



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΗΠΕΙΡΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΤΗΛΕΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ
ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ WLAN ΙΕΕΕ
802.11g**

της σπουδάστριας
Λιάσκα Βασιλικής

Φεβρουάριος 2006

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην εκπόνηση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Επικ. Καθ. (ΠΔ 407) και Προϊστάμενο του Τμήματος κ. Κ.Θ. Αγγέλη τόσο για την καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια της εργασίας μου όσο και για την παρότρυνση του σε κρίσιμα σημεία αυτής. Τον ευχαριστώ επίσης για τις σημαντικότερες παρατηρήσεις, τα εύστοχα σχόλια και την πολύτιμη συμβολή του στη διόρθωση του τελικού κειμένου.

Παράλληλα αισθάνομαι βαθιά υποχρεωμένη να ευχαριστήσω τους πολύ καλούς μου φίλους Κυριώτη Στεφανία και Γαλάνη Δημήτρη τόσο για την πολύτιμη βοήθεια τους στο πειραματικό κυρίως μέρος αυτής της εργασίας όσο και για την στήριξη τους όλο αυτόν τον καιρό.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους, οι οποίοι από διαφορετικά πόστα ο καθένας, συνειδητά ή μη βοήθησαν ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία και κατά συνέπεια να μου απονεμηθεί το πτυχίο στην ώρα του.

Abstract

Η Πτυχιακή Εργασία που παρουσιάζεται έχει σαν αντικείμενο την προσομοίωση και τη μελέτη απόδοσης ενός WLAN IEEE 802.11g συστήματος. Σήμερα, τα Ασύρματα Δίκτυα Τοπικής Περιοχής (WLAN) παρουσιάζουν αλματώδη αύξηση μέρα με τη μέρα.

Έχει εκτιμηθεί μια αύξηση μονάδων WLAN από 2.1εκ. το 2001 σε πάνω από 52εκ. το 2006. Ενώ αυτοί οι αριθμοί φαίνονται εντυπωσιακοί σήμερα, το δυναμικό αγοράς της τεχνολογίας WLAN μπορεί να αυξηθεί εντυπωσιακά εάν γίνει ενσωμάτωση WLAN στα καθημερινά ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης όπως οι εκτυπωτές, τα PDA, οι κονσόλες παιχνιδιών και τα κυψελοειδή τηλέφωνα.

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή αυτή η ευκαιρία, οι λύσεις WLAN πρέπει να δώσουν έμφαση στην "χωρίς ανησυχία" συνεκτικότητα. Με άλλα λόγια, οι προμηθευτές συνόλου τσιπ (chipset) WLAN πρέπει όχι μόνο να ικανοποιήσουν, αλλά και να υπερβούν τις προσδοκίες των καταναλωτών όσον αφορά την απόδοση περιοχής. Οι άνθρωποι προσδοκούν τη λειτουργία των WLAN σε πολλά διαφορετικά περιβάλλοντα και δεν θα ανεχτούν λύσεις WLAN που λειτουργούν διαφορετικά.

Αναπτύχθηκε ένα WLAN IEEE 802.11g σύστημα υπό διαλειπτικό (fading) κανάλι τύπου Rayleigh με διαμόρφωση OFDM. Μέσω της μεταβολής παραμέτρων όπως η ταχύτητα του κινητού, το ύψος της κεραίας και ο ρυθμός εκπομπής στοιχείων προκύπτουν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση ενός WLAN. Ο ρυθμός εκπομπής εσφαλμένων bit (BER) αποφασίστηκε να χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την αξιολόγηση της απόδοσης συστημάτων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:

Wireless Local Area Network,
IEEE 802.11g,
OFDM Modulation,
Fading Channel,
Rayleigh Distribution,
WLAN Performance,
Bit Error Rate

ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

Όλες οι προτάσεις οι οποίες παρουσιάζονται σε αυτό το κείμενο και οι οποίες ανήκουν σε άλλον αναγνωρίζονται από τα εισαγωγικά και υπάρχει η σαφής δήλωση του συγγραφέα. Τα υπόλοιπα αναγραφόμενα είναι επινόηση του γράφοντος ο οποίος φέρει και την καθολική ευθύνη για αυτό το κείμενο και δηλώνω υπεύθυνα ότι δεν υπάρχει λογοκλοπή σε αυτό το κείμενο.

Όνοματεπώνυμο:

Υπογραφή:

Ημερομηνία:

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.1	Πιθανότητα σφάλματος $P(e)$ σε συνάρτηση με το λόγο φέροντος προς θόρυβο (μπορεί να μεταφραστεί ως αναλογία σήματος προς θόρυβο) για διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης. (Kamilo Feher, Ψηφιακές Επικοινωνίες).....	22
1.2	Το σχήμα θορύβου (NF) ενός συστήματος είναι ανεξάρτητο της απολαβής. Εδώ, ένα 20 dB σήμα περνιέται μέσα από έναν ενισχυτή ισχύος με 10 dB NF. Καθώς το σήμα κορυφής ανυψώνεται κατά 20 dB, ο συνολικός λόγος S/N υποφέρει (40 dB S/N αναλογίας στην είσοδο and 30 dB of S/N στην έξοδο).....	23
1.3	.....	26
1.4	.....	27
1.5	.....	28
1.6	.....	28
1.7	.....	29
1.8	Κρουστικές Αποκρίσεις Καναλιού και Αντίστοιχη Απόκριση Συχνότητας.....	30
1.9	Μοντέλο σημάτων σε ένα ασύρματο σύστημα.....	31
2.1	Το πρότυπο 802.11 εστιάζει στα δύο κατώτατα επίπεδα του μοντέλου ISO: PHY και MAC.....	33
2.2	Τοπολογίες IEEE 802.11 BSS και ESS.....	35
2.3	Τυπική Διαμόρφωση WLAN.....	37
2.4	Το πρόβλημα του κρυφού κόμβου.....	40
2.5	Κράτηση μέσου με Πλαίσια RTS/CTS.....	40
2.6	Τα πρότυπα IEEE 802.11.....	42
2.7	Παράδειγμα Αλμάτων Συχνότητας.....	44
2.8	Διεύρυνση Φάσματος με Άλματα Συχνότητας.....	44
2.9	Διαυλοποίηση DSSS.....	45
2.10	Διεύρυνση Φάσματος Ευρείας Ακολουθίας.....	45
2.11	Υπολογισμός Ευαισθησίας Δέκτη.....	47
3.1	Προσέγγιση Ενιαίου Φέροντος έναντι Πολλαπλών φερόντων.....	52
3.2	Η Αλυσίδα Πομπού OFDM.....	55
3.3	Σχέδια Πολλαπλής Πρόσβασης.....	56
3.4	Δισδιάστατη απεικόνιση των πόρων OFDM του καναλιού.....	56
3.5	Τόνοι OFDM.....	57
3.6	Παρουσίαση του OFDM στα πεδία χρόνου και συχνότητας.....	58
3.7	Ακέραιος Αριθμός Ημιτονικών Περιόδων.....	58
3.8	Κυκλική προέκταση ημίτονου.....	59
3.9	Ο ρόλος των διαστημάτων φρουράς και του κυκλικού προθέματος στην καταπολέμηση ISI και ICI....	60
3.10	Αποδοτικότητα φάσματος OFDM έναντι συμβατικού FDM.....	61

4.1	Οι αναμενόμενοι ρυθμοί στοιχείων 802.11a, 802.11b και 802.11g σε Ποικίλη Απόσταση από το Σημείο Πρόσβασης.....	66
4.2	Σχετική Περιοχή των Συσκευών 802.11b, 802.11g, και 802.11a.....	67
4.3	Απώλεια διαδρομών ελεύθερου χώρου στα 2.4 GHz και 5 GHz.....	73
4.4	Ρυθμοαποδόσεις στρώματος MAC για απλά κυψελοειδή δίκτυα.....	74
4.5	Απεικόνιση δια-καναλικών γειτονικών κυψελών σε ένα σύστημα 3-καναλιών.....	75
4.6	Επίδειξη του αριθμού των πιθανών διαμορφώσεων χωρίς δια-καναλικές παρακείμενες κυψέλες, συναρτήσει του αριθμού των διαθέσιμων καναλιών.....	76
4.7	Ρυθμοαποδόσεις στρώματος MAC για πολλαπλά κυψελοειδή δίκτυα.....	77
4.8	Απλή απεικόνιση της επιβάρυνσης προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού 802.11 προτύπου.....	78
4.9	Απλή απεικόνιση του προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού, της υποδοχής, και των γενικών εξόδων πλαισίων αναφοράς (ACK) του 802.11 προτύπου.....	79
4.10	Μείωση του ρυθμού στοιχείων προκαλούμενου από τη χρήση ενός χρόνου υποδοχής των 20 μ sec.....	81
4.11	Σχηματικό διάγραμμα μιας κατάστασης επικαλυπτόμενων BSS.....	81
4.12	Επίδειξη της ρυθμοαπόδοσης συσκευών όταν υπαναχωρούν μεταξύ τους.....	82
4.13	Σχηματικό διάγραμμα μιας μεικτής διαμόρφωσης.....	82
4.14	α) RTS/CTS εναντίον β) CTS-to-self.....	88
5.1	Σχηματική αναπαράσταση ενός 802.11g OFDM 36 Mbps Fading Συστήματος WLAN.....	90
5.2	Αναλυτική Σχηματική Αναπαράσταση ενός 802.11g OFDM 36 Mbps Fading Συστήματος WLAN.....	97
5.3	BER Απόδοση (Rate=5, $V_x=0.0$, AntHeight= 20 meter).....	98
5.4	BER Απόδοση (Rate=6, $V_x=0.0$, AntHeight=20 meter).....	99
5.5	BER Απόδοση (Rate=7, $V_x=0.0$, AntHeight=20 meter).....	100
5.6	BER Απόδοση (Rate=5, $V_x=100.0$, AntHeight=20 meter).....	101
5.7	BER Απόδοση (Rate=6, $V_x=100.0$, AntHeight=20 meter).....	102
5.8	BER Απόδοση (Rate=7, $V_x=100.0$, AntHeight=20 meter).....	103
5.9	BER Απόδοση (Rate=6, $V_x=0.0$, AntHeight=17 meter).....	104
5.10	BER Απόδοση (Rate=6, $V_x=0.0$, AntHeight=20 meter).....	105
5.11	BER Απόδοση (Rate=6, $V_x=0.0$, AntHeight=23 meter).....	106
5.12	Σύγκριση των 3 πρώτων μετρήσεων BER.....	107
5.13	Σύγκριση των 3 επόμενων μετρήσεων BER.....	108
5.14	Σύγκριση των 3 τελευταίων μετρήσεων BER.....	109

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

2.1	Χαρακτηριστικά του Φυσικού Στρώματος του προτύπου 802.11.....	42
3.1	Σύγκριση του ενιαίου φέροντος και της προσέγγισης πολλαπλών φερόντων από την άποψη της επιλεκτικότητας συχνότητας καναλιού.....	53
4.1	Ρυθμοί στοιχείων, τύποι μετάδοσης, και σχέδια διαμόρφωσης 802.11g προτύπου.....	65
4.2	Κατά προσέγγιση σύγκριση της ρυθμοαπόδοσης των προτύπων 802.11a, 802.11b και 802.11g.....	69
4.3	Προσεγγίσεις Χωρητικότητας Δικτύου των 802.11b, 802.11g και 802.11a προτύπων.....	69
4.4	Συγκριτικές Περιοχές σε ένα Ανοικτό Εσωτερικό Περιβάλλον Γραφείου μέσω Διαχωριστικών Τοίχων..	71
4.5	Αναμενόμενη Μέγιστη Ρυθμοαπόδοση για Περιβάλλοντα IEEE 802.11.....	72
4.6	Παράμετροι των διαφορετικών φυσικών στρωμάτων του προτύπου IEEE 802.11g.....	84
4.7	Παράμετροι φυσικού στρώματος για διαφορετικά σενάρια επικοινωνίας.....	87
5.1	Χαρακτηριστικά Μοντέλου A.....	91

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΡΟΣ Α - ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ

Σελίδα

Ευχαριστίες	3
Λίστα Σχημάτων	5
Λίστα Πινάκων	7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1.1	Εισαγωγή	11
1.2	Ιστορία των Ασύρματων Επικοινωνιών	12
1.3	Το Ασύρματο Όραμα	15
1.4	Τεχνικά Ζητήματα	17
1.5	Ασύρματες Τεχνολογίες	20
1.6	Βασικές Έννοιες Επικοινωνιών	21
1.7	Το ασύρματο κανάλι	24
1.7.1	Περιβαλλοντικός Θόρυβος	24
1.7.2	Απώλειες Διάδοσης	25
1.7.3	Πολλαπλές Διαδρομές	25
1.7.1.1	Παραμόρφωση λόγω πολύοδης διάδοσης	26
1.7.1.2	Απόσβεση λόγω πολύοδης διάδοσης	26
1.7.1.3	Επιλεκτική διάλεια συχνότητας έναντι επίπεδης διάλειψης	27
1.7.1.4	Φασματική διασπορά	27
1.7.1.5	Απόσβεση λόγω πολύοδης διάδοσης - Το πρόβλημα στο πεδίο του χρόνου	28
1.7.1.6	Αντιμετώπιση των πολλαπλών διαδρομών	30
1.7.4	Παρεμβολή	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΙΕΕΕ 802.11

2.1	Εισαγωγή	32
2.2	Αρχιτεκτονική WLAN	33
2.2.1	Τοπολογίες WLAN	33
2.2.2	Συστατικά μέρη ενός WLAN	35
2.2.3	Τρόπος λειτουργίας των Ασύρματων Τοπικών Δικτύων	36
2.2.4	Οφέλη των Ασύρματων Τοπικών Δικτύων	37
2.3	Στρώμα ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC Layer)	38
2.3.1	Επισκόπηση του στρώματος MAC	38
2.3.2	Μηχανισμοί πρόσβασης μέσου του προτύπου 802.11	38
2.3.2.1	Πλαίσιο αναφοράς λήψης	39
2.3.2.2	Το πρόβλημα του κρυφού κόμβου και ο μηχανισμός RTS/CTS	39
2.3.3	Προεκτάσεις QoS	41
2.4	Τεχνολογίες Φυσικού Επιπέδου του προτύπου 802.11	41
2.4.1	Πρότυπα WLAN	43
2.5	Τεχνολογικές Επιλογές WLAN	44
2.5.1	Διεύρυνση Φάσματος	44
2.5.2	Διεύρυνση Φάσματος με άλματα συχνότητας	44
2.5.3	Διεύρυνση Φάσματος ευθείας ακολουθίας	45
2.5.4	Τεχνολογία ζώνης στενού εύρους	46

2.6	Απόδοση Δέκτη WLAN	46
2.6.1	Βασικές Έννοιες της απόδοσης δέκτη	46
2.6.2	Μετρήσεις απόδοσης δέκτη	47
2.6.2.1	Ρυθμός εκπομπής εσφαλμένων bit (BER)	47
2.6.2.2	Θόρυβος και BER	47
2.6.2.3	Ορισμός E_b/N_0	48
2.6.2.4	Παράγοντες που επηρεάζουν το BER	48
2.6.2.5	Μετρήσεις BER	48
2.6.2.6	Χρήση στοιχείων BER	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ OFDM

3.1	Εισαγωγή	50
3.2	Διαμόρφωση Πολλαπλών Φερόντων	50
3.2.1	Εισαγωγή	50
3.2.2	Οφέλη της Διαμόρφωσης Πολλαπλών Φερόντων	51
3.3	OFDM για Κινητές Επικοινωνίες	54
3.3.1	Θεωρία της Λειτουργίας OFDM	57
3.4	Πλεονεκτήματα ενός Συστήματος OFDM	59
3.4.1	Καταπολέμηση του ISI και μείωση του ICI	59
3.4.2	Φασματική Αποδοτικότητα	60
3.4.3	Μερικά Άλλα Πλεονεκτήματα των Συστημάτων OFDM	61
3.5	Μειονεκτήματα ενός Συστήματος OFDM	62
3.5.1	Αυστηρή Απαίτηση Συγχρονισμού	62
3.5.2	Αναλογία ισχύος κορυφής προς μέση ισχύ (PAPR)	63
3.5.3	Δια-καναλική Παρεμβολή στα Κυψελοειδή OFDM	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕΕΕ 802.11g

4.1	Εισαγωγή	65
4.2	Απόδοση, χωρητικότητα και χαρακτηριστικά του προτύπου 802.11g	66
4.2.1	Ρυθμοί στοιχείων του προτύπου 802.11g	66
4.2.2	Περιοχή και Ρυθμός στοιχείων του προτύπου 802.11g	66
4.2.3	Απόδοση και Χωρητικότητα του προτύπου 802.11g	67
4.3	Εκτιμήσεις περιβάλλοντος δικτύου	71
4.3.1	Περιβάλλον Κληρονομημένων Συσκευών 802.11b	71
4.3.1.1	Ρυθμοαπόδοση του προτύπου 802.11g	71
4.3.1.2	Συμβατότητα του προτύπου 802.11g	72
4.3.2	Περιβάλλον Συσκευών 802.11g	72
4.3.2.1	Επίδραση της διάδοσης	73
4.3.2.2	Επίδραση της ζώνης συχνότητας και του αριθμού καναλιών	74
4.3.3	Συνύπαρξη με Συσκευές 802.11b	77
4.3.3.1	Τεχνικοί όροι	77
4.3.3.2	Πλαισίωση και Προπορευόμενο Σήμα Συγχρονισμού	77
4.3.3.3	Πρόσβαση καναλιού και χρόνος υποδοχής	79
4.3.4	Περίπτωση επικαλυπτόμενων BSS	81
4.3.5	Μεικτού τύπου δίκτυα	82
4.4	Νέα Χαρακτηριστικά Γνωρίσματα του προτύπου 802.11g	83
4.4.1	Τέσσερα διαφορετικά φυσικά επίπεδα	83
4.4.1.1	Υποχρεωτική υποστήριξη του βραχυπρόθεσμου Προπορευόμενου Σήματος Συγχρονισμού	84
4.4.1.2	Η ERP Ιδιότητα Δικτύου	85
4.4.1.3	Πτυχές διαλειτουργικότητας και μηχανισμοί προστασίας	86
4.4.1.4	Ο μηχανισμός CTS-to Self	87

ΜΕΡΟΣ Β - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ WLAN

5.1	Εισαγωγή	89
5.2	Μοντέλο Συστήματος	90
5.2.1	Περιγραφή Συστήματος	90
5.2.2	Χαρακτηριστικά Συστήματος	91
5.2.3	Προδιαγραφές Συστήματος	92
5.2.4	Συστατικά Μέρη Συστήματος	92
5.2.4.1	Μετάδοση	92
5.2.4.2	Το Ραδιοκάνάλι	94
5.2.4.3	Λήψη	95
5.3	Αποτελέσματα Προσομοίωσης	97
5.3.1	Σχετικά με τις Μετρήσεις	97
5.3.2	Περιπτώσεις Μετρήσεων BER	98
5.3.2.1	Μέτρηση 1η	98
5.3.2.2	Μέτρηση 2η	99
5.3.2.3	Μέτρηση 3η	100
5.3.2.4	Μέτρηση 4η	101
5.3.2.5	Μέτρηση 5η	102
5.3.2.6	Μέτρηση 6η	103
5.3.2.7	Μέτρηση 7η	104
5.3.2.8	Μέτρηση 8η	105
5.3.2.9	Μέτρηση 9η	106
5.4	Σύγκριση Αποτελεσμάτων	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1	Συμπεράσματα	110
	Συντομογραφίες	111
	Βιβλιογραφία-Αναφορές	112

ΜΕΡΟΣ Α΄

Κεφάλαιο 1

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Οι ασύρματες επικοινωνίες είναι, με οποιοδήποτε μέτρο σύγκρισης, το γρηγορότερα αυξανόμενο τμήμα της βιομηχανίας των επικοινωνιών. Υπό αυτήν τη μορφή, έχει κερδίσει την προσοχή των μέσων και την φαντασία του κοινού. Τα κυψελοειδή συστήματα έχουν υποστεί εκθετική αύξηση κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας και υπάρχουν επί του παρόντος περίπου δύο δισεκατομμύρια χρήστες παγκοσμίως. Πράγματι, τα κυψελοειδή τηλέφωνα έχουν γίνει ένα κρίσιμο επιχειρησιακό εργαλείο και μέρος της καθημερινής ζωής στις περισσότερες αναπτυγμένες χώρες, αντικαθιστώντας γρήγορα τα απαρχαιωμένα συστήματα καλωδιώσεων σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες. Επιπλέον, τα ασύρματα δίκτυα τοπικής περιοχής συμπληρώνουν ή αντικαθιστούν, συγχρόνως, τα ενσύρματα δίκτυα σε πολλά σπίτια, επιχειρήσεις, και πανεπιστημιοπόλεις. Πολλές νέες εφαρμογές - συμπεριλαμβανομένων των ασύρματων αισθητήριων δικτύων (wireless sensor networks), αυτοματοποιημένων εθνικών οδών και εργοστασίων, έξυπνων σπιτιών, συσκευών, και τηλεϊατρικής εξ αποστάσεως - προκύπτουν από ερευνητικές ιδέες σε χειροπιαστά συστήματα. Η εκρηκτική αύξηση των ασύρματων συστημάτων που συνδέονται με τον πολλαπλασιασμό των υπολογιστών laptop και palmtop υποδηλώνει το φωτεινό μέλλον των ασύρματων δικτύων, και ως αυτόνομα συστήματα και ως τμήμα της μεγαλύτερης δικτύωσης υποδομής. Εντούτοις, πολλές τεχνικές προκλήσεις εμμένουν όσον αφορά το σχεδιασμό εύρωστων ασύρματων δικτύων, τα οποία θα παραγάγουν την απαραίτητη απόδοση για την υποστήριξη των αναδυόμενων εφαρμογών. Σε αυτό το εισαγωγικό κεφάλαιο θα αναθεωρηθεί εν συντομία η ιστορία των ασύρματων δικτύων από τα σήματα καπνού της προβιομηχανικής περιόδου έως τα κυψελοειδή, και άλλα ασύρματα δίκτυα του σήμερα. Συζητείται έπειτα το ασύρματο όραμα λεπτομερέστερα, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών προκλήσεων που πρέπει ακόμα να υπερνικηθούν. Περιγράφονται τα τρέχοντα ασύρματα συστήματα μαζί με τα αναδυόμενα συστήματα και τα πρότυπα. Το χάσμα μεταξύ των τρεχόντων και αναδυόμενων συστημάτων και του οράματος για τις μελλοντικές ασύρματες εφαρμογές δείχνει ότι πρέπει να γίνει πολλή δουλειά ακόμη, ώστε να πραγματοποιηθεί ένα τέτοιο όραμα.

1.2 Ιστορία των ασύρματων επικοινωνιών

Τα πρώτα ασύρματα δίκτυα αναπτύχθηκαν στη προβιομηχανική περίοδο. Αυτά τα συστήματα μετέδιδαν πληροφορίες πέρα από αποστάσεις οπτικής επαφής (εκτεταμένες αργότερα από τα τηλεσκόπια) χρησιμοποιώντας σήματα καπνού, επικοινωνία με δαυλούς, λαμπυρίζοντες καθρέφτες, φλόγες σημάτων, ή σηματοφόρες σημαίες. Ένα επιμελημένο σύνολο συνδυασμών σημάτων αναπτύχθηκε για να μεταδώσει τα σύνθετα μηνύματα με αυτά τα στοιχειώδη σήματα. Οι σταθμοί παρατήρησης χτίστηκαν στις κορυφές υψώματος και κατά μήκος των δρόμων για να αναμεταδώσουν αυτά τα μηνύματα πέρα από μεγάλες αποστάσεις. Αυτά τα πρόωρα δίκτυα επικοινωνίας αντικαταστάθηκαν πρώτα από το δίκτυο τηλεγράφων (που εφευρέθηκε από το Samuel Morse το 1838) και αργότερα από το τηλεφωνικό. Το 1895, μερικές δεκαετίες αφότου εφευρέθηκε το τηλέφωνο, ο Marconi κατέδειξε την πρώτη ραδιομετάδοση, και οι ραδιοεπικοινωνίες γεννήθηκαν. Η ραδιοτεχνολογία προόδευσε γρήγορα για να επιτρέψει τις μεταδόσεις πέρα από μεγαλύτερες αποστάσεις με καλύτερη ποιότητα, λιγότερη ισχύ, και μικρότερες, φτηνότερες συσκευές, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τις δημόσιες και ιδιωτικές ραδιοεπικοινωνίες, την τηλεόραση, και την ασύρματη δικτύωση.

Τα πρόωρα ραδιοσυστήματα μετέδιδαν αναλογικά σήματα. Σήμερα τα περισσότερα ραδιοσυστήματα μεταδίδουν ψηφιακά σήματα που αποτελούνται από δυαδικά ψηφία, όπου τα ψηφία λαμβάνονται άμεσα από ένα σήμα στοιχείων ή με την ψηφιοποίηση ενός αναλογικού σήματος. Ένα ψηφιακό ραδιοκύμα (radio) μπορεί να μεταδώσει ένα συνεχές ρεύμα δυαδικών ψηφίων ή μπορεί να ομαδοποιήσει τα ψηφία σε πακέτα. Ο τελευταίος τύπος ραδιοκύματος καλείται *ραδιοπακέτο* και χαρακτηρίζεται συχνά από τις μεταδόσεις καταιγισμού (bursty): ο ραδιοπομπός είναι αδρανής εκτός από όταν μεταδίδει κάποιο πακέτο, αν και μπορεί να μεταδίδει συνεχώς πακέτα. Το πρώτο δίκτυο βασισμένο στο *ραδιοπακέτο*, το ALOHANET, αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Χαβάης το 1971. Αυτό το δίκτυο επέτρεψε σε τοποθεσίες υπολογιστών επτά πανεπιστημιούπολεων να εκπέμπουν σε πάνω από τέσσερα νησιά για να επικοινωνήσει με έναν κεντρικό υπολογιστή στο Oahu μέσω της ραδιομετάδοσης. Η δικτυακή αρχιτεκτονική χρησιμοποίησε μια τοπολογία αστέρα με τον κεντρικό υπολογιστή στο κομβικό σημείο της. Οποιοδήποτε δύο υπολογιστές θα μπορούσαν να εγκαταστήσουν μια αμφίδρομη σύνδεση επικοινωνιών περνώντας από το κομβικό σημείο. Το ALOHANET ενσωμάτωσε το πρώτο σύνολο πρωτοκόλλων για την πρόσβαση (access) καναλιού και δρομολόγησης στα συστήματα ραδιοπακέτου, και πολλές από τις βασικές αρχές αυτών των πρωτοκόλλων είναι σε χρήση ακόμα και σήμερα. Ο στρατός των ΗΠΑ ενδιαφερόταν υπερβολικά για αυτόν το συνδυασμό πακέτων στοιχείων και εκπομπής ραδιοκύματος. Καθ' όλη τη διάρκεια της δεκαετίας του '70 και αρχές της δεκαετίας του '80 το Πρακτορείο Προηγμένων Ερευνητικών Έργων Άμυνας (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) επένδυσε σημαντικούς πόρους για την ανάπτυξη δικτύων που χρησιμοποιούν ραδιοπακέτα για τις τακτικές επικοινωνίες στο πεδίο μάχης. Οι κόμβοι σε αυτά τα ειδικά ασύρματα δίκτυα είχαν την δυνατότητα να αυτό-διαμορφώνονται (ή να επαναδιαμορφώνονται) σε ένα δίκτυο χωρίς την ενίσχυση οποιασδήποτε καθιερωμένης υποδομής.

Η επένδυση του DARPA στα ad hoc δίκτυα κορυφώθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '80, αλλά τα προκύπτοντα συστήματα υπολήφθησαν αρκετά των προσδοκιών από άποψη ταχύτητας και απόδοσης. Αυτά τα δίκτυα συνεχίζουν να αναπτύσσονται για στρατιωτική χρήση. Τα δίκτυα ραδιοπακέτων βρήκαν επίσης εμπορική εφαρμογή στην υποστήριξη ασύρματων υπηρεσιών στοιχείων ευρείας περιοχής (wide area wireless data services). Οι υπηρεσίες, που εισάγονται στις αρχές της δεκαετίας του '90, επέτρεψαν την ασύρματη πρόσβαση στοιχείων (συμπεριλαμβανομένου του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, της μεταφοράς αρχείων, και του φυλλομετρητή Ιστού) με αρκετά χαμηλές ταχύτητες, της τάξης των 20 kbps. Καμία ισχυρή αγορά δεν υλοποιήθηκε ποτέ πραγματικά για αυτές τις ασύρματες υπηρεσίες στοιχείων ευρείας περιοχής, κυρίως λόγω των χαμηλών ρυθμών στοιχείων τους και το υψηλό κόστος τους. Αυτές οι υπηρεσίες εξαφανίστηκαν κυρίως στη δεκαετία του '90, οι οποίες αντικαταστάθηκαν από τις δυνατότητες των ασύρματων στοιχείων των κυψελοειδών τηλεφώνων και των ασύρματων δικτύων τοπικής περιοχής (WLAN).

Η εισαγωγή της ενσύρματης τεχνολογίας Ethernet στη δεκαετία του '70 οδήγησε πολλές εμπορικές επιχειρήσεις μακριά από την βασισμένη σε ραδιοκύματα δικτύωση. Ο 10 Mbps ρυθμός στοιχείων του Ethernet υπερέβη μακράν οτιδήποτε διαθέσιμο χρησιμοποιούσε ραδιοκύματα, και έτσι οι επιχειρήσεις πέρασαν καλώδια στις εγκαταστάσεις τους για να εκμεταλλευθούν αυτά τα υψηλά ποσοστά. Το 1985 η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) επέτρεψε την εμπορική ανάπτυξη ασύρματων LAN με την έγκριση της δημόσιας χρήσης των βιομηχανικών, επιστημονικών, και ιατρικών (ISM) ζωνών συχνότητας για τα ασύρματα προϊόντα του τοπικού LAN. Η ISM ζώνη ήταν ελκυστική στους ασύρματους προμηθευτές του τοπικού LAN επειδή δεν έπρεπε να λάβουν την άδεια της FCC για να λειτουργήσουν σε αυτήν την ζώνη. Εντούτοις, δεν επιτράπηκε στα ασύρματα συστήματα του τοπικού LAN να παρεμποδίσουν τους αρχικούς χρήστες της ISM ζώνης, οι οποίοι τους ανάγκασαν να χρησιμοποιήσουν ένα χαμηλό προφίλ ισχύος και ένα ανεπαρκές σηματοδοτικό πλάνο ενεργειών. Επιπλέον, η παρεμβολή από τους αρχικούς χρήστες μέσα σε αυτήν την ζώνη συχνότητας ήταν αρκετά υψηλή. Κατά συνέπεια, αυτά τα αρχικά ασύρματα LAN είχαν πολύ κακή απόδοση από άποψη ρυθμών στοιχείων (data rates) και κάλυψης (coverage). Αυτή η κακή απόδοση - που συνδέεται με ανησυχίες για την ασφάλεια, την έλλειψη τυποποίησης, και το υψηλό κόστος (τα πρώτα ασύρματα σημεία πρόσβασης του τοπικού LAN κοστολογούνται στα \$1400 σε σύγκριση με μερικές εκατοντάδες δολάρια για μια ενσύρματη κάρτα Ethernet) - οδήγησε σε ασθενείς πωλήσεις. Λίγα από αυτά τα συστήματα χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά για δικτύωση στοιχείων: υποβιβάστηκαν για εφαρμογές χαμηλής-τεχνολογίας όπως για έλεγχο καταλόγων. Η τρέχουσα γενιά των ασύρματων LAN, βασισμένη στην οικογένεια των προτύπων IEEE 802.11, έχει καλύτερη απόδοση, αν και οι ρυθμοί στοιχείων είναι ακόμα σχετικά χαμηλοί (μέγιστοι συλλογικοί ρυθμοί στοιχείων δεκάδων Mbps) και η περιοχή κάλυψης είναι ακόμα μικρή (περίπου 100 μ). Τα ενσύρματα Ethernet σήμερα προσφέρουν ρυθμούς στοιχείων 1 Gbps, και το χάσμα απόδοσης μεταξύ ενσύρματων και ασύρματων LAN είναι πιθανό να αυξηθεί

κατά τη διάρκεια του χρόνου χωρίς πρόσθετη κατανομή φάσματος. Παρά τους χαμηλότερους ρυθμούς στοιχείων τους, τα ασύρματα LAN γίνονται η προτιμώμενη μέθοδος πρόσβασης Διαδικτύου σε πολλά σπίτια, γραφεία, και πανεπιστημιούπολεις εξ αιτίας της ευκολίας εγκατάστασης και της ελευθερίας από καλώδια. Εντούτοις, τα περισσότερα ασύρματα LAN υποστηρίζουν εφαρμογές, όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και η φυλλομέτρηση Ιστού, οι οποίες δεν είναι ευρυζωνικές. Η πρόκληση για τα μελλοντικά ασύρματα LAN θα είναι να υποστηρίζουν πολλούς χρήστες ταυτόχρονα με μεγαλύτερο εύρος ζώνης και εφαρμογές ζώνης στενού εύρους όπως το βίντεο. Η επέκταση περιοχής είναι επίσης ένας κρίσιμος στόχος για τα μελλοντικά ασύρματα συστήματα τοπικού LAN.

Η επιτυχεστέρα εφαρμογή της ασύρματης δικτύωσης είναι, μακράν, το κυψελοειδές τηλεφωνικό σύστημα. Οι ρίζες αυτού του συστήματος άρχισαν το 1915, όταν καθιερώθηκε αρχικά η ασύρματη μετάδοση φωνής μεταξύ της Νέας Υόρκης και του Σαν Φρανσίσκο. Το 1946, η δημόσια υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας εισήχθη σε 25 πόλεις στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτά τα αρχικά συστήματα χρησιμοποίησαν έναν κεντρικό πομπό για να καλύψουν μια ολόκληρη μητροπολιτική περιοχή. Αυτή η ανεπαρκής χρήση του ραδιοφάσματος - που συνδέθηκε με την κατάσταση της ραδιοτεχνολογίας εκείνη την περίοδο - περιόρισε σοβαρά τη χωρητικότητα των συστημάτων: τριάντα χρόνια μετά από την εισαγωγή της υπηρεσίας κινητής τηλεφωνίας, το σύστημα της Νέας Υόρκης μπορούσε να υποστηρίξει μόνο 543 χρήστες.

Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα χωρητικότητας προέκυψε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '50 και της δεκαετίας του '60 δεδομένου ότι οι ερευνητές στα AT&T Bell Laboratories ανέπτυξαν την κυψελοειδή έννοια. Τα κυψελοειδή συστήματα εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι η ισχύς ενός μεταδιδόμενου σήματος μειώνεται με την απόσταση. Κατά συνέπεια, δύο χρήστες μπορούν να αναπτύξουν δραστηριότητες στην ίδια συχνότητα σε χωριστές θέσεις χωροταξικά με την ελάχιστη μεταξύ τους παρεμβολή. Αυτό επιτρέπει την αποδοτική χρήση του κυψελοειδούς φάσματος, έτσι ώστε να μπορεί να φιλοξενηθεί ένας μεγάλος αριθμός χρηστών. Η εξέλιξη των κυψελοειδών συστημάτων από την αρχική έννοια στην εφαρμογή ήταν αργή. Το 1947, το AT&T ζήτησε φάσμα για την κυψελοειδή υπηρεσία από την FCC. Το σχέδιο ολοκληρώθηκε προς τα τέλη της δεκαετίας του '60 αλλά η πρώτη δοκιμή πεδίου δεν έγινε πριν από το 1978, και η FCC χορήγησε την έγκριση υπηρεσιών το 1982 - όταν ένα μεγάλο μέρος της αρχικής τεχνολογίας ήταν απαρχαιωμένο. Το πρώτο αναλογικό κυψελοειδές σύστημα, που αναπτύχθηκε στο Σικάγο το 1983, είχε ήδη κορεστεί μέχρι το 1984, όταν η FCC αύξησε την κυψελοειδή φασματική κατανομή από 40 MHz σε 50 MHz. Η εκρηκτική αύξηση της κυψελοειδούς βιομηχανίας αιφνιδίασε τους πάντες. Στην πραγματικότητα, μια μελέτη μάρκετινγκ ανατεθειμένη από το AT&T πριν από την πρώτη δημόσια παρουσίαση του συστήματος πρόβλεψε ότι η απαίτηση για τα κυψελοειδή τηλέφωνα θα περιοριζόταν στους γιατρούς και τους πολύ πλούσιους. Το AT&T εγκατέλειψε βασικά την κυψελοειδή επιχείρηση στη δεκαετία του '80 για να εστιάσει στα δίκτυα οπτικών ινών, αφότου το δυναμικό τους έγινε προφανές. Προς τα τέλη της δεκαετίας του '80 - καθώς σε όλο και περισσότερες πόλεις επήλθε κορεσμός με την απαίτηση για κυψελοειδή υπηρεσία - η ανάπτυξη της ψηφιακής κυψελοειδούς τεχνολογίας για αυξανόμενη χωρητικότητα και καλύτερη απόδοση έγινε απαραίτητη.

Η δεύτερη γενιά των κυψελοειδών συστημάτων, που αναπτύχθηκε πρώτα στις αρχές της δεκαετίας του '90, βασίστηκε στις ψηφιακές επικοινωνίες. Η μετατόπιση από το αναλογικό στο ψηφιακό οδηγήθηκε από την υψηλότερη χωρητικότητα και το βελτιωμένο κόστος τους, την ταχύτητα, και την αποδοτικότητα ισχύος του ψηφιακού υλικού. Αν και τα δεύτερης γενιάς κυψελοειδή συστήματα παρείχαν αρχικά κυρίως υπηρεσίες φωνής, αυτά τα συστήματα εξελίχθηκαν βαθμιαία ώστε να υποστηρίζουν υπηρεσίες στοιχείων όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, η πρόσβαση Διαδικτύου, και το βραχυπρόθεσμο μήνυμα (short messaging). Δυστυχώς, το σπουδαίο δυναμικό της αγοράς για τα κυψελοειδή τηλέφωνα οδήγησε σε έναν πολλαπλασιασμό των δεύτερης γενιάς κυψελοειδών προτύπων: τρία διαφορετικά πρότυπα στις Ηνωμένες Πολιτείες μόνο, άλλο πρότυπο στην Ευρώπη και την Ιαπωνία, και όλα ασύμβατα. Το γεγονός ότι διαφορετικές πόλεις έχουν διαφορετικά ασύμβατα πρότυπα κάνει την περιπλάνηση(roaming) ανά τον κόσμο με μόνο ένα κυψελοειδές τηλεφωνικό πρότυπο αδύνατη. Επιπλέον, μερικές χώρες έχουν ξεκινήσει υπηρεσίες για συστήματα τρίτης γενιάς, για τα οποία υπάρχουν επίσης πολλαπλάσια ασύμβατα πρότυπα. Ως αποτέλεσμα αυτών των πολλαπλών προτύπων, πολλά κυψελοειδή τηλέφωνα είναι σήμερα πολυλειτουργικά: ενσωματώνουν πολλαπλά ψηφιακά πρότυπα ώστε να διευκολύνουν την περιπλάνηση σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο και ενδεχομένως πρώτης γενιάς αναλογικά πρότυπα.

1.3 Το Ασύρματο Όραμα

Το όραμα της υποστήριξης ανταλλαγής πληροφοριών μέσω των ασύρματων επικοινωνιών μεταξύ ανθρώπων ή συσκευών είναι το επικοινωνιακό σύνορο των επόμενων δεκαετιών, και ένα μεγάλο μέρος του υπάρχει ήδη σε κάποια μορφή. Αυτό το όραμα θα επιτρέψει την επικοινωνία πολυμέσων από οπουδήποτε στον κόσμο χρησιμοποιώντας μια μικρή φορητή συσκευή ή ένα laptop. Τα ασύρματα δίκτυα θα συνδέουν palmtop, laptop, και υπολογιστές γραφείου οπουδήποτε μέσα σε ένα κτήριο γραφείων ή μια πανεπιστημιούπολη, καθώς επίσης και από τα γωνιακά καφέ. Στο σπίτι, αυτά τα δίκτυα, θα επιτρέψουν μια νέα κατηγορία ευφών ηλεκτρονικών συσκευών που θα μπορούν να αλληλεπιδρούν η μια με την άλλη και με το Διαδίκτυο εκτός από την παροχή συνεκτικότητας (connectivity) μεταξύ υπολογιστών, τηλεφώνων και συστημάτων ασφάλειας / ελέγχου. Τέτοια "έξυπνα" σπίτια μπορούν επίσης να βοηθήσουν τους ηλικιωμένους και τα άτομα με ειδικές ανάγκες με τη βοηθημένη διαβίωση, τον έλεγχο ασθενών, και την απόκριση έκτακτης ανάγκης. Η ασύρματη ψυχαγωγία θα διαπεράσει το σπίτι και οποιοδήποτε μέρος όπου συναθροίζονται οι άνθρωποι. Το σύστημα εκπομπής τηλεδιασκέψεων θα πραγματοποιηθεί μεταξύ κτηρίων που είναι οικοδομικά τετράγωνα ή ηπείρους μακριά, και αυτές οι διασκέψεις μπορούν να περιλάβουν και τους ταξιδιώτες. Το ασύρματο βίντεο θα επιτρέψει τάξεις εξ αποστάσεως, εγκαταστάσεις κατάρτισης, και νοσοκομεία οπουδήποτε στον κόσμο. Οι ασύρματοι αισθητήρες έχουν μια τεράστια γκάμα εμπορικών και στρατιωτικών εφαρμογών.

Οι εμπορικές εφαρμογές περιλαμβάνουν έλεγχο κινδύνων πυρκαγιάς, περιοχών τοξικών αποβλήτων, πίεσης και κλίσης κτηρίων και γεφυρών, μετακίνηση διοξειδίου του άνθρακα, διάδοση χημικών ουσιών και δηλητηριωδών αερίων σε ένα τόπο καταστροφής. Αυτοί οι ασύρματοι αισθητήρες αυτοδιαμορφώνονται σε ένα δίκτυο για να επεξεργαστούν και να ερμηνεύσουν τις μετρήσεις των αισθητήρων και να μεταβιβάσουν έπειτα αυτές τις πληροφορίες σε μια κεντρική θέση ελέγχου. Οι στρατιωτικές εφαρμογές περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό και την καταδίωξη των εχθρικών στόχων, την ανίχνευση χημικών και βιολογικών επιθέσεων, την υποστήριξη τηλεκατευθυνόμενων ρομποτικών οχημάτων, και την αντιτρομοκρατία. Τέλος, τα ασύρματα δίκτυα επιτρέπουν τη σύνδεση μεταξύ κατανεμημένων συστημάτων ελέγχου με απομακρυσμένες συσκευές, αισθητήρες, και ενεργοποιητές μέσω ασύρματων καναλιών επικοινωνίας. Τέτοια συστήματα επιτρέπουν στη συνέχεια αυτοματοποιημένες εθνικές οδούς, κινητά ρομπότ, και την εύκολα επαναδιαμορφωμένη βιομηχανική αυτοματοποίηση.

Οι διάφορες εφαρμογές που περιγράφονται εδώ είναι όλα συστατικά του ασύρματου οράματος. Άλλα τι, ακριβώς, είναι οι ασύρματες επικοινωνίες; Υπάρχουν πολλοί τρόποι να τμηματοποιηθεί αυτό το σύνθετο θέμα στις διαφορετικές εφαρμογές, τα συστήματα, ή τις περιοχές κάλυψης. Οι ασύρματες εφαρμογές περιλαμβάνουν φωνή, πρόσβαση Διαδικτύου, φυλλομετρητή Ιστού, σελιδοποίηση και βραχυπρόθεσμο μήνυμα, υπηρεσίες πληροφοριών συνδρομητών, μεταφορά αρχείων, σύστημα εκπομπής τηλεδιασκέψεων, ψυχαγωγία, ανιχνευσιμότητα, και κατανεμημένο έλεγχο. Τα συστήματα περιλαμβάνουν κυψελοειδή τηλεφωνικά συστήματα, ασύρματα LAN, ασύρματα συστήματα στοιχείων ευρείας περιοχής, δορυφορικά συστήματα, και ad hoc ασύρματα δίκτυα. Οι περιοχές κάλυψης περιλαμβάνουν, μια πανεπιστημιούπολη, μια πόλη, περιφερειακά και σφαιρικά. Η ερώτηση για το πόσο καλύτερα μπορούν να χαρακτηριστούν οι ασύρματες επικοινωνίες κατά μήκος των διάφορων τμημάτων έχει οδηγήσει τη βιομηχανία σε αξιοσημείωτο τεμαχισμό, όπως αποδεικνύεται από τα πολλά διαφορετικά ασύρματα προϊόντα, τα πρότυπα, και τις υπηρεσίες που προσφέρονται ή προτείνονται. Ένας λόγος για αυτόν τον τεμαχισμό είναι ότι διαφορετικές ασύρματες εφαρμογές έχουν διαφορετικές απαιτήσεις. Τα συστήματα φωνής έχουν σχετικά χαμηλές απαιτήσεις σε ρυθμούς εκπομπής στοιχείων (περίπου 20 kbps) και μπορούν να ανεχτούν αρκετά υψηλή πιθανότητα εσφαλμένων bit (ρυθμούς εκπομπής εσφαλμένων bit, ή BER, περίπου 10^{-3}), αλλά η συνολική καθυστέρηση πρέπει να είναι κάτι λιγότερο από περίπου 100 ms ειδάλλως γίνεται αξιοπρόσεχτο στον τελικό χρήστη. Αφ' ετέρου, τα συστήματα στοιχείων, χαρακτηριστικά, απαιτούν πολύ υψηλότερους ρυθμούς εκπομπής στοιχείων (1-100 Mbps) και πολύ μικρά BER (ένα BER περίπου της τάξης των 10^{-8} ή λιγότερο, και όλα τα εσφαλμένα bit πρέπει να αναμεταδοθούν) αλλά δεν έχουν μια σταθερή απαίτηση καθυστέρησης. Τα πραγματικού χρόνου συστήματα εκπομπής συνδέουν τις υψηλές απαιτήσεις ρυθμών εκπομπής στοιχείων με τους ίδιους περιορισμούς καθυστέρησης με τα συστήματα φωνής, ενώ η σελιδοποίηση και το βραχυπρόθεσμο μήνυμα έχουν πολύ χαμηλή απαίτηση ρυθμού εκπομπής στοιχείων και κανέναν σκληρό περιορισμό καθυστέρησης. Αυτές οι διαφορετικές απαιτήσεις για τις διαφορετικές εφαρμογές καθιστούν δύσκολο να χτιστεί ένα ασύρματο σύστημα που να μπορεί αποτελεσματικά να

ικανοποιήσει όλες αυτές τις απαιτήσεις ταυτόχρονα. Τα ενσύρματα δίκτυα ικανοποιούν τις διαφορετικές απαιτήσεις των διαφορετικών εφαρμογών χρησιμοποιώντας ένα ενιαίο πρωτόκολλο, το οποίο σημαίνει ότι οι πιο αυστηρές απαιτήσεις για όλες τις εφαρμογές πρέπει να καλυφθούν ταυτόχρονα. Αυτό μπορεί να είναι δυνατό σε μερικά ενσύρματα δίκτυα - με ρυθμούς εκπομπής στοιχείων της τάξης των Gbps και BER της τάξης των 10^{-12} - αλλά δεν είναι δυνατό στα ασύρματα δίκτυα, τα οποία έχουν πολύ χαμηλότερους ρυθμούς εκπομπής στοιχείων και υψηλότερα BER. Για αυτούς τους λόγους, τουλάχιστον στο εγγύς μέλλον, τα ασύρματα συστήματα θα συνεχίσουν να τεμαχίζονται, με διαφορετικά πρωτόκολλα που προσαρμόζονται για να υποστηρίξουν τις απαιτήσεις των διαφορετικών εφαρμογών.

Η εκθετική αύξηση της κυψελοειδής τηλεφωνικής χρήσης και της ασύρματης πρόσβασης Διαδικτύου έχει δημιουργήσει μεγάλη αισιοδοξία για την ασύρματη τεχνολογία γενικά. Προφανώς δεν θα ακμάσουν όλες οι ασύρματες εφαρμογές. Ενώ πολλά ασύρματα συστήματα και επιχειρήσεις έχουν απολαύσει θεαματική επιτυχία, έχουν υπάρξει επίσης πολλές αποτυχίες, συμπεριλαμβανομένου της πρώτης γενιάς ασύρματων LAN, του δορυφορικού συστήματος Iridium, υπηρεσίες στοιχείων ευρείας περιοχής όπως το Metricom, και η σταθερή ασύρματη πρόσβαση (fixed wireless access) (ασύρματο "καλώδιο") στο σπίτι. Πράγματι, είναι αδύνατο να προβλεφθούν οι ασύρματες αποτυχίες και θριάμβοι. Επιπλέον, πρέπει να υπάρξει ικανοποιητική ευελιξία και δημιουργικότητα μεταξύ των μηχανικών και των ρυθμιστών για να επιτρέψουν απροσδόκητες επιτυχίες. Είναι σαφές, εντούτοις, ότι τα τρέχοντα και αναδυόμενα ασύρματα συστήματα του σήμερα - που συνδέονται με το όραμα των εφαρμογών που η ασύρματη τεχνολογία μπορεί να επιτρέψει - εξασφαλίζουν λαμπρό μέλλον για την ασύρματη τεχνολογία.

1.4 Τεχνικά ζητήματα

Πολλές τεχνικές προκλήσεις πρέπει να εξεταστούν για να επιτρέψουν τις ασύρματες εφαρμογές του μέλλοντος. Αυτές οι προκλήσεις επεκτείνονται σε όλες τις πτυχές του σχεδιασμού συστημάτων. Δεδομένου ότι τα ασύρματα τερματικά προσθέτουν περισσότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, αυτές οι μικρές συσκευές πρέπει να ενσωματώσουν πολλαπλές καταστάσεις λειτουργίας προκειμένου να υποστηρίξουν τις διαφορετικές εφαρμογές και τα μέσα. Οι υπολογιστές επεξεργάζονται τη φωνή, την εικόνα, το κείμενο, και τα στοιχεία εκπομπής, αλλά απαιτούνται επαναστατικές μέθοδοι στο σχεδιασμό κυκλώματος για να εφαρμόσουν την ίδια πολύ-λειτουργικότητα σε μια φτηνή, ελαφριά, φορητή συσκευή. Οι καταναλωτές δεν θέλουν μεγάλες μπαταρίες που χρειάζονται συχνά επαναφόρτιση, έτσι η επεξεργασία μετάδοσης σήματος στο φορητό τερματικό πρέπει να καταναλώσει ελάχιστη ενέργεια. Η επεξεργασία σήματος που απαιτείται για την υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων και λειτουργιών δικτύωσης μπορεί να είναι εντατικής ισχύος. Κατά συνέπεια, τα ασύρματα δίκτυα υποδομής, όπως τα ασύρματα LAN και τα κυψελοειδή συστήματα, τοποθετούν όσο το δυνατόν περισσότερο φορτίο επεξεργασίας στις σταθερές περιοχές με μεγάλους πόρους ισχύος.

Οι σχετικές δυσχέρειες και τα μονά σημεία αποτυχίας είναι σαφώς ανεπιθύμητα για το γενικό σύστημα. Τα ad hoc δίκτυα χωρίς υποδομή είναι ιδιαίτερα ελκυστικά για πολλές εφαρμογές λόγω της ευελιξίας και της ευρωστίας τους. Γι' αυτά τα δίκτυα, όλη η επεξεργασία και ο έλεγχος πρέπει να εκτελεσθούν από τους κόμβους δικτύων με έναν κατανεμημένο τρόπο, που κάνει την πρόκληση της ενεργειακής αποδοτικότητας να επιτύχει. Η ενέργεια είναι ένας ιδιαίτερα κρίσιμος πόρος στα δίκτυα όπου οι κόμβοι δεν μπορούν να επαναφορτίσουν τις μπαταρίες τους - παραδείγματος χάριν, στις ανιχνευτικές εφαρμογές. Ο σχεδιασμός δικτύων για να καλύψει τις απαιτήσεις εφαρμογής κάτω από τέτοιους σκληρούς ενεργειακούς περιορισμούς παραμένει ένα μεγάλο τεχνολογικό εμπόδιο. Το πεπερασμένο εύρος ζώνης και οι απροσδόκητες παραλλαγές των ασύρματων καναλιών απαιτούν επίσης γερές εφαρμογές που υποβιβάζονται καθώς η δικτυακή απόδοση υποβιβάζεται.

Ο σχεδιασμός των ασύρματων δικτύων διαφέρει πλήρως από τον ενσύρματο σχεδιασμό δικτύων εξ αιτίας της φύσης του ασύρματου καναλιού. Αυτό το κανάλι είναι ένα απρόβλεπτο και δύσκολο μέσο επικοινωνιών. Καταρχήν, το ραδιοφάσμα είναι ένας ανεπαρκής πόρος που πρέπει να διατεθεί σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές και συστήματα. Για αυτόν τον λόγο, το φάσμα ελέγχεται από τους ρυθμιστικούς οργανισμούς περιφερειακά και σφαιρικά, συγχρόνως. Ένα περιφερειακό ή σφαιρικό σύστημα που λειτουργεί σε μια δεδομένη ζώνη συχνοτήτων πρέπει να υπακούει τους περιορισμούς για εκείνη την ζώνη που διατυπώνονται από το αντίστοιχο ρυθμιστικό σώμα. Το φάσμα μπορεί επίσης να είναι πολύ ακριβό: σε πολλές χώρες οι φασματικές άδειες δημοπρατούνται συχνά στον υψηλότερο πλειοδότη. Το αποκτηθέν φάσμα μέσω αυτών των δημοπρασιών πρέπει να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για να λάβει μια λογική απολαβή στην επένδυση, και πρέπει επίσης να επαναχρησιμοποιηθεί επανειλημμένως στη ίδια γεωγραφική περιοχή, απαιτώντας κατά συνέπεια τα κυψελοειδείς σχεδιασμούς συστημάτων με υψηλή χωρητικότητα και καλή απόδοση. Στις συχνότητες κάμποσων GHz, ασύρματα ραδιοσυστατικά με λογικό μέγεθος, κατανάλωση ισχύος, και κόστους είναι διαθέσιμα. Εντούτοις, το φάσμα σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων είναι εξαιρετικά συσσωρευμένο. Κατά συνέπεια, για να επιτρέψουν, οι τεχνολογικές επαναστατικές μέθοδοι, συστήματα υψηλής συχνότητας με το ίδιο κόστος και απόδοση θα μείωναν πολύ την έλλειψη φάσματος. Παρόλο που, η απώλεια διαδρομών (path loss) σε αυτές τις υψηλότερες συχνότητες είναι μεγαλύτερη με τις πανκατευθυντικές κεραιές, εντούτοις περιορίζουν την εμβέλεια.

Δεδομένου ότι ένα σήμα μεταδίδεται μέσω ενός ασύρματου καναλιού, δοκιμάζεται από τυχαίες διακυμάνσεις στο χρόνο εάν ο πομπός, ο δέκτης, ή τα περιβάλλοντα αντικείμενα κινούνται λόγω των μεταβαλλόμενων αντανάκλασεων και της εξασθένησης. Ως εκ τούτου τα χαρακτηριστικά του καναλιού εμφανίζονται να αλλάζουν τυχαία με το χρόνο, κάτι που καθιστά δύσκολο το σχεδιασμό αξιόπιστων συστημάτων με εγγυημένη απόδοση. Η ασφάλεια είναι επίσης δυσκολότερο να εφαρμοστεί στα ασύρματα συστήματα, δεδομένου ότι τα μέσα μετάδοσης των κυμάτων είναι ευπαθή από οποιονδήποτε με μια RF κεραία. Τα αναλογικά κυψελοειδή συστήματα δεν έχουν καμία ασφάλεια, και κάποιος μπορεί εύκολα να ακούσει συνομιλίες με την ανίχνευση της αναλογικής κυψελοειδής ζώνης συχνοτήτων. Όλα τα ψηφιακά κυψελοειδή συστήματα εφαρμόζουν κάποιο επίπεδο κρυπτογράφησης.

Εντούτοις, με αρκετή γνώση, χρόνο, και αποφασιστικότητα, οι περισσότερες από αυτές τις μεθόδους κρυπτογράφησης μπορούν να σπάσουν· πράγματι, αρκετοί έχουν συμβιβαστεί. Για να υποστηρίξει εφαρμογές όπως συναλλαγές ηλεκτρονικού εμπορίου και πίστωση-καρτών, το ασύρματο δίκτυο πρέπει να είναι ασφαλές ενάντια σε τέτοιους ακροατές.

Η ασύρματη δικτύωση είναι επίσης μια σημαντική πρόκληση. Το δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να εντοπίσει έναν δεδομένο χρήστη οπουδήποτε μεταξύ των δισεκατομμυρίων καταναμημένων κινητών τερματικών. Πρέπει έπειτα να δρομολογήσει μια κλήση σε εκείνο το χρήστη καθώς κινείται με ταχύτητες μέχρι 100 km/hr. Οι πεπερασμένοι πόροι του δικτύου πρέπει να διατεθούν κατά τρόπο δίκαιο και αποδοτικό σχετικά με τις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις και θέσεις των χρηστών. Επιπλέον, αυτή την περίοδο υπάρχει μια τεράστια υποδομή ενσύρματων δικτύων: το τηλεφωνικό σύστημα, το Διαδίκτυο, και τα καλώδια οπτικά ινών - που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να συνδέσουν τα ασύρματα συστήματα με ένα παγκόσμιο δίκτυο. Εντούτοις, τα ασύρματα συστήματα με τους κινητούς χρήστες δεν θα είναι ποτέ σε θέση να ανταγωνιστούν με τα ενσύρματα συστήματα από την άποψη των ρυθμών και της αξιοπιστίας εκπομπής στοιχείων. Η διασύνδεση μεταξύ των ασύρματων και ενσύρματων δικτύων με το απέραντα διαφορετικό δυναμικό απόδοσης είναι ένα δύσκολο πρόβλημα.

Ίσως η σημαντικότερη τεχνική πρόκληση στον ασύρματο σχεδιασμό δικτύων είναι μια εξέταση της ίδιας της διαδικασίας σχεδιασμού. Τα ενσύρματα δίκτυα σχεδιάζονται συνήθως σύμφωνα με μια προσέγγιση διάταξης σε στρώματα, με την οποία τα πρωτόκολλα που συνδέονται με διαφορετικά στρώματα της λειτουργίας του συστήματος σχεδιάζονται μεμονωμένα, με μηχανισμούς βασικής γραμμής για τη διασύνδεση των στρωμάτων. Τα στρώματα σε ένα ασύρματο σύστημα περιλαμβάνουν: τη σύνδεση ή το φυσικό στρώμα, το οποίο χειρίζεται τις μεταδόσεις των bit πέρα από το μέσο επικοινωνιών· το στρώμα πρόσβασης, το οποίο χειρίζεται την κοινή πρόσβαση στο μέσο επικοινωνιών· τα στρώματα δικτύου και μεταφοράς, τα οποία δρομολογούν τα στοιχεία μέσω του δικτύου και εξασφαλίζουν τερματική συνεκτικότητα και παράδοση στοιχείων· και το στρώμα εφαρμογής, το οποίο υπαγορεύει τους τερματικούς ρυθμούς εκπομπής στοιχείων και τους περιορισμούς καθυστέρησης που συνδέονται με την εφαρμογή. Ενώ μια μεθοδολογία διάταξης σε στρώματα μειώνει την πολυπλοκότητα και διευκολύνει τη συναρμολογησιμότητα και την τυποποίηση, οδηγεί επίσης στην ανεπάρκεια και την απώλεια απόδοσης λόγω της έλλειψης μιας σφαιρικής βελτιστοποίησης σχεδιασμού. Η μεγάλη χωρητικότητα και καλή αξιοπιστία των ενσύρματων δικτύων καθιστούν αυτές τις ανεπάρκειες σχετικά ήπιες για πολλές ενσύρματες δικτυακές εφαρμογές, αν και αποκλείουν καλή απόδοση από τις ζώνες στενού εύρους εφαρμογές όπως φωνή και βίντεο. Η κατάσταση είναι πολύ διαφορετική σε ένα ασύρματο δίκτυο. Οι ασύρματες συνδέσεις μπορούν να εκθέσουν πολύ κακή απόδοση, και αυτή η απόδοση, μαζί με τη συνεκτικότητα των χρηστών και την τοπολογία δικτύων, αλλάζει κατά τη διάρκεια του χρόνου. Στην πραγματικότητα, η ίδια η έννοια μιας ασύρματης σύνδεσης είναι κάπως συγκεχυμένη εξ αιτίας της φύσης της ραδιοδιάδοσης και της εκπομπής.

Η δυναμική φύση και η κακή απόδοση του υποκείμενου ασύρματου καναλιού επικοινωνίας δείχνουν ότι τα υψηλής απόδοσης δίκτυα πρέπει να βελτιστοποιηθούν για αυτό το κανάλι και πρέπει να είναι γερά και προσαρμοστικά στις παραλλαγές του, καθώς επίσης και στη δυναμική των δικτύων. Κατά συνέπεια, αυτά τα δίκτυα απαιτούν ενσωματωμένα και προσαρμοστικά πρωτόκολλα σε όλα τα στρώματα, από το στρώμα σύνδεσης έως το στρώμα εφαρμογής. Αυτό το διαστρωματικό σχέδιο πρωτοκόλλου απαιτεί διεπιστημονική πείρα στις επικοινωνίες, την επεξεργασία σήματος, τη θεωρία και το σχεδιασμό δικτύων.

1.5 Ασύρματες Τεχνολογίες

Οι ασύρματες επικοινωνίες καλύπτουν σήμερα μια πολύ ευρεία γκάμα εφαρμογών. Η βιομηχανία τηλεπικοινωνιών είναι μια από τις μεγαλύτερες βιομηχανίες παγκοσμίως, με περισσότερα από \$1 τρισεκατομμύρια σε ετήσια εισοδήματα για υπηρεσίες και εξοπλισμό. (Τοποθετώντας αυτό σε προοπτική, αυτός ο αριθμός είναι συγκρίσιμος με το ακαθάριστο εγχώριο προϊόν πολλών από τις πλουσιότερες χώρες παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένης της Γαλλίας, της Ιταλίας, και του Ηνωμένου Βασιλείου.) Το μεγαλύτερο και πιο αξιοπρόσεχτο μέρος της επιχείρησης των τηλεπικοινωνιών είναι η τηλεφωνία. Το κύριο ασύρματο συστατικό της τηλεφωνίας είναι η κινητή (δηλ., κυψελοειδή) τηλεφωνία. Ο παγκόσμιος ρυθμός αύξησης στην κυψελοειδή τηλεφωνία είναι ραγδαίος, και οι αναλυτές αναφέρουν ότι ο αριθμός κυψελοειδών συνδρομών τηλεφωνίας παγκοσμίως έχει ξεπεράσει τώρα τον αριθμό ενσύρματων συνδρομών τηλεφωνίας (δηλ., σταθερό). Αυτοί οι αριθμοί κάνουν την κυψελοειδή τηλεφωνία έναν πολύ σημαντικό οδηγό της ανάπτυξης της ασύρματης τεχνολογίας, και τα τελευταία χρόνια η ώθηση να αναπτυχθούν νέες κινητές υπηρεσίες στοιχείων, που φέρουν συλλογικά το όνομα τρίτη γενιά (3G) κυψελοειδούς, έχει διαδραματίσει βασικό ρόλο στη δραστηριοποίηση της έρευνας στις νέες τεχνικές επεξεργασίας σήματος για την ασύρματη τεχνολογία. Εντούτοις, η κυψελοειδής τηλεφωνία είναι μόνο μια από μια πολύ ευρεία γκάμα ασύρματων τεχνολογιών που αναπτύσσονται πολύ γρήγορα αυτή την περίοδο. Μεταξύ άλλων τεχνολογιών είναι η πικο-δικτύωση (piconetworking) (όπως εξηγείται από το Bluetooth radio-on-a-chip) και άλλα συστήματα δικτύων προσωπικής περιοχής (PAN) (π.χ., η IEEE 802.15 οικογένεια προτύπων), ασύρματα συστήματα δικτύων τοπικής περιοχής (LAN) (που εξηγούνται από τις οικογένειες IEEE 802.11 και HiperLAN προτύπων, αποκαλούμενες συστήματα WiFi), ασύρματα συστήματα δικτύων μητροπολιτικής περιοχής (MAN) (που εξηγούνται από την IEEE 802.16 οικογένεια προτύπων, αποκαλούμενη συστήματα WiMax), άλλα ασύρματα συστήματα τοπικού βρόχου (WLL), και ποικίλα δορυφορικά συστήματα. Αυτές οι πρόσθετες ασύρματες τεχνολογίες παρέχουν μια βάση για μια πολύ πλούσια γκάμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της υπηρεσίας τοπικής τηλεφωνίας, της ευρυζωνικής πρόσβασης Διαδικτύου, και της κατανομής υψηλού ρυθμού ψυχαγωγικού περιεχομένου όπως υψηλής ευκρίνειας βίντεο και υψηλής ποιότητας ήχου στο σπίτι, μέσα στο σπίτι, στο αυτοκίνητο, και τα λοιπά. Όπως οι 3G, αυτές οι τεχνολογίες έχουν κεντρίσει αξιοσημείωτη έρευνα επεξεργασίας σήματος για την ασύρματη τεχνολογία.

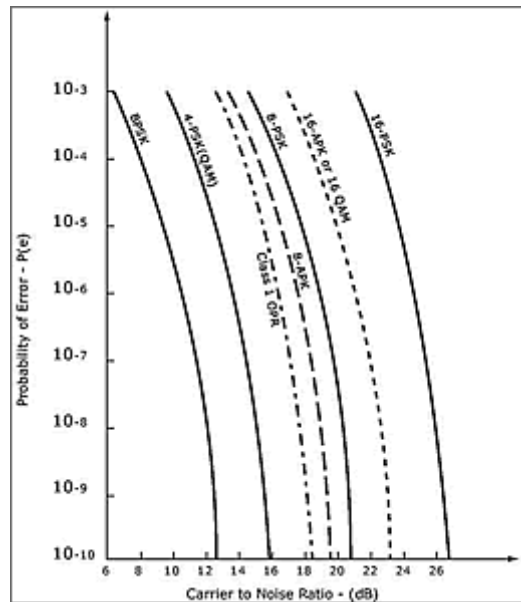
Αυτές οι τεχνολογίες υποστηρίζονται από διάφορες τεχνικές μετάδοσης και ανάθεσης καναλιού, συμπεριλαμβανομένης της Πολύπλεξης με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA), της Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαίρεση Κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA), και άλλα συστήματα διευρυμένου φάσματος, Ορθογωνική Πολύπλεξη με Διαίρεση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), άλλα συστήματα πολλαπλών φερόντων, και τα υψηλού ρυθμού συστήματα απλού φέροντος. Αυτές οι τεχνικές επιλέγονται πρώτιστα για να εξετάσουν τις φυσικές ιδιότητες των ασύρματων καναλιών, μεταξύ των οποίων οι πιο εξέχουσες είναι η διάλεια πολλαπλών διαδρομών, η διασπορά, και η παρεμβολή. Εκτός από αυτές τις χρονικές τεχνικές μετάδοσης, υπάρχουν χωρικές τεχνικές, ειδικότερα οι beamforming και κωδικοποίηση χρονικού διαστήματος, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν στον πομπό για να εκμεταλλευτούν την χωρική και γωνιακή διαφοροποίηση (diversity) των ασύρματων καναλιών. Για να λάβουν το μέγιστο όφελος από αυτές τις τεχνικές μετάδοσης, για να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες διαφοροποίησης (diversity) του ασύρματου καναλιού, και για να μετριάσουν τις εξασθενίσεις του ασύρματου καναλιού, οι προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος δεκτών είναι στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος. Αυτές περιλαμβάνουν την εξίσωση καναλιών (channel equalization) για να καταπολεμήσουν τη διασπορά (dispersion), συνδυασμός RAKE για την εκμετάλλευση επιλύσιμων πολλαπλών διαδρομών (multipath), ανίχνευση πολλαπλών χρηστών (multiuser detection) για να μετριάσουν την παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (multiple-access interference), μέθοδοι καταστολής για δια-καναλική παρεμβολή (co-channel interference), beamforming για να εκμεταλλευτούν τη χωρική διαφοροποίηση (spatial diversity), και επεξεργασία χρονικού διαστήματος (space-time processing) για να εκμεταλλευτούν από κοινού τις χρονικές και χωρικές ιδιότητες του σηματοδοτικού περιβάλλοντος.

1.6 Βασικές Έννοιες Επικοινωνιών

Μια από τις βασικές παραμέτρους (οι πολλαπλές διαδρομές, multipath είναι η άλλη), η οποία έχει επιπτώσεις στην περιοχή ενός ασύρματου συστήματος, είναι η δυναμική περιοχή του ραδιοκύματος. Η δυναμική περιοχή της διάδοσης στο κενό μπορεί να καθοριστεί ως εξής:

Δυναμική Περιοχή (Dynamic Range)(dB) = PTX (transmitted power, ισχύς μετάδοσης) - PTX (minimum receiver power, ελάχιστη ισχύς δέκτη)

Η ισχύς μετάδοσης ενός WLAN συστήματος υπαγορεύεται από τους ρυθμιστικούς οργανισμούς κάθε χώρας (δηλ. FCC, CE, κ.λπ...). Ως εκ τούτου, η δυναμική περιοχή του ραδιοκύματος δεν μπορεί να ενισχυθεί από μόνη της αυξάνοντας αυθαίρετα την ισχύ μετάδοσης. Οι ενισχύσεις της δυναμικής περιοχής πρέπει να γίνουν στην ευαισθησία δέκτη (receiver sensitivity).



Σχήμα 1.1: Πιθανότητα σφάλματος $P(e)$ σε συνάρτηση με το λόγο φέροντος προς θόρυβο (μπορεί να μεταφραστεί ως αναλογία σήματος προς θόρυβο) για διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης. (Kamilo Feher, Ψηφιακές Επικοινωνίες)

Η ευαισθησία δέκτη μετριέται σε ένα καθορισμένο ρυθμό σφάλματος. Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει το ρυθμό σφάλματος δέκτη για διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης και την αναλογία φέροντος προς θόρυβο. Από αυτό το διάγραμμα, είναι προφανές ότι η διατήρηση μιας υψηλής σήματος προς θόρυβο αναλογίας είναι πολύ σημαντική στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ρυθμού σφάλματος. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα επίπεδα θορύβου, ο θόρυβος καναλιού πρέπει να ελεγχθεί καλά και να περιοριστεί δεδομένου ότι το επίπεδο σήματος που φαίνεται από τον δέκτη δεν μπορεί να ελεγχθεί.

Ο θόρυβος καναλιού προέρχεται από τον θερμικό θόρυβο της πορείας μετάδοσης και τον παράγοντα θορύβου του δέκτη. Ο θερμικός θόρυβος του καναλιού υπολογίζεται από την Εξίσωση 1:

$$N = kTB$$

(Equation 1)

k = σταθερά Boltzman (Boltzman's constant)

N = Ισχύς Θορύβου (Noise Power (Watts) or $10\log N$ (dBm))

B = Εύρος ζώνης καναλιού (Channel Bandwidth)

Και ο παράγοντας θορύβου δέκτη, παράγεται από τις Εξισώσεις 2, 3:

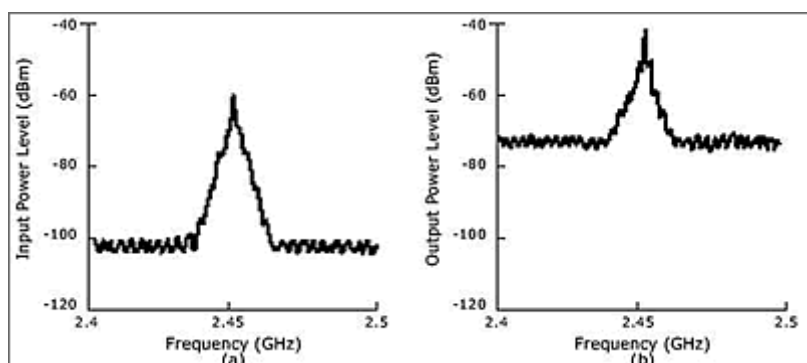
$$F = \frac{\text{Input S/N}}{\text{Output S/N}} \quad (\text{Equation 2})$$

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots \quad (\text{Equation 3})$$

S/N = Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio)

NF = Παράγοντας Θορύβου (Noise Figure), $NF = 10 \log_{10} F$

Τα F_i και G_i αντιπροσωπεύουν την απολαβή (gain σε dB) και τον παράγοντα θορύβου (noise figure σε dB) κάθε σταδίου της αλυσίδας δέκτη. Μια χαρακτηριστική αλυσίδα δέκτη περιλαμβάνει την κεραία, τα φίλτρα, ένα LNA, έναν μίκτη, ένα AGC, και τον επεξεργαστή βασικής ζώνης. Η επιρροή NF απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Το σχήμα θορύβου (NF) ενός συστήματος είναι ανεξάρτητο της απολαβής. Εδώ, ένα 20 dB σήμα περνιέται μέσα από έναν ενισχυτή ισχύος με 10 dB NF. Καθώς το σήμα κορυφής ανυψώνεται κατά 20 dB, ο συνολικός λόγος S/N υποφέρει (40 dB S/N αναλογίας στην είσοδο and 30 dB of S/N στην έξοδο).

Χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, ευαισθησία δέκτη της τάξης των -88 dBm στα 11 Mbps ωφέλιμου φορτίου μπορεί να επιτευχθεί. Αυτό είναι αξιοσημείωτο δεδομένου ότι η καλύτερη ευαισθησία δέκτη, άμεσης μετατροπής, μέχρι σήμερα είναι το πολύ της τάξης των -84 dBm. Στα περισσότερα μέρη του κόσμου, η ισχύς εξόδου του PA μπορεί να αυξηθεί σε 20 dBm στη κεραία. Η δυναμική περιοχή αυτής της λύσης είναι:

$$\text{Δυναμική Περιοχή (βελτιωμένη λύση)} = 20 \text{ dBm} - (-88 \text{ dBm}) = 108 \text{ dB}$$

Αυτό συγκρίνεται με τη σημερινή λύση:

$$\text{Δυναμική Περιοχή (σημερινή λύση)} = 15 \text{ dBm (συμβολικό)} - (-84 \text{ dBm}) = 99 \text{ dB}$$

Περιττό να ειπωθεί ότι αυτή η διαφορά των 9 dB (ή σχεδόν 10 φορές βελτίωση) ασκεί σημαντική επιρροή στην εμπειρία χρήστη (user experience). Στο κενό, τα 9 dB μεταφράζονται σε σχεδόν τρεις φορές την περιοχή χρησιμοποιώντας την εξίσωση περιοχής οπτικής επαφής ραδιοκύματος που ακολουθεί:

$$PRX = PTXGRXGTX \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

PRX = ελάχιστη ευαισθησία δέκτη (minimum receiver sensitivity)

PTX = ισχύς μετάδοσης (transmit power)

GRX = απολαβή κεραίας δέκτη σε dBi (receive antenna gain in dBi)

GTX = απολαβή κεραίας πομπού σε dBi (transmit antenna gain in dBi)

X = μήκος κύματος(περίπου 12 εκ. στα 2.45 GHz) (wavelength (approximately 12 cm at 2.45 GHz))

R = περιοχή (range)

Στα ρεαλιστικά περιβάλλοντα όπου η εκθετική ισχύς είναι 3-3.5 (αντί για 2), η αύξηση της περιοχής μπορεί να είναι δύο φορές πιο υψηλή. Φανταστείτε ένα σύστημα WLAN με τη διπλή περιοχή των σημερινών λύσεων.

1.7 Το Ασύρματο Κανάλι

Από τεχνικής άποψης, η μέγιστη διάκριση μεταξύ των ασύρματων και ενσύρματων επικοινωνιών βρίσκεται στις φυσικές ιδιότητες των ασύρματων καναλιών. Αυτές οι φυσικές ιδιότητες μπορούν να περιγραφούν σε σχέση με διάφορα ευδιάκριτα φαινόμενα, συμπεριλαμβανομένου του περιβαλλοντικού θορύβου, των απωλειών διάδοσης, των πολλαπλών διαδρομών, της παρεμβολής, και των ιδιοτήτων που προκύπτουν από την χρήση των πολλαπλών κεραιών. Εδώ αναθεωρούμε αυτά τα φαινόμενα μόνο εν συντομία.

1.7.1 Περιβαλλοντικός Θόρυβος

Όπως όλα τα πρακτικά κανάλια επικοινωνιών, τα ασύρματα κανάλια αλλοιώνονται από τον περιβαλλοντικό θόρυβο. Αυτός ο θόρυβος προέρχεται από τη θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων στη κεραία, των ηλεκτρονικών του δέκτη και από τις πηγές ακτινοβολίας του περιβάλλοντος. Αυτός ο θόρυβος διαμορφώνεται ως έχων ένα πολύ ευρύ εύρος ζώνης (πολύ ευρύτερο από το εύρος ζώνης οποιωνδήποτε χρησιμων σημάτων στο κανάλι) και καμία ιδιαίτερη αιτιοκρατική δομή (ο δομημένος θόρυβος μπορεί να αντιμετωπιστεί χωριστά ως παρεμβολή). Για ευκολία, τα περισσότερα εγχειρίδια αλλά και οι πρακτικοί μηχανικοί κατατάσσουν το θόρυβο εν γένει στην κατηγορία του *Προσθετικού Λευκού Γκαουσιανού Θορύβου (Additive White Gaussian Noise, AWGN)*, κάτι που είναι ορθό στις

περισσότερες περιπτώσεις. Όπως το όνομα του υπονοεί, σημαίνει ότι είναι προσθετικός στα άλλα σήματα στον δέκτη, έχει μια επίπεδη φασματική πυκνότητα ισχύος, και προκαλεί μια γκαουσιανή πιθανότητα κατανομής στην έξοδο οποιουδήποτε γραμμικού φίλτρου στο οποίο εισάγεται. Παρ' όλα αυτά, δε θα έπρεπε να ξεχνούμε ότι αυτό αποτελεί μια γενικευμένη απλοποίηση του ζητήματος του θορύβου. Ο Κρουστικός Θόρυβος (Impulsive Noise) εμφανίζεται επίσης σε μερικά ασύρματα κανάλια. Ένας τέτοιος θόρυβος είναι ευρείας ζώνης, επίσης, αλλά προκαλεί μια μη γκαουσιανή κατανομή εύρους στην έξοδο των γραμμικών φίλτρων.

1.7.2 Απώλειες Διάδοσης

Οι απώλειες διάδοσης είναι επίσης ένα ζήτημα στα ασύρματα κανάλια. Αυτοί είναι οι δύο βασικοί τύποι: απώλειες διάχυσης (diffusion losses) και εξασθένηση σκιών (shadowing). Οι απώλειες διάχυσης προκύπτουν λόγω της ακάλυπτης φύσης των ασύρματων καναλιών. Παραδείγματος χάριν, η ενέργεια που ακτινοβολείται από μια απλή σημειακή πηγή στο κενό θα εξαπλώνει μια συνεχώς επεκτεινόμενη σφαιρική επιφάνεια καθώς η ενέργεια μεταδίδεται μακριά από την πηγή. Αυτό σημαίνει ότι μια κεραία με ένα δεδομένο μέγεθος ανοίγματος θα εισπράξει ένα ποσό ενέργειας, το οποίο μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ της κεραίας και της πηγής. Στα περισσότερα επίγεια ασύρματα κανάλια, οι απώλειες διάχυσης είναι πραγματικά μεγαλύτερες από αυτό, λόγω των αποτελεσμάτων της διάδοσης κύματος εδάφους, και λοιπών. Παραδείγματος χάριν, στην κυψελοειδή τηλεφωνία, η απώλεια διάχυσης είναι το αντίστροφο τετράγωνο με την απόσταση εντός οπτικής επαφής με τον πύργο κυψέλης, και μειώνεται με μια υψηλότερη ισχύ (χαρακτηριστικά, 3 ή 4) σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Όπως το όνομά του υπονοεί, η εξασθένηση σκιών (shadowing) προκύπτει από την παρουσία αντικειμένων (κτίρια, τοίχοι, κ.λπ...) μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Η εξασθένηση σκιών διαμορφώνεται, χαρακτηριστικά, από μια εξασθένηση (δηλ., ένας πολλαπλασιαστικός παράγοντας) στο εύρος σημάτων που ακολουθεί μια λογαριθμική κανονική κατανομή. Η παραλλαγή αυτής της εξασθένησης διευκρινίζεται από την σταθερή απόκλιση του λογαρίθμου αυτής της εξασθένησης.

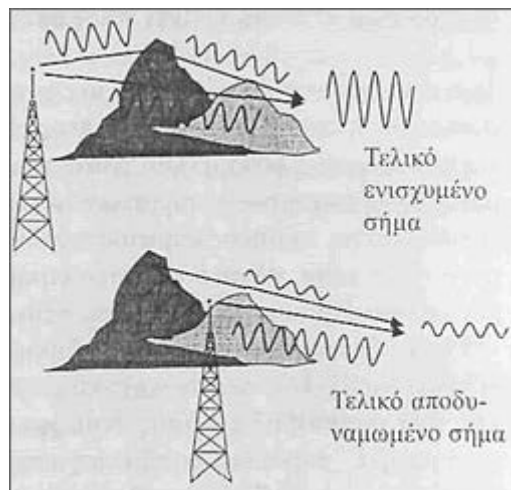
1.7.3 Πολλαπλές Διαδρομές

Ο όρος πολλαπλές διαδρομές αναφέρεται στο φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο πολλαπλά αντίγραφα ενός σήματος μετάδοσης λαμβάνονται στον δέκτη, λόγω της παρουσίας πολλαπλών ασύρματων διαδρομών μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Αυτές οι πολλαπλές διαδρομές προκύπτουν λόγω των αντανακλάσεων από τα αντικείμενα στο ασύρματο κανάλι. Το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών φανερώνεται με διάφορους τρόπους στους δέκτες επικοινωνιών, ανάλογα με τον βαθμό διαφοράς διαδρομής σε σχέση με το μήκος κύματος της διάδοσης, τον βαθμό διαφοράς διαδρομής σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης, και την σχετική κίνηση μεταξύ του πομπού και του δέκτη.

1.7.3.1 Παραμόρφωση λόγω πολύοδης διάδοσης

Στις εφαρμογές όπου υπάρχουν περισσότερες από μία διαδρομές διάδοσης, η αλληλεπίδραση των σημάτων που φτάνουν στον ανιχνευτή από αυτές τις πολλαπλές διαδρομές γνωστή ως *πολύοδη διάδοση (multipath propagation)*, δημιουργεί σημαντική παραμόρφωση στα σύμβολα δεδομένων που λαμβάνονται.

Το εκπεμπόμενο σήμα, εφόσον φθάνει στο δέκτη ακολουθώντας διαφορετική διαδρομή, διανύει διαφορετικό μήκος κύματος και υφίσταται επομένως διαφορετική καθυστέρηση διάδοσης σε σύγκριση με το ίδιο σήμα που φθάνει στο δέκτη άμεσα. Αυτή η διαφορά στην καθυστέρηση προκαλεί διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ανιχνευόμενων σημάτων. Εάν η διαφορά φάσης πλησιάζει τις 180° τα σήματα πρακτικά θα εξουδετερώσουν το ένα το άλλο ενώ όταν η διαφορά φάσης πλησιάζει τις 0° τα σήματα θα ενισχυθούν.



Σχήμα 1.3

1.7.3.2 Απόσβεση λόγω πολύοδης διάδοσης

Εάν ο πομπός, ο δέκτης ή οι ανακλώσες επιφάνειες μετακινούνται σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών, τα μήκη των διαδρομών θα μεταβάλλονται με το χρόνο και έτσι θα μεταβάλλονται οι σχετικές φάσεις των ανιχνευόμενων σημάτων καθώς κινούνται οι χρήστες. Το αποτέλεσμα είναι ότι ο δέκτης αντιλαμβάνεται ένα συνολικό σήμα με μεταβαλλόμενο χρονικά πλάτος και φάση.

Το βάθος της προκύπτουσας *διάλειψης (fading)* εξαρτάται έντονα από την ύπαρξη καλής "οπτικής επαφής" ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη, οπότε η περιβάλλουσα του αποσβενύμενου σήματος θα υπακούει στη *στατιστική κατανομή Rice*. Εάν από την άλλη πλευρά η οπτική επαφή είναι μέτρια και η ενέργεια φθάνει στο δέκτη μετά από ένα μεγάλο αριθμό ανακλάσεων, είναι πιθανό η περιβάλλουσα του ανιχνευόμενου σήματος να υπακούει στην *κατανομή Rayleigh*.

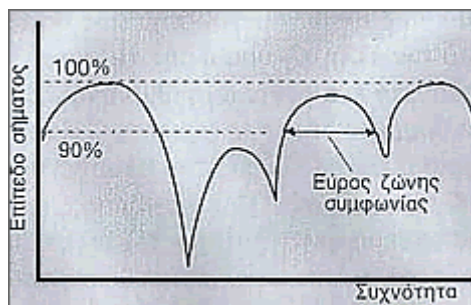
Τα χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας αυτού του αποσβενύμενου σήματος επηρεάζουν αποφασιστικά το ρυθμό σφαλμάτων μίας ψηφιακής επικοινωνιακής ζεύξης. Ένα εξαιρετικό βιβλίο για το θέμα αυτό είναι του Jakes (1993) και ένα ιδιαίτερα ενδελεχές κείμενο για την απόδοση των modem σε συνθήκες απόσβεσης δίνεται από τον Proakis (1989).

1.7.3.3 Επιλεκτική Διάλειψη Συχνότητας εναντίον Επίπεδης Διάλειψης

Ένα φαινόμενο που αποτελεί πρόκληση στην πολύοδη διάδοση είναι ότι ο βαθμός αναίρεσης ή ενίσχυσης ενός σήματος είναι διαφορετικός για τις διάφορες συχνότητες του σήματος δεδομένων. Αυτό συμβαίνει επειδή η σχετική μετατόπιση φάσης μεταξύ δύο συχνοτικών συνιστωσών που ακολουθούν τη ίδια διαδρομή είναι διαφορετική, καθώς το μήκος κύματος των δύο συνιστωσών είναι διαφορετικό. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως *επιλεκτική διάλειψη συχνότητας* (*frequency selective fading*) και δημιουργεί βυθίσματα στην απόκριση συχνότητας του καναλιού.

Εάν οι διαφορές στα μήκη των διαδρομών όλων των σημάτων που φτάνουν στο δέκτη είναι σχεδόν ίσες συγκριτικά με τα μήκη κύματος των συνιστωσών του σήματος, τότε οι μεταβολές φάσης ανάμεσα στις συνιστώσες θα είναι μικρές και θα υφίστανται όλες παρόμοια ποσά ενίσχυσης ή αναίρεσης. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται συχνά *επίπεδη διάλειψη* (*flat fading*). Από την άλλη πλευρά, εάν η διαφορά στα μήκη των διαδρομών είναι μεγάλη, τότε τα χαρακτηριστικά της απόσβεσης θα διαφέρουν σημαντικά ακόμα και ανάμεσα σε γειτονικές συχνότητες.

Ο βαθμός της συσχέτισης ανάμεσα στην διάλειψη που συμβαίνει σε ένα εύρος συχνοτήτων σήματος εκφράζεται με τον όρο *εύρος ζώνης συμφωνίας* (*coherence bandwidth*), που ορίζεται ως το εύρος ζώνης στο οποίο η στατιστική συμπεριφορά της διάλειψης συσχετίζεται σε βαθμό ανώτερο του 90%.

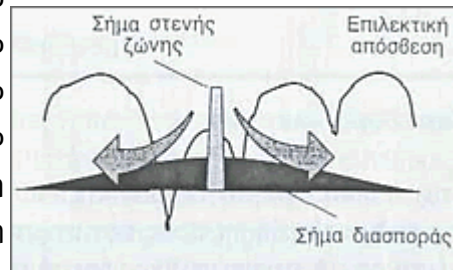


Σχήμα 1.4

1.7.3.4 Φασματική Διασπορά

Υπάρχουν δύο εναλλακτικές μέθοδοι για την αντιμετώπιση της επίπεδης και επιλεκτικής διάλειψης συχνότητας. Και οι δύο περιλαμβάνουν την αύξηση του εύρους ζώνης που απαιτείται για την αποστολή των δεδομένων.

Η τεχνική που ονομάζεται *διεύρυνση φάσματος ευθείας ακολουθίας (direct sequence spread spectrum, βλ. Παράγραφο 2.6.3)* χρησιμοποιεί μία ακολουθία δεδομένων ευρείας ζώνης και την αναμιγνύει με το σήμα δεδομένων στενής ζώνης, με αποτέλεσμα να διασπείρει την ενέργεια έξω από το εύρος ζώνης συμφωνίας του καναλιού. Ένα μικρό τμήμα αυτής της ενέργειας θα καθεί κατά τη επιλεκτική διάλειαση συχνότητας, αλλά το μεγαλύτερο τμήμα θα περάσει με μικρή παραμόρφωση από το κανάλι. Αποδιευρύνοντας το σήμα που φθάνει στο δέκτη μπορούμε να ανακτήσουμε ένα καλό αντίγραφο του αρχικά εκπεμπόμενου σήματος. Παράλληλα με τη διεύρυνση χρησιμοποιούνται επιπλέον κωδικοποίηση δεδομένων και ισοστάθμιση, ώστε να βελτιωθεί η ακεραιότητα του καναλιού.



Σχήμα 1.5

Αντί να διευρύνουμε στιγμιαία (και αδύναμα) το σήμα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μία εξίσου αποδοτική μέθοδο, στην οποία αλλάζουμε απότομα τη θέση του σήματος δεδομένων στενής ζώνης στα πλαίσια μίας ευρύτερης διαθέσιμης ζώνης συχνοτήτων. Αυτή η τεχνική



Σχήμα 1.6

αλμάτων συχνότητας (βλ. Παράγραφο 2.6.2) σημαίνει ότι για κάποιο χρόνο το σήμα θα εμπίπτει σε περιοχή επιλεκτικής διάλειψης, αλλά κατά το μεγαλύτερο μέρος της χρονικής διάρκειας της μετάδοσης το σήμα θα περνά από μία περιοχή του καναλιού που δεν εμφανίζει διάλειψη. Το αποτέλεσμα είναι ότι, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση της διεύρυνσης ευθείας ακολουθίας, το σήμα των δεδομένων θα φθάνει κατά το μεγαλύτερο μέρος της μετάδοσης με μικρή παραμόρφωση στο δέκτη, οπότε με επιπλέον κωδικοποίηση μπορεί να εγκαθιδρυθεί μία επικοινωνιακή ζεύξη με υψηλές επιδόσεις.

1.7.3.5 Απόσβεση πολύοδης διάδοσης – Το πρόβλημα στο πεδίο του χρόνου

Αυτό οδηγεί στην *επιλεκτική διάλειαση χρόνου (time-selective fading)*. (Τέτοια κίνηση προκαλεί επίσης τη διαστρέβλωση σημάτων λόγω του φαινομένου Doppler). Εάν οι καθυστερήσεις λόγω πολλαπλών διαδρομών, που ανέρχονται τυπικά σε μερικά msec για τις επικοινωνίες ελεύθερου χώρου, είναι σημαντικές ως προς την περίοδο του συμβόλου, τότε θα λάβει χώρα *διασυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference, ISI)* δηλαδή οι συνεισφορές από πολλαπλά σύμβολα φθάνουν συγχρόνως στον δέκτη.

Σημειώστε ότι αυτό το αποτέλεσμα της πολύοδης διάδοσης δεν αποτελεί μία επιπλέον μορφή παραμόρφωσης, πλέον της επιλεκτικής διάλειψης συχνότητας που περιγράψαμε προηγούμενα, αλλά το ίδιο φαινόμενο από την άποψη του πεδίου του χρόνου. Πολλές φορές καλείται και *επιλεκτική διάλειαση χρόνου (time-selective fading)*.

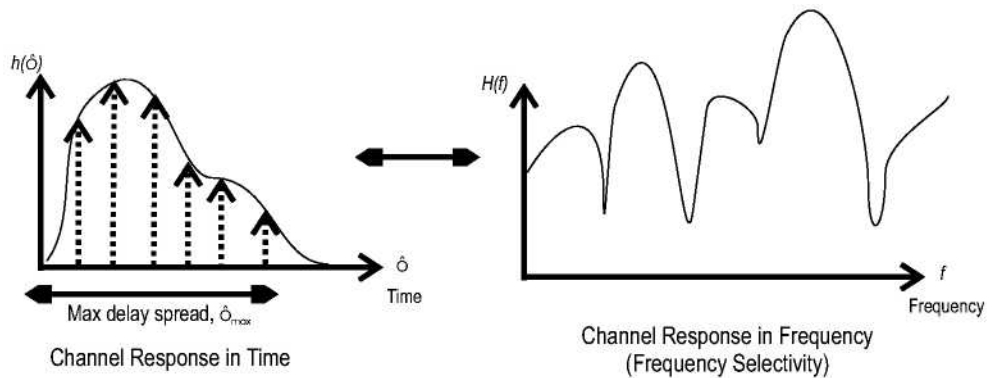
Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα χρησιμοποιούνται συχνά ισοσταθμιστές καναλιού, οι οποίοι πρέπει να αποκρίνονται (να προσαρμόζονται) στη μεταβαλλόμενη φύση του καναλιού. Εναλλακτικά, πρέπει να ελαττωθεί ο ρυθμός εκπομπής της Μ-αδικής σηματοδοσίας ή πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολλά παράλληλα κανάλια, ώστε η καθυστέρηση να πάψει να είναι σημαντικό κλάσμα της περιόδου των συμβόλων (τυπικά $< 10\%$).

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η καθυστέρηση της διάδοσης δεν είναι αυτή καθαυτή ένα μείζον πρόβλημα, αλλά είναι η διασπορά των καθυστερήσεων (delay spread) κατά τις διάφορες διαδρομές διάδοσης. Στο Σχήμα 1.7 εικονίζεται μία τυπική γραφική παράσταση της μορφής του πλάτους και των καθυστερήσεων στην περίπτωση ενός σήματος κινητού τηλεφώνου, καθώς αυτό μεταδίδεται στο κέντρο μίας πόλης. Το εύρος των χρονικών καθυστερήσεων των σημαντικών συνιστωσών εξάγεται ότι είναι περίπου ίσο με 15 μsec .



Σχήμα 1.7

Μια κοινή προσέγγιση της παρουσίασης ενός καναλιού πολλαπλών διαδρομών είναι η κρουστική απόκριση (impulse response) καναλιού που μας δίνει τη διασπορά των καθυστερήσεων του καναλιού. Διάδοση των καθυστερήσεων (delay spread) είναι η διάδοση του χρόνου μεταξύ της άφιξης του πρώτου και τελευταίου πολλαπλών διαδρομών σήματος που βλέπει ο δέκτης. Σε ένα ψηφιακό σύστημα, η διασπορά των καθυστερήσεων μπορεί να οδηγήσει σε ISI. Στο Σχήμα 1.8, η διασπορά των καθυστερήσεων ισοδυναμεί με τ_{max} . Διαπιστώνεται ότι η διασπορά των καθυστερήσεων μετριέται πάντα όσον αφορά το πρώτο συστατικό άφιξης.



Σχήμα 1.8: Κρουστικές Αποκρίσεις Καναλιού και Αντίστοιχη Απόκριση Συχνότητας

1.7.3.6 Αντιμετώπιση των πολλαπλών διαδρομών

Πολλές από τις προηγμένες μεθόδους μετάδοσης και επεξεργασίας σημάτων που έχουν αναπτυχθεί για τα ασύρματα συστήματα έχουν ως σκοπό να αντικρούσουν τα αποτελέσματα του φαινομένου των πολλαπλών διαδρομών. Παραδείγματος χάριν, οι ευρείας ζώνης τεχνικές μετάδοσης όπως η διεύρυνση φάσματος χρησιμοποιείται συχνά ως αντίμετρο στην επιλεκτική διάλεια συχνότητας. Αυτό και ελαχιστοποιεί βυθίσματα συχνότητας και διευκολύνει την αναλυσιμότητα (resolvability) και το διαδοχικό σύμφωνο (subsequent coherent) που συνδυάζει πολλαπλά αντίγραφα του ίδιου σήματος.

Ομοίως, με τη διαίρεση ενός σήματος υψηλού ρυθμού σε πολλά παράλληλα σήματα χαμηλότερου ρυθμού, η OFDM διαμόρφωση μετριάζει τα αποτελέσματα της διασποράς των καναλιών στα υψηλού ρυθμού σήματα. Εναλλακτικά, τα συστήματα απλού φέροντος υψηλού ρυθμού εκπομπής στοιχείων χρησιμοποιούν την εξίσωση καναλιών (channel equalization) στον δέκτη για να αντιδράσουν σε αυτήν την διασπορά. Η διαμόρφωση OFDM αναλύεται περαιτέρω στο Κεφάλαιο 3.

1.7.4 Παρεμβολή

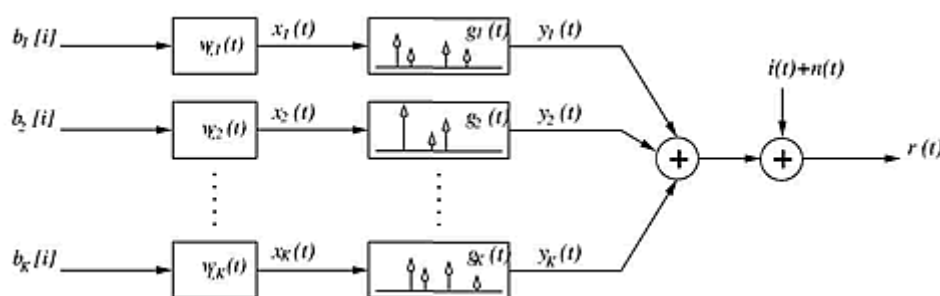
Η παρεμβολή, επίσης ένα σημαντικό ζήτημα σε πολλά ασύρματα κανάλια, είναι δύο τύπων: Παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης και δια-καναλική παρεμβολή. Η παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (*Multiple-access interference, MAI*) αναφέρεται στην παρεμβολή που προκύπτει από άλλα σήματα στο ίδιο δίκτυο με το σήμα που μας ενδιαφέρει. Παραδείγματος χάριν, στα κυψελοειδή συστήματα τηλεφωνίας, MAI μπορεί να προκύψει στον σταθμό βάσης όταν τα σήματα των πολλαπλών κινητών πομπών δεν είναι ορθογώνια. Αυτό συμβαίνει βάση σχεδιασμού στα συστήματα CDMA, και στα συστήματα FDMA ή TDMA λόγω των ιδιοτήτων των καναλιών όπως οι πολλαπλές διαδρομές ή τα μη ιδανικά χαρακτηριστικά συστημάτων όπως τα ατελή φίλτρα διαυλοποίησης (channelization). Η δια-καναλική παρεμβολή (CCI) αναφέρεται στην παρεμβολή από σήματα διαφορετικών δικτύων, τα οποία λειτουργούν στη ίδια ζώνη συχνότητας με το σήμα που μας ενδιαφέρει. Ένα παράδειγμα είναι η παρεμβολή από τις παρακείμενες κυψέλες σε ένα κυψελοειδές σύστημα τηλεφωνίας.

Αυτό το πρόβλημα είναι ένας κύριος περιορισμός της χρήσης FDMA στα κυψελοειδή συστήματα και ήταν ένας σημαντικός παράγοντας στην απομάκρυνση του FDMA από τα δεύτερης γενιάς συστήματα. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η παρεμβολή από άλλες συσκευές που λειτουργούν στο ίδιο τμήμα του ανεξέλεγκτου φάσματος με το σήμα ενδιαφέροντος, όπως η παρεμβολή από τις συσκευές Bluetooth που λειτουργούν στη ίδια ISM 2.4 GHz ζώνη με τα ασύρματα IEEE 802.11 LAN. Ο μετριασμός της παρεμβολής είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας όσον αφορά το σχεδιασμό των τεχνικών μετάδοσης (π.χ., η προαναφερθείσα απομάκρυνση του FDMA από τα κυψελοειδή συστήματα) καθώς επίσης και στο σχεδιασμό των προηγμένων συστημάτων επεξεργασίας σήματος για τα ασύρματα.

Τα φαινόμενα που έχουμε συζητήσει παραπάνω μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα γενικό αναλυτικό μοντέλο για ένα ασύρματο κανάλι πολλαπλής πρόσβασης. Ειδικότερα, το μοντέλο σήματος σε ένα ασύρματο σύστημα απεικονίζεται στο **Σχήμα 1.9**. Μπορούμε να γράψουμε το λαμβανόμενο σήμα σε έναν δεδομένο δέκτη με την ακόλουθη μορφή:

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^{M-1} b_k[i] \int_{-\infty}^{\infty} g_k(t, u) w_{i,k}(u) du + i(t) + n(t), \quad -\infty < t < \infty, \quad (1.9)$$

όπου $g_k(t, u)$ δείχνει την κρουστική απόκριση ενός γραμμικού φίλτρου που αντιπροσωπεύει το κανάλι μεταξύ του k -οστού πομπού και του δέκτη, το $i(\cdot)$ αντιπροσωπεύει την δια-καναλική παρεμβολή, και το $n(\cdot)$ αντιπροσωπεύει τον περιβαλλοντικό θόρυβο. Η διαμόρφωση του ασύρματου καναλιού ως γραμμικό σύστημα φαίνεται να συμφωνεί με την παρατηρηθείσα συμπεριφορά τέτοιων καναλιών. Όλες οι ποσότητες $g_k(\cdot, \cdot)$, $i(\cdot)$, και το $n(\cdot)$ είναι, γενικά, τυχαίες διαδικασίες.



Σχήμα 1.9: Μοντέλο σημάτων σε ένα ασύρματο σύστημα

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, ο περιβαλλοντικός θόρυβος παρουσιάζεται ως μια λευκή διαδικασία με πολύ λίγη πρόσθετη δομή. Εντούτοις, η δια-καναλική παρεμβολή και οι κρουστικές αποκρίσεις του καναλιού είναι χαρακτηριστικά, δομημένες διαδικασίες που μπορούν παραμετροποιηθούν.

ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΙΕΕΕ 802.11

2.1 Εισαγωγή

Η υποστήριξη των ασύρματων δικτύων τοπικής περιοχής (WLAN) στα εταιρικά γραφεία και τα σπίτια των υπαλλήλων γίνεται μια απαραίτητη δραστηριότητα για τους επαγγελματίες των δικτύων, με απαιτήσεις νέων γνώσεων και εκπαίδευσης. Το πρότυπο σχεδιάστηκε ως ένα σύστημα μετάδοσης μεταξύ των συσκευών κάνοντας χρήση κυμάτων ραδιοσυχνότητας (RF) παρά υποδομή καλωδίων, και παρέχει κινητές, οικονομικά αποδοτικές λύσεις, μειώνοντας σημαντικά το κόστος εγκαταστάσεων δικτύων ανά χρήστη. Αρχιτεκτονικά, τα WLAN ενεργούν συνήθως ως τελική σύνδεση μεταξύ του εξοπλισμού τελικού χρήστη και της ενσύρματης δομής των εταιρικών υπολογιστών, των κεντρικών υπολογιστών και των δρομολογητών.

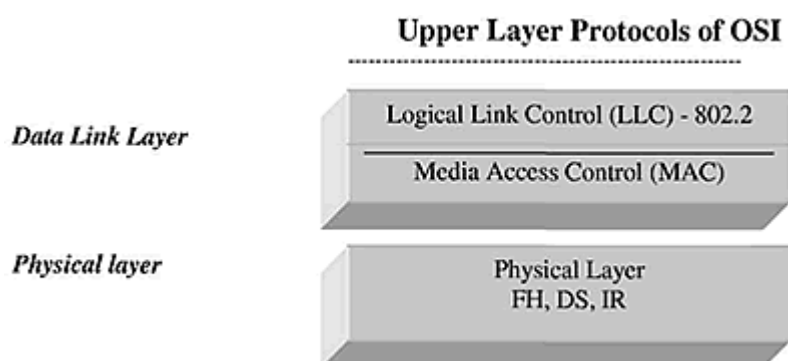
Το πρότυπο όχι μόνο καθορίζει τις προδιαγραφές, αλλά περιλαμβάνει επίσης ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών συμπεριλαμβανομένου:

- υποστήριξη των ασύγχρονων και χρονικά κρίσιμων υπηρεσιών παράδοσης*
- συνοχή υπηρεσίας μέσα σε εκτεταμένες περιοχές μέσω ενός Κατανεμημένου Συστήματος, όπως το Ethernet*
- στέγαση των ρυθμών μετάδοσης*
- υποστήριξη των περισσότερων εφαρμογών της αγοράς*
- πολλαπλής κατανομής (συμπεριλαμβανομένης της ραδιοφωνικής μετάδοσης) υπηρεσίες*
- διοικητικές υπηρεσίες δικτύων* και,
- υπηρεσίες εγγραφής και επικύρωσης.

Το περιβάλλον στόχου του προτύπου περιλαμβάνει:

- το εσωτερικό κτηρίων όπως γραφεία, κέντρα συνελεύσεων, πύλες και σαλόνια αερολιμένων, νοσοκομεία, εγκαταστάσεις εργοστασίων και κατοικίες και
- υπαίθριες περιοχές, όπως χώροι στάθμευσης, πανεπιστημιούπολεις, συγκροτήματα οικοδόμησης, και υπαίθριες εγκαταστάσεις.

Το 1997, το IEEE παρουσίασε ως το πρώτο διεθνώς εγκεκριμένο πρότυπο για ασύρματα LAN, το 802.11, καθορίζοντας 1 και 2 Mbps ταχυτήτων. Το Σεπτέμβριο του 1999, επικύρωσαν την "υψηλού ρυθμού 802.11b" τροποποίηση στο πρότυπο, το οποίο πρόσθεσε δύο υψηλότερες ταχύτητες (5,5 και 11 Mbps) στο 802.11. Η βασική αρχιτεκτονική, τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα και οι υπηρεσίες του 802.11b καθορίζονται από τα αρχικό πρότυπο 802.11, με αλλαγές που γίνονται μόνο στο φυσικό στρώμα. Αυτές οι αλλαγές οδηγούν σε υψηλότερους ρυθμούς στοιχείων και πιο εύρωστη συνεκτικότητα.



Σχήμα 2.1: Το πρότυπο 802.11 εστιάζει στα δύο κατώτατα επίπεδα του μοντέλου ISO: PHY και MAC

2.2 Αρχιτεκτονική WLAN

2.2.1 Τοπολογίες WLAN

Το IEEE 802.11 υποστηρίζει τρεις βασικές τοπολογίες WLAN:

- το Ανεξάρτητο Βασικό Σύνολο Υπηρεσιών (Independent Basic Service Set, IBSS) ή *ad hoc*
- το Βασικό Σύνολο Υπηρεσιών (Basic Service Set, BSS)
- το Εκτεταμένο Σύνολο Υπηρεσιών (Extended Service Set, ESS)

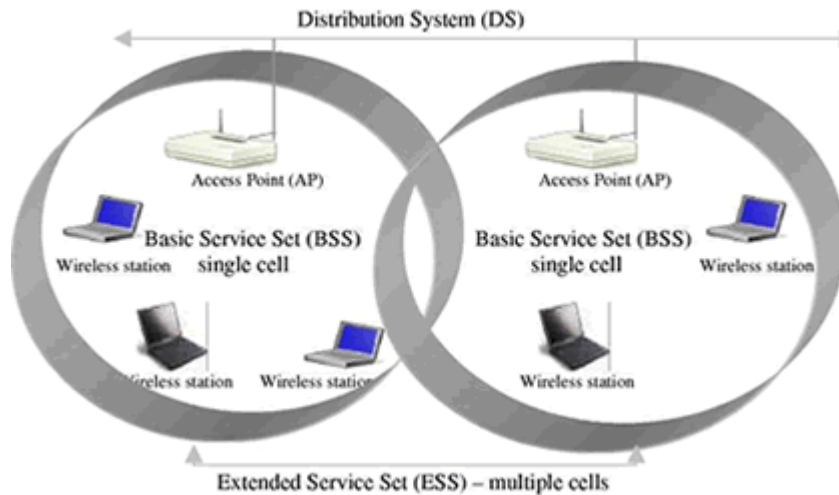
Και οι τρεις τοπολογίες υποστηρίζονται από την υλοποίηση του στρώματος MAC.

Ένα σύνολο υπηρεσιών (service set) είναι μια λογική ομαδοποίηση συσκευών. Τα WLAN παρέχουν δικτυακή πρόσβαση μεταδίδοντας ένα σήμα πέραν μιας ασύρματης ραδιοσυχνότητας (RF) φέροντος. Ένας σταθμός λήψης μπορεί να είναι μέσα στη περιοχική διάφορων πομπών. Ο πομπός προλογίζει τις μεταδόσεις του με ένα καθορισμένο αναγνωριστικό υπηρεσιών (service set identifier, SSID). Ο δέκτης χρησιμοποιεί το SSID για να φιλτράρει τα λαμβανόμενα σήματα και εντοπίζει αυτά που θέλει να ακούσει.

Το πρότυπο 802.11 καθορίζει δύο τύπους: *ad hoc/IBSS* και *infrastructure* τύπος. Λογικά, μια *ad hoc* τοπολογία είναι ανάλογη με ένα ομότιμης επικοινωνίας δίκτυο γραφείου στο οποίο κανένας απλός κόμβος δεν απαιτείται για να λειτουργήσει ως εξυπηρετητής δικτύου (server). Τα IBSS WLAN περιλαμβάνουν διάφορους κόμβους ή ασύρματους σταθμούς που επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους σε μια *ad-hoc*, ομότιμης επικοινωνίας βάση, χτίζοντας μια τοπολογία πλήρους ή μερικού δικτύου. Γενικά, οι *ad-hoc* υλοποιήσεις καλύπτουν μια περιορισμένη περιοχική και δεν συνδέονται σε οποιοδήποτε μεγαλύτερο δίκτυο.

Χρησιμοποιώντας τον *infrastructure* τύπο, το ασύρματο δίκτυο αποτελείται από τουλάχιστον ένα σημείο πρόσβασης που συνδέεται με την ενσύρματη υποδομή δικτύων και ένα σύνολο ασύρματων τελικών σταθμών. Αυτή η τοπολογία καλείται βασικό σύνολο υπηρεσιών (BSS). Δεδομένου ότι τα περισσότερα εταιρικά WLAN απαιτούν την πρόσβαση στο ενσύρματο τοπικό LAN για υπηρεσίες (κεντρικοί υπολογιστές αρχείων, εκτυπωτές, συνδέσεις Διαδικτύου), θα λειτουργήσουν με τον *infrastructure* τύπο και θα στηριχθούν σε ένα σημείο (AP) πρόσβασης που ενεργεί ως λογικός κεντρικός υπολογιστής για μια απλή WLAN κυψέλη ή ένα κανάλι. Οι επικοινωνίες μεταξύ δύο κόμβων, A και B, στην πραγματικότητα ρέουν από τον κόμβο A στο AP και έπειτα από το AP στον κόμβο B. Το AP είναι απαραίτητο για την εκτέλεση μιας λειτουργίας γεφύρωσης για τη σύνδεση πολλαπλών κυψελών WLAN ή καναλιών, και για τη σύνδεση WLAN κυψελών σε ένα ενσύρματο επιχειρηματικό LAN.

Ένα *Εκτεταμένο Σύνολο Υπηρεσιών (ESS)* είναι ένα σύνολο δύο ή περισσότερων BSS, τα οποία διαμορφώνουν ένα ενιαίο υποδίκτυο. Οι διαμορφώσεις ESS αποτελούνται από πολλαπλές κυψέλες BSS που μπορούν να συνδεθούν είτε με ενσύρματα είτε με ασύρματα δίκτυα στήριξης (backbone networks). Το IEEE 802.11 πρότυπο υποστηρίζει τις διαμορφώσεις ESS στις οποίες πολλαπλές κυψέλες χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι, και χρησιμοποιούν τα διαφορετικά κανάλια για να ενισχύσουν τη συνολική ρυθμοαπόδοση.



Σχήμα 2.2: Τοπολογίες IEEE 802.11 BSS και ESS

2.2.2 Συστατικά μέρη ενός WLAN

Το πρότυπο 802.11 καθορίζει δύο κομμάτια εξοπλισμού, έναν *ασύρματο σταθμό*, που είναι συνήθως ένα PC που εξοπλίζεται με μια ασύρματη κάρτα διεπαφής δικτύου (NIC), και ενός σημείου πρόσβασης (AP), το οποίο ενεργεί ως γέφυρα μεταξύ των ασύρματων και ενσύρματων δικτύων. Ένα σημείο πρόσβασης αποτελείται συνήθως από ένα ραδιοκύμα, μια ενσύρματη διεπαφή δικτύου (π.χ., 802.3), και ένα λογισμικό γεφύρωσης που προσαρμόζεται στο πρότυπο γεφύρωσης 802.11d. Το σημείο πρόσβασης ενεργεί ως σταθμός βάσης για το ασύρματο δίκτυο, αθροίζοντας την πρόσβαση για τους πολλαπλούς ασύρματους σταθμούς επάνω στο ενσύρματο δίκτυο. Οι ασύρματοι τελικοί σταθμοί μπορούν να είναι 802.11 PC Card, PCI, ή ISA NIC, ή ενσωματωμένες λύσεις σε μη-PC πελάτες (όπως μια τηλεφωνική συσκευή βασισμένη στο πρότυπο 802.11).

Ένα πρότυπο 802.11 WLAN είναι βασισμένο σε μια κυψελοειδή αρχιτεκτονική. Κάθε κυψέλη (BSS) συνδέεται με τον σταθμό βάσης ή το AP. Όλα τα AP συνδέονται με ένα σύστημα κατανομής (Distribution System, DS) που είναι παρόμοιο με ένα δίκτυο στήριξης, συνήθως Ethernet ή ραδιοκύμα. Όλα τα προαναφερθέντα συστατικά εμφανίζονται ως σύστημα 802.11 για τα ανώτερα στρώματα του OSI και είναι γνωστά ως ESS.

Το πρότυπο 802.11 δεν περιορίζει τη σύνθεση του συστήματος κατανομής· επομένως, μπορεί να είναι 802.11 συμμορφώσιμο ή μεταβλητό. Εάν τα πλαίσια στοιχείων χρειάζονται μετάδοση προς και από ένα μη IEEE 802.11 WLAN, έπειτα αυτά τα πλαίσια, όπως καθορίζονται από το πρότυπο 802.11, εισέρχονται και εξέρχονται μέσω ενός λογικού σημείου αποκαλούμενου *Πύλη (Portal)*. Η πύλη παρέχει λογική ολοκλήρωση μεταξύ των υπαρκτών ενσύρματων LAN και των 802.11 LAN. Όταν το σύστημα κατανομής κατασκευάζεται με 802-τύπου συστατικά, όπως το 802.3 (Ethernet) ή το 802.5 (Token Ring), κατόπιν η πύλη και το σημείο πρόσβασης είναι οι ίδιες, ενεργώντας ως *μεταφραστική γέφυρα (translation bridge)*.

Το πρότυπο 802.11 καθορίζει το σύστημα κατανομής ως ένα στοιχείο που διασυνδέει BSS μέσα στο ESS μέσω σημείων πρόσβασης. Το σύστημα κατανομής υποστηρίζει τους τύπους κινητικότητας 802.11 με την παροχή λογικών υπηρεσιών απαραίτητων στο χειρισμό της χαρτογράφησης διεύθυνσης προορισμού και την άρραφη ολοκλήρωση πολλαπλών BSS. Ένα σημείο πρόσβασης είναι ένας προσπελάσιμος σταθμός, που παρέχει μια διεπαφή στο σύστημα κατανομής για σταθμούς εγκατεστημένους σε διάφορα BSS. Τα ανεξάρτητα δίκτυα BSS και ESS είναι διαφανή στο LLC στρώμα.

2.2.3 Τρόπος λειτουργίας των Ασύρματων Τοπικών Δικτύων

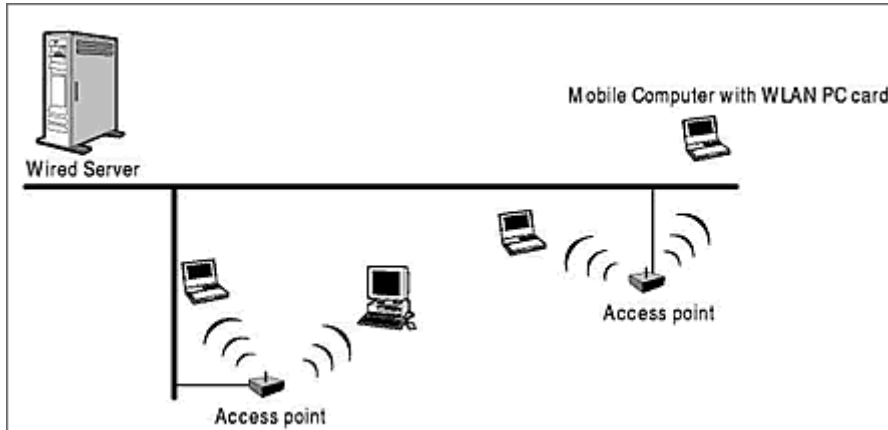
Τα ασύρματα LAN χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά μέσα μετάδοσης κυμάτων (το ραδιοκύμα και τις υπέρυθρες ακτίνες) για να μεταδώσουν τις πληροφορίες από ένα σημείο σε άλλο χωρίς να στηρίζονται σε οποιαδήποτε φυσική σύνδεση. Τα ραδιοκύματα αναφέρονται συχνά και ως ραδιοφέροντα επειδή εκτελούν απλά την λειτουργία της παράδοσης ενέργειας σε έναν μακρινό δέκτη. Το στοιχείο που μεταδίδεται τοποθετείται πάνω από το ραδιοφέρον έτσι ώστε να μπορεί να εξαχθεί ακριβώς στο λαμβάνον άκρο. Αυτό αναφέρεται ως διαμόρφωση του φέροντος από τις πληροφορίες που μεταδίδονται. Μόλις το στοιχείο τοποθετηθεί πάνω (διαμορφωθεί) από το ραδιοφέρον, το ραδιοσήμα καταλαμβάνει περισσότερες από μια απλή συχνότητα, δεδομένου ότι η συχνότητα ή ο ρυθμός δυαδικών ψηφίων της διαμορφωμένης πληροφορίας προστίθεται στο φέρον.

Τα πολλαπλά ραδιοφέροντα μπορούν να υπάρξουν στον ίδιο χώρο συγχρόνως χωρίς να παρεμβαίνει το ένα στο άλλο εάν τα ραδιοκύματα μεταδίδονται σε διαφορετικές ραδιοσυχνότητες. Για να εξαγάγει τα στοιχεία, ένας ραδιοδέκτης συντονίζει (ή επιλέγει) μια ραδιοσυχνότητα απορρίπτοντας όλα τα άλλα ραδιοσήματα σε διαφορετικές συχνότητες.

Σε μια χαρακτηριστική διαμόρφωση WLAN, ένας πομπός /δέκτης (πομποδέκτης), αποκαλούμενος *σημείο πρόσβασης (access point)*, συνδέεται με το ενσύρματο δίκτυο από μια σταθερή θέση χρησιμοποιώντας το τυποποιημένο καλώδιο Bernet. Εν συντομία, το σημείο πρόσβασης λαμβάνει, αποθηκεύει, και μεταδίδει στοιχεία μεταξύ του WLAN και της ενσύρματης υποδομής. Ένα απλό σημείο πρόσβασης μπορεί να υποστηρίξει μια μικρή ομάδα χρηστών και μπορεί να λειτουργήσει μέσα σε μια περιοχή λιγότερο από εκατό έως αρκετών εκατοντάδων ποδιών. Το σημείο πρόσβασης (ή η κεραία που συνδέεται με το σημείο πρόσβασης) είναι συνήθως τοποθετημένη ψηλά αλλά τοποθετημένη ουσιαστικά οπουδήποτε είναι πρακτική εφ' όσον εξασφαλίζεται η επιθυμητή ραδιοκάλυψη.

Τελικοί χρήστες έχουν πρόσβαση στο WLAN μέσω των ασύρματων προσαρμοστών (adapters) του τοπικού LAN, οι οποίοι εφαρμόζονται ως κάρτες PC στους notebook υπολογιστές, ή χρησιμοποιούν ISA ή PCI προσαρμοστές στους υπολογιστές γραφείου, ή πλήρως ενσωματωμένες συσκευές μέσα στους φορητούς υπολογιστές.

Οι προσαρμοστές WLAN παρέχουν μια διεπαφή μεταξύ του λειτουργικού συστήματος δικτύων πελατών (client network operating system, NOS) και των μέσων μετάδοσης κυμάτων (μέσω της κεραίας). Η φύση της ασύρματης σύνδεσης είναι διαφανής στο NOS.



Σχήμα 2.3: Τυπική Διαμόρφωση WLAN

2.2.4 Οφέλη των Ασύρματων Τοπικών Δικτύων

Η διαδεδομένη στρατηγική εμπιστοσύνης στη δικτύωση μεταξύ ανταγωνιστικών επιχειρήσεων και η μετωρική αύξηση του Διαδικτύου και των απευθείας σύνδεση (online) υπηρεσιών είναι ισχυρές καταθέσεις στα οφέλη των κοινών στοιχείων και των κοινών πόρων. Με τα ασύρματα LAN, οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε κοινές πληροφορίες χωρίς να χρειάζεται να συνδεθούν κάπου, και οι διαχειριστές δικτύων μπορούν να οργανώσουν ή να αυξήσουν τα δίκτυα χωρίς την εγκατάσταση ή μετακίνηση καλωδίων. Τα ασύρματα LAN προσφέρουν την ακόλουθη παραγωγικότητα, υπηρεσία, ευκολία, και πλεονεκτήματα κόστους σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα:

- **Η κινητικότητα βελτιώνει την παραγωγικότητα και την υπηρεσία** - Τα ασύρματα συστήματα LAN μπορούν να παρέχουν στους LAN χρήστες πρόσβαση σε πληροφορίες πραγματικού χρόνου οπουδήποτε στους οργανισμούς τους. Αυτή η κινητικότητα υποστηρίζει δυνατότητες παραγωγικότητας και απίθανων υπηρεσιών με ενσύρματα δίκτυα.
- **Ταχύτητα και απλότητα εγκατάστασης** - Η εγκατάσταση ενός ασύρματου τοπικού LAN συστήματος γίνεται γρήγορα και εύκολα, αποβάλλοντας την ανάγκη να “τραβηχτούν” καλώδια μέσω των τοίχων και των οροφών.
- **Ευελιξία εγκατάστασης** - Η ασύρματη τεχνολογία επιτρέπει στο δίκτυο να πάει όπου το καλώδιο δεν μπορεί.

- **Μειωμένο κόστος ιδιοκτησίας** - Ενώ η αρχική επένδυση που απαιτείται για το ασύρματο υλικό του τοπικού LAN μπορεί να είναι υψηλότερη από το κόστος του ενσύρματου υλικού, οι γενικές δαπάνες εγκαταστάσεων και οι δαπάνες κύκλου ζωής μπορούν να είναι σημαντικά χαμηλότερες. Τα μακροπρόθεσμα οφέλη κόστους είναι μέγιστα στα δυναμικά περιβάλλοντα που απαιτούν συχνές μετακινήσεις, προσθέσεις και αλλαγές.
- **Εξελιξιμότητα** - Τα ασύρματα συστήματα τοπικού LAN μπορούν να διαμορφωθούν σε μια ποικιλία τοπολογιών για να συναντήσουν τις ανάγκες συγκεκριμένων εφαρμογών και εγκαταστάσεων. Οι διαμορφώσεις αλλάζουν εύκολα και κυμαίνονται από τα ανεξάρτητα δίκτυα κατάλληλα για έναν μικρό αριθμό χρηστών στα πλήρη δίκτυα υποδομής χιλιάδων χρηστών που επιτρέπουν περιπλάνηση σε μια ευρεία περιοχή.

2.3 Στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC Layer)

2.3.1 Επισκόπηση του στρώματος MAC

Τα πρότυπα 802.11 καθορίζουν ένα κοινό στρώμα MAC για όλα τα φυσικά στρώματα 802.11. Το format πλαισίου του 802.11 είναι ελαφρώς πιο περίπλοκο από το format πλαισίου του Ethernet λόγω της ανάγκης να μεταφερθούν συγκεκριμένες ασύρματες πληροφορίες (π.χ., η διάρκεια της μετάδοσης), οι πληροφορίες ασφάλειας του 802.11 (π.χ., ένας κώδικας ακεραιότητας μηνυμάτων ανά πλαίσιο) και τουλάχιστον μια ακόμη διεύθυνση MAC που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του προοριζόμενου ασύρματου παραλήπτη (δηλ., που ενεργεί ως γέφυρα στο ενσύρματο δίκτυο) χωριστά από τον προσδιορισμό του στρώματος MAC. Αυτές οι πρόσθετες πληροφορίες απογυμνώνονται από το σημείο πρόσβασης καθώς μεταδίδει το πλαίσιο στο ενσύρματο τοπικό 802.11 LAN.

2.3.2 Μηχανισμοί Πρόσβασης Μέσου του προτύπου 802.11

Ο βασικός μηχανισμός MAC του 802.11, αποκαλούμενος Ανίχνευση Φέροντος Πολλαπλής Πρόσβασης με Αποφυγή Συχνότητας (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA*), είναι βασισμένος στην ανίχνευση και την αποφυγή των συγκρούσεων με τις μεταδόσεις άλλων συσκευών. Αυτό είναι παρόμοιο με το γνωστό Ethernet πρωτόκολλο CSMA/CD εκτός από το ότι η ανίχνευση σύγκρουσης Ethernet, το οποίο δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα σε ένα ασύρματο μέσο, έχει αντικατασταθεί από μια αποφυγή σύγκρουσης και ένα θετικό σχέδιο αναφοράς λήψης.

Οι προεκτάσεις που διευθυνοδοτούν μερικές από τις ανεπάρκειες του αρχικού σχεδιασμού MAC στους τομείς της ασφάλειας (802.11i) και η Ποιότητα της Υπηρεσίας (802.11e) αναμένονται να επικυρωθούν το 2004. Η *Wireless Fidelity (Wi-Fi®) Alliance*, μια μη κερδοσκοπική οργάνωση που διαμορφώθηκε το 1999 για να πιστοποιήσει τη διαλειτουργικότητα των προϊόντων WLAN Βασισμένων στις προδιαγραφές IEEE 802.11 προτύπου, περιελάμβανε ένα υποσύνολο των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων ασφάλειας 802.11i, που καλείται *Wi-Fi Protected Access™ (WPA)*, στις δοκιμές πιστοποίησής της το φθινόπωρο του 2003.

Ομοίως, η Wi-Fi Alliance έχει αναγγείλει ότι θα αρχίσει να εξετάζει ένα υποσύνολο των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων 802.11e QoS, αποκαλούμενο *Wi-Fi Multimedia Enhancements™ (WME)*, το φθινόπωρο του 2004.

Μερικά συστατικά κλειδιά του 802.11 CSMA/CA είναι:

- Ανίχνευση Φέροντος (Carrier Sense)
- Κατανεμημένη Λειτουργία Προορισμού (Distributed Coordination Function, DCF)
- Πλαίσια Αναφοράς Λήψης (Acknowledgement frames)
- Αίτηση για Αποστολή / Ελεύθερο για Αποστολή (Request to Send/Clear to Send, RTS/CTS)

2.3.2.1 Πλαίσιο αναφοράς λήψης

Οι σταθμοί ανιχνεύουν το ασύρματο μέσο και προσπαθούν να μεταδώσουν μόνο οπότε εμφανίζεται να είναι άεργο (idle). Η αποτυχία να παραληφθεί μια αναφορά λήψης δείχνει στον σταθμό μετάδοσης ότι μια σύγκρουση έχει συμβεί. Εάν διαμορφώνεται για να ξαναδοκιμάσει αποτυχημένες μεταδόσεις, ο σταθμός αναμεταδίδει το πλαίσιο με πρόσθετες προφυλάξεις: αυτή είναι η διαδικασία αποφυγής σύγκρουσης.

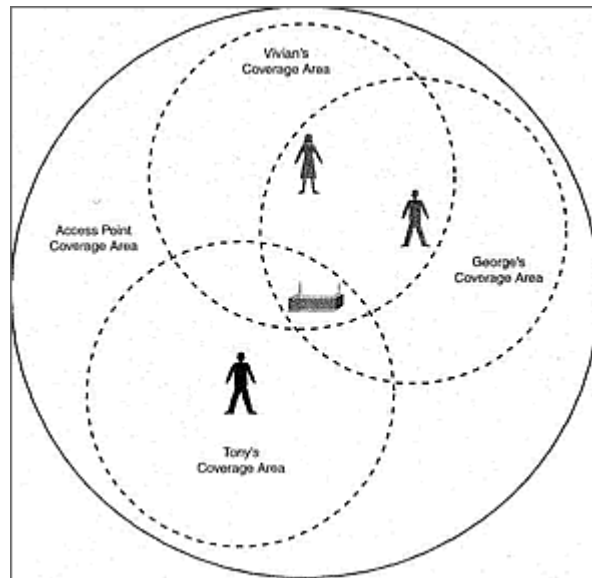
2.3.2.2 Το πρόβλημα του κρυφού κόμβου και ο μηχανισμός RTS/CTS

Εκτός από την βασική επιβεβαιωμένη ανταλλαγή πλαισίων, ένας προαιρετικός μηχανισμός Αίτηση για Αποστολή / Ελεύθερο για Αποστολή (*Request-To-Send/Clear-To-Send, RTS/CTS*) καθορίζεται για να αυξήσει την ευρωστία του πρωτοκόλλου MAC. Αυτός ο μηχανισμός μειώνει τον αντίκτυπο των συγκρούσεων για τις μακροχρόνιες μεταδόσεις: μια σύγκρουση ανιχνεύεται στο τέλος της σύντομης ανταλλαγής RTS/CTS παρά στο τέλος της μετάδοσης του πιο μακροχρόνιου πλαισίου στοιχείων. (βλ. 4.3.6)

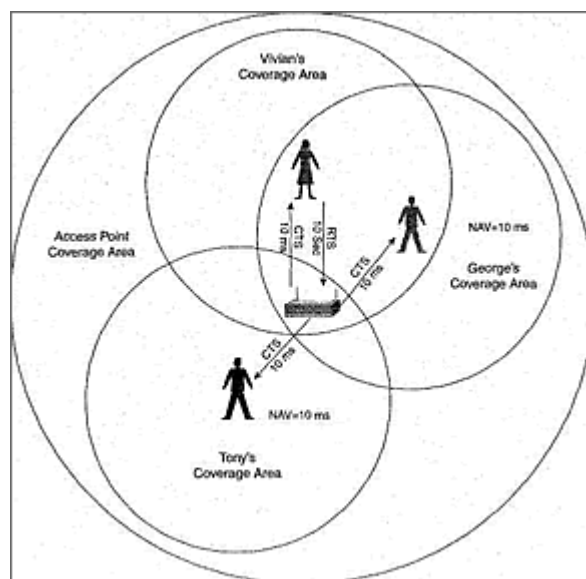
Η ανταλλαγή RTS/CTS προσπαθεί επίσης να εξετάσει το αποκαλούμενο "πρόβλημα κρυφού κόμβου" που εμφανίζεται όταν οι ασύρματες συσκευές είναι αρκετά μακριά η μια από την άλλη (π.χ., στις αντίθετες πλευρές ενός σημείου πρόσβασης) ή κρυφές η μια από την άλλη από κάποιο εμπόδιο έτσι ώστε να μην μπορούν να ανιχνεύσουν τις μεταξύ τους μεταδόσεις. Οι ασύρματες συσκευές που είναι κρυφές η μια από την άλλη, ανακριβώς, αξιολογούν ότι το κανάλι είναι ελεύθερο όταν στην πραγματικότητα η άλλη συσκευή μεταδίδει. Οι κρυφοί κόμβοι τείνουν να δοκιμάσουν ένα υψηλότερο ρυθμό συγκρούσεων. Για όλους αυτούς τους πρακτικούς λόγους, η ανταλλαγή RTS/CTS είναι μόνο χρήσιμη στα περιβάλλοντα WLAN όπου υπάρχει ένα υψηλό ποσό κυκλοφορίας και τα μεγέθη πακέτων είναι μεγάλα. Διαφορετικά, ο χρόνος που σώζεται από την αποφυγή των συγκρούσεων "κρυφού κόμβου" αντισταθμίζεται από την προστιθέμενη καθυστέρηση προκαλούμενη από την ανταλλαγή RTS/CTS πλαισίων.

Τμήμα 2.3. Στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC Layer)

Η Νίβιαν είναι ανίκανη να προσπελάσει το μέσο εξαιτίας ενός άλλου σταθμού που είναι στην περιοχή του AP αλλά και εκτός της περιοχής του σταθμού της. Το Σχήμα 2.4 επεξηγεί αυτήν την κατάσταση. Η Νίβιαν και ο George είναι στην περιοχή ο ένας του άλλου και στην περιοχή του AP. Εντούτοις κανένας από αυτούς δεν είναι στην περιοχή του Tony. Το Tony είναι στην περιοχή του AP και προσπαθεί κι αυτός να μεταδώσει στο μέσο. Η κατάσταση είναι γνωστή ως πρόβλημα κρυφού κόμβου, επειδή ο Tony είναι κρυμμένος από τη Νίβιαν και τον George.



Σχήμα 2.4: Το πρόβλημα του κρυφού κόμβου



Σχήμα 2.5: Κράτηση μέσου με Πλαίσια RTS/CTS

2.3.3 Προεκτάσεις QoS

Ο βασικός μηχανισμός MAC του 802.11 δεν έχει καμία υποστήριξη για *Ποιότητα Υπηρεσιών (Quality of Service, QoS)*: όλη η κυκλοφορία WLAN αντιμετωπίζεται σε μια καλύτερης βάσης προσπάθεια. Οι προεκτάσεις QoS απαιτούνται στα συστήματα WLAN που υποστηρίζουν τη μεικτή κυκλοφορία φωνής και στοιχείων προκειμένου να εξασφαλιστεί μια θετική εμπειρία τελικού χρήστη. Επειδή οι διαφορετικοί τύποι κυκλοφορίας έχουν διαφορετικές απαιτήσεις για την καθυστέρηση και το ρυθμό πτώσης πακέτου, οι προεκτάσεις QoS επιτρέπουν τύπους κυκλοφορίας να αντιμετωπίζονται διαφορετικά κατά τη διάρκεια της πρόσβασης μέσω ενός WLAN, επιτρέποντας κατά συνέπεια ειδικά κριτήρια απόδοσης.

Ένας δεύτερος προαιρετικός μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης αποκαλούμενος *λειτουργία σημείου συντονισμού (Point Coordination Function, PCF)*, ο οποίος περιελήφθη στο αρχικό πρότυπο 802.11 για να παρέχει αιτιοκρατική πρόσβαση στο ασύρματο μέσο για χρονικά εξαρτημένη κυκλοφορία. Το PCF βασίζεται στην φύλαξη των πόρων και χρησιμοποιεί ψηφοφορία από το σημείο πρόσβασης στις μεταδόσεις χρονοδιαγράμματος. Αν και ο μηχανισμός PCF ήταν προοριζόμενος να υποστηρίξει QoS, διάφορα προβλήματα έχουν εμφανιστεί με την αρχική προδιαγραφή του και δεν έχει υιοθετηθεί ευρέως.

Η προτεινόμενη τροποποίηση 802.11e QoS καθορίζει μια νέα λειτουργία συντονισμού αποκαλούμενη *Υβριδική λειτουργία συντονισμού (Hybrid Coordination Function, HCF)*. Το HCF έχει δύο τρόπους λειτουργίας: την *ενισχυμένη καταναμημένη πρόσβαση καναλιού (Enhanced Distributed Channel Access, EDCA)* και την προαιρετική *HCF ελεγχόμενη πρόσβαση καναλιού (HCF Controlled Channel Access, HCCA)*.

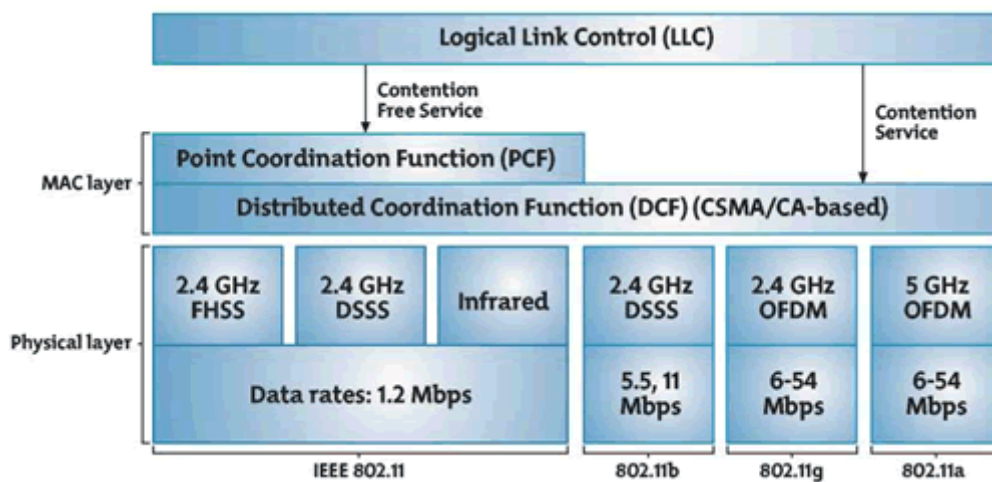
Ιδιόκτητες προεκτάσεις QoS υπάρχουν στη αγορά, ιδιαίτερα στα συστήματα που στοχεύουν στην παράδοση φωνής πάνω από τα WLAN. Η ανάγκη για αυτές τις ιδιόκτητες λύσεις θα ελαττώνεται καθώς η ανάπτυξη και η υποστήριξη του 802.11e γίνεται πιο διαδεδομένη και η δοκιμή Wi-Fi της Alliance's WME εξασφαλίζει διαλειτουργικότητα μεταξύ των προμηθευτών διαφορετικών εφαρμογών του προτύπου.

2.4 Τεχνολογίες Φυσικού Επιπέδου του προτύπου 802.11

Η επικύρωση των προτύπων 802.11a και 802.11b το 1999 μετασχημάτισε την ασύρματη τεχνολογία (WLAN) από μια λύση για τους σαρωτές γραμμωτών κωδικών (barcode scanners) σε μια γενικευμένη λύση για τη φορητή, χαμηλής τιμής, διαλειτουργική πρόσβαση στο δίκτυο. Σήμερα, πολλοί προμηθευτές προσφέρουν 802.11a και 802.11b πελάτες και σημεία πρόσβασης που παρέχουν απόδοση συγκρίσιμη με αυτή του ενσύρματου Ethernet. Η έλλειψη μιας ενσύρματης σύνδεσης δικτύων δίνει στους χρήστες την ελευθερία να κινούνται δεδομένοι ότι χρησιμοποιούν τις συσκευές τους. Αν και η τυποποίηση είναι βασική, η χρήση συχνοτήτων χωρίς άδεια, όπου μια δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία χορήγησης αδειών απαιτείται, έχει συμβάλει στη γρήγορη και κυρίαρχη διάδοση της τεχνολογίας.

Ως σώμα προτύπων το 802.11 καθόρισε στην πράξη έναν αριθμό διαφορετικών φυσικών τεχνολογιών στρώματος (PHY) που χρησιμοποιούνται με το στρώμα MAC του 802.11. Αυτό το κεφάλαιο εξετάζει κάθε ένα από αυτά τα 802.11 PHY, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

- Το 802.11 2.4 GHz PHY αλμάτων συχνότητας (802.11 2.4 GHz frequency hopping PHY)
- Το 802.11 2.4 GHz PHY ευρείας ακολουθίας (802.11 2.4 GHz direct sequencing PHY)
- Το 802.11b 2.4 GHz PHY ευρείας ακολουθίας (802.11b 2.4 GHz direct sequencing PHY)
- Το 802.11a 5 GHz PHY Ορθογωνικής Πολύπλεξης με Διαίρεση Συχνότητας (802.11a 5 GHz Orthogonal Frequency Division Multiplexing PHY)
- Το 802.11g 2.4 GHz PHY εκτεταμένου ρυθμού (802.11g 2.4 GHz extended rate physical layer, ERP)



Σχήμα 2.6: Πρότυπα IEEE 802.11

Ο ακόλουθος Πίνακας 2.1 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των φυσικών στρωμάτων 802.11. Οι ρυθμοί που πρέπει να υποστηριχθούν από οποιοδήποτε εξοπλισμό που λειτουργεί στη ζώνη συχνότητας, οι αποκαλούμενοι υποχρεωτικοί ρυθμοί, υπογραμμίζονται σε αυτόν τον πίνακα.

	802.11b	802.11g	802.11a
Adopted by IEEE	July 1999	June 2003	July 1999
Technology	DSSS	OFDM and DSSS	OFDM
Frequency band	2.4 GHz	2.4 GHz	5 GHz
Channels (US)	3 non-overlapping	3 non-overlapping	13 increasing to 24 ¹
Physical rates	11, 5.5, 2, and 1 Mbps	All 11a and 11b rates	54, 48, 36, 24, 18, 12, 9, and 6 Mbps
Modulation	CCK	OFDM and CCK	OFDM
Frequencies	2.4-2.497 GHz	2.4-2.497 GHz	5.15-5.35 GHz 5.425-5.675GHz 5.725-5.875GHz

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά του Φυσικού Στρώματος 802.11 προτύπου

2.4.1 Πρότυπα WLAN

Το ίδρυμα της επικρατούσας τάσης των προϊόντων WLAN άρχισε με τα αρχικά πρότυπα 802.11 που αναπτύχθηκαν το 1997 από το Ίδρυμα Ηλεκτρικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικής (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE). Εκείνο το πρότυπο βάσης συνεχίζει να ενισχύεται μέσω προσθηκών εγγράφων που καθορίζεται από ένα γράμμα μετά από το όνομα 802.11, όπως 802.11b, 802.11a, ή 802.11g. Το γράμμα επίθεμα αντιπροσωπεύει την ομάδα στόχου που καθορίζει την προέκταση του προτύπου. Αυτές οι αυξήσεις φέρουν αυξήσεις στο ρυθμό στοιχείων και τη λειτουργικότητα που οδηγούν στη γρήγορη πρόοδο της αγοράς WLAN. Εργασίες για ένα υψηλής ταχύτητας φυσικό στρώμα (802.11n) άρχισε στα τέλη του 2003. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά είναι διαθέσιμες μέσω της παρακάτω ιστοσελίδας: <http://grouper.ieee.org/groups/802/11>.

IEEE 802.11b

Επικυρωμένο από το IEEE τον Ιούλιο του 1999, το 802.11b επεκτείνει την αρχική IEEE 802.11 διεύρυνση φάσματος ευρείας ακολουθίας (DSSS) για να λειτουργήσει μέχρι τα 11 Mbps στο χωρίς άδεια 2.4 GHz φάσμα χρησιμοποιώντας τη συμπληρωματική διαμόρφωση κώδικα (complementary code keying, CCK). Οι τέσσερις ρυθμοί στοιχείων του 1, 2, 5.5, και 11 Mbps καθορίζονται σε μέχρι τρία μη επικαλυπτόμενα κανάλια, και οι χαμηλότεροι δύο ρυθμοί επιτρέπονται, επίσης, σε μέχρι 13 επικαλυπτόμενα κανάλια.

IEEE 802.11a

Επικυρωμένο από το IEEE ταυτόχρονα με το 802.11b, το IEEE 802.11a πρότυπο λειτουργεί στο 5 GHz φάσμα. Το πρότυπο 802.11a σχεδιάστηκε για υψηλότερες εφαρμογές εύρους ζώνης από το 802.11b, και περιλαμβάνει ρυθμούς στοιχείων της τάξης των 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps χρησιμοποιώντας την Ορθογωνική Πολύπλεξη με Διαίρεση Συχνότητας (OFDM) διαμόρφωση σε μέχρι 12 ευδιάκριτα κανάλια.

IEEE 802.11g

Τον Ιούλιο του 1999, η υποεπιτροπή 802.11g επιφορτίστηκε να επεκτείνει το χωρίς άδεια φάσμα 2.4 GHz σε ρυθμούς στοιχείων γρηγορότερους από 20 Mbps. Το προκύπτον πρότυπο 802.11g επικυρώθηκε τον Ιούνιο του 2003. Το πρότυπο 802.11g παρέχει προαιρετικούς ρυθμούς στοιχείων μέχρι 54 Mbps, και απαιτεί την οπίσθια συμβατότητα (backward compatibility) με τις συσκευές 802.11b για να προστατεύσει τις ουσιαστικές επενδύσεις στις σημερινές εγκαταστάσεις WLAN.

Το πρότυπο 802.11g περιλαμβάνει υποχρεωτικά και προαιρετικά συστατικά. Καθορίζει την OFDM (την ίδια τεχνολογία που χρησιμοποιεί το 802.11a) και CCK ως υποχρεωτική διαμόρφωση με 24 Mbps ως τον μέγιστο υποχρεωτικό ρυθμό στοιχείων, αλλά παρέχει επίσης προαιρετικούς υψηλούς ρυθμούς στοιχείων της τάξης των 36, 48, και 54 Mbps.

2.5 Τεχνολογικές Επιλογές WLAN

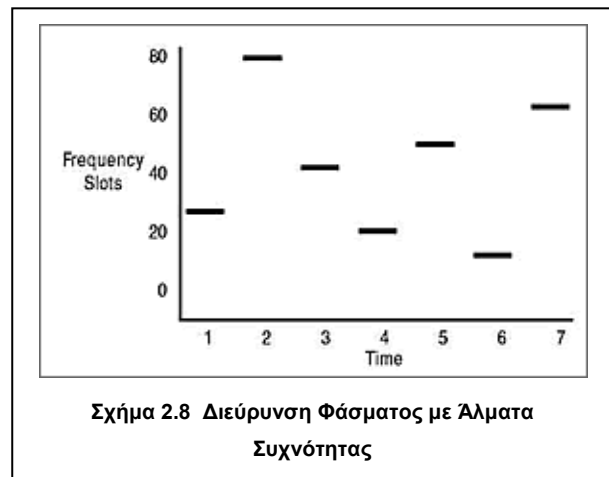
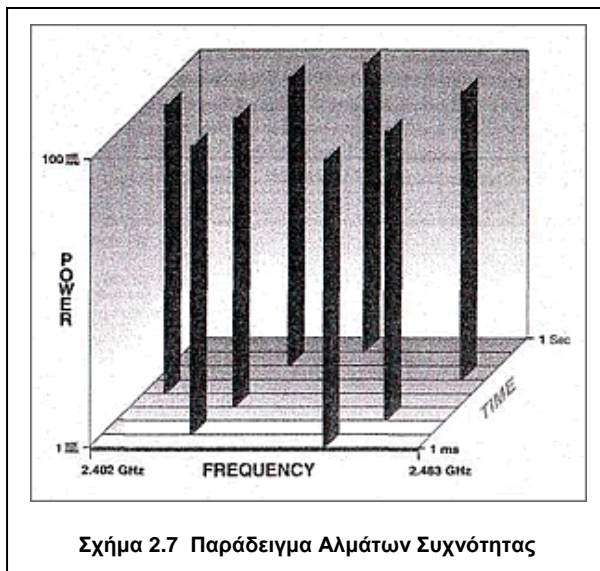
Οι κατασκευαστές των ασύρματων LAN έχουν μια περιοχική τεχνολογιών απ' όπου επιλέγουν κατά το σχεδιασμό μιας ασύρματης λύσης τοπικού LAN. Κάθε τεχνολογία έρχεται με ένα σύνολο πλεονεκτημάτων και περιορισμών.

2.5.1 Διεύρυνση Φάσματος

Τα περισσότερα ασύρματα LAN συστήματα χρησιμοποιούν την τεχνολογία διεύρυνσης φάσματος, μια ευρείας ζώνης τεχνική ραδιοσυχνότητας που αναπτύχθηκε αρχικά από τους στρατιωτικούς για τη χρήση αξιόπιστων, ασφαλών, κρίσιμων αποστολών συστημάτων επικοινωνίας. Το διευρυμένο φάσμα σχεδιάστηκε να ανταλλάσσει αποδοτικότητα εύρους ζώνης για αξιοπιστία, ακεραιότητα, και ασφάλεια. Με άλλα λόγια, περισσότερο εύρος ζώνης καταναλώνεται απ' ό,τι στην περίπτωση της μετάδοσης ζώνης στενού εύρους, αλλά η ανταλλαγή παράγει ένα σήμα, ουσιαστικά, δυνατότερο και ευκολότερο να ανιχνευθεί, υπό τον όρο ότι ο δέκτης ξέρει τις παραμέτρους του διευρυμένου φάσματος σήματος που μεταδίδεται. Εάν ένας δέκτης δεν είναι συντονισμένος στη σωστή συχνότητα, ένα σήμα διευρυμένου φάσματος μοιάζει με παρασιτικό θόρυβο. Υπάρχουν δύο τύποι ασύρματου διευρυμένου φάσματος: αλμάτων συχνότητας και ευρείας ακολουθίας.

2.5.2 Διεύρυνση Φάσματος με Άλματα Συχνότητας

Τα FHSS WLAN υποστηρίζουν 1 και 2 Mbps ρυθμούς στοιχείων. Όπως υπονοεί το όνομα, μια FHSS συσκευή αλλάζει ή αναπηδά συχνότητες με ένα προκαθορισμένο σχέδιο αναπηδήσεων και ένα καθορισμένο ρυθμό, όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 2.7-2.8. Οι συσκευές FHSS χωρίζουν το διαθέσιμο φάσμα σε 79 μη επικαλυπτόμενα κανάλια (για τη Βόρεια Αμερική και το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης) κατά μήκος του φάσματος συχνότητας 2.402 έως 2.480 GHz. Κάθε ένα από τα 79 κανάλια είναι 1 MHz ευρύ, έτσι τα FHSS WLAN χρησιμοποιούν ένα σχετικά γρήγορο 1 MHz ρυθμό συμβόλου και αναπηδά μεταξύ των 79 καναλιών σε ένα πολύ πιο αργό ρυθμό.



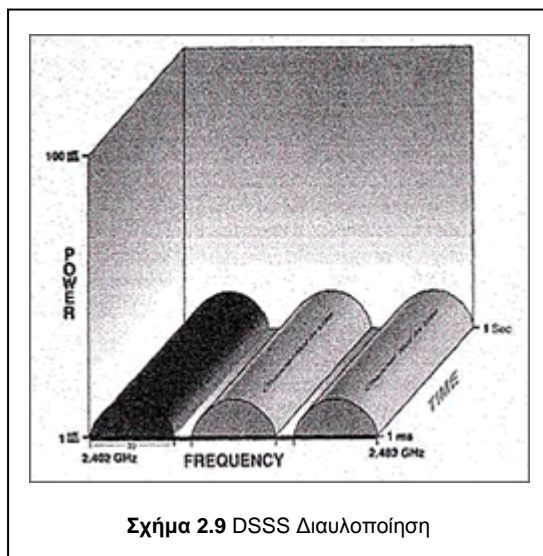
Η ακολουθία αναπηδήσεων πρέπει να αναπηδήσει σε ένα ελάχιστο ρυθμό 2,5 φορές ανά δευτερόλεπτο και πρέπει να περιέχει το ελάχιστο έξι κανάλια (6 MHz). Για να ελαχιστοποιήσει τις συγκρούσεις μεταξύ των επικαλυπτόμενων περιοχών κάλυψης, οι πιθανές ακολουθίες αναπηδήσεων μπορεί να χωριστούν σε τρία σύνολα μήκους, 26 για χρήση στη Βόρεια Αμερική και του μεγαλύτερου μέρους της Ευρώπης.

Στην ουσία, τα μοτίβα αναπηδήσεων παρέχουν μια αργή διαδρομή μέσω των πιθανών καναλιών κατά τέτοιο τρόπο ώστε κάθε αναπήδηση καλύπτει τουλάχιστον 6 MHz και, όταν θεωρείται μια πολλαπλή κυψελοειδής ανάπτυξη, ελαχιστοποιείται η πιθανότητα σύγκρουσης. Το μειωμένο καθορισμένο μήκος για τις χώρες όπως η Ιαπωνία, η Ισπανία, και Γαλλία έχει ως αποτέλεσμα από μικρότερη ISM κατανομή ζώνης συχνότητας σε 2.4 GHz.

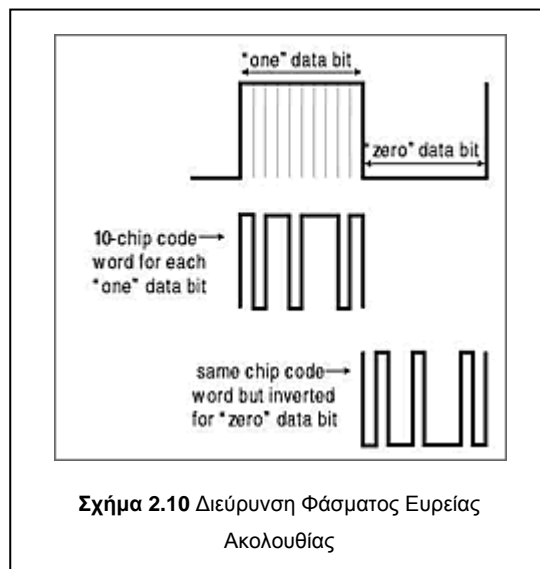
2.5.3 Διεύρυνση Φάσματος Ευρείας Ακολουθίας

Το DSSS είναι ένα άλλο φυσικό στρώμα για τις προδιαγραφές 802.11. Όπως καθορίζεται στα πρότυπα του 1997 802.11, το DSSS υποστηρίζει ρυθμούς στοιχείων 1 και 2 Mbps. Το 1999, η 802.11 Working Group επικύρωσε τα πρότυπα 802.11b να υποστηρίζουν ρυθμούς στοιχείων 5,5 και 11 Mbps. Το φυσικό στρώμα 802.11b DSSS είναι συμβατό με τα υπάρχοντα 802.11 DSSS WLAN. Το PLCP για 802.11b DSSS είναι το ίδιο με αυτό για 802.11 DSSS, με την προσθήκη ενός προαιρετικού βραχυπρόθεσμου προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού (preamble) και μιας σύντομης κεφαλίδας (header).

Το DSSS WLAN χρησιμοποιεί 22 MHz κανάλια, το οποίο επιτρέπει σε πολλαπλά WLAN να λειτουργήσουν στη ίδια περιοχή κάλυψης. Στη Βόρεια Αμερική και το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης, η χρήση 22 MHz καναλιών επιτρέπει τρία μη επικαλυπτόμενα κανάλια στην περιοχή 2.4 έως 2.483 GHz. Το Σχήμα 2.9 παρουσιάζει αυτά τα κανάλια.



Σχήμα 2.9 DSSS Διαυλοποίηση



Σχήμα 2.10 Διεύρυνση Φάσματος Ευρείας Ακολουθίας

2.5.4 Τεχνολογία Ζώνης Στενού Εύρους

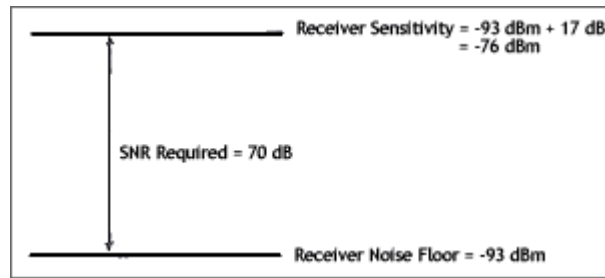
Ένα ραδιοσύστημα ζώνης στενού εύρους μεταδίδει και λαμβάνει πληροφορίες χρηστών για μια συγκεκριμένη ραδιοσυχνότητα. Το ραδιοκύμα ζώνης στενού εύρους κρατά το ραδιοσήμα όσο το δυνατόν πιο στενό μόνο για να περάσει τις πληροφορίες. Η ανεπιθύμητη συνακρόαση (crosstalk) μεταξύ των καναλιών επικοινωνίας αποφεύγεται συντονίζοντας προσεκτικά τους διαφορετικούς χρήστες στις διαφορετικές συχνότητες καναλιού.

Μια ιδιωτική τηλεφωνική γραμμή είναι σαν μια ραδιοσυχνότητα. Όταν κάθε σπίτι σε μια γειτονιά έχει την ιδιωτική τηλεφωνική γραμμή του, οι άνθρωποι σε ένα σπίτι δεν μπορούν να ακούσουν τις κλήσεις που γίνονται σε άλλα σπίτια. Σε ένα ραδιοσύστημα, η μυστικότητα και η μη παρεμβολή ολοκληρώνονται με την χρήση των χωριστών ραδιοσυχνοτήτων. Ο ραδιοδέκτης φιλτράρει όλα τα σήματα εκτός από αυτά στην οριζόμενη συχνότητά του.

2.6 Απόδοση Δέκτη WLAN

2.6.1 Βασικές Έννοιες Απόδοσης Δέκτη

Οι ραδιοδέκτες χαρακτηρίζονται από την ευαισθησία δέκτη (receiver sensitivity), η οποία είναι το ελάχιστο επίπεδο σήματος για τον δέκτη ώστε να είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει κατά αποδεκτό τρόπο τις πληροφορίες. Το ελάχιστο όριο αποδοχής κυβερνάται από έναν συγκεκριμένο ρυθμό εκπομπής εσφαλμένων bit (BER), ρυθμό εκπομπής εσφαλμένων πακέτων (PER), ή την αναλογία εσφαλμένων πλαισίων (FER). Παραδείγματος χάριν, το πρότυπο 802.11a καθορίζει ότι η ελάχιστη συμμορφώσιμη απόδοση δέκτη σε ένα ρυθμό στοιχείων 54 Mbps είναι -65 dBm σε 10% PER. Σημειώστε ότι η ευαισθησία δέκτη είναι επίσης σε ένα συγκεκριμένο ρυθμό στοιχείων επειδή κάθε πλάνο διαμόρφωσης έχει τη δική του απαίτηση αναλογίας σήματος προς θόρυβο (SNR). Γενικά, όσο υψηλότερος ο ρυθμός στοιχείων, τόσο υψηλότερο το SNR που απαιτείται και ως εκ τούτου τόσο υψηλότερο το επίπεδο ευαισθησίας δέκτη. Η ευαισθησία δέκτη του ραδιοκύματος κυβερνάται επίσης από τον αριθμό θορύβου δέκτη. Όλοι οι δέκτες έχουν κάποιο υποκείμενο επίπεδο θορύβου βάσης, είτε από την ακρίβεια της ψηφιακής επεξεργασίας είτε από την απόδοση των αναλογικών συστατικών. Αυτό το επίπεδο θορύβου είναι το κατώτατο όριο θορύβου. Καθώς το κατώτατο όριο θορύβου αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η ευαισθησία δέκτη επειδή το ελάχιστο επίπεδο σήματος πέραν του θορύβου, SNR, καθορίζεται για το πλάνο διαμόρφωσης. Αυτή η σκέψη απεικονίζεται στο **Σχήμα 2.11**. Για να αξιολογήσει την απόδοση ενός ραδιοκύματος, η ευαισθησία δέκτη είναι μια από τις σημαντικές εισόδους στον υπολογισμό προϋπολογισμού της σύνδεσης που καθορίζει τελικά τους επιτεύξιμους ρυθμούς στοιχείων και τις περιοχές. Γενικά, προτιμάται η χαμηλότερη ευαισθησία δέκτη που είναι οικονομικά εφικτή.



Σχήμα 2.11: Υπολογισμός Ευαισθησίας Δέκτη

2.6.2 Μετρήσεις Απόδοσης Δέκτη

2.6.2.1 Ρυθμός Εκπομπής Εσφαλμένων bit (BER)

Μια από τις αλλαγές που έχουν επιφέρει τα σύγχρονα ψηφιακά συστήματα επικοινωνιών στη ραδιομηχανική είναι η ανάγκη για τερματικές (end-to-end) μετρήσεις απόδοσης. Το μέτρο εκείνης της απόδοσης είναι συνήθως ο ρυθμός εμφάνιση εσφαλμένων bit (bit-error rate, BER), που ποσολογεί την αξιοπιστία ολόκληρου του ραδιοσυστήματος από τα bits που εισάγονται ("bits in") έως τα bits που εξάγονται ("bits out"), συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών, των κεραιών και της ενδιάμεσης πορείας σήματος.

Στη επιφάνεια, το BER είναι μια απλή έννοια - ο καθορισμός του είναι απλός:

$$\text{BER} = \frac{\text{Σφάλματα}}{\text{Συνολικός Αριθμός bits}}$$

Με ένα ισχυρό σήμα και μια αδιατάρακτη πορεία σήματος, αυτός ο αριθμός είναι τόσο μικρός ώστε είναι ασήμαντος. Γίνεται σημαντικός όταν επιθυμούμε να διατηρήσουμε μια ικανοποιητική αναλογία σήματος προς θόρυβο, παρουσία της ατελούς μετάδοσης μέσω των ηλεκτρονικών στοιχείων του κυκλώματος (ενισχυτές, φίλτρα, αναμίκτες, και ψηφιακοί /αναλογικοί μετατροπείς) και του μέσου διάδοσης (π.χ. η ραδιοπορεία ή η οπτική ίνα).

Οποιαδήποτε σε βάθος ανάλυση των διαδικασιών που έχουν επιπτώσεις στο BER απαιτεί σημαντική μαθηματική ανάλυση, η οποία δεν είναι σκοπός αυτής της σύντομης επισκόπησης.

2.6.2.2 Θόρυβος και BER

Ο θόρυβος είναι ο κύριος εχθρός της απόδοσης BER. Ο θόρυβος είναι μια τυχαία διαδικασία, που καθορίζεται με όρους στατιστικής. Ο θόρυβος που εισάγεται από τα στοιχεία κυκλώματος περιγράφεται με μια λειτουργία πυκνότητας γκαουσιανής πιθανότητας (Gaussian probability density function), ενώ η διαδρομή του σήματος περιγράφεται συνήθως με μια λειτουργία πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh (Rayleigh probability density function). Μια Rayleigh, η διάλειαση, η διαδρομή του σήματος δεν είναι "θόρυβος" υπό την διαισθητική έννοια του γνωστού σφυριχτού ήχου του "λευκού θορύβου," αλλά είναι μια τυχαία διαδικασία που αναλύεται με τον ίδιο τρόπο με το γκαουσιανό θόρυβο.

Χωρίς μετάβαση στη λεπτομέρεια, οι μαθηματικές εκφράσεις αυτών των λειτουργιών επιτρέπουν την ανάλυση ενός συστήματος, οι οποίες θα βοηθήσουν στην πρόβλεψη της απόδοσής του.

2.6.2.3 Ορισμός E_b/N_o

E_b είναι το σύμβολο που εκφράζει την ενέργεια που απαιτείται για την αναπαράσταση ενός bit πληροφορίας στο διαμορφωμένο σήμα και το N_o εκφράζει τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου (ισχύς θορύβου σε ένα εύρος ζώνης 1 Hz).

Η ενέργεια ανά bit, E_b , μπορεί να καθοριστεί με τη διαίρεση της ισχύς του φέροντος από το ρυθμό των δυαδικών ψηφίων. Σαν μέτρο ενέργειας, το E_b έχει μονάδα τα joules. Το N_o σαν μέτρο ισχύος μετριέται σε Watt/Hz, έτσι το E_b/N_o είναι ένας αδιάστατος όρος, ή απλά, μια αριθμητική αναλογία.

Το E_b/N_o , είναι μια μορφή SNR που εκφράζει την αναλογία σήματος προς θόρυβο.

2.6.2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το BER

Ένας τρόπος να χαμηλώσει η φασματική πυκνότητα του θορύβου είναι να μειωθεί το εύρος ζώνης, αλλά περιοριζόμαστε από το εύρος ζώνης που απαιτείται για να μεταδοθεί ο επιθυμητός ρυθμός δυαδικών ψηφίων (κριτήρια Nyquist). Μπορούμε επίσης να αυξήσουμε την ενέργεια ανά bit με τη χρήση υψηλότερης μετάδοσης ισχύος, αλλά η παρεμβολή με άλλα συστήματα μπορεί να περιορίσει αυτή την επιλογή. Ένας χαμηλότερος ρυθμός δυαδικών ψηφίων αυξάνει την ενέργεια ανά bit, αλλά χάνουμε σε χωρητικότητα. Τελικά, η βελτιστοποιημένη αναλογία E_b/N_o είναι μια ισορροπιστική πράξη μεταξύ αυτών των παραγόντων.

2.6.2.5 Μετρήσεις BER

Η απόδοση ενός δέκτη καθορίζεται από τη δυνατότητά του να λάβει και να αποδιαμορφώσει ένα επιθυμητό σήμα παρουσία θορύβου ή /και άλλων παρεμβαινόντων σημάτων. Αν και υπάρχουν διάφορες μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για να εξετάσουν την απόδοση ενός δέκτη, όλες τους μετρούν την ίδια ποσότητα υπό διαφορετικούς όρους. Η μετρημένη ποσότητα είναι ο ρυθμός εκπομπής εσφαλμένων bit. Το BER είναι η πιθανότητα ότι ένα μεταδιδόμενο bit θα παραληφθεί και θα ανιχνευθεί εσφαλμένο. Φυσικά, οι καλύτεροι δέκτες έχουν χαμηλότερο BER.

Τα διαφορετικά ασύρματα πρότυπα δίνουν διαφορετικά ονόματα στις διάφορες μετρήσεις BER όπως: Minimum Input Power Sensitivity, Minimum Input Level Sensitivity, Adjacent Channel Rejection, Adjacent Channel Selectivity, Reference Sensitivity Level, Dynamic Range, Blocking, Intermod. Όπως αναφέρεται νωρίτερα, όλες οι παραπάνω μετρήσεις είναι μετρήσεις BER υπό διαφορετικούς όρους. Αυτοί οι διαφορετικοί όροι περιλαμβάνουν τον πρόσθετο λευκό γκαουσιανό θόρυβο (AWGN), τα διαμορφωμένα σήματα παρεμβολής, και τα σήματα παρεμβολής CW. Τα σήματα παρεμβολής μπορούν να είναι εντός ζώνης ή /και εκτός ζώνης. Χαρακτηριστικά, τα πρότυπα διευκρινίζουν ότι το BER δεν πρέπει να υπερβαίνει μια ορισμένη τιμή για ορισμένα επίπεδα ισχύος των επιθυμητών και παρεμβαινόντων σημάτων, και ένα ορισμένο offset συχνότητας (μεταξύ της επιθυμητής συχνότητας καναλιού του σήματος και της συχνότητας των παρεμβαινόντων σημάτων).

Ενώ η βασική έννοια της BER μέτρησης είναι απλή - στέλνεται ένα ρεύμα στοιχείων μέσω του

συστήματος και συγκρίνεται η έξοδος με την είσοδο - η εκτέλεση του δεν είναι τετριμμένη.

Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα του προτύπου IEEE 802.11 Κεφάλαιο 2

Κατά τη διάρκεια μιας απείρωσ μακροχρόνιας περιόδου, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η μετάδοση στοιχείων είναι μια τυχαία διαδικασία. Εντούτοις, δεν θέλουμε να περιμένουμε για πάντα να κάνουμε μια μέτρηση BER! Έτσι μια ψευδοτυχαία ακολουθία στοιχείων χρησιμοποιείται για αυτήν την δοκιμή. Το καλούμε "ψευδο" τυχαίο επειδή δεν μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα αληθινά τυχαίο σήμα χρησιμοποιώντας τις αιτιοκρατικές (μαθηματικές) μεθόδους. Ευτυχώς, μερικοί έξυπνοι μαθηματικοί έχουν υπολογίσει ικανοποιητικές προσεγγίσεις της τυχαίας συμπεριφοράς έτσι ώστε να μπορούμε γρήγορα να κάνουμε τις ακριβείς BER μετρήσεις.

Το επόμενο ζήτημα μέτρησης είναι πρακτικό - εμείς δεν θέλουμε να εγκαταστήσουμε πλήρως το σύστημά μας για να κάνει την δοκιμή. Θα ήταν πάρα πολύ δαπανηρό και χρονοβόρο να χτιστούν ολόκληρα ραδιοκύματα και να εγκατασταθούν με γραμμές μετάδοσης, πύργους και κεραιές μετάδοσης, μόνο και μόνο για να εξεταστεί η απόδοση του ρυθμού εκπομπής εσφαλμένων bit ενός ιδιαίτερου σχεδίου φιλτραρίσματος ή κυκλώματος αποδιαμόρφωσης.

Ας επιστρέψουμε στο θέμα του θορύβου. Ο ραδιοθόρυβος είναι γκαουσιανός στη φασματική πυκνότητα ισχύος του. Αυτό περιλαμβάνει το θόρυβο συνδέσεων ημιαγωγών (semiconductor junction noise) (σε πλήρη διεξαγωγή) και το θερμικό θόρυβο στους αντιστάτες. Οι ειδικά σχεδιασμένες "δίοδοι θορύβου" μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραγάγουν το θόρυβο με προβλέψιμα φασματικά χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να προστεθούν στη διαδρομή του σήματος σε ένα ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον.

Είναι επίσης δυνατό να προστεθούν χαρακτηριστικά Rayleigh στο σήμα, που χρησιμοποιεί πολλαπλά κανάλια με μεταβλητές χρονικές καθυστερήσεις για να προσομοιώσει μεταβαλλόμενες συνθήκες διαδρομών. Ο συνδυασμός γκαουσιανού θορύβου και διάλειψης Rayleigh έχει γίνει εξαιρετικά σημαντικός στην ανάπτυξη νέων ψηφιακών εξοπλισμών επικοινωνίας και συστημάτων, δεδομένου ότι επιτρέπουν εύκολη εξέταση. Η μαθηματική φύση της μετάδοσης των ψηφιακών σημάτων επιτρέπει επίσης την προσομοίωση υπολογιστών, αλλά με τα πρακτικά όρια που επιβάλλονται από τις παραλλαγές παραγωγής στα συστατικά του συστήματος.

2.6.2.6 Χρήση στοιχείων BER

Όταν το BER απειλεί την χρησιμότητα ενός συστήματος, υπάρχουν πολλά σχέδια δράσης. Κατ' αρχάς, η διαδικασία ανίχνευσης σφαλμάτων πρέπει να προσδιορίσει την αιτία των λαθών. Είναι σχετική με το κύκλωμα με ή σχετική με τη διαδρομή; Ποιο είναι το κόστος της αποκατάστασης; Θα έπρεπε να βελτιώσουμε το υλικό, να ακολουθήσουμε τις αλλαγές στο περιβάλλον μετάδοσης, ή να επιλέξουμε ένα διαφορετικό format διαμόρφωσης;

Μερικές φορές η λύση είναι βασισμένη στο λογισμικό διόρθωσης σφάλματος. Αυτές οι τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά έτη στις επίγειες και δορυφορικές επικοινωνίες. Αυτές οι τεχνικές διατίθενται με κόστος τη χαμηλότερη ρυθμοαπόδοση στοιχείων, αλλά μπορούν αποτελεσματικά να μειώσουν τα BER.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ OFDM

3.1 Εισαγωγή

Η φύση των εφαρμογών WLAN απαιτούν υψηλούς ρυθμούς στοιχείων. Ρεαλιστικά αντιμέτωποι με το συνεχώς απρόβλεπτο ασύρματο κανάλι υψηλών ρυθμών στοιχείων επικοινωνίας δεν είναι εύκολος στόχος. Η ιδέα της μετάδοσης πολλαπλών φερόντων έχει εμφανιστεί πρόσφατα για να χρησιμοποιηθεί στην καταπολέμηση της εκθρότητας του ασύρματου καναλιού ως υψηλού ρυθμού στοιχείων επικοινωνίας. Η OFDM είναι μια ειδική μορφή μετάδοσης πολλαπλών φερόντων όπου όλοι οι υποφέροντα είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Η OFDM υπόσχεται υψηλότερη δυνατότητα μετάδοσης ρυθμού στοιχείων χρήστη σε λογική πολυπλοκότητα και ακρίβεια.

Στους υψηλούς ρυθμούς στοιχείων, η διαστρέβλωση των καναλιών ως προς τα στοιχεία είναι πολύ σημαντική, και είναι κάπως αδύνατο να ανακτηθούν τα μεταδιδόμενα στοιχεία με έναν απλό δέκτη. Μια πολύ σύνθετη δομή δέκτη απαιτείται, η οποία να χρησιμοποιεί υπολογιστικά εκτενή εξίσωση και αλγορίθμους εκτίμησης καναλιού για να υπολογίσει σωστά το κανάλι, έτσι ώστε οι εκτιμήσεις να μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τα ληφθέντα στοιχεία για να ανακτήσουν τα αρχικά μεταδιδόμενα στοιχεία. Η OFDM μπορεί να απλοποιήσει δραστικά το πρόβλημα της εξίσωσης μετατρέποντας το επιλεκτικής συχνότητας κανάλι σε ένα επίπεδο κανάλι. Ένας απλός one-tap εξισωτής απαιτείται για να υπολογίσει το κανάλι και να ανακτήσει τα στοιχεία.

Τα μελλοντικά συστήματα τηλεπικοινωνιών πρέπει να είναι φασματικά αποδοτικά να υποστηρίξουν διάφορους υψηλού ρυθμού στοιχείων χρήστες. Η OFDM χρησιμοποιεί το διαθέσιμο φάσμα πολύ αποτελεσματικά που είναι πολύ χρήσιμο για τις επικοινωνίες πολυμέσων. Κατά συνέπεια, η OFDM έχει μια καλή πιθανότητα να γίνει η πρωταρχική τεχνολογία για 4G. Καθαρόαιμη ή υβριδική OFDM θα είναι πιθανότατα η επιλογή για τη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης φυσικού στρώματος στη μελλοντική γενιά των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

3.2 Διαμόρφωση Πολλαπλών Φερόντων

3.2.1 Εισαγωγή

Η βασική ιδέα της διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων έγκειται στη διαίρεση ενός μεταδιδόμενου ρεύματος δυαδικών ψηφίων σε πολλά διαφορετικά υπορεύματα και την κατανομή τους σε πολλά διαφορετικά υποκανάλια. Χαρακτηριστικά τα υποκανάλια είναι ορθογώνια υπό ιδανικές συνθήκες

διάδοσης, οπότε σ' αυτή την περίπτωση η διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων αναφέρεται συχνά ως ορθογωνική πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας (OFDM). Ο ρυθμός στοιχείων σε κάθε ένα από τα υποκανάλια είναι πολύ λιγότερος από το συνολικό ρυθμό στοιχείων, και το αντίστοιχο εύρος ζώνης υποκαναλιού είναι πολύ λιγότερο από το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος. Ο αριθμός των υπορευμάτων επιλέγεται ώστε να εξασφαλίζει ότι κάθε υποκανάλι έχει ένα εύρος ζώνης λιγότερο από το εύρος ζώνης συμφωνίας (coherence bandwidth) του καναλιού, έτσι τα υποκανάλια δοκιμάζουν τη σχετικά επίπεδη διάλειψη (flat fading). Κατά συνέπεια, η διασυμβολική παρεμβολή (ISI) σε κάθε υποκανάλι είναι μικρή. Επιπλέον, στη διακεκριμένη εφαρμογή του OFDM, αποκαλούμενη συχνά διακεκριμένος πολυτονισμός (discrete multitone, DMT), το ISI μπορεί να αποβληθεί πλήρως μέσω της χρήσης ενός κυκλικού προθέματος. Τα υποκανάλια στο OFDM δεν χρειάζεται να είναι παρακείμενα, έτσι δεν απαιτείται μεγάλο συνεχές εμπόδιο φάσματος για τις επικοινωνίες πολλαπλών φερόντων υψηλού ρυθμού.

Η διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων χρησιμοποιείται αυτήν την περίοδο σε πολλά ασύρματα συστήματα. Εντούτοις, δεν είναι μια νέα τεχνική: χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τα στρατιωτικά HF (High Frequency) ραδιοκύματα προς στα τέλη της δεκαετίας του '50 και αρχές δεκαετίας του '60. Ξεκινώντας περίπου το 1990, η διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές διαφορετικές ενσύρματες και ασύρματες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ψηφιακής ακουστικής ραδιοφωνικής αναμετάδοσης στην Ευρώπη, τις ψηφιακές γραμμές συνδρομητών (DSL), και την πιο πρόσφατη γενιά των ασύρματων τοπικών δικτύων. Υπάρχουν επίσης διάφορες πρόσφατα αναδυόμενες νέες χρήσεις για τις τεχνικές πολλαπλών φερόντων, συμπεριλαμβανομένων των σταθερών ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών, την κινητή ασύρματη ευρεία ζώνη γνωστή ως FLASH-OFDM, ακόμη και για τα ούλτρα-ζώνη μεγάλου εύρους (ultrawideband) ραδιοκύματα, όπου το πολλαπλής ζώνης OFDM είναι μια από τις δύο ανταγωνιστικές προτάσεις για τα πρότυπα ούλτρα-ζώνης μεγάλου εύρους (ultrawideband, UWB) IEEE 802.15. Η διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων είναι επίσης υποψήφια για την διεπαφή αέρα στα επόμενης γενιάς κυψελοειδή συστήματα.

3.2.2 Οφέλη της διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων

Υπάρχει κάποια συζήτηση ως προς το εάν η διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων είναι η καλύτερη για τα κανάλια ISI από την ενιαία μετάδοση φέροντος με ισοστάθμιση (equalization). Ισχυρίζεται ότι για τις κινητές ραδιοεφαρμογές, το ενιαίο φέρον με ισοστάθμιση έχει κατά προσέγγιση την ίδια απόδοση με την διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων με την κωδικοποίηση καναλιού (channel coding), την διεμπλοκή πεδίου συχνότητας (frequency-domain interleaving), και τη σταθμισμένη αποκωδικοποίηση μέγιστης πιθανότητας.

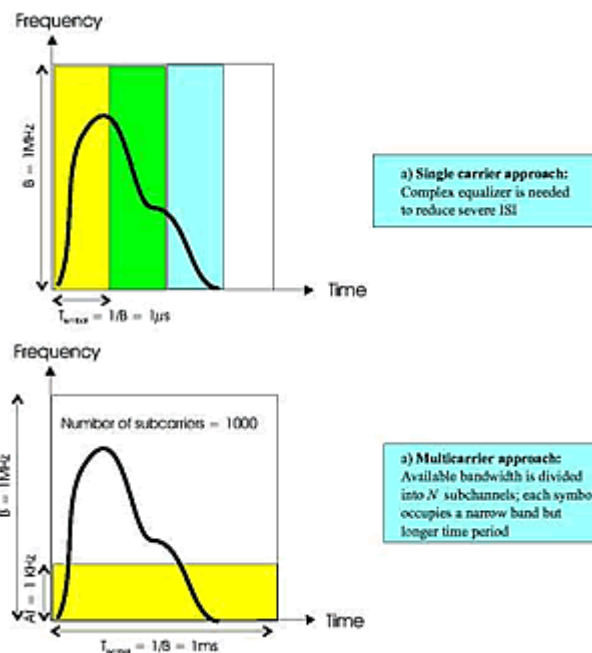
Ένα ενιαίο σύστημα φερόντων υποφέρει από το τετριμμένο πρόβλημα ISI όταν ο ρυθμός στοιχείων είναι εξαιρετικά υψηλός. Χρειαζόμαστε τον υψηλό ρυθμό στοιχείων για να υποστηρίξουμε τις ασύρματες ευρυζωνικές εφαρμογές, κατά συνέπεια αυτές οι εφαρμογές πάσχουν πάντα από ISI. Έχει διαπιστωθεί ότι με ένα εύρος ζώνης B και διάρκεια συμβόλου T_{sym} , όταν $\tau_{max} > T_{sym}$, συμβαίνει

ISI. Η μετάδοση πολλαπλών καναλιών (multichannel) έχει εμφανιστεί για να λύσει αυτό το πρόβλημα. Η ιδέα είναι να αυξηθεί η περίοδος συμβόλου των υποκαναλιών μειώνοντας το ρυθμό στοιχείων και κατά συνέπεια τη μείωση της επίδρασης του ISI. Η μείωση της επίδρασης του ISI παράγει μια ευκολότερη εξίσωση, η οποία σημαίνει απλούστερες τεχνικές λήψης.

Οι ασύρματες λύσεις πολυμέσων απαιτούν μέχρι δεκάδες Mbps για μια λογική ποιότητα υπηρεσίας. Εάν θεωρήσουμε ένα ενιαίο φέρον υψηλής ταχύτητας ασύρματης μετάδοσης στοιχείων, βλέπουμε ότι η διασπορά των καθυστερήσεων (delay spread) σε τέτοιο υψηλό ρυθμό στοιχείων θα είναι σίγουρα μεγαλύτερη από τη διάρκεια συμβόλου θεωρώντας ακόμη και την καλύτερη περίπτωση υπαίθριου σεναρίου. Τώρα, εάν διαιρέσουμε το υψηλό ρυθμό στοιχείων κανάλι πέραν του αριθμού υποφερόντων, κατόπιν έχουμε μεγαλύτερη διάρκεια συμβόλου στα υποφέροντα και η μέγιστη διασπορά καθυστερήσεων είναι πολύ μικρότερη από την διάρκεια συμβόλου.

Αυτό περιγράφεται πολύ αποτελεσματικά στο Σχήμα 3.1. Υποτίθεται ότι έχουμε το διαθέσιμο εύρος ζώνης B 1MHz. Τώρα σε μια ενιαία προσέγγιση φερόντων, μεταδίδουμε τα στοιχεία στη διάρκεια συμβόλου 1μs. Εξετάζεται ένα χαρακτηριστικό υπαίθριο σενάριο όπου η μέγιστη διασπορά καθυστερήσεων μπορεί να είναι 10μs, έτσι στο σενάριο της χειρότερης περίπτωσης, τουλάχιστον 10 σύμβολα θα επηρεαστούν από καθένα σύμβολο. Κατά συνέπεια, η επίδραση ISI κάθε συμβόλου θα διαδοθεί σε 10 διαδοχικά σύμβολα.

Σε ένα ενιαίο σύστημα φερόντων, αυτή η κατάσταση αντισταθμίζεται με τη χρησιμοποίηση της προσαρμοστικής τεχνικής εξίσωσης. Η προσαρμοστική εξίσωση υπολογίζει την κρουστική απόκριση του καναλιού και πολλαπλασιάζει τη σύνθετη κλίση της κατ' εκτίμηση κρουστικής απόκρισης με το ληφθέν σήμα στοιχείων στον δέκτη. Εντούτοις, υπάρχουν μερικές πρακτικές υπολογιστικές δυσκολίες στην εκτέλεση αυτών των τεχνικών εξίσωσης στις δεκάδες Mbps με το συμπαγές και χαμηλού κόστους υλικό.



Σχήμα 3.1: Προσέγγιση Ενιαίου Φέροντος έναντι Πολλαπλών Φερόντων

Design Parameters for outdoor channel	Required data rate	1Mbps
	RMS delay spread, σ	10 μ s
	Channel coherence bandwidth, $B_c = \frac{1}{5\sigma}$	20KHz
	Frequency selectivity condition	$\sigma > \frac{T_{sym}}{10}$
Single carrier approach	Symbol duration, T_{sym}	1 μ s
	Frequency selectivity	10 μ s > $\frac{1\mu s}{10} \implies$ YES
ISI occurs as the channel is frequency selective		
Multicarrier approach	Total number of subcarriers	128
	Data rate per subcarrier	7.8125kbps
	Symbol duration per subcarrier	$T_{carr} = 128\mu s$
	Frequency selectivity	10 μ s > $\frac{128\mu s}{10} \implies$ NO
ISI is reduced as flat fading occurs. CP completely removes the remaining ISI		

Πίνακας 3.1: Σύγκριση του ενιαίου φέροντος και της προσέγγισης πολλαπλών φερόντων από την άποψη της επιλεκτικότητας συχνότητας καναλιού

Αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι οι συμπαγείς και χαμηλού κόστους συσκευές υλικού δεν λειτουργούν απαραίτητως σε πολύ υψηλή ταχύτητα στοιχείων. Στην πραγματικότητα, οι διαδικασίες εξίσωσης παίρνουν τον όγκο των πόρων του δέκτη, στοιχίζοντας υψηλή υπολογιστική ισχύ και κατά συνέπεια το γενικό κόστος υπηρεσιών και υλικού γίνεται υψηλότερο. Οι σύνθετοι δέκτες είναι πολύ αποδοτικοί, αλλά κοστίζουν.

Ένας τρόπος να επιτευχθεί λογική ποιότητα και να λυθούν τα προβλήματα που περιγράφονται ανωτέρω για την ευρυζωνική κινητή επικοινωνία είναι να χρησιμοποιηθεί η παράλληλη μετάδοση. Υπό μια ακατέργαστη έννοια, κάποιος μπορεί να πει σε γενικές γραμμές ότι η παράλληλη μετάδοση είναι ακριβώς το άθροισμα ενός αριθμού μεταδόσεων ενιαίων φερόντων στις παρακείμενες συχνότητες. Η διαφορά είναι ότι τα κανάλια έχουν χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης στοιχείων από το αρχικό ενιαίο σύστημα φερόντων και τα χαμηλά ρεύματα ρυθμού είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Εάν εξεταστεί μια προσέγγιση πολλαπλών φερόντων όπου έχουμε N υποφέροντα, μπορούμε να έχουμε NB Hz του εύρους ζώνης ανά υποφέρον. Εάν $N = 1000$ και $B = 1\text{MHz}$, τότε έχουμε εύρος ζώνης υποφερόντων $B_{carr} 1\text{kHz}$. Κατά συνέπεια, η διάρκεια συμβόλου σε κάθε υποφέρον θα αυξηθεί 1ms σε (= 1kHz). Εδώ κάθε σύμβολο καταλαμβάνει μια στενή ζώνη αλλά μακρύτερο χρονικό διάστημα. Αυτό σαφώς δείχνει ότι η μέγιστη διασπορά καθυστερήσεων 1 msec δεν θα έχει οποιαδήποτε αποτελέσματα ISI στα ληφθέντα σύμβολα στο προαναφερθέν υπαίθριο σενάριο. Σε μια άλλη σκέψη, η προσέγγιση πολλαπλών φερόντων μετατρέπει το κανάλι σε ένα επίπεδης διάλειτουργίας κανάλι και έτσι μπορεί εύκολα να υπολογιστεί.

Θεωρητικά αυξάνοντας τον αριθμό υποφερόντων πρέπει να είναι σε θέση να δώσει την καλύτερη απόδοση με τη λογική πως θα είμαστε ικανοί να χειριστούμε μεγαλύτερη διασπορά καθυστερήσεων. Βέβαια διάφορα χαρακτηριστικά προβλήματα υλοποίησης προκύπτουν με το μεγάλο αριθμό υποφερόντων. Όταν έχουμε μεγάλους αριθμούς υποφερόντων, κατόπιν θα πρέπει να ορίσουμε τις συχνότητες των υποφερόντων πολύ κοντά μεταξύ τους. Ξέρουμε ότι ο δέκτης πρέπει να συγχρονιστεί σε κάθε συχνότητα υποφερόντων προκειμένου να ανακτηθούν τα στοιχεία σχετικά με εκείνο το συγκεκριμένο υποφέρον.

Όταν το διάστημα είναι πολύ μικρό, κατόπιν τα συστατικά συγχρονισμού δέκτη πρέπει να είναι πολύ ακριβή, κάτι που δεν είναι ακόμα δυνατό με το χαμηλού κόστους υλικό RF. Κατά συνέπεια, μια λογική ανταλλαγή μεταξύ του διαστήματος φερόντων και του αριθμού υποφερόντων πρέπει να επιτευχθεί.

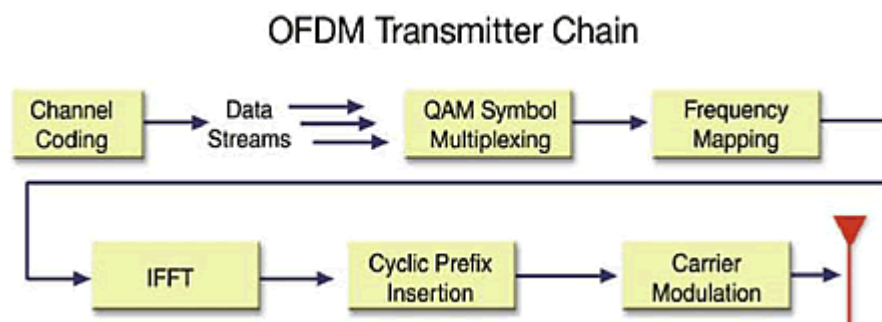
Ο Πίνακας 3.1 περιγράφει πώς η προσέγγιση πολλαπλών φερόντων μπορεί να μετατρέψει το κανάλι σε ένα επίπεδης διάλειτουργίας κανάλι από ένα επιλεκτικής συχνότητας κανάλι. Έχουμε εξετάσει ένα σύστημα πολλαπλών φερόντων με ένα ενιαίο σύστημα φερόντων, όπου η απαίτηση ρυθμού στοιχείων συστήματος είναι 1Mbps. Όταν χρησιμοποιούμε 128 υποφέροντα για το σύστημα πολλαπλών φερόντων, μπορούμε να δούμε ότι το πρόβλημα ISI λύνεται σαφώς. Είναι προφανές ότι εάν αυξήσουμε τον αριθμό υποφερόντων, το σύστημα θα παρέχει ακόμα καλύτερη απόδοση.

3.3 OFDM για Κινητές Επικοινωνίες

Η διαμόρφωση OFDM αντιπροσωπεύει μια διαφορετική προσέγγιση σχεδιασμού συστήματος. Μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός διαμόρφωσης και σχεδίων πολλαπλής πρόσβασης που τέμνει ένα κανάλι επικοινωνιών κατά τέτοιο τρόπο ώστε πολλοί χρήστες μπορούν να το μοιραστούν. Εκτιμώντας ότι η TDMA (Time Division Multiple Access) τεχνική τεμαχίζει σύμφωνα με το χρόνο, η CDMA (Code Division Multiple Access) τεμαχίζει σύμφωνα με διάδοση κωδίκων, η OFDM τεμαχίζει σύμφωνα με τη συχνότητα. Είναι μια τεχνική που διαιρεί το φάσμα σε διάφορους ισοδιάστατους τόνους, και φέρει μια μερίδα των πληροφοριών ενός χρήστη σε κάθε τόνο. Ένας τόνος μπορεί να θεωρηθεί ως συχνότητα, με τον ίδιο τρόπο που κάθε πλήκτρο σε ένα πιάνο αντιπροσωπεύει μια μοναδική συχνότητα. Η OFDM μπορεί να αντιμετωπισθεί ως μορφή Πολύπλεξης με Διάρθρωση Συχνότητας (FDM). Εντούτοις, η OFDM έχει μια σημαντική ιδιότητα ότι κάθε τόνος είναι ορθογώνιος με κάθε άλλο τόνο. Η FDM απαιτεί χαρακτηριστικά να υπάρχουν ζώνες φρουράς συχνότητας μεταξύ των συχνοτήτων έτσι ώστε να μην παρεμποδίζει η μία την άλλη. Η OFDM επιτρέπει στο φάσμα κάθε τόνου να επικαλυφθεί, δεδομένου ότι είναι ορθογώνιοι, δεν παρεμποδίζουν ο ένας τον άλλον. Επιτρέποντας στους τόνους να επικαλυφθούν, το γενικό ποσό φάσματος που απαιτείται μειώνεται.

Η OFDM είναι μια τεχνική διαμόρφωσης που επιτρέπει στα στοιχεία χρηστών να διαμορφωθούν επάνω στους τόνους. Οι πληροφορίες διαμορφώνονται επάνω σε έναν τόνο με τη ρύθμιση της φάσης, του εύρους, ή και των δύο του τόνου. Στην πιο βασική του μορφή, ένας τόνος μπορεί να είναι παρών ή απενεργοποιημένος να δείξει ένα 1 ή 0 bit πληροφορίας, εντούτοις, υιοθετείται είτε η διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (PSK), ή η διαμόρφωση εύρους τετραγωνισμού (QAM). Ένα σύστημα OFDM παίρνει ένα ρεύμα στοιχείων και το χωρίζει σε N παράλληλα ρεύματα στοιχείων, κάθε ένα σε ένα ρυθμό $1/N$ του αρχικού ρυθμού. Κάθε ρεύμα χαρτογραφείται έπειτα σε έναν τόνο σε μια μοναδική συχνότητα και συνδυάζεται χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (IFFT) για να παράγει την κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου που πρόκειται να μεταδοθεί.

Παραδείγματος χάριν, εάν ένα σύστημα 100 τόνων χρησιμοποιούνταν, ένα ενιαίο ρεύμα στοιχείων με ένα ρυθμό 1 Mbps θα μετατρεπόταν σε 100 ρεύματα των 10 kbps. Με τη δημιουργία πιο αργών παράλληλων ρευμάτων στοιχείων, το εύρος ζώνης του συμβόλου διαμόρφωσης μειώνεται αποτελεσματικά από έναν παράγοντα 100, ή ισοδύναμα, η διάρκεια του συμβόλου διαμόρφωσης αυξάνεται από έναν παράγοντα 100. Η κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων συστήματος, όπως ο αριθμός των τόνων και διαστήματος τόνου, μπορεί να μειώσει κατά πολύ, ή ακόμα και να αποβάλει το ISI, δεδομένου ότι η χαρακτηριστική διασπορά καθυστερήσεων πολλαπλών διαδρομών αντιπροσωπεύει μια πολύ μικρότερη αναλογία του επιμηκυνμένου χρόνου συμβόλου. Κατά έναν άλλο τρόπο, το εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού μπορεί να είναι πολύ μικρότερο δεδομένου ότι το εύρος ζώνης συμβόλου έχει μειωθεί. Η ανάγκη για σύνθετους multi-tap εξισωτές στο πεδίο του χρόνου μπορεί, κατά συνέπεια, να αποβληθεί.



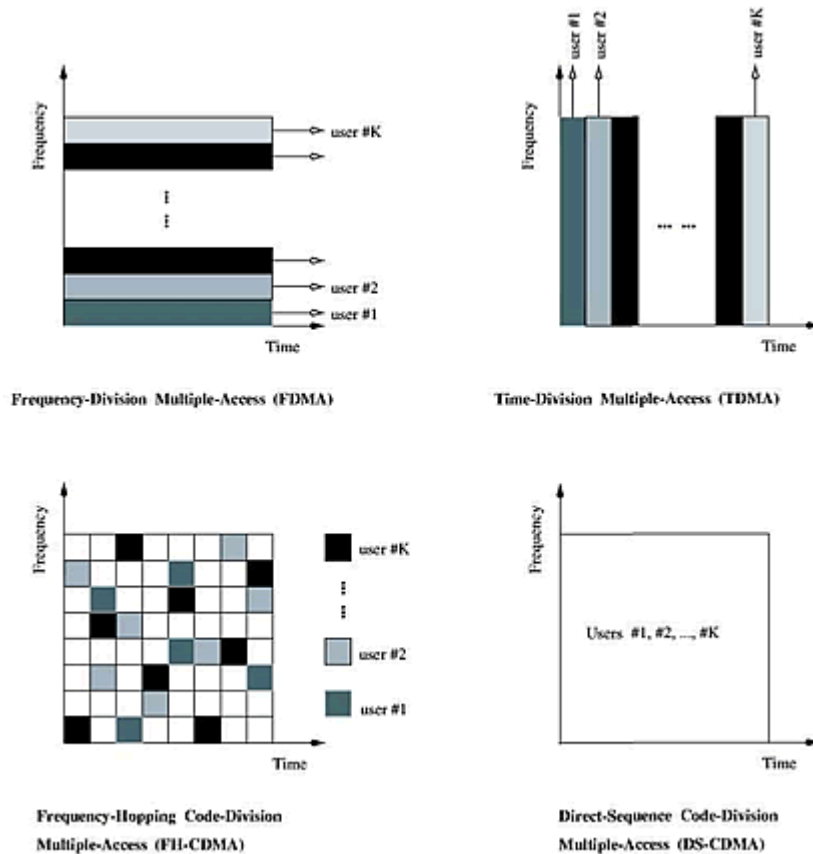
Σχήμα 3.2: Η Αλυσίδα Πομπού OFDM

Η OFDM μπορεί επίσης να θεωρηθεί πολλαπλή τεχνική πρόσβασης δεδομένου ότι ένας μεμονωμένος τόνος ή ομάδες τόνων μπορούν να διοριστούν σε διαφορετικούς χρήστες. Πολλαπλοί χρήστες μοιράζονται ένα δεδομένο εύρος ζώνης με αυτόν τον τρόπο, που παράγει ένα σύστημα αποκαλούμενο Ορθογωνική Πολύπλεξη με Διαίρεση Συχνότητας, ή OFDM. Σε κάθε χρήστη μπορεί να οριστεί ένας προκαθορισμένος αριθμός τόνων όταν έχουν πληροφορίες να στείλουν, ή εναλλακτικά, σε έναν χρήστη μπορεί να οριστεί ένας μεταβλητός αριθμός τόνων βασισμένων στο ποσό πληροφοριών που έχουν να στείλουν. Οι αναθέσεις ελέγχονται από το στρώμα ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC), το οποίο σχεδιάζει τις αναθέσεις των πόρων βασισμένες στις απαιτήσεις των χρηστών.

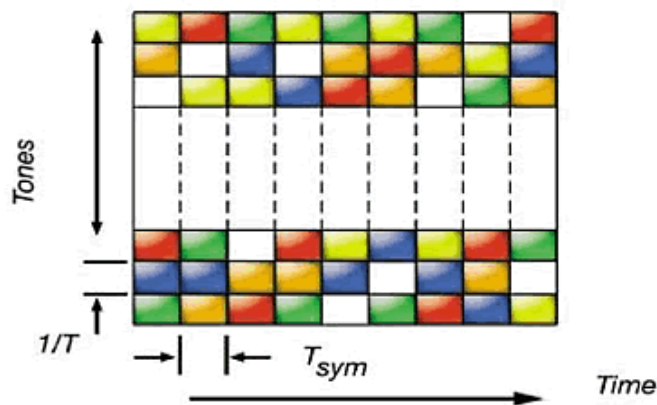
Η OFDM μπορεί να συνδυαστεί με άλματα συχνότητας για να δημιουργήσει ένα σύστημα διάδοσης φάσματος, αντιλαμβανόμενη τα οφέλη της διαφοροποίησης (diversity) συχνότητας και την κατά μέσο όρο παρεμβολή που περιγράφεται προηγουμένως για τα CDMA. Σε ένα σύστημα διάδοσης φάσματος με άλματα συχνότητας, το σύνολο τόνων κάθε χρήστη αλλάζει έπειτα από κάθε περίοδο (συνήθως αντιστοιχίζεται σε ένα σύμβολο διαμόρφωσης). Αλλάζοντας τις συχνότητες μετά από κάθε χρόνο συμβόλου, οι απώλειες λόγω της επιλεκτικής διάλειψης συχνότητας ελαχιστοποιούνται. Αν και τα άλματα συχνότητας και η CDMA είναι διαφορετικές μορφές διάδοσης φάσματος, επιτυγχάνουν συγκρίσιμη απόδοση σε ένα πολλαπλών διαδρομών διαλειπτικό περιβάλλον και παρέχουν παρόμοια οφέλη κατά μέσο όρου παρεμβολής.

Τμήμα 3.3. OFDM για Ασύρματες Επικοινωνίες

Επομένως, η OFDM συνδυάζει τις καλύτερες ιδιότητες της TDMA, δεδομένου ότι οι χρήστες είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους, και της CDMA, αποφεύγοντας τους περιορισμούς του καθενός, συμπεριλαμβανομένης της ανάγκης για TDMA προγραμματισμό συχνότητας και εξίσωση, και την πολλαπλή παρεμβολή πρόσβασης (στην περίπτωση της CDMA). Οι CDMA και TDMA τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης απεικονίζονται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Σχέδια Πολλαπλής Πρόσβασης

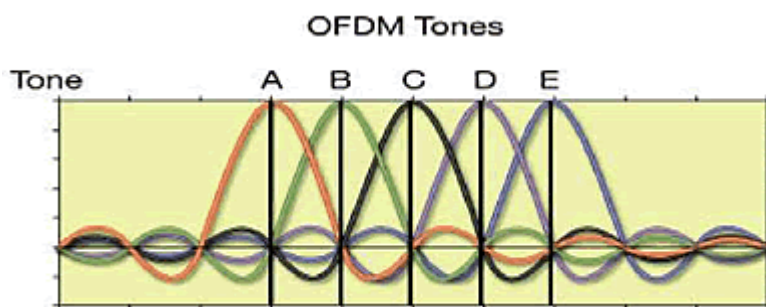


Σχήμα 3.4: Δισδιάστατη απεικόνιση των πόρων OFDM του καναλιού

3.3.1 Θεωρία της Λειτουργίας OFDM

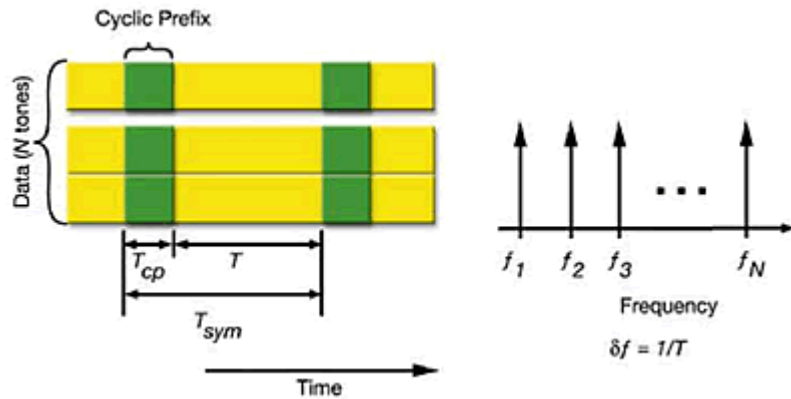
Οι ημιτονοειδείς κυματομορφές που σχηματίζουν τους τόνους στην OFDM έχουν την πολύ ιδιαίτερη ιδιότητα να είναι οι μόνες Eigen-functions ενός γραμμικού καναλιού. Αυτή η ιδιαίτερη ιδιότητα αποτρέπει τους παρακείμενους τόνους στα συστήματα OFDM να παρεμβαίνουν μεταξύ τους με τον ίδιο σχεδόν τρόπο που το ανθρώπινο αυτί μπορεί, σαφώς, να διακρίνει μεταξύ καθενός από τους τόνους που δημιουργούνται από τα παρακείμενα πλήκτρα ενός πιάνου. Αυτή η ιδιότητα, και η ενσωμάτωση ενός μικρού ποσού χρόνου φρουράς σε κάθε σύμβολο, επιτρέπουν την ορθογωνικότητα μεταξύ των τόνων να συντηρηθεί παρουσία πολλαπλών διαδρομών. Αυτό είναι που επιτρέπει στο OFDM να αποφεύγει την πολλαπλής πρόσβασης παρεμβολή που είναι παρούσα στα συστήματα CDMA.

Η αντιπροσώπευση ενός αριθμού τόνων στο πεδίο της συχνότητας, που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.5**, δίνει έμφαση στη ορθογώνια φύση των τόνων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα OFDM. Παρατηρήστε ότι η αιχμή κάθε τόνου αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο μηδέν, ή κενό (null), κάθε άλλου τόνου. Το αποτέλεσμα αυτού είναι ότι δεν υπάρχει καμία παρεμβολή μεταξύ των τόνων. Όταν ο δέκτης δειγματοληπτεί στη κεντρική συχνότητα κάθε τόνου, η μόνη παρούσα ενέργεια είναι αυτή του επιθυμητού σήματος, συν οποιοσδήποτε άλλος θόρυβος συμβαίνει να είναι στο κανάλι.

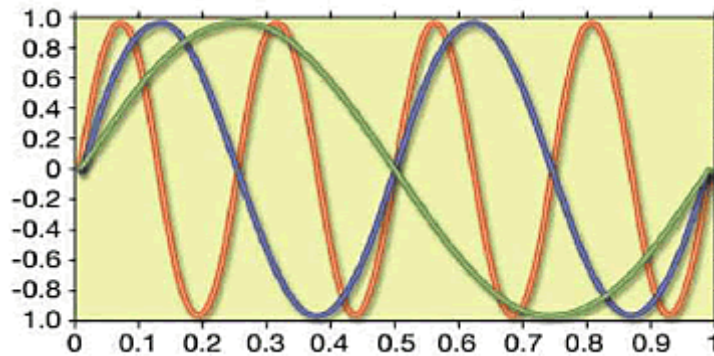


Σχήμα 3.5: Τόνοι OFDM

Για να διατηρηθεί η ορθογωνικότητα μεταξύ των τόνων, είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι ο χρόνος συμβόλου περιέχει έναν ή πολλαπλούς κύκλους κάθε ημιτονοειδούς κυματομορφής τόνου. Αυτή είναι κανονικά η περίπτωση δεδομένου ότι η νομερολογία συστήματος κατασκευάζεται έτσι ώστε οι συχνότητες τόνου να είναι ακέραια πολλαπλάσια της περιόδου συμβόλου, όπως τονίζεται παρακάτω, όπου το διάστημα τόνου, Δf , είναι $1/T$. Αντιμετωπιζόμενοι ως ημίτονα, το **Σχήμα 3.6** παρουσιάζει τρεις τόνους κατά τη διάρκεια μιας ενιαίας περιόδου συμβόλου, όπου κάθε τόνος έχει έναν ακέραιο αριθμό κύκλων κατά τη διάρκεια του συμβόλου.



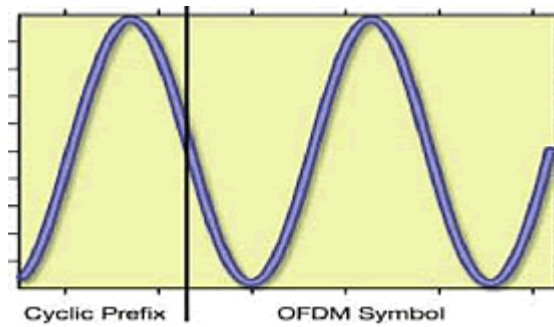
Σχήμα 3.6: Παρουσίαση του OFDM στα πεδία χρόνου και συχνότητας



Σχήμα 3.7: Ακέραιος Αριθμός Ημιτονικών Περιόδων

Με απόλυτους όρους, για να παραχθεί ένας καθαρός ημιτονοειδής τόνος απαιτείται η έναρξη σημάτων στον χρόνο μείον το άπειρο. Αυτό είναι σημαντικό δεδομένου ότι οι τόνοι είναι η μόνη κυματομορφή που μπορεί να εξασφαλίσει ορθογωνικότητα. Ευτυχώς, η απόκριση καναλιού μπορεί να αντιμετωπιστεί ως πεπερασμένη δεδομένου ότι τα πολλαπλών διαδρομών συστατικά αποσυντίθενται με το χρόνο και το κανάλι είναι αποτελεσματικά ζώνη στενού εύρους. Με την προσθήκη ενός χρόνου φρουράς (guard time), αποκαλούμενου κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix), το κανάλι αναγκάζεται να συμπεριφερθεί σαν οι μεταδιδόμενες κυματομορφές να ήταν από το χρόνο μείον το άπειρο, και να εξασφαλίσει έτσι ορθογωνικότητα, η οποία αποτρέπει ουσιαστικά σε ένα υποφέρων να παρέμβει με άλλο (αποκαλούμενη δια-καναλική παρεμβολή, ή ICI).

Το κυκλικό πρόθεμα είναι πραγματικά ένα αντίγραφο του τελευταίου τμήματος του συμβόλου στοιχείων επισυναπτόμενου στην πρόσοψη του συμβόλου κατά τη διάρκεια του διαστήματος φρουράς, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.6 και 3.8. Οι πολλαπλές διαδρομές είναι η αιτία που οι τόνοι και τα καθυστερημένα αντίγραφα των τόνων φτάνουν στον δέκτη με κάποια διάδοση καθυστερήσεων. Αυτό οδηγεί στη μη ευθυγράμμιση μεταξύ των ημίτονων, τα οποία πρέπει να ευθυγραμμιστούν όπως στο Σχήμα 3.8 προκειμένου να είναι ορθογώνια. Το κυκλικό πρόθεμα επιτρέπει στους τόνους να ευθυγραμμιστούν εκ νέου στον δέκτη, επανακτώντας κατά συνέπεια ορθογωνικότητα.



Σχήμα 3.8: Κυκλική προέκταση ημίτονου

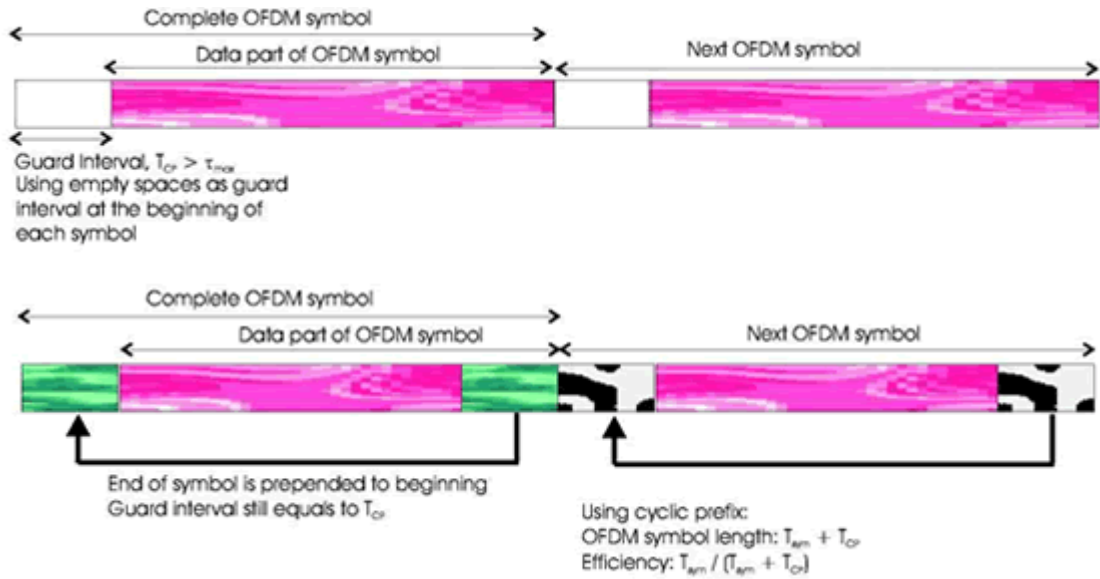
Το κυκλικό πρόθεμα ταξινομείται κατάλληλα για να χρησιμεύσει ως χρόνος φρουράς ώστε να αποβληθεί η διασυμβολική παρεμβολή (ISI). Αυτό επιτυγχάνεται δεδομένου ότι το ποσό της διασποράς του χρονικού διαστήματος από το κανάλι είναι μικρότερη από την διάρκεια του κυκλικού προθέματος.

3.4 Πλεονεκτήματα ενός Συστήματος OFDM

3.4.1 Καταπολέμηση του ISI και μείωση του ICI

Όταν το σήμα περνά μέσω ενός καναλιού χρονικής διασποράς, η ορθογωνικότητα του σήματος μπορεί να διακινδυνεύσει. Το CP (Cyclic Prefix) βοηθά να διατηρηθεί η ορθογωνικότητα των υποφερόντων. Προτού εφευρεθεί το CP, το διάστημα φρουράς προτάθηκε ως λύση. Το διάστημα φρουράς καθοριζόταν από ένα κενό διάστημα μεταξύ δύο συμβόλων OFDM, το οποίο χρησιμεύει ως απορροφητής (buffer) για την πολλαπλών διαδρομών αντανάκλαση. Το διάστημα πρέπει να επιλεγεί μεγαλύτερο από την αναμενόμενη μέγιστη διάδοση των καθυστερήσεων, έτσι ώστε η πολλαπλών διαδρομών αντανάκλαση από ένα σύμβολο να μην παρεμβαίνει με άλλο. Στην πράξη, ο κενός χρόνος φρουράς εισάγει ICI. ICI είναι συνακρόαση μεταξύ διαφορετικών υποφερόντων, που σημαίνει πως δεν είναι πλέον ορθογώνιοι. Μια καλύτερη λύση βρέθηκε αργότερα, η οποία είναι η κυκλική προέκταση του συμβόλου OFDM ή το CP. CP είναι ένα αντίγραφο του τελευταίου τμήματος του συμβόλου OFDM που επισυνάπτεται για να αντιμετωπίσει το μεταδιδόμενο σύμβολο OFDM .

Το CP καταλαμβάνει το ίδιο χρονικό διάστημα με την περίοδο φρουράς, αλλά εξασφαλίζει ότι τα καθυστερημένα αντίγραφα των συμβόλων OFDM θα έχουν πάντα ένα πλήρες σύμβολο μέσα στο διάστημα FFT (συχνά αναφερόμενο ως παράθυρο FFT)* αυτό καθιστά το μεταδιδόμενο σήμα περιοδικό. Αυτή η περιοδικότητα διαδραματίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο δεδομένου ότι αυτό βοηθά στη διατήρηση της ορθογωνικότητας. Η έννοια να είναι σε θέση να γίνει αυτό, και τι σημαίνει, προέρχεται από την φύση της διαδικασίας IFFT/FFT. Όταν το IFFT καταλαμβάνεται για μια περίοδο συμβόλου κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης OFDM, η προκύπτουσα διαδικασία χρονικού δείγματος είναι τεχνικά περιοδική. Σε έναν μετασχηματισμό Fourier, όλα τα επακόλουθα συστατικά του αρχικού σήματος είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Έτσι, εν ολίγοις, παρέχοντας περιοδικότητα στην πηγή σήματος OFDM, το CP σιγουρεύεται ότι τα διαδοχικά OFDM είναι ορθογώνια.



Σχήμα 3.9: Ο ρόλος των διαστημάτων φρουράς και του κυκλικού προθέματος στην καταπολέμηση ISI και ICI

Από την πλευρά του δέκτη, το CP αφαιρείται προτού αρχίσει οποιαδήποτε επεξεργασία. Εφ' όσον το μήκος του διαστήματος CP είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη αναμενόμενη καθυστέρηση τ_{max} , όλες οι αντανάκλασεις των προηγούμενων συμβόλων αφαιρούνται και η ορθογωνικότητα αποκαθίσταται. Η ορθογωνικότητα χάνεται όταν η διάδοση των καθυστερήσεων είναι μεγαλύτερη από το μήκος του διαστήματος CP. Εισάγοντας CP έχει το κόστος του, έτσι εκλύεται ένα μέρος της ενέργειας σήματος δεδομένου ότι δεν φέρει καμία πληροφορία. Η απώλεια μετριέται:

$$SNR_{loss_CP} = -10 \log_{10} \left(1 - \frac{T_{CP}}{T_{sym}} \right) \quad (3.1)$$

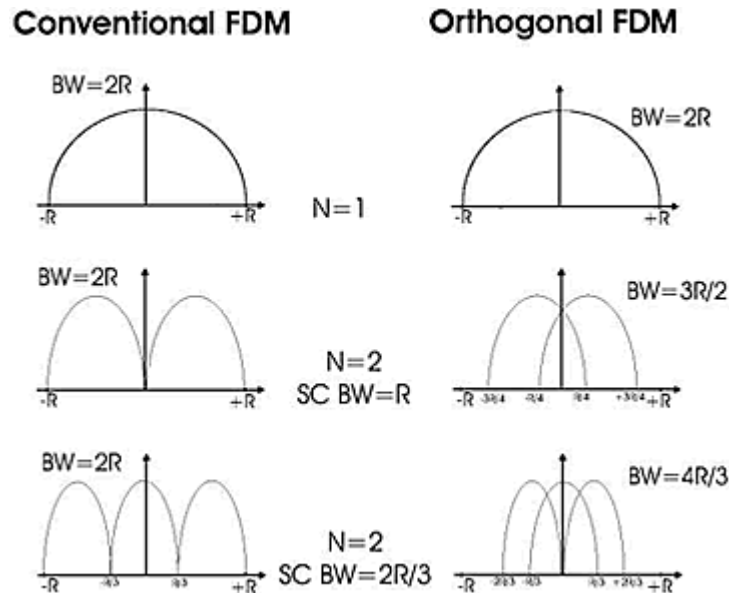
Εδώ, T_{CP} είναι το μήκος διαστήματος του CP και T_{sym} είναι η διάρκεια του συμβόλου OFDM. Γίνεται κατανοητό ότι αν και εκλύεται μέρος της ενέργειας σήματος, το γεγονός ότι μηδενική ICI και ISI κατάσταση αποπληρώνει την απώλεια.

Συμπερασματικά, το CP δίνει πλεονεκτήματα δύο πτυχών, καταλαμβάνοντας πρώτα το διάστημα φρουράς, εξαλείφει την επίδραση ISI και με τη διατήρηση της ορθογωνικότητας αφαιρεί εντελώς το ICI. Το κόστος όσον αφορά την ενεργειακή απώλεια σήματος δεν είναι τόσο σημαντική.

3.4.2 Φασματική Αποδοτικότητα

Το **Σχήμα 3.10** επεξηγεί τη διαφορετικότητα μεταξύ των συμβατικών συστημάτων FDM και OFDM. Στην περίπτωση ενός OFDM, καλύτερη φασματική αποδοτικότητα επιτυγχάνεται με τη διατήρηση της ορθογωνικότητας μεταξύ των υποφερόντων. Όταν η ορθογωνικότητα διατηρείται μεταξύ των διαφορετικών υποκαναλιών κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, κατόπιν είναι δυνατό να χωριστούν τα σήματα πολύ εύκολα από την πλευρά του δέκτη.

Το κλασικό FDM εξασφαλίζει κάτι τέτοιο με την παρεμβολή των ζωνών φρουράς μεταξύ των υποκαναλιών. Αυτές οι ζώνες φρουράς κρατούν τα υποκάναλια αρκετά μακριά έτσι ώστε ο χωρισμός των διαφορετικών υποκαναλιών να είναι δυνατός. Ρεαλιστικά η παρεμβολή ζωνών φρουράς έχει ως αποτέλεσμα την ανεπαρκή χρήση των φασματικών πόρων.



Σχήμα 3.10: Αποδοτικότητα φάσματος OFDM έναντι συμβατικού FDM

Η ορθογωνικότητα καθιστά πιθανό στην OFDM να τακτοποιηθούν τα υποφέροντα κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι πλευρικές ζώνες συχνοτήτων των μεμονωμένων φερόντων να επικαλύπτονται και παρόλα αυτά τα σήματα να λαμβάνονται στον δέκτη χωρίς παρεμβολή από ICI. Ο δέκτης ενεργεί ως τράπεζα του αποδιαμορφωτή, μεταφράζοντας κάθε υποφέρον σε συνεχές ρεύμα, με το προκύπτον σήμα να ολοκληρώνεται πέραν μιας περιόδου συμβόλου για να ανακτήσει τα ακατέργαστα στοιχεία. Εάν όλα τα άλλα υποφέροντα μετέτρεπαν στις συχνότητες που, στο πεδίο του χρόνου, έχουν έναν ακέραιο αριθμό κύκλων σε μια περίοδο συμβόλου T_{sym} , κατόπιν η διαδικασία ολοκλήρωσης θα είχε ως αποτέλεσμα τη μηδενική συμβολή όλων των άλλων φερόντων. Κατά συνέπεια, τα υποφέροντα είναι γραμμικά ανεξάρτητα (δηλ., ορθογώνια) εάν το διάστημα φερόντων είναι πολλαπλάσιο του T_1 .

3.4.3 Μερικά Άλλα Πλεονεκτήματα των Συστημάτων OFDM

1. Η ομορφιά του OFDM βρίσκεται στην απλότητά του. Ένα τέχνασμα του εμπορίου που κάνει τους πομπούς OFDM, χαμηλού κόστους είναι η δυνατότητα να εφαρμοστεί χαρτογράφηση των bits σε μοναδικά φέροντα μέσω της χρήσης IFFT.
2. Αντίθετα από το CDMA, ο δέκτης OFDM συλλέγει την ενέργεια σήματος στο πεδίο της συχνότητας, κατά συνέπεια είναι σε θέση να προστατεύσει την ενεργειακή απώλεια στο πεδίο της συχνότητας.

3. Σε ένα σχετικά αργό χρονικά ποικίλο κανάλι, είναι δυνατό να ενισχυθεί σημαντικά η χωρητικότητα με την προσαρμογή του ρυθμού στοιχείων ανά υποφέρον σύμφωνα με το SNR εκείνου του συγκεκριμένου υποφέροντος.
4. Το OFDM είναι ανθεκτικότερο στην επιλεκτική διάλεια συχνότητας από τα ενιαία συστήματα φερόντων.
5. Ο OFDM πομπός απλοποιεί την επίδραση καναλιού, κατά συνέπεια μια απλούστερη δομή δέκτη είναι αρκετή για την ανάκτηση των μεταδιδόμενων στοιχείων. Εάν χρησιμοποιούμε τα σύμφωνα σχέδια διαμόρφωσης, κατόπιν η πολύ απλή εκτίμηση καναλιού (ή /και εξίσωση) απαιτούνται, αφ' ετέρου, δεν χρειάζεται κανένας εκτιμητής καναλιού εάν χρησιμοποιούνται τα διαφορικά σχέδια διαμόρφωσης.
6. Οι διαδικασίες διατήρησης της ορθογωνικότητας στα OFDM είναι πολύ απλούστερες έναντι των τεχνικών CDMA ή TDMA ακόμη και σε πολύ αυστηρές συνθήκες πολλαπλών διαδρομών.
7. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η ανίχνευση μέγιστης πιθανότητας με λογική πολυπλοκότητα.
8. Το OFDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλης ταχύτητας εφαρμογές πολυμέσων με το χαμηλότερο κόστος υπηρεσιών.
9. Το OFDM μπορεί να υποστηρίξει δυναμική πρόσβαση πακέτων.
10. Τα ενιαία δίκτυα συχνότητας είναι δυνατά στο OFDM, πράγμα ιδιαίτερα ελκυστικό για εφαρμογές ραδιοφωνικής μετάδοσης.
11. Έξυπνες κεραιές μπορούν να ενσωματωθούν με OFDM. Τα συστήματα MIMO και η κωδικοποίηση χρονικού διαστήματος μπορούν να πραγματοποιηθούν σε OFDM και όλα τα οφέλη των MIMO συστημάτων μπορούν να ληφθούν εύκολα. Η προσαρμοστική διαμόρφωση και η κατανομή τόνου /ισχύος είναι επίσης εφικτές με OFDM.

3.5 Μειονεκτήματα ενός Συστήματος OFDM

3.5.1 Αυστηρή Απαιτήση Συγχρονισμού

Το OFDM σύστημα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στο χρόνο και τα σφάλματα συγχρονισμού συχνότητας, ειδικά στα σφάλματα συγχρονισμού συχνότητας, όλα μπορούν να πάνε στραβά. Η αποδιαμόρφωση ενός σήματος OFDM με μια εξίσωση συχνότητας μπορεί να οδηγήσει σε ένα υψηλό ρυθμό εσφαλμένων bit.

Οι πηγές των σφαλμάτων συγχρονισμού είναι δύο: η πρώτη είναι η διαφορά μεταξύ των συχνοτήτων των τοπικών ταλαντωτών του πομπού και του δέκτη, αφετέρου η σχετική κίνηση μεταξύ του πομπού και του δέκτη που δίνει διάδοση Doppler. Οι συχνότητες των τοπικών ταλαντωτών πρέπει να ταιριάζουν και στα δύο σημεία όσο πιο κοντά μπορούν. Για υψηλότερο αριθμό υποκαναλιών, το ταίριασμα θα πρέπει να είναι ακόμα τελειότερο.

Η κίνηση του πομπού και του δέκτη προκαλεί το άλλο σφάλμα συχνότητας. Έτσι, το OFDM μπορεί να παρουσιάσει σημαντική υποβάθμιση απόδοσης στα μεγάλης ταχύτητας κινούμενα οχήματα.

Για να βελτιστοποιηθεί η απόδοση μιας σύνδεσης OFDM, ο ακριβής συγχρονισμός είναι πρωταρχικής σημασίας. Ο συγχρονισμός πρέπει να γίνει σε τρεις παράγοντες: συγχρονισμός συχνότητας συμβόλου, φέροντος και συχνότητας δειγματοληψίας.

3.5.2 Αναλογία ισχύος κορυφής προς μέση ισχύ (PAPR)

Η αναλογία ισχύος κορυφής προς μέση ισχύ (Peak to Average Power Ratio, PAPR) είναι ανάλογη προς τον αριθμό υποφερόντων που χρησιμοποιούνται για τα συστήματα OFDM. Ένα σύστημα OFDM με μεγάλο αριθμό υποφερόντων θα έχει κατά συνέπεια ένα πολύ μεγάλο PAPR όταν τα υποφέροντα προστίθενται συνειρμικά. Ένα μεγάλο PAPR ενός συστήματος κάνει την υλοποίηση της Μετατροπής Ψηφιακού σε Αναλογικό Μετατροπέα (Digital-to-Analog Converter, DAC) και του Αναλογικού σε Ψηφιακό Μετατροπέα (Analog-to-Digital Converter, ADC) να είναι εξαιρετικά δύσκολη. Το σχέδιο του RF ενισχυτή γίνεται επίσης όλο και δυσκολότερο καθώς το PAPR αυξάνεται.

Υπάρχουν βασικά τρεις τεχνικές που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή για να μειώσουν το PAPR, είναι οι *Τεχνικές Διαστρέβλωσης Σήματος (Signal Distortion Techniques)*, οι *Τεχνικές Κωδικοποίησης (Coding Techniques)* και τέλος η *Τεχνική Περίπλεξης (Scrambling Technique)*.

Η τεχνική της περικοπής (clipping) και της παραθύρωσης (windowing) μειώνει το PAPR από μη γραμμική διαστρέβλωση του σήματος OFDM. Κατά συνέπεια, εισάγει τη μόνη παρεμβολή δεδομένου ότι το μέγιστο επίπεδο εύρους περιορίζεται σε ένα σταθερό επίπεδο. Αυξάνει επίσης την εκτός ζώνης ακτινοβολία, αλλά αυτό είναι η απλούστερη μέθοδος για να μειωθεί το PAPR. Για να μειώσουν το ρυθμό σφάλματος, οι συμπληρωματικοί κώδικες Πρόσω Διόρθωσης Σφάλματος (Forward Error Correction, FEC) μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κοινού με την μέθοδο της περικοπής και της παραθύρωσης.

Μια άλλη τεχνική αποκαλούμενη *Γραμμική Ακύρωση Κορυφής (Linear Peak Cancellation)* μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει το PAPR. Σε αυτήν την μέθοδο, η λειτουργία αναφοράς του χρόνου που μετατοπίζεται και κλιμακώνεται αφαιρείται από το σήμα, έτσι ώστε κάθε αφαιρούμενη λειτουργία αναφοράς μειώνει την ισχύ κορυφής τουλάχιστον ενός δείγματος σήματος. Επιλέγοντας μια κατάλληλη λειτουργία αναφοράς περίπου με το ίδιο εύρος ζώνης όπως η μεταδιδόμενη λειτουργία, αυτό μπορεί να βεβαιώσει ότι η μείωση ισχύος κορυφής δεν προκαλεί εκτός ζώνης παρεμβολή. Ένα παράδειγμα μιας κατάλληλης λειτουργίας αναφοράς είναι ένα παράθυρο υψωμένου συνημίτονου.

3.5.3 Δια-καναλική Παρεμβολή στα Κυψελοειδή OFDM

Στα κυψελοειδή συστήματα επικοινωνιών, η δια-καναλική παρεμβολή (Co-channel Interference, CCI) καταπολεμείται με συνδυασμό τεχνικών προσαρμοστικών κεραιών, όπως τομεοποίηση (sectorization), κατευθυντήριες κεραιές, σειρές κεραιών, κ.λπ.

Τμήμα 3.5. Μειονεκτήματα ενός OFDM Συστήματος

Χρησιμοποιώντας OFDM στα κυψελοειδή συστήματα θα προκαλέσει CCI. Ομοίως με τις παραδοσιακές τεχνικές, με την βοήθεια της καθοδήγησης δέσμης ραδιοσήματος (beam steering), είναι δυνατό να εστιάσει η δέσμη της κεραίας του δέκτη στον εξυπηρετούμενο χρήστη, εξασθενίζοντας τους δια-καναλικούς παρεμβολείς. Αυτό είναι σημαντικό δεδομένου ότι το OFDM είναι ευαίσθητο σε CCI.

ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.11g

4.1 Εισαγωγή

Ενα πρότυπο WLAN IEEE 802.11g μπορεί να θεωρηθεί ως μια διατομή μεταξύ των προτύπων 802.11b και 802.11a. Όπως και το 802.11b, έτσι και το πρότυπο 802.11g λειτουργεί στο ίδιο τμήμα 2.4 GHz της ασύρματης συχνότητας φάσματος που επιτρέπει την ελεύθερη άδεια λειτουργίας σε παγκόσμια σχεδόν βάση. Το 802.11g περιορίζεται επίσης στα ίδια τρία μη επικαλυπτόμενα κανάλια με το 802.11b. Μια σημαντική υποχρεωτική απαίτηση του 802.11g είναι η πλήρης οπίσθια συμβατότητα με το 802.11b, η οποία παρέχει επενδυμένη προστασία για την εγκατεστημένη βάση πελατών 802.11b και εξάγει μια ουσιαστική μειονεκτική απόδοση όταν λειτουργεί σε αυτή την κατάσταση.

Όπως το 802.11a, έτσι και το 802.11g χρησιμοποιεί την Ορθογωνική Πολύπλεξη με Διάρθρωση Συχνότητας (OFDM) για τη μετάδοση των στοιχείων. Η OFDM είναι αποδοτικότερο μέσο μετάδοσης από τη Διεύρυνση Φάσματος Ευρείας Ακολουθίας (DSSS), η οποία χρησιμοποιείται από το 802.11b. Όταν συνδέεται με διάφορους τύπους διαμόρφωσης, το 802.11g (όπως το 802.11a) είναι σε θέση να υποστηρίξει πολύ υψηλότερους ρυθμούς στοιχείων από το 802.11b. Όπως σημειώνεται στον Πίνακα 4.1, το 802.11g χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό μετάδοσης OFDM και DSSS για να υποστηρίξει ένα μεγάλο σύνολο ρυθμών στοιχείων - στην πραγματικότητα, όλοι οι ρυθμοί στοιχείων που υποστηρίζονται από το 802.11a και από το 802.11b.

Data Rate (Mbps)	Transmission Type	Modulation Scheme
54	OFDM	64 QAM
48	OFDM	64 QAM
36	OFDM	16 QAM
24	OFDM	16 QAM
18	OFDM	QPSK1
12	OFDM	QPSK
11	DSSS	CCK2
9	OFDM	BPSK3
6	OFDM	BPSK
5.5	DSSS	CCK
2	DSSS	QPSK
1	DSSS	BPSK

Πίνακας 4.1: Ρυθμοί στοιχείων, τύποι μετάδοσης, και σχέδια διαμόρφωσης 802.11g προτύπου

QAM quadrature amplitude modulation, CCK complementary code keying, BPSK biphase shift keying

4.2 Απόδοση, χωρητικότητα και χαρακτηριστικά του προτύπου 802.11g

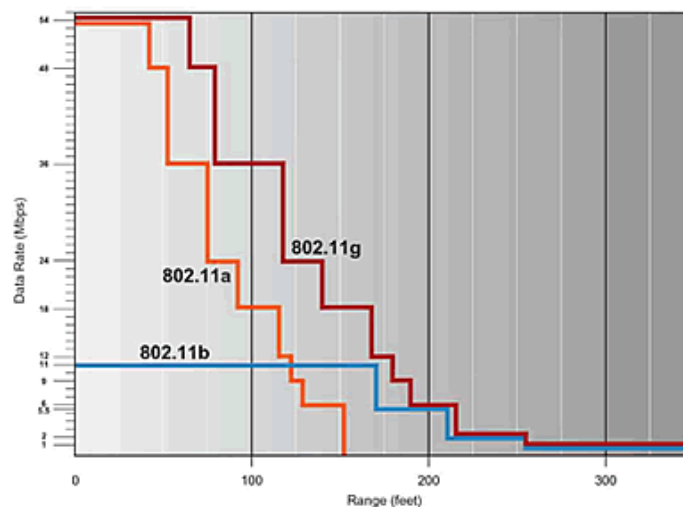
4.2.1 Ρυθμοί Στοιχείων του προτύπου 802.11g

Όλες οι τυποποιημένες τεχνολογίες 802.11 υποστηρίζουν πολλαπλούς ρυθμούς στοιχείων για να επιτρέπουν στους πελάτες να επικοινωνούν με την καλύτερη δυνατή ταχύτητα. Η επιλογή ρυθμού στοιχείων είναι μια ανταλλαγή μεταξύ της λήψης του υψηλότερου πιθανού ρυθμού στοιχείων προσπαθώντας παράλληλα να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των σφαλμάτων επικοινωνίας. Όποτε υπάρχει ένα σφάλμα στα στοιχεία, τα συστήματα πρέπει να ξοδέψουν χρόνο ώστε να αναμεταδώσουν τα στοιχεία έως ότου είναι ελεύθερο σφάλματος. Κάθε πελάτης 802.11 εκτελεί μια διαδικασία για να επιλέξει τον καλύτερο ρυθμό στοιχείων. Οι πελάτες του 802.11g μπορούν να επιλέξουν από την ευρύτερη πιθανή περιοχή και από τους ρυθμούς στοιχείων OFDM των 54, 48, 36, 24, 18, 12, 9, και 6 Mbps, και τους ρυθμούς CCK των 11, 5.5, και 1 Mbps.

4.2.2 Περιοχή και Ρυθμός Στοιχείων του προτύπου 802.11g

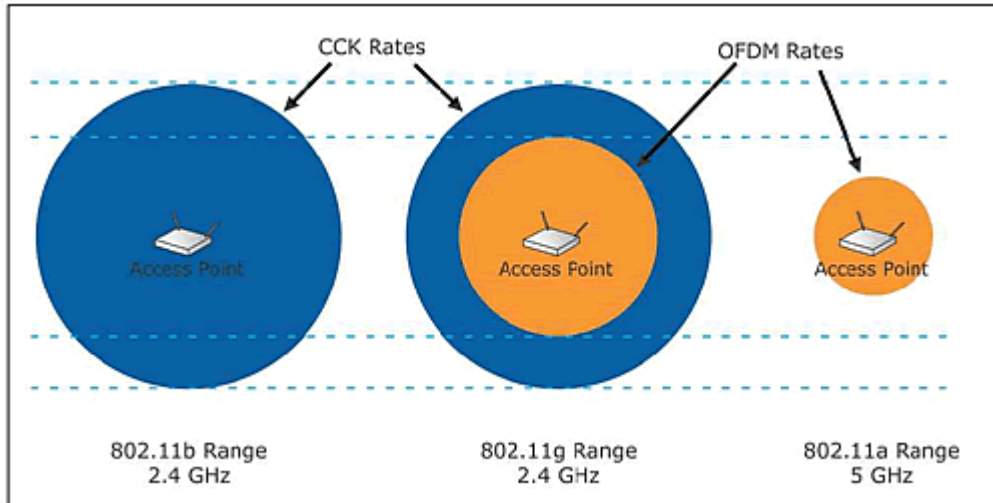
Δεδομένου ότι η απόσταση από το σημείο πρόσβασης αυξάνεται, τα προϊόντα βασισμένα στο 802.11 παρέχουν μειωμένους ρυθμούς στοιχείων για να διατηρήσουν τη συνεκτικότητα. Το πρότυπο 802.11g έχει το ίδιο χαρακτηριστικό διάδοσης με το 802.11b, επειδή εκπέμπει στην ίδια ζώνη συχνότητας 2.4 GHz. Επειδή τα προϊόντα 802.11b και 802.11g μοιράζονται τα ίδια χαρακτηριστικά διάδοσης, οι υλοποιήσεις παρέχουν κατά προσέγγιση την ίδια μέγιστη περιοχή στον ίδιο ρυθμό στοιχείων. Επειδή τα ραδιοσήματα των 5 GHz δεν διαδίδονται όπως τα ραδιοσήματα 2.4 GHz, η περιοχή προϊόντων 802.11a είναι περιορισμένη έναντι των περιοχών προϊόντων 802.11b ή 802.11g.

Το ακόλουθο Σχήμα επεξηγεί τον αναμενόμενο ρυθμό στοιχείων κάθε τεχνολογίας στις διαφορετικές περιοχές:



Σχήμα 4.1: Οι αναμενόμενοι ρυθμοί στοιχείων 802.11a, 802.11b και 802.11g σε Ποικίλη Απόσταση από το Σημείο Πρόσβασης

Χαρακτηριστικά, τα δίκτυα 2.4 GHz 802.11g έχουν την ίδια κάλυψη με τα δίκτυα 2.4 GHz 802.11b. Η τυποποιημένη διαμόρφωση 802.11b κάνει χρήση της CCK διαμόρφωσης, ενώ το 802.11g χρησιμοποιεί και τη διαμόρφωση CCK για την οπίσθια συμβατότητα και τη διαμόρφωση OFDM για να επιτύχει την καλύτερη ρυθμοαπόδοση σε μια δεδομένη απόσταση. Το πρότυπο 802.11a χρησιμοποιεί, επίσης, τη διαμόρφωση OFDM, αλλά υπάρχει περισσότερη απώλεια σήματος καθώς ταξιδεύει μέσω των αντικειμένων επειδή χρησιμοποιεί υψηλότερη συχνότητα.



Σχήμα 4.2: Σχετική Περιοχή των Συσκευών 802.11b, 802.11g, και 802.11a

4.2.3 Απόδοση και χωρητικότητα του προτύπου 802.11g

Μέσα στο περιεχόμενο των WLAN, η χωρητικότητα δικτύου είναι κατά προσέγγιση το προϊόν της ρυθμοαπόδοσης πολλαπλασιαζόμενο με τον αριθμό των διαθέσιμων καναλιών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όπως στο 802.11b, έτσι και οι συσκευές 802.11g περιορίζονται σε τρία μη επικαλυπτόμενα κανάλια. Το αποτέλεσμα είναι ότι οποιαδήποτε αύξηση στη χωρητικότητα δικτύου σχετική με το 802.11b θα προκύψει από τις αυξήσεις στη ρυθμοαπόδοση και μόνο. Η ρυθμοαπόδοση που παρέχεται από τα δίκτυα 802.11g είναι εξαρτώμενη από διάφορους περιβαλλοντικούς και παράγοντες εφαρμογής, κύριος μεταξύ αυτών είναι εάν ή όχι τα δίκτυα 802.11g υποστηρίζουν κληρονομημένους (legacy) 802.11b πελάτες.

Τα δίκτυα 802.11 χρησιμοποιούν Ανίχνευση Φέροντος Πολλαπλής Πρόσβασης με Αποφυγή Σύγκρουσης (CSMA/CA), μια μέθοδος πρόσβασης μέσου παρόμοια με αυτήν του από κοινού Ethernet. Επίσης, οι συσκευές 802.11b, που μοιράζονται την ίδια ζώνη 2.4 GHz με το 802.11g, δεν έχουν κανένα μέσο ανίχνευσης μεταδόσεων OFDM. Αν και οι συσκευές 802.11b μπορούν να αισθανθούν "το θόρυβο" στη ζώνη 2.4 GHz μέσω των Clear Channel Assessment (CCA) τους, δεν μπορούν να αποκωδικοποιήσουν οποιαδήποτε στοιχεία, διαχείριση, ή πακέτα ελέγχου που στέλνονται μέσω OFDM. Δεδομένου αυτό, το πρότυπο 802.11g περιλαμβάνει μηχανισμούς προστασίας ώστε να παρέχει συνύπαρξη και οπίσθια συμβατότητα.

Όταν οι πελάτες 802.11b συνδέονται σε ένα σημείο πρόσβασης 802.11g, το σημείο πρόσβασης θα θέσει σε λειτουργία ένα μηχανισμό αποκαλούμενο Request to Send/Clear to Send (RTS/CTS). Αρχικά ένας μηχανισμός για τη διευθυνοδότηση του " προβλήματος κρυφού κόμβου" (ένας όρος όπου δύο πελάτες μπορούν να διατηρήσουν μια σύνδεση με ένα σημείο πρόσβασης αλλά, λόγω της απόστασης δεν μπορούν να ακούσουν ο ένας τον άλλον), το RTS/CTS προσθέτει έναν βαθμό αιτιοκρατίας στο ειδιάλλως πολλαπλής πρόσβασης δίκτυο. Όταν επικαλείται το RTS/CTS, οι πελάτες πρέπει πρώτα να ζητήσουν πρόσβαση στο μέσο από το σημείο πρόσβασης με ένα μήνυμα RTS. Έως ότου απαντήσει το σημείο πρόσβασης στον πελάτη με ένα μήνυμα CTS, ο πελάτης θα απέχει από την πρόσβαση του μέσου και τη μετάδοση των πακέτων στοιχείων του.

Όταν παραλαμβάνεται από πελάτες εκτός αυτού που έστειλε το αρχικό RTS, η εντολή CTS ερμηνεύεται ως μια "μην στείλετε" εντολή, αναγκάζοντας τους για να απέχουν από την πρόσβαση του μέσου. Μπορεί να δει κανείς ότι αυτός ο μηχανισμός θα αποκλείσει τους πελάτες 802.11b από την ταυτόχρονη μετάδοση με έναν πελάτη 802.11g, αποφεύγοντας, με αυτόν τον τρόπο, τις συγκρούσεις που μειώνουν τη ρυθμοαπόδοση λόγω αναμεταδόσεων. Κάποιος μπορεί να δει ότι αυτή η πρόσθετη διαδικασία RTS/CTS προσθέτει ένα σημαντικό ποσό επιβάρυνσης πρωτοκόλλου (protocol overhead) που επίσης οδηγεί σε μια μείωση της ρυθμοαπόδοσης του δικτύου.

Εκτός από το RTS/CTS, το πρότυπο 802.11g προσθέτει μια άλλη σημαντική απαίτηση να λάβει υπ' όψιν την συμβατότητα 802.11b. Σε περίπτωση που συμβαίνει μια σύγκρουση λόγω των ταυτόχρονων μεταδόσεων (η πιθανότητα της οποίας μειώνεται πολύ λόγω RTS/CTS), οι συσκευές των πελατών υπαναχωρούν του δικτύου για μια τυχαία χρονική περίοδο πριν προσπαθήσουν να προσπελάσουν ξανά το μέσο. Ο πελάτης φθάνει σε αυτήν την τυχαία χρονική περίοδο επιλέγοντας από έναν αριθμό υποδοχών, κάθε μια από τις οποίες έχει μια σταθερή διάρκεια. Για το 802.11b, υπάρχουν 31 υποδοχές, κάθε μια από τις οποίες είναι 20 μsec. Για το 802.11a, υπάρχουν 15 υποδοχές, κάθε μια από τις οποίες είναι 9 μsec. Το 802.11a, γενικά παρέχει πιο βραχυπρόθεσμους backoff χρόνους, από το 802.11b που παρέχει καλύτερη απόδοση από το 802.11a, ιδιαίτερα όταν ο αριθμός των πελατών της κυψέλης αυξάνεται. Όταν λειτουργεί σε μια μεικτή κατάσταση (λειτουργώντας και με 802.11b συνδεδεμένους πελάτες) το δίκτυο 802.11g θα υιοθετήσει τους backoff χρόνους του 802.11b. Όταν λειτουργεί χωρίς 802.11b συνδεδεμένους πελάτες, το δίκτυο 802.11g θα υιοθετήσει τους υψηλότερης απόδοσης 802.11a backoff χρόνους.

Όταν τα 802.11g δίκτυα λειτουργούν εν τη απουσία των κληρονομημένων (legacy) 802.11b πελατών, η ρυθμοαπόδοση δικτύων είναι παρόμοια με αυτή του 802.11a. Με τα μέσα μετάδοσης OFDM και το 802.11a backoff σχέδιο, το 802.11g μπορεί ουσιαστικά να αντιμετωπισθεί ως το πρότυπο 802.11a της ζώνης 2.4 GHz. Ο Πίνακας 4.2 επεξηγεί τις συγκρίσεις ρυθμοαπόδοσης για τα πρότυπα 802.11a, 802.11b, και 802.11g. Σημειωτέον ότι η αύξηση της ρυθμοαπόδοσης για το 802.11g όταν λειτουργεί σε μεικτή κατάσταση είναι σχετικά μέτρια όταν συγκρίνεται με το 802.11b, και είναι ένας κλάσμα της ρυθμοαπόδοσης που παρέχεται από το 802.11g όταν δεν υποστηρίζει κληρονομημένους (legacy) πελάτες.

	Data Rate (Mbps)	Approximate Throughput (Mbps)	Throughput as a Percentage of 802.11b Throughput
802.11b	11	6	100%
802.11g - with 802.11b clients in cell (CTS/RTS)	54	8	133%
802.11g - with 802.11b clients in cell (CTS-to-self)	54	13	217%
802.11g (no 802.11b clients in cell)	54	22	367%
802.11a	54	25	417%

Πίνακας 4.2: Κατά προσέγγιση σύγκριση της ρυθμοαπόδοσης των προτύπων 802.11a, 802.11b, και 802.11g

Το πρότυπο 802.11g παρέχει μια επιλογή αποκαλούμενη CTS to Self, η οποία είναι σε θέση να παρέχει τη μεγαλύτερη ρυθμοαπόδοση όταν είναι σε μια κατάσταση μεικτών κυψελών. Όπως υπονοεί το όνομα, CTS to Self κάνει χωρίς το RTS και στηρίζεται επάνω στις σαφείς ικανότητες αξιολόγησης του καναλιού του πελάτη 802.11b για τον έλεγχο ελεύθερου μέσου.

Αποδεικνύοντας τις ικανότητες ρυθμοαπόδοσης του προτύπου 802.11g και στις δύο καταστάσεις, μπορεί κανείς να εξετάσει τις γενικές ικανότητες χωρητικότητας του. Θυμηθείτε, ως αποτέλεσμα της λειτουργίας στην ίδια ζώνη 2.4 GHz όπως το 802.11b, το 802.11g περιορίζεται ομοίως σε τρία μη επικαλυπτόμενα κανάλια. Αυτό συγκρίνεται με τα 12 χωρίς άδεια κανάλια που είναι διαθέσιμα σε πολλά μέρη του κόσμου για το 802.11a. Με τον συνυπολογισμό των ικανοτήτων ανίχνευσης ραντάρ που είναι μέρος του προτύπου 802.11h, ο αριθμός των 5 GHz διαθέσιμων καναλιών για το 802.11a θα αυξηθεί από 12 σε 24. Ακόμα και όταν δεν υποστηρίζονται 802.11b πελάτες, το 802.11g συνεχίζει να παρέχει ένα μέρος της χωρητικότητας του δικτύου, το οποίο παρέχεται από το 802.11a. Ο **Πίνακας 4.3** επεξηγεί μια σύγκριση της χωρητικότητας του δικτύου των προτύπων 802.11b, 802.11g, και 802.11a.

	Throughput (Mbps)	Channels	Capacity (Mbps)
802.11b	6	3	18
802.11g (mixed mode operation)	8	3	24
802.11g (no legacy support)	22	3	66
802.11a	25	12	300
802.11a (with 802.11h support)	25	24	600
802.11g Range and Coverage			

Πίνακας 4.3: Προσεγγίσεις Χωρητικότητας Δικτύου των προτύπων 802.11b, 802.11g, και 802.11a

Από θέμα φυσικής, υπάρχει μια αντίστροφη σχέση μεταξύ του μήκους κύματος και της περιοχής. Καθώς όλοι οι άλλοι όροι θεωρούνται ίσοι, ένα σήμα που μεταδίδεται σε ένα χαμηλότερο τμήμα του φάσματος συχνότητας θα μεταφερθεί περαιτέρω από ένα σήμα που μεταδίδεται σε μια υψηλότερη ζώνη. Επιπλέον, μια πιο μακροχρόνια κυματομορφή (χαμηλότερα στο φάσμα) τείνει να διαδοθεί

καλύτερα μέσω των στερεών (όπως τοίχοι και δέντρα) από μια βραχυπρόθεσμη κυματομορφή. Επειδή το 802.11g λειτουργεί στο ίδιο τμήμα 2.4 GHz του φάσματος ραδιοσυχνότητας όπως το 802.11b, θα μοιραστεί το θεμελιώδες πλεονέκτημά του σε αντίθεση με το 5 GHz 802.11a. Με τα πρότυπα 802.11b και 802.11g, εντούτοις, δεν κρατιούνται όλοι οι άλλοι όροι ίσοι. Ένας άλλος θεμελιώδης κανόνας είναι ότι καθώς οι ρυθμοί στοιχείων αυξάνονται, η περιοχή μειώνεται. Το 802.11b χρησιμοποιεί DSSS για να υποστηρίξει ρυθμούς στοιχείων των 11, 5.5, 2, και 1 Mbps, με αντιστοίχως πιο μακροχρόνιες περιοχές καθώς οι ρυθμοί στοιχείων μειώνονται. Το 802.11g χρησιμοποιεί OFDM για να υποστηρίξει ρυθμούς στοιχείων των 54, 48, 36, 24, 18, 12, 9, και 6 Mbps, με αντιστοίχως πιο μακροχρόνιες περιοχές καθώς οι ρυθμοί στοιχείων μειώνονται. Οι υψηλότεροι ρυθμοί στοιχείων που υποστηρίζονται από το 802.11g έχουν ως αποτέλεσμα πιο βραχυπρόθεσμη περιοχή από την περιοχή που υποστηρίζεται από το μέγιστο ρυθμό στοιχείων του 802.11b. Ο OFDM είναι ένας ακόμη αποδοτικότερος τρόπος μετάδοσης από τον DSSS, πράγμα που σημαίνει ότι σε μια δεδομένη περιοχή, οι υψηλότεροι ρυθμοί στοιχείων OFDM θα υποστηριχθούν από ότι ρυθμοί στοιχείων DSSS (όλοι οι όροι θεωρούνται ίσοι).

Άλλοι παράγοντες που είναι υπό εξέταση είναι η ισχύς μετάδοσης (transmit power) και η ευαισθησία δέκτη (receiver sensitivity). Η επιλογή είτε του DSSS είτε του OFDM τύπου μετάδοσης έχει μια επίδραση στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο πομπός, καθώς επίσης και η ικανότητα του δέκτη, ιδιαίτερα σε υψηλότερους ρυθμούς στοιχείων. Ο λόγος για αυτό είναι ότι τα υψηλότερης τάξης σχέδια διαμόρφωσης όπως η 64-αδική σηματοδότηση QAM (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) που χρησιμοποιείται για να υποστηριχθούν 54 και 48 Mbps ρυθμοί στοιχείων απαιτούν έναν υψηλό βαθμό οξύτητας εκ μέρους του δέκτη.

Η υψηλή ισχύς που προέρχεται από το ραδιοπομπό τείνει να απευαισθητοποιήσει τον δέκτη, ένα φαινόμενο γνωστό ως διανυσματικό μέγεθος σφάλματος (Error Vector Magnitude, EVM). Αυτό οδηγεί σε μια αντιδραστική επίδραση, δια του οποίου αυξάνοντας την ισχύ μετάδοσης τείνει να μειωθεί η περιοχή της συσκευής σε αυτούς τους υψηλότερους ρυθμούς στοιχείων. Επομένως τα ραδιοκύματα που λειτουργούν στην κατάσταση 802.11g, συνεπώς κάνουν χρήση χαμηλότερης ισχύος από ότι όταν λειτουργούν στην κατάσταση 802.11b.

Το αποτέλεσμα των διαφορετικών κυματομορφών, των ρυθμών στοιχείων, των τύπων μετάδοσης, και των χαρακτηριστικών μετάδοσης είναι πολυάριθμες περιοχές για τις τρεις τεχνολογίες 802.11. Φυσικά, οποιεσδήποτε δηλωμένες περιοχές δεν είναι άλλο από προσεγγίσεις, καθώς οι διάφοροι περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν να ασκήσουν δραματική επίδραση στην περιοχή και την προκύπτουσα περιοχή κάλυψης. Μπορεί κανείς να διακρίνει τις σχετικές περιοχές των διαφορετικών τεχνολογιών που παρέχονται από τον παρακάτω Πίνακα. Σημειώστε τις σημαντικές διαφορές περιοχής του 802.11a σε σχέση με το πρότυπο 802.11g. Επίσης σημειώστε την ανώτερη περιοχή των OFDM ρυθμών στοιχείων σχετικά με τους DSSS ρυθμούς στοιχείων στο πρότυπο 802.11g, όπως εμφανίζεται στη μεγαλύτερη περιοχή των 18 Mbps απ' ό,τι των 11 Mbps.

Data Rate (Mbps)	802.11a (40 mW with 6 dBi gain diversity patch antenna) Range	802.11g (30 mW with 2.2 dBi gain diversity dipole antenna)	802.11b (100 mW with 2.2 dBi gain diversity dipole antenna)
54	45 ft (13 m)	90 ft (27 m)	-
48	50 ft (15 m)	95 ft (29 m)	-
36	65 ft (19 m)	100 ft (30 m)	-
24	85 ft (26 m)	140 ft (42 m)	-
18	110 ft (33 m)	180 ft (54 m)	-
12	130 ft (39 m)	210 ft (64 m)	-
11	-	160 ft (48 m)	160 ft (48 m)
9	150 ft (45 m)	250 ft (76 m)	-
6	165 ft (50 m)	300 ft (91 m)	-
5.5	-	220 ft (67 m)	220 ft (67 m)
2	-	270 ft (82m)	270 ft (82m)
1	-	410 ft (124 m)	410 ft (124 m)

Πίνακας 4.4: Συγκριτικές Περιοχές σε ένα Ανοικτό Εσωτερικό Περιβάλλον Γραφείου μέσω Διαχωριστικών Τοίχων

Επειδή το 802.11g λειτουργεί στη ίδια ζώνη συχνότητας με το 802.11b, μπορεί να μοιραστεί ένα κοινό σύνολο κεραιών. Επειδή η λειτουργία WLAN στην 5 GHz περιοχή είναι ένα σχετικά νέο φαινόμενο και επειδή τα volumes του 802.11a είναι αυτήν την περίοδο πολύ χαμηλότερα από εκείνα του 802.11b, δεν υπάρχει και τόσο ευρεία επιλογή διαθέσιμων κεραιών. Κατά συνέπεια, σήμερα κάποιος έχει μεγαλύτερη δυνατότητα να διαμορφώσει μια περιοχή κάλυψης μέσω της χρήσης εξειδικευμένων κεραιών με το πρότυπο 802.11g παρά με το 802.11a. Επιπλέον, τα πιο περιορισμένα χαρακτηριστικά διάδοσης της 5 GHz κυματομορφής μπορούν να περιορίσουν περαιτέρω τη μορφή μιας περιοχής κάλυψης λόγω των εμποδίων σε μια 2.4 GHz τεχνολογία.

4.3 Εκτιμήσεις Περιβάλλοντος Δικτύου

4.3.1 Περιβάλλον Κληρονομημένων Συσκευών 802.11b

Όταν το AP και όλοι οι πελάτες είναι 802.11b, η επικοινωνία συμβαίνει σε ρυθμούς στοιχείων 802.11b. Η επιβάρυνση της επικοινωνίας μεταξύ των προϊόντων περιορίζει αποτελεσματικά την μέγιστη TCP ρυθμοαπόδοση σε 5.8 Mbps. Όταν τα προϊόντα επικοινωνούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε χαμηλότερους ρυθμούς στοιχείων, η ρυθμοαπόδοση, αντίστοιχα, μειώνεται.

4.3.1.1 Ρυθμοαπόδοση του προτύπου 802.11g

Η ρυθμοαπόδοση δεν είναι ίδια με το ρυθμό στοιχείων για τα συστήματα δικτύωσης, λόγω των επιβαρύνσεων, του περιβάλλοντος, και της σύνθεσης του δικτύου. Η ρυθμοαπόδοση των προϊόντων 802.11g μπορεί να εξαρτηθεί από το εάν υπάρχουν προϊόντα 802.11b κοντά. Η απόδοση είναι

καλύτερη στα περιβάλλοντα όπου ένα 802.11g σημείο πρόσβασης (AP) επικοινωνεί μόνο με 802.11g πελάτες σε ένα ομοιογενές WLAN. Σε αυτά τα περιβάλλοντα, ο ρυθμός στοιχείων μέσα σε 75 πόδια είναι 54 Mbps και η ρυθμοαπόδοση είναι 22-24 Mbps κατά τη χρήση του πρωτοκόλλου ελέγχου μετάδοσης (Transmission Control Protocol, TCP).

Για χάρη της μεγιστοποίησης της απόδοσης παρουσία 802.11b προϊόντων, τα 802.11g AP συντονίζουν την χρήση του μέσου μετάδοσης με τους μηχανισμούς προστασίας. Επειδή οι μηχανισμοί προστασίας απαιτούν επιβάρυνση της επικοινωνίας, συμβατότητα παρέχεται εις βάρος της ρυθμοαπόδοσης. Ο CTS-to-self μηχανισμός προστασίας χαμηλώνει την μέγιστη ρυθμοαπόδοση TCP σε περίπου 15 Mbps, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

<i>Distance (Feet)</i>	<i>802.11b (Mbps)</i>	<i>802.11a (Mbps)</i>	<i>802.11g-only (Mbps)</i>	<i>802.11g Mixed Environment with CTS-to-self (Mbps)</i>	<i>802.11g Mixed Environment with RTS/CTS (Mbps)</i>
10	5.8	24.7	24.7	14.7	11.8
50	5.8	19.8	24.7	14.7	11.8
100	5.8	12.4	19.8	12.7	10.6
150	5.8	4.9	12.4	9.1	8.0
200	3.7	0	4.9	4.2	4.1
250	1.6	0	1.6	1.6	1.6
300	0.9	0	0.9	0.9	0.9

Πίνακας 4.5: Αναμενόμενη Μέγιστη Ρυθμοαπόδοση για Περιβάλλοντα IEEE 802.11

4.3.1.2 Συμβατότητα του προτύπου 802.11g

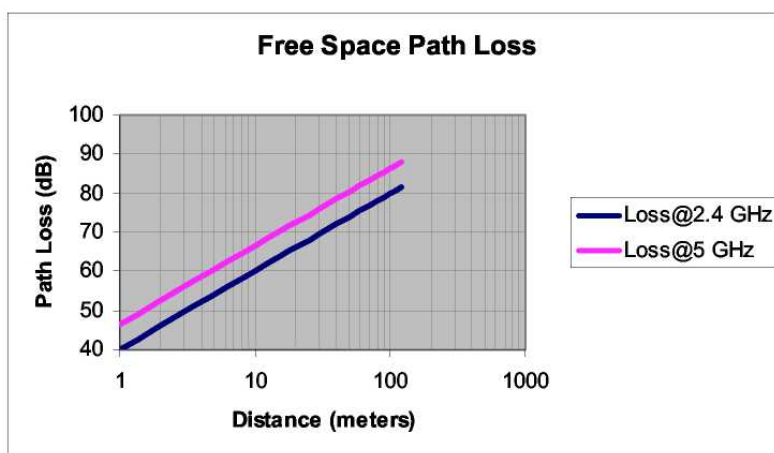
Επειδή το 802.11g χρησιμοποιεί την ίδια ραδιοσηματοδοσία όπως το 802.11b στους χαμηλότερους τέσσερις ρυθμούς στοιχείων του 802.11g, είναι πλήρως οπίσθια συμβατό με το 802.11b. Αυτό επιτρέπει στα δίκτυα να συνεχίσουν να υποστηρίζουν 802.11b ενεργές συσκευές κατά τη μετανάστευση στο υψηλότερης απόδοσης πρότυπο.

4.3.2 Περιβάλλον 802.11g Συσκευών

Ακόμη και χωρίς να λάβουμε υπ' όψιν τη συνύπαρξη με τις 802.11b συσκευές, είναι αλήθεια ότι οι συσκευές 802.11g δεν θα έχουν ισοδύναμη απόδοση με τις συσκευές 802.11a απλά λόγω της ζώνης συχνότητας στην οποία λειτουργούν. Αυτό το τμήμα περιγράφει την επίδραση της διάδοσης και τη διαθεσιμότητα καναλιών, και πώς είναι διαφορετικές στις περιπτώσεις των 802.11a και 802.11g προτύπων.

4.3.2.1 Επίδραση τη Διάδοσης

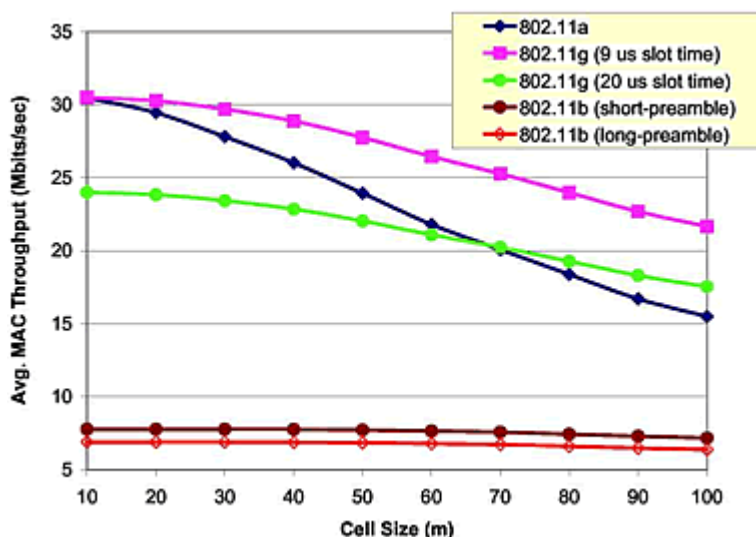
Μια από τις προφανέστερες διαφορές μεταξύ των συσκευών 802.11g και 802.11a είναι ότι λειτουργούν σε διαφορετικές ζώνες συχνότητας. Επειδή το μέγεθος των κεραιών που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση και τη λήψη των σημάτων εξαρτάται από τη συχνότητα, για τις κεραιές με παρόμοια χαρακτηριστικά υπάρχει μια επίδραση εξαρτώμενη της συχνότητας στη μείωση της δύναμης σήματος όπως μετρήθηκε από δύο κεραιές. Αυτή η επίδραση αναφέρεται συνήθως ως απώλεια διαδρομών εξαρτώμενη της συχνότητας. Σε ένα ελεύθερου χώρου περιβάλλον, η απώλεια διαδρομών μεταξύ ιστροπικών κεραιών στα 2.4 GHz και 5 GHz παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Απώλεια διαδρομών ελεύθερου χώρου στα 2.4 GHz και 5 GHz

Όπως δείχνει αυτό το Σχήμα, στο μοντέλο του απλού ελεύθερου χώρου υπάρχει μια διαφορά περίπου 6 dB μεταξύ της διάδοσης στα 2.4 GHz και στα 5 GHz. ($20 \times \log_{10}(2400) - 20 \times \log_{10}(5000) = -6.4 \text{ dB}$.) Στις αναπτύξεις στις οποίες η περιοχή σήματος είναι ο σημαντικότερος παράγοντας, αυτή η επίδραση ευνοεί τις συσκευές 802.11g δεδομένου ότι, σε γενικές γραμμές τα σήματα από εκείνες τις συσκευές θα διαδοθούν περαιτέρω με τη λιγότερη απώλεια.

Φυσικά, οι συνθήκες διάδοσης στις θέσεις στις οποίες τα ασύρματα 802.11 LAN χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι πιθανό να μην αντιπροσωπευθούν καλά από το μοντέλο απώλειας διαδρομών ελεύθερου χώρου. Τα ασύρματα LAN χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικά στο εσωτερικό, όπου τα πολλαπλών διαδρομών και εξασθένιση σκιών (shadowing) αποτελέσματα θα έχουν μια σημαντική επίδραση στη επιτυγχάνουσα διάδοση. Το Σχήμα 4.4 παρουσιάζει τη μέση ρυθμοαπόδοση για διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας ενάντια του μεγέθους της κυψέλης.



Σχήμα 4.4: Ρυθμοαποδόσεις στρώματος MAC για απλά κυψελοειδή δίκτυα

4.3.2.2 Επίδραση της ζώνης συχνότητας και του αριθμού καναλιών

Ενώ η επίδραση της διάδοσης ευνοεί τις συσκευές 802.11g, τα χαμηλότερα επίπεδα παρεμβολής στη ζώνη των 5 GHz, και ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών, ευνοούν τις συσκευές 802.11a.

Δεδομένου ότι οι συσκευές 802.11g λειτουργούν στη ζώνη 2.4 GHz, υπόκεινται σε πολλές περισσότερες πηγές παρεμβολής από ότι οι συσκευές 802.11a, οι οποίες λειτουργούν στη ζώνη των 5 GHz. Δεδομένου ότι η ζώνη 2.4 GHz είναι ISM (βιομηχανική, επιστημονική, και ιατρική ζώνη) από 2.400-2.500 GHz καθώς επίσης και μια χωρίς άδεια ζώνη από 2.400-2.4835 GHz, τα ασύρματα LAN σε αυτήν την ζώνη πρέπει να αντιμετωπίσουν παρεμβολή από συσκευές όπως φούρνοι μικροκυμάτων (περισσότερα από 100 εκατομμύρια στις ΗΠΑ, μόνο), τις ιατρικές χρήσεις του RF για τη θέρμανση των ιστών του σώματος, και φυσικά άλλες συσκευές επικοινωνιών όπως το Bluetooth και τα ασύρματα τηλέφωνα. Δεδομένου ότι οι περισσότερες από τις κατανομές των 5 GHz δεν επικαλύπτουν μια ISM ζώνη, και επειδή οι φούρνοι μικροκυμάτων δεν λειτουργούν σε αυτήν την ζώνη, υπάρχουν λιγότερες πηγές εξωτερικής παρεμβολής για τις συσκευές 802.11a.

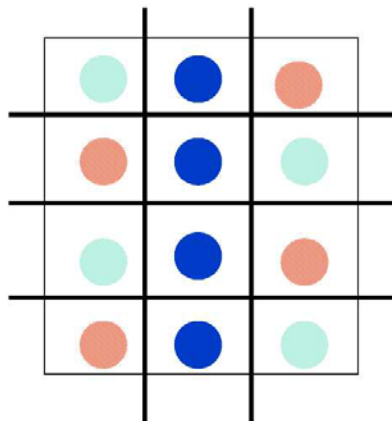
Εντούτοις, μια εξίσου προβληματική πηγή παρεμβολής στα ασύρματα LAN είναι η αυτό-παρεμβολή (*self-interference*), η οποία προκύπτει από ένα AP σε ένα ενιαίο δίκτυο, στο οποίο παρεμβαίνουν κι άλλα AP σε εκείνο το ίδιο δίκτυο που λειτουργεί στην ίδια συχνότητα. Δεδομένου ότι τα δίκτυα γίνονται μεγαλύτερα και απαιτούνται περισσότερα AP, είτε για κάλυψη είτε για χωρητικότητα, είτε και για τα δύο, γίνεται όλο και πιο δύσκολο να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ δια-καναλικών AP επειδή υπάρχει ένας περιορισμένος αριθμός καναλιών από τον οποίο μπορεί να επιλέξει κανείς.

Αυτή η επίδραση συσχετίζεται με ένα κλασικό πρόβλημα στα μαθηματικά γνωστό ως θεώρημα των τεσσάρων χρωμάτων. Το θεώρημα των τεσσάρων χρωμάτων χρονολογείται από το 1852 όταν ο Francis Guthrie, ενώ προσπαθώντας να χρωματίσει το χάρτη των νομών της Αγγλίας παρατήρησε ότι

τέσσερα χρώματα ήταν ικανοποιητικά για το στόχο του. Ρώτησε τον αδελφό του Frederick εάν είναι αλήθεια ότι οποιοσδήποτε χάρτης μπορεί να χρωματιστεί χρησιμοποιώντας τέσσερα χρώματα κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι παρακείμενες περιοχές (δηλ. εκείνες που μοιράζονται ένα κοινό τμήμα ορίου, όχι μόνο ένα σημείο) να λαμβάνουν διαφορετικά χρώματα.

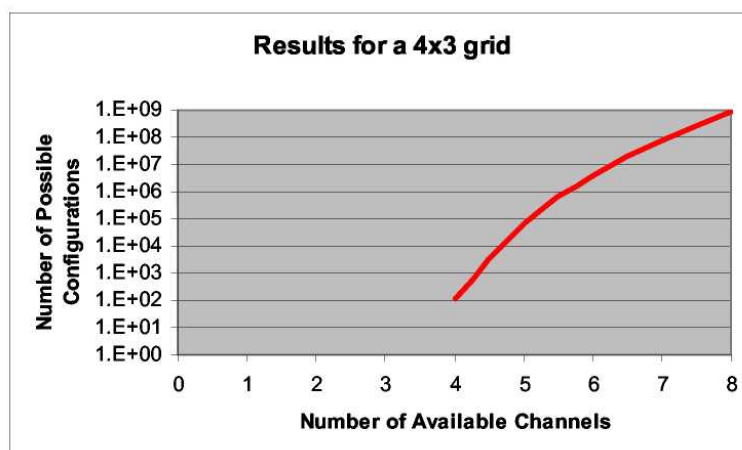
Αυτό το θεώρημα επιβεβαιώθηκε τελικά από τους Appel και Haken το 1976, όταν δημοσίευσαν την απόδειξη του Θεωρήματος των τεσσάρων χρωμάτων. Το θεώρημα παρουσιάζει ότι σε οποιαδήποτε προσπάθεια γίνει να χρωματιστεί ένας χάρτης προκειμένου να αποφευχθούν τα παρακείμενα όρια που μοιράζονται ένα χρώμα (ή, στην περίπτωση των WLAN, να αποφευχθεί παρακείμενες κυψέλες να μοιράζονται ένα κανάλι) χρειάζονται τουλάχιστον 4 χρώματα (ή 4 κανάλια).

Η πιθανή εγκυρότητα αυτού του ισχυρισμού μπορεί να φανεί με τη λήψη ενός απλού παραδείγματος. Φανταστείτε ένα 4×3 πλέγμα, κάθε τμήμα του οποίου μπορεί να αντιπροσωπεύει μια περιοχή που πρέπει να καλυφθεί από ένα ενιαίο AP. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.5**.



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση δια-καναλικών γειτονικών κυψελών σε ένα σύστημα 3 καναλιών

Οι τρεις τύποι κύκλων που παρουσιάζονται σε αυτό το σχήμα αντιπροσωπεύουν τρία διαφορετικά κανάλια στα οποία το AP μπορεί να αναπτύξει δραστηριότητες. Η διαμόρφωση που παρουσιάζεται σε αυτό το σχήμα θα έχει σημαντικά προβλήματα παρεμβολής δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές περιπτώσεις στις οποίες οι μπλε (στερεοί) κύκλοι είναι ο ένας δίπλα στον άλλο. Δεν υπάρχει καμία διαμόρφωση χρωμάτων που αποφεύγει αυτό το πρόβλημα με μόνο 3 χρώματα (κανάλια) διαθέσιμα. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.6**, εντούτοις, μόλις αυξάνεται ο αριθμός των καναλιών πέρα από τρία, υπάρχουν πολλοί τρόποι να διευθετηθούν τα AP έτσι ώστε οι παρακείμενες κυψέλες να μην χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι. Αυτό οδηγεί σε δραματικές μειώσεις της επίδρασης της αυτό-παρεμβολής.



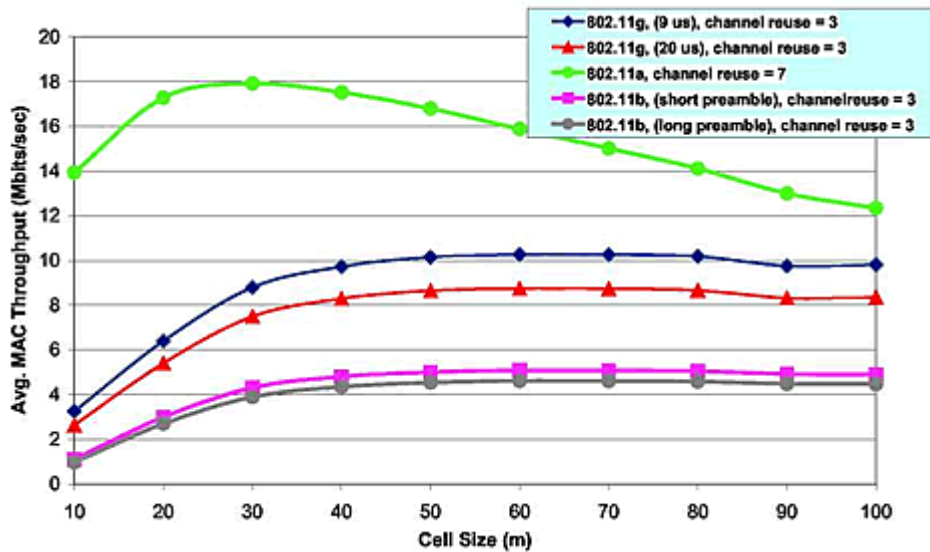
Σχήμα 4.6: Επίδειξη του αριθμού των πιθανών διαμορφώσεων χωρίς δια-καναλικές παρακείμενες κυψέλες, συναρτήσει του αριθμού των διαθέσιμων καναλιών

Κατά συνέπεια, με μόνο τρία κανάλια, το 802.11g έχει ανεπαρκή κανάλια για να αναπτύξει σημεία πρόσβασης σε ένα σχεδιάγραμμα πλέγματος χωρίς να πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ίδιο κανάλι στα παρακείμενα σημεία πρόσβασης. Το 802.11a με το μεγαλύτερο αριθμό καναλιών δίνει στον ασύρματο σχεδιαστή δικτύων πολύ περισσότερη ευελιξία στην ανάθεση καναλιών. Υπάρχει μια δυνατότητα πρόσθετου φάσματος δίπλα στη τρέχουσα ζώνη 2.4 GHz που παρέχεται για τη χωρική άδεια χρήση στις ΗΠΑ για να αυξήσει τον αριθμό καναλιών του 802.11g από τρία σε τέσσερα. Εντούτοις, το 802.11a έχει, ακόμα, περισσότερη ευελιξία σε αυτήν την περιοχή, και έτσι πολύ μεγαλύτερα εύρη ζώνης δικτύων μπορούν να επιτευχθούν.

Χρησιμοποιώντας την προσομοίωσή μας μπορούμε να εξετάσουμε συγκεκριμένα το μέγεθος αυτής της επίδρασης όπως σχετίζεται με την ανάπτυξη των 802.11a και 802.11g δικτύων.

Το **Σχήμα 4.7** σχεδιάζει την απόδοση ρυθμοαπόδοσης όπως επηρεάζεται από τη δια-καναλική παρεμβολή όταν οι συχνότητες επαναχρησιμοποιούνται σε μια κυψελοειδή διαμόρφωση. Μόνο οι 6 πρώτοι δια-καναλικοί παρεμβολείς εξετάζονται. (Μόνο επτά κανάλια για το 802.11a εξετάστηκαν.) Εντούτοις, η πιθανότητα της χειρότερης περίπτωσης δια-καναλικής δραστηριότητας παρεμβολέα, δηλ. 100%. Δεδομένου ότι ο αντίκτυπος παρεμβολής συσχετίζεται επίσης με τον τύπο κυκλοφορίας της σύνδεσης WLAN (η συσκευή αναφοράς WLAN μπορεί να είναι ένα σημείο πρόσβασης ή ένας πελάτης), 20% της κυκλοφορίας υποτίθεται ότι είναι ανερχόμενη κυκλοφορία (πελάτης προς σημείο πρόσβασης) και 80% της κυκλοφορίας υποτίθεται ότι ήταν κυκλοφορία κατερχόμενων συνδέσεων (σημείο πρόσβασης προς πελάτη).

Το **Σχήμα 4.7** παρουσιάζει την επίδραση της λιγότερο πυκνής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας πιθανής λόγω του μεγαλύτερου αριθμού καναλιών διαθέσιμων στη ζώνη 5 GHz. Τα δίκτυα 802.11a έχουν πολύ υψηλότερη μέση ρυθμοαπόδοση σε αυτά τα περιβάλλοντα πολλαπλών κυψελών.



Σχήμα 4.7: Ρυθμοαποδόσεις στρώματος MAC για πολυ-κυψελοειδή δίκτυα

4.3.3 Συνύπαρξη με Συσκευές 802.11b

Ένα από τα οφέλη του 802.11g είναι ότι το πρότυπο προετοιμάζονται έτσι ώστε οι συσκευές 802.11g να έχουν ενσωματωμένη οπίσθια συμβατότητα με τις συσκευές 802.11b. Η ταυτόχρονη λειτουργία αυτών των δύο τύπων συσκευών, εντούτοις, έχει επιπτώσεις στη γενική απόδοση των δικτύων. Πρώτα περιγράφουμε μερικούς απαραίτητους τεχνικούς όρους, και έπειτα περιγράφουμε τι συμβαίνει στην περίπτωση της επικάλυψης των μεικτών καταστάσεων δικτύων. Τέλος, συζητάμε τους μηχανισμούς προστασίας, και την επίδρασή τους στην απόδοση των δικτύων.

4.3.3.1 Τεχνικοί Όροι

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, υπάρχουν διαφορές που ένας χρήστης μπορεί να αναμένει μεταξύ της απόδοσης ενός δικτύου 802.11a και ενός 802.11g βασισμένων απλώς στις ζώνες συχνότητας στις οποίες λειτουργούν και στον αριθμό των μη επικαλυπτόμενων λειτουργικών καναλιών διαθέσιμων σε εκείνες τις ζώνες. Εντούτοις, υπάρχει ένα πιο σύνθετο ζήτημα που έχει επιπτώσεις στη απόδοση των συσκευών 802.11g - η συνύπαρξη με τις συσκευές 802.11b. Προκειμένου να συζητηθούν αυτές οι περιπλοκές, είναι δυστυχώς απαραίτητο να γίνουν κατανοητές μερικές από τις λεπτομέρειες του φυσικού στρώματος 802.11 και των πρωτοκόλλων στρώματος πρόσβασης μέσου.

4.3.3.2 Πλαισίωση και Προπορευόμενο Σήμα Συγχρονισμού

Η πρώτη λεπτομέρεια που απαιτεί εξήγηση είναι πώς το στοιχείο μεταδίδεται μέσα σε ένα δίκτυο 802.11. Ενώ είναι σχετικά γνωστό ότι τα πρότυπα 802.11 καθορίζουν μια διαμόρφωση στοιχείων που καθορίζει τους ρυθμούς στους οποίους τα στοιχεία μπορούν να μεταδοθούν (παραδείγματος

χάριν, στο 802.11b, ο υψηλότερος ρυθμός στοιχείων των 11 Mbps επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας CCK διαμόρφωση), λιγότερο γνωστά είναι η "επιβάρυνση" που συνοδεύει κάθε μια από αυτές τις μεταδόσεις πακέτων στοιχείων. Ο όρος "επιβάρυνση" αναφέρεται στις πληροφορίες που πρέπει να σταλούν για να λειτουργήσει το δίκτυο κατάλληλα, αλλά δεν είναι μέρος των στοιχείων που μεταδίδει ο χρήστης.

Δεδομένου ότι το δίκτυο πρέπει, ακόμα, να ξοδέψει χρόνο για να στείλει αυτές τις πληροφορίες, αλλά δεδομένου ότι δεν αναγνωρίζεται από τον τελικό χρήστη ως τμήμα του ρεύματος κυκλοφορίας του, η συνολική ρυθμοαπόδοση του δικτύου θα εμφανιστεί να είναι χαμηλότερη από το μέγιστο ρυθμό στοιχείων που παρατίθεται. Εν μέρει, για αυτόν τον λόγο ακόμη και τα υψηλότερα 802.11 εκτελεστικά δίκτυα δεν επιτυγχάνουν αποτελέσματα ρυθμοαπόδοσης χρήστη πολύ παραπάνω από το 50% του μέγιστου ρυθμού στοιχείων (περίπου 5 Mbps για ένα 11 Mbps δίκτυο 802.11b που χρησιμοποιεί μακροχρόνια προπορευόμενα σήματα συγχρονισμού, και 30 Mbps για ένα 54 Mbps 802.11a δίκτυο). Οι υπολογισμοί που ακολουθούν, είναι προοριζόμενοι να δώσουν στον αναγνώστη μια κατανόηση του μεγέθους της επίδρασης που συζητείται. Υπάρχουν πολλές επιβαρύνσεις που, για λόγους σαφήνειας, δεν συζητούνται, εδώ. Επίσης, ενώ οι πραγματικές μετρήσεις ρυθμοαπόδοσης λαμβάνονται χρησιμοποιώντας το αποτέλεσμα κάποιας υψηλότερης εφαρμογής στρώματος (όπως το FTP παραδείγματος χάριν), θα περιοριστούμε στο στρώμα πρωτοκόλλου 802.11. Ένας πολύ απλουστευμένος αριθμός ενός πακέτου στοιχείων 802.11 παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.8**.



Σχήμα 4.8: Απλή απεικόνιση της 802.11 επιβάρυνσης προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού

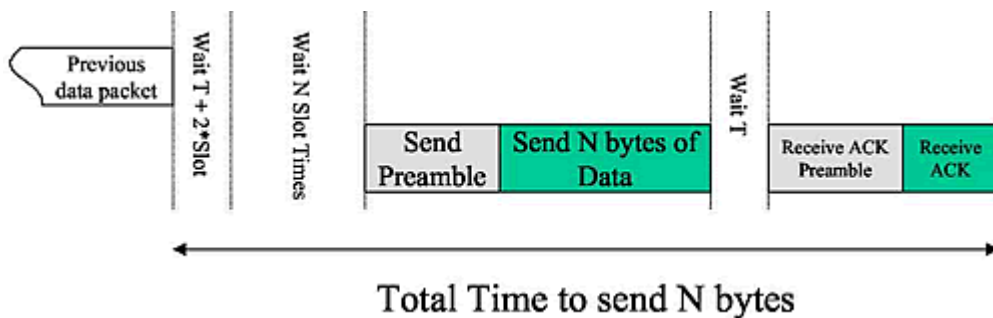
Οι περιοχές που παρουσιάζονται σε γκριζό αποτελούν αυτό που είναι γνωστό ως πεδίο PLCP (Φυσικού Στρώματος Πρωτόκολλο Σύγκλισης, Physical Layer Convergence Protocol, PLCP) στο 802.11. Υπάρχουν τρία διαφορετικά προπορευόμενα σήματα συγχρονισμού που συζητούνται. Για το 802.11b υπάρχει το μακροχρόνιο προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού (192 μ sec) και το βραχυπρόθεσμο προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού (96 μ sec), και για το 802.11a και 802.11g υπάρχει το προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού OFDM (20 μ sec). Η επίδραση αυτού του προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού μπορεί να υπολογιστεί με τον ακόλουθο τρόπο. Εάν 1500 bytes στοιχείων στέλνονται σε 11 Mbps, αυτό παίρνει 1091 μ sec ($1500 \times 8 / 11$). Εάν αυτό το στοιχείο στέλνονταν με το μακροχρόνιο προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού συνημμένο, θα έπαιρνε πρόσθετα 192 μ sec για συνολικά 1283 μ sec. Η αποστολή 1500 bytes στοιχείων το 1283 μ sec σημαίνει ότι ο χρήστης θα δει μια ρυθμοαπόδοση 9.5 Mbps, μια μείωση 13.6% από το παρατιθέμενο 11 Mbps ρυθμό. Αφ' ετέρου, εάν χρησιμοποιείται το βραχυπρόθεσμο προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού, κατόπιν 1500 bytes στέλνονται σε 1187 μ sec, για έναν αποτελεσματικό ρυθμό 10.2 Mbps.

Η χρήση του μακροχρόνιου προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού χαμηλώνει τον αποτελεσματικό ρυθμό στοιχείων κατά περίπου 7%. Η σημασία αυτού για τα μεικτά δίκτυα 802.11g/802.11b θα συζητηθεί αργότερα.

4.3.3.3 Πρόσβαση καναλιού και χρόνος υποδοχής

Το παραπάνω τμήμα περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο το στοιχείο 802.11 συσκευάζεται για μετάδοση. Αυτό το τμήμα περιγράφει πώς, μόλις δημιουργηθεί, ένα πακέτο στοιχείων όπως αυτό που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.8**, μεταδίδεται στο 802.11. Το πρωτόκολλο πρόσβασης μέσω 802.11 προσπαθεί να αποφύγει να στείλουν, διαφορετικές συσκευές, τα πακέτα στοιχείων τους συγχρόνως. Όταν αυτό συμβαίνει είναι γνωστό ως σύγκρουση, και έχει ως αποτέλεσμα, συνήθως, κανένα πακέτο να μην παραλαμβάνεται σωστά. Αυτό απαιτεί τα στοιχεία να αναμεταδοθούν, και η επίδραση είναι μια χαμηλωμένη μέση ρυθμοαπόδοση συστήματος.

Προκειμένου να αποφευχθούν αυτές οι συγκρούσεις, οι 802.11 συσκευές έχουν πρόσβαση στο κανάλι με τον ακόλουθο τρόπο. Όταν όλες οι άλλες συσκευές μεταδίδουν, καμία άλλη συσκευή δεν θα μεταδώσει. Οι άλλες συσκευές θα περιμένουν έως ότου το κανάλι είναι ελεύθερο πριν μεταδώσουν. Αλλά αφότου επιβεβαιωθούν ότι το κανάλι είναι ελεύθερο, και προτού να μεταδώσουν τα πακέτα στοιχείων τους, θα περιμένουν μια τυχαία χρονική περίοδο προκειμένου να μειωθεί η στατιστική πιθανότητα κατά την οποία οποιεσδήποτε δύο συσκευές που έχουν περιμένει να καταστεί ελεύθερο το κανάλι θα μεταδώσουν συγχρόνως. Η χρονική περίοδος κατά την οποία μια συσκευή περιμένει να έχει πρόσβαση στο κανάλι (ο "χρόνος backoff") μετρίεται σε ακέραιες μονάδες γνωστή ως "χρόνος υποδοχής". Οι χρόνοι υποδοχής παρουσιάζονται σχηματικά στο **Σχήμα 4.9**.



Σχήμα 4.9: Απλή απεικόνιση του προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού, της υποδοχής, και των γενικών εξόδων πλαισίων αναφοράς (ACK) του 802.11 προτύπου

Στο πρότυπο 802.11b, ο χρόνος υποδοχής καθορίζεται να είναι 20 μsec . Στο 802.11a, ο χρόνος υποδοχής καθορίζεται να είναι 9 μsec . Η επίδραση αυτών των χρόνων μπορεί να υπολογιστεί με τον ίδιο τρόπο που υπολογίσαμε τα αποτελέσματα του προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού, παραπάνω. Εάν μια συσκευή μεταδίδει ένα πακέτο 1500 byte σε 11 Mbps, αυτό θα πάρει 1091 μsec . Στο 802.11b, ο χρόνος υποδοχής είναι 20 μsec , και ο αριθμός των υποδοχών που χρησιμοποιούνται είναι ένας τυχαίος αριθμός μεταξύ 0 και 31.

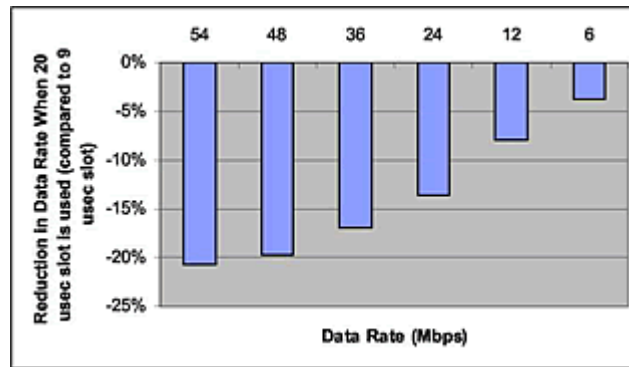
Χρησιμοποιώντας 15 χρόνους υποδοχής ως μέσο όρο, αυτό προσθέτει 300 μsec πρόσθετα στον χρόνο μετάδοσης, για μια αποτελεσματική ρυθμοαπόδοση 1500 byte σε 1391 μsec , ή 8.6 Mbps. Έτσι οι χρόνοι backoff μειώνουν την ρυθμοαπόδοση κατά περίπου 22% σε αυτήν την περίπτωση. Όπως μπορεί να φανεί, το μέγεθος αυτής της επίδρασης θα αλλάξει ανάλογα με το ρυθμό στοιχείων, επειδή ενώ ο χρόνος που απαιτείται για να σταλεί ένα πακέτο θα αλλάξει, ο χρόνος που ξοδεύεται για υπαναχώρηση όχι.

Αυτό θα είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα στην κατανόηση της ρυθμοαπόδοσης των συσκευών 802.11g παρουσία των συσκευών 802.11b. Επειδή το 802.11g είναι βασισμένο στο πρότυπο 802.11a, χρησιμοποιεί έναν χρόνο υποδοχής των 9 μsec με έναν τυχαίο αριθμό υποδοχών μεταξύ 0 και 15. Χρησιμοποιώντας τον ίδιο υπολογισμό με παραπάνω, αυτό μπορεί να μειώσει ένα ρυθμό στοιχείων 54 Mbps κατά 22% σε 42 Mbps.

Ο μηχανισμός πρόσβασης καναλιού δεν μπορεί να λειτουργήσει σωστά εκτός αν όλες οι συσκευές σε ένα δίκτυο χρησιμοποιούν τον ίδιο συγχρονισμό υποδοχής για να καθορίσουν πότε πρέπει να στείλουν τα πακέτα τους. Εάν χρησιμοποιούνταν διαφορετικοί χρόνοι υποδοχής, οι συσκευές με τον μικρότερο χρόνο υποδοχής θα είχαν προνομιακή πρόσβαση στο ασύρματο μέσο. (Εάν μια συσκευή 802.11g επέλεγε μια backoff τιμή των 10 υποδοχών, και μια συσκευή 802.11b στο ίδιο δίκτυο επέλεγε μια backoff τιμή των 5 υποδοχών, η συσκευή 802.11g θα είχε ακόμα, πρώτη, πρόσβαση στο κανάλι εάν χρησιμοποιούσε υποδοχές των 9 μsec [90 μsec σύνολο] ενώ η συσκευή 802.11b χρησιμοποιεί υποδοχές των 20 μsec [100 μsec σύνολο]. Επομένως οι συσκευές 802.11g που λειτουργούν στο ίδιο δίκτυο με τις συσκευές 802.11b πρέπει να χρησιμοποιήσουν έναν χρόνο υποδοχής των 20 μsec . Ο ίδιος υπολογισμός με παραπάνω δείχνει ότι μόνο αυτή η επίδραση θα μειώσει το ρυθμό στοιχείων 54 Mbps κατά 39%, σε 33 Mbps. Αυτή η επίδραση χρόνου υποδοχής, επομένως, έχει το αποτέλεσμα της μείωσης του ρυθμού στοιχείων, αντιληπτού από τον χρήστη, κατά περίπου 21%.

Οι σκληροί υπολογισμοί που συζητήθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στην κατανόηση του μεγέθους αυτών των αποτελεσμάτων. Υπάρχουν άλλες επιβαρύνσεις και επιρροές που δεν λαμβάνονται υπόψη σε μια προσπάθεια να γίνει η περιγραφή κατανοητή. Για έναν πιο αξιόπιστο υπολογισμό, μια προσομοίωση του πρωτοκόλλου 802.11 χρησιμοποιήθηκε για να μετρήσει το μέγεθος αυτών των επιδράσεων λαμβάνοντας υπ' όψιν την πολυπλοκότητα του 802.11. Στο **Σχήμα 4.10** παρουσιάζουμε την επίδραση σε έναν χρήστη 802.11g, που χρησιμοποιεί χρόνο υποδοχής των 20 μsec εναντίον της χρήσης χρόνου υποδοχής των 9 μsec .

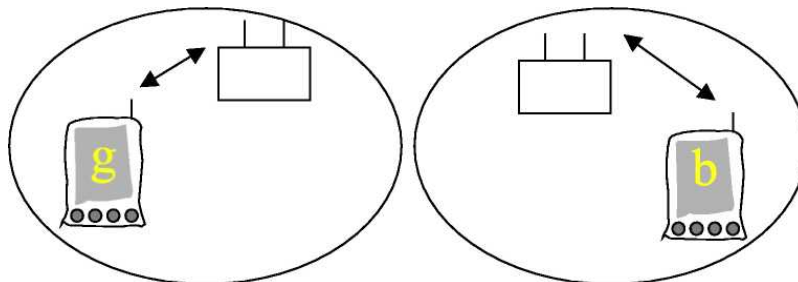
Η συμφωνία με τον απλό υπολογισμό που παρουσιάζεται παραπάνω είναι άριστη, με την αντιληπτή ρυθμοαπόδοση που μειώνεται κατά περίπου 20% στον 54 Mbps ρυθμό στοιχείων. Παρουσιάζονται επίσης αποτελέσματα και για άλλους ρυθμούς στοιχείων.



Σχήμα 4.10: Μείωση του ρυθμού στοιχείων προκαλούμενου από τη χρήση ενός χρόνου υποδοχής των 20 μsec

4.3.4 Περίπτωση Επικαλυπτόμενων BSS

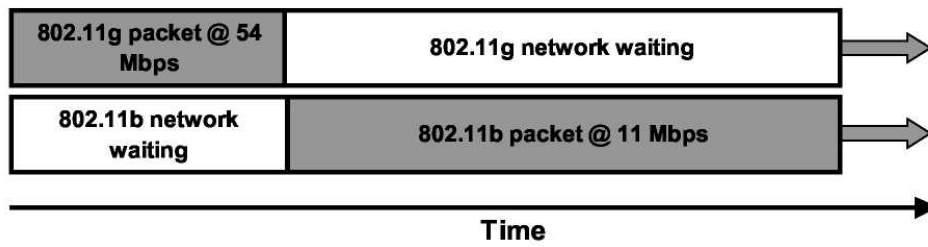
Έχουμε τώρα τα εργαλεία για να αρχίσουμε να αναλύουμε μερικά από τα ζητήματα που περιβάλλουν την ανάπτυξη των συστημάτων 802.11g παρουσία συσκευών 802.11b. Πρώτα παίρνουμε την περίπτωση των επικαλυπτόμενων BSS στο ίδιο κανάλι. Αυτό αναφέρεται στη κατάσταση, που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.11, στο οποίο δύο συστήματα, ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, είναι σε αρκετά στενή εγγύτητα για να ακούσουν το ένα το άλλο.



Σχήμα 4.11: Σχηματικό διάγραμμα μιας κατάστασης επικαλυπτόμενων BSS

Όπως παρουσιάζεται, καθιστούμε αυτήν την κατάσταση όσο το δυνατόν απλούστερη και καθορίζουμε πως ένα από τα δίκτυα έχει μόνο συσκευές 802.11g, και το άλλο δίκτυο έχει μόνο συσκευές 802.11b. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ιδανικές περιστάσεις, ποια θα ήταν η επίδραση αυτής της περίπτωσης;

Στη ιδανική περίπτωση, οι συσκευές 802.11b και οι 802.11g δεν θα μεταδώσουν συγχρόνως δεδομένου ότι κάτι τέτοιο θα προκαλούσε συγκρούσεις πακέτων. Οι συσκευές θα αισθάνονταν η μια την άλλη και θα μετέδιδαν μόνο όταν οι υπόλοιπες συσκευές δεν θα μετέδιδαν. Αυτό παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Επίδειξη της ρυθμοαπόδοσης συσκευών όταν υπαναχωρούν μεταξύ τους

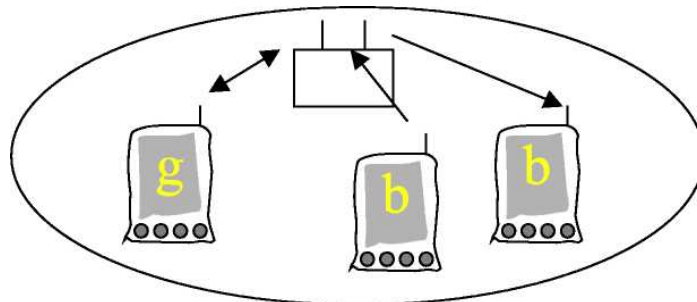
Πάρτε ένα απλό παράδειγμα της αποτελεσματικής ρυθμοαπόδοσης σε αυτήν την περίπτωση, όπως παραπάνω. Αγνοώντας τις επιβαρύνσεις (όπως αναφέρονται αρκετές φορές, οι υπολογισμοί που παρουσιάζονται εδώ δείχνουν το μέγεθος της επίδρασης, αλλά δεν περιλαμβάνουν την πλήρη πολυπλοκότητα του πρωτοκόλλου 802.11), το δίκτυο 802.11g στα 54 Mbps μπορεί να στείλει ένα πακέτο 1500 byte σε 222 μ sec. Το δίκτυο 802.11b στα 11 Mbps μπορεί να στείλει ένα πακέτο 1500 byte σε 1091 μ sec. Επομένως, από την άποψη κάθε δικτύου (ή από την άποψη μιας συσκευής σε κάθε δίκτυο) θα χρειαστούν 1313 μ sec για να μεταδοθεί ένα πακέτο 1500 bytes.

Από την άποψη της συσκευής 802.11b αυτό μεταφράζεται σε μια αποτελεσματική ρυθμοαπόδοση 9.1 Mbps, ή σε μια μείωση 17% της ρυθμοαπόδοσης λόγω της παρουσίας κοντινών συσκευών 802.11g.

Από την άποψη της συσκευής 802.11g, εντούτοις, η εικόνα είναι πολύ χειρότερη. Η συσκευή 802.11g βλέπει ότι κάνει 1313 μ sec για να μεταδώσει 1500 bytes, έτσι η ρυθμοαπόδοσή της είναι η ίδια με αυτήν της συσκευής 802.11b. (Αυτό είναι πραγματικά προφανές με μια ματιά στο **Σχήμα 4.12**. Παίρνει το ίδιο χρονικό διάστημα για μια συσκευή σε κάθε δίκτυο να μεταδώσει το ίδιο ποσό στοιχείων, έτσι ο αποτελεσματικός ρυθμός στοιχείων πρέπει να είναι ο ίδιος.) Οι συσκευές 802.11g, επομένως, βλέπουν μια μείωση του αποτελεσματικού ρυθμού στοιχείων τους κατά περίπου 83% λόγω της παρουσίας κοντινών συσκευών 802.11b.

4.3.5 Δίκτυα Μεικτού Τύπου

Στα μεικτού τύπου δίκτυα η κατάσταση είναι ακόμα πιο περίπλοκη εξαιτίας του γεγονότος ότι οι συσκευές 802.11b και οι 802.11g θα λειτουργήσουν με έναν συμβατό τρόπο. Ένα παράδειγμα ενός μεικτού τύπου δικτύου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.13**.



Σχήμα 4.13: Σχηματικό διάγραμμα μιας μεικτής διαμόρφωσης

Σε αυτό το δίκτυο, όχι μόνο, ιδανικά, θα υπαναχωρήσουν οι συσκευές δημιουργώντας την ίδια κατάσταση όπως περιγράφεται παραπάνω, αλλά θα υπάρξουν κι άλλες επιδράσεις. Κατ' αρχάς, για να συνυπάρξουν οι συσκευές, οι χρόνοι υποδοχής πρέπει να είναι ισοδύναμοι. Δεδομένου ότι οι συσκευές 802.11b μπορούν μόνο να λειτουργήσουν με έναν χρόνο υποδοχής 20 μsec, οι συσκευές 802.11g πρέπει, επίσης, να χρησιμοποιήσουν τον ίδιο. Το Σχήμα 4.10 παρουσιάζει το μέγεθος αυτής της επίδρασης, η οποία μπορεί να είναι τόσο μεγάλη όσο μια μείωση 20% της ρυθμοαπόδοσης των συσκευών 802.11g, ανάλογα με το ρυθμό στοιχείων, στον οποίο λειτουργούν οι συσκευές. Απαιτώντας την υπαναχώρηση των 802.11g και 802.11b συσκευών στη μεταξύ τους παρουσία σημαίνει, όπως παρουσιάζεται παραπάνω, ότι η αποτελεσματική ρυθμοαπόδοση για οποιοσδήποτε συσκευές μπορεί να περιοριστεί από την πιο αργή συσκευή στο δίκτυο.

4.4 Νέα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του προτύπου 802.11g

Επιγραμματικά, τα νέα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του προτύπου IEEE 802.11g είναι:

- Η παροχή τεσσάρων διαφορετικών φυσικών στρωμάτων
- Η υποχρεωτική υποστήριξη του βραχυπρόθεσμου τύπου προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού
- Το χαρακτηριστικό δικτύου ERP
- Πρόσφατα καθορισμένοι μηχανισμοί προστασίας που εξετάζουν πτυχές συμβατότητας
- Ο CTS-to-self μηχανισμός

Στις επόμενες υποενότητες, κάθε ένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά γνωρίσματα εξηγείται εκτενώς.

4.4.1 Τέσσερα Διαφορετικά Φυσικά Στρώματα

Ενώ το IEEE 802.11b χρησιμοποιεί μόνο την τεχνολογία DSSS, το IEEE 802.11g χρησιμοποιεί DSSS, OFDM, ή και τις δύο στην ISM 2.4 GHz ζώνη για να παρέχει υψηλούς ρυθμούς στοιχείων μέχρι 54 Mbps. Η συνδυασμένη χρήση DSSS και OFDM επιτυγχάνεται μέσω της παροχής τεσσάρων διαφορετικών φυσικών στρωμάτων. Αυτά τα στρώματα, ορισμένα στο πρότυπο ως εκτεταμένοι φυσικοί ρυθμοί (*extended rate physicals*, ERPs), συνυπάρχουν κατά τη διάρκεια της ανταλλαγής ενός πλαισίου, έτσι ο πομπός και δέκτης έχουν το δικαίωμα να επιλέξουν και να χρησιμοποιήσουν ένα εκ των τεσσάρων στρωμάτων εφ' όσον και οι δύο το υποστηρίζουν. Τα τέσσερα διαφορετικά φυσικά στρώματα που καθορίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11g είναι τα ακόλουθα:

- *ERP-DSSS/CCK*: Αυτό είναι το παλαιό φυσικό στρώμα που χρησιμοποιείται από το IEEE 802.11b. Η τεχνολογία DSSS χρησιμοποιείται με τη διαμόρφωση CCK. Οι ρυθμοί των στοιχείων που παρέχονται είναι εκείνοι του IEEE 802.11b.
- *ERP-OFDM*: Αυτό είναι ένα νέο φυσικό στρώμα, το οποίο εισήχθη από το IEEE 802.11g. Το OFDM χρησιμοποιείται ώστε να παρέχει ρυθμό στοιχείων IEEE 802.11a στη ζώνη 2.4 GHz.

- *ERP-DSSS/PBCC*: Αυτό το φυσικό στρώμα εισήχθη από το IEEE 802.11b και παρέχει τους ίδιους ρυθμούς στοιχείων με το φυσικό στρώμα DSSS/CCK. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία DSSS με τον αλγόριθμο κωδικοποίησης PBCC. Το IEEE 802.11g επέκτεινε τους καθορισμένους ρυθμούς στοιχείων με την προσθήκη των 22 και 33 Mbps.
- *DSSS-OFDM*: Αυτό είναι ένα νέο φυσικό στρώμα που χρησιμοποιεί έναν υβριδικό συνδυασμό του DSSS και του OFDM. Η φυσική κεφαλίδα (header) των πακέτων μεταδίδεται χρησιμοποιώντας DSSS, ενώ το ωφέλιμο φορτίο πακέτων μεταδίδεται χρησιμοποιώντας OFDM. Το αντικείμενο αυτής της υβριδικής προσέγγισης είναι να καλυφθούν οι πτυχές διαλειτουργικότητας, όπως εξηγείται αργότερα.

Από τα παραπάνω τέσσερα φυσικά στρώματα, τα πρώτα δύο είναι υποχρεωτικά¹ κάθε συσκευή IEEE 802.11g πρέπει να τα υποστηρίζει. Τα άλλα δύο είναι προαιρετικά. Η στήλη 2 του Πίνακα 4.6 συνοψίζει τους ρυθμούς στοιχείων που υποστηρίζονται για τα διαφορετικά φυσικά στρώματα της IEEE 802.11g προδιαγραφής. Οι στήλες 3 και 4 εξηγούνται στη επόμενη υποενότητα.

Physical layer	Supported rates (Mb/s)	PLCP preamble + header delay		PLCP preamble + header length	
		Long	Short	Long	Short
ERP-DSSS (mandatory)	1, 2, 5.5, 11	192 μ s	96 μ s	192 bits	120 bits
ERP-OFDM (mandatory)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	20 μ s		40 bits ¹	
ERP-PBCC (optional)	1, 2, 5.5, 11, 22, 33	192 μ s	96 μ s	192 bits	120 bits
DSSS-OFDM (optional)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	192 μ s	96 μ s	192 bits	120 bits

¹ This is the length of the PLCP header only. The PLCP preamble, which is used for synchronization, is a pure time interval equal to 16 ms that does not contain any bits.

Πίνακας 4.6: Παράμετροι των διαφορετικών φυσικών στρωμάτων IEEE 802.11g

4.4.2 Υποχρεωτική υποστήριξη του βραχυπρόθεσμου προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού

Η επιβάρυνση του πακέτου του φυσικού στρώματος ενός πακέτου IEEE 802.11 αποτελείται από δύο μέρη: το Πρωτόκολλο Σύγκλισης Φυσικού Στρώματος (PLCP) προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού (preamble) που χρησιμοποιήθηκε για το συγχρονισμό και την *PLCP κεφαλίδα (header)* που φυλάσσει τις πληροφορίες πακέτων σχετικές με το φυσικό στρώμα. Η ομάδα IEEE 802.11b συνειδητοποίησε ότι το PLCP προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού είναι πολύ μακροχρόνιο και προσθέτει αξιοσημείωτη επιβάρυνση σε ένα σύστημα WLAN.

Ως εκ τούτου, μια επιλογή να υποστηριχθεί ένας πιο βραχυπρόθεσμος τύπος προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού (αποκαλούμενος βραχυπρόθεσμο προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού σε αντίθεση με το παλιό μακροχρόνιο προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού) (short preamble vs. long preamble) εισήχθη προκειμένου να μειωθεί η επιβάρυνση πακέτου και να βελτιωθεί η απόδοση του δικτύου. Εάν και ο πομπός και ο δέκτης υποστηρίζουν αυτήν την επιλογή, η επικοινωνία εκτελείται χρησιμοποιώντας το βραχυπρόθεσμο προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού. Το IEEE 802.11g συστήνει την υποχρεωτική χρήση της βραχυπρόθεσμης επιλογής προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού.

Οι στήλες 3 και 4 του Πίνακα 4.6 συνοψίζουν την καθυστέρηση και το μήκος των βραχυπρόθεσμων και μακροχρόνιων προπορευόμενων σημάτων συγχρονισμού για τα διαφορετικά φυσικά στρώματα του προτύπου IEEE 802.11g. Όταν το προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού και η επιβάρυνση μεταδίδονται χρησιμοποιώντας DSSS (αυτό συμβαίνει σε όλα τα φυσικά στρώματα εκτός από το ERP-OFDM), βραχυπρόθεσμοι και μακροχρόνιοι τύποι προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού και επιβάρυνση καθορίζονται. Για το φυσικό στρώμα ERP-OFDM υπάρχει μόνο ένας τύπος προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού και επιβάρυνσης, το σχήμα του οποίου είναι σχεδόν ίδιο με αυτό του προτύπου IEEE 802.11a.

4.4.3 Η ERP Ιδιότητα Δικτύου

Οι προεπιλεγμένες τιμές του χρόνου υποδοχής και του ελάχιστου παραθύρου ανταγωνισμού για το IEEE 802.11b είναι 20 μ s και 31 υποδοχές, αντίστοιχα. Το IEEE 802.11g, δεδομένου ότι υποστηρίζει τους σταθμούς IEEE 802.11b, υιοθέτησε αυτές τις τιμές σε όλα τα φυσικά στρώματά του, επίσης. Αυτές οι παράμετροι είναι συντονισμένες προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση κάτω από τη μετάδοση DSSS για ρυθμούς στοιχείων μέχρι 11 Mbps με προπορευόμενα σήματα συγχρονισμού 192 ή 96 μ s. Εντούτοις, όταν μεταδίδουν οι σταθμοί σε ρυθμούς στοιχείων ERP-OFDM (6-54 Mbps) με το σημαντικά βραχυπρόθεσμο προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού των 20 μ s, οι παραπάνω τιμές του χρόνου υποδοχής και του ελάχιστου παραθύρου ανταγωνισμού υποβιβάζουν την απόδοση του δικτύου. Οι καταλληλότερες τιμές σε αυτήν την περίπτωση θα ήταν εκείνες που καθορίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11a (που είναι 9 μ s και 15 υποδοχές, αντίστοιχα), όπου οι σταθμοί μεταδίδουν αποκλειστικά σε ρυθμούς στοιχείων OFDM.

Το πρότυπο IEEE 802.11g ενσωματώνει τη δυναμική ρύθμιση των τιμών του χρόνου υποδοχής και του ελάχιστου παραθύρου ανταγωνισμού με τον καθορισμό μιας ιδιότητας δικτύου ERP, η οποία είναι μια σημαία που δημοσιεύεται στους σταθμούς μέσω ενός πλαισίου αναγνωριστικού σήματος (δηλ., ένα πλαίσιο ελέγχου που περιέχει τις πληροφορίες του δικτύου). Η ιδιότητα ERP επιτρέπεται εάν όλοι οι σταθμοί που συνδέονται σε ένα WLAN είναι σε θέση να υποστηρίξουν ERP-OFDM ρυθμούς στοιχείων. Σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές του χρόνου υποδοχής και του ελάχιστου παραθύρου ανταγωνισμού εξαρτώνται από τον τύπο της λειτουργίας WLAN: το βασικό σύνολο υπηρεσιών (BSS) ή το ανεξάρτητο BSS (IBSS).

Για τη BSS λειτουργία, εάν η ιδιότητα ERP είναι ενεργοποιημένη, η τιμή του χρόνου υποδοχής παραμέτρου τίθεται σε 9 μ s, η τιμή της παραμέτρου του ελάχιστου παραθύρου ανταγωνισμού τίθεται σε 15 υποδοχές, και όλες οι ανταλλαγές πλαισίων εκτελούνται χρησιμοποιώντας ρυθμούς στοιχείων ERP-OFDM. Κάτω από αυτές τις τοποθετήσεις, η λειτουργία του δικτύου είναι παρόμοια με αυτήν ενός δικτύου IEEE 802.11a. Η τιμή του ελάχιστου παραθύρου ανταγωνισμού μπορεί να τεθεί 15 υποδοχές ακόμα κι αν η ιδιότητα ERP είναι εκτός λειτουργίας, εφ' όσον το σημείο (AP) πρόσβασης της ρύθμισης BSS υποστηρίζει ρυθμούς στοιχείων ERP-OFDM. Για την IBSS λειτουργία, εάν η ιδιότητα ERP είναι ενεργοποιημένη, η τιμή του ελάχιστου παραθύρου ανταγωνισμού τίθεται σε 15 υποδοχές και όλες οι ανταλλαγές πλαισίων εκτελούνται χρησιμοποιώντας ρυθμούς στοιχείων ERP-OFDM. Η τιμή του χρόνου υποδοχής είναι πάντα καθορισμένο στα 20 μ s.

4.4.4 Πτυχές διαλειτουργικότητας και μηχανισμοί προστασίας

Σε ένα δίκτυο IEEE 802.11g, οι σταθμοί μπορούν να επιλέξουν μεταξύ 14 διαφορετικών ρυθμών στοιχείων και τεσσάρων φυσικών στρωμάτων προκειμένου να μεταδοθεί ένα πακέτο με τον αποδοτικότερο τρόπο. Αυτός ο μεγάλος αριθμός ρυθμών στοιχείων και φυσικών στρωμάτων θίγει τα προβλήματα διαλειτουργικότητας.

Πριν προχωρήσουμε περαιτέρω, είναι ουσιαστικό να ξεχωρίσουμε τους διαφορετικούς τύπους σταθμών που μπορούν να υπάρξουν σε ένα δίκτυο IEEE 802.11g:

- *Σταθμοί ERP:* Οι σταθμοί που υποστηρίζουν το φυσικό στρώμα ERP-OFDM. Αυτοί οι σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με μια “καθαρόαιμη” ασύρματη διεπαφή IEEE 802.11g.
- *Σταθμοί μη-ERP που υποστηρίζουν το βραχυπρόθεσμο προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού:* Αυτοί οι σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με μια ασύρματη διεπαφή IEEE 802.11b νεότερης έκδοσης, η οποία υποστηρίζει μέχρι 11 Mbps, αλλά το σταθερό τμήμα του λογισμικού του αναβαθμίζεται προκειμένου να υποστηριχθεί η χρήση του βραχυπρόθεσμου προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού.
- *Σταθμοί μη-ERP που δεν υποστηρίζουν το βραχυπρόθεσμο προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού:* Αυτοί οι σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με μια ασύρματη διεπαφή IEEE 802.11b παλαιότερης έκδοσης ή μιας ασύρματης διεπαφής IEEE 802.11 που δεν υποστηρίζει την χρήση του βραχυπρόθεσμου προπορευόμενου σήματος συγχρονισμού. Διαφορετικοί συνδυασμοί επικοινωνίας προκύπτουν· ο Πίνακας 4.7 συνοψίζει τις παραμέτρους φυσικού στρώματος για διαφορετικά ζευγάρια. Από τα μη-ERP/S ή τα μη-ERP/L, δηλώνονται οι μη-ERP σταθμοί που υποστηρίζουν ή δεν υποστηρίζουν το βραχυπρόθεσμο προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού, αντίστοιχα.

Τώρα, ας επιστρέψουμε στο πρόβλημα της διαλειτουργικότητας. Εξετάζεται ένα δίκτυο που αποτελείται από ERP σταθμούς και μη-ERP. Οι σταθμοί ERP επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας τα πακέτα ERP-OFDM, αλλά οι μη-ERP σταθμοί δεν είναι ικανοί να ανιχνεύσουν μια μετάδοση OFDM. Ως εκ τούτου, εάν ένας σταθμός ERP μεταδίδει, το μέσο ανιχνεύεται ελεύθερο για τους σταθμούς μη-ERP, και οποιαδήποτε προσπάθεια από τους να μεταδώσουν θα οδηγήσει σε σύγκρουση.

Η *πρώτη λύση* που προτείνει το πρότυπο IEEE 802.11g είναι η χρήση του φυσικού στρώματος DSSS-OFDM, όπου όλοι οι σταθμοί θα είναι σε θέση να ανιχνεύσουν τον DSSS μεταδιδόμενο PLCP προπορευόμενο σήμα συγχρονισμού και την κεφαλίδα και να απέχουν της μετάδοσης, ακόμα κι αν δεν μπορούν να ανιχνεύσουν το μεταδιδόμενο OFDM ωφέλιμο φορτίο. Η *δεύτερη λύση* είναι η χρήση των request to send/clear to send (RTS/CTS) πλαισίων για να προστατεύσει τα OFDM μεταδιδόμενα πακέτα. Σύμφωνα με το IEEE 802.11g, όταν συνυπάρχουν οι μη-ERP και ERP σταθμοί, όλα τα πλαίσια RTS και CTS πρέπει να μεταδοθούν χρησιμοποιώντας το φυσικό στρώμα ERP-DSSS. Ως εκ τούτου, όλοι οι σταθμοί ενημερώνονται για την εισερχόμενη μετάδοση, ακόμα κι αν το πακέτο στοιχείων που μεταδίδεται χρησιμοποιεί OFDM. Προφανώς, όταν υπάρχουν μόνο ERP σταθμοί στο δίκτυο, δεν υπάρχει καμία ανάγκη να χρησιμοποιηθεί RTS/CTS, δεδομένου ότι όλοι οι σταθμοί είναι σε θέση να ανιχνεύσουν μια μετάδοση OFDM.

Εκτός από το RTS/CTS, το IEEE 802.11g καθορίζει έναν εναλλακτικό μηχανισμό προστασίας αποκαλούμενο CTS-to-self για να αποτρέψει τις συγκρούσεις προκαλούμενες από το πρόβλημα της DSSS/OFDM διαλειτουργικότητας. Ο CTS-to-self μηχανισμός συζητείται στη επόμενη υποενότητα.

Communication	Preamble	SlotTime	CwMin
ERP-ERP	ERP-OFDM	20 μ s	31
ERP-non-ERP/S	Short	20 μ s	31
ERP-non-ERP/L	Long	20 μ s	31
Non-ERP/S-non-ERP/S	Short	20 μ s	31
Non-ERP/S-non-ERP/L	Long	20 μ s	31
Non-ERP/L-non-ERP/L	Long	20 μ s	31
All ERP	ERP-OFDM	9 μ s	15

Πίνακας 4.7: Παράμετροι φυσικού στρώματος για διαφορετικά σενάρια επικοινωνίας

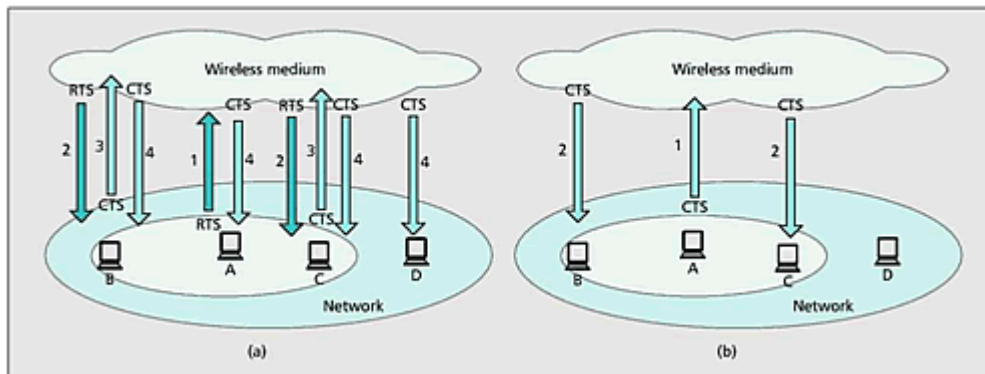
4.4.5 Ο Μηχανισμός CTS-to-Self

Το IEEE 802.11g πρότυπο καθορίζει τον CTS-to-self μηχανισμό προστασίας ως εναλλακτική λύση του RTS/CTS προκειμένου να μειωθούν οι προστιθέμενες επιβαρύνσεις σε ένα σύστημα WLAN. Αντίθετα από τον RTS/CTS, ο CTS-to-self μηχανισμός δεν μπορεί αποτελεσματικά να αντιμετωπίσει το πρόβλημα κρυφού κόμβου. Το **Σχήμα 4.14** απεικονίζει την διαδικασία ανταλλαγής πλαισίων και για τον RTS/CTS και τον CTS-to-self μηχανισμό προτού αρχίσει ένας πομπός να μεταδίδει ένα πακέτο στοιχείων.

Στο **Σχήμα 4.14α** (μηχανισμός RTS/CTS), όταν επιθυμεί ο σταθμός A να στείλει ένα πακέτο στον σταθμό C, στέλνει αρχικά ένα πλαίσιο RTS (Βέλος 1), το οποίο παραλαμβάνεται από τους σταθμούς B και C (Βέλη 2) που βρίσκονται μέσα στην περιοχή κάλυψης του πομπού.

Οι σταθμοί B και C στέλνουν τα πλαίσια CTS (βέλη 3) που παραλαμβάνονται από όλους τους σταθμούς (βέλη 4). Ο σταθμός D, ο οποίος είναι κρυφός για τον πομπό (εκτός της περιοχής κάλυψης του σταθμού A), αν και δεν είναι ικανό να λάβει το πλαίσιο RTS του πομπού, λαμβάνει το CTS του σταθμού C, έτσι απέχει της μετάδοσης. Μετά τη λήψη ενός πλαισίου CTS, Ο σταθμός A αρχίζει να μεταδίδει το πακέτο στοιχείων του.

Αφ' ετέρου, στο **Σχήμα 4.14B** (CTS-to-self μηχανισμός), όταν ο σταθμός A επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο στον σταθμό C, στέλνει αρχικά ένα πλαίσιο CTS (βέλος 1), το οποίο παραλαμβάνεται και από τους σταθμούς B και C (βέλη 2). Και οι δύο σταθμοί θα αναβάλουν τη μετάδοση. Εντούτοις, ο σταθμός D, που είναι εκτός της περιοχής κάλυψης του πομπού, δεν θα λάβει το πλαίσιο CTS και δεν θα ανιχνεύσει την μετάδοση του A. Ως εκ τούτου, εάν ο σταθμός D αποφασίσει να μεταδώσει, μια σύγκρουση θα συμβεί. Συνεπώς, το CTS-to-self πλαίσιο μπορεί μόνο να αποτρέψει τις συμπτωματικές συγκρούσεις (δύο ή περισσότεροι σταθμοί αρχίζουν μια μετάδοση στην ίδια υποδοχή). Δυστυχώς, δεν μπορεί να αποτρέψει τις συγκρούσεις προκαλούμενες από το πρόβλημα κρυφού κόμβου. Ως εκ τούτου, ο CTS-to-self μηχανισμός πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο όταν μπορούν να ανιχνεύσουν όλοι οι σταθμοί τις μεταξύ τους μεταδόσεις. Σε άλλες περιπτώσεις μηχανισμός πρέπει να χρησιμοποιείται ο RTS/CTS.



Σχήμα 4.14: α) RTS/CTS εναντίον β) CTS-to-self

ΜΕΡΟΣ Β΄

Κεφάλαιο 5

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΟΣ WLAN

5.1 Εισαγωγή

Το ακόλουθο Σχήμα παρουσιάζει μετρήσεις απόδοσης BER ενός IEEE 802.11g WLAN υπό διαλειπτικό (fading) κανάλι με διαμόρφωση OFDM.

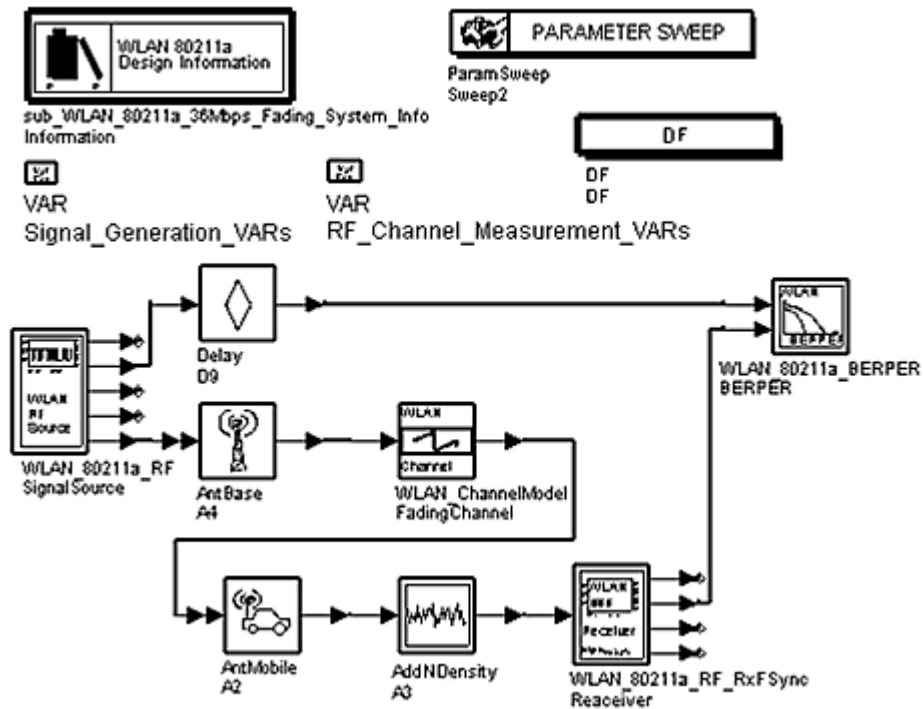
Ο ρυθμός στοιχείων ορίζεται στα 36 Mbps, το μοντέλο καναλιού επιλέχτηκε από τη JTC (Joint Standards Committee) '94 Εσωτερικό Μοντέλο Καναλιού, επονομαζόμενο Εσωτερικό ΓΡΑΦΕΙΟ Β, το οποίο είναι ένα Τυπικό Περιβάλλον Γραφείου με RMS διάδοση καθυστερήσεων 100ns. Προκειμένου να προσομοιώσει ποικίλη χρονικά απόδοση, καθορίζονται ταχύτητες των 0 και 100 κλμ.. Επίσης αλλαγές στο Ύψος της Κεραίας γίνονται για τον ίδιο λόγο.

5.2 Μοντέλο Συστήματος

5.2.1 Περιγραφή Συστήματος

Το παρακάτω Σχήμα παρουσιάζει απόδοση συστήματος με ρυθμό στοιχείων 36 Mbps και κωδικοποίηση καναλιού υπό διαλειπτικό κανάλι. Ένα μήκος καταιγισμού 512 bytes προσομιώνεται.

Η top-level σχηματική αναπαράσταση για αυτό το Σχήμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.1**. Οι παράμετροι του SignalSource περιλαμβάνονται στο Signal_Generation_VARS* Ο θόρυβος, ο δέκτης, και οι παράμετροι BER περιλαμβάνονται στο RF_Channel_Measurement_VARS.



Σχήμα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός 802.11g OFDM 36 Mbps Fading Συστήματος WLAN

Σύμφωνα με την αναφορά [22], έχουν σχεδιαστεί πέντε πρότυπα μοντέλα. Για το Μοντέλο A χρησιμοποιείται ένα διαλειπτικό κανάλι 18-tap που αντιστοιχεί σε ένα χαρακτηριστικό περιβάλλον γραφείου για συνθήκες μη οπτικής επαφής και μια μέση RMS διάδοση καθυστερήσεων 50ns. Προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των taps που απαιτείται, το χρονικό διάστημα είναι ανομοιόμορφο για πιο βραχυπρόθεσμες καθυστερήσεις, ένα πυκνότερο διάστημα χρησιμοποιείται. Η μέση ισχύς μειώνεται εκθετικά με το χρόνο. Για το Μοντέλο A, όλα τα taps έχουν στατιστικές κατανομές Rayleigh. Τα χαρακτηριστικά αυτού του μοντέλου παρατίθενται στον Πίνακα 5.1.

Tap Number	Delay (ns)	Average Relative Power (dB)	Ricean K	Doppler Spectrum
1	0	0.0	0	Class
2	10	-0.9	0	Class
3	20	-1.7	0	Class
4	30	-2.6	0	Class
5	40	-3.5	0	Class
6	50	-4.3	0	Class
7	60	-5.2	0	Class
8	70	-6.1	0	Class
9	80	-6.9	0	Class
10	90	-7.8	0	Class
11	110	-4.7	0	Class
12	140	-7.3	0	Class
13	170	-9.9	0	Class
14	200	-12.5	0	Class
15	240	-13.7	0	Class
16	290	-18.0	0	Class
17	340	-22.4	0	Class
18	390	-26.7	0	Class

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά Μοντέλου A

5.2.2 Χαρακτηριστικά Συστήματος

- Ρυθμός Στοιχείων = 36Mbps, ρυθμός κωδικοποίησης = 3/4, διαμόρφωση = 16-QAM, ταχύτητα = 0 km/hr
- Ρυθμίσεις προεπιλογής παραμέτρων μήκους και Order = 512 and 7, αντίστοιχα
- BER εναντίον E_b/N_0 καμπύλες σε διαλειπτικό κανάλι επιδεικνύονται

5.2.3 Προδιαγραφές Συστήματος

- Πλατφόρμα Υλικού: Pentium IV 1.8GHz, 512MB μνήμη
- Πλατφόρμα Λογισμικού: Windows XP
- Σημεία Στοιχείων (Data points): Οι E_b/N_o τιμές καθορίζονται από 10 μέχρι 30 dB με βήμα 2.
- Χρόνος Προσομοίωσης: περίπου 28 ώρες

5.2.4 Συστατικά Μέρη Συστήματος

5.2.4.1 Μετάδοση

AntMobile



Περιγραφή Cellular Mobile Antenna
Library Antennas & Propagation
Class TSDFAntMobile
Derived From antenna
Required Licenses

Παράμετροι

Name	Description	Default	Sym	Unit	Type	Range
Gain	Gain of antenna, in dB	0.0	g		real	(-∞, ∞)
X	X-position coordinate, in distance units	100.0		km	real	
Y	Y-position coordinate, in distance units	0.0		km	real	
Height	antenna height above X-Y plane, in length units	2.0		km	real	(0, ∞)
SpeedType	velocity unit: km/hr, miles/hr	km/hr			enum	
Vx	X component of velocity vector	0.0			real	
Vy	Y component of velocity vector	0.0			real	

Pin Είσοδος

Pin	Name	Description	Signal Type
1	input	Antenna input signal	multiple timed

Pin Έξοδος

Pin	Name	Description	Signal Type
2	output	Antenna output signal	timed

AntBase



Περιγραφή Base Station Stationary Antenna Model
 Library Antennas & Propagation
 Class TSDFAntBase
 Derived From antenna
 Required Licenses

Παράμετροι

Name	Description	Default	Sym	Unit	Type	Range
Gain	Gain of antenna, in dB	0.0	g		real	(-∞, ∞)
X	X-position coordinate	0.0		km	real	
Y	Y-position coordinate	0.0		km	real	
Height	antenna height above X-Y plane	10		km	real	(0, ∞)

Pin Είσοδος

Pin	Name	Description	Signal Type
1	input	Antenna input signal	multiple timed

Pin Έξοδος

Pin	Name	Description	Signal Type
2	output	Antenna output signal	timed

5.2.4.2 Το Ραδιοκανάλι

WLAN_ChannelModel



Περιγραφή channel model

Library WLAN, Channel

Class TSDFWLAN_ChannelModel

Derived From channel

Required Licenses

Παράμετροι

Name	Description	Default	Type	Range
Algorithm	fading algorithm: Jakes, NoiseFilter	NoiseFilter	enum	
ModelType	fading model: NoMultipath, A, B, C, D, E, UserDefined	A	enum	
PathNumber	number of multipath echoes, effective only when ModelType is set as UserDefined	4	int	[1, 150]
PowerArray	average relative power of path array, in dB, effective only when ModelType is set as UserDefined	0.0 -14 -18 -20	real array	(-∞, ∞)
DelayArray	delays associated with path array, in nsec, effective only when ModelType is set as UserDefined	0.0 56 108 185	real array	[0, ∞)
FadingType	fading type of first path, effective only when ModelType is set as UserDefined: Rayleigh, Ricean	Rayleigh	enum	
RiceanFactor	Ricean factor, effective only when ModelType is set as UserDefined and FadingType is set as Ricean	10	int	[1, ∞)

Name	Description	Default	Type	Range
Seed	integer number to randomize channel output(Jakes model)	1234567	int	(-∞, ∞)
N	number of oscillators in Jakes model	80	int	(PathNumber, ∞)
Pathloss	option for inclusion of large-scale pathloss: No, Yes	No	enum	
Env	environment type options: TypicalUrban, TypicalSuburban, RuralArea, FreeSpace	TypicalUrban	enum	

Pin Είσοδος

Pin	Name	Description	Signal Type
1	input	channel input signal	timed

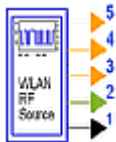
Pin Έξοδος

Pin	Name	Description	Signal Type
2	output	channel output signal	timed

Αυτό το συστατικό χρησιμοποιείται για να μιμηθεί ένα πολλαπλών διαδρομών διαλειπτικό κανάλι βασισμένο σε ένα tapped-delay μοντέλο γραμμής.

5.2.4.3 Λήψη

WLAN_80211a_RF



Περιγραφή Signal source of IEEE 802.11a with RF modulation
 Library WLAN, Signal Source
 Required Licenses

Παράμετροι

Name	Description	Default	Unit	Type	Range
ROut	output resistance	DefaultROut	Ohm	real	(0, ∞)
FCarrier	carrier frequency	5200MHz	Hz	real	(0, ∞)
Power	modulator output power	40mW	W	real	(0, ∞)
VRef	reference voltage for output power calibration	0.1122V	V	real	(0, ∞)
Bandwidth	bandwidth	20MHz	Hz	real	(0, ∞)
PhasePolarity	if set to Invert, Q channel signal is inverted: Normal, Invert	Normal		enum	
GainImbalance	gain imbalance in dB, Q channel relative to I channel	0.0		real	(-∞, ∞)
PhaseImbalance	phase imbalance in degrees, Q channel relative to I channel	0.0		real	(-∞, ∞)
I_OriginOffset	I origin offset in percent with respect to output rms voltage	0.0		real	(-∞, ∞)
Q_OriginOffset	Q origin offset in percent with respect to output rms voltage	0.0		real	(-∞, ∞)
IQ_Rotation	IQ rotation, in degrees	0.0		real	(-∞, ∞)
NDensity	noise spectral density at output, in dBm/Hz	-173.975		real	(-∞, ∞)
Length	octet number of PSDU	256		int	[1, 4095]

Name	Description	Default	Unit	Type	Range
Rate	data rate: Mbps_6, Mbps_9, Mbps_12, Mbps_18, Mbps_24, Mbps_27, Mbps_36, Mbps_48, Mbps_54	Mbps_6		enum	
Order	FFT points=2*Order	6		int	[6, 11]
ScramblerInit	initial state of scrambler	1 0 1 1 1 0 1		int array	{0, 1}†
Idle	padded number of zeros between two bursts	0		int	[0, ∞)
WindowType	type of window: Specification, CosRolloff	Specification		enum	
TransitionTime	the transition time of window function	100nsec	sec	real	(0, 800nsec]
GuardType	type of guard interval: T/2, T/4, T/8, T/16, T/32, UserDefined	T/4		enum	
GuardInterval	guard interval defined by user	16		int	[0, 2*Order]
† for each array element: array size must be 7.					

Pin Έξοδοι

Pin	Name	Description	Signal Type
1	RF_Signal	RF signals	timed
2	For_EVM	mapped SIGNAL and DATA	complex
3	EncodedBits	DATA before mapping	int
4	PSDU	PSDU bits	int
5	SIGNAL	SIGNAL	int

Αυτή η πηγή WLAN σημάτων παράγει ένα IEEE 802.11a και 802.11g OFDM RF σήμα. Το παραγόμενο σήμα μπορεί να διαμορφωθεί σε ένα top-level Σχήμα χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του μοντέλου.

5.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

5.3.1 Σχετικά με τις Μετρήσεις

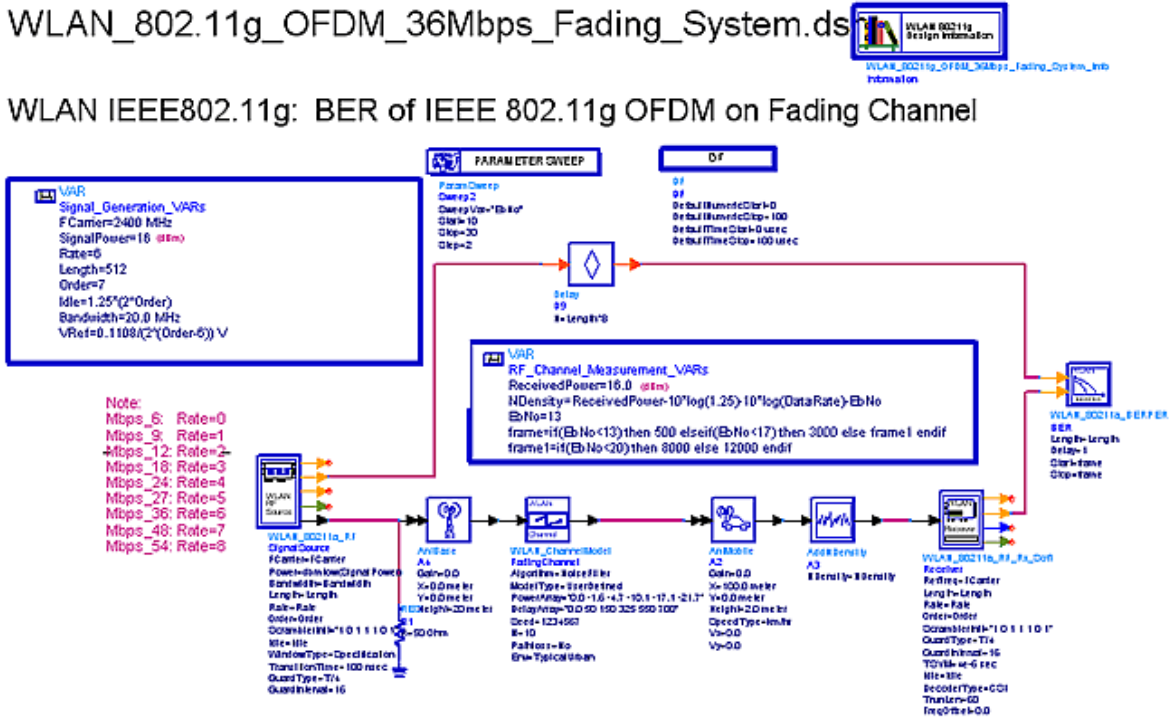
Αναπτύχθηκε ένα 802.11g OFDM διαλειπτικό σύστημα WLAN σε επίπεδο σύνδεσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2 με σκοπό τη μέτρηση της απόδοσης του συστήματος. Στο περιβάλλον προσομοίωσης εργαζόμαστε με το σήμα και τα μεταδιδόμενα bits και ως εκ τούτου αποφασίστηκε να χρησιμοποιείται ο ρυθμός εκπομπής εσφαλμένων bit (BER) ως κριτήριο για την αξιολόγηση της απόδοσης συστημάτων.

Οι μετρήσεις απόδοσης BER εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες (βλ. Παράγραφο 2.6.2.4). Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες μετρήσεις BER, στις οποίες έχουν μεταβληθεί διάφορες παράμετροι.

Στις 3 πρώτες μετρήσεις η ταχύτητα του κινητού είναι ίση με 0 km/hr, μεταβάλλεται ο ρυθμός εκπομπής στοιχείων ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν ως έχουν.

Στις 3 επόμενες μετρήσεις η ταχύτητα του κινητού είναι ίση με 100 km/hr, μεταβάλλεται ο ρυθμός εκπομπής στοιχείων ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν ως έχουν.

Στις 3 τελευταίες μετρήσεις η ταχύτητα του κινητού είναι ίση με 0 km/hr, ο ρυθμός εκπομπής στοιχείων ισούται με 36 Mbps ενώ μεταβάλλεται το ύψος της κεραίας.



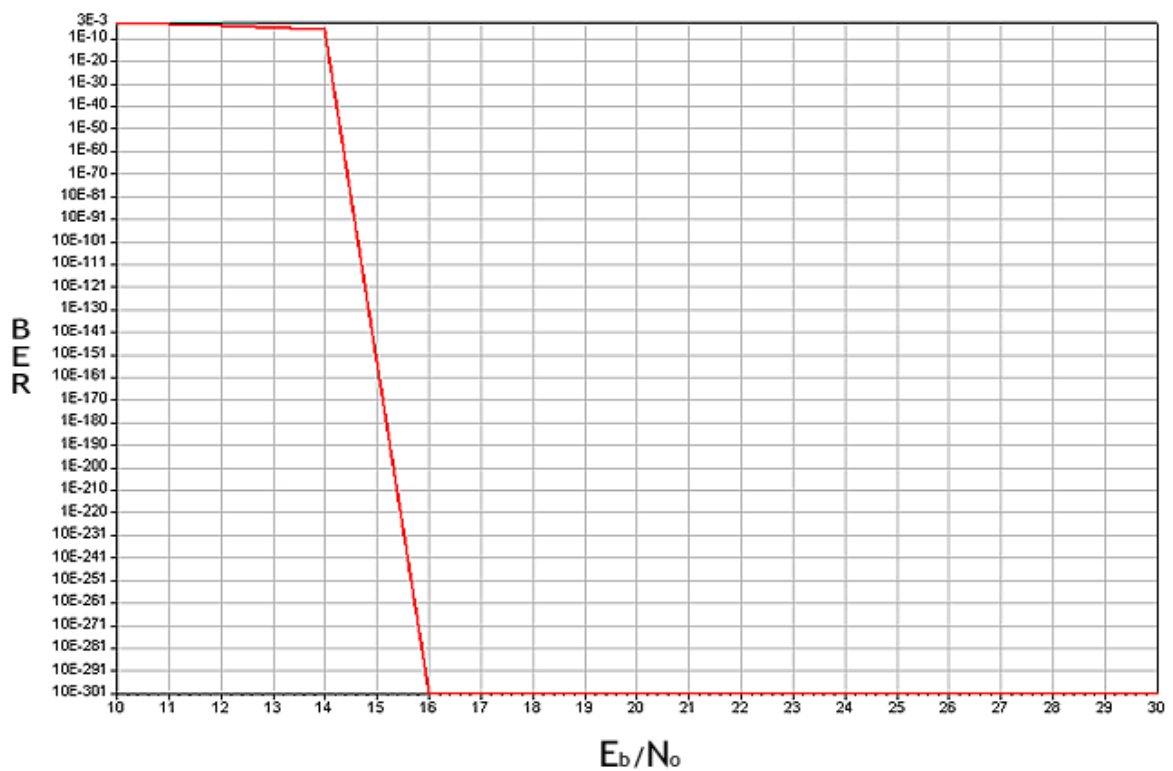
Σχήμα 5.2: Αναλυτική Σχηματική Αναπαράσταση ενός 802.11g OFDM 36Mbps Fading Συστήματος WLAN

5.3.2 Περιπτώσεις Μετρήσεων BER

5.3.2.1 Μέτρηση 1η

Παράμετροι:

- Ρυθμός Εκπομπής Στοιχείων, Rate = 5 (27Mbps)
- Ταχύτητα, $V_x = 0.0$ (km/hr)
- Ύψος Κεραίας, Antenna Height = 20 meter

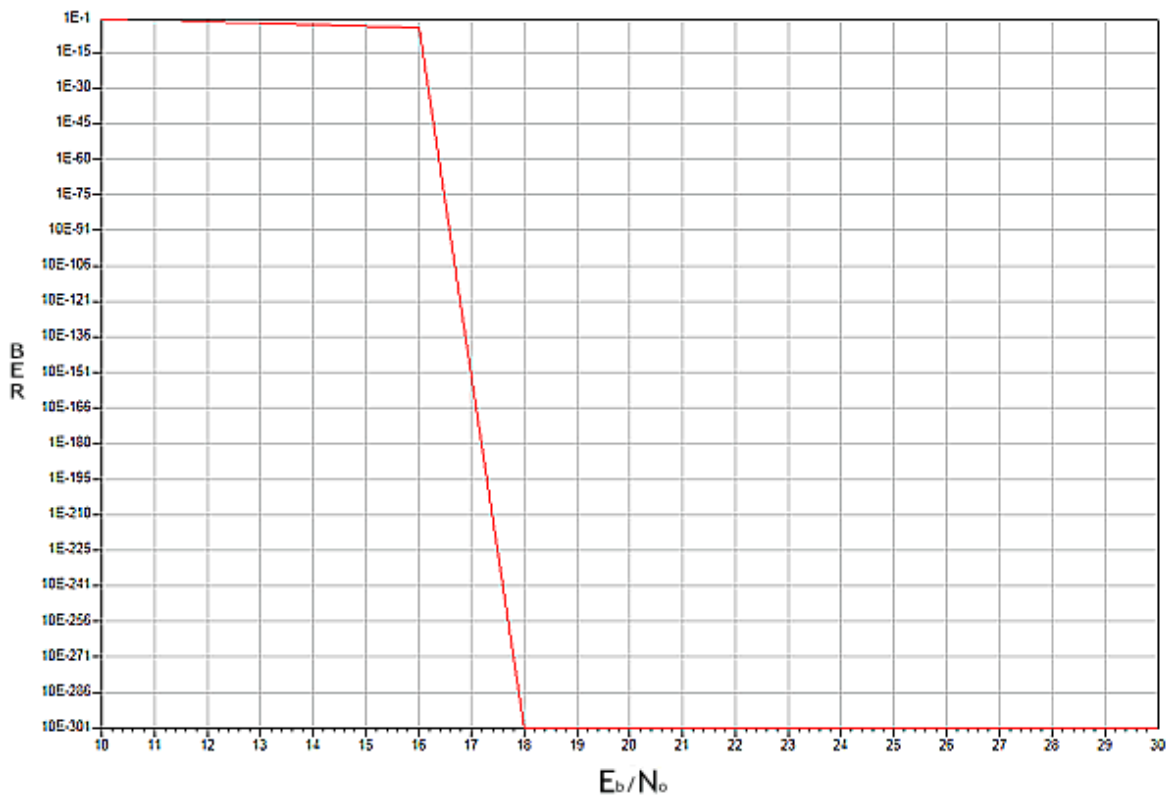


Σχήμα 5.3: BER Απόδοση (Rate=5, $V_x=0.0$, AntHeight=20 meter)

5.3.2.2 Μέτρηση 2η

Παράμετροι:

- Ρυθμός Εκπομπής Στοιχείων, Rate = 6 (36Mbps)
- Ταχύτητα, $V_x = 0.0$ (km/hr)
- Ύψος Κεραίας, Antenna Height = 20 meter

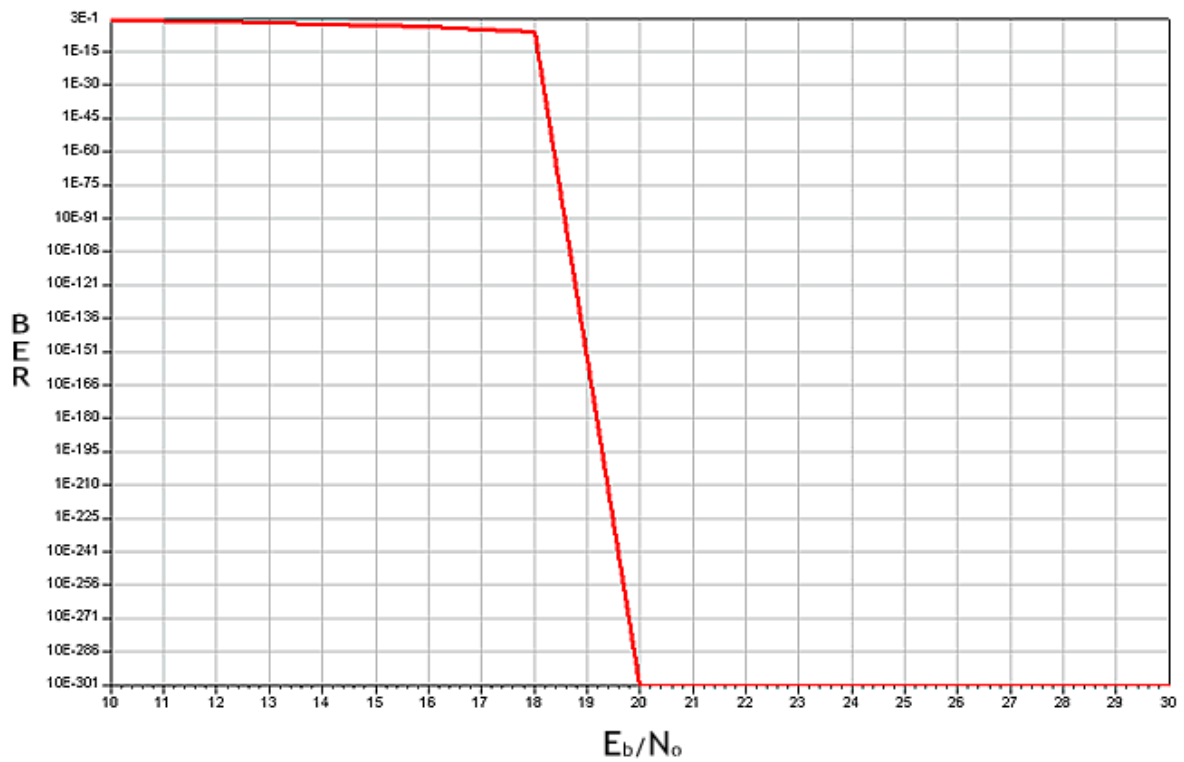


Σχήμα 5.4: BER Απόδοση (Rate=6, $V_x=0.0$, AntHeight=20 meter)

5.3.2.3 Μέτρηση 3η

Παράμετροι:

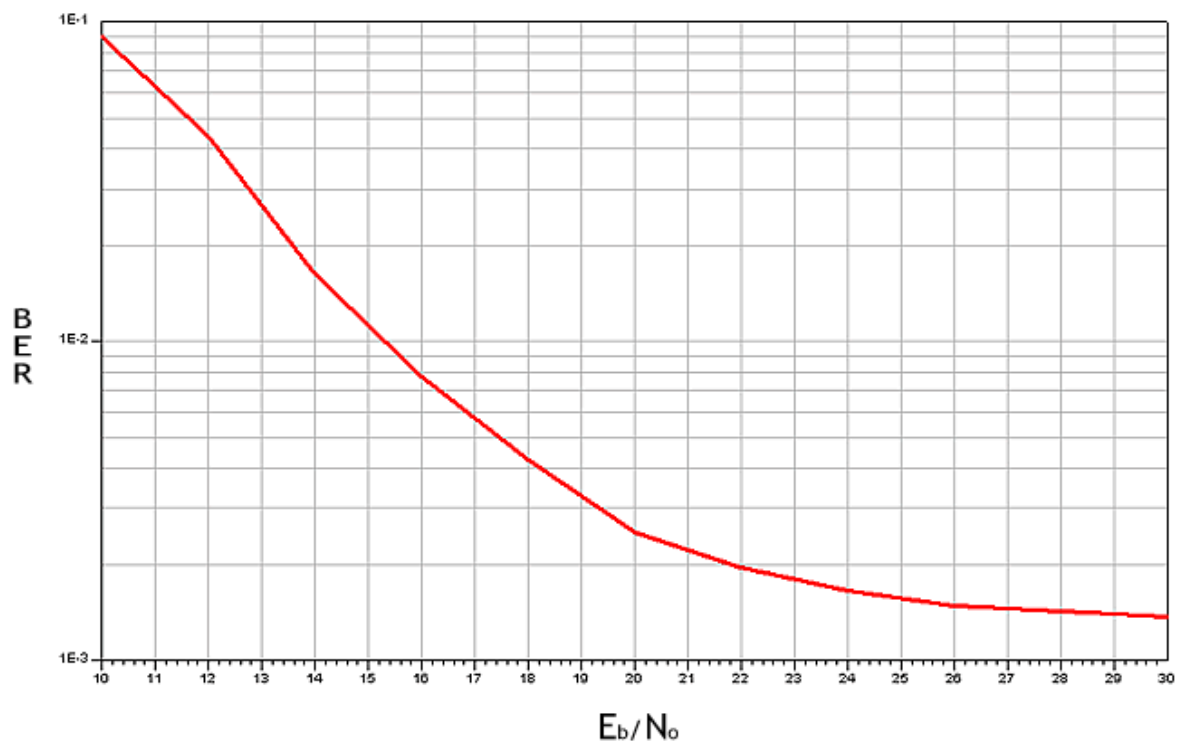
- Ρυθμός Εκπομπής Στοιχείων, Rate = 7 (48Mbps)
- Ταχύτητα, $Vx = 0.0$ (km/hr)
- Ύψος Κεραίας, Antenna Height = 20 meter

Σχήμα 5.5: BER Απόδοση (Rate=7, $Vx=0.0$, AntHeight=20 meter)

5.3.2.4 Μέτρηση 4η

Παράμετροι:

- Ρυθμός Εκπομπής Στοιχείων, Rate = 5 (27Mbps)
- Ταχύτητα, $V_x = 100.0$ (km/hr)
- Ύψος Κεραίας, Antenna Height = 20 meter

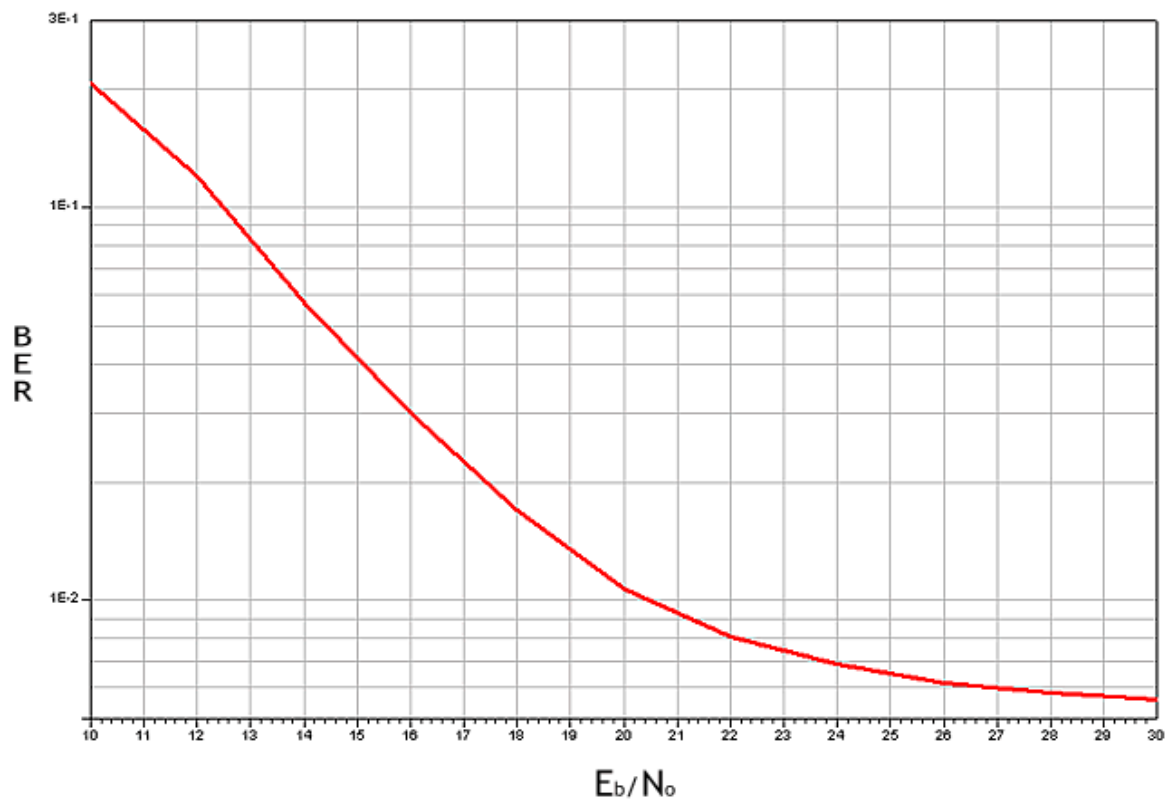


Σχήμα 5.6: BER Απόδοση (Rate=5, $V_x=100.0$, AntHeight=20 meter)

5.3.2.5 Μέτρηση 5η

Παράμετροι:

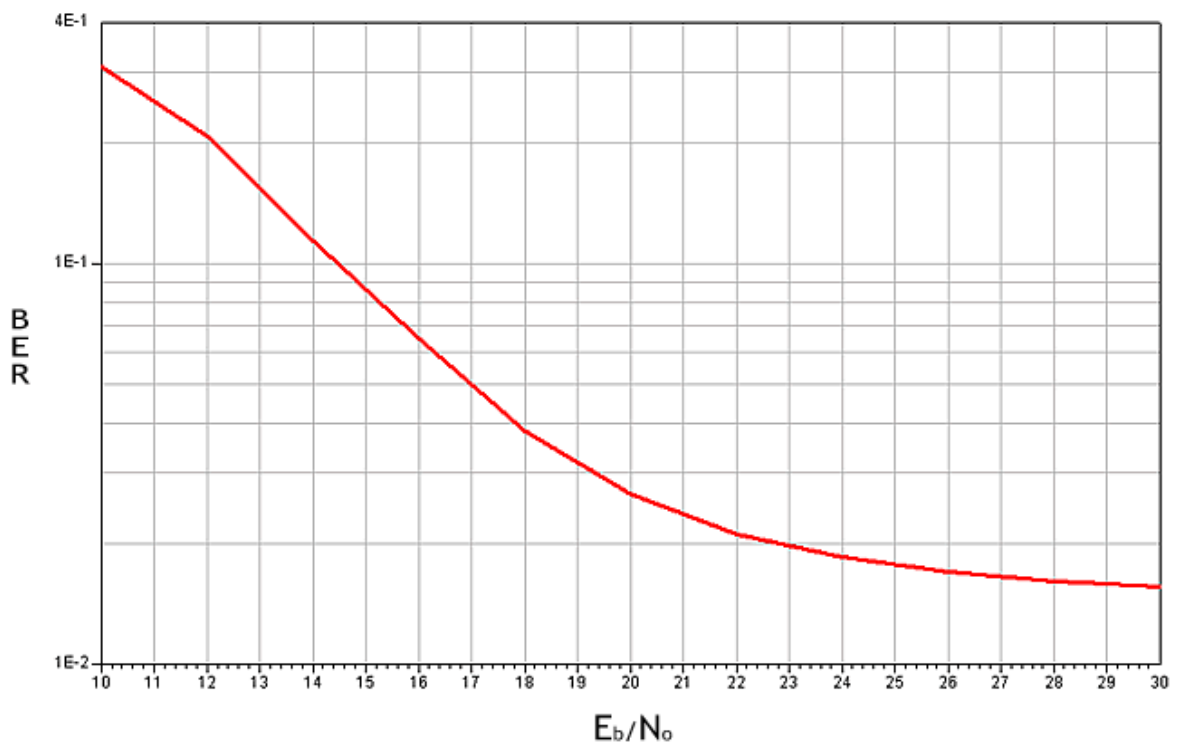
- Ρυθμός Εκπομπής Στοιχείων, Rate = 6 (36 Mbps)
- Ταχύτητα, $V_x = 100.0$ (km/hr)
- Ύψος Κεραίας, Antenna Height = 20 meter

Σχήμα 5.7: BER Απόδοση (Rate=6, $V_x=100.0$, AntHeight=20 meter)

5.3.2.6 Μέτρηση BER

Παράμετροι:

- Ρυθμός Εκπομπής Στοιχείων, Rate = 7 (48 Mbps)
- Ταχύτητα, $V_x = 100.0$ (km/hr)
- Ύψος Κεραίας, Antenna Height = 20 meter

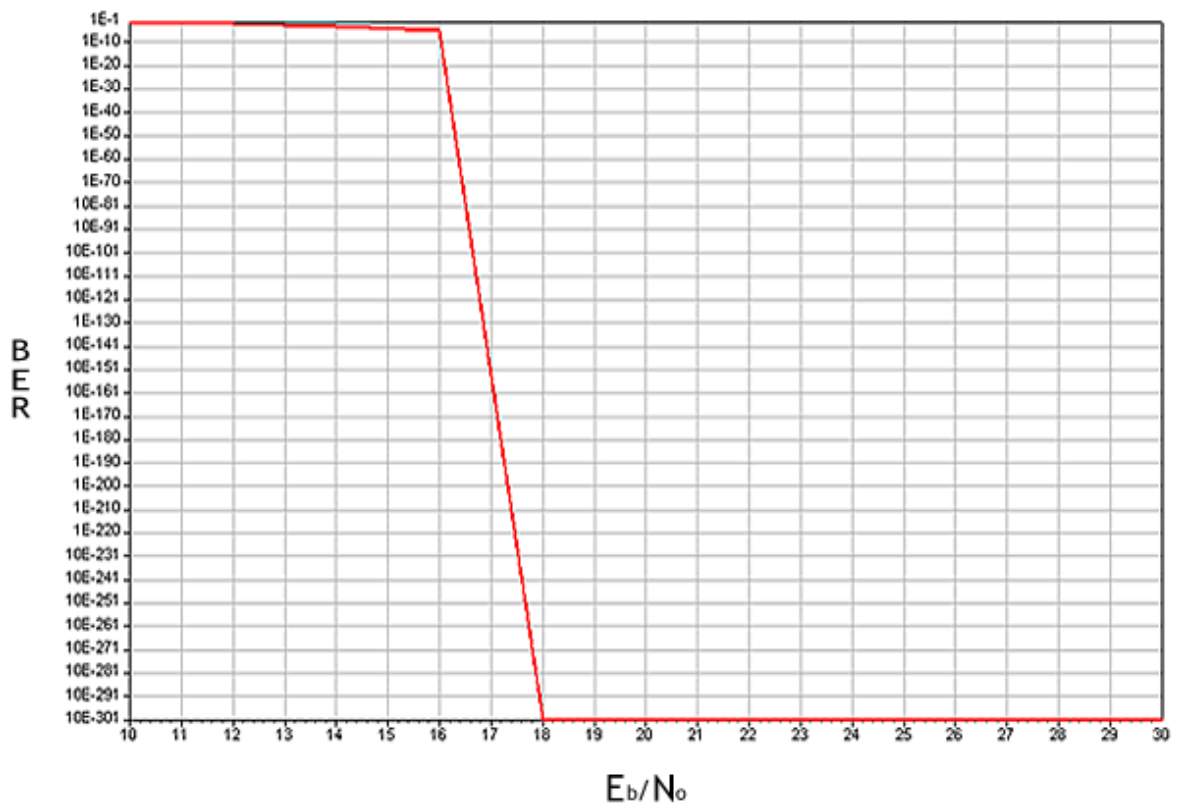


Σχήμα 5.8: BER Απόδοση (Rate=7, $V_x=100.0$, AntHeight=20 meter)

5.3.2.7 Μέτρηση 7η

Παράμετροι:

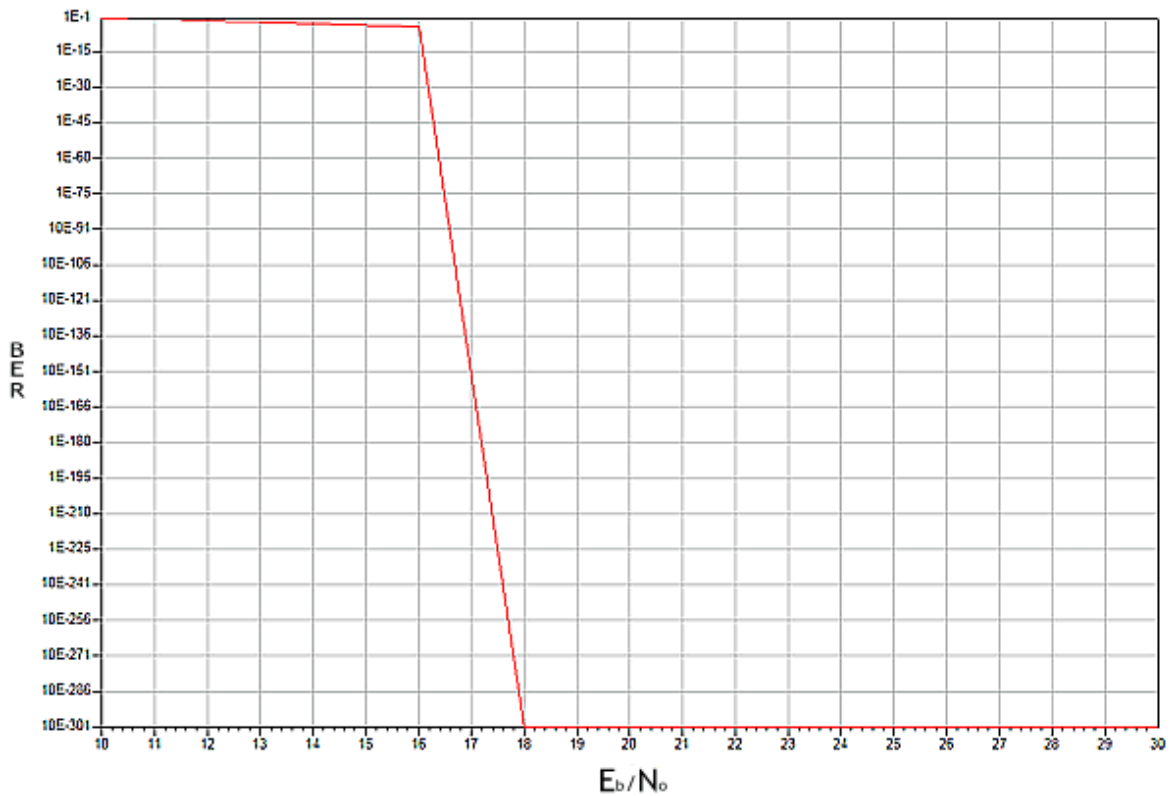
- Ρυθμός Εκπομπής Στοιχείων, Rate = 6 (39Mbps)
- Ταχύτητα, $V_x = 0.0$ (km/hr)
- Ύψος Κεραίας, Antenna Height = 17 meter

Σχήμα 5.9: BER Απόδοση (Rate=6, $V_x=0.0$, AntHeight=17 meter)

5.3.2.8 Μέτρηση BER

Παράμετροι:

- Ρυθμός Εκπομπής Στοιχείων, Rate = 6 (36 Mbps)
- Ταχύτητα, $V_x = 0.0$ (km/hr)
- Ύψος Κεραίας, Antenna Height = 20 meter

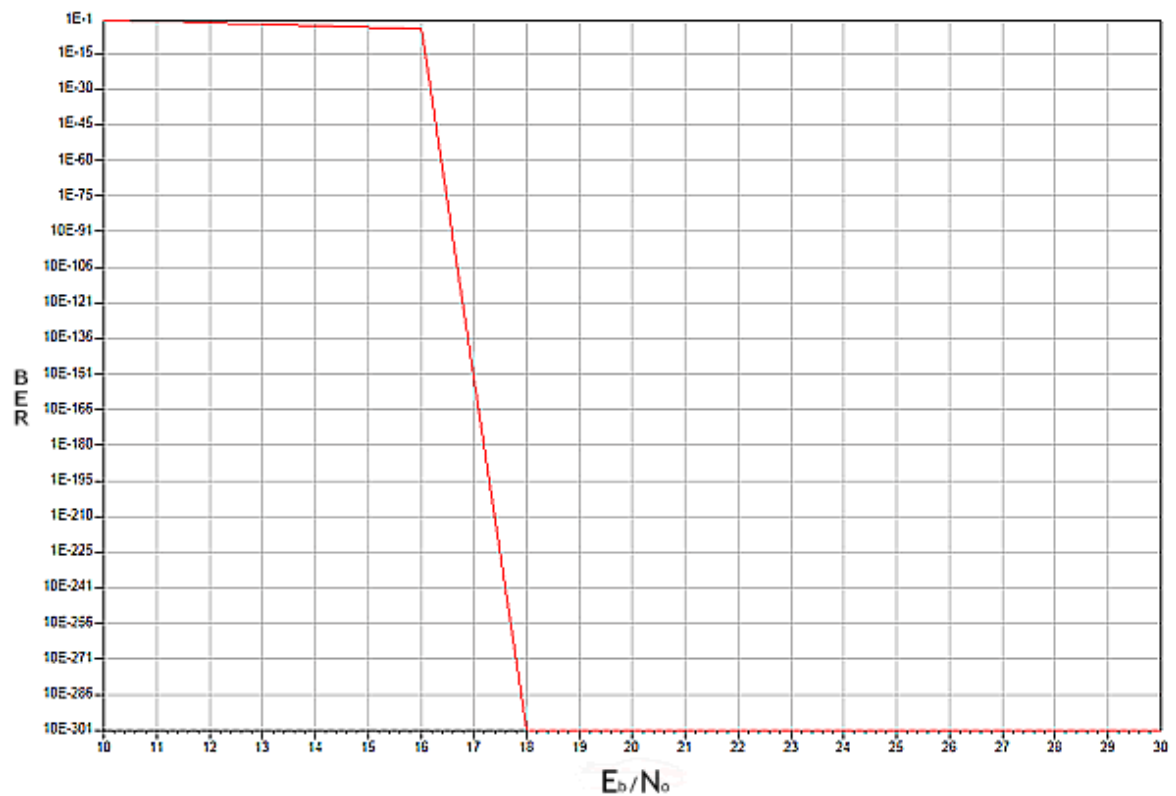


Σχήμα 5.10: BER Απόδοση (Rate=6, $V_x=0.0$, AntHeight=20 meter)

5.3.2.9 Μέτρηση θη

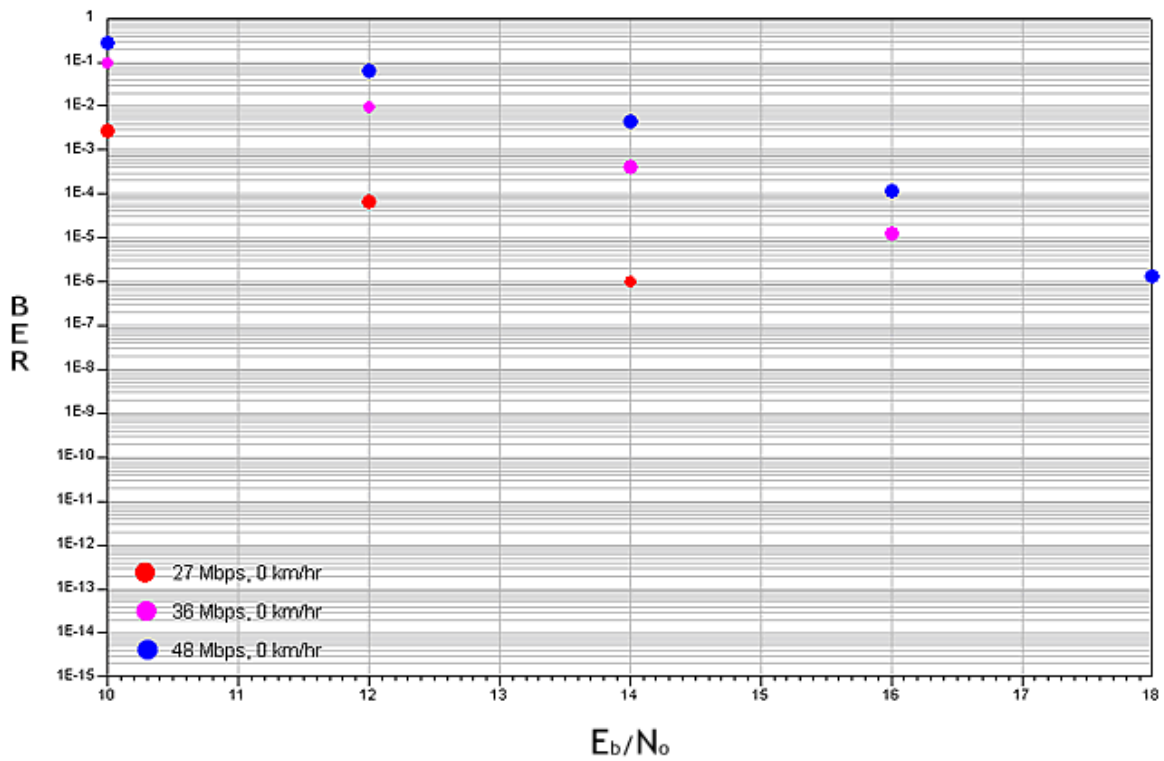
Παράμετροι:

- Ρυθμός Εκπομπής Στοιχείων, Rate = 6 (36 Mbps)
- Ταχύτητα, $V_x = 0.0$ (km/hr)
- Ύψος Κεραίας, Antenna Height = 23 meter

Σχήμα 5.11: BER Απόδοση (Rate=6, $V_x=0.0$, AntHeight=23 meter)

5.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

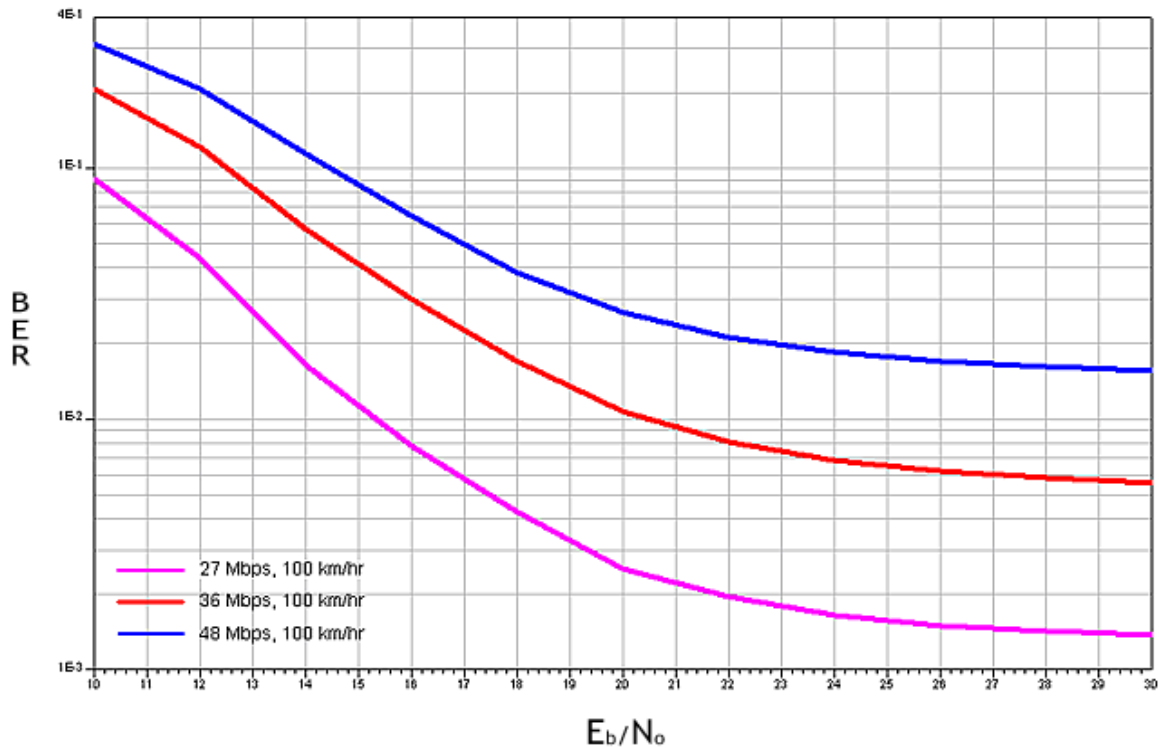
3 πρώτες μετρήσεις - Σύγκριση



Σχήμα 5.12: Σύγκριση των 3 πρώτων μετρήσεων BER

Σχόλια: Η απόδοση BER, της μέτρησης με ρυθμό εκπομπής στοιχείων 36 Mbps είναι χειρότερη κατά περίπου 2 dB από εκείνη με ρυθμό εκπομπής στοιχείων 27 Mbps. Η μέτρηση με ρυθμό εκπομπής στοιχείων 48 Mbps είναι χειρότερη κατά περίπου 0.5 dB και περίπου 3 dB από τη μέτρηση την μέτρηση με 27Mbps. Παρατηρούμε ότι μειώνοντας το λόγο E_b/N_0 το BER χειροτερεύει απότομα.

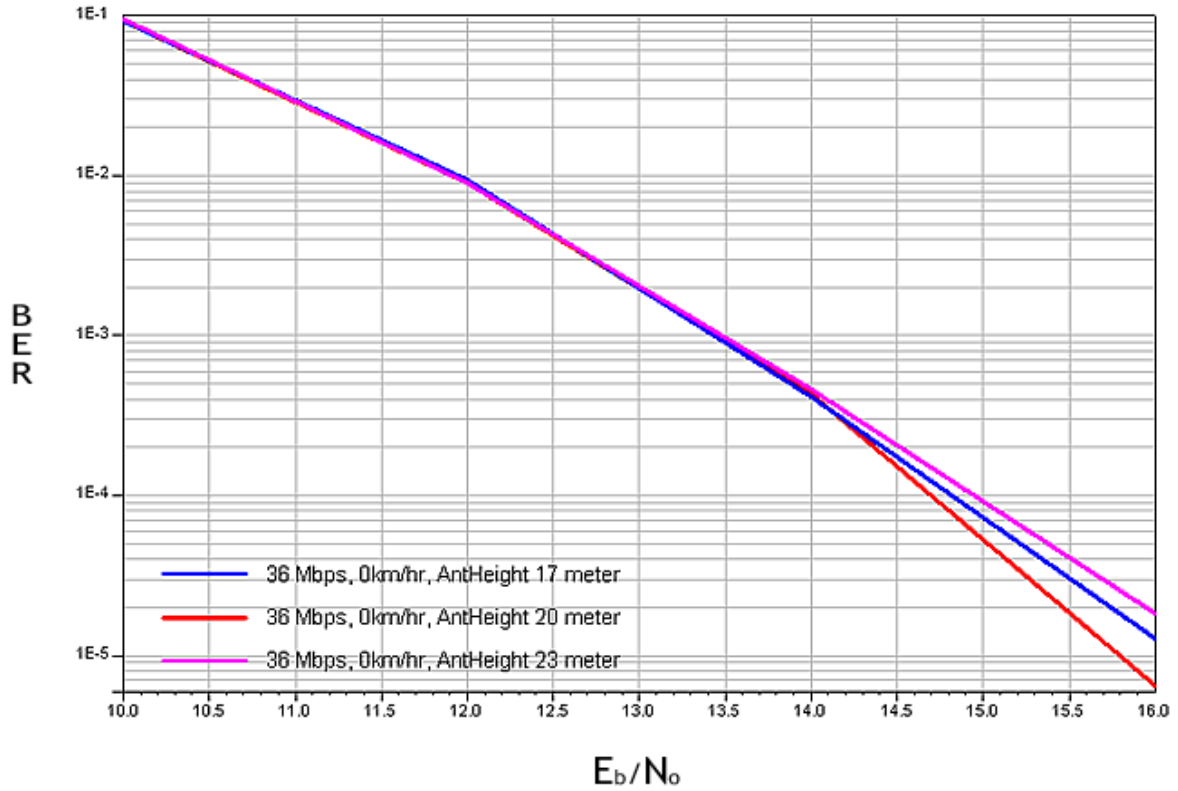
3 επόμενες μετρήσεις - Σύγκριση



Σχήμα 5.13: Σύγκριση των 3 επόμενων μετρήσεων BER

Σχόλια: Η απόδοση BER, της μέτρησης με ρυθμό εκπομπής στοιχείων 36 Mbps είναι χειρότερη κατά περίπου 2 dB από εκείνη με ρυθμό εκπομπής στοιχείων 27 Mbps. Η μέτρηση με ρυθμό εκπομπής στοιχείων 48 Mbps είναι χειρότερη κατά περίπου 0.5 dB και περίπου 3 dB από τη μέτρηση την μέτρηση με 27Mbps. Παρατηρούμε ότι μειώνοντας το λόγο E_b/N_0 το BER χειροτερεύει απότομα.

3 τελευταίες μετρήσεις - Σύγκριση



Σχήμα 5.14: Σύγκριση των 3 τελευταίων μετρήσεων BER.

Σχόλια: Η απόδοση BER, των 3 τελευταίων μετρήσεων, με ρυθμό εκπομπής στοιχείων 36 Mbps, ταχύτητα κινητού χρήστη ίση με 0 km/hr και ύψη κεραίας 17, 20 και 23 μέτρα αντίστοιχα δεν μεταβάλλεται.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Συμπεράσματα

Η Πτυχιακή Εργασία που παρουσιάστηκε έχει σαν αντικείμενο την προσομοίωση και τη μελέτη απόδοσης ενός WLAN IEEE 802.11g συστήματος. Σήμερα, τα Ασύρματα Δίκτυα Τοπικής Περιοχής (WLAN) παρουσιάζουν αλματώδη αύξηση μέρα με τη μέρα.

Έχει εκτιμηθεί μια αύξηση μονάδων WLAN από 2.1εκ. το 2001 σε πάνω από 52εκ. το 2006. Ενώ αυτοί οι αριθμοί φαίνονται εντυπωσιακοί σήμερα, το δυναμικό αγοράς της τεχνολογίας WLAN μπορεί να αυξηθεί εντυπωσιακά εάν γίνει ενσωμάτωση WLAN στα καθημερινά ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης όπως οι εκτυπωτές, τα PDA, οι κονσόλες παιχνιδιών και τα κυψελοειδή τηλέφωνα.

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή αυτή η ευκαιρία, οι λύσεις WLAN πρέπει να δώσουν έμφαση στην "χωρίς ανησυχία" συνεκτικότητα. Με άλλα λόγια, οι προμηθευτές συνόλου τσιπ (chipset) WLAN πρέπει όχι μόνο να ικανοποιήσουν, αλλά και να υπερβούν τις προσδοκίες των καταναλωτών όσον αφορά την απόδοση περιοχής. Οι άνθρωποι προσδοκούν τη λειτουργία των WLAN σε πολλά διαφορετικά περιβάλλοντα και δεν θα ανεχτούν λύσεις WLAN που λειτουργούν διαφορετικά.

Αναπτύχθηκε ένα WLAN IEEE 802.11g σύστημα υπό διαλειπτικό (fading) κανάλι τύπου Rayleigh με διαμόρφωση OFDM. Μέσω της μεταβολής παραμέτρων όπως η ταχύτητα του κινητού, το ύψος της κεραίας και ο ρυθμός εκπομπής στοιχείων προέκυψαν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση ενός WLAN. Ο ρυθμός εκπομπής εσφαλμένων bit (BER) αποφασίστηκε να χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων.

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ADC	Analog - to - Digital Converter
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BSS	Basic Service Set
CCA	Clear Channel Assessment
CCI	Co-channel Interference
CCK	Complementary Code Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Prefix
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DAC	Digital - to - Analog Converter
DCF	Distributed Coordination Function
DFE	Decision Feedback Equalizer
DMT	Discrete Multitone
DS	Distribution System
DSL	Digital Subscriber lines
DSP	Digital Signal Processing
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
ERP	Extended Rate Physical
ESS	Extended Service Set
EVM	Error Vector Magnitude
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Frequency Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
HCCA	HCF Controlled Channel Access
HCF	Hybrid Coordination Function
HF	High Frequency
IBSS	Independent Basic Service Set
ICI	InterCarrier Interference
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ISI	Intersymbol Interference
ISM	Industrial, Scientific, Medical band
LOS	Line of Sight
MAC	Medium Access Mechanism
MAI	Multiple Access Interference
NAV	Network Allocation Vector
NICs	Network Interface Cards
NLOS	Non Line of Sight
NOS	Network Operating System
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PER	Packet Error Rate
PHY	Physical Layer
PSF	Point Coordination Function
QoS	Quality of Services
RF	Radio Frequency
RTS/CTS	Request to send/ Clear to Send
SSID	Service Set Identifier
TBTT	Target beacon transmission times
TDMA	Time Division Multiple Access

TSF	Timer synchronization function
UWM	Ultrawideband
WLAN	Wireless Local Area Network

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] IEEE Std.802.11, "Wireless Lan Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) Specification," 1999
- [2] IEEE Std.802.11b, "Higher - Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz Band," 2003
- [3] IEEE Std.802.11a, "High - Speed Physical Layer in the 5 GHz Band," 2000
- [4] IEEE Std.802.11g, "Further Higher - Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band," 2003
- [5] Andrea Goldsmith, "Wireless Communications", Cambridge University Press, 2005
- [6] Andy Bateman, "Ψηφιακές Επικοινωνίες", Εκδόσεις Τζιόλα, 2000
- [7] Pejman Roshman, Jonathan Leary, "802.11 Wireless LAN Fundamentals", Cisco Press, 2003
- [8] Muhammad Imadur Rahman, Suvra Sekhar Das, Frank H.P Fitzek, "OFDM Based WLAN Systems", Aalborg University, 2004
- [9] "Making 802.11g Transmitter Measurements", Agilent Application Note 1380-4, Literature number 5988-7813EN
- [10] "IEEE 802.11 Wireless LAN PHY Layer (RF) Operation and Measurment", Agilent Application Note 1380-2, Literature number 5988-5411EN
- [11] Design Guide, "WLAN Design Guide", Agilent Technologies, May 2003
- [12] "A detailed examination of the environmental and protocol parameters that affect 802.11g network performance "
- [13] "Capacity, Coverage, and Deployment Considerations ", Proxim Corporation White Paper
- [14] "Capacity, Coverage, and Deployment Considerations for 802.11g", Cisco Systems White Paper
- [15] "The New Mainstream Wireless LAN Standard", BroadCom White Paper
- [16] "OFDM for Mobile Data Communications", Flarion White Paper
- [17] "Introduction to Wireless LANs", WLANA White Paper
- [18] "Engineering A WLAN Network", Nortel White Paper
- [19] "Techniques to Enhance Wireless Local Area Network (WLAN) Performance", Marbel White Paper
- [20] "Bit Error Rate: Fundamental Concepts and Measurment Issues", High Frequency Electronics
- [21] Dimitris Vassis, George Kormentzas, Angelos Rouskas, Ilias Maglogiannis, "The IEEE 802.11g Standard for High Data Rate WLANs", Aegean University, 2005
- [22] Channel Models for HIPERLAN/2 in Different Indoor Scenarios, ETSI EP BRAN 3ER1085B, 30 March 1998.