μια ενδεχόμενη επικάλυψη συχνότητας.

2. Επίπεδο Εφαρμογής - ZigBee Application Layer (APL)

Το επίπεδο αυτό είναι το υψηλότερο και πολυπλοκότερο που ορίζει το πρότυπο και προσφέρει μια δομή για την ανάπτυξη και επικοινωνία κατανεμημένων εφαρμογών. Αποτελείται από τα Αντικείμενα Εφαρμογών (Application Objects), το Αντικείμενο Συσκευής ZigBee (ZigBee Application Object) και το υπο-επίπεδο Υποστήριξης Εφαρμογής (Application Support SubLayer - APS). Τα Αντικείμενα Εφαρμογών είναι οι εφαρμογές που τρέχουν σε μια συσκευή ZigBee και το Αντικείμενο Συσκευής ZigBee παρέχει τη διασύνδεση στα Αντικείμενα Εφαρμογών, που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση άλλων συσκευών και υπηρεσιών που αυτές παρέχουν. Το υπο-επίπεδο APS είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση των λογικών συνδέσεων μεταξύ των συσκευών επικοινωνίας με την προώθηση παράλληλα των πακέτων δεδομένων μεταξύ των συνδεδεμένων συσκευών. Ακόμη, το υπο-επίπεδο αυτό επικοινωνεί άμεσα με την υπηρεσία παροχής ασφάλειας των δεδομένων μεταφοράς και λήψης δεδομένων (Security Service Provider).

3. Πλαίσιο Εργασίας Εφαρμογών - ZigBee Application Framework (AF)

Το επίπεδο AF είναι το τελευταίο επίπεδο του πρωτοκόλλου ZigBee και είναι υπεύθυνο για την ύπαρξη και διαμονή όλων των αντικειμένων της εφαρμογής στο δίκτυο, που θεωρείται η λογική περιγραφή κάθε συσκευής ZigBee συνδεδεμένης στο δίκτυο και η οποία μπορεί να εκπέμπει και να λαμβάνει πακέτα δεδομένων. Αυτό το επίπεδο διαθέτει μέχρι 240 αντικείμενα εφαρμογών, οντότητες εφαρμογών καθορισμένες από το χρήστη και οι οποίες αποτελούν μέρος της εφαρμογής ZigBee.

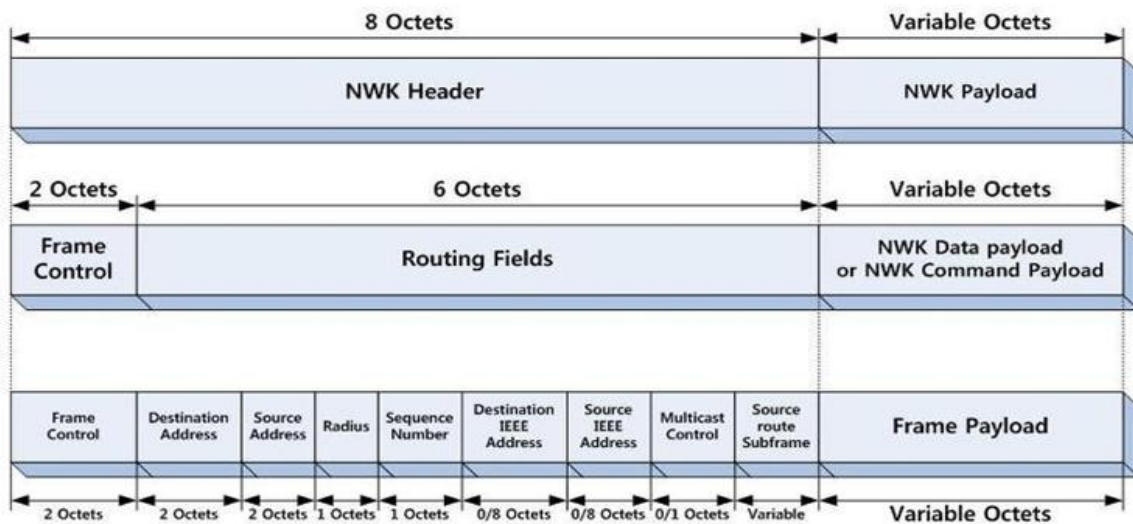


Εικόνα 25: Στοιβα του πρωτοκόλλου ZigBee

4.3.2 Η Δομή του Πλαισίου του ZigBee στο Επίπεδο Δικτύου

Τα πλαίσια του ZigBee στο επίπεδο NWK, στη γενική τους μορφή, αποτελούνται από:

- * Την επικεφαλίδα NWK
- * Το πλαίσιο ελέγχου
- * Το πεδίο διεύθυνσης
- * Το πεδίο για πληροφορία αρίθμησης
- * Το ωφέλιμο φορτίο NWK



Εικόνα 26: Μορφή του πλαισίου NWK του ZigBee

Κεφάλαιο 4

Το πεδίο της διεύθυνσης προορισμού είναι 2 octets, εξαρτάται από το multicast flag sub – field του πεδίου του πλαισίου ελέγχου και διατηρεί 16 bits της διεύθυνσης δικτύου της συσκευής προορισμού, μια broadcast διεύθυνση ή την 16 bits ταυτότητα της ομάδας της προοριζόμενης multicast ομάδας. Το πεδίο της διεύθυνσης πηγής διατηρεί πάντα την 16 bits διεύθυνση του δικτύου της συσκευής πηγής. Το πεδίο αυτό μαζί με τον αριθμό ακολουθίας χαρακτηρίζουν μοναδικά το πλαίσιο. Το πεδίο payload πλαισίου έχει μεταβλητό μήκος και περιέχει πληροφορία με τα μεμονωμένα είδη των πλαισίων. Το πεδίο του πλαισίου ελέγχου είναι 16 bits και περιέχει πληροφορία για τον καθορισμό του είδους του πλαισίου, τη διεύθυνση, τα πεδία αρίθμησης και άλλες σημαίες ελέγχου.

4.4 Πλεονεκτήματα Χρήσης του IEEE 802.15.4 και ZigBee

Η τεχνολογία ZigBee και IEEE 802.15.4 εμφανίζεται να αποτελεί την τεχνολογία με τα περισσότερα πλεονεκτήματα για την εφαρμογή της σε ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPANs). Η ευρεία επέκταση των εφαρμογών τους οφείλεται στα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν αυτά τα πρότυπα, όπως η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, δυνατότητα μεταφοράς μικρού μήκους πακέτων δεδομένων σε διάφορες τοπολογίες δικτύων με αξιοπιστία και μεγάλη ταχύτητα. Ακόμη, η τεχνική εξάπλωσης του φάσματος DSSS, που χρησιμοποιείται από το IEEE 802.15.4, δίνει τη δυνατότητα μετάδοσης των δεδομένων ταχύτερα και αποδοτικότερα, αφού πραγματοποιείται μέσω πολλαπλών συχνοτήτων. Η διαδεδομένη χρήση τους οφείλεται επίσης στο χαμηλό κόστος υλικού και λογισμικού, το οποίο οδηγεί σε απλές λύσεις. Έτσι, η χρήση του προτύπου 802.15.4 ή του ZigBee σε ένα δίκτυο, τις περισσότερες φορές διατηρεί σε χαμηλό επίπεδο το κόστος του και περιορίζει το χρόνο ανάπτυξής του. Επίσης, σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των πρωτοκόλλων είναι ότι το εκάστοτε δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει πολλές συσκευές καθώς και πολλαπλές τοπολογίες. Το κύριο στοιχείο του 802.15.4 είναι η δυνατότητα επίτευξης χαμηλού κόστους κατασκευής και λειτουργίας με παράλληλα την τεχνολογική απλότητα των δικτύων και των συσκευών. Συνεπώς, το πρότυπο αυτό αποτελεί την κατάλληλη λύση για εφαρμογές με χαμηλή ενέργεια και χαμηλό κόστος, όπως και το ZigBee, που είναι μια τεχνολογία χαμηλού εύρους δεδομένων, χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ασύρματων πρωτοκόλλων δικτύωσης.

Κεφάλαιο 5

Τα Πρότυπα της Οικογένειας του IEEE 802.11

5.1 Γενικά

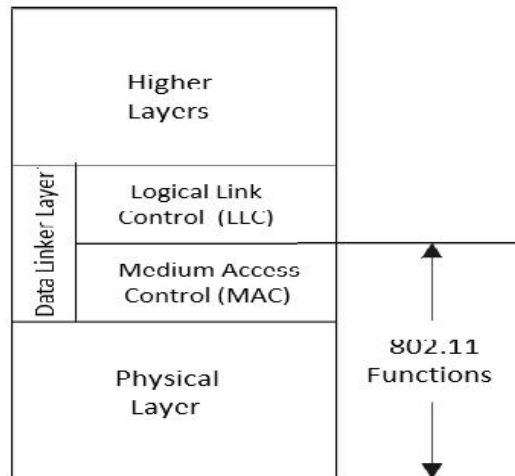
Το IEEE 802.11 είναι μια οικογένεια πρωτοκόλλων που περιγράφουν τη λειτουργία ασύρματων τοπικών δικτύων, Wireless Local Area Networks (WLANs), που έχουν στόχο την επέκταση του ενσύρματου 802.3 (Ethernet). Αναμφισβήτητα, τα WLANs έχουν γνωρίσει τη μεγαλύτερη εξάπλωση την τελευταία δεκαετία όσον αφορά τεχνολογίες σχετικές με το διαδίκτυο. Κάθε σπίτι ή εργασιακός χώρος με πρόσβαση στο internet, μέσω της κεραίας στο router και της ασύρματης κάρτας δικτύου ενός laptop, έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει ένα ασύρματο δίκτυο. Είναι φανερό λοιπόν ότι ο σχεδιασμός ενός οποιοσδήποτε διαφορετικού δικτύου από τα WLAN θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν του τις παρεμβολές που δέχεται από τα ασύρματα τοπικά δίκτυα.

Το πρότυπο αυτό είναι ευρύτερα γνωστό ως «Wi-Fi» (Wireless Fidelity) επειδή η Wi-Fi Alliance, ένας οργανισμός ανεξάρτητος από την IEEE, παρέχει την πιστοποίηση για τα προϊόντα που τηρούν τις προδιαγραφές του 802.11. Τον Ιούνιο του 1997, η IEEE οριστικοποίησε το πρώτο πρότυπο για τα ασύρματα δίκτυα με την ονομασία 802.11. Το πρότυπο αυτό καθορίζει διασύνδεση μέσω αέρα μεταξύ ενός ασύρματου πελάτη και ενός σταθμού βάσης ή μεταξύ δύο ασύρματων πελατών και παρέχει μετάδοση 1 ή 2 Mbps στη ζώνη 2.4 GHz. Σύμφωνα με την αρχική διατύπωση «...σκοπός του προτεινόμενου προτύπου είναι η ανάπτυξη μιας προδιαγραφής για την ασύρματη διασύνδεση σταθερών, φορητών (portable) και κινητών (moving) σταθμών μέσα σε μια τοπική περιοχή». Το τελικό πρότυπο, που δημοσιεύθηκε το Νοέμβριο του 1997, καθορίζει τη λειτουργία πρωτοκόλλων ικανών να υποστηρίζουν την από αέρος δικτύωση μιας τοπικής περιοχής. Όπως με άλλα πρότυπα της οικογένειας IEEE 802, η κύρια υπηρεσία του 802.11 είναι η μεταφορά των MSDU (MAC Service Data Unit) μεταξύ ομότιμων στρωμάτων ζεύξης δεδομένων.

Οι λειτουργίες και οι υπηρεσίες που καθορίζονται από το 802.11 αφορούν τα επίπεδα MAC και PHY. Συγκεκριμένα για το υπόστρωμα MAC, καθορίζονται δύο τρόποι λειτουργίας. Μια κατανομημένη (distributed) και μια συντονισμένη (coordinated) και όσον αφορά το φυσικό επίπεδο, το 802.11 υποστηρίζει τρία διαφορετικά στρώματα. Δύο που χρησιμοποιούν ραδιοσυχνότητες ως μέσο μετάδοσης με τεχνικές εξάπλωσης φάσματος (εναλλαγής συχνότητας και ευθείας ακολουθίας) και ένα που χρησιμοποιεί υπέρυθη ακτινοβολία. Η παραπάνω διάκριση οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την περίοδο προτυποποίησης του 802.11 υπήρχαν ήδη υλοποιήσεις ασυρμάτων δικτύων που χρησιμοποιούσαν τα προαναφερόμενα συστήματα μετάδοσης και σκοπός του 802.11 ήταν να είναι εντάξει τις προϋπάρχουσες υλοποιήσεις στο νέο

Κεφάλαιο 5

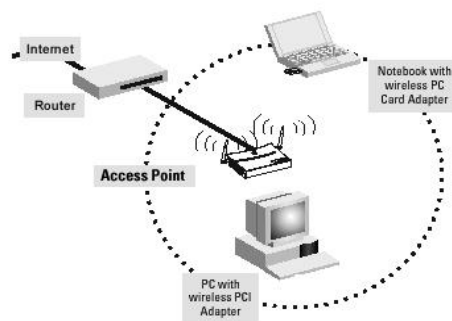
πρότυπο και όχι να τις αποκλείσει.



Εικόνα 27: Επίπεδα Λειτουργίας 802.11

Το πρωτόκολλο 802.11 ορίζει δύο τύπους εξοπλισμού:

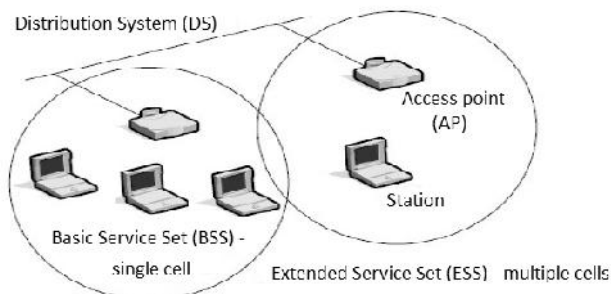
- έναν ασύρματο σταθμό (wireless station), που είναι συνήθως ένα PC, εξοπλισμένο με μία ασύρματη κάρτα δικτύου (wireless network interface card) και
- ένα σημείο πρόσβασης (access point), που λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ της ασύρματης και της ενσύρματης περιοχής του δικτύου. Το access point αποτελείται συνήθως από μία κεραία, μία διασύνδεση ενσύρματου δικτύου (wired network interface) και υποστηρίζει το πρωτόκολλο 802.11 ώστε τα δεδομένα να «περνούν» από το ασύρματο δίκτυο στο ενσύρματο. Ακόμη, το access point λειτουργεί σαν ένας σταθμός βάσης για το ασύρματο δίκτυο, ο οποίος επιτρέπει την πολλαπλή σύνδεση των τερματικών συσκευών στο ενσύρματο δίκτυο.



Εικόνα 28: Παράδειγμα ενός WLAN

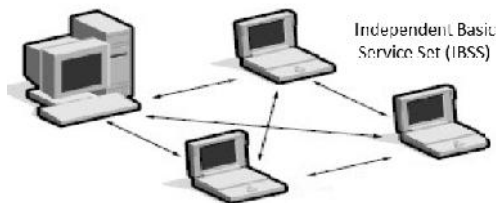
Το πρότυπο αυτό ορίζει δύο τύπους λειτουργίας:

- τη λειτουργία υποδομής (infrastructure mode), όπου το δίκτυο αποτελείται το λιγότερο από ένα access point που συνδέεται με την ενσύρματη περιοχή και



Εικόνα 29: Infrastructure mode

- τη λειτουργία ad-hoc, η οποία αποτελείται από μία ομάδα wireless stations, που επικοινωνούν ο ένας με τον άλλο χωρίς την παρέμβαση ενσύρματου δικτύου, δηλαδή σε μορφή peer-to-peer.

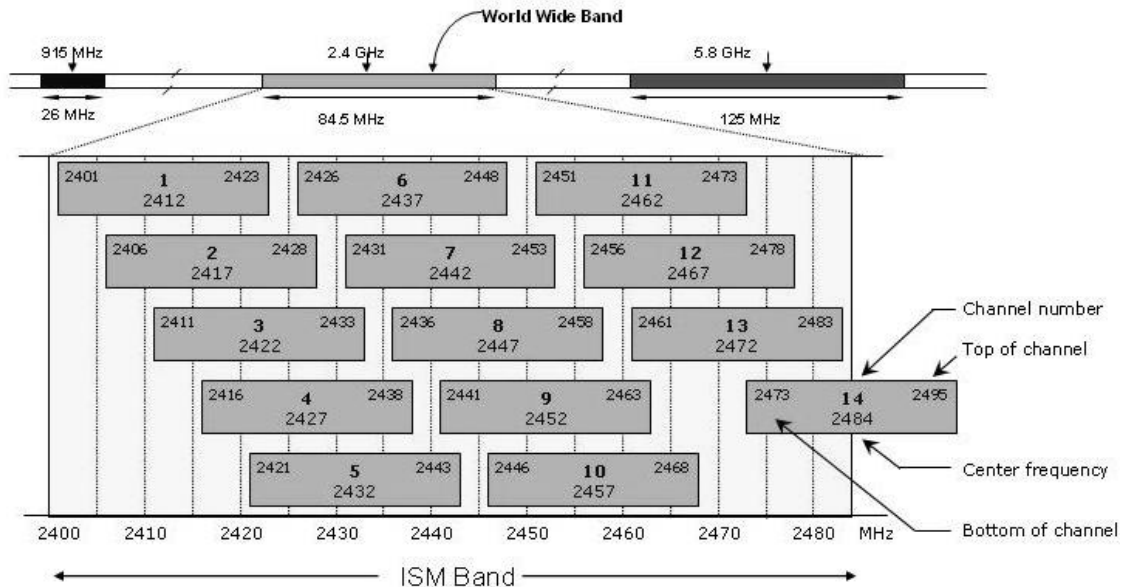


Εικόνα 30: Ad-hoc mode

Το πρωτόκολλο 802.11 έχει εδραιωθεί και χαρακτηρίζεται ως ένα μικρό τεχνολογικό θαύμα, το οποίο αρχικά έκανε διαμόρφωση του σήματος στην ελεύθερη συχνότητα ISM band (Industrial, Scientific and Medical Band) των 2.4 GHz και έπειτα στην περιοχή των 5.8 GHz. Το πρωτόκολλο 802.11 υπήρξε το θεμέλιο για την ευρεία εξάπλωση των ασύρματων δικτύων, καθώς η προτυποποίηση έδινε τη δυνατότητα διαλειτουργικότητας στις συσκευές που το υλοποιούσαν. Ωστόσο, οι ταχύτητες των 1Mbps και 2Mbps που υποστήριζε ήταν πολύ μικρές για τα 10Mbps αρχικά και τώρα 100Mbps που δίνει το ενσύρματο Ethernet. Πολύ γρήγορα, λοιπόν, εμφανίστηκαν παραλλαγές (variations) του 802.11 που αύξησαν την ταχύτητά του και διόρθωσαν διάφορα προβλήματα που εμφανίστηκαν.

Το 802.11b είναι το πλέον διαδεδομένο πρωτόκολλο ασύρματων δικτύων που υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης έως 11Mbps και το 802.11g μέχρι 54Mbps. Τα σύγχρονα access points έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίζουν τη λειτουργία είτε του 802.11b είτε του 802.11g ξεχωριστά είτε σε mixed μορφή, όπου το access point επιλέγει το πρωτόκολλο που θα υποστηρίξει ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου και τις διαθέσιμες κάρτες των τερματικών.

Στην Εικόνα 31, φαίνεται ότι όλα τα κανάλια χρησιμοποιούν φάσμα που αντιστοιχεί και στα γειτονικά τους κανάλια εκτός του 1^{ου} (2412 MHz), του 6^{ου} (2437 MHz) και του 11^{ου} (MHz) όπου το φάσμα τους έχει οριστεί να λειτουργεί χωρίς επικάλυψη.



Εικόνα 31: Τα κανάλια λειτουργίας του Wi-Fi 802.11b/g

5.2 Παραλλαγές του Πρωτοκόλλου 802.11

Οι παραλλαγές του 802.11 εμφανίζονται με ένα λατινικό γράμμα το οποίο προέρχεται από την ομάδα εργασίας (task group) που έκανε την αναθεώρηση του πρωτοκόλλου.

5.2.1 Το Πρωτόκολλο 802.11a

Το πρωτόκολλο 802.11a αποτελεί ένα πρωτόκολλο για το φυσικό επίπεδο ενός ασύρματου δικτύου και καθορίζει τη λειτουργία του δικτύου στη ζώνη UNII των 5 GHz. Υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης από 6 έως και 54 Mbps και χρησιμοποιείται πολυπλεξία ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Εξαιτίας της λειτουργίας του στη ζώνη UNII παρουσιάζει λιγότερες παρεμβολές από τη ζώνη ISM και εξαιτίας του υψηλού ρυθμού μετάδοσης προσφέρει πολύ καλύτερες επιδόσεις τόσο από το κλασικό πρωτόκολλο 802.11 όσο και από το 802.11b, που είναι νεότερο και ευρύτερα εξαπλωμένο.

5.2.2 Το Πρωτόκολλο 802.11b

Το πρωτόκολλο 802.11b κατασκευάστηκε με στόχο να υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 5.5Mbps και 10Mbps και αυτό επιτεύχθηκε με την τροποποίηση του τρόπου διαμόρφωσης του σήματος. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε η διαμόρφωση CCK (Complementary Code Keying) για να την επίτευξη των νέων ρυθμών, ενώ για να διατηρηθεί η συμβατότητα με το 802.11 με τους ρυθμούς 1Mbps και 2Mbps, χρησιμοποιήθηκε η διαμόρφωση DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) και DQPSK ((Differential Quadrature phase-shift keying) αντίστοιχα.

5.2.3 Το Πρωτόκολλο 802.11c

Το πρωτόκολλο αυτό παρέχει πληροφορίες για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας των γεφυρών-bridges και χρησιμοποιούνται κυρίως από τους κατασκευαστές των σημείων πρόσβασης για να εξασφαλίσουν τη διαλειτουργικότητά τους με συσκευές άλλων κατασκευαστών.

5.2.4 Το Πρωτόκολλο 802.11e

Το πρωτόκολλο 802.11e είναι ένα συμπληρωματικό πρωτόκολλο για το επίπεδο πολλαπλής πρόσβασης του 802.11, το οποίο παρέχει βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS). Στοχεύει σε μια από τις βασικές αδυναμίες του κλασσικού 802.11 πρωτοκόλλου, δηλαδή στην έλλειψη δυνατότητας παροχής διαφοροποιημένης μεταχείρισης σε διαφορετικές κατηγορίες κίνησης.

5.2.5 Το Πρωτόκολλο 802.11f

Το πρωτόκολλο 802.11f παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες στα σημεία πρόσβασης για να γίνει περιαγωγή με επιτυχία και να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος

5.2.6 Το Πρωτόκολλο 802.11g

Το πρωτόκολλο αυτό έχει στόχο να προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 54 Mbps, όπως και το 802.11a, αλλά να διατηρήσει και τη συμβατότητά του με το διαδομένο 802.11b. Το 802.11g λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων ISM, όπως και το 802.11b, αλλά χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM, όπως το 802.11a για να πετύχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και λόγω συμβατότητας με το 802.11b υποστηρίζεται και η διαμόρφωση CCK.

5.2.7 Το Πρωτόκολλο 802.11h

Το πρωτόκολλο αυτό είναι συμπληρωματικό του υπο-επιπέδου MAC και συμμορφώνεται με τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς για τη χρήση της ζώνης συχνοτήτων στα 5GHz. Συγκεκριμένα οι ευρωπαϊκοί κανονισμοί απαιτούν για τις συσκευές που λειτουργούν σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων να έχουν δυνατότητες ελέγχου εκπεμπόμενης ισχύος (Transmission Power Control) και δυναμικής επιλογής συχνότητας (Dynamic Frequency Selection) για τον καλύτερο έλεγχο των συγκρούσεων.

5.2.8 Το Πρωτόκολλο 802.11i

Το πρωτόκολλο 802.11i είναι ένα συμπληρωματικό πρότυπο για τη βελτίωση της ασφάλειας του συστήματος. Παρέχει έναν εναλλακτικό μηχανισμό του κλασσικού Wired Equivalent Privacy - WEP με καινούριες μεθόδους κρυπτογράφησης και πιστοποίησης.

Κεφάλαιο 5

5.2.9 Το Πρωτόκολλο 802.11n

Το πρωτόκολλο 802.11n είναι το νεότερο πρότυπο της IEEE, το οποίο επικυρώθηκε τον Αύγουστο του 2009, και αναπτύχθηκε για τη λειτουργία πιο γρήγορου LAN. Το πρωτόκολλο αυτό είναι ικανό να μεταδίδει δεδομένα με ταχύτητες της τάξης των 300Mbps. Έτσι, το πρότυπο 802.11n προσφέρει πολύ υψηλότερες ταχύτητες από το προηγούμενως επικυρωμένο 802.11g, το οποίο φτάνει τα 54Mbps και χρησιμοποιεί εύρος ζώνης των 40 MHz. Ακόμη, το πρωτόκολλο αυτό μπορεί να λειτουργήσει τόσο στην περιοχή των 5 GHz όσο και των 2.4 GHz.

5.2.10 Το Πρωτόκολλο 802.11y

Το πρωτόκολλο IEEE 802.11y προσθέτει τρεις νέες έννοιες στο πρωτόκολλο 802.11:

- Υποστηρίζει το Πρωτόκολλο Βασισμένο στο Συναγωνισμό (Contention-Based Protocol - CBP), μέσω του οποίου επιτυγχάνονται αυξήσεις στους μηχανισμούς αντίληψης μεταφορέων και ενεργειακής ανίχνευσης του προτύπου 802.11 προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις της FCC (Federal Communications Commission) για το CBP.

- Έχει Εκτεταμένη Ανακοίνωση Εναλλαγής Καναλιών (Extended Channel Switch Announcement - ECSA) και παρέχει έναν μηχανισμό για ένα σημείο πρόσβασης, έτσι ώστε αυτό να δηλώνει τους σταθμούς που συνδέονται με βάση την πρόθεσή του να αλλάζει τα κανάλια ή να αλλάζει το εύρος ζώνης των καναλιών. Αυτός ο μηχανισμός θα επιτρέψει στα ασύρματα τοπικά δίκτυα να επιλέγουν συνεχώς το κανάλι που είναι το ελάχιστο θορυβώδες και το λιγότερο πιθανότερο να προκαλέσει την παρεμβολή. Αυτός ο μηχανισμός θα χρησιμοποιηθεί επίσης στο 802.11n, το οποίο θα επιτρέπει στις συσκευές να εναλλάσσονται μεταξύ της λειτουργίας 11y και 11n στις ζώνες των 2.4 και 5 GHz.

- Παρέχει Εξαρτώμενη Ενδυνάμωση Σταθμών (Dependent Station Enablement - DSE) και είναι ο μηχανισμός από τον οποίο ένας χειριστής επεκτείνει και αποσύρει την άδεια από συσκευές, γνωστό ως εξαρτώμενο STAs, να χρησιμοποιήσουν το εξουσιοδοτημένο ραδιοφάσμα. Αυτή η διαδικασία ικανοποιεί πλήρως μια ρυθμιστική απαίτηση που υπαγορεύει ότι μια εξαρτώμενη λειτουργία STAs εξαρτάται από τη δυνατότητά της να λάβει τα περιοδικά μηνύματα από έναν σταθμό βάσεων κατόχων άδειας, αλλά το DSE είναι ιδανικό σε άλλους σκοπούς όσον αφορά τη διαχείριση και το συντονισμό.

5.3 Το Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer) του 802.11

Το φυσικό στρώμα του 802.11 αποτελείται από δύο υποστρώματα και μια οντότητα διαχείρισης επιπέδου τα οποία προσφέρουν στο υπο-επίπεδο MAC τις λειτουργίες ανίχνευσης φέροντος, μετάδοσης και λήψης:

- * PLCP (Physical Layer Convergence Procedure), που επικοινωνεί με το υπόστρωμα MAC μέσω στοιχείων υπηρεσίας (service primitives) με τη βοήθεια των SAPs (Service Access Points) του φυσικού στρώματος. Το PLCP ετοιμάζει τα MPDUs για μετάδοση όταν το υπόστρωμα MAC δώσει εντολή και ακόμη προσαρτά πεδία στο MPDU που περιέχουν πληροφορίες που

χρειάζονται οι πομποί και οι δέκτες του φυσικού στρώματος. Το 802.11 αναφέρεται σε αυτό το σύνθετο πλαίσιο ως PPDU (PLCP Protocol Data Unit). Η δομή του PPDU πλαισίου παρέχεται για ασύγχρονη μεταφορά των MPDUs μεταξύ των σταθμών.

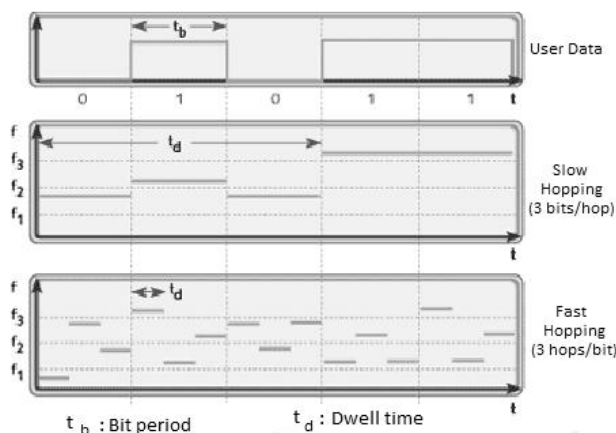
* PMD (Physical Medium Dependent), το οποίο κάτω από την καθοδήγηση του PLCP, παρέχει την ουσιαστική μετάδοση και λήψη των οντοτήτων του φυσικού στρώματος μέσω του ασύρματου μέσου. Για την παροχή αυτής της υπηρεσίας, το PMD διασυνδέεται άμεσα με το ασύρματο μέσο, δηλαδή τον αέρα, και παρέχει διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των πλαισίων που μεταδίδονται. Τα PLCP και PMD επικοινωνούν μέσω των primitives για τον έλεγχο των λειτουργιών μετάδοσης και λήψης.

* PLM (Physical Layer Management), η οντότητα αυτή λειτουργεί σε συνεργασία με το υπόστρωμα διαχείρισης MAC και εκτελεί λειτουργίες διαχείρισης για το φυσικό στρώμα.

Το πρότυπο 802.11 στο φυσικό επίπεδο, πλην του 802.11a που κινείται στα 5 GHz, λειτουργεί στην περιοχή των 2.4 GHz και οι τεχνικές αξιοποίησης του φάσματος που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις συχνότητες είναι:

- Εξάπλωση Φάσματος με Συνεχή Αλλαγή Συχνότητας FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)

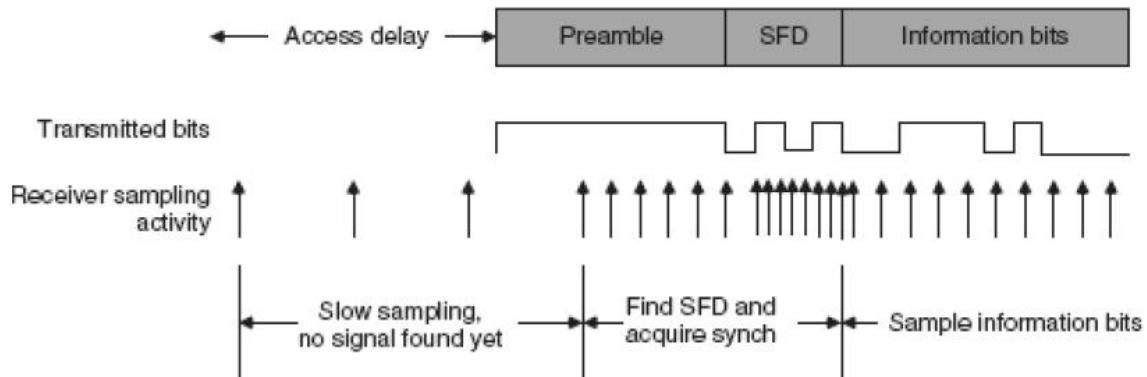
Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί 79 κανάλια με εύρος 1 MHz ξεκινώντας από το κάτω όριο της περιοχής των 2.4 GHz. Υπάρχει μια γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών, που παράγει την ακολουθία συχνοτήτων, στις οποίες μεταβαίνουν διαδοχικά οι σταθμοί. Όταν οι σταθμοί χρησιμοποιούν το ίδιο φύτρο (seed) στη γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών και παραμένουν χρονικά συγχρονισμένοι, τότε θα εκτελούν ταυτόχρονα τη μετάβαση στις ίδιες συχνότητες. Ο χρόνος παραμονής (dwell time) στην ίδια συχνότητα είναι μια ρυθμιζόμενη παράμετρος με τιμή μικρότερη των 400 msec. Η τυχαία ακολουθία αυτής της τεχνικής παρέχει ένα δίκαιο τρόπο εκχώρησης του φάσματος στη ζώνη ISM και ελαχιστοποιεί την πιθανότητα ταυτόχρονης μετάδοσης δεδομένων στο κανάλι την ίδια χρονική στιγμή, αφού κάθε επικοινωνία μεταξύ τερματικού και access point γίνεται με μια διαφορετική ακολουθία αλλαγής καναλιών. Ακόμη, η τεχνική FHSS παρέχει ασφάλεια καθώς ο εισβολέας δε γνωρίζει την ακολουθία συχνοτήτων ή το χρόνο παραμονής και συνεπώς δε θα μπορεί να υποκλέψει τις μεταδόσεις και είναι ανθεκτική στις ραδιοκυματικές παρεμβολές. Βέβαια, μειονέκτημα της τεχνικής FHSS είναι ότι δεν μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς μετάδοσης άνω των 2 Mbps εξαιτίας του μικρού εύρους των καναλιών.



Εικόνα 32: Η χρονική αναπαράσταση της FHSSS

Κεφάλαιο 5

Η δημιουργία της ακολουθίας των bits που μεταδίδει ένας πομποδέκτης βασίζεται στη χρήση του εσωτερικού ταλαντωτή του και τις περισσότερες φορές λόγω των αποκλίσεων της ονομαστικής συχνότητας των ταλαντωτών, δημιουργείται σφάλμα στο συγχρονισμό πομπού και δέκτη (drift) και η αποκωδικοποίηση των ληφθέντων bits αποτυγχάνει. Εξαιτίας αυτού λοιπόν, σε κάθε μεταδιδόμενο πακέτο-πλαίσιο προστίθεται μια ακολουθία εκπαίδευσης (training sequence), η οποία επιτρέπει στο δέκτη να αναγνωρίσει τις παραμέτρους μετάδοσης του πομπού και να συγχρονιστεί η βάση με αυτές. Η ακολουθία συνήθως τοποθετείται στην αρχή του πλαισίου (preamble), αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις που τοποθετείται στη μέση (midamble).

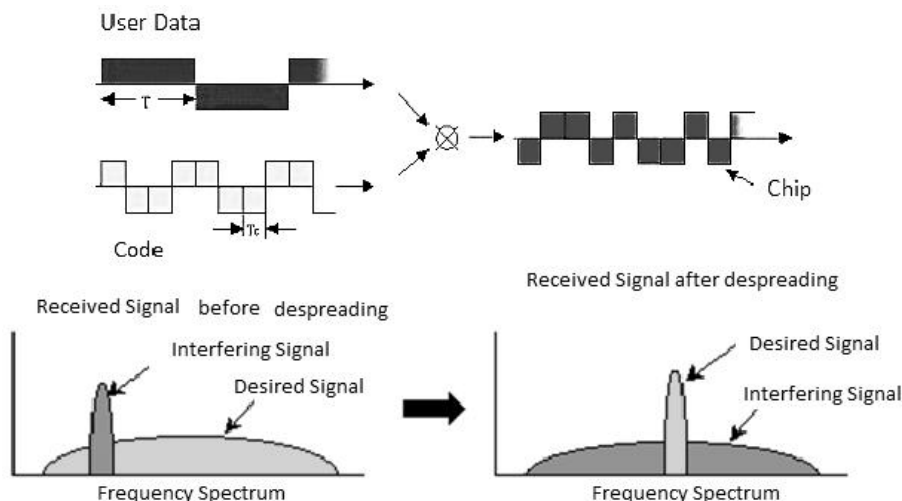


Εικόνα 33: Δειγματοληψία του καναλιού και συγχρονισμός με τη βοήθεια της preamble ακολουθίας

- Εξάπλωση Φάσματος Άμεσης Ακολουθίας DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Η τεχνική αυτή διαιρεί το φάσμα σε 14 κανάλια των 22 MHz χωρίς να γίνεται μεταπήδηση συχνότητας και τα 11 από τα 14 κανάλια δεν είναι εντελώς «ανεξάρτητα» μεταξύ τους, αφού ένα κομμάτι των κύριων λοβών τους επικαλύπτεται με τα γειτονικά, ενώ υπάρχουν και τρία από τα 14 που ορίζονται με στόχο να λειτουργούν χωρίς παρεμβολές από γειτονικά κανάλια. Στην τεχνική DSSS, η βασική ιδέα είναι ότι το μεταδιδόμενο σήμα κωδικοποιείται κατά φάση με ψευδο-τυχαία τμήματα «τεχνητού θορύβου», τα οποία ονομάζονται chips. Δηλαδή, κάθε μεταδιδόμενο bit δεδομένων πολλαπλασιάζεται με αυτό το σήμα του τεχνητού θορύβου, το οποίο είναι εναλλαγή των τιμών -1 και 1, σε συχνότητα πολύ μεγαλύτερη του αρχικού σήματος. Ο όρος bit χρησιμοποιείται για τα στοιχεία του συρμού που μεταφέρει την πληροφορία. Με αυτό τον τρόπο η ενέργεια της μετάδοσης εξαπλώνεται σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Η ακολουθία των σημάτων του ψευδο-θορύβου είναι εκ των προτέρων γνωστή τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη. Συνεπώς, ο δέκτης, αφού γνωρίζει την ακολουθία του τεχνητού θορύβου μπορεί να αποκωδικοποιήσει το σήμα και να ανακτήσει την αρχική πληροφορία. Η τεχνική αυτή παρουσιάζει αρκετά κοινά στοιχεία με την πιο γνωστή τεχνική των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας CDMA.

Η DSSS αυξάνει τον αριθμό των bits του σήματος που πρόκειται να σταλεί σε μεγάλο βαθμό με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτερο εύρος ζώνης και χωρητικότητα του καναλιού. Βέβαια, το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η δυνατότητα του δέκτη να ανακτήσει τη χαμένη ακολουθία από bits σε περίπτωση αλλοίωσής τους κατά την αποστολή, με μεθόδους στατιστικής και αποφεύγοντας την περίπτωση της αναμετάδοσης, η οποία θα μείωνε την ταχύτητα επικοινωνίας.

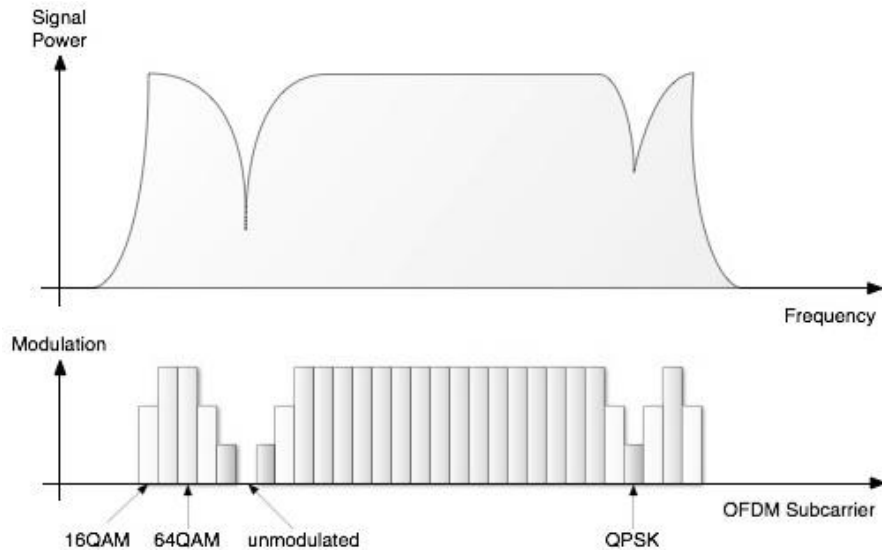


Εικόνα 34: Η χρονική αναπαράσταση και το φάσμα ενός σήματος πριν και μετά την DSSS

- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Η Ορθογώνια Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) χρησιμοποιείται από ασύρματα δίκτυα που παρουσιάζουν υψηλές ταχύτητες και για το λόγο αυτό αποτελεί και τεχνική του 802.11 για να πετύχει ταχύτητα μετάδοσης μέχρι και 54Mbps στην ευρύτερη ζώνη των 5.4 GHz. Όπως δείχνει ο όρος FDM χρησιμοποιούνται διαφορετικές συχνότητες, 52 συχνότητες, 48 για δεδομένα και 4 για συγχρονισμό. Η τεχνική OFDM, όπως και η DSSS, διαιρεί το φάσμα το σε 14 κανάλια των 22 MHz και μεταδίδει τη συνολική ροή δεδομένων μέσω ενός αριθμού υπο-καναλιών, που το καθένα έχει χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Επιτρέπει την αποστολή πακέτων-δεδομένων όχι σειριακά στο χρόνο αλλά παράλληλα. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αποσταλούν πολλά πακέτα ταυτόχρονα σε ένα σταθερό χρονικό διάστημα. Παράλληλα, αν επιθυμούμε την αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης, αρκεί να αυξήσουμε τον αριθμό των πακέτων που μεταδίδονται ταυτόχρονα. Επειδή γίνονται ταυτόχρονες μεταδόσεις σε πολλαπλές συχνότητες η τεχνική αυτή θεωρείται μορφή εξάπλωσης φάσματος διαφορετική όμως τόσο από την CDMA όσο και από την FHSS.

Η διαίρεση του φάσματος σε πολλές στενές ζώνες έχει κάποια βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη χρήση μίας μόνο ευρείας ζώνης, στα οποία περιλαμβάνεται η καλύτερη ανοχή σε παρεμβολές στενής ζώνης και η δυνατότητα χρήσης μη συνεχόμενων ζωνών. Χρησιμοποιείται ένα περίπλοκο σύστημα κωδικοποίησης, το οποίο βασίζεται σε διαμόρφωση μετατόπισης φάσης για ταχύτητες μέχρι 18 Mbps και σε διαμόρφωση πλάτους με ορθογωνισμό (Quadrature Amplitude Modulation – QAM) για τις μεγαλύτερες ταχύτητες. Στα 56 Mbps κωδικοποιούνται 216 bits δεδομένων σε σύμβολα των 288 bits. Η τεχνική αυτή έχει καλή αποδοτικότητα σφάλματος από πλευράς Bit/Hz και καλή αντοχή στην εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών.



Εικόνα 35: Η φασματική αναπαράσταση της τεχνικής OFDM

5.4 Το Υπο-επίπεδο Ελέγχου Προσπέλασης στο Μέσο Μετάδοσης (MAC-Mac Access Control) του 802.11

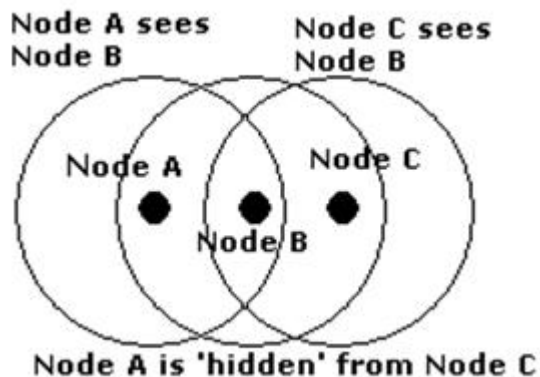
Το υπο-επίπεδο MAC του 802.11, το οποίο είναι κοινό για τα 802.11b και 802.11g, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να υποστηρίξει πολλούς χρήστες σε ένα κανάλι συχνοτήτων, παρέχοντας τη δυνατότητα στον αποστολέα να μπορεί να «αφουγκραστεί» το κανάλι πριν το καταλάβει, επειδή η ανίχνευση των συγκρούσεων από τα τερματικά προϋποθέτει ο αποστολέας να ακούει ταυτόχρονα το κανάλι, κάτι που είναι αδύνατο στα ασύρματα δίκτυα. Στα δίκτυα Ethernet, χρησιμοποιείται η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection), όπου τα τερματικά διαχειρίζονται την πρόσβαση στο μέσο μέσω της ανίχνευσης των συγκρούσεων που πραγματοποιούνται. Συνεπώς, στο πρωτόκολλο 802.11 χρησιμοποιείται, όπως και στο 802.15.4, ο μηχανισμός αποφυγής των συγκρούσεων CSMA/CA.

Η τεχνική αυτή ανιχνεύει φέροντα κύματα δίνοντας έτσι τη δυνατότητα μετάδοσης με την αποφυγή συγκρούσεων. Ο μηχανισμός ανίχνευσης φέροντος ορίζει συγκεκριμένους χρόνους αναμονής, οι οποίοι ονομάζονται interframe spacing (IFS), και αν κατά τη διάρκεια τους δεν ανιχνευθεί ανταγωνιστικό σήμα, θα καταληφθεί το κανάλι και θα αρχίσει η μετάδοση του πακέτου. Για τους χρόνους αναμονής – interframe spacing υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι, ο SIFS (Short IFS), DIFS-DCF (Distributed Coordination Function) IFS, EIFS (Extended IFS) και PIFS-PCF (Point Coordination Function) IFS, και ανάλογα με τις παραμέτρους του δικτύου επιλέγεται ο αντίστοιχος χρόνος αναμονής. Για παράδειγμα, ως επί το πλείστον, οι μικρότεροι διάρκειας χρόνοι αναμονής χρησιμοποιούνται στις μεταδόσεις που έχουν προτεραιότητα ή για να διασφαλίσουν ότι οι επαληθεύσεις – ACKS θα μεταδοθούν πριν τη μετάδοση ενός επόμενου πακέτου. Αν δεν ληφθεί ACK τότε έχει αποτύχει η αποστολή του πακέτου.

Το στρώμα MAC του 802.11 έχει ως βασική λειτουργία να διατηρεί τη σειρά στο ασύρματο μέσο μετάδοσης. Τόσο η διανεμημένη λειτουργία συντονισμού DCF, η οποία βασίζεται στη μέθοδο CSMA/CA, όσο και η λειτουργία του σημείου συντονισμού PCF χρησιμοποιούνται από το υπο-επίπεδο MAC για να ελέγχει την πρόσβαση των σταθμών στο ασύρματο μέσο. Ακόμη κι αν η DCF μπορεί να συνυπάρξει σε ένα δίκτυο με τη PCF, η DCF είναι περισσότερη χρησιμοποιούμενη σε εφαρμοσμένα δίκτυα.

Η θεμελιώδης μέθοδος του μέσου πρόσβασης του DCF είναι η πολλαπλή πρόσβαση με αποφυγή σύγκρουσης CA (Collision Avoidance) ή με τη χρήση CSMA/CA, όπου στόχος του CSMA/CA είναι η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας δύο ή περισσότεροι σταθμοί να έχουν πρόσβαση στο ασύρματο μέσο την ίδια χρονική στιγμή. Το CSMA απαιτεί μερικούς μηχανισμούς για να εντοπίσει εάν το μέσο είναι απασχολημένο και μία σειρά πρωτοκόλλων για να προγραμματίσει την πρόσβαση σε αυτό. Το DCF έχει δύο τρόπους για την ανίχνευση της κατάστασης του μέσου, τη φυσική και την εικονική λειτουργία.

Ένα συχνό πρόβλημα των ασύρματων επικοινωνιών είναι αυτό του «κρυμμένου» τερματικού, όπου δύο τερματικά σε αντίθετη κατεύθυνση μεταξύ τους μπορούν να «ακούσουν» ένα τρίτο τερματικό, όπως ένα access point, αλλά είναι τόσο μακριά που η μεταξύ τους επικοινωνία είναι ανέφικτη. Έτσι, θα συμβαίνουν συγκρούσεις μεταξύ των πακέτων που αποστέλλονται στο τρίτο τερματικό στο βαθμό που το CSMA/CA είναι αδύνατο να ανιχνεύσει το φάσμα των τερματικών που βρίσκονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η επίλυση αυτού του προβλήματος γίνεται με την εφαρμογή εικονικής λειτουργίας του CSMA/CA.

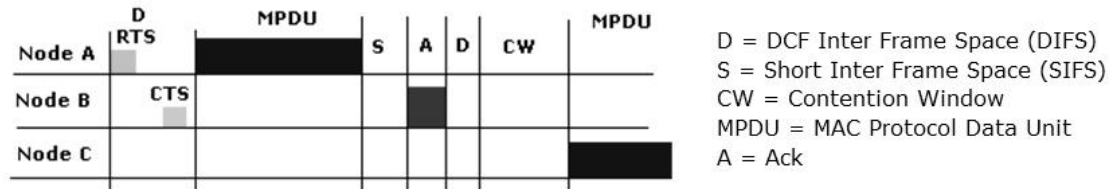


Εικόνα 36: Το πρόβλημα του «κρυμμένου» τερματικού για το Wi-Fi

Ένας μηχανισμός της εικονικής λειτουργίας είναι η χρήση του πεδίου διάρκειας/αναγνωριστικού που ενσωματώνεται σε κάθε πλαίσιο δεδομένων παρέχοντας έτσι πληροφορίες για το χρόνο και το σταθμό που απασχολεί το μέσο. Άλλος μηχανισμός της εικονικής λειτουργίας είναι η χρήση εικονικού καναλιού, ο οποίος αποτελεί και τον πιο συνηθισμένο για αντιμετώπιση του προβλήματος του «κρυμμένου» τερματικού. Ο μηχανισμός αυτός χρησιμοποιεί δύο μικρά πλαίσια ελέγχου (frames), το RTS (Ready To Send) και το CTS (Clear To Send). Το RTS πακέτο στέλνεται από το σταθμό που θέλει να εκπέμψει στον παραλήπτη ζητώντας του έτσι την άδεια να καταλάβει το κανάλι και ο παραλήπτης αν είναι διαθέσιμος απαντά με το πλαίσιο CTS, το οποίο μόλις ο αποστολέας του RTS το λάβει έχει τη δυνατότητα να αρχίσει την εκπομπή των δεδομένων του, ενεργοποιώντας ταυτόχρονα ένα

Κεφάλαιο 5

χρονόμετρο επιβεβαίωσης, χωρίς πιθανότητα σύγκρουσης καθώς οι υπόλοιποι κόμβοι, που άκουσαν το RTS ή το CTS, είναι ενήμεροι ότι το κανάλι είναι απασχολημένο και εισέρχονται σε κατάσταση αναμονής για κατάλληλο χρονικό διάστημα (Network Allocation Vector-NAV), το οποίο υπολογίζεται από τις πληροφορίες που μεταφέρουν τα πλαίσια ελέγχου. Με τη λήξη του διαστήματος αυτού, οι κόμβοι που έχουν πλαίσια για αποστολή ακολουθούν την ίδια διαδικασία για να καταλάβουν το κανάλι αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ώστε να μειωθεί η πιθανότητα σύγκρουσης. Βέβαια, αν παρά ταύτα υπάρξει σύγκρουση μεταξύ δύο σταθμών, τίθενται σε κατάσταση αναμονής, περιμένοντας ένα τυχαίο χρονικό διάστημα, και προσπαθούν ξανά.



Εικόνα 37: Χρήση των πλαισίων RTS και CTS στο CSMA/CA

Η ενεργοποίηση της λειτουργίας PCF γίνεται αυτόματα για συγκεκριμένα διαστήματα όταν το access point, το θεωρεί αναγκαίο ώστε να αποφευχθούν συγκρούσεις για κάποιο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, το access point, στην αρχή κάθε τέτοιου διαστήματος, χωρίς ανταγωνισμό στέλνει ένα πλαίσιο συγχρονισμού (beacon) σε όλους τους κόμβους και έπειτα κάνει διαμερισμό του χρόνου σε θυρίδες και αναθέτει σε κάθε σταθμό μία θυρίδα κατά την οποία μόνο αυτός ο σταθμός μπορεί να εκπέμψει ή να λάβει δεδομένα. Η έναρξη κάθε θυρίδας σηματοδοτείται από την αποστολή ενός πλαισίου Poll από το access point στον κόμβο που ανήκει η τρέχουσα θυρίδα. Η μετάδοση των πλαισίων από τον έναν κόμβο στον άλλο γίνεται είτε με απευθείας μετάδοση από τον έναν κόμβο στον άλλον κατά τη θυρίδα του πρώτου είτε από τον πρώτο στο access point κατά τη θυρίδα αυτού και μετά από το access point στον άλλο κόμβο κατά τη θυρίδα αυτού του κόμβου.

Το υπο-επίπεδο MAC του 802.11 προσφέρει δύο ακόμη λειτουργίες, το άθροισμα ελέγχου CRC και το θρυμματισμό πακέτων. Το άθροισμα ελέγχου CRC, το οποίο υπολογίζεται και προστίθεται σε κάθε πακέτο, έχει ως στόχο να ελέγχει αν έχει δημιουργηθεί καταστροφή των δεδομένων κατά τη διάρκεια της μετάδοσής τους ενώ τα θραύσματα των πακέτων δίνουν τη δυνατότητα να κατακερματίζονται τα πακέτα σε μικρότερα όταν στέλνονται στο φυσικό επίπεδο και έτσι να αποφεύγονται οι καταστροφές των μεγάλων πακέτων που είναι πιο έντονες σε περιβάλλοντα περισσότερο θορυβώδη.

5.5 Η Δομή των Πακέτων του 802.11

Η βασική δομή των πακέτων στο υπο-επίπεδο MAC περιλαμβάνει μέχρι τέσσερα πεδία MAC διευθύνσεων αφού σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητο να μπορεί ο πομπός ή ο δέκτης να αναγνωρίζει την διεύθυνση του access point. Για παράδειγμα, η χρήση τεσσάρων

συνολικά διευθύνσεων χρησιμοποιείται όταν δύο χρήστες ενός WLAN ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους και είναι συνδεδεμένοι σε διαφορετικά access points. Ακόμη, στο πεδίο sequence control στα τέσσερα πρώτα bits υπάρχουν αναγνωριστικά, τα οποία υποδηλώνουν στοιχεία για τα θραύσματα των πακέτων.

Όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που σχετίζονται με τον τύπο του πακέτου που μεταδίδεται περιέχονται στο πεδίο Frame Control. Βέβαια, τα πεδία διευθύνσεων μεταβάλλονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πακέτου που θέλουμε να μεταδώσουμε. Πριν από το υπο-επίπεδο MAC αποστέλλονται οι πληροφορίες preamble και PLCP (Physical Layer Convergence Protocol), που αναφέρονται στο φυσικό επίπεδο, με μικρότερη ταχύτητα μετάδοσης καθώς αυτές πραγματοποιούν τον συγχρονισμό πομπού και δέκτη σε συγκεκριμένες ταχύτητες μετάδοσης και συγχρονισμού ανάλογα με τη μορφή της χρησιμοποιούμενης κωδικοποίησης.

Frame Control	Duration ID	Address1 (source)	Address2 (destination)	Address3 (rx node)	Sequence Control	Address4 (tx node)	Frame Data	Frame Check Sequence
2 bytes	2 bytes	6 bytes	6 bytes	6 bytes	2 bytes	6 bytes	0 to 2312 bytes	4 bytes

Εικόνα 38: Η δομή του πακέτου του υπο-επιπέδου MAC του 802.11

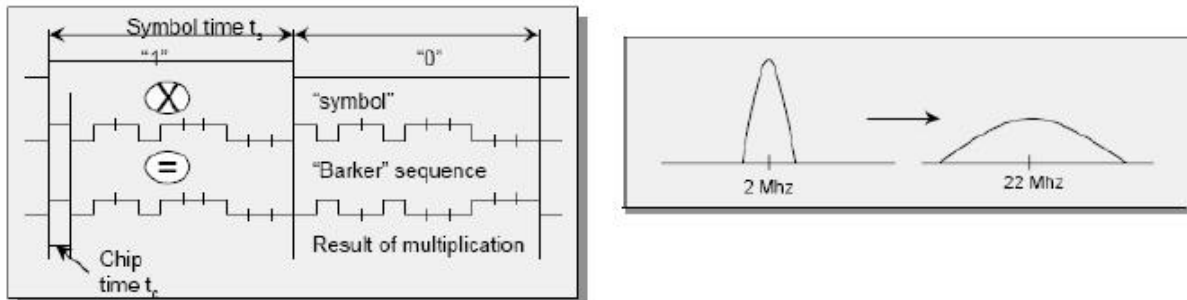
5.5.1 Η Δομή των Πακέτων του 802.11b

Το πρωτόκολλο 802.11b αναπτύχθηκε το 1999 και αποτελεί μια επέκταση του αρχικού προτύπου. Πιο συγκεκριμένα, υποστηρίζει επιπλέον μετάδοση σε ρυθμούς 5.5 και 11Mbps με κωδικοποίηση CCK (Complementary Code Keying). Μια δεύτερη κωδικοποίηση, PBCC (Packet Binary Convolutional Code) ορίστηκε για προαιρετική υλοποίηση υποστηρίζοντας μετάδοση 5.5 και 11Mbps και έχοντας ελαφρά καλύτερη ευαισθησία δέκτη με αντίτιμο την πολυπλοκότητα.

Η μετάδοση γίνεται στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz. Είναι το πιο δημοφιλές από όλα τα πρότυπα και το πρότυπο με τη μεγαλύτερη διαλειτουργικότητα αφού είναι ένα αποτελεσματικό και δοκιμασμένο πρότυπο. Οι προσθήκες της 802.11b σε σχέση με την 802.11 αφορούν μόνο τον τρόπο μετάδοσης αφού ο τρόπος πρόσβασης των συσκευών και οι τρόποι λειτουργίας παραμένουν οι ίδιοι. Μία συσκευή που εργάζεται ακολουθώντας το 802.11b, υλοποιεί και τους τρόπους μετάδοσης του 802.11 και έτσι είναι συμβατή με αυτό. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται συμβατότητα προς τα πίσω, δηλαδή ότι οι καινούργιες συσκευές θα μπορούν να συνεργαστούν και με παλιότερες, προκειμένου να μην αναγκαστεί ο καταναλωτής να αλλάξει εξ ολοκλήρου τον εξοπλισμό του.

Στο πρωτόκολλο 802.11b, ο τρόπος διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, ακολουθεί την ίδια τεχνική με αυτή του 802.15.4 αλλά σε πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης, στα 22 MHz αντί στα 2 MHz, για την αποφυγή των παρεμβολών και την καλύτερη και πιο αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος ώστε να επιτευχθούν μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης σε σχέση με την τεχνική FHSS, που δεν μπορεί να υπερβεί το όριο των 2Mbps χωρίς την παραβίαση των κανονισμών των πρωτοκόλλων.

Κεφάλαιο 5



Εικόνα 39: Διαμόρφωση του 802.11 με DSSS και κώδικα Barker

Στο πρωτόκολλο 802.11b, ανάλογα με τη μορφή μεταφοράς των πληροφοριών του φυσικού επιπέδου, υπάρχουν δύο τύποι πακέτων, τα πακέτα μεγάλου μήκους και τα πακέτα μικρού μήκους. Η διαφορά αυτή, έγκειται στη μορφή του πακέτου από το πεδίο preamble, το οποίο μπορεί να είναι long preamble ή short preamble αντιστοίχως. Τα bits του φυσικού επιπέδου και στους δύο τύπους πακέτων, μεταδίδονται με την τεχνική DSSS.

Phy preamble 9 bytes 1 Mbps	PLCP Header 6 bytes 2 Mbps	Mac layer(headers, payload, footers) 2,5.5 ή 11Mbps
Short data Packet Format		
Phy preamble 18bytes 1 Mbps	PLCP Header 6bytes 1, 2,5.5, 11Mbps	Mac layer(headers, payload, footers) 2,5.5 ή 11Mbps
Long data Packet Format		

Εικόνα 40: Δομές πακέτων του 802.11b

5.5.2 Η Δομή των Πακέτων του 802.11g

Τον Ιούνιο του 2003 επικυρώθηκε το 802.11g πρωτόκολλο, το οποίο συνιστά την πιο εξελιγμένη γενιά πρωτοκόλλου ενός ασύρματου δικτύου και αποτελεί επέκταση στο 802.11b ώστε να υποστηρίζει μεγαλύτερους ρυθμούς αλλά να λειτουργεί στο ίδιο εύρος ζώνης του 802.11b, των 22MHz. Ακόμη, ανάλογα με το θόρυβο του περιβάλλοντος είναι δυνατόν το πρωτόκολλο να επιλέξει νέα ταχύτητα λειτουργίας μεταξύ των 6, 9, 12, 18, 24, 46, 48 και 54Mbps. Βέβαια, έχει τη συμβατότητα με το 802.11b αφού μπορεί να υποστηρίζει και τις ταχύτητες των 1, 2, 5.5 και 11Mbps χρησιμοποιώντας την τεχνική DSSS και την κωδικοποίηση CCK αλλά χρησιμοποιώντας OFDM διαμόρφωση υποστηρίζει και τους ρυθμούς μέχρι 54Mbps.

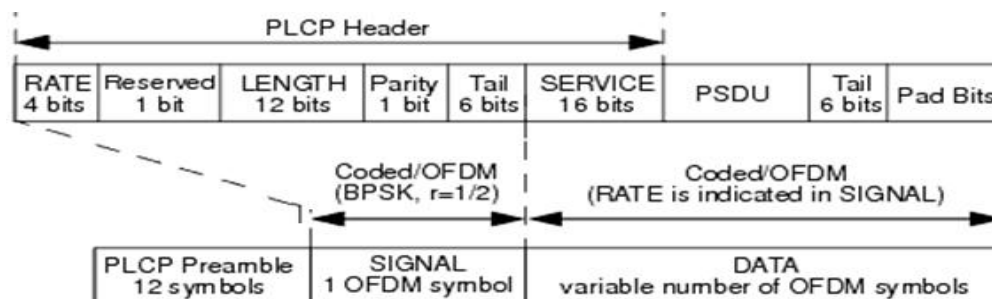
Η ανάγκη για αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης και διατήρηση του εύρους ζώνης στα 22 MHz σε συνδυασμό με την ανθεκτικότητα του συστήματος στη διασυμβολική παρεμβολή αποτέλεσαν το βασικό κίνητρο για την χρησιμοποίηση μιας νέας τεχνικής διαμόρφωσης της OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Η τεχνική αυτή είναι μια εξελιγμένη μορφή της τεχνικής FDM (Frequency Division Multiplexing). Στην FDM η πληροφορία μεταδίδεται ταυτόχρονα από περισσότερα από ένα φέροντα κύματα και τα φάσματα που προκύπτουν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους αλλά αυτή παρουσιάζει ορισμένες αδυναμίες, αφού τα φάσματά τους είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους

οριοθετώντας έτσι τους ρυθμούς μετάδοσης και οι φέρουσες κωδικοποιούν τον ίδιο αριθμό bits ανά φάση ανεξαρτήτως του θορύβου.

Η μετάδοση OFDM παρουσιάζεται τόσο σαν τεχνική διαμόρφωσης όσο και ως τεχνική πολυπλεξίας. Η διάδοση γίνεται μέσω πολλών «μονοπατιών», αφού η συνολική ροή δεδομένων μεταδίδεται μέσω πολλών υπο-καναλιών με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης, αυξάνοντας έτσι την ανθεκτικότητα απέναντι τόσο σε φαινόμενα εξασθένισης επιλεκτικής συχνότητας όσο και σε φαινόμενα παρεμβολής μεταξύ γειτονικών υπο-καναλιών μετάδοσης. Ωστόσο, η προσπάθεια για αποφυγή των φαινομένων παρεμβολής μεταξύ των υπο-καναλιών μετάδοσης συνεπάγεται την επιλογή μη επικαλυπτόμενων πεδίων φάσματος. Με αποτέλεσμα, η τεχνική αυτή να οδηγεί σε μη αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος και έτσι προτάθηκαν συστήματα που συνδυάζουν την παράλληλη ροή δεδομένων και την τεχνική FDM με επικαλυπτόμενα κανάλια μετάδοσης. Έτσι, είναι απαραίτητη η ορθογωνικότητα μεταξύ των φερόντων κυμάτων μετάδοσης για να μειωθεί η ανεπιθύμητη παρεμβολή μεταξύ των φορέων μετάδοσης, η οποία δημιουργείται από την πλήρη εκμετάλλευση των επικαλυπτομένων φερουσών.

Στο πρωτόκολλο 802.11g, τα bits του φυσικού επιπέδου μπορούν μεταδοθούν είτε με την τεχνική DSSS, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του 802.11b, είτε με την τεχνική OFDM είτε με συνδυασμό και των δύο αυτών τεχνικών. Η τεχνική DSSS υποστηρίζει και τους δύο τύπους πακέτων, long preamble και short preamble. Στην περίπτωση της OFDM, το πεδίο preamble μεταφέρει δοκιμαστικές ακολουθίες συμβόλων για το συγχρονισμό του δέκτη με τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου σήματος του πομπού και όχι bits για αποκωδικοποίηση, τα οποία αναλαμβάνει να μεταφέρει το πεδίο PLCP header.



Εικόνα 41: Μορφή πακέτου του 802.11g για OFDM

Στην υβριδική μορφή, που συνδυάζεται η τεχνική DSSS και OFDM, τα πεδία preamble και PLCP header μεταφέρονται σύμφωνα με τη DSSS και τα υπόλοιπα με την OFDM διαμόρφωση.

Preamble 72 bits 1Mbps (DSSS)	PLCP Header 48bits 2 Mbps (DSSS)	OFDM long sync -8μsec	OFDM signal-4μsec BPSK/(1/2)	OFDM data symbols 6, 9, 12, 18, 24, 46, 48, 54 Mbps
Short data Packet Format DSSS-OFDM				
Preamble 48bits 1Mbps (DSSS)	PLCP Header 48bits 1Mbps (DSSS)	OFDM long sync-8μsec	OFDM signal-4μsec BPSK/(1/2)	OFDM data symbols 6, 9, 12, 18, 24, 46, 48, 54 Mbps
Long data Packet Format DSSS-OFDM				

Εικόνα 42: Δομές πακέτων του 802.11g για DSSS-OFDM

Κεφάλαιο 6

Πλατφόρμες Ασύρματων Αισθητήρων

6.1 Γενικά

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χαρακτηρίζονται από τις δυνατότητες επεξεργασίας, αίσθησης και επικοινωνίας, και όλα αυτά σε μικροσκοπικές ενσωματωμένες συσκευές. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας συνδυάζουν κατάλληλα τις ανεξάρτητες συσκευές ώστε να δημιουργηθεί ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο, όπου τα δεδομένα δρομολογούνται σε όλους τους κόμβους.

Κάθε συσκευή του δικτύου αισθητήρων είναι σημαντικό να μπορεί να ικανοποιεί τις μεγάλες απαιτήσεις κάθε εφαρμογής και οι διαστάσεις της κυμαίνονται από μερικά χιλιοστά έως το μέγεθος ενός κινητού τηλεφώνου. Σε αντίθεση με τις συσκευές των κινητών τηλεφώνων και των ασύρματων φορητών υπολογιστών, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν είναι δυνατή η περιοδική τροφοδοσία τους.

6.2 Κατηγορίες Πλατφορμών

Τα συστήματα των WSNs είναι λογικό να απαιτούν μια ιεράρχηση κόμβων ανάλογα με τις δυνατότητες των εφαρμογών που εξυπηρετούν, η οποία να ξεκινάει από αισθητήρες χαμηλού επιπέδου και να συνεχίζει με μονάδες υψηλού επιπέδου. Σε κάθε επίπεδο ιεράρχησης είναι δυνατή η επεξεργασία και η διαχείριση διαφορετικού τύπου δεδομένων, τα οποία στη συνέχεια δρομολογούνται μαζί, μέσω ενός δικτύου, σε μια μονάδα ελέγχου και παρακολούθησης.

Η βαθμωτή αρχιτεκτονική είναι κοινή σχεδόν για όλα τα δίκτυα αισθητήρων και οι μονάδες-κόμβοι των δικτύων αισθητήρων ιεραρχικά διακρίνονται στις ακόλουθες πλατφόρμες:

- * Πλατφόρμες αισθητήρων ειδικού σκοπού (specialized sensing platforms) στο χαμηλότερο επίπεδο ιεράρχησης, οι οποίες σχεδιάζονται έτσι ώστε να θυσιάζουν την ευελιξία για να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες και σχετικά φτηνές. Έχουν μικροσκοπικές διαστάσεις και απαιτούν ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Η χρήση τους επικεντρώνεται κυρίως στην παρακολούθηση κινητών αντικειμένων, όπως για παράδειγμα την ενεργοποίηση του συναγερμού όταν ένα

Κεφάλαιο 6

αντικείμενο απομακρυνθεί.

* Πλατφόρμες αισθητήρων γενικού σκοπού (Generic sensing platforms) στο αμέσως επόμενο επίπεδο, που παρέχουν διεπαφές (interfaces) με μεγάλες δυνατότητες επέκτασης ώστε να δημιουργούν ευέλικτες συνδέσεις με μια σειρά από απλούς αισθητήρες. Η πολυπλοκότητα των δεδομένων είναι απλή και οι ρυθμοί επεξεργασίας και επικοινωνίας είναι οι ελάχιστοι ενώ είναι απαραίτητη η τροφοδοσία από μπαταρία μεγάλης διάρκειας.

* Πλατφόρμες αισθητήρων μεγάλου εύρους ζώνης (High – Bandwidth sensing platforms) ακολουθούν ακριβώς πριν την κορυφή της πυραμίδας, οι οποίες έχουν ενσωματωμένες τις δυνατότητες επεξεργασίας και επικοινωνίας, που είναι απαραίτητες για να ανταποκρίνονται σε πολύπλοκες ακολουθίες δεδομένων, συμπεριλαμβάνοντας την επεξεργασία κινούμενης εικόνας και ήχου. Η τροφοδοτήσή τους μπορεί να γίνει από μπαταρία αλλά η λειτουργία τους σε μεγάλη διάρκεια απαιτεί τη σύνδεσή τους με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής τάσης.

* Πύλες (Gateway nodes) στην κορυφή της ιεραρχίας, όπου οι μονάδες αυτές παρέχουν μια σημαντική σύνδεση μεταξύ του δικτύου αισθητήρων και των παραδοσιακών δικτύων, όπως το Ethernet και τα διευρυμένα δίκτυα. Η σύνδεση αυτή γίνεται μέσω των διεπαφών (interfaces), που παρέχουν οι συσκευές αυτές και αποτελούν τα τελικά σημεία των WSNs. Για την επεξεργασία και την αποθήκευση των ενδείξεων ανεξάρτητων αισθητήρων περιλαμβάνεται μια βάση δεδομένων ή κάποιο άλλο λογισμικό συλλογής δεδομένων.

Στον Πίνακα 1, παρατίθενται τα τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των τεσσάρων κατηγοριών των μονάδων – κόμβων:

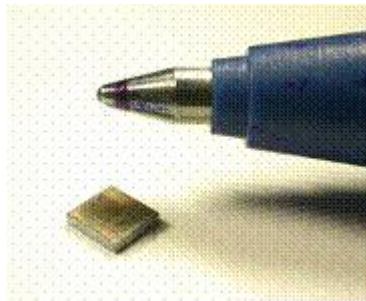
Node Type	Sample «Name» and Size	Typical Application Sensors	Radio Bandwidth (Kbps)	MIPS Flash RAM	Typical Active Energy (mW)	Typical Sleep Energy (uW)	Typical Duty Cycle (%)
Specialized sensing platform	Spec mm ³	Specialized low-bandwidth sensor or advanced RF tag	<50 Kbps	<5 <0.1Mb <4Kb	1.8v*10 – 15mA	1.8V*1uA	0.1- 0.5%
Generic sensing platform	Mote 1-10cm ³	General-purpose sensing and communications relay	<100 Kbps	<10 <0.5Mb < 10Kb	3V*10– 15mA	3V*10uA	1 – 2%
High-bandwidth sensing	Imote 1-10cm ³	High-bandwidth sensing (video, acoustic and vibration)	~500 Kbps	< 50 <10Mb < 128Kb	3V*60mA	3V*100uA	5– 10%
Gateway	Stargate >10cm ³	High-bandwidth sensing and communications aggregation Gateway node	>500 Kbps – 10 Mbps	< 100 <32Mb < 512Kb	3V*200mA	3V*10mA	> 50%

Πίνακας 1: Τα τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των τεσσάρων κατηγοριών των WSNs

6.3 Μερικά Παραδείγματα Πλατφορμών

1. Μονάδα Spec

Η μονάδα Spec είναι τυπικό παράδειγμα της τάξης αισθητήρων ειδικού σκοπού. Είναι μονάδα μονού στοιχείου (single – chip node) και είναι σχεδιασμένη κυρίως για λειτουργία χαμηλής ισχύος και παραγωγή χαμηλού κόστους. Για την κατασκευή της μονάδας Spec απαιτείται μόνο 2.5mm*2.5mm πυριτίου και προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος και η πολυπλοκότητα, σχεδιάστηκε με μία διεπαφή μόνο με απλούς αισθητήρες και να επικοινωνεί σε μικρές αποστάσεις. Περιλαμβάνει μνήμη RAM και έχει ικανότητες επεξεργασίας και επικοινωνίας. Οι πρώτες εκδοχές αυτής της μονάδας περιελάμβαναν μόνο πομπό ενώ οι επόμενες έχουν πλήρη πομποδέκτη. Η μονάδα Spec είναι ιδανική για εφαρμογές παρακολούθησης κινητών αντικειμένων αξίας. Είναι εξοπλισμένη με μικρή μπαταρία και έτσι είναι ικανή να λειτουργεί για πολλά χρόνια.



Εικόνα 1: Η Μονάδα Spec

2. Μονάδα Mica2

Η μονάδα αυτή αποτελεί παράδειγμα συσκευής γενικευμένης τάξης, το οποίο σχεδιάστηκε στο πανεπιστήμιο Berkeley, και χρησιμοποιείται σήμερα από πολλούς ερευνητικούς οργανισμούς. Το Mica2 είναι ένα από τα πιο πρόσφατα ανεπτυγμένα εμπορικά διαθέσιμα μοντέλα, το οποίο ενσωματώνει εξαρτήματα για μεγάλη ευελιξία, ενώ το Micaz αποτελεί την πιο σύγχρονη εκδοχή του. Περιλαμβάνει διεπαφή διασύνδεσης παρέχοντας τη δυνατότητα προσάρτησης μιας σειράς από αισθητήρες. Επιπλέον, διαθέτει μεγάλο πλήθος από I/O pins – ακίδες και δυνατότητες επέκτασης, με αποτέλεσμα να καθίστανται η καλύτερη επιλογή κόμβου – αισθητήρα σε περιπτώσεις όπου δεν είναι σημαντικοί παράγοντες το κόστος και το μέγεθος. Για παράδειγμα, συνδέεται εύκολα σε ανιχνευτές κίνησης και σε επαφές θυρών και παραθύρων, που είναι απαραίτητα για το σύστημα ασφαλείας σε κτίρια. Ακόμη, η μονάδα αυτή είναι ικανή να δέχεται μηνύματα από μονάδες κόμβους Spec, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε αντικείμενα αξίας, όπως οι φορητοί υπολογιστές, για περιπτώσεις κλοπής. Η μνήμη και η επεξεργαστική ισχύς που διαθέτει η μονάδα Mica2, είναι ικανές για τη διαχείριση πολλών δεδομένων που στέλνονται από τις μονάδες Spec. Αν και μπορεί να συνδεθεί με ένα μεγάλο πλήθος αισθητήρων,

Κεφάλαιο 6

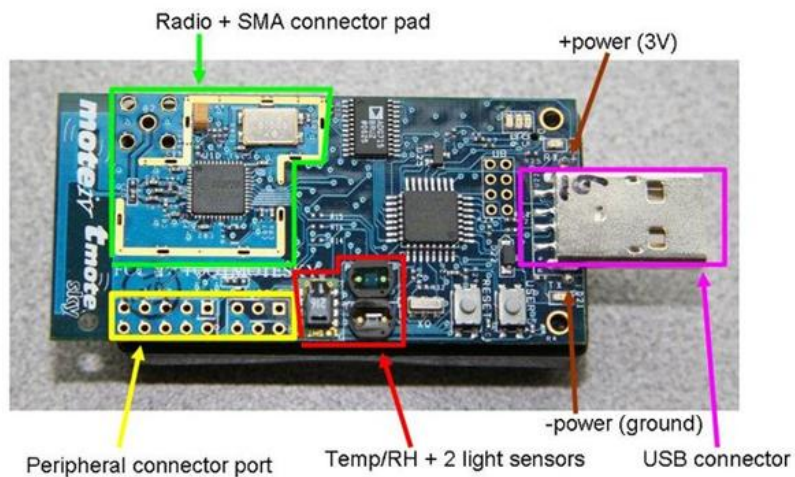
δεν έχει την ικανότητα να ανταποκριθεί στο μεγάλο εύρος δεδομένων που προέρχονται από σύνθετους αισθητήρες. Αποτυγχάνει στην επεξεργασία κινούμενης εικόνας και ήχου μεγάλου εύρους ζώνης.



Εικόνα 2: Η Μονάδα Mica2

3. Μονάδα Tmote-sky

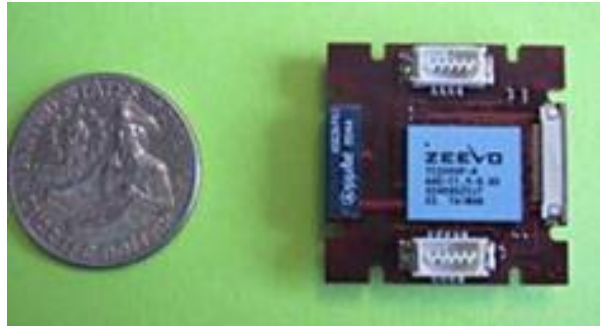
Η μονάδα αυτή, όπως και η προηγούμενη, αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της California, Berkeley και αποτελεί παράδειγμα συσκευής γενικευμένης τάξης. Το μοντέλο αυτό αποτελεί εξέλιξη του Telosb, ο οποίος παρέχει ασύρματη επικοινωνία στα 2.4 GHz, καθώς και επικοινωνία με το IEEE 802.15.4 και χρησιμοποιείται κυρίως σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χαμηλής ενέργειας. Ο αισθητήρας Tmote-sky αποτελεί μια μονάδα που συνδυάζει ενσωματωμένους αισθητήρες, δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και προγραμματιστικές δυνατότητες. Είναι μια ασύρματη μονάδα mote πολύ χαμηλής κατανάλωσης ισχύος για χρήση σε δίκτυα αισθητήρων και σε εφαρμογές καταγραφής και παρακολούθησης σχεδιασμένες με σκοπό την ανεκτικότητα στο θόρυβο και στην ευκολία περαιτέρω ανάπτυξης και αξιοποίησης.



Εικόνα 45: Η Μονάδα Tmote-sky

4. Πλατφόρμα iMote

Η μονάδα iMote δημιουργήθηκε τον Μάιο του 2003 από την Intel Research και σχεδιάστηκε ως πλατφόρμα αισθητήρων μεγάλου εύρους ζώνης. Περιλαμβάνει πολύ μεγαλύτερη μνήμη RAM και ισχύ επεξεργασίας. Επιπλέον, το iMote έχει πομποδέκτη βασισμένο σε τεχνολογία Bluetooth και μπορεί να επικοινωνεί σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 500 Kbps.



Εικόνα 46: Η πλατφόρμα iMote της intel

5. Πλατφόρμα Stargate

Την πλατφόρμα αυτή ανέπτυξε η Intel και πούλησε η Crossbow Technology και είναι αντιπροσωπευτική των συσκευών κατηγορίας πύλης. Περιλαμβάνει επεξεργαστή Intel 400 MHz, μνήμη RAM μερικών megabytes και δυνατότητα αποθήκευσης μέχρι την τάξη των gigabytes. Η μονάδα αυτή έχει την ικανότητα να συνδέεται ευθέως με συσκευές βασισμένες στο Mica2 και στο iMote και να διαβάζει δεδομένα από χαμηλής ισχύος δίκτυα σε «παραδοσιακά» ασύρματα δίκτυα όπως το 802.11 και το Ethernet. Επιπλέον, οι διατάξεις μνήμης και επεξεργασίας που διαθέτει, του επιτρέπουν να λειτουργεί ως Web front-end σε δίκτυα αισθητήρων, όπου οι χρήστες έχουν πρόσβαση στα δεδομένα του μέσω Web browser.



Εικόνα 47: Η πλατφόρμα Stargate της Crossbow

6. Μονάδα BTnode

Το BTnode έχει αναπτυχθεί από κοινού στο ΕΤΗ Ζυρίχης από την εφαρμοσμένη μηχανική υπολογιστών και το εργαστήριο δικτύων και την ερευνητική ομάδα για τα διανεμημένα συστήματα. Η μονάδα αυτή είναι μια αυτόνομη ασύρματη πλατφόρμα επικοινωνίας και υπολογισμών που βασίζεται σε ένα ραδιοπομπό Bluetooth και έναν μικροελεγκτή. Χρησιμοποιεί ως μια πλατφόρμα επίδειξης για την έρευνα σε κινητά και ειδικά συνδεδεμένα δίκτυα (MANETs) και διανεμημένα δίκτυα αισθητήρων. Διαθέτει χαμηλής ισχύος ασύρματο σύστημα εκπομπής και μικροεπεξεργαστή Atmel ATmega 128L 8 MHz.



Εικόνα 48: Η Μονάδα BT-Node

7. Μονάδα IRIS

Η πλατφόρμα αυτή αποτελεί μια μονάδα που σχεδιάστηκε για ενσωματωμένα δίκτυα αισθητήρων και έχει δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και προγραμματιστικές δυνατότητες. Τα χαρακτηριστικά του θα περιγραφούν αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο αφού αποτελεί την πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 49: Η μονάδα IRIS

6.4 Διάφορες Αρχιτεκτονικές Πλατφορμών

Η συνολική αρχιτεκτονική δομή και των τεσσάρων κατηγοριών πλατφορμών των δικτύων αισθητήρων παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ομοιότητα παρά τις σημαντικές διαφορές που έχουν στις δυνατότητες των συσκευών.

Η ομοιότητά τους στην αρχιτεκτονική προκύπτει από την απαίτηση να υποστηρίζουν ασύρματη δικτύωση ενώ οι βασικές τους διαφορές προκύπτουν από το την επιθυμία των σχεδιαστών τους να βελτιστοποιούν σε διαφορετικό βαθμό, ανάλογα με την πλατφόρμα και την συγκεκριμένη κατηγορία εφαρμογής τους, την κατανάλωση ισχύος. Οι μηχανικοί εφαρμογών πρέπει να λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με το μέγεθος της on-board μνήμης, την ύπαρξη ή όχι μνήμης flash (flash memory), το μέγεθος της ισχύος της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU), τον τύπο και το εύρος ζώνης της ασύρματης ζεύξης.

Ανάμεσα στις μονάδες δικτύου αισθητήρων και των πιο «παραδοσιακών» υπολογιστικών πλατφορμών, περιλαμβάνοντας τους προσωπικούς υπολογιστές, τους υπολογιστές παλάμης (PDAs) ακόμη και τους ενσωματωμένες συσκευές, μια κύρια διαφορά είναι η ακραία έμφαση που δίνουν τα δίκτυα αισθητήρων στη διαχείριση της ενέργειας. Μία ευρεία γκάμα εφαρμογών απαιτούν τροφοδότηση με μπαταρία για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ακόμη, κάθε υποσύστημα της πλατφόρμας τροφοδοτείται ανεξάρτητα ώστε να διαχειρίζεται αποτελεσματικά η ισχύς της. Για παράδειγμα, ο πομποδέκτης πρέπει να λειτουργεί μόνο κατά τη διάρκεια της ενεργής επικοινωνίας και αν είναι δυνατόν να κλείνει την κεντρική μονάδα επεξεργασίας στις περιόδους μη επεξεργασίας και να μπορεί να διακόπτει την τροφοδοσία στα υποσυστήματα των αισθητήρων και των μονάδων εισόδου- εξόδου όταν είναι ανενεργά.

Σε πολλές περιπτώσεις, ο έλεγχος της δραστηριότητας και της ισχύς των διάφορων υποσυστημάτων των πλατφορμών γίνεται από το λειτουργικό σύστημα TinyOS, το οποίο περιγράφεται αναλυτικότερα στη συνέχεια. Στο TinyOS, η διαχείριση ισχύος αφορά κάθε τομέα του συστήματος και όλα τα επιμέρους στοιχεία είναι σχεδιασμένα ώστε να μην καταναλώνουν ισχύ όταν είναι ανενεργά. Ο χρονισμός των περιόδων που σταματάει η τροφοδοσία (power-down cycles) καθορίζεται από πολλούς παράγοντες, όπως το υλικό που χρησιμοποιείται και οι απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι πλατφόρμες των δικτύων αισθητήρων δίνουν στις εφαρμογές απευθείας λεπτομερή έλεγχο του υποκείμενου υλικού ώστε να διευκολύνεται η σωστή διαχείριση ισχύος. Οι μέχρι τώρα αντιλήψεις για τα «παραδοσιακά» δίκτυα, και την διαστρωμάτωση σχετικά με τις στοίβες του δικτύου και των συσκευών, οδηγούν σε μη αποτελεσματική χρήση της ισχύος στην περίπτωση των δικτύων αισθητήρων. Έτσι, πρόσφατες έρευνες οδηγούν στο συμπέρασμα ότι χρειάζεται μια κοινή προσέγγιση με αυτή των «κοινών»

δικτύων αλλά με τρία πρόσθετα βασικά χαρακτηριστικά:

- * Ένα πλαίσιο στοιχείων γενικού σκοπού, το οποίο καταργεί τη διαστρωμάτωση.
- * Λειτουργίες υλικού, που είναι διαθέσιμες σε εφαρμογές και σε εξατομικευμένο λογισμικό (middleware).
- * Εικονικοποίηση (virtualization), μεταφρασμένα προγράμματα ή απλοποιημένη διαδικασία προγραμματισμού για την ανάπτυξη εφαρμογών δικτύων αισθητήρων.

Στις κατηγορίες των συσκευών mote (mote-class devices), όπως το Mica2 και το Iris, το TinyOS παρέχει ένα χαμηλού επιπέδου ελέγχου υλικού, μέσω ενός ενσωματωμένου στοιχείου, που απαλείφει τη διαστρωμάτωση. Στο TinyOS, τα στοιχεία επιπέδου εφαρμογής έχουν τη δυνατότητα απευθείας πρόσβασης στο υλικό όπου απαιτείται. Η δυνατότητα αυτή απουσιάζει από άλλα πιο «παραδοσιακά» λειτουργικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένου και του Linux. Η χρήση του Linux σε μονάδες κατηγορίας πύλης, όπως το Stargate, απαιτεί επιπρόσθετη υποστήριξη για ακριβή έλεγχο του υλικού για την οποία οι σχεδιαστές έχουν μεριμνήσει.

6.5 Η Εξέλιξη στο Υλικό και Λογισμικό των Πλατφορμών

Η πρόσφατη έρευνα και ανάπτυξη των πλατφορμών 1^{ης} γενιάς ασύρματων δικτύων αισθητήρων επαναπροσδιορίζεται με στόχο να βοηθήσει τους μηχανισμούς συστημάτων να ορίσουν μια νέα γενιά υλικού, που θα εξυπηρετήσει καλύτερα τις ανάγκες των δικτύων.

Αναλύοντας την εξέλιξη στο υλικό των δικτύων αισθητήρων πρέπει να τονιστεί η επίδραση του νόμου του Moore στο σχεδιασμό και την εξέλιξη των δικτύων. Σε όλες τις κατηγορίες πλατφορμών, εκτός των αισθητήρων ειδικού σκοπού, ο νόμος αυτός εγγυάται αύξηση της απόδοσης για δεδομένη ισχύ. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, η μονάδα Mica2 έχει σχεδόν οκταπλάσια μνήμη και εύρος ζώνης επικοινωνίας από τον προκάτοχό του, τη μονάδα Rene που σχεδιάστηκε το 1999, αν και έχουν την ίδια ισχύ και το ίδιο κόστος. Παρόμοια άλματα, χωρίς σημαντική αλλαγή στις απαιτήσεις ισχύος και κόστους, έχουν εμφανίσει και οι συσκευές κατηγορίας πύλης και μεγάλου εύρους ζώνης. Σε αντίθεση με τις μονάδες αισθητήρων ειδικού σκοπού, όπως είναι η μονάδα Spec, οι οποίες χρησιμοποιούν προχωρημένες τεχνικές που απορρέουν από το νόμο του Moore, προκειμένου να μειώσουν την κατανάλωση ισχύος και το κόστος αλλά να διατηρήσουν την ίδια απόδοση.

Η αυξημένη απόδοση των μονάδων αισθητήρων γενικευμένης τάξης εν μέρει οφείλεται στους νέους CMOS ραδιοπομπούς, που σχεδιάστηκαν για εκπομπή χαμηλού ρυθμού και χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Ακόμη, οι διεπαφές επικοινωνίας που παρέχονται από πομπούς χαμηλής ισχύος, περιλαμβάνουν τώρα εξειδικευμένη υποστήριξη υλικού για να βοηθήσουν στη μείωση του υψηλού φόρτου της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας. Οι ελεγκτές χαμηλής ισχύος μπορούν να στείλουν δεδομένα μέσω RF καναλιού με πολλαπλάσιες ταχύτητες των πομπών της προηγούμενης γενιάς. Επιπλέον, σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι οι επόμενης γενιάς πομποί έχουν ενσωματωμένους μηχανισμούς που να καθορίζουν τον κύκλο εργασίας λειτουργίας τους και ελέγχουν τη δραστηριότητα στο κανάλι ενώ οι προηγούμενοι σχεδιασμοί υλικού χρησιμοποιούσαν τον μικροελεγκτή για να καθορίζει αυτές τις λειτουργίες.

Node	CPU	Power	Memory	I/O and Sensors	Radio	Remarks
Special-purpose Sensor Nodes						
Spec 2003	4-8Mhz Custom 8-bit	3mW peak 3uW idle	3K RAM	I/O Pads on chip, ADC	50-100Kbps	Full custom silicon, traded RF range and accuracy for low-power operation.
Generic Sensor Nodes						
Rene 1999	ATMEL 8535	0.036mW sleep 60mW active	512B RAM 8K Flash	Large expansion connector	10Kbps	Primary TinyOS development platform.
Mica-2 2001	ATMEGA 128	0.036mW sleep 60mW active	4K RAM 128K Flash	Large expansion connector	76Kbps	Primary TinyOS development platform.
Telos 2004 (tmote sky)	Motorola HCS08	0.001 mW sleep 32 mW active	4K RAM	USB and Ethernet	250Kbps	Supports IEEE 802.15.4 standard. Allows higher-layer Zigbee standard. 1.8V operation
IRIS-XM2110	ATMEGA 1281		8K RAM 128K Flash	Large expansion connector	250Kbps	Supports IEEE 802.15.4 standard. Allows higher-layer Zigbee standard.
High-bandwidth Sensor Nodes						
BT Node 2001	ATMEL Mega 128L 7.328Mhz	50MW idle 285MW active	128KB Flash 4KB EEPROM 4KB SRAM	8-channel 10-bit A/D, 2 UARTS Expandable connectors	Bluetooth	Easy connectivity with cell phones. Supports TinyOS. Multihop using multiple radios/nodes.
Imote 1.0 2003	ARM 7TDMI 12-48MHz	1mW idle 120mW active	64KB SRAM 512KB Flash	UART, USB, GPIO, I ² C, SPI	Bluetooth 1.1	Multihop using scatternets, easy connections to PDAs, phones, TinyOS 1.0, 1.1.
Gateway Nodes						
Stargate 2003	Intel PXA255		64KNSRM	2 PCMCIA/CF, com ports, Ethernet, USB		Flexible I/O and small form factor power management.
Imysnc Cerfcube 2003	Intel PXA255		32KB Flash 64KB SRAM	Single CF card, general-purpose I/O	Serial connection to sensor network	Small form factor, robust industrial support, Linux and Windows CE support.
PC 104 nodes	X86 processor		32KB Flash 64KB SRAM	PCI Bus		Embedded Linux or Windows support.

Πίνακας 2: Σημαντικές πλατφόρμες δικτύων αισθητήρων οργανωμένες ανά κατηγορία συσκευών

6.6 Το Κατάλληλο Λειτουργικό Σύστημα των Πλατφορμών

Τόσο η ίδια αρχιτεκτονική των διαφόρων πλατφορμών όσο και τα γενικά χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις των *nodes*, απαιτούν την ανάπτυξη του κατάλληλου, συμβατού με το υλικό και τις απαιτήσεις, λειτουργικό σύστημα.

Για τους αισθητήρες ειδικού και γενικού σκοπού έχει σχεδιαστεί ένα ειδικό λειτουργικό σύστημα καλούμενο *TinyOS*, ώστε να τρέχει σε αυτές τις πλατφόρμες που έχουν περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και μνήμη. Αντιθέτως, οι συσκευές με αυξημένες δυνατότητες απαιτούν όλο και μεγαλύτερη συμμετοχή του λειτουργικού συστήματος ώστε να υποστηριχτούν πιο σύνθετες εφαρμογές, όπως η πολυεπεξεργασία, η μεταγωγή εκτέλεσης διεργασιών με βάση την προτεραιότητα ή ακόμα και την υποστήριξη εικονικής μνήμης. Συνεπώς, η χρησιμοποίηση πιο «αναβαθμισμένων» λειτουργικών συστημάτων κρίνεται αναγκαία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, που χρησιμοποιείται η πλατφόρμα γενικού σκοπού *IRIS*, το *TinyOS* καθίσταται το καταλληλότερο σε σχέση με άλλα ομοειδή λειτουργικά συστήματα χάρη στα πλεονεκτήματα και τα γενικά χαρακτηριστικά του.

Κεφάλαιο 7

Το Λειτουργικό Σύστημα TinyOS

7.1 Γενικά

Το TinyOS είναι ένα ευέλικτο λειτουργικό σύστημα, προορισμένο για χρήση στα δίκτυα αισθητήρων. Τα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να αποτελούνται από χιλιάδες μονάδες χαμηλής κατανάλωσης, καθεμία από τις οποίες πρέπει να εκτελέσει ενεργά προγράμματα με μικρή ποσότητα μνήμης και περιορισμούς στην κατανάλωση ενέργειας. Οι απαιτήσεις των δικτύων αυτών σε περιορισμένο χώρο αποθήκευσης δεδομένων, εκτέλεσης παράλληλων εφαρμογών και χαμηλής κατανάλωσης, αποτελούν τον οδηγό σχεδίασης του TinyOS. Οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται από τη λειτουργία του TinyOS και για το λόγο αυτό έχει επικρατήσει στην έρευνα και ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων.

7.2 Απαιτήσεις Σχετικά με την Σχεδίαση Λειτουργικών Συστημάτων για WSNs

Τα συμβατικά λειτουργικά συστήματα αποτελούν λογισμικό συστήματος που περιλαμβάνει προγράμματα, τα οποία διαχειρίζονται πόρους, ελέγχουν τις περιφερειακές συσκευές και παρέχουν αφηρημένη απεικόνιση του υλικού. Στόχος είναι η διαχείριση των διεργασιών, της μνήμης, του χρόνου του επεξεργαστή, του συστήματος των αρχείων και των συσκευών, τα οποία επιτυγχάνονται συνήθως με τον διαχωρισμό σε πολλά επίπεδα. Τα WSNs εξαιτίας της ιδιομορφίας των εφαρμογών που εκτελούν και των περιορισμένων πόρων του συστήματος, απαιτούν μια διαφορετική προσέγγιση στη σχεδίαση του λειτουργικού τους συστήματος. Αρχικά, σε ένα συμβατικό λειτουργικό σύστημα, η εκτέλεση πολλαπλών διεργασιών γίνεται δυνατή μέσω της κατανομής μνήμης για καθεμία ξεχωριστά. Το περιορισμένο μέγεθος μνήμης σε ένα ασύρματο κόμβο δεν επαρκεί για μια τέτοια διαδικασία. Επιπλέον, η εναλλαγή στην εκτέλεση των διεργασιών δεν ευνοεί την εκτέλεση κάποιων real-time εφαρμογών που εμφανίζονται σε ένα WSN, με αποτέλεσμα να χάνονται κρίσιμα δεδομένα. Τέλος, ένα συμβατικό λειτουργικό σύστημα εξ' ορισμού αξιοποιεί το σύνολο των δυνατοτήτων του υλικού για την καλύτερη εκτέλεση των προγραμμάτων. Η προσέγγιση αυτή είναι απολύτως λογική για έναν υπολογιστή με τροφοδοσία από το δίκτυο αλλά υπερβολικά ενεργοβόρα για ένα σύστημα που τροφοδοτείται από δύο μικρές μπαταρίες.

Κεφάλαιο 7

Συνεπώς, οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρεί ένα λειτουργικό σύστημα για ένα WSN είναι:

- Μικρή έκταση κώδικα.
- Παροχή μηχανισμού διαχείρισης πόρων συστήματος και ενέργειας.
- Δυνατότητα επαναπρογραμματισμού.
- Παροχή διεπαφής προγράμματος εφαρμογής.
- Η σχεδίαση να είναι modular (δομοστοιχειωτή) για να μπορούμε να φτιάξουμε γρήγορα και εύκολα εφαρμογές.

7.3 Επισκόπηση του TinyOS

Το TinyOS αποτελείται από ένα σύνολο επαναχρησιμοποιημένων συστατικών, που λέγονται components, τα οποία ενώνονται για να σχηματίσουν μία συγκεκριμένη εφαρμογή, και από ένα σύνολο διασυνδέσεων (ή διεπαφών), που λέγονται interfaces, τα οποία διασυνδέουν τα components. Ακόμη, υποστηρίζει ένα μοντέλο λειτουργίας συνεργασίας συμβάντων, που λέγονται events, το οποίο βασίζεται στη λειτουργία χωρισμού των interfaces (split-face interfaces), ασύγχρονα events και χρονικά καθυστερημένους υπολογισμούς, που καλούνται tasks. Το TinyOS έχει υλοποιηθεί στη γλώσσα NesC και υποστηρίζει το μοντέλο λειτουργίας των συστατικών, καθώς και μία εκτεταμένη βελτιστοποίηση στην εναλλαγή των components και στην ανίχνευση του χρόνου μεταγλώττισης.

7.4 Ιστορικά Στοιχεία και Εξέλιξη του TinyOS

Το TinyOS είναι από τα πρώτα λειτουργικά συστήματα που σχεδιάστηκαν ειδικά για WSNs και είναι ανοικτού κώδικα (open source). Η ανάπτυξή του ξεκίνησε από το πανεπιστήμιο της California, Berkeley στα τέλη της προηγούμενης δεκαετίας και η πρώτη έκδοση κυκλοφόρησε το 2000. Μπορεί να υποστηρίζει πλατφόρμες εμπορικές και μη, με επεξεργαστές από αρχιτεκτονικής 8-bit και μόλις 2 KB RAM μέχρι επεξεργαστές αρχιτεκτονικής 32-bit και μνήμης άνω των 32 MB. Μερικές από αυτές είναι το IRIS της εταιρίας Crossbow, το iMote της Intel και το Eyes, το οποίο δημιουργήθηκε από κοινοπραξία των Ευρωπαϊκών πανεπιστημίων και των εταιριών.

Η ανάπτυξη των εφαρμογών του TinyOS γίνεται σε μία νέα γλώσσα, διάλεκτο της C, η οποία προσαρμόζεται στις απαιτήσεις και τους περιορισμούς των WSNs, την NesC (Network embedded systems C). Ο μεταγλωττιστής (compiler) της NesC και τα απαραίτητα εργαλεία Atmel AVR binutils είναι γραμμένα σε C. Το λειτουργικό σύστημα αυτό περιέχει ακόμη

ενσωματωμένες κάποιες βοηθητικές εφαρμογές σε Java.

Η εγκατάστασή του γίνεται σε ένα host PC, με λειτουργικό Linux ή Windows με την προσθήκη του Unix προσομοιωτή Cygwin, και μέσω της σειριακής ή της USB θύρας του γίνεται ο προγραμματισμός των κόμβων και η συλλογή δεδομένων.

Στην ιστοσελίδα του αναφέρεται ότι πάνω από 500 ερευνητικές ομάδες χρησιμοποιούν πλατφόρμες που τρέχουν με το TinyOS συνεισφέροντας στην ανάπτυξη κώδικα, ενώ άλλες ερευνητικές κοινότητες ελέγχουν νέα πρωτόκολλα και αλγορίθμους μέσω προσομοιώσεων. Τελευταία έκδοση είναι η 2.02, που κυκλοφόρησε τον Ιούλιο του 2007.

7.5 Η Γλώσσα NesC

Η NesC (Network embedded systems C) είναι μία γλώσσα προγραμματισμού βασισμένη σε συστατικά (components), τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των εφαρμογών στην πλατφόρμα του TinyOS, και αποτελεί μια επέκταση της C.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι:

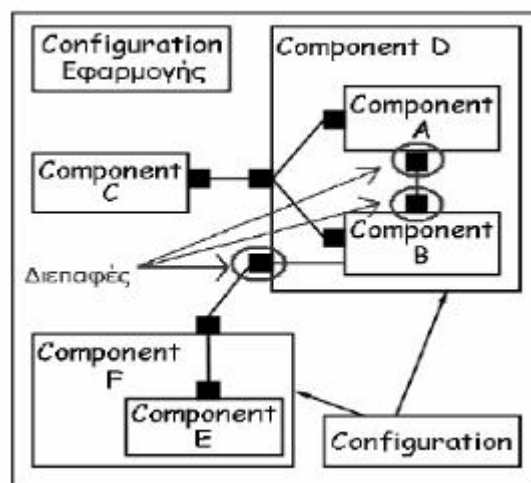
- Η χρήση της C παράγει αποδοτικό κώδικα, ο οποίος καλύπτει όλα τα είδη των μικροελεγκτών που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα αισθητήρων. Παρέχει χαρακτηριστικά χαμηλού επιπέδου, απαραίτητα για επικοινωνία με το υλικό και η αλληλεπίδραση με υπάρχοντα κομμάτια κώδικα C είναι απλούστερη. Βέβαια, έχει και σημαντικά μειονεκτήματα αφού παρέχει μικρή βοήθεια στη συγγραφή κώδικα με ασφάλεια αλλά η NesC γίνεται ασφαλής με την μειωμένη εκφραστική δύναμη και την δόμηση με components.
- Υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ της κατασκευής και της σύνθεσης καθώς τα προγράμματα κατασκευάζονται από components, τα οποία συνδέονται μέσω μιας τεχνικής, που λέγεται wiring, για να σχηματιστεί ένα πλήρες πρόγραμμα. Τα components απαρτίζονται από δύο οπτικές. Η μία είναι των προδιαγραφών τους, που περιέχουν τα ονόματα των διεπαφών τους, και η άλλη της υλοποίησής τους. Τα components έχουν εσωτερικό παραλληλισμό (concurrency) με τη μορφή των διεργασιών (tasks). Τα σήματα ελέγχου περνούν σε ένα component μέσω των διεπαφών τους. Τα σήματα αυτά δρομολογούνται είτε μέσω των διεργασιών είτε μέσω του υλικού (hardware interrupts).
- Οι προδιαγραφές της συμπεριφοράς των components μέσω των διεπαφών. Οι διεπαφές μπορούν να παρέχονται (provided) ή να χρησιμοποιούνται (used) από τα components. Οι παρεχόμενες διεπαφές προσδιορίζουν τη λειτουργικότητα που δίνουν στο χρήστη και οι χρησιμοποιούμενες διεπαφές προσδιορίζουν τις λειτουργίες που χρειάζεται ένα component για να υλοποιήσει τη λειτουργικότητά του.
- Οι διεπαφές είναι διπλής κατεύθυνσης. Αυτές καθορίζουν μία σειρά από λειτουργίες που πρέπει να υλοποιηθούν από τον πάροχο της διεπαφής και αντιστοιχούν σε εντολές που καλούνται commands και μια σειρά γεγονότων που καλούνται events και πρέπει να υλοποιηθούν από το χρήστη. Αυτό επιτρέπει σε μια διεπαφή να αναπαριστά μια σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ των components, το οποίο είναι πολύ σημαντικό επειδή οι πολύπλοκες λειτουργίες στο

Κεφάλαιο 7

TinyOS, για παράδειγμα να σταλεί ένα πακέτο δεδομένων, δεν σταματούν την εκτέλεση του τρέχοντος προγράμματος και η ολοκλήρωσή τους σημαίνεται μέσω της σηματοδότησης του αντίστοιχου γεγονότος, για παράδειγμα το πακέτο εστάλη. Οι εντολές καλούνται τυπικά από πάνω προς τα κάτω, όπως για παράδειγμα από τα components μιας εφαρμογής προς αυτά που βρίσκονται πιο κοντά στο υλικό, ενώ τα events καλούνται από κάτω προς τα πάνω.

- Η NesC παρέχει μία μοναδική ισορροπία μεταξύ της ορθής ανάλυσης του προγράμματος για την βελτίωση της αξιοπιστίας και τη μείωση του μεγέθους του κώδικα, καθώς και της ικανής ισχύος για τη δημιουργία πραγματικών εφαρμογών. Ακόμη, ο μεταγλωττιστής της πραγματοποιεί άμεση ενοποίηση των συνιστωσών (components) του προγράμματος, ευθυγράμμιση και εξάλειψη χαλασμένου κώδικα. Γενικά, στη NesC αποκλείεται η χρήση χαρακτηριστικών που εμποδίζουν την στατική ανάλυση, συμπεριλαμβανομένων των δεικτών σε συναρτήσεις και τη δυναμική δέσμευση μνήμης.
- Η NesC σχεδιάστηκε με την προϋπόθεση ότι ο κώδικας θα παράγεται από μεταγλωττιστές ολικού προγράμματος (whole-program compilers). Έτσι, άμεση συνέπεια είναι η ανίχνευση εκφυλισμένων καταστάσεων δεδομένων (data-race conditions) κατά τη διάρκεια της μεταγλώττισης.
- Η NesC ορίζει ένα απλό αλλά ικανό μοντέλο ταυτόχρονου προγραμματισμού συνδεδεμένο με εκτεταμένο χρόνο ανάλυσης από τον μεταγλωττιστή. Ο μεταγλωττιστής της NesC ανιχνεύει τη ροή δεδομένων κατά την διάρκεια του χρόνου μεταγλώττισης. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει στις εφαρμογές να εκτελούνται παράλληλα χρησιμοποιώντας περιορισμένους πόρους.
- Το μοντέλο παράλληλου προγραμματισμού της NesC είναι βασισμένο σε διεργασίες (tasks) που τρέχουν μέχρι να τελειώσουν (run-to-completion) και σε διαχειριστές διακοπών (interrupt handlers), οι οποίοι μπορούν να διακόψουν τα tasks.
- Τα components είναι συνδεδεμένα στατικά μεταξύ τους μέσω των διεπαφών. Το γεγονός αυτό αυξάνει την αποτελεσματικότητα κατά την εκτέλεση και επιτρέπει την καλύτερη στατική ανάλυση του προγράμματος.

Η δομή μια εφαρμογής σε NesC παρουσιάζεται στην Εικόνα 50.



Εικόνα 50: Δομή μιας εφαρμογής σε NesC

Η συγκεκριμένη δομή αποτελείται από διεπαφές και επιμέρους τμήματα κώδικα, τα components. Η κάθε διεπαφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή να παρασχεθεί από τα components, τα οποία διακρίνονται σε υπομονάδες (modules) και συνθέσεις τμημάτων (configurations).

7.5.1 Commands- Εντολές

Οι εντολές είναι αιτήσεις (requests) προς τα συστατικά χαμηλού επιπέδου. Η εκτέλεσή τους είναι άμεση και χωρίς δυνατότητα φραγής και γι' αυτό και ολοκληρώνεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Έχουν την δυνατότητα να καλούν άλλες εντολές χαμηλότερου επιπέδου tasks αλλά δεν μπορούν να σηματοδοτούν events. Τα commands μαζί με τα events αποτελούν τον μηχανισμό επικοινωνίας μεταξύ των συστατικών.

7.5.2 Events- Γεγονότα

Ενώ οι εντολές ορίζονται ως αιτήσεις προς τα συστατικά για την έναρξη μιας λειτουργίας, τα αντίστοιχα events σηματοδοτούν τη λήξη τους. Για παράδειγμα, μια εντολή μπορεί να ζητήσει από έναν αισθητήρα την έναρξη συλλογής δεδομένων. Ένα event θα προκληθεί όταν ο αισθητήρας ολοκληρώσει τη συλλογή και είναι έτοιμος να τις στείλει στις εισόδους που είναι συνδεδεμένες. Μπορεί να εμφανιστεί και ασύγχρονα εξαιτίας μιας διακοπής (interrupt) του υλικού. Τα γεγονότα και οι εντολές δεν υπόκεινται σε φραγή εκτέλεσης. Με την χρήση των εντολών και γεγονότων, επιτυγχάνεται η εκτέλεση των λειτουργιών του λογισμικού σε δύο φάσεις (split phase operation), όπως ακριβώς συμβαίνει και με το υλικό. Μετά από την αίτηση εκτέλεσης μιας λειτουργίας, η εντολή επιστρέφει αμέσως και το αντίστοιχο event σηματοδοτεί το τέλος της λειτουργίας μετά τη μεσολάβηση κάποιου χρονικού διαστήματος. Τέλος, τα events έχουν τη δυνατότητα να καλέσουν εντολές και διεργασίες χαμηλότερου επιπέδου καθώς και να σηματοδοτήσουν events ανωτέρου επιπέδου.

7.5.3 Tasks - Διεργασίες

Το task είναι ένας απλός υπολογιστικός μηχανισμός που παρέχεται από τη NesC και χρησιμοποιείται για την εκτέλεση υπολογισμών σε καθυστερημένες χρονικά στιγμές σε σχέση με τις εντολές και τα γεγονότα. Ο συνήθης χρονοπρογραμματισμός του TinyOS ακολουθεί λογική First-In First-Out (FIFO) για την εκτέλεση των tasks. Εφόσον, οι εντολές και τα γεγονότα έχουν την ιδιότητα να μην διακόπτονται, και έτσι είναι δεσμευτικά για τους πόρους του συστήματος, ο υπολογιστικός φόρτος που ανατίθεται στις εντολές και τα γεγονότα πρέπει να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Σκοπός της ύπαρξής τους άλλωστε είναι να επιτελούν καίριες και απολύτως απαραίτητες λειτουργίες για το σύστημα. Τα tasks καλούνται μέσα από commands ή events για να εκτελέσουν λειτουργίες χαμηλότερης προτεραιότητας κάποια στιγμή μετά την ολοκλήρωση των τρεχόντων εντολών και γεγονότων. Δεν έχουν τύπο επιστροφής, δεν δέχονται παραμέτρους γεγονότος που διατηρεί τον χρονοπρογραμματιστή τους αρκετά απλό και δηλώνεται με τη λέξη task. Τέλος, μπορούν να έχουν πρόσβαση σε μεταβλητές, να καλούν εντολές, να σηματοδοτούν events και να προκαλούν την εκτέλεση εσωτερικών ή γενικών

συναρτήσεων της C.

7.6 Το Μοντέλο των Συστατικών – *Component-Based Model*

Ο σχεδιασμός του TinyOS προσανατολίζεται στην ικανοποίηση τριών βασικών απαιτήσεων:

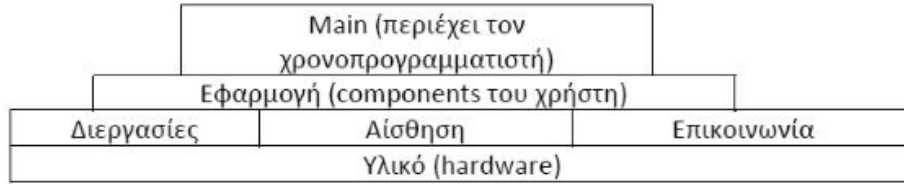
- Εγγυημένη ροή διαμέσου των εξαρτημάτων του υλικού
- Διαίρεση του λογισμικού σε διαβαθμισμένα επιμέρους δομικά στοιχεία (component-based architecture)
- Εκτέλεση των στοιχείων με το μικρότερο δυνατό κόστος ισχύος επεξεργαστή και χώρου μνήμης.

Το TinyOS για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, χρησιμοποιεί ένα δομημένο μοντέλο εκτέλεσης κώδικα βασισμένο σε συμβάντα (event-driven), το οποίο και εξασφαλίζει παράλληλη εκτέλεση διεργασιών, με την ελάχιστη δυνατή χρήση μνήμης και ενέργειας. Κρίσιμος παράγοντας για τον περιορισμό του κόστους ισχύος είναι η ικανότητα του συστήματος να αναγνωρίζει πότε υπάρχει σημαντική εργασία προς εκτέλεση και πότε όχι. Στο TinyOS, όταν ένα συμβάν εμφανιστεί, οι διεργασίες που σχετίζονται με αυτό εκτελούνται γρήγορα με μεγάλη προτεραιότητα και μόλις ολοκληρωθούν, ο επεξεργαστής τίθεται σε κατάσταση SLEEP, χωρίς να ψάχνει για νέα συμβάντα, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια.

Το προγραμματιστικό μοντέλο του TinyOS, που παρέχει η γλώσσα NesC, βασίζεται στην έννοια των components, τα οποία εκτελούν ένα σύνολο από λειτουργίες που καθορίζονται από τις διασυνδέσεις. Το TinyOS από μόνο του αποτελείται από ένα σύνολο από επαναχρησιμοποιούμενα συστατικά του συστήματος μαζί με ένα χρονοδιάγραμμα από tasks. Μια εφαρμογή συνδέει συστατικά χρησιμοποιώντας ένα τρόπο καθορισμένης διασύνδεσης, που είναι ανεξάρτητη από την υλοποίηση των συστατικών. Ο τρόπος αυτός διασύνδεσης καθορίζει το πλήρες σύνολο των συστατικών, τα οποία μια εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιήσει.

7.7 Η Αρχιτεκτονική του TinyOS

Το TinyOS αποτελείται από έναν χρονοπρογραμματιστή (scheduler) και μια σειρά από υπομονάδες (modules). Η εφαρμογή και οι υπομονάδες μεταγλωττίζονται μαζί για να υλοποιηθεί το σύστημα. Από την κορυφή προς τα κάτω, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, υπάρχουν η κύρια υπομονάδα (main), η υπομονάδα της εφαρμογής και η υπομονάδα επιπέδου υλικού. Η τελευταία υπομονάδα φορτίζεται με την ιδιότητα της αποστολής και λήψης αρχικών δεδομένων και η υπομονάδα της εφαρμογής απαντά στη συμπίεση, δρομολόγηση και μετάδοση των δεδομένων.



Εικόνα 51: Η στοίβα αρχιτεκτονικής του TinyOS

Στην ουσία, απεικονίζεται μια στοίβα από components, η έννοια των οποίων υποκαθιστά εν μέρει την έννοια της διεργασίας σε συμβατικά λειτουργικά συστήματα. Τα περισσότερα components είναι modules λογισμικού και ανήκουν στο κάτω μέρος της στοίβας αλλά χρησιμοποιούνται κυρίως σαν απλά interfaces για το υλικό του συστήματος. Επίσης, έννοιες όπως πυρήνας, εικονική μνήμη, δυναμική κατανομή μνήμης δεν ορίζονται. Από τη στιγμή που δεν υπάρχει πυρήνας, η διαχείριση του hardware γίνεται άμεσα και υπάρχει μόνο μία διαδικασία στο σύστημα, ο χώρος διευθύνσεων είναι γραμμικός και η μνήμη κατανέμεται στατικά κατά τη διάρκεια της μεταγλώττισης. Τέλος, όταν λέγεται ότι ένας κόμβος τρέχει TinyOS, σημαίνει ότι έχει εγκατεστημένη στη flash μνήμη του μια binary εκτελέσιμη εικόνα με τις βιβλιοθήκες του TinyOS συνδεδεμένες με την εφαρμογή που πρέπει να εκτελεστεί. Η εικόνα αυτή αποτελεί την εφαρμογή του TinyOS. Άλλωστε η εγκατάσταση του TinyOS σε ένα κόμβο δεν έχει νόημα αφού από μόνο του δεν εκτελεί κάποια λειτουργία ούτε έχει κάποιο user interface.

7.8 Τα Συστατικά – Components του TinyOS

Τα components του TinyOS, ανάλογα με την διαβάθμισή τους, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

► Αφηρημένες Απεικονίσεις Υλικού – Hardware Abstractions

Εδώ ανήκουν τα components χαμηλού επιπέδου και σε αυτά γίνεται ουσιαστικά η αποτύπωση του hardware, όπως είναι οι συσκευές εισόδου/εξόδου (I/O), ο πομποδέκτης και οι αισθητήρες. Ο κώδικας αποτελείται κυρίως από μακροεντολές.

► Συνθετικό Υλικό – Synthetic Hardware

Στην κατηγορία αυτή αποτυπώνεται η συμπεριφορά προχωρημένων λειτουργιών του υλικού στα συστατικά και διασυνδέονται με τις αφηρημένες απεικονίσεις υλικού. Επειδή τα συστατικά συνθετικού υλικού αποτελούν συνδετικό κρίκο μεταξύ των συστατικών των αφηρημένων απεικονίσεων υλικού και των συστατικών υψηλού επιπέδου εφαρμογών του χρήστη, ο κώδικας τους είναι ένα μείγμα μακροεντολών προγραμματισμού σε assembly και προγραμματισμού σε NesC.

► Υψηλού Επιπέδου - High Level Software

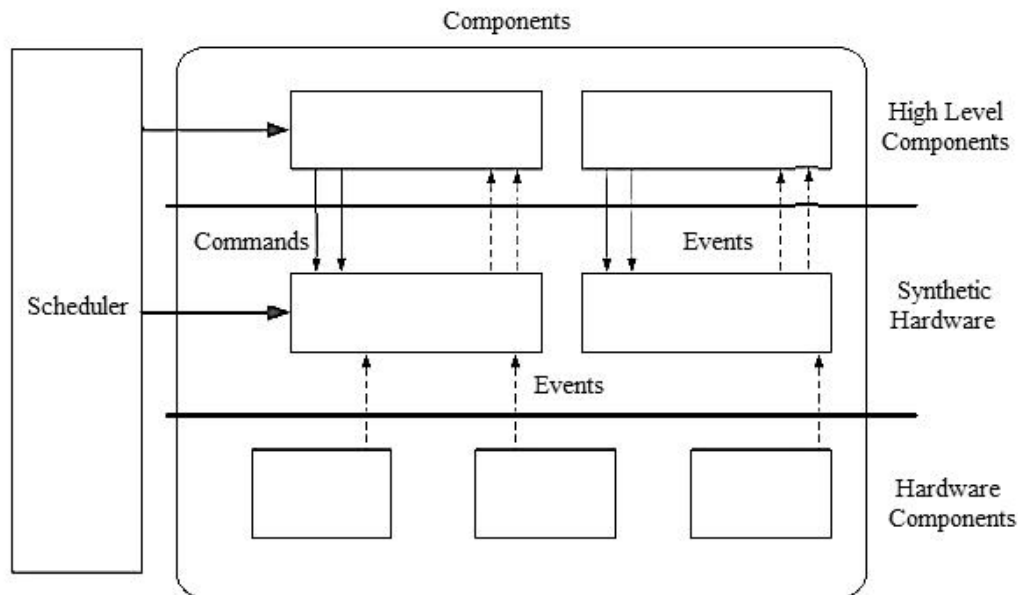
Είναι συστατικά υψηλού επιπέδου που περιέχουν την εφαρμογή, την οποία έχει συρράψει ο

χρήστης. Κάθε συστατικό του συνδέεται με ένα πλαίσιο μνήμης σταθερού μεγέθους. Ακόμη, κάθε συστατικό μπορεί να περιέχει τρία είδη συναρτήσεων, command handler, event handler και tasks.

7.9 Ο Χρονοπρογραμματισμός στο TinyOS – Scheduler

Ο χρονοπρογραμματισμός οργανώνει την λειτουργία των components. Τρέχει σε ένα πεδίο διευθύνσεων και περιέχει δύο περιβάλλοντα εκτέλεσης. Έχει τους διαχειριστές διακοπών που τρέχουν με μεγαλύτερη προτεραιότητα και διεργασίες που εξυπηρετούνται με τη λογική FIFO (First-In First-Out με μέγιστο αριθμό στην ουρά 8). Κάθε task που καλείται, τοποθετείται στη στοίβα του scheduler. Αν κάποιο event δεν τρέχει, επιτρέπει την εκτέλεση των tasks που έχουν καταφτάσει, ένα κάθε φορά, διασφαλίζοντας την ολοκλήρωσή τους. Ένα ασύγχρονο event έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα από ένα task, οπότε αν υπάρχουν μόνο tasks στη στοίβα και ξαφνικά έρθει ένα event, μπορεί να διακοπεί η εκτέλεση του task και να αρχίσει η εκτέλεση του event. Δηλαδή, ένα event μπορεί να προηγηθεί ενός task, δεν μπορεί όμως να γίνει το αντίθετο. Η εκτέλεση των events είναι ατομική μεταξύ τους, όπως ατομική είναι και η εκτέλεση μεταξύ των διαφορετικών tasks. Όταν η στοίβα αδειάσει, ο scheduler δίνει εντολή στον επεξεργαστή να μπει σε κατάσταση SLEEP. Τα περιφερειακά όμως παραμένουν ενεργά, συνεπώς μια διακοπή μπορεί να επανεκκινήσει την ίδια διαδικασία. Ο scheduler υλοποιείται στο αρχείο sched.c που υπάρχει στον κατάλογο system του TinyOS και διαφέρει από έκδοση σε έκδοση.

Το σχεδιάγραμμα μιας εφαρμογής και των components φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Εικόνα 52: Σχεδιάγραμμα μια εφαρμογής και των components

7.10 Η Επικοινωνία στο TinyOS

Τα επίπεδα της στοίβας, που βασίζεται η επικοινωνία στο TinyOS όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο, περιγράφονται ως εξής:

- Επίπεδο bit (RFM – RF Module – Μονάδα Ράδιο-Επικοινωνίας)

Σε αυτό το επίπεδο, καθορίζεται ο τρόπος λειτουργίας, εκπομπή ή λήψη, και ο ρυθμός δειγματοληψίας, να ληφθεί ή να αποσταλεί ένα bit και να υπάρξει κατάλληλη ειδοποίηση για το αν η εκπομπή ή λήψη ολοκληρώθηκε ώστε να μεταβεί το RFM σε ανενεργή κατάσταση ή γενικά σε κατάσταση μικρής κατανάλωσης ενέργειας.

- Επίπεδο byte (Radio byte)

Αυτό το επίπεδο είναι υπεύθυνο για την κωδικοποίηση των μεταδιδόμενων bits σε επίπεδο bytes, την ανίχνευση και διόρθωση λαθών και την ανίχνευση του επιπέδου ισχύος του σήματος ώστε να μπορεί να εντοπιστεί αν το κανάλι είναι ελεύθερο για τη μετάδοση δεδομένων, διαφορετικά εισέρχεται η μονάδα επικοινωνίας σε αναμονή για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα.

- Επίπεδο πακέτου (Radio Packet)

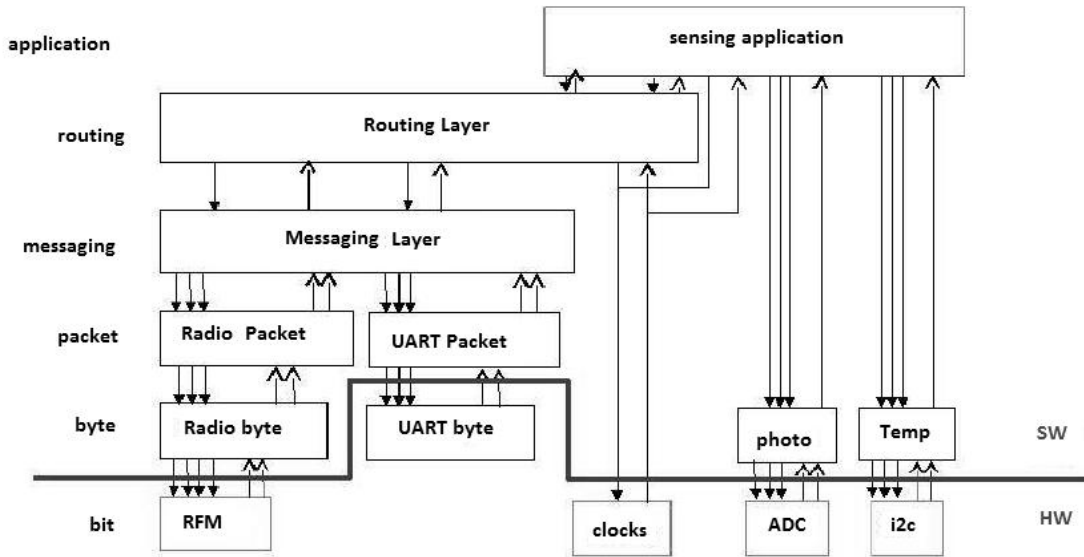
Σε αυτό το επίπεδο, γίνεται 16-bit crc έλεγχος και δημιουργία πλεονάζουσας εκπομπής δεδομένων, δηλαδή προστίθενται και άλλα bits στο μεταδιδόμενο πακέτο.

- Επίπεδο μηνύματος (Messaging)

Εδώ οι πληροφορίες ενσωματώνονται σε πακέτα και γίνεται δρομολόγησή τους σύμφωνα με κατάλληλες διευθύνσεις προς τη μονάδα επικοινωνίας (broadcast) ή τη σειριακή θύρα (UART).

- Επίπεδο Εφαρμογής

Σε αυτό το επίπεδο αναπτύσσονται οι εφαρμογές, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης και γενικά η επεξεργασία των δεδομένων που παρέχονται από τα πακέτα μετάδοσης.



Εικόνα 53: Στοιβά Επικοινωνίας στο TinyOS

7.11 Ενεργά Μηνύματα – Active Messages

Τα ενεργά μηνύματα αποτελούν ένα απλό παράδειγμα για επικοινωνία που βασίζεται σε ανταλλαγή μηνυμάτων και χρησιμοποιείται ευρέως σε παράλληλα καταναμημένα υπολογιστικά συστήματα. Αποκαλούνται ενεργά επειδή η δομή τους αποτελείται από μία ενεργή επικεφαλίδα (header) και τα δεδομένα που αναπαριστούν τη χρήσιμη πληροφορία (data payload). Η επικεφαλίδα περιέχει τη διεύθυνση προορισμού, τον τύπο του μηνύματος, την ομάδα που ανήκει το μήνυμα και το μήκος του. Τα πεδία αυτά καθορίζουν πλήρως το μήνυμα. Ο πυρήνας λοιπόν, της επικοινωνίας του TinyOS στηρίζεται σε ενεργά μηνύματα, τα οποία έχουν σχετικά μικρό μήκος (36-bytes το μέγιστο).

Κάθε ενεργό μήνυμα περιέχει το όνομα ενός χειριστή επιπέδου εφαρμογής 1-byte, ο οποίος επικαλείται κατά την άφιξη του μηνύματος στον κόμβο και το φορτίο δεδομένων περνά σαν όρισμα στον χειριστή. Η συνάρτηση του χειριστή υπηρετεί διττό σκοπό. Εξάγει το μήνυμα από το δίκτυο και είτε καλεί τοπικούς υπολογισμούς στα δεδομένα είτε στέλνει ένα μήνυμα ανταπόκρισης. Το δίκτυο μοντελοποιείται σαν ένας αγωγός με μικρούς χώρους αποθήκευσης, ελαχιστοποιώντας έτσι πολλές από τις αποθηκευτικές δυσκολίες, τις οποίες αντιμετωπίζουν τα τμήματα που συμμετέχουν στην επικοινωνία, τα οποία κάνουν χρήση πρωτοκόλλων παρεμπόδισης (blocking protocols) ή ειδικών buffers για αποστολή και λήψη.

Οι χειριστές των μηνυμάτων πρέπει να είναι σε θέση να εκτελούνται γρήγορα και ασύγχρονα προκειμένου να αποφευχθεί η συμφόρηση του δικτύου και να εξασφαλιστεί η επαρκής λειτουργία. Αν και τα ενεργά μηνύματα έχουν τις ρίζες τους σε παράλληλα υπολογιστικά συστήματα μεγάλης κλίμακας, οι ίδιες βασικές ιδέες μπορούν χρησιμοποιηθούν ώστε να ικανοποιούν τους περιορισμούς που τίθενται από τα δίκτυα αισθητήρων. Επιπλέον, το μοντέλο των χειριστών βασισμένο στην κλήση μέσω γεγονότων, επιτρέπει στους προγραμματιστές να

αποφεύγουν τις καταστάσεις αναμονής (busy-waiting) για δεδομένα που λαμβάνονται και επιτρέπει στο σύστημα να επικαλύπτει την επικοινωνία με άλλες δραστηριότητες.

7.12 Διεπαφές– Interfaces

Οι διεπαφές αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι ενός προγράμματος. Χρησιμοποιούν στην απόδοση ενός αφηρημένου ορισμού στην αλληλεπίδραση μεταξύ των components. Τα interfaces μπορούν να παρέχονται ή να χρησιμοποιούνται από ένα component. Τα παρεχόμενα interfaces αντιπροσωπεύουν τις λειτουργίες που παρέχει ένα component (provider), ενώ τα χρησιμοποιούμενα interfaces, τις λειτουργίες που απαιτεί ένας χρήστης (user) να του δοθούν για την εκτέλεση της λειτουργίας που του έχει ανατεθεί. Σε αναλογία με την Java, ένα interface απαγορεύεται να περιέχει κώδικα για την εκτέλεση υπολογισμών και το μόνο που μπορεί να περιέχει είναι απλές δηλώσεις συναρτήσεων (commands) που πρέπει να υλοποιούνται από το component που παρέχει το interface και δηλώσεις συναρτήσεων (events) που πρέπει να υλοποιούνται από το component που χρησιμοποιεί το interface. Ο τρόπος αυτός χρήσης των διεπαφών τους δίνει την ιδιότητα της διπλής κατεύθυνσης και σχετίζεται με την split-phase operation. Ένα component δεν μπορεί να καλέσει μια command, αν δεν παρέχει μια υλοποίηση για το αντίστοιχο event που θα προκαλέσει στο τέλος της εκτέλεσής της.

7.13 Δομοστοιχεία– Modules

Η υλοποίηση των modules γίνεται με τη γλώσσα προγραμματισμού NesC. Στο επίπεδο των απλών δηλώσεων, η NesC είναι σχεδόν πανομοιότυπη με τη C. Η διαφορά υφίσταται κυρίως στον τρόπο κλήσης των συναρτήσεων από το κυρίως πρόγραμμα και την εμβέλεια των μεταβλητών. Το module είναι ένα component που περιέχει τον πυρήνα της εφαρμογής TinyOS που θέλει να υλοποιήσει ο χρήστης. Ο κώδικας ενός module παρέχει και χρησιμοποιεί ένα ή περισσότερα interfaces και αποτελείται από υλοποιήσεις των commands που παρέχει και των events που χρησιμοποιεί. Δηλαδή, υλοποιεί τα interfaces που έχει δηλώσει ότι χρησιμοποιεί.

7.14 Διαρθρώσεις– Configurations

Τα modules αποτελούν τις βασικές δομικές μονάδες μιας TinyOS εφαρμογής, όπου υλοποιείται η εκτελέσιμη λογική της. Οι συναρτήσεις και οι μεταβλητές που μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα module, είναι μόνο αυτές που έχουν οριστεί στο δικό του τοπικό namespace.

Κεφάλαιο 7

Συνεπώς, ένα module από μόνο του δεν διαθέτει τρόπο να καλέσει κάποιο άλλο. Για να συμβεί αυτό, πρέπει να αποτυπωθεί το σύνολο ονομάτων ενός module component μέσω μιας διασύνδεσης, στο σύνολο ονομάτων ενός component. Η διαδικασία σύνδεσης των components μεταξύ τους αποκαλείται wiring (καλωδίωση) και υλοποιείται από ένα ξεχωριστό component που ονομάζεται configuration. Ένα configuration μοιάζει με ένα module όσον αφορά τη βασική δομή και χωρίζεται σε πεδίο για specification (προδιαγραφές) και σε πεδίο για implementation (υλοποίηση).

Τα configurations είναι πολύ απλά και διαθέτουν μόλις τρεις τελεστές. Το δεξί βέλος (->), το αριστερό βέλος (<-) και το ίσον (=). Οι δύο πρώτοι τελεστές εξυπηρετούν το βασικό wiring, το οποίο είναι ουσιαστικά μια διαδικασία αντιστοίχισης interface ενός component σε interface ενός άλλου component. Η κατεύθυνση είναι πάντα από την πλευρά του χρήστη (user) προς αυτή του παροχέα (provider) και επίσης διαχωρίζει τις κλήσεις διακατατευθυντήριων interfaces και στις δύο κατευθύνσεις (used to provided commands και provided to used events). Έτσι, ένα module που χρησιμοποιεί ένα interface, βρίσκει το module στο οποίο υλοποιείται το interface μέσω του wiring στο configuration.

Κεφάλαιο 8

Ο Ασύρματος Αισθητήρας IRIS-XM2110

8.1 Γενικά

Ο αισθητήρας IRIS-XM2110 χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής εργασίας. Το mote IRIS-XM2110 κατασκευάζεται από την Crossbow και προέρχεται από την σειρά IRIS, η οποία προσφέρει πολλές νέες δυνατότητες που βελτιώνουν τη συνολική λειτουργία των ασύρματων προϊόντων δικτύωσης αισθητήρων της Crossbow και αποτελεί την τελευταία γενιά των motes της τεχνολογίας της.



Εικόνα 54: Ο αισθητήρας IRIS-XM2110

Τα κυριότερα γνωρίσματα και τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα IRIS είναι :

- Ασύρματος πομποδέκτης Atmel AT86RF230 των 250 kbps
- Συμβατός με το IEEE 802.15.4 και συχνότητα λειτουργίας στα 2.4 GHz
- Μικροελεγκτής 7.37 MHz Atmel Atmega 1281 (8K RAM, 128K Flash)
- Πάνω στην πλατφόρμα (onboard) διαθέτει κεραία με εσωτερική και εξωτερική εμβέλεια

Κεφάλαιο 8

- Υποστηρίζει το λειτουργικό σύστημα TinyOS
- Σχεδιασμένος ειδικά για μεγάλου βάθους (deeply) ενσωματωμένα δίκτυα αισθητήρων
- Ασύρματη επικοινωνία με τη δυνατότητα κάθε κόμβος να λειτουργεί ως δρομολογητής
- Προγραμματισμός και συλλογή δεδομένων μέσω θύρας USB
- Χαμηλή κατανάλωση ρεύματος
- Υποστήριξη επέκτασης 51-pin (συνδετήρας επέκτασης) για λειτουργία του αισθητήρα ως αισθητήρα φωτός, θερμοκρασίας, πίεσης και άλλων επιφανειών αισθητήρων της Crossbow αλλά και αναλογικές εισόδους, ψηφιακές I/O, I2C, SPI, UART κ.ά
- Άμεση εξάπλωση της ακολουθίας του ραδιοφάσματος κάνοντας το ανθεκτικό στις παρεμβολές RF και παρέχοντας εγγενή ασφάλεια των δεδομένων
- Μέχρι και τρεις φορές καλύτερη εμβέλεια και διπλάσια μνήμη προγράμματος από προηγούμενα MICA Motes
- Δοκιμές εξωτερικής οπτικής επαφής γραμμικής κλίμακας με απόδοση 500 μέτρων μεταξύ των κόμβων χωρίς ενίσχυση

8.2 Τα Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Μονάδας IRIS-XM2110

Η υλοποίηση και ανάπτυξη του αισθητήρα αυτού στηρίχθηκε στην χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές πλατφορμών και στην ευκολία χρήσης. Ο σχεδιασμός της μονάδας IRIS στηρίζεται στην βασική αρχή ότι ο κόμβος βρίσκεται σε αδράνεια στο σύνολο του χρόνου, αφυπνίζεται άμεσα με την ύπαρξη ενός συμβάντος, το επεξεργάζεται και επιστρέφει σε αδράνεια. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας αυτής.

Processor/Radio Board	XM2110CA	Remarks
Processor Perfomance		
Program Flash Memory	128K bytes	> 100,000 Measurements
Measurement (Serial) Flash	512K bytes	
RAM	8K bytes	
Configuration EEPROM	4K bytes	
Serial Communications	UART	0-3V transmission levels
Analog to Digital Converter	10 bit ADC	8 channel, 0-3V input
Other Interfaces	Digital I/O, I2C, SPI	
Current Draw	8mA	Active mode
	8μA	Sleep mode (total)
RF Transceiver		
Frequency band	2405 MHz to 2480 MHz	ISM band, programmable in 1 MHz steps
Transmit (TX) data rate	250 kbps	
RF power	3dBm (typ)	
Receive Sensitivity	-101 dBm (typ)	
Adjacent channel rejection	36 dB	+ 5 MHz channel spacing
	34 dB	- 5 MHz channel spacing
Outdoor Range	> 300 m	¼ wave dipole antenna, LOS
Indoor Range	> 50 m	¼ wave dipole antenna, LOS
Current Draw	16 mA	Receive mode
	10 mA	TX, -17 dBm
	13 mA	TX, - 3 dBm
	17 Ma	TX, 3 dBm
Electromechanical		
Battery	2 X AA batteries	Attached pack
External Power	2.7 V – 3.3 V	Molex connector provided
User Interface	3 LEDS	Red, green and yellow
Size (in)	2.25 x 1.25 x 0.25	Excluding battery pack
(mm)	58 x 32 x 7	Excluding battery pack
Weight (oz)	0.7	Excluding batteries
(grams)	18	Excluding batteries
Expansion Connector	51-pin	All major I/O signals

Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα IRIS-XM2110

Κεφάλαιο 8

8.2.1 Ο Μικροελεγκτής Atmel ATmega 1281

Έχει παρατηρηθεί ότι η τάση στους χρησιμοποιούμενους μικροελεγκτές, είναι η ολοένα μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, η ενσωμάτωση περισσότερων «ενσωματωμένων» περιφερειακά και όλα αυτά πάνω σε μια ποικιλία από μεγέθη μνήμης RAM και flash. Παρατίθεται ο Πίνακας 4, όπου παρουσιάζεται η εξέλιξη των μικροελεγκτών.

Manufacturer	Device	RAM (kB)	Flash (kB)	Active (mA)	Sleep (μ A)	Release
Atmel	AT90LS8535	0.5	8	5	15	1998
	Mega128	4	128	8	20	2001
	Mega165/325/645	4	64	2.5	2	2004
General Instruments	PIC	0.025	0.5	19	1	1975
Microchip	PIC Modern	4	128	2.2	1	2002
Intel	4004 4-bit	0.625	4	30	N/A	1971
	8051 8-bit Classic	0.5	32	30	5	1995
	8051 16-bit	1	16	45	10	1996
Philips	80C51 16-bit	2	60	15	3	2000
Motorola	HC05	0.5	32	6.6	90	1988
	HC08	2	32	8	100	1993
	HCS08	4	60	6.5	1	2003
Texas Instruments	TSS400 4-bit	0.03	1	15	12	1974
	MSP430F 14x 16-bit	2	60	1.5	1	2000
	MSP430F 16x 16-bit	10	48	2	1	2004
Atmel	AT91 ARM Thumb	256	1024	38	160	2004
Intel	XScale PXA27X	256	N/A	39	574	2004

Πίνακας 4: Η εξέλιξη των μικροελεγκτών

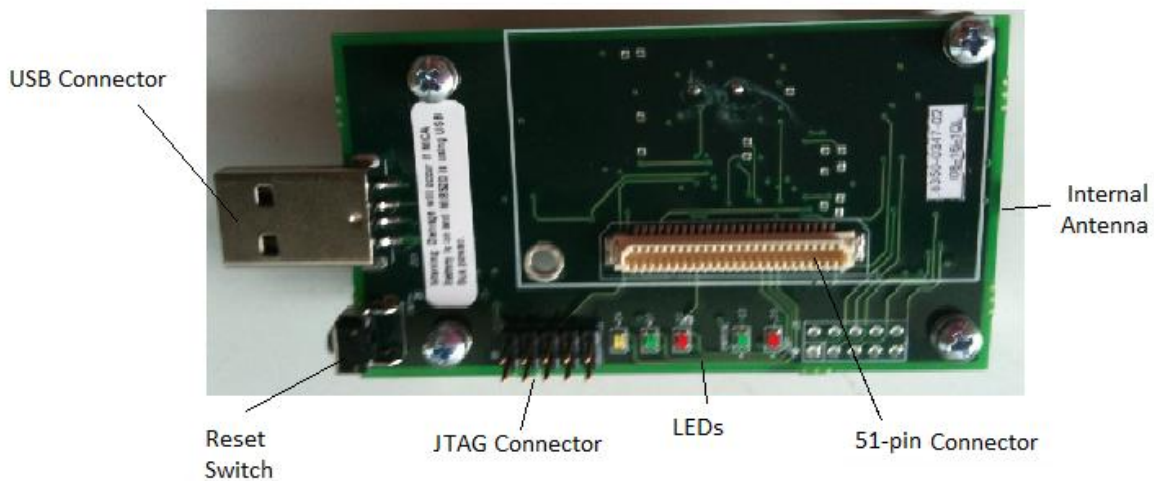
Ο αισθητήρας IRIS-XM2110CA βασίζεται στον Atmel ATmega1281. Ο ATmega1281 αναπτύχθηκε από την Atmel με την AVR, η οποία είναι μια τροποποιημένη αρχιτεκτονική του πανεπιστημίου Harvard των 8-bit. Είναι ένας μικροελεγκτής υψηλής απόδοσης και χαμηλής κατανάλωσης που λειτουργεί με το λογισμικό MoteWorks™. Το MoteWorks™ επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών με προσαρμοσμένους αισθητήρες και είναι ειδικά βελτιστοποιημένο για χαμηλής ισχύος δίκτυα που λειτουργούν με μπαταρία. Το MoteWorks™ βασίζεται στο TinyOS και παρέχει αξιόπιστη δικτύωση των ad-hoc δικτύων. Αυτός ο μικροελεγκτής συνδυάζει 128KB ISP flash μνήμη, 8KB SRAM και 4KB EEPROM.



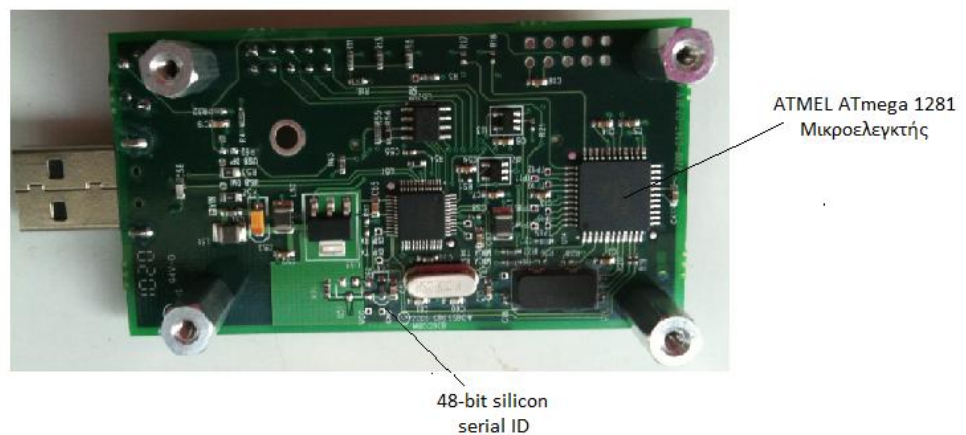
Εικόνα 55: Ο μικροελεγκτής ATmega 1281

8.2.2 Σύνδεση με Υπολογιστή

Ο αισθητήρας IRIS-XM2110 χρησιμοποιεί ένα USB ελεγκτή για επικοινωνία με τον υπολογιστή. Η σύνδεση αυτή είναι απαραίτητη τόσο για τον προγραμματισμό του mote όσο και για την επικοινωνία του WSN με τα υπόλοιπα δίκτυα εφαρμογών. Για να είναι εφικτή αυτή η επικοινωνία με το mote χρειάζεται η εγκατάσταση κάποιων οδηγών (drivers). Μπορούν να είναι συνδεδεμένα πολλαπλά motes σε έναν υπολογιστή. Ένας σταθμός βάσης επιτρέπει την ομαδοποίηση των δεδομένων του δικτύου αισθητήρων πάνω σε ένα υπολογιστή ή κάποιας άλλης υπολογιστικής πλατφόρμας. Κάθε IRIS Mote μπορεί να λειτουργήσει ως ένας σταθμός βάσης όταν είναι συνδεδεμένος με μία τυποποιημένη διεπαφή υπολογιστή ή πύλη.



Εικόνα 56: IRIS-XM2110 (άνω όψη)



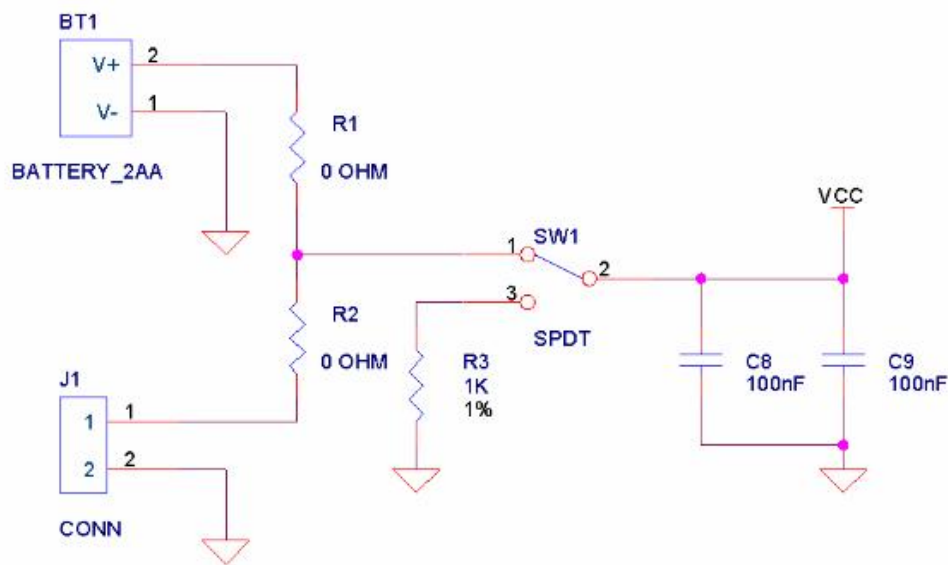
Εικόνα 57: IRIS-XM2110 (κάτω όψη)

8.2.3 Τροφοδοσία και Κατανάλωση Ενέργειας

Η συσκευή λειτουργεί με δύο μπαταρίες τύπου AA, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για λειτουργία στο εύρος τάσης 2.1V με 3.6V DC. Εάν η συσκευή είναι συνδεδεμένη στη θύρα USB για προγραμματισμό ή επικοινωνία με τον H/Y τότε μπορεί να τροφοδοτηθεί μέσω της θύρας αυτής. Σε αυτή την περίπτωση η τάση τροφοδοσίας είναι 3V και δεν είναι απαραίτητη η χρήση μπαταρίας. Η κατανάλωση ενέργειας ενός αισθητήρα δεν αφορά μόνο τον μικροελεγκτή ή/και τον πομποδέκτη, αλλά επίσης και τα βοηθητικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η ποσότητα του ρεύματος που χρειάζεται για κάθε λειτουργία του IRIS-XM2110.

Operating Mode	M2110 Current (mA)
ATMega1281V, full operation	6 (7.37 MHz)
ATMega1281V, sleep	0.010
Radio, receive	16
Radio, transmit (1 mW power)	17
Radio, sleep	0.001
Serial flash memory, write	15
Serial flash memory, read	4
Serial flash memory, sleep	0.002

Πίνακας 5: Οι απαιτήσεις ρεύματος του αισθητήρα υπό διάφορες λειτουργίες



Εικόνα 58: Διάγραμμα τροφοδοτικού του IRIS-XM2110

8.2.4 Κεραία

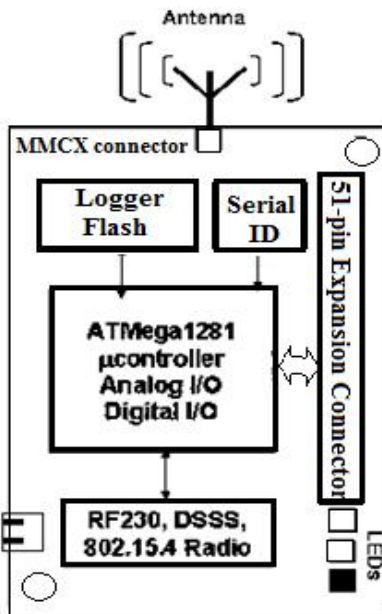
Η κεραία αποτελεί το βασικό τμήμα κάθε ασύρματου συστήματος. Μια κεραία διευκολύνει τη μεταφορά της λήψης ενός RF σήματος από και προς το ελεύθερο χώρο. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να λαμβάνεται για την επιλογή της κεραίας ή το σχέδιο ώστε να παρέχει τη σωστή κάλυψη. Ο καλός σχεδιασμός της κεραίας είναι ο πιο κρίσιμος παράγοντας για την επίτευξη μεγάλης και σταθερής απόδοσης σε μία ασύρματη εφαρμογή. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε χαμηλής ισχύος RF πομποδέκτες και σε συμπαγή (compact) σχεδιασμό κεραίων, όπου ο χώρος της κεραίας είναι μικρότερος από τον αναμενόμενο.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία κεραίων τόσο ως προς τη μορφή όσο και στα χαρακτηριστικά και η επιλογή τους βασίζεται στη συχνότητα λειτουργίας της εφαρμογής, το εύρος ζώνης, την ισχύ εκπομπής /λήψης, την πόλωση, τις διαστάσεις, την κατευθυντικότητα και το κόστος κατασκευής.

Το εύρος και η επίδοση του ασύρματου μέσου επηρεάζεται έντονα από την επιλογή της κεραίας και την τοποθέτησή της στο χώρο. Ακόμη, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για να εξασφαλιστεί συμμόρφωση τους κανονισμούς της FCC (Federal Communication Commission – Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών). Λόγω του μικρού φυσικού μεγέθους της κεραίας, συνήθως επιλέγεται το μήκος του σύρματος να είναι ίσο με το ένα τέταρτο του μήκους κύματος ανάλογα με τη συχνότητα της εφαρμογής. Αυτό το είδος της κεραίας συχνά ονομάζεται κεραία μονόπολο. Οι κεραίες $\lambda/4$ εκπέμπουν ομοιόμορφα γύρω τους κατά το οριζόντιο επίπεδο και δεν εκπέμπουν καθόλου προς τα επάνω. Αυτό τις κάνει κατάλληλες για χρήση στις περιπτώσεις που οι δέκτες βρίσκονται ολόγυρα και στο ίδιο επίπεδο με τον πομπό.

Το μήκος της κεραίας του IRIS-XM2110 που λειτουργεί στα 2.4 GHz είναι

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 2.4 \cdot 10^9} = 0.03215m \Rightarrow l = 3.215cm .$$



Εικόνα 59: Διάγραμμα της μονάδας IRIS-XM2110

8.2.5 Ο Πομποδέκτης Atmel AT86RF230

Το mote IRIS-XM2110 είναι συμβατό με το IEEE 802.15.4 και θα πρέπει να χρησιμοποιεί ένα πομποδέκτη RF σχεδιασμένο για χαμηλής ισχύος και χαμηλής τάσης ασύρματες εφαρμογές. Ο πομποδέκτης αυτός είναι ο AT86RF230 της Atmel και χρησιμοποιεί διαμόρφωση OQPSK (Offset Quadrature Phase Keying) με μισό ημιτονοειδές παλμό διαμόρφωσης.

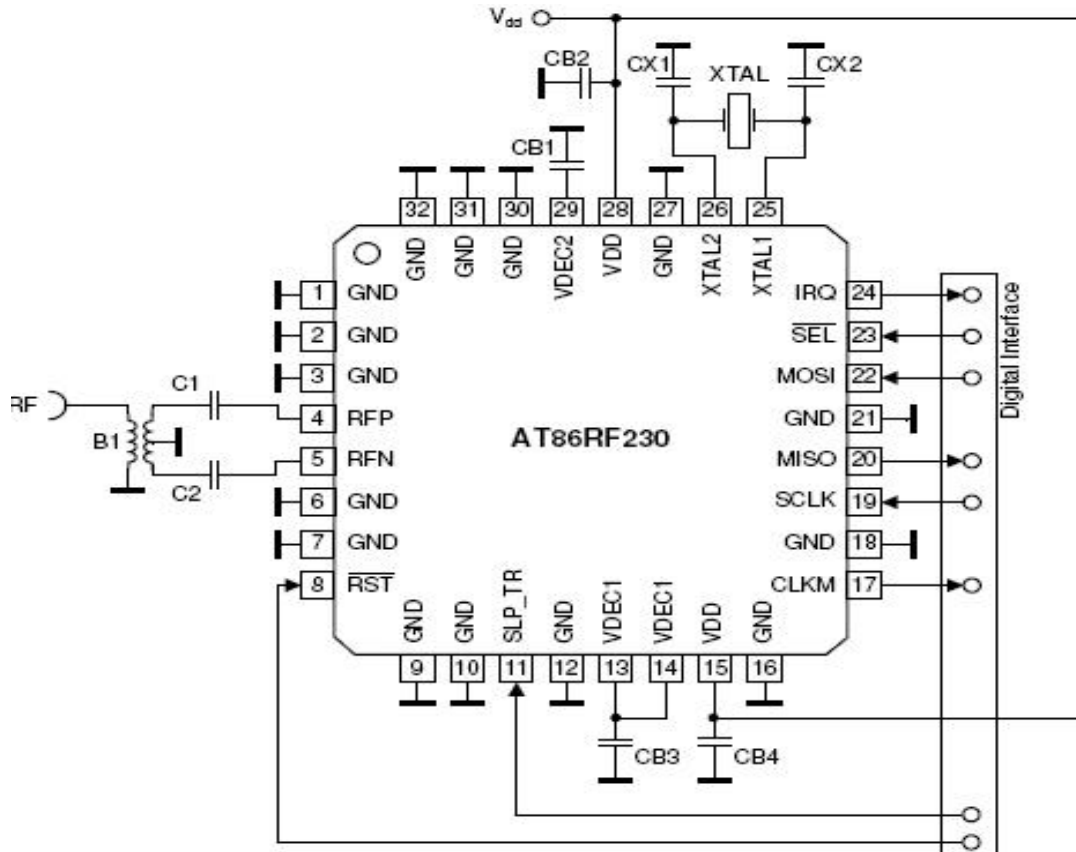
Ο πομποδέκτης αυτός της Atmel μπορεί να συντονιστεί με τα κανάλια του 802.15.4 που είναι αριθμημένα από το 11 στα 2.405 GHz έως το 26 στα 2.480 GHz με εύρος ζώνης 5MHz. Δύο σημαντικά οφέλη αυτού του πομποδέκτη είναι ο εντυπωσιακός ρυθμός των 250Kbps και η απλή διεπαφή SPI (SDH Physical Interface).

Το κύκλωμα του πομποδέκτη AT86RF230 με ένα μονό άκρο (single-ended) RF σύνδεσης φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Ο συμμετροασυμμετριστής (balun) B1 μετατρέπει των 100Ω διαφορικό της θύρας RF σε μία 50Ω μονού άκρου θύρας RF. Οι πυκνωτές C1 και C2 παρέχουν AC σύζευξη των σημάτων RF στα RF pins. Οι πυκνωτές αποσύνδεσης της παροχής ρεύματος (CB2, CB4) συνδέεται με το εξωτερικό αναλογικό pin τροφοδοσίας (EVDD, pin 28) και το εξωτερικό ψηφιακό pin τροφοδοσίας (DEVDD, pin 15).

Οι πυκνωτές CB1 και CB2 είναι πυκνωτές παράκαμψης για τους ολοκληρωμένους αναλογικούς και ψηφιακούς ρυθμιστές τάσης ώστε να διασφαλιστεί η σταθερή λειτουργία (1μF η προτεινόμενη λειτουργία). Όλοι οι πυκνωτές παράκαμψης τοποθετούνται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στα pins του AT86RF230 για να έχουν χαμηλής αντίστασης και χαμηλής αυτεπαγωγής σύνδεση προς τη γη ώστε να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση.

Το κρύσταλλο (XTAL), οι δύο πυκνωτές φορτίου (CX1, CX2) και τα εσωτερικά κυκλώματα που συνδέονται στα pins XTAL1 και XTAL2, μορφοποιούν το κρυσταλλικό ταλαντωτή. Οι κρυσταλλικές γραμμές πρέπει να δρομολογούνται όσο το δυνατόν συντομότερες και όχι στη γειτνίαση (proximity) των ψηφιακών I/O σημάτων.

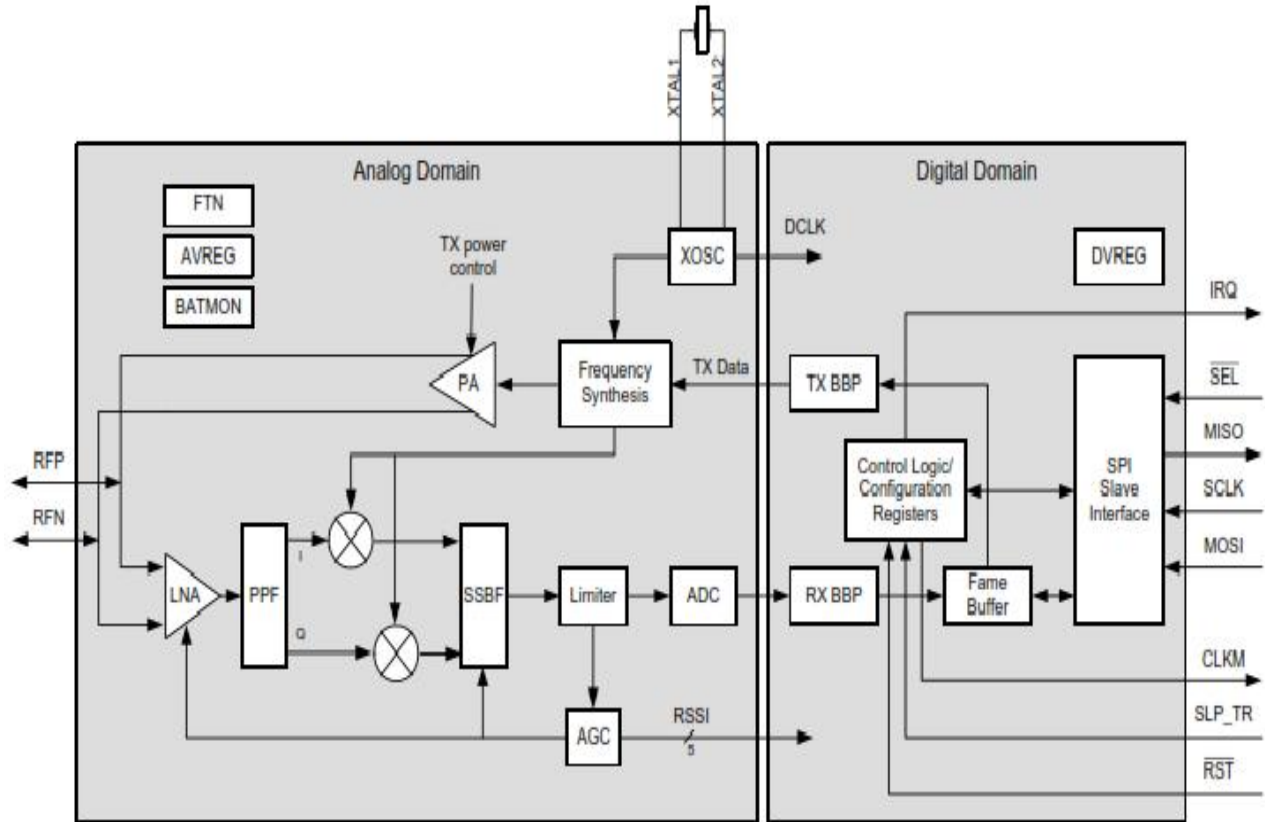
Η διαφωνία (crosstalk) από τα ψηφιακά σήματα στα pins του κρυστάλλου ή του RF υποβαθμίζουν την απόδοση του συστήματος. Ως εκ τούτου, ένα βαθυπερατό φίλτρο (C3, R2) τοποθετείται κοντά στο pin του CLKM εξόδου για τη μείωση της ακτινοβολίας των αρμονικών σημάτων. Αυτό δεν είναι αναγκαίο εάν το pin του CLKM δεν χρησιμοποιείται. Έπειτα, η έξοδος θα πρέπει να είναι απενεργοποιημένη κατά τη διάρκεια εκκίνησης της συσκευής.



Εικόνα 60: Ο πομποδέκτης AT86RF230

Αυτός ο πομποδέκτης παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον μεταξύ του μικροελεγκτή και της κεραίας. Αποτελείται από το αναλογικό πομποδέκτη και τον ψηφιακό αποδιαμορφωτή, συμπεριλαμβανομένου το συγχρονισμό χρόνου και συχνότητας και καταχωρητή δεδομένων. Ο αριθμός των εξωτερικών στοιχείων (components) ελαχιστοποιείται ώστε να είναι υποχρεωτικά μόνο μια κεραία και τέσσερις κρυσταλλικούς αποσυνδεδετές πυκνωτές (decoupling capacitors). Η αμφίδρομη κεραία χρησιμοποιείται για μετάδοση και λήψη.

Το λαμβανόμενο σήμα RF στα RFN και RFP pins διοχετεύονται διαφορετικά στο ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA) για το φίλτρο RF (PPF) ώστε να δημιουργηθεί ένα σύνθετο σήμα. Αυτό το σήμα μετατρέπεται από το μείκτη σε μία ενδιάμεση συχνότητα και τροφοδοτείται στο ολοκληρωμένο κανάλι φίλτρου (SSBF). Ο περιορισμένος ενισχυτής παρέχει επαρκή κέρδος για να το οδηγήσει επιτυχώς στο αναλογικό – ψηφιακό μετατροπέα (ADC) και παράγεται ένα ψηφιακό σήμα RSSI (Radio Signal Strength Indication – Ένδειξη Έντασης Ραδιοσήματος) με 3dB granularity (κοκκιότητα). Το σήμα εξόδου του ADC δειγματοληπτείται από το ψηφιακό δέκτη. Διαμορφώνεται με OQPSK και 32- μήκους κωδικοποίηση.



Εικόνα 61: Το διάγραμμα του AT86RF230

8.3 Τοπικές Συνθήκες Λειτουργίας της Μονάδας IRIS-XM2110

Για την σωστή λειτουργία του αισθητήρα IRIS-XM2110 έχουν οριστεί συγκεκριμένες προδιαγραφές. Οι βασικές συνθήκες λειτουργίας αυτής της μονάδας παρατίθενται στον Πίνακα 6.

Παράμετρος	Μονάδα Λειτουργίας
Τάση λειτουργίας κατά την ασύρματη εκπομπή	2.7 έως 3.6 Volts
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40 έως +85 °C
Εύρος συχνοτήτων RF	2.4 έως 2.4835 GHz
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	250Kbps
Ονομαστική ισχύς εξόδου	-3 έως 0 dBm
Κατανάλωση ρεύματος σε κατάσταση μη λειτουργίας	1 μ A
Κατανάλωση ρεύματος σε κατάσταση αδράνειας	20 μ A
Κατανάλωση ρεύματος κατά την ασύρματη λήψη	19.7 mA
Κατανάλωση ρεύματος κατά την ασύρματη μετάδοση σε 0 dBm	17.4 mA

Πίνακας 6: Τυπικές συνθήκες λειτουργίας του αισθητήρα IRIS-XM2110

Κεφάλαιο 9

Πειραματική Ανάλυση των Παρεμβολών των WLAN σε 802.15.4 IRIS-XM2110 Motes

9.1 Εισαγωγικά

Σε προηγούμενα κεφάλαια αναφέρθηκαν ορισμένα στοιχεία τόσο για τα πρωτόκολλα επικοινωνίας όσο και για τις πλατφόρμες των αισθητήρων. Σε αυτό το κεφάλαιο λοιπόν, θα μελετηθούν με πειραματικό τρόπο οι παρεμβολές που μπορεί να υπάρχουν ανάμεσα σε ένα IEEE 802.11 WLAN και ένα IEEE 802.15.4 WSN, τα οποία λειτουργούν σε πραγματικό περιβάλλον. Θα μελετηθεί ο τρόπος που επηρεάζεται η μετάδοση δεδομένων μεταξύ των αισθητήρων υπό την παρουσία κίνησης Wi-Fi, εκτιμώντας το ρυθμό απωλειών πακέτων PLR (Packet Error Ratio). Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στην αίθουσα EMC του εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων.

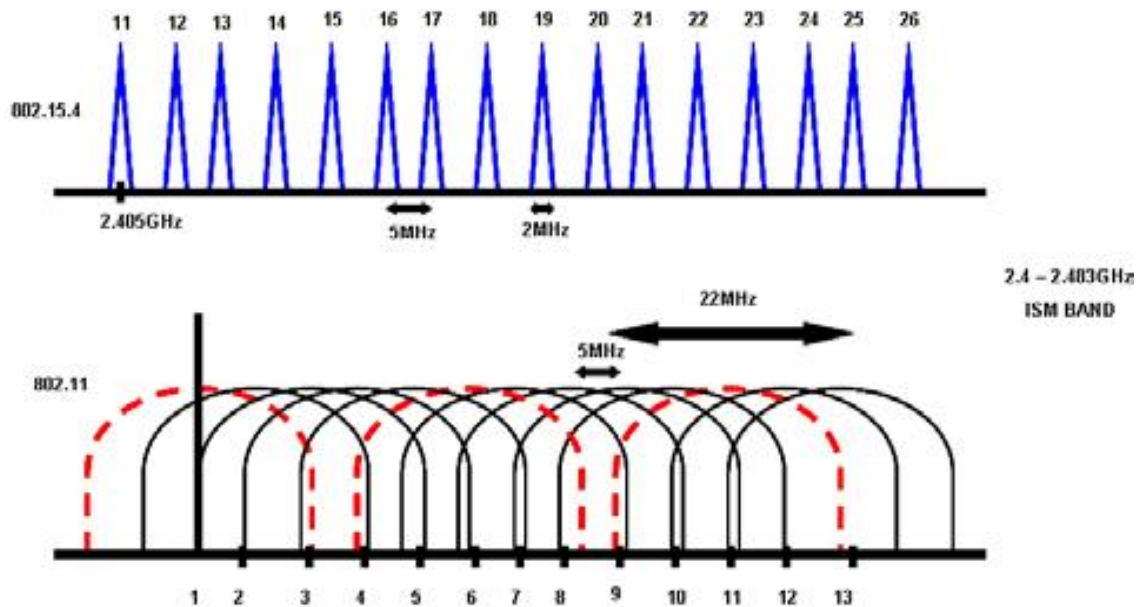


Εικόνα 62: Η αίθουσα EMC του εργαστηρίου

Καθώς οι συσκευές ασύρματης δικτύωσης πολλαπλασιάζονται συνεχώς, θα πρέπει

Κεφάλαιο 9

«αναγκαστικά» να λειτουργούν μέσα σε ένα περιβάλλον με πολλές παρεμβολές από συνυπάρχουσες συσκευές. Προκύπτει, επομένως, η ανάγκη συνύπαρξης του προτύπου 802.15.4 των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με το πρότυπο 802.11 των ασύρματων τοπικών δικτύων στη ζώνη συχνοτήτων ISM των 2.4 GHz.



Εικόνα 63: Τα κανάλια του 802.11 και του 802.15.4 στην ζώνη συχνοτήτων ISM των 2.4 GHz

Στην Εικόνα 63 περιγράφονται τα κανάλια συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται τόσο από το πρωτόκολλο 802.15.4 όσο και από το 802.11. Το εύρος ζώνης διαύλου του 802.11 είναι 22 MHz και στις περισσότερες περιπτώσεις συμπίπτει με 4 κανάλια του 802.15.4, του οποίου το εύρος ζώνης είναι 2 MHz. Τη συνύπαρξη των δύο προτύπων θα γίνει η προσπάθεια να μελετηθεί πειραματικά με τις μετρήσεις που θα ληφθούν στο χώρο του εργαστηρίου.

9.2 Οι Μονάδες και τα Όργανα του Πειράματος

Για τη διεξαγωγή του πειράματος και τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τα εξής όργανα και συσκευές:

Αναλυτής Φάσματος – Spectrum Analyzer Agilent E4403B

Ο αναλυτής φάσματος είναι η συσκευή που χρησιμοποιείται για την εξέταση της φασματικής σύνθεσης των ηλεκτρικών, ακουστικών ή οπτικών κυματομορφών. Επίσης, μετράει το φάσμα ισχύος. Εμφανίζει το πλάτος του σήματος καθώς μεταβάλλεται με την αλλαγή της συχνότητας του σήματος. Ακόμη, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του εύρους ζώνης ενός ψηφιακού ή αναλογικού σήματος με άμεση παρατήρηση. Η συχνότητα εμφανίζεται στον οριζόντιο άξονα και το πλάτος στον κάθετο άξονα. Στη διεξαγωγή αυτού του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής φάσματος Agilent E4403B για τη μέτρηση της ισχύος του δρομολογητή του WLAN.

Ο αναλυτής φάσματος Agilent E4403B είναι της σειράς ESA-L και λειτουργεί στο εύρος συχνοτήτων 9 KHz έως 3.0 GHz.



Εικόνα 64: Ο Spectrum Analyzer Agilent E4403B

Τα βασικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα αυτού του spectrum analyzer είναι:

- 1.1 dB συνολική ορθότητα πλάτους
- 100 Hz έως 5 MHz RBW (Resolution Bandwidth – Ζωνικό Εύρος Διακριτικής Ικανότητας)
- 7.5 dBm TOI (Third Order Intercept)
- Ταχύτερος χρόνος σάρωσης στην κατηγορία του (4ms ελάχιστο)
- Πολλαπλής μορφής μέτρηση της ισχύος RF
- Συμβατότητα με το κώδικα προγραμματισμού της σειράς 8590 αναλυτών φάσματος
- Προγραμματισμός με SCPI και υποστήριξη του οδηγού IVI – COM

Κεφάλαιο 9

Κεραία Aaronia HyperLog 7060

Η κεραία αυτή όταν συνδεθεί με τον αναλυτή φάσματος, αποτελεί μια επαγγελματική συσκευή μέτρησης ραδιοσυχνοτήτων με κατευθυντικά χαρακτηριστικά. Η κεραία λόγω του μικρού της βάρους, είναι το καλύτερο συμπλήρωμα για φορητές συσκευές μέτρησης της EMC (Electromagnetic Compatibility – Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας) για τον εντοπισμό και αξιολόγηση κάθε είδους πηγής σήματος.



Εικόνα 65: Η κεραία Aaronia HyperLog 7060

Τα βασικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα αυτής της κεραίας είναι:

- * 700 MHz έως 6 GHz εύρος συχνότητας λειτουργίας
- * 100 W CW (Carrier Wave – Συνεχούς Κύματος) Μέγιστη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας
- * 50 Ω ονομαστική εμπέδηση (nominal impedance)
- * Μόνο μία κεραία ευρείας ζώνης για το πλήρες εύρος συχνοτήτων έως τα 6 GHz
- * Κατάλληλη για χρήση με αναλυτές φάσματος για τη μέτρηση EMC
- * Άριστη συμμετρία των διαγραμμάτων ακτινοβολίας
- * Κατάλληλη για κινητή χρήση και εξωτερική τοποθέτηση
- * Κατευθυντική
- * Εξαιρετικό λόγο front / back

Δρομολογητής Cisco WAP4410N

Προκειμένου να δημιουργηθεί η παρεμβάλλουσα κίνηση Wi-Fi, χρησιμοποιούμε ως σημείο πρόσβασης (Access Point - AP) το δρομολογητή Cisco WAP4410N.

Ο παρεμβολέας του WSN στο πείραμα θα χαρακτηρίζεται από τα μεγέθη:

- Διάυλος: 11
- Κεντρική Συχνότητα: 2.412 GHz
- Εύρος Ζώνης Διαύλου: 2 MHz



Εικόνα 66: Ο δρομολογητής Cisco WAP4410N

Χρησιμοποιώντας το δρομολογητή αυτό, το ασύρματο σημείο πρόσβασης της Cisco (Wireless Access Point) , είναι απλή η σύνδεση στο τοπικό δίκτυο του Εργαστηρίου και γρήγορος ο συγχρονισμός με το ασύρματο δίκτυο. Είναι επίσης συμβατό με χρήστες που χρησιμοποιούν συσκευές με 802.11b και 802.11g. Αυτό το σημείο πρόσβασης ενσωματώνει τεχνολογία MIMO.

SONY VAIO VPCPK111KX-B 8-Inch

Ο υπολογιστής αυτός αποτέλεσε το σταθμό εργασίας του δικτύου των αισθητήρων μετά την εγκατάσταση του λειτουργικού συστήματος TinyOS, λεπτομέρειες της εγκατάστασής του θα αναφερθούν στην συνέχεια.



Εικόνα 67: Ο υπολογιστής Sony Vaio VPCPK111KX-B

DELL LATITUDE D620

Ο υπολογιστής διαθέτει την Intel Pro/Wireless 3945 WiFi 802.11 a/b/g κάρτα ασύρματης δικτύωσης και έτσι χρησιμοποιείται στη διάταξή μας για να συνδεθεί στο δίκτυο Wi-Fi και να δημιουργήσει κίνηση σε αυτό.



Εικόνα 68: Ο υπολογιστής DELL LATITUDE D620

IRIS-XM2110 Base-mote

Ο αισθητήρας αυτός συνδέεται με τον υπολογιστή Sony μέσω σύνδεσης USB, ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση 0.80m, από τον υπολογιστή DELL. Χρησιμοποιείται ως δέκτης στο WSN του πειράματος για τη λήψη των πακέτων.



Εικόνα 69: Ο IRIS-XM2110 Base-mote

IRIS-XM2110 Sender-mote

Ο δεύτερος αισθητήρας IRIS χρησιμοποιείται ως πομπός στο WSN του πειράματος, που στέλνει τα δεδομένα στον αισθητήρα base-mote από διαφορετικές θέσεις στο χώρο.



Εικόνα 70: Ο IRIS-XM2110 Sender-mote

9.3 Προετοιμασία και Διεξαγωγή του Πειράματος

Το πρώτο βήμα για την εκτέλεση του πειράματος είναι η εγκατάσταση του TinyOS στον υπολογιστή Sony. Το λογισμικό αυτό διατίθεται ως λογισμικό ανοικτού κώδικα στο επίσημο site του TinyOS, <http://www.tinyos.net/>. Έτσι, έγινε η εγκατάσταση της τελευταίας έκδοσης 2.1.1.

Πλέον, μπορεί να δημιουργηθεί το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο θα περιλαμβάνει έναν πομπό και έναν δέκτη.

Το επόμενο βήμα μετά την εγκατάσταση του TinyOS είναι η ρύθμιση, μέσω των κατάλληλων αρχείων που υπάρχουν σε φακέλους του TinyOS των τιμών που θα λαμβάνουν τα διάφορα μεγέθη των αισθητήρων των δικτύου:

- Διάυλος: 11
- Κεντρική Συχνότητα: 2.405 GHz
- Εύρος Ζώνης Διαύλου: 2 MHz
- CCA (Clear Channel Assessment) mode: 3 → Όταν η εισερχόμενη ισχύς είναι κάτω από το καθορισμένο κατώφλι και δεν λαμβάνει αποδεκτά IEEE 802.15.4 δεδομένα
- CCA threshold: 0xC7
- RF power: 15

Κεφάλαιο 9

Εν συνεχεία, συνδέεται ο ένα αισθητήρα IRIS, ο οποίος θα αποτελεί τον πομπό στο δίκτυο, με το υπολογιστή Sony μέσω θύρας USB και χαρακτηρίζεται με τον αριθμό 1. Μέσω του παραθύρου εντολών (terminal) γίνεται η είσοδος στο φάκελο:

```
/opt/tinyos-2.x/apps/RadioCountToLeds/
```

Έπειτα, ακολουθεί η εκτέλεση της εντολής:

```
make iris install,1 mib520,/dev/ttyUSB0.
```

Έτσι, ο αισθητήρας με την ετικέτα 1 αποτελεί το πομπό του ασύρματου δικτύου το πειράματος.

Ομοίως, γίνεται η σύνδεση και του άλλου αισθητήρα, ο οποίος θα είναι ο σταθμός βάσης του δικτύου, και του δίνεται η ετικέτα 0. Μέσω του παραθύρου εντολών (terminal) γίνεται η είσοδος στο φάκελο:

```
/opt/tinyos-2.x/apps/BaseStation/
```

και ακολουθεί η εκτέλεση της εντολής:

```
make iris install,0 mib520,/dev/ttyUSB0.
```

Έτσι, ο αισθητήρας με την ετικέτα 0 αποτελεί το δέκτη. Ο αισθητήρας αυτός θα παραμείνει συνδεδεμένος στον υπολογιστή καθόλη την διάρκεια του πειράματος και τροφοδοτείται από αυτόν και όχι από τις μπαταρίες σε αντίθεση με τον πομπό.

Έχει στηθεί λοιπόν, ένα WSN με δύο κόμβους, έναν πομπό και έναν δέκτη και μπορούν να σταλούν πακέτα. Τα πακέτα που λαμβάνονται μπορούν να φαίνονται στην οθόνη εκτελώντας την εντολή

```
javanet.tinyos.tools.Listen -common serial@/dev/ttyUSB1:57600
```

Προκειμένου να ληφθούν υπόψιν οι μεταβολές του χώρου και να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις, αναπτύχθηκε ένα script για την εκτέλεση της εντολής αυτής σε συγκεκριμένους χρόνους με συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων και την αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε αρχεία.

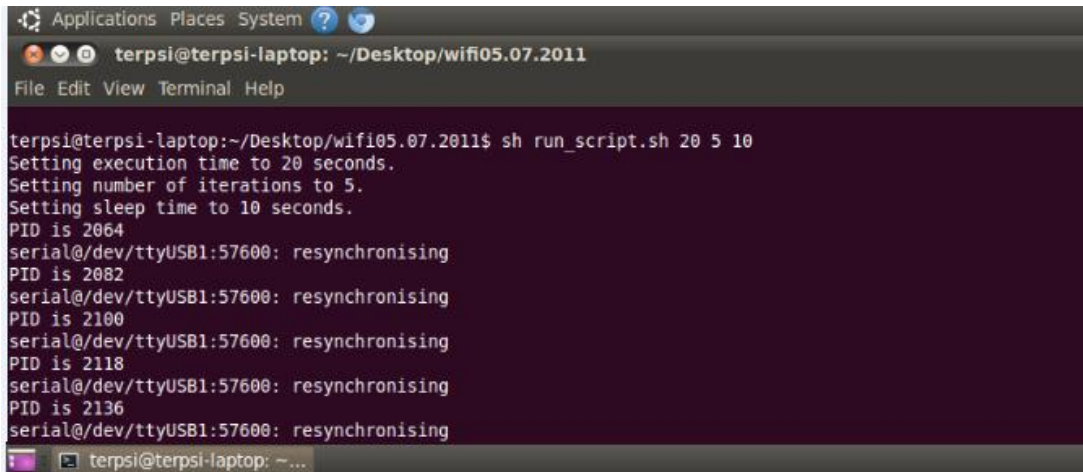
Έτσι, για την εκτέλεση της εντολής μέσω του script, πρέπει να οριστούν οι τιμές:

a: ο χρόνος σε sec που διαρκεί η κάθε εκτέλεση (iteration)

b: ο αριθμός των εκτελέσεων

c: ο ενδιάμεσος χρόνος σε sec μεταξύ δύο εκτελέσεων

Συγκεκριμένα, θα αποδοθούν οι τιμές $a=20$, $b=5$ και $c=10$, δηλαδή κάθε μέτρηση αποστολής πακέτων θα διαρκεί 20 sec και θα εκτελείται 5 φορές με ενδιάμεσο χρόνο μεταξύ δύο εκτελέσεων 10 sec. Μια εκτέλεση αυτής της εντολής φαίνεται στην Εικόνα 71.



```
Applications Places System
terpsi@terpsi-laptop: ~/Desktop/wifi05.07.2011
File Edit View Terminal Help

terpsi@terpsi-laptop:~/Desktop/wifi05.07.2011$ sh run_script.sh 20 5 10
Setting execution time to 20 seconds.
Setting number of iterations to 5.
Setting sleep time to 10 seconds.
PID is 2064
serial@/dev/ttyUSB1:57600: resynchronising
PID is 2082
serial@/dev/ttyUSB1:57600: resynchronising
PID is 2100
serial@/dev/ttyUSB1:57600: resynchronising
PID is 2118
serial@/dev/ttyUSB1:57600: resynchronising
PID is 2136
serial@/dev/ttyUSB1:57600: resynchronising
```

Εικόνα 71: Εκτέλεση της εντολής `javanet.tinyos.tools.Listen -common serial@/dev/ttyUSB1:57600` χρησιμοποιώντας το script με τιμές παραμέτρων 20 5 10 στο terminal

Το πείραμα θα περιλαμβάνει 30 μετρήσεις αποστολής πακέτων μεταξύ πομπού και δέκτη. Πομπός και δέκτης θα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με το δέκτη να έχει σταθερή θέση στο χώρο ενώ ο πομπός θα μεταβάλλεται χωρικά στην έκταση του χώρου. Οι μετρήσεις θα γίνουν αρχικά με κλειστό το παρεμβολέα Wi-Fi, έπειτα με ανοιχτό το δρομολογητή και σε κοντινή θέση με το δέκτη και τέλος σε μακρινή θέση από αυτόν.

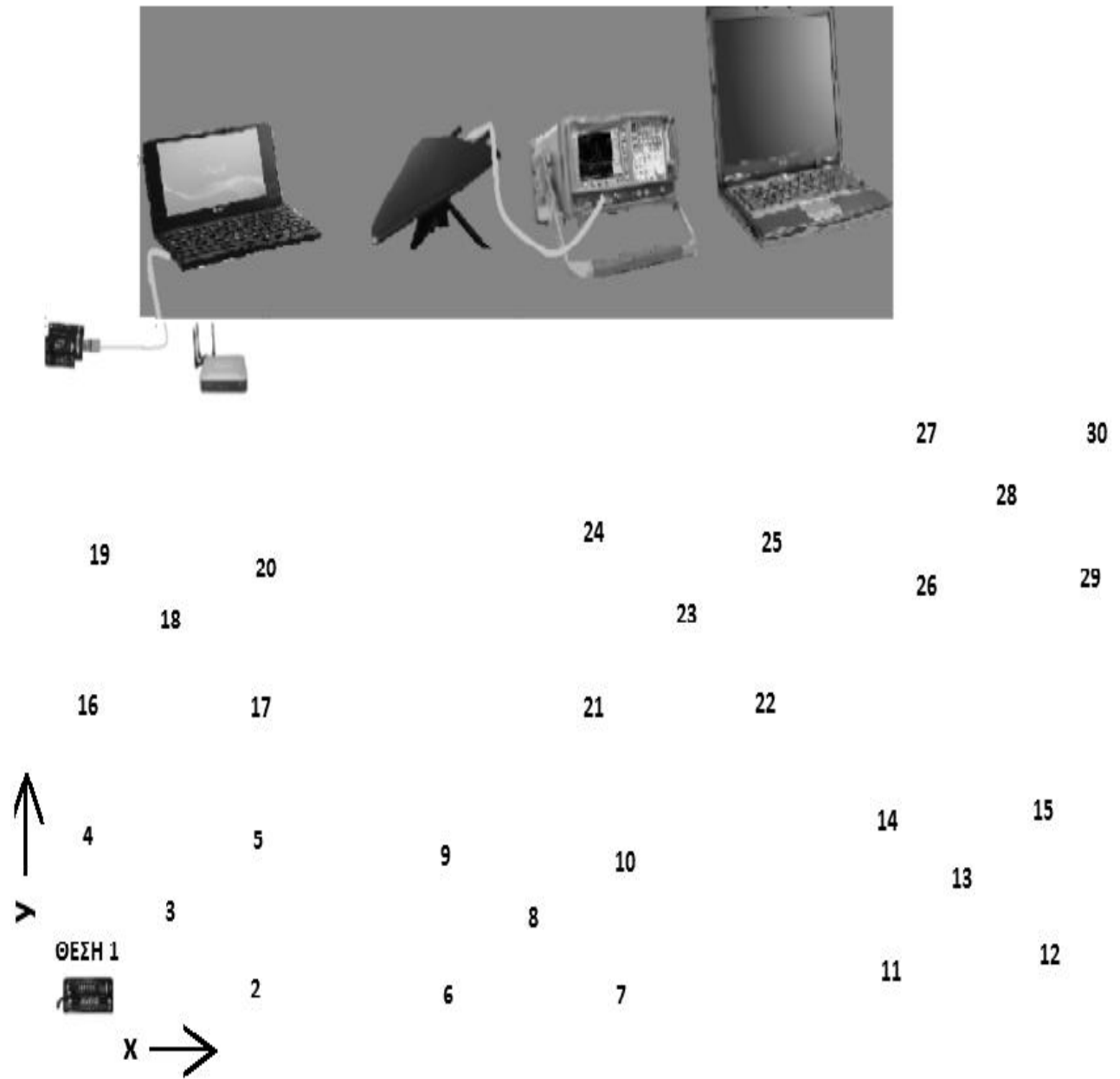
Η πειραματική διαδικασία λοιπόν, για κάθε μία από τις 30 θέσεις θα περιλαμβάνει την καταγραφή της θέσης του πομπού και έπειτα την αποστολή πακέτων από αυτόν στο δέκτη. Σε κάθε θέση θα εκτελείται τρεις φορές το script για να αποθηκεύονται σε αρχεία τα πακέτα που λαμβάνει ο δέκτης ανάλογα με την θέση και κατάσταση του Wi-Fi.

Στην περίπτωση, που θα είναι ανοιχτό το δίκτυο Wi-Fi, θα γίνεται σύνδεση σε αυτό με τον υπολογιστή DELL για να δημιουργηθεί κίνηση.

Επιπλέον, συνδέοντας την κεραία με τον αναλυτή φάσματος σε κάθε θέση του παρεμβολέα θα υπολογίζεται η ισχύς κορυφής του δικτύου Wi-Fi, η συχνότητα που αντιστοιχεί σε αυτή τη τιμή της ισχύς και ακόμη η ισχύς του στην συχνότητα των 2.412 GHz που λειτουργεί.

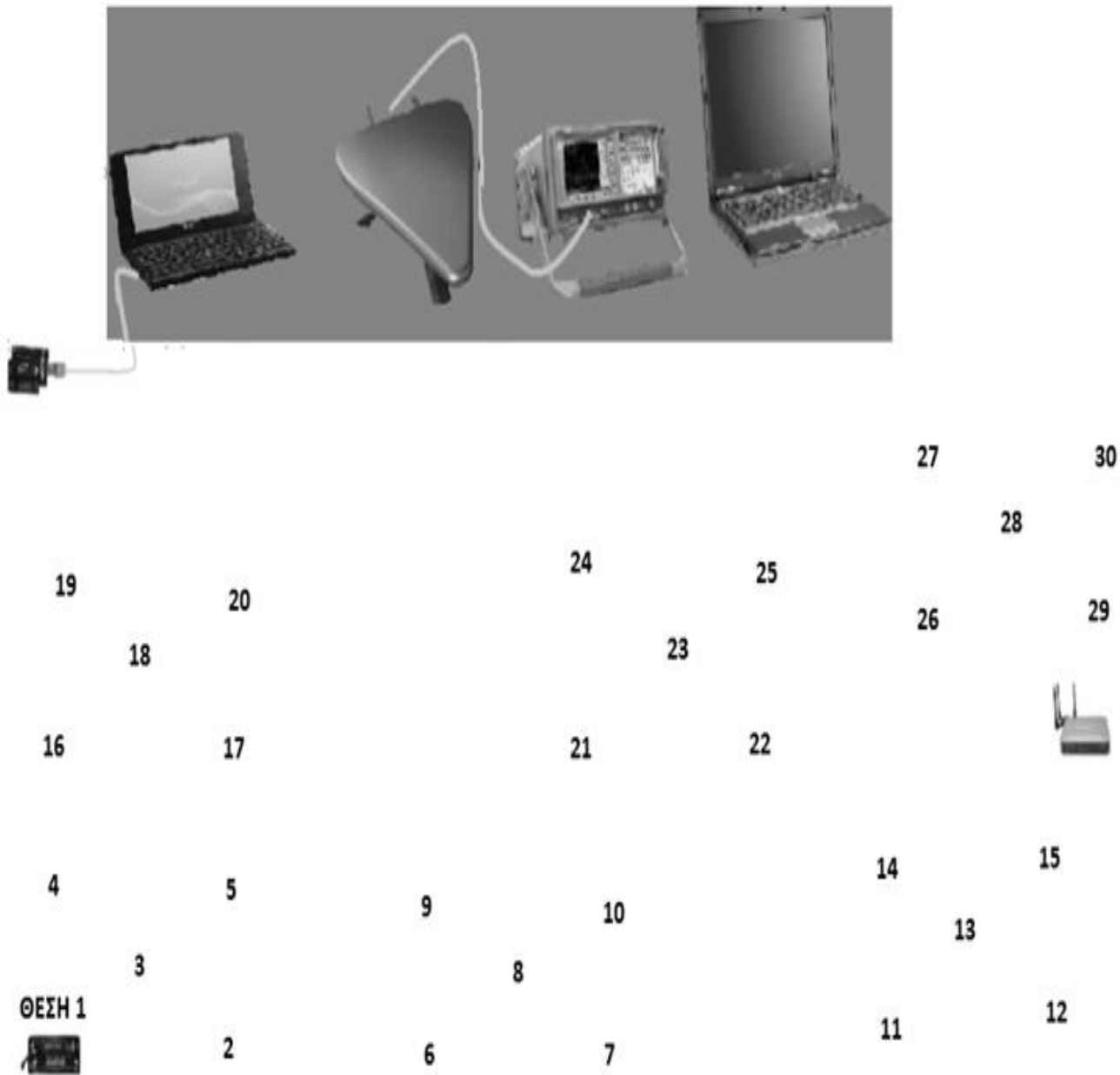
Στην Εικόνα 72 και την Εικόνα 73 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία των οργάνων, η θέση του παρεμβολέα και οι 30 διαφορετικές θέσεις που θα λάβει ο πομπός για την διεξαγωγή του πειράματος αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 9



Εικόνα 72: Η πειραματική διάταξη με τον παρεμβολέα στη κοντινή θέση

Πειραματική Ανάλυση των Παρεμβολών των WLAN σε 802.15.4 IRIS-XM2110 Motes



Εικόνα 73: Η πειραματική διάταξη με τον παρεμβολέα στη μακρινή θέση

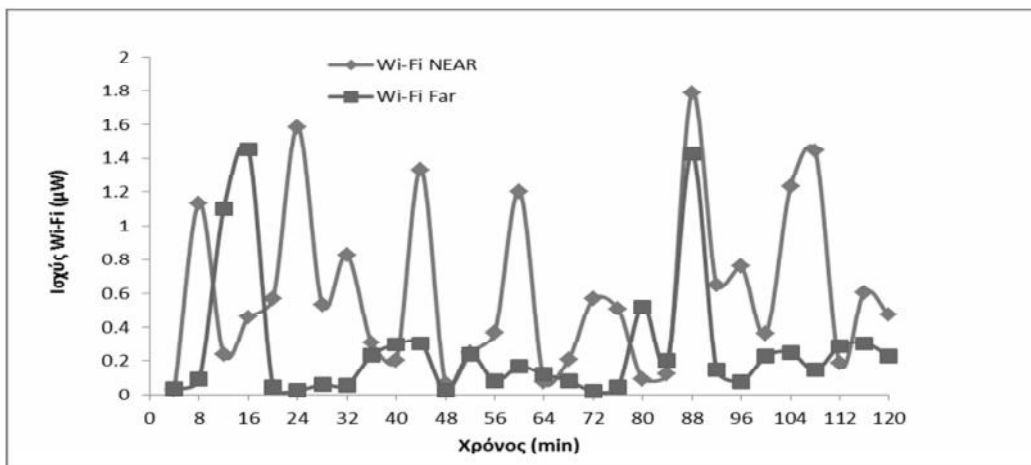
9.4 Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις των Μετρήσεων του Πειράματος

Οι μετρήσεις που καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία ήταν η ισχύς εκπομπής του access point του δικτύου Wi-Fi σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και τα πακέτα που στέλνονταν από τον πομπό στο δέκτη τόσο με την παρουσία του Wi-Fi σε κοντινή και μακρινή θέση ως προς τον αισθητήρα δέκτη όσο και χωρίς αυτό, για τις 30 διαφορετικές τοποθετήσεις του αισθητήρα πομπού στο χώρο, σε πραγματικό περιβάλλον.

Από τα αρχεία που αποθηκεύτηκαν για τις 30 θέσεις, υπολογίστηκε ο ρυθμός απωλειών πακέτων PLR (Packet Loss Ratio) σε κάθε κατάσταση του access point του Wi-Fi. Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμός των χαμένων πακέτων σε κάθε θέση του πομπού υπολογίστηκε από τη μέση τιμή του ρυθμού των χαμένων πακέτων των πέντε εκτελέσεων κάθε μέτρησης από το αρχείο. Έτσι, με το μέγεθος αυτό υπολογίζεται ο αριθμός των πακέτων που χάνονταν προς τα συνολικά πακέτα που έστειλε ο πομπός. Ο αριθμός των πακέτων που χάνονταν κατά τη λήψη υπολογίστηκε αφαιρώντας από το συνολικό αριθμό των πακέτων που αποστέλλονταν από το πομπό, τον αριθμό των πακέτων που λαμβάνονταν στο δέκτη.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στη συνέχεια με την καταγραφή τους σε διαγράμματα.

Στην Εικόνα 74 που ακολουθεί, παρουσιάζονται σε διαγράμματα οι διάφορες τιμές ισχύος εκπομπής του δικτύου Wi-Fi, που καταγράφονται από τον αναλυτή φάσματος μέσω της κεραίας, η οποία στοχεύει τη συσκευή στην κοντινή και μακρινή θέση αντίστοιχα, σε συνάρτηση με το χρόνο.



Εικόνα 74: Το διάγραμμα της ισχύος του Wi-Fi σε μW στη συχνότητα λειτουργίας του, 2.412 GHz, στην κοντινή και μακρινή θέση συναρτήσεως του χρόνου σε min

Οι μετρήσεις που καταγράφηκαν για την ισχύ του Wi-Fi αφορούν το κανάλι 1 στο οποίο λειτουργεί. Το κανάλι αυτό των 2.412 GHz του 802.11 καλύπτει τα κανάλια 11, που λειτουργούν και οι αισθητήρες του πειράματος, 12, 13 και 14 του 802.15.4.

Προκύπτει λοιπόν, ότι οι τιμές ισχύος του access point που λαμβάνονται, μεταβάλλονται σημαντικά με το χρόνο. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι το εκπεμπόμενο σήμα διέρχεται μέσα από χρονικά μεταβαλλόμενες διαδρομές.

Οι πειραματικές μετρήσεις σε πραγματικό περιβάλλον ασύρματων καναλιών επιβεβαιώνουν ότι η διακύμανση της λαμβανόμενης ισχύος με το χρόνο μοιάζει με μια τυχαία διαδικασία. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, πως σε κάθε μετάδοση που γίνεται σε πραγματικό περιβάλλον, το σήμα που καταφθάνει στο δέκτη αποτελεί στην πραγματικότητα το άθροισμα επιμέρους υποσημάτων (multipath), τα οποία έχουν προέλθει από το αρχικό, εξαιτίας μιας σειράς φαινομένων όπως: η σκέδαση (scattering), η ανάκλαση (reflection), η διάθλαση (refraction) και η περίθλαση (diffraction).

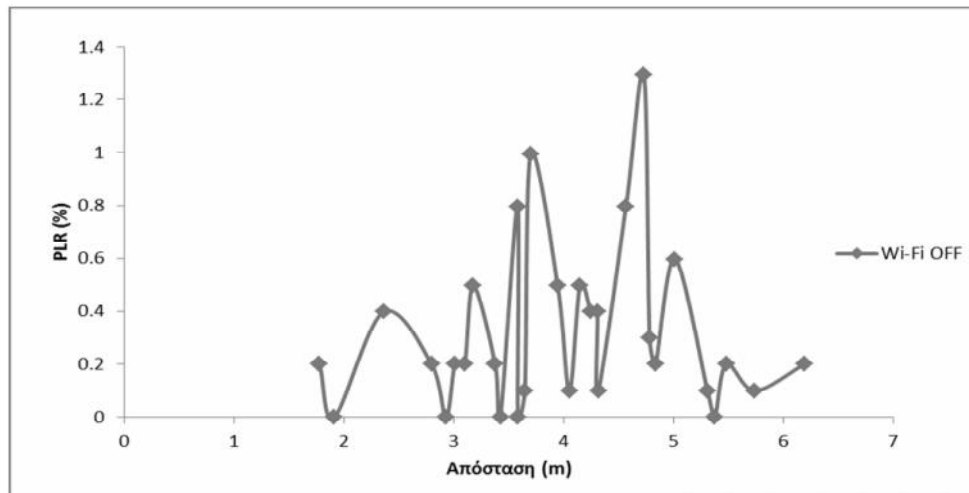
Η ισχύς του Wi-Fi παρουσιάζει τυχαίες αυξομειώσεις και λαμβάνει στην κοντινή θέση παρατήρησης, ελάχιστη τιμή -45.29 dBm (0.02958 μ W) και μέγιστη τιμή -27.48 dBm (1.78649 μ W) ενώ στη μακρινή θέση -46.51 dBm (0.02234 μ W) και -28.38 dBm (1.45211 μ W) αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι η ισχύς του Wi-Fi λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές όταν είναι στην κοντινή θέση, αφού η κεραία και η μετρούμενη συσκευή βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση έναντι της μακρινής θέσης.

Στη μακρινή θέση, η ισχύς του Wi-Fi έχει μεγαλύτερη διασπορά τιμών και λαμβάνει μικρότερες τιμές από ότι στην κοντινή θέση. Αυτό οφείλεται βέβαια όχι μόνο στην απόσταση αλλά και στην παρεμβολή άλλων αντικειμένων και συσκευών τόσο του χώρου του εργαστηρίου όσο και του υπόλοιπου κτιρίου.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 75 που ακολουθεί, καταγράφεται ο ρυθμός των απολεσθέντων πακέτων, που υπολογίστηκε από τις 30 μετρήσεις του πειράματος, σε συνάρτηση με την απόσταση των δύο αισθητήρων του WSN και με απενεργοποιημένο το δίκτυο Wi-Fi. Στην περίπτωση αυτή, καταγράφεται ο ρυθμός των χαμένων πακέτων που οφείλονται στο περιβάλλον του πειράματος.

Κεφάλαιο 9



Εικόνα 75: Το διάγραμμα του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR του WSN συναρτήσει της απόστασης πομπού και δέκτη χωρίς Wi-Fi traffic

Προσδοκώμενο αυτών των μετρήσεων είναι να μην έχουμε απώλειες πακέτων ή τουλάχιστον όχι τέτοιες που να βλάπτουν σημαντικά τα πακέτα που λαμβάνονται από το δέκτη, αφού δεν υπάρχει η παρεμβολή του Wi-Fi. Βέβαια, εφόσον το δίκτυο των αισθητήρων είναι ασύρματο, η μετάδοση των πακέτων του πομπού κληρονομεί όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά που αφορούν τις ιδιαιτερότητες της μετάδοσης στον ελεύθερο χώρο. Χαρακτηριστικό λοιπόν του ασύρματου διαύλου είναι η απώλεια των πακέτων λόγω αλλοιωμένων πακέτων ως αποτέλεσμα του χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio –SNR), της εξασθένησης του σήματος, αλλά και των παρεμβολών από σήματα άλλων πηγών.

Οι απώλειες πακέτων μεταξύ των δύο αισθητήρων που καταγράφηκαν στο περιβάλλον του εργαστηρίου και χωρίς τη παρουσία του Wi-Fi εμφανίζει πολύ μικρές απώλειες. Ο μέγιστος ρυθμός απωλειών έχει τιμή κάτω από το ποσοστό του 1.3%. Τα αίτια αυτών των απωλειών μπορούν να αποδοθούν στις επιπτώσεις του σήματος λόγω ασύρματης επικοινωνίας σε πραγματικό περιβάλλον. Επιπλέον, το δίκτυο WSN λειτουργούσε υπό την παρεμβολή Wi-Fi που μπορεί να χρησιμοποιούνταν σε διπλανές αίθουσες κατά τη διάρκεια του πειράματος.

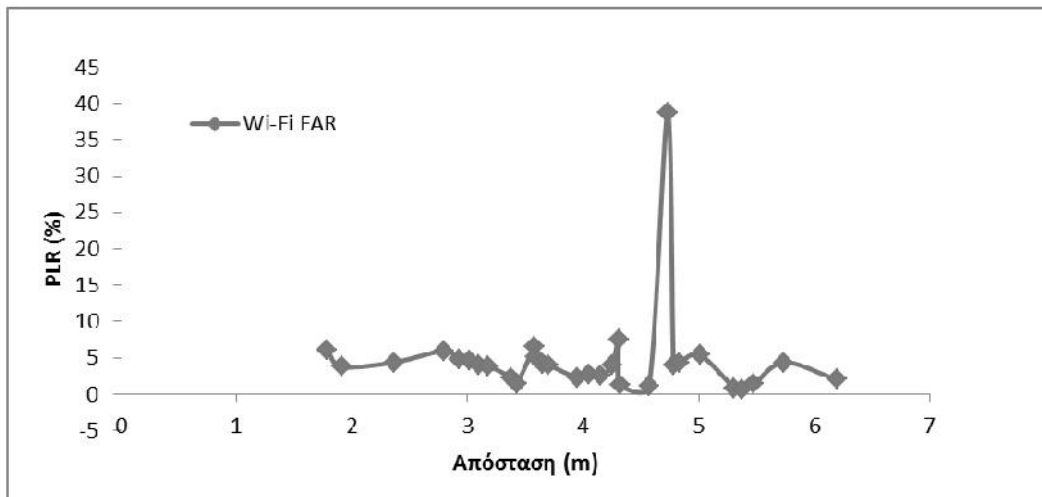
Ακολουθούν στα διαγράμματα των Εικόνων 76 και 77, οι επεξεργασμένες μετρήσεις που αφορούν τις θέσεις που έλαβε το access point του Wi-Fi, οι οποίες επιλέχθηκαν να είναι η μία κοντά στο δέκτη του WSN και μία σε αρκετή απόσταση από αυτόν. Αυτό έγινε επειδή υπάρχει ασύρματη επικοινωνία και η διάδοση αυτή μελετάται ξεχωριστά για μια σειρά από διαφορετικές περιοχές, την περιοχή κοντινού πεδίου (Near Field Region) και μακρινού πεδίου (Far Field Region), αφού παρουσιάζεται διαφορετική συμπεριφορά του δέκτη.

Η απόσταση με την οποία εξασφαλίζονται οι συνθήκες μακρινού πεδίου του δέκτη στο πείραμα είναι τα 1.443m. Ο δέκτης, καθόλη τη διάρκεια της διεξαγωγής του πειράματος, κατείχε τη θέση (0m,0m) και ο παρεμβολέας τις θέσεις (0m,5.23m) και (4.63m,3.63m). Συνεπώς, στην περίπτωση της μακρινής θέσης, βρισκόταν στην περιοχή μακρινού πεδίου του δέκτη και στην κοντινή θέση, βρισκόταν στην περιοχή εγγύς πεδίου.

Σε θεωρητικό επίπεδο, η επίδραση που αναμένεται να έχει το ασύρματο τοπικό δίκτυο επάνω στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ενώ εκπέμπει στο μακρινό πεδίο του αισθητήρα δέκτη, είναι η επιβάρυνση της μετάδοσης του WSN αλλά όχι σε σημαντικό βαθμό. Αντιθέτως, στην περίπτωση που ο παρεμβολέας ανήκει στο εγγύς πεδίο του, θα αναμένεται να παρατηρηθεί σημαντική επίδραση στην επικοινωνία των αισθητήρων. Στο μακρινό πεδίο, το διάγραμμα ακτινοβολίας έχει πλέον σταθεροποιηθεί κάτι που δεν ισχύει στο εγγύς πεδίο, όπου υπάρχει αυξημένη αβεβαιότητα για την συνύπαρξη, επειδή το πεδίο αυτό της κεραίας επηρεάζεται και από το ίδιο το σώμα του χρήστη.

Θεωρείται δεδομένο, ότι εάν η απόσταση μεταξύ μιας ασύρματης συσκευής και μιας συσκευής Wi-Fi είναι μεγαλύτερη από τρία μέτρα, η απόδοση των δύο συστημάτων είναι καλή και δεν εμφανίζει μεγάλα προβλήματα σε αντίθεση με τις αποστάσεις των 0,5m έως 2m που εμφανίζεται σημαντική υποβάθμιση. Όταν οι ασύρματες συσκευές παρουσιάζονται πολύ κοντά η μια στην άλλη, η διαλειτουργικότητα είναι αδύνατη.

Οι τιμές που αναπαρίστανται στην γραφική παράσταση της Εικόνας 76, δείχνουν τις απώλειες των πακέτων που καταγράφηκαν, ενώ το Wi-Fi βρισκόταν στη μακρινή θέση του δέκτη, σε συνάρτηση με την απόσταση των δύο κόμβων του WSN. Στην περίπτωση αυτή λοιπόν, καταγράφεται ο ρυθμός των χαμένων πακέτων που οφείλονται τόσο στο περιβάλλον όσο και στην παρεμβολή του Wi-Fi, που βρίσκεται στο μακρινό πεδίο του δέκτη.



Εικόνα 76 : Το διάγραμμα του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR του WSN συναρτήσει της απόστασης πομπού και δέκτη με Wi-Fi traffic στη μακρινή θέση

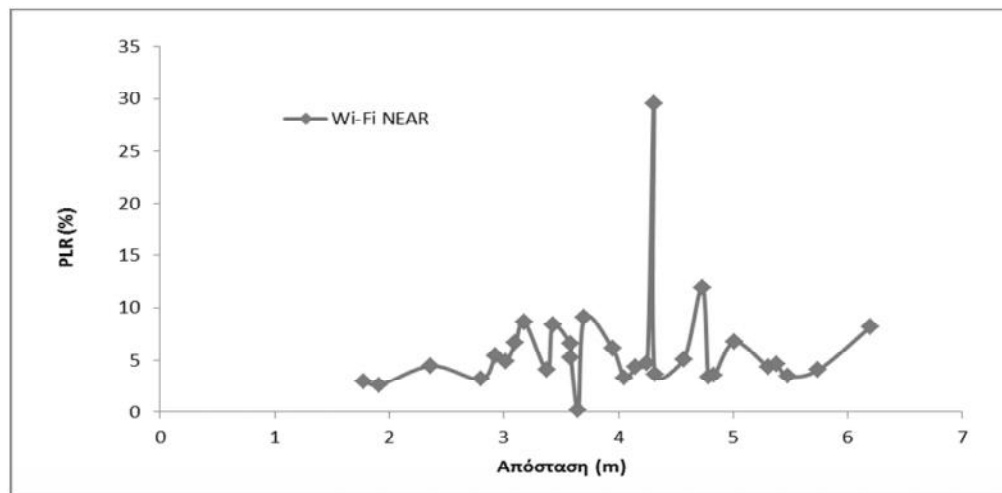
Είναι εμφανές ότι στην περίπτωση αυτή τα πακέτα που έστειλε ο πομπός δεν έφταναν εντελώς ακέραια στο δέκτη καθώς σε όλες τις θέσεις υπήρχαν απώλειες πακέτων. Ο ρυθμός απωλειών πακέτων κυμαίνεται χωρίς ιδιαίτερες αυξομειώσεις με μέσο ποσοστό το 3.64%, πλην μιας παρατήρησης η οποία εμφανίζει μεγάλο ποσοστό απωλειών. Η παρατήρηση αυτή, κατά την οποία καταγράφηκαν απώλειες πακέτων του 38%, ποσοστό με μεγάλη απόκλιση από τις υπόλοιπες, μπορεί να οφείλεται είτε στην ύπαρξη δικτύων που λειτουργούσαν κατά τη διάρκεια του πειράματος σε άλλες αίθουσες του εργαστηρίου και την στιγμή της συγκεκριμένης

Κεφάλαιο 9

μέτρησης, εμφάνισαν μεγάλη παρεμβολή στο δίκτυο WSN λόγω φορτωμένης κίνησης, είτε σε σφάλματα μετρήσεων είτε στις απώλειες ελεύθερου χώρου, αφού όπως έχει αναφερθεί ξανά, οι μετρήσεις έγιναν σε πραγματικό περιβάλλον.

Η πειραματική διαδικασία λοιπόν, συμφωνεί με τα θεωρητικά στοιχεία περί μικρής παρεμβολής, όταν το Wi-Fi βρίσκεται στο μακρινό πεδίο του δέκτη, αφού η επικοινωνία των αισθητήρων επηρεάστηκε σε πολύ μικρό ποσοστό, ενώ η ύπαρξη μιας μόνο μέτρησης, κατά την οποία χάθηκε μεγάλος αριθμός πακέτων, δεν είναι ικανή να επηρεάσει αυτό το συμπέρασμα για τη μακρινή θέση του καθώς έχει μικρό ποσοστό εμφάνισης 3.33%, μία μόνο μέτρηση από τις 30 συνολικά μετρήσεις.

Στη γραφική παράσταση της Εικόνας 77, αποτυπώνονται οι απώλειες των πακέτων που καταγράφηκαν, ενώ το Wi-Fi βρισκόταν στη κοντινή θέση του δέκτη, σε συνάρτηση με την απόσταση των δύο κόμβων του WSN. Στην περίπτωση αυτή λοιπόν, καταγράφεται ο ρυθμός των χαμένων πακέτων που οφείλονται τόσο στο περιβάλλον όσο και στην παρεμβολή του Wi-Fi, που βρίσκεται στο εγγύς πεδίο του δέκτη.

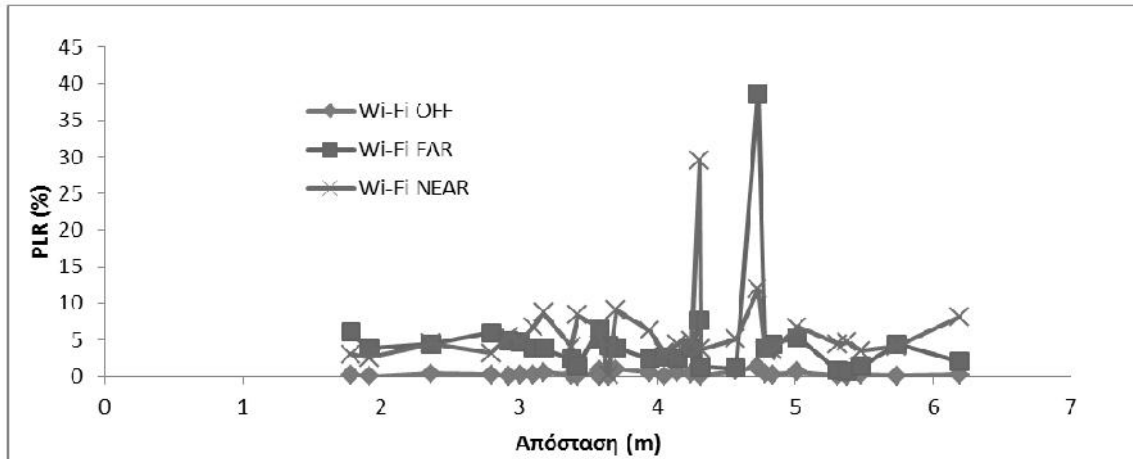


Εικόνα 77: Το διάγραμμα του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR του WSN συναρτήσει της απόστασης πομπού και δέκτη με Wi-Fi traffic στην κοντινή θέση

Ο ρυθμός των απολεσθέντων πακέτων που καταγράφεται εδώ, παρουσιάζει μεγαλύτερα ποσοστά σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Εισάγεται εντονότερη παρεμβολή από το Wi-Fi με αποτέλεσμα να χάνονται περισσότερα από τα πακέτα που στέλνει ο πομπός στο δέκτη, αφού ακτινοβολεί στο εγγύς πεδίο του. Πιο συγκεκριμένα, οι απώλειες κυμαίνονται με αυξομειώσεις, με μέσο όρο την τιμή του 6% ενώ και εδώ παρατηρείται η μέτρηση που αποκλίνει από τη μέση τιμή και υπολογίστηκε στο ποσοστό του 30%. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στους λόγους που αναφέρθηκαν και προηγουμένως.

Οι μετρήσεις λοιπόν, επαληθεύουν το γεγονός ότι η συνύπαρξή τους στο κοντινό πεδίο δημιουργεί πιο έντονα προβλήματα καθώς το δίκτυο WSN δέχεται μεγαλύτερη παρεμβολή.

Ακολουθεί στην Εικόνας 75, η κοινή παρουσίαση και των τριών διαγραμμάτων, που αφορούν το ρυθμό των πακέτων που χάθηκαν, σε συνάρτηση με την απόσταση πομπού και δέκτη για την εκάστοτε θέση και κατάσταση του παρεμβολέα Wi-Fi.



Εικόνα 78: Τα διαγράμματα του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR του WSN σε συνάρτηση με την απόσταση του πομπού για την εκάστοτε θέση και κατάσταση του Wi-Fi

Παρατηρώντας από κοινού και τα τρία διαγράμματα, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η απόσταση πομπού και δέκτη δεν επηρεάζει τις απώλειες πακέτων και αυτό αναμενόταν αφού η απόσταση πομπού και δέκτη δεν ξεπερνά τα 7m και βρίσκονται εντός της εμβέλειας της κεραίας του αισθητήρα IRIS-XM2110.

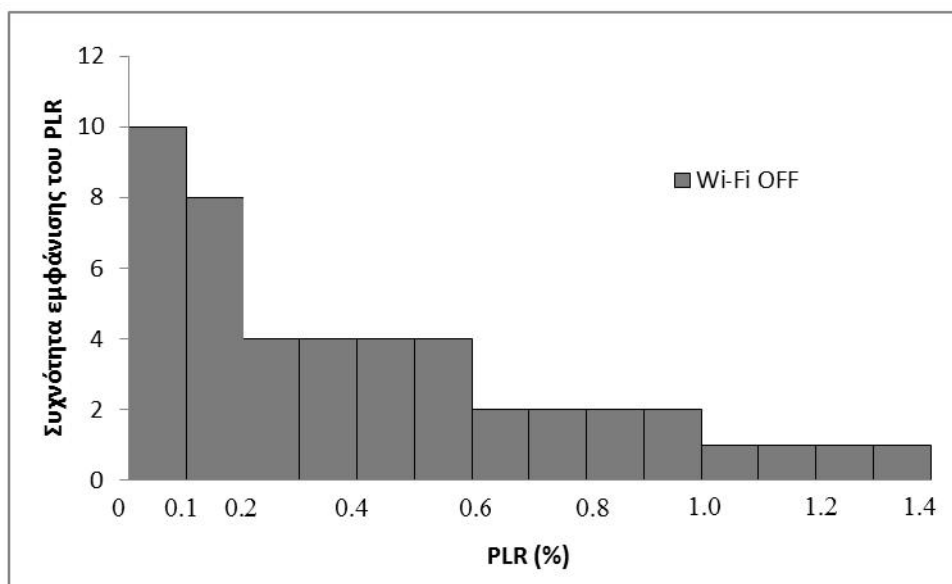
Κοιτάζοντας την Εικόνα 78 και γνωρίζοντας ότι τα γραφήματα αντιστοιχούν σε λειτουργία του WSN στο πραγματικό περιβάλλον, στο πραγματικό περιβάλλον και με την παρουσία του Wi-Fi στο εγγύς πεδίο και στο πραγματικό περιβάλλον και με την παρουσία του Wi-Fi στο μακρινό πεδίο, εύκολα γίνεται αντιληπτή η γραμμή που αντιστοιχεί στη λειτουργία του WSN χωρίς την παρουσία του Wi-Fi. Τα άλλα δύο γραφήματα, αν τα κοιτάξει κάποιος βιαστικά δεν μπορεί να κάνει την αντιστοίχιση γρήγορα ενώ υπάρχει η πιθανότητα, αν δεν τα μελετήσει προσεκτικά, να προβεί σε λάθος συμπέρασμα αν σταθεί μόνο στη μέγιστη τιμή του ρυθμού απωλειών, η οποία εμφανίζεται όταν το Wi-Fi είναι τοποθετημένο στη μακρινή και όχι κοντινή θέση. Βέβαια, κοιτάζοντάς τα προσεκτικά, διαπιστώνεται ότι το ένα διάγραμμα καταλαμβάνει σταθερά τους μεγαλύτερους ρυθμούς απωλειών πακέτων πλην λίγων μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, που καταγράφονται μέσω των διαγραμμάτων, ικανοποιούν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Οι πειραματικές μετρήσεις επαληθεύουν ότι η παρουσία του Wi-Fi επηρεάζει την μετάδοση του WSN κάνοντας έντονο το φαινόμενο των παρεμβολών όταν βρίσκεται σε θέση κοντά στον αισθητήρα δέκτη ενώ σε θέση αρκετά μακριά από το δέκτη η επίδρασή του είναι υπαρκτή αλλά σε μικρότερα επίπεδα.

Κεφάλαιο 9

Παρατίθενται στην συνέχεια τα ιστογράμματα, στα οποία καταγράφεται η συχνότητα εμφάνισης του ρυθμού των πακέτων που χάνονταν σε διάφορες κλάσεις των ποσοστών αυτού, για την εκάστοτε περίπτωση λειτουργίας. Έτσι, δίνεται μια άμεση εικόνα του γενικού σχήματος της κατανομής συχνοτήτων του PLR ανάλογα με το περιβάλλον που υπολογίστηκαν. Στην περίπτωση των μετρήσεων με ενεργό το Wi-Fi, στα ιστογράμματα δεν συμπεριλαμβάνονται οι δύο μετρήσεις που παρουσίαζαν μεγάλη απόκλιση από τις υπόλοιπες, η μία όταν το Wi-Fi βρισκόταν στο κοντινό πεδίο και η άλλη στο μακρινό πεδίο, αφού ήταν μεμονωμένα περιστατικά πραγματικού περιβάλλοντος.

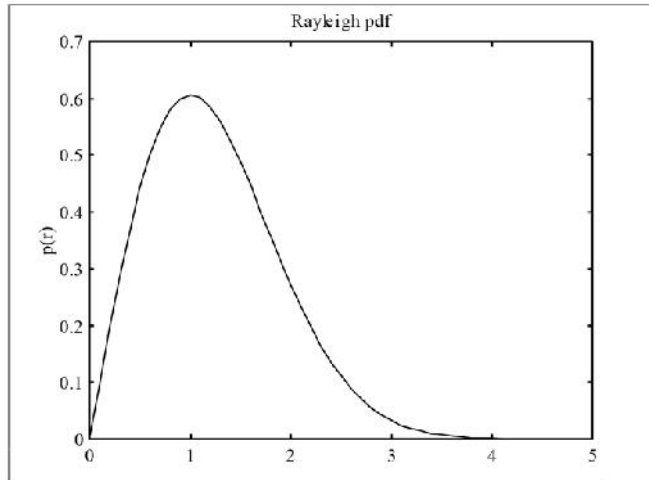
Στο ιστόγραμμα της Εικόνας 79, παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης του ρυθμού των χαμένων πακέτων, που καταγράφηκε για το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων όταν λειτουργούσε μόνο υπό τις συνθήκες του πραγματικού περιβάλλοντος.



Εικόνα 79 : Ιστόγραμμα της συχνότητας εμφάνισης του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR χωρίς την παρουσία του Wi-Fi

Στην περίπτωση αυτή που το WSN λειτουργεί μόνο του, δηλαδή το Wi-Fi είναι απενεργοποιημένο, ο ρυθμός απωλειών πακέτων που καταγράφηκε από τις μετρήσεις του πειράματος ανέρχεται έως το ποσοστό του 0.2% τουλάχιστον για τις μισές μετρήσεις. Τα πακέτα που χάνονται δεν ξεπερνούν σε καμία περίπτωση το ποσοστό του 1.5%. Οι απώλειες αυτές οφείλονται στην ασύρματη μετάδοση των αισθητήρων και γι' αυτό κυμαίνονται σε πολύ μικρά επίπεδα. Όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα, τα πακέτα αυτά που χάνονται οφείλονται στο ασύρματο κανάλι, στις απώλειες χώρου και γενικά στο φαινόμενο των υπο-σημάτων (multipath).

Οι τιμές της συχνότητας εμφάνισης του PLR όταν δεν παρεμβάλλει το Wi-Fi παρουσιάζουν μία αριστερή ασύμμετρη κατανομή, δηλαδή οι μεγάλες συχνότητες του PLR συγκεντρώνονται στο αριστερό άκρο της κατανομής, που αντιστοιχεί στις χαμηλότερες τιμές του απωλειών πακέτων.

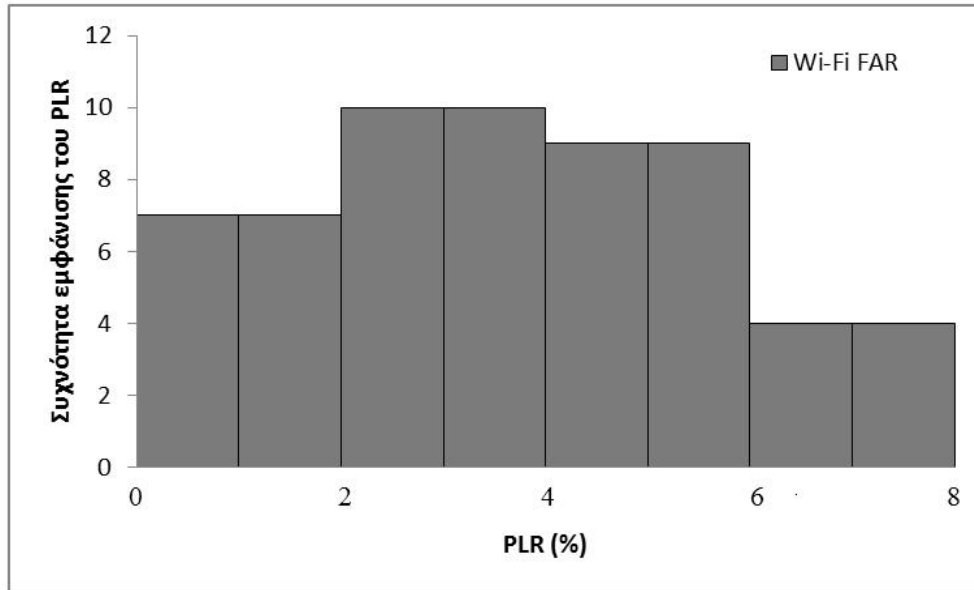


Εικόνα 80 : Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rayleigh

Σύμφωνα λοιπόν, με τα πειραματικά αποτελέσματα, τα χαμένα πακέτα του WSN, όταν αυτό λειτουργεί σε πραγματικό περιβάλλον και δεν συνυπάρχει με το Wi-Fi, ακολουθούν την κατανομή Rayleigh, η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 80. Η κατανομή Rayleigh είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη κατανομή για να περιγράψει το λαμβανόμενο σήμα, το οποίο ανακλάται, σκεδάζεται και δεν υπάρχει απευθείας διαδρομή μεταξύ πομπού και δέκτη. Έχει πολλές εφαρμογές στα κανάλια επικοινωνίας, τα οποία παρουσιάζουν διαλείψεις.

Τα πειραματικά αποτελέσματα, έρχονται σε συμφωνία με τα θεωρητικά, όσον αφορά την ασύρματη μετάδοση μεταξύ των αισθητήρων

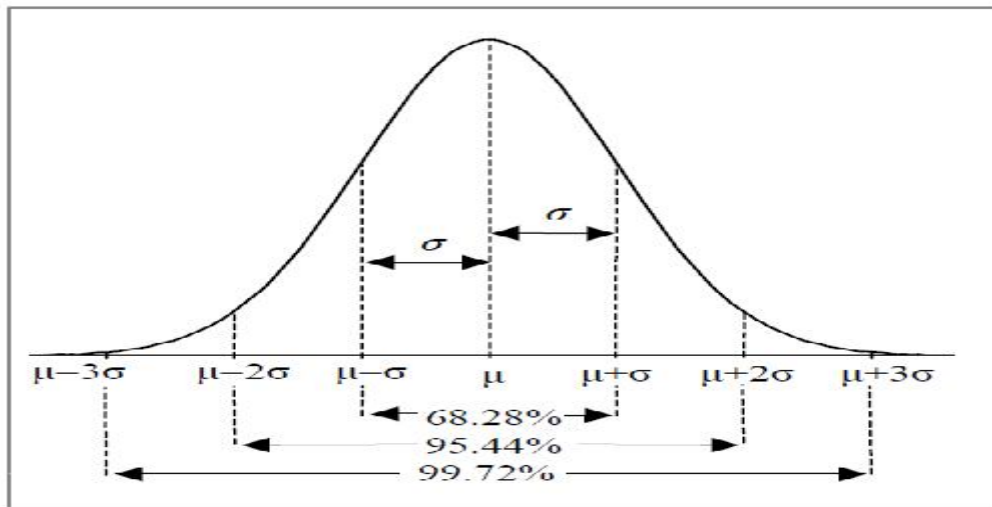
Στο ιστόγραμμα της Εικόνας 81 που παρατίθεται στη συνέχεια, παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης του ρυθμού των πακέτων, τα οποία έστειλε ο πομπός αλλά δεν μπόρεσε να λάβει ο δέκτης, όπως καταγράφηκε όταν το WSN συνυπήρχε με το Wi-Fi στο μακρινό πεδίο σε πραγματικό περιβάλλον.



Εικόνα 81: Ιστόγραμμα της συχνότητας εμφάνισης του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR με το Wi-Fi στη μακρινή θέση

Η μετάδοση των πακέτων του αισθητήρα έχει να αντιμετωπίσει όχι μόνο το φαινόμενο των υπο-σημάτων (multipath) αλλά και την παρεμβολή του Wi-Fi. Τα πακέτα που χάνονται είναι εμφανώς περισσότερα από την προηγούμενη περίπτωση. Οι απώλειες ανέρχονται έως στο ποσοστό του 8% και προσεγγίζουν την κανονική κατανομή, καθώς είναι συγκεντρωμένες γύρω από τη μέση τιμή 3,64% , και υπάρχουν σχετικά πολλές τιμές γύρω της.

Η Κανονική κατανομή, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 82, είναι η σημαντικότερη κατανομή πιθανοτήτων με τις περισσότερες εφαρμογές

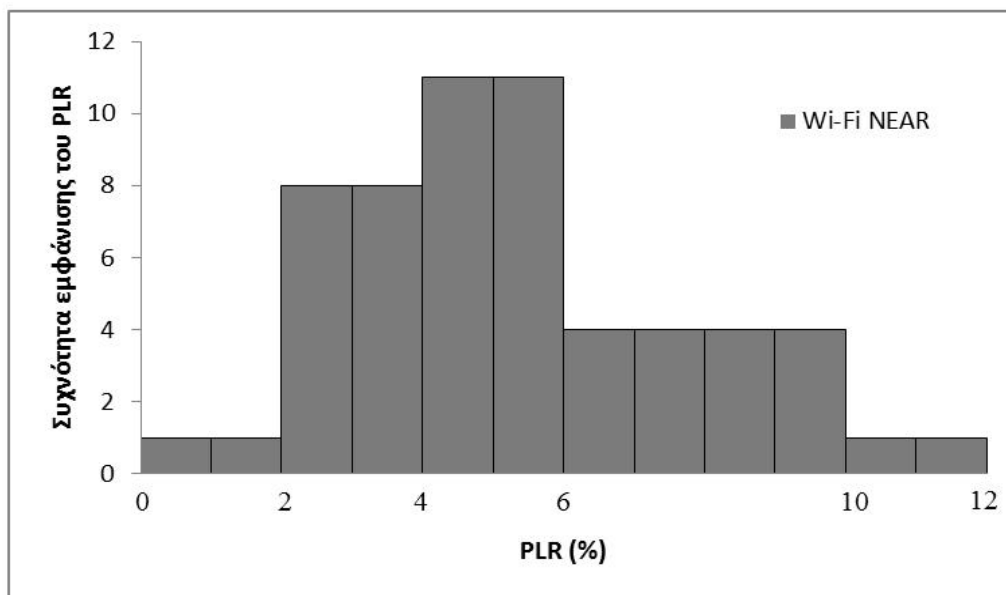


Εικόνα 82 : Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Κανονικής κατανομής

Υιοθετώντας το πειραματικό αυτό αποτέλεσμα, ότι οι απώλειες πακέτων του WSN, όταν συνυπάρχει με το Wi-Fi σε μακρινή θέση σε σχέση με το δέκτη, θα ακολουθούν την κανονική κατανομή, μπορούν να προσεγγιστούν τα ποσοστά των παρατηρήσεων, τα οποία θα βρίσκονται εντός μιας τυπικής απόκλισης από την μέση τιμή.

Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζοντας ότι η μέση τιμή των μετρήσεων είναι 3.64% και η τυπική απόκλιση 1.78% προκύπτει σύμφωνα με την καμπάνα της Εικόνας 82, ότι σε ποσοστό 68.28% των περιπτώσεων αποστολής πακέτων, τα πακέτα που θα χάνονται, θα κυμαίνονται σε ρυθμό απωλειών από 1.86% έως 5.42%. Με άλλα λόγια, οι παραπάνω από τις μισές μεταδόσεις δέχονται τέτοιες παρεμβολές με απώλειες πακέτων από 1.86% έως 5.42%.

Στην Εικόνα 83, είναι το ιστόγραμμα, που παρουσιάζει τη συχνότητα εμφάνισης του ρυθμού των απολεσθέντων πακέτων, όπως αυτός καταγράφηκε, όταν το WSN συνυπήρχε με το Wi-Fi στο κοντινό πεδίο σε πραγματικό περιβάλλον.



Εικόνα 83 : Ιστόγραμμα της συχνότητας εμφάνισης του ρυθμού απωλειών πακέτων PLR με το Wi-Fi στην κοντινή θέση

Ο ρυθμός απωλειών πακέτων, που καταγράφεται όταν το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων συνυπάρχει με το ασύρματο τοπικό δίκτυο και μάλιστα βρίσκεται εντός του κοντινού πεδίου του δέκτη του πρώτου, εμφανίζει τιμές που κατανέμονται σχεδόν κανονικά. Συνεπώς, οι απώλειες των πακέτων, στην περίπτωση αυτή, ακολουθούν την κανονική κατανομή, δηλαδή είναι συγκεντρωμένες γύρω από τη μέση τιμή του 5.18%, και γύρω από αυτή υπάρχουν σχετικά πολλές τιμές ενώ μακριά από αυτή σχετικά λίγες τιμές.

Κεφάλαιο 9

Χρησιμοποιώντας, όπως και πριν το συμπέρασμα αυτό και υπολογίζοντας ότι η μέση τιμή είναι 5.18% και η τυπική απόκλιση 2.34%, προκύπτει ότι οι μισές περίπου μεταδόσεις των πακέτων από τον πομπό στο δέκτη, θα πραγματοποιούνται με απώλειες πακέτων που θα κυμαίνονται από το 2.84% έως το 7.52%.

Κεφάλαιο 10

Επίλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στην υλοποίηση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων και στην παρεμβολή που δέχεται από Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα. Η ανάλυση που προηγήθηκε, είχε αντικείμενό της το πρόβλημα των παρεμβολών ενός Wi-Fi σε WSN. Τα δίκτυα Wi-Fi, μέσω των πρωτοκόλλων τους, έχουν την ικανότητα να εκτιμάται η ποιότητα των συνδέσεών τους και να μπορούν να προσαρμόζονται σε συνθήκες «δύσκολες». Αντιθέτως, τα WSNs και τα αντίστοιχα πρωτόκολλά τους δεν καθορίζουν (by default) τρόπους διαχείρισης «δύσκολων» καταστάσεων κυρίως λόγω των περιορισμένων υπολογιστικών πόρων και των μικρών δυνατοτήτων του hardware των αισθητήρων.

Από τις μετρήσεις που προέκυψαν γίνεται αντιληπτό ότι η επίδραση του Wi-Fi στην αξιοπιστία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων εξαρτάται από τη διάταξη των δικτύων, που επί της ουσίας αφορά τις αποστάσεις του access point, των 802.11 τερματικών και του αισθητήρα-πομπού από τον αισθητήρα-δέκτη. Είναι προφανές λοιπόν ότι ο δέκτης, όσο πιο κοντά βρίσκεται στις παρεμβαλλόμενες συσκευές τόσο περισσότερο επιβαρυνμένες θα είναι οι συνδέσεις του. Η τοπολογία των συσκευών είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το σηματοθορυβικό λόγο, ο οποίος προκαλεί τις απώλειες πακέτων .

Τα WSNs αποτελούν ένα άκρως ενδιαφέρον αντικείμενο έρευνας. Καθίσταται σαφές ότι οι επιδιωκόμενοι στόχοι της παρούσας έρευνας πραγματοποιήθηκαν, ωστόσο υπάρχουν ανεξάντλητα ζητήματα μελλοντικής έρευνας στον τομέα των WSNs. Ενδιαφέρον στοιχείο για περαιτέρω μελέτη είναι η προσπάθεια ανάπτυξης ενός συνεκτικού μοντέλου εκτίμησης της επίδρασης των Wi-Fi σε WSNs, τόσο σε επίπεδο θεωρίας όσο και επίπεδο προσομοίωσης. Ακόμη, μπορεί να μελετηθεί η συνύπαρξή τους πειραματικά σε ανηχοϊκό θάλαμο. Ένα άλλο θέμα μελλοντικής έρευνας είναι η περαιτέρω μελέτη της συνύπαρξής τους, όταν η κίνηση του Wi-Fi θα δημιουργείται μεταξύ δύο υπολογιστών με δεδομένο ρυθμό μετάδοσης και μέγεθος πακέτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] X. Καυάλης, Π. Κωττής (2008), Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [2] A. Κανατάς, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος (2008), Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [3] M. Θεολόγου, Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών (2007), Εκδόσεις Τζιόλα.
- [4] K. Sohraby, D. Minoli, T. Znati, “Wireless sensor networks: Technology, Protocols, and Applications”, Wiley-Interscience, 2007.
- [5] B. Sinopoli, C. Sharp, L. Shanato, S. Schaffert, S. Sastry, “Distributed Control Applications within Sensor Networks”, UC Berkley
- [6] Experimental Study of Coexistence Issues Between IEEE 802.11b and IEEE 802.15.4 Wireless, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL 57, NO 8, AUGUST 2008.
- [7] Interference Measurements on Performance Degradation between Colocated IEEE 802.11g/n and IEEE 802.15.4 Networks, Marina Petrova, Lili Wu, Department of Wireless Networks.
- [8] <http://www.wikipedia.org>
- [9] <http://www.eett.gr>
- [10] <http://www.cs.umd.edu>
- [11] <http://edocs.soco.agilent.com>
- [12] http://www.wildpackets.com/resources/compendium/wireless_lan/wlan_packets
- [13] <http://www.scielo.org.mx>
- [14] <http://www.cs.uccs.edu>
- [15] <http://www.zytrax.com>
- [16] <http://www.cs.ru.nl>
- [17] <http://www.cs.ucsb.edu>

[18] <http://www.memsic.com>

[19] <http://www.waset.org>

[20] <http://sites.google.com/site/teamofincredibles/zigbee>

[21] <http://www.ieeehtn.org>

[22] <http://www.xbow.com>