

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΠΑΡΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ &
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Ανάπτυξη υποδομών προσωποποιημένης παροχής υπηρεσιών με επίγνωση του περιβάλλοντος διάθεσης



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΜΕΛΙΣΣΙΔΗ ΑΡΧΑΓΓΕΛΟΥ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 2007200**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. Πικραμμένος Α. Ιωάννης

Σπάρτη, Μάιος 2012

Περίληπτική Αναφορά

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζεται το πρότυπο της IEEE 802.16a (WiMAX) το οποίο αναφέρεται στην μη οπτική επαφή (NLOS) μεταξύ πομπού και δέκτη στις συχνότητες 2-11 GHz με χρήση ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) και αναλύεται σε 4 κεφάλαια. Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των λειτουργικών χαρακτηριστικών του προτύπου IEEE 802.16a καθώς και η προσομοίωση ενός συστήματος ασύρματου ευρυζωνικού πομποδέκτη ο οποίος το υλοποιεί χωρίς κωδικοποίηση διαύλου. Η προσομοίωση έγινε με τη χρήση του Matlab Simulink R2010a , ώστε να μπορέσει να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του σε διαφορετικά τηλεπικοινωνιακά περιβάλλοντα (περιβάλλον απλού θορύβου Gauss (AWGN) ή περιβάλλοντα πολυδιόδευσης όπως Rayleigh ή Rice) εφόσον το περιβάλλον λειτουργίας του είναι δασώδες και ορεινό με αποτέλεσμα την απώλεια σήματος και μετάδοσης δεδομένων.

Στο 1ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή και αναφορά στα πρότυπα 802.16, οι προδιαγραφές του προτύπου 802.16a, καθώς και μια πρώτη επαφή με την μέθοδο OFDM.

Στο 2ο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια μετάδοσης των δεδομένων σε ένα ασύρματο ευρυζωνικό σύστημα NLOS.

Στο 3ο κεφάλαιο αναλύονται οι προοπτικές και οι παράγοντες λειτουργίας ενός ασύρματου ευρυζωνικού συστήματος NLOS σε ορεινό δασώδες περιβάλλον μη οπτικής επαφής.

Στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση ενός ασύρματου ευρυζωνικού συστήματος NLOS με χρήση του Matlab Simulink R2010a καθώς και το σενάριο λειτουργίας του για την Ανώνυμη Ναυτιλιακή Εταιρεία Κρήτης ANEK LINES που εδρεύει στα Χανιά Κρήτης.

Λέξεις κλειδιά: WiMAX, 802.16a, OFDM, NLOS, Διαλείψεις, AWGN, Rayleigh, Rice

Summary

In this thesis is presented IEEE 802.16a standard (WiMAX) which referred at non line of sight (NLOS) between transmitter and receiver over a bandwidth 2-11 GHz with the use of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) and analyzed in 4 chapters. The objective of this thesis is the study of functional characteristics of IEEE 802.16a standard as well as the simulation of a wireless broadband transceiver system that generates it without channel coding. The simulation has been developed with Matlab Simulink R2010a, so that its behaviour can be observed in different telecommunications environments (environment of Additive White Gaussian Noise (AWGN) or multipath propagation environments like Rayleigh or Rice) because these are wooded and mountainous so signal and data transfer loss.

In 1st Chapter are presented a chronology and a report in 802.16 standards, the specifications of 802.16a standard and a first contact with OFDM method.

In 2nd Chapter is presented the analyzed stages of the transferring data in a wireless broadband NLOS system.

In 3rd Chapter are analyzed the prospects and factors of a wireless broadband NLOS system in a wooded and mountained environment non optical line of sight.

In 4th Chapter is presented a simulation of wireless broadband NLOS system with the use of Matlab Simulink R2010a and also the operating scenario for Anonymous Navy Company of Crete (A.N.E.K. LINES) which located in Chania, Crete.

Key words: WiMAX, 802.16a, OFDM, NLOS, Fading, AWGN, Rayleigh, Rice

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου Ιωάννη Α. Πικραμμένο Δρ. Μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος και επίκαιρου θέματος.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογενειά μου για την συνεχή υποστήριξη που μου δίνουν όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληπτική Αναφορά.....	2
Summary.....	3
Ευρετήριο Σχημάτων.....	7
Ευρετήριο Πινάκων.....	8
Κατάλογος Ακρωνυμίων	9
Πρόλογος	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΙΣΤΟΡΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΑ	
1.1 Μια Ιστορική Αναδρομή	13
1.2 Ζώνες Συχνοτήτων.....	16
1.3 Παροχές του WiMAX.....	20
1.4 Δομή του WiMAX.....	23
1.5 Τι Είναι Ακριβώς το OFDM.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	
2.1 Τα Φυσικά Στρώματα.....	29
2.2 Περιγραφή του Συμβόλου OFDM.....	34
2.3 Κωδικοποίηση Καναλιού.....	37
2.4 Διαμόρφωση Δεδομένων	46
2.5 Διαμόρφωση Πιλότων.....	48
2.6 Κωδικοποίηση Χώρο-χρόνου (Space Time Coding).....	49
2.7 IFFT-FFT	50
2.8 Κωδικοποιήσεις ID Encodings.....	50
2.9 Διαμόρφωση Προπομπού.....	51
2.10 Το Στρώμα MAC.....	52
2.11 Radio Link Control (RLC).....	62
2.12 Ασφάλεια.....	64
2.13 Σύστημα Προσαρμοζόμενων Κεραίων (Adaptive Antenna System).....	65
2.14 Δομή και Μετάδοση Πλαισίου	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΟΡΕΙΝΟ ΚΑΙ ΔΑΣΩΔΕΣ	
3.1 Απώλειες Διαδρομής	69
3.2 Διαλείψεις.....	73

3.2.1 Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας-Φαινόμενο Σκίασης.....	73
3.2.2 Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας-Φαινόμενο Πολλαπλής Διαδρομής.....	75
3.2.3 Μοντέλα Διαλείψεων Μικρής Κλίμακας.....	81
3.2.4 Μοντέλα Σύνθετων Διαλείψεων.....	85
3.2.5 Διαλείψεις Λόγω Ατμοσφαιρικών Κατακρημνίσεων	86
3.3 Τεχνικές Βελτίωσης Απόδοσης NLOS Συστήματος WiMAX.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	
4.1 Περιγραφή του Μοντέλου Προσομοίωσης.....	99
4.1.1 Πομπός.....	101
4.1.2 Κανάλι.....	104
4.1.3 Δέκτης.....	106
4.2 Τρόπος Λειτουργίας Συστήματος.....	107
4.3 Εξαγωγή Αποτελεσμάτων	108
4.4 Μελέτη σε Κανάλια Διαλείψεων Πολλαπλών Διαδρομών.....	113
4.5 Σενάριο Λειτουργίας του Προτύπου 802.16a WiMAX για την Ανώνυμη Ναυτιλιακή Εταιρεία Κρήτης Α.Ν.Ε.Κ. LINES.....	115
4.5.1 Εξοπλισμός WiMAX	117
Συμπεράσματα.....	119
Μελλοντικά Θέματα (Future Work).....	120
Αναφορές.....	121

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1: Τα σχήματα διαμόρφωσης	30
Σχήμα 2: Το σύμβολο OFDM στο πεδίο του χρόνου	34
Σχήμα 3: Το σύμβολο OFDM στο πεδίο της συχνότητας	35
Σχήμα 4: Η λειτουργία της γεννήτριας PRBS	38
Σχήμα 5: Η λειτουργία του τυχαιοποιητή σε DL	39
Σχήμα 6: Η λειτουργία του τυχαιοποιητή σε UL	39
Σχήμα 7: Συνελικτικός δυαδικός κωδικοποιητής ρυθμού $\frac{1}{2}$	42
Σχήμα 8: Διαδικασία κωδικοποίησης στο WiMAX	46
Σχήμα 9: PRBS για διαμόρφωση πιλοτικών φερόντων	48
Σχήμα 10: Δομή για UL δεδομένα και DL AAS προπομπός	51
Σχήμα 11: Δομή προπομπού DL και αρχικός κυμαινόμενος προπομπός	52
Σχήμα 12: Παράδειγμα δομής πλαισίου OFDM με TDD	67
Σχήμα 13: Παράδειγμα δομής πλαισίου OFDM με FDD	68
Σχήμα 14: Εξάρτηση της ισχύς του σήματος με την απόσταση και τη συχνότητα	71
Σχήμα 15: Ανάκλαση σήματος σε εμπόδιο εντός της ζώνης Fresnel	72
Σχήμα 16: Επίδραση πολυδιαδρομικής διάδοσης στο αρχικό σήμα	72
Σχήμα 17: Οι διαλείψεις σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα	74
Σχήμα 18: Πολλαπλές διαδρομές	76
Σχήμα 19: Η ολίσθηση Doppler	78
Σχήμα 20: Διασπορά Doppler στο φάσμα του απλού τόνου	79
Σχήμα 21: Κατανομή Rayleigh που ακολουθεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος	83
Σχήμα 22: Κατανομή Rice που ακολουθεί η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος	84
Σχήμα 23: Κατανομή Nakagami-m που ακολουθεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος	85
Σχήμα 24: Ειδική απόσβεση λόγω βροχής σε συνάρτηση με τη συχνότητα και το ρυθμό βροχόπτωσης	87
Σχήμα 25: Μονό φέρον και OFDM	88
Σχήμα 26: Λαμβανόμενα σήματα μονού φέροντος και OFDM	88
Σχήμα 27: Η λειτουργία του Sub Channelization	89
Σχήμα 28: Ένα σύστημα MIMO χωρικής πολύπλεξης	93
Σχήμα 29: Σχήματα της προσαρμόσιμης διαμόρφωσης	96
Σχήμα 30: Μετάδοση υπηρεσιών από σταθμό βάσης σε συνδρομητή μέσω του μοντέλου 802.16a WiMax	101
Σχήμα 31: Υποσύστημα Normalization	102
Σχήμα 32: Υποσύστημα OFDM Symbol Creation	104
Σχήμα 33: Υποσύστημα Multipath Fading Channel	106
Σχήμα 34: Υποσύστημα OFDM Data	107
Σχήμα 35: Σενάριο λειτουργίας για την Ανώνυμη Ναυτιλιακή Εταιρεία Κρήτης (A.N.E.K. LINES)	116

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι του εκπεμπόμενου σήματος	37
Πίνακας 2: Η διαμόρφωση του puncturing στον εσωτερικό CC	43
Πίνακας 3: Βασικές κωδικοποιήσεις καναλιού	43
Πίνακας 4: Μέγεθος του μπλοκ interleaver	44
Πίνακας 5: Αριθμός των bits ανά φορέα ανάλογα με τον τύπο διαμόρφωσης	45
Πίνακας 6: Σύμβολα καναλιού για την υλοποίηση STC 2×2	49
Πίνακας 7: Λαμβανόμενα σύμβολα για την υλοποίηση STC 2×2	49
Πίνακας 8: ID Encodings	51
Πίνακας 9: Υποστηριζόμενες υπηρεσίες με τα αντίστοιχα απαιτούμενα εύρη ζώνης	57
Πίνακας 10: Παράμετροι του συστήματος	100
Πίνακας 11: BER συναρτήσει του SNR και των σχημάτων διαμόρφωσης στο κανάλι Rice	113
Πίνακας 12: BER συναρτήσει του SNR και των σχημάτων διαμόρφωσης στο κανάλι Rayleigh	113
Πίνακας 13: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων με τις χειρότερες περιβαλλοντολογικές συνθήκες σε κανάλι πολλαπλής διαδρομής Rice	114
Πίνακας 14: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων με τις χειρότερες περιβαλλοντολογικές συνθήκες σε κανάλι πολλαπλής διαδρομής Rayleigh	114
Πίνακας 15: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων με σταθεροποιημένο BER σε κανάλι πολλαπλής διαδρομής Rice	114
Πίνακας 16: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων με σταθεροποιημένο BER σε κανάλι πολλαπλής διαδρομής Rayleigh	115

Κατάλογος ακρωνυμίων

3-DES	Triple Data Encryption Standard	Πρότυπο τριπλής κρυπτογράφησης δεδομένων
AAS	Adaptive Antenna System	Σύστημα προσαρμοζόμενων κεραιών
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	Ασύμμετρη γραμμή συνδρομητή
AES	Advanced Encryption Standard	Πρότυπο προχωρημένης κρυπτογράφησης
ARQ	Automatic Repeat Request	Αυτόματο αίτημα επανάληψης
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Πρόσθετος λευκός γκαουσιανός θόρυβος
BE	Best Effort	Καλύτερη προσπάθεια
BER	Bit Error Rate	Ρυθμός σφάλματος Bit
BPSK	Binary Phase Shift Keying	Διαδικασία διαμόρφωσης μετατόπισης φάσης
BS	Base Station	Σταθμός βάσης
BTC	Block Turbo Code	Block τούρμπο κώδικας
BW	Bandwidth	Εύρος ζώνης
C/N	Carrier-To-Noise Ratio	Ρυθμός φέροντος προς θόρυβο
CAC	Call Admission Control	Έλεγχος αδείας κλήσης
CC	Convolutional Code	Συνελικτικός κώδικας
CID	Connection Identifier	Αναγνωριστικό σύνδεσης
CP	Cyclic Prefix	Κύκλικό πρόθεμα
CPE	Customer Premises Equipment	Εξοπλισμός εγκατάστασης πελάτη
CRC	Cyclic Redundancy Check	Κυκλικός έλεγχος πλεονασμού
DES	Data Encryption Standard	Πρότυπο κρυπτογράφησης δεδομένων
DIUC	Downlink Interval Usage Code	Κώδικας χρήσης διαστήματος καναλιού κάτω ζεύξης
DL	Downlink	Κάτω ζεύξη
DL-MAP	Downlink Map	Μήνυμα κάτω ζεύξης
ErtPS	Extended Real-time Polling Service	Εκτεταμένη υπηρεσία πραγματικού χρόνου
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιών
DCD	Downlink Channel Descriptor	Περιγραφέας καναλιού κάτω ζεύξης
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol	Πρωτόκολλο δυναμικής διαμόρφωσης χρηστών
FCH	Frame Control Header	Κεφαλίδα ελέγχου frame
FDD	Frequency Division Duplex or Duplexing	Διαμόρφωση διαίρεσης συχνότητας
FDM	Frequency Division Multiplexing	Πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας
FDMA	Frequency Division Multiple Access	Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας
FEC	Forward Error Correction	Εμπρόσθετη διόρθωση λάθους

FFT	Fast Fourier Transform	Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier
GF	Galois Field	Πεδίο Galois
H-FDD	Half-Duplex Frequency Division Duplex	Ημι-διαμόρφωση διαίρεσης συχνότητας
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform	Αντίστροφος γρήγορος μετασχηματισμός Fourier
ISDN	Intergrated Services Digital Network	Ολοκληρωμένες υπηρεσίες ψηφιακού δικτύου
ISI	InterSymbol Interference	Διασυμβολική παρεμβολή
ISP	Internet Service Provider	Πάροχος υπηρεσιών Internet
LAN	Local Area Network	Τοπικό δίκτυο
LOS	Line Of Sight	Όπτική επαφή
LSB	Least Significant Bit	Λιγότερο σημαντικό Bit
MAC	Medium Access Control	Έλεγχος μέσου πρόσβασης
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Πολλαπλή είσοδος πολλαπλή έξοδος
MPEG	Moving Pictures Experts Group	Ομάδα κινούμενων εικόνων
MSB	Most significant Bit	Περισσότερο σημαντικό Bit
Ncps	Number of Coded Bits Per Interleaved Block	Αριθμός κωδικοποιημένων bit για κάθε μπλόκ διασυμβολισμού
NLOS	Non Line Of Sight	Μη οπτική επαφή
NrtPS	Non-Real-Time Polling Service	Υπηρεσία μη πραγματικού χρόνου
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	Πολλαπλή πρόσβαση ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association	Κάρτα μνήμης προσωπικού υπολογιστή διεθνούς σχέσης
PDU	Protocol Data Unit	Μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου
PHY	Physical Layer	Φυσικό επίπεδο
PMP	Point-To-Multipoint	Σημείο προς πολλά σημεία
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence	Ψευδο-τυχαία δυαδική ακολουθία
PSTN	Public Switched Telephone Network	Δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής
PTP	Point To Point	Σημείο προς σημείο
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους
QoS	Quality Of Service	Ποιότητα υπηρεσιών
QPSK	Quadrature Phase Shift keying	Τετραγωνική διαμόρφωση μετατόπισης φάσης
RLC	Radio Link Control	Έλεγχος συχνότητας ζεύξεων
RS	Reed Solomon	Κώδικας Reed Solomon
RTG	Receive Transition Gap	Κενό μετάβασης δέκτη
RtPS	Real-Time Polling Service	Υπηρεσία πραγματικού χρόνου

Rx	Receiver	Δέκτης
SC	Single Carrier	Μονό φέρον
SDMA	Space Division Multiple Access	Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης διαστήματος
SDU	Service Data Unit	Μονάδα δεδομένων των υπηρεσιών
SLA	Service Level Agreement	Συμφωνηθέν επίπεδο υπηρεσιών
SNR	Signal To Noise Ratio	Λόγος σήματος προς θόρυβο
SOHO	Small Office/Home Office	Μικρό γραφείο/ Γραφείο σπιτιού
STC	Space Time Coding	Κωδικοποίηση Χωρο-Χρόνου
SS	Subscriber Station	Σταθμός συνδρομητή
TDD	Time Division Duplexing	Διαμόρφωση διαίρεσης χρόνου
TDM	Time Division Multiplexing	Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου
TDMA	Time Division Multiple Access	Πρόσβαση πολλαπλής διαίρεσης χρόνου
TFTP	Trivial File Transfer Protocol	Πρωτόκολλο ασήμαντης μεταφοράς αρχείου
TTG	Transmit Transition Gap	Κενό μετάβασης πομπού
Tx	Transmitter	Πομπός
UCD	Uplink Channel Descriptor	Περιγραφέας καναλιού άνω ζεύξης
UGS	Unsolicited Grant Service	Υπηρεσία αυτόκλητης χορήγησης
UIUC	Uplink Interval Usage Code	Κώδικας χρήσης διαστήματος άνω ζεύξης
UL-MAP	Uplink-Map	Μήνυμα άνω ζεύξης
UL	Uplink	Άνω ζεύξη
VoD	Video On Demand	Βίντεο σε ζήτηση
VoIP	Voice-Over-Internet Protocol	Φωνή μέσω του Πρωτοκόλλου Internet
Wi-Fi	Wireless Fidelity	Ασύρματη πιστότητα
WiMAX	Worldwide Interoperability For Microwave Access	Παγκόσμια Διαλειτουργικότητα για Μικροκυματική Πρόσβαση
WISP	Wireless Internet Service Provider	Πάροχος ασύρματων υπηρεσιών Internet
WHUMAN	Wireless High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Network	Μη αδειοδοτούμενο ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο υψηλής ταχύτητας
WMAN	Wireless Metropolitan Network	Ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο

Πρόλογος

Η εκρηκτική ανάπτυξη του διαδικτύου κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαπενταετίας έχει οδηγήσει στην ολοένα αυξανόμενη ζήτηση από τους χρήστες του για υψηλής ταχύτητας πρόσβαση σε οποιοδήποτε σημείο και αν βρίσκονται. Η μεγάλη επιτυχία των κυψελωτών δικτύων επικοινωνίας από τις αρχές του 1990, μας έχει δώσει σήμερα τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε δίκτυα ασύρματης πρόσβασης νέας γενιάς. Μέσα στα πλαίσια αυτών των εξελίξεων, ένα νέο πρότυπο επικοινωνίας το IEEE 802.16, έρχεται να προσφέρει ασύρματη πρόσβαση, με πολύ υψηλές ταχύτητες, σε μεγάλες αποστάσεις και μάλιστα με πολύ μικρό κόστος υλοποίησης. Ωστόσο, με δεδομένη την κυριαρχία του DSL και του cable σε Ευρώπη και Αμερική αντίστοιχα, πολύ είναι αυτοί που αναθέτουν έναν συμπληρωματικό ρόλο σε αυτή τη νέα τεχνολογία. Πράγματι, ο μόνος τρόπος για το WiMAX να κερδίσει μερίδιο αγοράς από τις κυρίαρχες τεχνολογίες και να τις ανταγωνιστεί απευθείας, είναι να μπορέσει να διαφοροποιηθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΙΣΤΟΡΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΑ

1.1 Μια Ιστορική Αναδρομή

Η ΙΕΕΕ εισήγαγε μια οικογένεια προτύπων το ΙΕΕΕ 802.11 για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) που είχαν ως σκοπό να επεκτείνουν το 802.3 (Ethernet, το συνηθέστερο πρωτόκολλο ενσύρματης δικτύωσης υπολογιστών) στην ασύρματη περιοχή. Τα πρότυπα 802.11 είναι ευρύτερα γνωστά ως «WiFi». Αυτή η οικογένεια πρωτοκόλλων αποτελεί το καθιερωμένο πρότυπο της βιομηχανίας στο χώρο των ασύρματων τοπικών δικτύων.

Η εξέλιξη του ασύρματου LAN άρχισε με την εισαγωγή του προτύπου **802.11b** το 1999. Αυτό το πρότυπο χρησιμοποιούσε ένα φέρον (SC), διαμόρφωση σε μια συχνότητα RF 2,4 GHz με διαμόρφωση BPSK και QPSK και είχε ένα μέγιστο ρυθμό μεταφοράς 11 Mbit/s.

Το ίδιο έτος, το πρότυπα **802.11a** εισήγαγε την Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) μέθοδο που μετέδιδε μέχρι και 54 Mbit/s σε μια συχνότητα RF 5 GHz με 6 GHz απλώνοντας την πληροφορία διαμέσου από αρκετά φέροντα OFDM που μπορούν να έχουν τη διαμόρφωση που ποικίλει από BPSK έως 64QAM.

Το 2003, το βελτιωμένο και των δύο προτύπων με χαμηλή συχνότητα RF 802.11b και 54 Mbit/s 802.11a ενώθηκαν στο πρότυπο **802.11g**. Αυτό το πρότυπο χρησιμοποιεί τη συχνότητα RF 2,4 GHz και υποστηρίζει και τους δύο τύπους διαμόρφωσης του 802.11 (SC και OFDM). Επιπλέον, "turbo τρόποι" με μέχρι 108 Mbit/s εισήχθησαν.

Τέλος το 2009, το πρότυπο **802.11n**, το οποίο με χρήση πολλαπλών κεραιών (μέθοδος γνωστή ως MIMO, εκ του Multiple Inputs Multiple Outputs) αναμένεται να παρέχει ρυθμό μετάδοσης τουλάχιστον 108 Mbps. Σε αντίθεση με τα δύο προηγούμενα πρόκειται να τυποποιηθεί σύντομα και να κυκλοφορήσουν εμπορικά προϊόντα βασισμένα σε αυτό. Μάλιστα κάρτες ασύρματης δικτύωσης συμβατές με το 802.11n έχουν ήδη βγει στην αγορά από ορισμένους προμηθευτές, χωρίς να έχει οριστικοποιηθεί ακόμα το επίσημο πρότυπο.

Ενώ όλα τα προηγούμενα πρότυπα χρησιμοποιήθηκαν για τα "μικρά δίκτυα" χωρίς να απαιτείται χειριστής δικτύου (small office & home office, SOHO), το πρώτο 802.16 πρότυπο, που εισήχθησε στο τέλος του 2001, παρείχε ένα πρότυπο βασισμένο σε διαχειριστή για π.χ Πρόσβαση στο Διαδίκτυο όταν έχουμε μεγάλες αποστάσεις σε αστικές περιοχές.

Η εξέλιξη του προτύπου 802.16

Το 2003 η IEEE υιοθέτησε το πρότυπο 802.16 γνωστό και σαν WiMAX, (Worldwide Interoperability for Microwave Access) ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για ασύρματη πρόσβαση (με σταθερούς ρυθμούς) ευρείας ζώνης. Όπως συμβαίνει με τα πρότυπα της σειράς 802 για ασύρματα τοπικά δίκτυα, έτσι και το 802.16 καθορίζει μια οικογένεια προτύπων με επιλογές για συγκεκριμένες ρυθμίσεις. Το πρότυπο αυτό σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί σε μια ευρεία μπάνα συχνοτήτων η οποία εκτείνεται από 2 έως 66 GHz. Υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης έως και 72 Mbps στον αέρα ενώ η πραγματική ταχύτητα στο Ethernet (καλώδιο) υπολογίζεται στα 50 Mbps. Οι αποστάσεις που μπορεί να καλυφθούν ξεπερνούν τα 50 Km σε συνθήκες οπτικής επαφής. Μια σημαντική διαφορά του προτύπου IEEE 802.16 σε σχέση με το IEEE 802.11 είναι ότι το πρώτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνθήκες μη οπτικής επαφής φυσικά με πολύ χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης οι οποίοι μπορούν να φτάσουν τα 35 Mbps σε αποστάσεις έως και 8 Km και εύρος ζώνης καναλιού τα 7 MHz [21]. Προσφέρει μεγαλύτερη εμβέλεια και εύρος ζώνης από το Wi-Fi, παρέχει ασύρματη εναλλακτική λύση για συνδεδεμένο με καλώδιο δικτύου κορμού (backhaul) και δικτύου πρόσβασης (last mile) εφαρμογές που χρησιμοποιούν Data Over Cable Service Interface Specification (DOCSIS), Subscriber Line technologies (xDSL), T-carrier και E-carrier, Optical Carrier Level (Oc-H) και υπολογίζεται ότι θα μπορεί να καλύψει ακόμη και μια μεγαλούπολη. Το WiMAX σχεδιάστηκε κατά βάση ώστε να καλύπτει κυρίως Point-to- Multipoint (PTM) συνδέσεις χωρίς ωστόσο να αποκλείεται και η χρήση του για point to point συνδέσεις. Η διαμόρφωση η οποία χρησιμοποιείται ονομάζεται OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Πρόκειται για μια πολύ ανθεκτική διαμόρφωση σε ότι αφορά το φαινόμενο της πολυδιόδευσης (multipath) ειδικότερα στις συχνότητες πάνω των 2 GHz όπου το πρότυπο χρησιμοποιεί [16].

Όλα ξεκίνησαν το 1998, όταν το ίδρυμα της IEEE δημιούργησε μια ομάδα εργασίας, αποκαλούμενη IEEE 802.16 Working Group, επικεντρώθηκε στον χώρο της ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης με σκοπό να αναπτύξει πρότυπα αλλά και να προτείνει πρακτικές έτσι ώστε να υποστηρίξει την ανάπτυξη και την εξάπλωση των ασύρματων μητροπολιτικών δικτύων (wireless metropolitan area networks). Στην αρχική του έκδοση το πρωτόκολλο IEEE 802.16 αναφερόταν για εφαρμογές απ'ευθείας οπτικής επαφής (Line Of Sight-LOS) στο φάσμα μη αδειοδοτημένων συχνοτήτων 10-66GHz όμως σε επόμενες τροποποιήσεις το επέκτειναν για εφαρμογές μη οπτικής επαφής (Non Line Of Sight-NLOS) στο φάσμα συχνοτήτων 2-11GHz με αδειοδότηση ή χωρίς, κάτι που στις υψηλότερες συχνότητες δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί καθώς το μήκος κύματος είναι πολύ μικρό και η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από διάφορες επίγειες και ανθρώπινες κατασκευές είναι σφοδρή. Το πρότυπο προδιέγραφε air-interface μονού φέροντος (Single Carrier), εύρος καναλιών 25 και 28MHz και ρυθμούς έως 120Mbps σε κανάλι

25MHz. Έτσι δημιουργήθηκε το πρότυπο IEEE 802.16-2001, ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για ασύρματη πρόσβαση με σταθερούς ρυθμούς ευρείας ζώνης, το οποίο ολοκληρώθηκε το 2001 και εγκρίθηκε το 2002 [19].

Η συνεχής εξέλιξη του θα το καταστήσει σε λίγο καιρό ικανό να απευθύνεται σε κινητούς χρήστες που επιθυμούν ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση. Τα συστήματα WiMAX, καλύπτοντας το κενό μεταξύ των ασύρματων τοπικών δικτύων (Wireless LAN) και των δικτύων ευρείας περιοχής (WAN), θα παρέχουν μία οικονομική εναλλακτική λύση στην ευρυζωνική πρόσβαση με τεχνολογία DSL, όπου αυτή είναι διαθέσιμη, ενώ το πιο σημαντικό είναι ότι θα προσφέρει ευρυζωνική πρόσβαση σε περιοχές όπου το DSL δεν έχει ακόμα φτάσει. Περαιτέρω αναθεωρήσεις έγιναν στο πρότυπο IEEE 802.16-2001 οδηγώντας στην δημιουργία των προτύπων IEEE 802.16c, IEEE 802.16a, IEEE 802.16d, IEEE 802.16-2004 και IEEE 802.16e.

IEEE 802.16c

Αποτέλεσε την πρώτη τροποποίηση του IEEE 802.16-2001 και συμπεριλάμβανε χαρακτηριστικά συστημάτων που ορίστηκαν ως η βάση για τη διεξαγωγή των τεστ συμμόρφωσης των διαφόρων συστημάτων με τις προδιαγραφές του προτύπου.

IEEE 802.16a

Τον Απρίλιο του 2003 εκδόθηκε το πρότυπο IEEE 802.16a που αφορούσε συχνότητες 2-11GHz συμπεριλαμβάνοντας τις συχνότητες με ή χωρίς αδειοδότησης χρήσης τους, για επικοινωνίες μη οπτικής επαφής και επομένως σε περιβάλλον με ισχυρές απώλειες λόγω πολυδιαδρομικής παρεμβολής. Το πρότυπο προδιέγραφε τρία air interface:

- i. WirelessMAN-SC μονού φέροντος
- ii. WirelessMAN-OFDM με μετασχηματισμό 256 σημείων
- iii. WirelessMAN-OFDMA με μετασχηματισμό 2048 σημείων ενώ προέβλεπε ρυθμούς έως 70Mbps σε κανάλι 14MHz και σε απόσταση μέχρι 50Km.

IEEE 802.16d

Καθώς η πολυπλοκότητα των εφαρμογών που διαδίδονται πάνω από ένα ασύρματο δίκτυο ολοένα και αυξάνει, η ποιότητα υπηρεσίας πάνω από τέτοια δίκτυα γίνεται ένας πολύ καθοριστικός παράγοντας για την ποιότητα της επικοινωνίας. Για παράδειγμα, η μετάδοση video σε πραγματικό χρόνο απαιτεί από το δίκτυο συνθήκες πολύ χαμηλής καθυστέρησης μετάδοσης. Για αυτό το λόγο, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη για ποιότητα υπηρεσίας ορίστηκε αυτό το υποπρότυπο.

IEEE 802.16-2004

Το 2004 εκδόθηκε το πρότυπο IEEE 802.16-2004 το οποίο αναθεώρησε και αντικατέστησε όλα τα προηγούμενα και είναι σε χρήση έως σήμερα. Αναφέρεται σε

σταθερά συστήματα ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης που υποστηρίζουν υπηρεσίες πολυμέσων. Το πρότυπο προδιαγράφει πέντε air interfaces:

- i. WirelessMAN-SC για συχνότητες 10-66GHz
- ii. WirelessMAN-SCa για αδειοδοτημένες συχνότητες 2-11GHz
- iii. WirelessMAN-OFDM για αδειοδοτημένες συχνότητες 2-11GHz
- iv. WirelessMAN-OFDMA για αδειοδοτημένες συχνότητες 2-11GHz
- v. WirelessHUMAN για μη αδειοδοτημένες συχνότητες 2-11GHz

IEEE 802.16e

Το Δεκέμβριο του 2005 εκδόθηκε το IEEE 802.16e που αφορά την ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση για κινητά συστήματα. Το πρότυπο υιοθετεί air interface OFDMA για βελτιωμένη πολυδιαδρομική απόδοση σε περιβάλλοντα μη απ'ευθείας οπτικής επαφής (NLOS). Παρουσιάζεται ακόμη η κλιμακωτή OFDMA (Scalable OFDMA-SOFDMA) για να υποστηρίξει κλιμακούμενα εύρη καναλιών από 1.25 έως 20MHz . Η πρώτη έκδοση του προτύπου καλύπτει εύρη καναλιών 5, 7, 8.75 και 10MHz για τις αδειοδοτημένες συχνότητες 2.3, 2.5 και 3.5GHz ενώ προβλέπει ρυθμούς κάτω ζεύξης έως 63Mbps, άνω ζεύξης έως 28Mbps σε κανάλι εύρους 10MHz.

1.2 Ζώνες Συχνοτήτων

Το πρωτόκολλο IEEE 802.16 συγκεκριμενοποιεί το MAC και το PHY των σταθερών συστημάτων ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης. Παρόμοια με το IEEE 802.11, το στρώμα MAC έχει φτιαχτεί ώστε να υποστηρίζει πολλαπλά φυσικά στρώματα και έτσι να δίνει στο πρωτόκολλο μεγάλη ευελιξία. Το πρωτόκολλο IEEE 802.16 υποστηρίζει point-to-multipoint και multipoint-to-multipoint επικοινωνίες στη ζώνη 2-66 GHz. Η ύπαρξη των πολλαπλών φυσικών στρωμάτων, εκτός των τεχνολογικών και των επιχειρηματικών λόγων, αντικατοπτρίζει και το γεγονός ότι η ηλεκτρομαγνητική διάδοση ανάμεσα στα 2 και τα 66 GHz δεν είναι ομοιογενής. Κάθε φυσικό στρώμα είναι κατάλληλο για μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Το 802.16 είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε 3 διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων.

Η πρώτη ζώνη συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει είναι οι αδειοδοτημένες (licensed) συχνότητες ανάμεσα στα 10 και τα 66 GHz. Σε αυτό το εύρος των συχνοτήτων, το μήκος κύματος είναι πολύ μικρό και η εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από διάφορες επίγειες και ανθρώπινες κατασκευές είναι σφοδρή. Γι' αυτό, η οπτική επαφή (line-of-sight, LOS) ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη επιβάλλεται. Η πολυδιαδρομική διάδοση (multipath) δεν αποτελεί πρόβλημα, επειδή μόνο το κύριο μονοπάτι από τον πομπό στο δέκτη θα έχει επαρκή ενέργεια. Ενώ, όμως, η πολυδιαδρομική διάδοση δεν είναι πρόβλημα, ο θερμικός θόρυβος και/ή οι παρεμβολές είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την επίδοση των ασύρματων συστημάτων σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων. Τα συστήματα αυτά

χρησιμοποιούνται μόνο σε εξωτερικό περιβάλλον και η βροχή θα αυξήσει την εξασθένηση που υφίστανται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Έτσι, ένα αρκετά μεγάλο περιθώριο ζεύξης πρέπει να ληφθεί υπόψιν για τις απώλειες λόγω βροχής. Ταυτόχρονα, η επιθυμία για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν υψηλής τάξης σχήματα διαμόρφωσης. Αντίστοιχα, τα τελευταία απαιτούν πολύ μεγάλο σηματοθορυβικό λόγο (signal-to-noise-ratio, SNR) για να λειτουργήσουν ικανοποιητικά.

Η δεύτερη ζώνη συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει είναι οι αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων ανάμεσα στα 2 και τα 11 GHz. Σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων, η οπτική επαφή δεν είναι αναγκαία. Η πολυδιαδρομική λήψη μπορεί να είναι σημαντική και υπολογίσιμη, γι' αυτό και πρέπει να γίνονται οι απαραίτητες μετρήσεις. Επειδή μπορεί να υπάρχει ή όχι οπτική επαφή, η ισχύς του σήματος μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Οι επανεκπομπές πιθανόν να κρίνονται αναγκαίες εξαιτίας της συμπεριφοράς απωλειών του ασύρματου μέσου. Σαν λύση σε αυτά τα προβλήματα, το πρωτόκολλο 802.16 παρέχει αναβαθμισμένες τεχνικές ελέγχου της ισχύος και το φυσικό στρώμα για λειτουργία στα 2-11 GHz μπορεί να βασιστεί στο OFDM.

Μία ακόμα διαφορά ανάμεσα στα 802.16 και 802.11 ή και το 802.15 είναι ότι το εύρος της παρεμβολής τυπικά ξεπερνάει το εύρος λειτουργίας. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι οι σταγόνες της βροχής που προκαλούν τις πιο μεγάλες απώλειες δεν είναι ομοιόμορφα διατεταγμένες στη λειτουργική περιοχή. Αυτό δημιουργεί την προοπτική για περιπτώσεις όπου το επιθυμητό σήμα υφίσταται σφοδρή εξασθένηση, αλλά το παρεμβαλλόμενο σήμα όχι. Ενώ η εξασθένηση λόγω βροχής είναι ένα τεχνικό πρόβλημα, η λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων 10-66 GHz οδηγεί σε 2 τεχνικά πλεονεκτήματα. Πρώτον, για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η πολυδιαδρομική παρεμβολή είναι αμελητέα. Δεύτερον, οι ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας σε αυτό το φυσικό περιβάλλον είναι πολύ μεγάλες, της τάξης των 25-28 MHz. Αυτό επιτρέπει ρυθμούς δεδομένων μεγαλύτερους από 120 Mb/s.

Για να αναπτύξει μια αδειοδοτημένη λύση, ένας πάροχος δικτύου ή υπηρεσιών πρέπει να αγοράσει φάσμα που είναι μια δυσκίνητη διαδικασία. Σε μερικές χώρες η συγκέντρωση των απαραίτητων δικαιολογητικών και αδειών που απαιτούνται για τη λήψη της άδειας χρήσης του φάσματος μπορεί να πάρει μήνες, ενώ σε άλλες χώρες, η δημοπρασία φάσματος μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των τιμών και να προκαλέσει καθυστερήσεις στην απόκτηση φάσματος. Το παραπάνω σημαντικό εμπόδιο, σε συνδυασμό με την αποκλειστική ιδιοκτησία μιας ζώνης, επιτρέπει την βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών και την μείωση των παρεμβολών. Οι αδειοδοτημένες λύσεις WiMAX έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Οι υψηλότερες δαπάνες και τα αποκλειστικά δικαιώματα στο φάσμα επιτρέπουν μια πιο

προβλέψιμη και σταθερή λύση για τις μεγάλες μητροπολιτικές εφαρμογές και την κινητή χρήση. Οι χαμηλότερες συχνότητες που συνδέονται με τις αδειοδοτημένες ζώνες (2.5GHz και 3.5GHz) ευνοούν την επικοινωνία NLOS. Εντούτοις, οι ζώνες αυτές αντιμετωπίζουν κάποια ζητήματα παρεμβολής. Δεδομένου ότι οι πάροχοι επεκτείνουν περισσότερα δίκτυα, πρέπει να αντιμετωπίσουν τις αμοιβαίες παρεμβολές μέσα στο δίκτυό τους. Το κατάλληλο σχέδιο και εφαρμογή μπορούν να ανακουφίσουν αυτά τα προβλήματα. Συνοψίζοντας, οι αδειοδοτημένες λύσεις προσφέρουν βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών (QoS) σε σύγκριση με τις μη αδειοδοτημένες λύσεις.

Η τρίτη ζώνη συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει είναι οι μη αδειοδοτούμενες ζώνες συχνοτήτων ανάμεσα στα 2 και τα 11 GHz (5,8 GHz στις ΗΠΑ). Ενώ τα φυσικά χαρακτηριστικά των μη αδειοδοτημένων αυτών ζωνών συχνοτήτων είναι ίδια όπως αυτά των αντίστοιχων αδειοδοτημένων, υπάρχουν 2 διαφορές. Πρώτον, επειδή οι ζώνες αυτές είναι μη αδειοδοτημένες, πιθανόν να υπάρχουν και άλλοι χρήστες, γεγονός το οποίο προκαλεί πρόβλημα παρεμβολής. Δεύτερον, οι κανονισμοί οριοθετούν την εκπεμπόμενη ισχύ. Τα προβλήματα αυτά απαιτούν δυναμική επιλογή συχνότητας και ελέγχου της ισχύος.

Πλεονεκτήματα ζωνών συχνοτήτων

Οι δαπάνες που αφορούν στην απόκτηση αδειοδοτημένων ζωνών οδηγούν πολλούς WISP και κάθετες αγορές (vertical markets) να εξετάσουν τις μη αδειοδοτημένες λύσεις για εξειδικευμένες αγορές, όπως οι αγροτικές περιοχές και οι αναδυόμενες αγορές. Οι μη αδειοδοτημένες λύσεις παρέχουν διάφορα βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις αδειοδοτημένες λύσεις, συμπεριλαμβανομένων των χαμηλότερων αρχικών δαπανών, τη γρηγορότερη ανάπτυξη του δικτύου, και μια κοινή ζώνη συχνοτήτων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο μέρος της υφηλίου. Αυτά τα οφέλη τροφοδοτούν το ενδιαφέρον και δίνουν δυναμική στην επιτάχυνση της υιοθέτησης ευρυζωνικών λύσεων.

Οι πάροχοι υπηρεσιών στις αναδυόμενες αγορές, όπως είναι οι αναπτυσσόμενες χώρες ή οι ανεπτυγμένες χώρες με υπανάπτυκτες περιοχές, μπορούν να μειώσουν το χρόνο που απαιτείται μέχρι να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους στην αγορά και τις αρχικές δαπάνες, αναπτύσσοντας μια license-exempt λύση χωρίς την χρονοβόρα απαίτηση λήψης άδειών ή πραγματοποίησης δημοπρασιών. Ακόμη και οι ανεπτυγμένες περιοχές μπορούν να ωφεληθούν από τις μη αδειοδοτημένες λύσεις. Μερικοί πάροχοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια τέτοια λύση για να παρέχουν δίκτυο πρόσβασης (last mile) για το σπίτι, την επιχείρηση, ή δικτύου κορμού (backhaul) [13] ή συμπληρωματικό backup δικτύων για τα αδειοδοτημένα ή συνδεδεμένα με καλώδιο δίκτυα τους. Μια μη αδειοδοτημένη λύση είναι ρυθμισμένη από την άποψη της ισχύος εξόδου μετάδοσης. Μια συσκευή ή μια υπηρεσία μπορεί

να χρησιμοποιήσει τη ζώνη οποιαδήποτε στιγμή εφ' όσον ελέγχεται επαρκώς η ισχύς εξόδου. Οι πάροχοι που ανησυχούν ιδιαίτερα για την QoS, παραδείγματος χάριν, μπορούν να διαπιστώσουν ότι μια αδειοδοτημένη λύση παρέχει σε αυτούς μεγαλύτερο έλεγχο της υπηρεσίας που προσφέρουν. Ένας πάροχος που θέλει να εξυπηρετήσει μια αναπτυσσόμενη ή μια υπανάπτυκτη αγορά με μια business class υπηρεσία μπορεί να χρησιμοποιήσει μια μη αδειοδοτημένη λύση, με το κατάλληλο σχέδιο δικτύων να περιλαμβάνει έρευνες των επιθυμητών περιοχών και εξειδικευμένες λύσεις κεραιών, για να προσφέρει συγκεκριμένα Service Level Agreements (SLA) για τις εξειδικευμένες αγορές τους. Εντούτοις, μια τέτοια λύση δεν πρέπει να θεωρηθεί ως ο αντικαταστάτης μιας αδειοδοτημένης λύσης. Κάθε μία λύση καλύπτει μια διαφορετική ανάγκη της αγοράς βασισμένη στις ανταλλαγές (tradeoffs) μεταξύ του κόστους και της QoS. Οι μη αδειοδοτημένες λύσεις και οι αδειοδοτημένες παρουσιάζουν διαφορετικά πλεονεκτήματα στους παρόχους. Η διαθεσιμότητα και των δύο επιτρέπει στους προμηθευτές και στις αναδυόμενες αγορές να καλύψουν ποικίλες ανάγκες χρήσης.

Οι πάροχοι υπηρεσιών που θέλουν να προσθέσουν την κινητικότητα στο ασύρματο ευρυζωνικό δίκτυό τους πρέπει να εξετάσουν πρώτα μια αδειοδοτημένη λύση WiMAX για βελτιωμένη QoS, έπειτα μια Wi-Fi λύση πλέγματος (Mesh) για τις εφαρμογές που απαιτούν μια άμεση κάλυψη, και έπειτα μια μη αδειοδοτημένη λύση. Μια αδειοδοτημένη λύση WiMAX προσφέρει καλύτερο έλεγχο στις μεγάλες περιοχές, ενισχυμένη εξελιξιμότητα, QoS, και ελαστικότητα για τους χρήστες, ενώ το πλέγμα Wi-Fi μπορεί να καλύψει τις μικρότερες περιοχές με χαμηλότερο κόστος και να χρησιμοποιήσει ένα πρωτόκολλο Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) για να χειριστεί τους πολλαπλούς χρήστες μέσα σε μια μικρή περιοχή. Για αυτούς τους λόγους, οι μη αδειοδοτημένες λύσεις WiMAX στρέφονται στις αγροτικές περιοχές, τις αναδυόμενες αγορές, και τις point-to-point εφαρμογές και μπορούν να παρέχουν, παραδείγματος χάριν, μια εξαιρετικά οικονομική backhaul λύση.

Οι διακυμάνσεις στον αριθμό και τη θέση των χρηστών και ο περιορισμένος έλεγχος του φάσματος που προσφέρεται από μια μη αδειοδοτημένη λύση μπορούν να οδηγήσουν σε περισσότερη παρεμβολή. Τα στατιστικά στοιχεία δικτύων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προγραμματίσουν αυτή την μεταβλητότητα. Εντούτοις, τα σχετικά με την κινητικότητα ζητήματα όπως η μετάδοση των σημάτων RF προς και από έναν κινούμενο στόχο αντιμετωπίζονται ευκολότερα χρησιμοποιώντας μια αδειοδοτημένη λύση. Επομένως, οι κινητές εφαρμογές είναι καταλληλότερες για μια αδειοδοτημένη λύση WiMAX.

1.3 Παροχές του WiMAX

Απαλλαγμένο από τα μειονεκτήματα των σημερινών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο και διατηρώντας ή αναβαθμίζοντας τα πλεονεκτήματά τους, το WiMAX είναι η λύση που όπως όλα δείχνουν θα επικρατήσει στο πολύ κοντινό μέλλον, αντικαθιστώντας ακόμη και τις οικιακές ADSL συνδέσεις. Με τον τρόπο που τα κινητά τηλέφωνα σήμερα έχουν επικρατήσει για τις ανάγκες της επικοινωνίας μας έναντι του ενσύρματου τηλεφωνικού δικτύου, με τον ίδιο τρόπο εκτιμάται από τους ειδικούς ότι πολύ σύντομα το WiMAX θα καλύπτει πολύ μεγαλύτερο ποσοστό συνδρομητών, σε σχέση με αυτούς που συνδέονται στο διαδίκτυο μέσω ενσύρματης γραμμής ADSL, ISDN ή PSTN. Το Internet πρέπει να αποτελεί ένα μέσο ενημέρωσης και επικοινωνίας προσβάσιμο ανά πάσα στιγμή από παντού, με την ίδια λογική που σήμερα ένα κινητό τηλέφωνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν από οποιοδήποτε σημείο, χωρίς πολύπλοκες διαδικασίες. Κάπως έτσι εκτιμάται ότι μελλοντικά ο χρήστης ενός φορητού υπολογιστή ή PDA θα ενεργοποιεί τη συσκευή του σε οποιοδήποτε σημείο μιας πόλης ή και ολόκληρης της χώρας του και θα είναι αμέσως έτοιμος να πλοηγηθεί στο Internet με ταχύτητες αρκετών Mbps. Όσο κι αν αυτό φαίνεται σαν ένα άπιαστο όνειρο, το WiMAX υπόσχεται να το κάνει πραγματικότητα και η εφαρμογή του σε χώρες του εξωτερικού, δείχνουν ότι το έχει κατορθώσει. Οι παροχές του είναι οι εξής:

Γρήγορη εγκατάσταση-ανάπτυξη: Συγκρινόμενο με την εγκατάσταση των καλωδιωμένων λύσεων, το WiMAX απαιτεί μικρή ή καθόλου κατασκευή ή αναμόρφωση ήδη υπάρχοντων εγκαταστάσεων. Για παράδειγμα, δεν απαιτείται εκσκαφή για την υποστήριξη των υπάρχοντων καλωδίων. Οι χειριστές που έχουν αποκτήσει άδειες να χρησιμοποιούν αδειοδοτούμενες ζώνες, ή σκοπεύουν να χρησιμοποιήσουν μία από τις μη αδειοδοτημένες ζώνες δε χρειάζονται να λογοδοτούν κάθε φορά στην κυβέρνηση. Άπαξ και η κεραία και ο αναγκαίος εξοπλισμός έχουν εγκατασταθεί, το WiMAX είναι έτοιμο να παρέχει την υπηρεσία. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η εγκατάσταση του συστήματος WiMAX μπορεί να ολοκληρωθεί σε λίγες ώρες, συγκρινόμενο με τους μήνες που χρειάζονται για άλλες λύσεις.

Ευέλικτη αρχιτεκτονική: Η τεχνολογία WiMAX υποστηρίζει πολλαπλές αρχιτεκτονικές συστημάτων, όπως Point-to-Point, Point-to-Multipoint και ευρεία κάλυψη. Το MAC του WiMAX υποστηρίζει Point-to-Point και ευρείας κάλυψης υπηρεσία με τον προγραμματισμό μιας χρονοθυρίδας (timeslot) για κάθε σταθμό υπηρεσίας. Αν υπάρχει μόνο ένας σταθμός υπηρεσίας στο δίκτυο, ο σταθμός βάσης του WiMAX θα επικοινωνεί με το σταθμό υπηρεσίας με μία βάση Point-to-Point. Ένας σταθμός βάσης σε ρυθμίσεις Point-to-Point μπορεί να χρησιμοποιεί κεραία στενότερης δέσμης ώστε να καλύψει μεγαλύτερες αποστάσεις. Επίσης παρέχει κάλυψη σε περιοχές που είναι αδύνατο να καλυφθούν με χρήση χαλκού ή οπτικής

ίνας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν συμπλήρωμα δικτύων οπτικών ινών σε τμήματα του εδάφους στα οποία το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης δικτύων οπτικών ινών είναι απαγορευτικό.

Πιο ευρεία κάλυψη: Το WiMAX δυναμικά υποστηρίζει πολλαπλά επίπεδα διαμόρφωσης, όπως BPSK, QPSK, 16-QAM και 64-QAM. Τα συστήματα WiMAX, όταν εξοπλίζονται με έναν ενισχυτή υψηλής ισχύος και λειτουργούν με μια χαμηλού επιπέδου διαμόρφωση (BPSK ή QPSK ή 16 QAM, για παράδειγμα) είναι ικανά να καλύψουν μια αρκετά μεγάλη γεωγραφική περιοχή όταν η διαδρομή ανάμεσα στο σταθμό βάσης και το σταθμό υπηρεσίας δε διακόπτεται από κάποιο εμπόδιο ενώ η 64 QAM μπορεί να εξασφαλίσει τη μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης.

Υψηλού επιπέδου ποιότητα υπηρεσίας: Το επίπεδο MAC του προτύπου είναι σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει στους χρήστες, όταν οι ίδιοι το επιθυμούν, εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης και ταυτόχρονα κίνηση best effort (καλύτερης δυνατής προσπάθειας) σε χρήστες που καλύπτονται από τον ίδιο σταθμό βάσης, κάτι που το πρότυπο IEEE 802.11 δεν μπορούσε να εξασφαλίσει. Δηλαδή, αν υποθέσουμε ότι δύο χρήστες καλύπτονται από τον ίδιο σταθμό βάσης, είναι δυνατό ο ένας χρήστης να έχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας και ο δεύτερος χρήστης να δέχεται και να στέλνει απλή IP κίνηση best effort κάτι που με το πρότυπο 802.11 δεν ήταν δυνατό. Δηλαδή χρήστες που βρισκόταν στην κάλυψη ενός Access Point (σημείου πρόσβασης) είχαν την ίδια ποιότητα υπηρεσίας.

Μειωμένο κόστος: Το WiMAX είναι βασισμένο σε ένα ανοιχτό, παγκόσμιο πρωτόκολλο. Η μαζική αποδοχή του και η χρήση chipsets χαμηλού κόστους μαζικής παραγωγής θα οδηγήσει σε δραματική μείωση του κόστους και το αποτέλεσμα του ανταγωνισμού στις τιμές θα παρέχει σημαντικές οικονομίες για τους παρόχους υπηρεσιών και τους τελικούς χρήστες. Επίσης αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος εξάπλωσης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας μιας και αποτελεί μια οικονομικότερη πρόταση, αν συγκριθεί με την οπτική ίνα, για τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας. Εξασφαλίζει ταυτόχρονα αξιοπιστία και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που απαιτούν τα δίκτυα κορμού των κινητών δικτύων επικοινωνιών.

Broadband on Demand: Πλήρης υποστήριξη για υπηρεσίες WMAN. Είναι σε θέση να υποστηρίζει περισσότερους χρήστες παρέχοντας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης κάνοντας εφικτή τη χρήση της τεχνολογίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου σε μεγάλες αποστάσεις που σε σύγκριση με τις εφαρμογές last-mile του προτύπου IEEE 802.11g δεν ήταν εφικτό.

Διαλειτουργικότητα: Το WiMAX βασίζεται σε παγκόσμια πρότυπα και πρωτόκολλα, εκτός εταιρικών παρεμβάσεων, τα οποία διευκολύνουν τους τελικούς χρήστες να

ταξιδεύουν και να χρησιμοποιούν τους σταθμούς υπηρεσίας τους σε διαφορετικές τοποθεσίες ή με διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών. Η διαλειτουργικότητα προστατεύει την πρόωρη επένδυση ενός χειριστή καθώς μπορεί να επιλέξει εξοπλισμό από διαφορετικές εταιρείες και θα συνεχίσει να μειώνει το κόστος του εξοπλισμού σαν αποτέλεσμα της μαζικής αποδοχής.

Φορητότητα: Όπως και με τα τρέχοντα κυψελωτά συστήματα, μόλις ο σταθμός υπηρεσίας του WiMAX αρχίζει τη λειτουργία του, αναγνωρίζεται, καθορίζει τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης με το σταθμό βάσης όσο ο σταθμός υπηρεσίας είναι εγγεγραμμένος στη βάση δεδομένων του συστήματος και τότε διαπραγματεύεται τα χαρακτηριστικά εκπομπής του αντίστοιχα.

Κινητικότητα: Η τροποποίηση IEEE 802.16e έχει προσθέσει χαρακτηριστικά- κλειδιά για την υποστήριξη της κινητότητας του πρωτοκόλλου. Βελτιώσεις έχουν γίνει στα φυσικά στρώματα των OFDM και OFDMA, ώστε να υποστηρίζουν συσκευές και υπηρεσίες σε ένα κινητό περιβάλλον. Αυτές οι βελτιώσεις, που περιλαμβάνουν Scalable OFDMA, MIMO και υποστήριξη για idle/sleep mode και hand-off, θα επιτρέπουν πλήρη κινητικότητα σε ταχύτητες ως και 160 χιλιόμετρα την ώρα. Το υποστηριζόμενο από το WiMAX Forum πρωτόκολλο έχει κληρονομήσει τη μοναδική NLOS επίδοση και την ανθεκτική σε πολλαπλή διαδρομή λειτουργία του OFDM, καθιστώντας το κατάλληλο για το κινητό περιβάλλον.

Υψηλή χωρητικότητα: Χρησιμοποιώντας υψηλότερη διαμόρφωση (64-QAM) και εύρος ζώνης καναλιού (τρέχουσα τιμή 7 MHz, με σχεδιασμένη ανάπτυξη προς το πλήρες εύρος ζώνης όπως διευκρινίζεται στα αντίστοιχα πρότυπα της IEEE και της ETSI), τα συστήματα WiMAX μπορούν να παρέχουν σημαντικό εύρος ζώνης στους τελικούς χρήστες.

Λειτουργία Μη-Οπτικής-Επαφής: Ο όρος NLOS συνήθως αναφέρεται σε μία ραδιοδιαδρομή με την πρώτη της ζώνη Fresnel πλήρως μπλοκαρισμένη. Το WiMAX βασίζεται στην τεχνολογία OFDM, η οποία έχει τη δυνατότητα να μεταχειρίζεται NLOS περιβάλλοντα. Η δυνατότητα αυτή βοηθάει τα προϊόντα WiMAX να μεταφέρουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης σε ένα NLOS περιβάλλον, κάτι το οποίο άλλα ασύρματα προϊόντα δεν μπορούν να κάνουν.

Υπηρεσία πολλαπλών επιπέδων: Ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται το QoS γενικά βασίζεται στο Service Level Agreement (SLA) μεταξύ της υπηρεσίας παροχής και του τελικού χρήστη. Επίσης, ένας πάροχος υπηρεσίας μπορεί να προσφέρει διαφορετικά SLAs σε διαφορετικούς εγγεγραμμένους χρήστες ή ακόμα σε διαφορετικούς χρήστες στον ίδιο σταθμό υπηρεσίας.

Βελτιωμένη συνδεσιμότητα των χρηστών: Το 802.16 κρατά περισσότερους χρήστες συνδεδεμένους λόγω των εύκαμπτων σε πλάτος καναλιών και της προσαρμοστικής διαμόρφωσής (adaptive modulation) τους. Επειδή χρησιμοποιεί στενότερα κανάλια από αυτά των 20MHz που χρησιμοποιεί το 802.11, το 802.16a μπορεί να εξυπηρετήσει τους συνδρομητές με μικρότερες απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης χωρίς σπατάλη εύρους ζώνης. Όταν οι συνδρομητές αντιμετωπίζουν θορυβώδεις καταστάσεις ή χαμηλή ισχύ σημάτων, το προσαρμοστικό σχέδιο διαμόρφωσης τους κρατά συνδεδεμένους ενώ σε άλλη περίπτωση ίσως είχαμε διακοπή της σύνδεσης.

1.4 Δομή του WiMAX

Η WiMAX τεχνολογία είναι ένα παγκόσμιο ασύρματο πρότυπο δικτύωσης που εξετάζει τη διαλειτουργικότητα στα IEEE 802.16 τυποποιημένα προϊόντα και έχει ως σκοπό να εξετάσει τις προκλήσεις που συνδέονται με τις παραδοσιακές εφαρμογές σύνδεσης μέσω καλωδίου όπως:

Backhaul (Δίκτυο κορμού): Χρήση point-to-point κεραιών για να συνδέσει όλες τις περιοχές συνδρομητών μεταξύ τους και με τους σταθμούς βάσεων σε μεγάλες αποστάσεις.

Last mile (Δίκτυο πρόσβασης): Χρήση Point-to-multipoint κεραιών για να συνδέσει τους οικιακούς ή επαγγελματικούς συνδρομητές με το σταθμό βάσεως.

Κάλυψη ευρείας περιοχής: Χρήση σταθμών βάσης, σταθμών συνδρομητών, και λύσεις Wi-Fi όπως τα δίκτυα πλέγματος, για να καλύψει μια μεγάλη περιοχή και να παρέχουν πρόσβαση στους πελάτες 802.16e. (Επίσης αναφέρονται ως hot zones.)

Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται ένα δίκτυο WiMAX, ώστε να παρέχει υπηρεσίες διαδικτύου στους συνδρομητές του, είναι αρκετά απλός. Ο πάροχος υπηρεσιών Internet εγκαθιστά σταθμούς βάσης, δηλαδή τις λεγόμενες κεραιές, οι οποίες αναλαμβάνουν τη διανομή του σήματος σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή. Στη συνέχεια ο συνδρομητής εγκαθιστά στο χώρο του τον απαραίτητο εξοπλισμό, ο οποίος μπορεί να είναι είτε ένας απλός υπολογιστής με υποστήριξη WiMAX, είτε ένας WiMAX router (δρομολογητής) αν η σύνδεση πρόκειται να μοιραστεί σε περισσότερους από έναν υπολογιστές στον ίδιο χώρο. Μάλιστα ήδη από τις αρχές του 2006 υπάρχουν στην αγορά ηλεκτρονικοί υπολογιστές με εγγενή υποστήριξη δικτύων WiMAX, με τον ίδιο τρόπο που συμβαίνει και με την τεχνολογία Wi-Fi. Σε γενικές γραμμές εκτιμάται ότι ο χρόνος που θα χρειάζεται ένας απλός χρήστης για να συνδεθεί για πρώτη φορά σε ένα δίκτυο WiMAX δεν θα ξεπερνά τα τρία λεπτά, δεδομένου ότι τα βήματα της σύνδεσης είναι πολύ απλά και συνοψίζονται στα εξής:

- 1) Ο χρήστης ενεργοποιεί την ασύρματη σύνδεση WiMAX στον ηλεκτρονικό υπολογιστή ή PDA του.
- 2) Το διαθέσιμο δίκτυο εντοπίζεται και αναφέρεται ως εντός εμβέλειας.
- 3) Ο χρήστης πληκτρολογεί ένα κλειδί εισόδου, το οποίο του έχει γνωστοποιηθεί από τον πάροχο υπηρεσιών διαδικτύου (ISP).
- 4) Η σύνδεση ολοκληρώνεται με επιτυχία και ο χρήστης είναι έτοιμος να πλοηγηθεί στο Internet.

Πρέπει να σημειώσουμε δε ότι η παραπάνω διαδικασία θα ακολουθηθεί μόνο την πρώτη φορά που θα συνδεθεί κανείς σε ένα δίκτυο WiMAX. Από τη στιγμή που οι απαραίτητες ρυθμίσεις (όνομα δικτύου, κλειδί πρόσβασης) αποθηκευτούν στη συσκευή του, τις επόμενες φορές η σύνδεση θα πραγματοποιείται σε κλάσματα του δευτερολέπτου. Ουσιαστικά, ενεργοποιώντας κάποιος τον ηλεκτρονικό του υπολογιστή, μόλις ολοκληρωθεί η εκκίνηση του λειτουργικού συστήματος, θα έχει ήδη συνδεθεί στο προκαθορισμένο δίκτυο WiMAX και κατ' επέκταση στο Internet.

Ένα σύστημα WiMAX αποτελείται από δύο μέρη:

Έναν WiMAX tower (πομπό): Ο πύργος αυτός είναι παρόμοιος σε σκεπτικό με τον κυψελωτό πύργο που χρησιμοποιείται στην κινητή τηλεφωνία. Ένας τέτοιος πομπός μπορεί να παρέχει κάλυψη σε μια ευρεία περιοχή του μεγέθους 8.000 τετραγωνικών χιλιομέτρων.

Έναν WiMAX δέκτη: Ο δέκτης και η κεραία μπορεί να είναι ένα μικρό κουτί ή μία κάρτα PCMCIA, η οποία μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα laptop όπως γίνεται και στην περίπτωση του Wi-Fi δέκτη.

Ένας σταθμός βάσης WiMAX μπορεί να συνδεθεί άμεσα με το internet(ISP Network) χρησιμοποιώντας μία καλωδιακή σύνδεση μεγάλου εύρους ζώνης (π.χ. μια γραμμή T3). Μπορεί επίσης να συνδεθεί με κάποιον άλλο σταθμό WiMAX χρησιμοποιώντας μια μικροκυματική ζεύξη οπτικής επαφής. Αυτή η σύνδεση με ένα δεύτερο πομπό(που συχνά αναφέρεται ως σύνδεση δικτύου κορμού) μαζί με την ικανότητα ενός απλού tower να καλύπτει μέχρι και 8.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα, είναι τα στοιχεία που επιτρέπουν στο WiMAX να παρέχει κάλυψη σε απομακρυσμένες περιοχές. Πιο αναλυτικά το WiMAX μπορεί να παρέχει δύο τρόπους ασύρματης υπηρεσίας:

Μη οπτικής επαφής: Μια μικρή κεραία στον υπολογιστή λαμβάνει σήμα από έναν πύργο μέσω μίας μετάδοσης μη οπτικής επαφής και στη συνέχεια ο πύργος αυτός μέσω μιας σύνδεσης δικτύου κορμού (backhaul) επικοινωνεί με τον WiMAX πομπό.

Σε αυτή τη μορφή, το WiMAX χρησιμοποιεί μπάντα χαμηλών συχνοτήτων (2-11 GHz) καθώς οι εκπομπές μικρότερου μήκους κύματος δε διακόπτονται τόσο εύκολα από φυσικά εμπόδια, αφού είναι ικανές να διαθλαστούν ή να σκεδαστούν γύρω από αυτά.

Οπτικής επαφής: Μια σταθερή κεραία τύπου πιάτου κοιτάζει άμεσα τον WiMAX πύργο από μια οροφή ή ένα ύψωμα. Η σύνδεση οπτικής επαφής είναι δυνατότερη και πιο σταθερή και έτσι είναι δυνατό να σταλούν περισσότερα δεδομένα με λιγότερα λάθη. Οι εκπομπές οπτικής επαφής χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες φτάνοντας τα 66 GHz όπου υπάρχει μικρότερη παρεμβολή και μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

1.5 Τι Είναι Ακριβώς το OFDM

Το OFDM είναι μια ειδική μορφή διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων, όπου μια ροή δεδομένων εκπέμπεται με έναν αριθμό υπο-φερόντων χαμηλότερου ρυθμού. Το OFDM είναι συνδυασμός διαμόρφωσης και πολυπλεξίας. Η πολυπλεξία γενικά αναφέρεται σε μεμονωμένα σήματα, που παράγονται από διαφορετικές πηγές. Έτσι, το πρόβλημα είναι πως θα μοιραστεί το φάσμα στους χρήστες. Στο OFDM το πρόβλημα της πολυπλεξίας εφαρμόζεται στα μεμονωμένα σήματα, αλλά αυτά τα μεμονωμένα σήματα είναι ένα υποσύνολο του κυρίως σήματος. Στο OFDM το ίδιο το σήμα χωρίζεται σε ανεξάρτητα κανάλια, διαμορφώνεται από τα δεδομένα και ξαναπολυπλέκεται για να δημιουργήσει το φέρον του OFDM.

Σε ένα συνηθισμένο σύστημα σειριακών δεδομένων, τα σύμβολα εκπέμπονται διαδοχικά, με το φάσμα συχνοτήτων καθενός συμβόλου δεδομένων να επιτρέπεται να καταλαμβάνει ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Σε ένα παράλληλο σύστημα εκπομπής δεδομένων πολλαπλά σύμβολα εκπέμπονται την ίδια στιγμή, το οποίο δίνει πιθανότητες για επίλυση πολλών προβλημάτων που αντιμετωπίζονται με τα σειριακά συστήματα. Στην OFDM διαμόρφωση, τα δεδομένα διαιρούνται ανάμεσα σε μεγάλο αριθμό κοντινά χωριζόμενων φερόντων. Αυτό ευθύνεται για το μέρος 'πολυπλεξία συχνότητας' στο OFDM. Αυτή δεν είναι μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, καθώς δεν υπάρχει κοινό μέσο για να διαμοιραστούν. Το ολικό εύρος ζώνης συμπληρώνεται με ένα ρεύμα δεδομένων. Αντί να εκπέμπονται με σειριακό τρόπο, τα δεδομένα μεταφέρονται με παράλληλο τρόπο. Μόνο ένα μικρό μέρος των δεδομένων μεταφέρεται σε κάθε φέρον και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μείωση του ρυθμού μετάδοσης ανά φέρον (όχι ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης) και κατά συνέπεια η σημαντική μείωση της επίδρασης της διασυμβολικής παρεμβολής. Σύμφωνα με αυτήν την αρχή, πολλά σχήματα διαμόρφωσης μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να διαμορφώσουν τα δεδομένα με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης σε κάθε φέρον.

Είναι ένα σημαντικό μέρος του σχεδιασμού του OFDM συστήματος το ότι το εύρος ζώνης που χρησιμοποιεί είναι μεγαλύτερο το εύρος ζώνης συνέλιξης του καναλιού εξασθένησης. Μια καλή κατανόηση των στατιστικών διάδοσης είναι αναγκαία για να σιγουρέψουμε ότι οι συνθήκες αυτές είναι οι ιδανικές. Τότε, αν και μερικά από τα φέροντα υποβαθμίζονται από το την εξασθένηση λόγω πολυδιόδευσης, η πλειονότητα των φερόντων μπορεί να ληφθούν επαρκώς. Το OFDM μπορεί να τυχαιοποιεί με επιτυχία τα λάθη ρυθμών που προκαλούνται από την εξασθένηση τύπου Rayleigh, τα οποία προκαλούνται από τον διασυμβολισμό λόγω της παραλληλοποίησης. Έτσι, αντί πολλαπλά γειτονικά σύμβολα να καταστρέφονται, πολλά σύμβολα παραμορφώνονται πολύ λίγο. Επειδή διαιρούμε το εύρος ζώνης ενός ολόκληρου καναλιού σε πολλές στενές υπο-ζώνες, η απόκριση συχνότητας για κάθε μεμονωμένη υπό-ζώνη είναι σχετικά επίπεδη (relatively flat). Καθώς κάθε υπό-κανάλι καλύπτει μόνο ένα μικρό ποσοστό του αυθεντικού εύρους ζώνης, η επανάκτηση είναι πιθανώς απλούστερη από ότι σε ένα σειριακό σύστημα δεδομένων. Ένας απλός αλγόριθμος επανάκτησης μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη μέση τετραγωνική παραμόρφωση σε κάθε υπό-κανάλι και η υλοποίηση διαφορικής κωδικοποίησης πιθανόν να προκαλεί την αποφυγή ολικού αλγορίθμου επανάκτησης. Αυτό επιτρέπει την ακριβή ανακατασκευή της πλειονότητας από αυτά, ακόμα και χωρίς FEC.

Επίσης, χρησιμοποιώντας ένα διάστημα φύλαξης, η ευαισθησία του συστήματος ως προς την εξάπλωση καθυστέρησης μπορεί να μειωθεί. Το OFDM μπορεί απλά να καθοριστεί ως μια μορφή διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων όπου ο διαχωρισμός μεταξύ των φερόντων επιλέγεται προσεκτικά έτσι ώστε κάθε υπο-φέρον να είναι ορθογώνιο με τα άλλα υπό-φέροντα. Όπως είναι γνωστό, τα ορθογώνια σήματα μπορούν να διαχωριστούν στο δέκτη με συνελικτικές τεχνικές. Έτσι, η διασυμβολική παρεμβολή ανάμεσα στα κανάλια μπορεί να εξαλειφθεί. Η ορθογωνιότητα μπορεί να επιτευχθεί με την προσεκτική επιλογή διαχωρισμού των υπό-φερόντων, όπως το να αφήνουμε το διάστημα μεταξύ των φερόντων να είναι ίσο με το αντίστροφο της χρήσιμης περιόδου συμβόλου. Για να παρέχουμε αρκετό εύρος ζώνης και να λάβουμε τα πλεονεκτήματα του συστήματος OFDM, θα ήταν καλό να συγκεντρώσουμε έναν αριθμό χρηστών ώστε να δημιουργήσουμε ένα σύστημα ευρείας ζώνης ώστε να γίνουν interleave τα δεδομένα στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας (εξαρτάται πόσο ευρύ είναι το σήμα του ενός χρήστη).

Η σημασία της ορθογωνιότητας

Το 'ορθογώνιο' μέρος του ονόματος OFDM υποδεικνύει ότι υπάρχει μια ακριβής μαθηματική σχέση μεταξύ των συχνοτήτων των φερόντων στο σύστημα. Σε ένα κανονικό FDM σύστημα, τα πολλά φέροντα είναι διαχωρισμένα με τέτοιο τρόπο ώστε τα σήματα μπορούν να ληφθούν χρησιμοποιώντας συμβατικά φίλτρα και

αποδιαμορφωτές. Σε τέτοιους δέκτες, οι ζώνες φύλαξης πρέπει να παρουσιάζονται μεταξύ των διαφορετικών φερόντων και η εισαγωγή αυτών των ζωνών φύλαξης στο πεδίο της συχνότητας έχει ως αποτέλεσμα σε μία μείωση της αποδοτικότητας του φάσματος συχνοτήτων. Είναι πιθανό πάντως να κανονίζουμε τα φέροντα σε ένα σήμα OFDM έτσι ώστε οι πλευρικές ζώνες των μεμονομένων φερόντων να επικαλύπτονται και τα σήματα να μπορούν ακόμα να λαμβάνονται χωρίς παρεμβολή γειτονικών φερόντων. Για να γίνει αυτό τα φέροντα πρέπει να είναι μαθηματικά ορθογώνια. Ο δέκτης δρα ως μια σειρά αποδιαμορφωτών, μεταφράζοντας κάθε φέρον στο DC επίπεδο. Το παραγόμενο σήμα τότε ολοκληρώνεται σε μια περίοδο συμβόλου να ανακτήσει τα δεδομένα. Αν τα άλλα φέροντα έχουν όλα συχνότητες, οι οποίες, στο πεδίο του χρόνου, έχουν ολόκληρο αριθμό κύκλων στην περίοδο συμβόλου (T), τότε η διαδικασία ολοκλήρωσης έχει ως αποτέλεσμα μηδενική συνεισφορά από όλα αυτά τα φέροντα. Έτσι, τα φέροντα είναι γραμμικά ανεξάρτητα (π.χ. ορθογώνια) αν ο διαχωρισμός των φερόντων είναι πολλαπλάσιο του $1/T$. Μαθηματικά, υποθέτουμε ότι έχουμε ένα σετ από σήματα ψ , όπου ψ_p είναι το p -οστό στοιχείο στο σετ.

Τα σήματα είναι ορθογώνια αν:

$$\int_b^a \psi_p(t) \psi_q^*(t) dt = \begin{cases} K & \text{για } p = q \\ 0 & \text{για } p \neq q \end{cases}$$

όπου το * υποδεικνύει το συζυγές μιγαδικό και το διάστημα $[a,b]$ είναι μία περίοδος συμβόλου. Μία αρκετά απλή μαθηματική εξήγηση υπάρχει, ότι οι σειρές $\sin(mx)$ για $m=1,2,\dots$ είναι ορθογώνιες σε ένα διάστημα από $-\pi$ έως π . Αρκετή από τη θεωρία μετατροπής κάνει χρήση των ορθογώνιων σειρών, αν και δεν είναι καταναγκαστικά το μόνο παράδειγμα.

Ένας από τους κύριους λόγους γιατί το OFDM είναι χρήσιμο είναι γιατί επηρεάζει την αντοχή απέναντι στην επιλεκτική εξασθένιση στη συχνότητα και την παρεμβολή στενής ζώνης. Σε ένα σύστημα με ένα φέρον μία μόνο διάλειψη μπορεί να προκαλέσει την ολική κατάρρευση της ζεύξης, αλλά σε ένα σύστημα με πολλά φέροντα, μόνο ένα μικρό ποσοστό των υπο-φερόντων θα επηρεαστεί. Τότε μπορεί να εφαρμοστεί η κωδικοποίηση διόρθωσης λαθών για να διορθώσει τα λίγα λανθασμένα υπο-φέροντα. Η διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων διέπεται από την αρχή, κατά την οποία τα δεδομένα εκπέμπονται με το να διαιρείται το εισερχόμενο ρεύμα τους σε πολλαπλά ρεύματα συμβόλων, καθένα από τα οποία έχει αρκετά μικρότερο ρυθμό συμβόλων και χρησιμοποιώντας αυτά τα υπο-ρεύματα να διαμορφώνονται πολλαπλά υπο-φέροντα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

2.1 Τα Φυσικά Στρώματα

Η πρώτη έκδοση των προτύπου 802.16 υποστήριζε περιβάλλοντα οπτικής Επαφής (LOS) στις ζώνες υψηλής συχνότητας 10-66 GHz, ενώ το πρότυπο 802.16a, σχεδιάζεται για συστήματα που λειτουργούν στις ζώνες μεταξύ 2 GHz και 11 GHz και καθορίζει το air interface ενός σταθερού (fixed) point-to-multipoint ευρυζωνικού συστήματος ασύρματης πρόσβασης παρέχοντας πολλαπλές υπηρεσίες σε ένα ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο. Η σημαντικότερη διαφορά των δύο ζωνών συχνοτήτων έγκειται στη δυνατότητα να υποστηρίζεται η Non-Line-of-Sight (Χωρίς άμεση ορατότητα) λειτουργία στις χαμηλότερες συχνότητες, κάτι που δεν είναι δυνατό στις υψηλότερες.

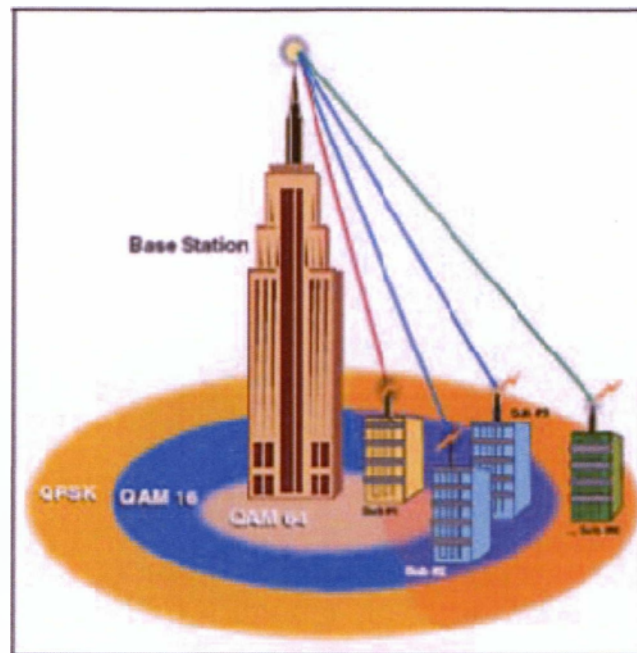
Τα περισσότερα ασύρματα επικοινωνιακά συστήματα επιδιώκουν να μπορούν να λειτουργούν σε συνθήκες μη οπτικής επαφής, σε συνθήκες δηλαδή όπου η μετάδοση γίνεται μέσω ενός μονοπατιού το οποίο διακόπτεται μερικώς στη ζώνη Fresnel συνήθως από ένα φυσικό αντικείμενο όπως κτίρια και δέντρα. Αυτή η επιδίωξη οφείλεται στο γεγονός ότι στην πραγματικότητα τις περισσότερες φορές δεν μπορεί να υπάρξει άμεση οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη λόγω των φυσικών εμποδίων αλλά και γιατί τα συστήματα που έχουν την δυνατότητα μετάδοσης σε NLOS(no line of sight) συνθήκες δεν υπόκεινται σε τόσο αυστηρούς περιορισμούς σχεδίασης και είναι πιο ευέλικτα και φθηνά στην εγκατάσταση και επέκτασή τους σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα που λειτουργούν μόνο σε LOS συνθήκες.

Το WiMAX ωστόσο, είναι μοναδικό επειδή σχεδιάστηκε εξ ολοκλήρου από την αρχή για να προσφέρει τη μέγιστη ικανότητα διαβίβασης δεδομένων στη μέγιστη απόσταση και παράλληλα να είναι 99,999% αξιόπιστο. Για να επιτευχθεί αυτό, οι σχεδιαστές (IEEE 802.16 Working Group D) βασίστηκαν σε αποδεδειγμένες τεχνολογίες για το φυσικό στρώμα όπως Orthogonal Frequency (OFDM), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) και Quadrature Amplitude Modulation (QAM), Time Division Duplex (TDD), Frequency Division Duplex (FDD):

Τετραγωνική διαμόρφωση με μετατόπιση φάσματος (Quadrature Phase-Shift Keying, QPSK): είναι το ψηφιακό σχήμα διαμόρφωσης που μεταλλάσσει τα δεδομένα αλλάζοντας τη φάση του φερόμενου κύματος. Συγκεκριμένα στην τετραγωνική χρησιμοποιούνται 4 φάσεις που διαφέρουν μεταξύ τους κατά 90°. Έτσι επιτυγχάνεται να αποστέλλονται δύο bits ανά σύμβολο. Έτσι για να κωδικοποιήσουμε τα σύμβολα 00, 01, 10, 11 τα αντιστοιχίζουμε σε συνημίτονα με διαφορά φάσης 90°.

Τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους 16 σημείων (16-Quadrature Amplitude Modulation, 16-QAM): είναι το ψηφιακό σχήμα διαμόρφωσης που μετατρέπει τα δεδομένα αλλάζοντας το πλάτος δύο φερόντων κυμάτων. Αυτά τα δύο κύματα είναι συνήθως ημιτονοειδούς μορφής και έχουν διαφορά φάσης 90° . Με την 16-QAM επιτυγχάνουμε να αποστείλουμε 4 bits ανά σύμβολο.

Τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους 64 σημείων (64-Quadrature Amplitude Modulation, 64-QAM): είναι αντίστοιχη με τα 16 σημεία, μόνο που μπορούμε να αποστείλουμε 6 bits ανά σύμβολο [2].



Σχήμα 1: Το μεγάλο πλεονέκτημα του WiMAX σε σχέση με το φυσικό επίπεδο είναι η δυνατότητά του να μεταβαίνει από ένα προφίλ ριπών σε ένα άλλο, ανάλογα με την απόσταση από τον σταθμό βάσης και από τις καιρικές συνθήκες. Κοντά στον BS, χρησιμοποιείται πιο αποδοτικό σχήμα διαμόρφωσης και έτσι απολαμβάνουμε μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Διαφορετικά χρησιμοποιούμε ένα πιο ανθεκτικό στα λάθη σχήμα.

Το υποπρότυπο IEEE 802.16a δημιούργησε την ευκαιρία για σημαντικές αλλαγές στις προδιαγραφές στρώματος PHY σε σύγκριση με τις υψηλότερες συχνότητες όπως και με σημαντικές προσθήκες στο στρώμα MAC για να καλύψει συγκεκριμένα τις ανάγκες των ζωνών 2-11 GHz. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εισαγωγής τεσσάρων νέων προδιαγραφών φυσικού στρώματος τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με το MAC επίπεδο για να παρέχουν μία αξιόπιστη από άκρο σε άκρο (end-to-end) ζεύξη. Τα WMAN πρωτόκολλα για τα WirelessMAN-OFDM και WirelessMAN OFDMA έχουν φυσικά στρώματα βασισμένα στο OFDM. Η

διαμόρφωση OFDM εκπέμπει δεδομένα ταυτόχρονα πάνω από πολλαπλές, παράλληλες υποομάδες συχνότητας και προσφέρει ικανοποιητική επίδοση κάτω από άσχημες συνθήκες ραδιοδιαύλου. Το OFDM επίσης προσφέρει μια βολική μέθοδο για να εξαλείφονται οι επιπτώσεις από τη διάδοση καθυστέρησης. Μια κυκλική επέκταση του εκπεμπομένου OFDM συμβόλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτυχία ενός διαστήματος φύλαξης μεταξύ των συμβόλων. Δεδομένου ότι το διάστημα φύλαξης υπερβαίνει την υπερβάλλουσα διάδοση καθυστέρησης του ραδιοκαναλιού, η επίπτωση της διάδοσης καθυστέρησης περιορίζεται στην επιλεκτική εξασθένιση στη συχνότητα των μεμονωμένων υποομάδων. Αυτή η εξασθένιση μπορεί να ακυρωθεί χρησιμοποιώντας έναν αντισταθμιστή καναλιού, ο οποίος παίρνει τη μορφή ενός single tap ισοσταθμιστή σε κάθε υποομάδα.

WirelessMAN-SCa (Single Carrier)

Το WirelessMAN-SCa (ή SC2 όπως είναι εναλλακτικά γνωστό) είναι μια διαμόρφωση μονού φέροντος και ορίζεται για τη ζώνη 2-11 GHz. Είναι σχεδιασμένο για κανάλια NLOS και χρησιμοποιεί την προσαρμοστική διαμόρφωση. Οι υποστηριζόμενες διαμορφώσεις περιλαμβάνουν «spread BPSK,» BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, και 256-QAM. Και οι δύο τρόποι διαίρεσης χρόνου TDD και συχνότητας FDD υποστηρίζονται, με την άνω ζεύξη να είναι TDMA, και την κάτω ζεύξη είτε TDM είτε TDMA. Η TDD είναι μια τεχνική στην οποία το σύστημα εκπέμπει και λαμβάνει μέσα στην ίδια συχνότητα, ορίζοντας χρονοθυρίδες εκπομπής και χρονοθυρίδες λήψης. Η FDD, το κάνει σε δύο διαφορετικές συχνότητες γενικώς χωριζόμενες ανά 50 έως 100 MHz εντός του φάσματος λειτουργίας.

WirelessMAN-OFDM

Το WirelessMAN-OFDM PHY βασίζεται στη διαμόρφωση OFDM και είναι σχεδιασμένο για τη NLOS λειτουργία στις ζώνες συχνοτήτων 2-11GHz. Αυτή η ασύρματη διεπαφή είναι υποχρεωτική για ζώνες απαλλαγμένες από άδειες. Αυτό το φυσικό επίπεδο ολοκληρώθηκε στις προδιαγραφές IEEE 802.16 και υιοθετήθηκε από την επιτροπή WiMAX για σταθερές (όχι κινητές) λειτουργίες και αναφέρεται συχνά ως fixed WiMAX. Το φυσικό στρώμα χρησιμοποιεί OFDM διαμόρφωση με ένα σταθερό μέγεθος FFT 256 φερόντων. Το μεταβλητό διάστημα των υποφερόντων καθορίζεται προκειμένου να υποστηριχθούν τα πολλαπλά εύρη ζώνης. Η λογική για αυτό είναι η διακύμανση στα εύρη ζώνης απαιτούμενα άδεια παγκοσμίως. Παραδείγματος χάριν, η ζώνη 3.4-3.6 GHz χρησιμοποιεί κανάλια που είναι είτε 3.5 είτε 7.0 MHz, ενώ στη ζώνη 5.725-5.850 GHz τα κανάλια είναι 10 MHz. Υπάρχουν 16 υπό- κανάλια στην κατερχόμενη ζεύξη. Το φυσικό στρώμα OFDM υποστηρίζει λειτουργίες TDD και FDD, με υποστήριξη και FDD και H-FDD σταθμών συνδρομητών. Το πρότυπο υποστηρίζει επίπεδα πολλαπλής διαμόρφωσης συμπεριλαμβάνοντας Binary Phase Shift Keying (BPSK), QPSK, 16-QAM, και 64-QAM. Τέλος, το Φυσικό Στρώμα υποστηρίζει (προαιρετικά) ανομοιότητα εκπομπών στην κατερχόμενη ζεύξη

χρησιμοποιώντας Space Time Coding (STC) και AAS με Spatial Division Multiple Access (SDMA). Το σχέδιο ανομοιότητας εκπομπών χρησιμοποιεί δύο κεραίες στο σταθμό βάσης για να εκπέμψει ένα σήμα κωδικοποιημένο κατά STC για να παρέχει τις απολαβές που προέρχονται από την ανομοιότητα δεύτερης τάξης. Κάθε μια από τις δύο κεραίες εκπέμπει ένα διαφορετικό σύμβολο (δύο διαφορετικά σύμβολα) στο χρόνο του πρώτου συμβόλου. Τότε οι δύο κεραίες εκπέμπουν τον σύνθετο συνδυασμό των ίδιων δύο συμβόλων στο χρόνο του δευτέρου συμβόλου. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι ο ίδιος και χωρίς ανομοιότητα εκπομπής.

WirelessMAN-OFDMA

Φυσικό επίπεδο με χρήση ενός FFT 2048 σημείων γρήγορου μετασχηματισμού Fourier βασισμένο στην τεχνική διαμόρφωσης OFDMA (τεχνική OFDM πολλαπλής πρόσβασης) για σημείο προς πολλαπλά σημεία σε συνθήκες NLOS, στην περιοχή συχνοτήτων 2-11 GHz. Εξαιτίας των απαιτήσεων διάδοσης υποστηρίζεται η χρήση συστημάτων AAS. Στις προδιαγραφές 802.16e-2005 αυτό το φυσικό επίπεδο τροποποιήθηκε σε SOFDMA (scalable OFDMA), όπου το μέγεθος του FFT είναι μεταβλητό και μπορεί να πάρει μία από τις ακόλουθες τιμές: 128,512,1024 και 2048. Το μεταβλητό μέγεθος του FFT έχει σαν αποτέλεσμα την βέλτιστη λειτουργία / υλοποίηση του συστήματος πάνω σε ένα ευρύ φάσμα εύρους ζώνης καναλιών και ραδιοσυνθηκών. Αυτό το φυσικό επίπεδο υιοθετήθηκε από τη WiMAX για κινητές και φορητές λειτουργίες και αναφέρεται ως mobile WiMAX. Υποστηρίζει υπό καναλοποίηση σε UL και DL. Το πρότυπο υποστηρίζει πέντε διαφορετικά σχέδια υπό-καναλοποίησης. Το Φυσικό Στρώμα OFDMA υποστηρίζει λειτουργίες και TDD και FDD. Επίσης υποστηρίζονται τα ίδια επίπεδα διαμόρφωσης. Υποστηρίζονται κωδικοποίηση STC και σύστημα AAS με SDMA, κατά τη συνήθη μέθοδο πολλαπλής εισόδου, πολλαπλής εξόδου (Multiple Input, Multiple Output). Η MIMO περιλαμβάνει έναν αριθμό τεχνικών για την αξιοποίηση πολλαπλών κεραιών στον σταθμό βάσης και στο σταθμό συνδρομητή με σκοπό να αυξηθεί η χωρητικότητα και το βεληνεκές του καναλιού. Η δομή του πλαισίου στο Φυσικό Στρώμα OFDMA είναι όμοια με αυτήν του Φυσικού Στρώματος OFDM. Οι αξιοσημείωτες εξαιρέσεις είναι ότι η υπό-καναλοποίηση ορίζεται και στο DL και στο UL, έτσι μηνύματα μετάδοσης εκπέμπονται μερικές φορές ταυτόχρονα (σε διαφορετικά υπό-κανάλια) σαν δεδομένα. Ακόμη, επειδή ορίζεται ένα πλήθος διαφορετικών σχεδίων δόμησης της υπό-καναλοποίησης, το πλαίσιο διαιρείται σε κάποιες ζώνες που η κάθε μια χρησιμοποιεί ένα διαφορετικό σχέδιο υπό-καναλοποίησης. Το στρώμα MAC είναι υπεύθυνο για τη διαίρεση του πλαισίου σε ζώνες και την επικοινωνία αυτής της δομής στους σταθμούς συνδρομητών σε DL-MAP και UL-MAP. Όπως και στο Φυσικό Στρώμα OFDM, υπάρχουν προαιρετικές ζώνες ανομοιότητας εκπομπής και AAS, καθώς και μια ζώνη MIMO.

WirelessHUMAN-OFDM

Το WirelessHUMAN είναι όμοιο με τα προαναφερθέντα σχέδια δόμησης κατά OFDM και επικεντρώνεται σε συσκευές UNII (Unlicensed National Information Infrastructure) και άλλες μη αδειοδοτημένες ζώνες.

FDD-TDD

Σε ένα FDD σύστημα, τα κανάλια άνω ζεύξης (uplink) και κάτω ζεύξης (downlink) βρίσκονται σε διαφορετικές συχνότητες και τα δεδομένα κάτω ζεύξης μπορούν να μεταδοθούν σε ριπές. Ένα σταθερής διάρκειας πλαίσιο χρησιμοποιείται και για τις μεταδόσεις άνω ζεύξης και για τις κάτω ζεύξης, γεγονός που διευκολύνει τη χρήση διαφορετικών τύπων διαμόρφωσης. Επίσης επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση των full-duplex συνδρομητικών σταθμών και προαιρετικά των half-duplex. Όταν χρησιμοποιούνται half-duplex συνδρομητικοί σταθμοί, ο ελεγκτής του εύρους ζώνης δεν κατανέμει άνω ζεύξης εύρος ζώνης τη στιγμή που αναμένεται η λήψη δεδομένων στο κανάλι κάτω ζεύξης. Το γεγονός ότι τα δύο κανάλια χρησιμοποιούν σταθερής διάρκειας πλαίσιο απλοποιεί τους αλγόριθμους κατανομής εύρους ζώνης. Ένας full-duplex συνδρομητικός σταθμός έχει τη δυνατότητα να ακούει συνεχώς το κανάλι κάτω ζεύξης, ενώ ο half-duplex συνδρομητικός σταθμός μπορεί να ακούει το κανάλι κάτω ζεύξης μόνο όταν δεν χρησιμοποιείται για μετάδοση το κανάλι άνω ζεύξης.

Στην TDD περίπτωση, οι μεταδόσεις άνω και κάτω ζεύξης πραγματοποιούνται σε διαφορετικούς χρόνους και συνήθως χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα αλλά χωρίζονται στο πεδίο του χρόνου. Το TDD πλαίσιο έχει συγκεκριμένη διάρκεια και αποτελείται από ένα υποπλαίσιο κάτω ζεύξης και ένα άνω ζεύξης. Το πλαίσιο χωρίζεται σε ακέραιο αριθμό φυσικών σχισμών που βοηθά στο εύκολο χώρισμα του εύρους ζώνης. Η TDD πλαίσιοποίηση είναι προσαρμοστική με την έννοια ότι το εύρος ζώνης που κατανέμεται στο κανάλι κάτω ζεύξης σε σχέση με το αντίστοιχο της άνω ζεύξης, μπορεί να ποικίλλει. Ο διαχωρισμός μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης αποτελεί ένα σύστημα παραμέτρων που ελέγχεται από ανώτερα στρώματα.

TTG-RTG

Το TTG είναι ένα κενό μεταξύ της κάτω και άνω ζεύξης ριπής που ακολουθεί. Αυτό το κενό παρέχει χρόνο στο σταθμό βάσης ώστε να μεταπέσει από τη διαμόρφωση πομπού στην αντίστοιχη του δέκτη και στους συνδρομητικούς σταθμούς να μεταπέσουν από τη διαμόρφωση του δέκτη σε αυτή του πομπού. Κατά τη διάρκειά του, ο σταθμός βάσης και οι συνδρομητικοί σταθμοί δεν εκπέμπουν διαμορφωμένα δεδομένα αλλά απλώς επιτρέπουν στις κεραίες πομπού/δέκτη(Tx/Rx) και στον τομέα λήψης του σταθμού βάσης να ενεργοποιηθούν. Μετά το κενό, ο δέκτης σταθμός βάσης πρέπει να κοιτάξει για τα πρώτα σύμβολα της ριπής άνω ζεύξης. Το χάσμα έχει διάρκεια ακέραιο πολλαπλάσιο της διάρκειας των χρονοσχισμών, και

αρχίζει στην έναρξη μίας χρονοσχισμής. Κατά αντιστοιχία, υπάρχει το RTG (Receive Transition Gap) που είναι το κενό μεταξύ της άνω και κάτω ζεύξης που ακολουθεί.

Από τα παραπάνω φυσικά επίπεδα, τα δύο βασισμένα στην τεχνική διαμόρφωσης OFDM είναι τα πιο κατάλληλα για λειτουργία σε NLOS συνθήκες εξαιτίας της απλότητας ισοστάθμισης (equalization) που προσφέρουν τα σήματα πολλαπλών φορέων.

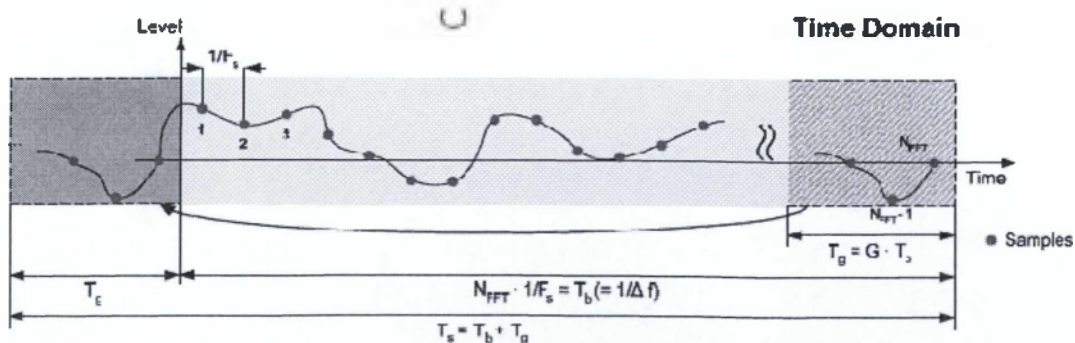
Τώρα από αυτά τα δύο φυσικά επίπεδα, το Wireless MAN OFDM με τους 256 φορείς φαίνεται να ευνοείται σε σχέση με τους 2048 φορείς από την κοινότητα των κατασκευαστών για διάφορους λόγους όπως είναι το χαμηλότερο PAR (peak to average ratio), οι πιο γρήγοροι υπολογισμοί στον μετασχηματισμό FFT καθώς και οι λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις, όσον αφορά τον συγχρονισμό της συχνότητας.

Σε αυτήν την εργασία θα ασχοληθούμε με το φυσικό επίπεδο WirelessMAN – OFDM, 256 φορέων.

2.2 Περιγραφή του Συμβόλου OFDM

Πεδίο του χρόνου

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) παράγει την κυματομορφή OFDM. Η χρονική διάρκεια T_b αναφέρεται ως ο χρήσιμος χρόνος συμβόλου. Ένα αντίγραφο του τελευταίου τμήματος της χρήσιμης περιόδου συμβόλου, που καλείται κυκλικό πρόθεμα (CP), επαναλαμβάνεται σε χρονικό διάστημα T_g (Guard Time- διάστημα ασφαλείας) χρησιμοποιείται για να συλλέξουμε σωστά τα πολυδιαδρομικά σήματα, διατηρώντας την ορθογωνιότητα των τόνων. Τα δύο μαζί αναφέρονται ως χρόνος συμβόλου T_s . Το σχήμα 2 επεξηγεί αυτήν την δομή.



Σχήμα 2: Το σύμβολο OFDM στο πεδίο του χρόνου

Η ενέργεια του πομπού αυξάνεται με την αύξηση του διαστήματος ασφαλείας ενώ η ενέργεια του δέκτη παραμένει σταθερή, οπότε υπάρχει απώλεια στον σηματοθορυβικό λόγο SNR της τάξης του $10 \log\{1 - T_g / (T_b + T_g)\}$ db. Το κυκλικό

πρόθεμα και η απώλεια του SNR μπορούν να μειωθούν με την αύξηση του μεγέθους του FFT, η οποία όμως μεταξύ των άλλων θα επηρεάσει την ευαισθησία του συστήματος στο θόρυβο φάσης που προκαλούν οι ταλαντωτές. Χρησιμοποιώντας κυκλική επέκταση (cyclic extension), τα δείγματα που απαιτούνται για την εκτέλεση του FFT στο δέκτη μπορούν να ληφθούν από οποιοδήποτε σημείο του μήκους του επιμηκυμένου συμβόλου. Το παραπάνω παρέχει ανοσία σε παρεμβολή λόγω πολυδιάσχυσης καθώς και ανοχή σε σφάλματα συγχρονισμού συμβόλων. Κατά την έναρξη της επικοινωνίας, ένας συνδρομητικός σταθμός πρέπει να ψάξει όλες τις πιθανές τιμές του CP μέχρι να βρει την τιμή του CP που χρησιμοποιεί ο σταθμός βάσης. Ο συνδρομητικός σταθμός πρέπει να χρησιμοποιήσει το ίδιο CP κατά την άνω ζεύξη. Από τη στιγμή που ένα CP επιλεγεί από τον σταθμό βάσης για λειτουργία κατά την κάτω ζεύξη, αυτό δεν πρέπει να αλλάξει. Αλλαγή του CP θα αναγκάσει όλους τους συνδρομητικούς σταθμούς να επανασυγχρονιστούν με τον σταθμό βάσης.

Πεδίο συχνότητας

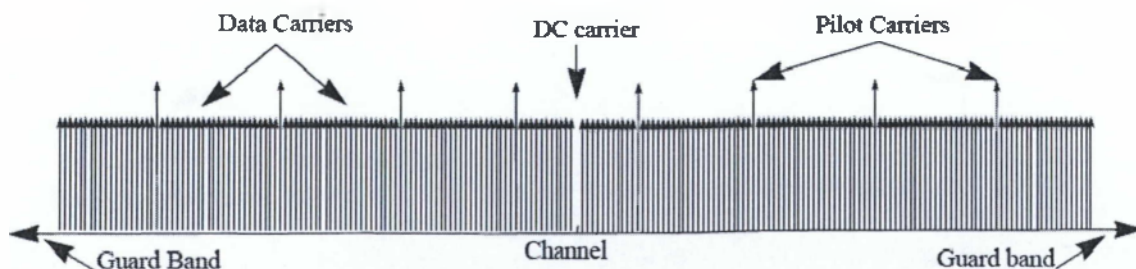
Ένα σύμβολο OFDM (Σχήμα 2) αποτελείται από φέροντα, ο αριθμός των οποίων καθορίζεται από το μέγεθος του χρησιμοποιούμενου FFT. Χρησιμοποιούνται τρεις τύποι φερόντων:

Φέροντα δεδομένων: Για μετάδοση δεδομένων

Φέροντα πιλοτικά: Για ποικίλους εκτιμητικούς σκοπούς

Φέροντα μηδενικά: Καθόλου εκπομπή, για τις ζώνες φύλαξης και το DC φέρον

Ο σκοπός των ζωνών φύλαξης είναι να επιτρέπουν στο σήμα να φθίνει φυσικά και να δημιουργούν το σχήμα του «brick wall» FFT, που παρουσιάζεται στο σχήμα 3. Αυτό επίσης συνεισφέρει στην ακύρωση της διακαναλικής παρεμβολής Inter-Channel Interference.



Σχήμα 3: Το σύμβολο OFDM στο πεδίο της συχνότητας

Το OFDM σύμβολο αποτελείται λοιπόν από το κυκλικό πρόθεμα και στη συνέχεια ακολουθούν όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3: η guard band των υψηλών συχνοτήτων, τα χρήσιμα δεδομένα μαζί με τους πιλότους, ο DC φορέας και τέλος τα

υπόλοιπα χρήσιμα δεδομένα, οι πιλότοι και η guard band των χαμηλών συχνοτήτων.

Ένας ορισμένος αριθμός τέτοιων OFDM συμβόλων, τα οποία περιέχουν τα δεδομένα του χρήστη τοποθετούνται μαζί και σχηματίζουν ένα πλαίσιο (frame). Ωστόσο, το πλαίσιο δεν είναι έτοιμο για να μεταδοθεί στο κανάλι. Το πρότυπο ορίζει ότι ένας αριθμός προκαθορισμένων OFDM συμβόλων πρέπει να προταχθεί. Το σύνολο αυτό των συμβόλων ονομάζεται preamble. Το preamble και το πλαίσιο αναφέρονται μαζί ως ριπή του φυσικού επιπέδου (physical burst/ PHY burst). Πρέπει να αναφερθεί ότι η μετάδοση γίνεται πάντα με ριπές.

Παράμετροι συμβόλου OFDM και εκπεμπόμενο σήμα

Καθορισμός πρωτογενών παραμέτρων:

Τέσσερις πρωτογενείς παράμετροι χαρακτηρίζουν το σύμβολο OFDM:

-BW: Το εύρος ζώνης του καναλιού

-Nused: Αριθμός χρησιμοποιούμενων υπο-φερόντων

-n: Παράγοντας δειγματοληψίας. Αυτή η παράμετρος, σε συνδυασμό με τα BW και Nused καθορίζει το διάστημα μεταξύ των υπο-φερόντων.

-G: Ο λόγος του cyclic prefix προς τον ωφέλιμο χρόνο.

Οι ακόλουθες παράμετροι καθορίζονται σε σχέση με τις προαναφερθείσες παραμέτρους της προηγούμενης παραγράφου.

N_{FFT} : είναι η μικρότερη δύναμη του δύο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ώστε να είναι μεγαλύτερη από το N_{used} .

Συχνότητα δειγματοληψίας (Sampling Frequency): $F_s = \text{floor}(n \cdot BW / 8000) \cdot 8000$

Κενό μεταξύ των φορέων (Subcarrier spacing): $\Delta f = F_s / N_{FFT}$

Χρήσιμος χρόνος συμβόλου (Useful symbol time): $T_b = 1 / \Delta f$

Χρόνος ασφαλείας CP (CP Time): $T_g = (T_g / T_b) \cdot T_b$

Συνολικός χρόνος (OFDM symbol time): $T_s = T_b + T_g$

Χρόνος δειγματοληψίας (Sampling time): T_b / N_{FFT}

Η επόμενη εξίσωση αναπαριστά την τάση του εκπεμπόμενου σήματος στην κεραία σαν συνάρτηση του χρόνου κατά τη διάρκεια κάθε OFDM συμβόλου.

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{\substack{k=-\frac{N_{used}}{2} \\ k \neq 0}}^{N_{used}/2} c_k * e^{j2\pi k \Delta f (t - T_g)} \right\}$$

Όπου:

t : είναι ο χρόνος που έχει διανυθεί από την αρχή του OFDM συμβόλου υπό εξέταση, με $0 < t < T_s$.

c_k : είναι ένας μιγαδικός αριθμός, τα δεδομένα που είναι να εκπεμφθούν με το υπο-φέρον του οποίου ο δείκτης συχνότητας είναι k , κατά τη διάρκεια του υπό εξέταση OFDM συμβόλου. Καθορίζει ένα σημείο σε έναν αστερισμό QAM. Στην subchannelized εκπομπή, το c_k είναι μηδέν για όλα τα subcarriers.

Παράμετροι του εκπεμπόμενου σήματος

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τιμές των παραμέτρων του εκπεμπόμενου σήματος.

Παράμετρος	Τιμές
N_{FFT}	256
N_{USED}	200 (192 δεδομένα χρήστη + 8 πιλότοι)
F_s/BW	8/7 για ζώνες συχνοτήτων χωρίς άδεια και απαιτούμενες άδεια με εύρος ζώνης πολλαπλάσιο των 1,75 MHz 7/6 για άλλα εύρη ζώνης
(T_G/T_B)	1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Αριθμός των φερόντων φύλαξης με την χαμηλότερη συχνότητα	28
Αριθμός των φερόντων φύλαξης με την υψηλότερη συχνότητα	27
Ο αριθμός του δείκτη για την συχνότητα των φερόντων φύλαξης	-128, -127..., -101 +101, +102..., +127
Ο αριθμός του δείκτη για την συχνότητα των πιλοτικών φερόντων	-84, -60, -36, -12, 12, 36, 60, 84
Αριθμός υποκαναλιών: Κατανομή των δεικτών των συχνοτήτων για τα φέροντα δεδομένων	1: {-88, ..., -76}, {-50, ..., -39}, {1, ..., 13}, {64, ..., 75} 2: {-63, ..., -51}, {-25, ..., -14}, {26, ..., 38}, {89, ..., 100} 3: {-100, ..., -89}, {-38, ..., -26}, {14, ..., 25}, {51, ..., 63} 4: {-75, ..., -64}, {-13, ..., -1}, {39, ..., 50}, {76, ..., 88}

Πίνακας 1: Παράμετροι του εκπεμπόμενου σήματος

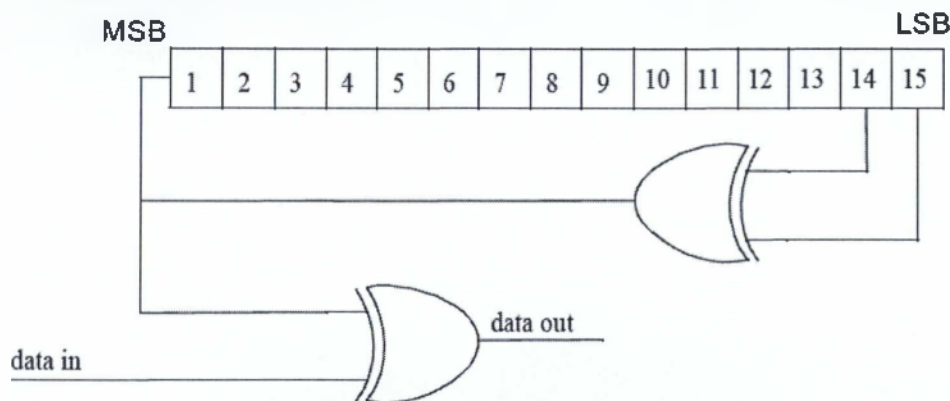
2.3 Κωδικοποίηση Καναλιού

Η κωδικοποίηση του διαύλου γίνεται σε τρία διαδοχικά βήματα: παραγωγή τυχαίων αριθμών (randomization), FEC (Forward Error Coding) και interleaving (μπλόκ διασυμβολισμού). Οι συμπληρωματικές διαδικασίες εφαρμόζονται με αντίστροφη σειρά κατά τη λήψη.

Παραγωγή τυχαίων αριθμών (Randomization)

Η παραγωγή τυχαίων αριθμών των δεδομένων εκτελείται σε κάθε σειρά εκπεμπόμενων δεδομένων στην άνω και στην κάτω ζεύξη. Η διαδικασία της παραγωγής τυχαίων αριθμών χρησιμοποιείται έτσι ώστε να μειωθεί η πιθανότητα μετάδοσης μη-διαμορφωμένων φορέων. Η παραγωγή τυχαίων αριθμών εκτελείται σε κάθε περίπτωση (κάτω και άνω ζεύξη), το οποίο σημαίνει ότι για κάθε σετ δεδομένων (Sub-Channels στο πεδίο της συχνότητας και σύμβολα OFDM στο πεδίο του χρόνου) ο τυχαιοποιητής θα πρέπει να χρησιμοποιείται ανεξάρτητα. Αν η ποσότητα των δεδομένων προς εκπομπή δεν καλύπτει το χρονικό πλαίσιο που έχει δεσμευτεί, τότε εφαρμόζεται η διαδικασία του padding με το 0xFF ('γέμισμα με 1') στο τέλος του μπλοκ εκπομπής μέχρι την ποσότητα των δεδομένων που έχουν δεσμευτεί μείον ενός byte, το οποίο φυλάσσεται για την εισαγωγή ενός byte ουράς από το FEC. Ο καταχωρητής ολίσθησης του τυχαιοποιητή πρέπει να αρχικοποιείται για κάθε νέα δέσμευση δεδομένων.

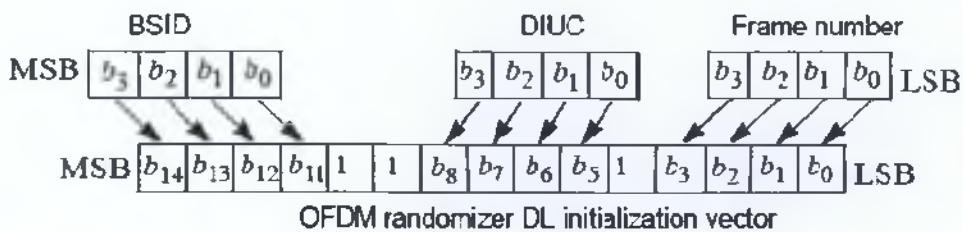
Η γεννήτρια PRBS ψευδοτυχαίας δυαδικής ακολουθίας είναι η $1+x^{14}+x^{15}$ όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4. Κάθε byte δεδομένων προς εκπομπή πρέπει να εισέρχεται διαδοχικά στον τυχαιοποιητή, με το MSB πρώτο. Οι προπομποί (preambles) και οι πιλότοι δεν τυχαιοποιούνται. Η τιμή του seed (σπόρου γεννήτριας) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τυχαίων bits, τα οποία συνδυάζονται με μια XOR πύλη με τη σειριακή ροή δεδομένων κάθε μπλοκ δεδομένων. Η ακολουθία του τυχαιοποιητή εφαρμόζεται μόνο στα bits πληροφορίας.



Σχήμα 4: Η λειτουργία της γεννήτριας PRBS

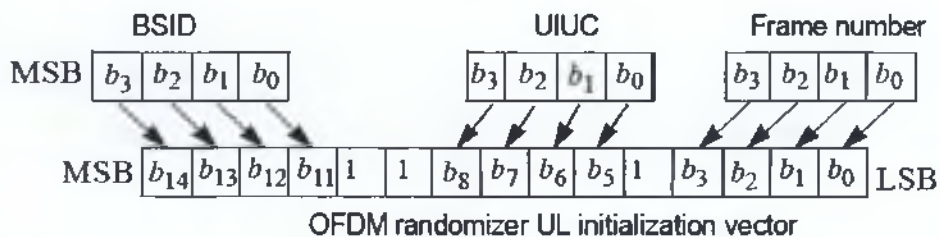
Τα bits που παράγονται από τον τυχαιοποιητή εφαρμόζονται στον κωδικοποιητή (encoder). Στην κάτω ζεύξη, ο τυχαιοποιητής πρέπει να ξανααρχικοποιείται στην αρχή κάθε πλαισίου με την ακολουθία 1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0. Ο τυχαιοποιητής δεν πρέπει να επαναφέρεται στην αρχή του πρώτου πλαισίου δεδομένων. Στην αρχή συνεχόμενων πλαισίων, ο τυχαιοποιητής πρέπει να αρχικοποιείται με το διάνυσμα που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5. Ο αριθμός πλαισίου που

χρησιμοποιείται για την αρχικοποίηση αναφέρεται στο πλαίσιο στο οποίο το ρεύμα της κάτω ζεύξης εκπέμπεται.



Σχήμα 5: Η λειτουργία του τυχαιοποιητή σε DL

Στην άνω ζεύξη, ο τυχαιοποιητής αρχικοποιείται με το διάνυσμα που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 6. Ο αριθμός πλαισίου που χρησιμοποιείται για την αρχικοποίηση είναι αυτό του πλαισίου στο οποίο ο χάρτης ροής της άνω ζεύξης εκπέμφθηκε.



Σχήμα 6: Η λειτουργία του τυχαιοποιητή σε UL

Εμπροσθόδοτη διόρθωση σφάλματος (FEC)

Προτού περάσουμε στην ανάλυση των προδιαγραφών της εμπροσθόδοτης διόρθωσης σφάλματος (FEC) όπως αυτή ορίζεται στο πρότυπο, είναι χρήσιμο να γίνει μία σύντομη αναφορά στους συναλυσόμενους κώδικες (concatenated codes) καθώς μια τέτοια μορφή κώδικα χρησιμοποιεί και το WiMAX.

Ένας συναλυσόμενος κώδικας είναι αυτός που χρησιμοποιεί δύο στάδια κωδικοποίησης, μία εσωτερική κωδικοποίηση και μία εξωτερική κωδικοποίηση για να επιτύχει την επιθυμητή απόδοση λάθους. Ο εσωτερικός κώδικας, αυτός δηλαδή που βρίσκεται πριν από τον διαμορφωτή και το κανάλι, χρησιμοποιείται για να διορθώσει τα περισσότερα από τα λάθη κατά ριπές που εισάγει το κανάλι. Ο εξωτερικός κώδικας ο οποίος είναι συνήθως ένας υψηλότερου ρυθμού κώδικας (καθώς εισάγει μικρότερο πλεονασμό) μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης λάθους στο επιθυμητό επίπεδο.

Ο πρωταρχικός λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούμε τους concatenated κώδικες είναι για να πετύχουμε ένα χαμηλό ρυθμό λάθους έχοντας παράλληλα μικρότερη πολυπλοκότητα υλοποίησης σε σχέση με αυτή που απαιτείται από μία μοναδική

διαδικασία κωδικοποίησης. Εφαρμόζεται λοιπόν αρχικά ο συνελικτικός κώδικας με λογισμική απόφαση (soft decision) ο οποίος αποδίδει καλά σε σχετικά χαμηλά SNRs στην είσοδο και στην συνέχεια εφαρμόζεται ο μπλοκ κώδικας με υλισμική απόφαση (hard decision), ο οποίος «καθαρίζει» τα σχετικά λίγα εναπομείναντα λάθη στην έξοδο των αποκωδικοποιημένων bits του συνελικτικού αποκωδικοποιητή. Συνήθως ο εσωτερικός κώδικας είναι ένας συνελικτικός κώδικας και ο εξωτερικός είναι ένας μπλοκ κώδικας και στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο κώδικας Reed Solomon. Αυτό ακριβώς συμβαίνει και στο WiMAX.

Το WiMAX χρησιμοποιεί την λεγόμενη FEC κωδικοποίηση (forward error correction) η οποία και αποτελείται από τον συνδυασμό ενός εξωτερικού κώδικα Reed-Solomon και ενός εσωτερικού συνελικτικού κώδικα συμβατού ρυθμού. Υπάρχει επίσης προαιρετική χρήση turbo συνελικτικού κώδικα (Convolutional Turbo Coding CTC) και Block Turbo Coding (BTC) με την οποία όμως δεν θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία. Η κωδικοποίηση επιτυγχάνεται περνώντας πρώτα τα δεδομένα σε μορφή μπλοκ μέσα από τον RS κωδικοποιητή και στη συνέχεια μέσα από τον συνελικτικό κώδικα (CC). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι στο τέλος κάθε εκχώρησης δεδομένων απαιτείται από το πρότυπο να τοποθετηθούν οχτώ μηδενικά bits. Αυτό το byte ουράς (tail byte) πρέπει να τοποθετηθεί όμως μετά την παραγωγή τυχαίων αριθμών. Στον RS κωδικοποιητή, τα πλεονάζοντα bits στέλνονται πριν από τα bits εισόδου, κρατώντας πάντα το tail byte στο τέλος. Οι ιδιότητες του κώδικα Reed-Solomon τον κάνουν κατάλληλο για εφαρμογές όπου μπορούν να εμφανιστούν λάθη κατά ριπές. Η διόρθωση λάθους με χρήση του κώδικα Reed-Solomon είναι μία τεχνική κωδικοποίησης η οποία λειτουργεί δημιουργώντας πρώτα ένα πολυώνυμο από τα δεδομένα σύμβολα που πρόκειται να μεταδοθούν και στέλνει στη συνέχεια μία υπερδειγματοληπτούμενη έκδοση αυτού του πολυωνύμου αντί για τα αρχικά-πραγματικά σύμβολα. Ο ρυθμός κωδικοποίησης Συνελικτικού-Reed-Solomon κώδικα είναι $\frac{1}{2}$ και πάντα αυτός χρησιμοποιείται σαν coding mode όταν ζητείται πρόσβαση στο δίκτυο και στην FCH(Frame Control Header) ριπή. Η κωδικοποίηση εκτελείται πρώτα περνώντας τα δεδομένα σε σχήμα μπλοκ μέσω του RS κωδικοποιητή και στη συνέχεια περνώντας τα μέσω ενός με μηδενικά-τερματιζόμενο συνελικτικό κωδικοποιητή.

Ένας κώδικας Reed-Solomon ορίζεται ως $RS(N, K, T)$ με l -bit σύμβολα δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι ο κωδικοποιητής παίρνει K σύμβολα δεδομένων των l -bit το καθένα και προσθέτει $2T$ σύμβολα ισοτιμίας (parity) για να δομήσει μία κωδικολέξη των συμβόλων. Έτσι τα N, K, T μπορούν να οριστούν ως:

N: αριθμός των συνολικών bytes μετά την κωδικοποίηση.

K: αριθμός των data- bytes πριν την κωδικοποίηση.

T: αριθμός των data- bytes που μπορούν να διορθωθούν.

Η ικανότητα διόρθωσης λάθους οποιουδήποτε RS κώδικα ορίζεται από το μέτρο πλεονασμού σε κάθε μπλοκ το οποίο δίνεται από τη σχέση $(N-K)$. Αν η θέση των λανθασμένων συμβόλων δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων τότε ο Reed-Solomon κώδικας μπορεί να διορθώσει μέχρι T σύμβολα, όπου το T μπορεί να εκφραστεί ως $T=(N-K)/2$.

Όπως διευκρινίζεται στο πρότυπο η κωδικοποίηση RS προέρχεται από έναν συστηματικό $RS(N=255, K=239, T=8)$ κώδικα που χρησιμοποιεί $GF(2^8)$.

Τα GF είναι τα γνωστά Galois-Fields [3] και προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι αρχές κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης του κώδικα Reed-Solomon θα ήταν καλό να ασχοληθεί κανείς με την περιοχή των πεπερασμένων πεδίων, Galois Fields. Εδώ απλώς αναφέρουμε ότι για κάθε πρώτο αριθμό p , υπάρχει ένα πεπερασμένο πεδίο που συμβολίζεται με $GF(p)$ το οποίο περιέχει p στοιχεία. Είναι δυνατό να επεκτείνουμε το $GF(p)$ σε ένα πεδίο με στοιχεία, το οποίο καλείται επέκταση πεδίου του GF και συμβολίζεται με $GF(p^m)$, με έναν μη μηδενικό ακέραιο αριθμό. Πρέπει να σημειωθεί ότι η επέκταση πεδίου $GF(p^m)$ περιέχει ένα υποσύνολο των στοιχείων του $GF(p)$.

Για την κατασκευή των κωδικών Reed-Solomon (RS) χρησιμοποιούνται σύμβολα από την επέκταση πεδίου $GF(2^m)$. Για την δημιουργία αυτού του πεδίου χρησιμοποιείται μια ειδική κατηγορία πολυωνύμων που ονομάζονται πολυώνυμα γεννήτριας πεδίου (primitive polynomial) και έχουν την μορφή της (2.2) καθώς και πολυώνυμα γεννήτριας κώδικα (generator polynomial) τα οποία υπολογίζουν τα σύμβολα ισοτιμίας και έχουν την μορφή της (2.1). Για τον συστηματικό κώδικα RS που χρησιμοποιείται λοιπόν στο πρότυπο, το πολυώνυμο της γεννήτριας κώδικα $g(x)$ και το πολυώνυμο της γεννήτριας πεδίου $p(x)$ δίνονται από την (2.1) και (2.2), όπου λ είναι το primitive στοιχείο του πεδίου Galois πάνω στην οποία ορίζεται το μήνυμα εισόδου.

$$\text{Code Generator Polynomial: } g(x)=(x+\lambda^0)(x+\lambda^1)(x+\lambda^2)\dots(x+\lambda^{2T-1}), \quad \lambda = 02_{\text{HEX}} \quad (2.1)$$

$$\text{Field Generator Polynomial: } p(x)=x^8+x^4+x^3+x^2+1 \quad (2.2)$$

Για να γίνει τώρα αυτός ο κώδικας πιο ευέλικτος, δηλαδή να επιτρέπει ποικίλα μεγέθη μπλοκ καθώς και ποικίλες δυνατότητες διόρθωσης λαθών, υφίσταται τη διαδικασία του shortening (δηλαδή της αλλαγής του μεγέθους του) και τη διαδικασία του puncturing (περικοπή).

Όταν ένα μπλοκ μειωθεί σε K' bytes δεδομένων τοποθετούνται $239-K'$ μηδενικά bytes σαν πρόθεμα, έτσι ώστε στην είσοδο του RS να έχουμε πάντα 239 bytes

δεδομένων, τα οποία όμως μετά την κωδικοποίηση τα αγνοούμε. Όταν μια κωδική λέξη μικραίνει τόσο ώστε να επιτρέψει τη διόρθωση T' bytes, μόνο τα πρώτα $2T'$ από τα συνολικά 16 bytes παράγονται. Αυτή η bit/byte μετατροπή γίνεται με πρώτο ψηφίο το MSB. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία του shortening, ο αριθμός των συμβόλων που μπαίνουν και βγαίνουν από τον κωδικοποιητή RS αλλάζει, καθώς επίσης αλλάζει και ο αριθμός των συμβόλων που μπορούν να διορθωθούν.

Συνελικτικός Κώδικας

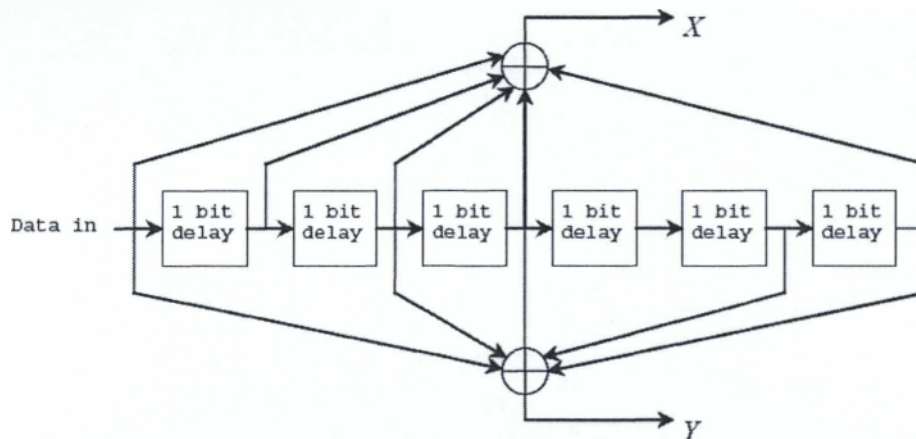
Μετά την διαδικασία κωδικοποίησης RS, κάθε μπλοκ RS κωδικοποιείται περαιτέρω από τον δυαδικό συνελικτικό κωδικοποιητή Convolutional Code-CC, ο οποίος έχει ρυθμό $1/2$, μήκος περιορισμού ίσο με το 7 και χρησιμοποιεί γεννήτριες κώδικα με πολυώνυμα:

$$G_1=177_{oct} \quad \text{για το } X$$

$$G_2=133_{oct} \quad \text{για το } Y$$

Ο συνελικτικός κωδικοποιητής δέχεται μηνύματα μεγέθους K_0 bits και παράγει κωδικολέξεις μεγέθους n_0 bits. Γενικά δημιουργείται από έναν καταχωρητή μετατόπισης L τμημάτων, όπου L συμβολίζεται το μήκος περιορισμού (constraint length).

Ο δυαδικός συνελικτικός κωδικοποιητής που υλοποιεί τον κώδικα που περιγράφηκε παραπάνω φαίνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Συνελικτικός δυαδικός κωδικοποιητής ρυθμού $1/2$.

Μετά το στάδιο του shortening όπως έχει ήδη αναφερθεί ακολουθεί η διαδικασία του puncturing η οποία χρησιμοποιείται έτσι ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός κωδικοποίησης. Συγκεκριμένα περικοπή (puncturing) είναι η διαδικασία της συστηματικής διαγραφής των bits από την έξοδο ενός κωδικοποιητή χαμηλού ρυθμού για να μειωθεί το ποσοστό των δεδομένων που προορίζεται για μετάδοση, δημιουργώντας έτσι έναν κώδικα υψηλού ρυθμού. Όταν μία λέξη γίνεται punctured, ώστε να επιτρέψει T bytes να διορθωθούν, μόνο τα $2T$ bytes από τα συνολικά 16 bytes πλεονασμού (parity bytes) χρησιμοποιούνται. Τα parity αυτά bytes υπολογίζονται από τον συστηματικό RS($N=255, K=239, T=8$) κώδικα ως $2T=(N-K)$. Οι δυνατοί ρυθμοί κωδικοποίησης καθώς και η σχηματομορφή (pattern) που ακολουθείται στο πρότυπο παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Τα bits που μεταδίδονται συμβολίζονται με «1» και τα bits που αφαιρούνται με «0». Τα X και Y που αναφέρονται στον Πίνακα 2 βρίσκονται σε αντιστοιχία με αυτά του Σχήματος 6.

Ρυθμός Κωδικοποίησης CC Μετά το Puncturing	X	Y	Διάταξη
1/2	1	1	X_1Y_1
2/3	10	11	$X_1Y_1Y_2$
3/4	101	110	$X_1Y_1Y_2X_3$
5/6	10101	11010	$X_1Y_1Y_2X_3Y_4X_5$

Πίνακας 2: Η διαμόρφωση του puncturing στον εσωτερικό CC.

Στον Πίνακα 3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τύποι διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται, καθώς και οι ρυθμοί κωδικοποίησης που μπορούμε να επιτύχουμε ανάλογα με το σενάριο του puncturing (Πίνακας 2) και τον RS κώδικα που εφαρμόζουμε κάθε φορά.

FDM IODE	Διαμόρφωση	Μη κωδικοποιημένο μέγεθος block (bytes)	Κωδικοποιημένο μέγεθος block (bytes)	Συνολικός Ρυθμός Κωδικοποίησης	Ρυθμός Κωδικοποίησης CC Μετά το Puncturing	Κώδικας RS
1	QPSK	24	48	1/2	2/3	(32,24,4)
2	QPSK	36	48	3/4	5/6	(40,36,2)
3	16-QAM	48	96	1/2	2/3	(64,48,8)
4	16-QAM	72	96	3/4	5/6	(80,72,4)
5	64-QAM	96	144	2/3	3/4	(108,96,6)
6	64-QAM	108	144	3/4	5/6	(120,108,6)

Πίνακας 3: Βασικές κωδικοποιήσεις καναλιού.

Συνολικός Ρυθμός Κωδικοποίησης = Κώδικας RS · Ρυθμός Κωδικοποίησης CC Μετά το Puncturing

Όταν χρησιμοποιείται υποκαναλιοποίηση, το FEC προσπερνά τον κωδικοποιητή RS και χρησιμοποιεί το *Συνολικό Ρυθμό Κωδικοποίησης* όπως φαίνεται στον πίνακα 3 ως *Ρυθμό Κωδικοποίησης CC Μετά το Puncturing*. Τα κωδικοποιημένα και μη μεγέθη των blocks μπορούν να υπολογιστούν διαιρώντας τις τιμές του πίνακα 3 με το 3 και το 1 για κατανομή ενός και δύο υποκαναλιών αντίστοιχα.

Διασυμβολισμός (interleaving)

Εξαιτίας της εξασθένησης με επιλεκτικότητα στη συχνότητα των συνηθισμένων ραδιοκαναλιών, οι φορείς του OFDM γενικά έχουν διαφορετικά πλάτη. Οι μεγάλες εξασθενήσεις στο φάσμα της συχνότητας μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα ομάδες φορέων να είναι λιγότερο αξιόπιστες από άλλες, προκαλώντας έτσι τη δημιουργία λαθών κατά ριπές και όχι τη δημιουργία λαθών που να είναι τυχαία κατανεμημένα.

Οι περισσότεροι όμως FEC κώδικες, όπως και αυτός που χρησιμοποιείται στο WiMAX δεν έχουν σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζουν ριπές λαθών. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ο διασυμβολισμός (interleaving). Για να κατανείμει δηλαδή τυχαία τα λάθη. Υπάρχουν δύο είδη συσκευών παρεμβολής (interleavers), οι μπλοκ interleavers και οι συνελικτικοί interleavers. Η απόδοση των δύο αυτών ειδών διεμπλοκέων είναι παρόμοια. Το πρότυπο 802.16 ορίζει ότι όμως πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μπλοκ interleaver.

Σε αυτό λοιπόν το στάδιο χρησιμοποιείται ένας μπλοκ interleaver το μέγεθος του οποίου εξαρτάται κάθε φορά από τον αριθμό των κωδικοποιημένων bits (N_{CBPS}) που ανατίθενται σε κάθε φορέα. Ο αριθμός αυτός των κωδικοποιημένων bits που ανατίθενται σε κάθε φορέα διαφέρει ανάλογα με την διαμόρφωση που έχει επιλεγεί και δίνεται στον Πίνακα 4. Αυτό είναι και το μέγεθος του interleaver. Το εκάστοτε μέγεθος προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των bits ανά φορέα N_{CBPS} με τον αριθμό των χρήσιμων φορέων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση, δηλαδή το 192. Ο αριθμός των bits ανά φορέα N_{CBPS} δίνεται στον Πίνακα 5.

Διαμόρφωση	Μέγεθος Interleaver ,(N _{CBPS})
BPSK	192
QPSK	384
16-QAM	768
64-QAM	1152

Πίνακας 4: Μέγεθος του μπλοκ interleaver.

Όπως αναφέρθηκε ήδη η χρήση του interleaver είναι απαραίτητη έτσι ώστε το σύστημα να είναι περισσότερο αξιόπιστο στην περίπτωση που εμφανίζονται ριπές λαθών.

Η λειτουργία του μπλοκ interleaver είναι η εξής: Το μπλοκ θα λάβει στην είσοδο του τα κωδικοποιημένα δεδομένα και θα τα ανακατανείμει μέσα από μία διαδικασία δύο σταδίων, τα δεδομένα δηλαδή εφαρμόζονται στις (2.3) και (2.4).

Αρχικά εισάγοντας τα δεδομένα στην (2.3) εξασφαλίζεται ότι τα γειτονικά (παρακείμενα) bits δεν αντιστοιχίζονται σε συνεχόμενους υποφορείς και στη συνέχεια μέσω της (2.4) εξασφαλίζεται ότι τα παρακείμενα κωδικοποιημένα bits αντιστοιχίζονται εναλλάξ σε lsb και msb σημεία του αστερισμού, αποφεύγοντας έτσι μεγάλες ροές από λιγότερο αξιόπιστα bits.

$$m_k = (N_{CBPS}/12)*k \bmod(12) + \text{floor}(k/12) \quad k=0,1,\dots,N_{CBPS}-1 \quad (2.3)$$

$$j_k = s * \text{floor}(m_k/s) + (m_k + N_{cbps} - \text{floor}(12 * m_k / N_{CBPS})) \bmod(s) \quad k=0,1,\dots,N_{CBPS}-1 \quad (2.4)$$

Στις παραπάνω σχέσεις η συνάρτηση $B = \text{floor}(A)$ στρογγυλοποιεί τα στοιχεία του A στον πλησιέστερο ακέραιο ο οποίος είναι μικρότερος ή ίσος με το A , σε περίπτωση που ο A είναι μιγαδικός το φανταστικό και το πραγματικό του μέρος στρογγυλοποιούνται ανεξάρτητα. Στην (2.4) το s δίνεται από τη σχέση $s = \text{ceil}(N_{CBPS}/2)$, όπου η συνάρτηση $B = \text{ceil}(A)$ στρογγυλοποιεί τα στοιχεία του A στον πλησιέστερο ακέραιο ο οποίος είναι μεγαλύτερος ή ίσος με το A , ενώ σε περίπτωση που ο A είναι μιγαδικός το φανταστικό και το πραγματικό του μέρος στρογγυλοποιούνται ανεξάρτητα.

Μέσα σε ένα μπλοκ των N_{CBPS} bits ορίζουμε το k δείκτη του κωδικοποιημένου bit πριν το πρώτο στάδιο του interleaving, m_k το δείκτη του κωδικοποιημένου bit μετά το πρώτο στάδιο του interleaving (2.3) και j_k το δείκτη του κωδικοποιημένου bit μετά το δεύτερο στάδιο του interleaving (2.4).

Διαμόρφωση	N_{CBPS}
BPSK	1
QPSK	2
16-QAM	4
64-QAM	6

Πίνακας 5: Αριθμός των bits ανά φορέα ανάλογα με τον τύπο διαμόρφωσης.

Στον δέκτη αντίστοιχα θα πρέπει να εφαρμοστεί η αντίθετη διαδικασία χρησιμοποιώντας έναν μπλοκ de-interleaver ο οποίος πάλι διέπεται από δύο

στάδια. Μέσα σε ένα μπλοκ διαστάσεων N_{CBPS} bits ορίζουμε j το δείκτη ενός bit πριν το πρώτο στάδιο, m_j το δείκτη του bit μετά το πρώτο στάδιο (2.5) και πριν το δεύτερο και k_j το δείκτη του bit μετά το δεύτερο στάδιο του de-interleaving (2.6), δηλαδή πριν την εισαγωγή του στον συνελικτικό αποκωδικοποιητή.

Η πρώτη μετάθεση δίνεται από την εξίσωση:

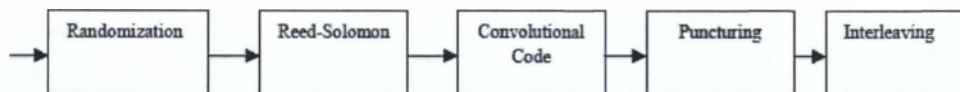
$$m_j = s * \text{floor}(j/s) + (j + \text{floor}(12 * j / N_{\text{cbps}})) \bmod(s) \quad j=0,1,\dots,N_{\text{cbps}}-1 \quad (2.5)$$

Η δεύτερη μετάθεση δίνεται από την εξίσωση:

$$k_j = 12 * m - (N_{\text{cbps}} - 1) * \text{floor}(12 * m / N_{\text{cbps}}) \quad j=0,1,\dots,N_{\text{cbps}}-1 \quad (2.6)$$

Το πρώτο στάδιο του de-interleaving είναι το αντίστροφο του πρώτου σταδίου του interleaving και το αντίθετο.

Η διαδικασία κωδικοποίησης λοιπόν στο WiMAX δίνεται από το ακόλουθο μπλοκ διάγραμμα στο Σχήμα 8:



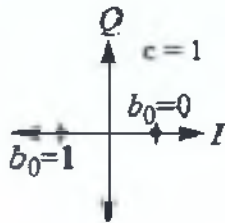
Σχήμα 8: Διαδικασία κωδικοποίησης στο WiMAX

2.4 Διαμόρφωση Δεδομένων

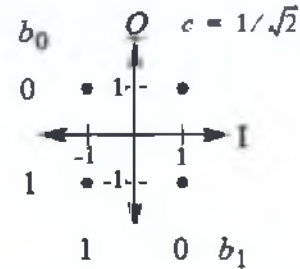
Το επόμενο στάδιο μετά την κωδικοποίηση καναλιού, είναι η διαμόρφωση του συμβόλου (modulation). Όλα τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούν μια τεχνική διαμόρφωσης για να αντιστοιχήσουν τα κωδικοποιημένα bits σε μία δομή η οποία να μπορεί εύκολα να μεταδοθεί μέσα από ένα επικοινωνιακό κανάλι. Έτσι τα bits αντιστοιχίζονται σε έναν φορέα πλάτους και φάσης, ο οποίος αναπαρίσταται από ένα μιγαδικό και ορθογώνιο διάνυσμα φάσης (complex in-phase and quadrature-phase vector). Για την τεχνική εκχώρησης χρησιμοποιείται η κωδικοποίηση κατά Gray έτσι ώστε γειτονικά σημεία στον αστερισμό να διαφέρουν σε ένα μόνο bit. Η κωδικοποίηση Gray μειώνει το συνολικό BER αλλά και την πιθανότητα να συμβούν πολλαπλά λάθη, τα οποία να οφείλονται σε ένα μόνο λανθασμένο σύμβολο.

Μετά λοιπόν από το interleaving των bits ,τα bits δεδομένων εισέρχονται σειριακά στον απεικονιστή του αστερισμού (constellation mapper). Κατά την διάρκεια της απεικόνισης του συμβόλου, η ακολουθία των δυαδικών bits μετατρέπεται σε μία ακολουθία μιγαδικών συμβόλων. Σύμφωνα με το πρότυπο υποστηρίζονται οι διαμορφώσεις BPSK, QPSK, 16-QAM και 64-QAM οι αστερισμοί των οποίων

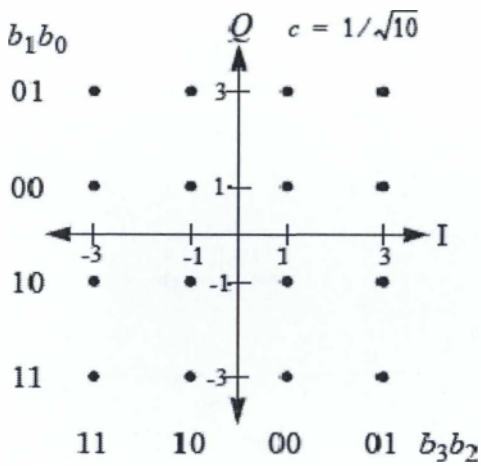
φαίνονται παρακάτω. Κάθε σημείο στον αστερισμό πολλαπλασιάζεται με έναν παράγοντα c -παράγοντας κανονικοποίησης έτσι ώστε η μέση εκπεμπόμενη ισχύς να είναι μονάδα, υποθέτοντας πάντα ότι όλα τα σύμβολα έχουν την ίδια πιθανότητα εμφάνισης. Τα δεδομένα που θα έχουν τώρα απεικονιστεί πάνω στον αστερισμό στη συνέχεια θα διαμορφωθούν πάνω σε όλους τους εκχωρημένους φορείς με σειρά αυξανόμενου δείκτη μετατόπισης συχνότητας.



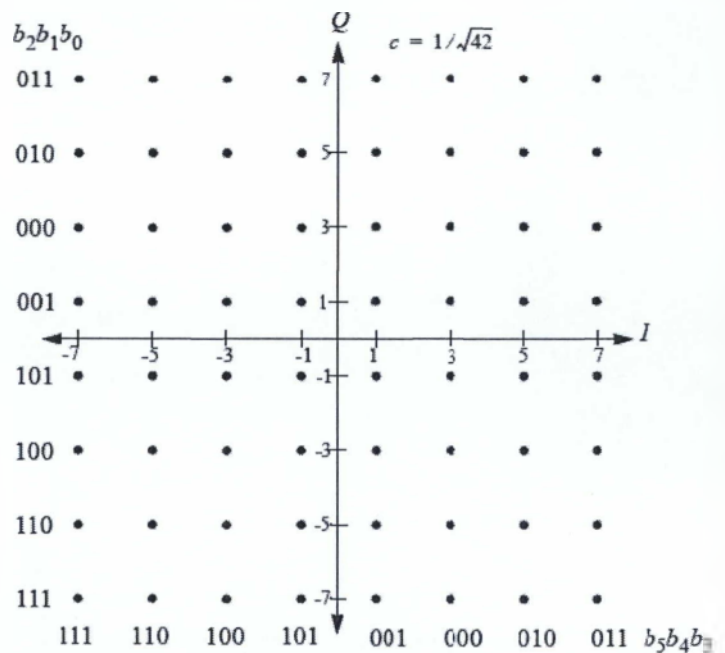
Αστερισμός για BPSK



Αστερισμός για QSPK



Αστερισμός για 16-QAM



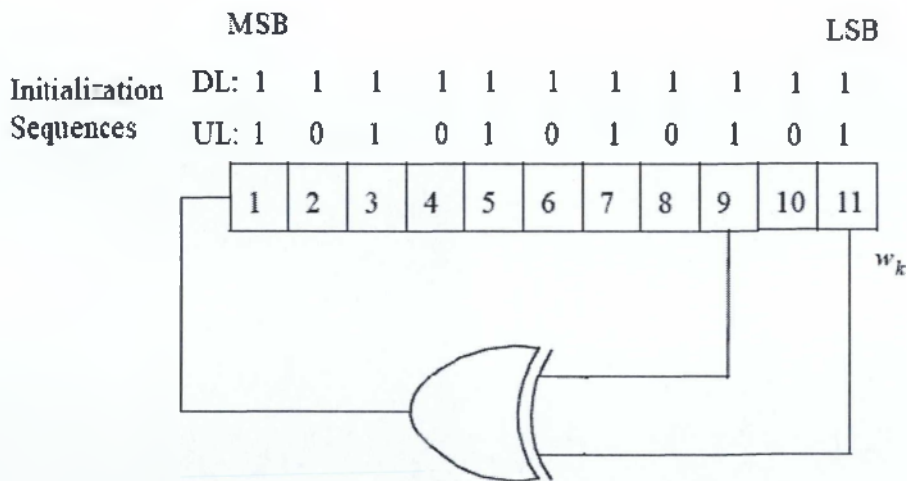
Αστερισμός για 64-QAM

Τα δεδομένα που βρίσκονται στον αστερισμό θα διαμορφώνονται στη συνέχεια σε όλα τα διαθέσιμα φέροντα δεδομένων με σειρά αυξανόμενου δείκτη συχνότητας. Το πρώτο εξερχόμενο σύμβολο του αστερισμού πρέπει να διαμορφωθεί στο φέρον με το μικρότερο δείκτη συχνότητας $-N_{used}/2$

2.5 Διαμόρφωση Πιλότων

Οι πιλότοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιστάθμιση της μετατόπισης συχνότητας στον δέκτη. Ακόμη όπως έχουν δείξει και πρόσφατες μελέτες [4], μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για εκτίμηση καναλιού σε γρήγορα χρονικά μεταβαλλόμενα κανάλια (fast time-varying channels). Τα σύμβολα των πιλότων παρεμβάλλονται σε κάθε ριπή δεδομένων προκειμένου να συγκροτήσουν και διαμορφώνονται σύμφωνα με τη θέση-φορέα τους μέσα σε όλα τα OFDM σύμβολα.

Αυτοί οι πιλότοι δημιουργούνται από μία γεννήτρια ψευδοτυχαίας δυαδικής ακολουθίας (PRBS) που βασίζεται στο πολυώνυμο $X^{11} + X^9 + 1$. Όλοι οι πιλότοι διαμορφώνονται με BPSK. Αυτού του είδους η αντιστοίχιση δίνεται από τις σχέσεις $1-2w_k$ και $1-2\bar{w}_k$.



Σχήμα 9: PRBS για διαμόρφωση πιλοτικών φερόντων

Η τιμή για την πιλοτική διαμόρφωση του k συμβόλου OFDM, σε σχέση με την αρχή του πλαισίου, παράγεται από την ακολουθία που παράγεται από την PRBS w_k και με \bar{w}_k συμβολίζεται το συζυγές του. Οι ακολουθίες αρχικοποίησης που χρησιμοποιούνται από την άνω και κάτω ζεύξη φαίνονται στο παραπάνω σχήμα 9. Στην κάτω ζεύξη, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ακολουθία 1111111111100000000110... όπου το 3ο 1, για παράδειγμα το $w_3=1$, χρησιμοποιείται στο πρώτο OFDM σύμβολο της κάτω ζεύξης που ακολουθεί το πλαίσιο του προπομπού. Για κάθε πιλοτικό φέρον τα σημεία της BPSK διαμόρφωσης παράγονται όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις.

$$\begin{aligned}
 \text{DL: } & c_{-84}=c_{-36}=c_{60}=c_{84}=1-2w_k \quad \text{και} \quad c_{-60}=c_{-12}=c_{12}=c_{36}=1-2\bar{w}_k \\
 \text{UL: } & c_{-84}=c_{-36}=c_{12}=c_{36}=c_{60}=c_{84}=1-2w_k \quad \text{και} \quad c_{-60}=c_{-12}=1-2\bar{w}_k
 \end{aligned}$$

2.6 Κωδικοποίηση Χωρο-Χρόνου (Space Time Coding)

Μετά την διαμόρφωση υλοποιείται μια προαιρετική λειτουργία που προσφέρει το πρότυπο. Εφαρμόσαμε δηλαδή κωδικοποίηση χώρου-χρόνου η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία διαφορισμού κατά την εκπομπή. Για την επίτευξη του διαφορισμού υπάρχουν δύο κεραίες εκπομπής στην πλευρά του σταθμού βάσης και δύο στην πλευρά του συνδρομητικού σταθμού(STC 2x2). Κάθε κεραία εκπομπής έχει την δικιά της αλυσίδα OFDM αλλά έχουν και οι δύο τον ίδιο τοπικό ταλαντωτή για λόγους συγχρονισμού. Και οι δύο κεραίες εκπέμπουν ταυτόχρονα δύο διαφορετικά OFDM σύμβολα, τα οποία μπορεί και να ανήκουν σε διαφορετικές ριπές του φυσικού πεδίου και να χρησιμοποιούν ακόμη και διαφορετικούς αστερισμούς [5]. Μία ριπή του φυσικού πεδίου μπορεί να περιλαμβάνει έναν ακέραιο αριθμό από σύμβολα. Η βασική STC 2x2 υλοποίηση εκπέμπει 2 μιγαδικά σύμβολα s_0, s_1 και χρησιμοποιεί το κανάλι πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (δύο κεραίες εκπομπής και δύο λήψης) δύο φορές μαζί με τις τιμές των διανυσμάτων του καναλιού h_1 (Tx1 στην Rx1), h_2 (Tx1 στην Rx2), h_3 (Tx2 στην Rx1) h_4 (Tx2 στην Rx2) όπως παρουσιάζονται και στον Πίνακα 6.

	Rx1	Rx2
Χρόνος t	r_1	r_3
Χρόνος t+T	r_2	r_4

Πίνακας 6: Σύμβολα καναλιού για την υλοποίηση STC 2x2.

Τα σχετικά λαμβανόμενα σήματα για την υλοποίηση STC 2x2 φαίνονται στον Πίνακα 7.

	Rx1	Rx2
Tx1	h_1	h_3
Tx2	h_2	h_4

Πίνακας 7:Λαμβανόμενα σύμβολα για την υλοποίηση STC 2x2

Ο θόρυβος του καναλιού δίνεται από τα σύμβολα n_1, n_2, n_3, n_4 τα οποία αναπαριστούν μιγαδικές τυχαίες μεταβλητές που καλύπτουν την παρεμβολή και τον θερμικό θόρυβο. Τα λαμβανόμενα σήματα δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
 r_1 &= h_1s_1+h_2s_2+n_1 \\
 r_2 &= -h_1s_1^*+h_2s_1^*+n_2 \\
 r_3 &= h_3s_1+h_4s_2+n_3 \\
 r_4 &= -h_3s_2^*+h_4s_1^*+n_4
 \end{aligned}$$

2.7 IFFT-FFT

Μετά το στάδιο της διαμόρφωσης των φερόντων και των ζωνών προστασίας, όπου το σήμα βρίσκεται στο πεδίο της συχνότητας, χρησιμοποιείται ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (Inverse Fast Fourier Transform - IFFT), ώστε να επιτευχθεί η μετατροπή αυτού στο πεδίο του χρόνου [1]. Ο IFFT δέχεται ως είσοδο έναν αριθμό μιγαδικών σημείων δεδομένων, κάθε ένα από τα οποία καλείται *bin* και αντιστοιχεί σε ένα μεμονωμένο *subcarrier*. Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις ο αριθμός των δειγμάτων εισόδου N επιλέγεται να είναι μια δύναμη του δύο, με τις περισσότερες εισόδους να φέρουν διαμορφωμένα δεδομένα και τις εξωτερικές να μηδενίζονται, παρέχοντας συχνοτικά κενά, για λόγους ασφαλείας. Οι παράλληλες έξοδοι του IFFT μετατρέπονται σε σειριακή μορφή, εφόσον η μετέπειτα επεξεργασία τους το απαιτεί. Ο ευθύς μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform – FFT) εφαρμόζεται στο δέκτη για την απεικόνιση του ληφθέντος στο πεδίο του χρόνου σήματος στο αντίστοιχό του συχνοτικό φάσμα, αφού προηγηθεί η μετατροπή του λαμβανόμενου σήματος σε παράλληλη μορφή, η δειγματοληψία του και η δημιουργία ενός διανύσματος από το σύνολο των N δειγμάτων. Σε αυτό το διάνυσμα πραγματοποιείται ο FFT με την εύρεση της αντίστοιχης κυματομορφής, που παράγεται από ένα σύνολο ορθογωνικών ημιτονοειδών συνιστωσών, τα πλάτη και οι φάσεις των οποίων αντιπροσωπεύουν το φάσμα του σήματος. Το αποτέλεσμα είναι μια εκτίμηση των αρχικά μεταδιδόμενων δεδομένων [6].

Η εφαρμογή των μετασχηματισμών Fourier συνιστά μια οικονομική και εύκολη υλοποίηση για την μετατροπή του προϊόντος της διαμόρφωσης από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου και αντιστρόφως, η οποία διατηρεί ταυτόχρονα την ορθογωνιότητα των φερόντων των OFDM σημάτων. Σε αντίθεση με την αναλογική υλοποίηση του OFDM, που θα απαιτούσε πολλαπλούς τοπικούς ταλαντωτές, κάθε ένας από τους οποίους θα έπρεπε να λειτουργεί με μικρό ποσοστό θορύβου και ολίσθησης για τη διατήρηση της ορθογωνιότητας, οι μετασχηματισμοί Fourier παρέχουν μια ταχεία και οικονομική ψηφιακή υλοποίηση. Επιπλέον, για την εφαρμογή του Fourier μετασχηματισμού διατίθενται υψηλά αποδοτικές δομές, οι λεγόμενες *butterfly* δομές [7], που μειώνουν την πολυπλοκότητα του συστήματος. Έτσι ο Fourier μετασχηματισμός δεν απαιτεί, στην πραγματικότητα, πλήρεις πολλαπλασιασμούς, αλλά στροφές φάσης που υλοποιούνται πολύ πιο εύκολα από τους αλγορίθμους, με αποτέλεσμα τη λογαριθμική αύξηση της πολυπλοκότητας σε συνάρτηση με τις εισόδους.

2.8 Κωδικοποιήσεις ID Encodings

Τα Rate IDs, τα οποία υποδεικνύουν ποια διαμόρφωση και ποια κωδικοποίηση θα ακολουθηθεί στην πρώτη ροή δεδομένων στην κάτω ζεύξη, φαίνονται παρακάτω. Η κωδικοποίηση Rate ID είναι στατική και δεν μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος.

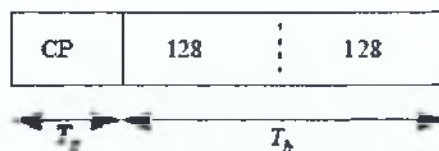
Rate_ID	Modulation RS-CC rate
0	QPSK 1/2
1	QPSK 3/4
2	16-QAM 1/2
3	16-QAM 3/4
4	64-QAM 2/3
5	64-QAM 3/4
6-15	reserved

Πίνακας 8: ID Encodings

2.9 Διαμόρφωση Προπομπού

Το preamble (προπομπός) είναι μία δομή η οποία αποτελείται από ένα καθορισμένο αριθμό OFDM συμβόλων και εισάγεται στην αρχή του frame που θέλουμε να στείλουμε. Το preamble το στέλνουμε πριν από τα δεδομένα και αφού περάσει μέσα από το μπλοκ του ισοσταθμιστή στον δέκτη εξάγονται οι κατάλληλοι συντελεστές που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του καναλιού. Στα συστήματα WiMAX, τα preamble και στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη δημιουργούνται χρησιμοποιώντας ακολουθίες ισοστάθμισης (training sequences). Παρά το γεγονός ότι στο πρότυπο καθορίζονται όλοι οι τύποι των ακολουθιών ισοστάθμισης, αυτές προέρχονται από την ίδια ακολουθία στο πεδίο της συχνότητας. Αυτή η ακολουθία έχει μήκος 201 φορείς και συμβολίζεται με P_{ALL} . Όλα τα preamble αποτελούνται είτε από ένα είτε από δύο OFDM σύμβολα. Κάθε ένα από τα OFDM αυτά σύμβολα περιέχουν ένα κυκλικό πρόθεμα (CP) ίδιου μήκους με αυτό που χρησιμοποιείται για τα OFDM σύμβολα δεδομένων.

Στη άνω ζεύξη, ο προπομπός δεδομένων (data preamble) αποτελείται από 2 φορές δείγματα μήκους 128 στα οποία προηγείται ένα κυκλικό πρόθεμα το μήκος του οποίου είναι το ίδιο με το κυκλικό πρόθεμα για τα OFDM σύμβολα δεδομένων. Αυτός ο προπομπός αναφέρεται σαν short preamble (σύντομος προπομπός). Αυτός ο προπομπός θα προηγηθεί επίσης όλων των κατανομών κατά τη διάρκεια της AAS μερίδας ενός πλαισίου (frame).



Σχήμα 10: Δομή για UL δεδομένα και DL AAS προπομπός

Ο πρώτος προπομπός στην DL ζεύξη PHY PDU, καθώς επίσης και ο προπομπός αρχικοποίησης, αποτελείται από ένα CP που ακολουθείται από 4 φορές από 64 δείγματα που ακολουθούνται από ένα CP και 2 φορές 128 δείγματα. Αυτός ο

προπομπός αναφέρεται ως μακροχρόνιος προπομπός(long preamble). Στη συνέχεια το long preamble ακολουθείται από το FCH(frame control header) το οποίο περιέχει αποκωδικοποιημένες πληροφορίες για τον συνδρομητικό σταθμό, δηλαδή πληροφορίες για τον τύπο της διαμόρφωσης, το μήκος του FEC κώδικα για κάθε ριπή καθώς επίσης και τους χάρτες ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης. Μετά από τις πληροφορίες του FCH ακολουθούν τα δεδομένα τα οποία αποτελούνται από αρκετά OFDM σύμβολα.



Σχήμα 11 : Δομή προπομπού DL και αρχικός κυμαινόμενος προπομπός

2.10 Το Στρώμα MAC

Ένα δίκτυο, του οποίου η λειτουργία βασίζεται σε ένα διαμοιραζόμενο μέσο επικοινωνίας (shared medium), πρέπει να διαθέτει αποτελεσματικούς μηχανισμούς για να διαχειρίζεται αυτό το μέσο και να το μοιράζει στους κόμβους του. Τα αμφίδρομα ασύρματα δίκτυα με τοπολογίες point-to-multipoint (PMP) και mesh είναι παραδείγματα μοιράσματος ασύρματος μέσου, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι το κενό μέσω του οποίου πραγματοποιείται η μετάδοση των ραδιοκυμάτων. Στη περίπτωση του πρωτοκόλλου 802.16 με το έργο της διαχείρισης καναλιού έχει επιφορτιστεί το υποεπίπεδο MAC. Το MAC του WiMAX παρέχει «νοημοσύνη» για το Φυσικό Στρώμα και εξασφαλίζει ένα πλήθος χαρακτηριστικών QoS που δε συναντώνται σε άλλα ασύρματα πρότυπα. Ίσως η μεγαλύτερή του αξία είναι ότι παρέχει δυναμική κατανομή εύρους ζώνης που κατατροπώνει τις συνηθισμένες υποβαθμίσεις των ασύρματων υπηρεσιών, δηλαδή λανθάνων χρόνου και παραμόρφωση σήματος (jitter).

Η MAC του 802.16a στηρίζεται σε ένα πρωτόκολλο κράτησης/αιτήματος για την πρόσβαση στο μέσο και υποστηρίζει ξεχωριστά επίπεδα υπηρεσιών (π.χ., dedicated T1/E1 για επιχειρήσεις και best effort για οικιακούς χρήστες). Το πρότυπο 802.16a χρησιμοποιεί ένα slotted πρωτόκολλο TDMA σχεδιασμένο από τον πομπό να δεσμεύει χωρητικότητα για τους συνδρομητές σε μια point-to-multipoint τοπολογία δικτύου. Αρχίζοντας από μια προσέγγιση με TDMA με ευφυή προγραμματισμό, τα συστήματα WiMAX είναι σε θέση να μεταδίδουν όχι μόνο στοιχεία υψηλής ταχύτητας με SLAs, αλλά και ευαίσθητες σε καθυστέρηση υπηρεσίες όπως η φωνή και το βίντεο ή πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων. Το πρότυπο προσφέρει QoS επιπλέον από το μόνο καθορισμό προτεραιοτήτων, μια τεχνική που είναι πολύ περιορισμένη στην αποτελεσματικότητα της με φορτία κίνησης και με αυξανόμενο

αριθμό συνδρομητών. Το στρώμα του MAC στα επικυρωμένα με WiMAX συστήματα έχει ως σκοπό επίσης να εξετάζει το εχθρικό φυσικό περιβάλλον στρώματος PHY layer όπου η παρεμβολή, η γρήγορη εξασθένηση και άλλα φαινόμενα παρουσιάζονται σε λειτουργία σε εξωτερικούς χώρους.

Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί τις ροές δεδομένων TDM στο DL (κάτω ζεύξη) και TDMA στο UL (άνω ζεύξη). Εξασφαλίζοντας πρόσβαση στο κανάλι απαλλαγμένη από συγκρούσεις δεδομένων, η 16a MAC βελτιώνει τη συνολική ρυθμοαπόδοση του συστήματος και την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης. Η 16a MAC εξασφαλίζει επίσης την οριοθετημένη καθυστέρηση στα δεδομένα. Η τεχνική πρόσβασης TDM/TDMA εξασφαλίζει επίσης ευκολότερη υποστήριξη για υπηρεσίες multicast και broadcast.

Δίκτυα με τοπολογία point-to-multipoint (PMP)

Η κάτω ζεύξη, από τον σταθμό βάσης προς τον χρήστη, λειτουργεί σε PMP βάση. Το IEEE 802.16 λειτουργεί με έναν κεντρικό σταθμό βάσης και μία κατευθυντική κεραία χωρισμένη σε τομείς, η οποία έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται πολλούς ανεξάρτητους τομείς ταυτόχρονα. Μέσα σε δοσμένη συχνότητα καναλιού και δοσμένο τομέα κεραίας, όλοι οι σταθμοί λαμβάνουν την ίδια εκπομπή ή μέρος αυτής. Ο σταθμός βάσης είναι ο μόνος πομπός που λειτουργεί σε αυτή την κατεύθυνση, οπότε εκπέμπει χωρίς να πρέπει να συντονιστεί με άλλους σταθμούς, εκτός από την TDD περίπτωση όπου μπορεί να χωρίσει το χρόνο σε περιόδους εκπομπής άνω και κάτω ζεύξης. Η κάτω ζεύξης εκπομπή είναι γενικά broadcast. Σε περιπτώσεις όπου το DL-MAP δεν υποδεικνύει ρητά ότι ένα τμήμα του υποπλαισίου κάτω ζεύξης προορίζεται για κάποιον συγκεκριμένο συνδρομητικό σταθμό, όλοι οι συνδρομητικοί σταθμοί που έχουν την δυνατότητα να λαμβάνουν το τμήμα αυτό, το λαμβάνουν. Οι συνδρομητικοί σταθμοί μοιράζονται την άνω ζεύξη προς τον σταθμό βάσης υπό καθεστώς ζήτησης. Αναλόγως με την κλάση των υπηρεσιών που χρησιμοποιούνται, ο συνδρομητικός σταθμός μπορεί να αιτηθεί άδεια για συνεχή μετάδοση ή η άδεια εκπομπής μπορεί να χορηγηθεί από τον σταθμό βάσης κατόπιν λήψεως αίτησης από τον χρήστη. Πέρα από τα ιδιωτικά διευθυνσιοδοτημένα μηνύματα, μηνύματα μπορεί επίσης να στέλνονται σε multicast συνδέσεις (μηνύματα ελέγχου και διανομή video είναι παραδείγματα multicast εφαρμογών) καθώς και σε broadcast συνδέσεις προς όλους τους συνδρομητικούς σταθμούς. Μέσα σε κάθε τομέα, οι χρήστες εμμένουν σε ένα πρωτόκολλο μετάδοσης που ελέγχει τη διαμάχη μεταξύ των χρηστών για μετάδοση και επιτρέπει την προσαρμογή των υπηρεσιών στις απαιτήσεις καθυστέρησης και εύρους ζώνης κάθε εφαρμογής του χρήστη. Το MAC είναι προσανατολισμένο σε σύνδεση για να διαχειριστεί το κανάλι. Αυτό ενισχύει την αξιοπιστία και εξασφαλίζει υψηλή ποιότητα υπηρεσιών. Κάθε φορά που ένα SS (Subscriber station) εγκαθίσταται στο δίκτυο, τότε αμέσως δημιουργείται μια σύνδεση με αυτόν, για να είναι δυνατή η

ροή υπηρεσιών. Για τους σκοπούς της χαρτογράφησης υπηρεσιών στους συνδρομητικούς σταθμούς και της παροχής διαφορετικών επιπέδων QoS, όλες οι μεταδόσεις δεδομένων βρίσκονται στο πλαίσιο της σύνδεσης. Οι συνδέσεις αναφέρονται με αναγνωριστικά σύνδεσης (Connection ID, CID) και είναι πιθανόν να απαιτούν συνεχώς χορηγούμενο εύρος ζώνης ή εύρος ζώνης κατά απαίτηση. Μπορούν να υπάρξουν μέχρι 65535 CID ανά κανάλι ραδιοσυχνότητας. Για τη διάκριση πολλαπλών καναλιών UL που σχετίζονται με το ίδιο κανάλι DL χρησιμοποιείται ένα CID. Οι σταθμοί συνδρομητών ελέγχουν τα CID στα λαμβανόμενα PDU και διατηρούν μόνο τα PDU που απευθύνονται σε αυτούς.

Κάθε σταθμός συνδρομητή έχει μια συνήθη διεύθυνση MAC 48-bit, η οποία είναι και αναγνωριστικό εξοπλισμού επειδή οι κύριες διευθύνσεις που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας είναι τα CID. Με την είσοδο στο δίκτυο, ανατίθενται στον σταθμό-συνδρομητή τρεις συνδέσεις διαχείρισης σε κάθε κατεύθυνση. Αυτές οι τρεις συνδέσεις αντιπροσωπεύουν τις τρεις διαφορετικές απαιτήσεις QoS που χρησιμοποιούνται από διαφορετικά επίπεδα διαχείρισης:

Βασική σύνδεση (Basic connection): μεταφέρει μικρά, time-critical μηνύματα MAC και ελέγχου ράδιο ζεύξης (Radio Link Control).

Σύνδεση πρωτεύουσας διαχείρισης (Primary management connection): μεταφέρει μεγαλύτερα, περισσότερο ανεκτικά στην καθυστέρηση μηνύματα, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για αυθεντικοποίηση και αρχικοποίηση της σύνδεσης. Η σύνδεση δευτερεύουσας διαχείρισης μεταφέρει μηνύματα διαχείρισης που έχουν σχέση με τα πρότυπα, όπως DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol), TFTP (Trivial File Transfer Protocol), και SNMP (Simple Network Management Protocol). Εκτός από αυτές τις συνδέσεις διαχείρισης, οι σταθμοί συνδρομητών είναι εκχωρημένες συνδέσεις μεταφοράς για τις συμφωνημένες υπηρεσίες.

Συνδέσεις μεταφοράς (Transport connection): είναι μονοκατευθυντικές για να υπάρχει διαφορετικό QoS UL και DL καθώς και παραμέτρους κίνησης. Τυπικά εκχωρούνται σε υπηρεσίες ανά ζευγάρια. Οι σταθμοί συνδρομητών μοιράζονται το UL στον σταθμό βάσης κατά απαίτηση. Ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη τάξη υπηρεσίας, ο σταθμός συνδρομητή μπορεί να χορηγείται δικαιώματα εκπομπής συνεχώς, ή ο σταθμός βάσης μπορεί να χορηγήσει το δικαίωμα εκπομπής μετά από λήψη αίτησης από έναν χρήστη.

Δίκτυα με τοπολογία Mesh (πλέγματος)

Η κύρια διαφορά μεταξύ των τοπολογιών PMP και Mesh, είναι ότι στην PMP η κίνηση δεδομένων παρουσιάζεται μόνο μεταξύ των συνδρομητικών σταθμών και του σταθμού βάσης ενώ στην Mesh η κίνηση μπορεί να δρομολογηθεί μεταξύ

άλλων συνδρομητικών σταθμών και μπορεί να παρουσιαστεί κατευθείαν μεταξύ αυτών. Μέσα στο Mesh δίκτυο, ένα σύστημα που έχει ευθεία σύνδεση με υπηρεσίες κορμού δικτύου (backhaul) έξω από αυτό, ορίζεται ως ο Mesh σταθμός βάσης, ενώ όλα τα άλλα συστήματα ορίζονται ως Mesh συνδρομητικοί σταθμοί. Γενικά, όλα τα Mesh συστήματα ονομάζονται κόμβοι. Σε ένα Mesh σύστημα ούτε ο σταθμός βάσης δεν μπορεί να εκπέμψει χωρίς να συντονιστεί με τους άλλους κόμβους. Με τη χρήση κατανεμημένου προγραμματισμού, όλοι οι κόμβοι πρέπει να συντονίζουν την εκπομπή τους στην two-hop γειτονιά τους και να εκπέμπουν broadcast τα προγράμματα τους (διαθέσιμοι πόροι, αιτήσεις και παροχές) σε όλους τους γειτονικούς κόμβους.

QoS

Ο όρος Quality of Service αναφέρεται στην πιθανότητα ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου να μπορέσει να τηρήσει ένα δεδομένο συμβόλαιο κίνησης, ή σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται ατύπως ως η πιθανότητα ενός πακέτου να επιτύχει να πάει από ένα σημείο σε ένα άλλο σε ένα δίκτυο εντός της επιθυμητής περιόδου καθυστέρησης. Μια από τις πρωταρχικές έγνοιες σχετικά με την ασύρματη παράδοση δεδομένων είναι ότι το QoS είναι ανεπαρκές. Ο ανταγωνισμός με άλλες ασύρματες υπηρεσίες, τα χαμένα πακέτα, και οι ατμοσφαιρικές παρεμβολές είναι πιθανές ενστάσεις στο αν το WiMAX είναι μια καλή εναλλακτική στο PSTN. Το QoS αναφέρεται επίσης στην ικανότητα ενός WISP (Wireless Internet Provider) να προσαρμόσει φωνή στο δίκτυό του. Το WiMAX αξιοποιεί ένα πλήθος μέτρων για να διασφαλίσει καλό QoS, συμπεριλαμβανομένου χρονοπρογραμματισμό QoS ροής υπηρεσίας, εγκαθίδρυση δυναμικής υπηρεσίας, και ένα μοντέλο ενεργοποίησης δύο φάσεων.

Ένας από τους κεντρικούς στόχους του WiMAX εκτός του να προσφέρει ένα ενοποιημένο πρότυπο ασύρματης μετάδοσης ανεξάρτητα από το μέσο, σε πολύ υψηλές ταχύτητες και σε μεσαία απόσταση, είναι και το να προσφέρει μηχανισμούς που μπορούν να εγγυηθούν στον χρήστη διάφορα επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service, QoS). Μέχρι στιγμής το QoS ήταν μια υπόθεση που αφορούσε ενσύρματα δίκτυα όπως δίκτυα ασύγχρονης μετάδοσης (Asynchronous Transfer Mode, ATM). Το WiMAX προσφέρει ανάλογες υπηρεσίες σε ασύρματο μέσο. Οι υπηρεσίες παρέχονται από τον BS χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό του scheduler για να αποφασίσει ποια δεδομένα θα πρέπει να αποσταλούν σε κάθε χρονικό διάστημα. Έτσι, γίνεται εφικτή η παροχή των υπηρεσιών καθορίζοντας μόνο τις παραμέτρους του scheduler του BS. Το ίδιο το πρότυπο δεν καθορίζει, ούτε προτείνει την υλοποίηση του scheduler, δίνοντας έτσι την ευκαιρία στον κάθε κατασκευαστή να τον υλοποιήσει σύμφωνα με τις δικές του ανάγκες και τους δικούς του στόχους. Έτσι δίνεται η δυνατότητα για επιπλέον διαφοροποίηση των υπηρεσιών.

Μέσα σε κάθε τομέα, οι χρήστες τηρούν ένα πρωτόκολλο εκπομπής που ελέγχει τις διαμάχες μεταξύ των χρηστών και επιτρέπει στην υπηρεσία να συνταιριαστεί στην καθυστέρηση και τις απαιτήσεις εύρους ζώνης της κάθε εφαρμογής χρήστη. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω τεσσάρων ειδών μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού του UL. Αυτοί οι μηχανισμοί υλοποιούνται χρησιμοποιώντας αυτόκλητες αιτήσεις εύρους ζώνης, προσκλήσεων για εκπομπή (polling) και διαδικασίες συναγωνισμού. Το MAC του WiMAX παρέχει διαφοροποίηση του QoS για διαφορετικά είδη εφαρμογών που ενδεχομένως λειτουργούν πάνω από δίκτυα WiMAX. Οι τύποι των υπηρεσιών που περιγράφονται στο πρότυπο είναι οι εξής:

Unsolicited Grant Service (UGS): Το UGS σχεδιάστηκε για πακέτα δεδομένων πραγματικού χρόνου και σταθερού μεγέθους που μεταδίδονται σε περιοδικά διαστήματα. Σε αυτή την υπηρεσία έχουν καθοριστεί ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης και αφού πρόκειται για δεδομένα ευαίσθητα ως προς τον χρόνο, η καθυστέρηση και το jitter. Είναι κατάλληλη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως στις γραμμές T1 και E1, αλλά και για εφαρμογές VoIP με σταθερό μέγεθος πακέτου.

Extended Real-time Polling Service (ertPS): Είναι ένας συνδυασμός των UGS και rtPS υπό την έννοια ότι περιοδικά αποστέλλονται πακέτα, αλλά με μεταβλητό μέγεθος. Έτσι λόγω της περιοδικότητας, το ertPS παρέχει τις ίδιες εγγυήσεις με το rtPS με τη διαφορά ότι προσφέρει και εγγύηση για το jitter. Η υπηρεσία αυτή έχει δημιουργηθεί από την έκδοση του IEEE 802.16 και είναι κατάλληλη κυρίως για υπηρεσίες VoIP.

Real-time Polling Service (rtPS): Αντίστοιχο με το UGS, με τη διαφορά ότι τα πακέτα δεδομένων είναι μεταβλητού μεγέθους. Χρησιμοποιείται για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου όπως streaming video. Προσφέρει μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης, αλλά με εγγυημένο ελάχιστο και μέγιστο ρυθμό. Αφού είναι υπηρεσία πραγματικού χρόνου, υπάρχουν εγγυήσεις και για τη μέγιστη end-to-end καθυστέρηση. Αντιθέτως, δεν υπάρχουν εγγυήσεις για το jitter. Είναι επίσης κατάλληλη και για πρόσβαση επιχείρησης μιας που εγγυάται το ρυθμό μετάδοσης, και επειδή το μέγεθος πακέτων μπορεί να είναι μεταβλητό, επιτρέπει στους χρήστες να εκμεταλλεύονται επιπλέον bandwidth περιστασιακά αν αυτό είναι διαθέσιμο.

Non-real-time Polling Service (nrtPS): Για ροές δεδομένων μεταβλητού μεγέθους που είναι ανθεκτικές στην καθυστέρηση, αλλά απαιτείται ελάχιστη ταχύτητα μετάδοσης. Στην υπηρεσία αυτή προσφέρεται εγγύηση μόνο για το ρυθμό μετάδοσης, αφού τα δεδομένα δεν είναι πραγματικού χρόνου και έτσι είναι ανθεκτικά στην καθυστέρηση. Μία από τις πιθανές εφαρμογές είναι το FTP με εγγύηση ταχύτητα κατεβάσματος.

Best Effort (BE): για ροές δεδομένων που είναι ανθεκτικές στην καθυστέρηση, δεν απαιτείται κανένα ελάχιστο επίπεδο υπηρεσίας, μπορούν να εξυπηρετηθούν σε μια βάση διαθέσιμου χώρου και δεν απαιτούν οποιαδήποτε εγγύηση στην ταχύτητα μετάδοσης. Παραδείγματα εφαρμογής είναι το HTTP browsing και Data transfer.

Η διαδικασία που ακολουθείται για να ζητηθεί μια από τις παραπάνω κατηγορίες υπηρεσιών είναι: αρχικά ο SS αιτείται την παροχή μια από τις παραπάνω υπηρεσίες. Ο BS μέσω της διαδικασίας ελέγχου για αποδοχή της κλήσης (Call Admission Control, CAC) αποδέχεται ή όχι το συγκεκριμένο επίπεδο υπηρεσιών. Σε αρνητική περίπτωση, ο χρήστης μπορεί να επιλέγει μία από τις υπόλοιπες και να επιχειρήσει ξανά. Όπως ήταν αναμενόμενο το πρότυπο έχει αφήσει ανοικτή την υλοποίηση της διαδικασίας του CAC όπως έχει κάνει και με τον scheduler στον BS.

Class Description	Real Time	Application Type	Bandwidth
Διαδραστικά Παιχνίδια	Ναι	Interactive games	50-85 kbps
VoIP, Τηλεδιάσκεψη	Ναι	VoIP, Βιντεοκλήση	4-64kbps 32-384kbps
Streaming Media	Ναι	Μουσική / Ομιλία Video Clips Ταινίες	5-128kbps 20-384kbps >2Mbps
Τεχνολογία Πληροφοριών	Όχι	Web Browsing Ηλεκτρονικό Ταχυδρομείο Στιγμιαίο Μήνυμα	>500kbps >500kbps <250 μηνύματα ψηφιολέξεων
Media Content Download	Όχι	Bulk Data, Download	>1Mbps

Πίνακας 9: Υποστηριζόμενες υπηρεσίες με τα αντίστοιχα απαιτούμενα εύρη ζώνης

Η χρήση των προσκλήσεων για εκπομπή απλοποιεί τη λειτουργία πρόσβασης και εγγυάται ότι οι εφαρμογές λαμβάνουν την υπηρεσία σε μια προκαθορισμένη βάση αν απαιτείται. Γενικώς, οι εφαρμογές δεδομένων είναι ανεκτικές στις καθυστερήσεις, αλλά οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως φωνή και βίντεο, απαιτούν υπηρεσία σε μια πιο ομοιόμορφη βάση και μερικές φορές σε ένα πολύ σφιχτά ελεγχόμενο πρόγραμμα. Για σκοπούς αντιστοίχισης των υπηρεσιών στους σταθμούς συνδρομητών και συσχετισμού ποικίλων επιπέδων QoS, όλες οι επικοινωνίες δεδομένων είναι στο γενικότερο θεματικό πλαίσιο μιας σύνδεσης. Οι ροές υπηρεσιών μπορούν να παρέχονται όταν είναι εγκατεστημένος ένας σταθμός συνδρομητή στο σύστημα. Αμέσως μετά την καταχώρηση του σταθμού συνδρομητή οι συνδέσεις συσχετίζονται με αυτές τις ροές υπηρεσιών (μια σύνδεση ανά ροή υπηρεσίας) για να παρέχουν μια σχέση στην οποία θα γίνει η αίτηση εύρους ζώνης.

Επιπροσθέτως, όταν η υπηρεσία ενός πελάτη χρειάζεται αλλαγή μπορεί να εγκαθιδρυθούν νέες συνδέσεις. Μια σύνδεση ορίζει μια ροή υπηρεσίας καθώς και την αντιστοίχιση μεταξύ διαδικασιών ομότιμης σύγκλισης που χρησιμοποιούν το MAC. Η ροή υπηρεσίας ορίζει τις παραμέτρους QoS για τα PDU που ανταλλάσσονται μόλις εγκαθιδρυθεί η σύνδεση. Οι ροές υπηρεσίας είναι ο μηχανισμός για UL και DL για διαχείριση QoS. Συγκεκριμένα, διευκολύνουν τη διαδικασία κατανομής εύρους ζώνης. Ένας σταθμός συνδρομητή αιτείται εύρος ζώνης UL ανά σύνδεση (αφανώς αναγνωρίζοντας τη ροή υπηρεσίας). Ο σταθμός βάσης χορηγεί το εύρος ζώνης στον σταθμό συνδρομητή ως ένα σύνολο αιτήσεων σε απόκριση των ανά σύνδεση αιτήσεων από τους σταθμούς συνδρομητών. Τα σχέδια διαμόρφωσης και κωδικοποίησης καθορίζονται σε ένα προφίλ ριπών που μπορεί να ρυθμιστεί προσαρμοζόμενο σε κάθε ριπή σε κάθε σταθμό συνδρομητή. Το MAC μπορεί να κάνει χρήση προφίλ ριπών που διαχειρίζονται αποτελεσματικά το εύρος ζώνης υπό ιδανικές συνθήκες ζεύξης μετά να πάει σε πιο αξιόπιστες μεν, λιγότερο αποτελεσματικές δε, εναλλακτικές λύσεις, όπως απαιτεί η επιθυμητή 99,999% διαθεσιμότητα ζεύξης (QPSK σε 16-QAM σε 64-QAM). Ο μηχανισμός αίτησης-χορήγησης σχεδιάστηκε να είναι κλιμακούμενος, αποτελεσματικός, και αυτό-διορθωτικός. Το σύστημα πρόσβασης του WiMAX δε χάνει σε αποτελεσματικότητα όταν υλοποιείται με πολλαπλές συνδέσεις ανά τερματικό, πολλαπλά επίπεδα QoS ανά τερματικό, και μεγάλο αριθμό χρηστών στατιστικής πολυπλεξίας. Παράλληλα με τη θεμελιώδη εργασία κατανομής του εύρους ζώνης και μεταφοράς των δεδομένων, το MAC περιλαμβάνει ένα υπόστρωμα ιδιωτικότητας που παρέχει αυθεντικοποίηση για την πρόσβαση στο δίκτυο και την εγκαθίδρυση της σύνδεσης ώστε να αποφευχθεί κλοπή υπηρεσίας, και παρέχει ανταλλαγή κλειδιών και κρυπτογράφηση για ιδιωτικότητα δεδομένων.

MAC PDU-SDU

Το MAC PDU είναι η μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου που ανταλλάσσεται μεταξύ των MAC στρωμάτων του σταθμού βάσης και των σταθμών συνδρομητών του. Είναι η μονάδα δεδομένων που παράγεται στην καθοδική κατεύθυνση για το επόμενο χαμηλότερο στρώμα και η μονάδα δεδομένων που λαμβάνεται κατά την ανοδική κατεύθυνση από το προηγούμενο χαμηλότερο στρώμα. Κάθε PDU αρχίζει με μία σταθερού μήκους επικεφαλίδα MAC (header) σταθερού μήκους, η οποία μπορεί να ακολουθείται από το ωφέλιμο φορτίο (payload). Το ωφέλιμο φορτίο περιέχει πληροφορία μεταβλητού μήκους οπότε το MAC PDU μπορεί να αποτελείται από μεταβλητό αριθμό bytes. Αυτό επιτρέπει στο MAC να εξυπηρετεί διάφορους τύπους κίνησης δεδομένων ανωτέρου στρώματος, χωρίς να έχει γνώση της μορφής ή του σχηματισμού των bits αυτών των μηνυμάτων (διαδικασία tunneling). Ένα MAC PDU μπορεί να περιλαμβάνει και έναν προαιρετικό κυκλικό έλεγχο πλεονασμού CRC (Cyclic Redundancy Check), η χρήση του οποίου είναι υποχρεωτική για SCa, OFDM και OFDMA PHY στρώματα.

Ορίζονται δύο τύποι επικεφαλίδων. Ο πρώτος είναι η γενική μορφή MAC επικεφαλίδας με την οποία ξεκινά κάθε MAC PDU και περιέχει είτε μηνύματα διαχείρισης MAC είτε δεδομένα του υποστρώματος σύγκλισης (convergence sublayer). Ο δεύτερος τύπος είναι η επικεφαλίδα αίτησης εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται για την απόκτηση επιπλέον εύρους ζώνης και δεν περιέχει καθόλου ωφέλιμο φορτίο. Όταν ένας συνδρομητικός σταθμός λάβει μία επικεφαλίδα αίτησης εύρους ζώνης πρέπει να απορρίψει το PDU. Τρεις τύποι υπο-επικεφαλίδων (subheader) μπορούν να παρουσιαστούν: Fragmentation, Packing, και Grant Management.

Υπό-κεφαλίδα επιχορήγησης διαχείρισης (Grant Management Sub-header): χρησιμοποιείται από έναν σταθμό συνδρομητή για τη διαβίβαση των αναγκών διαχείρισης εύρους ζώνης στον σταθμό βάσης του.

Υπό-κεφαλίδα κατάτμησης (Fragmentation sub-header): περιέχει πληροφορίες που υποδηλώνουν την παρουσία και τον προσανατολισμό στο ωφέλιμο φορτίο τυχόντων τμημάτων στις SDU.

Υπό-κεφαλίδα πακετοποίησης (Packing sub-header): υποδηλώνει την πακετοποίηση πολλαπλών SDU σε μια μονή PDU. Οι υπό-κεφαλίδες εκχώρησης διαχείρισης και κατάτμησης μπορούν να εισέλθουν σε μια MAC PDU ακολουθούμενες αμέσως τη γενική κεφαλίδα αν αυτό υποδηλώνεται από το Type Field. Η υπό-κεφαλίδα πακετοποίησης μπορεί να εισέλθει πριν την εκάστοτε MAC SDU αν αυτό υποδηλώνεται από το Type Field.

SDU (Service Data Units): είναι οι μονάδες που ανταλλάσσονται μεταξύ δύο γειτονικών στρωμάτων πρωτοκόλλων. Είναι οι μονάδες δεδομένων ειδικών υπηρεσιών που λαμβάνονται στην καθοδική κατεύθυνση από το προηγούμενο υψηλότερο στρώμα και οι μονάδες δεδομένων που αποστέλλονται κατά την ανοδική κατεύθυνση στο επόμενο υψηλότερο στρώμα. Μέσω του υποστρώματος σύγκλισης εντάσσονται στη σωστή διεύθυνση MAC.

Μετάδοση των MAC PDU και SDU

Οι εισερχόμενες MAC SDU από τα αντίστοιχα υποστρώματα σύγκλισης είναι μορφοποιημένες σύμφωνα με τη μορφή του MAC PDU, με κατάτμηση, ή/και πακετοποίηση, πριν διαβιβαστούν πάνω από μια ή περισσότερες συνδέσεις σύμφωνα με το πρωτόκολλο MAC. Μετά τη διάσχιση της ασύρματης ζεύξης, οι MAC PDU ανακατασκευάζονται στις αρχικές MAC SDU έτσι ώστε οι τροποποιήσεις που έγιναν από το πρωτόκολλο του στρώματος MAC να είναι σαφείς στην λαμβάνουσα οντότητα.

Πακετοποίηση και Κατάτμηση (Packing and Fragmentation)

Το WiMAX επωφελείται από την ενσωμάτωση των διαδικασιών πακετοποίησης και κατάτμησης με τη διαδικασία κατανομής εύρους ζώνης με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ευελιξίας, της αποδοτικότητας και την δραστικότητα αυτών των δύο. Η κατάτμηση (fragmentation) είναι η διαδικασία κατά την οποία μια MAC SDU διαιρείται σε ένα ή 42 περισσότερα κομμάτια MAC SDU. Η πακετοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία πολλαπλές MAC SDU πακετάρονται σε ένα μονό MAC PDU ωφέλιμο φορτίο. Τις δύο διαδικασίες μπορεί να αρχικοποιήσει είτε ένας σταθμός βάσης για μια DL σύνδεση, είτε ένας σταθμός συνδρομητή για μια UL σύνδεση. Το WiMAX επιτρέπει ταυτόχρονη κατάτμηση και πακετοποίηση για αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης.

Δημιουργία ARQ

Τα ARQ μπλοκ είναι διακριτές μονάδες δεδομένων που μεταφέρονται σε συνδέσεις που υποστηρίζουν ARQ. Σκοπός του ARQ είναι η επανεκπομπή χαμένων ή αλλοιωμένων MAC SDU μπλοκ (δηλαδή μπλοκ ARQ). Το MAC του WiMAX χρησιμοποιεί μια απλή προσέγγιση βασισμένη στην τεχνική του «ολισθαίνοντος παραθύρου» όπου ο πομπός μπορεί να αποστείλει έναν αριθμό μπλοκ χωρίς να λαμβάνει επιβεβαίωση. Ο δέκτης στέλνει μηνύματα επιβεβαίωσης ή αρνητικής επιβεβαίωσης για να πει στον πομπό ποια SDU μπλοκ λήφθηκαν και ποια χάθηκαν. Ο πομπός επανεκπέμπει μπλοκ που χάθηκαν και μετακινεί το ολισθαίνον παράθυρο εμπρός όταν έχουν επιβεβαιωθεί τα SDU μπλοκ που ληφθεί. Σε κάθε σύνδεση σταθμού συνδρομητή-σταθμού βάσης ανατίθεται μια τάξη υπηρεσίας, ως μέρος της δημιουργίας της σύνδεσης.

Μηνύματα διαχείρισης MAC

Downlink Channel Descriptor (DCD) μήνυμα: Ένα DCD μήνυμα εκπέμπεται από τον σταθμό βάσης κατά περιοδικά διαστήματα προκειμένου να ορίσει τα χαρακτηριστικά του φυσικού καναλιού κάτω ζεύξης. Ο σταθμός βάσης παράγει DCD περιλαμβάνοντας την καταμέτρηση των αλλαγών διαμόρφωσης και την ταυτότητα του καναλιού κάτω ζεύξης.

Downlink Map (DL-MAP) μήνυμα: Το DL-MAP μήνυμα ορίζει την πρόσβαση στην πληροφορία κάτω ζεύξης. Ο σταθμός βάσης παράγει DL-MAP μηνύματα περιλαμβάνοντας τα παρακάτω πεδία:

Συγχρονισμού PHY

Καταμέτρησης DCD

Ταυτότητας σταθμού βάσης

Uplink Channel Descriptor (UCD) μήνυμα: Το UCD μήνυμα εκπέμπεται από τον σταθμό βάσης κατά περιοδικά διαστήματα προκειμένου να ορίσει τα

χαρακτηριστικά του φυσικού καναλιού άνω ζεύξης. Ο σταθμός βάσης παράγει UCD μηνύματα που περιλαμβάνουν την καταμέτρηση των αλλαγών διαμόρφωσης, Ranging Backoff Start, Ranging Backoff End, Request Backoff Start και Request Backoff End.

Uplink Map (UL-MAP) μήνυμα: Το UL-MAP μήνυμα ορίζει την πρόσβαση στην πληροφορία άνω ζεύξης. Ο σταθμός βάσης παράγει UL-MAP μηνύματα περιλαμβάνοντας τα παρακάτω πεδία:

Ταυτότητα καναλιού άνω ζεύξης: Η ταυτότητα του καναλιού στην οποία αναφέρεται το μήνυμα

UCD καταμέτρηση: Ταιριάζει την τιμή του Configuration Change Count του UCD, που περιγράφει το προφίλ ριπής άνω ζεύξης που εφαρμόζεται.

Χρόνος έναρξης κατανομής: Ο αποτελεσματικός χρόνος της κατανομής άνω ζεύξης που ορίζεται από το UL-MAP.

Map IEs: Καθορίζει την άνω ζεύξης κατανομή εύρους ζώνης.

Μήνυμα Ranging Request (RNG-REQ): Ένα RNG-REQ μήνυμα εκπέμπεται από τον συνδρομητικό σταθμό κατά την έναρξη της επικοινωνίας αλλά και περιοδικά για να καθορίσει την καθυστέρηση του δικτύου και για να αιτηθεί αλλαγή επιπέδου ισχύος και/το προφίλ ριπής κάτω ζεύξης. Το RNG-REQ μπορεί να σταλεί κατά την αρχική ταξινόμηση και στα διαστήματα παροχής δεδομένων.

Ο συνδρομητικός σταθμός παράγει RNG-REQ που περιλαμβάνει την ταυτότητα του καναλιού κάτω ζεύξης, στο οποίο ο σταθμός έλαβε το UCD που περιγράφει το άνω ζεύξης και στο οποίο το ranging request μήνυμα πρόκειται να σταλεί. Όταν ο συνδρομητικός σταθμός προσπαθεί να εισέλθει στο δίκτυο, τότε το RNG-REQ περιλαμβάνει το προφίλ ριπής κάτω ζεύξης που αιτήθηκε καθώς και την MAC διεύθυνση του. Όταν το RNG-REQ μεταδίδεται κατά το αρχικό ranging στη σύνδεση του σταθμού βάσης, τότε το μήνυμα πρέπει να περιλαμβάνει την έκδοση του MAC. Επιπλέον, στο RNG-REQ μήνυμα μπορεί να περιλαμβάνεται η broadcast ικανότητα του AAS.

Μήνυμα Ranging Response (RNG-RSP): Το RNG-RSP μήνυμα αποστέλλεται από τον σταθμό βάσης σε απάντηση του ληφθέντος RNG-REQ μηνύματος και επιπλέον μπορεί να μεταδοθεί ανώνυμα για να στείλει διορθώσεις βασισμένες σε μετρήσεις που έχουν γίνει σε άλλα δεδομένα που ελήφθησαν ή σε MAC μηνύματα. Οπότε, ο

συνδρομητικός σταθμός πρέπει να είναι προετοιμασμένος να λάβει ένα RNG-RSP μήνυμα οποιαδήποτε στιγμή και όχι μόνο μετά από μία μετάδοση RNG-REQ.

Μήνυμα Registration Request (REG-REQ): Ένα REG-REQ μήνυμα αποστέλλεται από τον συνδρομητικό σταθμό κατά τη διάρκεια της έναρξης της επικοινωνίας και λαμβάνει σαν απάντηση ένα Registration Response (REG-RSP) μήνυμα από τον σταθμό βάσης.

2.11 Radio Link Control (RLC)

Ο έλεγχος ράδιο-ζεύξης (RLC) εκτελείται ταυτοχρόνως στην απόκτηση καναλιού και στη ροή υπηρεσίας για τη διατήρηση μιας σταθερής ζεύξης. Το Φυσικό Στρώμα του WiMAX απαιτεί εξίσου προηγμένα RLC, ειδικότερα την δυνατότητα του PHY μετάβασης από το ένα προφίλ ριπών στο άλλο. Το RLC ελέγχει αυτή τη δυνατότητα καθώς και τις παραδοσιακές του λειτουργίες που δεν είναι άλλες από τον έλεγχο ισχύος και εμβέλειας. Το RLC ξεκινά με περιοδικές broadcast εκπομπές των προφίλ ριπών που επιλέχθηκαν για την ανοδική ζεύξη και την κατερχόμενη ζεύξη. Τα ειδικά προφίλ ριπών που χρησιμοποιούνται σε ένα κανάλι επιλέγονται βάσει ενός συνόλου παραγόντων, όπως περιοχές βροχής και δυνατότητες εξοπλισμού. Τα προφίλ ριπών για την κατερχόμενη ζεύξη δέχονται μια αναγνωριστική ετικέτα, το DIUC (Downlink Interval Usage Code). Αντίστοιχα της ανοδικής ζεύξης λέγεται UIUC (Uplink Interval Usage Code).

Κατά το αρχικό ranging, ο SS (σταθμός συνδρομητή) ζητά από τον BS (σταθμό βάσης) να εξυπηρετηθεί στην κάτω ζεύξη σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο προφίλ και δηλώνει αυτή του την προτίμηση απλά μεταδίδοντας το επιλεγμένο DIUC στον BS. Αυτή η προτίμηση για τον SS έχει προέρθει από μετρήσεις ποιότητας του σήματος που έχει αρχικά διενεργήσει ο SS κατά τη διαδικασία του ranging και εξαρτάται από παραμέτρους, μία από τις οποίες είναι και η απόσταση SS και BS. Ο BS έχει τη δυνατότητα είτε να αρνηθεί το αίτημα του SS είτε να το αποδεχθεί. Παρομοίως και ο BS επιβλέπει συνεχώς την ποιότητα του σήματος στην άνω ζεύξη που λαμβάνει από τον SS. Έτσι μπορεί να ζητήσει από τον SS να μεταβεί σε διαφορετικό προφίλ ριπής στην άνω ζεύξη, απλά αλλάζοντας τον κατάλληλο UIUC που περιέχεται στο UL-MAP. Μετά το τέλος της παραπάνω διαδικασίας, οι BS και SS έχουν καθορίσει τα αρχικά προφίλ ριπών για άνω και κάτω ζεύξη. Ωστόσο, δεν έχουν τελειώσει και οι αρμοδιότητες του RLC. Ο λόγος είναι ότι οι συνθήκες που επικρατούν στο μέσο είναι πιθανό να αλλάξουν και έτσι να δυσχεράνουν ή να ευνοήσουν περισσότερο τη μετάδοση. Πιθανοί λόγοι για την αλλαγή των συνθηκών είναι η παρουσία νέων εμποδίων μεταξύ SS και BS εξαιτίας κλιματολογικών αλλαγών, για παράδειγμα βροχή, χιόνι, ομίχλη ή η παρουσία φυσικών εμποδίων. Έτσι το RLC συνεχίζει να επιβλέπει την ποιότητα της σύνδεσης στην άνω και κάτω ζεύξη σε όλη τη διάρκεια της συνεδρίας. Όπου οι νέες συνθήκες το επιβάλουν, το

RLC μπορεί να μεταβεί σε περισσότερο ανθεκτικό ή περισσότερο αποδοτικό προφίλ ριπών. Έτσι με αυτή την επίβλεψη, το RLC λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες στη διάρκεια της μετάδοσης, επιχειρεί να ισορροπήσει μεταξύ ενός ανθεκτικού και ενός αποδοτικού προφίλ ριπών. Αντίστοιχα λειτουργεί το RLC και από την πλευρά του BS. Σε αυτή την περίπτωση επιβλέπει συνεχώς την ποιότητα του σήματος στην άνω ζεύξη. Εάν κρίνει ότι κάποιος SS θα πρέπει να μεταβεί σε άλλο προφίλ ριπής άνω ζεύξης, τότε ο BS καθορίζει το κατάλληλο προφίλ ριπής για την άνω ζεύξη του SS, αλλά αλλάζοντας τον UIUC που σχετίζεται με τον αντίστοιχο SS. Η αλλαγή του προφίλ ριπών είναι ιδιαίτερα απλή διαδικασία γιατί δε χρειάζεται επιβεβαίωση από τον SS για αυτή την αλλαγή. Πράγματι, αφού ο δέκτης του SS θα λειτουργεί σε συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος είτε θα λάβει την αίτηση του BS για αλλαγή του προφίλ ριπής και το UIUC στο οποίο κατοχυρώνεται είτε κανένα από τα δύο. Συνεπώς, δεν υπάρχει ενδεχόμενο ασυμφωνίας των BS και SS για το προφίλ ριπής στην άνω ζεύξη. Κάτι τέτοιο δεν είναι τόσο εύκολο και για την κάτω ζεύξη. Το γεγονός ότι το RLC στο SS είναι ο υπεύθυνος να ζητήσει την αλλαγή του προφίλ ριπής στην κάτω ζεύξη, είναι πιθανό να δημιουργήσει ασυμφωνία μεταξύ SS και BS. Έτσι η αλλαγή του προφίλ ριπής στην κάτω ζεύξη θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά. Όπως αναφέρθηκε, ο SS επιβλέπει την ποιότητα του σήματος στην κάτω ζεύξη. Έτσι αυτός γνωρίζει πότε το προφίλ ριπής κάτω ζεύξης θα πρέπει να αλλάξει. Για την αίτηση αλλαγής υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι που εξαρτιούνται από τον τρόπο που λειτουργεί ο SS σε σχέση με τις συνδέσεις του. Ο τρόπος που μπορεί να ενεργήσει ο SS για τις αιτήσεις αλλαγής του προφίλ ριπής κάτω ζεύξης είναι εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας του. Υπάρχουν δύο δυνατότητες λειτουργίας ενός SS:

- α) Επιχορήγηση ανά σύνδεση (Grand Per Connection, GPC)
- β) Επιχορήγηση ανά SS (Grand Per SS, GPSS)

Και στις δύο περιπτώσεις, ο SS μπορεί να χρησιμοποιήσει μηνύματα τύπου *downlink burst profile change request (DBPC-REQ)* και να περιμένει την απάντηση του BS με μήνυμα τύπου *DBPC response (DBPC-RSP)*. Επιπλέον, η πρώτη περίπτωση έχει μια επιπλέον εναλλακτική, ο SS να χρησιμοποιήσει μήνυμα τύπου *RNG-REQ* για να ζητήσει την αλλαγή του προφίλ ριπής κάτω ζεύξης. Για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο ασυμφωνίας μεταξύ SS και BS, το πρωτόκολλο αλλαγής σε ένα πιο ανθεκτικό προφίλ ριπών, από το πρωτόκολλο αλλαγής σε πιο αποδοτικό προφίλ είναι διαφορετικό. Όσο αφορά την αλλαγή του προφίλ ριπών σε ένα λιγότερο ανθεκτικό προφίλ, ο SS εξετάζει σε κάθε χρονικό διάστημα το σήμα που λαμβάνει είναι αρκετά καλής ποιότητας για να μεταβεί σε λιγότερο ανθεκτικό προφίλ. Αν η απάντηση είναι θετική, στέλνει *RNG-REQ* ή *DBPC-REQ* στον BS με αίτημα να μεταβεί στο νέο προφίλ. Ωστόσο, ο SS στη συνέχεια «ακούει» στο νέο προφίλ για απάντηση και δεδομένα, κάτι που συνεχίζει να κάνει και μετά τη θετική απάντηση του BS. Ο

λόγος που ο SS αλλάζει το προφίλ του και ακούει στο νέο προφίλ ριπών είναι ότι εφόσον το νέο είναι λιγότερο ανθεκτικό από το παλαιό, θα «ακούσει» σίγουρα την απάντηση από τον BS, ανεξάρτητα αν αυτή έρθει στο νέο ή στο παλαιό προφίλ.

Κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να γίνει στην περίπτωση που μεταβαίνει σε ένα πιο ανθεκτικό προφίλ. Ο SS αρχικά αντιλαμβάνεται ότι η ποιότητα του σήματος είναι αρκετά χαμηλή για το συγκεκριμένο προφίλ που έχει επιλέξει. Έτσι χρησιμοποιώντας μηνύματα τύπου RNG-REQ ή DBPC-REQ ζητά από τον BS να μεταβεί σε καλύτερο προφίλ ριπών. Ωστόσο, συνεχίζει να «ακούει» στο παλαιό προφίλ ριπών, γιατί αν είχε μεταβεί στο νέο προφίλ ριπών όπως στην προηγούμενη περίπτωση, δε θα ήταν σε θέση να λάβει δεδομένα στο παλαιό προφίλ που ενδεχομένως να λάμβανε πριν από τα RNG-RSP ή DBPC-RSP. Επομένως, αλλάζει το προφίλ του μόνο όταν λάβει θετική απάντηση από τον BS.

2.12 Ασφάλεια

Κάθε τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης και ιδιαιτέρως αυτήν που προσφέρει μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης, θα πρέπει εμπεριέχει ισχυρά πρωτόκολλα ασφαλείας, τα οποία εγγυώνται στους χρήστες ασφάλεια και εμπιστοσύνη για τις συναλλαγές τους. Επίσης, θα πρέπει να υπάρχουν μηχανισμοί που θα αποτρέπουν τους κακεντρεχείς χρήστες να εισέλθουν στο δίκτυο και να υποκλέψουν πόρους. Το WiMAX χρησιμοποιεί έναν αριθμό από πολύ ανθεκτικούς αλγορίθμους για να αποτρέψει τα παραπάνω φαινόμενα. Σε κάθε SS είναι εγκατεστημένη μια ψηφιακή πιστοποίηση X.509 από τον κατασκευαστή όπως και η πιστοποίηση του ίδιου του κατασκευαστή. Οι πιστοποιήσεις αυτές αποστέλλονται στον BS και χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθεί μια σύνδεση μεταξύ της MAC διεύθυνσης του SS και του δημοσίου του κλειδιού Rivest-Shamir-Adleman (RSA). Ο BS αξιολογεί τις πιστοποιήσεις που έχει δεχθεί από τον SS και καθορίζει από αυτές, το επίπεδο πρόσβασης του SS στο δίκτυο. Στην περίπτωση που ο SS είναι εξουσιοδοτημένος να εισέλθει στο δίκτυο, τον αυθεντικοποιεί περιλαμβάνοντας στην απάντηση του και ένα κλειδί αυθεντικοποίησης (Authorization Key, AK), το οποίο είναι κρυπτογραφημένο με το δημόσιο κλειδί του SS. Περιοδικά ο SS ανανεώνει αυτή την πληροφορία για λόγους ασφαλείας. Κατά τη διάρκεια των συναλλαγών, το IEEE 802.16 εγγυάται την μυστικότητα των δεδομένων χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Private Key Management (PKM). Το PKM στηρίζεται στις πιστοποιήσεις X.509 και στην κρυπτογράφηση RSA για την αυθεντικοποίηση. Τα δεδομένα κρυπτογραφούνται χρησιμοποιώντας τουλάχιστον 56 bits στη μέθοδο κρυπτογράφησης Data Encryption Standard (DES), ενώ τα κλειδιά ανταλλάσσονται χρησιμοποιώντας το 3DES με αποτέλεσμα να κρυπτογραφούνται 3 φορές αυξάνοντας σημαντικά την ασφαλή μεταφορά τους όπως επίσης και το πρότυπο βελτιωμένης κρυπτογράφησης AES (Advanced Encryption Standard) για ενισχυμένη

ασφάλεια. Τέλος τα μηνύματα του PKM πρωτοκόλλου, πιστοποιούνται χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Hashed Message Authentication Code (HMAC).

2.13 Σύστημα Προσαρμοζόμενων Κεραιών (Adaptive Antenna System)

Το AAS χρησιμοποιείται στις προδιαγραφές του WiMAX για να περιγράψει τεχνικές σχηματισμού δεσμών όπου μια παράταξη κεραιών χρησιμοποιείται στο σταθμό βάσης για να αυξηθεί το κέρδος προς τον στοχευόμενο σταθμό συνδρομητή και παράλληλα εκμηδενισμό των παρεμβολών από άλλους σταθμούς συνδρομητών ή διαφόρων πηγών παρεμβολών. Οι τεχνικές τύπου AAS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενεργοποιήσουν Πολλαπλή Πρόσβαση Χωρικής διαίρεσης (Spatial Division Multiple Access), έτσι ώστε πολλαπλοί σταθμοί συνδρομητών που ξεχωρίζουν στο χώρο να μπορούν να λαμβάνουν και να εκπέμπουν στο ίδιο υποκανάλι την ίδια χρονική στιγμή. Χρησιμοποιώντας σχηματισμό δέσμης, ο σταθμός βάσης έχει τη δυνατότητα να κατευθύνει το επιθυμητό σήμα στους διαφορετικούς σταθμούς συνδρομητών και να διακρίνει τα σήματα των διαφορετικών σταθμών συνδρομητών ακόμη και αν λειτουργούν στα ίδια υποκανάλια.

2.14 Δομή και Μετάδοση Πλαισίου

Για αδειοδοτημένες μπάντες συχνοτήτων, η μέθοδος duplexing μπορεί να είναι είτε FDD είτε TDD. Οι σταθμοί εργασίας FDD μπορεί να είναι Half Duplex FDD (H-FDD). Στις μπάντες συχνοτήτων χωρίς άδεια, η μέθοδος duplexing είναι η TDD. Το διάστημα του πλαισίου περιλαμβάνει εκπομπές (PHY PDUs) από σταθμούς βάσης ή εργασίας, κενά και διαστήματα φύλαξης (guard intervals). Το PHY στρώμα του OFDM υποστηρίζει εκπομπές βασισμένες σε πλαίσια. Ένα πλαίσιο αποτελείται από ένα υπό-πλαίσιο κάτω ζεύξης και ένα υπο-πλαίσιο άνω ζεύξης. Ένα υπο-πλαίσιο κάτω ζεύξης αποτελείται από ένα μόνο κάτω ζεύξης PHY PDU. Ένα υπο-πλαίσιο άνω ζεύξης αποτελείται από διαστήματα συνοχής σχεδιασμένα για σκοπούς αρχικοποίησης και απαίτησης εύρους ζώνης και ένα ή πολλαπλά άνω ζεύξης PHY PDUs, κάθε ένα εκπεμπόμενα από διαφορετικό σταθμό εργασίας SS.

Ένα άνω ζεύξης PHY PDU αποτελείται από μια μόνο ροή η οποία αποτελείται από ένα short preamble και έναν ακέραιο αριθμό από σύμβολα OFDM. Οι PHY παράμετροι της ροής UL PHY PDU καθορίζονται από ένα UIUC 4-bit στο UL-MAP. Η κωδικοποίηση του UIUC ορίζεται στα μηνύματα UCD. Ένα κάτω ζεύξης PHY PDU αρχίζει με ένα long preamble, το οποίο χρησιμοποιείται για το PHY συγχρονισμό. Ο προπομπός ακολουθείται από μια FCH ριπή η οποία έχει διάρκεια όσο ένα OFDM σύμβολο και εκπέμπεται χρησιμοποιώντας διαμόρφωση QPSK ρυθμού 1/2 με το υποχρεωτικό σχήμα κωδικοποίησης. Το FCH περιέχει ένα DL_Frame_Prefix για να καθορίσει το προφίλ της ροής και το μήκος της ροής #1. Η κωδικοποίηση Rate_ID ορίζεται στον πίνακα στο κεφάλαιο ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ID ENCODINGS.

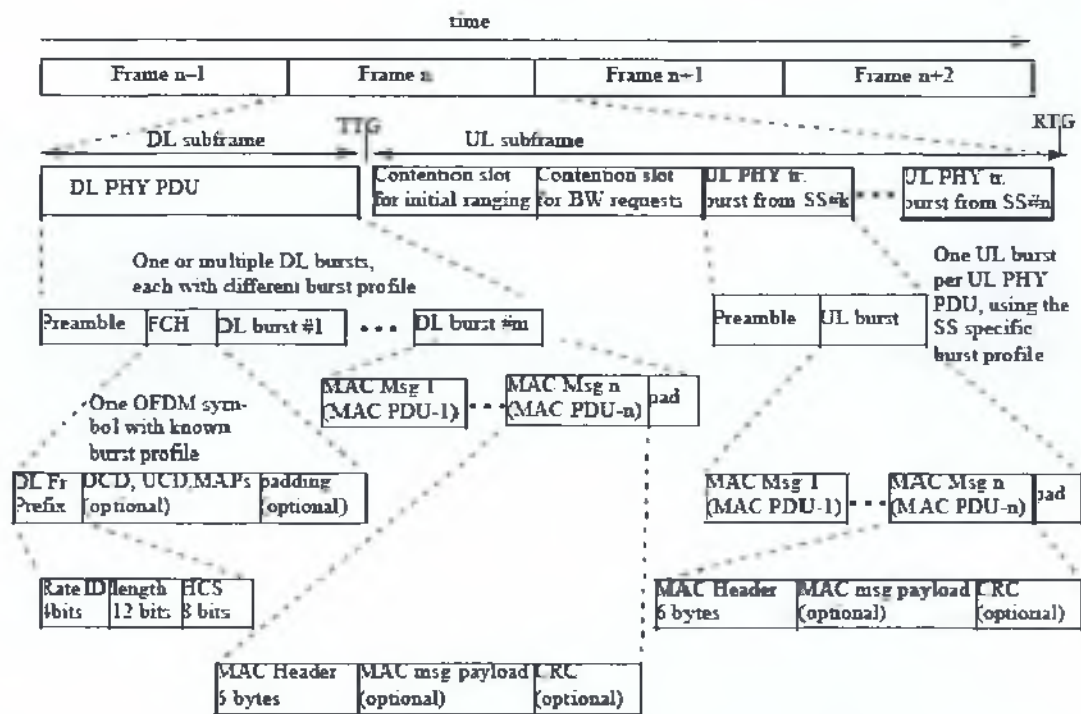
Η FCH ροή μπορεί επίσης να περιέχει μικρά μηνύματα ελέγχου MAC όπως DCD και/ή UCD. Μπορεί επίσης να περιέχει μακρά μηνύματα. Ένα DL-MAP μήνυμα, αν εκπεμφθεί στο εν λόγω πλαίσιο, πρέπει να είναι το πρώτο MAC PDU στη ροή που ακολουθεί το FCH. Ένα UL-MAP μήνυμα πρέπει αμέσως να ακολουθεί είτε το DL-MAP μήνυμα (αν έχει εκπεμφθεί κάποιο) είτε το DLFP. Αν UCD ή DCD μηνύματα εκπέμπονται στο πλαίσιο, πρέπει αμέσως να ακολουθούν τα DL-MAP και UL-MAP μηνύματα. Αν και η πρώτη ροή περιέχει MAC μηνύματα ελέγχου, δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούν την πιο γνωστή διαμόρφωση/κωδικοποίηση. Μια πιο αποδοτική διαμόρφωση/κωδικοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν υποστηρίζεται και εφαρμόζεται σε όλους τους σταθμούς εργασίας ενός σταθμού βάσης. Το FCH ακολουθείται από μία ή πολλαπλές ροές κάτω ζεύξης, κάθε ένα εκπέμπεται με διαφορετικό προφίλ ροής. Κάθε ροή κάτω ζεύξης αποτελείται από έναν ακέραιο αριθμό OFDM συμβόλων. Η τοποθεσία και το προφίλ της πρώτης ροής κάτω ζεύξης καθορίζεται στο Downlink Frame Prefix (DLFP). Η τοποθεσία και το προφίλ του μέγιστου δυνατού αριθμού συνεχόμενων ροών πρέπει επίσης να καθοριστεί στο DLFP. Τουλάχιστον ένα πλήρες DL-MAP πρέπει να είναι γνωστό στην πρώτη ροή ανάμεσα στο Lost DL-MAP Interval. Η τοποθεσία και το προφίλ των άλλων ροών καθορίζονται στο DL-MAP. Το προφίλ καθορίζεται από ένα 4-bit Rate_ID (για την πρώτη ροή DL) ή από το DIUC. Η κωδικοποίηση DIUC καθορίζεται στα DCD μηνύματα. Το πεδίο HCS επεξεργάζεται το τελευταίο byte του DLFP. Αν υπάρχουν αχρησιμοποίητα IEs στο DLFP, το πρώτο αχρησιμοποίητο IE πρέπει να έχει όλα τα πεδία κωδικοποιημένα ως μηδέν.

Αν και η ροή #1 περιέχει MAC μηνύματα ελέγχου, δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσει την πιο γνωστή διαμόρφωση/κωδικοποίηση. Μια πιο αποδοτική διαμόρφωση/κωδικοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν υποστηρίζεται και εφαρμόζεται σε όλους τους σταθμούς εργασίας ενός σταθμού βάσης. Το FCH ακολουθείται από μία ή πολλαπλές ροές κάτω ζεύξης, κάθε ένα εκπεμπόμενο με διαφορετικό προφίλ ροής. Κάθε ροή κάτω ζεύξης αποτελείται από έναν ακέραιο αριθμό OFDM συμβόλων ροής και τα προφίλ του DL PHY PDU καθορίζονται από ένα DIUC 4-bit στο DL-MAP. Η κωδικοποίηση DIUC ορίζεται στα DCD μηνύματα.

Το υπό-πλαίσιο DL μπορεί εναλλακτικά να περιέχει μια ζώνη STC στην οποία όλες οι ροές DL είναι κωδικοποιημένα κατά STC. Η ζώνη STC αρχίζει με έναν προπομπό και μία STC-κωδικοποιημένη FCH-STC ροή, η οποία εκπέμπεται με BPSK ρυθμού 1/2. Ακολουθείται από μία ή περισσότερες STC-κωδικοποιημένες PHY ροές. Η πρώτη ροή στη ζώνη STC μπορεί να περιέχει ένα DL-MAP εφαρμόσιμο μόνο στη ζώνη STC. Αν το DL-MAP είναι παρόν, πρέπει να είναι το πρώτο MAC PDU στην πληροφορία της ροής. Η ζώνη STC τελειώνει στο τέλος του πλαισίου.

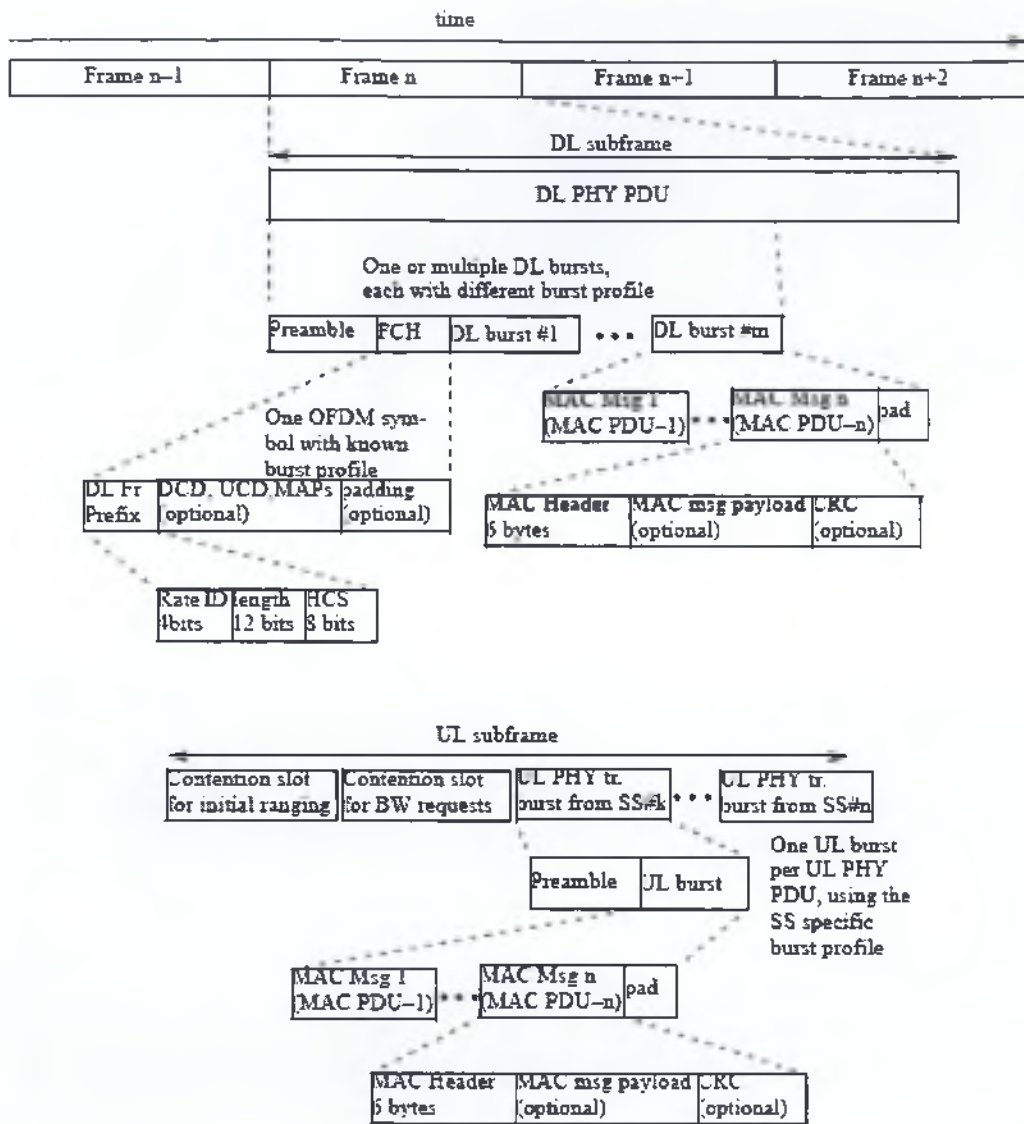
Με το OFDM-PHY, μία PHY ροή είτε DL είτε UL αποτελείται από ένα ακέραιο αριθμό OFDM συμβόλων, MAC μηνύματα π.χ MAC PDUs. Για να σχηματίσουμε έναν ακέραιο αριθμό από σύμβολα OFDM ένα «φορτίο» με bytes 0xFF πρέπει να προστεθεί. Ύστερα το «φορτίο» αναδιατάσσεται, κωδικοποιείται και διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους PHY οι οποίες ορίζονται στο πρότυπο.

Σε κάθε TDD frame το κενό μετάβασης Tx/Rx (TTG) και το Rx/Tx κενό μετάβασης (RTG) πρέπει να εισάγεται μεταξύ των υπό-frame DL και UL και στο τέλος κάθε frame ώστε να μπορέσει ο σταθμός βάσης να αλλάξει κατεύθυνση μετάδοσης. TTG και RTG πρέπει να είναι τουλάχιστον 5μs καθώς και ακέραιο πολλαπλάσιο του (physical slot) PS σε διάρκεια και να ξεκινά σε άκρο του PS. Μετά το TTG ο δέκτης BS θα κοιτάξει για τα πρώτα σύμβολα μιας ροής άνω ζεύξης. Έπειτα από το RTG οι δέκτες SS θα κοιτάζουν για τα πρώτα σύμβολα με QPSK διαμορφωμένα δεδομένα στη ροή DL.



Σχήμα 12: Παράδειγμα δομής πλαισίου OFDM με TDD

Σε συστήματα FFD τα TTG και RTG δε χρειάζονται καθώς η μετάδοση από πομπή σε δέκτη και από δέκτη σε πομπή γίνεται σε ανεξάρτητες συχνότητες. Με τη χρησιμοποίηση FDD ο σταθμός βάσης BS μέσα σε ένα frame δε χρειάζεται να προγραμματίσουν μία δέσμευση DL κατά τη διάρκεια ή μετά μίας UL δέσμευσης στο ίδιο H-FDD τεμαχικό [8].



Σχήμα 13: Παράδειγμα δομής πλαισίου OFDM με FDD

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΟΡΕΙΝΟ ΚΑΙ ΔΑΣΩΔΕΣ

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση του σήματος στις ασύρματες επικοινωνίες είναι άπειροι. Κατά τη σχεδίαση ενός ασύρματου δικτύου σημαντικό είναι να λαμβάνουμε υπ' όψιν ότι η ισχύς του διαδιδόμενου σήματος επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η συχνότητα, η απόσταση που το σήμα διανύει από το πομπό μέχρι το δέκτη, η μορφολογία του εδάφους, εμπόδια στη διαδρομή του σήματος και οι παραγόμενες ανακλάσεις, σκεδάσεις, περιθλάσεις σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου. Αυτό το σήμα έχει διαφορετική διάδοση καθυστέρησης (delay spreads), εξασθένηση και πόλωση σχετικά με αυτό του απευθείας μονοπατιού. Η ανάκλαση εμφανίζεται όταν τα μεταδιδόμενα κύματα προσπίπτουν σε επιφάνειες με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με το μήκος κύματος τους, πχ η επιφάνεια της Γης, ψηλά κτίρια, τοίχους κλπ. Η περιθλάση εμφανίζεται όταν μεταξύ των κεραιών πομπού και δέκτη υπάρχει αιχμηρό εμπόδιο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δευτερεύοντα κύματα ακόμα και όταν δεν υπάρχει διαδρομή οπτικής επαφής. Η σκέδαση δημιουργείται όταν τα μεταδιδόμενα κύματα προσπίπτουν σε εμπόδια των οποίων οι διαστάσεις είναι ίδιας ή μικρότερης τάξης μεγέθους από το μήκος κύματος του σήματος και προκαλεί την πολλαπλή αλλαγή κατεύθυνσης της ενέργειας. Σκεδαζόμενα κύματα εμφανίζονται όταν τα κυρίως κύματα προσπίπτουν για παράδειγμα σε πινακίδες, θύλα δρόμων κλπ. Σαν αποτέλεσμα των τριών παραπάνω μηχανισμών η ασύρματη διάδοση μπορεί, σε γενικές γραμμές, να χαρακτηριστεί από τρία φαινόμενα: α) τις απώλειες διαδρομής (path loss) β) τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας-σκίαση και γ) τις διαλείψεις μικρής κλίμακας-πολλαπλής διαδρομής. Η περιοχή των συχνοτήτων που αφορούν την παρούσα εργασία είναι από 2-11GHz. Το άνω όριο για επιτυχείς ζεύξεις μη οπτικής επαφής (NLOS) είναι τα 6 GHz. Πάνω από το όριο αυτό τα Η/Μ κύματα (σήματα) συμπεριφέρονται όπως το φως και δε διαθλώνται γύρω από αντικείμενα που συναντούν στη διαδρομή. Παρακάτω αναλύουμε τους παράγοντες αυτούς και μελετάμε πως επηρεάζουν τη σχεδίαση ενός δικτύου, δίνοντας έμφαση κυρίως στις διαλείψεις.

3.1 Απώλειες Διαδρομής

Σε κάθε σχεδίαση ενός δικτύου, σίγουρα έχουμε απώλειες λόγω της απόστασης που διανύει το σήμα. Γενικότερα, η πιο ολοκληρωμένη μελέτη των απωλειών διάδοσης σε οποιοδήποτε περιβάλλον διάδοσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εφαρμογή των εξισώσεων του Maxwell, χρησιμοποιώντας οριακές συνθήκες οι οποίες εκφράζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων παρεμπόδισης. Όμως οι υπολογισμοί που προκύπτουν είναι εξαιρετικά περίπλοκοι και επιπλέον σε πολλές περιπτώσεις οι αναγκαίες παράμετροι δεν είναι διαθέσιμες. Για να

ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, έχουν προταθεί και κατόπιν εφαρμοστεί διάφορες προσεγγίσεις. Οι πιο γνωστές από αυτές χρησιμοποιούν τεχνικές αντιγράφων ακτινών, όπου στην απλούστερη περίπτωση (2 ακτινών) η διάδοση του σήματος περιγράφεται με μια απευθείας διαδρομή μεταξύ πομπού και δέκτη και μια ανακλώμενη, συνήθως στο έδαφος. Υπάρχουν όμως συνθήκες διάδοσης που δεν μπορούν να περιγραφούν επακριβώς με τη χρήση των μοντέλων των ακτινών. Σε αυτές τις περιπτώσεις συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται διάφορα αναλυτικά μοντέλα που βασίζονται σε εμπειρικές μετρήσεις, όπως θα δούμε και παρακάτω.

Μια άλλη τεχνική για τον υπολογισμό των απωλειών διαδρομής είναι η χρήση του μοντέλου διάδοσης σε ελεύθερο χώρο (**Free Space Loss**). Το μοντέλο διάδοσης σε ελεύθερο χώρο χρησιμοποιείται για να γίνει μια εκτίμηση της ισχύς του λαμβανόμενου σήματος όταν ο πομπός και ο δέκτης έχουν καθαρή, χωρίς εμπόδια, διαδρομή οπτικής επαφής μεταξύ τους. Η λαμβανόμενη ισχύς σε ελεύθερο χώρο δίνεται από το νόμο του Friis ως:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_r G_t \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (3.1)$$

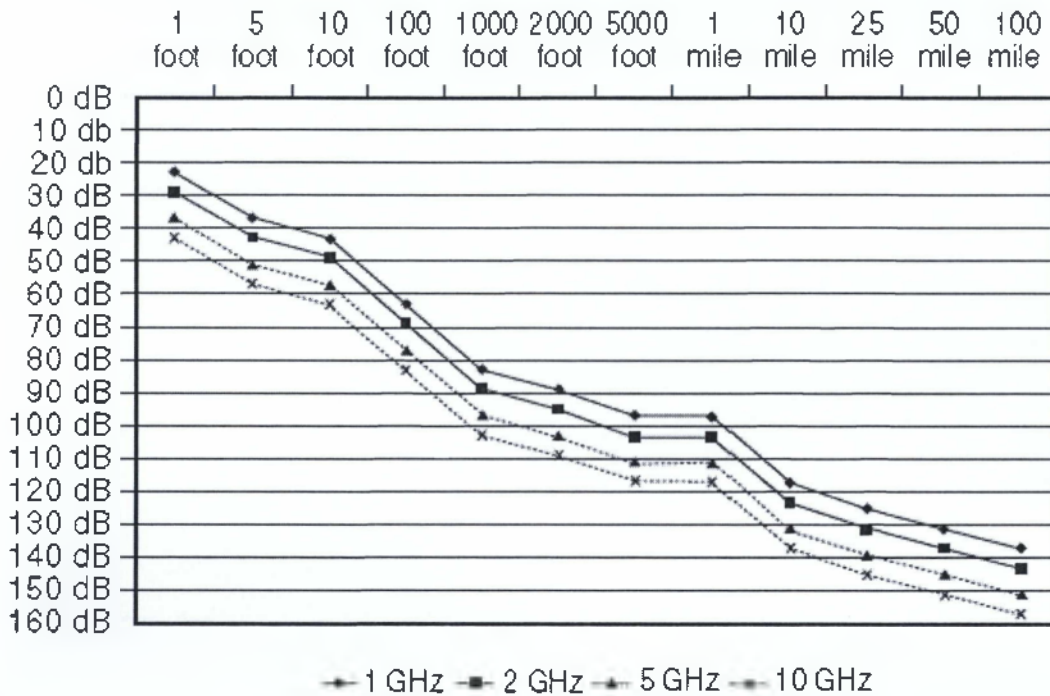
όπου P_t είναι η εκπεμπόμενη ισχύς, G_t και G_r είναι τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα, λ είναι το μήκος κύματος του σήματος, σε m, d είναι η απόσταση των κεραιών εκπομπής και λήψης, σε m, και $L > 1$ είναι ο παράγοντας απωλειών του συστήματος που δεν εξαρτάται από τη διάδοση. Η (3.1) δείχνει ότι η λαμβανόμενη ισχύς μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης πομπού δέκτη. Οι απώλειες διαδρομής ορίζονται ως η διαφορά, σε dB, μεταξύ της ενεργής ισχύς εκπομπής προς λήψης, και για το μοντέλο ελεύθερου χώρου δίνονται από:

$$PL = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{G_r G_t \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \text{ (dB)} \quad (3.2)$$

Στην πραγματικότητα οι μέσες απώλειες διαδρομής που εμφανίζονται στα ασύρματα κανάλια είναι αντιστρόφως ανάλογες με την απόσταση πομπού και δέκτη υψωμένη σε μια δύναμη p , όπου $2 \leq p \leq 4$ [23]. Συνεπώς είναι πολύ πιο σημαντικές σε σχέση με τις απώλειες ελευθέρου χώρου, δηλαδή για $p = 2$. Επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν είναι τα ύψη των κεραιών, η συχνότητα λειτουργίας, οι συνθήκες της ατμόσφαιρας και η παρουσία κτιρίων και δέντρων. Υπάρχουν πολλά εμπειρικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη όλους αυτούς τους παράγοντες ώστε να πραγματοποιείται όσο το δυνατόν ακριβέστερα ο υπολογισμός των απωλειών διαδρομής. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου μοντέλου για μεγάλες πόλεις είναι το **Hata**, όπου οι μέσες απώλειες διαδρομής δίνονται από:

$$PL = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_t - \alpha (h_r) + (44.9 - 6.55 \log h_t) \log d \quad \text{(dB)} \quad (3.3)$$

όπου f είναι η συχνότητα λειτουργίας, σε MHz, h_t και h_r είναι τα ενεργά ύψη των κεραιών πομπού και δέκτη, σε m, αντίστοιχα, και a (h_r) είναι ο παράγοντας διόρθωσης του ενεργού ύψους του κινητού, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος της καλυπτόμενης περιοχής. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι και τα εμπειρικά μοντέλα έχουν περιορισμούς ως προς την εφαρμογή τους, αφού μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε περιβάλλον παρόμοιο με αυτό που έγιναν οι μετρήσεις και δύσκολα μπορούν να επεκταθούν σε άλλα.

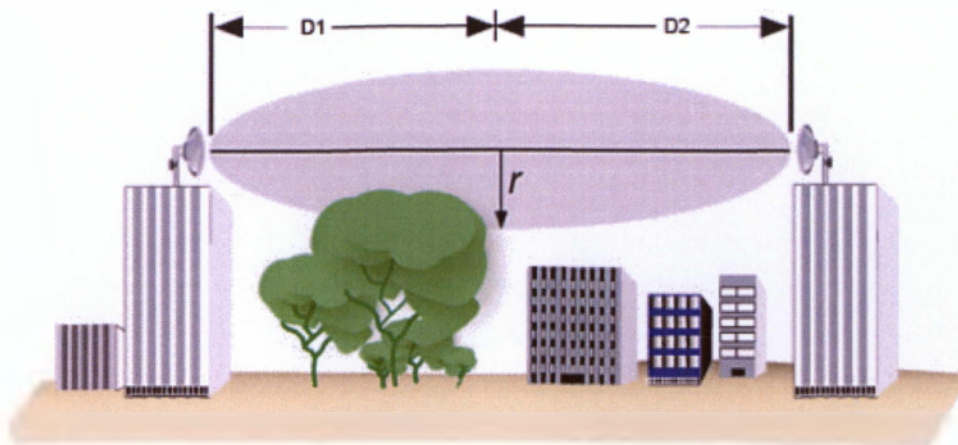


Σχήμα 14: Εξάρτηση της ισχύος του σήματος με την απόσταση και τη συχνότητα

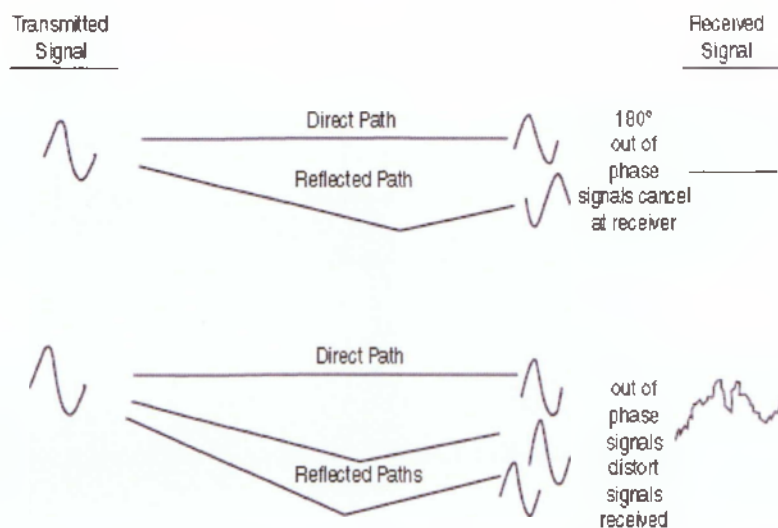
Από το παραπάνω σχήμα γίνεται αντιληπτό ότι μείωση της ισχύος του σήματος επιφέρει σημαντικές μεταβολές στην εμβέλεια του σήματος και κατά συνέπεια στην περιοχή κάλυψης του ασύρματου δικτύου.

Πολυδιαδρομική παρεμβολή

Ένα άλλο φαινόμενο που προκαλεί αυξημένο ρυθμό λαθών στο δέκτη είναι η πολυδιαδρομική παρεμβολή. Αν, καθώς διαδίδεται το σήμα, συναντήσει κάποιο εμπόδιο στην πρώτη ζώνη Fresnel, τότε τα ανακλώμενα σήματα κατευθύνονται μαζί με το απ' ευθείας στο δέκτη, με τη διαφορά ότι φτάνουν αργότερα (αφού διανύουν μεγαλύτερη απόσταση) αλλά και με διαφορετική φάση έτσι ώστε είτε να του προκαλούν ισχυρή παραμόρφωση, είτε ακόμη και να ακυρώσουν το αρχικό σήμα (διαφορά φάσης 180°). Ένα εμπόδιο εντός της ζώνης Fresnel μπορεί να μειώσει την ισχύ του σήματος σχεδόν για πάνω από 10dB. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ακριβώς αυτό το φαινόμενο που περιγράψαμε.



Σχήμα 15: Ανάκλαση σήματος σε εμπόδιο εντός της ζώνης Fresnel



Σχήμα 16: Επίδραση πολυδιαδρομικής διάδοσης στο αρχικό σήμα

Ομοδιαυλική παρεμβολή (co-channel interference)

Για την καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος σε ένα ασύρματο δίκτυο, χρησιμοποιούνται δίαυλοι της ίδιας συχνότητας σε μη γειτονικές περιοχές. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν κυψέλες που χρησιμοποιούν την ίδια ομάδα συχνοτήτων και ονομάζονται ομοδιαυλικές. Αν κατά τον σχεδιασμό του δικτύου, οι ομοδιαυλικές κυψέλες δεν έχουν την αναγκαία απόσταση μεταξύ τους τότε εμφανίζονται παρεμβολές, από τους διαύλους της ίδιας συχνότητας που λειτουργούν σε διαφορετικές θέσεις στην υπό κάλυψη περιοχή. Τέτοιου είδους παρεμβολές, μπορούν να αποτελέσουν σοβαρό πρόβλημα γιατί δεν μπορεί να διορθωθεί με αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος, εφόσον έτσι θα αυξηθεί και η παρεμβολή στις γειτονικές ομοδιαυλικές κυψέλες. Συνεπώς, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά το

σχεδιασμό του δικτύου, έτσι ώστε οι ομοδιαυλικές κυψέλες να έχουν την αναγκαία απόσταση μεταξύ τους ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές κατά τη διάδοση.

Παρεμβολή Γειτονικών Διαύλων

Η παρεμβολή γειτονικών διαύλων ελέγχεται ελαφρώς καλύτερα από την ομοδιαυλική. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την ελαχιστοποίηση της ομοδιαυλικής παρεμβολής, οι δίαυλοι μίας κυψέλης επαναχρησιμοποιούνται σε άλλες κυψέλες που απέχουν επαρκώς. Κατά παρόμοιο τρόπο, για να αποφευχθεί παρεμβολή μεταξύ γειτονικών διαύλων, δεν κατανέμονται στην ίδια κυψέλη δίαυλοι που είναι γειτονικοί στο φάσμα συχνοτήτων. Έτσι, ρυθμιστικός παράγοντας για την παρεμβολή γειτονικών διαύλων είναι η συγκεκριμένη κατανομή διαύλων στην κυψέλη. Ωστόσο, το πρόβλημα δεν εξαλείφεται τελείως ακόμη και αν οι παρεμβάλλοντες δίαυλοι δεν είναι γειτονικοί στο φάσμα. Αυτό συμβαίνει διότι, για πρακτικούς λόγους, οι ραδιοδίαυλοι δεν έχουν αυστηρά περιορισμένο εύρος ζώνης. Ο βαθμός κατά τον οποίο αυτή η ατέλεια περιορίζει την επίδοση του συστήματος, είναι συνάρτηση της απόστασης των γειτονικών διαύλων, της απόκρισης του φίλτρου στην είσοδο του δέκτη, της επιλεκτικότητας του δέκτη και της στατιστικής κατανομής του λόγου του επιθυμητού σήματος προς τη στάθμη του φέροντος του γειτονικού διαύλου. Υπάρχει παρεμβολή γειτονικών διαύλων εντός και εκτός ζώνης. Η πρώτη είναι παρόμοια με την ομοδιαυλική και δεν μπορεί να φιλτραριστεί.

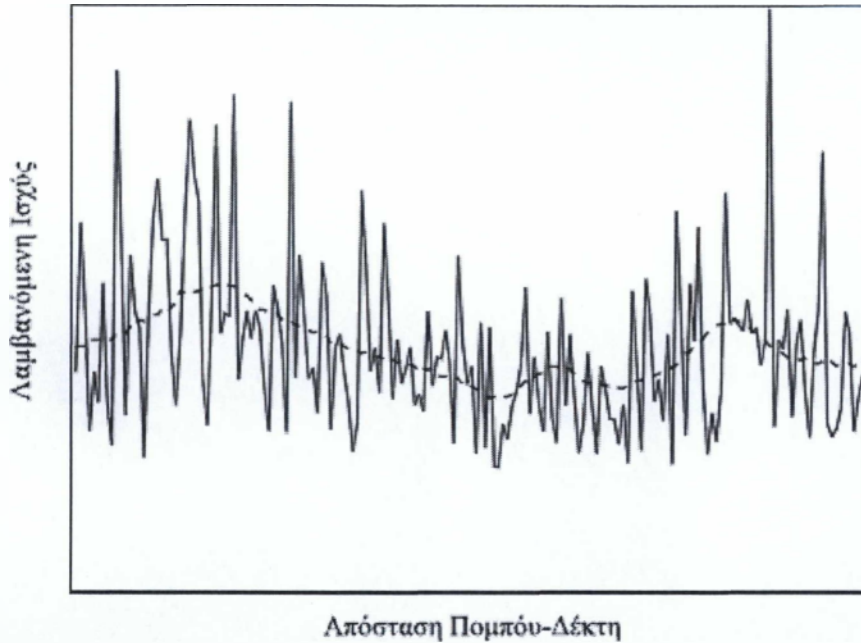
3.2 Διαλείψεις

Οι παρεμβολές που οφείλονται σε κινούμενα εμπόδια και μη ονομάζονται διαλείψεις. Όταν σε μία περιοχή κάλυψης έχουμε αντικείμενα που κινούνται όπως αυτοκίνητα, δέντρα, φύλλα δέντρων και μη όπως η μορφολογία του εδάφους (λόφοι, βουνά), προκαλούνται ανακλάσεις στο δίαυλο καθότι ο δίαυλος υπόκειται σε τυχαίες διακυμάνσεις του πλάτους και της συχνότητας. Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας αναπαριστούν τη διακύμανση στη μέση ισχύ του σήματος εξαιτίας της κίνησης σε μεγάλες διαδρομές. Αυτό το φαινόμενο επηρεάζεται από μεγάλα εμπόδια ή το έντονο ανάγλυφο της Γης (δάση ή λόφοι) που υπάρχουν μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας αναφέρονται στις δραματικές αλλαγές στο πλάτος ή τη θάση του σήματος που μπορεί να συμβούν σαν αποτέλεσμα μικρών αλλαγών (της τάξεως του μισού μήκους κύματος) στη χωρική απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Και βέβαια σε πολλές περιπτώσεις τα δύο αυτά φαινόμενα μπορούν να συμβούν ταυτόχρονα δημιουργώντας ένα περιβάλλον διάδοσης που είναι γνωστό ως σύνθετο.

3.2.1 Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας-Φαινόμενο Σκίασης

Ένα άλλο ζήτημα που επηρεάζει την ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος στο ασύρματο κινητό περιβάλλον είναι το φαινόμενο της σκίασης. Συγκεκριμένα, ένα ράδιο-σήμα υπόκειται σε σκίαση, όταν φράσσεται εντελώς η διαδρομή του με

αποτέλεσμα σε μερικές περιπτώσεις το μοναδικό σήμα που λαμβάνει ο δέκτης να προέρχεται από ανακλάσεις του αρχικού, ενώ η ισχύς του εμφανίζει σχετικά αργά μεταβαλλόμενες διακυμάνσεις. Στο Σχήμα 17, απεικονίζεται η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα σαν συνάρτηση της απόστασης. Στο σχήμα αυτό παρατηρούνται ξεκάθαρα οι γρήγορες διακυμάνσεις της ισχύς του σήματος όσο ο δέκτης κινείται, που οφείλονται στις διαλείψεις μικρής κλίμακας, και οι αντίστοιχες διακυμάνσεις που οφείλονται στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας, όπου η τοπική μέση μεταβολή του σήματος πραγματοποιείται βαθμιαία.



Σχήμα 17 : Οι διαλείψεις σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Με την συνεχή μαύρη γραμμή παρουσιάζονται οι διαλείψεις μικρής κλίμακας ενώ με την διακεκομμένη μαύρη γραμμή οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας.

Γενικότερα, οι διακυμάνσεις στην ισχύ που οφείλονται στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας δημιουργούνται εξαιτίας της παρεμπόδισης από μεγάλα αντικείμενα που υπάρχουν μεταξύ πομπού και δέκτη, πχ κτίρια, δέντρα, ανάγλυφο του εδάφους. Επίσης, οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται στις μεταβολές του σήματος από τις επιφάνειες ανάκλασης και τα αντικείμενα σκέδασης στα οποία προσπίπτει. Συνεπώς, εξαιτίας του γεγονότος ότι η περιοχή, το μέγεθος και οι διηλεκτρικές ιδιότητες των αντικειμένων παρεμπόδισης, όπως επίσης και οι μεταβολές του σήματος από τις σκεδάσεις και ανακλάσεις, είναι άγνωστες, χρησιμοποιούνται στατιστικά μοντέλα για το χαρακτηρισμό των διακυμάνσεων. Το πιο διαδεδομένο μοντέλο για την περιγραφή αυτών των διακυμάνσεων είναι η σκίαση *log-normal*. Αυτό το μοντέλο έχει επιβεβαιωθεί εμπειρικά ότι μοντελοποιεί επακριβώς τις διακυμάνσεις στη λαμβανόμενη ισχύ και για το εσωτερικό και για το εξωτερικό

περιβάλλον διάδοσης. Στο μοντέλο σκίασης log-normal ο λόγος εκπεμπόμενης προς λαμβανόμενης ισχύς, $\psi = P_r/P_t$, θεωρείται ότι είναι τυχαίος και ακολουθεί την κατανομή log-normal που δίνεται από:

$$p(\psi) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\psi_{dB}}\psi} \exp\left[-\frac{(10\log(\psi)-\mu_{\psi_{dB}})^2}{2\sigma_{\psi_{dB}}^2}\right], \psi \geq 0 \quad (3.4)$$

όπου $\xi = 10/\ln 10$, $\mu_{\psi_{dB}}$ είναι η μέση τιμή του $\psi_{dB} = 10\log(\psi)$, σε dB, και $\sigma_{\psi_{dB}}$ είναι η τυπική απόκλιση (standard deviation) του ψ_{dB} , σε dB. Σε εμπειρικές μετρήσεις το $\mu_{\psi_{dB}}$ είναι ίσο με τις εμπειρικές απώλειες διαδρομής, μιας και η μέση διακύμανση εξαιτίας της σκίασης έχει ήδη ενσωματωθεί στις μετρήσεις. Σε αναλυτικά μοντέλα το $\mu_{\psi_{dB}}$ πρέπει να ενσωματώνει και τις μέσες διακυμάνσεις εξαιτίας εμποδίων. Η (2.4) περιγράφει τα τυχαία φαινόμενα σκίασης τα οποία εμφανίζονται σε μετρήσεις όταν η απόσταση πομπού και δέκτη παραμένει σταθερή και μεταβάλλονται τα εμπόδια που υπάρχουν μεταξύ τους. Στο φαινόμενο αυτό, γνωστό και ως διαλείψεις μεγάλης κλίμακας τα μετρούμενα επίπεδα του σήματος, σε dB, σε μια δεδομένη απόσταση, ακολουθούν την κατανομή του Gauss.

3.2.2 Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας-Φαινόμενο Πολλαπλής Διαδρομής

Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας είναι οι μικρές διακυμάνσεις που παρατηρούνται στο πλάτος, τη φάση και τις χρονικές καθυστερήσεις των ραδιο-σημάτων σε μια μικρή απόσταση ή περίοδο του χρόνου. Οι διαλείψεις αυτές οφείλονται σε παρεμβολές μεταξύ δύο ή περισσότερων εκδοχών του εκπεμπόμενου σήματος οι οποίες λαμβάνονται στο δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Υπάρχουν πολλοί φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις διαλείψεις μικρής κλίμακας σε ένα ασύρματο κανάλι διάδοσης. Οι πιο σημαντικοί είναι :

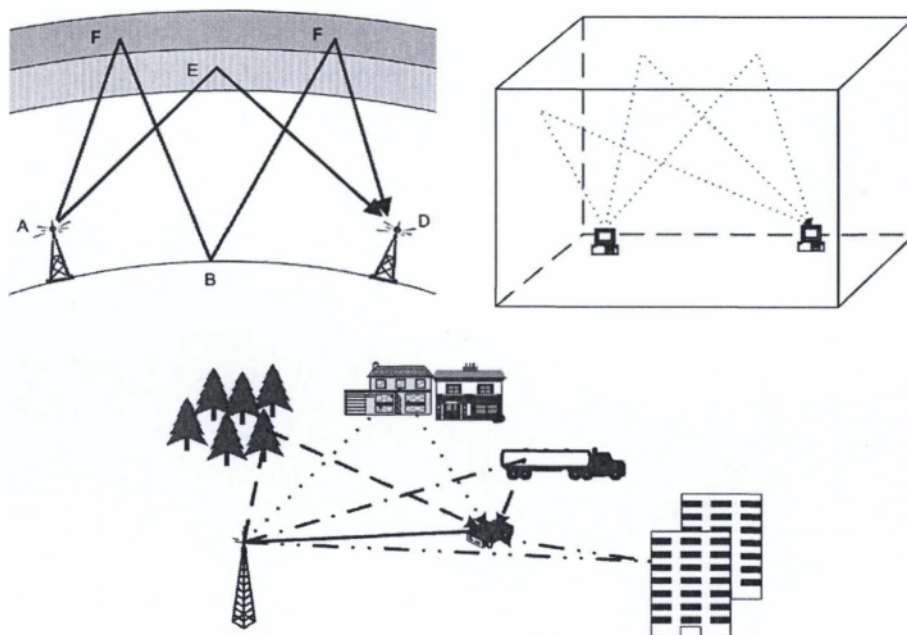
1) Διάδοση πολλαπλής διαδρομής: Οι μηχανισμοί διάδοσης των κυμάτων (όπως αυτοί αναφέρθηκαν έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλαπλών εκδοχών του εκπεμπόμενου σήματος, οι οποίες λαμβάνονται στην κεραία λήψης, μετατοπισμένες στο χωρικό και χρονικό προσανατολισμό. Τα διαφορετικά αυτά κύματα πολλαπλής διαδρομής έχουν τυχαίο πλάτος και φάση, δημιουργώντας έτσι διακυμάνσεις στην ισχύ των σημάτων και συνεπώς διαλείψεις μικρής κλίμακας.

2) Κίνηση του κινητού : Η σχετική κίνηση μεταξύ του σταθμού βάσης και ενός κινητού δέκτη επιφέρει τυχαία μεταβολή της συχνότητας εξαιτίας των διαφορετικών μετατοπίσεων Doppler των κυμάτων πολλαπλής διαδρομής. Η μετατόπιση Doppler μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με το αν ο κινητός δέκτης πλησιάζει ή απομακρύνεται από το σταθμό βάσης.

3) Κίνηση των αντικειμένων του περιβάλλοντος : Η κίνηση των αντικειμένων σε ένα

ασύρματο κανάλι επιφέρει μια χρονικά μεταβαλλόμενη μετατόπιση Doppler στα κύματα πολλαπλής διαδρομής. Η κίνηση των αντικειμένων του περιβάλλοντος λαμβάνεται υπόψη όταν είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του κινητού δέκτη, αλλιώς μπορεί να αγνοηθεί και να εξεταστεί μόνο η ταχύτητα του δέκτη.

4) Εύρος ζώνης εκπομπής του σήματος: Εάν το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου ραδιοσήματος είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του καναλιού πολλαπλής διαδρομής, το λαμβανόμενο σήμα θα παραμορφωθεί αλλά οι διαλείψεις μικρής κλίμακας δεν θα είναι σημαντικές. Εάν το εκπεμπόμενο σήμα έχει μικρότερο εύρος ζώνης σε σύγκριση με εκείνο του καναλιού, το πλάτος του σήματος θα μεταβάλλεται γρήγορα αλλά το σήμα δεν θα παραμορφώνεται στο χρόνο. Στο Σχήμα 18, δίνονται παραδείγματα ασύρματων καναλιών στα οποία εμφανίζονται διαλείψεις πολλαπλής διαδρομής.



Σχήμα 18: Πολλαπλές διαδρομές : α) εξαιτίας ιονοσφαιρικών σκεδάσεων, β) σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα εσωτερικού χώρου, και γ) σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα εξωτερικού χώρου.

Γενικότερα, το ασύρματο κανάλι μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα γραμμικό Φ ίλτρο με χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση, όπου η χρονική μεταβολή οφείλεται στην κίνηση στο χώρο. Αυτή η Φ ύση του καναλιού οφείλεται στο άθροισμα των πλατών και των καθυστερήσεων των πολλαπλών εισερχόμενων κυμάτων που έχουν σαν αποτέλεσμα:

α) τη χρονική εξάπλωση (time spread) των πολλαπλών διαδρομών,

β) τη χρονική διασπορά (time variance) των πολλαπλών διαδρομών.

Η χρονική εξάπλωση είναι η καθυστέρηση μεταξύ της άφιξης του πρώτου και του τελευταίου συνθετικού πολλαπλών διαδρομών, ενώ η χρονική διασπορά είναι η αλλαγή στο πλάτος και τη φάση του σήματος λόγω της μεταβολής του περιβάλλοντος που οφείλεται στην κίνηση. Εξαιτίας αυτών των μηχανισμών, ένα ράδιο-σήμα το οποίο διαδίδεται σε ένα ασύρματο κινητό κανάλι επηρεάζεται από διαφορετικά είδη διαλείψεων ανάλογα με τις παραμέτρους του σήματος (εύρος ζώνης, περίοδος συμβόλου) και τα χαρακτηριστικά του καναλιού (εξάπλωση καθυστέρησης, delay spread, εξάπλωση Doppler). Για παράδειγμα όταν το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος B_s είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης συμφωνίας (coherence bandwidth) του καναλιού B_c , τότε έχουμε **συχνο-επιλεκτικές διαλείψεις (frequency selective)**, αλλιώς έχουμε **επίπεδες διαλείψεις (flat fading)** όπως θα δούμε στις επόμενες ενότητες. Αντίστοιχο του B_c στο πεδίο της συχνότητας, είναι η εξάπλωση καθυστέρησης, σ_τ , στο πεδίο του χρόνου. Επίσης, εάν η χρονική διάρκεια ενός συμβόλου T_s είναι μεγαλύτερη από το σύμφωνο χρόνο ενός καναλιού T_c , τότε έχουμε **γρήγορες διαλείψεις (fast fading)**, διαφορετικά έχουμε **αργές διαλείψεις (slow fading)**.

Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα

Όταν ένα κανάλι εισάγει σταθερό κέρδος και γραμμική απόκριση φάσης σε εύρος που είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος, τότε το κανάλι προκαλεί στο λαμβανόμενο σήμα διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα. Το σήμα που τελικά λαμβάνεται, αποτελείται από διαφορετικές εκδοχές του εκπεμπόμενου σήματος με διαφορετικές εξασθενήσεις και καθυστερήσεις, δηλαδή είναι ισχυρά παραμορφωμένο. Αιτία των επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα διαλείψεων είναι η χρονική διασπορά των μεταδιδόμενων συμβόλων στο κανάλι, με αποτέλεσμα το κανάλι να προκαλεί διασυμβολική παρεμβολή. Επίσης, τέτοιου είδους διαλείψεις οφείλονται σε καθυστερήσεις λόγω πολλαπλών διαδρομών, οι οποίες υπερβαίνουν την περίοδο των μεταδιδόμενων συμβόλων. Τα κανάλια με διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα ονομάζονται επίσης δίαυλοι ευρείας ζώνης.

Επίπεδες διαλείψεις

Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή ο δίαυλος εισάγει σταθερό κέρδος και γραμμική απόκριση φάσης σε εύρος ζώνης που είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος τότε το λαμβανόμενο σήμα υπόκειται σε επίπεδες διαλείψεις. Τότε, η δομή του διαύλου είναι τέτοια ώστε καθώς μεταδίδεται το σήμα στο δέκτη να διατηρεί τα φασματικά του χαρακτηριστικά και αυτό που μεταβάλλεται με τον χρόνο είναι η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος, καθώς διακυμαίνεται το κέρδος του διαύλου λόγω των πολλαπλών διαδρομών.

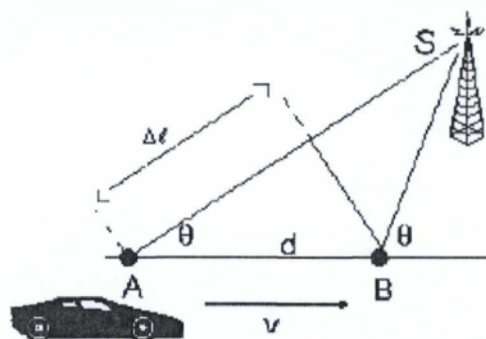
Έτσι, οι δίαυλοι αυτοί είναι επίσης γνωστοί και ως δίαυλοι μεταβαλλόμενου πλάτους ή στενού εύρους ζώνης, καθότι το εύρος ζώνης τους είναι μεγαλύτερο σε σχέση με του μεταδιδόμενου σήματος. Συνήθως προκαλούν βαθιές διαλείψεις, οπότε απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ εκπομπής κατά 20 dB με 30 dB, έτσι ώστε να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα ο ρυθμός εσφαλμένων bit (BER) κατά τη διάρκεια των διαλείψεων αυτών. Τα κανάλια με επίπεδες διαλείψεις είναι επίσης γνωστοί ως δίαυλοι μεταβαλλόμενου πλάτους και μερικές φορές αναφέρονται και ως δίαυλοι στενού εύρους ζώνης.

Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς το χρόνο

Πρόκειται για διαλείψεις που εξαρτώνται από χρόνο. Προκαλούνται από την κίνηση του κινητού τερματικού ή και από την κίνηση του περιβάλλοντος διάδοσης γενικότερα. Το φαινόμενο αναφέρεται ως ολίσθηση Doppler και οι διαλείψεις που προκαλούνται εμφανίζονται ως μια μεταβολή της φάσης του λαμβανόμενου σήματος. Στη συνέχεια περιγράφεται εν συντομία η ολίσθηση Doppler και τα αίτια που την προκαλούν.

1) Ολίσθηση Doppler

Για την ορθότερη περιγραφή του φαινομένου παρατίθεται στο σχήμα 19, όπου το κινητό τερματικό κινείται με σταθερή ταχύτητα v μεταξύ των θέσεων A και B, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει σήμα από την απομακρυσμένη πηγή S.



Σχήμα 19: Η ολίσθηση Doppler

Έστω Δt ο χρόνος που χρειάζεται το κινητό να φτάσει από την θέση A στη θέση B και θ η γωνία που σχηματίζεται από την κατεύθυνση άφιξης του σήματος και την ταχύτητα του κινητού, τότε η διαφορά δρόμων από τη πηγή προς τα A, B θα είναι $\Delta l = d \cos \theta = v \Delta t \cos \theta$. Η γωνία θ είναι ίδια και στις δύο θέσεις διότι θεωρήσαμε την πηγή S εξαιρετικά απομακρυσμένη και κατ' επέκταση τις SA και SB σχεδόν παράλληλες. Δεδομένης λοιπόν της διαφοράς δρόμου Δl του εκπεμπόμενου σήματος η μεταβολή της φάσης στο λαμβανόμενο σήμα θα είναι:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi*v*\Delta t}{\lambda} * \cos\theta \quad (3.5)$$

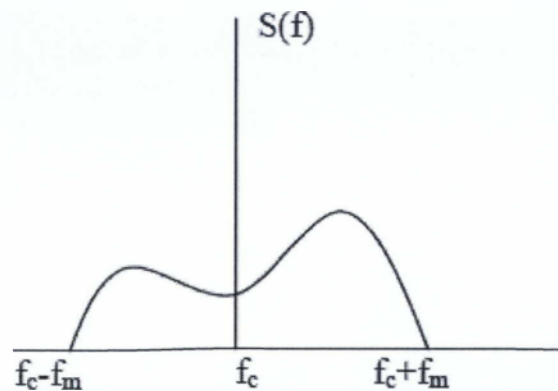
Η ολίσθηση Doppler f_D δίνεται από τον τύπο:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} * \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{1}{2\pi} \frac{2\pi*v}{\lambda} * \cos\theta = \frac{v}{\lambda} \cos\theta \quad (3.6)$$

Από τον τύπο 3.5 είναι προφανές ότι όταν για τη γωνία θ ισχύει $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ τότε το συνημίτονο είναι θετικό, το κινητό κινείται προς την πηγή και η ολίσθηση είναι θετική, το αντίθετο συμβαίνει όταν το κινητό απομακρύνεται από την πηγή, τότε το συνημίτονο είναι αρνητικό και η ολίσθηση είναι αρνητική.

2) Διασπορά Doppler

Η μέγιστη τιμή της ολίσθησης Doppler, f_m , ονομάζεται διασπορά Doppler (Doppler spread). Πρακτικά η διασπορά Doppler συνεπάγεται διεύρυνση του εύρους ζώνης του σήματος κατά f_m , αν για παράδειγμα το φάσμα του σήματος αποτελείτο από ένα απλό τόνο στη συχνότητα f_c τότε το φάσμα μετά την επίδραση του Doppler spread θα αποκτούσε εύρος ζώνης όπως εμφανίζεται και στο σχήμα 20.



Σχήμα 20: Διασπορά Doppler στο φάσμα του απλού τόνου

Μαθηματικά η διασπορά Doppler ορίζεται ως η RMS τιμή του φάσματος $S(f)$ του σήματος. Συγκεκριμένα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_{f_c-f_m}^{f_c+f_m} (f-f_c)^2 S(f) df}{\int_{f_c-f_m}^{f_c+f_m} S(f) df}} \quad (3.7)$$

όπου \bar{f} είναι η μέση συχνότητα του φάσματος που δίνεται από τον τύπο:

$$\bar{f} = \frac{\int_{f-f_m}^{f+f_m} f \cdot S(f) df}{\int_{f-f_m}^{f+f_m} S(f) df}$$

Αποτέλεσμα της διασποράς Doppler είναι η αποσυσχέτιση του σήματος με χρονική περίοδο $1/f_D$. Αυτό σημαίνει ότι το κανάλι μεταβάλλεται με περίοδο $1/f_D$, όσο δηλαδή μεγαλύτερη είναι η ολίσθηση Doppler τόσο πιο γρήγορα μεταβάλλεται ο δίαυλος. Αν η διάρκεια του bit που εκπέμπεται είναι μεγάλη, τότε κατά τη διάρκεια του bit ο δίαυλος θα μεταβληθεί και θα έχουμε αποσυσχέτιση φάσης για το επόμενο bit. Άρα σε ένα δίαυλο που εμφανίζει διαλείψεις επιλεκτικές ως προς το χρόνο απαιτείται ο ρυθμός μετάδοσης να είναι αρκούντως υψηλός ώστε να «προλαβαίνει» τις αλλαγές του καναλιού. Διαφορετικά η περίοδος των bit πρέπει να είναι αρκετά μικρή ώστε κατά τη διάρκειά τους το κανάλι να παραμένει σταθερό. Ένα κανάλι επιλεκτικό ως προς το χρόνο χαρακτηρίζεται από το χρόνο συνοχής (coherence time), T_c , του καναλιού. Πρακτικά, ο χρόνος συνοχής δείχνει τη διάρκεια κατά την οποία το κανάλι επηρεάζει τα εκπεμπόμενα σήματα με τον ίδιο τρόπο, στο διάστημα αυτό τα πλάτη των λαμβανόμενων σημάτων έχουν επηρεαστεί από το κανάλι με τον ίδιο τρόπο, παρουσιάζουν δηλαδή υψηλό δείκτη αυτοσυσχέτισης. Αν η περίοδος συμβόλου είναι μικρότερη από T_c τότε το κανάλι δε θα προκαλεί παραμόρφωση στο σήμα λόγω της κίνησης του κινητού τερματικού ή του παραβάλλοντος. Πιο αυστηρά, ως χρόνος συνοχής ορίζεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος πέφτει από το 1 στο 0.7. Ορίζεται δε ως το αντίστροφο της διασποράς Doppler.

$$T_c \approx 1/f_{RMS} \quad (3.8)$$

Προσεγγιστικοί τύποι για τον 4.13 έχουν προσδιοριστεί. Επί παραδείγματι αν ο χρόνος συνοχής αναφέρεται ως το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου η συνάρτηση χρονικής συσχέτισης είναι πάνω από 0.5 τότε δίνεται από τη σχέση:

$$T_c \approx 9/16\pi f_m \quad (3.9)$$

3.2.3 Μοντέλα Διαλείψεων Μικρής Κλίμακας

Κανάλι με χρήση του μοντέλου Rayleigh

Το μοντέλο περιγραφής του ασύρματου καναλιού που συναντάται κυρίως στις σύγχρονες κινητές τηλεπικοινωνίες είναι το μοντέλο Rayleigh. Βασική προϋπόθεση για να θεωρήσουμε το ασύρματο κανάλι Rayleigh είναι η πολύοδη διάδοση του εκπεμπόμενου σήματος. Οι τοποθεσίες που εγκαθίστανται σήμερα συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών (όπως αστικά κέντρα) αποτελούν σίγουρα ένα πλούσιο περιβάλλον σκέδασης με έντονο το φαινόμενο της πολλαπλής διαδρομής, γεγονός που εξηγεί την ευρεία χρήση του μοντέλου αυτού. Όπως θα φανεί και στην σύντομη μαθηματική ανάλυση που ακολουθεί η παρουσία πολλών διαδρομών διάδοσης για το σήμα είναι απαραίτητη λόγω της ανάγκης ισχύος του κεντρικού οριακού θεωρήματος, ώστε να μπορεί η λαμβανόμενη μιγαδική περιβάλλουσα να μοντελοποιείται ως μιγαδική τυχαία διαδικασία Gauss. Συγκεκριμένα θεωρούμε ότι εκπέμπεται περί την συχνότητα f_c το ζωνοπερατό σήμα $x(t)$, του οποίου μάλιστα το εύρος ζώνης είναι αρκούντως μικρό σε σχέση με τη f_c ώστε να μπορεί να θεωρηθεί στενής ζώνης [14][17].

$$x(t) = \text{Re}\{\tilde{u}(t) * \exp(j2\pi f_c t)\} \quad (3.10)$$

Με $\tilde{u}(t)$ τη μιγαδική περιβάλλουσα του εκπεμπόμενου σήματος. Αν N είναι οι διαδρομές από τις οποίες διαδίδεται το σήμα αυτό για να φτάσει στο δέκτη τότε το λαμβανόμενο σήμα θα είναι:

$$s(t) = \text{Re}\{\exp(j2\pi f_c t) \sum_{i=1}^N A_i(t) \exp(-j\varphi_i(t) * \tilde{u}(t - \tau(t)))\} \quad (3.11)$$

με $A_i(t)$, $\tau_i(t)$ και $\varphi_i(t)$ να είναι το πλάτος, η καθυστέρηση και η φάση της συνιστώσας που λαμβάνει ο δέκτης από την i -οστή διαδρομή. Όταν οι διαλείψεις επιδρούν σε συστήματα στενής ζώνης, το λαμβανόμενο πλάτος του φέροντος διαμορφώνεται από τη σταθερά διαλείψεων α , όπου α είναι μία τυχαία μεταβλητή με μεταβλητότητα $\Omega = \overline{\alpha^2}$ και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) $p_\alpha(\alpha)$. Η PDF εξαρτάται από τη φύση του περιβάλλοντος διάδοσης. Μετά τη διέλευση του από το κανάλι διαλείψεων, φτάνοντας το σήμα στο δέκτη, προστίθεται σ' αυτό προσθετικός λευκός Gaussian θόρυβος (AWGN), ο οποίος θεωρείται τυπικά στατιστικά ανεξάρτητος του πλάτους διαλείψεων α και χαρακτηρίζεται από μονόπλευρη φασματική πυκνότητα ισχύος N_0 W/Hz. Ισοδύναμα, η λαμβανόμενη στιγμιαία ισχύς σήματος διαμορφώνεται από την τιμή α^2 . Συνεπώς, ορίζουμε το στιγμιαίο λόγο της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου (SNR) ανά σύμβολο ως $\gamma = \alpha^2 E_s / N_0$ και τη μέση σηματοθορυβική σχέση ανά σύμβολο ως

$\bar{\gamma} = \Omega E_S / N_0$ όπου E_S είναι η ενέργεια του συμβόλου. Για απλοποίηση η 3.11 γράφεται:

$$s(t) = \text{Re}\{\bar{a}(t) * \exp(j2\pi f_c t)\} \quad (3.12)$$

Με $\bar{a}(t)$ τη μιγαδική περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος. Επειδή αρχικά θεωρήσαμε ζωνοπερατό σήμα στενής ζώνης μπορούμε να παραστήσουμε το $s(t)$ στην κανονική του μορφή και αντίστοιχα να εκφράσουμε τη μιγαδική περιβάλλουσά του, $\bar{a}(t)$ με τη βοήθεια της συμφασικής και ορθογωνικής συνιστώσας του $s(t)$. Συγκεκριμένα η δίδεται από τη σχέση:

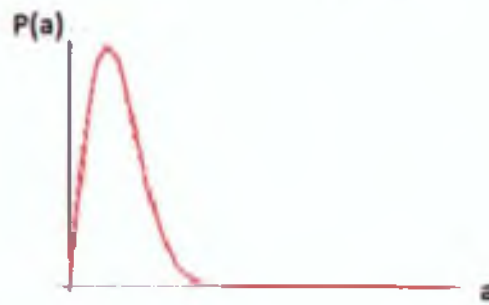
$$\bar{a}(t) = S_c(t) + jS_s(t) \quad (3.13)$$

ενώ το μέτρο της $\bar{a}(t)$ που αποτελεί ουσιαστικά και τη ζητούμενη περιβάλλουσα δίδεται από τη 3.14:

$$a(t) = \sqrt{S_c^2(t) + S_s^2(t)} \quad (3.14)$$

Εξαιτίας του έντονου περιβάλλοντος σκέδασης και της πολύοδης διάδοσης ο δέκτης λαμβάνει πολλαπλά αντίγραφα του σήματος ενώ αποκλείεται και το ενδεχόμενο ύπαρξης LOS ή επικρατέστερης συνιστώσας. Υπό αυτές τις συνθήκες και θεωρώντας τα σήματα αυτά ως τυχαίες μεταβλητές ισόνομες και ανεξάρτητες μεταξύ τους μπορούμε να πούμε ότι για την άθροισή τους στο δέκτη μπορεί να ισχύσει το κεντρικό οριακό θεώρημα και το ολικό άθροισμα να ακολουθεί την κατανομή Gauss. Έτσι η μιγαδική περιβάλλουσα $\bar{a}(t)$ μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια μιγαδική τυχαία διαδικασία Gauss. Από τη σχέση 3.14 παρατηρούμε ότι η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος, $a(t)$, είναι η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος δύο συναρτήσεων Gauss οπότε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητάς της (PDF) προκύπτει Rayleigh και δίνεται από τον τύπο 3.15, ενώ γραφικά εμφανίζεται στο σχήμα 21.

$$p(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.15)$$



Σχήμα 21: Κατανομή Rayleigh που ακολουθεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος

Με σ^2 να είναι η μέση τετραγωνική τιμή των $s_c(t)$, $s_s(t)$ συνιστωσών. Άρα η μέση σηματοθορυβική ισχύς ανά σύμβολο του σήματος του οποίου η περιβάλλουσα $r(t)$ ακολουθεί την Rayleigh κατανομή θα είναι:

$$\Omega = \frac{E_s}{N_0} [a^2(t)] = \frac{E_s}{N_0} [S_c^2(t)] + \frac{E_s}{N_0} [S_s^2(t)] = 2\sigma^2 \quad (3.16)$$

Ενώ η 3.15 συναρτήσεϊ της μέση σηματοθορυβικής ισχύος ανά σύμβολο του σήματος Ω γράφεται ως εξής:

$$p(a) = \frac{2a}{\Omega} \exp\left(-\frac{a^2}{\Omega}\right) \quad , \text{ για } a \geq 0 \quad (3.17)$$

Το μοντέλο Rayleigh όπως περιγράφηκε παραπάνω είναι ορθή προσέγγιση σε περιπτώσεις που οι χρήστες κινούνται σε περιβάλλοντα με πολλά εμπόδια τα οποία εξαλείφουν τη συνιστώσα οπτικής επαφής, έτσι ώστε το φαινόμενο της διάδοσης να γίνεται μια τυχαία διαδικασία. Ωστόσο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις το μοντέλο Rayleigh δεν μπορεί να εφαρμοστεί και οι αποκλίσεις του με την πραγματικότητα γίνονται αισθητές. Συγκεκριμένα το μοντέλο δεν εφαρμόζεται όταν:

(α) Ο αριθμός των διαδρομών N δεν είναι αρκούντως μεγάλος ώστε να ισχύει η προσέγγιση του θεωρήματος κεντρικού ορίου.

(β) Λόγω της διάταξης των κτιρίων και των δρόμων σε ένα περιβάλλον διάδοσης το σήμα διαδίδεται υπό συνθήκες κυματοδηγησης. Δημιουργεί δηλαδή κατά τη διάδοσή του πολλαπλές ανακλάσεις και κατ' επέκταση στάσιμα κύματα.

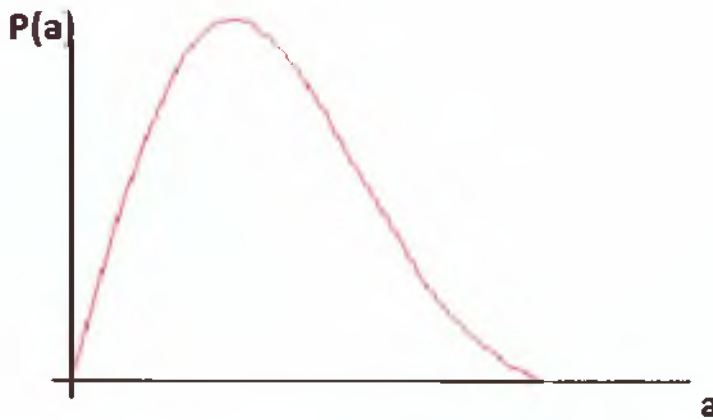
(γ) Όταν υπάρχει διαδιδόμενη συνιστώσα οπτικής επαφής που λαμβάνεται από το δέκτη. Σε αυτή την περίπτωση εμπίπτουν οι περιοχές κοντά στους σταθμούς βάσης.

Εδώ η περιβάλλουσα του σήματος που λαμβάνει ο δέκτης ακολουθεί την κατανομή Rice.

Κανάλι με χρήση του μοντέλου Nakagami-n (Rice)

Το μοντέλο αυτό διάδοσης εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου ο δέκτης λαμβάνει μια ισχυρή συνιστώσα σήματος και περισσότερες ασθενέστερες λόγω πολυόδης διάδοσης. Η ισχυρή αυτή συνιστώσα είτε είναι η συνιστώσα οπτικής επαφής είτε αποτελεί τη μέση τιμή συνιστωσών που φτάνουν στο δέκτη μέσω ανακλάσεων από συγκεκριμένα, μεγάλα και σταθερά εμπόδια που απέχουν αρκετά από το δέκτη. Στο μοντέλο αυτό η περιβάλλουσα του σήματος μιας και παύει να έχει μηδενική μέση τιμή μεταβάλλεται πολύ λιγότερο, ενώ ακολουθεί την Ricean κατανομή. Η συνάρτηση που περιγράφει την πυκνότητα πιθανότητας της περιβάλλουσας σε αυτή την περίπτωση δίνεται από τον τύπο 3.18 και γραφικά από το σχήμα 22 [12].

$$P(a) = \frac{2(1+n^2)e^{-n^2 a}}{\Omega} \exp\left(-\frac{(1+n^2)a^2}{\Omega}\right) * I_0\left(2na\sqrt{\frac{1+n^2}{\Omega}}\right), a \geq 0 \quad (3.18)$$



Σχήμα 22: Κατανομή Rice που ακολουθεί η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος

Όπου I_0 είναι η μηδενικού βαθμού τροποποιημένη συνάρτηση Bessel του πρώτου είδους, Ω είναι η μέση σηματοθορυβική ισχύς ανά σύμβολο του σήματος όπου n είναι η παράμετρος διαλείψεων της Nakagami-n, η οποία κυμαίνεται από 0 έως ∞ . Αυτή η παράμετρος σχετίζεται με τον παράγοντα Ricean K μέσω της σχέσης $K = n^2$, ο οποίος αντιστοιχεί στο πηλίκο της ισχύος της επικρατέστερης συνιστώσας προς την ισχύ των υπολοίπων ασθενέστερων συνιστωσών. Βάσει των συμβόλων που χρησιμοποιήθηκαν στη σχέση 3.18 ο παράγοντας K θα δίνεται από τον τύπο:

$$n^2 = K = \frac{\left(\frac{A_0}{\sigma}\right)^2}{\Omega} = \frac{A_0^2}{2\Omega} \quad (3.19)$$

Όπου A_0 είναι μέση τιμή του πλάτους της περιβάλλουσας που εδώ όπως προαναφέραμε είναι διάφορη του μηδενός και οδηγεί στην ανάγκη χρήσης του μοντέλου Rice.

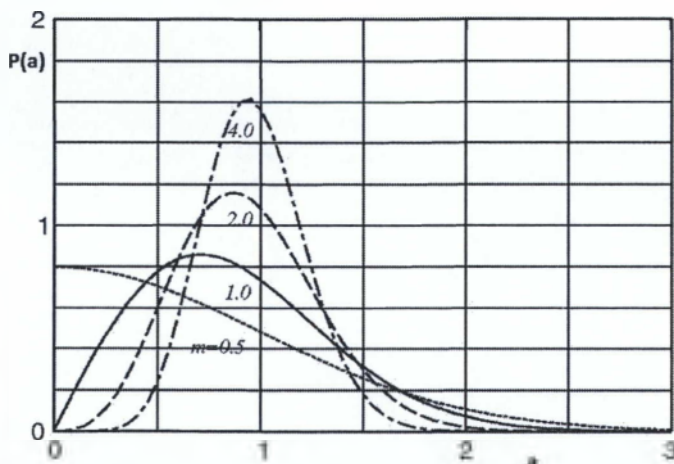
Όταν δεν υπάρχει LOS συνιστώσα η Nakagami- m για $m = 0$ μας δίνει την κατανομή διαλείψεων Rayleigh και για $m = \infty$ υποδηλώνει την ανυπαρξία διαλείψεων (σταθερό πλάτος).

Κανάλι με χρήση του μοντέλου Nakagami- m

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Nakagami- m είναι στην ουσία μια κεντρική χ^2 κατανομή και δίνεται από τη σχέση:

$$p(a) = \frac{2m^2 a^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{ma^2}{\Omega}\right), \quad a \geq 0 \quad (3.20)$$

Όπου Γ είναι η συνάρτηση Γάμα. Όπου m είναι η παράμετρος διαλείψεων της Nakagami- m , η οποία κυμαίνεται από $1/2$ έως ∞ . Για τις ειδικές περιπτώσεις $m = 1/2$ και $m = 1$, η Nakagami- m μετατρέπεται σε μονόπλευρη Gauss και Rayleigh κατανομή αντίστοιχα. Στο όριο $m \rightarrow +\infty$, το κανάλι διαλείψεων Nakagami- m συγκλίνει σε AWGN κανάλι χωρίς διαλείψεις [20].



Σχήμα 23: Κατανομή Nakagami- m που ακολουθεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος

3.2.4 Μοντέλα σύνθετων διαλείψεων

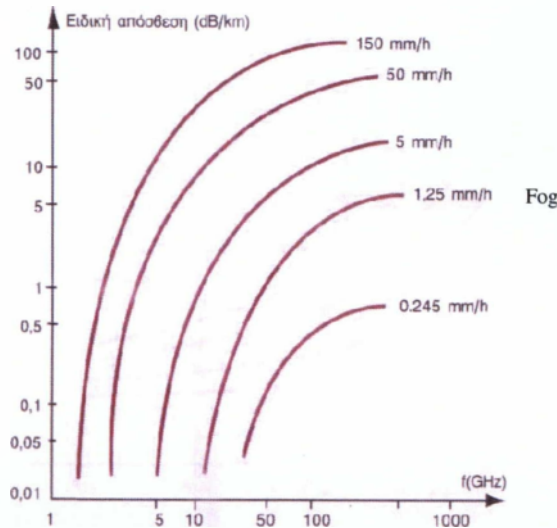
Το σύνθετο περιβάλλον διάδοσης δημιουργείται όταν οι διαλείψεις πολλαπλής διαδρομής συνυπάρχουν με το φαινόμενο της σκίασης. Αυτό είναι συνήθως το σενάριο που παρατηρείται σε πυκνοκατοικημένες πόλεις με πεζούς και οχήματα κινούμενα με χαμηλή ταχύτητα. Οι σημαντικότερες κατανομές πολλαπλασιαστικών διαλείψεων μεγάλης κλίμακας για τη μοντελοποίηση του σύνθετου περιβάλλοντος

διάδοσης τρεις. Rayleigh-Log-Normal, Rice-Log-Normal και Nakagami- m Log-Normal. Επειδή το στατιστικό μοντέλο της κατανομής log-normal είναι πολύ σύνθετο, από μαθηματικής απόψεως, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η εξαγωγή εύχρηστων μαθηματικών εκφράσεων για την αναλυτική εξέταση της επίδοσης ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, είχε παρατηρηθεί ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Log-Normal μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από τη αντίστοιχη της κατανομής Γάμα. Με χρήση της κατανομής Γάμα προκύπτουν σύνθετες κατανομές με σαφώς πιο εύχρηστες μαθηματικές εκφράσεις από την περιγραφή των φαινομένων της σκίασης, όπως είναι η K και η K_G Γενικευμένη- K . Ας θεωρήσουμε ότι ένα κανάλι διάδοσης υπόκειται σε διαλείψεις μικρής κλίμακας που μοντελοποιούνται με την κατανομή Nakagami- m . Εάν το κανάλι δεν επηρεάζεται από φαινόμενα σκίασης υπάρχει βεβαιότητα για την τιμή της μέσης ισχύος, δηλαδή του Ω , σε κάθε χρονική στιγμή και άρα θεωρείται ντετερμινιστική. Αντιθέτως με την παρουσία διαλείψεις μεγάλης κλίμακας το Ω γίνεται τυχαίο (στοχαστικό) και μπορεί να μοντελοποιηθεί με την κατανομή Γάμα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι διαλείψεις μικρής κλίμακας παύουν να είναι ανεξάρτητες από τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας [24].

3.2.5 Διαλείψεις λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων

Στις περιπτώσεις όπου το σήμα βρίσκεται στη ζώνη ραδιοφάσματος από 3 έως 30 GHz, εισάγεται μία επιπλέον παράμετρο ως προς μελέτη που είναι η επίδραση των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (βροχή, χιόνι, χαλάζι, παγοκρύσταλλοι) στη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Τα ρεύματα μετατόπισης που επάγονται τους υδρομετεωρίτες κατά τη διάδοση ενός κύματος, έχουν σαν αποτέλεσμα τη σκέδαση και την απορρόφηση μέρους της ενέργειας του. Η απώλεια ενέργειας που οφείλεται στα παραπάνω αίτια είναι πολύ σημαντική στις συχνότητες άνω των 10GHz. Επιπλέον, η σκέδαση μπορεί να προκαλέσει και φαινόμενα παρεμβολών μεταξύ γειτονικών συστημάτων. Η σχετική συμβολή της σκέδασης και της απορρόφησης στην τελική εξασθένιση του διαδιδόμενου κύματος εξαρτάται από τη σχέση των μεγεθών των υδρομετεωριτών με το μήκος κύματος. Για μήκη κύματος που είναι μεγάλα σε σχέση με το μέγεθος της σταγόνας (3–30GHz) η εξασθένιση λόγω απορρόφησης θα υπερτερεί έναντι της σκέδασης. Αντίστροφα, για μήκη κύματος που είναι μικρά σε σχέση με τη βροχοσταγόνα (>30GHz) θα κυριαρχεί η σκέδαση. Η επίδραση της ομίχλης είναι λιγότερο σοβαρή, αν και η πυκνή ομίχλη ($1\text{gr}/\text{m}^3$) δημιουργεί ειδική απόσβεση που είναι γενικά μεγαλύτερη από αυτή που δημιουργούν τα ατμοσφαιρικά αέρια. Το χιόνι και το χαλάζι έχουν σχετικά μικρότερη επίδραση στα Η/Μ κύματα σχετικά με την βροχόπτωση. Παρ'όλα αυτά όμως, όταν το χιόνι αρχίζει να λιώνει καθώς πέφτει, οι νιφάδες μπορεί να συγκρατούν νερό υπό μορφή πολύ μεγάλων σταγόνων σε σύγκριση με την κανονική βροχή και συνεπώς μπορεί να προκαλέσουν πολύ μεγαλύτερη σκέδαση ή απορρόφηση. Από την άλλη μεριά, οι μικρές σταγόνες που υπάρχουν στα σύννεφα

έχουν σχετικά μικρή επίδραση για συχνότητες <20GHz αλλά σε υψηλότερες συχνότητες προκαλούν και αυτές αξιοσημείωτη απόσβεση. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η ειδική απόσβεση λόγω βροχής σε συνάρτηση με τη συχνότητα και το ρυθμό βροχόπτωσης.



Σχήμα 24: Ειδική απόσβεση λόγω βροχής σε συνάρτηση με τη συχνότητα και το ρυθμό βροχόπτωσης.

3.3 Τεχνικές Βελτίωσης Απόδοσης NLOS Συστήματος WiMAX

Η τεχνολογία WiMAX λύνει ή περιορίζει τα προβλήματα που δημιουργούνται από τις συνθήκες NLOS χρησιμοποιώντας τεχνικές ώστε να αποδίδει στην μέγιστη δυνατή απόδοση ένα σύστημα μη οπτικής επαφής:

Τεχνολογία OFDM

Sub-Channelization

Κατευθυντικές Κεραίες

Ποικιλία εκπομπής και λήψης

-Τεχνολογία MIMO (Multiple Input Multiple Output)

-Τεχνική κωδικοποίησης χώρου-χρόνου του Alamouti

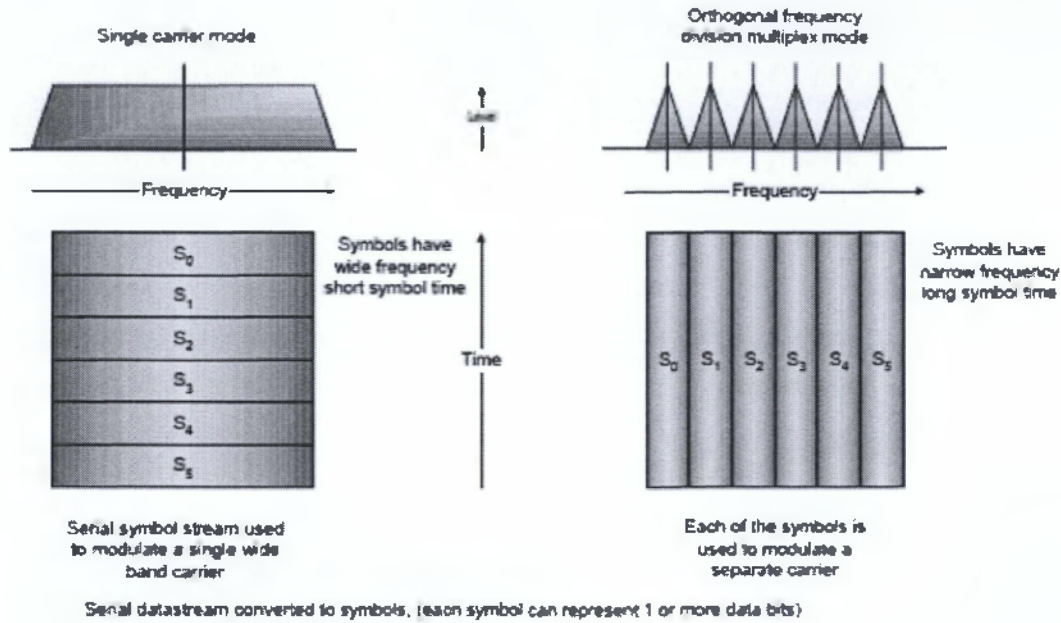
Προσαρμόσιμη Διαμόρφωση

Έλεγχος ισχύος

Τεχνολογία OFDM

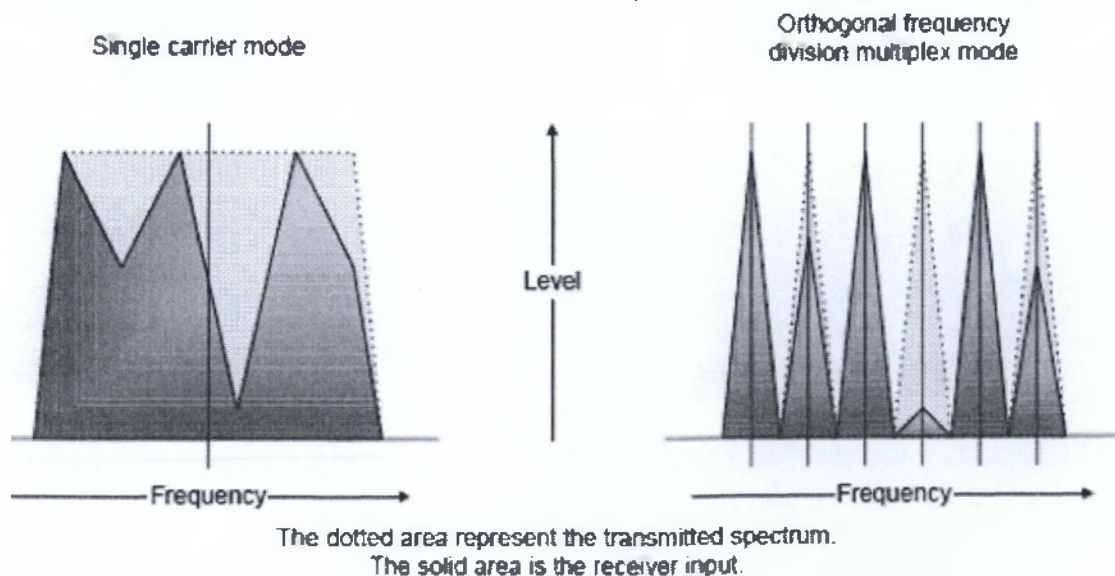
Η τεχνολογία ορθογώνιας πολυπλεξίας συχνότητας παρέχει ένα εξάισιο μέσο ώστε να ξεπεραστούν τα προβλήματα της διάδοσης μέσω ενός NLOS περιβάλλοντος. Η κυματομορφή OFDM του WiMAX προσφέρει το πλεονέκτημα της λειτουργίας με το μεγαλύτερο διάδοση καθυστέρησης του NLOS περιβάλλοντος. Με την αρετή του χρόνου συμβόλου OFDM και τη χρήση ενός κυκλικού προθέματος, η κυματομορφή του OFDM αποκλείει τα προβλήματα της διασυμβολικής παρεμβολής και τις

αντιξοότητες της προσαρμόσιμης εξίσωσης του σήματος στο δέκτη. Επειδή η κυματομορφή του OFDM αποτελείται από πολλαπλά ορθογώνια φέροντα στενής ζώνης, η επιλεκτική εξασθένιση είναι τοπική σε ένα μέρος από τα φέροντα που είναι σχετικά εύκολο να ανακτηθούν. Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα σε σύγκριση μεταξύ ενός σήματος OFDM και ενός σήματος μονού φέροντος, με την πληροφορία να στέλνεται παράλληλα για το OFDM και σειριακά για το μονό φέρον σχήμα 25.



Σχήμα 25: Μονό φέρον και OFDM

Η ικανότητα να ξεπερνιέται η διάδοση καθυστέρησης, η πολλαπλή διαδρομή και η διασυμβολική παρεμβολή με έναν επαρκή τρόπο επιτρέπει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Σαν παράδειγμα είναι ευκολότερο να ανακτηθούν τα μεμονωμένα OFDM φέροντα από το να ανακτηθεί το ευρύτερο σήμα μονού φέροντος (Σχήμα 26).



Σχήμα 26: Λαμβανόμενα σήματα μονού φέροντος και OFDM

Sub Channelization

Το sub channelization (υποκαναλοποίηση) στην άνω ζεύξη είναι μια επιλογή για το WiMAX. Χωρίς το sub channelization, οι απαγορεύσεις των κανονισμών και η ανάγκη για χαμηλού κόστους αποτελεσματικούς σταθμούς εργασίας, τυπικά προκαλούν τους πόρους της ζεύξης να είναι ασυμμετρικοί και αυτό αναγκάζει την ακτίνα του συστήματος να είναι περιορισμένη ως προς την άνω ζεύξη. Το sub channeling επιτρέπει τους πόρους της ζεύξης να είναι ισορροπημένοι ώστε τα κέρδη του συστήματος να είναι παρόμοια για την ευθεία και την ανάστροφη ζεύξη. Το sub channeling συγκεντρώνει την ισχύ εκπομπής σε λιγότερα φέροντα OFDM. Αυτό αυξάνει το κέρδος του συστήματος το οποίο μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί για να επεκτείνει την ακτίνα του συστήματος, ξεπερνώντας τις απώλειες διείσδυσης στα κτίρια, είτε για να μειώσει την κατανάλωση ισχύος από το σταθμό εργασίας. Η χρήση sub channeling επεκτείνεται ακόμα περισσότερο στην πολλαπλή πρόσβαση ορθογώνιας συχνότητας (OFDMA) ώστε να επιτρέψει μια πιο ευέλικτη χρήση των πόρων που υποστηρίζουν νομαδική ή κινητή λειτουργία.



Transmitted downstream OFDM spectrum from the base station, each slot represents a RF carrier



Transmitted upstream OFDM spectrum from the CPE, all carriers are transmitted but at a quarter of the level of the base station, hence the range will be less



Transmitted upstream OFDM spectrum from the CPE using only a quarter of the carriers, but at the same level as the base station, hence the range will be the same with a quarter of the capacity

Σχήμα 27: Η λειτουργία του Sub Channelization

Κεραίες για εφαρμογές σταθερής ασύρματης υπηρεσίας

Οι κατευθυντικές κεραίες αυξάνουν το περιθώριο εξασθένισης με την προσθήκη περισσότερου κέρδους. Αυτό αυξάνει τη διαθεσιμότητα της ζεύξης. Η διάδοση καθυστέρησης μειώνεται ακόμα περισσότερο με τις κατευθυντικές κεραίες και στο σταθμό βάσης και στο σταθμό υπηρεσίας. Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας καταπιέζει όποιο σήμα πολλαπλής διαδρομής φτάνει με πλευρικούς ή οπίσθιους λοβούς. Η αποτελεσματικότητα αυτών των μεθόδων είναι αποδεδειγμένη και δοκιμασμένη σε επιτυχείς εγκαταστάσεις, όπου η υπηρεσία λειτουργεί υπό σημαντικές NLOS απώλειες. Τα συστήματα προσαρμοζόμενων κεραιών είναι ένα προαιρετικό σημείο του πρωτοκόλλου 802.16. Έχουν ιδιότητες οδήγησης ακτίνας

που μπορούν να οδηγήσουν την προσοχή τους σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ μεταδίδεται, ένα σήμα μπορεί να περιοριστεί στην επιθυμητή κατεύθυνση του δέκτη. Αντίθετα, κατά τη λήψη του σήματος, τα συστήματα προσαρμοζόμενων κεραιών μπορούν να εστιάσουν μόνο στην κατεύθυνση από όπου το επιθυμητό σήμα έρχεται προς το δέκτη. Επίσης έχουν την ιδιότητα να καταπιέσουν την ομοδιαυλική παρεμβολή από άλλες τοποθεσίες. Τα συστήματα αυτά θεωρούνται μελλοντικά τα στοιχεία τα οποία μπορούν τελικά να βελτιώσουν την επαναχρησιμοποίηση φάσματος και χωρητικότητα ενός δικτύου WiMAX.

Ποικιλία εκπομπής και λήψης

Ποικίλα σχήματα χρησιμοποιούνται για να εκμεταλλευτούν το πλεονέκτημα της πολλαπλής διαδρομής και των ανακλάσεων που υφίστανται τα σήματα κατά τις NLOS συνθήκες. Η ποικιλία είναι ένα προαιρετικό χαρακτηριστικό στο WiMAX. Οι αλγόριθμοι ποικιλίας που προσφέρει το WiMAX στον πομπό και το δέκτη αυξάνουν τη διαθεσιμότητα του συστήματος. Η επιλογή ποικίλων σχημάτων εκπομπής του WiMAX χρησιμοποιεί κωδικοποίηση χώρου και χρόνου ώστε να παρέχει ανεξαρτησία πηγής εκπομπής. Αυτό μειώνει τις απαιτήσεις περιθωρίου εξασθένησης και πολεμά την παρεμβολή. Για ποικιλία λήψης, υπάρχουν ποικίλες συνδυαστικές τεχνικές ώστε να βελτιωθεί η διαθεσιμότητα του συστήματος. Για παράδειγμα, ο μέγιστος λόγος συνδυασμών (MRC) εκμεταλλεύεται δύο ξεχωριστές αλυσίδες λήψης ώστε να ξεπεραστεί η εξασθένηση και να μειωθεί η απώλεια του μονοπατιού. Η ποικιλία σχημάτων έχει αποδειχτεί ότι είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο ώστε να καταπολεμηθούν τα προβλήματα της NLOS διάδοσης.

Τεχνολογία MIMO

Οι σχεδιαστές των ασύρματων συστημάτων αντιμετωπίζουν μεγάλο αριθμό προκλήσεων όπως είναι το περιορισμένο διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων καθώς και το πολύπλοκο ασύρματο περιβάλλον το οποίο μεταβάλλεται στο χρόνο και στο χώρο. Παράλληλα, υπάρχει μια αυξανόμενη απαίτηση για επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης, καλύτερη ποιότητα εξυπηρέτησης, και δικτύων υψηλής χωρητικότητας. Τα τελευταία χρόνια τα συστήματα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων (MIMO) έχουν αναδειχθεί ως η πιο υποσχόμενη τεχνολογία που θα μπορούσε να καλύψει αυτές τις ανάγκες [9].

Στην τεχνολογία MIMO χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη. Χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές και στις δύο άκρες του συστήματος μπορούμε να βελτιώσουμε την χωρητικότητα αλλά και το throughput (απόδοση) μιας ασύρματης ζεύξης τόσο σε κανάλια που υφίστανται επίπεδη εξασθένηση όσο και σε κανάλια που υφίστανται εξασθένηση με επιλεκτικότητα στη συχνότητα. Η βασική ιδέα πίσω από τα MIMO είναι ότι τα σήματα

δειγματοληπτούνται στο πεδίο του χώρου και στις δύο άκρες του συστήματος (δηλαδή στον πομπό και στον δέκτη) και συνδυάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε, είτε να δημιουργούν πολλαπλούς παράλληλους «σωλήνες» δεδομένων (αυξάνοντας έτσι τη ταχύτητα μετάδοσης), είτε να προσθέτουν επιπλέον διαφορισμό (diversity) βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα (bit -error rate) της επικοινωνίας.

Εφαρμόζοντας λοιπόν τέτοιου είδους δομές πετυχαίνουμε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων χωρίς να αυξάνουμε το εύρος ζώνης ή την συνολική ισχύ μετάδοσης. Επιπλέον, η χρήση πολλαπλών κεραιών και στον πομπό και στο δέκτη παρέχει το πλεονέκτημα του διαφορισμού, το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει μια σημαντική αύξηση στη χωρητικότητα του συστήματος άρα και βελτίωση στο λόγο σήματος προς θόρυβο καθώς και στην πιθανότητα εμφάνισης λάθους στο δέκτη.

Τα συστήματα WiMAX μπορούν να πετύχουν διαφορισμό στο πεδίο της συχνότητας μέσω της χρήσης της διαμόρφωσης πολλαπλών φορέων (τεχνική διαμόρφωσης OFDM). Κάνοντας όμως και χρήση της MIMO τεχνολογίας επιτυγχάνουμε διαφορισμό και στο πεδίο του χώρου. Είναι σαφές λοιπόν ότι τα πλεονεκτήματα από τη χρήση πολλαπλών κεραιών οφείλονται στη χρήση αυτής της νέας διάστασης, του χώρου. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του χωρικού διαφορισμού σε σχέση με το χρονικό διαφορισμό αλλά και τον διαφορισμό στη συχνότητα είναι ότι δεν απαιτείται επιπλέον εύρος ζώνης ή ισχύς.

Επειδή η χωρική διάσταση συμπληρώνει αυτή του χρόνου (η οποία αποτελεί τη φυσική διάσταση των ψηφιακών επικοινωνιών), η τεχνολογία MIMO είναι γνωστή και ως «space-time» ασύρματες κεραιές ή «έξυπνες» κεραιές.

Η τεχνολογία MIMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

- 1) Να αυξήσει την αξιοπιστία του συστήματος (μείωση του bit-error rate ή packet error rate).
- 2) Να αυξήσει τον ρυθμό μετάδοσης και επομένως και την χωρητικότητα του συστήματος.
- 3) Να αυξήσει την περιοχή κάλυψης.
- 4) Και να μειώσει την απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης.

Όμως οι τέσσερις αυτές επιθυμητές ιδιότητες συνήθως ανταγωνίζονται η μία την άλλη. Για παράδειγμα μία αύξηση στο ρυθμό μετάδοσης θα έχει ως αποτέλεσμα μία αύξηση είτε στο ρυθμό λαθών (error rate) είτε στην ισχύ μετάδοσης. Ο τρόπος με τον οποίο οι κεραιές χρησιμοποιούνται κάθε φορά δείχνει σε ποιό από τα παραπάνω χαρακτηριστικά θέλει να εστιάσει ο σχεδιαστής σε συνδυασμό πάντα με το διαθέσιμο χώρο που έχει στη διάθεσή του αλλά και το κόστος που μπορεί να καλύψει.

Παρά το μεγαλύτερο κόστος όμως που υπάρχει λόγω της χρήσης επιπρόσθετων κεραιών, των επιπλέον RF αλυσίδων που αυτές συνεπάγονται, καθώς και λόγω της επεξεργασίας του σήματος που απαιτείται για να διαμορφωθούν ή να αποδιαμορφωθούν οι παράλληλες χωρικές ροές των δεδομένων, το κέρδος από τη συστάδα των κεραιών είναι τόσο μεγάλο έτσι ώστε να θεωρείται βέβαιο ότι οι πολλαπλές κεραιές θα παίξουν ουσιαστικό ρόλο στα συστήματα WiMAX.

Πιο αναλυτικά η τεχνολογία των πολλαπλών κεραιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

- 1) Να εστιάσει την ενέργεια (beamforming)
- 2) Να δημιουργήσει πολύπλεξη στο πεδίο του χώρου
- 3) Και να δημιουργήσει διαφορισμό (diversity)

Με την τεχνική beamforming είναι δυνατή η ρύθμιση της απόκρισης των πολλαπλών κεραιών στις διάφορες κατευθύνσεις-γωνίες στο χώρο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός συνόλου από κατάλληλα βάρη (weights) για το σήμα της κάθε κεραιάς κατά τη διάρκεια είτε της εκπομπής είτε της λήψης. Είναι προφανές ότι για να χρησιμοποιηθεί η τεχνική του beamforming κατά την εκπομπή πρέπει να είναι γνωστό στον πομπό το κανάλι. Η κύρια εφαρμογή της τεχνικής αυτής είναι η ακύρωση των παρεμβολών (interference cancellation) σε ένα τοπικό ασύρματο δίκτυο, όπου ο δέκτης θέλει να επικοινωνήσει με ένα χρήστη σε μία συγκεκριμένη γωνία αλλά και να μην υποβαθμίζεται η ποιότητα επικοινωνίας από τους χρήστες (ή άλλα δίκτυα) σε άλλες γωνίες.

Όσον αφορά τώρα την πολύπλεξη στο πεδίο του χώρου, δηλαδή την χωρική πολύπλεξη, αυτή είναι μία τεχνική όπου ανεξάρτητες ακολουθίες δεδομένων μεταδίδονται από τις κεραιές του πομπού με σκοπό την αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 28, η εισερχόμενη ροή των bits (δεδομένων) που φθάνει στο σύστημα με υψηλό ρυθμό μετάδοσης, χωρίζεται και δημιουργούνται N_t ανεξάρτητες ροές δεδομένων. Υποθέτοντας ότι οι ροές αυτές μπορούν να αποκωδικοποιηθούν επιτυχώς στο δέκτη, η ονομαστική φασματική απόδοση αυξάνεται με τον τρόπο αυτό κατά έναν παράγοντα N_t . Είναι επομένως μια πολύ ισχυρή τεχνική για την αύξηση του συνολικού throughput στα ασύρματα συστήματα. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την χωρική πολύπλεξη είναι το ακόλουθο :

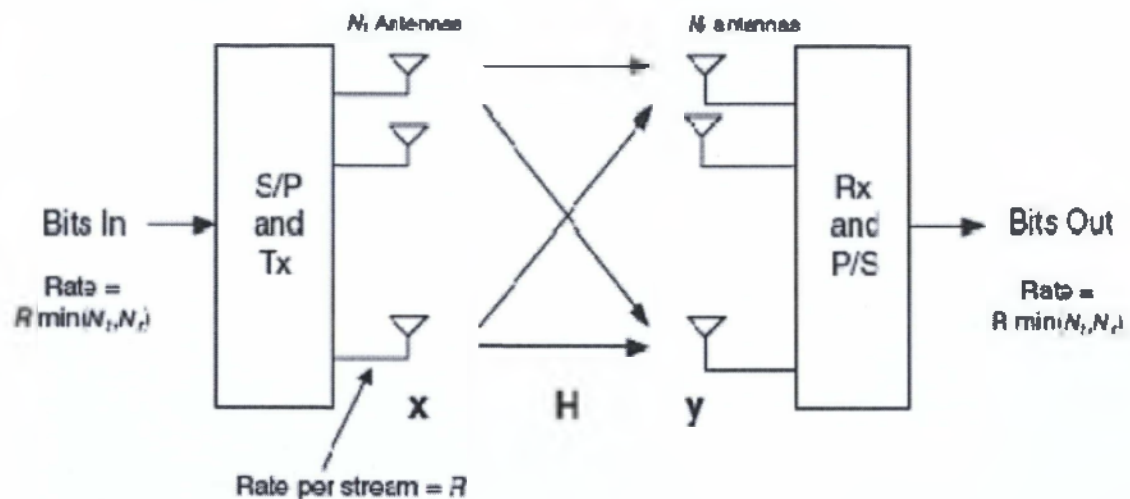
$Y=Hx+n$, όπου:

- το μέγεθος του διανύσματος λήψης y είναι $N_r \times 1$,

• πίνακας του καναλιού $H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_t} \\ h_{21} & \cdot & \dots & h_{2N_t} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ h_{N_r,1} & h_{N_r,2} & \dots & h_{N_r,N_t} \end{bmatrix}$ είναι $N_r \times N_t$

• το διάνυσμα εκπομπής x είναι $N_t \times 1$

• ο θόρυβος είναι $N_r \times 1$



Σχήμα 28: Ένα σύστημα MIMO χωρικής πολύπλεξης μεταδίδει πολλαπλές υποροές (substreams) για να αυξήσει το ρυθμό μετάδοσης.

Η τρίτη τεχνική χρήσης των πολλαπλών κεραιών είναι η δημιουργία διαφορισμού (diversity). Η βασική ιδέα των τεχνικών διαφορισμού είναι ο δέκτης να λάβει αντίτυπα της ίδιας πληροφορίας, ενδεχομένως με ορισμένη κωδικοποίηση, τα οποία έχουν υποστεί ανεξάρτητες μεταξύ τους εξασθενήσεις. Η πιθανότητα όλα αυτά τα σήματα να έχουν υποστεί μεγάλη εξασθένηση είναι αρκετά μικρή. Ανάλογα με το αν οι πολλαπλές κεραιές χρησιμοποιούνται για την δημιουργία διαφορισμού στον πομπό ή στο δέκτη μπορούμε να χωρίσουμε τον διαφορισμό σε δύο κατηγορίες: στον διαφορισμό κατά την εκπομπή (transmit diversity) και στον διαφορισμό κατά την λήψη (receive diversity).

Το «κλειδί» όλων των τεχνικών διαφορισμού είναι ότι υπάρχει πάρα πολύ μικρή πιθανότητα να υπάρξει ταυτόχρονη μεγάλη εξασθένηση στα διαφορετικά υποκανάλια που χρησιμοποιούνται. Γενικά η απόδοση των συστημάτων που χρησιμοποιούν τεχνικές διαφορισμού εξαρτάται από το πώς τα αντίγραφα των σημάτων που φθάνουν στο δέκτη συνδυάζονται για να αυξήσουν το συνολικό

λαμβάνόμενο SNR. Γι αυτό το λόγο οι τεχνικές διαφορισμού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και ανάλογα με τις συνδυαστικές μεθόδους που χρησιμοποιούν στο δέκτη. Ανάλογα λοιπόν με την πολυπλοκότητα υλοποίησης και το μέγεθος της πληροφορίας του καναλιού που χρειάζεται από την συνδυαστική μέθοδο στο δέκτη υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες συνδυαστικών τεχνικών:

Selection combining, switched combining, equal –gain combining (EGC) και maximal ratio combining (MRC).

Στην απόκλιση κατά τη λήψη οι κεραιές χρησιμοποιούνται στην πλευρά του δέκτη για να μαζέψουν ανεξάρτητα δείγματα από το σήμα που μεταδόθηκε. Τα αντίγραφα από τα σήματα που μεταδόθηκαν συνδυάζονται για αυξήσουν το συνολικό λαμβανόμενο SNR και για να μετριάσουν την εξασθένηση λόγω πολλαπλής διαδρομής. Στην απόκλιση κατά την εκπομπή οι πολλαπλές κεραιές τοποθετούνται στην μεριά του πομπού. Τα μηνύματα επεξεργάζονται στον πομπό και μετά διαδίδονται μέσω των πολλαπλών κεραιών. Η απόκλιση εκπομπής αυξάνει την χωρητικότητα του καναλιού και μειώνει την απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ των πομπών, οδηγώντας έτσι σε μία απλούστερη δομή συστήματος, χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος και χαμηλότερο κόστος με αρκετές τεχνικές διαφορισμού. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: α) στις τεχνικές ανοικτού βρόχου και β) στις τεχνικές κλειστού βρόχου. Τα ανοικτού βρόχου συστήματα δεν χρειάζονται να γνωρίζει το κανάλι ο πομπός. Αντίθετα τα κλειστού βρόχου χρειάζονται γνώση του καναλιού στον πομπό γεγονός που σημαίνει ότι χρειάζεται να μπορεί να γίνει αντιστροφή του καναλιού ή πιο συχνά χρειάζεται να υπάρχει ένα κανάλι ανατροφοδότησης (feedback channel) από τον δέκτη στον πομπό. Η απόκλιση χώρου κατά την εκπομπή μπορεί να υλοποιηθεί με κώδικες χώρου-χρόνου (space-time codes, STC). Η κωδικοποίηση χώρου-χρόνου είναι μία τεχνική κωδικοποίησης που έχει σχεδιαστεί για χρήση με πολλαπλές κεραιές εκπομπής. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική τα δεδομένα προς εκπομπή μετασχηματίζονται και μοιράζονται ώστε να μεταδοθούν ταυτόχρονα από τις κεραιές του πομπού. Βασικό χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός ότι σκοπός της τεχνικής αυτής δεν είναι να αυξηθεί η ταχύτητα μετάδοσης αλλά να έχουμε μια πιο αξιόπιστη μετάδοση καθώς αντισταθμίζεται η εξασθένηση. Σε αυτή την περίπτωση η τοποθέτηση πολλαπλών κεραιών και στο δέκτη είναι προαιρετική. Η κωδικοποίηση πραγματοποιείται τόσο στο πεδίο του χώρου όσο και στο πεδίο του χρόνου, έτσι ώστε να εισάγουν συσχετισμό μεταξύ των σημάτων που μεταδίδονται από τις διάφορες κεραιές σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Ο συσχετισμός στο πεδίο του χώρου και του χρόνου χρησιμοποιείται για να αντεπεξέλθουμε στην εξασθένηση του MIMO καναλιού και για να περιορίσουμε τα λάθη που φτάνουν στο δέκτη κατά τη μετάδοση. Η STC μπορεί να επιτύχει απόκλιση κατά την εκπομπή και κέρδος ισχύος χωρίς να χρειάζεται να θυσιάσουμε καθόλου εύρος ζώνης.

Υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις όσον αφορά τις δομές που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση χώρου-χρόνου, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι: οι μπλοκ κώδικες χώρου-χρόνου (STBC), κώδικες trellis χώρου – χρόνου (STTC), turbo trellis κώδικες χώρου - χρόνου και κώδικες χώρου –χρόνου με επίπεδα (LST). Εμείς θα εστιάσουμε στους μπλοκ κώδικες χώρου –χρόνου (STBCs), οι οποίοι υλοποιούνται εύκολα και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία διαφορισμού κατά την εκπομπή στα WiMAX συστήματα.

Η απόκλιση κατά την εκπομπή είναι ιδιαίτερα ελκυστική για την κάτω ζεύξη για συστήματα βασισμένα σε δομές, όπως είναι και το WiMAX, αφού μετατοπίζει το βάρος των πολλαπλών κεραιών στον πομπό, δηλαδή σε αυτή την περίπτωση στο σταθμό βάσης, ευνοώντας ιδιαίτερα τους κινητούς σταθμούς οι οποίοι έχουν αυστηρούς περιορισμούς όσον αφορά την ισχύ, το κόστος και το μέγεθός τους. Επιπλέον, αν οι πολλαπλές κεραιές βρίσκονται ήδη στο σταθμό βάσης για την ανερχόμενη απόκλιση κατά την λήψη το επιπρόσθετο κόστος για να τις χρησιμοποιήσουμε για απόκλιση κατά την εκπομπή είναι πολύ μικρό.

Τεχνική κωδικοποίησης χώρο-χρόνου του Alamouti

Μία σημαντική ανακάλυψη στα τέλη της δεκαετίας του 90 ήταν ένας μπλοκ κώδικας χώρου-χρόνου που αναφέρεται ως κώδικας Alamouti (λόγω του εφευρέτη του) ή ορθογώνιος μπλοκ κώδικας χώρου –χρόνου (OSTBC). Ο κώδικας Alamouti ήταν ιστορικά ο πρώτος μπλοκ κώδικας χώρου-χρόνου που μπόρεσε να εξασφαλίσει πλήρη απόκλιση κατά την εκπομπή για συστήματα που χρησιμοποιούν δύο κεραιές μετάδοσης.

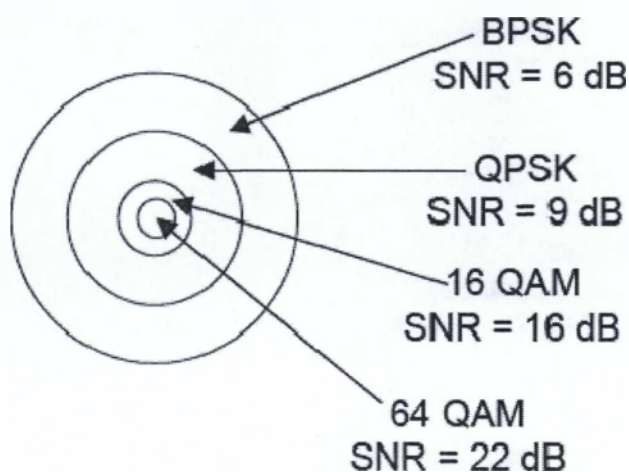
Ο Alamouti πρότεινε μια απλή τεχνική διαφορισμού κατά την εκπομπή η οποία βελτιώνει την ποιότητα του σήματος στην μία πλευρά της ζεύξης δηλαδή στον δέκτη, με την απλή επεξεργασία μέσω δύο κεραιών στην αντίθετη πλευρά. Η απόκλιση που αποκτάται είναι ίδια με το να εφαρμόζαμε την μέγιστη αναλογία συνδυασμού στον δέκτη (maximal ratio receiver combining, MRRC) χρησιμοποιώντας δύο κεραιές στον δέκτη. Η τεχνική αυτή μπορεί εύκολα να γενικευθεί στη χρήση δύο κεραιών εκπομπής και M κεραιών λήψης για να πάρουμε απόκλιση της τάξης του $2M$. Αυτό γίνεται χωρίς τη χρήση οποιασδήποτε ανατροφοδότησης από τον δέκτη στον πομπό και με χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Ακόμη, δεν απαιτείται καμία επέκταση στο εύρος ζώνης, καθώς ο πλεονασμός εφαρμόζεται στο χώρο μέσω των πολλαπλών κεραιών και όχι στον χρόνο ή στη συχνότητα.

Η καινούρια αυτή τεχνική διαφορισμού κατά την εκπομπή μπορεί να βελτιώσει την απόδοση λάθους, τον ρυθμό μετάδοσης ή την χωρητικότητα των ασύρματων συστημάτων καθώς και την εμβέλεια που μπορούν να έχουν σε μία περιοχή κάλυψης. Ακόμη μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά το φαινόμενο της εξασθένησης

στις κινητές μονάδες χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες εκπομπής στους σταθμούς βάσης [10].

Προσαρμόσιμη διαμόρφωση

Η προσαρμόσιμη διαμόρφωση επιτρέπει στο σύστημα WiMAX να προσαρμόσει το σχήμα διαμόρφωσης του σήματος εξαρτημένη στις συνθήκες SNR της ραδιοζεύξης. Όταν η ραδιοζεύξη έχει υψηλή ποιότητα, χρησιμοποιείται το υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης, δίνοντας στο σύστημα περισσότερη χωρητικότητα. Κατά τη διάρκεια μιας εξασθένησης του σήματος, το σύστημα WiMAX μπορεί να αλλάξει σε ένα χαμηλότερο σχήμα διαμόρφωσης ώστε να διατηρηθεί η ποιότητα σύνδεσης και η σταθερότητα της ζεύξης. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει στο σύστημα να ξεπεράσει την επιλεκτική εξασθένηση στο χρόνο. Το χαρακτηριστικό κλειδί της προσαρμόσιμης διαμόρφωσης είναι ότι αυξάνει την ακτίνα στην οποία ένα υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί, καθώς το σύστημα μπορεί να γυρίσει στις πραγματικές συνθήκες εξασθένησης, ενώ η ύπαρξη ενός σταθερού σχήματος που στοχεύει στις χειρότερες συνθήκες.



Relative cell radii for adaptive modulation

Σχήμα 29: Σχήματα της προσαρμόσιμης διαμόρφωσης

Έλεγχος ισχύος

Οι αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος χρησιμοποιούνται για να βελτιώνεται η ολική επίδοση του συστήματος, υλοποιείται από το σταθμό βάσης στέλνοντας πληροφορία ελέγχου ισχύος σε καθένα από τους σταθμούς εργασίας για να κανονικοποιείται το επίπεδο ισχύς εκπομπής ώστε το επίπεδο που λαμβάνεται στο σταθμό βάσης είναι σε ένα προαποφασισμένο επίπεδο. Σε ένα δυναμικά αλλαζόμενο περιβάλλον εξασθένισης αυτό το προαποφασισμένο επίπεδο επίδοσης σημαίνει ότι ο σταθμός εργασίας εκπέμπει αρκετή ισχύ ώστε να ικανοποιεί τις συνθήκες. Το αντίθετο θα ήταν ότι το επίπεδο εκπομπής του σταθμού εργασίας βασίζεται στις συνθήκες χειρότερου σεναρίου. Ο έλεγχος ισχύος μειώνει την ολική κατανάλωση ισχύος από το σταθμό εργασίας και την πιθανή παρεμβολή με άλλους σταθμούς βάσης της περιοχής. Για LOS η ισχύς εκπομπής του σταθμού εργασίας είναι σχεδόν ανάλογο με την απόσταση από το σταθμό βάσης, για NLOS είναι επίσης υψηλά εξαρτημένη στην καθαρότητα από εμπόδια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

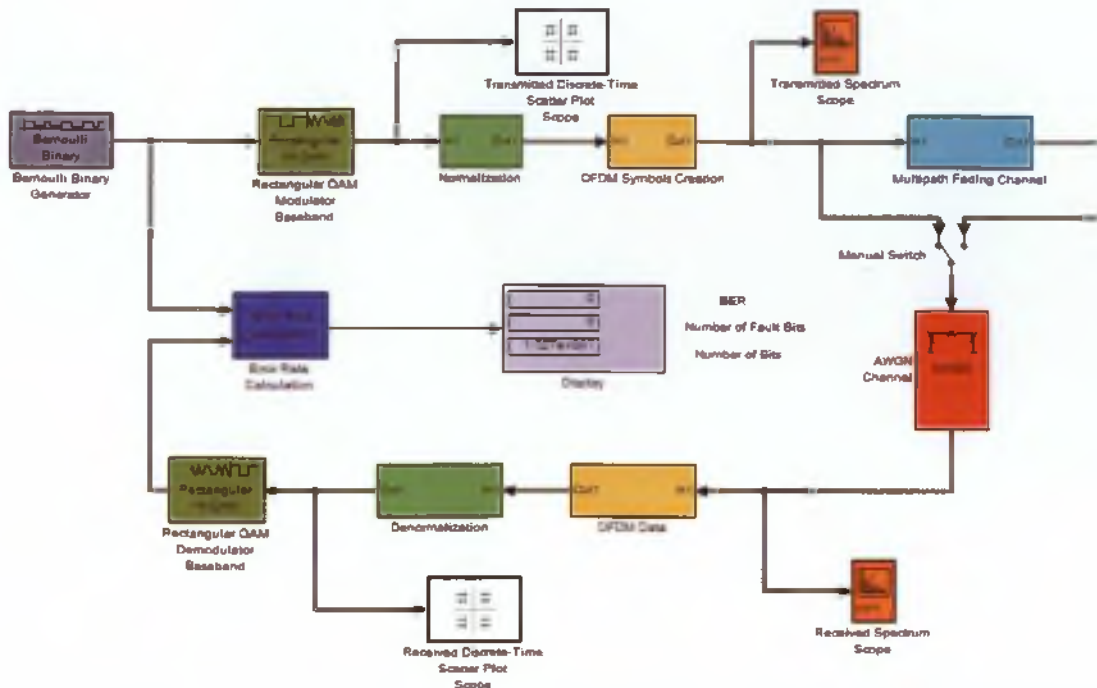
4.1 Περιγραφή του Μοντέλου Προσομοίωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε όλα τα χαρακτηριστικά της υλοποίησης του συστήματος IEEE 802.16a. Θα προσομοιωθούν το μοντέλο μετάδοσης σε κανάλι απλού προσθετικού θορύβου (AWGN) και στα κανάλια-μοντέλα μικρής κλίμακας διαλείψεων Rayleigh και Rice με σχήματα διαμόρφωσης 64-QAM, 16-QAM και QPSK.

Πριν αρχίσουμε την διαδικασία της προσομοίωσης του συστήματος στο MATLAB Simulink R2010a θα πρέπει να ορίσουμε τους παραμέτρους που θα χρησιμοποιήσουμε ώστε να υλοποιηθεί σωστά. Αυτό πρέπει να γίνει από το πρώτο κιάλας block που είναι η γεννήτρια παραγωγής τυχαίων δυαδικών αριθμών (Bernoulli Binary Generator). Οι τιμές καταχώρησης στην γεννήτρια δυαδικών αριθμών είναι κομβικές καθώς από αυτήν εξαρτάται όλο το μοντέλο προσομοίωσης. Στην συνέχεια θα πρέπει να ορίσουμε τα block της διαμόρφωσης (Modulation) και της κανονικοποίησης (Normalization) όπου καταχωρούνται οι τιμές για κάθε διαφορετική διαμόρφωση που θα χρησιμοποιήσουμε (QPSK, 16-QAM, 64-QAM). Εν συνεχεία θα δημιουργήσουμε ένα block - υποσύστημα στο οποίο θα προσομοιώνουμε τις διαδικασίες μετάδοσης των υπηρεσιών όπως η παραγωγή των OFDM συμβόλων, εισαγωγή των πιλοτικών και DC/Guardbands φερόντων. Διαδικασίες κωδικοποίησης όπως το padding κατά την παραγωγή τυχαίων αριθμών, IFFT για αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier κατά την είσοδο των δεδομένων, τον καθορισμό του κυκλικού προθέματος – Cyclic Prefix(CP) που στην περιπτωσή μας είναι $\frac{1}{4}$ και blocks τα οποία ενισχύουν το σήμα κατά την μετάδοση του. Αυτές είναι οι διαδικασίες που γίνονται στο πομπό. Μετά θα ορίσουμε τα blocks των καναλιών από τα οποία θα περάσει το εκπεμπόμενο σήμα όπως αναφέραμε παραπάνω, με την διαφορά ότι τα κανάλια μικρής κλίμακας διαλείψεων Rice και Rayleigh θα υλοποιηθούν χωρίς κωδικοποίηση φάσης ώστε να έχουν τέλειο χρονισμό. Τέλος θα προσομοιώσουμε τις διαδικασίες που γίνονται στο δέκτη οι οποίες είναι αντίστοιχες του πομπού. Η διαδικασία της αποκωδικοποίησης περιλαμβάνει τα εξής: Αφαίρεση του κυκλικού προθέματος – Cyclic Prefix(CP), FFT για ευθύ μετασχηματισμό Fourier, μετατροπή του λαμβανόμενου σήματος από frame (σύμβολο) σε sample (δείγμα) και αφαίρεση του padding. Κατά την λήψη του σήματος πραγματοποιείται η διαδικασία της αφαίρεσης των πιλοτικών φερόντων ώστε να απομείνουν στον δέκτη μόνο δεδομένα. Κατά την διαδικασία εκπομπής και λήψης χρησιμοποιούμε και φασματογράφους (Scopes) και Gray-Mapped Scopes ώστε να δούμε το φάσμα και τα σύμβολα του σήματος.

Parameter	Variable and Calculations	Value
Bandwidth	B	7 MHz
Sampling factor	N	8/7
Sampling frequency	$F_s = n \cdot B$	8 MHz
Size of FFT	N_{FFT}	256
DC/Guardbands subcarriers	N_{DCGBs}	56
Subcarrier spacing	$\Delta_f = F_s / N_{FFT}$	31.25 kHz
Useful symbol time	$T_b = 1 / \Delta_f$	32 μ s
The guard intervals	G	1/32, 1/16, 1/8, 1/4
Cyclic prefix time	$T_g = G \cdot T_b = 32 \cdot \frac{1}{4}$	8 μ s or 1.0 μ s
delay path (given by the speed of light)	$d_{delay} = c \cdot T_g = 3 \cdot 10^8 \cdot 8 \mu s$ $d_{delay} = c \cdot T_g = 3 \cdot 10^8 \cdot 1 \mu s$	2.4 km or 0.3 km
Overall symbol time (G=1/4)	$T_s = T_b + T_g = 32 \mu s + 8 \mu s$	40 μ s
Number of Symbols	$N_{Symbols}$	25
Length of subframe	$T_{sym.frame} = N_{Symbols} \cdot T_s = 25 \cdot 40 \mu s$	1000 μ s
Length of Frame	T_F	10 ms
Number of symbols per frame	$N = \text{FLOOR}(10 \text{ ms} / 40 \mu s)$	250
User subcarriers	N_{User}	200
Pilot subcarriers	N_{Pilot}	8
Used data subcarriers	$N_{Used} = N_{User} - N_{Pilot}$	192
Modulation (QPSK), bits in Subframe	$N_{bit} = N_{Used} \cdot 25 \cdot 2$	9600 bits
Modulation (16-QAM), bits in Subframe	$N_{bit} = N_{Used} \cdot 25 \cdot 4$	19200 bits
Modulation (64-QAM), bits in subframe	$N_{bit} = N_{Used} \cdot 25 \cdot 16$	76800 bits
Raw bit rate (no coding)	$R_{b(raw)} = N_{bit} / 1000 \mu s$	QPSK \rightarrow 9.6 Mbps 16-QAM \rightarrow 19.2 Mbps 64-QAM \rightarrow 76.8 Mbps

Πίνακας 10: Παράμετροι του συστήματος



Σχήμα 30: Μετάδοση υπηρεσιών από σταθμό βάσης σε συνδρομητή μέσω του μοντέλου 802.16a WiMAX. Τα blocks με το ίδιο χρώμα είναι οι αντίστοιχες διαδικασίες που γίνονται σε πομπό και δέκτη.

4.1.1 Πομπός

Γεννήτρια δυαδικών δεδομένων

Τα δεδομένα παράγονται τυχαία από το block της Δυαδικής Τυχαίας Γεννήτριας Bernoulli (**Bernoulli Binary Generator**). Στην περίπτωση του 16-QAM χρησιμοποιούνται Samples per frame \rightarrow 768 δείγματα ανά μονάδα χρόνου βασιζόμενοι στο πρότυπο σύμφωνα με τους πίνακες του υποκεφαλαίου Interleaver ($4 \cdot 192 = 768$). Ο χρόνος συμβόλου OFDM είναι 40μs για CP=1/4 και για εύρος ζώνης 7 MHz. Η τιμή του sample time είναι 40μs/768 και έστω ότι έχουμε 320 initial seed. Οι υπόλοιποι παράμετροι είναι οι εξής: Propability of a zero \rightarrow 0.5, Output data type \rightarrow double και τέλος επιλέγουμε Frame-based outputs [18].

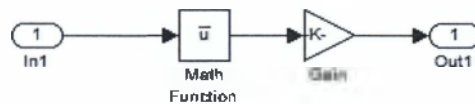
Ορθογώνιος διαμορφωτής/αποδιαμορφωτής QAM βασικής ζώνης

Χρησιμοποιούμε το block Rectangular QAM Modulator Baseband για τον πομπό και Rectangular QAM Demodulator για τον δέκτη. Χρησιμοποιούμε M-ary number \rightarrow 16, Input type \rightarrow Bit, Constellation ordering \rightarrow Gray, Normalization method \rightarrow Min. distance between symbols, Minimum distance \rightarrow 2, Phase offset (rad) \rightarrow 0 όπως και στο πρότυπο.

Normalization

Με την βοήθεια του block Subsystem υλοποιούμε την διαδικασία της κανονικοποίησης. Χρησιμοποιούμε το block Math Function για να δημιουργήσουμε

την συνάρτηση conj (Complex conjugate) η οποία μας επιστρέφει το συζυγές πραγματικό και φανταστικό μέρος ενός μιγαδικού αριθμού z . Για παράδειγμα αν ο z είναι μιγαδικός αριθμός τότε $\text{conj}(Z) = \text{real}(Z) - i*\text{imag}(Z)$ με real το πραγματικό και imag (imaginary) το φανταστικό μέρος αντίστοιχα. Οι παράμετροι για αυτό το block είναι οι εξής: Function→ conj , Output signal type→Auto, Sample time (-1 for inherited)→-1. Αυτό έγινε για να μπορέσουμε να πολλαπλασιάσουμε τα σημεία του αστερισμού με τη βοήθεια του block **Gain** με ένα συντελεστή $1/\sqrt{2}$ για QPSK $1/\sqrt{10}$ για 16-QAM και $1/\sqrt{42}$ για 64-QAM. Επίσης Multiplication→ Element-wise(K.*u), Sample time (-1 for inherited)→-1. Δεν πειράζουμε τις υπόλοιπες καρτέλες των δυο blocks.



Σχήμα 31: Υποσύστημα Normalization

OFDM Symbols Creation

Με την βοήθεια του block **Subsystem** υλοποιούμε ένα σύνθετο υποσύστημα το οποίο παράγει τα OFDM σύμβολα τα οποία μεταδίδονται. Ξεκινάμε με το block **Multiport Selector** με τις εξής παραμέτρους: Select→Rows, Indices to Output→{1:16,17:39,40:62,63:85,86:96,97:107,108:130,131:153,154:176,177:192} και Invalid index→Clip Index

Το block **DSP Constant** με Constant Value→ $\text{Complex}(1,0)$ χρησιμοποιείται για να εισάγουμε τα πιλοτικά φέροντα. Τα φέροντα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το συγχρονισμό πλαισίων, συγχρονισμό συχνότητας, προσέγγιση καναλιού, εξακρίβωση λειτουργίας μετάδοσης και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να ακολουθούν τη φάση του θορύβου. Το συγκεκριμένο block έχει τις εξής ρυθμίσεις: Sample Mode→Discrete, Output→Sample based(interpret vectors as 1-D), Sample Time→1 με την βοήθεια των δυο blocks **Gain** με τιμή -1 όπως και η Sample Time.

Το block **Constant** με Constant Value→ $\text{Complex}(0,0)$ εισάγει τη DC τιμή με ίδιες τις υπόλοιπες παραμέτρους. Δεν πειράζουμε τις καρτέλες Data types.

Το block **Matrix Concatenation** συγχωνεύει και παράγει με τη σωστή σειρά τα δεδομένα, τα πιλοτικά φέροντα και τη DC συνιστώσα με την εξής

παραμετροποίηση: Number of inputs→19, Mode→Multidimensional array, Concatenate dimension→1

Το block **Zero Pad** συμπληρώνει τον πίνακα [201x1] με μηδενικά ώστε να έχει 256 σειρές. Αυτό γίνεται για να προσθέσουμε τα 55 φέροντα φρουρούς όπως απαιτεί η σχεδίαση του OFDM συμβόλου. Pad over→Columns, Pad value source→Specify via dialog, Pad value→0, Output column mode→User Specified, Column size→256, Pad signal at→end, Action when truncation occurs→None.

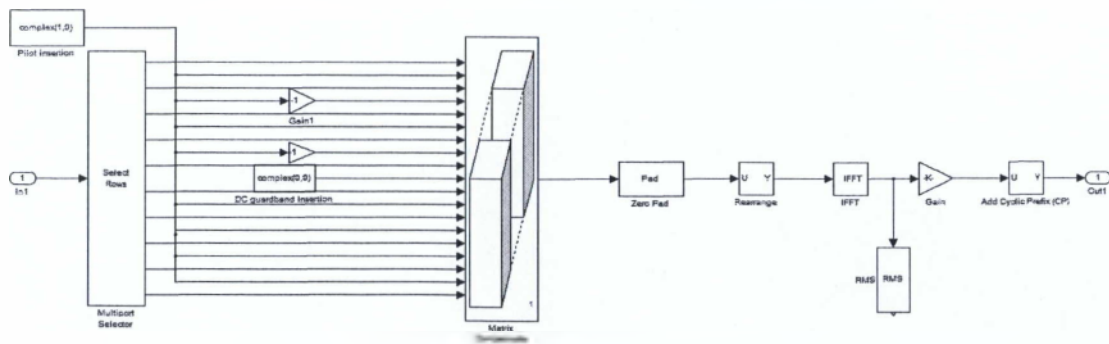
Το block **Selector** με όνομα **Rearrange** χρησιμοποιείται για να αναδιατάξουμε τα στοιχεία του πίνακα ώστε να είναι έτοιμα να περάσουν από το block του IFFT και η έξοδος του φάσματος να πέφτει αριστερά και δεξιά από το μηδέν όταν το σχεδιάζουμε από $-F_s/2$ έως $F_s/2$. Οι τιμές των παραμέτρων είναι οι εξής: Number of input dimensions→1, Index mode→One Based, Index Option→Index Vector(dialog)→[101:201 202:256 1:100], Input port size→256.

Το block **IFFT** πραγματοποιεί τον 256 bins σημείων IFFT μετασχηματισμό στα δεδομένα εισόδου με τις εξής παραμέτρους: Twiddle factor computation→Table lookup, Optimize table for→Speed, FFT length→256, Output sampling mode→Frame Based και τέλος επιλέγουμε Divide output by FFT length. Δεν πειράζουμε την καρτέλα Data types.

Το block **Gain** έχει τιμή $\sqrt{256} \cdot \sqrt{256/192}$ και ενισχύει το εισερχόμενο σήμα από την έξοδο του IFFT έτσι ώστε να έχει μέση ενέργεια 1W. Στην συνέχεια οι εξής παραμετροποιήσεις: Multiplication→Element-wise(K.*u), Sample time (-1 for inherited)→1.

Το block **RMS** μας επιστρέφει την root mean square τιμή του διανύσματος εισόδου [256x1] η οποία υψωμένη στο τετράγωνο είναι η input signal power και χρησιμοποιείται για ενισχυτικό σκοπό.

Το block **Selector** με όνομα **Cyclic Prefix (CP)** αντιγράφει τα 64 τελευταία στοιχεία του OFDM συμβόλου στην αρχή για να αντιμετωπιστούν τα αρνητικά φαινόμενα της πολλαπλής διαδρομής. Οι τιμές των παραμέτρων είναι οι εξής: Number of input dimensions→1, Index mode→One based, Index Option→Index vector(dialog), Index→[193:256 1:256], Input port size→256



Σχήμα 32: Υποσύστημα OFDM Symbol Creation

Για να μετρήσουμε την ένταση του εκπεμπόμενου σήματος συναρτήσει του εύρους ζώνης επιλέγουμε το block Spectrum Score με τις εξής παραμετροποιήσεις: Spectrum units→ dBW/Hertz, Spectrum type→ Two sided ($-Fs/2...Fs/2$), Window→Hann, Window sampling→periodic, επιλέγουμε το Specify FFT length και συμπληρώνουμε FFT length→256, Number of spectral averages→2. Την ίδια διαδικασία ακολουθούμε για το block που αντιστοιχεί στον δέκτη.

4.1.2 Κανάλι

AWGN

Το κανάλι του προστιθέμενου λευκού γκαουσιανού θορύβου (Additive White Gaussian Noise) ή αλλιώς θερμικού θορύβου που παρουσιάζει ελαττωματική επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη μέσω της γραμμικής πρόσθεσης λευκού θορύβου σταθερής φασματικής πυκνότητας, έχει ως αποτέλεσμα την Γκαουσιανή διακύμανση του πλάτους του εκπεμπόμενου σήματος. Σκοπός μας με την χρήση αυτού του καναλιού είναι η αξιολόγηση του συστήματος μας η οποία επιτυγχάνεται μέσω της ομαλής μετάδοσης των δεδομένων με μηδενική πιθανότητα λάθους (BER). Τέλος το κανάλι συνοδεύεται από ένα block **manual switch** ο οποίος είναι ένας εικονικός αισθητήρας που μας δίνει την επιλογή να διαλέξουμε αν η μετάδοση του σήματος θα γίνει με ή χωρίς την παρουσία καναλιού διαλείψεων πολλαπλής διαδρομής. Η παραμετροποίηση του καναλιού είναι η εξής: Initial seed→320, Mode→ Signal to noise Ratio (SNR), SNR (dB)→50, Input signal power, referenced to 1 ohm (watts)→1.04.

Στο υποσύστημα Multipath Fading Channel παρουσιάζονται τα προσομοιώσιμα κανάλια πολλαπλής διαδρομής τα οποία χρησιμοποιούμε όταν το σήμα εμποδίζεται από πολλές επιφάνειες με αποτέλεσμα να φτάνει ασθενέστερο στον δέκτη. Τα κανάλια υλοποιούνται με ένα block **AWGN** στην έξοδο τους, με σύστημα ιδεατής πρόβλεψης φάσης και με ένα εικονικό αισθητήρα block **Manual Switch** ο οποίος

επιλέγει ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος το κατάλληλο κανάλι διαλείψεων πολλαπλής διαδρομής.

Για το σύστημα ιδεατής πρόβλεψης φάσης χρησιμοποιούμε δυο block **Complex to Magnitude-Angle**, ρυθμίζουμε το ένα με Output→Magnitude και το άλλο με Output→Angle ενώ και τα δυο έχουν Sample time (-1 for inherited)→-1. Τέλος έχουμε το block **Magnitude-Angle to Complex** που συγχωνεύει τα δυο προηγούμενα block. Οι ρυθμίσεις του είναι οι εξής: Input→Magnitude and Angle, Sample time (-1 for inherited)→-1

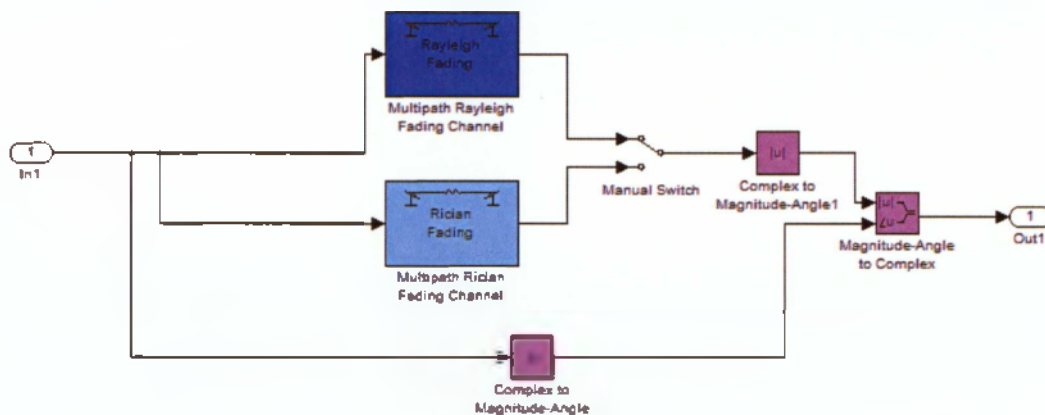
Rician

Αυτό το κανάλι διαλείψεων πολλαπλής διαδρομής το χρησιμοποιούμε όταν ο δέκτης λαμβάνει μια ισχυρή συνιστώσα σήματος και περισσότερες ασθενέστερες λόγω πολυόδης διάδοσης. Στην δική μας περίπτωση το χρησιμοποιούμε όταν τα δέντρα στο περιβάλλον αναφοράς μας δεν έχουν φύλλα πάνω τους με αποτέλεσμα ο δέκτης όπως αναφέραμε να λαμβάνει μια ισχυρή συνιστώσα του σήματος λόγω της απουσίας των φύλλων και ασθενέστερες λόγω της ανάκλασής του στα κλαδιά των δέντρων. Η παραμετροποίηση του καναλιού είναι η εξής: K-factor (scalar or vector)→4, Doppler shift(s) of line-of-sight component(s) (Hz)→0, Initial phase(s) of line-of-sight component(s) (rad)→0, Maximum diffuse Doppler shift (Hz)→10, Doppler spectrum type→Jakes, Discrete path delay vector (s)→0, Average path gain vector (dB)→0, Initial seed→320 και τέλος επιλέγουμε Normalize average path gain vector to 0dB overall gain. Το Maximum diffuse Doppler shift ορίζεται από την θεωρία στα 10Hz όπως και το Doppler spectrum type. Αν ο παράγοντας K είναι μηδέν το κανάλι μετατρέπεται σε Rayleigh, οπότε πρέπει να είναι διάφορος του 0. Για ευνόητους λόγους τον ορίζουμε 4 για τον λόγο ότι μια κοντινότερη προσέγγιση στο 0 θα καθιστούσε άσκοπη τη χρήση του καναλιού Rice. Τέλος θεωρούμε μηδενικές τις τιμές στα υπόλοιπα πεδία για τον λόγο ότι έχουμε οπτική επαφή και δεν χρειαζόμαστε περαιτέρω παραμετροποίηση.

Rayleigh

Αυτό το κανάλι διαλείψεων πολλαπλής διαδρομής το χρησιμοποιούμε όταν παρουσιάζονται πολλές επιφάνειες όπου το σήμα μπορεί να ανακλαστεί με αποτέλεσμα το σήμα να φθάνει ασθενέστερο στον δέκτη και με περισσότερη αύξηση του BER σε σχέση με το Rice κανάλι. Στην δική μας περίπτωση το χρησιμοποιούμε όταν ανακλάται ή/και σκεδάζεται από την διαμόρφωση του εδάφους (λόφοι, βουνά) και όταν το φύλλωμα των δέντρων είναι πυκνό με αποτέλεσμα να υφίσταται πολλαπλή ανάκλαση. Η παραμετροποίηση του καναλιού είναι η εξής: Maximum Doppler shift (Hz)→10, Doppler spectrum type→ Jakes, Discrete path delay vector (s)→ [0 1/4*40e-6 2*1/4*40e-6], Average path gain vector (dB)→ [0 -5 -10], Initial seed→320 και τέλος επιλέγουμε το Normalize gain

vector to 0dB overall gain. Το Maximum Doppler shift ορίζεται από την θεωρία στα 10Hz όπως και το Doppler spectrum type. Το Discrete path delay vector δηλώνει ότι έχουμε προσομοιώσει τρία μονοπάτια πολλαπλής διαδρομής ξεκινώντας από το μηδενικό μονοπάτι, τα οποία έχουν καθυστερήσεις σε seconds και ορίζονται ως το $CP * \text{Sampletime}$. Το Average path gain vector μας δηλώνει τα dB που υπόκεινται σε καθυστερήσεις τα τρία παραπάνω μονοπάτια πολλαπλής διαδρομής. Τα 0dB αντιστοιχούν σε 0 μsecs για το πρώτο μονοπάτι, τα -5dB αντιστοιχούν σε καθυστέρηση των 5 μsecs για το δεύτερο μονοπάτι και -10dB αντιστοιχούν σε καθυστέρηση των 10 μsecs για το τρίτο μονοπάτι.



Σχήμα 33: Υποσύστημα Multipath Fading Channel

4.1.3 Δέκτης

OFDM data

Αυτό το υποσύστημα αποτελείται από το block selector με όνομα Remove Cyclic Prefix (CP) αφαιρεί το κυκλικό πρόθεμα το οποίο προσθέσαμε στον πομπό. Οι τιμές των παραμέτρων είναι οι εξής: Number of input dimensions→1, Index mode→ One-based, Index→ Index vector (dialog), Index→ [65:320], Input port size→320.

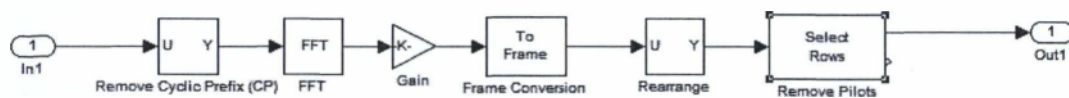
Το block FFT πραγματοποιεί τον ευθύ μετασχηματισμό Fourier FFT με τις εξής παραμέτρους: Twiddle factor computation→Table lookup, Optimize table for→Speed, FFT length→256 και τέλος επιλέγουμε Divide output by FFT length. Δεν πειράζουμε την καρτέλα Data types.

Το block Gain έχει τιμή $1/\sqrt{256} * \sqrt{256 * 192}$. Στην συνέχεια οι εξής παραμετροποιήσεις: Multiplication→ Element-wise($K * u$), Sample time (-1 for inherited)→1.

Το block Frame Status Conversion μετατρέπει το sample based σήμα στην είσοδο του σε Frame-Based στην έξοδο. Αυτό το block το αφήνουμε ως έχει.

Το block **Selector** με όνομα **Rearrange** αναδιατάσσει την είσοδο αφαιρώντας τα μηδενικά και δίνοντας στην έξοδο τα δεδομένα με τα φέροντα. Οι τιμές των παραμέτρων είναι: **Number of input dimensions**→1, **Index mode**→One Based, **Index Option**→ **Index Vector(dialog)**→ [157:256 1:101], **Input port size**→256.

Το block **Multiport Selector** με όνομα **Remove Pilots** αφαιρεί τα πιλοτικά φέροντα και αφήνει μόνο τα δεδομένα. Οι τιμές των παραμέτρων είναι: **Select**→ **Rows**, **Indices to output**→ [1:16,18:40,42:64,66:88,90:100,102:112,114:136,138:160,162:184,186:201],[17 41 65 89 113 137 161 185], **Invalid index**→ **Clip Index**.



Σχήμα 34: Υποσύστημα OFDM Data

Denormalization

Αυτό το block αποτελείται από τα ίδια blocks με το **Normalize** το οποίο περιγράψαμε προηγουμένως με τη μόνη διαφορά ότι ο συντελεστής K του **Gain** είναι ο αντίστροφος. Δηλαδή $\sqrt{2}$ για QPSK $\sqrt{10}$ για 16-QAM και $\sqrt{42}$ για 64-QAM.

4.2 Τρόπος Λειτουργίας Συστήματος

Κατά τον σχεδιασμό του συστήματος θα θεωρήσουμε δεδομένες και αμετάβλητες τις διαλείψεις που προκύπτουν από βουνά ως φυσικό και σταθερό μέσο. Το σύστημα θα επιλέγει μέσω χρονοπρογραμματισμού (π.χ. σύμφωνα με τις εποχές του χρόνου) ή ακραίων καιρικών φαινομένων πιο κανάλι πολλαπλών διαδρομών θα χρησιμοποιήσει για την μετάδοση των υπηρεσιών. Δηλαδή την άνοιξη όπου το φύλλωμα των δέντρων είναι πλούσιο θα επιλέγεται το Rayleigh κανάλι διαλείψεων επειδή το σήμα θα υπόκειται σε πολλαπλές ανακλάσεις και σκεδάσεις. Το φθινόπωρο όπου πέφτουν τα φύλλα των δέντρων θα χρησιμοποιείται το Rice κανάλι διαλείψεων λόγω του ότι μικρές συνιστώσες του σήματος θα προσπίπτουν επάνω σε κλαδιά δέντρων και μια μεγάλη δέσμη σήματος θα φτάνει στον δέκτη εξαιτίας της απουσίας του φυλλώματος. Κατά την διάρκεια του χειμώνα μπορεί να μην έχουν φύλλωμα τα δέντρα αλλά λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων όπως έντονη βροχόπτωση, χιόνι, χαλάζι ή/και με την παρουσία δυνατού αέρα που θα έχει ως αποτέλεσμα την κινητικότητα των κλαδιών των δέντρων, να κριθεί αναγκαία η αλλαγή καναλιού πολλαπλών διαδρομών από Rice σε Rayleigh. Η εναλλαγή των καναλιών πολλαπλών διαδρομών θα γίνεται μέσω του αισθητήρα στον οποίο θα πραγματοποιηθεί και ο προαναφερθής προγραμματισμός. Μετά από κάθε βλάβη όπως και πρίν από την πρώτη λειτουργία του συστήματος ο άλλος αισθητήρας θα

επιλέγει την λειτουργία του σε κανάλι λευκού θορύβου προκειμένου να διαπιστωθεί η επιτυχής μετάδοση των δεδομένων από τον πομπό στον δέκτη δίχως σφάλματα. Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία ο αισθητήρας μπορεί να επιλέξει το κατάλληλο κανάλι διαλείψεων για την μετάδοση των υπηρεσιών.

4.3 Εξαγωγή Αποτελεσμάτων

Με την χρήση του AWGN καναλιού, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, έχουμε ως σκοπό την αξιολόγηση του συστήματος με μηδενική πιθανότητα εμφάνισης λάθους με την ίδια παραμετροποίηση του καναλιού και ανεξάρτητα με την διαμόρφωση που θα επιλέξουμε. Για εύρος ζώνης **7MHz** παραμετροποιούμε τα παρακάτω blocks ανάλογα με την διαμόρφωση που επιθυμούμε και έχουμε σχηματικά Gray-mapped και φασματικά τα αντίστοιχα αποτελέσματα:

QPSK

Bernoulli binary generator: Sample time → $40 \cdot 10^{-6} / 384$, Samples per frame → 384

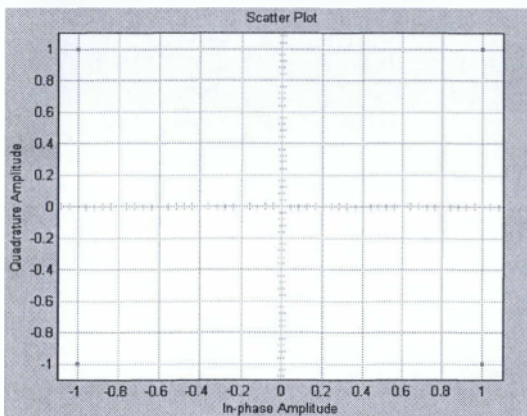
Rectangular QAM Modulator Baseband: M-ary number → 4

Normalization/Gain: Gain → $1/\sqrt{2}$

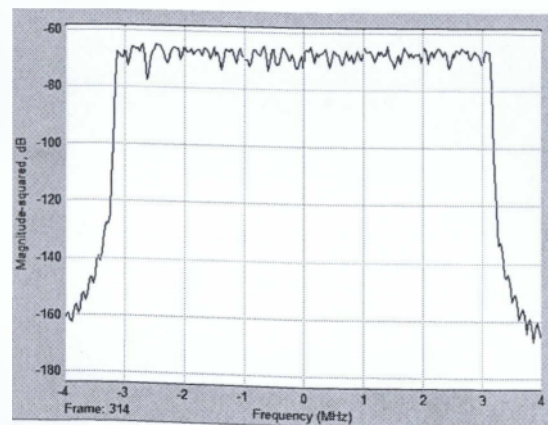
Denormalization/Gain: Gain → $\sqrt{2}$

Rectangular QAM Demodulator Baseband: M-ary number → 4

Πομπός

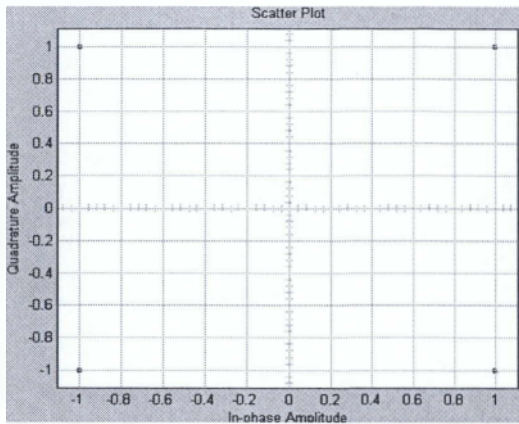


Transmitted Discrete-Time Scatter Plot Scope

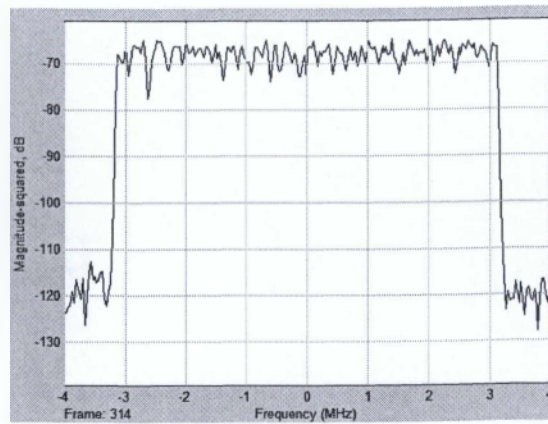


Transmitted Spectrum Scope

Δέκτης



Received Discrete-Time Scatter Plot Scope



Received Spectrum Scope

16-QAM

Bernoulli binary generator: Sample time $\rightarrow 40 \cdot 10^{-6} / 768$, Samples per frame $\rightarrow 768$

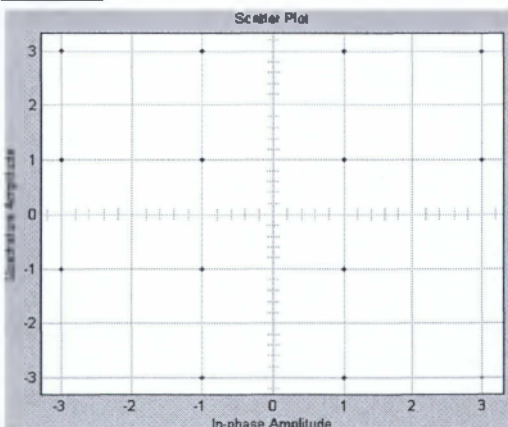
Rectangular QAM Modulator Baseband: M-ary number $\rightarrow 16$

Normalization/Gain: Gain $\rightarrow 1/\sqrt{10}$

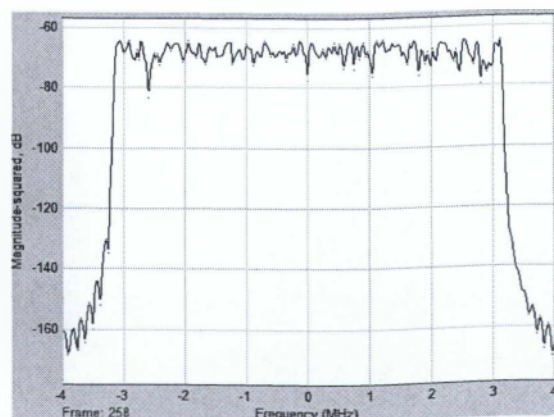
Denormalization/Gain: Gain $\rightarrow \sqrt{10}$

Rectangular QAM Demodulator Baseband: M-ary number $\rightarrow 16$

Πομπός

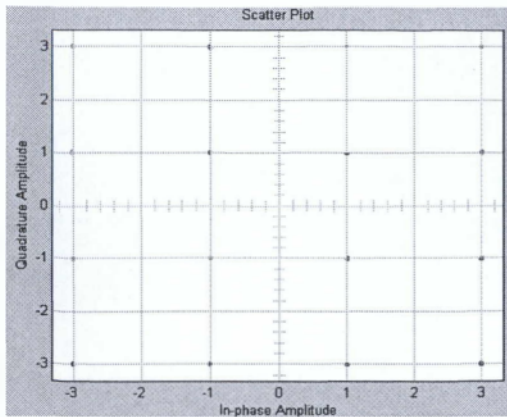


Transmitted Discrete-Time Scatter Plot Scope

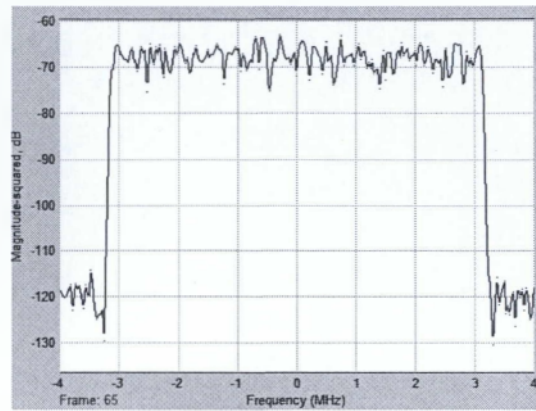


Transmitted Spectrum Scope

Δέκτης



Received Discrete-Time Scatter Plot Scope



Received Spectrum Scope

64-QAM

Bernoulli binary generator: Sample time $\rightarrow 40 \cdot 10^{-6} / 1152$, Samples per frame $\rightarrow 1152$

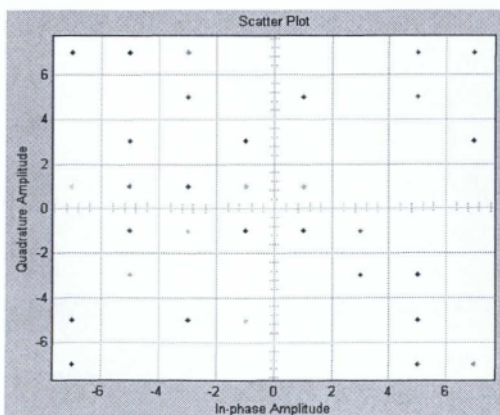
Rectangular QAM Modulator Baseband: M-ary number $\rightarrow 64$

Normalization/Gain: Gain $\rightarrow 1/\sqrt{42}$

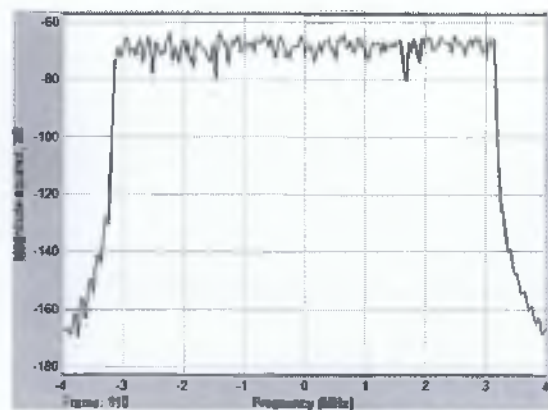
Denormalization/Gain: Gain $\rightarrow \sqrt{42}$

Rectangular QAM Demodulator Baseband: M-ary number $\rightarrow 64$

Πομπός

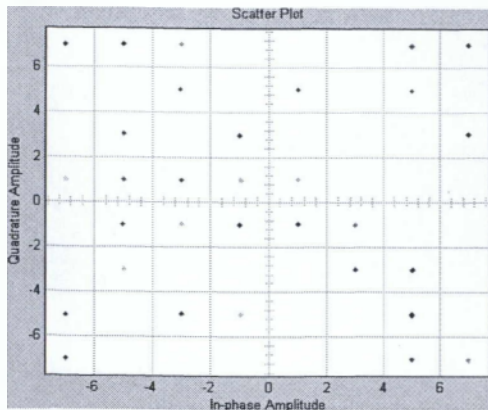


Transmitted Discrete-Time Scatter Plot Scope

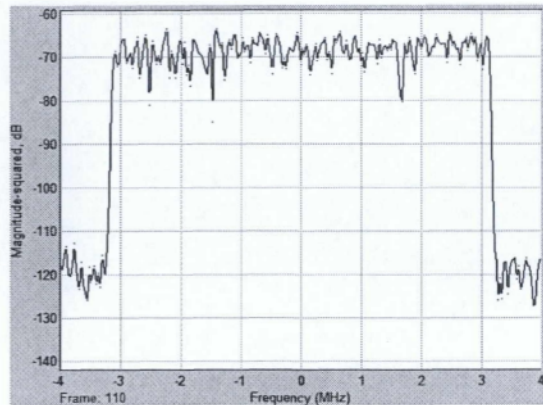


Transmitted Spectrum Scope

Δέκτης



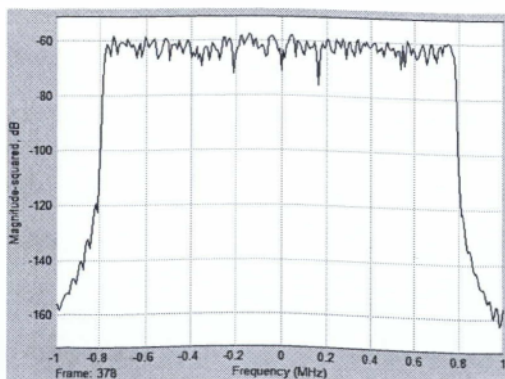
Received Discrete-Time Scatter Plot Scope



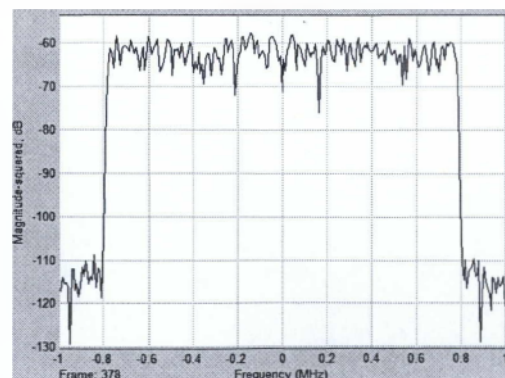
Received Spectrum Scope

Στην συνέχεια θα κάνουμε μετρήσεις στον πομπό και στον δέκτη με ένα σταθερό σχήμα διαμόρφωσης (16-QAM), σταθερό αριθμό σημείων FFT, σταθερό διάστημα ασφαλείας και μεταβλητό εύρος ζώνης. Για να το πετύχουμε αυτό παραμετροποιούμε την συχνότητα δειγματοληψίας της γεννήτριας Βερνουλλι ως εξής ενώ κρατάμε ίδιες τις υπόλοιπες παραμέτρους για το συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης:

Για εύρος ζώνης **1,75MHz**: Sample time $\rightarrow 160 \cdot 10^{-6} / 768$

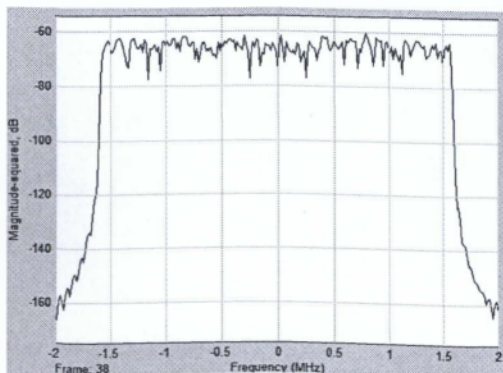


Transmitted Spectrum Scope

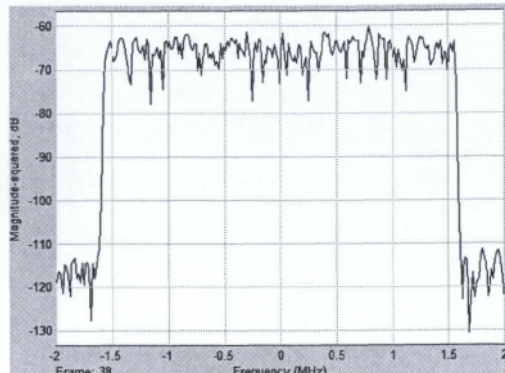


Received Spectrum Scope

Για εύρος ζώνης **3,5MHz**: Sample time $\rightarrow 80 \cdot 10^{-6} / 768$

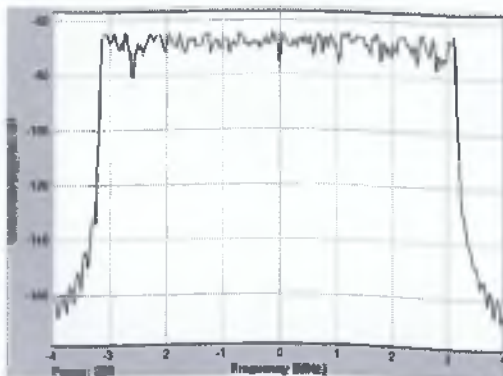


Transmitted Spectrum Scope

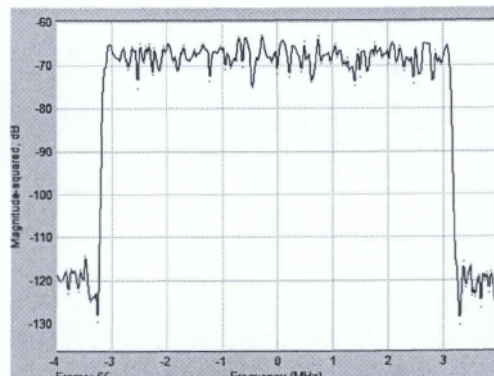


Received Spectrum Scope

Για εύρος ζώνης **7MHz**: Sample time $\rightarrow 40 \cdot 10^{-6} / 768$

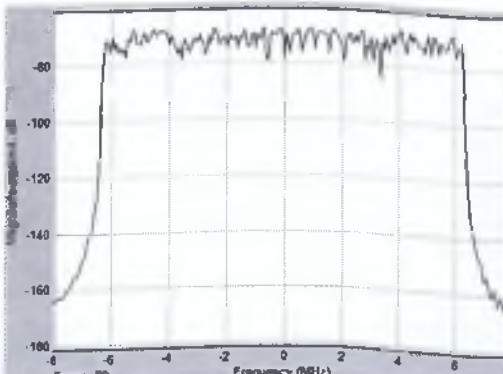


Transmitted Spectrum Scope

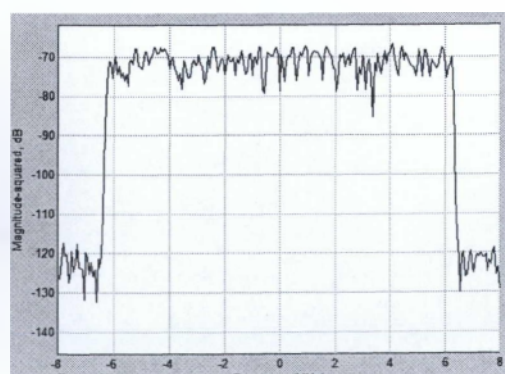


Received Spectrum Scope

Για εύρος ζώνης **14MHz**: Sample time $\rightarrow 20 \cdot 10^{-6} / 768$

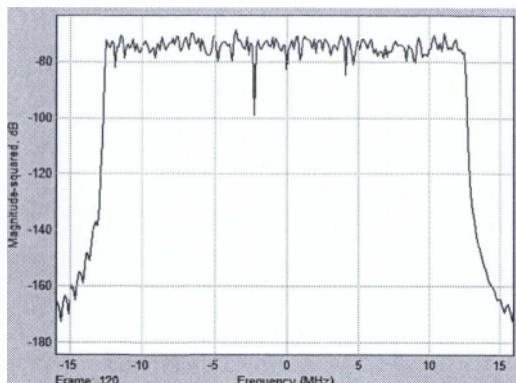


Transmitted Spectrum Scope

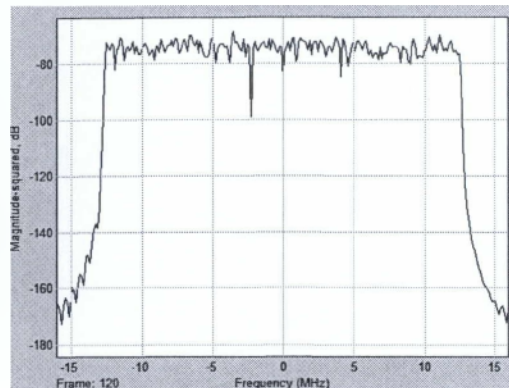


Received Spectrum Scope

Για εύρος ζώνης **28MHz**: Sample time $\rightarrow 10 \cdot 10^{-6} / 768$



Transmitted Spectrum Scope



Received Spectrum Scope

4.4 Μελέτη σε Κανάλια Διαλείψεων Πολλαπλών Διαδρομών

Rice

Με την παρουσία αυτού του καναλιού πολλαπλής διαδρομής θα μετρήσουμε την πιθανότητα εμφάνισης λάθους (BER) με σταθερό εύρος ζώνης (**7 MHz**) σε διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης M-QAM με 10 διαφορετικές τιμές του SNR στο κανάλι λευκού θορύβου (AWGN) [11]. Ως σημείο αναφοράς θα ορίσουμε τα $7.000 \cdot 10^6$ bits που λαμβάνονται από τον δέκτη.

R(dB)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
PSK	0.01143	0.0001549	0	0	0	0	0	0	0	0
QAM	0.09113	0.04121	0.03801	0.03845	0.0389	0.03863	0.03894	0.03844	0.03852	0.03885
QAM	0.1988	0.1366	0.1305	0.1264	0.1289	0.1281	0.1284	0.1286	0.129	0.1292

Πίνακας 11: BER συναρτήσει του SNR και των σχημάτων διαμόρφωσης στο κανάλι Rice

Rayleigh

Την διαδικασία που κάναμε στο Rice κανάλι διαλείψεων θα κάνουμε και στο Rayleigh κανάλι διαλείψεων με σημείο αναφοράς τα $7.000 \cdot 10^6$ bits.

R(dB)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
PSK	0.06042	0.01995	0.01586	0.01554	0.01551	0.0155	0.0155	0.01553	0.01553	0.01553
QAM	0.1966	0.1595	0.1543	0.154	0.1539	0.1541	0.1539	0.154	0.1541	0.154
QAM	0.3047	0.2751	0.2675	0.2688	0.2691	0.269	0.2694	0.2703	0.2687	0.2703

Πίνακας 12: BER συναρτήσει του SNR και των σχημάτων διαμόρφωσης στο κανάλι Rayleigh

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις θα πρέπει επιπροσθέτως να υπολογίσουμε τα Mbps που είναι πλέον διαθέσιμα στο σύστημα μας μετά τις απώλειες που υφίσταται το σήμα κατά την εκπομπή του αν επικρατούν οι χειρότερες περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Δηλαδή με το μικρότερο δυνατό SNR στο κανάλι λευκού θορύβου που σε αυτή την περίπτωση είναι 10dB. Άρα σύμφωνα με τους Πίνακες 10, 11 και 12 προκύπτει ότι: Διαθέσιμοι ρυθμοί μετάδοσης = $R_{b(\text{raw})} - (\text{BER} * R_{b(\text{raw})})$ Mbps. Δηλαδή για διαμόρφωση QPSK σε Rice κανάλι έχουμε: Διαθέσιμοι ρυθμοί μετάδοσης = $9,6 - (0,01143 * 9,6) = 9,490272$ Mbps. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες:

SNR = 10 dB	Mbps
QPSK	9,490272
16QAM	17,450304
64QAM	61,53216

Πίνακας 13: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων με τις χειρότερες περιβαλλοντολογικές συνθήκες σε κανάλι πολλαπλής διαδρομής Rice.

SNR = 10 dB	Mbps
QPSK	9,019968
16QAM	15,42528
64QAM	53,39904

Πίνακας 14: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων με τις χειρότερες περιβαλλοντολογικές συνθήκες σε κανάλι πολλαπλής διαδρομής Rayleigh.

Στην συνέχεια θα μετρήσουμε τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων για κάθε κανάλι πολλαπλών διαδρομών όταν σταθεροποιείται το BER και σύμφωνα με τους Πίνακες 11 και 12 αυτό συμβαίνει μετά τα 20 dB. Θα επιλέξουμε ως σημείο αναφοράς τα 50 dB.

SNR = 50 dB	Mbps
QPSK	9,6
16QAM	18,45312
64QAM	66,90048

Πίνακας 15: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων με σταθεροποιημένο BER σε κανάλι πολλαπλής διαδρομής Rice.

SNR = 50 dB	Mbps
QPSK	9,451104
16QAM	16,24512
64QAM	56,13312

Πίνακας 16: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων με σταθεροποιημένο BER σε κανάλι πολλαπλής διαδρομής Rayleigh.

4.5 Σενάριο Λειτουργίας του Προτύπου 802.16a WiMAX για την Ανώνυμη Ναυτιλιακή Εταιρεία Κρήτης A.N.E.K. LINES

Τα γραφεία της Ανώνυμης Ναυτιλιακής Εταιρείας Κρήτης A.N.E.K. LINES εδρεύουν στην Σούδα Χανίων. Ως ορεινό σημείο του νομού Χανίων θα ορίσουμε τον Ομαλό όπου η απόσταση Ομαλού-Σούδας είναι 22.6 χιλιόμετρα σε ευθεία γραμμή [22]. Οι σταθμοί βάσης που θα τοποθετήσουμε κατά μήκος αυτής της απόστασης θα πρέπει να έχουν μέγιστη απόσταση τα 8 Km όπως ορίζεται από το πρότυπο και μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων τα 35 Mbps. Ο σταθμός βάσης που επικοινωνεί με το κτίριο της εταιρείας (CPE) τοποθετείται σε απόσταση πολύ μικρότερη των 8 Km ώστε να είναι προσβάσιμες όλες οι διαμορφώσεις (QPSK, 16-QAM, 64-QAM) για την μετάδοση των δεδομένων. Οι συνδέσεις που επρόκειτο να πραγματοποιηθούν θα είναι κορμού δικτύου (backhaul) και NLOS. Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος θα επιλεγεί η κατάλληλη διαμόρφωση και το κατάλληλο κανάλι πολλαπλής διαδρομής. Οι χρήστες δεσμεύουν μόνο το απαιτούμενο εύρος ζώνης για την κάθε ασύρματη υπηρεσία που χρησιμοποιούν σύμφωνα με τον Πίνακα 9 και έτσι επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης και η αποφυγή καθυστερήσεων του συστήματος. Αν η εταιρεία έχει 100 χρήστες και χρησιμοποιείται διαμόρφωση QPSK σε Rayleigh κανάλι διαλείψεων με εύρος ζώνης 7MHz σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας (9,6 Mbps), ο κάθε χρήστης δεν θα δέσμευε 0,096 Mbps (9,6 Mbps/100 χρήστες) που του αναλογούν γιατί τότε θα υπήρχαν καθυστερήσεις στο σύστημα και δεν θα εξυπηρετούσε κανέναν αυτός ο ρυθμός μετάδοσης.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται δυο πιθανά σενάρια δημιουργίας του συστήματος με την χρήση του προτύπου που προσομοιώσαμε στην προηγούμενη ενότητα. Η διαδρομή με την παχιά μαύρη γραμμή είναι η κύρια διαδρομή ενώ με την μαύρη λεπτή απεικονίζεται η εφεδρική διαδρομή σε περίπτωση βλάβης της κύριας. Με κόκκινες γραμμές παρουσιάζονται τα τρία προσομοιώσιμα μονοπάτια εξαιτίας της πολλαπλής διαδρομής που θα ακολουθήσει το σήμα στην περίπτωση του Rayleigh καναλιού. Αν οι καιρικές συνθήκες καθιστούν αδύνατη την λειτουργία του συστήματος παρά τις αλλαγές σχημάτων διαμόρφωσης και καναλιών πολλαπλής διαδρομής τότε θα χρησιμοποιηθεί η εφεδρική διαδρομή (λεπτή μαύρη

γραμμή) προκειμένου να παρέχονται οι ασύρματες υπηρεσίες στους χρήστες της εταιρείας. Όταν βελτιωθούν οι καιρικές συνθήκες και αποκατασταθεί η βλάβη μετά από έλεγχο ορθής λειτουργίας του συστήματος με χρήση του καναλιού λευκού θορύβου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πάλι η κύρια διαδρομή. Το ίδιο ισχύει και για την εφεδρική διαδρομή. Σε περίπτωση που και οι δυο διαδρομές δεν μπορούν να λειτουργήσουν θα χρησιμοποιηθεί προσωρινά backup dsl όπως αναφέρεται παρακάτω στον εξοπλισμό WiMAX.



Σχήμα 35: Σενάριο λειτουργίας για την Ανώνυμη Ναυτιλιακή Εταιρεία Κρήτης (A.N.E.K. LINES). Με τρίγωνο παρουσιάζονται οι σταθμοί βάσης της κύριας διαδρομής, με εξάγωνο οι σταθμοί βάσης της εφεδρικής και με αστέρι ο CPE (δέκτης).

Οι αποστάσεις μεταξύ των σταθμών βάσης είναι οι εξής:

Κύρια διαδρομή

- Ομαλός – Ζούρβα → 7,3 Km
- Ζούρβα – Κεραμιά → 8 Km
- Κεραμιά – Τσικαλαριά → 6,5 Km
- Τσικαλαριά – Σούδα → 1,6 Km

Εφεδρική διαδρομή

Ομαλός – Καράνου → 6 Km

Καράνου - Σκινές → 3,5 Km

Σκινές – Βαρύπετρο → 5,6 Km

Βαρύπετρο – Χανιά → 6,6 Km

Χανιά – Σούδα → 5,6 Km

4.5.1 Εξοπλισμός WiMAX

Ο εξοπλισμός που απαιτείται για την παραπάνω ασύρματη διασύνδεση WiMAX περιλαμβάνει τα παρακάτω στοιχεία [15]:

Ένα (1) κεντρικό υπολογιστή του συστήματος (server), όπου θα αποθηκεύονται τα δεδομένα όλων των υποσυστημάτων.

Ένα (1) κεντρικό υπολογιστή που θα χρησιμοποιηθεί ως backup server του παραπάνω υπολογιστή. Στην αγορά των servers έχουν κυριαρχήσει οι επεξεργαστές της Intel και της AMD.

Backup DSL ή PSTN σύνδεση μεταξύ πλοίου και εταιρείας.

Λειτουργικό σύστημα με κυριότερες επιλογές κάποια έκδοση του Unix (από το ελεύθερο-αλλά όχι δωρεάν πολλές φορές-Linux και τους κλώνους του, ως τις εμπορικές υλοποιήσεις Unix, όπως το AIX της IBM και το Solaris της Sun Microsystems).

Σταθμός βάσης WiMAX επιπέδου φορέα.

Δύο (1+1) κεραιές συγκεκριμένης γωνίας κάλυψης για τον σταθμό βάσης (αν τελικά υιοθετήσουμε τη χρήση omni κεραιών).

Έξι (3+3) κατευθυντικές παραβολικές κεραιές για τους τερματικούς σταθμούς.

Δύο (1+1) μεμονωμένες μονάδες χωρίς εξωτερικά καλώδια ή κυματοδηγούς για αποφυγή απωλειών μεταξύ του ραδιοσυστήματος και κεραιάς, προστασία σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες, εύκολη εγκατάσταση και μεταφορά.

Μονά ομοαξονικά καλώδια για διασύνδεση δεδομένων, ισχύος και διαχείριση με τον εξοπλισμό εσωτερικού χώρου. Το ραδιοσύστημα σταθμού βάσης (BRS) και το ραδιοσύστημα τερματικού σταθμού (SRS) διαχειρίζονται πλήρως μέσω του τοπικού τερματικού και το σύστημα wBBMS.

Βραχίονες στήριξης για εύκολη εγκατάσταση των κεραιών, διατήρηση της ευθυγράμμισης και εύκολη αντικατάσταση.

Hubs, switches, routers.

Μόντεμ και κάρτες μόντεμ.

Σύστημα Διαχείρισης Ευρυζωνικών Υπηρεσιών .

Μηχανισμός ελέγχου αποδοχής κλήσης (Call Admission Control).

Συμπεράσματα

Από τις παραπάνω μετρήσεις συμπεραίνουμε ότι η πιθανότητα εμφάνισης λάθους στο Rayleigh κανάλι είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το Rice κανάλι. Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι ένα μεγάλο ποσοστό του λαμβανόμενου σήματος χάνεται λόγω των πολλαπλών διαδρομών. Στο Rice κανάλι το μεγαλύτερο ποσοστό του σήματος λαμβάνεται από τον δέκτη, σε σημείο να επιτυγχάνουμε την μηδενική πιθανότητα εμφάνισης λάθους χρησιμοποιώντας διαμόρφωση QPSK με SNR πάνω από 20 dB. Επιπλέον στην εξασθένηση λόγω πολλαπλής διαδρομής το εύρος ζώνης είναι άλλος ένας σημαντικός παράγοντας στην προσομοίωση. Και αυτό γιατί διαφορετικό εύρος ζώνης συνεπάγεται διαφορετική συχνότητα δειγματοληψίας και επομένως διαφορετικό λάθος χρονισμού. Εμείς έχουμε θεωρήσει τέλειο χρονισμό ανάμεσα σε πομπό και δέκτη. Ο χρονισμός επιτυγχάνεται στην πράξη με τα βοηθητικά φέροντα και την εκτίμηση του καναλιού.

Παρατηρούμε, λοιπόν, από τη θεωρία και από την προσομοίωση ότι όσο αυξάνεται το σχήμα της διαμόρφωσης, τόσο αυξάνεται και ο ρυθμός εκπομπής δεδομένων. Αυτό εξηγείται πολύ απλά. Καθώς αυξάνεται το σχήμα διαμόρφωσης, αυξάνονται και τα σύμβολα που μπαίνουν στον αστερισμό κατά τη διαμόρφωση και έτσι περισσότερα σύμβολα μεταφέρονται στο ίδιο πλαίσιο. Έτσι, τα εκπεμπόμενα δεδομένα είναι πολύ περισσότερα στην 64-QAM διαμόρφωση από ότι στην QPSK. Ο κίνδυνος λάθους, βέβαια, είναι πολύ μεγαλύτερος στην QAM (καθώς τα σύμβολα μπαίνουν στον αστερισμό πολύ κοντά το ένα με το άλλο και πιθανόν να έχουμε μπερδεμένα σύμβολα κατά την αποδιαμόρφωση) και αυτό είναι το μειονέκτημα της. Μπορεί, λοιπόν, να μεταδίδουμε περισσότερα δεδομένα στον ίδιο χρόνο με την QAM διαμόρφωση, έχουμε όμως και μεγαλύτερη πιθανότητα λάθους. Ο μέγιστος ρυθμός που επιτυγχάνεται είναι περίπου 115.2 Mbps για εύρος ζώνης 28 MHz, αριθμός αρκετά ικανοποιητικός για το νέο αυτό και πολλά υποσχόμενο πρωτόκολλο της IEEE.

Μελλοντικά Θέματα (Future Work)

Το MATLAB Simulink R2010a προσομοιώνει μόνο δυο κανάλια μικρής κλίμακας διαλείψεων. Επειδή ένα περιβάλλον ορεινό και δασώδες εμφανίζει μεγάλη πολυπλοκότητα ως προς την ορθή μετάδοση των υπηρεσιών απαιτούνται παραπάνω από δυο κανάλια διαλείψεων. Ένας συνδιασμός ακραίων καιρικών φαινομένων και πλούσιου σε παρεμβολές περιβάλλοντος είναι ικανός να διακόψει την επικοινωνία μεταξύ των ζεύξεων με χρήση μόνο των καναλιών Rice και Rayleigh.

Για να περιοριστεί αυτή η πιθανότητα απώλειας της επικοινωνίας, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε επιπλέον κανάλια διαλείψεων τα οποία μπορούν να κρατήσουν ενεργή την επικοινωνία μεταξύ ζεύξεων και χρηστών. Άλλα μη προσομοιώσιμα κανάλια όπως το Nakagami-m (μικρής κλίμακας διαλείψεων), log-normal (μεγάλης κλίμακας διαλείψεων - σκίασης), Hata (απώλειας διαδρομής) log-normal Rice, log-normal Rayleigh, log-normal Nakagami (μοντέλα σύνθετων διαλείψεων) μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση και λειτουργία του συστήματος. Αυτά τα κανάλια-μοντέλα διαλείψεων παρέχουν πολύ πιο ελαχιστοποιημένο BER και το σύστημά μας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης με αποτέλεσμα την καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση των χρηστών όσον αφορά την ποιότητα προσωποποιημένων υπηρεσιών. Υπάρχει πάντα και το λεγόμενο turbo mode, για εύρος ζώνης 40 MHz καναλιού, που εκτοξεύει το ρυθμό δεδομένων στα 120 Mbps.

Έτσι εγγυάται η επικοινωνία κατά μήκος ολόκληρου του δικτύου και παράλληλα διατίθεται στους χρήστες μεγαλύτερο εύρος ζώνης οι οποίοι δεσμεύουν μόνο το απαιτούμενο για κάθε προσωποποιημένη υπηρεσία που χρησιμοποιούν χωρίς να υπάρχουν σφάλματα και καθυστερήσεις στο δίκτυο.

Αναφορές

- [1] Tanenbaum "Δίκτυα Υπολογιστών" Τέταρτη Αμερικάνικη Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [2] Μ.Ε. Θεολόγου, "Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών», Εκδόσεις ΕΜΠ, Μάρτιος 2002".
- [3] John M. Howie, "Fields and Galois Theory, Springer (Undergraduate Mathematics Series)" ,May 2005
- [4] E. P. Lawrey "Adaptive Techniques for Multiuser OFDM, Ph. D. Thesis, School of Engineering", James Cook Univeristy, December 2001
- [5] A. van Zelst, R. van Nee, and G. A. Awater: "Space division multiplexing (SDM) for OFDM systems", IEEE 51st Vehicular Technology Conference (VTC) Proceedings, vol. 2, pp. 1070-1074, Tokyo, Spring 2000
- [6] A. F. Molisch, "Wireless Communications", 2005
- [7] R. V. Nee, R. Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Boston : Artech House, c2000
- [8] 802.16aTM IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems— Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2–11 GHz
- [9] Fan Wang, Amitava Ghosh, Chandy Sankaran, Philip J. ,Fleming, Frank Hsieh, and Stanley J. Benes, Networks Advanced Technologies, Motorola Inc. "Mobile WiMAX Systems: Performance and Evolution".
- [10] S. M. Alamouti "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, October 1008
- [11] Md. Anamul Islam, Md. Abdul Kader, Md. Julkarnain "BER Performance Analysis of a Real Data Communication through WiMAX-PHY Layer over an AWGN and Fading Channels", International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS Vol: 10 No: 04
- [12] Muhammad Imran Hasan Md. Obaid Ullah "Performance Evaluation of IEEE 802.16e (Mobile WiMAX) in OFDM Physical Layer", Blekinge Institute of Technology, August 2009

[13] <http://www.wimax.com/microwave-backhaul/backhaul-for-wimax-top-8-technical-considerations>

[14] <http://gaussianwaves.blogspot.com/2010/02/fading-channels-rayleigh-fading.html>

[15] <http://www.wirelessnetworkproducts.com/search.aspx?find=wimax>

[16] <http://cpe.kmutt.ac.th/wiki/index.php/WiMax> By Group20

[17] http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_fading

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

[19] <http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX>

[20] http://en.wikipedia.org/wiki/Nakagami_distribution

[21] <http://www.techteam.gr/wiki/WiMAX>

[22] <http://www.daftlogic.com/projects-google-maps-distance-calculator.htm>

Επιστημονικά Περιοδικά

[23] P. S. Bithas, N. C. Sagias, P. T. Mathiopoulos, G. K. Karagiannidis, and A. A. Rontogiannis, "On the performance analysis of digital communications over generalized-K fading channels", IEEE Communications Letters, vol.10, no.5, pp. 353-355, May 2006.

[24] P. S. Bithas, P. T. Mathiopoulos, and S. A. Kotsopoulos, "Diversity reception over generalized-K (KG) fading channels", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.6, no.12, pp. 4238-4243, Dec. 2007.