

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου
Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακή Διατριβή
Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας



**Μελέτη Παρεμβολών μεταξύ Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων
και Δικτύων WLAN**

Θεμιστοκλής Κοντογιάννης

Επιβλέπων Καθηγητής
Δημοσθένης Βουγιούκας

Μάιος 2018

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μελέτη Παρεμβολών μεταξύ Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και Δικτύων WLAN

Θεμιστοκλής Κοντογιάννης

**Επιβλέπων Καθηγητής
Δημοσθένης Βουγιούκας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2018

ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής ήταν η μελέτη παρεμβολών μεταξύ ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSNs) και δικτύων Wi-Fi (WLANs). Διενεργήθηκαν μετρήσεις σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων για την εκτίμηση της ποιότητας της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης σε πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας συστήματος WLAN. Η επεξεργασία των μετρήσεων φανέρωσε την ύπαρξη παρεμβολών στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν παρεμβολές που καταγράφηκαν για δυο διαφορετικές θέσεις των αισθητήρων και το συμπέρασμα ήταν ότι η μείωση της απόστασης μεταξύ του AP (Wi-Fi Access Point) και του ασύρματου δικτύου αισθητήρων (WSN) αυξάνει το πλήθος των μη λαμβανόμενων πακέτων με αρνητικό αντίκτυπο στη ρυθμαπόδοση (throughput) της επικοινωνίας των αισθητήρων.

Έχει προηγηθεί θεωρητική ανάλυση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που υλοποιούν ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (ZigBee) και ασύρματα τοπικά δίκτυα (802.11).

Summary

The scope of this M.Sc. dissertation was to study interference between wireless sensor networks (WSNs) and Wi-Fi networks (WLANs). The measurements were performed at a wireless sensor network estimating the quality of this wireless link while a Wi-Fi system was present and operable. The processing of measurements showed the existence of interference at the wireless sensor network.

Specifically, presented the interference recorded for two different positions of the sensors and for different Wi-Fi protocols (802.11g/n). The conclusion was that the reduction of distance between AP (Wi-Fi Access Point) and the wireless sensor network (WSN) increases the non-received number of packet. This fact reduces the throughput of the wireless sensor network (WSN). In addition, it was presented that the change of the Wi-Fi protocol, also affects the wireless sensor network.

Previously, was presented a theoretical analysis for communication protocols that regulate wireless sensor networks (ZigBee) and wireless local networks (802.11).

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου το οποίο, με την επιδότηση διδάκτρων που προσφέρει σε πολύτεκνους φοιτητές, μου έδωσε τη δυνατότητα να παρακολουθήσω και να ολοκληρώσω δωρεάν το παρόν μεταπτυχιακό πρόγραμμα.

Επίσης, ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δημοσθένη Βουγιούκα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της διατριβής και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό το επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα.

Τέλος ευχαριστώ τη σύζυγό μου Στέλα, που με παρότρυνε να ξαναπιάσω μετά από πολλά χρόνια, τα βιβλία καθώς και για την συνεχή υποστήριξη κατά τη διάρκεια αυτών των δυο ετών. Χρειάστηκε να αναλάβει πολύ περισσότερες υποχρεώσεις ώστε να έχω το χρόνο να ανταποκριθώ επιτυχώς στις απαιτήσεις αυτού του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Θα ήθελα να αναφέρω ότι η εργασία αυτή αφιερώνεται στα παιδιά μου Άννα, Γεωργία, Βασίλειο, Χρήστο, Πορφύριο και Αναστάσιο-Τίτο, τα οποία έδειξαν πρωτοφανή υπομονή τις ώρες που ήμουν χωμένος και χαμένος στον υπολογιστή! Τους εύχομαι κάθε προκοπή στη ζωή τους πνευματική και σωματική.

Περιεχόμενα

Περίληψη	ii
Summary.....	iv
Ευχαριστίες.....	v
Περιεχόμενα	vi
Ευρετήριο Πινάκων.....	ix
Ευρετήριο Σχημάτων.....	xi
Ευρετήριο Γραφημάτων	xiv
Ευρετήριο Συντμήσεων – Ακρωνυμίων	xvi
Κεφάλαιο 1	1
Εισαγωγή.....	1
1.1 IEEE.....	2
1.2 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων – WSN	4
1.2.1 Εφαρμογές WSN.....	4
1.2.2 Προκλήσεις σχεδίασης WSN.....	5
1.3 Συνύπαρξη διαφόρων δικτύων.....	7
Κεφάλαιο 2	8
Ασύρματα Πρότυπα IEEE	8
2.1 Πρωτόκολλο 802.11	9
2.1.1 Πρότυπο 802.11b.....	10
2.1.2 Πρότυπο 802.11a	12
2.1.3 Πρότυπο 802.11g.....	15
2.1.4 Πρότυπο 802.11n.....	17
2.1.5 Πρότυπο 802.11ac.....	19
2.1.6 Πρότυπο 802.11.ax.....	21
2.2 Πρωτόκολλο ZigBee.....	23
2.2.1 Τα πλεονεκτήματα του ZigBee.....	23
2.2.2 Δομή και τοπολογίες δικτύου.....	24
2.2.3 Τύποι Συσκευών ZigBee.....	27
2.2.4 Η στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee	28
2.2.5 Σύνδεση στο δίκτυο	39
2.2.6 Ισχύς εκπομπής, ευαισθησία δέκτη, data rates.....	42
2.2.7 Εφαρμογές της τεχνολογίας ZigBee	43

2.3	Παρεμβολή συνεγκατεστημένων πρωτοκόλλων 802.11 και ZigBee.....	48
	Κεφάλαιο 3	50
	Θεωρία διάδοσης και θεωρητικοί υπολογισμοί σημαντικών παραμέτρων.....	50
3.1	Μηχανισμοί διάδοσης ΗΜ κύματος	50
3.1.1	Ανάκλαση.....	51
3.1.2	Διάθλαση.....	51
3.1.3	Περίθλαση	52
3.1.4	Σκέδαση.....	53
3.1.5	Διάδοση ελεύθερου χώρου	53
3.2	Περιγραφή μοντέλων σχεδιασμού δικτύων.....	53
3.2.1	Μοντέλο Wall and floor	54
3.2.2	Μοντέλο ITU-R [ITU, 1238]	54
3.2.3	Μοντέλο COST231 Multi-wall.....	56
3.2.4	Μοντέλα Ray-tracing	57
3.3	Επίδραση διαφορετικών υλικών στη μετάδοση ΗΜ κύματος.....	57
3.3.1	Συστατικές παράμετροι –μέσου διάδοσης.....	58
3.3.2	Αγωγοί και διηλεκτρικά	58
3.3.3	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τυπικών δομικών υλικών	59
3.4	Μετρικές.....	59
3.4.1	Baud rate.....	60
3.4.2	PER – Packet Error Rate	60
3.4.3	RSSI – Received Signal Strength Indicator	61
3.4.4	Throughput.....	61
3.4.5	RTT – Round-Trip Time.....	62
	Κεφάλαιο 4	63
	Πειραματική Ανάλυση και Μετρήσεις	63
4.1	Ανάλυση εργαλείων – εξοπλισμού.....	63
4.1.1	Εξοπλισμός Access Point D-Link GO-RT-N150.....	64
4.1.2	Γεννήτρια θορύβου (κίνησης δικτύου)	64
4.1.3	Εξοπλισμός Arduino Due	70
4.1.4	Λογισμικό Arduino (sw v. 1.8.3)	72
4.1.5	Πλακέτα - Ηλεκτρονική συσκευή, XBee	73
4.1.6	Λογισμικό XCTU	78
4.2	Προετοιμασία πειράματος – Αρχικοποιήσεις.....	90

4.2.1	Στάδια που ακολουθήθηκαν	90
4.2.2	Τοπολογία	92
4.2.3	Αρχικοποίηση του εξοπλισμού.....	93
4.2.4	Μετρηθήσες αρχικές τιμές θορύβου, χωρίς την παρουσία επικοινωνίας ZigBee	98
4.3	Πραγματοποίηση Μετρήσεων.....	101
4.3.1	Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 4800, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps	102
4.3.2	Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 9600, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps	103
4.3.3	Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 115200, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps	104
4.4	Γραφήματα και συμπεράσματα	105
4.4.1	Διαγράμματα αρχικοποίησης	105
4.4.2	Διαγράμματα μετρήσεων	108
Κεφάλαιο 5		116
Συμπεράσματα – Επίλογος		116
5.1	Απόσταση	116
5.2	Συχνότητα – κανάλι λειτουργίας.....	117
5.3	Πρωτόκολλο επικοινωνίας	117
5.4	Στοιχεία για περεταίρω μελέτη	118
Βιβλιογραφία		119

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1-1 Πρωτόκολλα δικτύων 802.x της IEEE.[1]	3
Πίνακας 2-1 Πρωτόκολλα δικτύων 802.11 της IEEE.[1]	9
Πίνακας 2-2 Κανάλια του 802.11.b και αλληλοεπικάλυψη αυτών.....	11
Πίνακας 2-3 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11.b, σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.....	12
Πίνακας 2-4 Data Rate στο 802.11.b.....	12
Πίνακας 2-5 Κανάλια του 802.11.a.....	13
Πίνακας 2-6 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11.a, σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.....	14
Πίνακας 2-7 Ευαισθησία δέκτη 802.11a, αναλόγως των χαρακτηριστικών του καναλιού.....	14
Πίνακας 2-8 Data Rate στο 802.11.a.....	15
Πίνακας 2-9 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11.g, σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.....	16
Πίνακας 2-10 Ευαισθησία δέκτη 802.11g, αναλόγως των χαρακτηριστικών του καναλιού.....	16
Πίνακας 2-11 Data Rate στο 802.11.g.....	17
Πίνακας 2-12 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11.n για 2.4GHz, σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.....	18
Πίνακας 2-13 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11.n για 5GHz, σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.....	19
Πίνακας 2-14 Ευαισθησία δέκτη 802.11n, αναλόγως των χαρακτηριστικών του καναλιού.....	19
Πίνακας 2-15 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11.ac.[9].....	20
Πίνακας 2-16 Ευαισθησία δέκτη 802.11ac, αναλόγως των χαρακτηριστικών του καναλιού.....	21
Πίνακας 2-17 Επιμέρους χαρακτηριστικά των τριών ζωνών συχνοτήτων του ZigBee.....	31
Πίνακας 2-18 Κεντρικές συχνότητες των καναλιών ZigBee.....	32
Πίνακας 2-19 Ζώνες συχνοτήτων, τυπική ισχύς εξόδου, διαμορφώσεις και data rates για τα πρωτόκολλα 802.11.4 και ZigBee.....	43

Πίνακας 2-20 Ζώνες συχνοτήτων και ελάχιστη ευαισθησία δέκτη για τα πρωτόκολλα 802.11.4 και ZigBee.....	43
Πίνακας 3-1 Τιμές του Lf σε dB, αναλόγως του περιβάλλοντος και της συχνότητας του σήματος.....	55
Πίνακας 3-2 Τιμές του n σε dB, αναλόγως του περιβάλλοντος και της συχνότητας του σήματος.....	56
Πίνακας 4-1 Περιεχόμενα .log αρχείου δέκτη, από το πειραματικό μέρος.....	70
Πίνακας 4-2 Οικογένεια των συσκευών XBee® της Digi International.....	74
Πίνακας 4-3 Χαρακτηριστικά ακροδεκτών XBee.....	77
Πίνακας 4-4 Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευών XBee.....	78
Πίνακας 4-5 Μετρηθήσες τιμές αρχικοποίησης με 802.11.g, τον αισθητήρα κοντά και μακριά του AP, για τα τρία διαφορετικά bitrates.....	99
Πίνακας 4-6 Μετρηθήσες τιμές αρχικοποίησης με 802.11.n, τον αισθητήρα κοντά και μακριά του AP, για τα τρία διαφορετικά bitrates.....	100
Πίνακας 4-7 Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 4800, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps.....	102
Πίνακας 4-8 Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 9600, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps.....	103
Πίνακας 4-9 Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 115200, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps.....	104

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1	Λογότυπο IEEE.....	2
Σχήμα 1-2	Εφαρμογές δικτύων αισθητήρων αναλόγως του έργου τους.	5
Σχήμα 1-3	Διαφορετικά είδη ασύρματων αισθητήρων.	6
Σχήμα 1-4	Διαφορετικά είδη μπαταριών για ασύρματους αισθητήρες.	6
Σχήμα 2-1	Κανάλια του 802.11.b και αλληλοεπικάλυψη αυτών.	10
Σχήμα 2-2	Κανάλια του 802.11.b που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα.	11
Σχήμα 2-3	Δομή του frame του 802.11b.	12
Σχήμα 2-4	Κανάλια του 802.11.a.....	13
Σχήμα 2-5	Δομή του frame του 802.11a.	14
Σχήμα 2-6	Κανάλια του 802.11.g για διαμόρφωση OFDM.....	15
Σχήμα 2-7	Κανάλια του 802.11.g για διαμόρφωση DSSS.....	15
Σχήμα 2-8	Δομή frame του 802.11b για DSSS-OFDM μεταδόσεις.	16
Σχήμα 2-9	Κανάλια του 802.11.n, στη ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz και για εύρη καναλιών 20 και 40MHz.....	17
Σχήμα 2-10	Κανάλια του 802.11.n, στη ζώνη συχνοτήτων 5GHz και για εύρη καναλιών 20 και 40MHz.....	18
Σχήμα 2-11	Δομές του frame του 802.11n.....	18
Σχήμα 2-12	Κανάλια του 802.11.ac.....	20
Σχήμα 2-13	Δομή του frame του 802.11ac.	20
Σχήμα 2-14	Πρόσβαση ενός χρήστη OFDM και πολλών χρηστών OFDMA στο ίδιο κανάλι.....	22
Σχήμα 2-15	Δομές του frame του 802.11ax.....	22
Σχήμα 2-16	Λογότυπο εταιρίας ZigBee Alliance.	23
Σχήμα 2-17	Τοπολογία δικτύων ZigBee - Αστέρας.....	25
Σχήμα 2-18	Τοπολογία δικτύων ZigBee – Σημείου προς σημείο.....	26
Σχήμα 2-19	Τοπολογία δικτύων ZigBee – Δέντρο.....	27
Σχήμα 2-20	Δομή επιπέδων ZigBee.[11]	29
Σχήμα 2-21	Φυσικό επίπεδο (Physical layer, PHY).....	29
Σχήμα 2-22	Δομή πλαισίου στο φυσικό επίπεδο, PHY, του ZigBee.	30
Σχήμα 2-23	Κατανομή καναλιών ZigBee σε κάθε ζώνη συχνοτήτων.....	31
Σχήμα 2-24	Παράδειγμα υπερπλαισίου φυσικού επιπέδου, του ZigBee.....	33

Σχήμα 2-25 Επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control layer, MAC)	34
Σχήμα 2-26 Δομή πλαισίου στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC) , του ZigBee.....	34
Σχήμα 2-27 Επίπεδο δικτύου (Network layer, NWK).....	36
Σχήμα 2-28 Επίπεδο εφαρμογών (Application layer, APL).....	38
Σχήμα 2-29 Σύστημα ασφάλειας κτηρίων	44
Σχήμα 2-30 Σύστημα τηλεϊατρικής.....	45
Σχήμα 2-31 Οικιακές εφαρμογές.....	45
Σχήμα 2-32 Εφαρμογή στα οχήματα.....	46
Σχήμα 2-33 Γεωργία ακριβείας.....	46
Σχήμα 2-34 Εφαρμογές Emergency 1.....	47
Σχήμα 2-35 Εφαρμογές Emergency 2.....	48
Σχήμα 2-36 2.4GHz κανάλια ZigBee και Wi-Fi.	48
Σχήμα 2-37 Πολύ κοντινές κεντρικές συχνότητες.	49
Σχήμα 2-38 Σχετικά μακρινές κεντρικές συχνότητες.	49
Σχήμα 3-1 Ανάκλαση.	51
Σχήμα 3-2 Διάθλαση.	52
Σχήμα 3-3 Περίθλαση ή σκίαση.	52
Σχήμα 3-4 Σκέδαση.....	53
Σχήμα 4-1 Access Point D-Link GO-RT-N150.....	64
Σχήμα 4-2 Πρώτη αρχιτεκτονική γεννήτριας κίνησης δικτύου	65
Σχήμα 4-3 Δεύτερη αρχιτεκτονική γεννήτριας κίνησης δικτύου.....	66
Σχήμα 4-4 Εντολή ITGSend.....	67
Σχήμα 4-5 Εντολή ITGRecv.....	68
Σχήμα 4-6 Εντολή ITGDec.	68
Σχήμα 4-7 Λογότυπο του Arduino	71
Σχήμα 4-8 Arduino DUE	71
Σχήμα 4-9 Λογισμικό Arduino (sw v. 1.8.3).....	73
Σχήμα 4-10 Διαστάσεις συσκευής XBee	74
Σχήμα 4-11 Τύποι κεραιών Xbee.....	75
Σχήμα 4-12 XbeeS2C.....	76
Σχήμα 4-13 XBee Series2 (S2).....	77
Σχήμα 4-14 Λογισμικό XCTU.....	79

Σχήμα 4-15 Radio Range Test Tool.	85
Σχήμα 4-16 Spectrum Analyzer Tool.....	86
Σχήμα 4-17 Μέτρηση από την περίπτωση 802.11g, Bit rate 5.5Mbps, με τον αισθητήρα μακριά από κοντά στο AP, της παρούσας εργασίας.....	87
Σχήμα 4-18 Throughput Tool.	88
Σχήμα 4-19 Console Mode.....	89
Σχήμα 4-20 Τοπολογία αρχικοποίησης.....	92
Σχήμα 4-21 Τοπολογία μετρήσεων.....	93
Σχήμα 4-22 Μάσκα XCTU για τη ρύθμιση των XBees.....	94
Σχήμα 4-23 Μάσκα ρύθμισης Access Point μέσω browser.	96
Σχήμα 4-24 Κυρίως εξοπλισμός μέτρησης τιμών αρχικοποίησης θορύβου.	98
Σχήμα 4-25 Κυρίως εξοπλισμός μέτρησης τιμών.	101
Σχήμα 5-1 802.11ax - διαίρεση καναλιού 20MHz σε τμήματα των 2MHz και ξεχωριστή χρήση καθενός από αυτά.....	118

Ευρετήριο Γραφημάτων

Γράφημα 3-1 Απώλεια σε σχέση με το πλήθος ορόφων, σύμφωνα με το COST231 Multi-wall model	57
Γράφημα 4-1 Στάθμη θορύβου για 802.11g με τον αισθητήρα κοντά στο AP.....	105
Γράφημα 4-2 Στάθμη θορύβου για 802.11g με τον αισθητήρα μακριά από το AP.....	106
Γράφημα 4-3 Στάθμη θορύβου για 802.11n με τον αισθητήρα κοντά στο AP.	106
Γράφημα 4-4 Στάθμη θορύβου για 802.11n με τον αισθητήρα μακριά από το AP.....	107
Γράφημα 4-5 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως της συχνότητας f_c των XBees, όταν αυτά βρίσκονται κοντά στο AP.	108
Γράφημα 4-6 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως της συχνότητας f_c των XBees, όταν αυτά βρίσκονται μακριά από το AP.....	109
Γράφημα 4-7 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως του bit rate της γεννήτριας θορύβου, όταν αυτή εκπέμπει σε 802.11n και τα XBees βρίσκονται κοντά στο AP.....	110
Γράφημα 4-8 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως του bit rate της γεννήτριας θορύβου, όταν αυτή εκπέμπει σε 802.11n και τα XBees βρίσκονται μακριά από το AP.	110
Γράφημα 4-9 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως του bit rate της γεννήτριας θορύβου, όταν αυτή εκπέμπει σε 802.11g και τα XBees βρίσκονται κοντά στο AP.....	111
Γράφημα 4-10 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως του bit rate της γεννήτριας θορύβου, όταν αυτή εκπέμπει σε 802.11g και τα XBees βρίσκονται μακριά από το AP.	111
Γράφημα 4-11 Βαθμός μεταβολής Throughput αναλόγως του baud rate της επικοινωνίας των XBees για διάφορα bit rates, όταν τα XBees βρίσκονται κοντά στο AP.	112
Γράφημα 4-12 Βαθμός μεταβολής Throughput αναλόγως του baud rate της επικοινωνίας των XBees για διάφορα bit rates, όταν τα XBees βρίσκονται μακριά από το AP.	113
Γράφημα 4-13 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 115200 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees κοντά στο AP.	114
Γράφημα 4-14 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 115200 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees μακριά από το AP.....	114
Γράφημα 4-15 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 9600 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees κοντά στο AP.	114

Γράφημα 4-16 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 96200 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees μακριά από το AP.....	115
Γράφημα 4-17 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 4800 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees κοντά στο AP.	115
Γράφημα 4-18 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 4800 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees μακριά από το AP.....	115

Ευρετήριο Συντμήσεων – Ακρωνυμίων

AP	Access Point
AF	Application Framework
APL	APplication Layer
APS	APplication Support sub layer
BER	Bit Error Rate
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CCK	Complementary Code Keying
CAP	Contention-Access Period
CFP	Contention-Free Period
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
D-ITG	Distributed Internet Traffic Generator
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full Function Device
ID	Identification
IDT	Internet Departure Time
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
MFR	Mac Footer
MLME	MAC Layer Management Entity
MLME-SAP	MAC Layer Management Entity - Service Access Point
MAC	Medium Access Control layer
NWK	Network layer
NLDE	Network Layer Data Entity
NLME	Network Layer Management Entity
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PER	Packet Error Rate
PS	Packet Size
PAN	Personal Area Network
PAN ID	Personal Area Network Identification
PSDU	PHY Service Data Unit
PHY	Physical layer
RF	Radio Frequency
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RFD	Reduced Function Device
RTT	Round-Trip Time
SAP	Service Access Point
TSP	Traffic Specification Protocol
UTD	Uniform Theory of Diffraction
WLAN	Wireless Local Area Network
WLANS	Wireless Local Area Networks
WPAN	Wireless Personal Area Network

WPANs	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
WSNs	Wireless Sensor Networks
ZDO	ZigBee Device Objects

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Από παλιά ο άνθρωπος ψάχνει τρόπους επικοινωνίας με σκοπό τη μεταφορά πληροφοριών από μέρος σε μέρος. Αρχικά με σήματα καπνού, αργότερα με τις φρυκτωρίες. Χαρακτηριστική η μεταφορά της είδησης της πτώσης της Τροίας το 1218 π.Χ., η οποία μεταφέρθηκε ως τις Μυκήνες με αυτό τον τρόπο. Το σύστημα χρησιμοποιήθηκε για πολλούς αιώνες μέχρι το 1850 μ.Χ., αλλά μπορούσε να μεταφέρει μηνύματα μόνο με ένα κοινό κώδικα.

Με την ανακάλυψη του ηλεκτρισμού εφευρέθηκε το τηλέφωνο ως ενσύρματος τρόπος επικοινωνίας. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, νέοι ασύρματοι τρόποι μετάδοσης μηνυμάτων και πληροφοριών εξελίχθηκαν. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έφεραν επανάσταση στην ψηφιοποίηση, αποθήκευση και επεξεργασία πληροφοριών. Το διαδίκτυο αποτελεί χαρακτηριστικό δείγμα της εξέλιξης των επικοινωνιών και της διασύνδεσης των ΗΥ μεταξύ τους.

Το IoT – Internet of Things, αποτελεί την τελευταία εξέλιξη του διαδικτύου. Αντικείμενα εξοπλισμένα με διάφορους αισθητήρες συλλέγουν πληροφορίες, επιτηρούν και μεταδίδουν μέσω του διαδικτύου μεταξύ χρήστη και αντικειμένου ό,τι κρίνεται σκόπιμο.

1.1 IEEE

Η επικοινωνία των διαφόρων ψηφιακών συσκευών και υπολογιστικών συστημάτων μεταξύ τους καθίσταται εφικτή εφόσον ακολουθούνται κάποιοι κοινοί κανόνες. Αυτοί ορίζονται στα πρωτόκολλα επικοινωνίας που διάφοροι οργανισμοί έχουν εκδώσει και εκδίδουν βελτιώνοντας κάθε φορά τις επιδόσεις των.

Το **Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών — IEEE** (Institute of Electrical and Electronics Engineers), είναι ένας επαγγελματικός οργανισμός, ο οποίος μεταξύ των άλλων ασχολείται με τη δημιουργία προτύπων – πρωτοκόλλων επικοινωνίας ηλεκτρονικών υπολογιστών.



Σχήμα 1-1 Λογότυπο IEEE

Τα πρωτόκολλα αυτού του σκοπού τα ονομάζει 802. Γνωστό μας είναι το 802.3 που αναφέρεται στην ενσύρματη σύνδεση ΗΥ, το Ethernet. Παρακάτω φαίνεται πίνακας με όλα τα πρωτόκολλα της οικογένειας 802.

Name	Description	Note
IEEE 802.1	Higher Layer LAN Protocols (Bridging)	active
IEEE 802.2	LLC	disbanded
IEEE 802.3	Ethernet	active
IEEE 802.4	Token bus	disbanded
IEEE 802.5	Token ring MAC layer	disbanded
IEEE 802.6	MANs (DQDB)	disbanded
IEEE 802.7	Broadband LAN using Coaxial Cable	disbanded
IEEE 802.8	Fiber Optic TAG	disbanded
IEEE 802.9	Integrated Services LAN (ISLAN or isoEthernet)	disbanded
IEEE 802.10	Interoperable LAN Security	disbanded
IEEE 802.11	Wireless LAN (WLAN) & Mesh (Wi-Fi certification)	active
IEEE 802.12	100BaseVG	disbanded
IEEE 802.13	Unused[2]	Reserved for Fast Ethernet development ^[3]
IEEE 802.14	Cable modems	disbanded
IEEE 802.15	Wireless PAN	active
IEEE 802.15.1	Bluetooth certification	active
IEEE 802.15.2	IEEE 802.15 and IEEE 802.11 coexistence	
IEEE 802.15.3	High-Rate wireless PAN (e.g., UWB, etc.)	
IEEE 802.15.4	Low-Rate wireless PAN (e.g., ZigBee, WirelessHART, MiWi, etc.)	active
IEEE 802.15.5	Mesh networking for WPAN	
IEEE 802.15.6	Body area network	active
IEEE 802.15.7	Visible light communications	
IEEE 802.16	Broadband Wireless Access (WiMAX certification)	
IEEE 802.16.1	Local Multipoint Distribution Service	
IEEE 802.16.2	Coexistence wireless access	
IEEE 802.17	Resilient packet ring	hibernating
IEEE 802.18	Radio Regulatory TAG	
IEEE 802.19	Coexistence TAG	
IEEE 802.20	Mobile Broadband Wireless Access	hibernating
IEEE 802.21	Media Independent Handoff	
IEEE 802.22	Wireless Regional Area Network	
IEEE 802.23	Emergency Services Working Group	
IEEE 802.24	Smart Grid TAG	New (November, 2012)
IEEE 802.25	Omni-Range Area Network	

Πίνακας 1-1 Πρωτόκολλα δικτύων 802.x της IEEE.[1]

Ορισμένα από αυτά είναι ενεργά, κάποια έχουν ξεπεραστεί ενώ άλλα είναι υπό κατασκευή.

1.2 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων – WSN

Ένα πεδίο που έχει ιδιαίτερα αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων WSN (Wireless Sensor Networks). Τα πρότυπα της IEEE που υλοποιούν τέτοιου είδους δίκτυα ανήκουν στην οικογένεια 802.15. παρακάτω αναφέρονται ορισμένα από αυτά:

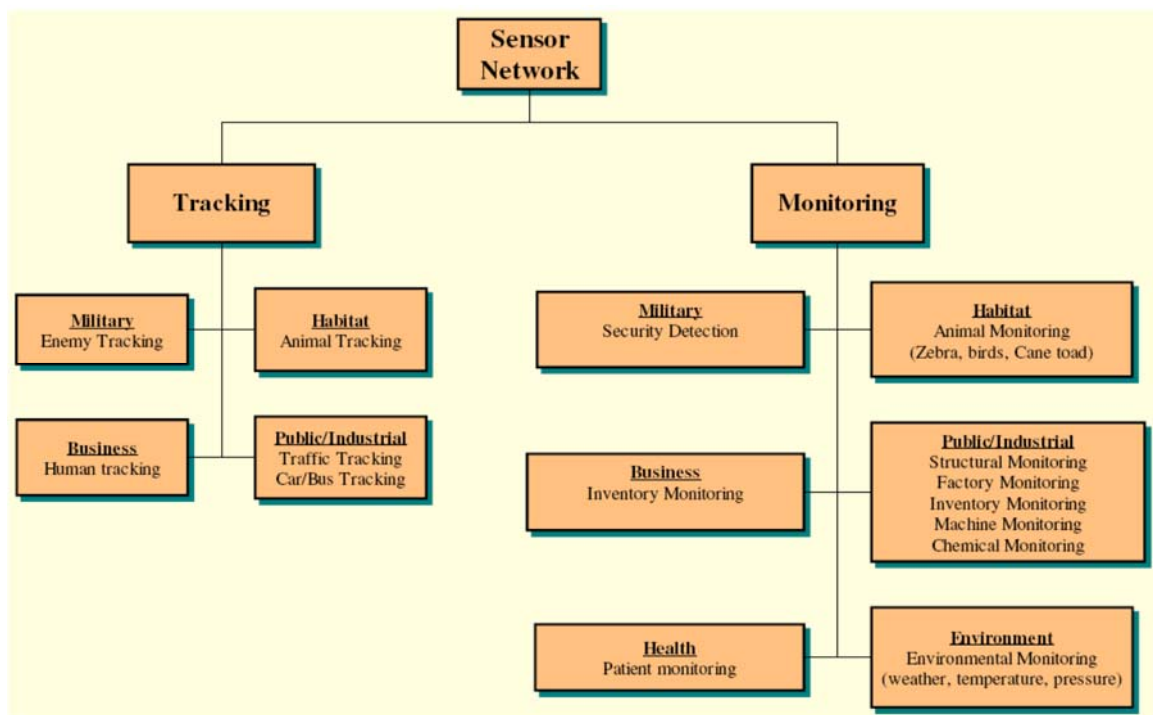
- 802.15.1 – Bluetooth
- 802.15.4
- ZigBee

1.2.1 Εφαρμογές WSN

Οι εφαρμογές δικτύων αισθητήρων είναι πάρα πολλές και χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, αναλόγως του σκοπού τους[2]:

- Monitoring – επίβλεψης
- Tracking – ανίχνευσης

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται αρκετές εφαρμογές δικτύων αισθητήρων, χωρισμένες στις δυο προαναφερθείσες κατηγορίες.

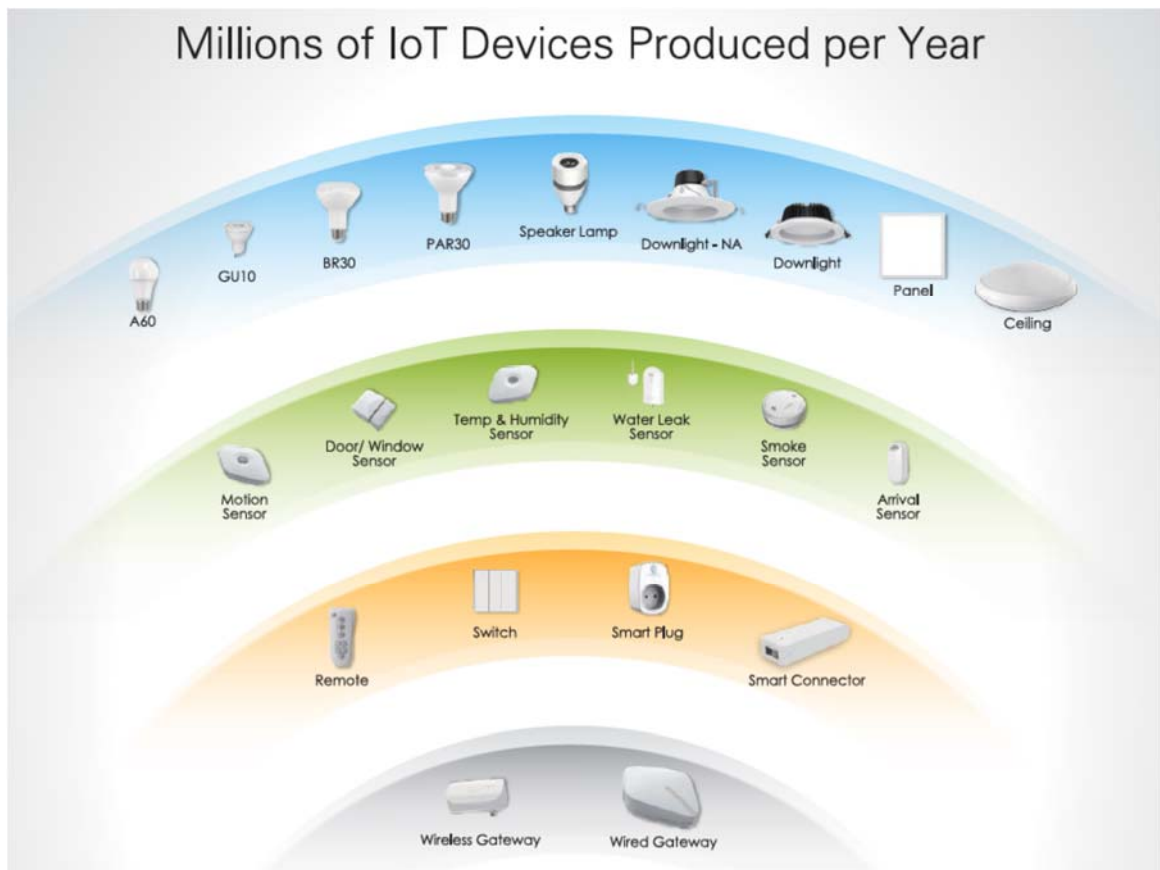


Σχήμα 1-2 Εφαρμογές δικτύων αισθητήρων αναλόγως του έργου τους.

1.2.2 Προκλήσεις σχεδίασης WSN

Ένα δίκτυο αισθητήρων πρέπει να είναι ανθεκτικό σε σφάλματα. Επειδή δεν επιτηρείται ο κάθε αισθητήρας, θα πρέπει να μην επηρεάζεται ο γενικός σκοπός του δικτύου από την αποτυχία ενός αισθητήρα λόγω π.χ. βροχής ή κατανάλωσης ισχύος.

Επίσης το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων θα πρέπει να είναι επεκτάσιμο. Έτσι θα μπορεί να συνεργαστεί με μεγάλο αριθμό κόμβων.



Σχήμα 1-3 Διαφορετικά είδη ασύρματων αισθητήρων.

Ακόμη, πρέπει να αποτελείται από στοιχεία μικρού μεγέθους. Λόγω των σημείων που τοποθετούνται οι αισθητήρες, είναι αναγκαίο οι μονάδες τροφοδοσίας, παρακολούθησης, επεξεργασίας και αποστολής - λήψης του αισθητήρα, να εντάσσονται σε μικροσκοπικό περίβλημα.



Σχήμα 1-4 Διαφορετικά είδη μπαταριών για ασύρματους αισθητήρες.

Τέλος, σημαντική πρόκληση για ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι η κατανάλωση ισχύος[3]. Συγκεκριμένα, η αντικατάσταση των πόρων ενέργειας, πολλές φορές είναι αδύνατη λόγω του σημείου που βρίσκονται οι αισθητήρες πχ ωκεανοί. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι η κατανάλωση ισχύος επηρεάζει άμεσα το χρόνο ζωής του δικτύου αισθητήρων.

1.3 Συνύπαρξη διαφόρων δικτύων.

Πολλά από τα προαναφερθέντα ασύρματα δίκτυα τυγχάνει σε αρκετές περιπτώσεις να συνυπάρχουν στα ίδια περιβάλλοντα.

Σε αυτές τις περιπτώσεις αλληλεπιδρούν μεταξύ τους παρεμβάλλοντας λίγο ή πολύ το ένα στο άλλο. Ο βαθμός της παρεμβολής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Χωρική απόσταση μεταξύ των δικτύων
- Ζώνη συχνοτήτων στην οποία λειτουργεί καθένα από τα δίκτυα.
- Τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε προτύπου που χρησιμοποιείται από το αντίστοιχο δίκτυο

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή σκοπεύει στη μελέτη της περίπτωσης συνύπαρξης ασύρματου δικτύου Wi-Fi (WLAN) και δικτύου ασύρματου αισθητήρων (WSN).

Κεφάλαιο 2

Ασύρματα Πρότυπα IEEE

Σε αυτή την εργασία θα ασχοληθούμε με τα ασύρματα πρότυπα της IEEE, 802.11 και ZigBee, τον τρόπο που παρεμβάλλει το πρώτο στο δεύτερο και τις μεθόδους αποφυγής των παρεμβολών.

Πρόκειται για δύο δίκτυα που μπορούν να συνυπάρξουν συνήθως σε κλειστούς χώρους. Αυτό συμβαίνει επειδή το 802.11 συστήνει ασύρματο δίκτυο υπολογιστών WLAN, ενώ το 802.15.4, που αποτελεί τα πρώτα δύο στρώματα του ZigBee, ασύρματο δίκτυο αισθητήρων WPAN – Wireless Personal Area Network.

Διαφέρουν βεβαίως ως προς τα επιμέρους τεχνικά χαρακτηριστικά, ωστόσο συχνά παρατηρούνται παρεμβολές του ενός προς το άλλο.

Παρακάτω θα ακολουθήσει μια επισκόπηση του κάθε προτύπου.

2.1 Πρωτόκολλο 802.11

Το πρότυπο 802.11, χωρίζεται σε επιμέρους πρότυπα αναλόγως της συχνότητας λειτουργίας του καθώς και άλλων χαρακτηριστικών αυτού. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αυτά τα πρότυπα:

802.11 network PHY standards								
802.11 Protocol	Release date ^[6]	Fre- quency (GHz)	Band- width (MHz)	Stream data rate ^[7] (Mbit/s)	Allowable MIMO streams	Modulation	Approximate range ^[citation needed]	
							Indoor	Outdoor
802.11-1997	Jun-97	2.4	22	1, 2	N/A	DSSS, FHSS	20 m (66 ft)	100 m (330 ft)
a	Sep-99	5	20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	N/A	OFDM	35 m (115 ft)	120 m (390 ft)
		3.7[A]					5,000 m (16,000 ft)[A]	
b	Sep-99	2.4	22	1, 2, 5.5, 11	N/A	DSSS	35 m (115 ft)	140 m (460 ft)
g	Jun-03	2.4	20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	N/A	OFDM	38 m (125 ft)	140 m (460 ft)
n	Oct-09	2.4/5	20	Up to 288.8[B]	4		70 m (230 ft)	250 m (820 ft)[8]
			40	Up to 600[B]				
ac	Dec-13	5	20	Up to 346.8[B]	8	MIMO-OFDM	35 m (115 ft)[9]	
			40	Up to 800[B]				
			80	Up to 1733.2[B]				
			160	Up to 3466.8[B]				
	0.054-0.79[C]	06-Aug		Up to 568.9[10]	4			
ad	Dec-12	60	2,160	Up to 6,757[11]	N/A	OFDM, single carrier,	3.3 m (11 ft)[12]	
				(6.7 Gbit/s)		low-power single carrier		
ah	Dec-16	0.9		Up to 347 [13]				
aj	Est. Jul 2017	45/60						
ax	Est. Dec 2018	2.4/5		Up to 10.53 Gbit/s		MIMO-OFDM		
ay	Est. Nov 2019	60	8000	Up to 100,000 (100 Gbit/s)	4	OFDM, single carrier,	60	
az	Est. Mar 2021	60						

Πίνακας 2-1 Πρωτόκολλα δικτύων 802.11 της IEEE.[1]

Αρχικά υπήρχε το 802.11, που δημιουργήθηκε το 1997, λειτουργούσε στα 2.4GHz, με 1 ή 2Mbps και είδος διαμόρφωσης FHSS ή DSSS.

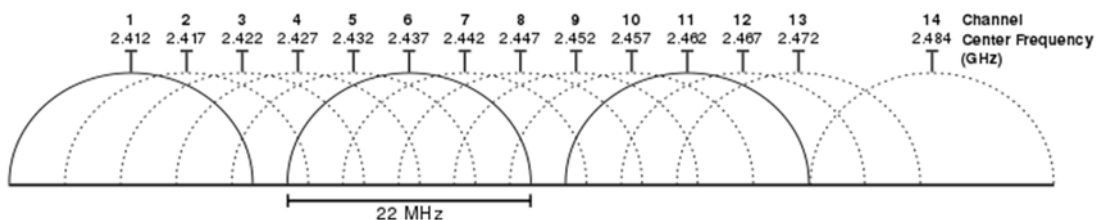
Τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται σήμερα συχνότερα είναι τα παρακάτω:

- 802.11b
- 802.11a
- 802.11g
- 802.11n
- 802.11ac
- 802.11ax

Στη συνέχεια καθένα από τα παραπάνω πρότυπα θα περιγραφεί ως προς τα χαρακτηριστικά του.

2.1.1 Πρότυπο 802.11b

Το πρότυπο 802.11b δημιουργήθηκε το 1999[4]. Η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του είναι στα 2.4GHz. Η ζώνη χωρίζεται σε 14 κανάλια εύρους 22MHz έκαστο.

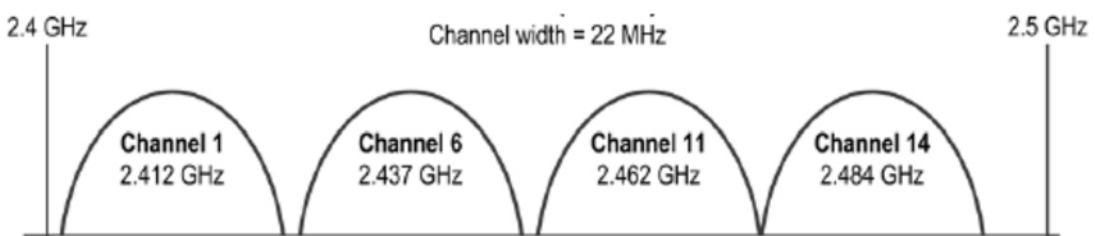


Σχήμα 2-1 Κανάλια του 802.11.b και αλληλοεπικάλυψη αυτών.

802.11b channel to frequency map			
Channel	Center Frequency	Channel Width	Overlaps Channels
1	2.412 GHz	2.401–2.423 GHz	2,3,4,5
2	2.417 GHz	2.406–2.428 GHz	1,3,4,5,6
3	2.422 GHz	2.411–2.433 GHz	1,2,4,5,6,7
4	2.427 GHz	2.416–2.438 GHz	1,2,3,5,6,7,8
5	2.432 GHz	2.421–2.443 GHz	1,2,3,4,6,7,8,9
6	2.437 GHz	2.426–2.448 GHz	2,3,4,5,7,8,9,10
7	2.442 GHz	2.431–2.453 GHz	3,4,5,6,8,9,10,11
8	2.447 GHz	2.436–2.458 GHz	4,5,6,7,9,10,11,12
9	2.452 GHz	2.441–2.463 GHz	5,6,7,8,10,11,12,13
10	2.457 GHz	2.446–2.468 GHz	6,7,8,9,11,12,13
11	2.462 GHz	2.451–2.473 GHz	7-10,12-13
12	2.467 GHz	2.456–2.478 GHz	8,9,10,11,13,14
13	2.472 GHz	2.461–2.483 GHz	9,10,11,12,14
14	2.484 GHz	2.473–2.495 GHz	12,13

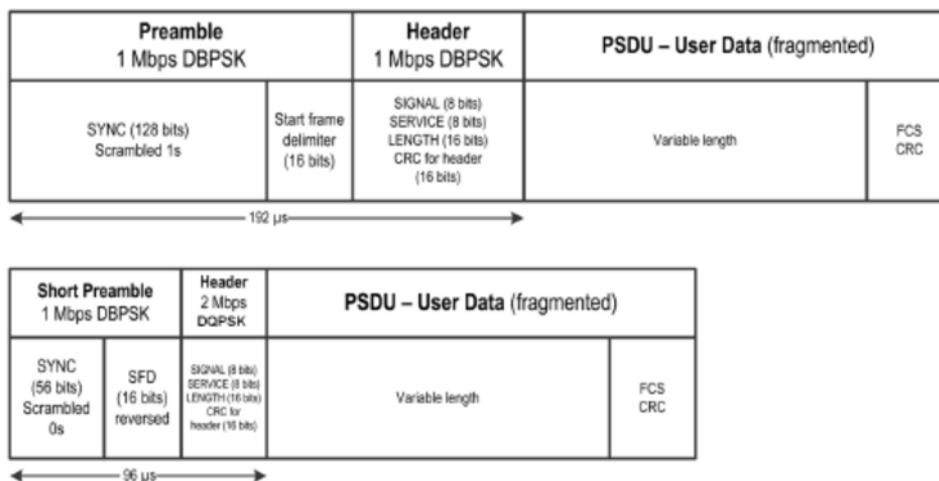
Πίνακας 2-2 Κανάλια του 802.11.b και αλληλοεπικάλυψη αυτών.

Τα κανάλια αυτά αλληλεπικαλύπτονται μεταξύ τους, όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα για αυτό χρειάζεται προσεκτική χρήση τους.



Σχήμα 2-2 Κανάλια του 802.11.b που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα.

Η διαμόρφωση είναι DSSS για τα 1 και 2 Mbps, ενώ CCK για τα 5.5 και 11Mbps. Η δομή του frame του 802.11b φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2-3 Δομή του frame του 802.11b.

Το ελάχιστο επίπεδο ευαισθησίας στο δέκτη είναι -76dBm ενώ το μέγιστο -10dBm. Η ισχύς εκπομπής φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Γεωγραφική περιοχή	Μέγιστη ισχύς εξόδου
ΗΠΑ	1000mW
Ευρώπη	100mW

Πίνακας 2-3 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11b, σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.

Το data rate, αναλόγως της ισχύος του σήματος, είναι από 1Mbps – 11Mbps:

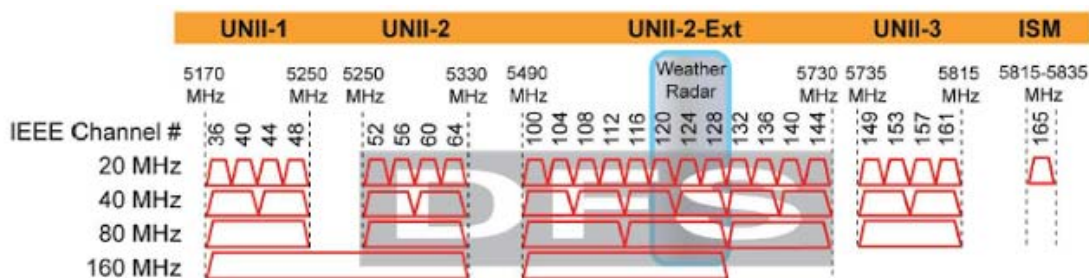
Data Rate	Code Length	Modulation	Symbol Rate	Bits/Symbol
1 Mbps	11 (Barker Sequence)	BPSK	1 MSps	1
2 Mbps	11 (Barker Sequence)	QPSK	1 MSps	2
5.5 Mbps	8 (CCK)	QPSK	1.375 MSps	4
11 Mbps	8 (CCK)	QPSK	1.375 MSps	8

Πίνακας 2-4 Data Rate στο 802.11b.

2.1.2 Πρότυπο 802.11a

Το πρότυπο 802.11a δημιουργήθηκε το 1999[5]. Η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του είναι στα 5GHz. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται είναι η OFDM. Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται

είναι εύρους 20MHz ή 40MHz ή 80MHz ή 160MHz έκαστο, όπως φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα:



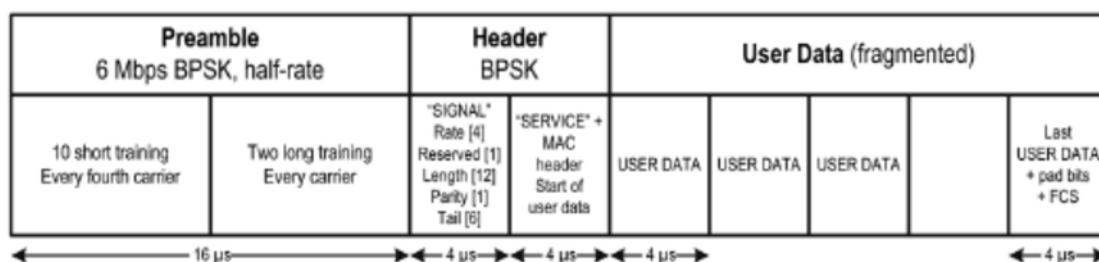
Σχήμα 2-4 Κανάλια του 802.11.a.

Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται φαίνονται επίσης και στον παρακάτω πίνακα:

Channel	Center Frequency MHz	Frequency Range MHz	Bandwidth (MHz)	Europe
36	5180	5170-5190	20	Indoors
40	5200	5190-5210	20	Indoors
44	5220	5210-5230	20	Indoors
48	5240	5230-5250	20	Indoors
50	5250	5170-5330	160	DFS
52	5260	5250-5270	20	Indoors/DFS/TPC
56	5280	5270-5290	20	Indoors/DFS/TPC
60	5300	5290-5310	20	Indoors/DFS/TPC
64	5320	5310-5330	20	Indoors/DFS/TPC
100	5500	5490-5510	20	DFS/TPC
104	5520	5510-5530	20	DFS/TPC
108	5540	5530-5550	20	DFS/TPC
112	5560	5550-5570	20	DFS/TPC
114	5570	5490-5650	160	DFS
116	5580	5570-5590	20	DFS/TPC
120	5600	5590-5610	20	DFS/TPC
124	5620	5610-5630	20	DFS/TPC
128	5640	5630-5650	20	DFS/TPC
132	5660	5650-5670	20	DFS/TPC
136	5680	5670-5690	20	DFS/TPC
140	5700	5690-5710	20	DFS/TPC

Πίνακας 2-5 Κανάλια του 802.11.a.

Η δομή του frame του προτύπου 802.11a φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2-5 Δομή του frame του 802.11a.

Η ισχύς εκπομπής ανά κανάλι και συχνότητα λειτουργίας στο 802.11a φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Ζώνη συχνότητας λειτουργίας (GHz)	ΗΠΑ (Μέγιστη ισχύς εξόδου με έως 6dBi antenna gain) (mW)	Ευρώπη (Ενεργός ισοτροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς)
5.15 – 5.25	40 (2.5mW/MHz)	200mW
5.25 – 5.35	200 (12.5mW/MHz)	200mW
5.47 – 5.725	–	1W
5.725 – 5.825	800 (50mW/MHz)	–

Πίνακας 2-6 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11a, σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.

Το μέγιστο επίπεδο ευαισθησίας στο δέκτη είναι -30dBm ενώ το ελάχιστο, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα αναλόγως των επιμέρους χαρακτηριστικών εύρους καναλιού, ρυθμού κωδικοποίησης και είδους διαμόρφωσης:

Είδος διαμόρφωσης	Ρυθμός κωδικοποίησης (R)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (20MHz εύρος καναλιού)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (10MHz εύρος καναλιού)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (5MHz εύρος καναλιού)
BPSK	1/2	-82	-85	-88
BPSK	3/4	-81	-84	-87
QPSK	1/2	-79	-82	-85
QPSK	3/4	-77	-80	-83
16-QAM	1/2	-74	-77	-80
16-QAM	3/4	-70	-73	-76
64-QAM	2/3	-66	-69	-72
64-QAM	3/4	-65	-68	-71

Πίνακας 2-7 Ευαισθησία δέκτη 802.11a, αναλόγως των χαρακτηριστικών του καναλιού.

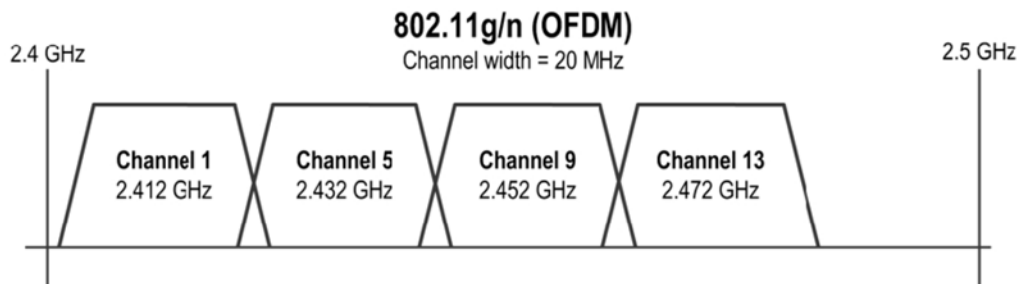
Το data rate, αναλόγως είδους διαμόρφωσης και ρυθμού κωδικοποίησης, φαίνεται παρακάτω:

Είδος διαμόρφωσης	Ρυθμός κωδικοποίησης (R)	Data rate (Mbps)
BPSK	1/2	6
BPSK	3/4	9
QPSK	1/2	12
QPSK	3/4	18
16-QAM	1/2	24
16-QAM	3/4	36
64-QAM	2/3	48
64-QAM	3/4	54

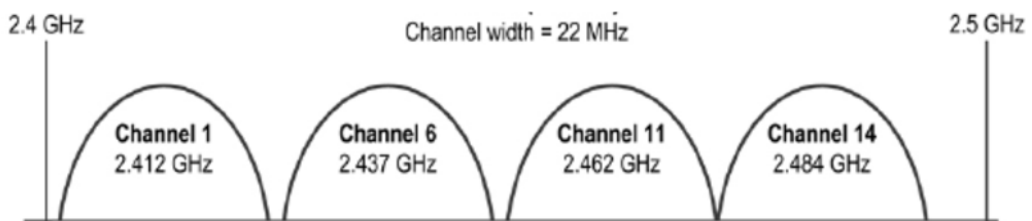
Πίνακας 2-8 Data Rate στο 802.11.a.

2.1.3 Πρότυπο 802.11g

Το πρότυπο 802.11g δημιουργήθηκε το 2003[6]. Η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του είναι στα 2.4GHz. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται είναι η OFDM για τα 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 και 54 Mbps, DSSS για τα 1 και 2 Mbps, ενώ CCK για τα 5.5 και 11Mbps. Το κάθε κανάλι με διαμόρφωση OFDM, έχει εύρος 20MHz, ενώ για αυτά που έχουν διαμόρφωση DSSS, ισχύει το 22MHz, όπως και στο 802.11b.

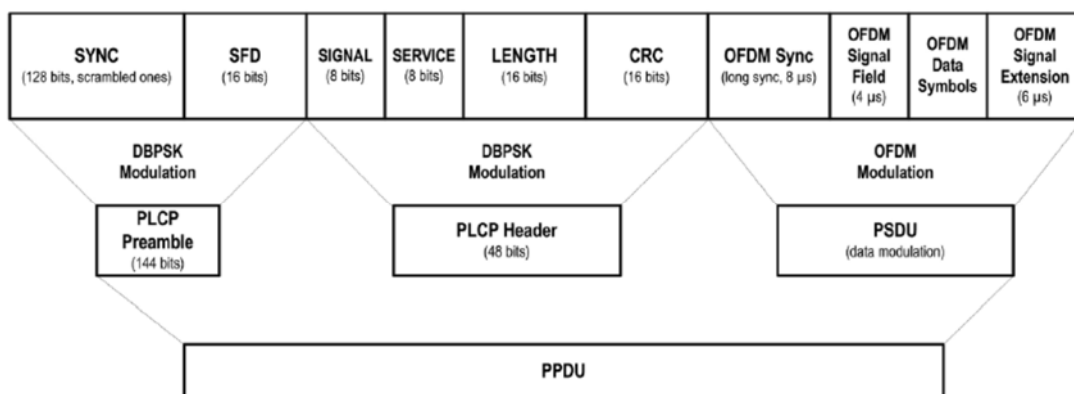


Σχήμα 2-6 Κανάλια του 802.11.g για διαμόρφωση OFDM.



Σχήμα 2-7 Κανάλια του 802.11.g για διαμόρφωση DSSS.

Η δομή του frame του 802.11g φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2-8 Δομή frame του 802.11b για DSSS-OFDM μεταδόσεις.

Η ισχύς εκπομπής φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Γεωγραφική περιοχή	Μέγιστη ισχύς εξόδου
ΗΠΑ	1000mW
Ευρώπη	100mW

Πίνακας 2-9 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11.g, σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.

Το μέγιστο επίπεδο ευαισθησίας στο δέκτη είναι -20dBm ενώ το ελάχιστο, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα αναλόγως των επιμέρους χαρακτηριστικών εύρους καναλιού, ρυθμού κωδικοποίησης και είδους διαμόρφωσης:

Είδος διαμόρφωσης	Ρυθμός κωδικοποίησης (R)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (20MHz εύρος καναλιού)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (10MHz εύρος καναλιού)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (5MHz εύρος καναλιού)
BPSK	1/2	-82	-85	-88
BPSK	3/4	-81	-84	-87
QPSK	1/2	-79	-82	-85
QPSK	3/4	-77	-80	-83
16-QAM	1/2	-74	-77	-80
16-QAM	3/4	-70	-73	-76
64-QAM	2/3	-66	-69	-72
64-QAM	3/4	-65	-68	-71

Πίνακας 2-10 Ευαισθησία δέκτη 802.11g, αναλόγως των χαρακτηριστικών του καναλιού.

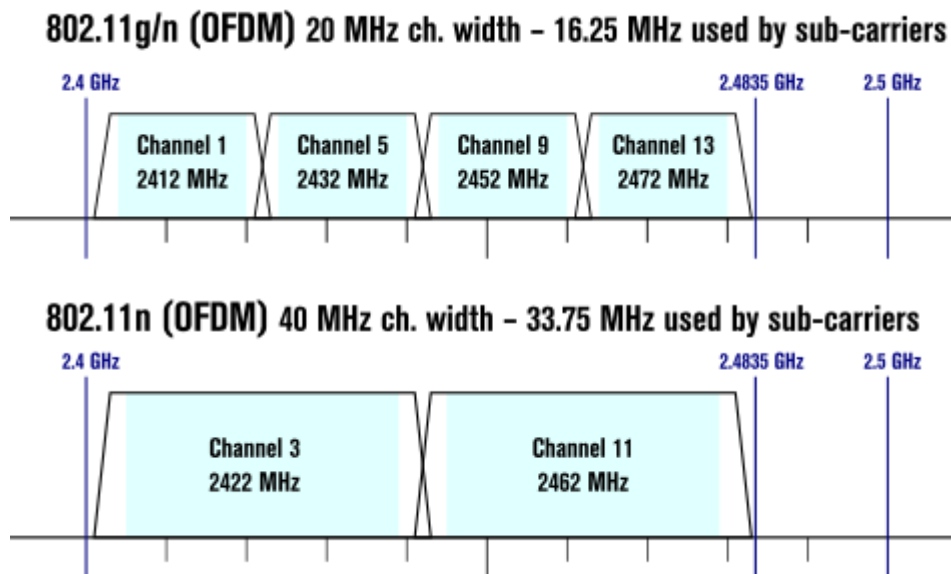
Το data rate, αναλόγως είδους διαμόρφωσης και ρυθμού κωδικοποίησης, φαίνεται παρακάτω:

Είδος διαμόρφωσης	Ρυθμός κωδικοποίησης (R)	Data rate (Mbps)
BPSK	1/2	6
BPSK	3/4	9
QPSK	1/2	12
QPSK	3/4	18
16-QAM	1/2	24
16-QAM	3/4	36
64-QAM	2/3	48
64-QAM	3/4	54

Πίνακας 2-11 Data Rate στο 802.11g.

2.1.4 Πρότυπο 802.11n

Το πρότυπο 802.11g δημιουργήθηκε το 2009[7]. Η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του είναι στα 2.4GHz και στα 5GHz. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται είναι η OFDM. Το εύρος των καναλιών του μπορεί να είναι 20 ή 40MHz.



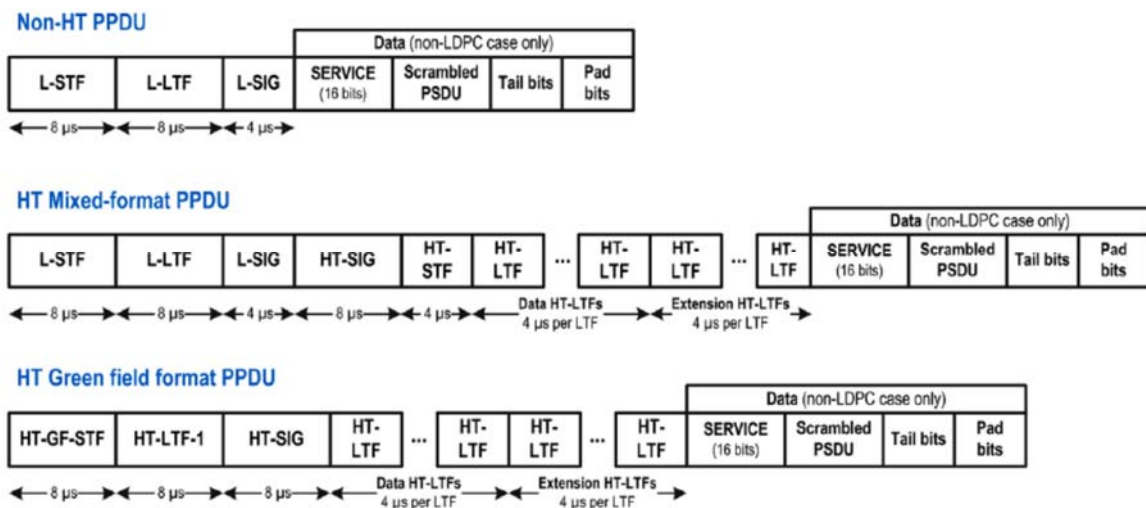
Σχήμα 2-9 Κανάλια του 802.11.n, στη ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz και για εύρη καναλιών 20 και 40MHz.



Σχήμα 2-10 Κανάλια του 802.11.n, στη ζώνη συχνοτήτων 5GHz και για εύρη καναλιών 20 και 40MHz.

Έχει τη δυνατότητα λειτουργίας με μέχρι 4 spatial streams (MIMO), αυξάνοντας έτσι το data rate μέχρι και 600Mbps.

Οι τρεις διαφορετικές δομές frames που χρησιμοποιούνται στο 802.11n φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 2-11 Δομές του frame του 802.11n.

Η ισχύς εκπομπής, αναλόγως της ζώνης λειτουργίας του πομπού, φαίνεται παρακάτω:

Γεωγραφική περιοχή	Μέγιστη ισχύς εξόδου
ΗΠΑ	1000mW
Ευρώπη	100mW

Πίνακας 2-12 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11.n για 2.4GHz, σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.

Ζώνη συχνότητας λειτουργίας (GHz)	ΗΠΑ (Μέγιστη ισχύς εξόδου με έως 6dBi antenna gain) (mW)	Ευρώπη (Ενεργός ισοτροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς)
5.15 – 5.25	40 (2.5mW/MHz)	200mW
5.25 – 5.35	200 (12.5mW/MHz)	200mW
5.47 – 5.725	–	1W
5.725 – 5.825	800 (50mW/MHz)	–

Πίνακας 2-13 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11.n για 5GHz, σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.

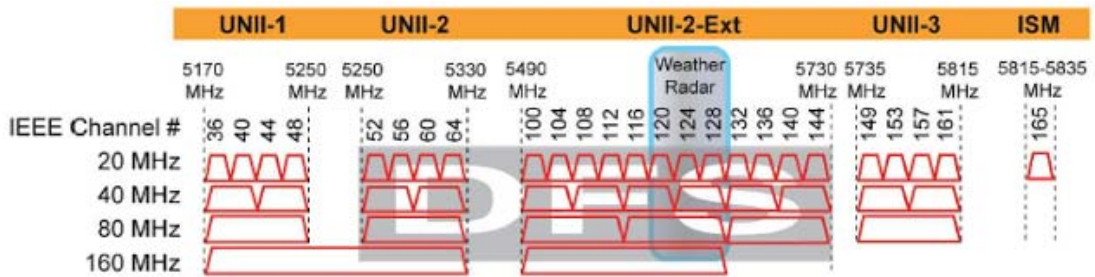
Το μέγιστο επίπεδο ευαισθησίας στο δέκτη είναι -20dBm ενώ το ελάχιστο, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα αναλόγως των επιμέρους χαρακτηριστικών εύρους καναλιού, ρυθμού κωδικοποίησης και είδους διαμόρφωσης:

Είδος διαμόρφωσης	Ρυθμός κωδικοποίησης (R)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (20MHz εύρος καναλιού)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (40MHz εύρος καναλιού)
BPSK	1/2	-82	-79
QPSK	1/2	-79	-76
QPSK	3/4	-77	-74
16-QAM	1/2	-74	-71
16-QAM	3/4	-70	-67
64-QAM	2/3	-66	-63
64-QAM	3/4	-65	-62
64-QAM	5/6	-64	-61

Πίνακας 2-14 Ευαισθησία δέκτη 802.11n, αναλόγως των χαρακτηριστικών του καναλιού.

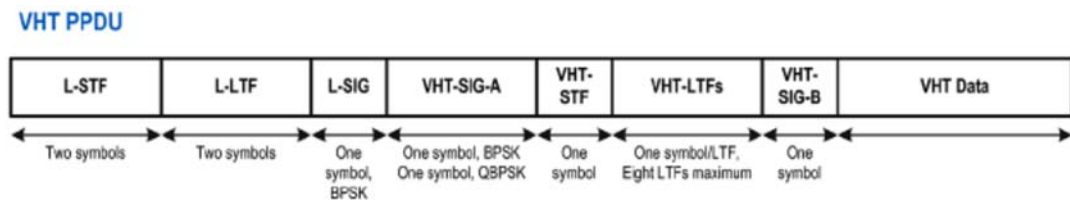
2.1.5 Πρότυπο 802.11ac

Το πρότυπο 802.11a δημιουργήθηκε το 2013[8]. Η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του είναι στα 5GHz. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται είναι η OFDM. Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται είναι εύρους 20MHz ή 40MHz ή 80MHz ή 160MHz έκαστο, όπως φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2-12 Κανάλια του 802.11ac.

Έχει τη δυνατότητα λειτουργίας με μέχρι 8 spatial streams (MIMO), αυξάνοντας έτσι το data rate μέχρι και 6.9Gbps. Η δομή του frame του προτύπου 802.11a φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2-13 Δομή του frame του 802.11ac.

Η ισχύς εκπομπής ανά κανάλι και συχνότητα λειτουργίας στο 802.11ac φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Ζώνη συχνότητας λειτουργίας (GHz)	Ευρώπη (Ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς)
5.15 – 5.25	200mW
5.25 – 5.35	200mW
5.47 – 5.725	1W
5.725 – 5.825	4W

Πίνακας 2-15 Πίνακας ισχύων εκπομπής στο 802.11ac.[9]

Το μέγιστο επίπεδο ευαισθησίας στο δέκτη είναι -30dBm ενώ το ελάχιστο, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα αναλόγως των επιμέρους χαρακτηριστικών εύρους καναλιού, ρυθμού κωδικοποίησης και είδους διαμόρφωσης:

Είδος διαμόρφωσης	Ρυθμός κωδικοποίησης (R)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (20MHz εύρος καναλιού)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (40MHz εύρος καναλιού)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (80MHz εύρος καναλιού)	Ελάχιστη ευαισθησία (dBm) (80+80MHz εύρος καναλιού)
BPSK	1/2	-82	-79	-76	-73
QPSK	1/2	-79	-76	-73	-70
QPSK	3/4	-77	-74	-71	-68
16-QAM	1/2	-74	-71	-68	-65
16-QAM	3/4	-70	-67	-64	-61
64-QAM	2/3	-66	-63	-60	-57
64-QAM	3/4	-65	-62	-59	-56
64-QAM	5/6	-64	-61	-58	-55
256-QAM	3/4	-59	-56	-53	-50
256-QAM	5/6	-57	-54	-51	-48

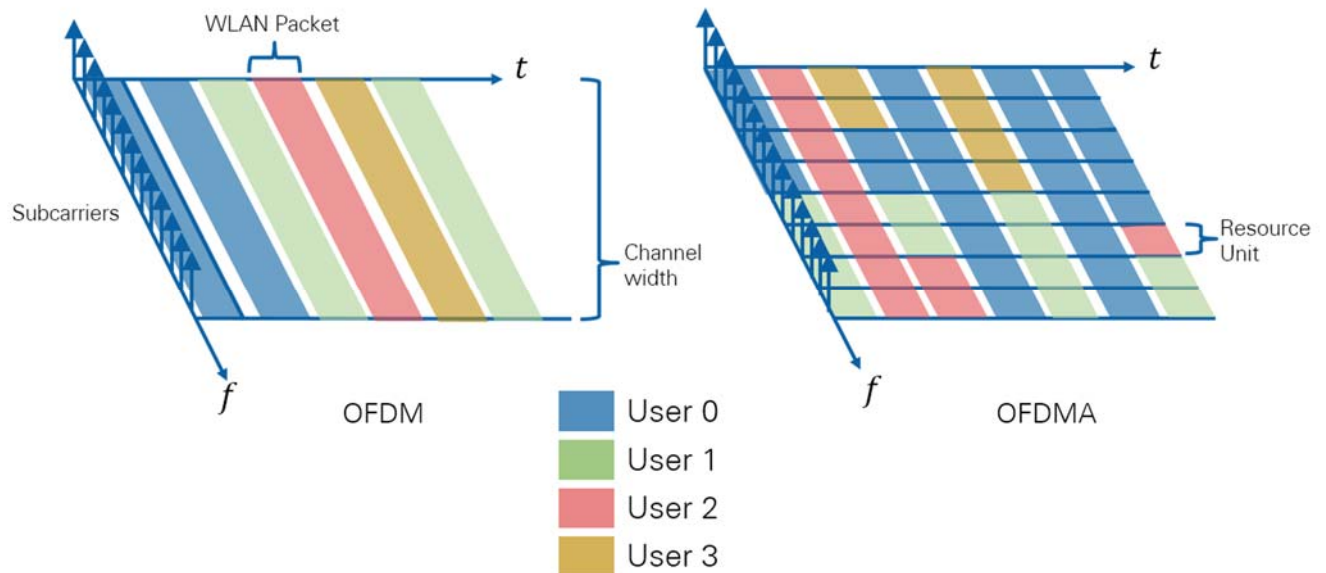
Πίνακας 2-16 Ευαισθησία δέκτη 802.11ac, αναλόγως των χαρακτηριστικών του καναλιού.

2.1.6 Πρότυπο 802.11ax

Το πρότυπο 802.11ax πρόκειται να κυκλοφορήσει το 2019[10]. Η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του είναι στα 2.4 και 5GHz. Το εύρος των καναλιών του μπορεί να είναι 20, 40, 80 ή 160MHz.

Η τεχνική πρόσβασης στο κανάλι είναι OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access). Βασισμένο στις ανάγκες των χρηστών, το AP αποφασίζει τον τρόπο που θα μοιράσει το κανάλι. Έτσι, μπορεί να δώσει ένα κανάλι αποκλειστικά σε έναν χρήστη ή να το τεμαχίσει και να εξυπηρετήσει πολλούς χρήστες ταυτόχρονα.

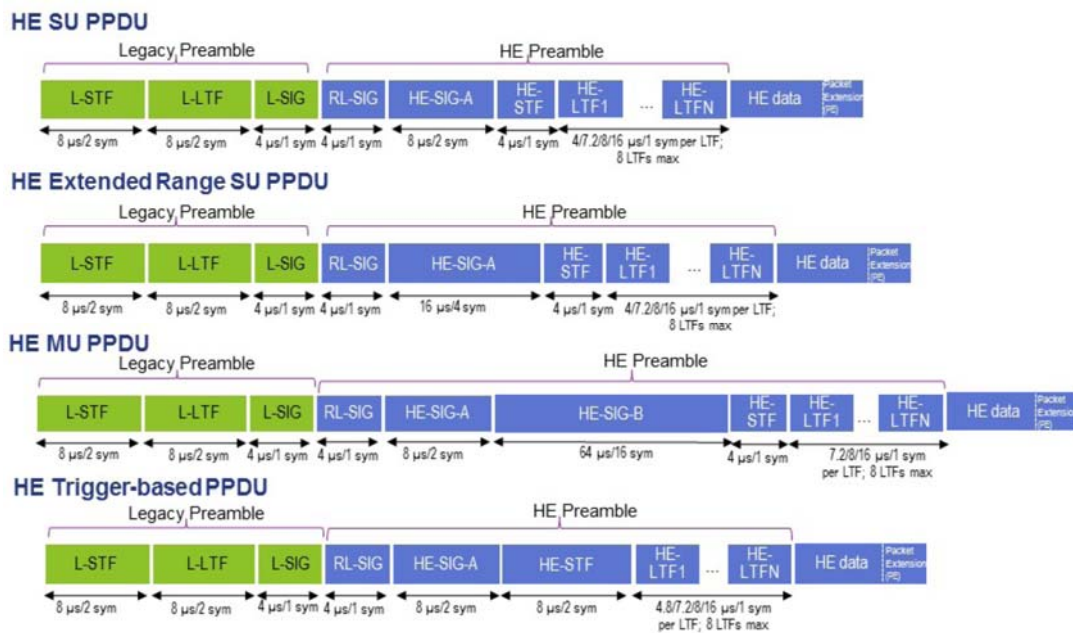
- Έτσι, κανάλι εύρους 20MHz, μπορεί να τεμαχιστεί σε 9 κανάλια των 2MHz και να εξυπηρετήσει έως και 9 χρήστες.



Σχήμα 2-14 Πρόσβαση ενός χρήστη OFDM και πολλών χρηστών OFDMA στο ίδιο κανάλι.

Το πρότυπο 802.11ax έχει τη δυνατότητα λειτουργίας με μέχρι 8 spatial streams (MU-MIMO), αυξάνοντας έτσι το data rate μέχρι και 9.6Gbps.

Οι τέσσερις διαφορετικές δομές frames που χρησιμοποιούνται στο 802.11ax φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 2-15 Δομές του frame του 802.11ax.

2.2 Πρωτόκολλο ZigBee

Το ZigBee[11] είναι μία από τις πιο νέες τεχνολογίες στο χώρο των ασύρματων δικτύων προσωπικού χώρου (WPANs). Προήλθε από τη συνεργασία της εταιρίας ZigBee Alliance με την επιτροπή IEEE 802.15.4 [12] και παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης συσκευών με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης, χαμηλό κόστος και χαμηλή κατανάλωσης ισχύος.



Σχήμα 2-16 Λογότυπο εταιρίας ZigBee Alliance.

Το ZigBee[11], είναι ένα πρωτόκολλο, μια ασύρματη τεχνολογία με σκοπό να καλύψει τις μοναδικές ανάγκες των χαμηλού κόστους, χαμηλής ισχύος, ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Συγκεκριμένα το ZigBee είναι το όνομα μιας προδιαγραφής για μια ακολουθία υψηλού επιπέδου πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούν οι μικροί, χαμηλής ισχύος ψηφιακοί δεκτές βασισμένοι στο 802.15.4[13] πρότυπο της IEEE για τα ασύρματα προσωπικά τοπικά δίκτυα (WPAN), όπως για παράδειγμα τα ασύρματα ακουστικά που συνδέονται με τα κινητά τηλέφωνα. Η τεχνολογία προορίζεται να είναι απλούστερη και φτηνότερη από άλλα ασύρματα προσωπικά, τοπικά δίκτυα (WPAN), όπως το Bluetooth. Το ZigBee στοχεύει στις εφαρμογές ραδιοσυχνότητας (RF) που απαιτούν ένα χαμηλό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων, μεγάλη ζωή μπαταριών, και εξασφαλισμένη δικτύωση. Τα πρότυπα εκμεταλλεύονται πλήρως το 802.15.4 πρότυπο της IEEE και λειτουργούν στις χωρίς άδεια ζώνες παγκοσμίως στις ακόλουθες συχνότητες: 2.400-2.484 GHz, 902-928 MHz και 868-868.6 MHz.

2.2.1 Τα πλεονεκτήματα του ZigBee

Το ZigBee είναι χαμηλού κόστους, χαμηλής ισχύος, ασύρματο πρότυπο δικτύωσης πλέγματος. Το χαμηλότερο κόστος επιτρέπει στην τεχνολογία να επεκταθεί ευρέως στις ασύρματες εφαρμογές ελέγχου και παρακολούθησης, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος επιτρέπει τη μακρύτερη ζωή με μικρότερες μπαταρίες, και η δικτύωση πλέγματος παρέχει υψηλή αξιοπιστία και μεγαλύτερη ακτίνα λειτουργίας.

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα του πρωτοκόλλου ZigBee είναι τα εξής:

- Χαμηλός κύκλος καθηκόντων - παρέχει μακριά ζωή μπαταριών
- Χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση
- Υποστηρίζει πολλές τοπολογίες δικτύων: Στατικός, δυναμικός, αστέρι και πλέγμα (Static, dynamic, star and mesh)
- Φασματική εξάπλωση μέσης ακολουθίας (DSSS) Direct Sequence Spread Spectrum
- Μέχρι 65.000 κόμβοι σε ένα δίκτυο
- 128-bit AES encryption κρυπτογράφηση - παρέχει ασφαλείς συνδέσεις μεταξύ των συσκευών
- Αποφυγή συγκρούσεων
- Ποιοτική ένδειξη συνδέσεων
- Σαφής αξιολόγηση των καναλιών

2.2.2 Δομή και τοπολογίες δικτύου

Ένα από τα πιο ισχυρά χαρακτηριστικά του ZigBee είναι η ικανότητα να προσλαμβάνει διαφορετικές τοπολογίες δικτύου.

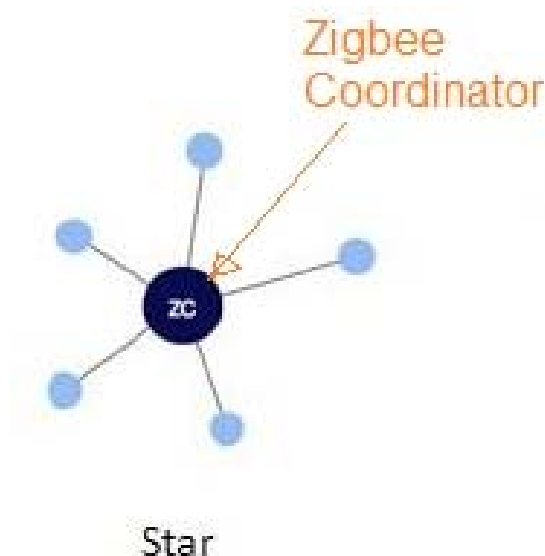
Ένα δίκτυο ZigBee αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

1. **Coordinator** – συντονιστής: Απαραίτητος για κάθε ZigBee δίκτυο. Σκοπός του να ορίσει το PAN (Personal Area Network). Ειδικότερα ορίζει το όνομα του δικτύου PAN ID (16bit number), καθώς και το κανάλι επικοινωνίας αυτού. Συνδέεται συνεχώς με την τροφοδοσία και δεν μπαίνει ποτέ σε sleep mode.
2. **Router** – δρομολογητής: Συνδέεται με τον coordinator και επιτρέπει σε άλλους routers και end devices να συνδεθούν με το δίκτυο. Δρομολογεί τα δεδομένα προς άλλες συνδεδεμένες με αυτόν συσκευές. Συνδέεται συνεχώς με την τροφοδοσία και δεν μπαίνει ποτέ σε sleep mode.
3. **End Device** – τελική συσκευή: δεν επιτρέπει σε άλλη συσκευή να συνδεθεί στο δίκτυο PAN. Λειτουργεί και σε sleep mode με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας.

Παρακάτω αναλύονται οι διαφορετικές τοπολογίες δικτύου που μπορούμε να συναντήσουμε.

Τοπολογία αστέρα (Star)

Η απλούστερη τοπολογία είναι η τοπολογία αστέρα (Star). Αποτελείται από έναν ενιαίο συντονιστή (ZigBee Coordinator), συνδεδεμένο με μια σειρά από συσκευές. Ο συντονιστής έχει την αρμοδιότητα να ελέγχει και να συντονίζει το δίκτυο. Οι άλλες συσκευές είναι απευθείας συνδεδεμένες με τον συντονιστή και επικοινωνούν μόνο μέσω αυτού με άλλες συσκευές.



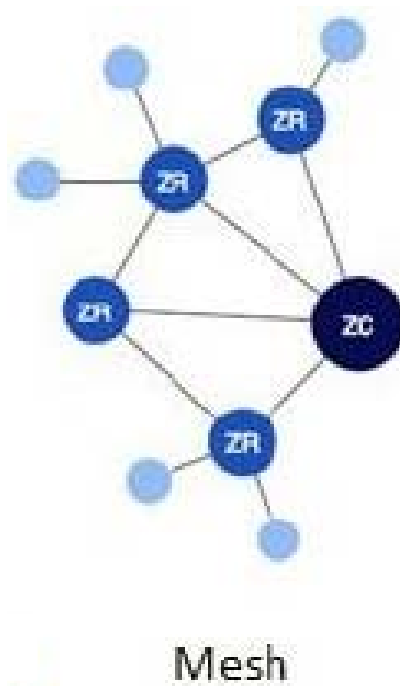
Σχήμα 2-17 Τοπολογία δικτύων ZigBee - Αστέρας.

Ένα παράδειγμα ενός δικτύου αστέρα, είναι ένα οικιακό σύστημα ασφαλείας. Το πάνελ ασφαλείας θα ενεργεί ως συντονιστής του δικτύου παρακολούθησης, πχ με αισθητήρες κίνησης και διακόπτες θα ελέγχει πόρτες και παράθυρα.

Οι τοπολογίες αστέρα είναι κοινές και παρέχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των μπαταριών.

Τοπολογία σημείου προς σημείο (Mesh)

Τοπολογία σημείου προς σημείο (Mesh). Κάθε συσκευή εγκαθιστά συνδέσεις σημείου προς σημείο με άλλες συσκευές που βρίσκονται μέσα στην εμβέλεια της. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται δίκτυα που έχουν τη μορφή δένδρου ή πλέγματος. Με τη βοήθεια αλγορίθμων δρομολόγησης, όλες οι συσκευές μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Πολλά τέτοια δίκτυα μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους και να σχηματίσουν ένα μεγαλύτερο.

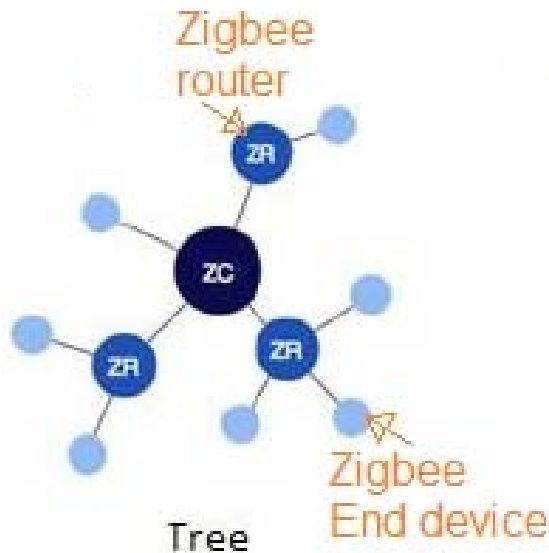


Σχήμα 2-18 Τοπολογία δικτύων ZigBee – Σημείου προς σημείο.

Στο μεγαλύτερο δίκτυο υπάρχει μόνο ένας συντονιστής δικτύου, ενώ κάθε μικρότερο δίκτυο έχει από έναν δρομολογητή. Οι τοπολογίες αυτές παρέχουν μεγαλύτερα επίπεδα αξιοπιστίας και επεκτασιμότητας.

Συνδυασμός των δύο τοπολογιών (Tree)

Συνδυασμός των δύο τοπολογιών είναι εφικτός σχηματίζοντας ένα λεγόμενο δίκτυο δέντρου (Tree). Συνδυάζει τα οφέλη από τις δυο τοπολογίες, δηλαδή τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των μπαταριών και τα μεγαλύτερα επίπεδα αξιοπιστίας και επεκτασιμότητας. Στα μεγαλύτερα αυτά δίκτυα υπάρχει μόνο ένας συντονιστής δικτύου ενώ στα μικρότερα δίκτυα υπάρχει μόνο ένας δρομολογητής.



Σχήμα 2-19 Τοπολογία δικτύων ZigBee – Δέντρο.

2.2.3 Τύποι Συσκευών ZigBee

Σε ένα δίκτυο που λειτουργεί με βάση τη στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee, οι συσκευές μπορούν να διακριθούν σε πλήρους λειτουργίας (Full Function Device , FFD) και μειωμένης λειτουργίας (Reduced Function Device, RFD). Σε κάθε δίκτυο υπάρχει πάντοτε μια συσκευή FFD που έχει το ρόλο του συντονιστή του δικτύου (Personal Area Network coordinator). Οι συσκευές FFD μπορούν να επικοινωνήσουν με όλες τις άλλες συσκευές, ενώ οι RFDs μόνο με μία FFD.

FFD – Full Function Device

Μια συσκευή FFD μπορεί να χρησιμεύσει ως συντονιστής δικτύων, συντονιστής συνδέσεων ή ως άλλη συσκευή επικοινωνιών. Οποιαδήποτε συσκευή FFD μπορεί να μιλήσει σε άλλες FFD και RFD συσκευές. Επίσης, ανακαλύπτει άλλες FFD και RFD για να καθιερώσει τις επικοινωνίες. Συνήθως, τροφοδοτείται από καλώδιο τροφοδοσίας.

RFD – Reduced Function Devices

Οι RFD συσκευές χρησιμοποιούνται σε πολύ απλές εφαρμογές. Υλοποιούνται με τους ελάχιστους πόρους RAM και ROM και είναι σχεδιασμένες για να είναι ένας απλός στείλε ή/και λάβε κόμβος σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο. Με ένα μειωμένο μέγεθος σωρών δεδομένων, απαιτείται λιγότερη

μνήμη, κατά συνέπεια ένα οικονομικότερο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Τα ZigBee RFDs λειτουργούν γενικά με μπαταρίες.

Οι RFD συσκευές μπορούν να ψάξουν για τα διαθέσιμα δίκτυα, να μεταφέρουν τα στοιχεία από την αίτησή τους ανάλογα με τις ανάγκες, να καθορίσουν εάν το στοιχείο αιτήματος είναι εκκρεμές, να αιτηθούν δεδομένα από το συντονιστή δικτύων και να μπουν σε λειτουργία ύπνου για εκτεταμένες χρονικές περιόδους για να μειώσουν την κατανάλωση μπαταριών. Τέλος, μπορούν να «μιλήσουν» μόνο σε ένα FFD, μια συσκευή με τους ικανοποιητικούς πόρους συστημάτων για τη δρομολόγηση δικτύων.

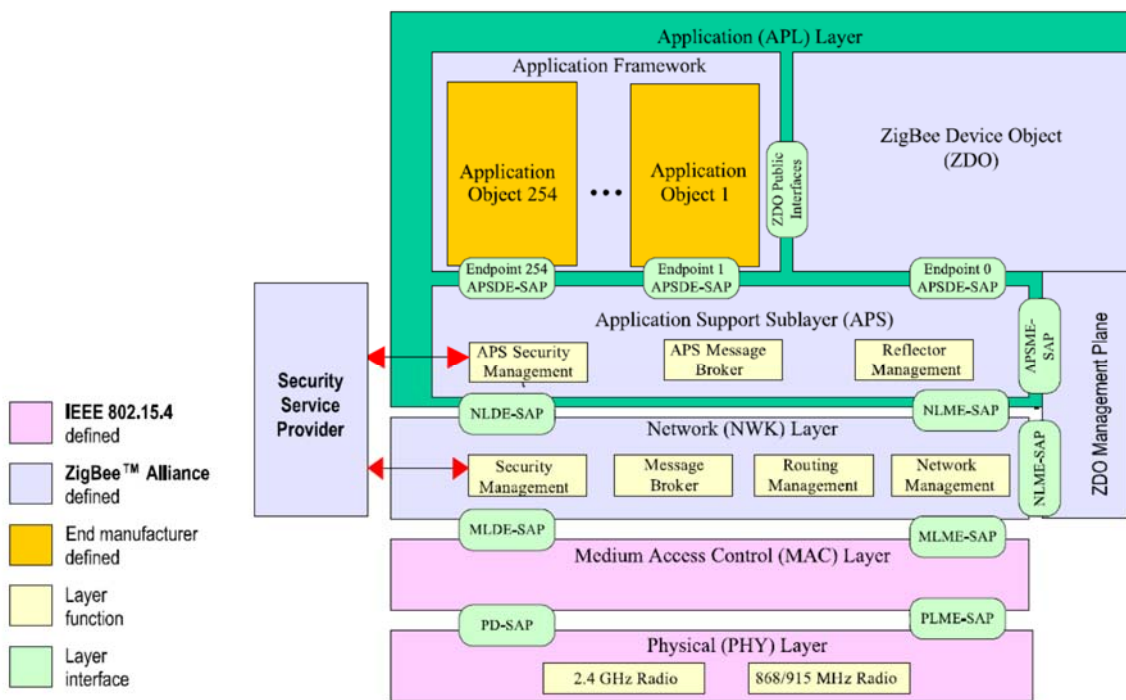
2.2.4 Η στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee

Η στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee αποτελείται από 4 επίπεδα[14]. Κάθε επίπεδο εκτελεί ένα συγκεκριμένο σύνολο λειτουργιών και παρέχει τις υπηρεσίες του στο ανώτερο επίπεδο μέσω μιας διεπαφής που ονομάζεται σημείο πρόσβασης υπηρεσιών (Service Access Point, SAP). Τα 4 επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων του ZigBee είναι τα παρακάτω:

1. Το **φυσικό επίπεδο** (Physical layer, PHY). Είναι υπεύθυνο για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του πομποδέκτη, μετάδοση και λήψη δεδομένων, ανίχνευση ενέργειας στο κανάλι, εκτίμηση της κατάστασης των καναλιών για την πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση φέροντος και με αποφυγή συγκρούσεων (CSMA-CA) και τη μέτρηση της ποιότητας των λαμβανομένων πακέτων.
2. Το **επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο** (Medium access control layer, MAC). Παρέχει υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων και διαχείρισης. Είναι υπεύθυνο για την πρόσβαση στο κανάλι, για τη διαχείριση των χρονοσχημάτων και για την παροχή μιας αξιόπιστης σύνδεσης μεταξύ δύο επιπέδων MAC. Επιπρόσθετα παρέχει τα μέσα για την εφαρμογή διαφόρων μηχανισμών ασφάλειας.
3. Το **επίπεδο δικτύου** (Network layer, NWK). Είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του δικτύου, για την είσοδο και την έξοδο μία συσκευής από ένα δίκτυο, για την ασφάλεια και για τη δρομολόγηση των μεταδιδόμενων πακέτων.
4. Το **επίπεδο εφαρμογών** (Application layer, APL). Περιλαμβάνει το υποεπίπεδο υποστήριξης εφαρμογών (Application support sublayer, APS), το πλαίσιο εφαρμογών (Application framework, AF), τα αντικείμενα συσκευής ZigBee

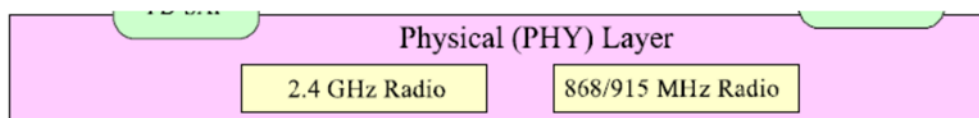
(ZigBee Device Objects, ZDO) και τις καθορισμένες από τον κατασκευαστή εφαρμογές. Το υποεπίπεδο APS είναι υπεύθυνο για τη σύνδεση δύο συσκευών βάση των αναγκών και των υπηρεσιών τους και για την αποστολή δεδομένων μεταξύ τους. Τα ZDO είναι αυτά που καθορίζουν το ρόλο της κάθε συσκευής στο δίκτυο και το επίπεδο ασφάλειας. Επίσης συμβάλλουν στην ανίχνευση των συσκευών σε ένα δίκτυο και στον προσδιορισμό των υπηρεσιών που αυτές παρέχουν. Το πλαίσιο εφαρμογών είναι το περιβάλλον στο οποίο φιλοξενούνται οι εφαρμογές μέσα σε μία συσκευή ZigBee.

Τα δυο πρώτα επίπεδα είναι κοινά για όλες τις τεχνολογίες που υλοποιούνται στο standard 802.15.4, ενώ τα δυο επόμενα αφορούν αποκλειστικά την τεχνολογία ZigBee[12].



Σχήμα 2-20 Δομή επιπέδων ZigBee.[11]

Φυσικό επίπεδο (Physical layer, PHY)

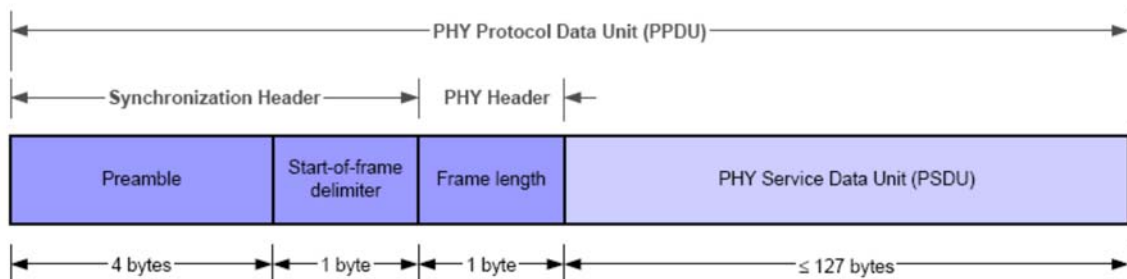


Σχήμα 2-21 Φυσικό επίπεδο (Physical layer, PHY)

Το φυσικό επίπεδο παρέχει υπηρεσίες:

- δεδομένων
- διαχείρισης

στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, MAC. Επίσης στο φυσικό επίπεδο υπάρχει και μία βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες σχετικές με τη λειτουργία του (κανάλι που χρησιμοποιείται, κανάλια που υποστηρίζονται, εκπεμπόμενη ισχύς και τρόπος ανίχνευσης ελεύθερου καναλιού).



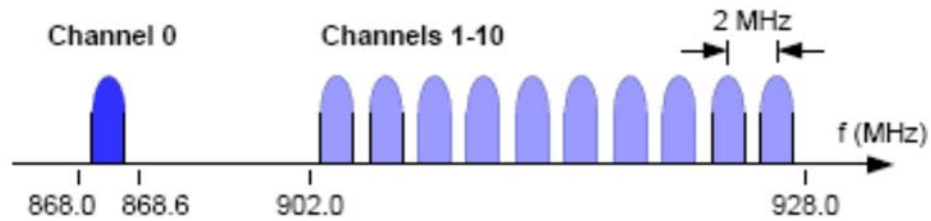
Σχήμα 2-22 Δομή πλαισίου στο φυσικό επίπεδο, PHY, του ZigBee.

Διατίθενται 27 κανάλια, αριθμημένα από 0 ως 26, χωρισμένα σε 3 ζώνες συχνοτήτων.

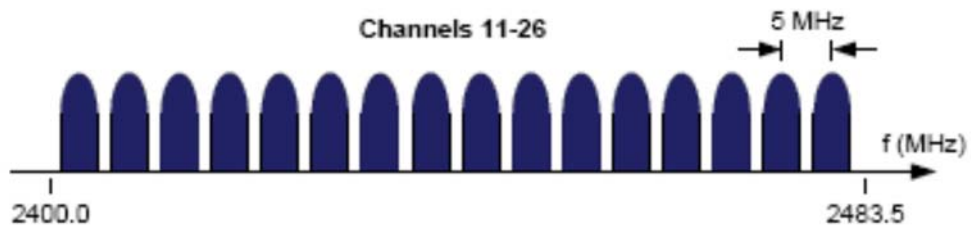
1. 868MHz – 868.6MHz: 1 κανάλι
2. 902MHz - 928MHz: 10 κανάλια
3. 2.4GHz – 2.4835GHz: 16 κανάλια

Παρακάτω φαίνεται η κάθε ζώνη συχνοτήτων και τα κανάλια που αντιστοιχούν σε καθεμιά από αυτές.

PHY 868/915 MHz



PHY 2400 MHz



Σχήμα 2-23 Κατανομή καναλιών ZigBee σε κάθε ζώνη συχνοτήτων.

zigbee PHY version	Frequency Band(MHz)	Chip rate (kchip/s)	Modulation type	Bit rate (kb/s)	symbol rate (ksymbol/s)	syms
868 MHz band	868 - 868.6	300	BPSK	20	20	binary
915 MHz band	902 - 928	600	BPSK	40	40	binary
2450 MHz band	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary orthogonal

Πίνακας 2-17 Επιμέρους χαρακτηριστικά των τριών ζωνών συχνοτήτων του ZigBee.

ZigBee channels (0-26)	Center Frequency(MHz)
0	868
1	906
2	908
3	910
4	912
5	914
6	916
7	918
8	920
9	922
10	924
11	2405
12	2410
13	2415
14	2420
15	2425
16	2430
17	2435
18	2440
19	2445
20	2450
21	2455
22	2460
23	2465
24	2470
25	2475
26	2480

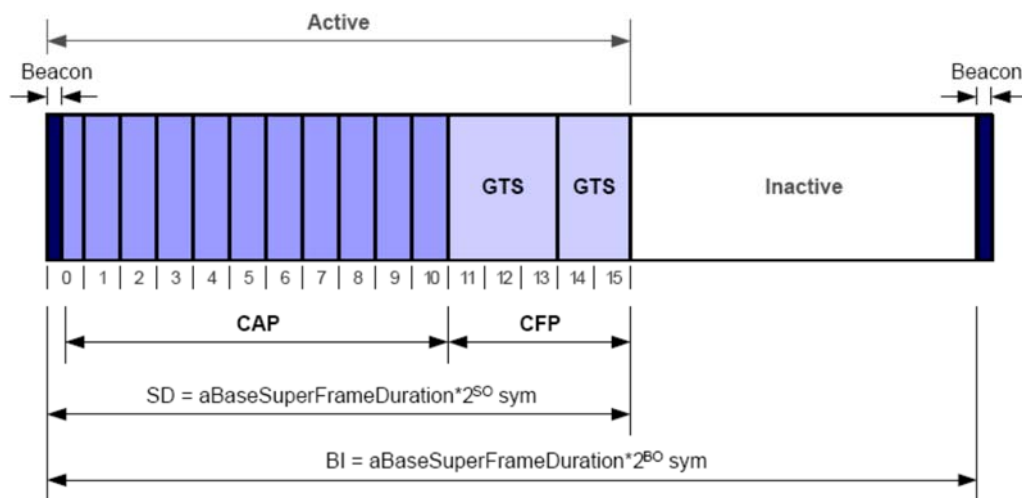
Πίνακας 2-18 Κεντρικές συχνότητες των καναλιών ZigBee.

Κάθε συσκευή θα πρέπει να υποστηρίζει όλα τα κανάλια, εκτός και αν κάποια από αυτά δεν είναι ελεύθερα στην περιοχή που λειτουργεί.

Οι μεταδόσεις σε κάθε κανάλι μπορούν να γίνουν με δύο τρόπους:

Στον πρώτο τρόπο χρησιμοποιείται ο μηχανισμός πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος, αποφυγή συγκρούσεων και χωρίς χρονοσχισμές (unslotted CSMA-CA). Κάθε συσκευή πριν να μεταδώσει, ανιχνεύει το κανάλι. Αν είναι αδρανές, αρχίζει να μεταδίδει. Αν είναι κατειλημμένο, ο αποστολέας αναβάλλει τη μετάδοση μέχρι το κανάλι να γίνει αδρανές.

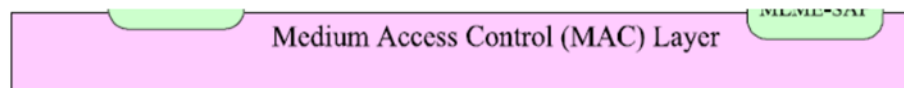
Στο δεύτερο τρόπο χρησιμοποιείται το υπερπλαίσιο, το οποίο οριοθετείται από τα αναγνωριστικά σήματα και χωρίζεται σε 16 χρονοσχισμές ίσης διάρκειας. Το αναγνωριστικό σήμα στέλνεται πάντοτε στην πρώτη χρονοσχισμή. Τα σήματα αυτά χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη δομή του υπερπλαισίου, για το συγχρονισμό των συσκευών του δικτύου και για τον προσδιορισμό του δικτύου. Το υπερπλαίσιο μπορεί να έχει ένα ενεργό και ένα μη ενεργό μέρος. Η δομή και η διάρκειά του καθορίζονται από το συντονιστή του δικτύου. Κατά τη διάρκεια του μη ενεργού μέρους, ο συντονιστής δεν αλληλεπιδρά με το δίκτυο του και λειτουργεί με χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Το ενεργό μέρος αποτελείται από την περίοδο πρόσβασης με ανταγωνισμό (CAP) και από την περίοδο χωρίς ανταγωνισμό (CFP). Στην CAP κάθε συσκευή που μεταδίδει χρησιμοποιεί το μηχανισμό πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος, αποφυγή συγκρούσεων και χρονοσχισμές (slotted CSMA-CA). Αυτό είναι το ίδιο με το unslotted CSMA-CA, με τη διαφορά ότι οι μεταδόσεις ξεκινούν πάντοτε στην αρχή κάποιας χρονοσχισμής και σε περίπτωση κατελημμένου καναλιού, ο αποστολέας αναβάλλει τη μετάδοση για τυχαίο αριθμό χρονοσχισμών. Όταν ένα κανάλι είναι αδρανές, η μετάδοση πραγματοποιείται μόνο αν υπάρχει αρκετός χρόνος για να ολοκληρωθεί πριν τη λήξη της CAP.



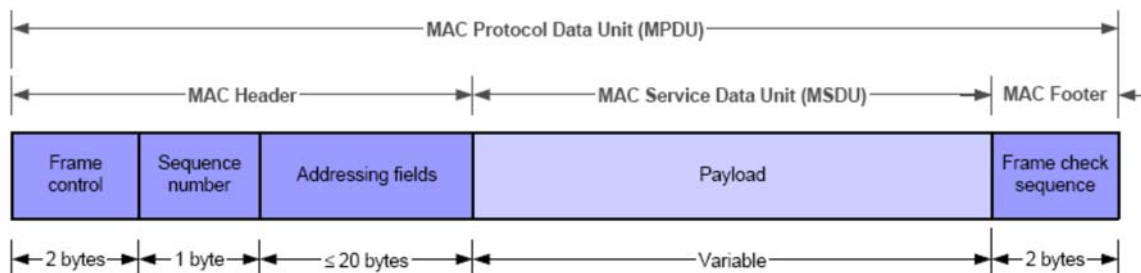
Σχήμα 2-24 Παράδειγμα υπερπλαισίου φυσικού επιπέδου, του ZigBee

Η CFP περιέχει κρατημένες χρονοσχισμές και βρίσκεται ακριβώς πριν το μη ενεργό μέρος. Οι χρονοσχισμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξυπηρέτηση εφαρμογών που απαιτούν συγκεκριμένο εύρος ζώνης.

Επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control layer, MAC)



Σχήμα 2-25 Επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control layer, MAC)



Σχήμα 2-26 Δομή πλαισίου στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC), του ZigBee.

Το επίπεδο MAC έχει τις παρακάτω λειτουργίες:

- Δημιουργία αναγνωριστικών σημάτων εάν η συσκευή είναι συντονιστής του δικτύου.

Τα σήματα αυτά χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη δομή του υπερπλαισίου, για το συγχρονισμό των συσκευών του δικτύου και για τον προσδιορισμό του δικτύου.

- Υποστήριξη στη δημιουργία και διατήρηση δικτύων.

Το επίπεδο MAC έχει τη δυνατότητα να ζητήσει από το φυσικό επίπεδο να εκτελέσει ανίχνευση σε ορισμένα κανάλια και στη συνέχεια να παραδώσει τα αποτελέσματα της ανίχνευσης στο επίπεδο δικτύου. Με αυτό τον τρόπο ανιχνεύονται τα αναγνωριστικά σήματα που εκπέμπουν οι συντονιστές των δικτύων. Στη συνέχεια το επίπεδο δικτύου μπορεί να ζητήσει τη σύνδεση σε κάποιο δίκτυο. Επιπλέον το επίπεδο MAC μπορεί να ζητήσει από το φυσικό επίπεδο να μετρήσει την ενέργεια σε ένα σύνολο καναλιών. Οι μετρήσεις αυτές παραδίδονται στο επίπεδο δικτύου για να επιλέξει το κατάλληλο κανάλι για τη δημιουργία ενός δικτύου.

- Υποστήριξη υπηρεσιών ασφάλειας.

Το επίπεδο MAC είναι σε θέση να παρέχει στα ανώτερα του επίπεδα κάποιες βασικές υπηρεσίες ασφαλείας, όταν αυτό του ζητηθεί. Τα κλειδιά και οι λίστες που απαιτούνται για αυτές, του τα παρέχουν τα ανώτερα επίπεδα. Οι παρεχόμενες υπηρεσίες ασφαλείας είναι:

- ο έλεγχος πρόσβασης
- η κρυπτογράφηση των δεδομένων
- η ακεραιότητα των πλαισίων.

Στον έλεγχο πρόσβασης, κάθε συσκευή διατηρεί μία λίστα με συσκευές και μόνο από αυτές μπορεί να δεχθεί πλαίσια.

Η κρυπτογράφηση των δεδομένων γίνεται με τη βοήθεια ενός κλειδιού το οποίο είναι γνωστό σε μία ομάδα συσκευών. Σκοπός της είναι να μη διαβαστούν τα δεδομένα από συσκευές που δεν διαθέτουν το κλειδί και εφαρμόζεται μόνο στο ωφέλιμο φορτίο των πλαισίων.

Στην ακεραιότητα των πλαισίων χρησιμοποιείται ένας κωδικός ακεραιότητας μηνυμάτων για να μην τροποποιηθούν τα δεδομένα από συσκευές που δε διαθέτουν το κλειδί κρυπτογράφησης. Επιπλέον αυτός ο κωδικός παρέχει τη διαβεβαίωση ότι τα δεδομένα στάλθηκαν από μία συσκευή που γνωρίζει το κλειδί.

Το επίπεδο MAC, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας της συσκευής, μπορεί να προσφέρει διαφορετικές υπηρεσίες ασφαλείας. Έτσι σε μία συσκευή που λειτουργεί με μη ασφαλή τρόπο, δεν παρέχει καμία ασφάλεια. Σε μία συσκευή που λειτουργεί με λίστα έλεγχου πρόσβασης, δέχεται πλαίσια μόνο από τις συσκευές που περιέχονται στην λίστα.

- Πρόσβαση στο κανάλι

Το επίπεδο MAC είναι υπεύθυνο για το πότε θα πραγματοποιούνται οι μεταδόσεις δεδομένων στο φυσικό κανάλι. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιεί τα υπερπλασία και το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή συγκρούσεων (CSMA-CA).

- Χειρισμός και διαχείριση του μηχανισμού των εγγυημένων χρονοσχισμών

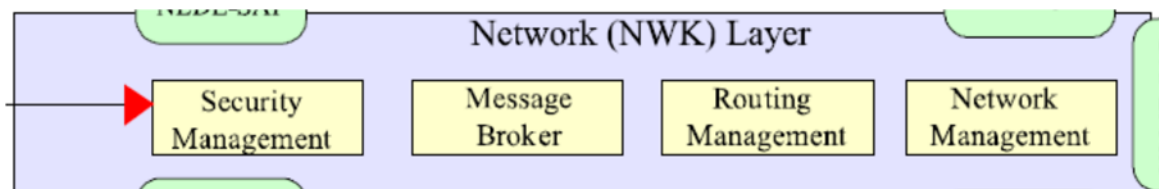
Κατά τον καθορισμό της δομής του υπερπλασίου, ο συντονιστής μπορεί να δεσμεύσει μέχρι και 7 χρονοσχισμές για την επικοινωνία του με συγκεκριμένες συσκευές. Κατά τη διάρκεια αυτών,

μία συσκευή μεταδίδει μόλις φθάσει η χρονοσχιμή που της αναλογεί χωρίς να χρησιμοποιήσει το πρωτόκολλο CSMA-CA. Η δέσμευση των χρονοσχιμών γίνεται κατόπιν αιτήσεων των συσκευών. Ο συντονιστής του δικτύου εξυπηρετεί αυτές τις αιτήσεις με τη σειρά που φθάνουν και είναι αυτός που αποφασίζει για το αν θα δοθούν νέες χρονοσχιμές σε μία συσκευή ή θα αποδεσμευθούν οι κρατημένες χρονοσχιμές.

- Παροχή μιας αξιόπιστης σύνδεσης μεταξύ δύο συσκευών

Τα πλαίσια του επιπέδου MAC περιέχουν το πεδίο MFR που περιέχει την ακολουθία ελέγχου πλαισίου (FCS). Με αυτή ο δέκτης μπορεί να ανιχνεύσει λάθη που δημιουργήθηκαν κατά τη μετάδοση του πλαισίου. Επιπλέον με το υποπεδίο αίτημα επιβεβαίωσης (acknowledgment request), ο αποστολέας μπορεί να ζητήσει επιβεβαίωση για το πλαίσιο που έστειλε. Αν μία επιβεβαίωση φθάσει, ελέγχεται η τιμή του πεδίου αριθμός ακολουθίας. Εφόσον το πλαίσιο και η επιβεβαίωση έχουν τον ίδιο αριθμό ακολουθίας, τότε η μετάδοση θεωρείται επιτυχημένη. Σε περίπτωση που δεν ληφθεί επιβεβαίωση ή δεν έχουν ίδιους αριθμούς ακολουθίας, ο αποστολέας θα μεταδώσει ξανά το πλαίσιο.

Επίπεδο δικτύου (Network layer, NWK)



Σχήμα 2-27 Επίπεδο δικτύου (Network layer, NWK)

Το επίπεδο δικτύου:

- παρέχει τις υπηρεσίες του, δεδομένων και διαχείρισης, στο επίπεδο εφαρμογών
- εξασφαλίζει τη σωστή λειτουργία του επιπέδου MAC

Οι υπηρεσίες δεδομένων παρέχονται στο επίπεδο εφαρμογών μέσω του σημείου πρόσβασης υπηρεσιών NLDE (Network Layer Data Entity), ενώ οι υπηρεσίες διαχείρισης μέσω του σημείου πρόσβασης υπηρεσιών NLME (Network Layer Management Entity). Επίσης στο επίπεδο αυτό υπάρχει και μία βάση δεδομένων (NIB) που περιέχει πληροφορίες σχετικές με τη λειτουργία του.

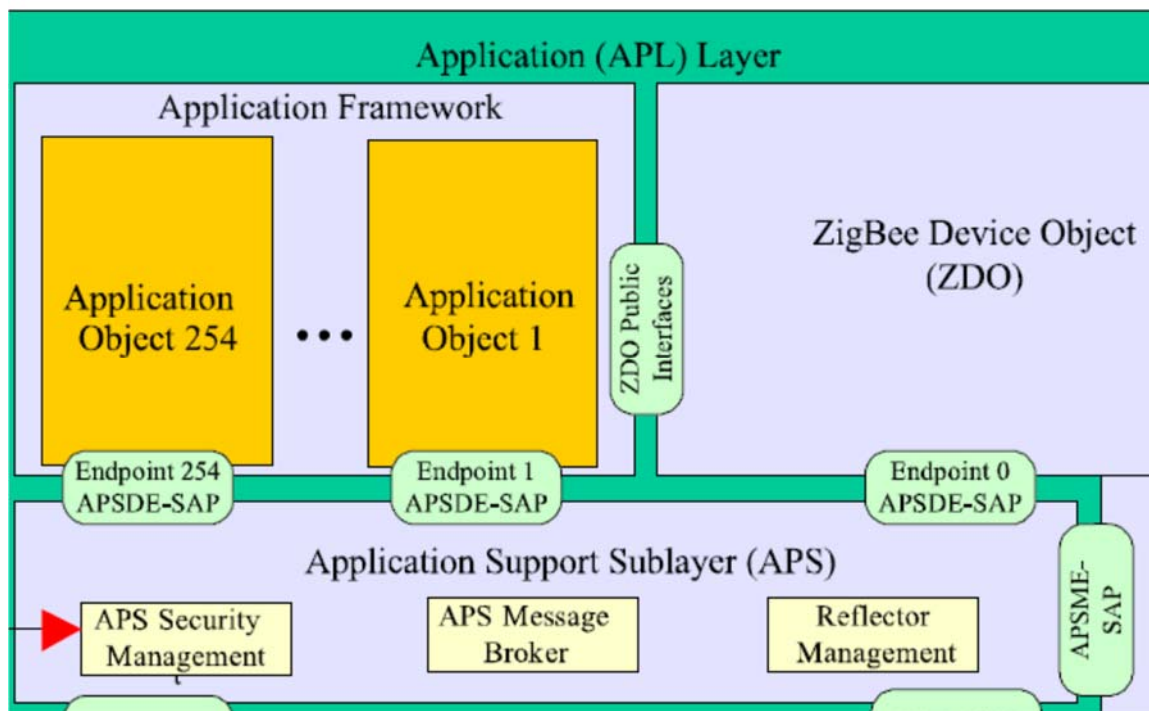
Οι υπηρεσίες δεδομένων περιλαμβάνουν:

- παραλαβή των δεδομένων από το ανώτερο επίπεδο
- τοποθέτησή τους σε κατάλληλα πλαίσια
- αποστολή τους στην κατάλληλη συσκευή, είτε απευθείας είτε μέσω κάποιας άλλης

Οι υπηρεσίες διαχείρισης περιλαμβάνουν:

- διαμόρφωση της λειτουργίας μίας συσκευής ανάλογα με το ρόλο της στο δίκτυο
- δημιουργία ενός δικτύου (το ZigBee μπορεί να υποστηρίξει δύο τοπολογίες δικτύων)
- σύνδεση σε ένα δίκτυο
- αποχώρηση από ένα δίκτυο
- διευθυνσιοδότηση των συσκευών του δικτύου
- δυνατότητα να ανακαλύπτουν γειτονικές συσκευές
- δυνατότητα να ανακαλύπτουν και να καταγράφουν διαδρομές για την αποτελεσματική αποστολή των μηνυμάτων στο δίκτυο
- δυνατότητα να ελέγχουν τη λειτουργία του δέκτη

Επίπεδο εφαρμογών (Application layer, APL)



Σχήμα 2-28 Επίπεδο εφαρμογών (Application layer, APL)

Το επίπεδο εφαρμογών αποτελείται από:

- υποεπίπεδο υποστήριξης εφαρμογών (Application support sublayer, APS)
- πλαίσιο εφαρμογών (Application framework, AF)
- αντικείμενα συσκευής ZigBee (ZigBee Device Objects, ZDO)
- καθορισμένες από τον κατασκευαστή εφαρμογές.

Το υποεπίπεδο APS είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά των δεδομένων των εφαρμογών σε άλλες συσκευές του δικτύου. Επίσης υποστηρίζει την ανακάλυψη συσκευών και την εγκατάσταση συνδέσεων με αυτές.

Τα ZDO είναι αυτά που καθορίζουν το ρόλο της κάθε συσκευής στο δίκτυο, τον τρόπο λειτουργίας της και παρέχουν τη δυνατότητα για ανακάλυψη υπηρεσιών και συσκευών στις εφαρμογές. Επίσης διαχειρίζονται όλους τους μηχανισμούς που έχουν σχέση με την ασφάλεια.

Το πλαίσιο εφαρμογών – Application Framework, είναι το περιβάλλον στο οποίο φιλοξενούνται οι εφαρμογές μέσα σε μία συσκευή ZigBee. Σε αυτό μπορούν να υπάρξουν μέχρι και 240 εφαρμογές. Για το διαχωρισμό τους, καθεμία έχει το δικό της σημείο τερματισμού.

2.2.5 Σύνδεση στο δίκτυο

Δημιουργία ενός δικτύου

Τη διαδικασία δημιουργίας ενός δικτύου, μπορούν να ξεκινήσουν μόνο συσκευές ZigBee που έχουν τη δυνατότητα να γίνουν συντονιστές δικτύων.

Αρχικά, το επίπεδο εφαρμογών ζητά από το επίπεδο δικτύου να δημιουργήσει ένα καινούριο δίκτυο με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Η διαδικασία συνεχίζεται με την εκτέλεση ανίχνευσης ενέργειας σε ένα σύνολο καναλιών. Η ανίχνευση αυτή πραγματοποιείται από το επίπεδο δικτύου, με τη βοήθεια των κατώτερων επιπέδων. Με τη λήψη των αποτελεσμάτων, το επίπεδο δικτύου κατατάσσει τα κανάλια σε μία σειρά, ξεκινώντας από το κανάλι στο οποίο μετρήθηκε η χαμηλότερη ενέργεια. Επίσης απορρίπτει τα κανάλια στα οποία η ενέργεια ξεπερνά ένα αποδεκτό επίπεδο, το οποίο καθορίζεται από την εφαρμογή για την αποφυγή παρεμβολών.

Στη συνέχεια το επίπεδο δικτύου, με τη βοήθεια των κατώτερων, εκτελεί ενεργή ανίχνευση των αποδεκτών καναλιών, ψάχνοντας για συσκευές. Τα αποτελέσματα της ανίχνευσης παραδίδονται στο επίπεδο δικτύου, το οποίο προσδιορίζει τον αριθμό και τις ταυτότητες των δικτύων που λειτουργούν σε κάθε κανάλι. Ως κανάλι λειτουργίας του δικτύου επιλέγεται εκείνο με το μικρότερο αριθμό δικτύων.

Έπειτα επιλέγεται η ταυτότητα του δικτύου. Αυτή έχει μήκος 16 bits, δεν πρέπει να είναι μία από τις κρατημένες για ειδικούς σκοπούς (π.χ εκπομπή σε όλα τα δίκτυα) και πρέπει να προσδιορίζει μοναδικά το δίκτυο στη συγκεκριμένη περιοχή. Η αδυναμία εύρεσης κατάλληλου καναλιού ή μοναδικής ταυτότητας, οδηγεί τη διαδικασία σε τερματισμό.

Αφού επιλεγεί η ταυτότητα, το επίπεδο δικτύου του συντονιστή πρέπει να προσδιορίσει τη διεύθυνση του μέσα στο δίκτυο. Αυτή έχει μήκος 16 bits και την τιμή 0. Έπειτα μέσω του σημείου πρόσβασης υπηρεσιών διαχείρισης του επιπέδου MAC (MLME-SAP), το επίπεδο δικτύου διαμορφώνει τη λειτουργία του MAC, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Τελικά, το επίπεδο εφαρμογών ενημερώνεται για την επιτυχία της αίτησης και ο συντονιστής είναι πλέον έτοιμος να δεχθεί νέες συσκευές στο δίκτυο.

Πίνακες γειτόνων

Κάθε συσκευή διατηρεί στη βάση δεδομένων της έναν πίνακα με πληροφορίες για τις συσκευές που βρίσκονται μέσα στην ακτίνα δράσης της. Στον πίνακα αυτό, για κάθε γειτονική συσκευή υπάρχει μία εγγραφή που περιέχει:

- την ταυτότητα του δικτύου της
- τον τύπο της
- τη διεύθυνση της μέσα στο δίκτυο που ανήκει (16 bits)
- τη σχέση που υπάρχει μεταξύ των δύο συσκευών
- την εκτεταμένη της διεύθυνση (64 bits) εφόσον οι δύο συσκευές είναι συνδεδεμένες

Στον πίνακα αυτό μπορεί να υπάρχουν και διάφορες άλλες προαιρετικές πληροφορίες, όπως το πόσο συχνά εκπέμπει αναγνωριστικά σήματα, αν αποδέχεται τις αιτήσεις για σύνδεση, μία εκτίμηση της ποιότητας της ζεύξης, το λογικό κανάλι στο οποίο λειτουργεί και το πόσα βήματα απέχει από το συντονιστή του δικτύου της.

Σύνδεση σε ένα δίκτυο

Κάθε συσκευή ZigBee έχει τη δυνατότητα να συνδέεται σε ένα δίκτυο και να αποχωρεί από αυτό. Μία σχέση γονέα-παιδιού αναπτύσσεται κάθε φορά που μία συσκευή ενός δικτύου επιτρέπει σε μία άλλη να γίνει μέλος του δικτύου. Η νέα συσκευή είναι το παιδί, ενώ η πρώτη είναι ο γονέας.

Ένα παιδί μπορεί να προστεθεί σε ένα δίκτυο με 2 τρόπους.

Στον **πρώτο τρόπο**, η διαδικασία ξεκινά από τη νέα συσκευή (παιδί). Μία εφαρμογή της ζητά αρχικά να γίνει ανίχνευση κάποιων καναλιών. Η αίτηση αυτή μεταβιβάζεται από το ανώτερο προς τα κατώτερα επίπεδα. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της ανίχνευσης, διαθέσιμα δίκτυα και χαρακτηριστικά τους, ακολουθώντας την αντίθετη πορεία παραδίδονται στο επίπεδο εφαρμογών, το οποίο και αποφασίζει σε ποιο από τα διαθέσιμα δίκτυα θέλει να συνδεθεί.

Στέλνει μία αίτηση στο επίπεδο δικτύου για σύνδεση με το συγκεκριμένο δίκτυο. Το επίπεδο δικτύου ψάχνει στον πίνακα γειτόνων για μία συσκευή που να ανήκει σε αυτό το δίκτυο (συγκρίνει την ταυτότητα του δικτύου των γειτόνων με αυτή που του έστειλε το ανώτερο επίπεδο). Επιπλέον θα πρέπει αυτή η συσκευή να αποδέχεται τις αιτήσεις για σύνδεση. Αν δεν βρει κάποια κατάλληλη, απαντά ότι η σύνδεση με το συγκεκριμένο δίκτυο δεν επιτρέπεται. Σε διαφορετική περίπτωση, χρησιμοποιεί τη διεύθυνση της συσκευής που βρίσκεται στον πίνακα, στέλνει μία αίτηση για σύνδεση και περιμένει για την απάντηση. Για την αποστολή της αίτησης, το επίπεδο δικτύου χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες που του παρέχονται από τα κατώτερα επίπεδα. Αν η απάντηση είναι αρνητική, το επίπεδο δικτύου ψάχνει για μία δεύτερη κατάλληλη συσκευή και επαναλαμβάνει την αίτηση για σύνδεση. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να έρθει κάποια θετική απάντηση ή μέχρι να μη βρίσκει κάποια άλλη κατάλληλη συσκευή, οπότε και το ανώτερο επίπεδο ενημερώνεται για την αδυναμία σύνδεσης στο συγκεκριμένο δίκτυο. Σε περίπτωση θετικής απάντησης, στη νέα συσκευή δίνεται μία διεύθυνση (16 bits), την οποία θα πρέπει να χρησιμοποιεί για τις μεταδόσεις της στο δίκτυο. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να ξεκινήσει μόνο από μία συσκευή που δεν ανήκει σε κάποιο δίκτυο.

Στην πλευρά του γονέα ακολουθείται η εξής διαδικασία. Η αίτηση για σύνδεση παραδίδεται ιεραρχικά στο επίπεδο δικτύου. Εκεί απορρίπτεται σε περίπτωση που ο πιθανός γονέας δεν είναι συντονιστής του δικτύου ή δρομολογητής (μόνο αυτοί έχουν δικαίωμα να επιτρέπουν σε συσκευές να συνδέονται στο δίκτυο). Επίσης μπορεί να απορριφθεί σε περίπτωση που δεν υπάρχει διαθέσιμη διεύθυνση για να δοθεί στη νέα συσκευή. Εφόσον δεν συντρέχει λόγος απόρριψης, ο πιθανός γονέας ελέγχει μήπως η συσκευή που έστειλε την αίτηση ανήκει ήδη στο δίκτυο. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με σύγκριση της εκτεταμένης διεύθυνσης της συσκευής, που περιέχεται στην αίτηση, με τις διευθύνσεις που υπάρχουν στον πίνακα γειτόνων του. Αν βρεθεί μία εγγραφή, ο γονέας απαντά θετικά στην αίτηση με την διεύθυνση (16 bits) που βρίσκεται στον πίνακα. Σε διαφορετική περίπτωση, διαθέτει μία νέα διεύθυνση με μήκος 16 bits, η οποία είναι μοναδική στο δίκτυο, και στη συνέχεια απαντά και πάλι θετικά.

Στο **δεύτερο τρόπο**, η διαδικασία ξεκινά από τον πιθανό γονέα, ο οποίος θα πρέπει να είναι συντονιστής του δικτύου ή δρομολογητής και να γνωρίζει την εκτεταμένη διεύθυνση (64 bits) της συσκευής, την οποία επιθυμεί να εντάξει στο δίκτυο. Αρχικά το επίπεδο εφαρμογών ζητά από το επίπεδο δικτύου να συνδεθεί με τη συγκεκριμένη συσκευή. Το επίπεδο δικτύου συγκρίνει την εκτεταμένη διεύθυνση που του στάλθηκε με αυτές που υπάρχουν στον πίνακα γειτόνων. Αν βρεθεί στον πίνακα, ενημερώνει το επίπεδο εφαρμογών ότι η συγκεκριμένη συσκευή ανήκει ήδη

στο δίκτυο. Διαφορετικά, διαθέτει μία νέα διεύθυνση των 16 bits για τη συσκευή και ενημερώνει το επίπεδο εφαρμογών ότι η συσκευή προστέθηκε στο δίκτυο.

Στην πλευρά του παιδιού ακολουθείται η εξής διαδικασία. Το επίπεδο εφαρμογών ζητά από το επίπεδο δικτύου να κάνει εκπομπές μηνυμάτων προς όλα τα δίκτυα που λειτουργούν στην γύρω περιοχή. Τα μηνύματα αυτά περιέχουν την εκτεταμένη διεύθυνση της συσκευής (64 bits), ενώ ως διεύθυνση προορισμού έχουν τη διεύθυνση εκπομπής. Μόλις ένα τέτοιο μήνυμα φθάσει στη συσκευή του πιθανού γονέα, το επίπεδο δικτύου θα καταλάβει ότι πρόκειται για μία συσκευή που ανήκει στο δίκτυο και θα τις στείλει τη διεύθυνση των 16 bits, την οποία θα πρέπει να χρησιμοποιεί για τις μεταδόσεις της στο δίκτυο.

Αποχώρηση από ένα δίκτυο

Η αποχώρηση μίας συσκευής από ένα δίκτυο μπορεί και αυτή να γίνει με δύο τρόπους.

Στον **πρώτο τρόπο**, το ίδιο το παιδί ζητά από το γονέα να αποχωρήσει. Ο γονέας εγκρίνει και η σύνδεση διακόπτεται. Στην περίπτωση όμως που το παιδί έχει και αυτό άλλα παιδιά, πρέπει πρώτα να ζητήσει από αυτά να φύγουν και στη συνέχεια να διακόψει τη σύνδεση.

Στο **δεύτερο τρόπο**, ο γονέας ζητά από το παιδί να φύγει από το δίκτυο. Μόλις ένα παιδί λάβει αυτή την εντολή, ενεργεί όπως στον πρώτο τρόπο.

2.2.6 Ισχύς εκπομπής, ευαισθησία δέκτη, data rates

Ο πομπός στις 3 ζώνες συχνοτήτων, έχει ελάχιστη ισχύ εκπομπής ίση με -3 dBm, ενώ η μέγιστη περιορίζεται από τη νομοθεσία κάθε περιοχής. Ο κάθε πομπός έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του, έτσι ώστε να εκπέμπει πάντοτε με την ελάχιστη απαιτούμενη.

Το data rate κυμαίνεται, αναλόγως της ζώνης συχνοτήτων και φτάνει έως και 250kbps.

Frequency Band (MHz)	Geographical Region	Modulation	Channels	Bit Rate (kbps)	Typical Output Power (dBm)
868-868.6	Europe	BPSK	1	20	0
902-928	United States	BPSK	10	40	0
2400-2483.5	Worldwide	O-QPSK	16	250	0

Πίνακας 2-19 Ζώνες συχνοτήτων, τυπική ισχύς εξόδου, διαμορφώσεις και data rates για τα πρωτόκολλα 802.11.4 και ZigBee.

Η ευαισθησία του δέκτη ορίζεται ως η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς για να έχουμε ποσοστό λανθασμένων πλαισίων μικρότερο του 1%, για πλαίσια με 20 bytes ωφέλιμο φορτίο, με απουσία παρεμβολής και την ισχύ να μετράται στην κεραία του δέκτη.

Οι ελάχιστες τιμές ευαισθησίας για το πρωτόκολλο ZigBee φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ζώνη συχνοτήτων (MHz)	Ελάχιστη ευαισθησία δέκτη (dBm)
868-868.6	-92
902-928	-92
2400-2483.5	-85

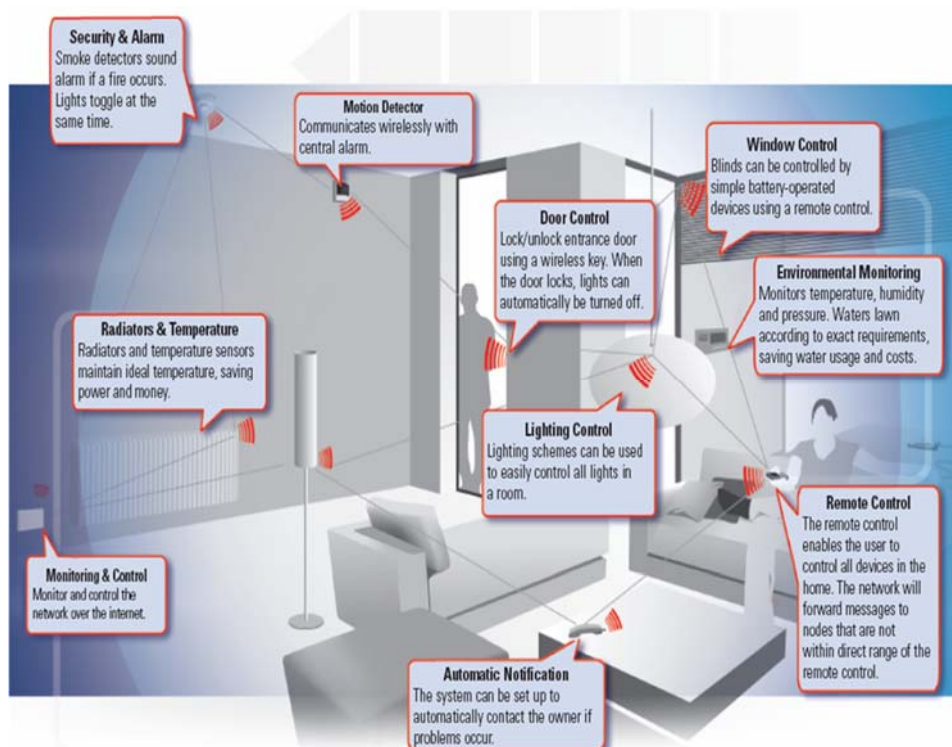
Πίνακας 2-20 Ζώνες συχνοτήτων και ελάχιστη ευαισθησία δέκτη για τα πρωτόκολλα 802.11.4 και ZigBee.

2.2.7 Εφαρμογές της τεχνολογίας ZigBee

Η τεχνολογία ZigBee χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα που απαιτούν πολύπλοκες τοπολογίες, χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, χαμηλό κόστος και μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών. Τέτοια δίκτυα είναι αυτά που αποτελούνται από αισθητήρες.

Παρακάτω θα αναφερθεί μια σειρά εφαρμογών για τους αισθητήρες ZigBee.

Σύστημα ασφάλειας κτηρίων



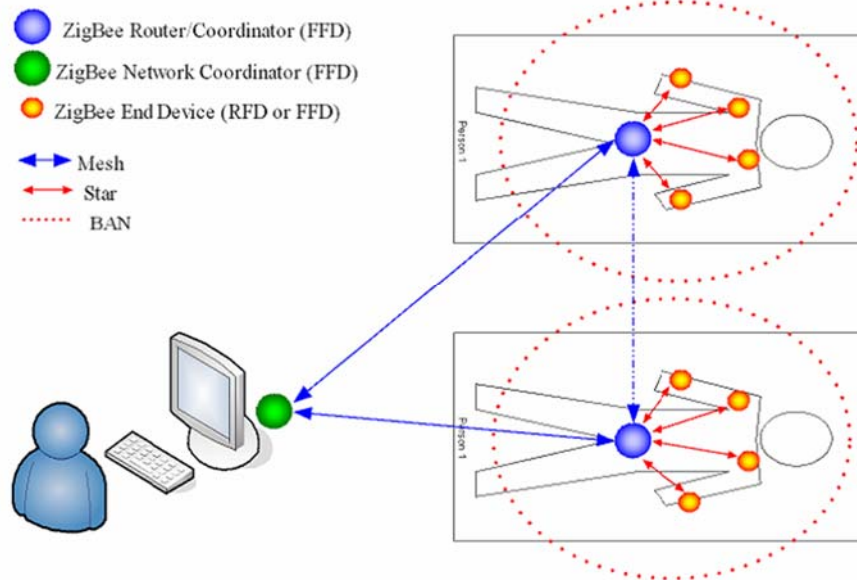
Σχήμα 2-29 Σύστημα ασφάλειας κτηρίων

Δίκτυο αισθητήρων ZigBee, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτοματισμούς και ασφάλεια κτιρίων καθώς και για παρακολούθηση της λειτουργίας βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Σύστημα Τηλεϊατρικής

Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παρακολούθηση ασθενών.

Κάθε τέτοιο σύστημα αποτελείται από μία ή περισσότερες ασύρματες μονάδες αισθητήρων σώματος (Body Sensor Units, BSUs). Οι BSUs είναι έξυπνες μικροσκοπικές συσκευές που προσαρμόζονται σε κατάλληλα σημεία του ανθρώπινου σώματος και καταγράφουν ένα ή περισσότερα βιολογικά σήματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ ηλεκτροκαρδιογράφημα, θερμοκρασία σώματος, πίεση αίματος, ποσότητα γλυκόζης στο αίμα και ποσοστό οξυγόνου ανά μονάδα αίματος).



Σχήμα 2-30 Σύστημα τηλειατρικής.

Αρχικά τα σήματα συλλέγονται σε αναλογική μορφή από τους αισθητήρες. Μετατρέπονται σε ψηφιακά και στέλνονται στο συντονιστή του δικτύου. Ακολούθως γίνεται αποστολή των δεδομένων στους ειδικούς είτε ασύρματα είτε ενσύρματα.

Οικιακές εφαρμογές

Σε οικίες έχουμε τη χρήση αισθητήρων ZigBee για τον έλεγχο πυρανίχνευσης, έλεγχο ηλεκτρικών συσκευών, φώτων, ασφάλειας του κτιρίου κ.α.



Σχήμα 2-31 Οικιακές εφαρμογές.

Εφαρμογή στα οχήματα

Δίκτυα αισθητήρων ZigBee αρχίζουν να χρησιμοποιούνται και εντός οχημάτων. Σκοπός τους η παροχή πληροφοριών σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του οχήματος και υποστήριξη εφαρμογών ασφάλειας.



Σχήμα 2-32 Εφαρμογή στα οχήματα.

Γεωργία ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας είναι ένα σύστημα διαχείρισης των αγρών και αγροκτημάτων.



Σχήμα 2-33 Γεωργία ακριβείας.

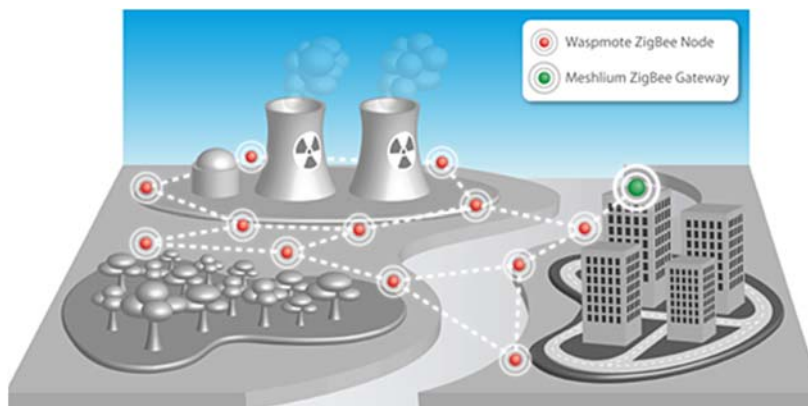
Οι πληροφορίες στο σύστημα παρέχονται από πλήθος αισθητήρων, τοποθετημένων σε διάφορα σημεία του αγρού. Ορισμένες από τις εφαρμογές της γεωργίας ακριβείας είναι οι παρακάτω:

- Χαρτογράφηση Παραγωγής
- Χαρτογράφηση Ηλ. Αγωγιμότητας του εδάφους
- Χαρτογράφηση Ιδιοτήτων Εδάφους – GIS
- Τηλεπισκόπηση
- Επιλεκτικός ψεκασμός με αισθητήρες
- Έλεγχος με Ασύρματους Αισθητήρες
- Πληροφοριακό Σύστημα Λήψης Αποφάσεων

Συχνά στη γεωργία ακριβείας, χρησιμοποιούνται αισθητήρες ZigBee λόγω των χαρακτηριστικών τους, πχ χαμηλή κατανάλωση ισχύος κτλ.

Εφαρμογές Emergency

Κόμβοι αισθητήρων μπορούν να επεκταθούν σε υπό έλεγχο περιοχή με σκοπό για παράδειγμα πυρανίχνευση ή ανίχνευση επιπέδων ακτινοβολίας.



Σχήμα 2-34 Εφαρμογές Emergency 1.

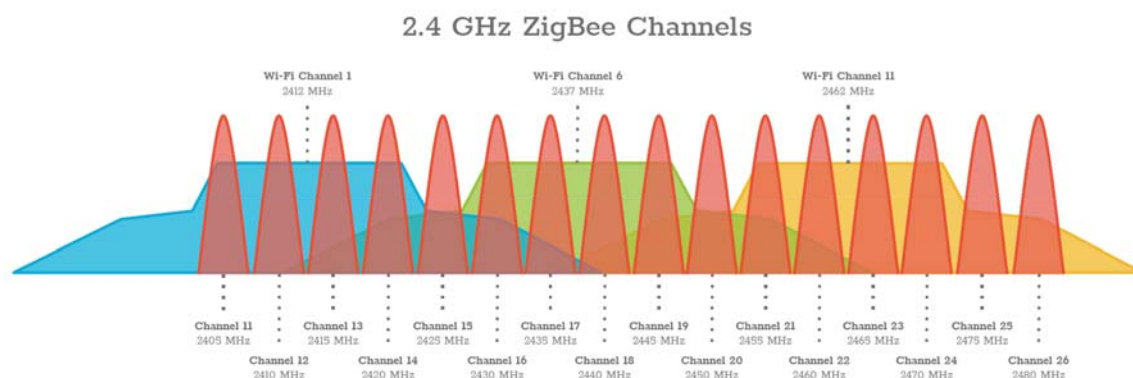
Πριν το φαινόμενο επεκταθεί, μέσω των αισθητήρων θα υπάρξει ειδοποίηση των αρμοδίων και έγκαιρη επέμβαση.

Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ρύθμιση των φαναριών στους δρόμους, σε περιπτώσεις οχημάτων προτεραιότητας, πχ ασθενοφόρων, πυροσβεστικών και αστυνομικών οχημάτων.



Σχήμα 2-35 Εφαρμογές Emergency 2.

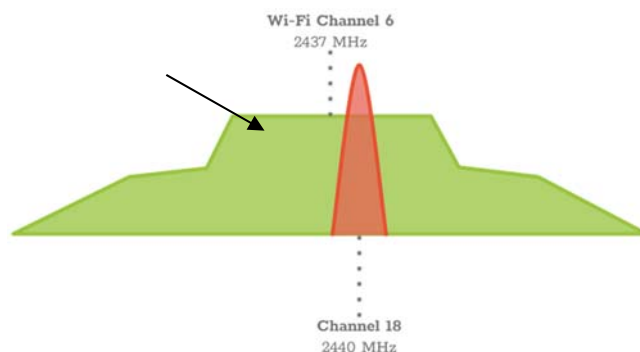
2.3 Παρεμβολή συνεγκατεστημένων πρωτοκόλλων 802.11 και ZigBee.



Σχήμα 2-36 2.4GHz κανάλια ZigBee και Wi-Fi.

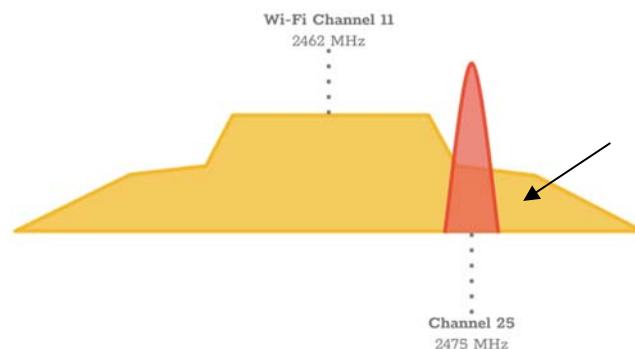
Όπως έχει περιγραφεί αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια, τα κανάλια του ZigBee και των 802.11 συνυπάρχουν στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz. Γι αυτό απαιτείται καλός σχεδιασμός όταν συνεγκαθίστανται, ώστε να μην παρεμβάλλει το ένα δίκτυο στο άλλο. Από μια τέτοια συνεγκατάσταση συνήθως το πρόβλημα παρουσιάζεται στο δίκτυο ZigBee.

Όταν οι κεντρικές συχνότητες είναι πολύ κοντινές, τότε υπάρχει σίγουρα παρεμβολή. Αυτό θα συμβεί επειδή στην περιοχή που δείχνει το μαύρο βέλος του παρακάτω σχήματος, μέσα δηλαδή στο εύρος 20 MHz του καναλιού του Wi-Fi, υπάρχουν δεδομένα του Wi-Fi.



Σχήμα 2-37 Πολύ κοντινές κεντρικές συχνότητες.

Αλλά και στην περίπτωση όπου η κεντρική συχνότητα του ZigBee καναλιού είναι σχετικά μακριά από τη κεντρική συχνότητα του Wi-Fi, πάλι οι πλαϊνοί λοβοί (βλέπε μαύρο βέλος στο παρακάτω σχήμα), μπορούν να παρεμβάλλουν σοβαρά επάνω στο ZigBee σήμα. Βέβαια, οι πλαϊνοί λοβοί επηρεάζουν μόνο στην περίπτωση που η ZigBee συσκευή βρίσκεται πολύ κοντά στον Wi-Fi Transmitter, όπως φαίνεται και στις μετρήσεις.



Σχήμα 2-38 Σχετικά μακρινές κεντρικές συχνότητες.

Όπως έχει προαναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, η ελάχιστη ευαισθησία του πρωτοκόλλου ZigBee είναι -85 dBm, ενώ των προτύπων 802.11g και 802.11n στο Wi-Fi είναι -82dBm.

Κεφάλαιο 3

Θεωρία διάδοσης και θεωρητικοί υπολογισμοί σημαντικών παραμέτρων

Τα δίκτυα 802.11 και τα ZigBee, μπορούν να συνυπάρξουν σε περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου (indoor). Οπότε, οι κυψέλες που δημιουργούνται από κάθε access point είναι τύπου picocells.

Παρακάτω θα αναφερθούν οι μηχανισμοί διάδοσης ΗΜ κυμάτων, θα περιγραφούν μοντέλα σχεδιασμού – υπολογισμού απωλειών ισχύος, η επίδραση διαφορετικών υλικών στη μετάδοση ενός ΗΜ κύματος καθώς και σημαντικές παράμετροι εκτίμησης της ποιότητας μιας ασύρματης επικοινωνίας.

3.1 Μηχανισμοί διάδοσης ΗΜ κύματος

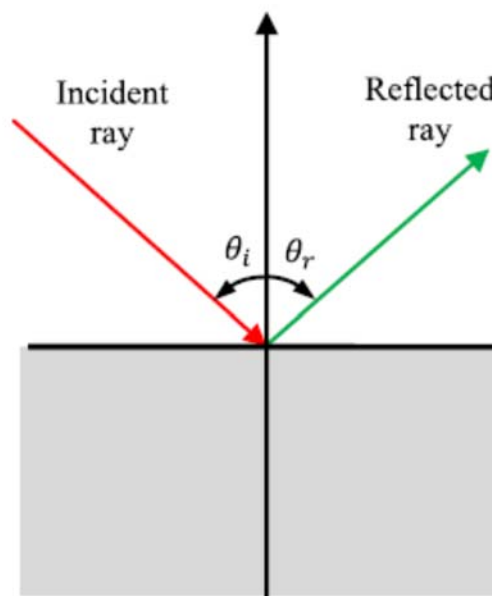
Οι μηχανισμοί διάδοσης ενός ΗΜ κύματος είναι οι παρακάτω:

- Ανάκλαση - Reflection

- Διάθλαση – Refraction
- Περίθλαση - Diffraction
- Σκέδαση - Scattering
- Διάδοση ελεύθερου χώρου – Free Space Propagation

3.1.1 Ανάκλαση

Στην ανάκλαση το ΗΜ κύμα προσκρούει σε λεία, επίπεδη επιφάνεια διαστάσεων πολύ μεγαλύτερων ως προς το μήκος κύματος λ του RF σήματος.

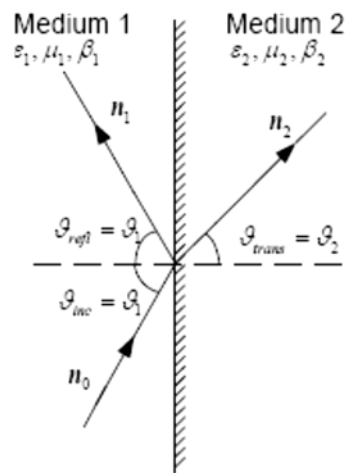


Σχήμα 3-1 Ανάκλαση.

Στη συνέχεια το ΗΜ κύμα ανακλάται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, (νόμος του Snell - Ανάκλαση και Διάθλαση).

3.1.2 Διάθλαση

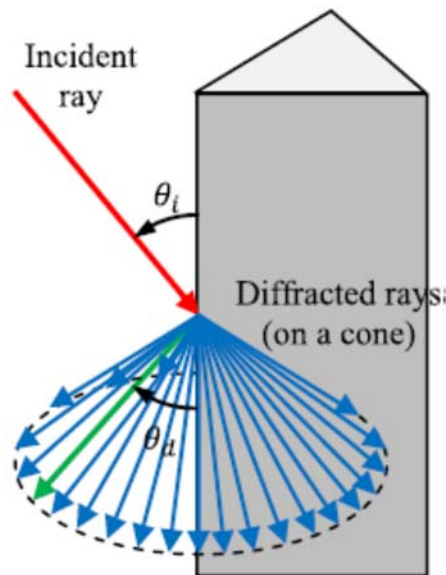
Προκαλείται όταν ΗΜ κύμα προσκρούσει σε μια διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα σε δυο μέσα ενώ ακολουθεί διάδοση και μετάδοση πέραν της διαχωριστικής επιφάνειας, (νόμος του Snell - Ανάκλαση και Διάθλαση).



Σχήμα 3-2 Διάθλαση.

3.1.3 Περίθλαση

Προκαλείται όταν το κύμα μεταξύ του πομπού και του δέκτη εμποδίζεται από μία επιφάνεια με ακμές. Τα κύματα καμπυλώνονται γύρω από τις ακμές του εμποδίου σε περιοχές Non-Line-of-Site (NLOS) σύμφωνα με την αρχή του Huygens.

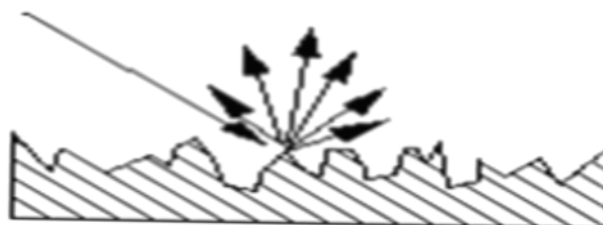


Σχήμα 3-3 Περίθλαση ή σκίαση.

Καλείται και σκίαση (shadowing).

3.1.4 Σκέδαση

Προκαλείται όταν το διαδιδόμενο κύμα προσκρούει σε επιφάνειες με διαστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος και διασκορπίζεται σε όλες τις κατευθύνσεις.



Σχήμα 3-4 Σκέδαση.

3.1.5 Διάδοση ελεύθερου χώρου

Ο μηχανισμός, σύμφωνα με τον οποίο, ΗΜ κύμα διαδίδεται σε ένα ομοιογενές και χωρίς απώλειες και απείρων διαστάσεων μέσο.

$$L_{FSL}(dB) = 32.5 + 20 \log R_{km} + 20 \log F_{MHz} \quad (1)$$

Η απώλεια σε έναν τέτοιο χώρο υπολογίζεται με μεγάλη ακρίβεια από τον παραπάνω τύπο.

3.2 Περιγραφή μοντέλων σχεδιασμού δικτύων

Γνωρίζουμε ότι τα μοντέλα σχεδιασμού δικτύων χωρίζονται στα εμπειρικά και τα θεωρητικά – ντετερμινιστικά.

Τα εμπειρικά βασίζονται σε παρατηρήσεις και μετρήσεις που έχουν προηγηθεί. Επίσης αναφέρονται σε συγκεκριμένες τοποθεσίες – συνθήκες (πχ συχνότητα carrier, ύψος κεραίας κλπ.). Είναι συνήθως πιο απλά και το αποτέλεσμά τους όχι τόσο λεπτομερές και ακριβές.

Τα θεωρητικά μοντέλα αντιθέτως, βασίζονται σε θεωρητικούς υπολογισμούς, βάσει των μηχανισμών διάδοσης των ΗΜ κυμάτων. Είναι πολύ πιο ακριβή σε σχέση με τα εμπειρικά, αλλά απαιτείται περισσότερος χρόνος και κόστος.

Για το σχεδιασμό δικτύων εσωτερικού χώρου πρέπει τα μοντέλα να λαμβάνουν υπόψη τους μεταξύ άλλων και τις απώλειες κατά τη διάδοση του ΗΜ κύματος μέσα από τοίχους και ορόφους. Γνωστά για το σχεδιασμό δικτύων 802.11, είναι τα παρακάτω μοντέλα:

- Wall and floor factor models
- ITU-R model [ITU, 1238]
- COST 231 Multi-wall model
- Ray-tracing models

3.2.1 Μοντέλο Wall and floor

Η απώλεια διάδοσης L_{dB} , σε αυτό το μοντέλο, υπολογίζεται από την απώλεια διάδοσης στον ελεύθερο χώρο L_{FSL} , προσθέτοντας σε αυτή επιπλέον απώλειες λόγω τοίχων και ορόφων που τυχών διαπερνά το σήμα. Ο τύπος υπολογισμού είναι ο εξής:

$$L_{dB} = L_{FSL} (dB) + 20 \log r + n_f a_f + n_w a_w \quad (2)$$

όπου:

- $L_{FSL} (dB)$, η απώλεια ελευθέρου χώρου
- r , η απόσταση μεταξύ πομπού – δέκτη
- n_f , ο αριθμός ορόφων
- a_f , η απώλεια ανά όροφο
- n_w , το πλήθος τοίχων
- a_w , η απώλεια ανά τοίχο.

3.2.2 Μοντέλο ITU-R [ITU, 1238]

Σε αυτό το μοντέλο, η απώλεια διάδοσης L_T , εξαρτάται από το συνολικό αριθμό των ορόφων. Αντιθέτως, οι τοίχοι δεν συνυπολογίζονται ρητά αλλά χρησιμοποιείται ένας εκθέτης απωλειών διάδοσης (n), αναλόγως του περιβάλλοντος και της συχνότητας του carrier.

Στον παρακάτω τύπο,

$$L_T = 20 \log f_c + 10 \log r + L_f(n_f) - 28dB \quad (3)$$

όπου:

- L_T (dB), η απώλεια ορόφων
- r , η απόσταση μεταξύ πομπού – δέκτη
- L_f , η απώλεια ανά όροφο
- n_f , ο αριθμός των ορόφων
- f_c , η συχνότητα του σήματος

υπολογίζω άμεσα μόνο την απώλεια ορόφων.

Οι τιμές του L_f σε dB, αναλόγως του περιβάλλοντος και της συχνότητας του σήματος, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Frequency [GHz]	Environment		
	Residential	Office	Commercial
0.9	-	9 (1 floor)	-
		19 (2 floors)	
		24 (3 floors)	
1.8-2.0	$4n_f$	$15+4(n_f-1)$	$6+3(n_f-1)$

Πίνακας 3-1 Τιμές του L_f σε dB, αναλόγως του περιβάλλοντος και της συχνότητας του σήματος.

Οι τοίχοι δεν συνυπολογίζονται ρητά αλλά χρησιμοποιείται ένας εκθέτης απωλειών διάδοσης n , αναλόγως του περιβάλλοντος και της συχνότητας του carrier. Οι τιμές αυτού σε dB, αναλόγως του περιβάλλοντος και της συχνότητας του σήματος, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Frequency [GHz]	Environment		
	Residential	Office	Commercial
0.9	-	3.3	2.0
1.2-1.3	-	3.2	2.2
1.8-2.0	2.8	3.0	2.2
4.0	-	2.8	2.2
60.0	-	2.2	1.7

Πίνακας 3-2 Τιμές του n σε dB, αναλόγως του περιβάλλοντος και της συχνότητας του σήματος.

3.2.3 Μοντέλο COST231 Multi-wall

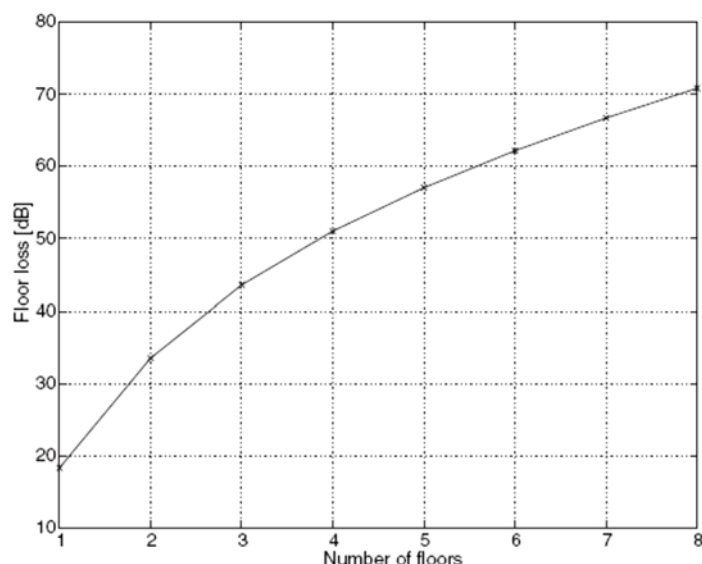
Στο μοντέλο COST231 Multi-wall, η απώλεια L_T , δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$L_T = L_F + L_C + \sum_{i=1}^W L_{wi} n_{wi} + L_f n_f^{((n_f+2)/(n_f+1)-b)} \quad (4)$$

όπου:

- L_T (dB), η ολική απώλεια
- L_F (dB) = L_{FSL} (dB), της ευθείας απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη
- L_C και b , εμπειρικά εξαγόμενες μεταβλητές
- L_{wi} , η απώλεια για τοίχο τύπου i
- n_{wi} , ο αριθμός των τοίχων τύπου i
- n_f , ο αριθμός ορόφων
- L_f , η απώλεια ανά όροφο

Σε αυτό το μοντέλο, η απώλεια L_T , αυξάνεται πιο αργά όσο προστίθενται επιπλέον όροφοι πέραν του πρώτου. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο παρακάτω γράφημα:



Γράφημα 3-1 Απώλεια σε σχέση με το πλήθος ορόφων, σύμφωνα με το COST231 Multi-wall model

3.2.4 Μοντέλα Ray-tracing

Πρόκειται για μοντέλα βασισμένα στη γεωμετρική οπτική και την ομοιόμορφη θεωρία της περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction-UTD). Υπολογίζονται δηλαδή ανακλάσεις, και διαθλάσεις μέσω των αρχών UTD.

Γι αυτά τα μοντέλα απαιτούνται δεδομένα τριών διαστάσεων ώστε να υπολογιστούν καθυστερήσεις σε ισχύ και φάση, γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης καθώς και η εκτιμώμενη κάλυψη του χώρου.

3.3 Επίδραση διαφορετικών υλικών στη μετάδοση ΗΜ κύματος

Όταν ένα ΗΜ κύμα διαδίδεται σε χώρο εκτός κενού, υφίσταται αλλοιώσεις εξαιτίας των μέσων τα οποία διαπερνά. Καθένα από αυτά, αναλόγως των χαρακτηριστικών του, επιδρά στο μεταδιδόμενο σήμα επηρεάζοντας σε αυτό την ηλεκτρική ή τη μαγνητική συνιστώσα.

3.3.1 Συστατικές παράμετροι –μέσου διάδοσης

Κάθε υλικό – μέσο διάδοσης, χαρακτηρίζεται από τις συστατικές παραμέτρους (constitutive parameters) αυτού. Σύμφωνα με αυτές, κατατάσσουμε τα υλικά σε αγωγούς ή διηλεκτρικά. Οι συστατικές παράμετροι ενός μέσου είναι οι εξής:

- Ηλεκτρική επιτρεπτότητα – electrical permittivity ϵ (F/m)
- Μαγνητική διαπερατότητα –permeability μ (H/m)
- Αγωγιμότητα – conductivity σ (S/m)

Οι συστατικές παράμετροι των υλικών (Constitutive parameter information) είναι σημαντικές εφόσον όλα τα θεωρητικά μοντέλα που υπολογίζουν τις απώλειες του σήματος κάνουν χρήση αυτών των παραμέτρων, οι οποίες πρέπει να αξιοποιούνται με τον ορθό τρόπο.

Για να αποκτήσουμε τα στοιχεία των συστατικών παραμέτρων ενός υλικού πρέπει να προβούμε σε αντίστοιχες μετρήσεις. Είναι χαρακτηριστικό ότι κάθε υλικό συμπεριφέρεται διαφορετικά σε διαφορετικές συχνότητες.

3.3.2 Αγωγοί και διηλεκτρικά

Ένα υλικό μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως αγωγός ή διηλεκτρικό με τον υπολογισμό του λόγου:

$$(\sigma/\omega\epsilon)^2 \quad (5)$$

- Αν $(\sigma/\omega\epsilon)^2 \gg 1$, τότε το υλικό κατηγοριοποιείται ως αγωγός.
- Αν $(\sigma/\omega\epsilon)^2 \ll 1$, τότε το υλικό κατηγοριοποιείται ως διηλεκτρικό.

Για τον λόγο $(\sigma/\omega\epsilon)^2$, ισχύουν:

- $\omega=2\pi f$
- f =συχνότητα λειτουργίας (Hz)

Αξιολογώντας τον προηγούμενο λόγο για κοινά υλικά οικοδομής (γυαλί, άργιλο, τούβλο, χώμα, ξύλο κλπ.), φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι τα υλικά αυτά εμπίπτουν στην κατηγορία των διηλεκτρικών.

Εφόσον τα πιο πάνω υλικά μπορούν να χαρακτηριστούν ως διηλεκτρικά, οι διηλεκτρικές απώλειες των υλικών μπορούν να συμπεριληφθούν στις προηγούμενες εξισώσεις μέσω μιας μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς – παραμέτρου, που ονομάζεται σύνθετη ηλεκτρική επιτρεπτότητα – complex electrical permittivity, $\epsilon_{complex}$:

$$\epsilon_{complex} = \epsilon' - j\epsilon''(1 - j\frac{\epsilon''}{\epsilon'}) \quad (6)$$

- $\epsilon_{complex}$: σύνθετη ηλεκτρική επιτρεπτότητα (F/m)
- ϵ' : πραγματικό μέρος της σύνθετης σχετικής επιτρεπτότητας (real part of the complex relative permittivity)
- ϵ'' : φανταστικό μέρος της σύνθετης σχετικής επιτρεπτότητας (imaginary part of the complex relative permittivity)

3.3.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τυπικών δομικών υλικών

Για συχνότητα λειτουργίας $f=2.4GHz$ έχω τα εξής στοιχεία για τα παρακάτω υλικά:

- Μπετό (concrete):
 - $\epsilon_{complex}=15-j0.112347$
 - $\tan\delta=75 \times 10^{-4}$
- Τούβλο (brick):
 - $\epsilon_{complex}=4-j0.00748979$
 - $\tan\delta=18 \times 10^{-4}$
- Γυψοσανίδα (plasterboard):
 - $\epsilon_{complex}=2.5-j0.224694$
 - $\tan\delta=0.0898$

3.4 Μετρικές

Για την εκτίμηση και αξιολόγηση της επίδοσης μιας ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιούνται μια σειρά από παραμέτρους. Οι παρακάτω παράμετροι,

- Baud rate (Ρυθμός μετάδοσης συμβόλων)

- PER - Packet Error Rate (Ρυθμός λάθος πακέτων)
- RSSI - Received Signal Strength Indicator (ενδείκτης ισχύος λαμβανόμενου σήματος)
- Throughput (Ρυθμαπόδοση)
- RTT - Round-Trip Time

που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας, μετρώνται στο φυσικό επίπεδο – PHY.

Παρακάτω περιγράφεται καθεμιά από αυτές. Επίσης, επισημαίνονται τα όριά τους, για τη συσκευή XBee που χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος.

3.4.1 Baud rate

Baud rate, ονομάζεται ο μέγιστος ρυθμός αλλαγών σήματος που μπορούν να συμβούν σε 1 δευτερόλεπτο. Μετριέται σε bauds και αναπαριστά τη δυνατότητα για αλλαγή σήματος ανά δευτερόλεπτο. Η διαφορά με το bit rate είναι ότι στο baud rate μπορούμε, αναλόγως της διαμόρφωσης, να κωδικοποιήσουμε περισσότερα του 1 bit σε μια αλλαγή του σήματος.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 4800, 9600 και 115200 κατά την επικοινωνία των δύο ZigBee συσκευών (XBees).

3.4.2 PER – Packet Error Rate

Packet Error Rate, σημαίνει ρυθμός λάθος πακέτων. Όπως προαναφέρθηκε, μετράται στο φυσικό επίπεδο. Για τον υπολογισμό αυτού, είναι ανάγκη να γνωρίζουμε το Bit Error Rate (BER), το οποίο είναι ο λόγος του πλήθους των bit που μεταδίδονται λανθασμένα δια του συνόλου των μεταδιδόμενων bit. Στην περίπτωση που ένα πακέτο αποτελείται από p bits, τότε ισχύει:

$$PER = p(BER) \quad (7)$$

Στο πρότυπο ZigBee, για το φυσικό επίπεδο ισχύει ότι και στο πρότυπο το IEEE Std 802.11.15.4[13]. Σύμφωνα με το πρότυπο, το PER υπολογίζεται υπολογίζοντας για μεγάλο δείγμα τυχαίων PSDU πακέτων και πρέπει να είναι μικρότερο του 1%.

Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του PER, στάλθηκαν 100 πακέτα.

3.4.3 RSSI – Received Signal Strength Indicator

Η παράμετρος RSSI, δείχνει το επίπεδο ισχύος σήματος μιας ασύρματης συσκευής, μετρούμενο σε dBm, του τελευταίου ληφθέντος πακέτου[15].

Το σκεπτικό πίσω από την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος RSS, είναι ότι το ΗΜ κύμα που διαδίδεται μέσα στο χώρο, διασπάται, ακολουθώντας τους μηχανισμούς διάδοσης. Στον ελεύθερο χώρο το RSS υποβιβάζεται με το τετράγωνο της απόστασης από τον πομπό[16]. Πιο συγκεκριμένα, η εξίσωση του Friis μας δίνει το λόγο της λαμβανόμενης ισχύος P_r προς την εκπεμπόμενη ισχύ P_t :

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 R^2} \quad (8)$$

όπου G_t η ενίσχυση της κεραίας του πομπού, G_r η ενίσχυση της κεραίας του δέκτη, λ το μήκος κύματος και R η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Η ληφθείσα ισχύς μετατρέπεται σε RSSI, από τον παρακάτω τύπο, όπου $P_{Ref} = 1\text{mW}$ [17].

$$RSSI = 10 \log_{10} \frac{P_r}{P_{Ref}} \quad (9)$$

Για το XBee S2C η ελάχιστη τιμή RSSI για να έχω ολοκληρωμένη επικοινωνία είναι τα -102dBm (boost mode) και τα -100dBm (normal mode)[15].

Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του RSSI, στάλθηκαν 100 πακέτα και υπολογίστηκε ο μέσος της τιμής ισχύος στο δέκτη.

3.4.4 Throughput

Η ρυθμαπόδοση ή διεκπεραιωτική ικανότητα[18] (throughput) μας δηλώνει πόση κίνηση περνά από τη μια άκρη στην άλλη ανά μονάδα χρόνου και μετριέται σε bits/sec. Δεν πρέπει να συγχέεται με τον ονομαστικό ρυθμό ψηφίου (bit rate) ενός καναλιού ή μιας ζεύξης που αλλιώς λέγεται και χωρητικότητα (capacity) της ζεύξης παρότι χρησιμοποιούν τις ίδιες μονάδες. Η

διαφορά είναι ότι ο ρυθμός ψηφίου ορίζεται από τον ρυθμό λειτουργίας των πομποδεκτών (που πρέπει φυσικά να μην είναι ανώτερος από αυτόν που μπορεί να διαβιβάσει το μέσο μετάδοσης) και είναι η μέγιστη δυνατότητα της ζεύξης, ενώ η ρυθμαπόδοση αναφέρεται στην πραγματική ποσότητα πληροφορίας που πέρασε στην διάρκεια κάποιας παρατήρησης.

Στην παρούσα εργασία στάλθηκαν πακέτα για 60s και υπολογίστηκε ο μέσος όρος του Throughput.

3.4.5 RTT – Round-Trip Time

Λέγεται και RTD – Round-Trip Delay. Αντιπροσωπεύει τον χρόνο που απαιτείται για να πάει μία μονάδα δεδομένων σε ένα προορισμό και να γυρίσει πίσω μια απάντηση ή επιβεβαίωση (ACK-acknowledgment).

Αναλύεται στις εξής συνιστώσες: τον χρόνο μετάδοσης, τον χρόνο διάδοσης, τον χρόνο επεξεργασίας και τον χρόνο αναμονής στις ουρές των ενδιάμεσων κόμβων[18].

Στην παρούσα εργασία στάλθηκε συγκεκριμένο πακέτο και υπολογίστηκε ο μέσος όρος των διαφορών του χρόνου λήψης μείον του χρόνου εκπομπής.

Κεφάλαιο 4

Πειραματική Ανάλυση και Μετρήσεις

Θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις παραμέτρων αξιολόγησης της ποιότητας επικοινωνίας δυο αισθητήρων XBee Series2, που επικοινωνούν με το πρωτόκολλο Zigbee, παρουσία θορύβου. Αυτός προέρχεται από ένα Access Point που βρίσκεται στην περιοχή και θα εκπέμπει στο Wi-Fi κανάλι 11 - 2.462GHz, σε 802.11g και 802.11n mode.

Σκοπός του όλου πειράματος είναι η αξιολόγηση της επικοινωνίας αισθητήρων που επικοινωνούν με το πρωτόκολλο ZigBee, παρουσία θορύβου από δίκτυο Wi-Fi που βρίσκεται στην περιοχή και λειτουργεί σε 802.11g και n. Τέλος, θα προταθούν τρόποι βελτίωσης αυτής.

4.1 Ανάλυση εργαλείων – εξοπλισμού

Παρακάτω θα αναλυθούν ο εξοπλισμός αλλά και τα εργαλεία – λογισμικά που απαιτήθηκαν για την πραγματοποίηση του πειραματικού μέρους αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής.

4.1.1 Εξοπλισμός Access Point D-Link GO-RT-N150

Για το πρωτόκολλο 802.11, χρησιμοποιείται το wireless Access Point της D-Link GO-RT-N150. Έχει μέγιστη ισχύ εξόδου 100mW και λειτουργεί στα modes: 802.11.n και 802.11b/g.



Σχήμα 4-1 Access Point D-Link GO-RT-N150

Χρησιμοποιήθηκε για να συνδεθεί ενσύρματα με τον Η/Υ Sender και ασύρματα με τον Η/Υ Receiver, για τη λειτουργία της γεννήτριας θορύβου.

4.1.2 Γεννήτρια θορύβου (κίνησης δικτύου)

Στις μέρες μας είναι απαραίτητη η αξιολόγηση των επιδόσεων του δικτύου και της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Αρχικά αξιολογείται η επίδοση του δικτύου σε εργαστηριακό περιβάλλον. Εκεί εξομοιώνουμε τις πραγματικές συνθήκες, μετράμε και διορθώνουμε ό,τι παρατηρήσουμε και κρίνουμε σκόπιμο.

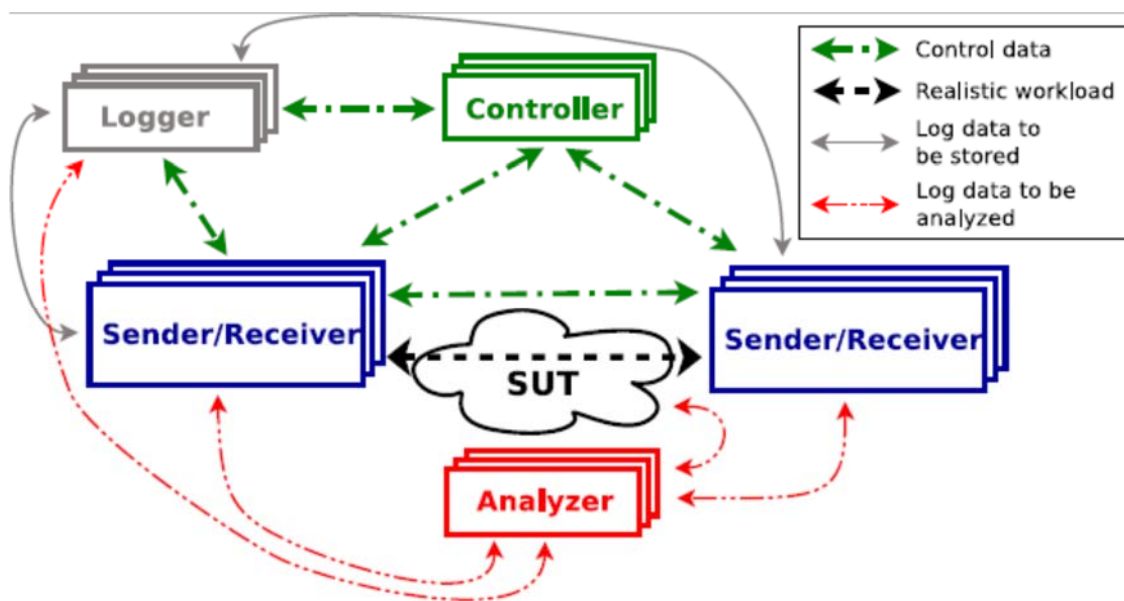
Η κίνηση του δικτύου δημιουργείται με δυο διαφορετικούς τρόπους[19]:

- *Trace-based generation*: Οι ροές αντιγράφουν ακριβώς το περιεχόμενο και το χρονοδιάγραμμα των ιχνών κυκλοφορίας που έχουν συλλεχθεί προηγουμένα από πραγματικά σενάρια.
- *Analytical model-based generation*: Οι ροές βασίζονται σε στατιστικά μοντέλα.

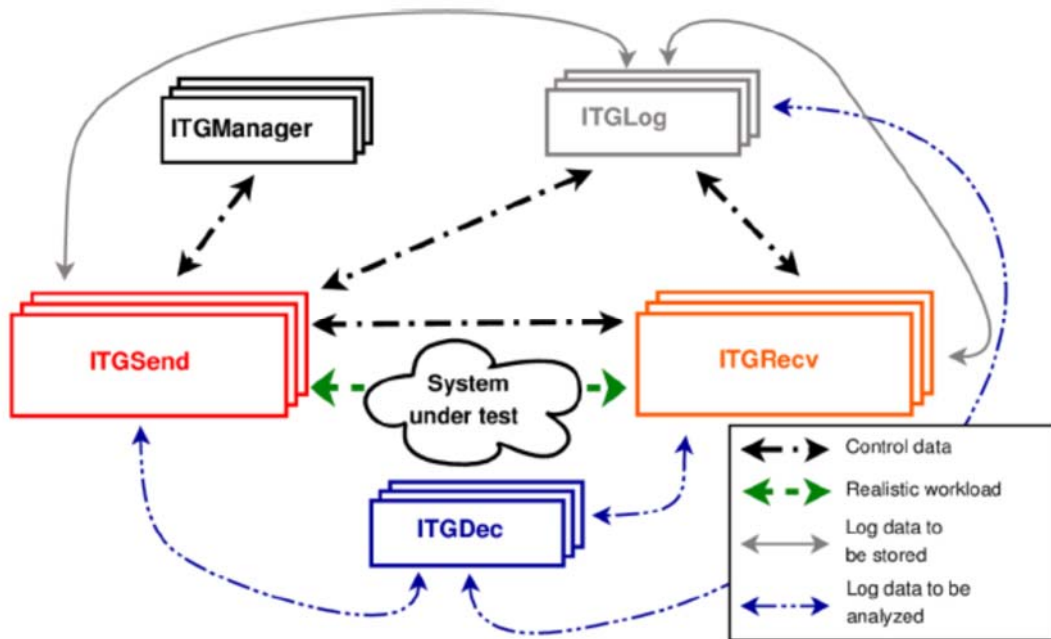
Για τη δημιουργία μιας ρεαλιστικής γεννήτριας κίνησης δικτύου (traffic generator) απαιτούνται και οι δυο παραπάνω τρόποι, αναλόγως των χαρακτηριστικών του σεναρίου που θέλουμε να εξομοιώσουμε. Στη συγκεκριμένη εργασία η γεννήτρια που χρησιμοποιούμε ονομάζεται D-ITG (Distributed Internet Traffic Generator) [20].

Αρχιτεκτονική του D-ITG

Η αρχιτεκτονική της γεννήτριας κίνησης δικτύου D-ITG φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 4-2 Πρώτη αρχιτεκτονική γεννήτριας κίνησης δικτύου



Σχήμα 4-3 Δεύτερη αρχιτεκτονική γεννήτριας κίνησης δικτύου

Τα πέντε βασικά τμήματα αυτής είναι τα εξής:

- **Sender (ITGSend)** - Πομπός
- **Receiver (ITGRecv)** - Δέκτης
- **Logger (ITGLog)** - Καταγραφέας
- **Controller (ITGManager)** - Διαχειριστής
- **Analyzer-Decoder (ITGDec)** - Αποκωδικοποιητής

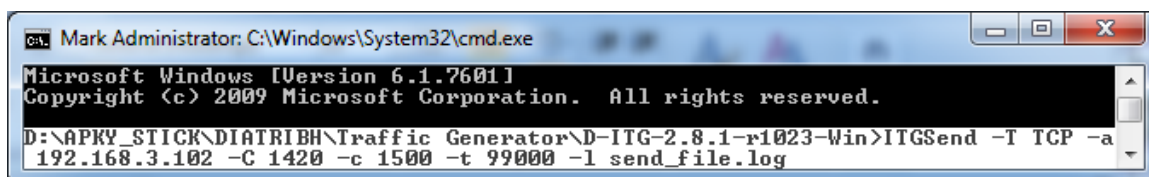
Αυτά μπορούν να βρίσκονται κατανεμημένα σε πολλά διαφορετικά συστήματα. Ο βασικός πυρήνας του συστήματος είναι τα ITGSend και ITDRecv. Αυτά δημιουργούν μεταξύ τους παράλληλες πολλαπλές ροές κυκλοφορίας. Επίσης, δημιουργείται μεταξύ τους 1 κανάλι σηματοδότησης (signaling channel), με σκοπό τον έλεγχο των ροών μεταξύ των ITGSend και ITGRecv.

Παρακάτω αναλύεται καθένα από τα παραπάνω τμήματα χωριστά[21]:

ITGSend: Τμήμα Πομπού της πλατφόρμας D-ITG

Ο πομπός Sender – ITGSend, είναι υπεύθυνος για να παράξει ροές θορύβου και μπορεί να δουλέψει με 3 διαφορετικούς τρόπους:

- Single – flow: δέχεται μια εντολή μέσω command line για τη δημιουργία μιας ροής θορύβου προς μεμονωμένο δέκτη.
- Multi – flow: δέχεται σειρά εντολών από script file για τη δημιουργία πολλαπλών ροών θορύβου προς έναν ή πολλούς διαφορετικούς δέκτες. Το script file είναι φτιαγμένο με 1 γραμμή για κάθε διαφορετική ροή που θέλει να δημιουργήσει. Κάθε γραμμή περιέχει όλες τις επιλογές, όπως και στην περίπτωση Single – flow.
- Daemon: βρίσκεται σε επαφή – σύνδεση με ένα UDP socket για εντολές και μπορεί να τηλεχειριστεί μέσω του D-ITG API.



```
Mark Administrator: C:\Windows\System32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

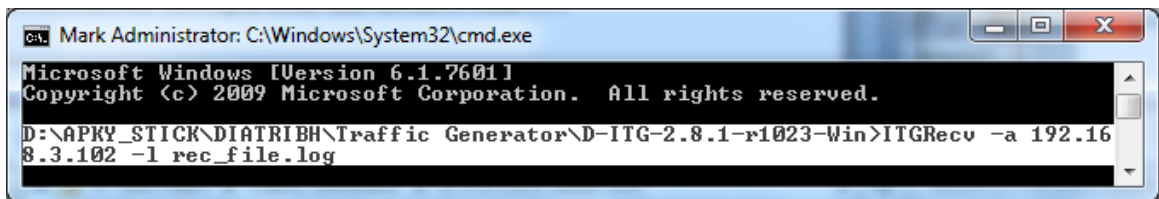
D:\APKY_STICK\DIATRIBH\Traffic Generator\D-ITG-2.8.1-r1023-Win>ITGSend -T TCP -a
192.168.3.102 -C 1420 -c 1500 -t 99000 -l send_file.log
```

Σχήμα 4-4 Εντολή ITGSend.

Κάθε ροή θορύβου περιγράφεται από δυο στοχαστικές διαδικασίες[22], σχετικές με το Packet Size (PS) και το Internet Departure Time (IDT). Μέσω αυτών μπορούν να παραχθούν συγκεκριμένα προφίλ ροών, εξομοιώνοντας έτσι πρωτόκολλα του επιπέδου εφαρμογών του OSI, όπως VoIP και DNS. Τέλος, πομπός ITGSend, μπορεί να καταγράψει χρονικές αλλά και άλλες πληροφορίες για κάθε πακέτο που στάλθηκε ή παραλήφθηκε.

ITGRecv: Τμήμα Δέκτη της πλατφόρμας D-ITG

Ο δέκτης Receiver – ITGRecv, είναι υπεύθυνος για την παραλαβή μιας ή πολλαπλών παράλληλων ροών θορύβου που παράγονται από έναν ή περισσότερους πομπούς. Ο δέκτης «ακούει» ένα TCP Socket για εισερχόμενα αιτήματα θορύβου και δημιουργεί διαφορετική διαδικασία για κάθε αίτημα από διαφορετικό αποστολέα που θα του φτάσει.



```
ca. Mark Administrator: C:\Windows\System32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.
D:\APKY_STICK\DIATRIBH\Traffic Generator\ND-ITG-2.8.1-r1023-Win>ITGRecv -a 192.168.3.102 -l rec_file.log
```

Σχήμα 4-5 Εντολή ITGRecv.

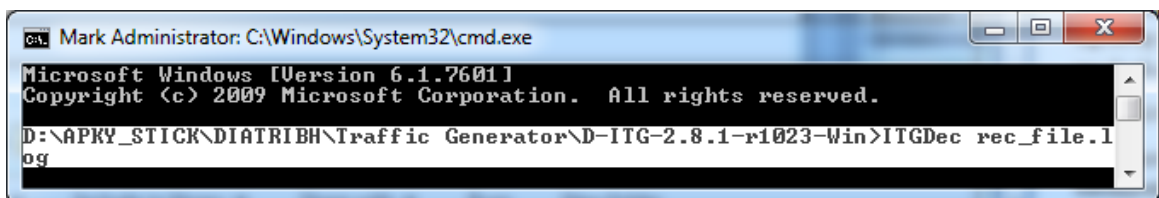
Συγκεκριμένο πρωτόκολλο σηματοδότησης (TSP – Traffic Specification Protocol), μέσω του signaling channel, επιτρέπει τη σωστή εγκατάσταση πομπού και δέκτη καθώς και τη διαχείριση της διαδικασίας παραγωγής θορύβου.

ITGLog: Τμήμα Καταγραφέα της πλατφόρμας D-ITG

Ο καταγραφέας Logger – ITGLog, είναι υπεύθυνος για την λήψη και αποθήκευση πληροφοριών καταγραφής που πιθανών σταλούν από πομπό και δέκτη. Ο Logger «ακούει» ένα TCP Socket για εισερχόμενες πληροφορίες καταγραφής και τις αποθηκεύει κατά αποστολέα. Αυτές οι πληροφορίες έρχονται με TCP ή UDP πρωτόκολλο, σε μια δυναμικά οριζόμενη πόρτα, μεταξύ των 9003 – 10003.

ITGDec: Τμήμα Αποκωδικοποιητή της πλατφόρμας D-ITG

Ο αποκωδικοποιητής Decoder – ITGDec, είναι υπεύθυνος για την αποκωδικοποίηση και ανάλυση των καταγραμμένων αρχείων που έχουν αποθηκευτεί κατά τη διάρκεια λειτουργίας του D-ITG traffic generator.



```
ca. Mark Administrator: C:\Windows\System32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.
D:\APKY_STICK\DIATRIBH\Traffic Generator\ND-ITG-2.8.1-r1023-Win>ITGDec rec_file.log
```

Σχήμα 4-6 Εντολή ITGDec.

Αναλύει τα log files που έχουν παραχθεί και υπολογίζει για κάθε ξεχωριστή ροή θορύβου τα παρακάτω:

- Ολικός χρόνος (Total time)(s)
- Συνολικά πακέτα (Total packets)
- Ελάχιστη καθυστέρηση (Minimum delay)(s)
- Μέγιστη καθυστέρηση (Maximum delay)(s)
- Μέση τιμή καθυστέρησης (Average delay)(s)
- Μέση χρονική διακύμανση επιστροφής πακέτων (καθυστέρηση δικτύου) (Average jitter)(s)
- Τυπική απόκλιση καθυστέρησης (Delay standard deviation)(s)
- Πλήθος αποσταλέντων Bytes (Bytes transmitted)
- Πλήθος ληφθέντων Bytes (Bytes received)
- Μέσος ονομαστικός ρυθμός ψηφίου (Average bitrate)(kbit/s)
- Μέσος ονομαστικός ρυθμός πακέτων (Average packet rate)(pkt/s)
- Πλήθος απορριφθέντων πακέτων (Packets dropped)(0.00%)
- Μέσο μέγεθος χαμένων πακέτων ριπής (Average loss-burst size)(pkt)
- Λανθασμένες γραμμές (Error lines)

Στο παρακάτω κελί πίνακα, φαίνεται το περιεχόμενο ενός .log αρχείου δέκτη, από το πειραματικό μέρος.

```

Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

D:\APKY_STICK\DIATRIBH\TrafficGenerator\D-ITG-2.8.1-r1023-
Win>ITGDec.exe rec_file.log
ITGDec version 2.8.1 (r1023)
Compile-time options:
/-----
Flow number: 1
From 192.168.3.101:51054
To 192.168.3.102:8999
-----
Total time                =      98.999000 s
Total packets             =      140580
Minimum delay             =      12.441000 s
Maximum delay             =      12.466000 s
Average delay             =      12.443051 s
Average jitter            =       0.000601 s
Delay standard deviation =       0.001012 s
Bytes received            =      210870000
Average bitrate           =    17040.172123 Kbit/s
Average packet rate       =    1420.014344 pkt/s
Packets dropped           =           0 (0.00 %)
Average loss-burst size   =       0.000000 pkt
-----

```

```

***** TOTAL RESULTS *****
Number of flows      =          1
Total time           =    98.999000 s
Total packets        =    140580
Minimum delay        =    12.441000 s
Maximum delay        =    12.466000 s
Average delay        =    12.443051 s
Average jitter        =     0.000601 s
Delay standard deviation =     0.001012 s
Bytes received       =    210870000
Average bitrate      =  17040.172123 Kbit/s
Average packet rate  =   1420.014344 pkt/s
Packets dropped      =           0 (0.00 %)
Average loss-burst size =           0 pkt
Error lines          =           0
-----
D:\APKY_STICK\DIATRIBH\Traffic Generator\D-ITG-2.8.1-r1023-Win>

```

Πίνακας 4-1 Περιεχόμενα .log αρχείου δέκτη, από το πειραματικό μέρος.

ITGManager: Τμήμα Διαχειριστή της πλατφόρμας D-ITG

Ο διαχειριστής Controller – ITGManager, είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση μεγάλης κλίμακας εφαρμογής, κατά την οποία λαμβάνει είσοδο από τον χρήστη και ελέγχει αντίστοιχα όλους τους πομπούς και τους δέκτες με σκοπό να οργανώσει καλύτερα τις παραγόμενες μετρήσεις.

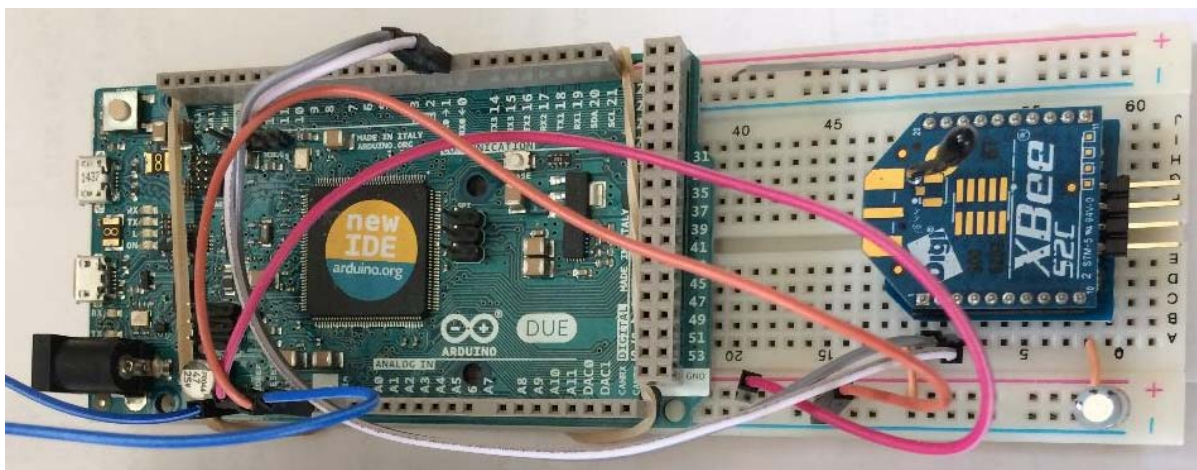
4.1.3 Εξοπλισμός Arduino Due

Το Arduino είναι ένας μικροελεγκτής μονής πλακέτας, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring.



Σχήμα 4-7 Λογότυπο του Arduino

Το Arduino Due[23], είναι η πρώτη πλακέτα της Arduino που βασίζεται σε έναν 32-bit μικροελεγκτή. Έχοντας 54 εισόδους/εξόδους και 12 αναλογικές εισόδους, αποτελεί την καλύτερη επιλογή για κατασκευές μεγάλης κλίμακας. Μπορεί να τροφοδοτηθεί είτε κατευθείαν από τη σύνδεση USB, είτε από εξωτερική τροφοδοσία μεταξύ 7V και 12V DC. Ο microcontroller του Arduino Due λειτουργεί με 3.3V. Συνδέοντας μεγαλύτερες τάσεις, όπως 5V που χρησιμοποιούν τα περισσότερα Arduino, θα καταστραφεί η πλακέτα.



Σχήμα 4-8 Arduino DUE

Στην παρούσα εργασία, το Arduino Due χρησιμοποιήθηκε, με σκοπό να συνδεθούν σειριακά (USB) τα XBeeS2C με τους Η/Υ για τον προγραμματισμό τους. Για να επιτευχθεί αυτή η χρήση του Arduino Due, χρειάστηκε να γίνει η εξής συνδεσμολογία:

- Βραχυκυκλώθηκαν οι ακροδέκτες GND και RESET του Arduino due.
- Τροφοδοτήθηκε το XBeeS2C από τους ακροδέκτες 3.3V και GND.

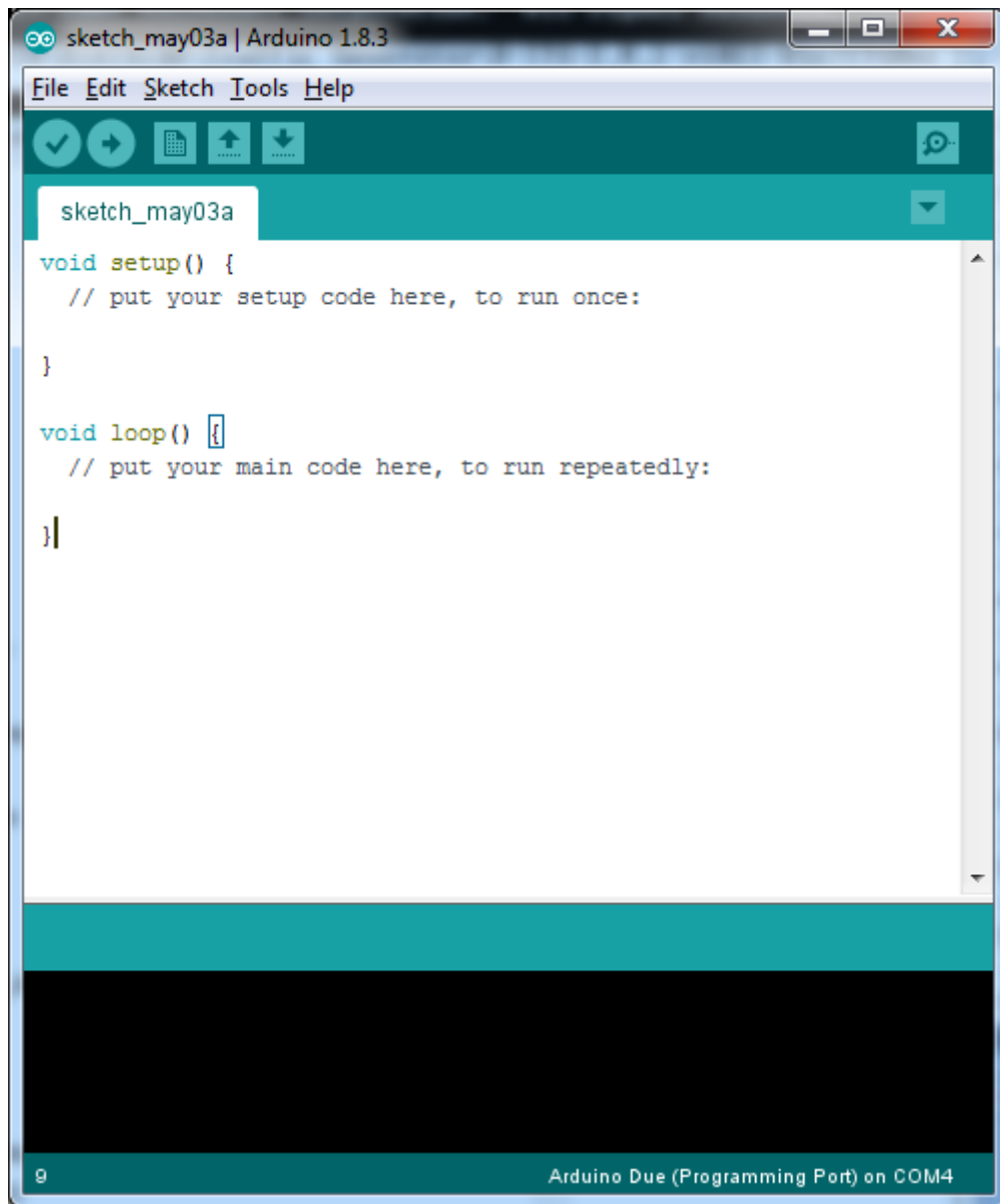
- Συνδέθηκε ο ακροδέκτης TX0 του Arduino με τον ακροδέκτη Data Out του XBeeS2C
- Συνδέθηκε ο ακροδέκτης RX0 του Arduino με τον ακροδέκτη Data In του XBeeS2C
- Συνδέθηκε το Arduino due με χρήση ενός micro-USB καλωδίου από την micro-USB έξοδο του με όνομα “Programming ATMEGA16” στην είσοδο USB του Η/Υ.
- Εγκατάσταση του λογισμικού ώστε να περαστούν οι κατάλληλοι οδηγοί στον Η/Υ και να αναγνωριστεί η πλακέτα Arduino από αυτόν.

Πλέον, η πλακέτα Arduino due, θα λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ του Η/Υ μου και της XBee συσκευής.

4.1.4 Λογισμικό Arduino (sw v. 1.8.3)

Το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) του Arduino είναι μία εφαρμογή γραμμένη σε Java, που λειτουργεί σε πολλές πλατφόρμες και προέρχεται από το IDE για τη γλώσσα προγραμματισμού Processing και το σχέδιο Wiring[24]. Έχει σχεδιαστεί για να εισαγάγει στον προγραμματισμό τους καλλιτέχνες και τους νέους που δεν είναι εξοικειωμένοι με την ανάπτυξη λογισμικού. Περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κώδικα με χαρακτηριστικά όπως είναι η επισήμανση σύνταξης και ο συνδυασμός αγκύλων και είναι επίσης σε θέση να μεταγλωττίζει και να φορτώνει προγράμματα στην πλακέτα με ένα μόνο κλικ. Δεν υπάρχει συνήθως καμία ανάγκη να επεξεργαστούν αρχεία make ή να τρέξουν προγράμματα σε ένα περιβάλλον γραμμής εντολών. Ένα πρόγραμμα ή κώδικας που γράφτηκε για Arduino ονομάζεται *σκίτσο* (sketch).

Στην παρούσα εργασία το λογισμικό Arduino ώστε να περαστούν οι κατάλληλοι οδηγοί στον Η/Υ και να αναγνωριστεί η πλακέτα Arduino Due από αυτόν[25].



Σχήμα 4-9 Λογισμικό Arduino (sw v. 1.8.3)

4.1.5 Πλακέτα - Ηλεκτρονική συσκευή, XBee

Τα XBee, είναι μια οικογένεια συσκευών ασύρματης επικοινωνίας.



Σχήμα 4-10 Διαστάσεις συσκευής XBee

Παράγονται από την Digi[26]. Χρησιμοποιούν μια ομάδα πρωτοκόλλων, μεταξύ αυτών και το πρωτόκολλο ZigBee[11]. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά των διαφόρων συσκευών XBee που κυκλοφορούν.

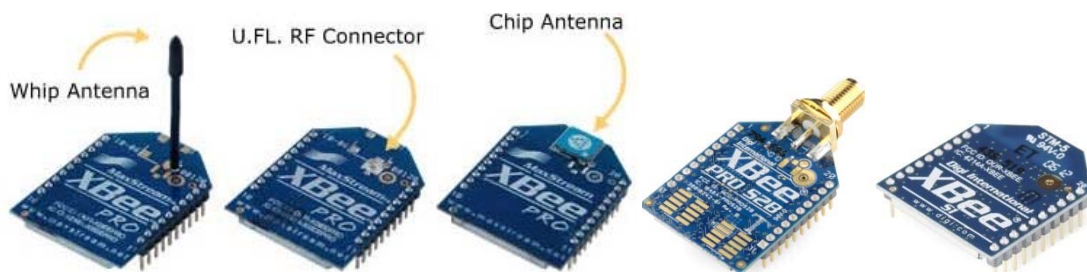
	Frequency	Form Factor	Protocol	Multi point	Mesh	Program mable	Gate way	Mo dem
XBee ZigBee	2.4 GHz	TH/SMT	ZigBee		✓	✓	✓	✓
XBee 802.15.4	2.4 GHz	Through-Hole	802.15.4	✓			✓	✓
XBee S2C 802.15.4	2.4GHz, 900MHz	TH, SMT	802.15.4	✓	✓	✓		
XBee DigiMesh 2.4	2.4 GHz	Through-Hole	<u>DigiMesh</u>		✓		✓	✓
XBee Wi-Fi	2.4 GHz	TH/SMT	802.11 b/g/n	✓				
XBee-PRO 900HP	900 MHz	Through-Hole	Proprietary	✓	✓	✓	✓	✓
XBee 868LP	868 MHz	Surface Mount	Proprietary	✓	✓	✓	✓	
XBee Cellular	Verizon 4G LTE Cat 1	Through Hole	Proprietary	✓	✓	✓	✓	✓
Coming Soon! XBee Cellular LTE-M	Verizon, AT&T, Bands 13/4	Through Hole	Proprietary	✓	✓	✓	✓	✓
XBee Cellular NB-IoT	NB-IoT, Bands 20/8	Through Hole	Proprietary	✓	✓	✓	✓	✓
Digi XBee Cellular 3G	HSPA/GSM, Quad-Band	Through Hole	Proprietary	✓	✓	✓	✓	✓

Πίνακας 4-2 Οικογένεια των συσκευών XBee® της Digi International

Τα XBee, υποστηρίζουν δίκτυα επικοινωνιών σημείο προς σημείο και σημείο προς πολλά σημεία, με το πρωτόκολλο ZigBee και με ταχύτητα 250kpbs.

Τα περισσότερα XBees στην αγορά λειτουργούν στα 2.4GHz και βγαίνουν με πέντε ειδών κεραίες:

- Whip - Wire Antenna
- u.FL. Antenna
- Chip Antenna
- PRSMA Antenna
- Trace Antenna



Σχήμα 4-11 Τύποι κεραίων Xbee.

Έχουν κυκλοφορήσει δύο σειρές XBee:

- XBee - Series 1
- XBee - Series 2, 2.5, ZB.

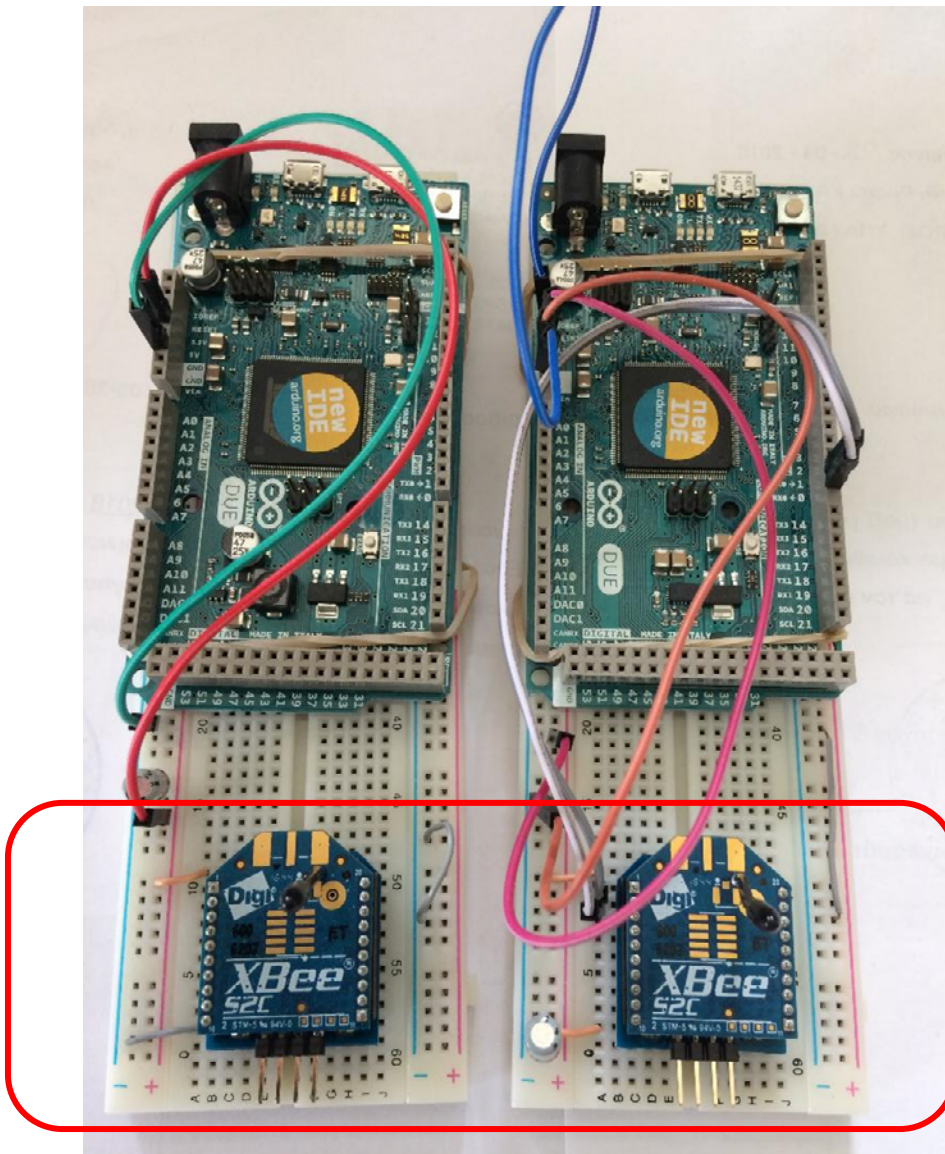
Η σειρά Series1 ονομάζεται και XBee 802.15.4, επειδή υποστηρίζει το πρωτόκολλο 802.15.4. Τα XBee αυτής της σειράς Δεν χρειάζονται ρυθμίσεις αλλά, αν ρυθμιστούν, αποδίδουν καλύτερα. Δεν είναι συμβατά με αυτά της σειράς 2.

Τα XBee της σειράς Series2, χρειάζονται ρυθμίσεις πριν τη χρήση τους. Λειτουργούν σε δυο modes:

- Transparent mode
- API commands mode

Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις XBee Series2. Καθένα από αυτά διαφέρει στα χαρακτηριστικά του με τα υπόλοιπα αναλόγως του firmware που περιέχει, ως προς την ισχύ εκπομπής, την εμβέλεια κ.α.

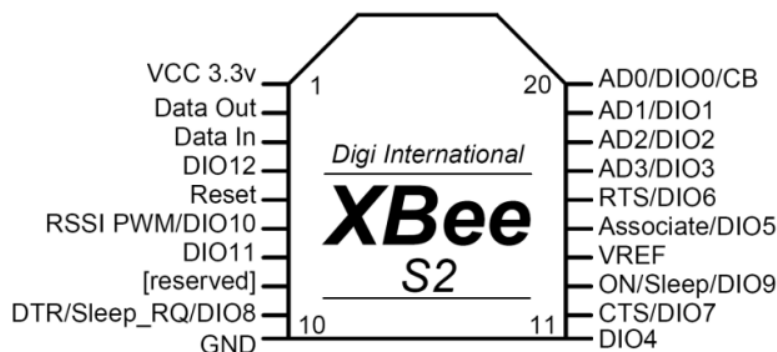
Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν 2 τεμάχια της έκδοσης XBee S2C.



Σχήμα 4-12 XbeeS2C.

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Τα XBee τροφοδοτούνται με 3.3V. Η ισχύς εξόδου κυμαίνεται από 0dBm έως 8dBm, αναλόγως της έκδοσης. Παρακάτω φαίνονται οι ονομασίες των ακροδεκτών καθώς και η περιγραφή αυτών.



Σχήμα 4-13 XBee Series2 (S2)

Pin #	Name	Direction	Default State	Description
1	VCC	-	-	Power supply
2	DOUT	Output	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	Input	UART Data In
4	DIO12	Both	Disabled	Digital I/O 12
5	RESET	Both	Open-Collector with pull-up	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	RSSI PWM / DIO10	Both	Output	RX Signal Strength Indicator / Digital IO
7	DIO11	Both	Input	Digital I/O 11
8	[reserved]	-	Disabled	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ / DIO8	Both	Input	Pin Sleep Control Line or Digital IO 8
10	GND	-	-	Ground
11	DIO4	Both	Disabled	Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Both	Output	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7. CTS, if enabled, is an output.
13	ON / SLEEP	Output	Output	Module Status Indicator or Digital I/O 9
14	VREF	Input	-	Not used for EM250. Used for programmable secondary processor. For compatibility with other XBEE modules, we recommend connecting this pin voltage reference if Analog sampling is desired. Otherwise, connect to GND.
15	Associate / DIO5	Both	Output	Associated Indicator, Digital I/O 5
16	RTS / DIO6	Both	Input	Request-to-Send Flow Control, Digital I/O 6. RTS, if enabled, is an input.
17	AD3 / DIO3	Both	Disabled	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Both	Disabled	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Both	Disabled	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0 / Commissioning Button	Both	Disabled	Analog Input 0, Digital IO 0, or Commissioning Button

Πίνακας 4-3 Χαρακτηριστικά ακροδεκτών XBee

	XBee 802.15.4	XBee ZB S2	XBee ZB S2C
Indoor/Urban range	up to 100 ft. (30m)	up to 133 ft. (40m)	up to 200 ft (60 m)
Outdoor RF line-of-sight range	up to 300 ft. (100m)	up to 400 ft. (120m)	up to 4000 ft (1200m)
Transmit Power Output	1 mW (0dbm)	2 mW (+3dbm)	6.3mW (+8dBm) Boost mode 3.1mW (+5dBm) Normal mode
RF Data Rate	250 Kbps	250 Kbps	250 Kbps
Receiver Sensitivity	-92dBm (1% PER)	-98dBm (1% PER)	-102dBm (1% PER) Boost mode -100dBm (1% PER) Normal Mode
Supply Voltage	2.8 - 3.4 V	2.8 - 3.6 V	2.1 - 3.6V
Transmit Current (typical)	45 mA (@ 3.3 V)	40 mA (@ 3.3 V)	45 mA (+8dBm) Boost Mode 33 mA (+5dBm) Normal Mode
Idle/Receive Current (typical)	50 mA (@ 3.3 V)	40 mA (@ 3.3 V)	31 mA (+8dBm) Boost Mode 28 mA (+5dBm) Normal Mode
Power-down Current	10 uA	1 uA	<1uA
Frequency	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz

Πίνακας 4-4 Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευών XBee

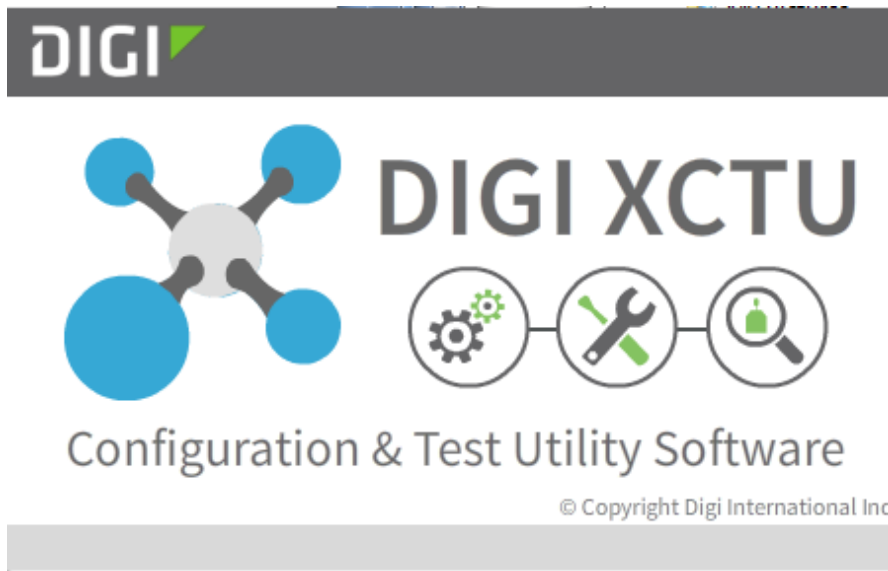
Καταστάσεις λειτουργίας συσκευής XBee ZigBee

Η συσκευή XBee ZigBee (Series2), βρίσκεται σε κατάσταση **Receive Mode**, εφόσον δεν στέλνει data. Μετάγει στις άλλες καταστάσεις λειτουργίας εφόσον υπάρχουν οι ακόλουθες συνθήκες:

- **Transmit Mode:** εφόσον τα σειριακά δεδομένα που βρίσκονται στον Serial Receive Buffer είναι έτοιμα προς αποστολή.
- **Sleep Mode:** εφόσον είναι End Device και δε βρίσκεται σε κάποια άλλη κατάσταση.
- **Command Mode:** είναι συνεχώς διαθέσιμη εκτός από την περίπτωση που χρησιμοποιείται η θύρα SPI.

4.1.6 Λογισμικό XCTU

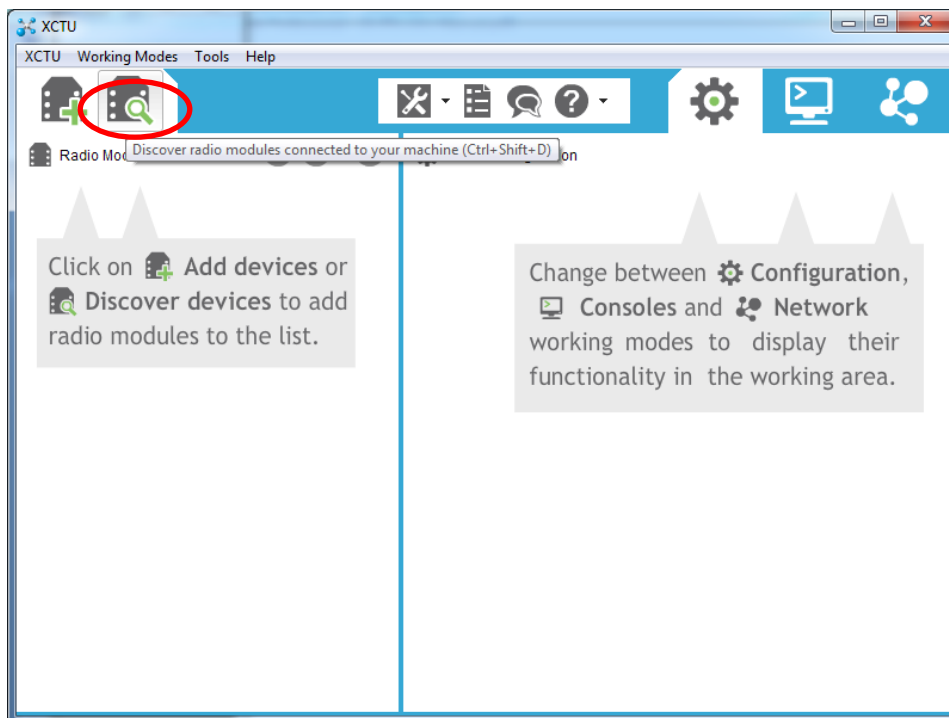
Το XCTU, είναι εφαρμογή της Digi, με σκοπό τη ρύθμιση των συσκευών XBee[27].



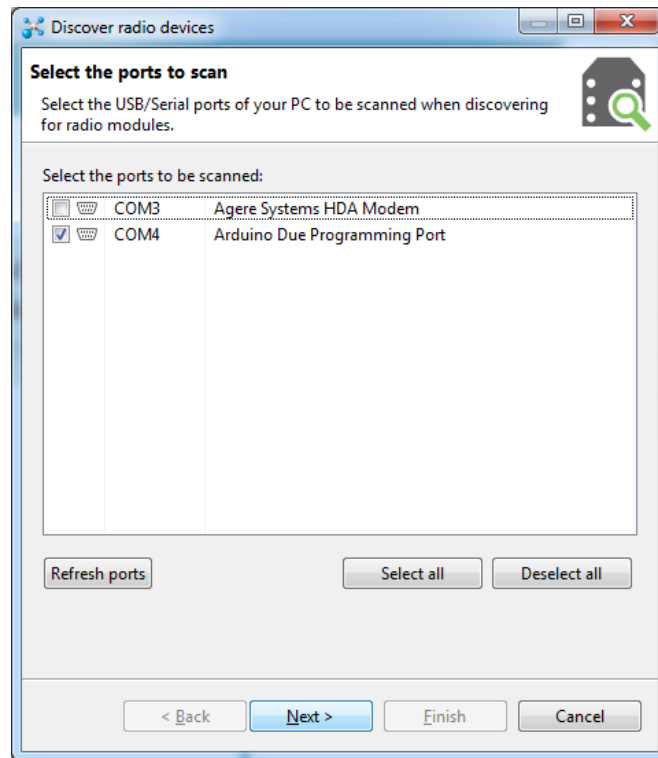
Σχήμα 4-14 Λογισμικό XCTU.

Από αυτή μπορούμε να ρυθμίσουμε όλες τις παραμέτρους ώστε να δημιουργήσουμε ένα mesh δίκτυο, να το ελέγξουμε αν λειτουργεί καθώς και να μετρήσουμε χαρακτηριστικά του δικτύου αυτού.

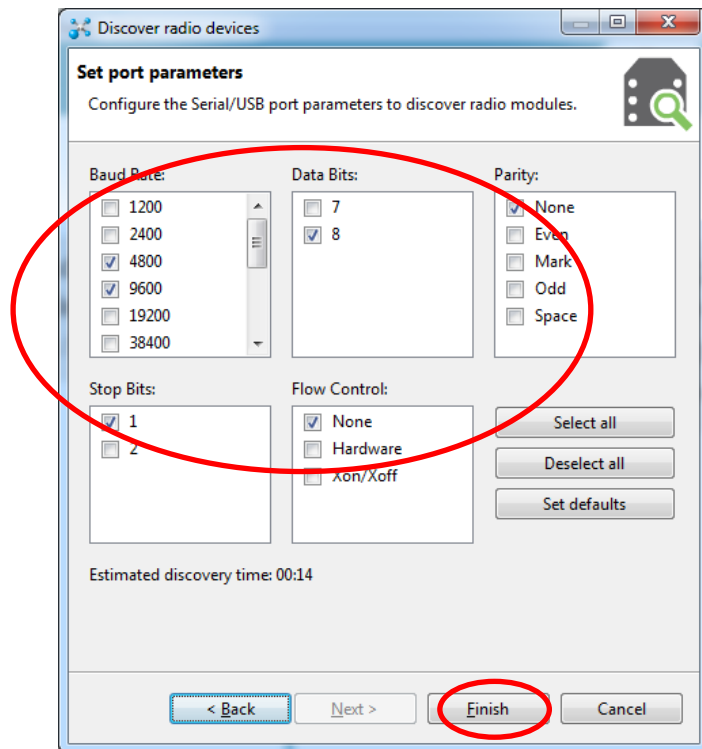
Σύνδεση – παραμετροποίηση συσκευών στο XCTU



Από το εικονίδιο Discover Devices, επιλέγω τη θύρα σειριακής επικοινωνίας "COM" του Η/Υ μου, όπου έχω συνδέσει το Arduino due.

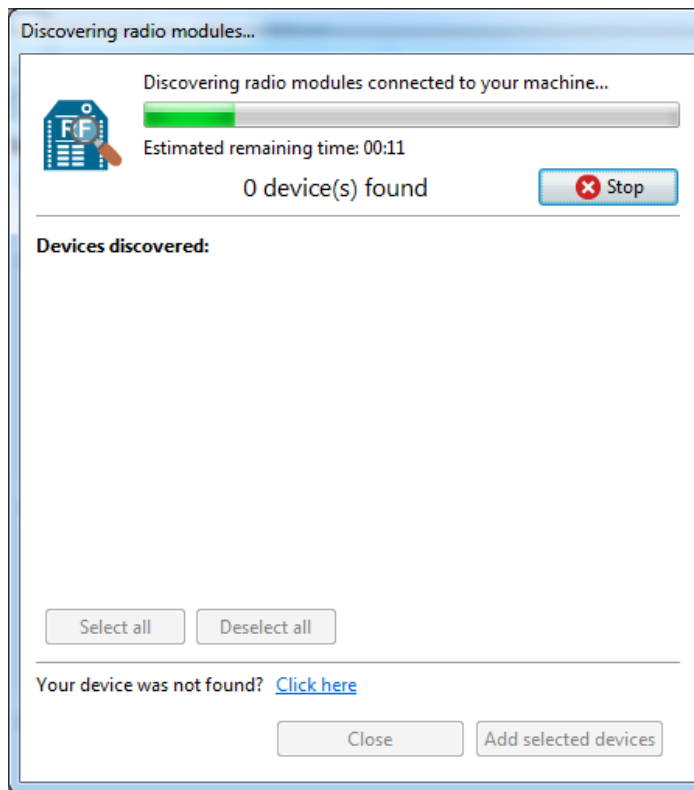


Στη συνέχεια επιλέγω τις παραμέτρους του Serial/USB port, όπως φαίνονται παρακάτω

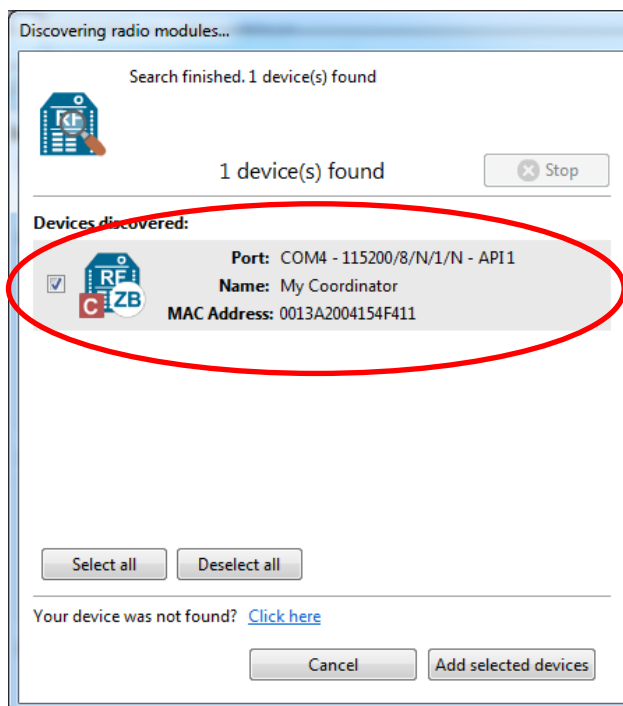


και τέλος επιλέγω “Finish”.

Το λογισμικό ξεκινά να ψάχνει,

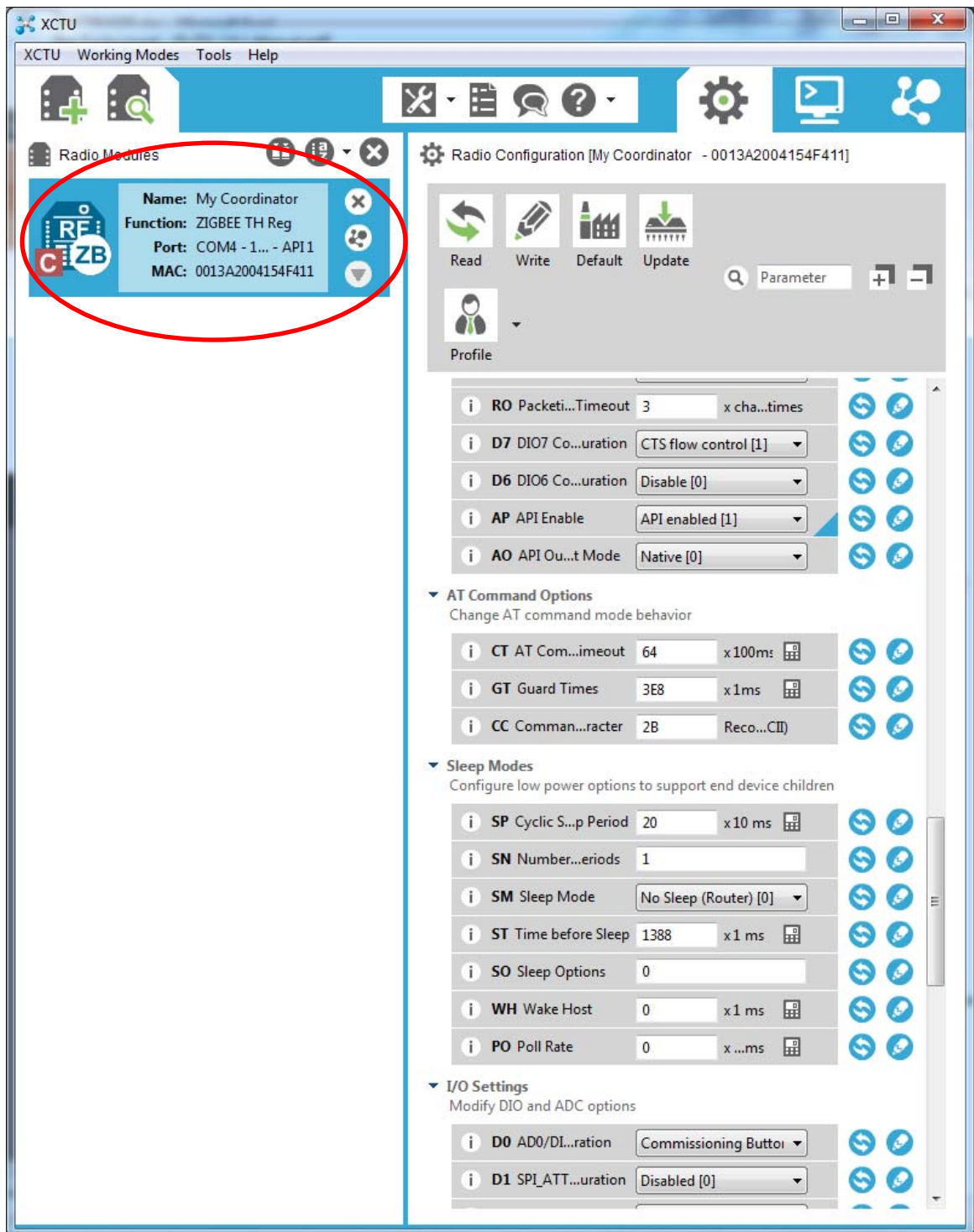


και τελικά βρίσκει,



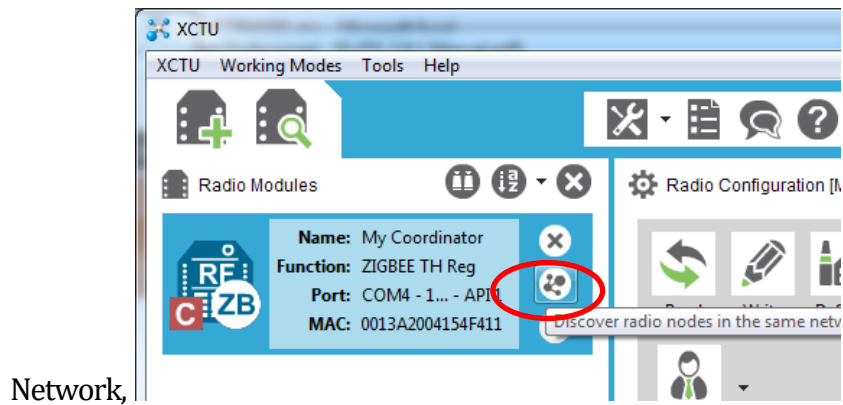
τη συνδεδεμένη συσκευή.

Με “Add Selected devices”, συνδέομαι και μπορώ να ρυθμίσω την συσκευή μου.

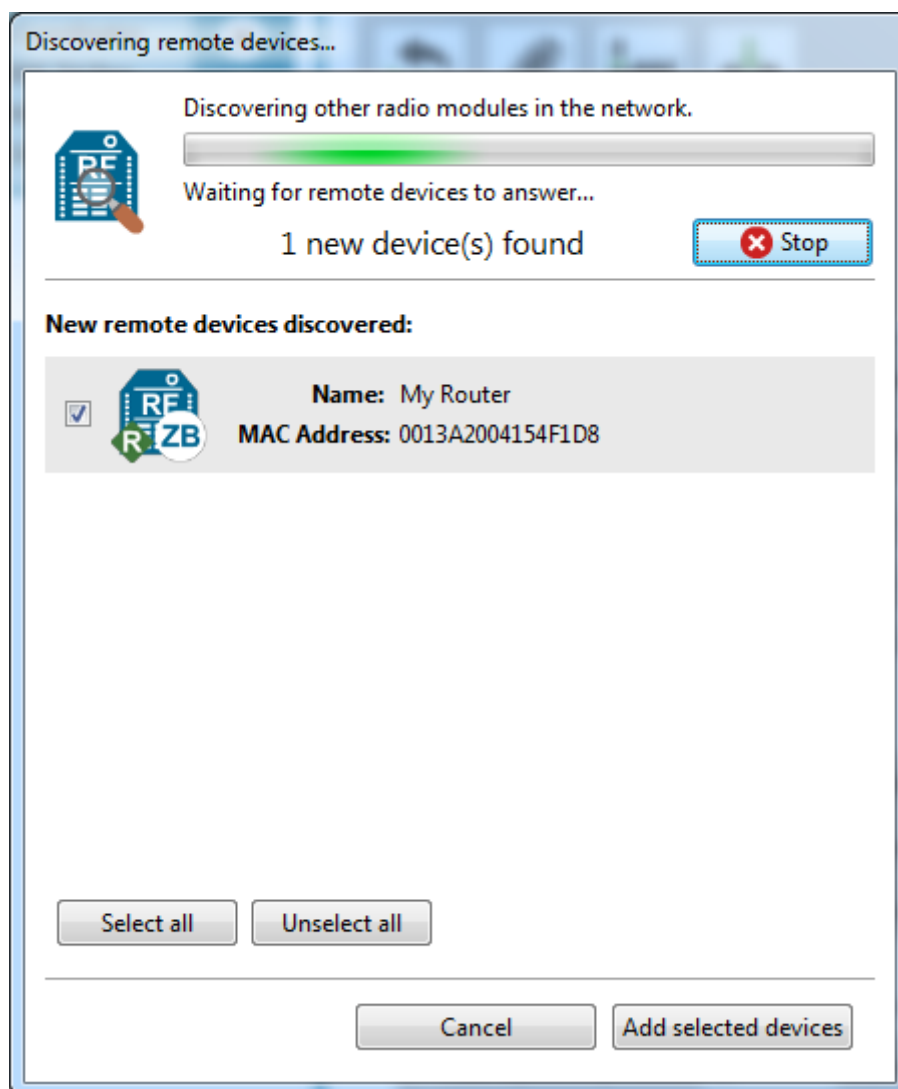


Επιλέγοντας από αριστερά τη συσκευή, δεξιά μπορώ να της ορίσω όσες παραμέτρους χρειάζομαι, κάνοντάς την Coordinator, Router ή EndPoint, PAN ID, κανάλι επικοινωνίας, Baud Rate, ορισμό των εισόδων – εξόδων της, sampling rate των εισόδων της, Cyclic Sleep Period κλπ.

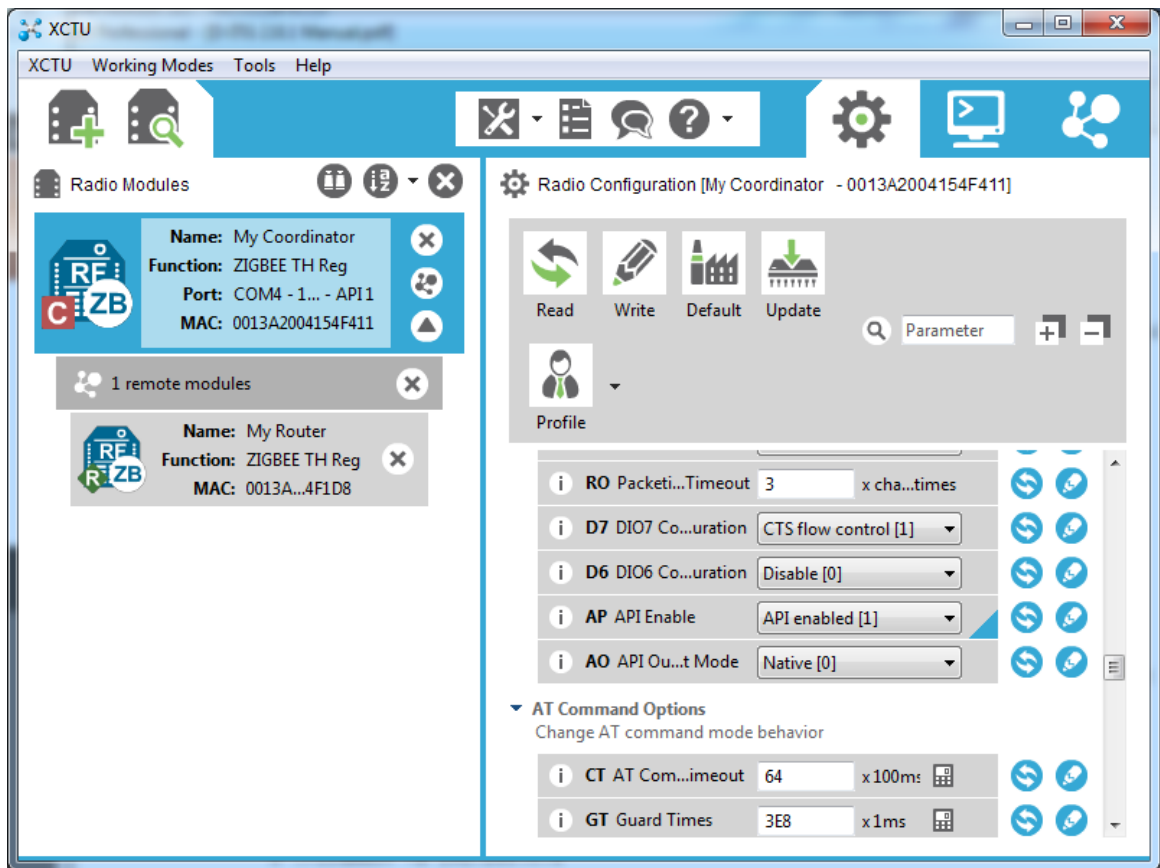
Επιλέγοντας αριστερά, από τη συσκευή το εικονίδιο Discover Radio Modules in the same



έχω παράθυρο να ψάχνει και βρίσκει συνδεδεμένες ασύρματα συσκευές στο δίκτυο που συμμετέχει η συσκευή στην οποία έχω συνδεθεί σειριακά.



Με Add selected Devices, την προσθέτω αριστερά στο βασικό menu.



Επιλέγοντάς την, βλέπω δεξιά παραμέτρους της που μπορώ να αλλάξω. Υπάρχουν και σε αυτή PAN ID, επιλογή καναλιού συχνότητας, Baud Rate, Cyclic Sleep Period κλπ.

Εννοείται ότι αυτά τα στοιχεία πρέπει να τα έχω ορίσει προηγουμένα, αφού συνδεθώ σε αυτή σειριακά. Διαφορετικά, δεν αποτελεί δίκτυο με την πρώτη μου συσκευή και δεν μπορώ να τη δω!

Περιγραφή εργαλείων XCTU, μέτρησης παραμέτρων επικοινωνίας.

Από τη στιγμή που έχω μια συσκευή συνδεδεμένη στο XCTU, μπορώ να κάνω μια σειρά από μετρήσεις. Παρακάτω περιγράφονται ορισμένα από τα “εργαλεία” του λογισμικού XCTU καθώς και ο τρόπος χρήσης τους για την παρούσα εργασία.

➤ **Radio Range Test Tool (Alt+Shift+R)**

Με το εργαλείο αυτό ελέγγω το ραδιοφάσμα και την ποιότητα της σύνδεσης μεταξύ δυο ασύρματων συσκευών που λειτουργούν στο ίδιο δίκτυο.

Σε αυτό το εργαλείο ορίζω:

- Την συσκευή XBee η οποία είναι συνδεδεμένη σειριακά στον Η/Υ (Local Radio Device)
- Την συσκευή XBee η οποία είναι συνδεδεμένη ασύρματα με την local radio device (Remote Radio Device)
- Το φορτίο του πακέτου (Packet payload)
- Το πλήθος των πακέτων που θα αποσταλούν κατά τη χρήση του εργαλείου (Number of Packets)



Σχήμα 4-15 Radio Range Test Tool.

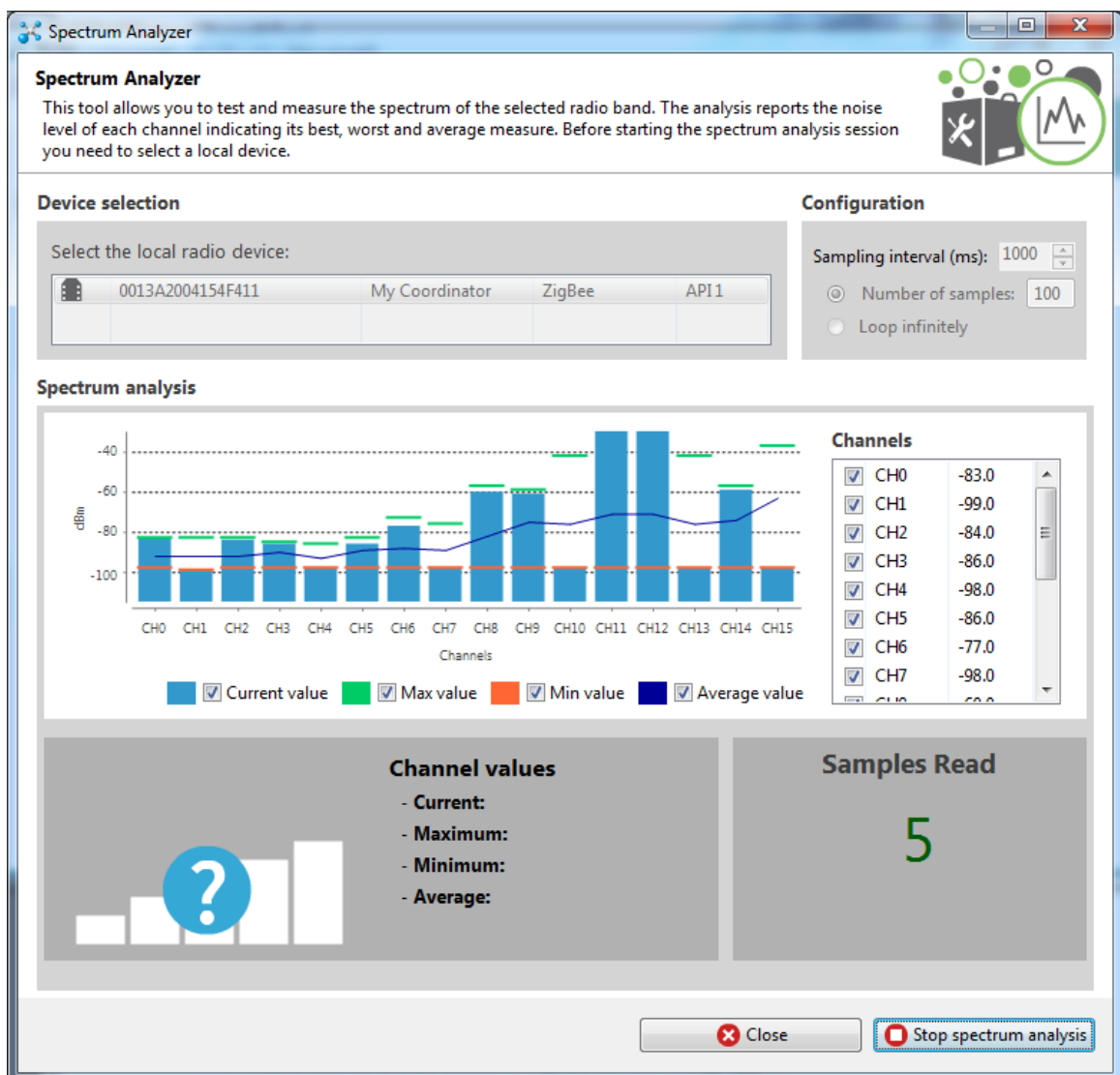
Στην παρούσα εργασία, από το συγκεκριμένο εργαλείο θα μετρήσω και θα υπολογίσω **Local + Remote RSSI** και **PER**.

➤ Spectrum Analyzer Tool (Alt+Shift+A)

Με αυτό το εργαλείο ελέγχω και μετρώ το ραδιοφάσμα για συγκεκριμένα κανάλια ζώνης συχνοτήτων. Παίρνω στοιχεία σχετικά με το επίπεδο θορύβου σε κάθε κανάλι για την καλύτερη, τη χειρότερη, τη στιγμιαία και τη μέση μετρηθείσα τιμή αυτού.

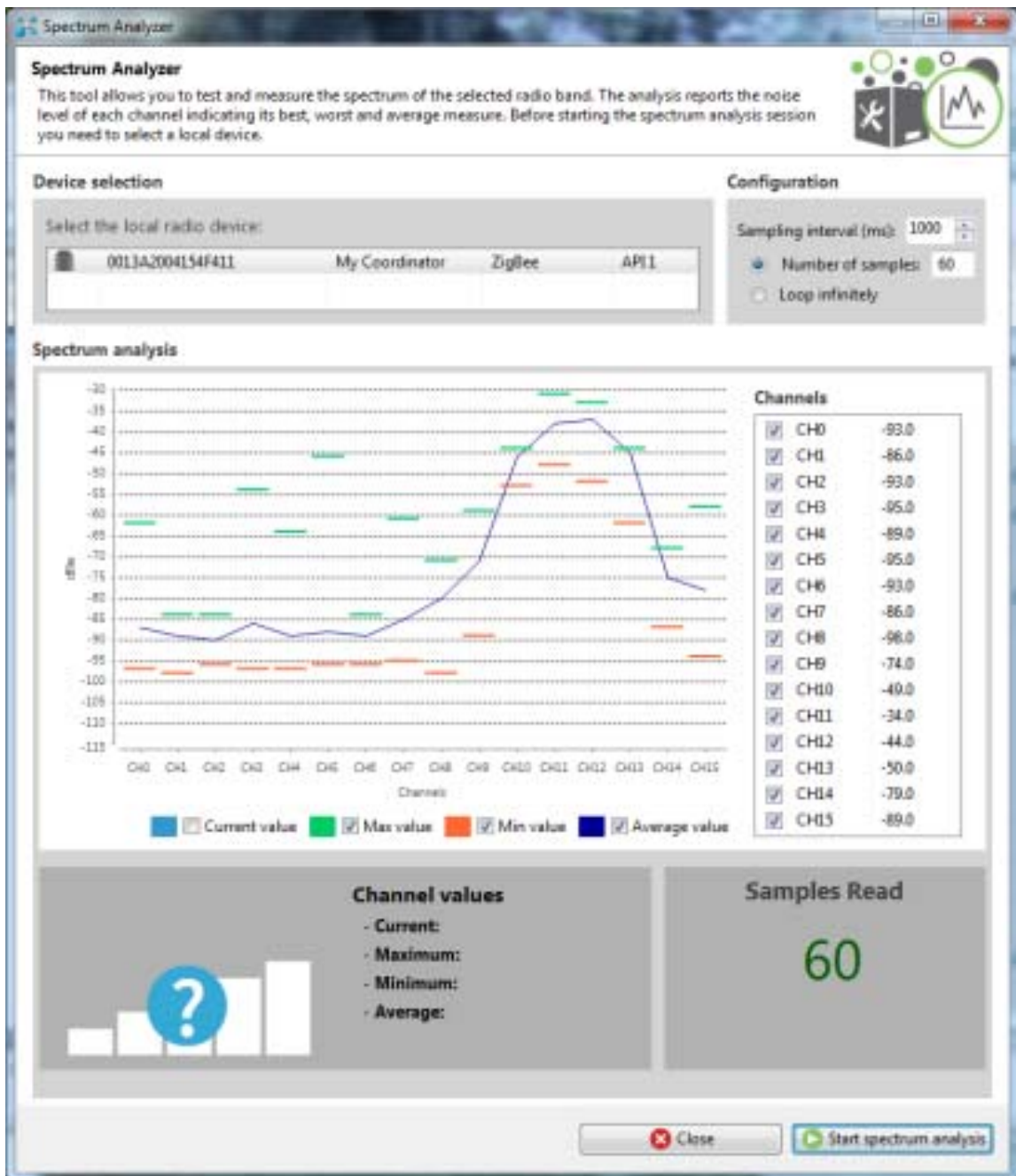
Σε αυτό το εργαλείο ορίζω:

- Την συσκευή XBee η οποία είναι συνδεδεμένη σειριακά στον Η/Υ (Local Radio Device). Απαιτείται μόνο μια συσκευή για την ανάλυση αυτή.
- Πλήθος δειγμάτων (Number of samples)
- Το Ρυθμό δειγματοληψίας (Sampling interval - min 1000ms)



Σχήμα 4-16 Spectrum Analyzer Tool.

Στην παρούσα εργασία, το συγκεκριμένο εργαλείο χρησιμοποιήθηκε κατά το στάδιο της αρχικοποίησης. Σε αυτό μετρήθηκαν οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές θορύβου για κάθε κανάλι ZigBee της μπάντας συχνοτήτων 2.4GHz. Στο τέλος, βάζοντας τον κέρσορα επάνω σε κάθε μπάρα του διαγράμματος, καταγράφω ελάχιστη, μέγιστη, τελευταία και μέση τιμή ισχύος θορύβου που υπάρχει στο περιβάλλον όπου βρίσκεται η συσκευή μου. Με αυτό τον τρόπο έγινε η **αρχικοποίηση** για το πείραμά μου.



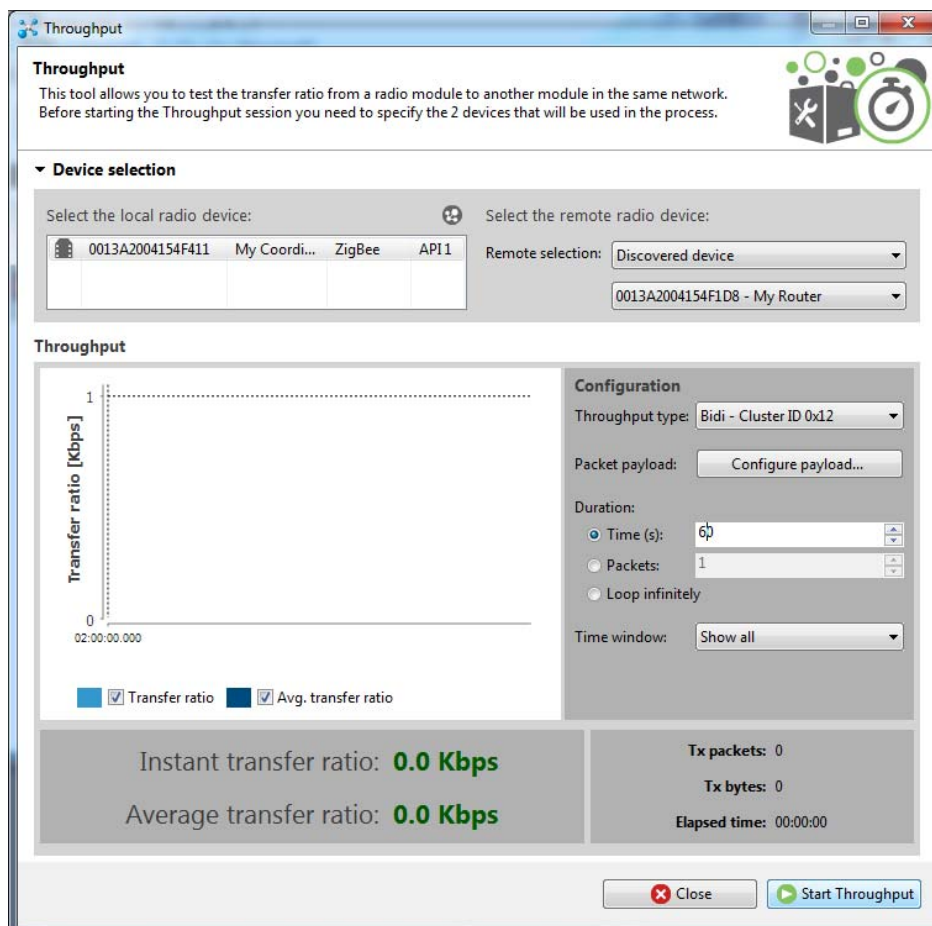
Σχήμα 4-17 Μέτρηση από την περίπτωση 802.11g, Bit rate 5.5Mbps, με τον αισθητήρα μακριά από κοντά στο AP, της παρούσας εργασίας.

➤ Throughput Tool (Alt+Shift+T)

Αυτό το εργαλείο μας επιτρέπει να μετράμε τη ρυθμαπόδοση (Throughput) δυο συνδεδεμένων μεταξύ τους ασύρματα συσκευών.

Σε αυτό το εργαλείο ορίζω:

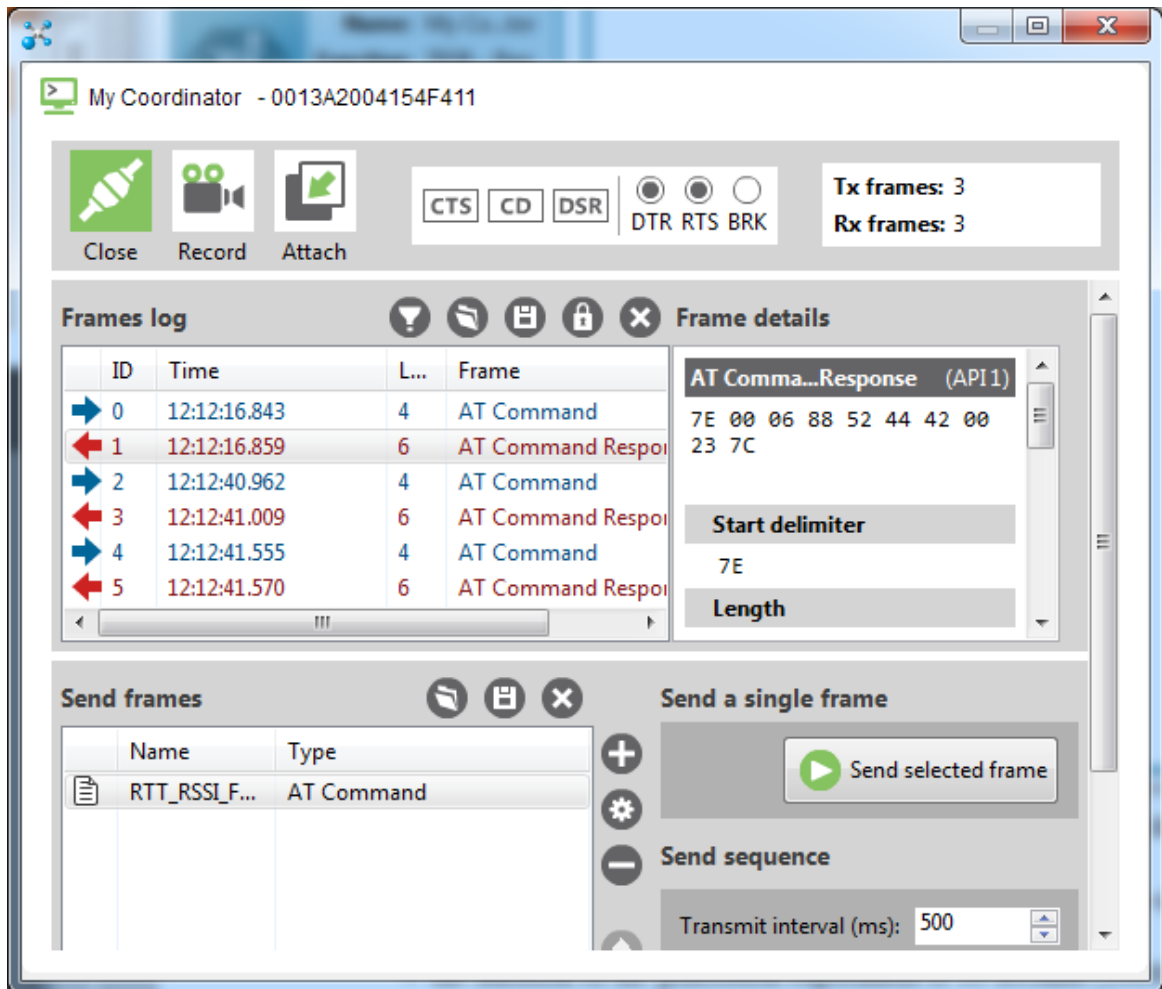
- Την συσκευή XBee η οποία είναι συνδεδεμένη σειριακά στον Η/Υ (Local Radio Device)
- Την συσκευή XBee η οποία είναι συνδεδεμένη ασύρματα με την local radio device (Remote Radio Device)
- Το είδος ελέγχου της ρυθμαπόδοσης που επιθυμώ (Throughput type - στο πείραμα ορίστηκε Bidi - Cluster ID 0x12)
- Διάρκεια μέτρησης (Duration time - στο πείραμα ορίστηκε 60 s)



Σχήμα 4-18 Throughput Tool.

➤ Console Mode (Alt+C)

Από αυτή τη μάσκα μπορώ να χειριστώ συνδεδεμένη ενσύρματα συσκευή.



Σχήμα 4-19 Console Mode.

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε για να μετρηθεί το **RTT (Round Trip Time)**.

- Ορίστηκε συγκεκριμένο frame προς αποστολή
- Έγινε σύνδεση των συσκευών
- Επιλέχθηκε το πλήθος επαναλήψεων
- Υπολογίστηκε ο χρόνος RTT

4.2 Προετοιμασία πειράματος – Αρχικοποιήσεις

4.2.1 Στάδια που ακολουθήθηκαν

Αρχικά πραγματοποιήθηκε θεωρητική μελέτη του πρωτοκόλλου ZigBee. Εντοπίστηκαν χαρακτηριστικά στοιχεία αυτού όπως η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας και το πλήθος των καναλιών και το εύρος καθενός από αυτά. Διαπιστώθηκε η ταυτόχρονη χρήση της 2.4 GHz ISM ζώνης από το ZigBee και το Wi-Fi.

Πραγματοποιήθηκε προμήθεια του παρακάτω εξοπλισμού:

- XBee S2C, δύο τεμάχια
- Λογισμικό XCTU
- Arduino Due, δύο τεμάχια
- Λογισμικό Arduino
- Breadboard, δύο τεμάχια
- Τρία τροφοδοτικά 12v, 1.5A
- Access Point D-Link GO-RT-N150, ένα τεμάχιο
- Η/Υ, δύο τεμάχια

Μελετήθηκε ο τρόπος λειτουργίας του Arduino, έγιναν δοκιμές προγραμματισμού και τρόποι σύνδεσης με το XBee.

Μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του XBeeS2C, όπως τάση λειτουργίας, τρόπος σύνδεσης με το Arduino και προγραμματισμός του XBee από ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε να επικοινωνεί με το έτερο XBee.

Ρυθμίστηκαν τα δυο XBees το ένα ως Coordinator και το άλλο ως Router, ώστε να επικοινωνούν μεταξύ τους δημιουργώντας ένα ad hoc δίκτυο (δίκτυο χωρίς υποδομή). Το Baud Rate της επικοινωνίας των XBees μεταξύ τους, πήρε τις εξής τιμές:

- 4800
- 9600
- 115200

Το κανάλι ZigBee, στο οποίο επικοινωνούσαν τα XBees ήταν σε σειρά καθένα από τα εξής:

- 22 - 2.460GHz
- 11 - 2.405GHz
- 15 - 2.425GHz
- 26 - 2.480GHz

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η τοπολογία αρχικοποίησης και μετρήθηκε ο θόρυβος του περιβάλλοντος, έχοντας το AP να λειτουργεί:

A) στο Wi-Fi κανάλι 11 - 2.462GHz, για 802.11g στα εξής bit rates:

- 5.5Mbps
- 11Mbps
- 17Mbps

B) στο Wi-Fi κανάλι 11 - 2.462GHz, για 802.11n στα εξής bit rates:

- 5.5Mbps
- 11Mbps
- 24Mbps

Η μέτρηση θορύβου έγινε σε όλα τα κανάλια ZigBee.

Η θέση του αισθητήρα XBee άλλαξε θέση με απόσταση 0.2 και 2m από το Access Point.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η τοπολογία μετρήσεων όπου πήρα τιμές για τις παραμέτρους

- PER - Packet Error Rate
- RSSI - Received Signal Strength Indicator
- Throughput
- RTT - Round-Trip Time

για κάθε πρωτόκολλο χωριστά, για τα διαφορετικά bitrates και για διαφορετικά baud rates στην επικοινωνία των XBees.

Ομοίως, όπως και στην περίπτωση της αρχικοποίησης, η θέση του ζεύγους αισθητήρων XBee άλλαξε θέση με απόσταση 0.2 και 2m από το Access Point.

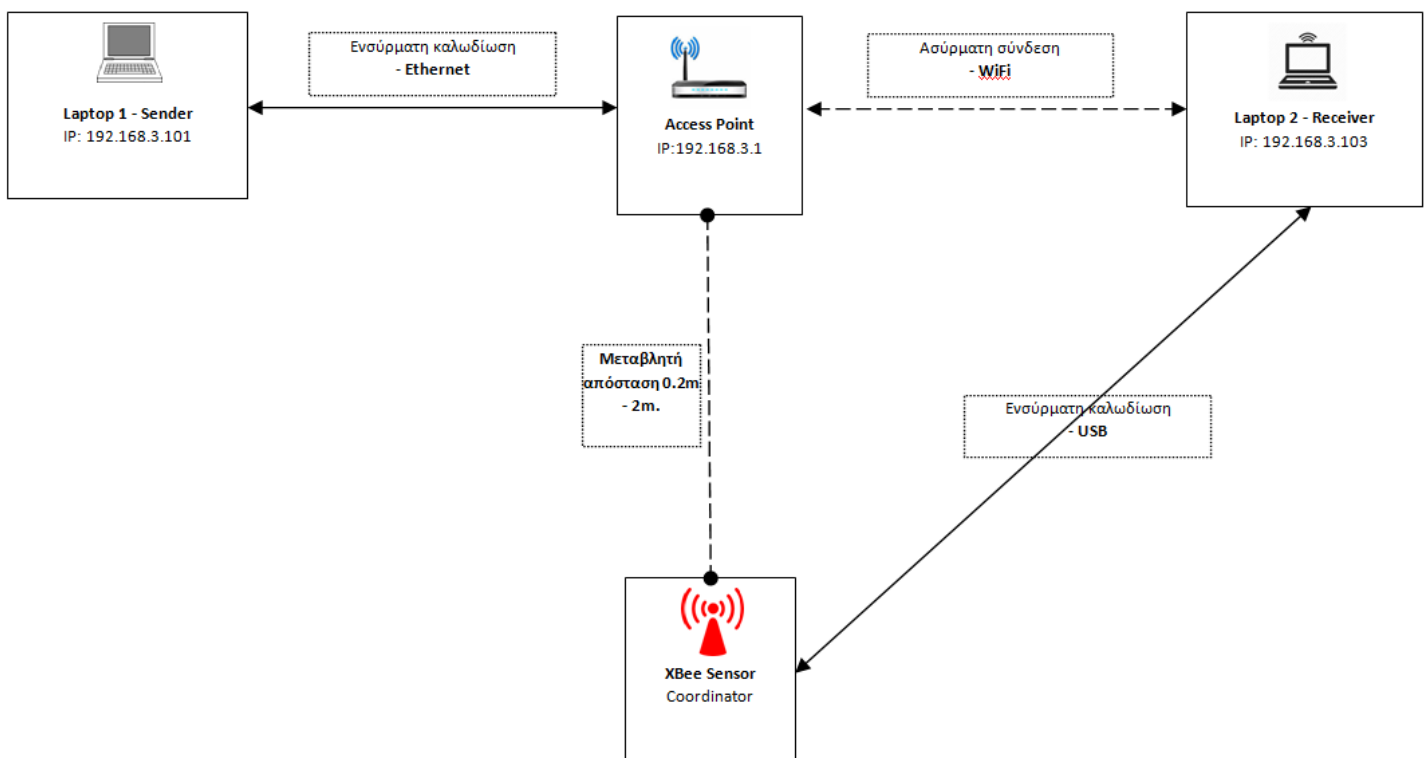
Για τη μέτρηση, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό υποστήριξης των XBees, το XCTU. Η διάρκεια κάθε μέτρησης ήταν 60sec και οι μετρηθήσες τιμές αποτελούν τον μέσο όρο των τιμών της συγκεκριμένης παραμέτρου για την παραπάνω χρονική διάρκεια. Το λογισμικό XCTU λαμβάνει δείγματα με ρυθμό 1sample/sec.

Τέλος ακολούθησε η αξιολόγηση των μετρήσεων.

4.2.2 Τοπολογία

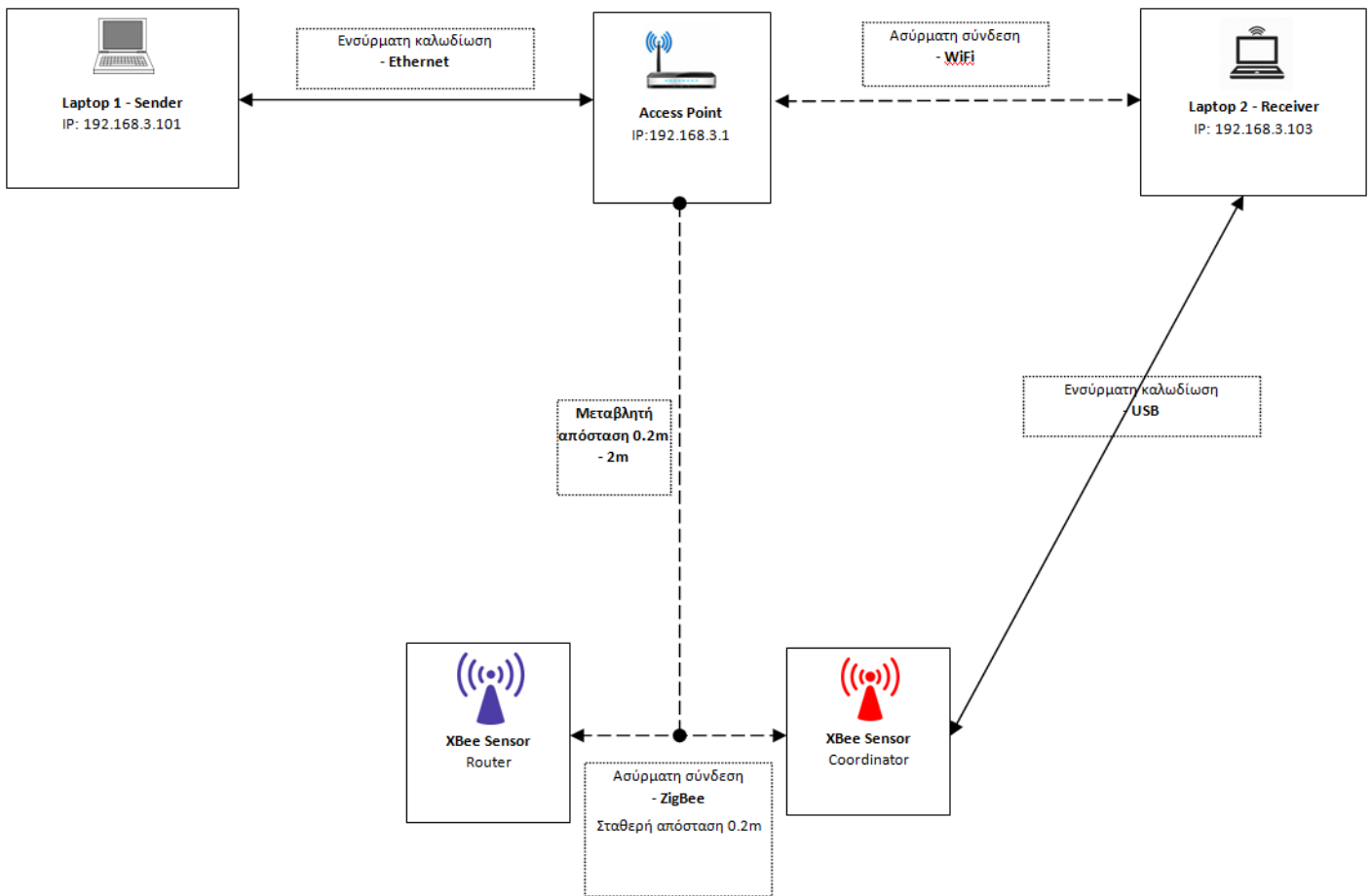
Παρακάτω φαίνονται οι δυο τοπολογίες για την πραγματοποίηση του πειραματικού μέρους της παρούσης εργασίας.

Τοπολογία αρχικοποίησης



Σχήμα 4-20 Τοπολογία αρχικοποίησης.

Τοπολογία μετρήσεων

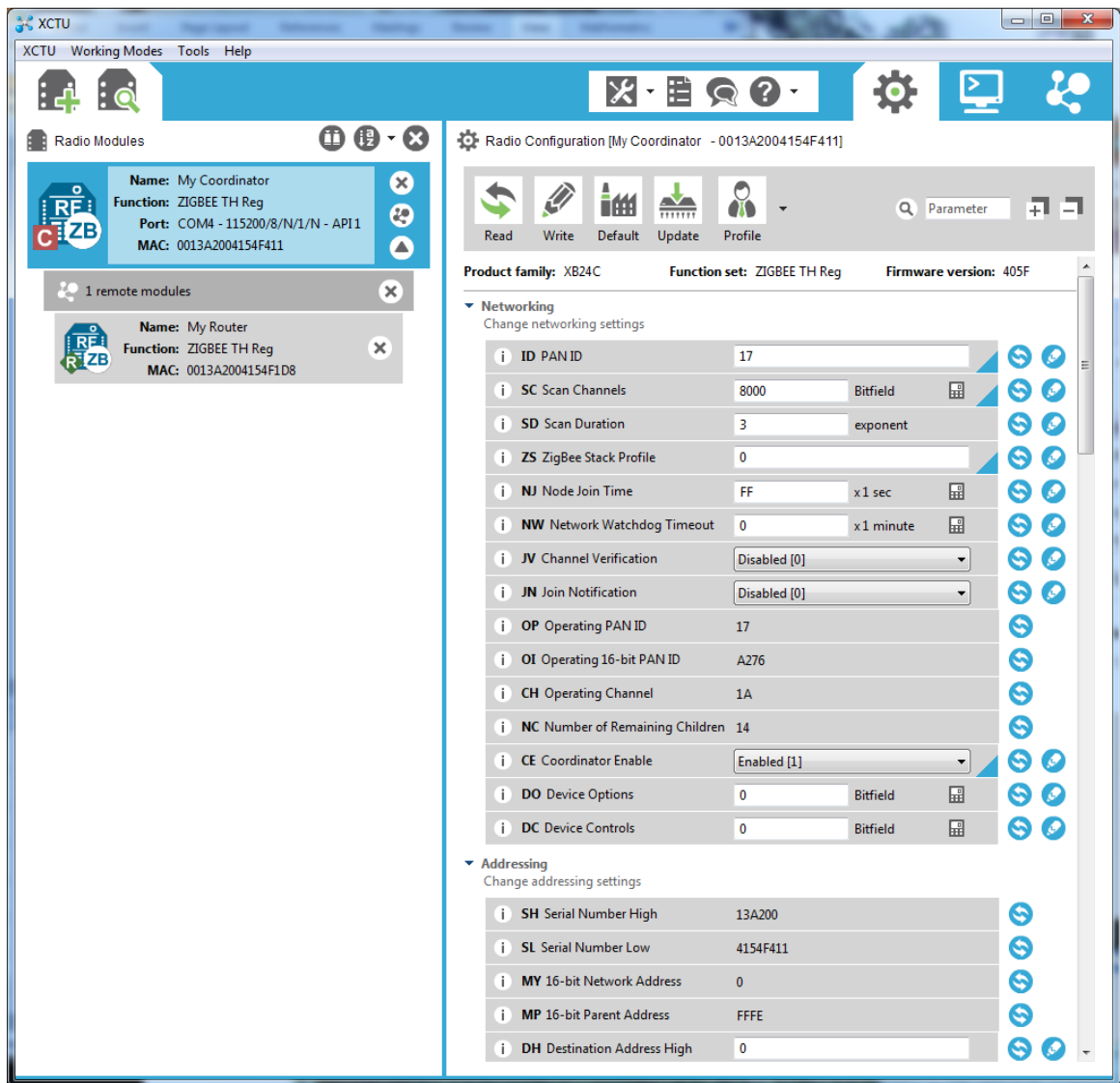


Σχήμα 4-21 Τοπολογία μετρήσεων.

4.2.3 Αρχικοποίηση του εξοπλισμού

Ρύθμιση, ενεργοποίηση και σύνδεση XBees.

Συνδέθηκε κάθε συσκευή XBeeS2C ξεχωριστά με τον Η/Υ, μέσω του Arduino due ενσύρματα, για να παραμετροποιηθεί μέσω του λογισμικού XCTU.



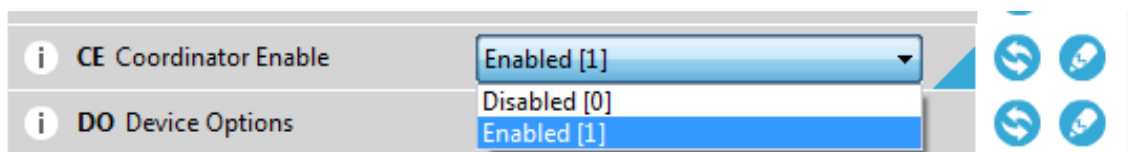
Σχήμα 4-22 Μάσκα XCTU για τη ρύθμιση των XBees.

Έτσι, ορίστηκαν οι παρακάτω παράμετροι:

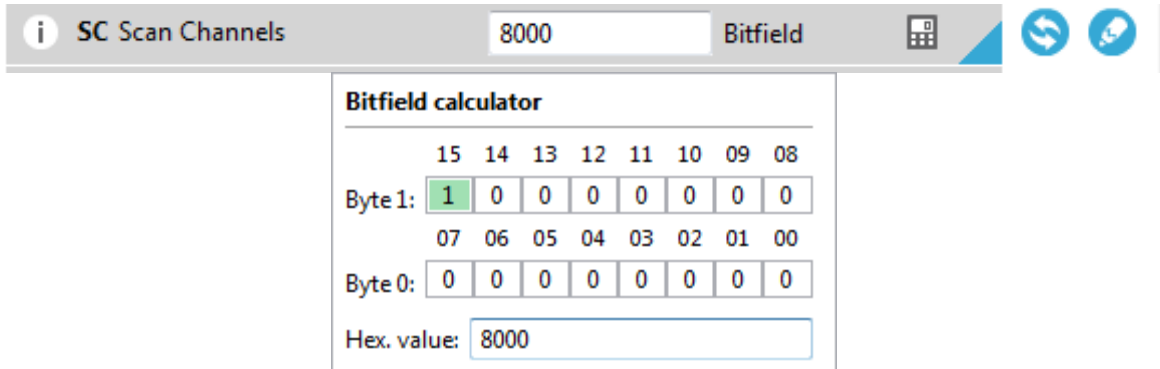
- Δόθηκε κοινό "PAN ID: 17" και στα δυο XBees, ώστε να συνδεθούν μεταξύ τους, δημιουργώντας δίκτυο.



- Ορίστηκε το ένα ως Coordinator και το άλλο ως Router.

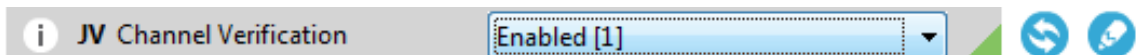


- Ορίστηκε το κανάλι επικοινωνίας ZigBee, στο οποίο θα επικοινωνούν οι συσκευές μεταξύ τους. Τα κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα : 22 - 2.460GHz, 11 - 2.405GHz, 15 - 2.425GHz και 26 - 2.480GHz.



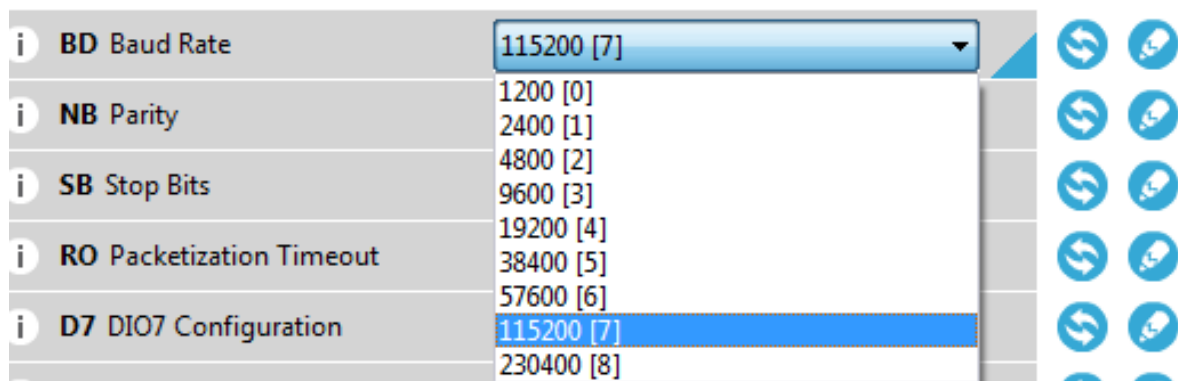
Επιλέγοντας στον διαχειριστή του δικτύου (Coordinator), από αυτό το σημείο στα κανάλια προς σάρωση για την εύρεση κατάλληλου καναλιού, μόνο ένα κανάλι, τον εξανάγκασα να λειτουργήσει μόνο σε αυτό.

Παραπάνω ορίζεται το κανάλι σε σειρά 15 (0x8000) που αντιστοιχεί στο 26 - 2.480GHz. Στον δρομολογητή (Router), επιλέγω στο πεδίο "JV=1", ώστε να παραμένει στο συγκεκριμένο κανάλι μόνο όσο σε αυτό ανιχνεύει τον coordinator.



Σε κάθε επανεκκίνηση του router, αυτός θα ξανά σαρώνει τη ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz για την εύρεση του coordinator με το ίδιο "PAN ID".

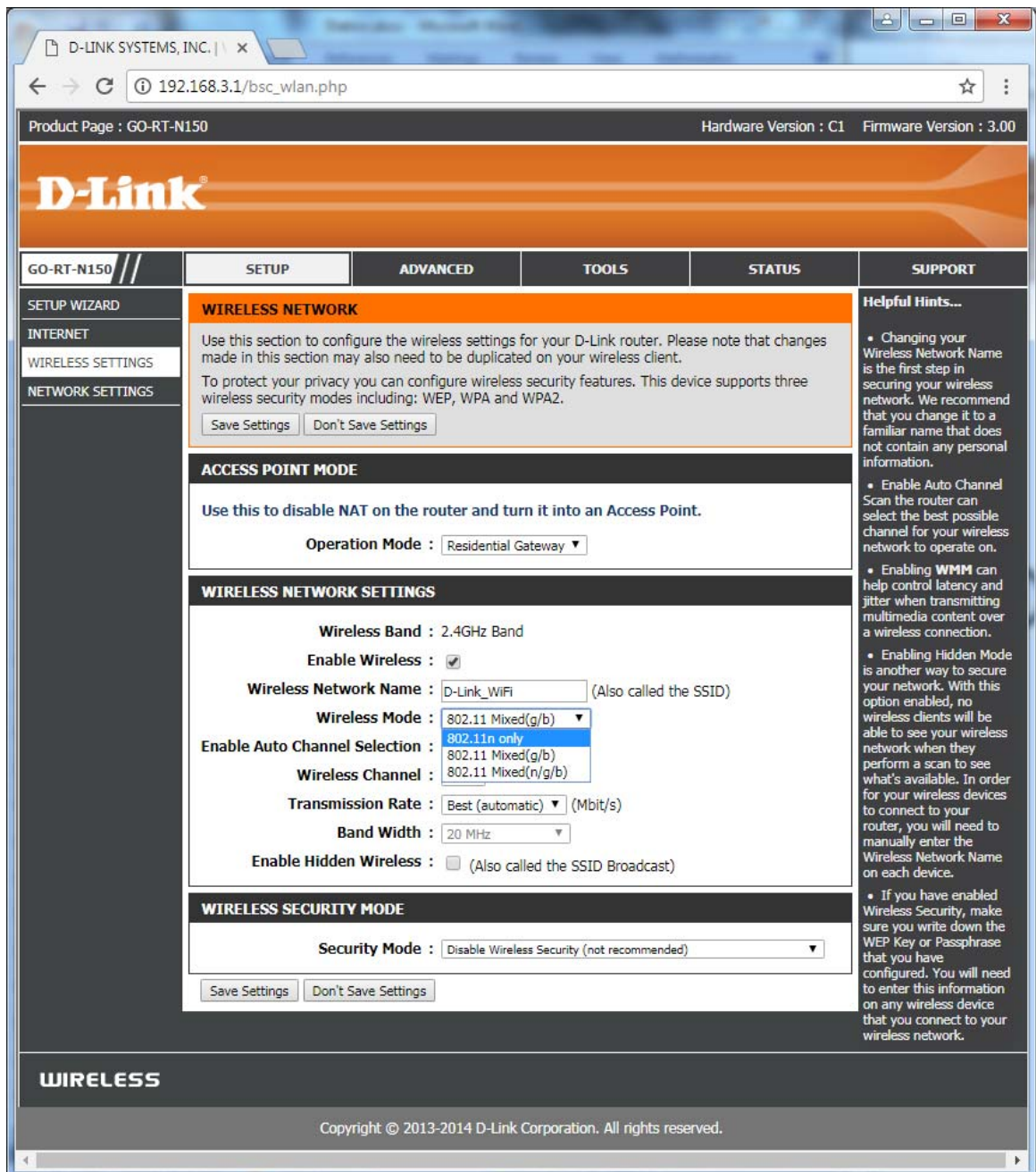
- Ορίστηκε το Baud Rate στο οποίο θα επικοινωνούν οι δυο ασύρματες συσκευές XBeeS2C μεταξύ τους.



Οι τιμές που πήρε διαδοχικά το Baud Rate ήταν: 4800, 9600 και 115200.

Σύνδεση, ρύθμιση και ενεργοποίηση Access Point.

Συνδέθηκε το Access Point D-Link GO-RT-N150.



Σχήμα 4-23 Μάσκα ρύθμισης Access Point μέσω browser.

- Το AP ορίστηκε ως Gateway με IP: 192.168.3.1.
- Κανάλι λειτουργίας ορίστηκε το 11 - 2.462GHz.
- Πρότυπο επικοινωνίας το 802.11n και το 802.11g.

Μπορώ να αλλάξω τα modes λειτουργίας σε 802.11n και 802.11b/g. Όσον αφορά το δεύτερο mode, επειδή από τη γεννήτρια θορύβου χρησιμοποιώ τα bit rates 5.5, 11 και 17, συνάγω ότι χρησιμοποιώ το πρωτόκολλο 802.11g.

Ρύθμιση και σύνδεση Η/Υ

- Ο Η/Υ “Laptop 1 - Sender”, συνδέθηκε ενσύρματα στο Access Point με IP: 192.168.3.101.
- Ο Η/Υ “Laptop 2 - Receiver”, συνδέθηκε ασύρματα στο Access Point με IP: 192.168.3.103.

Σύνδεση, ρύθμιση και ενεργοποίηση γεννήτριας κίνησης δικτύου.

Στον Η/Υ “Laptop 1 - Sender”, ενεργοποιήθηκε ο **Sender** της γεννήτριας κίνησης δικτύου με την εξής εντολή: **ITGSend -T TCP -a 192.168.3.102 -C 1420 -c 1500 -t 99000 -l send_file.log**.

- -T: ορίζει το είδος πρωτοκόλλου επικοινωνίας στο Transport Level. Εδώ ορίζω TCP
- -a: ορίζει τη διεύθυνση του Receiver (192.168.3.103)
- -C: ορίζει pkts/s (458, 916, 1420, 1992)

Οι τιμές αυτές δόθηκαν μετά από δοκιμές. Συγκεκριμένα μετρήθηκε ότι για -C:458pkts/s επιτυγχάνω bitrate 5.5Mbps, για -C:916pkts/s επιτυγχάνω bitrate 11Mbps, για -C:1420pkts/s επιτυγχάνω bitrate 17Mbps και για -C:1992pkts/s επιτυγχάνω bitrate 24Mbps.

- -c: ορίζει το μέγεθος των πακέτων (1500 bytes)
- -t: ορίζει διάρκεια εκπομπής (ms)
- -l: στον φάκελο του Sender θα δημιουργηθεί αρχείο με όνομα send_file.log

Στον Η/Υ “Laptop 2 - Receiver”, ενεργοποιήθηκε ο **Receiver** της γεννήτριας κίνησης δικτύου με την εξής εντολή: **ITGRecv -a 192.168.3.102 -l rec_file.log**.

- -a: ορίζει τη διεύθυνση του Receiver
- -l: ορίζει το όνομα του αρχείου που θα δημιουργηθεί στο φάκελο του Receiver και θα περιέχει όλα τα στοιχεία του Receiver.

Επίσης, στον Η/Υ “Laptop 2 - Receiver”, ενεργοποιήθηκε ο **Decoder** της γεννήτριας κίνησης δικτύου με την εξής εντολή: **ITGDec rec_file.log**.

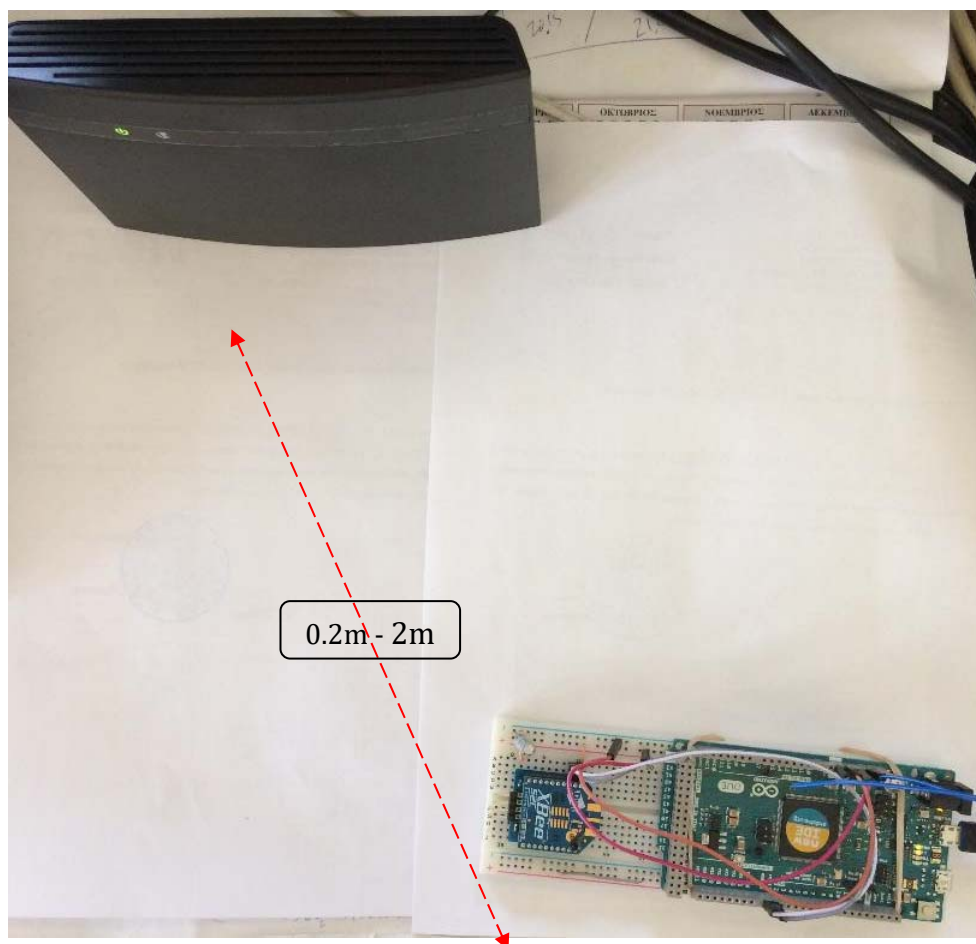
- Η παράμετρος `rec_file.log`, είναι το αρχείο που δημιουργήθηκε κατά τη λήψη και αφορά στοιχεία του Receiver.

4.2.4 Μετρηθήσες αρχικές τιμές θορύβου, χωρίς την παρουσία επικοινωνίας ZigBee

Σκοπός, να καταγράψω τις συνθήκες που διαμορφώνονται από την εκπομπή του AP, χωρίς την παρουσία επικοινωνίας ZigBee.

Συνδέθηκε ο εξοπλισμός σύμφωνα με την τοπολογία μετρήσεων αρχικοποίησης.

Χρησιμοποιήθηκε μόνο ο Coordinator ως αισθητήρας που, σε συνεργασία με το πρόγραμμα XCTU, μέτρησε τον υπάρχοντα θόρυβο.



Σχήμα 4-24 Κυρίως εξοπλισμός μέτρησης τιμών αρχικοποίησης θορύβου.

Τοποθετήθηκε ο Coordinator **κοντά** (0.2m) και **μακριά** (2m) από το AP, το οποίο εξέπεμπε σε **802.11g** στα προαναφερθέντα bit rates. Καταμετρήθηκαν οι παρακάτω τιμές:

ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΟΥΡΥΒΟΥ														
Channels		Bitrate (Mbps)	Min (dBm)	Max (dBm)	Av (dBm)	Bitrate (Mbps)	Min (dBm)	Max (dBm)	Av (dBm)	Bitrate (Mbps)	Min (dBm)	Max (dBm)	Av (dBm)	
802.11g	XBee κοντά στο Router		-81	-67	-79		-82	-71	-78		-82	-72	-77	
			-81	-69	-75		-81	-67	-75		-81	-68	-75	
			-77	-64	-71		-77	-64	-71		-77	-64	-72	
			-74	-63	-71		-75	-63	-70		-74	-63	-70	
			-70	-58	-64		-71	-57	-65		-70	-58	-64	
			-65	-62	-64		-66	-61	-63		-96	-61	-65	
			-62	-51	-60		-62	-51	-57		-62	-51	-57	
		5.496	-86	-56	-57	10.99	-57	-56	-57	17.032	-56	-55	-56	
		Mbps	-82	-45	-49	Mbps	-51	-45	-47	Mbps	-51	-45	-48	
			-49	-47	-47		-48	-47	-47		-47	-46	-47	
			-97	-25	-30		-28	-26	-28		-28	-26	-28	
			-97	-19	-24		-27	-18	-22		-27	-18	-23	
			-27	-19	-24		-28	-19	-24		-28	-19	-23	
			-30	-29	-29		-30	-29	-30		-30	-29	-30	
			-48	-47	-47		-48	-47	-47		-48	-47	-47	
			-52	-45	-49		-52	-46	-50		-52	-46	-49	
	XBee μακριά από το Router			-97	-62	-87		-97	-87	-97		-97	-93	-95
				-98	-84	-89		-98	-97	-97		-98	-93	-97
				-96	-84	-90		-97	-88	-96		-96	-91	-95
				-97	-54	-86		-97	-96	-96		97	-94	-95
				-97	-64	-89		-97	-87	-96		-97	-94	-97
				-96	-46	-88		-97	-95	-96		-97	-93	-96
				-96	-84	-89		-95	-89	-94		-96	-86	-93
		5.496	-95	-61	-85	10.992	-94	-81	-90	17.038	-94	-86	-92	
		Mbps	-98	-71	-80	Mbps	-92	-81	-86	Mbps	-93	-80	-89	
			-89	-59	-71		-85	-61	-81		-88	-79	-82	
	-53	-44	-46		-51	-50	-50		-54	-45	-50			
	-48	-31	-38		-51	-34	-44		-52	-34	-43			
	-52	-33	-37		-56	-45	-50		-63	-41	-50			
	-62	-44	-45		-60	-56	-58		-68	-53	-59			
	-87	-68	-75		-88	-80	-83		-91	-76	-87			
	-94	-58	-78		-91	-84	-89		-94	-85	-88			

Πίνακας 4-5 Μετρηθείσες τιμές αρχικοποίησης με 802.11g, τον αισθητήρα κοντά και μακριά του AP, για τα τρία διαφορετικά bitrates.

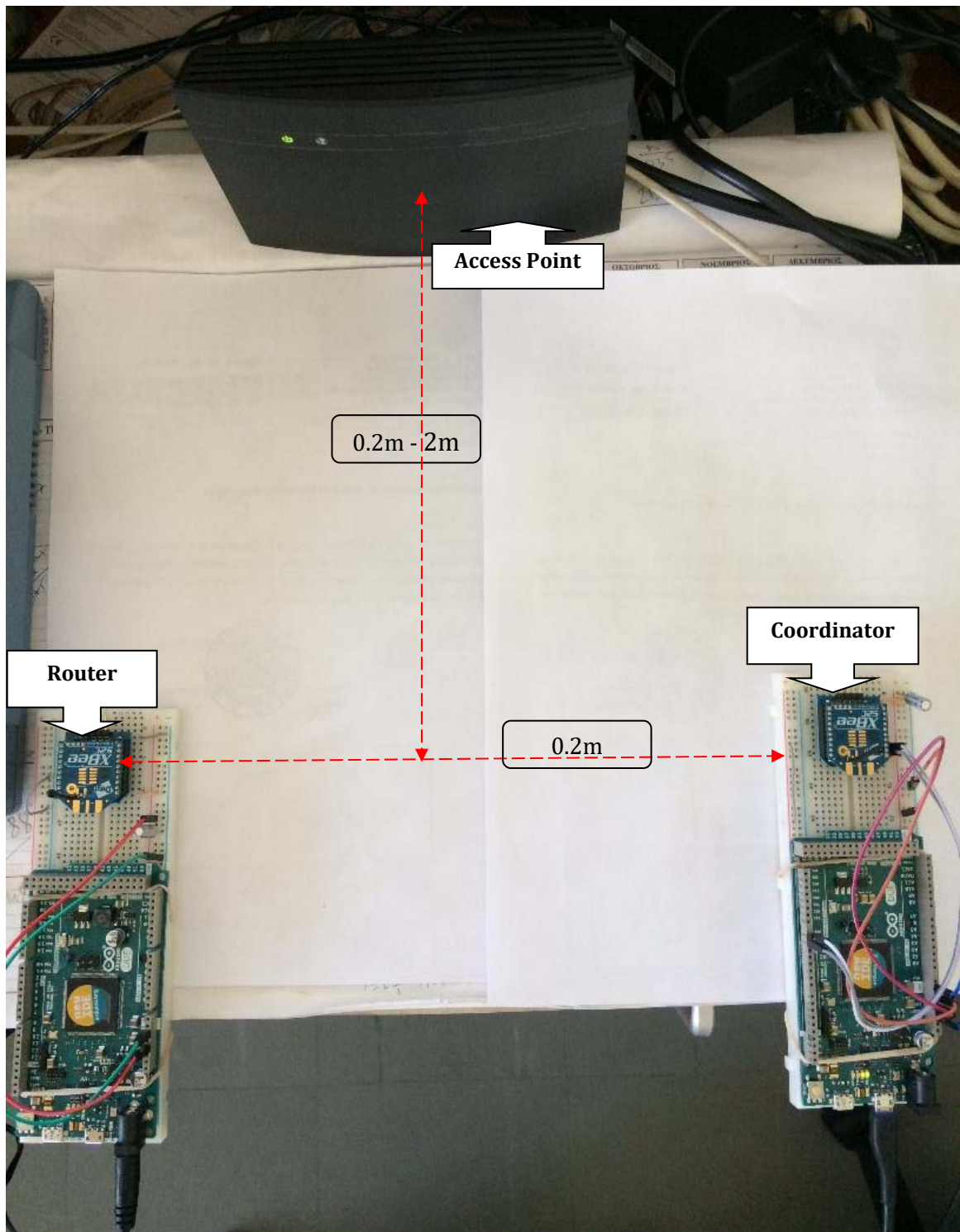
Τοποθετήθηκε ο Coordinator **κοντά** (0.2m) και **μακριά** (2m) από το AP, το οποίο εξέπεμπε σε **802.11n** στα προαναφερθέντα bit rates. Καταμετρήθηκαν οι παρακάτω τιμές:

ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΟΡΥΒΟΥ														
Channels		Bitrate (Mbps)	Min (dBm)	Max (dBm)	Av (dBm)	Bitrate (Mbps)	Min (dBm)	Max (dBm)	Av (dBm)	Bitrate (Mbps)	Min (dBm)	Max (dBm)	Av (dBm)	
802.11n	XBee κοντά στο Router	11 - 2.405GHz		-80	-56	-77		-80	-71	-76		-81	-62	-76
		12 - 2.410GHz		-81	-37	-73		-79	-67	-73		-80	-62	-75
		13 - 2.415GHz		-75	-64	-69		-75	-48	-69		-76	-60	-70
		14 - 2.420GHz		-71	-64	-68		-71	-63	-69		-97	-61	-71
		15 - 2.425GHz		-68	-58	-64		-68	-43	-62		-70	-59	-64
		16 - 2.430GHz		-64	-57	-61		-64	-55	-61		-65	-60	-63
		17 - 2.435GHz		-59	-52	-56		-59	-51	-55		-60	-52	-56
		18 - 2.440GHz	5.496	-55	-54	-54	10.992	-96	-48	-58	23.899	-94	-51	-56
		19 - 2.445GHz	Mbps	-50	-45	-48	Mbps	-50	-45	-48	Mbps	-50	-45	-48
		20 - 2.450GHz		-47	-46	-47		-97	-45	-51		-47	-46	-46
		21 - 2.455GHz		-28	-27	-27		-28	-27	-28		-28	-28	-28
		22 - 2.460GHz		-27	-19	-22		-97	-19	-24		-28	-19	-24
		23 - 2.465GHz		-27	-19	-24		-27	-19	-23		-96	-20	-25
		24 - 2.470GHz		-29	-28	-28		-97	-28	-32		-38	-29	-29
		25 - 2.475GHz		-47	-46	-47		-47	-46	-47		-96	-47	-48
		26 - 2.480GHz		-51	-45	-48		-95	-46	-50		-51	-46	-49
	XBee μακριά από το Router	11 - 2.405GHz		-96	-48	-93		-97	-93	-95		-95	-92	-95
		12 - 2.410GHz		-98	-84	-96		-98	-57	-95		-97	-93	-95
		13 - 2.415GHz		-97	-88	-94		-97	-88	-95		-97	-93	-95
		14 - 2.420GHz		-97	-85	-96		-97	-94	-95		-96	-93	-95
		15 - 2.425GHz		-96	-92	-94		-96	-93	-94		-97	-93	-94
		16 - 2.430GHz		-97	-92	-93		-95	-93	-95		-95	-94	-94
		17 - 2.435GHz		-95	-89	-93		-96	-89	-93		-95	-90	-93
		18 - 2.440GHz	5.496	-95	-87	-91	10.992	-96	-89	-94	23.752	-98	-89	-91
		19 - 2.445GHz	Mbps	-93	-83	-90	Mbps	-94	-87	-93	Mbps	-92	-88	-91
		20 - 2.450GHz		-86	-79	-82		-90	-79	-85		-88	-75	-83
21 - 2.455GHz		-56	-48	-50		-60	-50	-54		-98	-48	-55		
22 - 2.460GHz		-53	-36	-42		-52	-36	-44		-52	-36	-42		
23 - 2.465GHz		-54	-38	-44		-65	-39	-45		-51	-38	-44		
24 - 2.470GHz		-55	-42	-48		-52	-47	-49		-53	-46	-50		
25 - 2.475GHz		-84	-53	-77		-82	-77	-80		-83	-78	-81		
26 - 2.480GHz		-90	-84	-88		-91	-83	-89		-91	-86	-91		

Πίνακας 4-6 Μετρηθείσες τιμές αρχικοποίησης με 802.11.n, τον αισθητήρα κοντά και μακριά του AP, για τα τρία διαφορετικά bitrates.

4.3 Πραγματοποίηση Μετρήσεων

Συνδέθηκε ο εξοπλισμός σύμφωνα με την τοπολογία μετρήσεων.



Σχήμα 4-25 Κυρίως εξοπλισμός μέτρησης τιμών.

4.3.1 Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 4800, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps

Channels (GHz)		Baud Rate 4800												
		PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	
		5.5Mbps				11Mbps				17Mbps				
802.11.g	XBee κοντά στο Router	22 - 2.460	0	-35	78	1.34	0	-35	78	1.3	0	-35	46	1.14
		11 - 2.405	0	-20	63	1.34	0	-20	46	1.34	1	-20	63	1.34
		15 - 2.425	0	-30	47	1.34	0	-30	62	1.34	0	-30	62	1.34
		26 - 2.480	0	-35	78	1.31	0	-35	46	1.32	0	-36	78	1.34
	XBee μακριά από το Router	22 - 2.460	0	-23	62	1.34	0	-23	78	1.29	0	-23	47	1.26
		11 - 2.405	0	-26	47	1.34	1	-26	47	1.34	0	-26	63	1.34
		15 - 2.425	0	-26	63	1.34	0	-26	62	1.34	0	-26	78	1.34
		26 - 2.480	0	-32	15	1.34	1	-32	78	1.34	0	-32	47	1.34
		5.5Mbps				11Mbps				24Mbps				
802.11.n	XBee κοντά στο Router	22 - 2.460	0	-34	62	1.34	1	-34	62	1.31	0	-34	62	1.29
		11 - 2.405	0	-20	62	1.35	0	-20	47	1.34	0	-20	47	1.34
		15 - 2.425	0	-30	47	1.29	0	-30	78	1.34	0	-30	62	1.34
		26 - 2.480	0	-35	62	1.27	0	-35	47	1.34	0	-37	78	1.31
	XBee μακριά από το Router	22 - 2.460	0	-23	63	1.34	1	-23	47	1.34	0	-23	31	1.3
		11 - 2.405	0	-26	62	1.34	0	-26	63	1.34	0	-26	63	1.34
		15 - 2.425	0	-26	63	1.34	0	-26	62	1.34	0	-26	46	1.34
		26 - 2.480	0	-32	63	1.32	0	-32	47	1.32	0	-32	46	1.34

Πίνακας 4-7 Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 4800, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps.

4.3.2 Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 9600, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps

		Baud Rate 9600												
Channels (GHz)		PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	
		5.5Mbps				11Mbps				17Mbps				
802.11.g	XBee κοντά στο Router	22 - 2.460	0	-31	78	2.24	0	-31	47	2.14	0	-31	31	1.83
		11 - 2.405	0	-28	31	2.49	0	-28	78	2.47	0	-28	62	2.47
		15 - 2.425	0	-28	47	2.48	0	-28	32	2.49	0	-28	32	2.47
		26 - 2.480	0	-34	62	2.46	0	-36	47	2.42	0	-36	47	2.36
	XBee μακριά από το Router	22 - 2.460	0	-17	63	2.36	1	-17	46	2.21	1	-18	31	2.14
		11 - 2.405	0	-26	78	2.47	0	-26	31	2.49	0	-26	78	2.52
		15 - 2.425	0	-26	62	2.55	0	-26	32	2.54	0	-26	47	2.55
		26 - 2.480	0	-32	31	2.55	0	-32	63	2.49	0	-32	31	2.5
		5.5Mbps				11Mbps				24Mbps				
802.11.n	XBee κοντά στο Router	22 - 2.460	0	-31	32	2.37	0	-31	20	2.37	0	-31	63	2.06
		11 - 2.405	0	-28	31	2.45	0	-28	62	2.49	0	-28	63	2.47
		15 - 2.425	0	-28	47	2.54	0	-28	47	2.51	0	-28	62	2.47
		26 - 2.480	0	-34	78	2.47	0	-35	31	2.41	1	-37	78	2.29
	XBee μακριά από το Router	22 - 2.460	0	-25	47	2.38	0	-25	62	2.37	0	-25	46	2.21
		11 - 2.405	0	-26	31	2.5	0	-26	47	2.49	0	-26	31	2.5
		15 - 2.425	0	-26	47	2.53	0	-26	46	2.51	0	-26	63	2.5
		26 - 2.480	0	-32	63	2.51	0	-32	31	2.54	0	-32	31	2.55

Πίνακας 4-8 Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 9600, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps.

4.3.3 Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 115200, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps

Channels (GHz)		Baud Rate 115200												
		PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	
		5.5Mbps				11Mbps				17Mbps				
		PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	PER (%)	RSSI (dBm)	RTT (ms)	Throughput (kbps)	
802.11.g	XBee κοντά στο Router	22 - 2.460	0	-31	15	10.47	0	-31	47	7.94	0	-31	62	6.02
		11 - 2.405	1	-28	78	10.76	0	-28	46	10.76	0	-28	47	10.77
		15 - 2.425	0	-27	31	10.75	0	-27	62	10.76	0	-27	31	10.77
		26 - 2.480	0	-36	46	10.7	0	-36	46	10.53	0	-36	15	9.63
	XBee μακριά από το Router	22 - 2.460	0	-23	31	10.57	0	-23	47	9.21	0	-23	33	7.84
		11 - 2.405	1	-28	46	10.75	0	-28	15	10.74	0	-28	47	10.76
		15 - 2.425	0	-26	16	10.77	0	-26	16	10.74	0	-26	45	10.77
		26 - 2.480	0	-32	46	10.75	0	-32	62	10.74	0	-32	15	10.75
		5.5Mbps				11Mbps				24Mbps				
802.11.n	XBee κοντά στο Router	22 - 2.460	0	-31	15	10.7	0	-31	62	10.17	0	-31	62	7.9
		11 - 2.405	0	-27	16	10.76	0	-27	46	10.77	0	-27	47	10.74
		15 - 2.425	1	-28	63	10.77	0	-28	46	10.77	0	-28	62	10.73
		26 - 2.480	0	-35	62	10.73	0	-35	31	10.47	0	-35	31	9.56
	XBee μακριά από το Router	22 - 2.460	0	-24	62	10.72	0	-24	15	10.14	0	-24	47	8.12
		11 - 2.405	0	-28	31	10.76	0	-28	47	10.77	0	-28	15	10.77
		15 - 2.425	0	-26	47	10.77	0	-26	32	10.77	0	-26	16	10.77
		26 - 2.480	0	-32	47	10.77	0	-32	31	10.74	0	-32	63	10.76

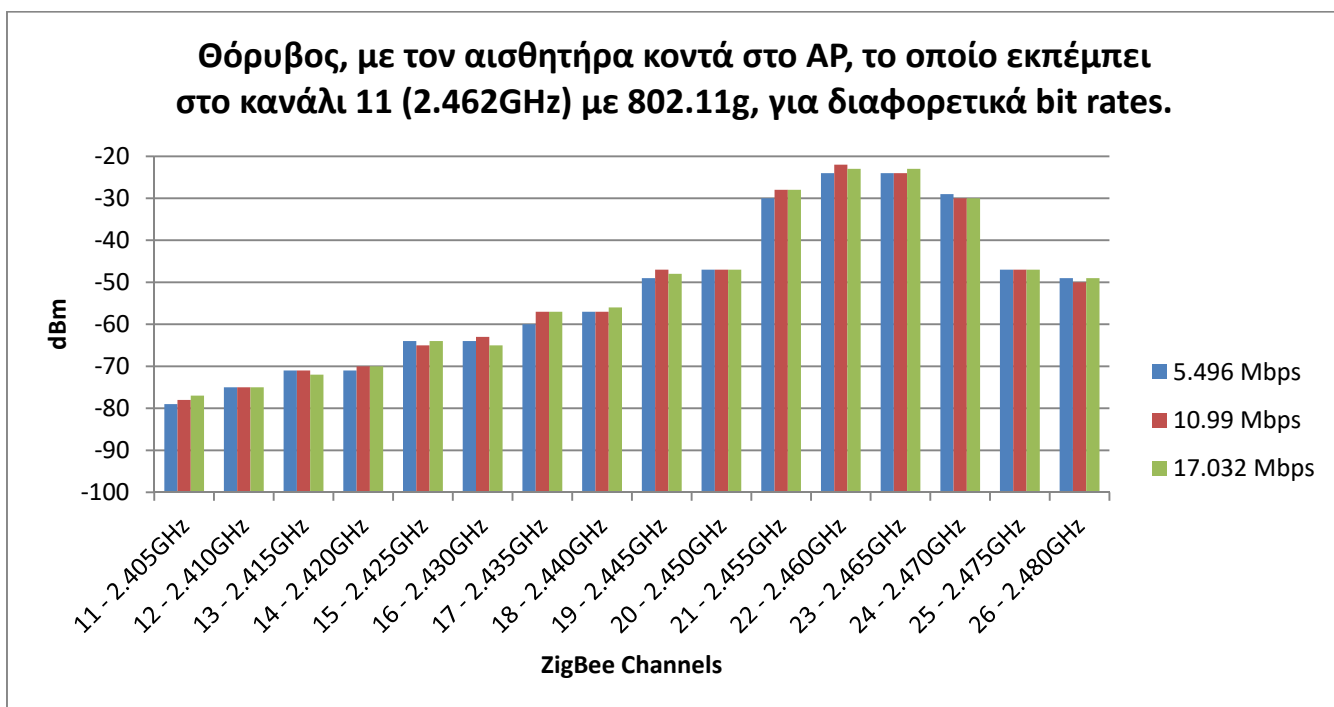
Πίνακας 4-9 Μετρηθήσες τιμές με 802.11.g/n με Baud Rate 115200, το ζεύγος αισθητήρων ZigBee κοντά και μακριά του AP, για τα bitrates 5.5, 11, 17, 24Mbps.

4.4 Γραφήματα και συμπεράσματα

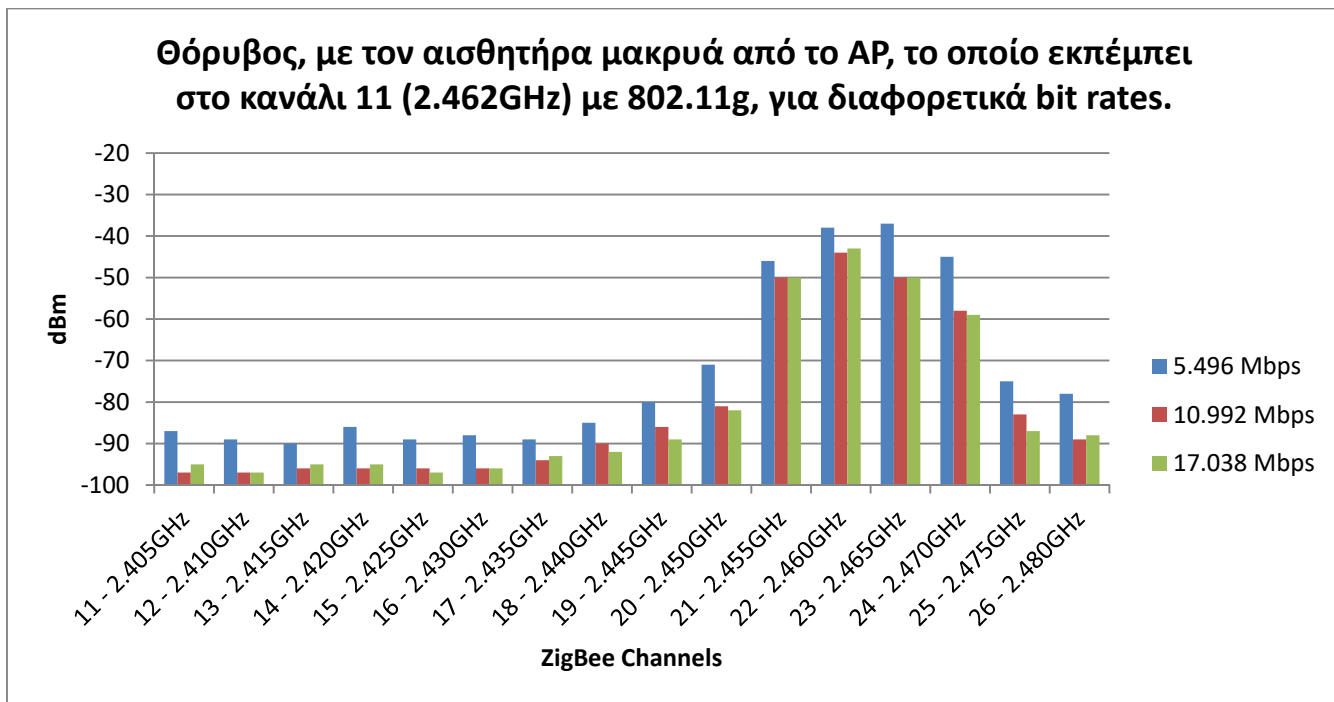
Παρακάτω ακολουθεί μια σειρά γραφημάτων που εξήχθησαν κατά τη διάρκεια της αρχικοποίησης και της λήψης των μετρήσεων.

4.4.1 Διαγράμματα αρχικοποίησης

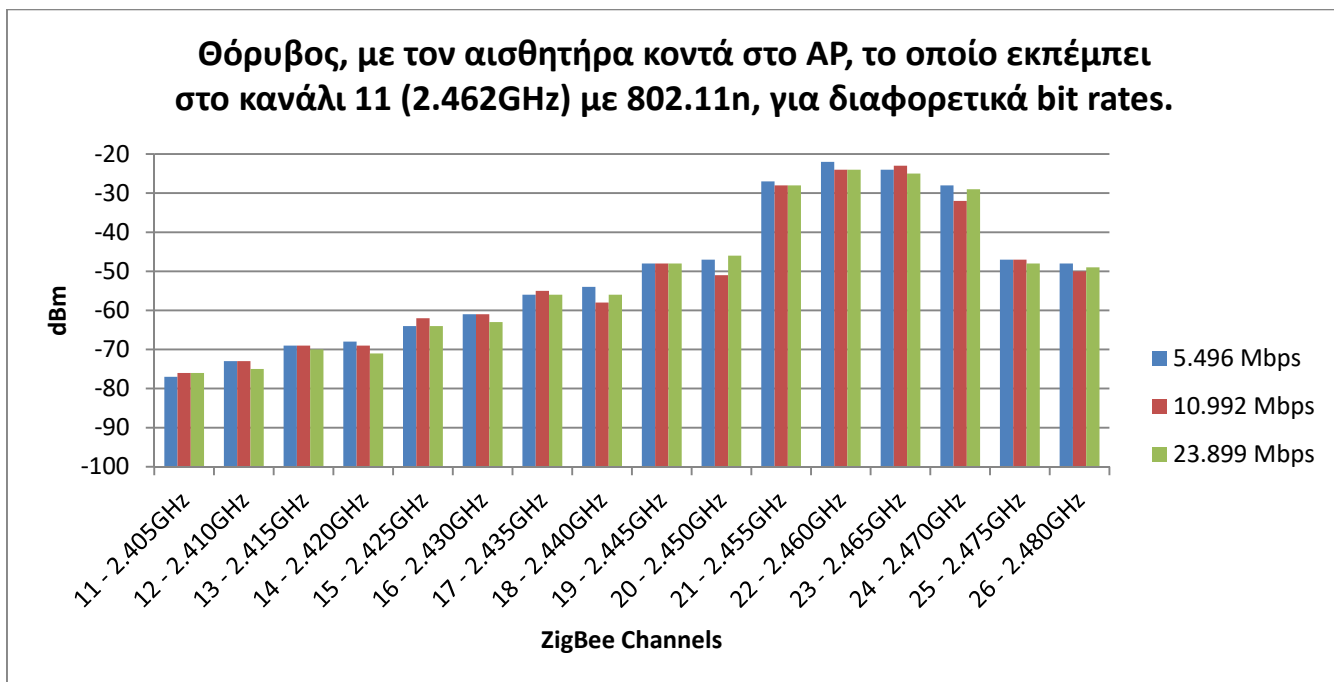
Παρακάτω ακολουθούν ραβδογράμματα με τη στάθμη θορύβου ανά κανάλι ZigBee για τα bit rates 5.5, 11, 17 και 24Mbps, για πρωτόκολλο Wi-Fi 802.11g και 802.11n. Η καταμέτρηση έγινε με χρήση του Coordinator σε αποστάσεις 0.2 και 2m από το AP, το οποίο εξέπεμπε στο κανάλι 11 (2.462GHz).



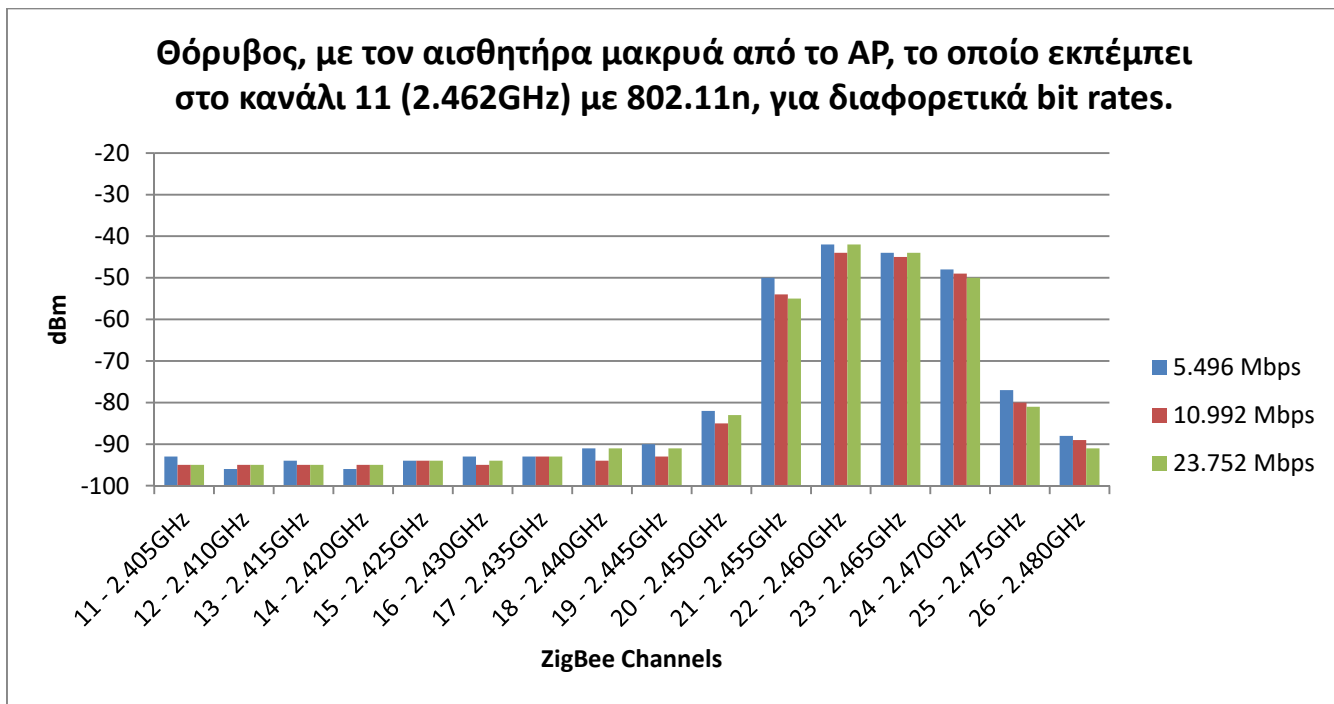
Γράφημα 4-1 Στάθμη θορύβου για 802.11g με τον αισθητήρα κοντά στο AP.



Γράφημα 4-2 Στάθμη θορύβου για 802.11g με τον αισθητήρα μακριά από το AP.



Γράφημα 4-3 Στάθμη θορύβου για 802.11n με τον αισθητήρα κοντά στο AP.



Γράφημα 4-4 Στάθμη θορύβου για 802.11n με τον αισθητήρα μακριά από το AP.

Από την παρατήρηση των παραπάνω γραφημάτων εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Όταν το AP λειτουργεί στο 802.11g στο κανάλι Wi-Fi 11 (2.462GHz), επηρεάζονται έντονα τα κανάλια ZigBee 20, 21, 22, 23, 24 και 25. Οπότε λοιπόν, αυτά τα κανάλια θεωρούνται θορυβώδη για χρήση τους από αισθητήρες όταν ο θόρυβος προκαλείται από AP που λειτουργεί στο 802.11g στο κανάλι Wi-Fi 11 (2.462GHz)
- Όταν το AP λειτουργεί στο 802.11n στο κανάλι Wi-Fi 11 (2.462GHz), επηρεάζονται έντονα τα κανάλια ZigBee 21, 22, 23 και 24. Οπότε λοιπόν, αυτά τα κανάλια θεωρούνται θορυβώδη για χρήση τους από αισθητήρες όταν ο θόρυβος προκαλείται από AP που λειτουργεί στο 802.11n στο κανάλι Wi-Fi 11 (2.462GHz)
- Όταν η απόσταση του αισθητήρα μεταβάλλεται από 0.2 σε 2m από το AP, η στάθμη του θορύβου μειώνεται κατά περίπου 20dB.

4.4.2 Διαγράμματα μετρήσεων

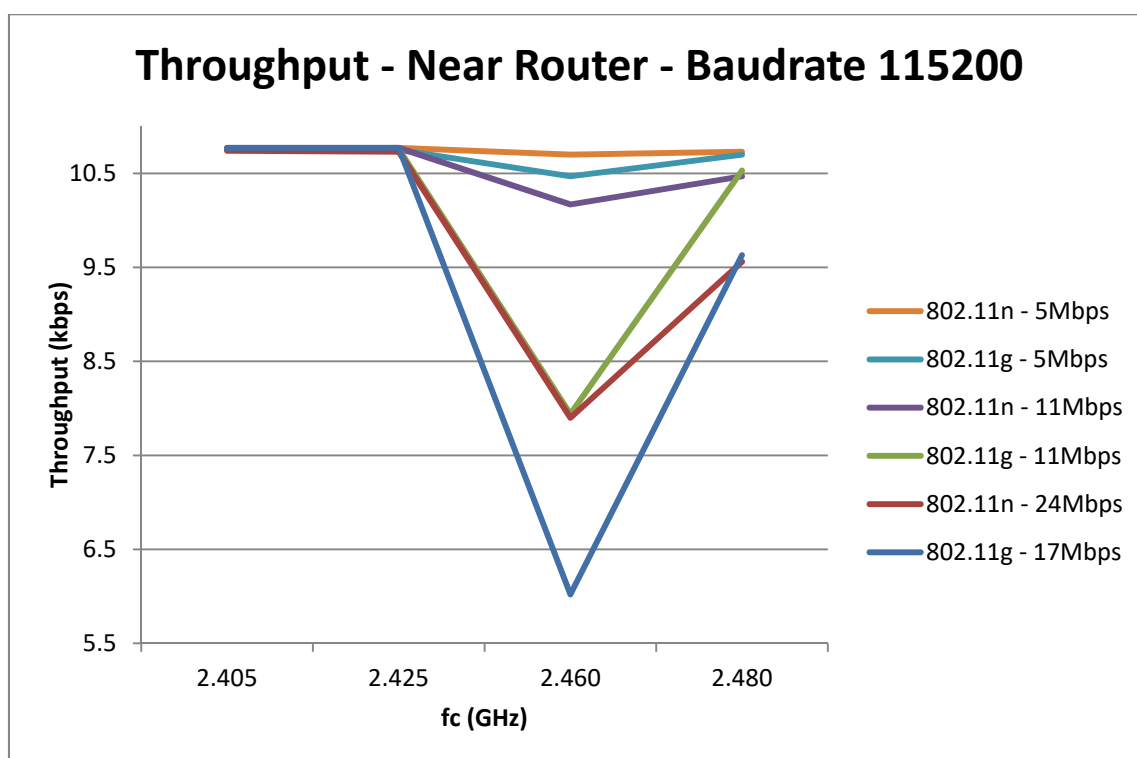
Παρακάτω ακολουθεί μια σειρά διαγραμμάτων και παρατηρήσεων που έγιναν βάσει των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά την πειραματική διαδικασία.

Απόδοση Throughput αναλόγως του καναλιού ZigBee

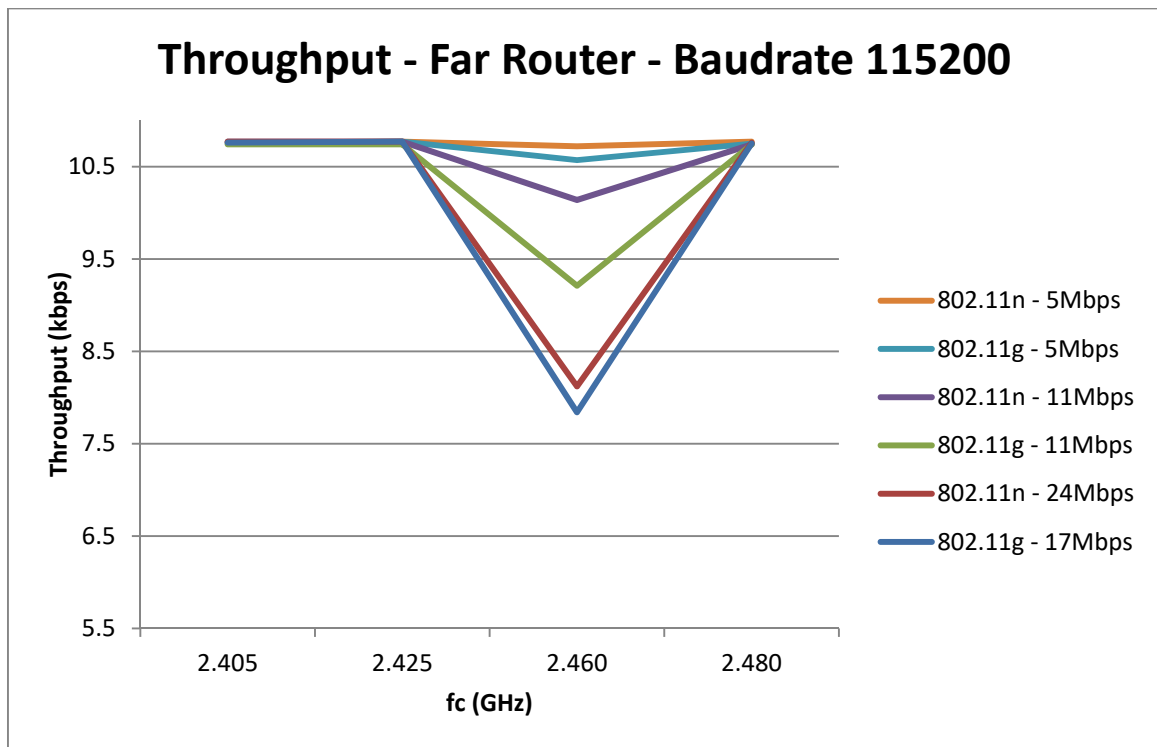
Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ της συμπεριφοράς της επικοινωνίας των ZigBee συσκευών, όταν αυτές επικοινωνούσαν με συχνότητα carrier $f_c=2.460\text{GHz}$, 2.425 , 2.405 και 2.480GHz , τη στιγμή που το AP εξέπεμπε σήμα Wi-Fi στο κανάλι 11 (2.462GHz).

Παρατηρήθηκε ότι το throughput της επικοινωνίας των XBees μειώνεται όσο η συχνότητα carrier των XBees πλησιάζει τη συχνότητα - κανάλι που λειτουργεί το AP.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι αν απομακρυνθούν τα XBees από το AP, τότε η μείωση στο throughput είναι μικρότερη. Αναμενόμενο, αφού με την αύξηση της απόστασης χαμηλώνει η ισχύς του σήματος του AP.



Γράφημα 4-5 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως της συχνότητας f_c των XBees, όταν αυτά βρίσκονται κοντά στο AP.



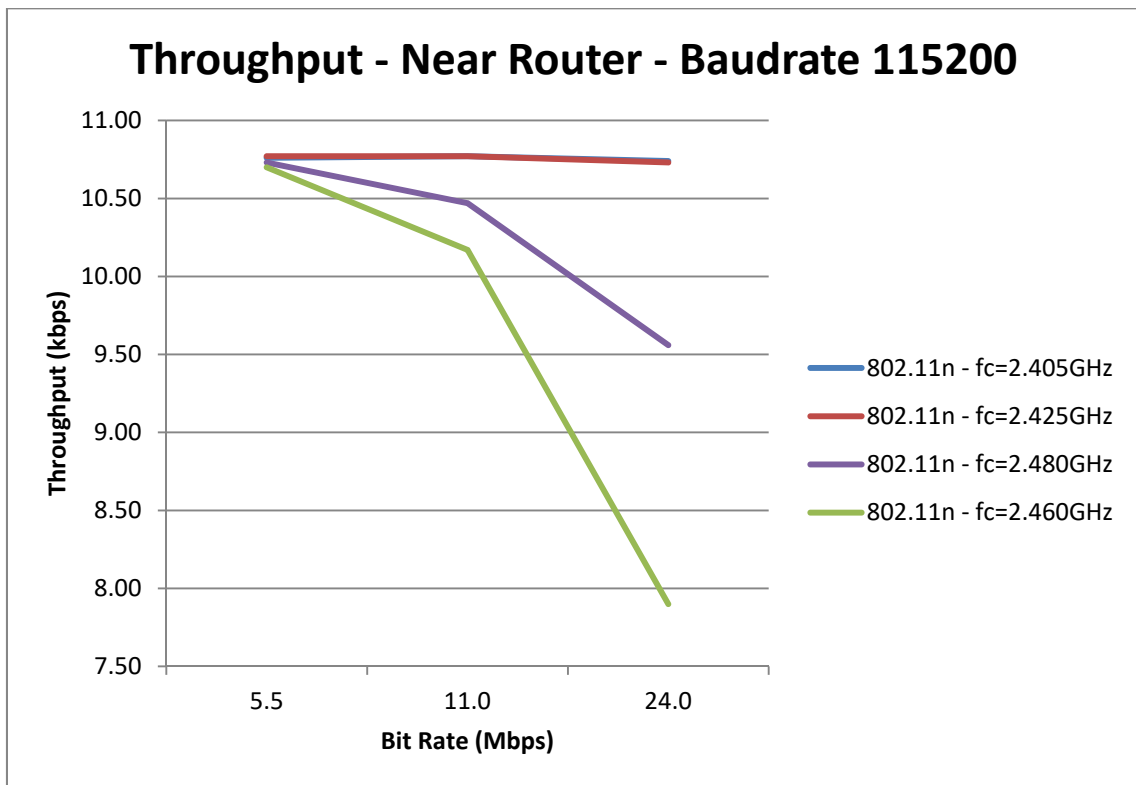
Γράφημα 4-6 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως της συχνότητας f_c των XBees, όταν αυτά βρίσκονται μακριά από το AP.

Απόδοση Throughput αναλόγως του Bit Rate του traffic generator

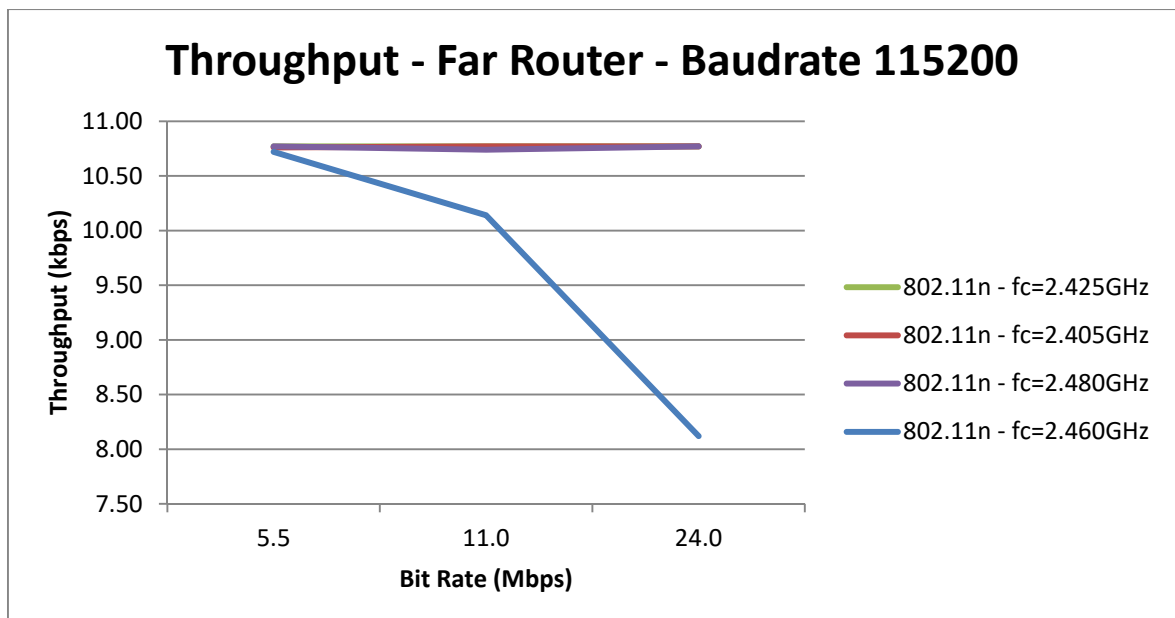
Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ της συμπεριφοράς της επικοινωνίας των ZigBee συσκευών, όταν η γεννήτρια θορύβου εκπέμπει σήμα διαφορετικού bit rate, για διαφορετικές συχνότητες f_c των XBees. Οι τιμές bit rate που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι 5.5, 11, 17Mbps για το πρωτόκολλο 802.11g και οι 5.5, 11, 24Mbps για το πρωτόκολλο 802.11n και βρίσκονται στον οριζόντιο άξονα των επόμενων τεσσάρων γραφημάτων.

Παρατηρήθηκε ότι το throughput της επικοινωνίας των XBees μειώνεται όσο το bit rate της παρεμβολής αυξάνεται. Αυτή η συμπεριφορά υπάρχει ανεξαρτήτως του πρωτοκόλλου n/g του σήματος Wi-Fi.

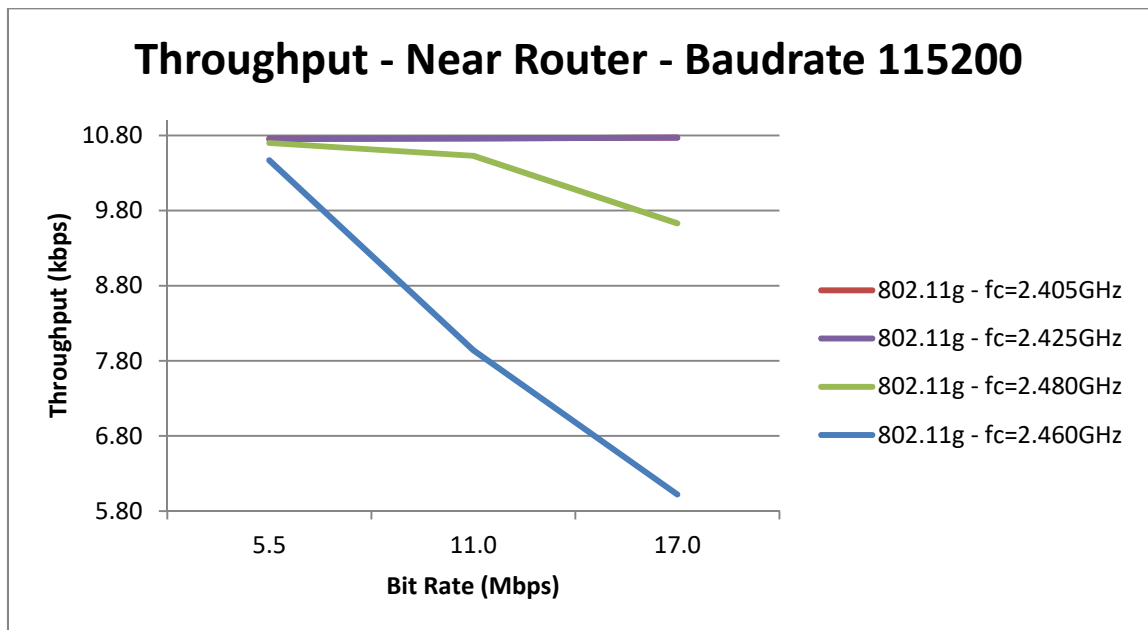
Επίσης παρατηρήθηκε ότι αν απομακρυνθούν τα XBees από το AP, τότε η μείωση στο throughput είναι μικρότερη. Αναμενόμενο, αφού με την αύξηση της απόστασης χαμηλώνει η ισχύς του σήματος του AP (σήμα παρεμβολής).



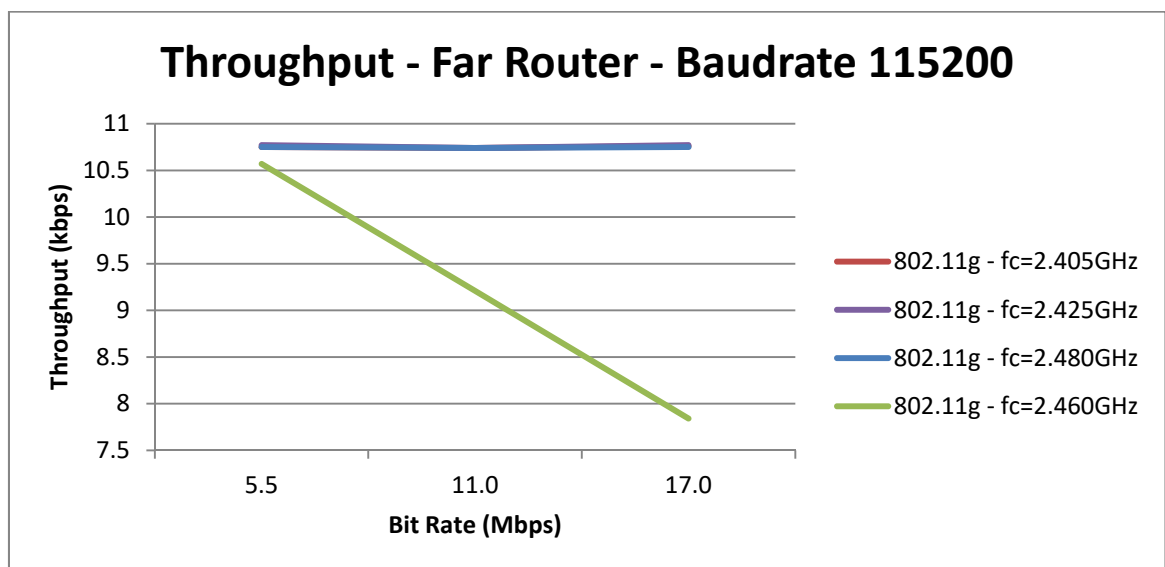
Γράφημα 4-7 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως του bit rate της γεννήτριας θορύβου, όταν αυτή εκπέμπει σε 802.11n και τα XBees βρίσκονται κοντά στο AP.



Γράφημα 4-8 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως του bit rate της γεννήτριας θορύβου, όταν αυτή εκπέμπει σε 802.11n και τα XBees βρίσκονται μακριά από το AP.



Γράφημα 4-9 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως του bit rate της γεννήτριας θορύβου, όταν αυτή εκπέμπει σε 802.11g και τα XBees βρίσκονται κοντά στο AP.



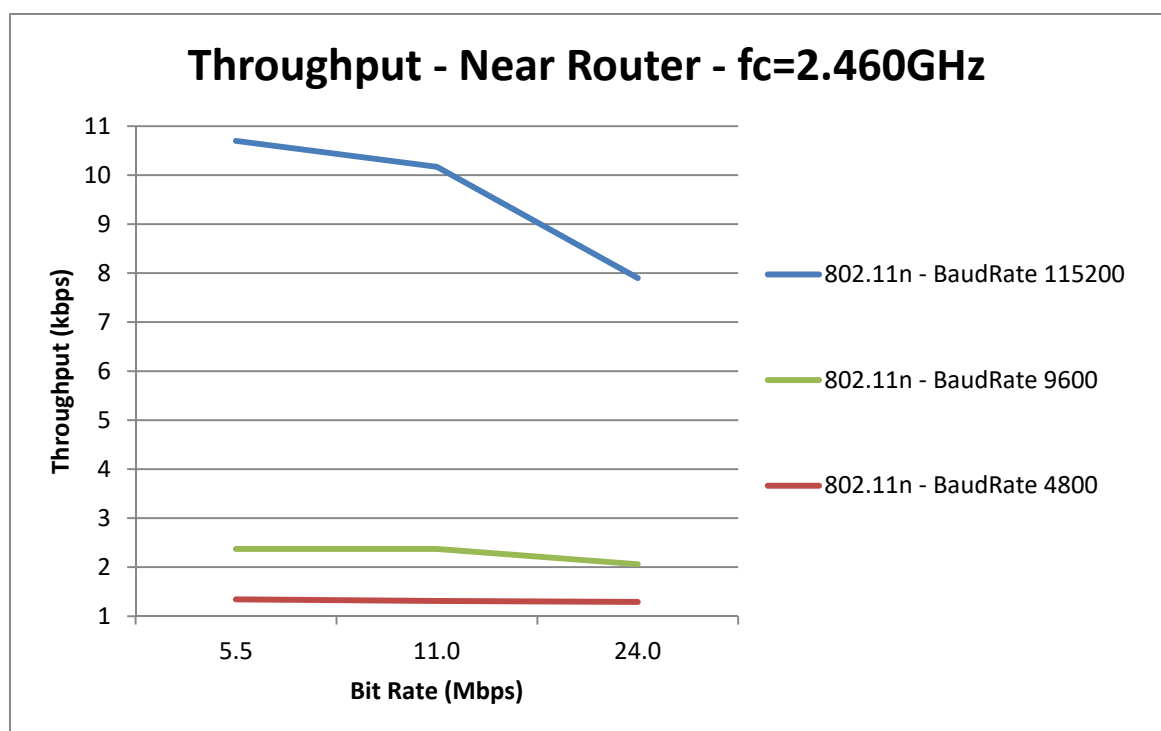
Γράφημα 4-10 Συμπεριφορά Throughput αναλόγως του bit rate της γεννήτριας θορύβου, όταν αυτή εκπέμπει σε 802.11g και τα XBees βρίσκονται μακριά από το AP.

Απόδοση Throughput αναλόγως του Baud Rate επικοινωνίας των XBees.

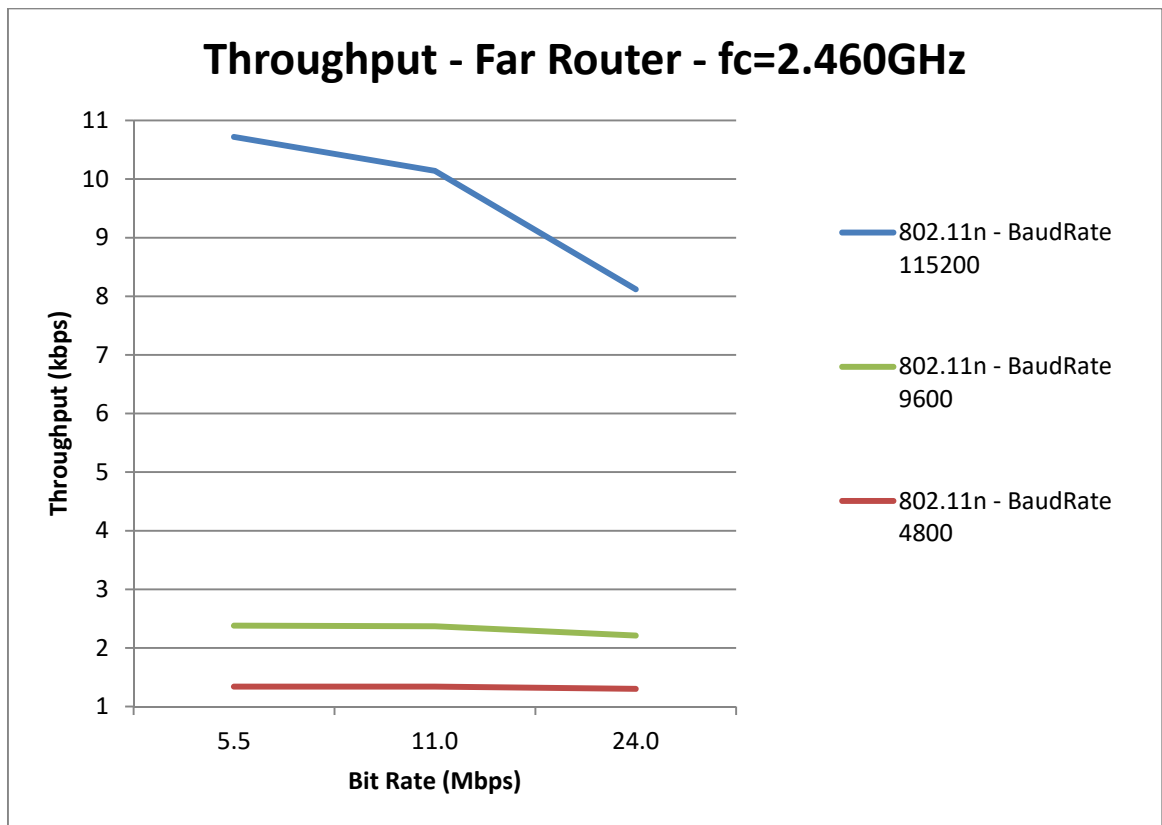
Η επόμενη παρατήρηση είναι σχετικά με το βαθμό μείωσης του throughput, αναλόγως του bitrate (οι τιμές του βρίσκονται στον οριζόντιο άξονα των επόμενων δύο γραφημάτων) αλλά και του baud rate επικοινωνίας των XBees.

Παρατηρώ ότι όσο πιο πολύ μικραίνει το Baud Rate της επικοινωνίας των XBees, τόσο πιο σταθερό είναι το throughput, ανεξαρτήτως του bitrate του θορύβου. Οι τιμές bit rate που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι 5.5, 11, 17Mbps για το πρωτόκολλο 802.11g και οι 5.5, 11, 24Mbps για το πρωτόκολλο 802.11n ενώ τα XBees επικοινωνούν στα εξής Baud rates: 4800, 9600 και 115200Baud/s. Η συμπεριφορά αυτή του throughput δικαιολογείται αφού στα χαμηλά baud rates, η επικοινωνία των XBees γίνεται πιο αργά και άρα με λιγότερα σφάλματα.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι αν απομακρυνθούν τα XBees από το AP, τότε ο βαθμός μείωσης του throughput μειώνεται. Αναμενόμενο, αφού η αύξηση της απόστασης χαμηλώνει την ισχύ του σήματος του AP (σήμα παρεμβολής).



Γράφημα 4-11 Βαθμός μεταβολής Throughput αναλόγως του baud rate της επικοινωνίας των XBees για διάφορα bit rates, όταν τα XBees βρίσκονται κοντά στο AP.



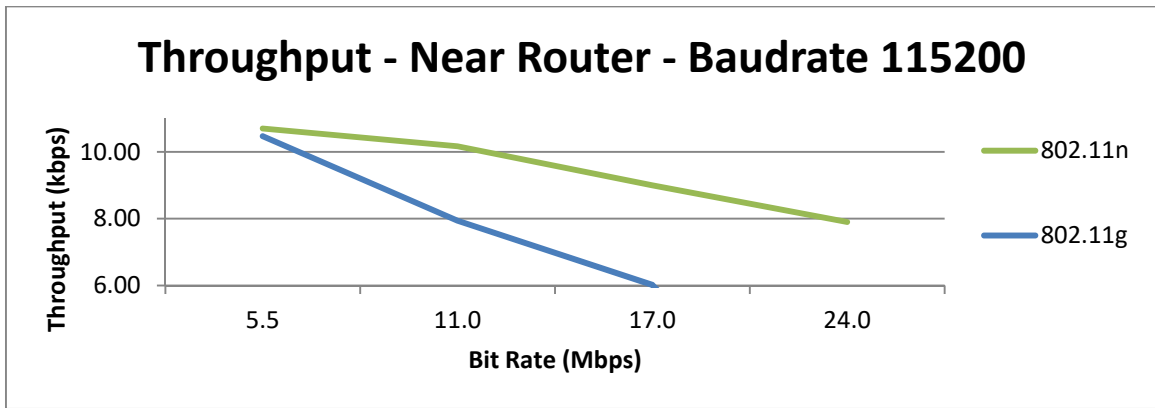
Γράφημα 4-12 Βαθμός μεταβολής Throughput αναλόγως του baud rate της επικοινωνίας των XBees για διάφορα bit rates, όταν τα XBees βρίσκονται μακριά από το AP.

Σύγκριση προτύπων 802.11g και 802.11n.

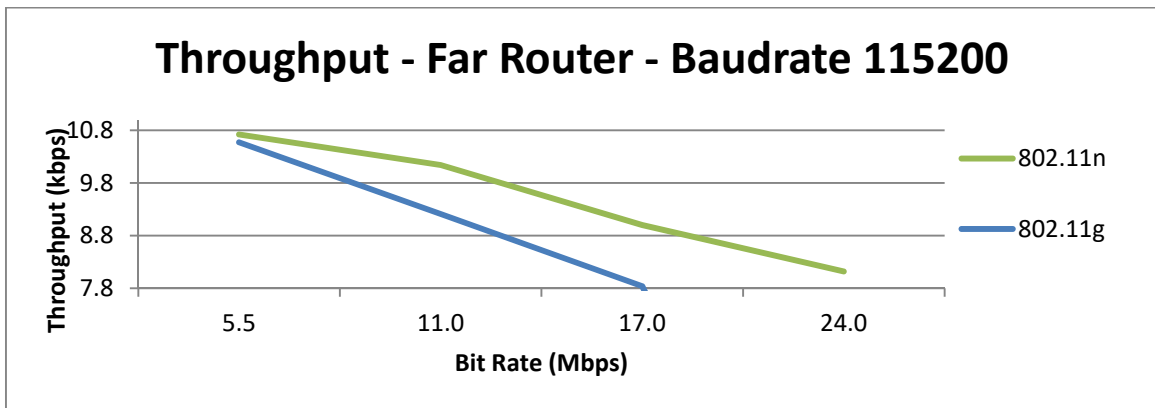
Άλλο ενδιαφέρον σημείο των μετρήσεων έχει να κάνει με τη συμπεριφορά του throughput αναλόγως του πρωτοκόλλου Wi-Fi που χρησιμοποιείται ως θόρυβος – παρεμβολή. Παρατηρώ ότι στη συχνότητα λειτουργίας $f_c=2.460\text{GHz}$, που είναι δίπλα στην 2.462GHz του AP, το 802.11n έχει καλύτερο Throughput από το 802.11g ανεξαρτήτως Baud Rate.

Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το 802.11g για χαμηλά bitrates χρησιμοποιεί διαμόρφωση CCK, η οποία αποτελεί επέκταση της DSSS. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, το πρώτο επίπεδο του ZigBee είναι το ίδιο με του 802.15.4 και χρησιμοποιεί διαμόρφωση DSSS. Αντιθέτως, το 802.11n χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση OFDM. Όσον αφορά την τιμή 17mbps, όπου και το 802.11g χρησιμοποιεί OFDM, η διαφορά οφείλεται στον μέσο χρόνο κατάληψης του φυσικού μέσου, ο οποίος είναι διαφορετικός κατά τη μετάδοση του ίδιου datarate.

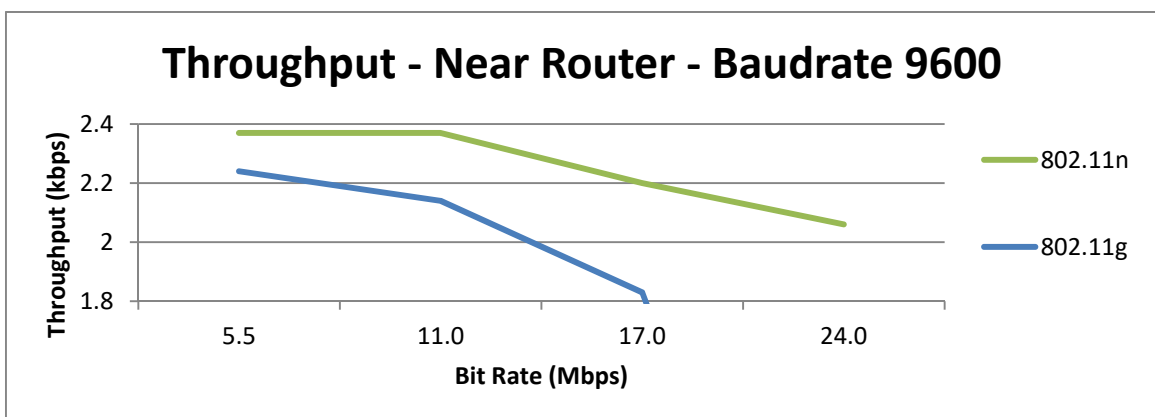
Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα για τις ίδιες μετρήσεις σε κάθε πρότυπο χωριστά.



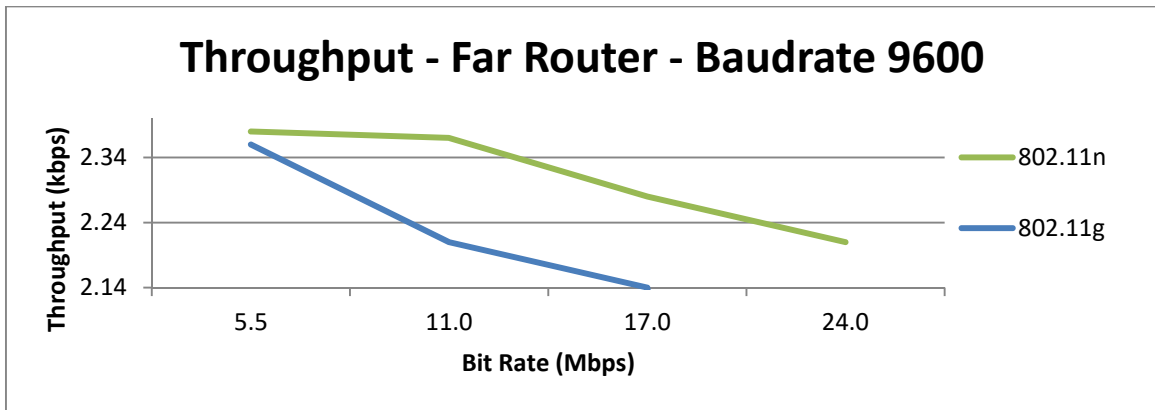
Γράφημα 4-13 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 115200 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees κοντά στο AP.



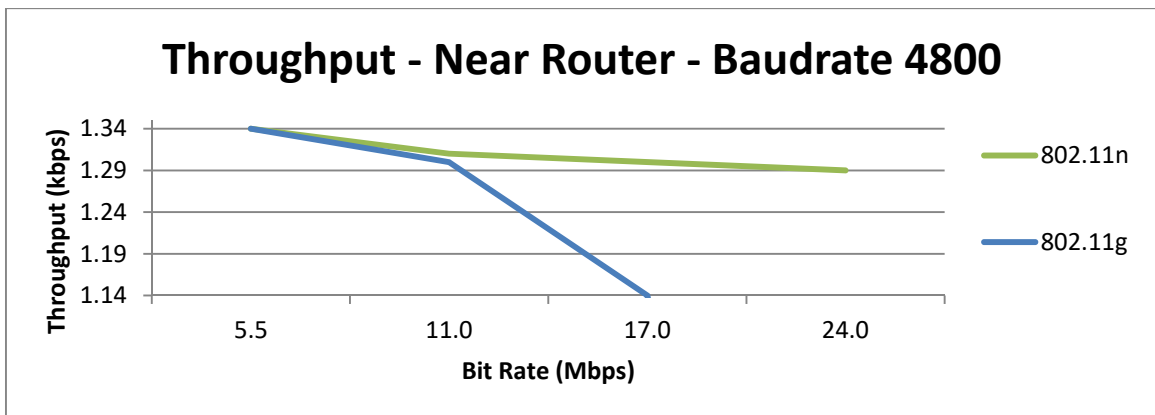
Γράφημα 4-14 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 115200 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees μακριά από το AP.



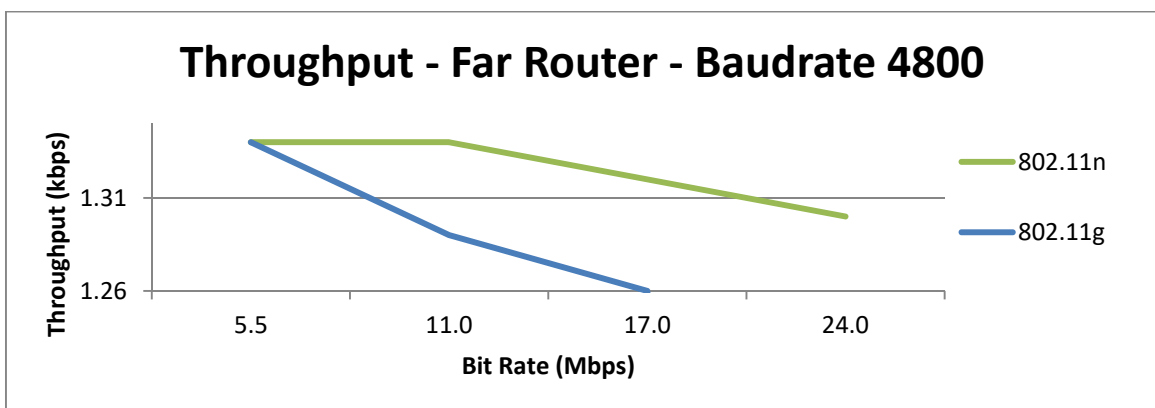
Γράφημα 4-15 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 9600 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees κοντά στο AP.



Γράφημα 4-16 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 96200 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees μακριά από το AP.



Γράφημα 4-17 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 4800 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees κοντά στο AP.



Γράφημα 4-18 Throughput συσκευών XBees για ίδια bitrates, 4800 baud rate και διαφορετικό πρωτόκολλο Wi-Fi. Συσκευές XBees μακριά από το AP.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα – Επίλογος

Από τη μελέτη της θεωρίας για την πραγματοποίηση αυτής της διατριβής καθώς και από το πειραματικό στάδιο που ακολούθησε, έχουν εξαχθεί σημαντικά αποτελέσματα.

Παρακάτω αναλύεται καθένα από αυτά, καθώς και ο τρόπος αποφυγής παρεμβολών που συνάγεται εκ του αποτελέσματος.

5.1 Απόσταση

Πρώτο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η απόσταση του AP και των συσκευών ZigBee είναι καθοριστικός παράγοντας. Από όλες τις μετρήσεις έγινε φανερό ότι οι τιμές ήταν πολύ καλύτερες στις περιπτώσεις που η απόσταση ήταν 2m, δηλαδή μακριά από το AP.

Μάλιστα, σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι και η απόσταση των 2m θεωρείται κοντινή. Για καλύτερα αποτελέσματα, η απόσταση θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 8m[28].

5.2 Συχνότητα – κανάλι λειτουργίας

Επειδή για τα πρωτόκολλα ZigBee, 802.11g και 802.11n, η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας είναι κοινή, παρατηρείται παρεμβολή στις περιπτώσεις που τα κανάλια των δυο επικοινωνιών επικαλύπτονται.

Μάλιστα, όπως φάνηκε και από όλες τις μετρήσεις, το εύρος της παρεμβολής αυξάνεται περισσότερο, όσο πιο κοντά βρίσκονται AP και συσκευές ZigBee.

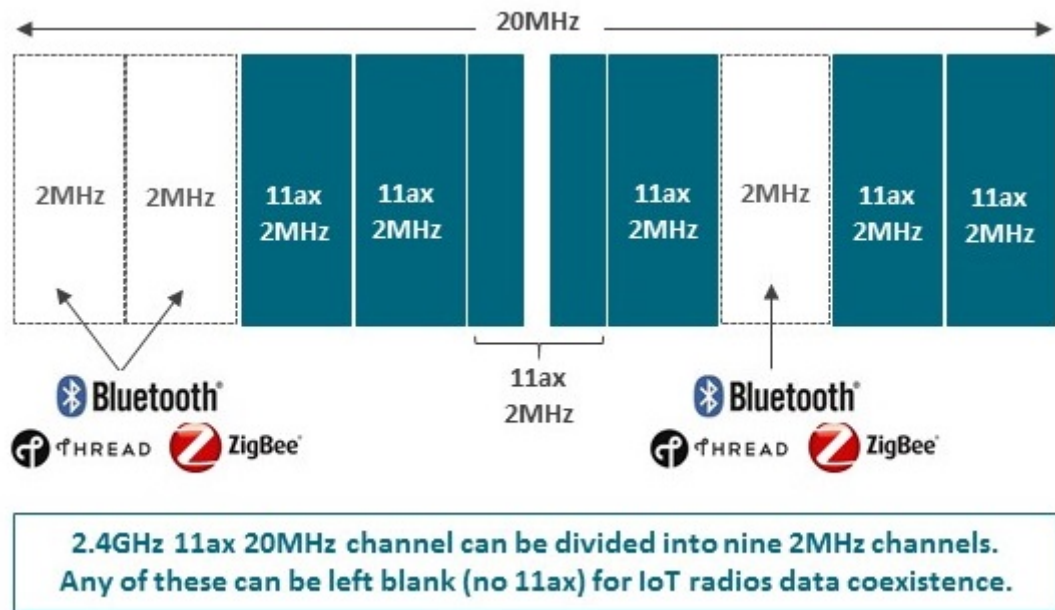
Από τη στιγμή που χρησιμοποιούνται λοιπόν πρωτόκολλα ίδιας ζώνης συχνοτήτων με αυτή του ZigBee, πρέπει τα κανάλια ZigBee και Wi-Fi να απέχουν αρκετά μεταξύ τους και σίγουρα περισσότερο από 15-20MHz.

5.3 Πρωτόκολλο επικοινωνίας

Από τις μετρήσεις φάνηκε ότι το πρότυπο 802.11n επηρεάζει λιγότερο την επικοινωνία ZigBee συσκευών σε σχέση με το 802.11g. Με την πάροδο του χρόνου, μειώνονται τα AP που θα χρησιμοποιούν το πρότυπο 802.11g και έτσι το πρόβλημα θα βαίνει μειούμενο.

Λύση αποτελεί επίσης και η χρήση του πρωτοκόλλου 802.11ac για ασύρματα τοπικά δίκτυα. Λόγω της ζώνης συχνοτήτων που χρησιμοποιεί (5GHz) εκτιμάται ότι δεν θα υπάρχει αξιοσημείωτη παρεμβολή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Οριστική λύση στο πρόβλημα των παρεμβολών μεταξύ ZigBee και Wi-Fi, θα δώσει το νέο πρότυπο της IEEE, 802.11ax[29], παρόλο που χρησιμοποιεί την ίδια ζώνη συχνοτήτων (2.4GHz) με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Εξαιτίας της τεχνικής πρόσβασης στο κανάλι που υποστηρίζει – OFDMA, μπορεί να μοιράσει το κανάλι σε τμήματα των 2MHz, χρησιμοποιώντας καθένα από αυτά διαφορετικά. Μπορούμε λοιπόν να ορίσουμε τμήμα 2MHz ενός καναλιού να μην χρησιμοποιείται από το 802.11ax, ώστε εκεί να λειτουργούν δίκτυα ασύρματων αισθητήρων πχ ZigBee, Bluetooth. Έτσι δεν θα υπάρχει παρεμβολή του Wi-Fi προς δίκτυα ασύρματων αισθητήρων (WSNs).



Σχήμα 5-1 802.11ax - διαίρεση καναλιού 20MHz σε τμήματα των 2MHz και ξεχωριστή χρήση καθενός από αυτά.

5.4 Στοιχεία για περαιτέρω μελέτη

Η παραπάνω μελέτη κατέδειξε ότι είναι υπαρκτή η παρεμβολή μεταξύ ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSNs) και ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN). Όσο τα πρότυπα επικοινωνίας βελτιώνονται, τόσο μειώνονται οι παρεμβολές μεταξύ τους.

Ενδιαφέρον στοιχείο για περαιτέρω μελέτη αποτελεί η πειραματική εξέταση της συνύπαρξης των νεότερων προτύπων Wi-Fi, 802.11ac και 802.11ax με τα WSNs και να αξιολογηθεί το μέγεθος των παρεμβολών που δημιουργούνται μεταξύ τους.

Βιβλιογραφία

- [1] John D'Ambrosia. (2017, Jan.) IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee. [Online]. <http://www.ieee802.org/>
- [2] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, and Dipak Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks*, no. 52, pp. 2292-2330, April 2008.
- [3] Jacobs, Sol; VP and General Manager - Tadiran Batteries, "Combining Low-Power Communications Protocols with Long-Life Lithium Batteries," in *ZIGBEE RESOURCE GUIDE*. COLORADO, USA: Webcom Communications Corp., 2016, pp. 6-7.
- [4] IEEE, "802.11b," *IEEE Std*, June 1999.
- [5] IEEE, "802.11a," *IEEE Std*, June 1999 - reaffirmed 2003.
- [6] IEEE, "802.11g," *IEEE Std*, June 2003.
- [7] IEEE, "802.11n," *IEEE Std*, September 2009.
- [8] IEEE, "802.11ac," *IEEE Std*, December 2013.
- [9] mtroi. (2014, 26 November) WLAN by german engineering. [Online]. <https://wlan1nde.wordpress.com/2014/11/26/wlan-maximum-transmission-power-etsi/>
- [10] IEEE, "802.11ax," *IEEE Std*, October 2014.
- [11] "ZigBee Specification," *ZigBee Standards Organization*, September 2012.
- [12] Mario Di Francesco. (2013, October) The IEEE 802.15.4 Standard and the ZigBee Specifications. Presentation.
- [13] "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," *IEEE Std*, June 2011.
- [14] Τμήμα Εφαρμογών Τηλεπικοινωνιακών Διατάξεων. (2014, Μάρτιος) Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. [Online]. <http://brain.ee.auth.gr/dokuwiki/doku.php?id=zigbee:zigbee>
- [15] D. International, *XBee®/XBee-PRO S2C Zigbee® User Guide*, Digi International, Ed., 2018, pp. 1-155.
- [16] W. Dargie and C Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice.*: John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [17] Rajeev Piyare and Seong-ro Lee, "Performance Analysis of XBee ZB Module Based

- Wireless Sensor Networks," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 4, no. 4, pp. 1615-1621, Apr. 2013.
- [18] Αγγελόπουλος Ιωάννης. Εξοικείωση με τις παραμέτρους και ποσοτική μελέτη ζεύξεων. Εργαστήριο Δικτύων Υπολογιστών - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 3.
- [19] Christopher Mueller, Michael Horie, and Stephen W Neville, "A distributed application-level IT system workload generator, in: International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA '09)," , 2009.
- [20] Alessio Botta, Alberto Dainotti, and Antonio Pescapé, "A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios," *ELSEVIER - Computer Networks*, vol. 56, no. Traffic generation, pp. 3531 - 3547, Mar. 2012.
- [21] Alessio Botta, Walter Donato, Alberto Dainotti, Stefano Avallone, and Antonio Pescapé. (2013, Oct.) D-ITG 2.8.1 Manual. [Online]. <http://traffic.comics.unina.it/software/ITG/manual/>
- [22] Μιχάλης Λουλάκης, *Στοχαστικές Διαδικασίες*, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Ed. Αθήνα, Ελλάδα / Ζωγράφου: Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα www.kallipos.gr, 2015.
- [23] ARDUINO STORE. [Online]. <https://store.arduino.cc/arduino-due>
- [24] (2018, March) Wikipedia. [Online]. <https://el.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- [25] James A. Langbridge, *ARDUINO SKETCHES Tools and Techniques for Programming Wizardry*. Indianapolis, United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [26] Digi International Inc. [Online]. <https://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/2-4-ghz-modules>
- [27] DIGI, "XCTU Configuration and Test Utility Software," User Guide 90001458-13, 2017.
- [28] "Co-existence of IEEE 802.15.4 at 2.4 GHz Application Note," JN-AN-1079 Revision 1.1 8-Nov-2013.
- [29] Ambroise Popper. (2018, February) Quantenna. [Online]. <http://www.quantenna.com/blog/making-wi-fi-truly-an-iot-technology-thanks-to-802-11ax/>