



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

Σχεδίαση και Προσομοίωση Συστήματος WiMAX

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Α. Στεφάνου

Επιβλέπων: Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2006



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

Σχεδίαση και Προσομοίωση Συστήματος WiMAX

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Α. Στεφάνου

Επιβλέπων: Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Ιουλίου 2006

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Κακλαμάνη
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2006

.....
Κωνσταντίνος Α. Στεφάνου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Α. Στεφάνου, 2006
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του νέου πρωτοκόλλου της IEEE, του 802.16™, γνωστότερο και ως WiMAX. Το νέο αυτό πρωτόκολλο έχει ως αντικείμενό του τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα επικοινωνιών και μεταφοράς δεδομένων. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζονται διάφορα σενάρια χρήσης του προς μελέτη πρωτοκόλλου και επίσης σχεδιάζεται ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα πομπού και καναλιού μεταφοράς του φέροντος στο οποίο γίνονται μετρήσεις για την ακεραιότητα και επίδοση του διαύλου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι διαρθρωμένη σε 3 κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο, το νέο πρωτόκολλο εξετάζεται από τη θεωρητική και τεχνοοικονομική του πλευρά. Εξετάζεται κατά πόσο οι δυνατότητές του θα ωφελήσουν τις ανάγκες του κόσμου των επικοινωνιών, ενώ παρουσιάζονται και οι πιο συνηθεις περιπτώσεις που θα μπορέσει να χρησιμοποιηθεί και αναλύονται οι παράμετροι κάθε ζεύξης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φυσικού στρώματος του πρωτοκόλλου, όπως αυτά έχουν προτυποποιηθεί από την IEEE. Αναλύονται λεπτομερώς τα στοιχεία του φυσικού στρώματος, όπως και επιμέρους δομικά του στοιχεία, όπως η τεχνική διαμόρφωσης OFDM, ο μετασχηματισμός Fourier και ο θόρυβος φάσης που εισάγεται σε ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι.

Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η υλοποίηση του τηλεπικοινωνιακού καναλιού για το νέο πρωτόκολλο, η οποία πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Advanced Design System 2005A της εταιρείας Agilent. Παρουσιάζεται λεπτομερώς η σχεδίαση του κάθε μέρους και σχολιάζονται οι μετρήσεις που αφορούν στα διάφορα σχήματα διαμόρφωσης, για διαφορετικά έυρη ζώνης και διαφορετικά σημεία μετασχηματισμού FFT. Τέλος, δοκιμάζουμε τη συμπεριφορά του συστήματός μας κατά την RF διαμόρφωση του φέροντος και τη χρήση ενισχυτή για συγκεκριμένες τιμές θορύβου φάσης και διαφορετικές τιμές χαρακτηριστικών του ενισχυτή, όπως η ισχύς του σημείου συμπίεσης 1 dB και ο παράγοντας θορύβου.

Λέξεις Κλειδιά

Ασύρματο Σύστημα, Πομπός, Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος, Μητροπολιτικό Δίκτυο, Ορθογώνια Διαμόρφωση Συχνότητας, Ενισχυτής, Θόρυβος Φάσης

Abstract

The scope of this thesis is the study of the new IEEE 802.16™ standard, also known as WiMAX. This new standard handles the subject of wireless metropolitan networks concerning communications and data transfer. In this thesis, many different usage scenarios of the new protocol are introduced and also a telecommunicational system, composing of a transmitter and a modulation channel is designed. Measurements for the channel's integrity and performance are being conducted.

This thesis is assembled in 3 chapters.

In the first chapter, the new standard is examined in a theoretical and technical – financial basis. Examination is being conducted on how the abilities of the new protocol will be of benefit to the world of telecommunications, while the most frequent usage scenarios are being demonstrated. The parameters of each usage link are being analyzed in detail.

In the second chapter, the technical characteristics of the physical layer of the protocol, as standardized by the IEEE are demonstrated. The features of the physical layer are analyzed in detail, as also features like the OFDM scheme of multiplexing, the Fourier transform and the phase noise which is introduced in a communications' channel.

Finally, in the third chapter, the implementation of the telecommunications channel for the new standard is demonstrated. The implementation was carried out using the Advanced Design System 2005A program, created by the Agilent company. The design of each part is reported in detail and the measurements on different modulation schemes, for different bandwidth and FFT points are commented on. In the end, we test the behaviour of the system during the RF modulation, using an amplifier for certain values of phase noise and different amplifier feature values, such as the 1 dB compression point power and the noise figure.

Key Words

Wireless System, Transmitter, Digital Signal Processing, Metropolitan Network, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Amplifier, Phase Noise

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ακόλουθους:

Τον **Κ. Καθηγητή Νικόλαο Ουζούνογλου** για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την αμέριστη και συνεχή συμπαράσταση και εμπιστοσύνη που έδειξε τόσο καιρό στο πρόσωπό μου και στην δουλειά μου, τόσο στα χρόνια της φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο όσο και στην πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής.

Τον ερευνητικό συνεργάτη **Γεώργιο Στρατάκο** για τις γνώσεις που μου μετέδωσε σχετικά με το αντικείμενο των ασύρματων δικτύων, της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και της διαμόρφωσης RF, τις συζητήσεις μας και τα σχόλιά του που ήταν καίρια για την ολοκλήρωση της διπλωματικής.

Τους συμφοιτητές μου **Τσόπελα Ανδρέα** και **Σπανάκη Γεράσιμο**, οι οποίοι μου παρείχαν την τεχνική υποδομή ώστε να μπορέσω να ολοκληρώσω με επιτυχία την παρούσα διπλωματική εργασία.

Επιπλέον **τους Γονείς μου** για την διαρκή συμπαράσταση και αγάπη τους.

Χωρίς τους παραπάνω ανθρώπους σίγουρα το αποτέλεσμα αυτής της εργασίας και της δικιάς μου εξέλιξης θα ήταν πολύ κατώτερο.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή στις Βασικές Έννοιες και στις εφαρμογές της ασύρματης τεχνολογίας WiMAX.....	11
1.1 Ασύρματες Τεχνολογίες – Μία Εισαγωγή.....	11
1.1.1 Γενικά.....	11
1.1.2 Νόμοι - Χαρακτηριστικά Ασυρμάτων Τεχνολογιών.....	13
1.2 IEEE Working Group Standardization Bodies.....	16
1.3 Εισαγωγή στην Ασύρματη Πρόσβαση Ευρείας Ζώνης.....	19
1.4 Πρότυπο IEEE 802.16TM.....	22
1.4.1 Γενικά.....	22
1.4.2 Ζώνες Συχνοτήτων.....	24
1.4.3 WiMAX: Μία εμπορική συμμαχία.....	25
1.4.4 Πλεονεκτήματα του WiMAX.....	26
1.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης της τεχνολογίας WiMAX.....	30
1.5.1 Εφαρμογές του WiMAX.....	31
1.5.2 Σενάρια χρήσης.....	32
1.5.2.1. Ιδιωτικά Δίκτυα.....	32
1.5.2.2. Δημόσια Δίκτυα.....	43
1.5.3 Συμπεράσματα.....	45
1.6 Δομή ενός δικτύου WiMAX.....	47
1.7 Εισαγωγή στη μετάδοση χωρίς οπτική επαφή (non line of sight, NLOS).....	50
1.7.1 Τεχνολογία OFDM.....	52
1.7.2 Sub Channelization.....	54
1.7.3 Κεραίες για Εφαρμογές Σταθερής Ασύρματης Υπηρεσίας.....	54
1.7.4 Ποικιλία Εκπομπής και Λήψης.....	55
1.7.5 Προσαρμόσιμη Διαμόρφωση.....	55
1.7.6 Τεχνικές Διόρθωσης Λαθών.....	56
1.7.7 Έλεγχος Ισχύος.....	56
Κεφάλαιο 2^ο: Προδιαγραφές και Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Φυσικού Στρώματος του 802.16TM – Θόρυβος Φάσης.....	57
2.1 Προδιαγραφές WMAN IEEE 802.16TM.....	57
2.1.1 Φυσικό Στρώμα.....	57
2.1.2 Παράμετροι συμβόλου OFDM και εκπεμπόμενο σήμα.....	58
2.1.3 Εκπεμπόμενο σήμα.....	58
2.1.4 Παράμετροι του εκπεμπόμενου σήματος.....	58
2.1.5 Κωδικοποίηση καναλιού.....	59
2.1.6 Randomization.....	59
2.1.7 FEC.....	61
2.1.8 Αλυσιδωτός Reed-Solomon Συνελκτικός Κώδικας (RS-CC).....	61

2.1.9	Interleaver.....	63
2.1.10	Διαμόρφωση.....	64
2.1.10.1	Διαμόρφωση Δεδομένων.....	64
2.1.10.2	Διαμόρφωση Πιλοτικών φερόντων.....	66
2.1.11	Κωδικοποιήσεις ID encodings.....	67
2.1.12	Δομή προοιμίου και διαμόρφωση.....	68
2.1.13	Δομή πλαισίου.....	70
2.2	OFDM.....	74
2.2.1	Εισαγωγή – Ιστορία του OFDM.....	74
2.2.2	Τι ακριβώς είναι όμως το OFDM;.....	74
2.2.3	Η σημασία της ορθογωνιότητας.....	75
2.2.4	Μαθηματική αναπαράσταση του σήματος OFDM.....	76
2.3	Χρήση Μετασχηματισμού Fourier.....	82
2.3.1	Ο Μ/Σ Fourier – Μια εισαγωγή.....	82
2.3.2	Μαθηματική αναπαράσταση του Μ/Σ Fourier.....	82
2.3.3	Η χρήση του FFT στο OFDM.....	84
2.4	Κυκλικό Πρόθεμα.....	89
2.4.1	Η χρήση του κυκλικού προθέματος στο OFDM και η μαθηματική αναπαράστασή του.....	89
2.4.2	Συνέπειες από την κυκλική επέκταση του συμβόλου.....	96
2.4.3	Το διάστημα φύλαξης και η υπολοίωσή του.....	96
2.5	Windowing (Παραθυροποίηση).....	102
2.6	Ιδιότητες του OFDM.....	104
2.6.1	Φάσμα και επίδοση.....	104
2.6.2	Επίδοση Bit Error Rate.....	105
2.6.3	Peak to average power ratio (PARP).....	106
2.6.4	Συγχρονισμός.....	107
2.6.5	Κωδικοποίηση.....	107
2.6.6	Καταπολέμηση της εξασθένισης που είναι επιλεκτική στη συχνότητα.....	107
2.7	Εισαγωγή στο Θόρυβο Φάσης (Phase Noise).....	109
2.7.1	Τι είναι ο θόρυβος φάσης και πλάτους;.....	109
2.7.2	Καθορισμός Μονόπλευρού Θορύβου Φάσης.....	110
2.7.3	Φάσμα ενός VCO διαμορφωμένου από Λευκό Θόρυβο.....	112
2.7.4	Αμοιβαία Μείξη – πως ο θόρυβος φάσης του τοπικού ταλαντωτή επηρεάζει την επιλεκτικότητα.....	114
2.7.5	Φασματικές μάσκες για πομπούς.....	116
 Κεφάλαιο 3^ο: Υλοποίηση του πομπού, του κομματιού RF και του ενισχυτή με χρήση του προγράμματος Advanced Design System 2005A της Agilent ©.....118		
3.1	Υλοποίηση του κομματιού του πομπού με χρήση του προγράμματος Advanced Design System 2005A της Agilent ©.....	118

3.1.1	Εισερχόμενα Δεδομένα και Διαμόρφωσή τους (Input Data – Modulation).....	118
3.1.2	Πιλοτικά Δεδομένα και Διαμόρφωσή τους (Pilot Data – Modulation).....	120
3.1.3	Διαμόρφωση OFDM (OFDM Modulation).....	122
3.1.4	Διαμόρφωση Προοιμίου (Preamble Modulation).....	125
3.1.5	Εισαγωγή Κενού Διαστήματος (Idle Generation).....	127
3.1.6	Διαμόρφωση RF (RF Modulation).....	127
3.2	Μετρήσεις στο κομμάτι του πομπού.....	132
3.2.1	Μετρήσεις με ένα σταθερό σχήμα διαμόρφωσης, σταθερό αριθμό σημείων FFT και σταθερό διάστημα φύλαξης και με μεταβλητό μέγεθος εύρους ζώνης.....	132
3.2.2	Μετρήσεις με ένα σταθερό σχήμα διαμόρφωσης, σταθερό εύρος ζώνης και σταθερό διάστημα φύλαξης και μεταβλητό αριθμό σημείων FFT.....	139
3.2.3	Μετρήσεις με σταθερό εύρος ζώνης, σταθερό αριθμό σημείων FFT, σταθερό διάστημα φύλαξης και μεταβλητό σχήμα διαμόρφωσης.....	145
3.2.4	Μετρήσεις των εκπεμπομένων συμβόλων ανά δευτερόλεπτο διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης, σταθερό αριθμό σημείων FFT και σταθερό εύρος ζώνης και σταθερό διάστημα φύλαξης.....	150
3.3	Υλοποίηση του κομματιού του ενισχυτή RF με χρήση του προγράμματος Advanced Design System 2005A της Agilent ©.....	152
3.4	Μετρήσεις στο κομμάτι του ενισχυτή.....	158
	Παράρτημα.....	167
	Αναφορές.....	171

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή στις Βασικές Έννοιες και στις εφαρμογές της ασύρματης τεχνολογίας WiMAX

1.1 Ασύρματες Τεχνολογίες – Μία Εισαγωγή

1.1.1 Γενικά

Ο κόσμος και η τεχνολογία των ασύρματων τεχνολογιών και ειδικότερα των ασύρματων επικοινωνιών είναι ο πιο ραγδαία αναπτυσσόμενος αυτή τη στιγμή στους κόλπους των τεχνολογικών επιστημών.

Από τη δεκαετία του 1980, οπότε και η ιδέα της ασύρματης επικοινωνίας σταμάτησε να είναι μια απλή θεωρητική ουτοπία, η ασύρματη τεχνολογία άρχισε να εξελίσσεται τόσο πολύ, ώστε σήμερα να θεωρείται το *de facto standard* για την υλοποίηση τηλεπικοινωνιακών αναγκών.

Όταν ο R. Metcalfe συνέλαβε και υλοποίησε την ιδέα του Ethernet, πιθανόν να μην μπορούσε να συλλάβει και το ότι ο αιθέρας που υπήρχε μέσα στα απτά καλώδια των LANs για να μεταδοθεί η πληροφορία, θα μπορούσε να μετατραπεί στο απλούστερο δυνατό αέριο μέσο, τον αέρα που υπάρχει γύρω μας, χωρίς είτε καλώδια είτε κάποιο άλλο υλικό μέσο.

Τώρα πλέον, εν έτη 2006 οι ασύρματες τεχνολογίες στις τηλεπικοινωνίες έχουν προχωρήσει απίστευτα πολύ και χρησιμοποιούνται στις κινητές τηλεπικοινωνίες, στα αμυντικά συστήματα, στην τηλεκπαίδευση, την τηλεϊατρική, την ψηφιακή τηλεόραση και σε πολλές ακόμα υπηρεσίες.

Οι τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης τα τελευταία χρόνια έχουν γνωρίσει σημαντική εξέλιξη, καθώς από τα πλεονεκτήματά τους επωφελούνται τόσο οι πάροχοι υπηρεσιών μετάδοσης δεδομένων, όσο και οι ιδιώτες ή οι απλοί χρήστες. Η ευκολία εγκατάστασης ενός ασύρματου δικτύου, οδήγησε στην ανάπτυξη σήμερα εκατομμυρίων δικτύων Wi-Fi σε ολόκληρο τον πλανήτη. Παρόλα αυτά, το Wi-Fi αντιμετωπίζει μειονεκτήματα που έρχεται να λύσει μια νέα τεχνολογία, η οποία ακούει στο όνομα WiMAX.

Κάνοντας μια ανασκόπηση του τρόπου με τον οποίο η συντριπτική πλειοψηφία των σημερινών χρηστών πλοηγείται στο διαδίκτυο, μάλλον η πιο συνηθισμένη εικόνα που σχηματίζει κανείς στο μυαλό του είναι αυτή των καλωδίων που απαιτούνται για τη σύνδεση του ηλεκτρονικού υπολογιστή με κάποιο modem ή router. Η πρόσβαση στο Internet μέσω ενσύρματων δικτύων μπορεί να παρουσιάζει σαν πλεονέκτημα την υψηλή σταθερότητα της σύνδεσης, ωστόσο περιορίζει σημαντικά την ευελιξία του χρήστη, ο οποίος θα πρέπει να βρίσκεται σε ένα σταθερό σημείο προκειμένου να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες του διαδικτύου.

Τα τελευταία χρόνια γνώρισε σημαντική απήχηση σε παγκόσμια κλίμακα μια εξελιγμένη τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης, το Wi-Fi, το οποίο απλοποιεί τις διαδικασίες σύνδεσης ενός χρήστη με το Internet. Το Wi-Fi όμως, αν και αρκετά απλό στη χρήση, δεν έφερε την πραγματική επανάσταση, που όλοι περίμεναν και αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην περιορισμένη εμβέλεια της κάλυψής του. Στην πραγματικότητα η εν λόγω τεχνολογία αξιοποιήθηκε κυρίως για σύνδεση ηλεκτρονικών υπολογιστών και δρομολογητών (routers) σε οικιακούς ή εταιρικούς χώρους και όχι για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Internet σε μια

γεωγραφικά εκτεταμένη περιοχή. Με την εμβέλειά του να περιορίζεται στα 100 μέτρα, δεν θα μπορούσε φυσικά να περιμένει κανείς κάτι διαφορετικό.

Το μειονέκτημα της περιορισμένης εμβέλειας του Wi-Fi άφησε σαν μοναδική λύση για τους χρήστες που επιθυμούν μόνιμη πρόσβαση στο διαδίκτυο εν κινήσει, τη χρήση των τεχνολογιών GPRS και 3G, μέσω των GSM και UMTS δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Οι εν λόγω τεχνολογίες προσφέρουν μεν σταθερή σύνδεση σε κάθε σημείο όπου υπάρχει κάλυψη σήματος από το δίκτυο, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι ο συνδρομητής μπορεί να πλοηγείται στα web sites που τον ενδιαφέρουν, να «κατεβάζει» τα e-mail του και να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε άλλη υπηρεσία του Internet ακόμη και στη διάρκεια ενός ταξιδιού από τη μία άκρη μιας χώρας στην άλλη, χωρίς καμία σχεδόν διακοπή της σύνδεσης.

Όμως τόσο το GPRS όσο και το 3G διαθέτουν ένα σημαντικό μειονέκτημα, που κράτησε μειωμένη τη συνδρομητική βάση: τις υψηλές χρεώσεις. Παρόλο που ο χρήστης είναι σε συνεχή σύνδεση με το Internet, χωρίς να υφίσταται χρονοχρέωση, η κοστολόγηση της πρόσβασης γίνεται σύμφωνα με τον όγκο των διακινούμενων δεδομένων. Ενδεικτικά στη χώρα μας, 1 MB δεδομένων που στέλνει ή λαμβάνει ο συνδρομητής GPRS/3G φθάνει να κοστολογείται μέχρι και 5 ευρώ, κάτι που καθιστά απαγορευτική τη χρήση της υπηρεσίας ακόμη και για πλοήγηση σε web sites λίγα λεπτά καθημερινά. [1]

1.1.2 Νόμοι - Χαρακτηριστικά Ασύρματων Τεχνολογιών

Ας μιλήσουμε όμως λίγο για τις ασύρματες τεχνολογίες, εν γένει, τα χαρακτηριστικά τους και τους νόμους που τις διέπουν.

Γενικά, οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες διέπονται από τέσσερις νόμους. [2]

- Ο νόμος του Shannon.

Ο νόμος του Shannon περιγράφεται από την εξής σχέση:

$$C=W*\log_2\left(1+\frac{P}{NoW}\right),$$

όπου C είναι η χωρητικότητα του τηλεπικοινωνιακού συστήματος σε bits/second, P είναι η ισχύς του σήματος σε Watt, W είναι το εύρος ζώνης του σήματος σε Hertz και No είναι η μονόπλευρη πυκνότητα φάσματος θορύβου.

Ο παραπάνω νόμος λέει ότι αν υπάρχει ένας πομπός και ένας δέκτης, η χωρητικότητα ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος εξαρτάται γραμμικά από το διαθέσιμο εύρος ζώνης και λογαριθμικά από το σηματοθορυβικό λόγο (signal-to-noise ratio, SNR).

- Ο νόμος του Moore.

Ο παραπάνω νόμος υπογραμμίζει πως η επίδοση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων διπλασιάζεται κάθε 18 μήνες.

- Ο 3^{ος} νόμος δηλώνει πως η αξία ενός δικτύου είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας της σύνδεσης.

- Ο 4^{ος} νόμος λέει ότι η αξία ενός δικτύου είναι ανάλογη του τετραγώνου του αριθμού των συσκευών οι οποίες μπορούν να συνδεθούν σε αυτό.

Με βάση τους παραπάνω νόμους λειτουργούν τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και προσπαθούν να καλύψουν τις αυξημένες ανάγκες των συνδρομητών και της βιομηχανίας.

Ποιες είναι αυτές οι ανάγκες όμως;

Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, πρέπει να είναι τα εξής:

- Ικανότητα να μεταφέρουν φωνή, ήχο και βίντεο, όπως επίσης και δεδομένα.
- Δυνατότητα λειτουργίας συσκευών με διαφορετική τιμή, κατανάλωση ισχύος και ρυθμό δεδομένων.
- Διάθεση φάσματος ικανοποιητικά και δυναμικά στις διάφορες συσκευές δικτύου.

Ιστορικά, όπως και στα ενσύρματα μέσα, η ανάπτυξη της ασύρματης τεχνολογίας προχωρούσε σε 2 μονοπάτια-τα δίκτυα φωνής και τα δίκτυα δεδομένων. Τα δίκτυα προσανατολισμένα στη μετάδοση φωνής αναπτύχθηκαν πρώτα και ο λόγος ήταν καθαρά εμπορικός, καθώς η αγορά για προϊόντα προσανατολισμένα σε φωνή και τέτοιες υπηρεσίες αναπτύχθηκαν πιο γρήγορα.

Παρ' όλ' αυτά, σήμερα υπάρχουν δύο σημαντικές μακροχρόνιες τάσεις της αγοράς. Πρώτον, η αγορά για προϊόντα και υπηρεσίες δεδομένων μεγαλώνει αντιληπτά πιο γρήγορα από την αγορά για προϊόντα και υπηρεσίες φωνής. Δεύτερον, και οι 2 προαναφερθείσες αγορές αναπτύσσονται και εξελίσσονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα δίκτυα προσανατολισμένα σε φωνή να έχουν αυξημένες δυνατότητες δεδομένων και τα μοντέρνα δίκτυα για δεδομένα να μπορούν άνετα να μεταφέρουν φωνή. Λογικό επακόλουθο είναι οι εταιρείες που αναλαμβάνουν την έρευνα και την ανάπτυξη των εν λόγω δικτύων να βρίσκονται σε συνεχώς αυξανόμενο ανταγωνισμό, τους καρπούς του οποίου απολαμβάνει ο τελικός χρήστης.

Όλα τα παραπάνω μας καταδεικνύουν το συμπέρασμα ότι η ιδανική ασύρματη τεχνολογία θα πρέπει να μεταφέρει φωνή, ήχο, (κινούμενη) εικόνα, καθώς και δεδομένα με την ίδια επιτυχία και ποιότητα. Το λεγόμενο, λοιπόν, triple play είναι το ζητούμενο στις μέρες μας και κάθε εταιρεία που αναπτύσσει ασύρματες τεχνολογίες προσέχει καταρχάς, τα προϊόντα της να ικανοποιούν την παραπάνω συνθήκη.

Κάτι τέτοιο, βέβαια, δεν είναι κάτι το εύκολο, για τους παρακάτω λόγους. Η φωνή, ο ήχος και το βίντεο έχουν διαφορετικές απαιτήσεις από τα δεδομένα. Για τα δεδομένα, λοιπόν, η πιο σημαντική παράμετρος είναι ο ρυθμός μετάδοσης (throughput), ενώ η καθυστέρηση δεν είναι και τόσο σημαντική. Για τη φωνή και το βίντεο, απαιτείται κάποιος ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης, αλλά η καθυστέρηση του σήματος είναι επίσης σημαντική. Σε αυτόν τον τομέα γίνεται η μεγαλύτερη προσπάθεια και αξίζει να σημειωθεί πως όλα τα ασύρματα standards από την ομάδα του IEEE 802 κινούνται προς αυτήν την κατεύθυνση.

Η δυνατότητα του ασύρματου δικτύου να υποστηρίζει πολλές διαφορετικές (σε τιμή, κατανάλωση ισχύος και ρυθμό μετάδοσης), όπως και η δυναμική εκχώρηση φάσματος είναι οι απαιτήσεις που προβληματίζουν παγκόσμια τις εταιρείες, όπως και την IEEE. Επειδή είναι δύσκολο να βγούνε πολλές εταιρικές συσκευές εκτός παιχνιδιού και καθώς ένα standard (802.11TM ή 802.16TM) πιθανό να μη λύνει όλα τα προβλήματα του λόγου για τον οποίον δημιουργήθηκαν, το κάθε πρωτόκολλο υποστηρίζει διαφορετικές συχνότητες, διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης και όλες σχεδόν τις συσκευές που ικανοποιούν τις minimum απαιτήσεις του πρωτοκόλλου. Βλέπουμε, παραδείγματος χάριν, στο πρωτόκολλο 802.11TM, το 802.11bTM να υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων 1, 2, 5.5 και 11 Mb/s, το 802.11aTM 6 έως 54 Mb/s και συσκευές με ρυθμούς 6 Mb/s να κοστίζουν το ίδιο με συσκευές των 54 Mb/s.

Η ικανότητα του δικτύου να εκχωρεί δυναμικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι απαραίτητη, καθώς το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι περιορισμένο και μοιράζεται και σε άλλες ασύρματες συσκευές. Όσο αυξανόταν ο αριθμός των διαφορετικών τεχνολογιών, τόσο η ευελιξία εκχώρησης φάσματος γινόταν σημαντικότερος παράγοντας σε ένα ασύρματο δίκτυο. Τα τελευταία, βέβαια, πρωτόκολλα έχουν χαρακτηριστικά για τον έλεγχο κάθε συχνότητας και κατά το πόσο αυτή ανήκει στο δεδομένο φάσμα ή ελέγχεται από άλλη συσκευή.

Από τα παραπάνω, γίνεται ξεκάθαρο ότι οι υπάρχουσες τεχνολογίες έχουν έλλειψη από πολλά χαρακτηριστικά του ιδανικού μοντέλου ασύρματης τεχνολογίας. Καθώς γίνεται η σύμβαση ότι μια τέτοια ιδανική τεχνολογία δεν υπάρχει, έχουμε οδηγηθεί σε 3 κύριες διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες.

- Τα ασύρματα δίκτυα τοπικής περιοχής (wireless local area networks, WLAN).
- Τα ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής (wireless personal area networks, WPAN).
- Τα ασύρματα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής (wireless metropolitan area networks, WMAN), επίσης γνωστά και ως δίκτυα ευρείας ζώνης ασύρματης πρόσβασης (broadband wireless access networks).

Με τα τελευταία θα ασχοληθούμε και αναλυτικά παρακάτω.

Πριν προχωρήσουμε στα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα, θα γίνει μια αναφορά στην IEEE και πιο συγκεκριμένα μια σύντομη αναδρομή στα πρωτόκολλα του Working Group 802 της IEEE.

1.2 IEEE Working Group Standardization Bodies

Η ανάπτυξη των μεγάλων αγορών για τις υπηρεσίες ασυρμάτων υπηρεσιών δεν εξαρτώνται μόνο στη διαθεσιμότητα του επαρκούς φάσματος στο συγκεκριμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων, αλλά επίσης και στη διαθεσιμότητα των πρωτοκόλλων (standards) που υπάρχουν. Ο κύριος λόγος γιατί οι μεγάλες αγορές δεν είναι εφικτές χωρίς τα πρωτόκολλα, είναι επειδή οι μεγάλοι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών θέλουν να έχουν την επιλογή της αγοράς εξοπλισμού από πολλαπλούς προμηθευτές και όχι από μία μόνο εταιρεία.

Με την απουσία των πρωτοκόλλων, οι μεγάλοι πάροχοι υπηρεσιών απλά απέχουν από τη χρήση της υπάρχουσας τεχνολογίας. Η ύπαρξη των πρωτοκόλλων επίσης βοηθάει τις μικρές επιχειρήσεις της τεχνολογίας να εισέλθουν στην αγορά της στις μεγάλες αγορές, μειώνοντας τα ρίσκα που συνδέονται με την προμήθεια προϊόντων όπως τα chipsets ημιαγωγών, λογισμικό, firmware κτλ.

Τα πρωτόκολλα φαίνονται σαν εθελοντικές συμφωνίες μεταξύ εταιρειών ημιαγωγών και τεχνολογίας, κατασκευαστών εξοπλισμού και παρόχων υπηρεσιών. Μέχρι και αρκετά χρόνια πριν, δεν υπήρχε κανένα πρωτόκολλο για ασύρματες επικοινωνίες δεδομένων. Η ολική αγορά ήταν μικρή, κατακερματισμένη και κυριαρχούμενη από αρκετές ιδιοκτησιακές τεχνολογίες. Η δραματική αύξηση της αγοράς είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της ανάγκης αρκετών πρωτοκόλλων, όπως τα IEEE 802.11a™, 802.11b™ και 802.11g™. Τα πρωτόκολλα επιτρέπουν εξοπλισμό από διαφορετικές εταιρείες να συνεργάζονται σε ένα δίκτυο. Τα πρωτόκολλα δημιουργούν μαζικές αγορές για εξοπλισμό, ο οποίος δημιουργεί οικονομία κλιμάκωσης για τους κατασκευαστές. Η οικονομική συνέπεια των πρωτοκόλλων είναι ακόμα πιο σημαντική από την απελευθέρωση της αγοράς. Η αγορά για προϊόντα τυποποιημένα κατά ένα πρωτόκολλο χαρακτηρίζεται από σημαντικό ανταγωνισμό, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες τιμές. Για να υπερκεράσουν αυτήν την τάση, πολλές εταιρείες ψάχνουν για τρόπους ώστε να διαφοροποιηθούν μέσα στην αγορά, αλλά παράλληλα να προσφέρουν τα τυποποιημένα κατά το πρωτόκολλο προϊόντα. Γενικά, τα πρωτόκολλα δίχως άλλο, προωθούν τη δημιουργικότητα, την καινοτομία και την επιχειρηματικότητα.

Επειδή τα πρωτόκολλα ευνοούν τις μαζικές αγορές, η πνευματική ιδιοκτησία που απαιτείται για τη δημιουργία ενός πρωτοκόλλου αξιολογείται πολύ ψηλά. Άλλωστε, αρκετές από τις πιο υψηλές πατέντες για πνευματική ιδιοκτησία στον κόσμο είναι αυτές που καλύπτουν ένα τέτοιο πρωτόκολλο ή μέρος του. Έτσι, η πολιτική πνευματικής ιδιοκτησίας κατά τη δημιουργία ενός πρωτοκόλλου είναι πολύ σημαντική.

Οι ανοιχτοί οργανισμοί, όπως οι οργανισμοί που αναπτύσσουν πρωτόκολλα, σχηματίζονται για να αναπτύξουν τα πρωτόκολλα, έτσι ώστε να μην ευνοούν καμία εταιρεία, αλλά έχουν ως σκοπό να ωφελήσουν το κοινό καλό. Η IEEE είναι ένα ανοιχτό σώμα ανάπτυξης πρωτοκόλλων. Πριν ένα IEEE πρωτόκολλο υιοθετηθεί, ζητείται από εταιρείες που είναι γνωστό ότι διαθέτουν απαραίτητες πατέντες γι' αυτό μια επιβεβαίωση ότι η εν λόγω εταιρεία είτε δε θα ενδυναμώσει κάποια από τις τωρινές είτε τις μελλοντικές πατέντες τις (ή μέρος τους) εμποδίζοντας κάποια άλλη εταιρεία, είτε ότι θα διαθέσει άδειες με αποζημίωση ή σε λογικές τιμές σε διάφανη βάση. Δεν υπάρχει εγγύηση από την IEEE ότι ένα πρωτόκολλο δεν παραβιάζει την πνευματική περιουσία τρίτων, ακόμη και αν οι τρίτοι αυτοί δε θέλουν να μοιραστούν

τα πνευματικά δικαιώματα. Τώρα, πως ακριβώς οριοθετούνται οι όροι “λογικός” και “διαφανής” είναι θέμα μόνο ενός δικαστηρίου.

Ειδικότερα στην IEEE, τα πρωτόκολλα για τις επικοινωνίες δεδομένων αναπτύσσονται από την κοινότητα IEEE 802, που αποκαλείται επίσης και Επιτροπή Πρωτοκόλλων Τοπικών και Μητροπολιτικών Δικτύων (Local and Metropolitan Area Networks Standards Committee – LMSC) και χορηγείται από την IEEE Computer Society. Η IEEE 802 έχει την ευθύνη της ανάπτυξης και συντήρησης παγκοσμίων πρωτοκόλλων και προτεινόμενων πρακτικών για επικοινωνίες υπολογιστών. Μερικά από τα επιτυχημένα πρωτόκολλα της IEEE 802 είναι:

- IEEE 802.3™ ή Ethernet standard
- IEEE 802.5™ ή Token Ring standard
- IEEE 802.11™ ή Wi-Fi standard.

Όλα τα παραπάνω έχουν υιοθετηθεί από την ISO/IEC Joint Technical Committee 1 (JTC1) ως International Standards.

Αν και η IEEE έχει την έδρα της στις Η.Π.Α., υπάρχει τεράστια παγκόσμια αναγνώριση και στήριξη, ειδικά στις διάφορες συνεδριάσεις που οργανώνει και πολλά πρωτόκολλα που εισάγονται από την IEEE αναγνωρίζονται ως παγκόσμια standards. Η κοινότητα IEEE 802 αποτελείται από πολλές ομάδες εργασίας, που οργανώνονται γύρω από σημαντικές εφαρμογές. Τα πρωτόκολλα της IEEE 802 σχετίζονται με το φυσικό στρώμα και το στρώμα διασύνδεσης δεδομένων, όπως αυτά ορίζονται στο ISO open systems interconnections (OSI) reference model. Τα πρωτόκολλα της IEEE 802 χωρίζει το στρώμα σύνδεσης δεδομένων σε 2 υποστρώματα, το logical link control (LLC) και το medium access control (MAC). Το LLC εισήχθη στο 802.2™ και είναι κοινό για όλα τα 802 MACs.

Στη δεκαετία του '90 δραστηριοποιήθηκε η ομάδα εργασίας του 802.11™ με εντυπωσιακά αποτελέσματα, καθώς ήταν το πρώτο πρωτόκολλο με τόσο μεγάλη απήχηση στον κόσμο και φυσικά την αγορά της ασύρματης τεχνολογίας. Η τεχνολογία, όμως, δε μένει στάσιμη και εφόσον το εμπορικό ενδιαφέρον ήταν μεγαλύτερο από ποτέ άλλοτε σχετικά με τις ασύρματες τεχνολογίες, το 1999 2 ακόμα ομάδες εργασίες δημιουργήθηκαν.

Η IEEE 802.15™ που δραστηριοποιήθηκε στα ασύρματα προσωπικά δίκτυα και

Η IEEE 802.16™ που δραστηριοποιήθηκε στα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα και στη λεγόμενη ασύρματη κάλυψη ευρείας ζώνης.

Η συμμετοχή στις ομάδες αυτές είναι ανοιχτή σε όποιον θέλει να συμμετάσχει με οποιονδήποτε ωφέλιμο τρόπο. Δεν επιτρέπεται σε εταιρείες να συμμετέχουν. Μόνο μεμονωμένα πρόσωπα δύνανται να ψηφίσουν και να αποφασίσουν. Οι τελευταίοι προέρχονται συνήθως από τις ΗΠΑ, τον Καναδά, την Ευρώπη, την Ιαπωνία και την Αυστραλία. Τα πρωτόκολλα που προκύπτουν από τη μελέτη της ομάδας εργασίας πρώτα γίνονται πρωτόκολλα της IEEE και έπειτα προτείνονται στην επιτροπή της ISO/IEC για αναγνώριση ως παγκόσμιου πρωτοκόλλου. Η εμπορική επιτυχία των 802.11™ και 802.15™, όπως και οι εργασίες για το 802.16 έχουν αναδείξει την IEEE το πλέον αναγνωρίσιμο σώμα δημιουργίας ασύρματων πρωτοκόλλων.

Το ότι ένα παγκόσμιο πρωτόκολλο υπάρχει, δε σημαίνει απαραίτητα και ότι θα επιτύχει στην αγορά της τεχνολογίας. Η επιτυχία αυτή εξαρτάται όχι μόνο από την ποιότητα τα τεχνολογίας, αλλά επίσης και από εταιρικούς και πολιτικούς λόγους. Έτσι, πρέπει να υπάρχει μια συγκεκριμένη συμπόρευση μεταξύ των ενδιαφερομένων εταιρειών και των αντίστοιχων πολιτικών θεμάτων ώστε να υπάρξει ευτυχής έκβαση. Στη βιομηχανία, η συμπόρευση αυτή είναι ευκολότερο να επιτευχθεί. Για να γίνει λοιπόν πραγματικότητα η επιτυχία του πρωτοκόλλου, οι εταιρείες δημιουργούν άλλες μορφές βιομηχανικών, αυτή τη φορά, οργανισμών για τα πρωτόκολλα. Τέτοιοι οργανισμοί συνδεδεμένοι με τα πρωτόκολλα 802.11™ και 802.16™ είναι οι Wi-Fi και WiMAX. Το εγχείρημα των οργανισμών αυτών περιλαμβάνει δοκιμές για να διαπιστωθεί η διαλειτουργικότητα (interoperability) ανάμεσα στα προϊόντα από διαφορετικές εταιρείες και την προώθηση των προϊόντων που είναι τυποποιημένα κατά το συγκεκριμένο πρωτόκολλο στην αγορά.

Πιο συγκεκριμένα, θα εξετάσουμε το 802.16™ Working Group της IEEE.

Η ομάδα εργασίας 802.16™ της IEEE είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη πρωτοκόλλων και την πρόταση πρακτικών πάνω στα δίκτυα ευρείας ζώνης ασύρματης πρόσβασης. Η ομάδα αυτή δημιουργήθηκε το Μάρτιο του 1999 και έχει αναπτύξει αρκετές εργασίες:

a) Air Interface (including a MAC and a PHY) for operation between 10 and 66 GHz.

b) IEEE 802.16™, an amendment specifying additional physical layers and appropriate MAC modifications for operation between 2 and 11 GHz, including licensed and unlicensed bands.

c) IEEE Std 802.16.2™ and 802.16.2a™, which provide a recommended practice for coexistence.

d) IEEE 802.16e™, being developed at present to support mobile subscribers.

In addition, IEEE 802.16™ has developed interoperability documentation, which is normally done outside of IEEE 802 standards.

Πιο συγκροτημένα, τα projects της IEEE είναι τα εξής:

Number	Description
802.16	Fixed Broadband wireless systems between 10 and 66 GHz
802.16a	Amendment for operation between 2 and 11 GHz
802.16c	Enhancement including system profiles between 10 and 66 GHz
802.16.2	Coexistence between 10 and 66 GHz
802.16/Conf01 802.16/Conf02 802.16/Conf03	Test and conformance specifications
802.16d	System profiles
802.16e	Enhancement to support mobility

1.3 Εισαγωγή στην Ασύρματη Πρόσβαση Ευρείας Ζώνης

Τα τελευταία χρόνια, η περιοχή των επικοινωνιών δεδομένων ευρείας ζώνης υπέστη πολύ μεγάλη ανάπτυξη. Ο όρος “ευρείας ζώνης” χρησιμοποιείται συνήθως για να καταδείξει τη δυνατότητα μεταφοράς σημαντικού εύρους ζώνης σε κάθε χρήστη, πολύ υψηλότερη από τα στενής ζώνης modem φωνής. Ακολουθώντας την ορολογία της ITU, ο όρος “ευρεία ζώνη” σημαίνει ρυθμοί μετάδοσης μεγαλύτεροι από 1.5 Mb/s. Η πρόσβαση στο internet ευρείας ζώνης έγινε μια βιομηχανία μαζικής αγοράς φτάνοντας περισσότερα από 100 εκατομμύρια σπίτια και 3 εκατομμύρια επιχειρήσεις στις ΗΠΑ. Η πρόσβαση ευρείας ζώνης φτάνει ένα ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό σε κάποιες άλλες εκβιομηχανοποιημένες χώρες, όπως η Κορέα και ο Καναδάς. Για ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, είναι γνωστό ότι οι κύριες τεχνολογίες για το internet ευρείας ζώνης είναι το DSL, η καλωδιακή, η ασύρματη και οι επικοινωνίες οπτικών ινών. Από αυτές τις 4 τεχνολογίες, οι 2 – το DSL και η καλωδιακή τεχνολογία- είναι ώριμες τεχνολογίες και έχουν φτάσει τη μαζική αγορά. Οι οπτικές επικοινωνίες παρέχουν πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, αλλά το κόστος της εγκατάστασης είναι εξαιρετικά υψηλό, πόσο μάλλον σε αστικές περιοχές όπου βρίσκονται οι περισσότεροι πελάτες. Λόγω του κόστους, δεν είναι ξεκάθαρο αν οι οπτικές επικοινωνίες θα μπορέσουν ποτέ να γίνουν μια τεχνολογία μαζικής αγοράς. Παρ’ όλ’ αυτά, αναμένεται ότι τα συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης θα γίνουν μία τεχνολογία η οποία γενικά είναι ανταγωνιστική στο DSL και την καλωδιακή, συνδέοντας τις οικίες των επιχειρήσεων και των χρηστών με τα κύρια δίκτυα.

Ξεκάθαρα πλέον, αν τα συστήματα πρόσβασης ευρείας ζώνης πρόκειται να ανταγωνιστούν το DSL και την καλωδιακή, η ανάπτυξη της αγοράς τους πρέπει να είναι το λιγότερο σημαντική. Πρώτα, σε μακρύ χρόνο τα συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης είναι ικανά να μεταφέρουν σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς από το DSL ή το καλώδιο. Η τεχνολογία του DSL απαιτεί από τους πελάτες να είναι κοντά στα κεντρικά γραφεία της τηλεφωνικής εταιρείας και μπορεί να μεταφέρει μέχρι 6 Mb/s σε αποστάσεις περί των 18.000 ποδών. Προς το παρόν, οι περισσότεροι κάτοχοι γραμμής DSL έχουν πολύ μικρότερες ταχύτητες. Οι πελάτες που βρίσκονται πάνω από 18.000 πόδια μακριά από το κεντρικό γραφείο της τηλεφωνικής εταιρείας δεν μπορούν να έχουν την υπηρεσία DSL. Παρόμοια κατάσταση επικρατεί και με την καλωδιακή τεχνολογία, όπου η αντίστοιχη υπηρεσία ευρείας ζώνης μεταφέρει 1.5 Mb/s, αλλά απαιτεί καλώδιο τηλεόρασης. Αν και οι περισσότερες εταιρείες και οι περισσότεροι κάτοικοι στη Βόρεια Αμερική έχουν πρόσβαση είτε στην τεχνολογία DSL είτε στην καλωδιακή, αρκετοί δεν έχουν. Αυτοί οι χρήστες αποτελούν μια σημαντική υποψήφια αγορά για την πρόσβαση ευρείας ζώνης. Επίσης, συγκρινόμενη με τα δίκτυα DSL και καλωδίου, η χρήση των ασύρματων τεχνικών έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο πλεονεκτημάτων για τους χρήστες και τους παρόχους των υπηρεσιών. Για τους παρόχους υπηρεσιών, αυτά τα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβάνουν σχετικά χαμηλού κόστους εξοπλισμό. Για τους χρήστες, τα οφέλη περιλαμβάνουν την ευκολία μιας ασύρματης σύνδεσης.

Ποια είναι όμως η αρχιτεκτονική των δικτύων ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης; Σταθερά συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης τυπικά περιλαμβάνουν τουλάχιστον έναν σταθμό βάσης (Base Station, BS) και έναν αριθμό σταθμών υπηρεσίας (subscriber stations, SS). Επίσης, πιθανόν να υπάρχουν ζεύξεις μεταξύ των σταθμών βάσης, επαναλήπτες και πιθανόν άλλος εξοπλισμός. Οι σταθμοί βάσης παρέχουν συνδέσεις στα κύρια δίκτυα (core networks) από τη μία πλευρά και

ραδιοσύνδεση με τους σταθμούς υπηρεσίας από την άλλη. Μια αναφορά στα παραπάνω φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Τα σταθερά συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης έχουν αρχιτεκτονικές πολλαπλών σημείων (multipoint architectures). Ο όρος multipoint περιλαμβάνει point-to-multipoint (PMP) και multipoint-to-multipoint (MP-MP). Τα συστήματα PMP περιλαμβάνουν σταθμούς βάσης, σταθμούς υπηρεσίας και σε μερικές περιπτώσεις, επαναλήπτες. Στο uplink, δηλαδή κατά την αποστολή σήματος από το τερματικό στο σταθμό βάσης, ο αποστολέας είναι ο σταθμός υπηρεσίας και ο παραλήπτης είναι ο σταθμός βάσης. Στο downlink, αντίστοιχα, ο αποστολέας είναι ο σταθμός βάσης και ο παραλήπτης ο σταθμός υπηρεσίας. Σημειώνουμε ότι μια διαφορά σε σύγκριση με τα WLAN και τα WPAN είναι ότι χρησιμοποιούνται κεραίες με ποικιλία διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Οι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν κεραίες σχετικά μεγάλης δέσμης, χωρισμένη σε έναν ή περισσότερους τομείς, παρέχοντας κάλυψη 360° με μία ή περισσότερες κεραίες. Η κεραία (μία από όλες) του σταθμού βάσης είναι ικανή να χειρίζεται πολλαπλούς ανεξάρτητους τομείς ταυτόχρονα. Σε ένα κανάλι δεδομένης συχνότητας και δοσμένου τομέα κεραίας, όλοι οι σταθμοί λαμβάνουν την ίδια εκπομπή. Για να επιτευχθεί πλήρης κάλυψη μιας περιοχής, μπορεί να χρειαστούν περισσότεροι του ενός σταθμοί βάσης. Η σύνδεση μεταξύ των σταθμών βάσης δεν είναι μέρος του σταθερού συστήματος ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης. Η σύνδεση επιτυγχάνεται από τη χρήση των ραδιοζεύξεων, καλωδίων οπτικών ινών ή αντίστοιχων μέσων. Οι ζεύξεις μεταξύ των σταθμών βάσης μπορεί μερικές φορές να χρησιμοποιούν κομμάτι από την ίδια ανάθεση συχνότητας όπως τα σταθερά συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης.

Η δρομολόγηση στον κατάλληλο σταθμό βάσης είναι μια συνάρτηση του κύριου δικτύου. Γενικά, οι σταθμοί υπηρεσίας χρησιμοποιούν πολύ κατευθυντικές κεραίες προς το σταθμό βάσης. Οι σταθμοί υπηρεσίας μοιράζονται τη χρήση του ραδιοκαναλιού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλες μεθόδους πρόσβασης, όπως διαμοιρασμός συχνότητας, διαμοιρασμός χρόνου ή διαμοιρασμός κώδικα. Μερικά συστήματα χρειάζονται και επαναλήπτες. Σε ένα PMP σύστημα, οι επαναλήπτες γενικά χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την κάλυψη σε τοποθεσίες όπου οι σταθμοί βάσης δεν έχουν οπτική επαφή στις περιοχές τοπικής κάλυψης, ή, εναλλακτικά να επεκτείνουν την κάλυψη ενός συγκεκριμένου σταθμού βάσης πέρα από τη συνηθισμένη ακτίνα εκπομπής του. Ο επαναλήπτης μεταφέρει την πληροφορία από ένα σταθμό βάσης σε έναν ή πολλούς σταθμούς υπηρεσίας. Μπορεί να λειτουργεί στις ίδιες συχνότητες downlink, όπως αυτές που χρησιμοποιεί, κοιτώντας το σταθμό βάσης, ή μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικές συχνότητες (π.χ. αποδιαμόρφωση και διαμόρφωση της κυκλοφορίας στα διαφορετικά κανάλια). MP-MP ή mesh συστήματα έχουν την ίδια λειτουργικότητα, όπως τα PMP συστήματα. Στα MP-MP συστήματα, η κυκλοφορία μπορεί να περάσει μέσω ενός ή πολλών επαναληπτών ώστε να φτάσει στο σταθμό υπηρεσίας. Οι περισσότεροι σταθμοί είναι επαναλήπτες που επίσης παρέχουν συνδέσεις για τοπικούς πελάτες. Οι κεραίες είναι συνήθως κατευθυντικές, τύπου στενής δέσμης με τρόπους για απομακρυσμένη χρήση.

Αυτά τα δίκτυα λειτουργούν με διαφάνεια, έτσι οι χρήστες δε γνωρίζουν ότι οι υπηρεσίες παρέχονται από ράδιο. Ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης παρέχει σύνδεση σε πολλές κατοικίες χρηστών μέσα σε μια ραδιοκαλυπτόμενη περιοχή. Παρέχει μία ποσότητα εύρους ζώνης, η οποία μοιράζεται αυτόματα σε όλους τους χρήστες. Η ζήτηση από διαφορετικούς χρήστες είναι συχνά στατιστικά μικρής

συσχέτισης, επιτρέποντας το δίκτυο να μεταφέρει σημαντικό εύρος ζώνης-σε-ζήτηση (bandwidth-on-demand) σε πολλούς χρήστες με ένα υψηλό επίπεδο διαθεσιμότητας φάσματος. Γίνεται επίσης σημαντική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας. Το εύρος των εφαρμογών είναι πολύ ευρύ και εξελίσσεται γρήγορα. Περιλαμβάνει φωνή, δεδομένα και υπηρεσίες ψυχαγωγίας κάθε είδους. Ο κάθε πελάτης μπορεί να απαιτεί μια διαφορετική ποικιλία από υπηρεσίες. Αυτή η ποικιλία πιθανόν να αλλάζει γρήγορα καθώς οι συνδέσεις εγκαθίστανται ή τερματίζονται. Η ροή της κυκλοφορίας μπορεί να είναι μονοκατευθυντική, ασύμμετρη ή συμμετρική, αλλάζοντας ξανά με τον καιρό. Με μερικές περιοχές, τα συστήματα που μεταφέρουν αυτές τις υπηρεσίες αναφέρονται ως Ασύρματα Συστήματα Πολυμέσων (Multimedia Wireless Systems, MWS) ώστε να αναδεικνύουν την σύγκλιση μεταξύ των παραδοσιακών τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και των υπηρεσιών ψυχαγωγίας.

Σε ανταπόκριση αυτών των αναγκών της αγοράς, η ομάδα εργασίας 802.16™ της IEEE ιδρύθηκε το 1999. Το ενδιαφέρον της βιομηχανίας ήταν σημαντικό και το πρώτο πρωτόκολλο (IEEE Std 802.16-2001) εγκρίθηκε το Δεκέμβριο του 2001 και δημοσιεύθηκε τον Απρίλη του 2002.

1.4 Πρότυπο IEEE 802.16™

1.4.1 Γενικά



Το 2003 η IEEE υιοθέτησε το πρότυπο 802.16™ γνωστό και σαν WiMAX, 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. [3]

Το πρότυπο αυτό σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί σε μια ευρεία μπάνα συχνοτήτων η οποία εκτείνεται από 2 ως 66 GHz. Υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης ως και 72 Mbps στον αέρα ενώ η πραγματική ταχύτητα στο Ethernet 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 ρυθμούς μετάδοσης πολύ χαμηλότερους των 50 Mbps.

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 συχνοτήτες πάνω των 2 GHz όπου το πρότυπο χρησιμοποιεί.

Παραλλαγές του προτύπου, που στοχεύουν στους κινητούς χρήστες (802.16e™) και στην παροχή QoS (802.16b™) είναι ήδη σε εξέλιξη. Διάφοροι προμηθευτές chip, συμπεριλαμβανομένης και της Intel, εργάζονται στο 802.16a™ ενσωματωμένο πυρίτιο, και σε χαμηλού κόστους μονάδες συνδρομητών και αναμένεται στο τέλος του 2005 να είναι ευρέως διαθέσιμα σημεία πρόσβασης (Access Points - AP). Αρκετοί προμηθευτές που έχουν ασχοληθεί με εξοπλισμό για ευρείας ζώνης ασύρματη πρόσβαση, έχουν εκδηλώσει το ενδιαφέρον τους για το WiMAX και έτσι δραστηριοποιούνται στην κατασκευή προϊόντων συμβατών με το εν λόγω πρότυπο.

Λόγω των μεγάλων αποστάσεων που καλύπτει και ταυτόχρονα τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που μπορεί να παρέχει, το πρότυπο WiMAX βρίσκει πολλές εφαρμογές, λύνοντας σημαντικά προβλήματα που απασχολούσαν του τεχνικούς δικτύων σήμερα. Τρεις είναι οι βασικότερες χρήσεις του:

- **Δίκτυο κορμού στα κυψελωτά συστήματα κινητής τηλεφωνίας.** Η εισαγωγή του προτύπου αυτού 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.** Παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης κάνοντας εφικτή τη χρήση της τεχνολογίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου κάτι που με το πρότυπο IEEE 802.11™ σε μεγάλες αποστάσεις δεν ήταν εφικτό.

- **Παρέχει κάλυψη σε περιοχές που είναι αδύνατο τα 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.

Οι ταχύτητες μετάδοσης του προτύπου εξαρτώνται από την εκάστοτε ψηφιακή διαμόρφωση που χρησιμοποιείται. Συνήθεις διαμορφώσεις είναι η 64 QAM η οποία μπορεί να εξασφαλίσει και τη μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης, η 16 QAM και η QPSK η οποία μπορεί να εξασφαλίσει μεγάλη κάλυψη του συστήματος.

Το πρότυπο IEEE 802.16TM παρέχει 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 802.11TM 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 802.11TM δεν ήταν δυνατό. Δηλαδή χρήστες που βρισκόταν στην κάλυψη ενός Access Point (σημείου πρόσβασης) είχαν την ίδια ποιότητα υπηρεσίας.

Την **ασφαλή μετάδοση** των δεδομένων στο WiMAX αναλαμβάνει ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης DES (Data Encryption Standard, Πρότυπο Κωδικοποίησης Δεδομένων) και συγκεκριμένα μια παραλλαγή του αλγορίθμου ο Triple DES. Το DES αναπτύχθηκε το 1970 από το Αμερικανικό Εθνικό Γραφείο Προτύπων. Η βασική ιδέα ήταν η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου κρυπτογράφησης που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί (και να βελτιωθεί) από διάφορες εταιρείες ή οργανισμούς. Το DES ανήκει στην οικογένεια των συμμετρικών αλγορίθμων και κάνει χρήση κλειδιών με μήκος 56 bit. Ο "κλασικός" αλγόριθμος DES είναι πλέον ξεπερασμένος, αφού με τη χρήση ενός σύγχρονου υπολογιστή μπορεί να παραβιαστεί σχετικά εύκολα. Στο μεταξύ, εφαρμόζοντας διάφορες τεχνικές επάνω στο DES, μπορούμε να αυξήσουμε σημαντικά την ασφάλειά του. Με τη μέθοδο Triple - DES, για παράδειγμα, το μήνυμα κωδικοποιείται τρεις φορές, με τρία διαφορετικά κλειδιά.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην αρχική του έκδοση το πρότυπο IEEE 802.16TM λειτουργούσε στην ζώνη συχνοτήτων 10-66 GHz. Στις παραπάνω συχνότητες η επικοινωνία μεταξύ δύο σταθμών επιτυγχάνεται μόνο όταν οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται σε συνθήκες οπτικής επαφής. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο υποπρότυπο **IEEE 802.11cTM**. Η ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ σταθμών που δεν βρίσκονται σε οπτική επαφή ήταν το κίνητρο για τη δημιουργία του υποπροτύπου **IEEE 802.16aTM**. Τον Ιανουάριο του 2003 το πρότυπο επεκτάθηκε ώστε να λειτουργεί και στις συχνότητες από 2-11 GHz όπου στις συχνότητες αυτές ήταν δυνατή η δημιουργία συνδέσεων χωρίς οπτική επαφή πομπού - δέκτη. Το υποπρότυπο το οποίο περιγράφει τη διαδικασία αυτή ονομάστηκε IEEE 802.16aTM. Τα πρώτα προϊόντα WiMAX τα οποία σήμερα είναι διαθέσιμα στην αγορά ακολουθούν στην μεγαλύτερή τους πλειοψηφία το υποπρότυπο αυτό.

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 το υποπρότυπο **IEEE 802.16dTM**.

Η ένωση των υποπροτύπων IEEE 802.11TM a, c, d όρισε το πρότυπο **IEEE 802.16-2004TM** το οποίο περιγράφει τη συνολική λειτουργικότητα των επιμέρους υποπροτύπων που προαναφέρθηκαν για συχνότητες λειτουργίας 2-66 GHz.

Το πρότυπο IEEE 802.16-2004™ ορίζει την επικοινωνία χρηστών οι οποίοι βρίσκονται μέσα σε ένα κελί το οποίο καλύπτεται από ένα σταθμό βάσης . Όταν κάποιος χρήστης κινηθεί σε περιοχή που βρίσκεται εκτός περιοχής κάλυψης του σταθμού βάσης η σύνδεση χάνεται. Το υποπρότυπο IEEE 802.16e™ εισάγει και περιγράφει την έννοια της κινητικότητας των χρηστών από ένα σταθμό βάσης σε άλλο. Στο υποπρότυπο αυτό ορίζεται ότι ένας κινητός χρήστης μπορεί να συνεχίσει να εξυπηρετείται από το δίκτυο ακόμα και αν κινείται με ταχύτητες οι οποίες προσεγγίζουν τα 120 Km / h . Ωστόσο η παραπάνω τιμή είναι ενδεικτική - πειραματική, καθώς μέχρι τη στιγμή αυτή δεν υπάρχει κάποιο διαθέσιμο προϊόν στην αγορά συμβατό με το IEEE 802.16e™ υποπρότυπο που να πιστοποιεί την προαναφερθείσα τιμή.

1.4.2 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. [2]

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.

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.

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.

Η τρίτη ζώνη συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει είναι οι μη αδειοδοτούμενες ζώνες συχνοτήτων ανάμεσα στα 2 και τα 11 GHz. 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.

Παρακάτω θα ασχοληθούμε με το φυσικό στρώμα (PHY) και το στρώμα ελέγχου πρόσβασης του μέσου (MAC). Πριν από αυτό όμως, ας δούμε πως από το πρωτόκολλο 802.16™ της IEEE φτάσαμε στην ονομασία WiMAX, που έχει επικρατήσει.

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω, στις εταιρείες δεν επιτρέπεται να συμμετέχουν ενεργά στις ομάδες εργασίας της IEEE. Μπορούν, όμως, να ιδρύουν οργανισμούς οι οποίοι θα δοκιμάζουν τα πρωτόκολλα και θα εξετάζουν τη διαλειτουργικότητά τους. Καθώς, λοιπόν, οι ασύρματες επικοινωνίες είναι το πιο ενδιαφέρον τεχνολογικά κομμάτι των επικοινωνιών, δε φαντάζει περίεργο το να αναφέρουμε ότι μόλις παρουσιάστηκε και εγκρίθηκε το πρώτο μέρος του 802.16™, αμέσως ιδρύθηκε και ένας οργανισμός που θα το εξέταζε και θα προσπαθούσε να το εκμεταλλευτεί. Το όνομα αυτού: WiMAX ή καλύτερα WiMAX Forum, όπως ονομάζεται η ένωση των εταιρειών και γενικότερα των οργανισμών που εξετάζουν και παρακολουθούν στενά το WiMAX.

1.4.3 WiMAX: Μία εμπορική συμμαχία



Το WiMAX είναι απλώς ένα ακρώνυμο που σημαίνει Worldwide Interoperability for Microwave Access. Αυτό επρόκειτο για ένα βραχυπρόθεσμο όνομα, είχε όμως τόσο μεγάλη απήχηση που συντηρείται μέχρι σήμερα. Το WiMAX Forum είναι μια αφιλοκερδής οργάνωση (ή καλύτερα οργανισμός) που ασχολείται με τα προϊόντα που σχεδιάζονται για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα, βασισμένα στο 802.16™ της IEEE. Παρόμοια οργάνωση-συμμαχία υπήρξε και με το 802.11™ της IEEE, τη γνωστή Wi-Fi Alliance, που ασχολείται με τα προϊόντα βασισμένα στο 802.11™. Το WiMAX Forum ιδρύθηκε το 2001 από τη Nokia Corp., την Ensemble Communications και το Orthogonal Frequency Division Multiplexing Forum και προσπαθεί – όσο δυνατόν- να πετύχει τη συμβατότητα του πρωτοκόλλου

σε παγκόσμια βάση, κάτι που το 802.11™ απέτυχε να κάνει. Το 2003 η Intel Corp. μπήκε στο παιχνίδι του WiMAX Forum και πολλές ευρωπαϊκές εταιρείες ακολουθούν το παράδειγμά της. Τελευταία η ελληνική Intracom εισήλθε και αυτή στο forum και έγινε συνétairos στην προσπάθεια για ανάδειξη και προώθηση του πρωτοκόλλου.

Το WiMAX, λοιπόν, (θα αναφερόμαστε έτσι σε αυτό πλέον, ως ένα καθολικό και ενιαίο πρωτόκολλο και όχι το πρωτόκολλο της 802.16™ της IEEE) είναι μια τεχνολογία που βασίζεται στο πρωτόκολλο 802.16™ της IEEE και υπόσχεται ασύρματη πρόσβαση ευρείας ζώνης με μεγάλη αξιοπιστία σαν το αντίπαλο δέος στις τεχνολογίες των DSL και καλωδίου. Το WiMAX παρέχει σταθερή, νομαδική, φορητή και κινητή ασύρματη επικοινωνία χωρίς μάλιστα την ανάγκη για οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης. Σε μία ακτίνα ενός τυπικού κελιού από 3 ως 10 χιλιόμετρα, τα συστήματα που πιστοποιούνται από το WiMAX Forum αναμένεται να μεταφέρουν χωρητικότητα ως και 40 Mbps ανά κανάλι, στις σταθερές και τις φορητές εφαρμογές. [5]

1.4.4 Πλεονεκτήματα του WiMAX

Γιατί, όμως, το WiMAX έλαβε τόσο μεγάλο ενδιαφέρον από τις μεγαλύτερες εταιρείες του κόσμου μας; Προφανώς για την πληθώρα των εφαρμογών του, που όπως διαφημίζεται θα λύσουν πολλά προβλήματα (απόστασης κυρίως) και θα προσφέρουν υπηρεσίες άνευ προηγουμένου στους χρήστες.

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. Το WiMAX προσφέρει αφενός μεν υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης σε σχέση με το Wi-Fi, αφετέρου δε σημαντικά υψηλότερη εμβέλεια, που υπολογίζεται ότι θα μπορεί να καλύψει σε κάθε της σημείο ακόμη και μια μεγαλούπολη. [3]

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 οι πρώτες δοκιμές που έχουν γίνει σε χώρες του εξωτερικού, δείχνουν ότι θα το κατορθώσει.

Τι κάνει όμως το WiMAX τόσο ξεχωριστό ως τεχνολογία; Τα προτερήματά του είναι εν τρώχῳ, τα εξής: [4]

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.

Υψηλή ασφάλεια: Η τεχνολογία WiMAX υποστηρίζει το AES (Advanced Encryption Standard) και το 3DES (Triple DES, όπου DES είναι το Data Encryption Standard). Με την κρυπτογράφηση των συνδέσεων μεταξύ του σταθμού βάσης και του σταθμού υπηρεσίας, το WiMAX παρέχει στους χρήστες ιδιωτικότητα και ασφάλεια (ενάντια στους κρυφακούοντες) και ασφάλεια στο ασύρματο ευρυζωνικό μέσο αλληλεπίδρασης (interface). Η ασφάλεια επίσης παρέχει στους υπεύθυνους υψηλή προστασία εναντίον της κλοπής υπηρεσιών. Το WiMAX επίσης έχει ενσωματωμένη υποστήριξη VLAN, η οποία παρέχει υποστήριξη για δεδομένα που εκπέμπονται από διαφορετικούς χρήστες στον ίδιο σταθμό βάσης.

WiMAX QoS: Το WiMAX μπορεί δυναμικά να ρυθμιστεί για την μείξη της κυκλοφορίας που μεταφέρεται. Τέσσερις τύπου υπηρεσίας υποστηρίζονται: [4]

Τύπος Υπηρεσίας	Περιγραφή
Unsolicited Grant Service (UGS)	Το UGS σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων πραγματικού χρόνου που αποτελούνται από πακέτα δεδομένων σταθερού μήκους που στέλνονται ανά περιοδικά διαστήματα, όπως T1/E1 και Voice over IP.
Real-Time Polling Service (rtPS)	Το rtPS σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων πραγματικού χρόνου που αποτελούνται από πακέτα δεδομένων με μεταβλητό μήκος που στέλνονται ανά περιοδικά διαστήματα, όπως MPEG video.
Non-Real-Time Polling Service (nrtPS)	Το nrtPS σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων που επιδέχονται καθυστέρηση και αποτελούνται από πακέτα δεδομένων μεταβλητού μεγέθους για τα οποία απαιτείται ένας ελάχιστος ρυθμός δεδομένων, όπως FTP.
Best Effort (BE)	Η BE υπηρεσία σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές δεδομένων για τις οποίες δεν απαιτείται κανένα ελάχιστο επίπεδο υπηρεσίας και μπορούν να εξυπηρετηθούν σε μια βάση διαθέσιμου χώρου.

Γρήγορη εγκατάσταση-ανάπτυξη: Συγκρινόμενο με την εγκατάσταση των καλωδιωμένων λύσεων, το WiMAX απαιτεί μικρή ή καθόλου κατασκευή ή αναμόρφωση ήδη υπαρχόντων εγκαταστάσεων. Για παράδειγμα, δεν απαιτείται εκσκαφή για την υποστήριξη των υπαρχόντων 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.

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 παροχέας υπηρεσίας μπορεί να προσφέρει διαφορετικά SLAs σε διαφορετικούς εγγεγραμμένους χρήστες ή ακόμα σε διαφορετικούς χρήστες στον ίδιο σταθμό υπηρεσίας.

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, ταυτοποιείται, 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.

Κινητότητα: 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 υποστηρίξουν 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 κινητότητα 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.

Επηρεάζει το 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.

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, 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.

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.

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.

1.5 Εφαρμογές και Σενάρια Χρήσης της τεχνολογίας WiMAX

Ας δούμε αναλυτικά τι υπόσχεται το WiMAX Forum για τις επερχόμενες εφαρμογές του 802.16™. [4]

Το παρακάτω διάγραμμα είναι ο στόχος του WiMAX Forum.



1.5.1 Εφαρμογές του WiMAX

Η τεχνολογία WiMAX έχει αναπτυχθεί ώστε να απευθύνεται σε μια ευρεία ακτίνα εφαρμογών, όπως συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

Περιγραφή	Πραγματικού Χρόνου;	Τύπος Εφαρμογής	Εύρος Ζώνης
Interactive Gaming	Ναι	Interactive Gaming	50-85 kbps
VoIP, Video Conference	Ναι	VoIP Video Phone	4-64 kbps 32-384 kbps
Streaming Media	Ναι	Music/Speech Video Clips Movies Streaming	5-128 kbps 20-384 kbps >2 Mbps
Information Technology	Όχι	Instant Messaging Web Browsing Email (with attachments)	<250 byte messages >500 kbps >500 kbps
Media Content Download (Store and Forward)	Όχι	Bulk Data, Movie Download Peer-to-Peer	>1 Mbps >500 kbps

Βασισμένο στα τεχνικά του χαρακτηριστικά, το WiMAX είναι κατάλληλο να υποστηρίξει μία μεγάλη ποσότητα σεναρίων χρήσης. Μερικά από αυτά τα σενάρια, συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα, ο οποίος επιδεικνύει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του WiMAX, που είναι κρίσιμα για την επιτυχή λειτουργία των σεναρίων αυτών.

	Flexible Architecture	High Security	WiMAX QoS	Quick Deployment	Multi-Level Service	Interoperability	Portability	Mobility	Cost-Effective	Wider Coverage	NLOS	High Capacity
Cellular Backhaul				x					x			x
WSP Backhaul				x					x			x
Banking Networks	x	x	x						x		x	
Education Networks	x		x						x	x		
Public Safety	x	x	x	x			x	x			x	
Offshore Communications	x		x				x	x		x	x	
Campus Connectivity	x	x	x									x
Temporary Construction			x	x			x				x	
Theme Parks	x		x				x	x			x	
WSP Access Network		x	x		x	x			x		x	x
Rural Connectivity			x			x			x	x		
Military Battlefield	x	x		x			x	x				

Πολλά από τα παραπάνω σενάρια χρησιμοποίησης, αναλύονται παρακάτω.

1.5.2 Σενάρια χρήσης

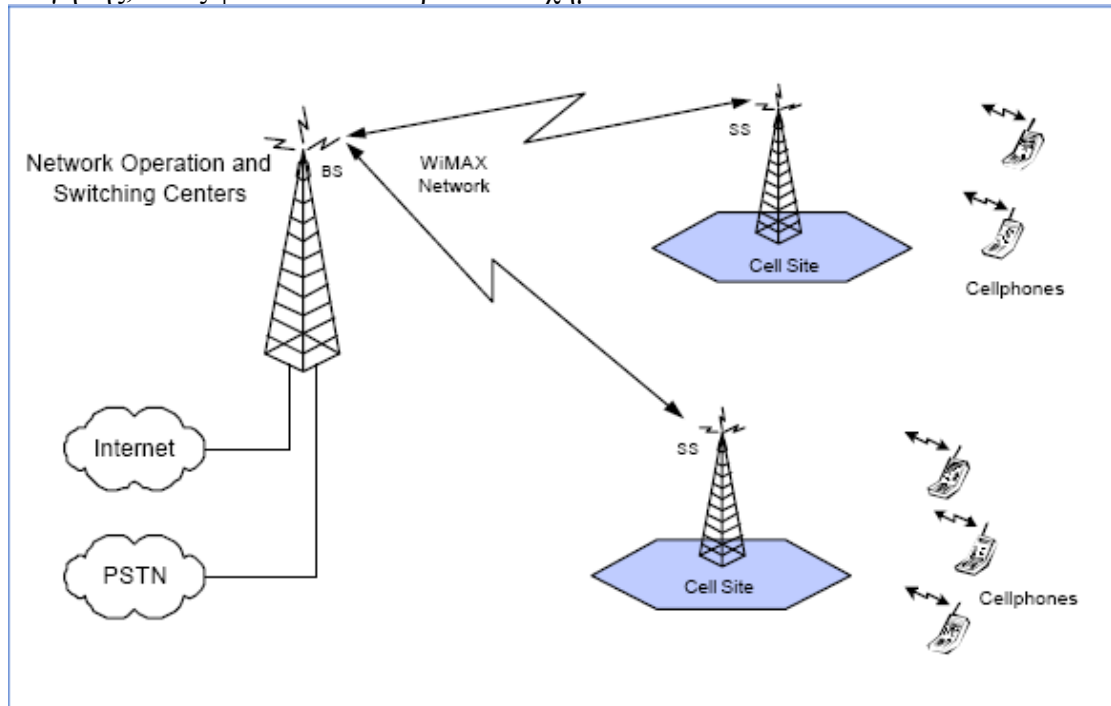
Η τεχνολογία WiMAX θα φέρει επανάσταση στον τρόπο που επικοινωνούμε. Θα παρέχει ολική ελευθερία στους ανθρώπους που είναι κινούνται αρκετά, επιτρέποντάς τους να παραμένουν συνδεδεμένοι με υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και βίντεο. Η τεχνολογία WiMAX θα επιτρέπει στους ανθρώπους να πηγαίνουν από το σπίτι στο αυτοκίνητό τους κι έπειτα στο γραφείο τους ή οπουδήποτε αλλού θέλουν, όλα αυτά χωρίς δέσμευση. Για να επιδείξουμε την ικανότητα του WiMAX να αντεπεξέλθει στις εφαρμογές που προηγήθηκαν, ακολουθούν αρκετά αντιπροσωπευτικά σενάρια χρήσης, χωρισμένα σε 2 κατηγορίες-ιδιωτικά και δημόσια δίκτυα.

1.5.2.1. Ιδιωτικά Δίκτυα

Τα ιδιωτικά δίκτυα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από έναν συγκεκριμένο οργανισμό, ίδρυμα ή επιχείρηση και προσφέρουν επικοινωνιακές ζεύξεις για την ασφαλή και αξιόπιστη μεταφορά φωνής, δεδομένων και βίντεο. Η γρήγορη και εύκολη εγκατάσταση είναι γενικά μια μεγάλη προτεραιότητα και οι ρυθμίσεις γίνονται συνήθως σε Point-to-Point και Point-to-Multipoint συνδέσεις.

1.5.2.1.1 Κυβελωτή Υποστήριξη

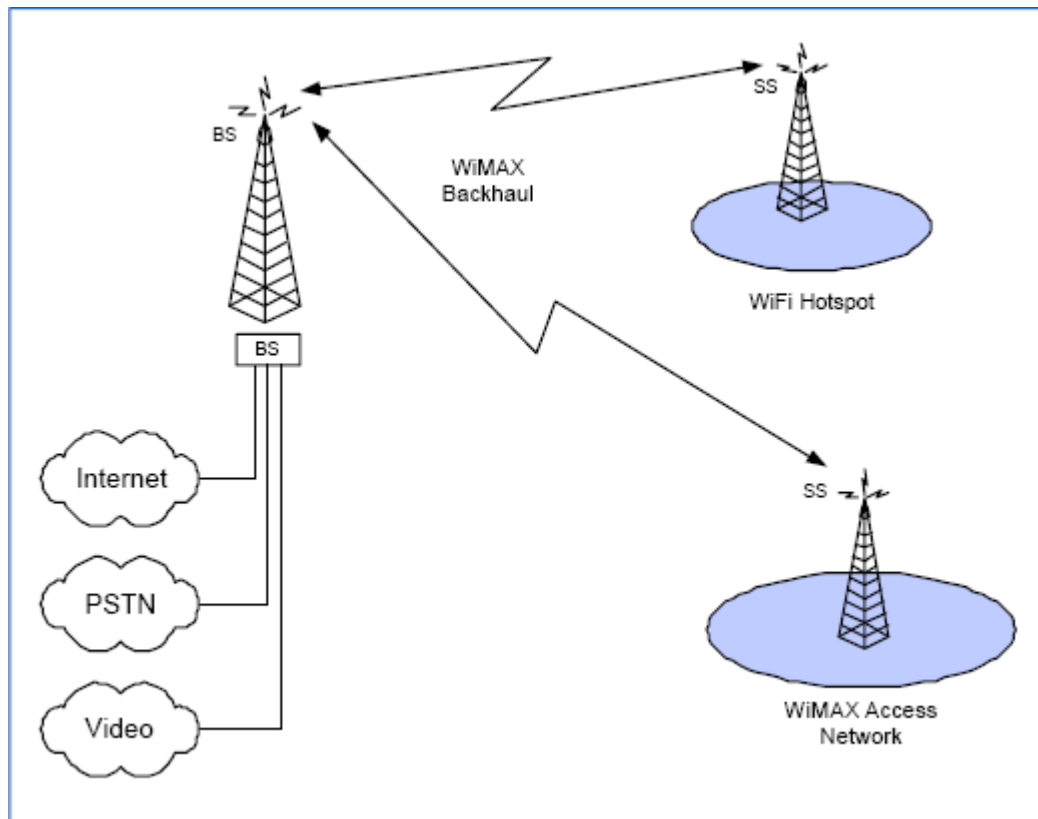
Η αγορά για κυβελωτές υπηρεσίες γίνεται ολοένα και πιο ανταγωνιστική. Για να κρατηθούν στη δουλειά, οι υπεύθυνοι των κυβελωτών συσκευών και υπηρεσιών, ψάχνουν συνεχώς τρόπους ώστε να μειώσουν τα λειτουργικά κόστη. Το κόστος των σταθμών εκπομπής και των επαναληπτών αποτελεί ένα σημαντικό μερίδιο των κοστών αυτών. Το WiMAX μπορεί να παρέχει ζεύξεις Point-to-Point μέχρι και 30 μίλια (50 χιλιόμετρα), με ρυθμούς δεδομένων που υποστηρίζουν πολλαπλά E1/T1. Για τα κυβελωτά δίκτυα, λοιπόν, το WiMAX είναι μια σωστή επιλογή για την υποστήριξη του σταθμού βάσης στη λειτουργία του δικτύου και τα κέντρα δρομολόγησης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σημείωση: Βασισμένη στη διαθεσιμότητα φάσματος του WiMAX στις διάφορες χώρες, η εφαρμογή της κυβελωτής εκπομπής μπορεί ή όχι να χειρίζεται δίκτυα που εκτείνονται σε ολόκληρη τη χώρα. Η κυβελωτή κυκλοφορία είναι ένα σύμπλεγμα από φωνή και δεδομένα, για τα οποία το ενσωματωμένο χαρακτηριστικό QoS του WiMAX είναι ίσως το πιο κατάλληλο. Η ενοικίαση συστημάτων κάλυψης και εκπομπής από τοπικές τηλεφωνικές εταιρείες μπορεί να είναι απαγορευτικές λόγω κόστους και η ανάπτυξη και υλοποίηση λύσης οπτικών ινών, η οποία είναι και χρονοβόρα και πολυέξοδη, μπορεί αρνητικά να επηρεάσει την υπηρεσία. Οι καλωδιωμένες λύσεις παροχής κυβελωτής κάλυψης είναι σπάνια αντάξιες του κόστους τους σε αστικές ή προαστιακές περιοχές και οι περισσότερες εκδοχές του DSL και της καλωδιακής τεχνολογίας δεν μπορούν να προσφέρουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης, ειδικά για backhauling των επερχόμενων 3G δικτύων.

1.5.2.1.2 Backhaul Παρόχου Ασύρματης Υπηρεσίας

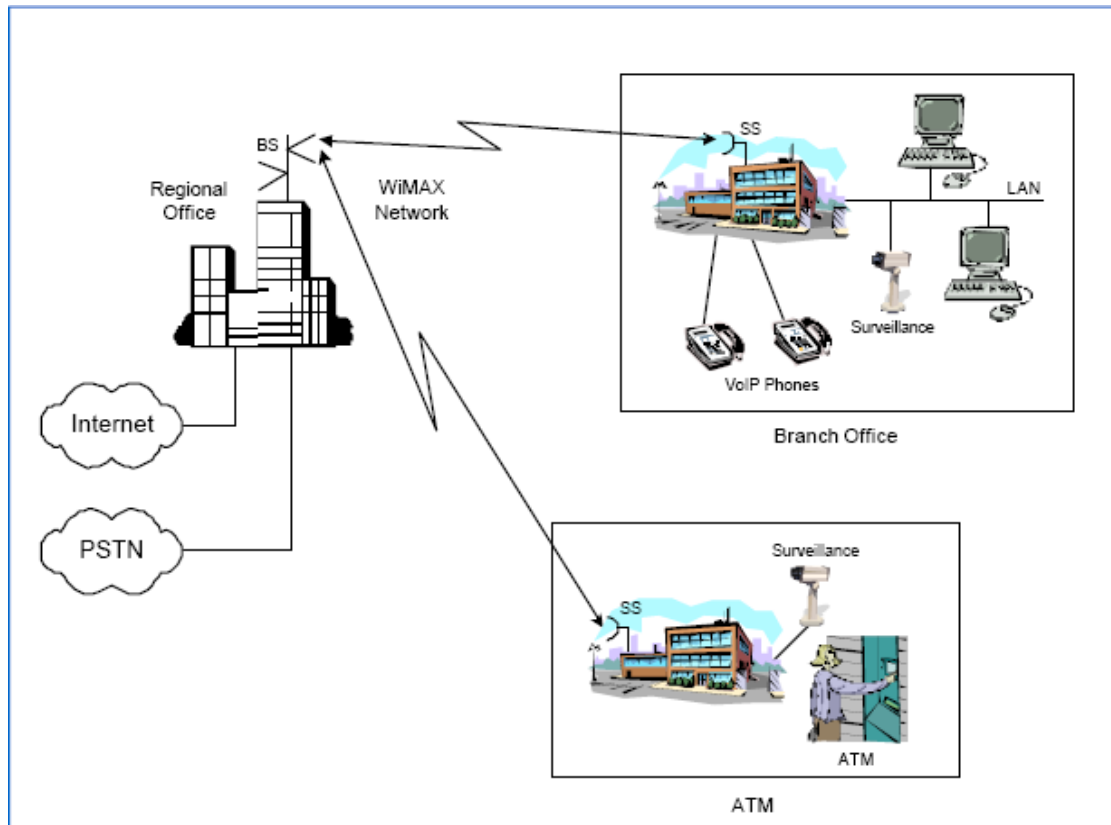
Οι πάροχοι ασύρματης υπηρεσίας χρησιμοποιούν εξοπλισμό WiMAX ώστε να μεταβιβάζουν την κυκλοφορία από τους σταθμούς βάσης στα δίκτυα πρόσβασης τους, όπως φαίνεται παρακάτω.



Τα δίκτυα πρόσβασης βασίζονται σε WiFi, WiMAX ή οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης. Αν το δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιεί εξοπλισμό WiFi το ολικό δίκτυο παρόχων ασύρματης υπηρεσίας αναφέρεται ως Hot Zone. Από τότε που οι πάροχοι ασύρματης υπηρεσίας τυπικά προσφέρουν φωνή, δεδομένα και βίντεο, το ενσωματωμένο χαρακτηριστικό QoS του WiMAX θα βοηθήσει στην προτεραιότητα και βελτιστοποίηση της μεταβιβαζόμενης κυκλοφορίας. Ο εξοπλισμός WiMAX μπορεί να τοποθετηθεί γρήγορα, βοηθώντας στην ανάπτυξη και το στήσιμο ενός δικτύου παρόχων ασύρματης πρόσβασης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ενοικίαση συστημάτων μετάδοσης από την τοπική τηλεφωνική εταιρεία θα αυξήσει το λειτουργικό κόστος και η εγκατάσταση δικτύου οπτικών ινών μπορεί να είναι πολυέξοδη και απαιτεί σημαντικό χρόνο, ενώ οι οπτικές ίνες, το DSL και η καλωδιακή τεχνολογία δεν είναι αντάξιες του κόστους τους.

1.5.2.1.3 Δίκτυα Τραπεζών

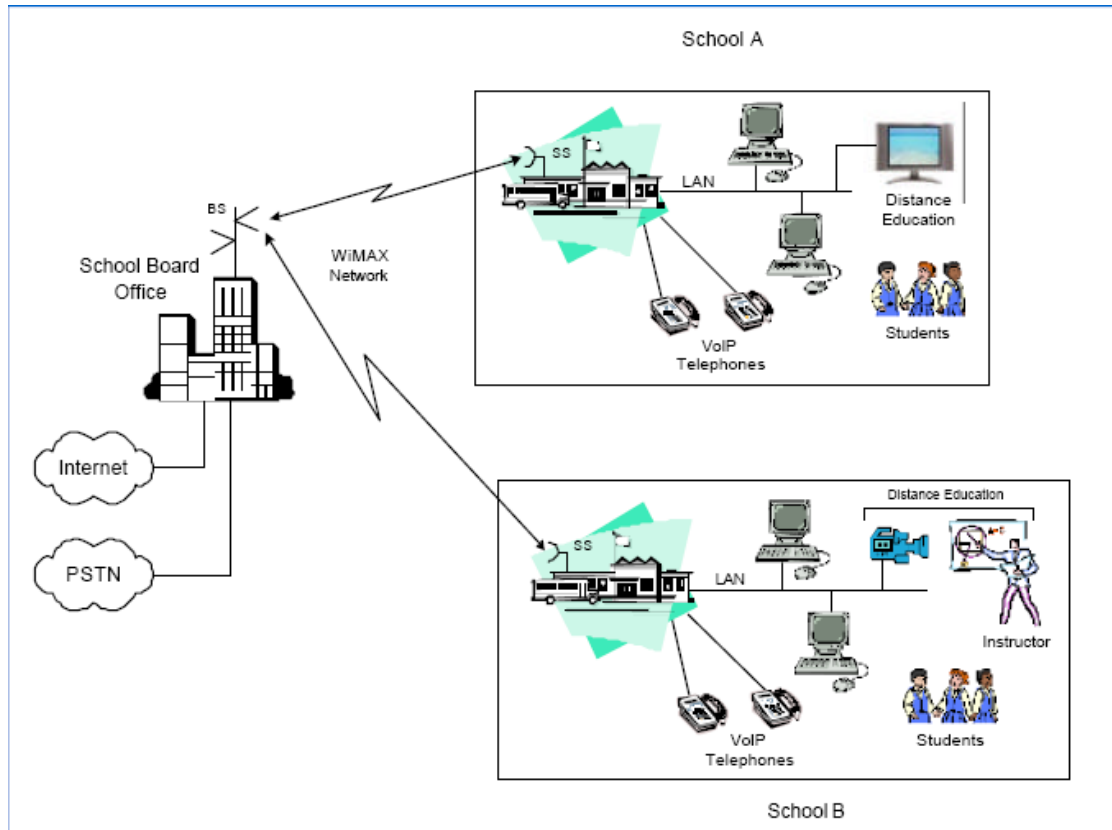
Οι μεγάλες τράπεζες μπορούν να συνδέουν υποκατάστημα και τοποθεσίες ATM με το κεντρικό γραφείο της περιοχής μέσω ενός ιδιωτικού δικτύου WiMAX μεταφέροντας φωνή, δεδομένα και βίντεο, όπως φαίνεται παρακάτω. Αυτές οι τράπεζες συνήθως εκτείνονται σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή και χρειάζεται υψηλή ασφάλεια και εύρος ζώνης, ώστε να διαχειρίζεται η κυκλοφορία:



Η κρυπτογράφηση δεδομένων μέσω του WiMAX προσφέρει εξαιρετική ασφάλεια σύνδεσης, παρολαυτά, οι τράπεζες πιθανόν να χρειαστούν και ασφάλεια από άκρη σε άκρη, όπως αυτή που παρέχεται από το SSL, για να προστατευτούν ενάντια σε ανεπιθύμητη εισβολή στην ευαίσθητη τραπεζική κυκλοφορία. Η ευρεία κάλυψη και η υψηλή χωρητικότητα επιτρέπει το κεντρικό γραφείο της τράπεζας να είναι συνδεδεμένο με ένα μεγάλο αριθμό υποκαταστημάτων και σημείων ATM, που είναι διασκορπισμένα στην ευρύτερη περιοχή. Τα δίκτυα WiMAX επίσης προσφέρουν έναν υψηλό βαθμό κλιμάκωσης, ώστε η κυκλοφορία χαμηλού ρυθμού δεδομένων μεταξύ του κεντρικού γραφείου και των ATM να συνυπάρχει με τα υψηλά επίπεδα της κυκλοφορίας που χρειάζεται για να υποστηριχθούν οι επικοινωνίες μεταξύ κεντρικού γραφείου και υποκαταστημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται, χρησιμοποιώντας το QoS του WiMAX, το οποίο χρησιμοποιείται, ώστε να δίνει προτεραιότητα στην κυκλοφορία φωνής (τηλεφωνία ανάμεσα στα καταστήματα), δεδομένων (οικονομικές συναλλαγές, email, Internet και intranet) και βίντεο (παρακολούθηση, CCTV). Είναι επιθυμητό για τις τράπεζες να έχουν τα δικά τους δίκτυα, για πολλούς λόγους. Εκτός από την εξάλειψη του κόστους που χρεώνουν οι τηλεφωνικές εταιρείες, οι τράπεζες θα έχουν τη δυνατότητα να αναδιοργανώνουν το δίκτυό τους γρήγορα αν ένα ATM ή ένα υποκατάστημα έχει προσωρινά ή μόνιμα αλλάξει τοποθεσία. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη λογική του DSL και της καλωδιακής τεχνολογίας, που είναι περισσότερο «δυσκίνητες» τεχνολογίες.

1.5.2.1.4 Εκπαιδευτικά Δίκτυα

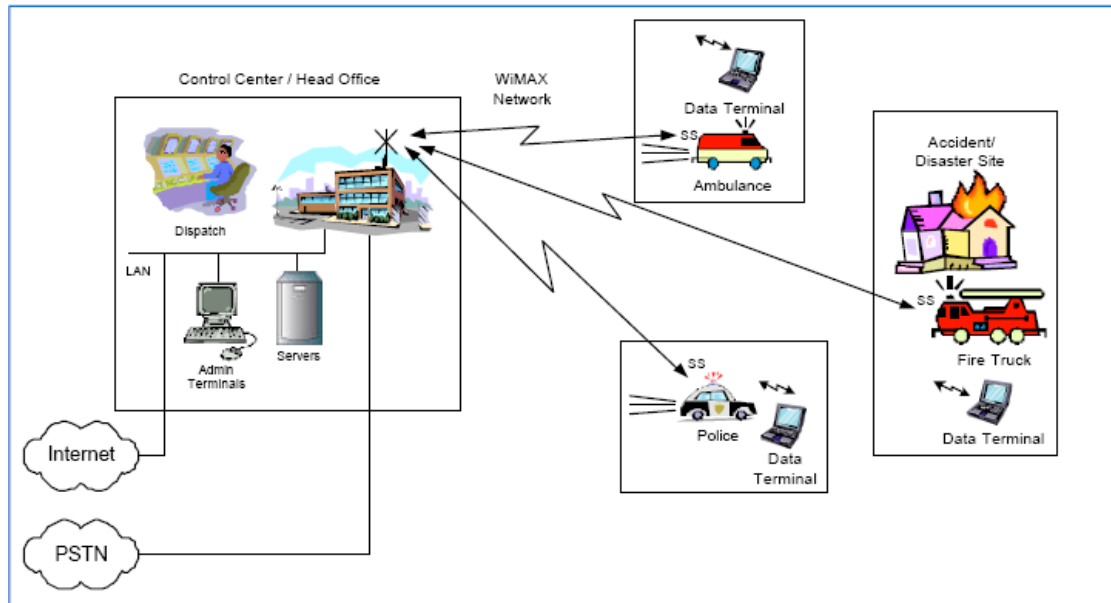
Τα υπουργεία παιδείας μπορούν να χρησιμοποιούν τα δίκτυα WiMAX για να συνδέουν τα σχολεία με τα υπουργεία ή τις νομαρχίες (αν βρισκόμαστε στην επαρχία) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Μερικά από τα χαρακτηριστικά κλειδιά για ένα τέτοιο σύστημα είναι NLOS, υψηλό εύρος ζώνης (>15 Mbps), δυνατότητα για Point-to-Point και Point-to-Multipoint στήσιμο και δυνατότητα για ευρεία κάλυψη.



Τα εκπαιδευτικά δίκτυα που βασίζονται στο WiMAX και χρησιμοποιούν το QoS, μπορούν να μεταφέρουν στο μέγιστο το εύρος των απαιτήσεων της επικοινωνίας, συμπεριλαμβανόμενων τη φωνή τηλεφωνίας, λειτουργικά δεδομένα (όπως οι φάκελοι των μαθητών), email, πρόσβαση σε Internet και intranet (δεδομένα) και εκπαίδευση από απόσταση (βίντεο) ανάμεσα σε κεντρικά του υπουργείου ή της νομαρχίας και όλων των σχολείων στην περιφέρεια κάλυψης, αλλά και μεταξύ των ίδιων των σχολείων. Στο παραπάνω σενάριο, η κάμερα στο σχολείο B μεταφέρει τη διδασκαλία του μαθήματος στο σχολείο A σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας τα σχολεία να μεταδίδουν τη διδασκαλία ενός μαθήματος και σε άλλα σχολεία ταυτόχρονα, μειώνοντας την ανάγκη για επιπλέον δασκάλους. Η λύση του WiMAX παρέχει ευρεία κάλυψη και σε χαμηλό κόστος και είναι ιδανική ειδικά για σχολεία της επαρχίας που έχουν λίγο ή καθόλου εξοπλισμό επικοινωνιών και είναι διασκορπισμένα σε μεγάλη ακτίνα. Όταν τα σχολεία θα έχουν και θα χρησιμοποιούν τα δικά τους δίκτυα, θα μπορούν οικειοθελώς να αντιδρούν σε οποιοσδήποτε αλλαγές στην τοποθεσία ή το πλήθος των εφαρμογών που διαθέτουν. Αυτό θα μειώσει σημαντικά το κόστος πιθανόν μισθωμένων γραμμών στο τηλεφωνικό δίκτυο. Έτσι, λοιπόν, βλέπουμε ότι οι καλωδιωμένες λύσεις δεν μπορούν να προσφέρουν μια γρήγορα εγκαταστάσιμη και χαμηλού κόστους λύση και οι περισσότερες εκδοχές DSL και καλωδίου δεν έχουν τους απαιτούμενους για τέτοια δίκτυα ρυθμούς μετάδοσης.

1.5.2.1.5 Δημόσια Ασφάλεια

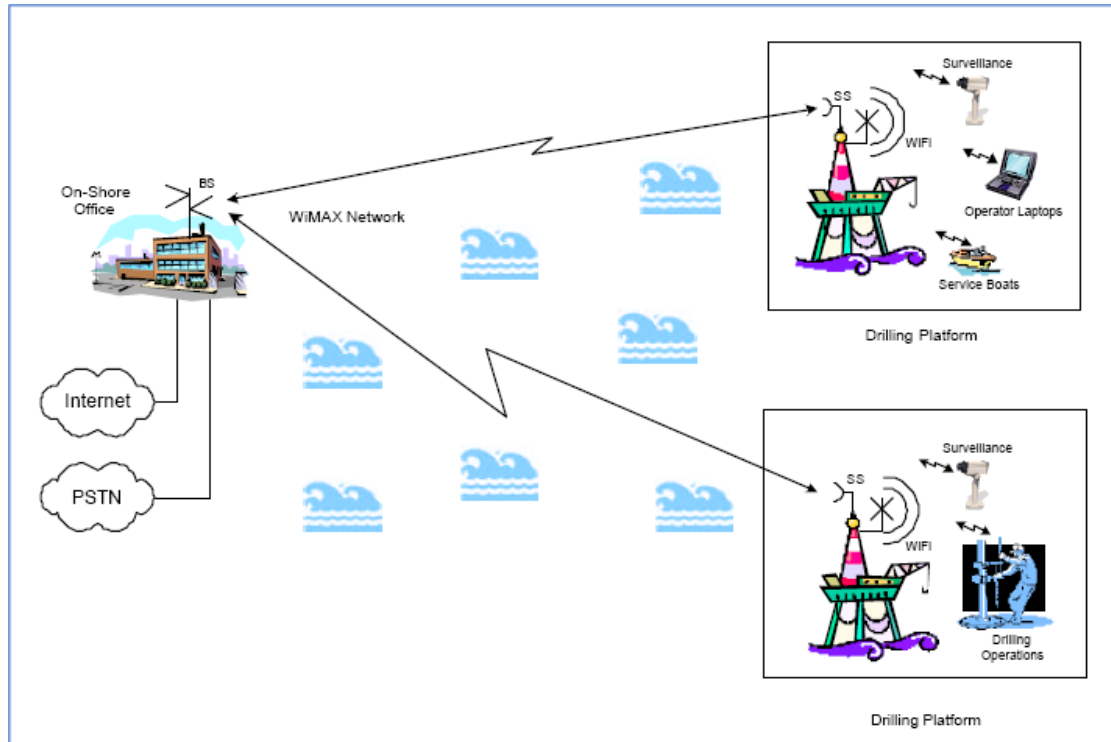
Οι κυβερνητικές υπηρεσίες δημόσιας ασφάλειας, όπως η αστυνομία και η πυροσβεστική μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα δίκτυα WiMAX, ώστε να υποστηρίξουν δύσκολες ιατρικές ή άλλες επείγουσες καταστάσεις, όπως φαίνεται παρακάτω.



Τα παραπάνω δίκτυα παρέχουν αμφίδρομη επικοινωνία φωνής ανάμεσα στο κέντρο ελέγχου και τις ομάδες διάσωσης που βρίσκονται στην τοποθεσία του επείγοντος συμβάντος. Επίσης το δίκτυο μεταφέρει εικόνες βίντεο και δεδομένα από το σημείο του ατυχήματος στο κέντρο ελέγχου. Τα δεδομένα αυτά μπορούν με τη σειρά τους να μεταφερθούν σε ειδικές ομάδες ιατρικών ή άλλων ειδικών επιτελείων, τα οποία μπορούν να αναλύσουν την κατάσταση σε πραγματικό χρόνο, σαν να ήταν οι ίδιοι στον τόπο του ατυχήματος. Το QoS του WiMAX επιτρέπει στο δίκτυο να χειρίζεται όλες τις διαφορετικές καταστάσεις κυκλοφορίας των δεδομένων. Οι λύσεις WiMAX είναι εύκολα εγκαταστάσιμες, έτσι η αρχική ομάδα διάσωσης μπορεί να στήσει ένα προσωρινό ασύρματο δίκτυο στο σημείο του ατυχήματος, γεγονός ή φυσικής καταστροφής μέσα σε λίγα λεπτά. Μπορούν επίσης να μεταφέρουν κυκλοφορία από το δίκτυο αυτό στο κέντρο ελέγχου, μέσω ενός ήδη υπάρχοντος δικτύου WiMAX. Οι καλωδιωμένες λύσεις δεν είναι λειτουργικές στην περίπτωση αυτή, λόγω του απρόβλεπτου των ατυχημάτων και των καταστροφών και της μεταβολής της ανάγκης για κινητότητα. Για παράδειγμα, ένας αστυνομικός μπορεί να θέλει να έχει πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων από ένα κινούμενο όχημα ή ένας πυροσβέστης να χρειάζεται τη βέλτιστη διαδρομή για να φτάσει στο σημείο της πυρκαγιάς ή να χρειάζεται την αρχιτεκτονική του κτιρίου. Μία βίντεο κάμερα στο ασθενοφόρο μπορεί να προσφέρει προχωρημένη πληροφορία για την κατάσταση ενός ασθενή πριν το ασθενοφόρο φτάσει το νοσοκομείο. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, το WiMAX παρέχει υποστήριξη για κινητότητα και υψηλό εύρος ζώνης, κάτι που τα συστήματα στενού εύρους ζώνης δεν μπορούν να επιτύχουν.

1.5.2.1.6 Επικοινωνίες Offshore (σε απόσταση από την παραλία)

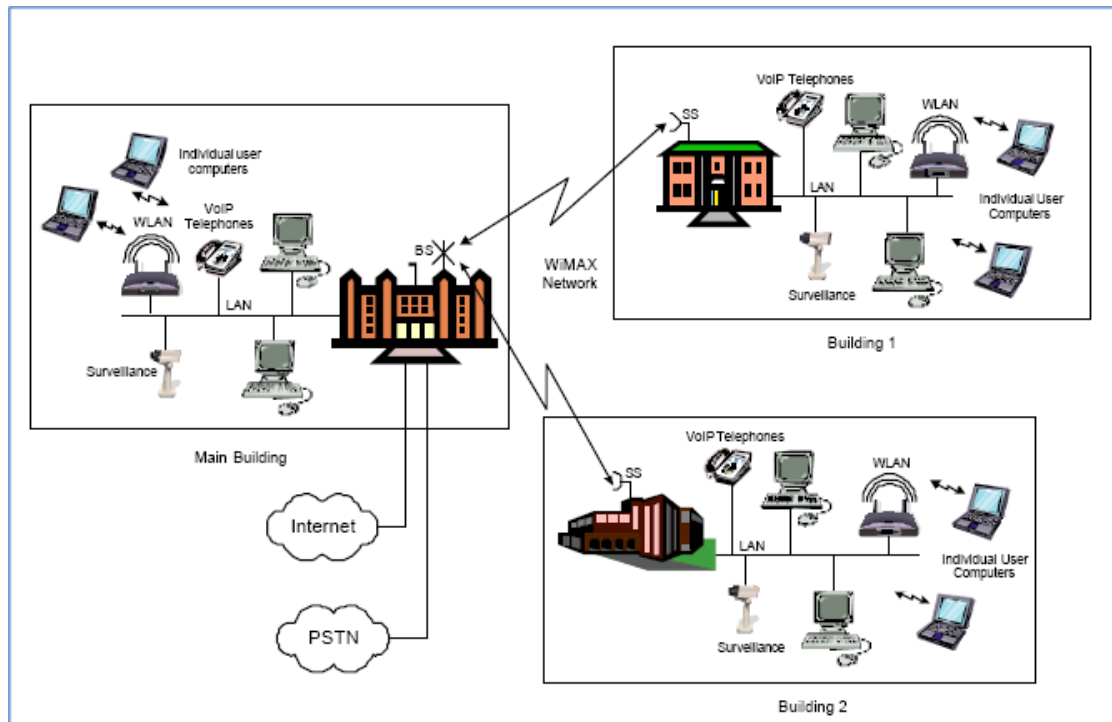
Οι παραγωγοί πετρελαίου και αερίου μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον εξοπλισμό WiMAX, ώστε να έχουν επικοινωνιακή ζεύξη από τις εγκαταστάσεις στην ξηρά στις πετρελαιοπηγές και πλατφόρμες στη θάλασσα, ώστε να πραγματοποιούνται απομακρυσμένες λειτουργίες, ασφάλεια και βασικές επικοινωνίες, όπως φαίνεται παρακάτω.



Οι απομακρυσμένες λειτουργίες περιλαμβάνουν απομακρυσμένη λύση προβλημάτων εξοπλισμού, παρακολούθηση της τοποθεσίας και πρόσβαση σε βάση δεδομένων. Για παράδειγμα, βίντεο από δυσλειτουργικά κομμάτια μπορούν να μεταδοθούν στους σταθμούς ξηράς για να αναλυθούν από ομάδες ειδικών. Η ασφάλεια περιλαμβάνει συστήματα συναγερμών και παρακολούθηση του χώρου. Οι βασικές επικοινωνίες περιλαμβάνουν τηλεφωνία, email, πρόσβαση στο internet και συνεδριάσεις μέσω βίντεο. Τα δίκτυα WiMAX εγκαθίστανται γρήγορα και εύκολα. Το δίκτυο μπορεί να στηθεί ή να ξαναστηθεί σε μικρό χρονικό διάστημα, ακόμα και όταν οι πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου μεταφέρονται. Οι καλωδιωμένες λύσεις δεν είναι κατάλληλες, καθώς οι εγκαταστάσεις δεν είναι πάντα στην ξηρά και είναι συχνά μεταφερόμενες. Όταν χρειάζεται μια εγκατάσταση να εγκαταλειφθεί προσωρινά, οι επικοινωνίες για την παρακολούθηση της περιοχής συντηρούνται με τερματικά WiMAX βασισμένα σε μπαταρίες.

1.5.2.1.7 Συνδέσεις σε Πανεπιστημιούπολεις

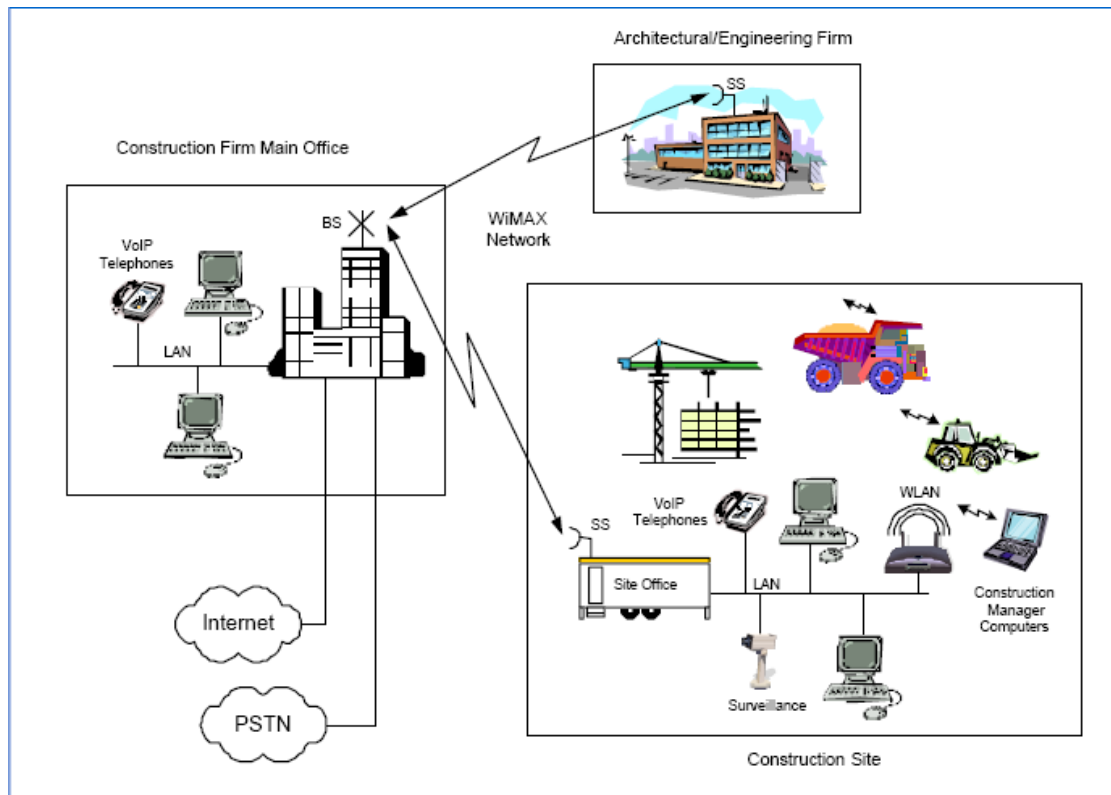
Κυβερνητικές υπηρεσίες, μεγάλες επιχειρήσεις, βιομηχανικές περιοχές, μεταφορικά μέσα, πανεπιστήμια και κολέγια μπορούν να χρησιμοποιούν δίκτυα WiMAX για να συνδέουν πολλαπλές τοποθεσίες και γραφεία μέσα στην περιοχή δράσης τους (π.χ. πανεπιστημιούπολη), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα συστήματα επικοινωνίας στην πανεπιστημιούπολεις απαιτούν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, χαμηλή καθυστέρηση, μεγάλη περιοχή κάλυψης και υψηλή ασφάλεια.



Όπως κάθε άλλο σενάριο χρήσης, τα δίκτυα αυτά μεταφέρουν μια μίξη φωνής, δεδομένων και βίντεο, την οποία το QoS του WiMAX βοηθάει να ιεραρχεί και να βελτιστοποιεί. Χρειάζεται λιγότερος χρόνος και εξοπλισμός για να διασυνδεθεί μία πανεπιστημιούπολη με ένα δίκτυο WiMAX, καθώς δε χρειάζεται ούτε σκάψιμο ούτε εξωτερικές κατασκευές. Μερικές πανεπιστημιούπολεις είναι ήδη διασυνδεδεμένες με καλώδιο εδώ και πολλά χρόνια και σκάψιμο για το ξήλωμα των καλωδίων δε συζητάται καν. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το WiMAX μπορεί να είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές λύσεις για τη διασύνδεση των κτιρίων της πανεπιστημιούπολης. Ακόμα και αν υπάρχουν καλωδιωμένες εγκαταστάσεις, ο χρόνος που χρειάζεται μια εφαρμογή βασισμένη στο υπάρχον καλωδιωμένο δίκτυο είναι πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειάζεται το δίκτυο WiMAX για να στηθεί και να δουλέψει.

1.5.2.1.8 Επικοινωνίες Προσωρινών Κατασκευών

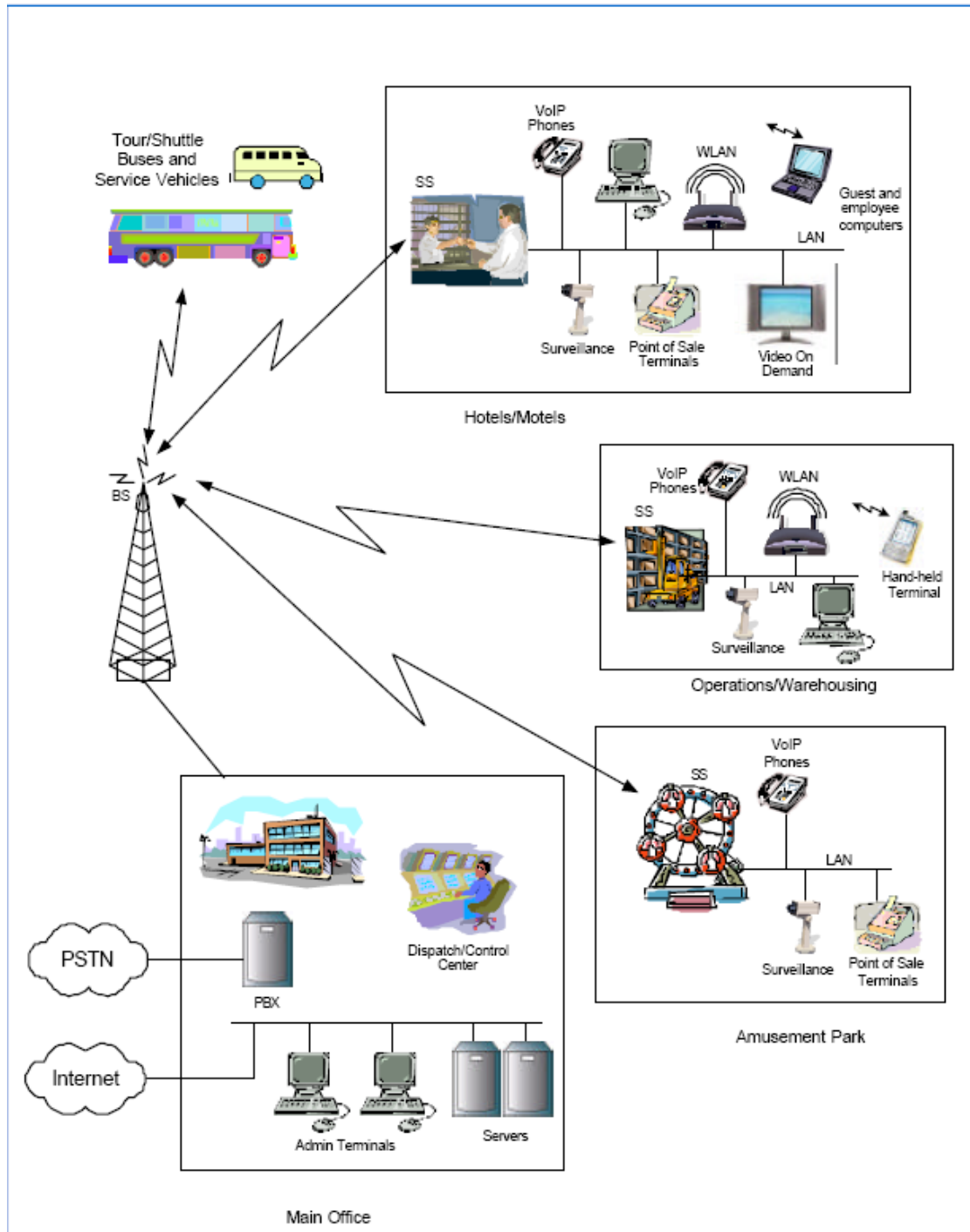
Οι εταιρείες κατασκευών μπορούν να χρησιμοποιήσουν δίκτυα WiMAX, ώστε να εγκαταστήσουν επικοινωνιακές ζεύξεις ανάμεσα στα κεντρικά γραφεία της εταιρείας και το μέρος της κατασκευής, όπως φαίνεται παρακάτω:



Η γρήγορη απεγκατάσταση του WiMAX είναι επίσης σημαντική σε αυτό το σενάριο, καθώς παρέχει γρήγορη επικοινωνία στην τοποθεσία κατασκευής με φωνή (τηλεφωνία) και δεδομένα (email, σχέδια μηχανικών και πρόσβαση στο internet). Η παρακολούθηση μέσω βίντεο επιτελείται επίσης μέσω του δικτύου για την υποστήριξη της επιτήρησης της τοποθεσίας (ή μερών της) που είναι δύσκολο να γίνει αλλιώς. Ένα τοπικό hot spot (σημείο πρόσβασης) μπορεί επίσης να εγκατασταθεί στην τοποθεσία της κατασκευής, επιτρέποντας στο προσωπικό να επικοινωνεί και να ανταλλάσσει δεδομένα και πληροφορίες για το χρονοδιάγραμμα. Όπως και στα προηγούμενα σενάρια, το ενσωματωμένο QoS του WiMAX ιεραρχεί τη δικτυακή κυκλοφορία και βελτιστοποιεί το κανάλι επικοινωνίας. Οι τοποθεσίες κατασκευής περιλαμβάνουν (και όχι μόνο) κτίρια γραφείων, ανάπτυξη κατοικιών, πετρελαϊκές εγκαταστάσεις και εγκαταστάσεις αερίου. Καθώς η κατασκευαστική δραστηριότητα στις τοποθεσίες αυτές είναι προσωρινή, οι καλωδιωμένες λύσεις δεν είναι οι κατάλληλες. Ο εξοπλισμός του WiMAX, καθότι φορητός, μπορεί να ξαναστηθεί και να ξαναχρησιμοποιηθεί και σε άλλες κατασκευαστικές τοποθεσίες.

1.5.2.1.9 Θεματικά Πάρκα

Οι υπεύθυνοι των θεματικών πάρκων μπορούν να χρησιμοποιήσουν WiMAX ώστε να μεταφέρουν μια ευρεία ακτίνα υπηρεσιών επικοινωνίας για τα πάρκα ψυχαγωγίας τους, εκθέσεις, κέντρα φιλοξενίας και ελέγχου και οχήματα υπηρεσιών και λεωφορεία, όπως φαίνεται παρακάτω:



Το παραπάνω δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει μια ευρεία ακτίνα από επικοινωνιακή κυκλοφορία, όπως αμφίδρομη επικοινωνία προς και από το κέντρο ελέγχου, παρακολούθηση μέσω βίντεο, συντήρηση δεδομένων, πρόσβαση και ανανέωση της βάσης δεδομένων, παρακολούθηση του πάρκου, βίντεο κατά βούληση

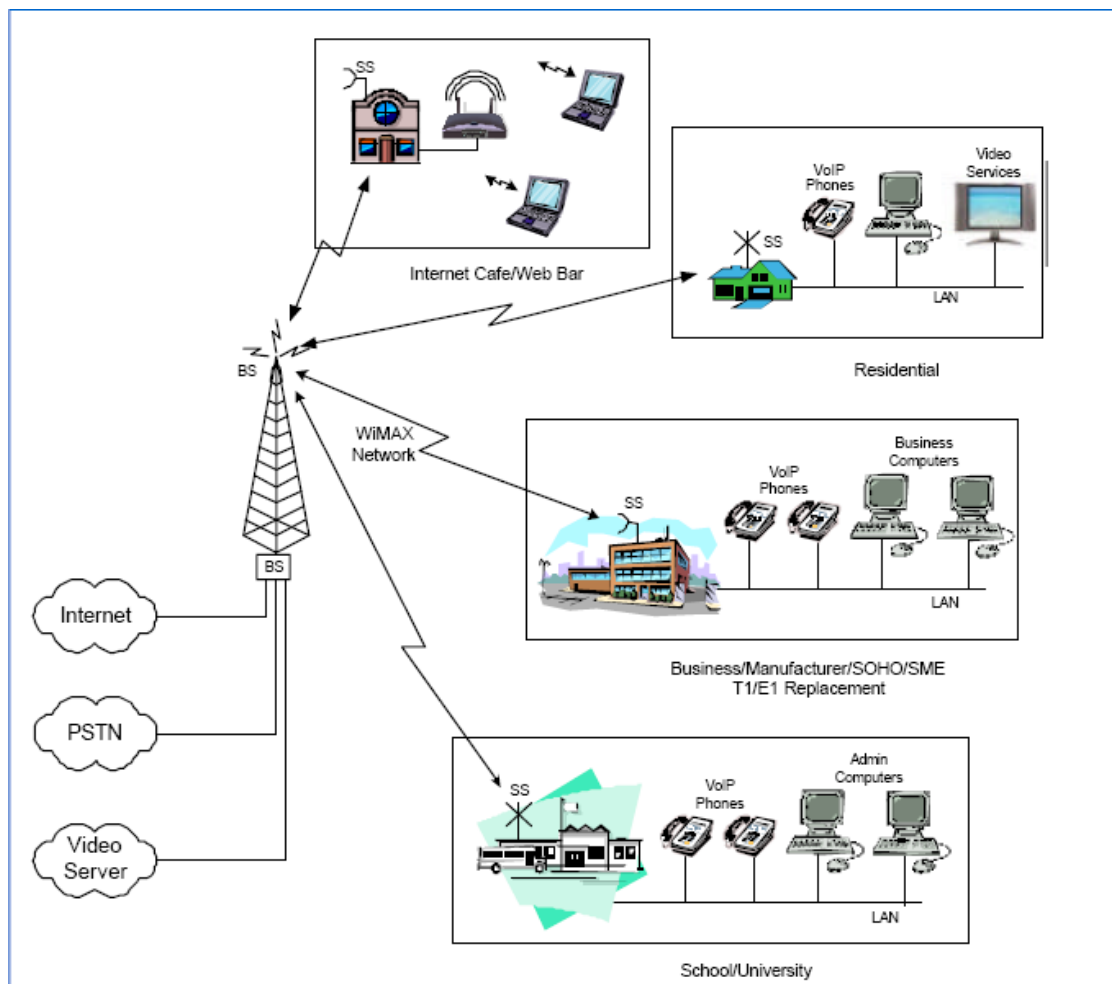
και τηλεφωνία φωνής. Μερικά από τις απαιτήσεις-κλειδιά για ένα σύστημα σαν το παραπάνω είναι η υποστήριξη για σταθερές και κινητές λειτουργίες, υψηλή ασφάλεια, κλιμακωτή αρχιτεκτονική και χαμηλή καθυστέρηση. Η ευρεία κάλυψη του WiMAX σημαίνει ότι ένα ολόκληρο πάρκο μπορεί να καλυφθεί από μόνο 11 σταθμούς βάσης, κλιμακωτά προς τα πάνω, καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις για χωρητικότητα. Το QoS MAC του WiMAX βάζει σε προτεραιότητα και βελτιστοποιεί την κυκλοφορία, όπως την καθορίζει ο χειριστής του συστήματος. Επίσης, το επαναστήσιμο του συστήματος είναι θέμα λεπτών και βίντεο σε πραγματικό χρόνο μεταδίδεται στα τουριστικά λεωφορεία, παρέχοντας πληροφορίες για τις δραστηριότητες και τον καιρό στους πελάτες.

1.5.2.2. Δημόσια Δίκτυα

Στα δημόσια δίκτυα πρόσβαση στις πληροφορίες έχουν διαφορετικοί χρήστες, είτε επιχειρηματίες είτε απλοί πελάτες. Τα δημόσια δίκτυα γενικά απαιτούν χαμηλού κόστους μέσα ώστε να καλύπτουν μια απρόβλεπτη περιοχή, καθώς η τοποθεσία των χρηστών δεν είναι ούτε προβλέψιμη ούτε σταθερή. Οι κύριες εφαρμογές των δημοσίων δικτύων είναι επικοινωνίες φωνής και δεδομένων, αν και η επικοινωνία μέσω βίντεο γίνεται σιγά σιγά εξαιρετικά δημοφιλής. Η ασφάλεια είναι μια κρίσιμη απαίτηση, καθώς πολλοί χρήστες μοιράζονται το δίκτυο. Η ενσωματωμένη VLAN υποστήριξη και η κρυπτογράφηση των δεδομένων υλοποιούν την απαίτηση αυτή. Αρκετά σενάρια χρήσης δημοσίων δικτύων περιγράφονται παρακάτω.

1.5.2.2.1 Δίκτυο Πρόσβασης Πάροχου Ασύρματης Υπηρεσίας

Οι πάροχοι Ασύρματης Υπηρεσίας χρησιμοποιούν τα δίκτυα WiMAX για να παρέχουν συνδεσιμότητα στους πελάτες (φωνή, δεδομένα και βίντεο στους ιδιώτες και φωνή και internet στους επιχειρηματίες), όπως φαίνεται παρακάτω:

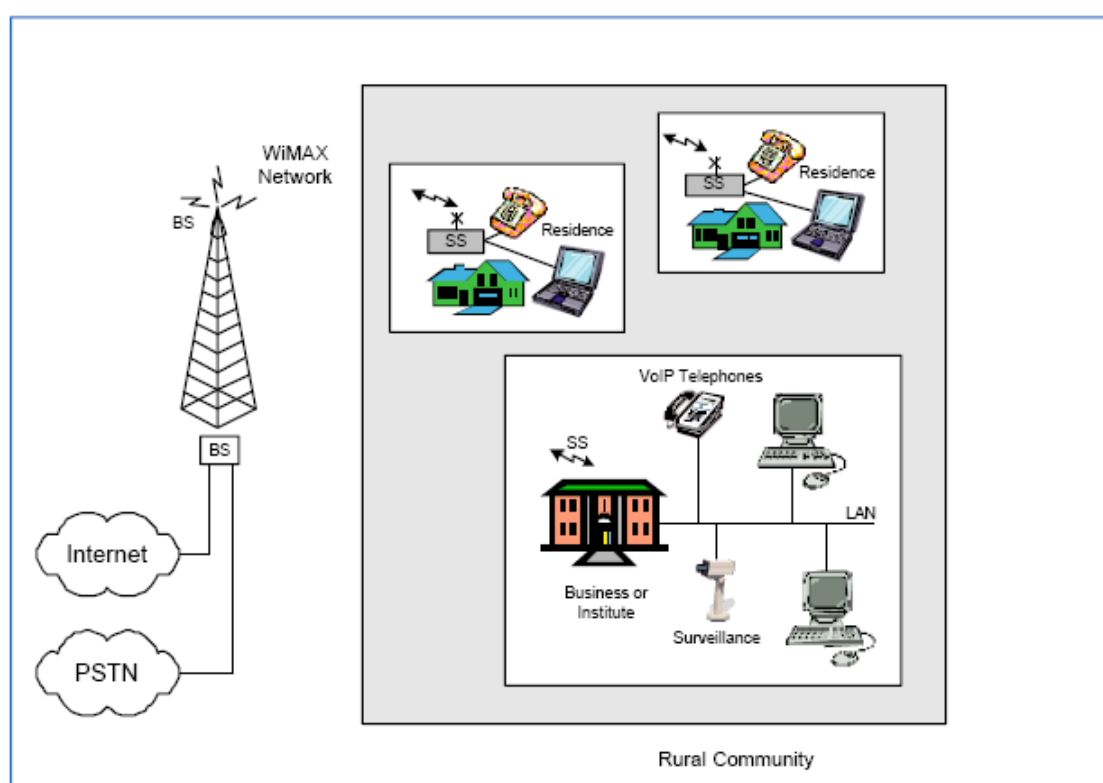


Οι πάροχοι ασύρματων υπηρεσιών μπορεί να είναι εταιρείες που ξεκινούν την επιχείρησή τους με μικρό ή καθόλου εξοπλισμό. Καθώς το WiMAX εγκαθίσταται εύκολα, οι εταιρείες μπορεί να αναπτυχθούν εύκολα και να ανταγωνίζονται με τις ήδη υπάρχουσες εταιρείες. Ο ενσωματωμένος μηχανισμός QoS του WiMAX είναι κατάλληλος για την κυκλοφορία που χειρίζεται η επιχείρηση. Το QoS MAC

προσφέρει επίσης πολυεπίπεδη υπηρεσία ώστε να καλύπτει την ποικιλία των αναγκών της υπηρεσίας των πελατών. Μία πλατφόρμα ενός συνηθισμένου δικτύου που προσφέρει φωνή, δεδομένα και βίντεο, είναι υψηλά ελκυστική στους τελικούς χρήστες, επειδή παρουσιάζει ευκολία και μηνιαίο λογαριασμό. Η υποστήριξη για πολλαπλούς τύπους υπηρεσίας επιτρέπει διαφορετικές ροές εσόδων και μειώνει το κόστος απόκτησής του από τους πελάτες, αυξάνοντας το μέσο έσοδο ανά χρήστη. Οι πάροχοι χρειάζονται μόνο ένα σύστημα πληρωμής και μία βάση δεδομένων πελατών. Οι κυψελωτές υπηρεσίες επίσης ενδιαφέρονται για τις εφαρμογές του WiMAX. Οι εταιρείες έχουν ήδη σταθμούς βάσης, υπηρεσίες πληρωμής και μία βάση πελατών, αλλά η εγκατάσταση συστήματος WiMAX θα επεκτείνει την παρουσία τους στην αγορά.

1.5.2.2.2 Συνδεσιμότητα σε αγροτικές περιοχές

Οι πάροχοι υπηρεσιών χρησιμοποιούν τα δίκτυα WiMAX για να μεταφέρουν υπηρεσίες σε υποβαθμισμένες αγορές σε αγροτικές περιοχές και στα προάστια των πόλεων, όπως φαίνεται παρακάτω:



Η μεταφορά της συνδεσιμότητας αυτής είναι κρίσιμη σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες και υποβαθμισμένες περιοχές των ανεπτυγμένων χωρών, όπου μικρός ή καθόλου εξοπλισμός δεν υπάρχει. Η συνδεσιμότητα αυτή μεταφέρει πολύ χρήσιμη τηλεφωνία φωνής και υπηρεσία internet. Από τότε που η λύση WiMAX παρέχει εκτεταμένη κάλυψη, είναι πολύ οικονομικά πιο αποτελεσματική από την καλωδιωμένη τεχνολογία σε περιοχές με μικρότερη πυκνότητα πληθυσμού. Οι λύσεις WiMAX μπορούν να εγκατασταθούν γρήγορα, παρέχοντας επικοινωνιακές ζεύξεις σε αυτές τις υποβαθμισμένες περιοχές, παρέχοντας ένα πιο ασφαλές περιβάλλον, βοηθώντας στη βελτίωση των τοπικών οικονομιών.

1.5.3 Συμπεράσματα:

Όπως φάνηκε από τα παραπάνω, η τεχνολογία WiMAX και τα προϊόντα της στοχεύουν να καλύψουν μία ευρεία γκάμα εφαρμογών για τις αγορές πολλών χωρών του πλανήτη. Τα παραπάνω σενάρια είναι αντιπροσωπευτικά και είναι ένα καλό παράδειγμα χρήσης του νέου αυτού πρωτοκόλλου. Το WiMAX αν και βρίσκεται ακόμη σε νηπιακό στάδιο ανάπτυξης, εκτιμάται ότι τα επόμενα χρόνια θα προσελκύσει εκατομμύρια συνδρομητές.

Η μόνιμη και ασύρματη σύνδεση στο διαδίκτυο επιτρέπει ακόμη και στον πιο απλό χρήστη να αξιοποιήσει ένα μεγάλο πλήθος νέων εφαρμογών, που μέχρι στιγμής δεν ήταν διαθέσιμες, είτε λόγω χαμηλού εύρους ζώνης, είτε λόγω των περιορισμών που θέτει η χρήση καλωδίων. [1]

Η τηλεφωνία Voice over IP, που επιτρέπει την πραγματοποίηση τηλεφωνικών κλήσεων μέσω Internet, μέχρι τώρα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο σε οικιακούς ή εταιρικούς χώρους που διέθεταν σύνδεση στο διαδίκτυο υψηλών ταχυτήτων. Με το WiMAX, το γρήγορο Internet είναι διαθέσιμο σε κάθε σημείο μιας μεγάλης πόλης και στα περισσότερα τμήματα της χώρας. Μπορείτε να φανταστείτε τον εαυτό σας να μετακινείται με ένα μέσο μαζικής μεταφοράς ή με το αυτοκίνητό του, συνομιλώντας τηλεφωνικά με άτομα που βρίσκονται στην άλλη άκρη του κόσμου, με πολύ χαμηλή ή και μηδενική χρέωση. Μάλιστα οι ταχύτητες που υπόσχεται το WiMAX είναι τόσο υψηλές, που εκτός από τη μετάδοση φωνής, το πιθανότερο είναι ότι θα καταστεί εφικτή και η βιντεοτηλεφωνία μέσω διαδικτύου. Εφαρμογές όπως το Skype, το ICQ ή ο MSN Messenger που ήδη επιτρέπουν την πραγματοποίηση συνομιλίας με ήχο ή και εικόνα, θα μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν σε φορητούς υπολογιστές και PDA εν κινήσει, καθιστώντας απλή υπόθεση την αδιάλειπτη και οικονομική επικοινωνία. Όμως οι διευκολύνσεις που αναμένεται να φέρει το WiMAX στον καθημερινό τρόπο ζωής δεν σταματούν εδώ.

Η παρακολούθηση video on demand και online τηλεοπτικών ή ραδιοφωνικών μεταδόσεων προγραμμάτων θα επιτρέπει σε κάποιο φίλαθλο να παρακολουθεί το ματς της αγαπημένης του ομάδας εν κινήσει, μέσω Internet, στον επαγγελματία να ενημερώνεται για τις τιμές των μετοχών κατά τη διαδρομή από το σπίτι προς την εργασία του, αλλά και στον μουσικόφιλο χρήστη να γεμίζει τις ώρες ενός πολύωρου πληκτικού ταξιδιού αγοράζοντας τραγούδια mp3 και video clips από online καταστήματα. Η αποστολή ενός e-mail με μεγάλα συνημμένα αρχεία, ενώ βρίσκεστε καθοδόν, σήμερα είναι πρακτικά ανέφικτη, εκτός φυσικά αν χρησιμοποιήσετε το -όχι και τόσο οικονομικό- 3G. Το WiMAX με πολλαπλάσιες ταχύτητες θα κοστίζει σημαντικά λιγότερο, επιτρέποντας τη διεκπεραίωση κάθε online εργασίας μέσα σε ελάχιστα λεπτά, χωρίς να βάλετε βαθιά το χέρι στην τσέπη.

Τα Wireless Metropolitan Networks, όπως αυτά που έχουν ήδη αναπτυχθεί σε πόλεις της Ελλάδας και του εξωτερικού, αυτή τη στιγμή αντιμετωπίζουν ως σημαντικό πρόβλημα τη μειωμένη εμβέλεια της τεχνολογίας Wi-Fi, παρουσιάζοντας μεγάλα κενά στις περιοχές κάλυψής τους. Ως εκ τούτου, τα μέλη των συλλόγων που τα διαχειρίζονται αναγκάζονται να τοποθετούν κεραιές σε πολύ κοντινές αποστάσεις, ώστε να επιτευχθεί πληρέστερη κάλυψη. Το WiMAX θα επιτρέψει τη δημιουργία ασύρματων μητροπολιτικών δικτύων που θα καλύπτουν αξιόπιστα μεγάλες περιοχές. Χρήστες που βρίσκονται στην ίδια μεγαλούπολη, αλλά σε απόσταση πολλών χιλιομέτρων μεταξύ τους, θα μπορούν να ανταλλάζουν αρχεία δημιουργώντας μεταξύ τους ένα προστατευμένο ιδιωτικό δίκτυο, στο οποίο δεν θα έχουν πρόσβαση τρίτα άτομα, παρά μόνο αν γνωρίζουν το μυστικό κλειδί κρυπτογράφησης.

Σαν νέα τεχνολογία, το WiMAX διαθέτει σε παγκόσμια κλίμακα, αρκετά χαμηλή συνδρομητική βάση εν συγκρίσει με τις άλλες τεχνολογίες πρόσβασης στο Internet, όπως οι συνδέσεις ADSL, Cable, ISDN ή μισθωμένων κυκλωμάτων. Αυτό είναι κάτι το δικαιολογημένο, αν αναλογιστεί κανείς ότι τα δίκτυα WiMAX δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί ιδιαίτερα.

Κατά το έτος του 2005 οι συνδρομητές WiMAX δεν ξεπερνούν τα 2 εκατομμύρια συνολικά σε Ευρώπη, Αμερική και Ασία, αλλά κατά το 2006 εκτιμάται ότι θα υπάρξει υπερδιπλασιασμός τους, φθάνοντας ή και ξεπερνώντας τα 5 εκατομμύρια. Στις χρονιές που ακολουθούν μάλιστα η αύξηση αναμένεται να συνεχιστεί με ανάλογους ρυθμούς, φθάνοντας ή και ξεπερνώντας τα 100 εκατομμύρια. Στους υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης του θα συμβάλλει φυσικά η ευκολία εγκατάστασης ενός δικτύου WiMAX, αλλά και η εύκολη εγγραφή και χρήση του από τους συνδρομητές.

Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι μετά τον πρόσφατο τυφώνα που έπληξε τη Νέα Ορλεάνη των Ηνωμένων Πολιτειών και τις καταστροφές που επέφερε στο ενσύρματο δίκτυο τηλεπικοινωνιών, τα σωστικά συνεργεία προχώρησαν στην άμεση δημιουργία δικτύου WiMAX για την κάλυψη των αναγκών επικοινωνίας στην περιοχή.

Πρόσφατα διατέθηκαν από την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ) οι πρώτες άδειες για εγκατάσταση και δοκιμαστική λειτουργία δικτύων WiMAX στην Ελλάδα. [1]

1.6 Δομή ενός δικτύου WiMAX

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 στις αρχές του 2006 αναμένεται να συναντήσουμε στην αγορά τους πρώτους ηλεκτρονικούς υπολογιστές με εγγενή υποστήριξη δικτύων WiMAX, με τον ίδιο τρόπο που σήμερα ήδη συμβαίνει αυτό με την τεχνολογία Wi-Fi. Για παλαιότερους υπολογιστές φυσικά θα διατεθούν κάρτες επέκτασης σε μορφή PCI για desktop συστήματα, PCMCIA για laptops ή SDIO για Pocket PC, ενώ ήδη στο εξωτερικό έχει αρχίσει η διάθεση WiMAX routers που αναλαμβάνουν να μοιράσουν τη σύνδεση Internet σε 2 ή περισσότερους υπολογιστές ενός τοπικού δικτύου.

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 3 λεπτά, δεδομένου ότι τα βήματα της σύνδεσης είναι πολύ απλά και συνοψίζονται ως 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 παροχέα υπηρεσιών διαδικτύου (ISP).
- 4) Η σύνδεση ολοκληρώνεται με επιτυχία και ο χρήστης είναι έτοιμος να πλοηγηθεί στο Internet.

Σημειώνεται 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.

Σε ότι αφορά τις χρεώσεις, το WiMAX δεν θα διαφοροποιείται σε σχέση με τη σημερινή τεχνολογία ADSL. Ως εκ τούτου, στα κοινά πακέτα πρόσβασης δεν θα υφίσταται χρονοχρέωση ή ογκοχρέωση, επιτρέποντας έτσι στον χρήστη να παραμένει μόνιμα συνδεδεμένος στο Internet, «κατεβάζοντας» κάθε είδους αρχεία, χωρίς να ανησυχεί για υπερβολικές χρεώσεις. Φυσικά δεν αποκλείεται να διατεθούν και προαιρετικά πρόσθετα προγράμματα ογκοχρέωσης ή χρονοχρέωσης για τους λεγόμενους “light users”, όπως ήδη ισχύει σήμερα για το ADSL.

Πώς δουλεύει το WiMAX: [6]



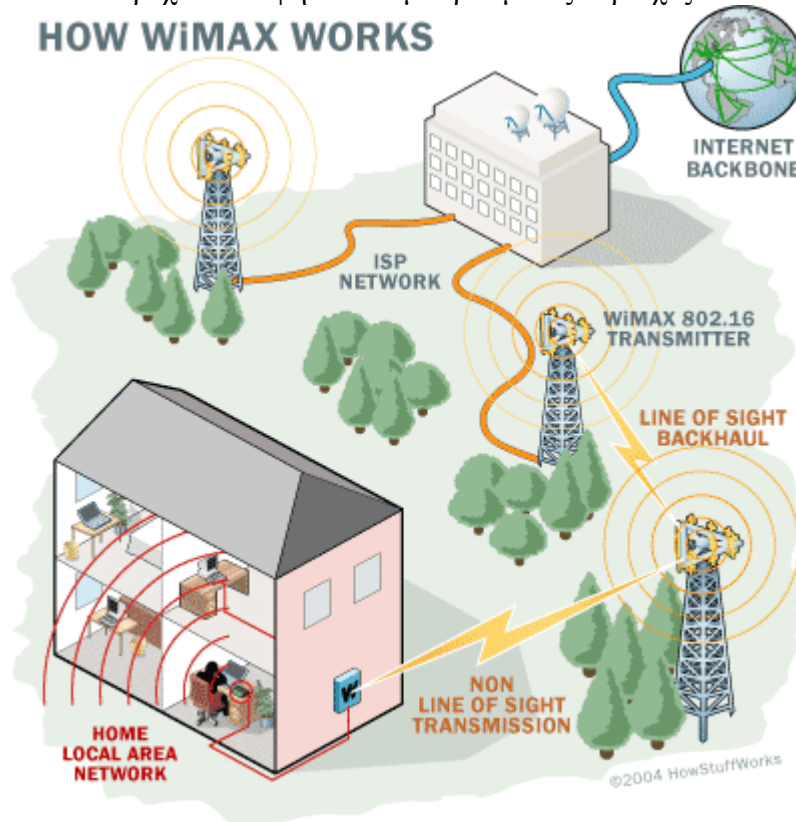
Με πρακτικούς όρους, το WiMAX λειτουργεί παρόμοια με το WiFi, αλλά σε υψηλότερους ρυθμούς, σε μεγαλύτερες αποστάσεις και για ένα μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Το WiMAX θα μπορούσε ενδεχομένως να διαγράψει τις αστικές ή προαστιακές περιοχές που δεν έχουν πρόσβαση στο ευρυζωνικό internet γιατί οι τηλεφωνικές εταιρείες δεν έχουν τον αναγκαίο εξοπλισμό σε καλώδια.

Ένα σύστημα WiMAX αποτελείται από δύο μέρη:

Έναν WiMAX tower (πομπό), παρόμοιο σε σκεπτικό με ένα κυβελωτό tower. Ένας τέτοιος πομπός μπορεί να παρέχει κάλυψη σε μια ευρεία περιοχή του μεγέθους των 3.000 τετραγωνικών μιλίων (8.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα).

Έναν WiMAX δέκτη. Ο δέκτης και η κεραία μπορεί να είναι ένα μικρό κουτί ή μία κάρτα PCMCIA, ή μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα laptop όπως γίνεται η πρόσβαση στο WiFi.

Ένας σταθμός βάσης WiMAX μπορεί να συνδεθεί άμεσα με το internet 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 backhaul) μαζί με την ικανότητα ενός απλού tower να καλύπτει μέχρι και 3.000 τετραγωνικά μίλια, είναι τα στοιχεία που επιτρέπουν στο WiMAX να παρέχει κάλυψη σε απομακρυσμένες περιοχές.



Αυτό που φαίνεται από το παραπάνω σχήμα είναι ότι το WiMAX μπορεί να παρέχει δύο τρόπους ασύρματης υπηρεσίας:

1. Μη οπτικής επαφής, τύπου υπηρεσίας WiFi, όπου μια μικρή κεραία στον υπολογιστή συνδέεται με τον tower. Σε αυτή τη μορφή, το WiMAX χρησιμοποιεί μια

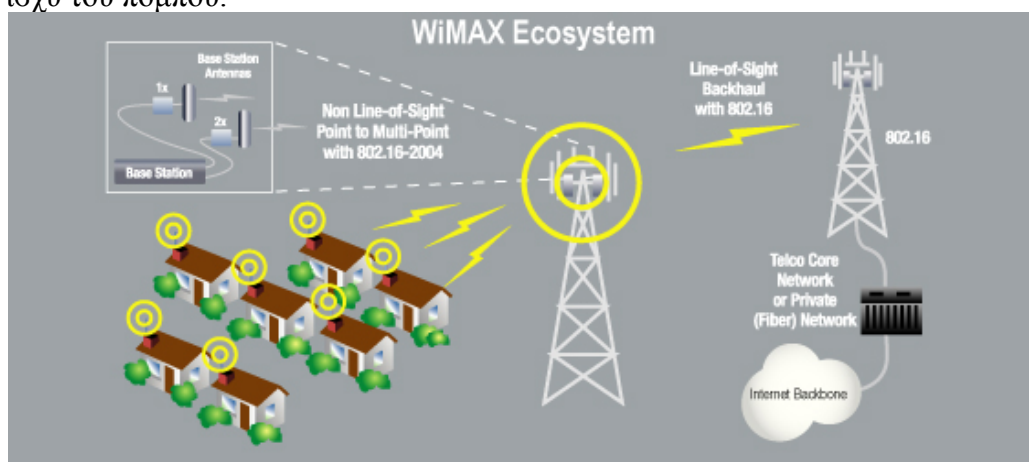
χαμηλότερη ακτίνα συχνοτήτων (2-11 GHz). Οι εκπομπές μικρότερου μήκους κύματος δε διακόπτονται τόσο εύκολα από φυσικά εμπόδια, είναι ικανά να διαθλαστούν ή να σκεδαστούν γύρω από αυτά.

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

Το WiMAX λειτουργεί στις ίδιες γενικές αρχές όπως το WiFi, στέλνει δεδομένα από τον έναν υπολογιστή στον άλλον μέσω ραδιοσημάτων. Ένας υπολογιστής (desktop ή laptop) εξοπλισμένος με WiMAX λαμβάνει τα δεδομένα από τον πομπό WiMAX, χρησιμοποιώντας κρυπτογράφηση για να αποτρέπουν χρήστες χωρίς άδεια να κλέβουν την πρόσβαση.

Η γρηγορότερη σύνδεση WiFi μπορεί να μεταδώσει μέχρι 54 Mbps στις βέλτιστες συνθήκες. Το WiMAX μπορεί να χειριστεί ως κα 70 Mbps. Αυτά τα mbps μπορεί να χρησιμοποιούνται από επιχειρήσεις ή ιδιώτες και εξισώνουν τα mbps που μεταφέρουν τα καλωδιωμένα modem.

Η μεγαλύτερη διαφορά δεν είναι η ταχύτητα, είναι η απόσταση. Ενώ η ακτίνα του WiFi είναι 100 πόδια (30 μέτρα), η κάλυψη του WiMAX φτάνει τα 30 μίλια (50 χιλιόμετρα). Η αυξημένη ακτίνα οφείλεται στις χρησιμοποιούμενες συχνότητες και στην ισχύ του πομπού.



Πώς δουλεύει όλο αυτό;

Ένας πάροχος internet εγκαθιστά ένα σταθμό βάσης WiMAX 10 μίλια από το σπίτι του πελάτη. Αν ο πελάτης αγοράσει έναν υπολογιστή με εξοπλισμό WiMAX (ή αναβαθμίσει τον παλιό), θα γίνει το εξής:

Ο πελάτης λαμβάνει ένα ειδικό κωδικό κρυπτογράφησης που δίνει πρόσβαση στο σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης μεταδίδει δεδομένα από το internet στον υπολογιστή με μηνιαία πληρωμή. Το κόστος όμως είναι πολύ χαμηλότερο από τα τρέχοντα δεδομένα, καθώς ο πάροχος δεν είχε τα έξοδα εγκατάστασης καλωδίων.

Αν υπάρχει δίκτυο στο σπίτι, τα πράγματα δεν αλλάζουν και πολύ. Ο σταθμός βάσης WiMAX στέλνει τα δεδομένα σε έναν WiMAX router, ο οποίος αναλαμβάνει να στείλει τα δεδομένα στους συνδεδεμένους στο δίκτυο υπολογιστές. Μπορούμε επίσης να συνδυάσουμε το WiFi με το WiMAX κάνοντας τον router να στείλει τα δεδομένα στους υπολογιστές μέσω WiFi. Αν οι υπολογιστές με εξοπλισμό WiMAX γίνουν κοινό φαινόμενο, τότε θα πρέπει να συνηθίζουμε στην ιδέα του VoIP ως μία ακόμη πραγματικότητα. Αν όλα όσα υπόσχεται το WiMAX γίνουν πράξη, σχεδόν καθένας με laptop θα κάνει κλήσεις με VoIP.

1.7 Εισαγωγή στη μετάδοση χωρίς οπτική επαφή (non line of sight, NLOS)

Ενώ οι περισσότερες τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες αυτόν τον καιρό για σταθερή ευρυζωνική ασύρματη υπηρεσία μπορούν μόνο να παρέχουν LOS κάλυψη, η τεχνολογία WiMAX έχει αναπτυχθεί ώστε να παρέχει έξοχη κάλυψη NLOS. Η προχωρημένη τεχνολογία WiMAX προσφέρει μεγάλες αποστάσεις κάλυψης ως και 50 χιλιόμετρα κάτω από συνθήκες LOS και τυπική κυμλωτή ακτίνα 8 χιλιομέτρων κάτω από συνθήκες NLOS. [7]

Ένας ραδιοδίαυλος σε ένα σύστημα ασύρματων τηλεπικοινωνιών συχνά περιγράφεται ως LOS (line of sight, οπτικής επαφής) είτε NLOS (non line of sight, μη οπτικής επαφής). Σε μία ζεύξη οπτικής επαφής, το σήμα ταξιδεύει σε ένα άμεσο και ανεμπόδιο μονοπάτι από τον πομπό στο δέκτη. Μία τέτοια ζεύξη απαιτεί το περισσότερο μέρος της πρώτης ζώνης Fresnel να είναι καθαρό από οποιοδήποτε εμπόδιο. Αν αυτό το κριτήριο δεν επαληθεύεται, τότε υπάρχει μια σημαντική μείωση στην ισχύ του σήματος. Το ποσοστό της ζώνης που πρέπει να είναι καθαρή, εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας και την απόσταση ανάμεσα σε πομπό και δέκτη.

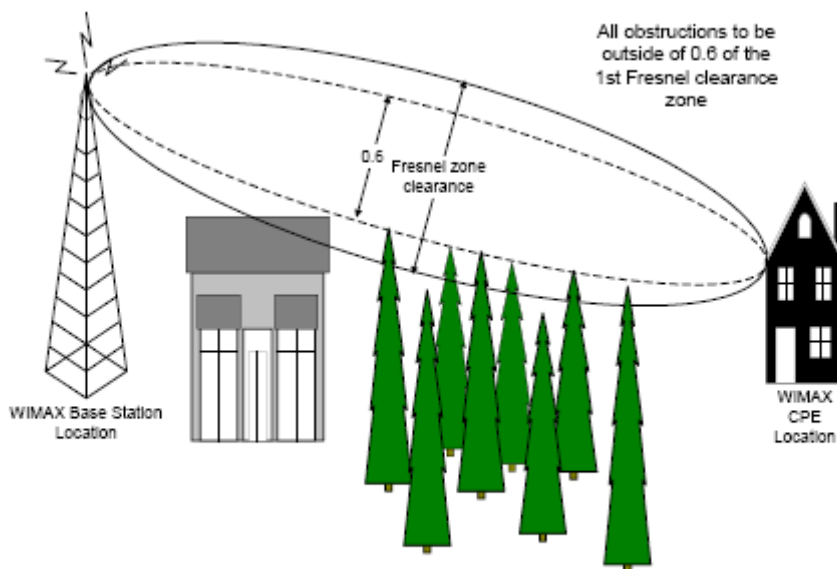


Figure 1 LOS Fresnel zone

Σε μία ζεύξη μη οπτικής επαφής, το σήμα φτάνει στο δέκτη μέσω ανακλάσεων, σκεδάσεων και περιθλάσεων. Το σήμα που φτάνει στο δέκτη περιλαμβάνει στοιχεία από το απευθείας μονοπάτι και πολλαπλά στοιχεία από άλλα μονοπάτια λόγω ανάκλασης, περίθλασης και σκέδασης. Αυτά τα σήματα έχουν διαφορετική διάδοση καθυστέρησης (delay spreads), εξασθένιση και πόλωση σχετικά με αυτό του απευθείας μονοπατιού.

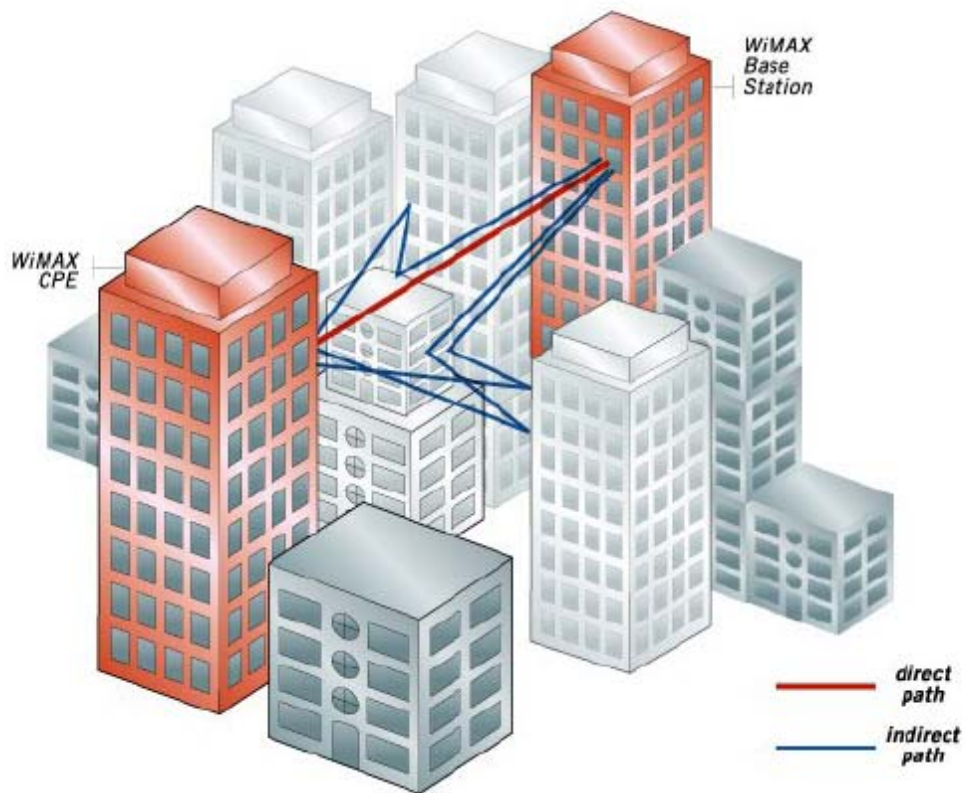


Figure 2 NLOS propagation

Τα φαινόμενα πολλαπλής διαδρομής μπορούν επίσης να προκαλέσουν την αλλαγή της πόλωσης του σήματος. Γι' αυτό, η χρήση πόλωσης ως μέσο επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, όπως συνήθως γίνεται στα LOS περιβάλλοντα, μπορεί να είναι προβληματική στις εφαρμογές NLOS. Το πώς ένα ραδιοσύστημα χρησιμοποιεί αυτά τα πολυδιαδρομικά σήματα ως πλεονέκτημα είναι το κλειδί στην παροχή υπηρεσιών στα NLOS περιβάλλοντα. Ένα προϊόν το οποίο αυξάνει την ισχύ, ώστε να διεισδύει τα εμπόδια (μερικές φορές αποκαλείται near line of sight) δεν είναι τεχνολογία NLOS γιατί η προσέγγιση αυτή ακόμα εξαρτάται σε ένα ισχυρό άμεσο μονοπάτι χωρίς να χρησιμοποιεί ενέργεια παρούσα στα έμμεσα σήματα. Οι συνθήκες κάλυψης LOS και NLOS εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά διάδοσης του περιβάλλοντός τους, την απώλεια διαδρομής και τους πόρους της ραδιοζεύξης.

Υπάρχουν πολλαπλά πλεονεκτήματα που κάνουν τις εγκαταστάσεις NLOS επιθυμητές. Για παράδειγμα, οι αυστηρές σχεδιαστικές απαιτήσεις και οι περιορισμοί ύψους κεραιών συχνά δεν επιτρέπουν στην κεραιά να εγκατασταθεί για LOS. Για μεγάλης κλίμακας γειτονικές κυψελωτές εφαρμογές, όπου η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας είναι σημαντικότερη, χαμηλώνοντας την κεραιά είναι πλεονεκτικό ώστε να μειωθεί η ομοδιαυλική παρεμβολή ανάμεσα στις γειτονικές κυψέλες. Αυτό συχνά αναγκάζει το σταθμό βάσης να λειτουργεί σε συνθήκες NLOS. Τα συστήματα LOS δεν μπορούν να μειώσουν τα ύψη των κεραιών γιατί αν γίνει αυτό θα χειροτερεύσει η θέα από το άμεσο μονοπάτι από το σταθμό εργασίας στο σταθμό βάσης.

Η τεχνολογία NLOS επίσης μειώνει τα έξοδα εγκατάστασης κάνοντας την επίπονη συνήθως διαδικασία της εγκατάστασης πραγματικότητα και διευκολύνοντας την τοποθέτηση αρκετών σταθμών εργασίας. Η τεχνολογία αυτή επίσης μειώνει την ανάγκη για προεγκατάσταση τοποθεσιών έρευνας και βελτιώνει την ακρίβεια των εργαλείων σχεδιασμού NLOS.

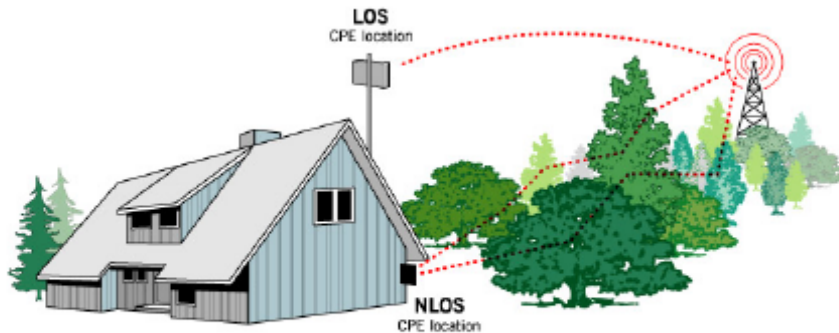


Figure 3 NLOS CPE location

Η τεχνολογία NLOS και τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά του WiMAX κάνουν δυνατή τη χρήση εσωτερικών σταθμών εργασίας. Αυτό έχει δύο κύριες προκλήσεις. Πρώτον, ξεπερνάει τις απώλειες από διεισδύσεις στα κτίρια και δεύτερον, καλύπτονται λογικές αποστάσεις με τη μικρότερη ισχύ εκπομπής και κέρδος κεραίας που συνδέονται με τους εσωτερικούς σταθμούς εργασίας. Το WiMAX δίνει αυτήν τη δυνατότητα και η κάλυψη NLOS μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο λόγω των προαιρετικών δυνατοτήτων του πρωτοκόλλου.

Η τεχνολογία WiMAX λύνει ή περιορίζει τα προβλήματα που δημιουργούνται από τις συνθήκες NLOS χρησιμοποιώντας:

- Τεχνολογία OFDM
- Sub-Channelization
- Κατευθυντικές Κεραίες
- Ποικιλία εκπομπής και λήψης
- Προσαρμόσιμη Διαμόρφωση
- Τεχνικές Διόρθωσης Λαθών
- Έλεγχος ισχύος

1.7.1 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.

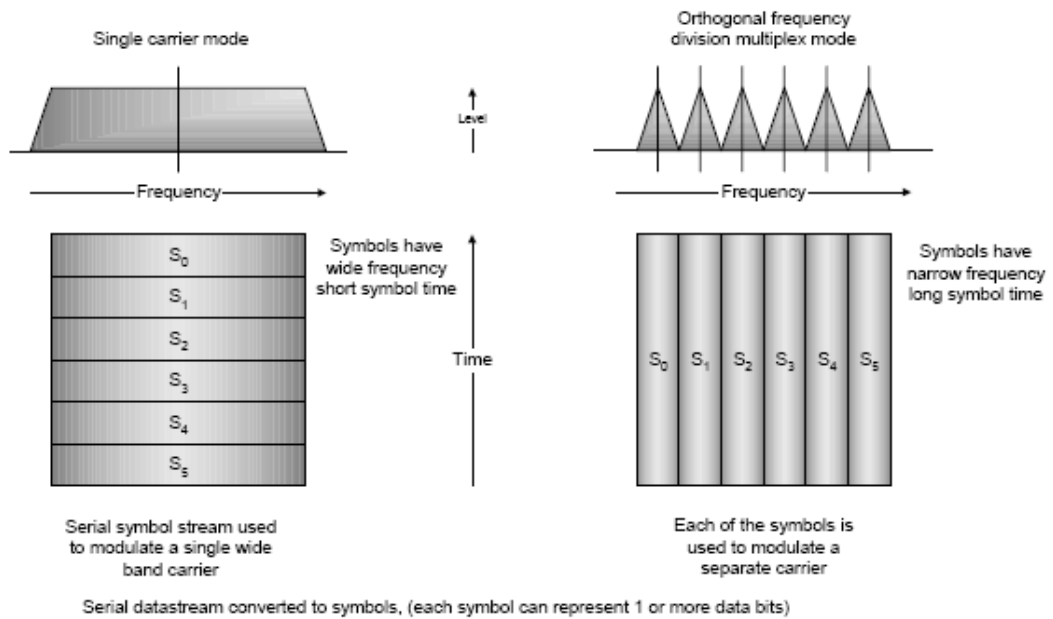


Figure 4 Single carrier and OFDM

Η ικανότητα να ξεπερνιέται η διάδοση καθυστέρησης, η πολυδιάσχυση 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.

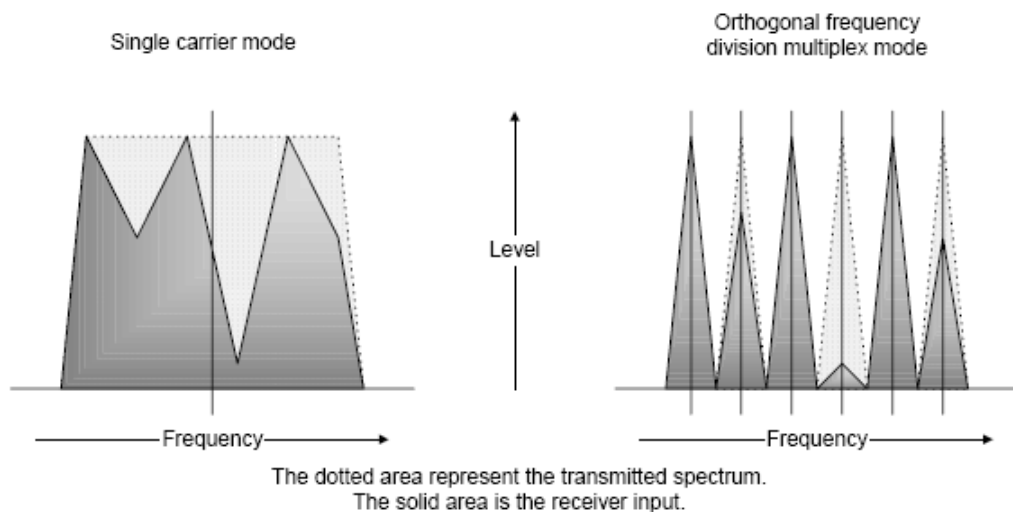


Figure 5 Single carrier and OFDM received signals

Για όλους αυτούς τους λόγους τα τελευταία διεθνή πρότυπα όπως αυτά που θεσπίζονται από την IEEE 802.16™, την ETSI BRAN και την ETRI έχουν εγκαθιδρύσει το OFDM ως την προτιμώμενη τεχνολογία επιλογής.

1.7.2 Sub Channelization

Το sub channelization (υποκαναλοποίηση) στο uplink 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 το uplink. 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.

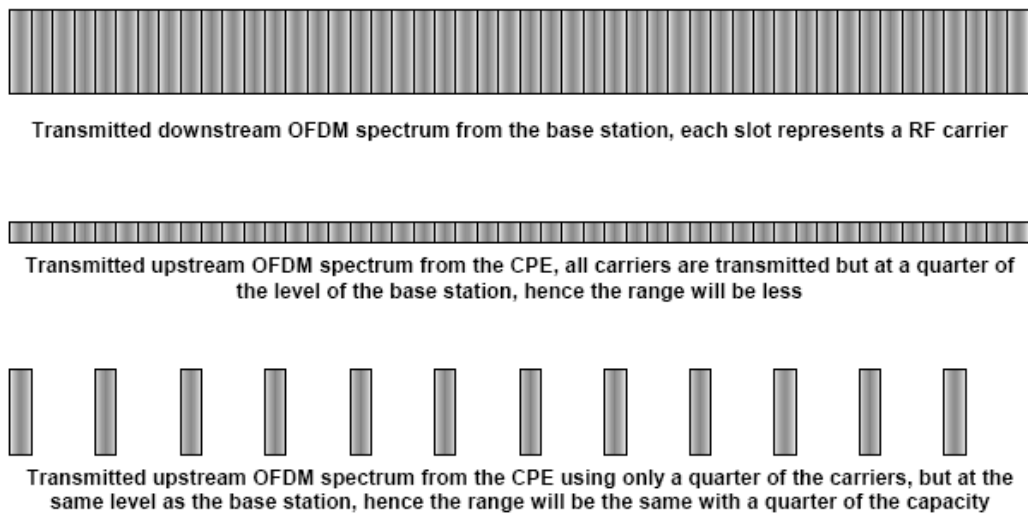


Figure 6 The effect of sub-channelization

1.7.3 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 πολυδιαδρομής 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

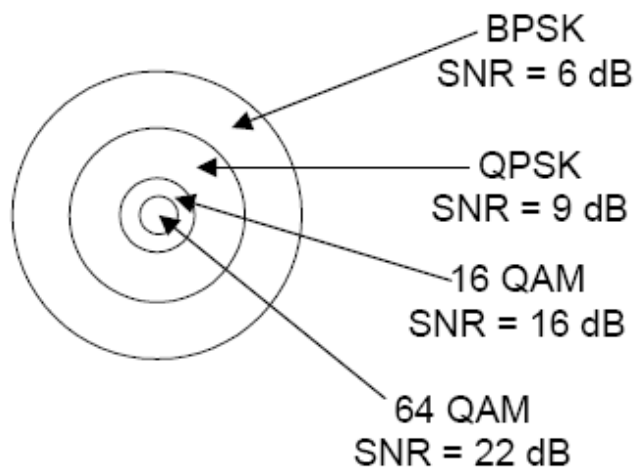
οδηγήσουν την προσοχή τους σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ μεταδίδεται, ένα σήμα μπορεί να περιοριστεί στην επιθυμητή κατεύθυνση του δέκτη. Αντίθετα, κατά τη λήψη του σήματος, τα συστήματα προσαρμοζόμενων κεραιών μπορούν να εστιάσουν μόνο στην κατεύθυνση από όπου το επιθυμητό σήμα 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.

1.7.4 Ποικιλία Εκπομπής και Λήψης

Ποικίλα σχήματα χρησιμοποιούνται για να εκμεταλλευτούν το πλεονέκτημα της πολυδιαδρομής 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.

1.7.5 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

1.7.6 Τεχνικές Διόρθωσης Λαθών

Οι τεχνικές διόρθωσης λαθών έχουν ενσωματωθεί στο WiMAX, ώστε να μειώνονται οι απαιτήσεις του SNR. Ισχυροί αλγόριθμοι Reed Solomon, FEC (Forward Error Correction), συνελκτική κωδικοποίηση και interleaving χρησιμοποιούνται ώστε να ανιχνεύουν και να διορθώνουν τα λάθη και να βελτιώνουν το ρυθμό μετάδοσης. Αυτές οι ισχυρές τεχνικές διόρθωσης λαθών βοηθούν στο να διορθώνονται λανθασμένα πλαίσια που μπορεί να έχουν χαθεί λόγω επιλεκτικής εξασθένισης στη συχνότητα ή έκρηξη λαθών. Η αυτόματη απαίτηση επανάληψης (ARQ) χρησιμοποιείται για να διορθώνει λάθη που δε διορθώνονται από το FEC, έχοντας τη λανθασμένη πληροφορία επεξεργασμένη. Αυτό βελτιώνει σημαντικά την επίδοση του bit error rate (BER) για ένα παρόμοιο επίπεδο κατωφλίου.

1.7.7 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 ισχύος 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.

Κεφάλαιο 2^ο: Προδιαγραφές και Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Φυσικού Στρώματος του 802.16TM - Θόρυβος Φάσης

2.1 Προδιαγραφές WMAN IEEE 802.16TM

Το πρωτόκολλο 802.16aTM αναπτύχθηκε αρχικά για τα συστήματα WMAN. Η ανανεωμένη έκδοσή του, η IEEE 802.16dTM καθορίζει το air interface ενός σταθερού (fixed) point-to-multipoint ευρυζωνικού συστήματος ασύρματης πρόσβασης παρέχοντας πολλαπλές υπηρεσίες σε ένα ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο. Το πρωτόκολλο περιλαμβάνει μια συγκεκριμενοποίηση του φυσικού στρώματος (PHY) η οποία είναι εφαρμόσιμη σε συστήματα που λειτουργούν στις συχνότητες 2-11 GHz. Το air interface σε αυτές τις συχνότητες έχει επιλογές διαμόρφωσης τις WirelessMAN-SCa, WirelessMAN-OFDM, WirelessMAN-OFDMA και τη WirelessHUMAN. [8]

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 εκπεμπόμενου 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.

2.1.1 Φυσικό Στρώμα

Οι ρυθμίσεις για το φυσικό στρώμα του IEEE 802.16dTM OFDM φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Προδιαγραφές Φυσικού Στρώματος OFDM	
Προδιαγραφή	Ρυθμίσεις
Ρυθμός Δεδομένων Πληροφορίας	4-70 Mbps
Σχήμα Διαμόρφωσης	QPSK OFDM, 16-QAM OFDM, και 64-QAM OFDM
Κώδικας Διόρθωσης Λαθών	Reed-Solomon plus Convolutional Code
Ολικός Ρυθμός Κωδικοποίησης	1/2, 3/4, 2/3
Βασικό Μέγεθος FFT	256
Αριθμός subcarriers	200, DC nulled

Αριθμός Πιλοτικών Τόνων	8
Κυκλικό Πρόθεμα (ή Διάστημα Φύλαξης)	1/32, 1/16, 1/8 και 1/4 της περιόδου συμβόλου

Συνεχίζουμε με τα χαρακτηριστικά του συμβόλου OFDM στο πεδίο της συχνότητας. [9] Το σύμβολο αυτό αποτελείται από υπο-φέροντα, ο αριθμός των οποίων καθορίζει το μέγεθος του χρησιμοποιούμενου FFT. Υπάρχουν 3 τύποι υπο-φερόντων:

- Data subcarriers: Για εκπομπή δεδομένων.
- Pilot subcarriers: Για ποικίλους εκτιμητικούς σκοπούς.
- Null subcarriers: Καθόλου εκπομπή, για τις ομάδες φύλαξης, ανενεργά υπο-φέροντα και το DC υπο-φέρον.

Ο σκοπός των ομάδων φύλαξης είναι να επιτρέπουν να decay φυσικά και να δημιουργήσουν το σχήμα του “brick wall” του FFT. Τα υπο-φέροντα είναι μη ενεργά μόνο στην περίπτωση την subchannelized εκπομπή από ένα σταθμό εργασίας.

Η subchannelized εκπομπή στο uplink είναι μια επιλογή για ένα σταθμό εργασίας και πρέπει μόνο να χρησιμοποιούνται αν ο σταθμός βάσης σηματοδοτεί τη δυνατότητά του να αποκωδικοποιεί τέτοια εκπομπή.

2.1.2 Παράμετροι συμβόλου OFDM και εκπεμπόμενο σήμα

Καθορισμός πρωτογενών παραμέτρων:

Τέσσερις πρωτογενείς παράμετροι χαρακτηρίζουν το σύμβολο OFDM:

- BW: Το εύρος ζώνης του καναλιού
- N_{used} : Αριθμός χρησιμοποιούμενων υπο-φερόντων
- n: Παράγοντας δειγματοληψίας. Αυτή η παράμετρος, σε συνδυασμό με τα BW και N_{used} 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} : Η μικρότερη δύναμη του 2 μεγαλύτερη του N_{used} .
- Sampling Frequency: $F_s = \text{floor}(n * BW / 8000) * 8000$
- Subcarrier spacing: $\Delta f = F_s / N_{FFT}$
- Useful symbol time: $T_b = 1 / \Delta f$
- CP Time: $T_g = G * T_b$
- OFDM symbol time: $T_s = T_b + T_g$
- Sampling time: T_b / N_{FFT}

2.1.3 Εκπεμπόμενο σήμα

Η παρακάτω εξίσωση καθορίζει τη διαφορά δυναμικού του εκπεμπόμενου σήματος στην κεραία, σα συνάρτηση του χρόνου, κατά τη διάρκεια ενός OFDM συμβόλου.

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

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.

2.1.4 Παράμετροι του εκπεμπόμενου σήματος

Οι παράμετροι του εκπεμπόμενου OFDM συμβόλου δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

2.1.5 Κωδικοποίηση καναλιού

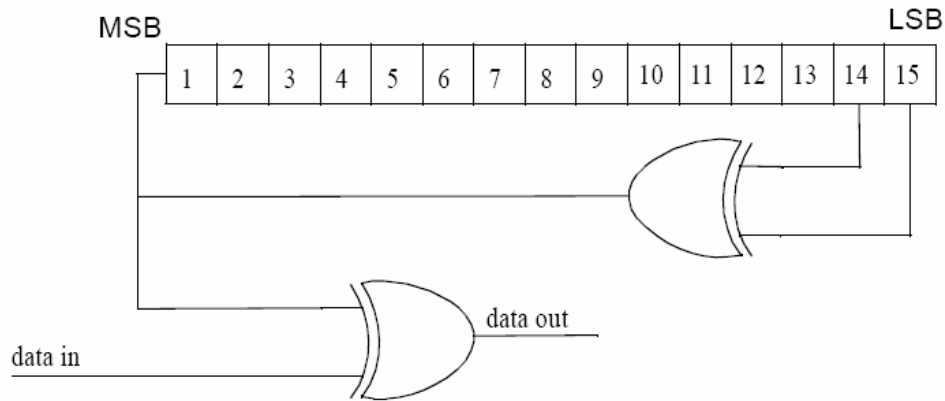
Η κωδικοποίηση του καναλιού αποτελείται από τρία βήματα: randomizer (τυχαία σειρά bits), FEC (Forward Error Coding) και interleaving. Πρέπει να εφαρμόζονται σε αυτήν τη σειρά κατά την εκπομπή. Οι συμπληρωματικές διαδικασίες πρέπει να εφαρμόζονται κατά τη λήψη.

2.1.6 Randomization

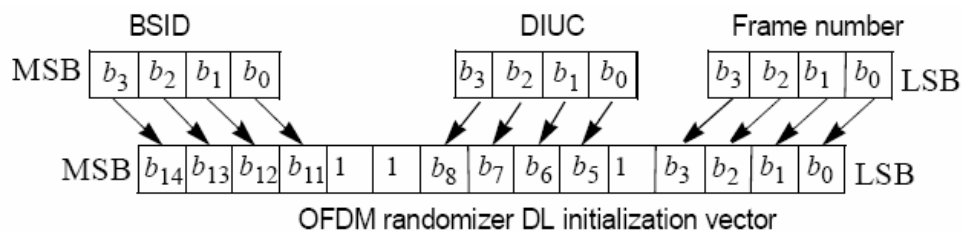
Η τυχαιοποίηση των δεδομένων εκτελείται σε κάθε σειρά δεδομένων στο downlink και στο uplink. Η τυχαιοποίηση εκτελείται σε κάθε περίπτωση (downlink και uplink), το οποίο σημαίνει ότι για κάθε σετ δεδομένων (subchannels στο πεδίο της συχνότητας και σύμβολο OFDM στο πεδίο του χρόνου) ο τυχαιοποιητής θα χρησιμοποιείται ανεξάρτητα. Αν η ποσότητα των δεδομένων προς εκπομπή δεν καλύπτει την ποσότητα των δεδομένων που έχουν δεσμευτεί, τότε γίνεται η διαδικασία του one padding ('γεμίσματος με άσσους') στο τέλος του μπλοκ εκπομπής. Για RS-CC και CC κωδικοποιημένα δεδομένα η διαδικασία του padding γίνεται 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.

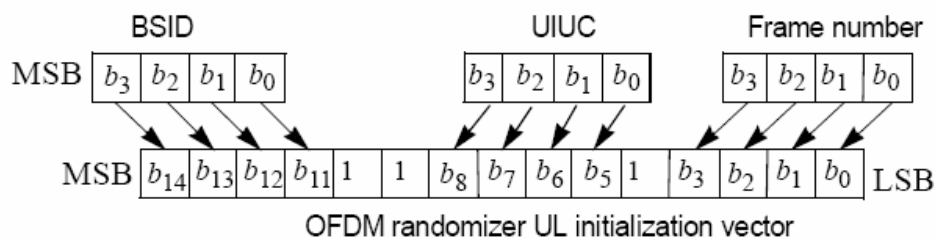
Η γεννήτρια PRBS είναι η $1+x^{14}+x^{15}$ όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Κάθε byte δεδομένων προς εκπομπή πρέπει να εισέρχεται διαδοχικά στον τυχαιοποιητή, με το MSB πρώτο. Τα προόμια (preambles) δεν τυχαιοποιούνται. Η τιμή του seed (σπόρου γεννήτριας) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των bits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



Τα bits που παράγονται από τον τυχαιοποιητή εφαρμόζονται στον κωδικοποιητή (encoder). Στο downlink, 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. Ο αριθμός πλαισίου που χρησιμοποιείται για την αρχικοποίηση αναφέρεται στο πλαίσιο στο οποίο το ρεύμα του downlink εκπέμπεται.



Στο uplink, ο τυχαιοποιητής αρχικοποιείται με το διάνυσμα που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο αριθμός πλαισίου που χρησιμοποιείται για την αρχικοποίηση είναι αυτό του πλαισίου στο οποίο ο χάρτης ροής του uplink εκπέμφθηκε.



2.1.7 FEC

Ένα FEC, αποτελούμενο από τη συνύπαρξη ενός Reed-Solomon εξωτερικού κώδικα και ενός σπάνια συμβατού εσωτερικού συνελκτικού κώδικα, υποστηρίζεται στο uplink και στο downlink. Η υποστήριξη BTC και CTC είναι προαιρετικό. Ο ρυθμός κωδικοποίησης Συνελκτικού-Reed-Solomon κώδικα είναι $\frac{1}{2}$ και πάντα αυτό θα χρησιμοποιείται σαν coding mode όταν ζητείται πρόσβαση στο δίκτυο (εκτός από ρυθμούς subchannelization, όπου χρησιμοποιείται μόνο συνελκτική κωδικοποίηση $\frac{1}{2}$) και στο FCH burst.

Η κωδικοποίηση εκτελείται πρώτα περνώντας τα δεδομένα σε σχήμα μπλοκ μέσω του RS κωδικοποιητή και μετά περνώντας τα μέσω ενός μηδενικά-τερματιζομένου συνελκτικού κωδικοποιητή.

2.1.8 Αλυσιδωτός Reed-Solomon Συνελκτικός Κώδικας (RS-CC)

Η κωδικοποίηση Reed-Solomon παράγεται από ένα συστηματικό RS κώδικα ($N=255, K=239, T=8$) χρησιμοποιώντας $GF(2^8)$, όπου

N είναι ο αριθμός των συνολικών bytes μετά την κωδικοποίηση,

K είναι ο αριθμός των bytes δεδομένων πριν την κωδικοποίηση,

T είναι ο αριθμός των bytes δεδομένων τα οποία μπορεί να διορθωθούν.

Τα ακόλουθα πολυώνυμα χρησιμοποιούνται για το συστηματικό κώδικα:

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

Field Generator Polynomial: $p(x)=x^8+x^4+x^3+x^2+1$

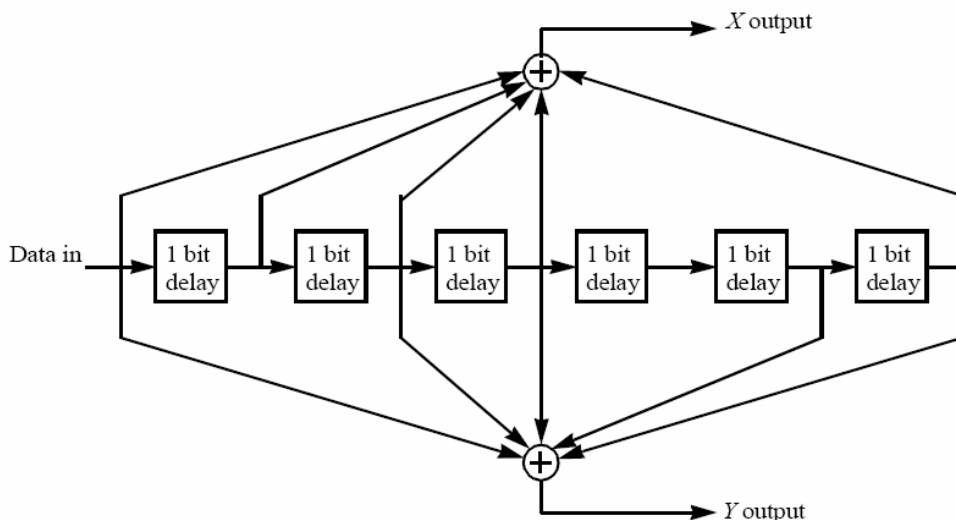
Αυτός ο κώδικας μικραίνει και κόβεται σε ορισμένα σημεία ώστε να επιτρέψει ποικίλα μεγέθη μπλοκ και ποικίλες δυνατότητες διόρθωσης λαθών. Όταν ένα μπλοκ μικραίνει σε K' bytes δεδομένων, προστίθενται $239-K'$ μηδενικά bytes ως πρόθεμα. Μετά την κωδικοποίηση, αυτά τα $239-K'$ μηδενικά bytes αποβάλλονται. Όταν μια κωδική λέξη μικραίνει τόσο ώστε να επιτρέψει τη διόρθωση T bytes, μόνο τα πρώτα $2T$ από τα συνολικά 16 bytes ισοτιμίας παράγονται. Αυτή η bit/byte μετατροπή γίνεται με πρώτο ψηφίο το MSB.

Κάθε RS block κωδικοποιείται από τον δυαδικό συνελκτικό κωδικοποιητή (convolutional encoder), ο οποίος έχει φυσικό ρυθμό $\frac{1}{2}$, ένα περιοριστικό μήκος ίσο με 7 και χρησιμοποιεί τους πολυωνυμικούς κώδικες γεννήτριας όπως φαίνονται παρακάτω ώστε να παράγουν τα 2 bits του κώδικα:

$$G_1 = 171_{OCT} \text{ FOR } X$$

$$G_2 = 133_{OCT} \text{ FOR } Y$$

Η γεννήτρια φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Τα μοτίβα σμίκρυνσης και η σειρά σειριακοποίησης που χρησιμοποιείται ώστε να πραγματοποιηθούν οι διαφορετικές ρυθμοί κωδικοποίησης καθορίζονται στον παρακάτω πίνακα. Στον πίνακα, το «1» σημαίνει ένα εκπεμπόμενο bit Και το «0» δείχνει ένα bit που απομακρύνθηκε, ενώ το X και το Y αναφέρονται στο προηγούμενο σχήμα.

	Code rates			
Rate	1/2	2/3	3/4	5/6
d_{free}	10	6	5	4
X	1	10	101	10101
Y	1	11	110	11010
XY	X_1Y_1	$X_1Y_1Y_2$	$X_1Y_1Y_2X_3$	$X_1Y_1Y_2X_3Y_4X_5$

Ο ρυθμός RS-CC $\frac{1}{2}$ πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται ως η κατάσταση κωδικοποίησης όταν ζητείται πρόσβαση στο δίκτυο.

Η κωδικοποίηση εκτελείται πρώτα περνώντας τα δεδομένα σε σχήμα μπλοκ μέσω του RS κωδικοποιητή και μετά περνώντας το μέσω ενός συνελκτικού κωδικοποιητή. Ένα 0x00 byte ουράς επικολλάται στο τέλος κάθε ροής δεδομένων. Αυτό το byte ουράς πρέπει να επικολλάται μετά από κάθε τυχαιοποίηση. Στον RS encoder, τα εναπομείναντα bits στέλνονται πριν τα εισερχόμενα bits, κρατώντας το 0x00 byte ουράς στο τέλος της δέσμευσης. Όταν ο ολικός αριθμός των bits δεδομένων σε μια ροή δεδομένων δεν είναι ακέραιος αριθμός bytes, μηδενικά bits προστίθενται μετά τα μηδενικά bits της ουράς. Τα μηδενικά bits δεν τυχαιοποιούνται. Σημειώστε ότι αυτή η κατάσταση μπορεί να προκύψει μόνο στο subchannelization. Σε αυτήν την περίπτωση, δε χρησιμοποιείται η κωδικοποίηση RS.

Ο παρακάτω πίνακας δίνει τα μεγέθη μπλοκ και τους ρυθμούς κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται για τις διαφορετικές διαμορφώσεις και ρυθμούς τους. Καθώς η διαμόρφωση 64-QAM είναι προαιρετική για τις εκτός άδειες μπάντες συχνότητας, οι κώδικες για αυτήν τη διαμόρφωση θα χρησιμοποιούνται όταν θα χρησιμοποιείται η διαμόρφωση.

Modulation	Uncoded block size (bytes)	Coded block size (bytes)	Overall coding rate	RS code	CC code rate
BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)	5/6
64-QAM	96	144	2/3	(108,96,6)	3/4
64-QAM	108	144	3/4	(120,108,6)	5/6

Όταν χρησιμοποιείται subchannelization στο uplink, το FEC προσπερνά τον κωδικοποιητή RS και χρησιμοποιεί το Overall Coding Rate όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα ως CC Code Rate. Τα Uncoded Block Size και Coded Block Size μπορούν να υπολογιστούν πολλαπλασιάζοντας τις τιμές στον παραπάνω πίνακα με τον αριθμό των δεσμευμένων υποκαναλιών διαιρεμένα με το 16.

Στην περίπτωση της BPSK διαμόρφωσης, ο κωδικοποιητής RS πρέπει να μη λαμβάνεται υπόψιν.

2.1.9 Interleaver

Όλα τα κωδικοποιημένα bits δεδομένων πρέπει να γίνονται interleaved από έναν μπλοκ interleaver με ένα μέγεθος μπλοκ που αντιστοιχεί στον αριθμό των κωδικοποιημένων bits ανά δεσμευμένων υποκαναλιών ανά OFDM σύμβολο, N_{cbps} . Ο interleaver καθορίζεται από ένα περιορισμό δύο βημάτων. Ο πρώτος είναι ότι σιγουρεύουμε ότι διπλανά κωδικοποιημένα bits μπαίνουν σε μη διπλανά υπο-φέροντα στον αστερισμό. Ο δεύτερος είναι ότι διπλανά κωδικοποιημένα bits μπαίνουν εναλλάξ σε λιγότερο ή περισσότερο σημαντικά bits του αστερισμού, αποφεύγοντας έτσι μεγάλες ακολουθίες χαμηλά σημαντικών bits.

Έστω N_{cpc} ο αριθμός των κωδικοποιημένων bits ανά υπο-φέρον, 1, 2, 4 ή 6 για BPSK, QPSK, 16-QAM ή 64-QAM αντίστοιχα. Έστω $s = \text{ceil}(N_{\text{cpc}}/2)$. Μέσα σε ένα μπλοκ N_{cpc} bits κατά την εκπομπή, έστω k ο δείκτης του κωδικοποιημένου bit πριν τον πρώτο περιορισμό, m_k ο δείκτης του κωδικοποιημένου αυτού bit μετά τον πρώτο και πριν το δεύτερο περιορισμό και έστω j_k ο δείκτης μετά το δεύτερο περιορισμό, ακριβώς πριν το mapping της διαμόρφωσης.

Ο πρώτος περιορισμός δίνεται από την εξίσωση:

$$m_k = (N_{\text{cbps}}/12) * k_{\text{mod}12} + \text{floor}(k/12) \quad k=0,1,\dots,N_{\text{cbps}}-1$$

Ο δεύτερος περιορισμός δίνεται από την εξίσωση:

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

Ο de-interleaver, ο οποίος εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία, καθορίζεται επίσης από δύο περιορισμούς. Μέσα σε ένα μπλοκ N_{cpc} bits κατά την εκπομπή, έστω j ο δείκτης του λαμβανομένου bit πριν τον πρώτο περιορισμό, m_j ο δείκτης του bit αυτού μετά τον πρώτο και πριν το δεύτερο περιορισμό και έστω k_j ο δείκτης μετά το δεύτερο περιορισμό, ακριβώς πριν την αποκωδικοποίηση.

Ο πρώτος περιορισμός δίνεται από την εξίσωση:

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

Ο δεύτερος περιορισμός δίνεται από την εξίσωση:

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

Ο πρώτος περιορισμός στον de-interleaver είναι ο αντίστροφος του δεύτερου περιορισμού στον interleaver και αντίστοιχα για τον δεύτερο.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τα μεγέθη bit interleaver ως συνάρτηση διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.

	Default (16 subchannels)	8 subchannels	4 subchannels	2 subchannels	1 subchannel
	N_{cbps}				
BPSK	192	96	48	24	12
QPSK	384	192	96	48	24
16-QAM	768	384	192	96	48
64-QAM	1152	576	288	144	72

2.1.10 Διαμόρφωση

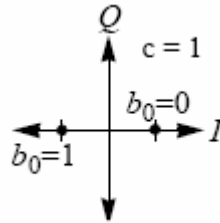
2.1.10.1 Διαμόρφωση Δεδομένων

Μετά το bit interleaving, τα bits των δεδομένων εισέρχονται σειριακά στον αστερισμο. Υποστηρίζονται οι BPSK, Gray-mapped QPSK, 16-QAM και 64-QAM, όπως φαίνεται παρακάτω, ενώ η 64-QAM είναι προαιρετική επιλογή για τις ζώνες χωρίς άδεια. Οι αστερισμοί πρέπει να κανονικοποιούνται πολλαπλασιάζοντας το σημείο του αστερισμού με τον ενδεικνυόμενο παράγοντα c ώστε να επιτευχθεί όμοια μέση ισχύς. Για κάθε διαμόρφωση, το b_o δείχνει το LSB.

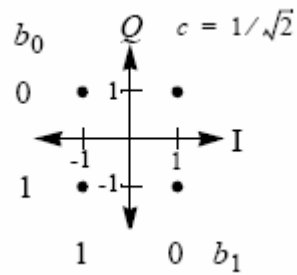
Η δεσμευμένη προσαρμόσιμη διαμόρφωση και κωδικοποίηση πρέπει να υποστηρίζεται στο downlink. Το uplink πρέπει να υποστηρίζει διαφορετικά σχήματα

διαμόρφωσης για κάθε σταθμό εργασίας βασισμένο στα μηνύματα MAC σχηματισμού ροής που προέρχονται από το σταθμό βάσης.

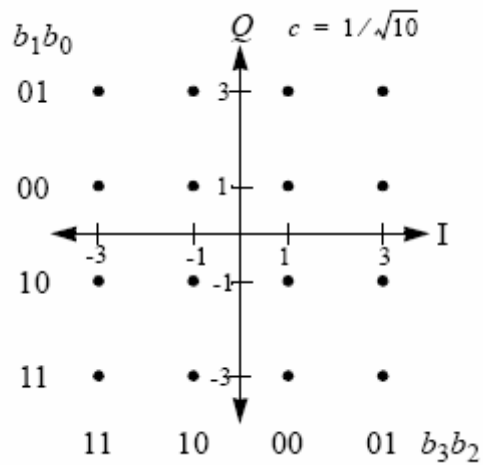
Αστερισμός για BSPK



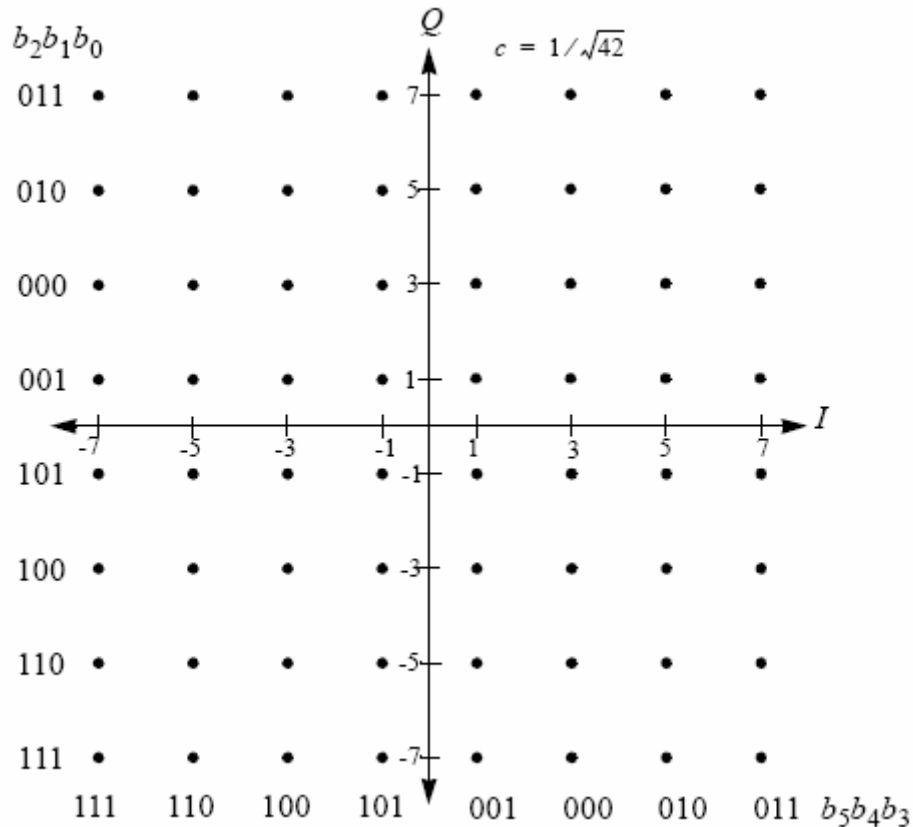
Αστερισμός για QSPK



Αστερισμός για 16-QAM



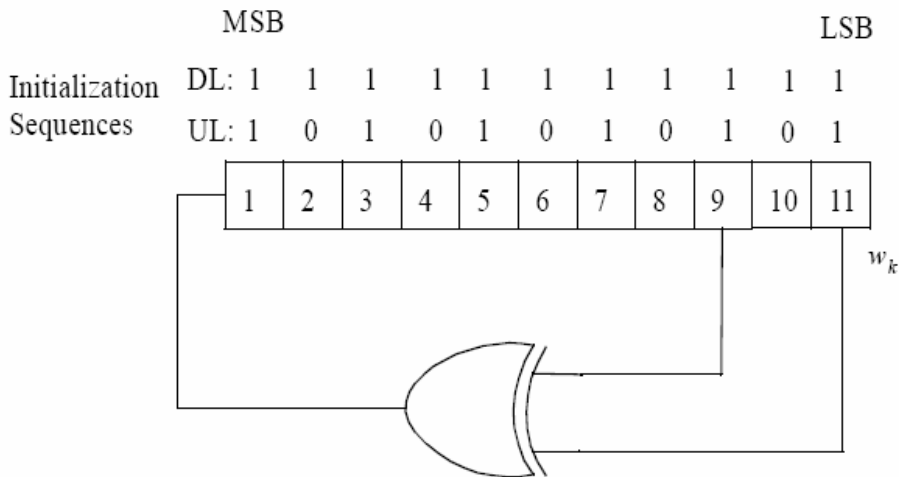
Αστερισμός για 64-QAM



Τα δεδομένα που βρίσκονται σε αστερισμό διαμορφώνονται εν συνεχεία σε όλα τα δεσμευμένα υπο-φέροντα δεδομένων με σειρά αυξανόμενου δείκτη συχνότητας. Το πρώτο σύμβολο εκτός του αστερισμού πρέπει να διαμορφωθεί στο δεσμευμένο υπο-φέρον με το μικρότερο δείκτη συχνότητας.

2.1.10.2 Διαμόρφωση Πιλοτικών φερόντων

Τα πιλοτικά υπο-φέροντα εισάγονται σε κάθε burst δεδομένων ώστε να ολοκληρώσουν το σύμβολο και πρέπει να διαμορφωθούν σύμφωνα με την τοποθεσία του φερόντός τους μέσα στο OFDM σύμβολο. Η PRBS γεννήτρια που φαίνεται παρακάτω χρησιμοποιείται ώστε να παράγει μια ακολουθία, w_k . Το πολυώνυμο για την PRBS γεννήτρια είναι το $x^{11}+x^9+1$.



Η τιμή του για την πιλοτική διαμόρφωση του k συμβόλου OFDM παράγεται από το w_k . Στο downlink ο δείκτης k αναπαριστά το δείκτη του συμβόλου αναφερόμενο στην αρχή του υποπλασίου του downlink. Στο uplink ο δείκτης k αναπαριστά το δείκτη του συμβόλου αναφερόμενο στην αρχή του burst. Στο uplink και στο downlink το πρώτο σύμβολο του προοιμίου (preamble) σημειώνεται με $k=0$. Οι ακολουθίες αρχικοποίησης που χρησιμοποιούνται από το downlink και το uplink φαίνονται στο παραπάνω σχήμα. Στο downlink, αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην ακολουθία 11111111111000000000110... όπου το 3^o 1, όπως το $w_2=1$, χρησιμοποιούνται στο πρώτο OFDM σύμβολο του downlink που ακολουθεί το πλαίσιο του προοιμίου. Για κάθε πιλοτικό φέρον, η BPSK διαμόρφωση παράγεται όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις.

$$\text{DL: } c_{.88}=c_{.38}=c_{63}=c_{88}=1-2w_k \text{ και } c_{.63}=c_{.13}=c_{13}=c_{38}=1-2w_k$$

$$\text{UL: } c_{.88}=c_{.38}=c_{13}=c_{38}=c_{63}=c_{88}=1-2w_k \text{ και } c_{.63}=c_{.13}=1-2w_k$$

2.1.11 Κωδικοποιήσεις ID encodings

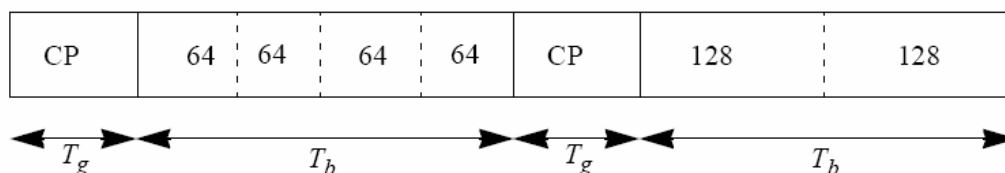
Τα Rate_IDs, τα οποία υποδεικνύουν ποια διαμόρφωση και ποια κωδικοποίηση θα ακολουθηθεί στην πρώτη ροή δεδομένων στο downlink, φαίνονται παρακάτω. Η κωδικοποίηση Rate_ID είναι στατική και δεν μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος.

Rate_ID	Modulation RS-CC rate
0	BPSK 1/2
1	QPSK 1/2
2	QPSK 3/4
3	16-QAM 1/2
4	16-QAM 3/4
5	64-QAM 2/3
6	64-QAM 3/4
7-15	<i>reserved</i>

2.1.12 Δομή προοίμιου και διαμόρφωση

Όλα τα preambles (προοίμια) δομούνται ως ένα από τα 2 OFDM σύμβολα. Τα OFDM σύμβολα καθορίζονται από τις τιμές των δημιουργημένων υπο-φερόντων. Κάθε ένα από τα OFDM σύμβολα περιέχει ένα cyclic prefix (κυκλικό πρόθεμα), του οποίου το μήκος είναι το όπως και για τα OFDM σύμβολα για τα δεδομένα.

Το πρώτο προοίμιο στο downlink PHY PDU, όπως και το αρχικό προοίμιο, αποτελείται από δύο συνεχόμενα OFDM σύμβολα. Το πρώτο OFDM σύμβολο χρησιμοποιεί μόνο υπο-φέροντα, οι δείκτες των οποίων είναι πολλαπλάσιοι των 4. Σαν αποτέλεσμα, η κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου του πρώτου συμβόλου αποτελείται από 4 επαναλήψεις ενός πλαισίου 64 δειγμάτων, ακολουθούμενου από ένα κυκλικό πρόθεμα. Το δεύτερο OFDM σύμβολο περιέχει μόνο άρτια υπο-φέροντα, έχοντας ως αποτέλεσμα 2 επαναλήψεις ενός πλαισίου 128 δειγμάτων, ακολουθούμενο από ένα κυκλικό πρόθεμα. Η δομή στο πεδίο του χρόνου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτός ο συνδυασμός των δύο OFDM συμβόλων αναφέρεται ως long preamble (μεγάλο πρόθεμα).



Οι ακολουθίες στο πεδίο της συχνότητας για όλα τα προοίμια πλήρους εύρους ζώνης παράγονται από την ακολουθία:

$\text{Pall}(-100:100) = \{1-j, 1-j, -1-j, 1+j, 1-j, 1-j, -1+j, 1-j, 1-j, 1-j, 1+j, -1-j, 1+j, 1+j, -1-j, 1+j, -1-j, 1-j, 1-j, -1+j, 1-j, 1-j, 1-j, -1+j, 1-j, 1-j, -1+j, 1-j, 1-j, 1-j, 1+j, -1-j, 1+j\}$

$1+j, -1-j, 1+j, -1-j, -1-j, 1-j, -1+j, 1-j, 1-j, -1-j, 1+j, 1-j, 1-j, -1+j, 1-j, 1-j, 1-j, 1+j, -1-j,$
 $1+j, 1+j, -1-j, 1+j, -1-j, -1-j, 1-j, -1+j, 1+j, 1+j, 1-j, -1+j, 1+j, 1+j, -1-j, 1+j, 1+j, 1+j, -$
 $1+j, 1-j, -1+j, -1+j, 1-j, -1+j, 1-j, 1-j, 1+j, -1-j, -1-j, -1-j, -1+j, 1-j, -1-j, -1-j, 1+j, -1-j, -$
 $1-j, -1-j, 1-j, -1+j, 1-j, 1-j, -1+j, 1-j, -1+j, -1+j, -1-j, 1+j, 0, -1-j, 1+j, -1+j, -1+j, -1-j,$
 $1+j, 1+j, 1+j, -1-j, 1+j, 1-j, 1-j, 1-j, -1+j, -1+j, -1+j, -1+j, 1-j, -1-j, -1-j, -1+j, 1-j, 1+j,$
 $1+j, -1+j, 1-j, 1-j, 1-j, -1+j, 1-j, -1-j, -1-j, -1-j, 1+j, 1+j, 1+j, 1+j, -1-j, -1+j, -1+j, 1+j, -$
 $1-j, 1-j, 1-j, 1+j, -1-j, -1-j, -1-j, 1+j, -1-j, -1+j, -1+j, -1+j, 1-j, 1-j, 1-j, 1-j, -1+j, 1+j,$
 $1+j, -1-j, 1+j, -1+j, -1+j, -1-j, 1+j, 1+j, 1+j, -1-j, 1+j, 1-j, 1-j, 1-j, -1+j, -1+j, -1+j, -1+j,$
 $1-j, -1-j, -1-j, 1-j, -1+j, -1-j, -1-j, 1-j, -1+j, -1+j, -1+j, 1-j, -1+j, 1+j, 1+j, -1-j, -1-j, -$
 $1-j, -1-j, 1+j, 1-j, 1-j\}$

Η ακολουθία στο πεδίο της συχνότητας για την 4x64 ακολουθία P_{4x64} καθορίζεται από:

$$P_{4 \times 64}(k) = \begin{cases} \sqrt{2} \times \sqrt{2} \times \text{conj}(P_{ALL}(k)) & k_{mod4} = 0 \\ 0 & k_{mod4} \neq 0 \end{cases}$$

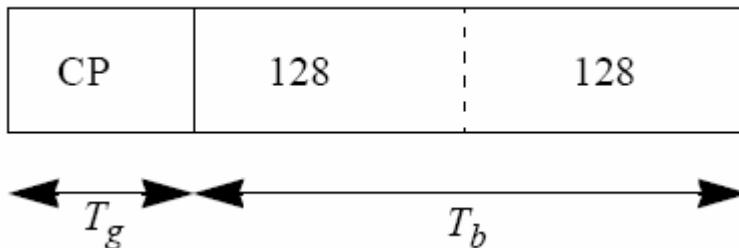
Στην παραπάνω εξίσωση ο παράγοντας της τετραγωνικής ρίζας εξισώνει την RMS ισχύ με αυτήν του τομέα των δεδομένων. Ο προσθετικός παράγοντας (η δεύτερη τετραγωνική ρίζα) αναφέρεται στην ώθηση 3 dB.

Η ακολουθία στο πεδίο της συχνότητας για την 2x128 ακολουθία P_{EVEN} καθορίζεται από:

$$P_{EVEN}(k) = \begin{cases} \sqrt{2} \times P_{ALL}(k) & k_{mod2} = 0 \\ 0 & k_{mod2} \neq 0 \end{cases}$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η τετραγωνική ρίζα αναφέρεται στο 3 dB boost.

Στο uplink, όταν και τα 16 υπο-κανάλια χρησιμοποιούνται, το προοίμιο δεδομένων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα αποτελείται από ένα OFDM σύμβολο κάνοντας χρήση μόνο των άρτιων υπο-φερόντων. Η κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου αποτελείται από 2x128 δείγματα ακολουθούμενο από ένα κυκλικό πρόθεμα. Οι τιμές των υπο-φερόντων πρέπει να τίθενται σύμφωνα με την ακολουθία P_{EVEN} . Αυτό το προοίμιο αναφέρεται ως το short preamble (μικρό πρόθεμα). Αυτό το πρόθεμα πρέπει να προηγείται όλων των δεσμευμένων συμβόλων στο πλαίσιο και χρησιμοποιείται σαν προοίμιο ροής στις ροές δεδομένων downlink.



Οι ροές δεδομένων στο downlink αρχίζουν με ένα προοίμιο, το οποίο εκπέμπεται από όλες τις κεραιές εκπομπής ταυτόχρονα και αποτελείται από ένα μόνο OFDM σύμβολο. Το προοίμιο που εκπέμπεται από την πρώτη κεραία χρησιμοποιεί μόνο άρτια υπο-φέροντα, οι τιμές των οποίων καθορίζονται σύμφωνα με την ακολουθία P_{EVEN} . Το προοίμιο που εκπέμπεται από τη δεύτερη κεραία χρησιμοποιεί μόνο περιττά υπο-φέροντα, οι τιμές των οποίων καθορίζονται από την ακολουθία P_{ODD} .

$$PODD(k) = \begin{cases} 0 & k_{mod2} = 0 \\ \sqrt{2} \times PALI(k) & k_{mod2} \neq 0 \end{cases}$$

2.1.13 Δομή πλαισίου

Στις μπάντες συχνοτήτων με άδεια, η μέθοδος duplexing μπορεί να είναι είτε FDD είτε TDD. Οι σταθμοί εργασίας FDD μπορεί να είναι H-FDD. Στις μπάντες συχνοτήτων χωρίς άδεια, η μέθοδος duplexing είναι η TDD.

Το περιθώριο του πλαισίου συμπεριλαμβάνει εκπομπές (PHY PDUs) από σταθμούς βάσης ή εργασίας, κενά και διαστήματα φύλαξης (guard intervals).

Το PHY του OFDM υποστηρίζει εκπομπές βασισμένες σε πλαίσια. Ένα πλαίσιο αποτελείται από ένα υπο-πλαίσιο downlink και ένα υπο-πλαίσιο uplink. Ένα υπο-πλαίσιο downlink αποτελείται από ένα downlink PHY PDU. Ένα υπο-πλαίσιο uplink αποτελείται από διαστήματα συνοχής σχεδιασμένα για σκοπούς αρχικοποίησης και απαίτησης εύρους ζώνης και ένα ή πολλαπλά uplink PHY PDUs, κάθε ένα εκπεμπόμενα από διαφορετικό σταθμό εργασίας.

Ένα downlink PHY PDU αρχίζει με ένα μεγάλο πρόθεμα, το οποίο χρησιμοποιείται για PHY συγχρονισμό. Το προοίμιο ακολουθείται από ένα FCH burst. Το τελευταίο είναι ένα OFDM σύμβολο και εκπέμπεται χρησιμοποιώντας BPSK ρυθμού $\frac{1}{2}$ με το υποχρεωτικό σχήμα κωδικοποίησης. Το FCH περιέχει DL_Frame_Prefix για να καθορίσει το προφίλ της ροής και μέγεθος από μία ή περισσότερες ροές downlink που αμέσως ακολουθούν το FCH. 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 κάποιος) είτε το DLFP. Αν UCD ή DCD μηνύματα εκπέπονται 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.

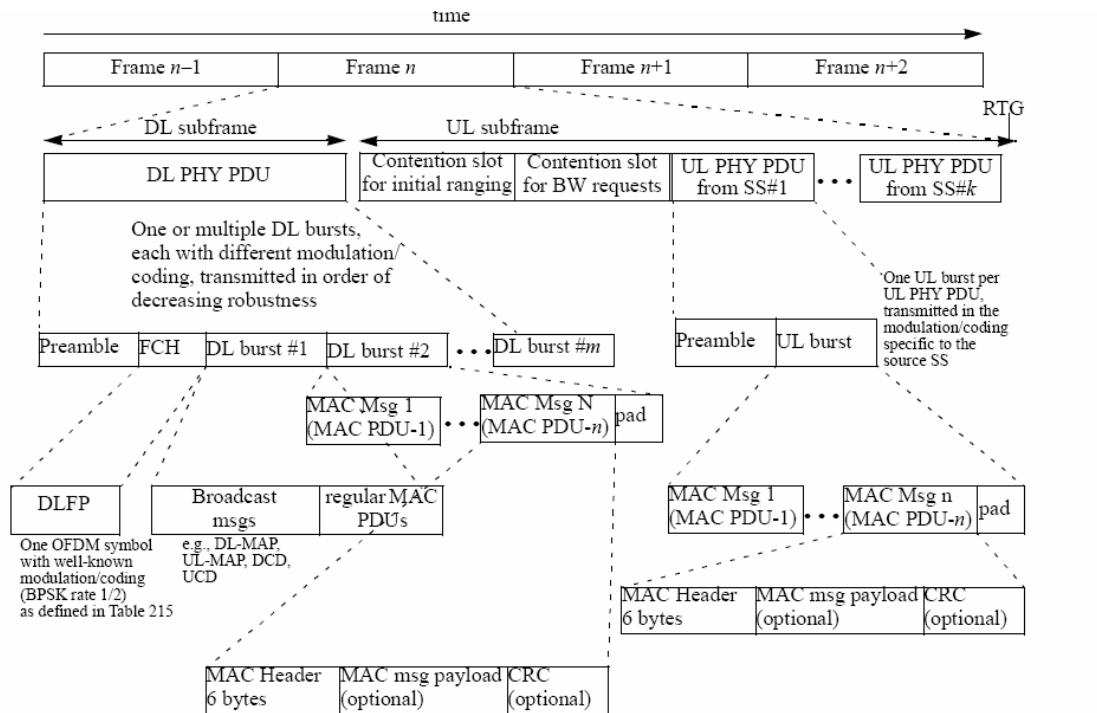
Το FCH ακολουθείται από μία ή πολλαπλές ροές downlink, κάθε ένα εκπέμπεται με διαφορετικό προφίλ ροής. Κάθε ροή downlink αποτελείται από έναν ακέραιο αριθμό OFDM συμβόλων. Η τοποθεσία και το προφίλ της πρώτης ροής downlink καθορίζεται στο Downlink Frame Prefix (DLFP). Η τοποθεσία και το προφίλ του μέγιστου 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.

Το υπο-πλαίσιο DL μπορεί εναλλακτικά να περιέχει μια ζώνη STC στην οποία όλες οι ροές DL είναι κωδικοποιημένα κατά STC. Αν μία ζώνη STC είναι παρούσα, το τελευταία χρησιμοποιημένο IE στο DLFP θα έχει DIUC=0 και το IE θα περιέχει πληροφορίες στην αρχή της ζώνης STC. Η ζώνη STC τελειώνει στο τέλος του πλαισίου.

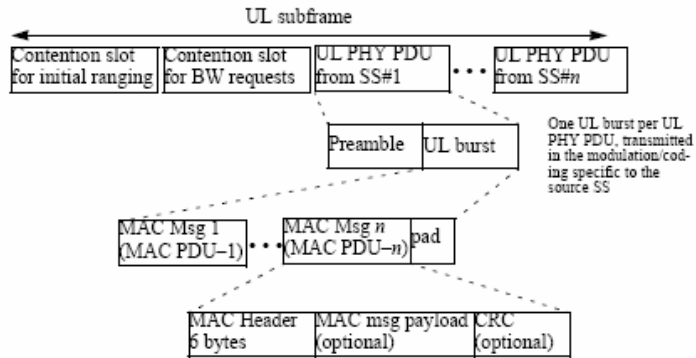
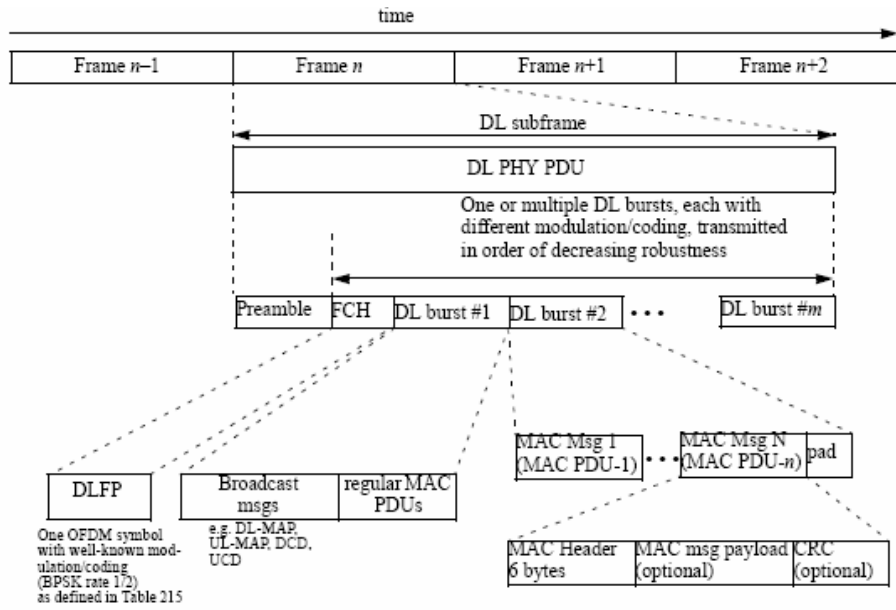
Η ζώνη STC αρχίζει με ένα προοίμιο και μία STC-κωδικοποιημένο FCH-STC ροή, το οποίο εκπέμπεται με BPSK ρυθμού $\frac{1}{2}$. Ακολουθείται από μία ή περισσότερες STC-κωδικοποιημένες PHY ροές. Η πρώτη ροή στη ζώνη STC μπορεί να περιέχει ένα DL-MAP εφαρμόσιμο μόνο στη ζώνη STC. Αν το DL-MAP είναι παρόν, πρέπει να είναι το πρώτο MAC PDU στην πληροφορία της ροής.

Με το PHY του OFDM, μία PHY ροή, είτε downlink PHY ροή, είτε uplink PHY ροή, αποτελείται από ένα ακέραιο αριθμό OFDM συμβόλων, που μεταφέρουν MAC μηνύματα, όπως MAC PDUs. Για να δημιουργηθεί ακέραιος αριθμός OFDM συμβόλων, τα αχρησιμοποίητα bytes στη ροή της πληροφορίας γεμίζουν με Bytes 0xFF. Τότε η πληροφορία πρέπει να τυχαιοποιηθεί, να κωδικοποιηθεί και να διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας τις burst PHY παραμέτρους που έχουν καθοριστεί από το πρωτόκολλο. Αν ένας σταθμός εργασίας δεν έχει δεδομένα προς μετάδοση σε μια uplink δέσμευση, ο σταθμός αυτός θα εκπέμψει ένα UL PHY burst που περιέχει μια επικεφαλίδα απαίτησης εύρους ζώνης, με BR=0 και το βασικό του CID. Αν η δέσμευση είναι αρκετά μεγάλη, ένας σταθμός εργασίας με δυνατότητα AAS μπορεί να παρέχει ένα μήνυμα AAS Feedback Response (AAS-FBCK-RSP). Ένας σταθμός εργασίας εκπέμπει κατά τη διάρκεια όλων των UL δεσμεύσεών του, χρησιμοποιώντας το μηχανισμό padding του πρωτοκόλλου για να γεμίζει τις εναπομείνουσες δεσμεύσεις.

Σε κάθε TTD πλαίσιο, τα TTG και RTG πρέπει να εισέρχονται ανάμεσα στο υπο-πλαίσιο downlink και uplink και στο τέλος κάθε πλαισίου, αντίστοιχα, ώστε να επιτρέπουν στο σταθμό βάσης να γυρνάει.



Στα συστήματα TDD και H-FDD, τα επιτρεπτά όρια των σταθμών εργασίας πρέπει να φτιάχνονται από ένα κενό εκπομπής-λήψης SSTTG και ένα κενό λήψης-εκπομπής SSRTG. Ο σταθμός βάσης δεν πρέπει να εκπέμπει downlink πληροφορία σε ένα σταθμό αργότερα από (SSRTG+RTD) πριν την προγραμματισμένη uplink δέσμευση και δεν πρέπει να εκπέμπει downlink πληροφορία σε αυτόν νωρίτερα από (SSTTG+RTD) μετά από το τέλος της προγραμματισμένης uplink δέσμευσης, όπου RTD σημαίνει Round-Trip-Delay. Οι παράμετροι SSRTG και SSTTG είναι δυνατότητες που παρέχονται από το σταθμό εργασίας στο σταθμό βάσης μετά από απαίτηση κατά τη διάρκεια της εισόδου στο δίκτυο.



2.2 OFDM

2.2.1 Εισαγωγή – Ιστορία του OFDM

Σε αυτό το κεφάλαιο της εργασίας θα δώσουμε βάση στη διαμόρφωση ή καλύτερα, την πολυπλεξία που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο 802.16™, το OFDM (orthogonal frequency division multiplexing). Από τα ωραία παράδοξα της επιστήμης και γενικότερα είναι ότι η ιστορία επαναλαμβάνεται και αυτό δεν αποκλείει την ιστορία της υιοθέτησης προτύπων στις τηλεπικοινωνίες και φυσικά, των σχημάτων διαμόρφωσης που θα ακολουθηθούν αντίστοιχα. Μια μικρή ιστορική αναδρομή κατά την εξέλιξη της τεχνολογίας θα δείξει αυτό το παράδοξο. [10]

Στις συζητήσεις για τα συστήματα 2G στη δεκαετία του 1980, 2 υποψήφιες τεχνικές υπήρχαν, η TDMA (time division multiple access) και η καινοτόμα CDMA (code division multiple access). Τελικά, μετά από συζητήσεις υιοθετήθηκε το σχήμα της TDMA τεχνικής ως πιο δοκιμασμένης.

Το έργο αυτό επαναλήφθηκε στη δεκαετία του 1990 κατά τις συζητήσεις για την υιοθέτηση κάποιας τεχνικής για τα 3G τεχνολογικά συστήματα. Εκεί υπήρχαν επίσης 2 τεχνολογικοί υποψήφιοι, το δοκιμασμένο πλέον CDMA και η καινούρια τεχνική διαμόρφωσης και πολυπλεξίας, OFDM. Η τελευταία, αν και ήταν καινοτόμα και πολλά υποσχόμενη, δεν υιοθετήθηκε τελικά, καθώς μάλλον ήταν η σειρά του CDMA.

Μια δεκαετία αργότερα, όμως, όταν τα πρώτα ασύρματα δίκτυα έγιναν οι αδιαφιλονίκητοι πρωτοπόροι της επικοινωνίας και η ανάγκη για δημιουργία 4G συστημάτων ήταν επιτακτική, η ιστορία επαναλήφθηκε για άλλη μια φορά και το ώριμο πλέον πρωτόκολλο OFDM επικράτησε του νέου συστήματος MIMO-SCM (multiple input multiple output-single carrier modulation) και υιοθετήθηκε αυτό σαν η βάση των πρωτοκόλλων της IEEE 802.11™ και 802.16™.

2.2.2 Τι ακριβώς είναι όμως 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 το πρόβλημα 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. [11]

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 η μείωση του ρυθμού μετάδοσης ανά φέρον (όχι ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης), μειώνεται σημαντικά η επίδραση 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 πολυδιάδευσης, η πλειονότητα των φερόντων μπορεί να ληφθούν επαρκώς. Το OFDM μπορεί να τυχαιοποιεί με επιτυχία τα λάθη burst που προκαλούνται από την εξασθένηση τύπου Rayleigh, τα οποία προκαλούνται από το interleaving 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 υπο-ζώνη είναι σχετικά επίπεδη (relatively flat). Καθώς κάθε υπο-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 υπο-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 υπο-φέροντα. Όπως είναι γνωστό, τα ορθογώνια σήματα μπορούν να διαχωριστούν στο δέκτη με συνελκτικές τεχνικές. Έτσι, η διασυμβολική παρεμβολή ανάμεσα στα κανάλια μπορεί να εξαλειφθεί. Η ορθογωνιότητα μπορεί να επιτευχθεί με την προσεκτική επιλογή διαχωρισμού των υπο-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).

2.2.3 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 (τ), 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 $1/\tau$. Μαθηματικά, υποθέτουμε ότι έχουμε ένα σετ από σήματα Ψ , όπου ψ_p είναι το p -ιστό στοιχείο στο σετ.

Τα σήματα είναι ορθογώνια αν

$$\int_a^b \Psi_p(t) \Psi_q^*(t) dt = \begin{cases} K & \text{for } p = q \\ 0 & \text{for } p \neq q \end{cases}$$

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.

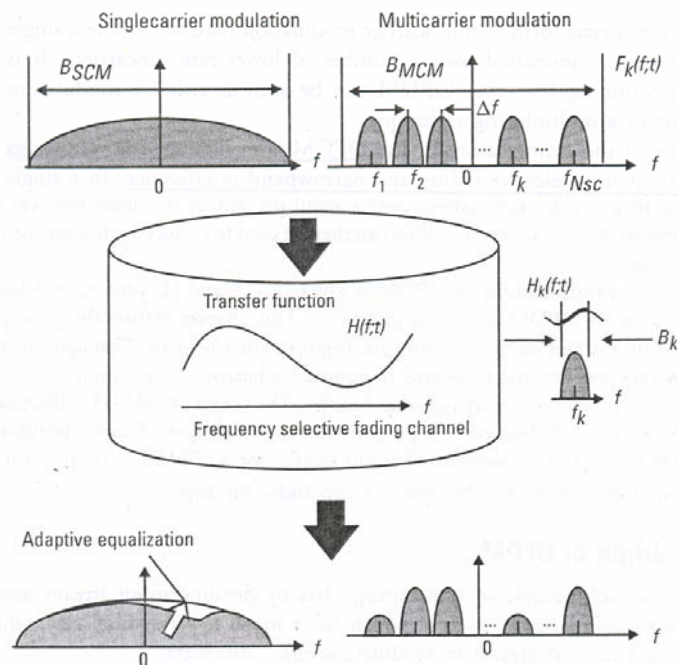
Ένας από τους κύριους λόγους γιατί το OFDM είναι χρήσιμο είναι γιατί επηρεάζει την αντοχή απέναντι στην επιλεκτική εξασθένιση στη συχνότητα και την παρεμβολή στενής ζώνης. Σε ένα σύστημα με ένα φέρον μία μόνο διάλειψη μπορεί να προκαλέσει την ολική κατάρρευση της ζεύξης, αλλά σε ένα σύστημα με πολλά 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. [10]

2.2.4 Μαθηματική αναπαράσταση του σήματος OFDM

Το παρακάτω σχήμα συγκρίνει μια διαμόρφωση μονού φέροντος και μια διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων. Εδώ, τα B_{SCM} και B_{MCM} είναι το εύρος ζώνης των εκπεμπόμενων σημάτων κατά τη διαμόρφωση μονού και πολλαπλών φερόντων, αντίστοιχα. Για τη διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων τα f_k , $F_k(f;t)$, N_{SC} και Δf είναι αντίστοιχα η συχνότητα του k υπο-φερόντος, το φάσμα της συχνότητας της παλμικής

κυματομορφής του k υπο-φέροντος, ο ολικός αριθμός των υπο-φερόντων και το διάστημα μεταξύ των υπο-φερόντων.



Το φάσμα συχνότητας του σήματος κατά τη διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων είναι:

$$S_{MCM}(f; t) = \sum_{k=1}^{N_{SC}} F_k(f; t)$$

Μέσω ενός καναλιού επιλεκτικής εξασθένησης στη συχνότητα χαρακτηριζόμενου από τη συνάρτηση μεταφοράς $H(f; t)$, τα φάσματα των λαμβανομένων σημάτων για τις δύο διαφορετικές διαμορφώσεις είναι τα εξής:

$$\begin{aligned} R_{SCM}(f; t) &= H(f; t) S_{SCM}(f; t) \\ R_{MCM}(f; t) &= H(f; t) S_{MCM}(f; t) \\ &= \sum_{k=1}^{N_{SC}} H_k(f; t) F_k(f; t) \end{aligned}$$

όπου $S_{SCM}(f; t)$ είναι το φάσμα του εκπεμπόμενου SCM σήματος και $H_k(f; t)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού σύμφωνα με το B_k , το οποίο είναι η μπάντα συχνότητας όπου βρίσκεται το k -ιστό υπο-φέρον. Όταν ο αριθμός των συμβόλων είναι μεγάλος, η απόκριση πλάτους και φάσης του $H_k(f; t)$ υποθέτουμε ότι είναι σταθερή πάνω από το B_k , ώστε το $R_{MCM}(f; t)$ να μπορεί να προσεγγιστεί ως εξής:

$$R_{MCM}(f; t) \cong \sum_{k=1}^{N_{SC}} H_k(t) F_k(f; t)$$

όπου $H_k(t)$ είναι η μιγαδική απώλεια δρόμου για το B_k .

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει καθαρά ότι η MCM διαμόρφωση είναι αποτελεσματική και ανθεκτική στα ασύρματα κανάλια, καταπολεμώντας την επιλεκτική εξασθένιση στη συχνότητα. Η MCM διαμόρφωση δεν απαιτεί αλγόριθμο επανάκτησης για κάθε υπο-φέρον, ενώ η SCM διαμόρφωση απαιτεί πολύπλοκη προσαρμόσιμη επανάκτηση.

Θεωρώντας τη διάρκεια συμβόλου στο επίπεδο του υπο-φέροντος ως T_s , το εκπεμπόμενο σήμα γράφεται ως

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{N_{SC}} c_{ki} e^{j2\pi f_k(t-iT_s)} f(t-iT_s)$$

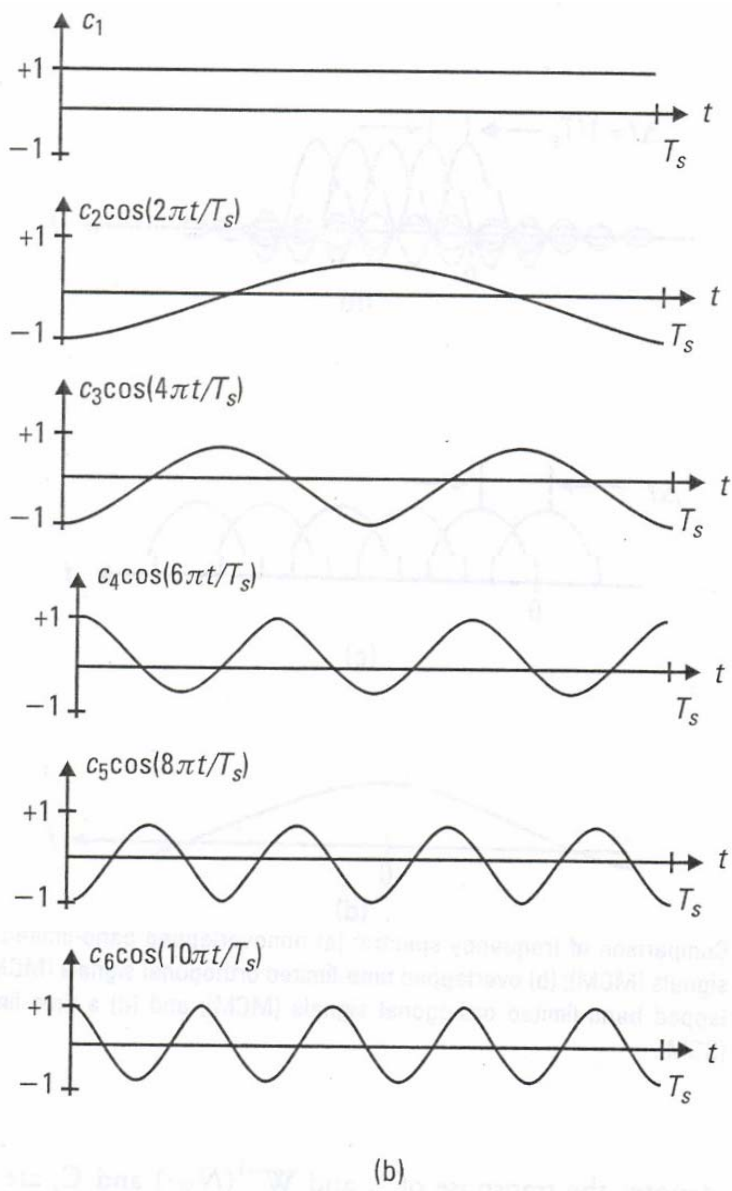
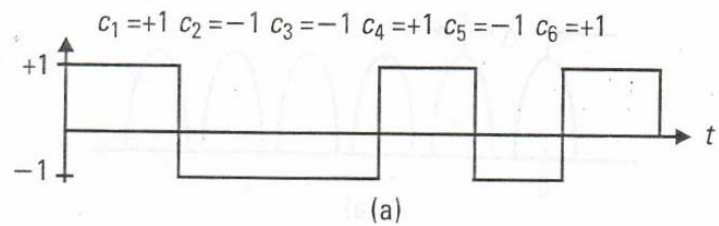
όπου c_{ki} είναι το i -ιοστό σύμβολο πληροφορίας στο k -ιοστό υπο-φέρον και $f(t)$ είναι η παλμική κυματομορφή του συμβόλου. Όταν χρησιμοποιείται η ορθογωνική παλμική κυματομορφή, η $f(t)$ δίνεται ως εξής:

$$f(t) = \begin{cases} 1, & (0 < t \leq T_s) \\ 0, & (t \leq 0, t > T_s) \end{cases}$$

έτσι οι f_k και Δf γράφονται αντίστοιχα ως:

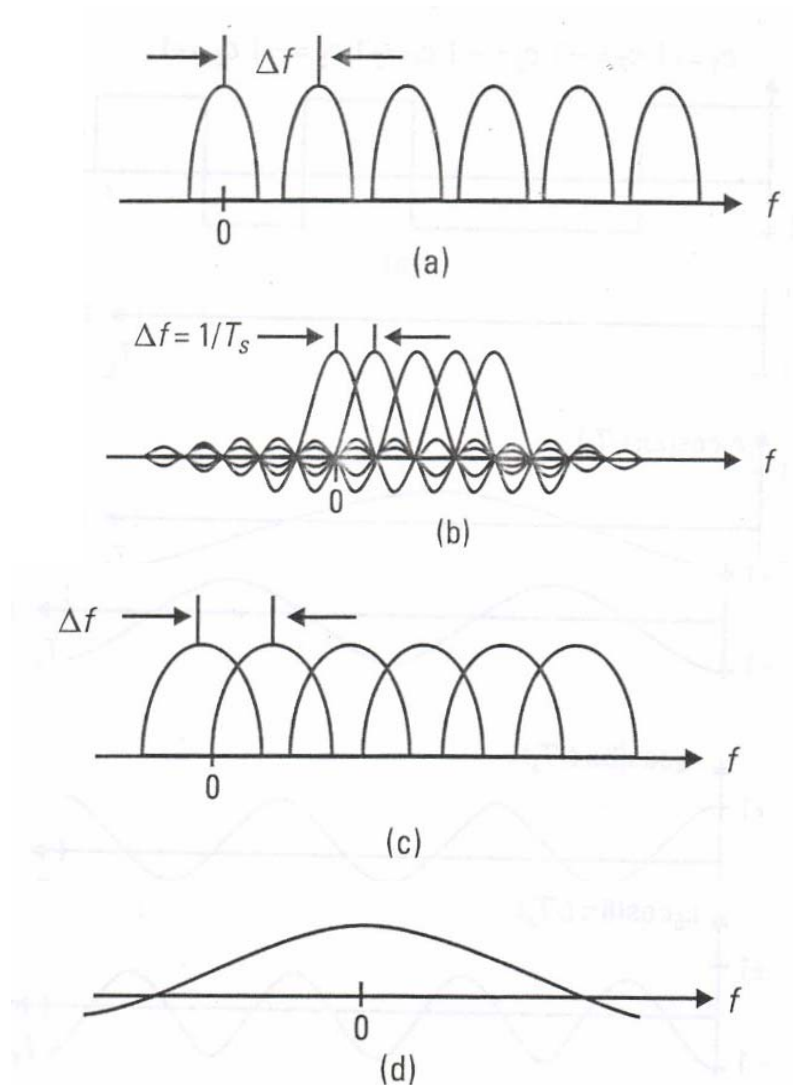
$$f_k = \frac{(k-1)}{T_s}, \Delta f = \frac{1}{T_s}$$

Το παρακάτω σχήμα συγκρίνει ένα σύστημα βασικής ζώνης, σειριακής εκπομπής δεδομένων με ένα σύστημα OFDM. Εδώ, το i δε χρησιμοποιείται για λόγους απλότητας.



Το παρακάτω σχήμα συγκρίνει τα φάσματα συχνοτήτων. Η κλασική MCM διαμόρφωση με μη επικαλυπτόμενα περιορισμένης ζώνης ορθογωνικά σήματα ταιριάζει στη χρήση αναλογικών ταλαντωτών υπο-φερόντων και φίλτρων, αλλά απαιτεί πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης (πρώτο σχήμα). Αν εφαρμόζαμε την ορθογωνική παλμική κυματομορφή για τα υπο-φέροντα, το φάσμα συχνότητας των κυματομορφών είναι διασπαρμένα ευρέως και επικαλυπτόμενα (δεύτερο σχήμα), αν και μπορεί να σώσει το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Έτσι, το concept του OFDM εγκαταλείφθηκε εξαιτίας της δυσκολίας στην ανάκτηση των υπο-φερόντων χωρίς παρεμβολή εντός των υπο-φερόντων με χρήση αναλογικών φίλτρων. Σαν

αποτέλεσμα, έναν αριθμός ερευνών στη δεκαετία του 1960 αφιερώθηκαν για την MCM διαμόρφωση με τη χρήση επικαλυπτόμενων περιορισμένης ζώνης ορθογωνίων σημάτων (τρίτο σχήμα). Αυτό συμβαίνει γιατί τα αναλογικά φίλτρα μπορούν εύκολα να διαχωρίσουν τέτοια σήματα. Στο τέταρτο σχήμα περιέχεται το φάσμα συχνότητας ενός χρονικά περιορισμένου σήματος.



- a) Μη επικαλυπτόμενα περιορισμένης ζώνης ορθογώνια σήματα
- b) Επικαλυπτόμενα ορθογώνια σήματα περιορισμένου χρόνου
- c) Επικαλυπτόμενα ορθογώνια σήματα περιορισμένης ζώνης
- d) Ένα σήμα περιορισμένου χρόνου

Μία άλλη μαθηματική έκφραση και υλοποίηση του σήματος OFDM είναι η ακόλουθη: [12]

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp(j2\pi(f_c - \frac{i+0.5}{T})(t-t_s)) \right\}, t_s \leq t \leq t_s + T$$

$$s(t) = 0, t < t_s \text{ and } t > t_s + T$$

όπου :

N_s είναι ο αριθμός των υπο-φερόντων

T είναι η διάρκεια του συμβόλου

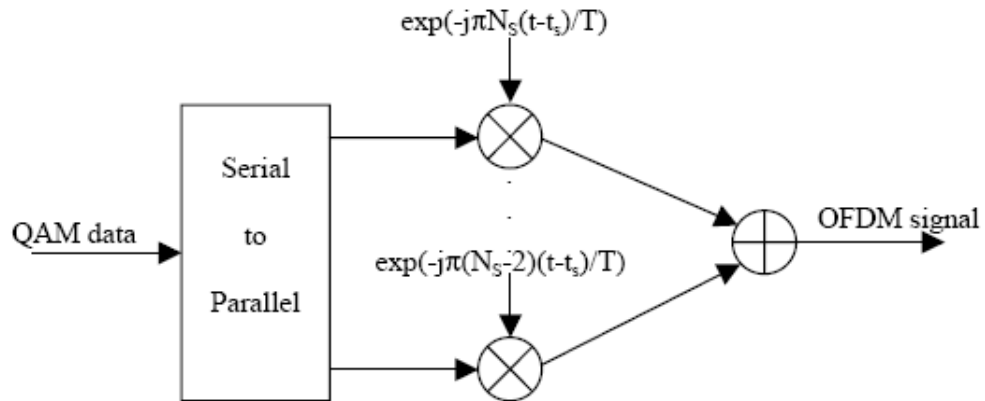
f_c είναι η συχνότητα του φέροντος

Η αντίστοιχη μιγαδική εξίσωση βασικής ζώνης δίνεται ως εξής:

$$s(t) = \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp(j2\pi \frac{i}{T}(t-t_s)) \quad , t_s \leq t \leq t_s + T$$

$$s(t) = 0, t < t_s \text{ and } t > t_s + T$$

Σε αυτήν την περίπτωση, τα πραγματικά και φανταστικά μέρη αντιστοιχούν στα I και Q μέρη του σήματος OFDM αντίστοιχα. Πρέπει να πολλαπλασιαστούν με ένα συνημίτονο και ένα ημίτονο της επιθυμητής συχνότητας για να παράγουν το τελικό σήμα OFDM. Το παρακάτω σχήμα δείχνει το μπλοκ διάγραμμα για το διαμορφωτή OFDM.



Το μιγαδικό σήμα OFDM βασικής ζώνης που καθορίζεται στην παραπάνω εξίσωση είναι ο αντίστροφος Μ/Σ Fourier των N_s εισαγόμενων συμβόλων QAM. Η περίπτωση του διακριτού χρόνου είναι ο αντίστροφος διακριτός Μ/Σ Fourier. Στην πράξη, αυτός ο Μ/Σ μπορεί να υλοποιηθεί πολύ αποδοτικά από τον αντίστροφο Μ/Σ fast Fourier (IFFT). Ο IFFT δραστηκά μειώνει τον αριθμό των υπολογισμών λόγω των κανονικοποιήσεων που γίνονται και την αναγωγή στις δυνάμεις του 2. Έτσι, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, από N^2 που είναι στον DFT, γίνεται $N \log N$ στον FFT.

2.3 Χρήση Μετασχηματισμού Fourier

2.3.1 Ο Μ/Σ Fourier – Μια εισαγωγή

Ο Μ/Σ Fourier μας επιτρέπει να σχετίζουμε γεγονότα στο πεδίο του χρόνου με γεγονότα στο πεδίο της συχνότητας. [11] Υπάρχουν αρκετές εκδοχές του Μ/Σ Fourier και η επιλογή προς το ποια θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται στις συγκεκριμένες συνθήκες εργασίας. Ο συμβατικός Μ/Σ σχετίζεται με συνεχόμενα σήματα τα οποία δεν είναι περιορισμένα είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας. Πάντως, η επεξεργασία του σήματος γίνεται ευκολότερη αν τα σήματα έχουν υποστεί δειγματοληψία. Η δειγματοληψία των σημάτων με άπειρο φάσμα οδηγεί σε παραμόρφωση και η επεξεργασία των σημάτων τα οποία δεν είναι χρονικά περιορισμένα μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα αποθηκευτικού χώρου. Για να αποφευχθεί αυτό, η πλειονότητα της επεξεργασίας σήματος χρησιμοποιεί μια έκδοση του διακριτού Μ/Σ Fourier (DFT). Ο DFT είναι μια εξέλιξη του κανονικού Μ/Σ στον οποίο τα σήματα δειγματοληπτούνται στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Εξ ορισμού, η χρονική κυματομορφή πρέπει να επαναλαμβάνεται συνεχώς και αυτό οδηγεί σε ένα φάσμα συχνοτήτων που επαναλαμβάνεται συνεχώς στο πεδίο της συχνότητας. Ο Μ/Σ fast Fourier (FFT) είναι απλώς μία γρήγορη μαθηματική μέθοδος για υπολογιστικές εφαρμογές του DFT. Είναι η διαθεσιμότητα αυτής της τεχνικής και η τεχνολογία που της επιτρέπει να υλοποιηθεί σε ολοκληρωμένα κυκλώματα σε μια λογική τιμή, που έχει επιτρέψει στο OFDM να έχει αναπτυχθεί τόσο πολύ όσο έχει μέχρι σήμερα. Η διαδικασία του μετασχηματισμού από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας χρησιμοποιεί τον ίδιο το Μ/Σ Fourier, όπου η αντίστροφη διαδικασία χρησιμοποιεί τον αντίστροφο Μ/Σ Fourier.

2.3.2 Μαθηματική αναπαράσταση του Μ/Σ Fourier

Η ιδέα της χρησιμοποίησης του Μ/Σ Fourier αναβίωσε τη διαμόρφωση MCM χρησιμοποιώντας χρονικά περιορισμένα ορθογώνια σήματα, δηλαδή, OFDM. [10]

Δειγματοληπτώντας το σήμα $s(t)$ ($iT_s < t \leq (i+1)T_s$) με ρυθμό δειγματοληψίας t_{spl} ($=T_s/N_{SC}$), το εκπεμπόμενο σήμα γράφεται σε μια στήλη διάνυσμα ως εξής:

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= [s(iT_s + t_{spl}), \dots, s(iT_s + qt_{spl}), \dots, s(iT_s + N_{SC}t_{spl})]^T \\ &= \mathbf{W}^{-1}(N_{SC}) \mathbf{C}_i \end{aligned}$$

όπου \mathbf{W}^{-1} είναι ο αντίστροφος πίνακας του \mathbf{W} και το $\mathbf{W}^{-1}(N_{SC})$ και το \mathbf{C}_i είναι ο πίνακας αντίστροφου Fourier N_{SC} -σημείων και το i -ιοστό (στήλη) διάνυσμα συμβόλων, αντίστοιχα:

$$\mathbf{W}^{-1}(N_{SC}) = \{w_{qk}^{-1}\}$$

$$w_{qk}^{-1} = e^{j2\pi \frac{q(k-1)}{N_{SC}}}$$

$$\mathbf{C}_i = [c_{1i}, c_{2i}, \dots, c_{N_{SC}i}]^T$$

Η αρχική εξίσωση δείχνει ξεκάθαρα ότι το εκπεμπόμενο διάνυσμα συμβόλων ανακτάται στο δέκτη με χρήση Μ/Σ Fourier:

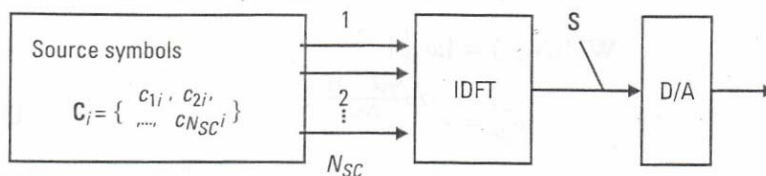
$$\mathbf{C}_i = \mathbf{W}(N_{SC})\mathbf{S}$$

όπου $\mathbf{W}(N_{SC})$ είναι ο πίνακας Fourier N_{SC} -σημείων που ορίζεται ως εξής:

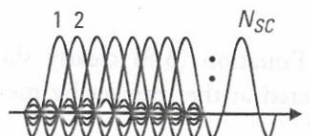
$$\mathbf{W}(N_{SC}) = \{w_{qk}\}$$

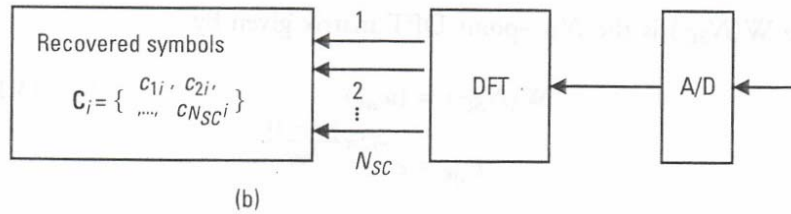
$$w_{qk} = e^{-j2\pi \frac{q(k-1)}{N_{SC}}}$$

Το παρακάτω σχήμα δείχνει το σύστημα OFDM χρησιμοποιώντας το Μ/Σ Fourier. Όταν χρησιμοποιούμε ορθογώνιο παράθυρο Fourier στο δέκτη, η παρεμβολή μεταξύ των υπο-φερόντων μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως.



(a)

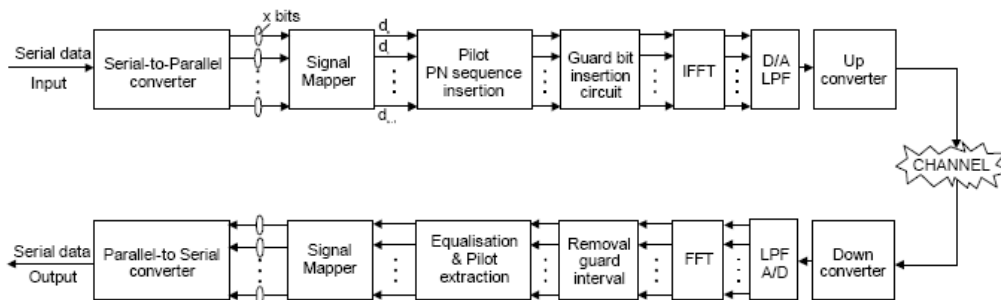




Η χρήση του Μ/Σ Fourier (ορθού και αντίστροφου) εξαλείφει πλήρως τα προβλήματα στον πομπό και δέκτη και ακόμα, αν ο αριθμός των υπο-φερόντων επιλεγεί ως δύναμη του 2, μπορούμε να αντικαταστήσουμε τον απλό DFT με τον FFT.

2.3.3 Η χρήση του FFT στο OFDM

Ο κύριος λόγος που η τεχνική OFDM άργησε να γίνει εφικτή και διαδεδομένη ήταν πρακτικός. Ήταν πολύ δύσκολο να δημιουργηθεί ένα τέτοιο σήμα και ακόμη πιο δύσκολο να ληφθεί και να αποδιαμορφωθεί. Η λύση του hardware, η οποία κάνει χρήση πολλαπλών διαμορφωτών και αποδιαμορφωτών, ήταν σχετικά μη πρακτική για χρήση σε λειτουργικά συστήματα. Η ικανότητα να καθοριστεί το σήμα στο πεδίο της συχνότητας με software σε επεξεργαστές VLSI και να δημιουργηθεί το σήμα χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο Μ/Σ Fourier είναι το κλειδί για την τωρινή του δημοσιότητα. Η χρήση της αντίστροφης διαδικασίας στο δέκτη είναι αναγκαία αν φτηνοί και αξιόπιστοι δέκτες είναι διαθέσιμοι. Αν και οι αυθεντικές προτάσεις έγιναν πριν από πολύ καιρό, χρειάστηκε ακόμα περισσότερος χρόνος για να συμβαδίσει και η τεχνολογία με τις προτάσεις αυτές. Στον πομπό, το σήμα ορίζεται στο πεδίο της συχνότητας. Είναι ένα ψηφιακό δειγματοληπτόμενο σήμα και ορίζεται έτσι ώστε το φάσμα του διακριτού Μ/Σ Fourier υφίσταται μόνο στις διακριτές συχνότητες. Κάθε φέρον OFDM αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο αυτού του φάσματος του διακριτού Μ/Σ Fourier. Τα πλάτη και οι φάσεις των φερόντων εξαρτώνται από τα προς εκπομπή δεδομένα. Οι μεταβάσεις των δεδομένων συγχρονίζονται στα φέροντα και μπορούν να επεξεργάζονται μαζί, σύμβολο με σύμβολο.



Σχήμα: Μπλοκ διάγραμμα ενός OFDM συστήματος χρησιμοποιώντας FFT, πιλοτικά φέροντα και εισαγωγή ενός bit φύλαξης

Ο ορισμός του διακριτού Μ/Σ Fourier N σημείων είναι:

$$X_p[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x_p[n] e^{-j(2\pi/N)kn} \quad \text{(DFT)}$$

και ο αντίστροφος διακριτός Μ/Σ Fourier Ν σημείων είναι:

$$x_p[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_p[k] e^{j(2\pi/N)kn} \quad \text{(IDFT)}$$

Μια φυσική συνέπεια της μεθόδου αυτής είναι ότι μας επιτρέπει να δημιουργούμε φέροντα που είναι ορθογώνια. Τα μέλη ενός ορθογώνιου συνόλου είναι γραμμικά ανεξάρτητα. Υποθέτοντας μία ακολουθία δεδομένων (d0, d1, d2, ..., dN-1), όπου κάθε dn είναι ένας μιγαδικός αριθμός dn=an+jbn. (an, bn=+-1 για QPSK, an, bn=+-1, +-3 για 16QAM, ...)

$$D_m = \sum_{n=0}^{N-1} d_n e^{-j(2\pi mn/N)} = \sum_{n=0}^{N-1} d_n e^{-j2\pi f_n t_m} \quad \text{k=0,1,2, ..., N-1}$$

όπου $f_n = n/(N\Delta T)$, $t_k = k\Delta t$ και Δt είναι μία αυθαίρετα επιλεγμένη διάρκεια συμβόλου της σειριακής ακολουθίας δεδομένων dn.

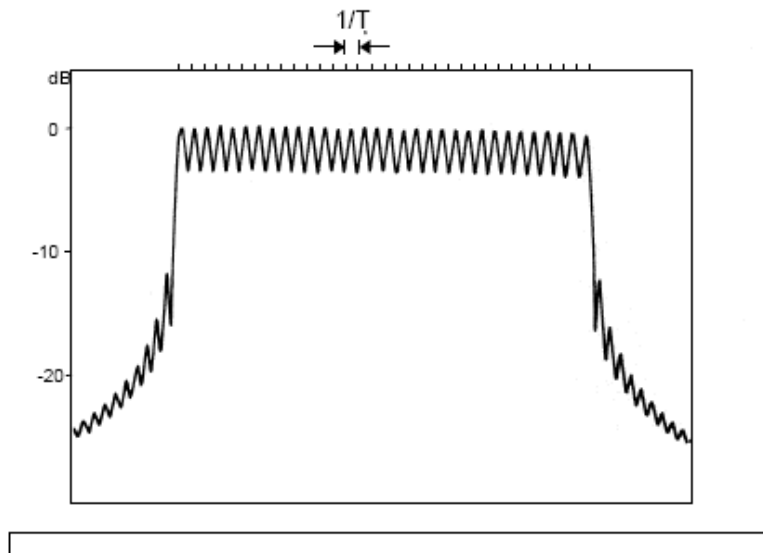
Το πραγματικό μέρος του διανύσματος D έχει στοιχεία

$$Y_m = \text{Re}\{D_m\} = \sum_{n=0}^{N-1} \left[(a_n \cos(2\pi f_n t_m) + b_n \sin(2\pi f_n t_m)) \right], \quad \text{k=0,1, ..., N-1}$$

Αν αυτά τα στοιχεία εφαρμοστούν σε ένα βαθυπερατό φίλτρο σε χρονικά διαστήματα Δt , ένα σήμα περιέχεται που προσεγγίζει αρκετά το σήμα της πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας

$$y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[(a_n \cos(2\pi f_n t_m) + b_n \sin(2\pi f_n t_m)) \right], \quad 0 \leq t \leq N\Delta t$$

Το προηγούμενο σχήμα δείχνει τη διαδικασία ενός τυπικού FFT-based OFDM συστήματος. Τα εισερχόμενα σειριακά δεδομένα πρώτα μετατρέπονται από σειριακά σε παράλληλα και ομαδοποιούνται σε x bits καθένα από τα οποία δημιουργούν ένα μιγαδικό αριθμό. Ο αριθμός x καθορίζει το σηματικό αστερισμό του αντίστοιχου υπο-φέροντος, όπως η 16 QAM ή η 32QAM. Οι μιγαδικοί αριθμοί διαμορφώνονται στη βασική ζώνη από τον αντίστροφο Μ/Σ Fourier (IFFT) και ξαναμετατρέπονται σε σειριακά δεδομένα για εκπομπή. Ένα διάστημα φύλαξης εισάγεται ανάμεσα στα σύμβολα για την αποφυγή διασυμβολικής παρεμβολής που προκαλείται από παραμόρφωση λόγω πολυδιάδεσης. Τα διακριτά σύμβολα μετατρέπονται σε αναλογικά και φιλτράρονται με βαθυπερατά φίλτρα για RF μετατροπή στο uplink. Ο δέκτης εφαρμόζει την αντίστροφη διαδικασία από ότι ο πομπός. Ένας one-tap εξισωτής χρησιμοποιείται για να διορθώσει την παραμόρφωση του καναλιού. Οι συντελεστές tap του φίλτρου υπολογίζονται βασισμένοι στην πληροφορία του καναλιού.



Το παραπάνω σχήμα δείχνει τη φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος OFDM με ένα διάστημα φύλαξης $T_s/4$ (αριθμός υπο-φερόντων $N = 32$)

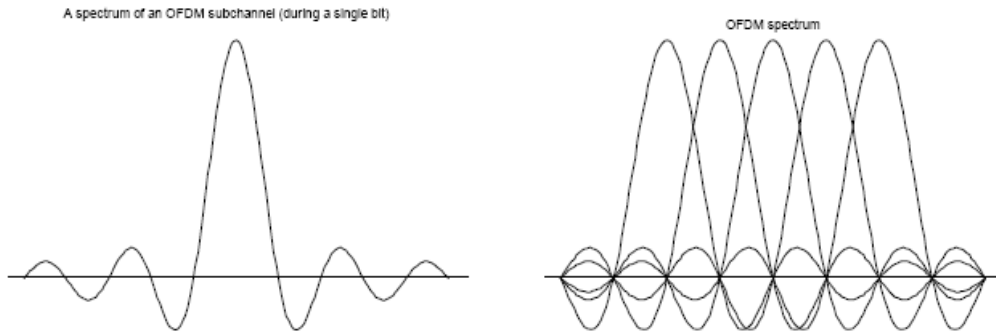


Fig. 4 Examples of OFDM spectrum (a) a single subchannel, (b) 5 carriers
At the central frequency of each subchannel, there is no crosstalk from other subchannels

Το αριστερό σχήμα δείχνει το φάσμα ενός φέροντος OFDM και το δεξιό σχήμα δείχνει το σύνθετο φάσμα του OFDM (φαίνονται 5 φέροντα). Με την προσεκτική επιλογή του διαστήματος μεταξύ των υπο-φερόντων, το φάσμα του OFDM σήματος μπορεί να γίνει επίπεδο και η ορθογωνιότητα μεταξύ των υπο-φερόντων μπορεί να εγγυηθεί.

Ο ευθύς Μ/Σ Fourier παίρνει ένα τυχαίο σήμα, το πολλαπλασιάζει διαδοχικά με μιγαδικούς εκθετικούς συντελεστές στο φάσμα των συχνοτήτων, προσθέτει κάθε γινόμενο και παρουσιάζει τα αποτελέσματα ως συντελεστής αυτής της συχνότητας. Οι συντελεστές καλούνται φάσμα και αντιπροσωπεύουν πόσο από αυτήν τη συχνότητα είναι παρούσα στο εισερχόμενο σήμα. Τα αποτελέσματα του FFT στην κοινή λογική είναι ένα σήμα στο πεδίο της συχνότητας. [13]

Μπορούμε να γράψουμε τον FFT σε ημίτονα ως:

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + j \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)$$

Εδώ το $x(n)$ είναι οι συντελεστές των ημιτόνων και συνημιτόνων της συχνότητας $2\pi k/N$, όπου k είναι ο δείκτης των συχνοτήτων από τις N συχνότητες και n είναι ο δείκτης του χρόνου, $x(k)$ είναι η τιμή του φάσματος για την k -οστή συχνότητα και $x(n)$ είναι η τιμή του σήματος τη χρονική στιγμή n .

Ο αντίστροφος Μ/Σ FFT παίρνει το φάσμα και το μετατρέπει πίσω στο πεδίο του χρόνου με διαδοχικούς πολλαπλασιασμούς με ένα εύρος ημιτόνων.

Η εξίσωση για τον IFFT είναι:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)$$

Η διαφορά ανάμεσα στις 2 εξισώσεις είναι ο τύπος των συντελεστών που λαμβάνουν τα ημίτονα και το πρόσημο 'μείον', αυτό είναι όλο. Οι συντελεστές από σύμβαση καθορίζονται στα χρονικά δείγματα $x(k)$ για τον FFT και $X(n)$ τιμές συχνότητας για τον IFFT.

Οι 2 διαδικασίες είναι ένα γραμμικό ζευγάρι. Χρησιμοποιώντας και τις 2 διαδοχικά θα μας δώσουν το αρχικό αποτέλεσμα.

Μπορούμε, λοιπόν, να χρησιμοποιήσουμε τον IFFT για να δημιουργήσουμε ένα σήμα στο πεδίο του χρόνου από ένα σήμα στο πεδίο της συχνότητας. Όμως, στο OFDM χρησιμοποιούμε τον IFFT για να λάβει ένα σήμα στο πεδίο του χρόνου και να δημιουργήσει ένα σήμα επίσης στο πεδίο του χρόνου. Δεν υπάρχει λόγος σύγχυσης. Η απάντηση είναι ότι παριστάνουμε ότι τα εισερχόμενα bits δεν είναι αναπαραστάσεις στο πεδίο του χρόνου αλλά είναι πλάτη συχνότητας τα οποία αν σκεφτούμε καθαρά, θα δούμε ότι αυτό πραγματικά είναι. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να πάρουμε αυτά τα bits και χρησιμοποιώντας τον IFFT, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα σήμα το οποίο είναι όντως ένα σήμα OFDM στο πεδίο του χρόνου.

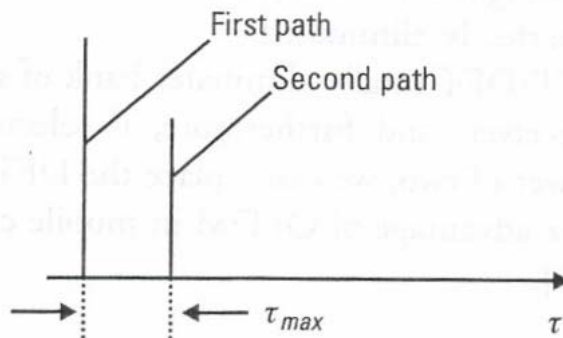
Ο IFFT είναι ένα μαθηματικό εργαλείο και δεν έχει πραγματικά σημασία τι εισέρχεται και τι εξέρχεται. Όσο αυτό που εισέρχεται είναι σε πλάτη ημιτόνων, ο IFFT θα μετατρέψει αυτά τα νούμερα ώστε να δημιουργηθεί ένα σωστό αποτέλεσμα στο πεδίο του χρόνου. Ο FFT και ο IFFT θα παράγουν όμοιο αποτέλεσμα στο ίδιο εισερχόμενο σήμα. Αλλά οι περισσότεροι από εμάς δεν είναι συνηθισμένοι να σκέφτονται τους Μ/Σ FFT/IFFT με αυτόν τον τρόπο. Επιμένουμε ότι μόνο φάσματα μπαίνουν μέσα στον IFFT.

Ο IFFT υπολογίζει γρήγορα το σήμα στο πεδίο του χρόνου αντί να το κάνει με ένα φέρον ανά φορά και μετά να τα προσθέσει. Καλώντας το αυτό λειτουργικότητα, ο IFFT μπορεί να είναι πιο ικανοποιητικός επειδή εισάγουμε ένα σήμα στο πεδίο του χρόνου, αλλά είναι και πιο μπερδεμένο. Επειδή οι FFT και IFFT είναι γραμμικές διαδικασίες και απόλυτα αντιστρέψιμες, θα έπρεπε να καλείται FFT αντί για IFFT. Τα αποτελέσματα είναι τα ίδια είτε εφαρμόσουμε FFT είτε IFFT.

2.4 Κυκλικό Πρόθεμα

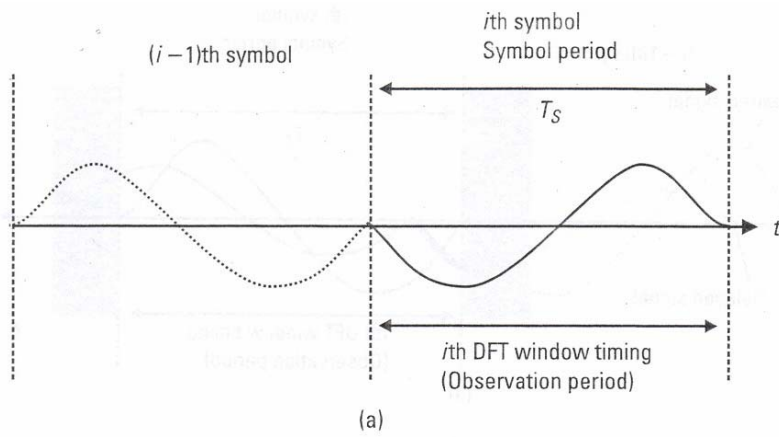
2.4.1 Η χρήση του κυκλικού προθέματος στο OFDM και η μαθηματική αναπαράστασή του.

Τώρα ας υποθέσουμε μια παρενόχληση που προκαλεί ένα επιλεκτικό στη συχνότητα κανάλι στο OFDM σήμα. Το κανάλι με εξασθένιση επιλεκτική στη συχνότητα χαρακτηρίζεται από μια κρουστική απόκριση με εξάπλωση καθυστέρησης στο πεδίο του χρόνου, το οποίο δεν είναι αγνοήσιμα μικρό συγκρινόμενο μία περίοδο συμβόλου. Το επόμενο σχήμα δείχνει μια στιγμιαία κρουστική απόκριση ενός επιλεκτικού στη συχνότητα καναλιού, όπου μπορούμε να δούμε 2 δρόμους και το τ_{max} είναι η χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στο πρώτο και το δεύτερο μονοπάτι. [10]

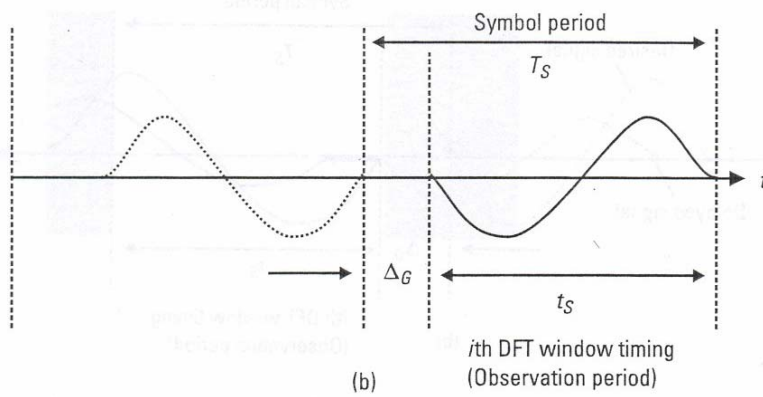


Διαμέσω του καναλιού, το πρώτο μονοπάτι δημιουργεί το επιθυμητό σήμα και το δεύτερο το καθυστερημένο σήμα στο δέκτη. Το πρώτο σετ σχημάτων δείχνει τρία εκπεμπόμενα σήματα και το δεύτερο σετ τα αντίστοιχα λαμβανόμενα. Εδώ, η προσοχή μας εστιάζεται μόνο σε κυματομορφές σε ένα συγκεκριμένο υπο-φέρον ($k=2$).

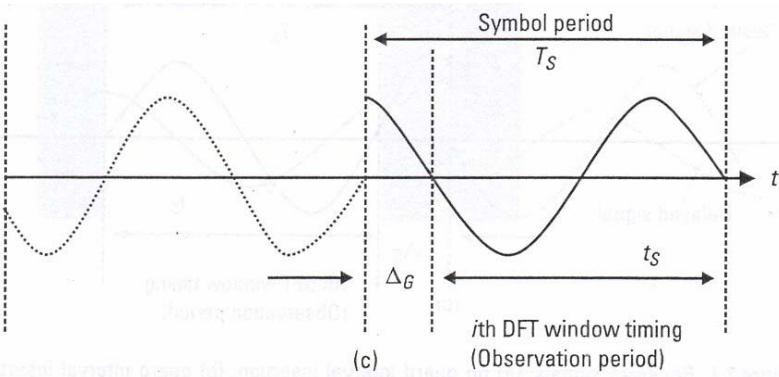
Χωρίς ένα διάστημα φύλαξης ανάμεσα στα διαδοχικά σύμβολα OFDM, η διασυμβολική παρεμβολή από το $(i-1)$ -ιοστό σύμβολο δίνει μια ενόχληση στο i -ιοστό σύμβολο (σύγκριση ανάμεσα στα πρώτα σχήματα του κάθε σετ). Αν χρησιμοποιήσουμε ένα διάστημα φύλαξης (χωρίς εκπομπή σήματος) με διάρκεια $\Delta G > \tau_{max}$, μπορούμε τέλεια να απαλείψουμε τη διασυμβολική παρεμβολή, αλλά μια ξαφνική αλλαγή της κυματομορφής περιέχει περισσότερα φασματικά περιεχόμενα, έτσι μπορεί να επιφέρουν σε παρεμβολή ανάμεσα στα υπο-φέροντα. (σύγκριση ανάμεσα στα δεύτερα σχήματα κάθε σετ). Τα τρίτα σχήματα κάθε σετ δείχνουν την τεχνική εισαγωγής διαστήματος φύλαξης με κυκλικό πρόθεμα ώστε να εξαλειφθεί πλήρως η παρεμβολή μεταξύ των υπο-φερόντων, όπου το σύμβολο OFDM επεκτείνεται κυκλικά στο χρόνο φύλαξης. Προσέχοντας το i -ιοστό παράθυρο Fourier με πλάτος t_s στο τελευταίο σχήμα του δεύτερου σετ, μπορούμε να δούμε ημιτονοειδή σήματα με πλήρες πλάτος, έτσι ώστε να μην επιφέρει την ανεπιθύμητη παρεμβολή. Σημειώνουμε ότι το σύμβολο OFDM έχει διάρκεια T_s αλλά η συχνότητα του υπο-φερόντος είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του $1/t_s$. Αυτό επιβάλλει ότι ο διαχωρισμός των υπο-φερόντων τώρα γίνεται λίγο μεγαλύτερος, δηλαδή $1/t_s$.



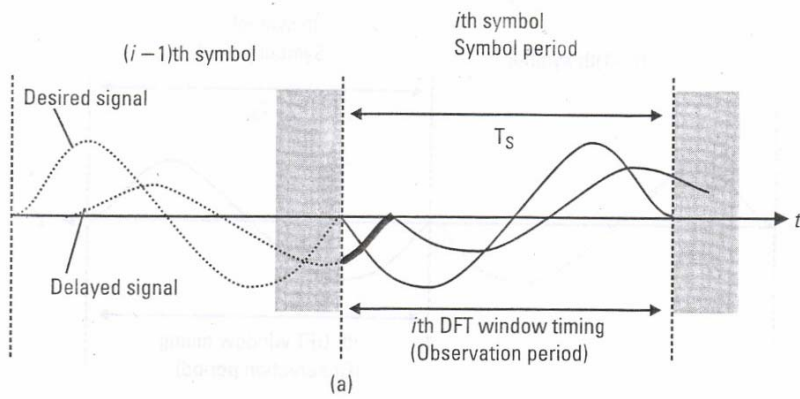
Εκπεμπόμενο σήμα χωρίς διάστημα φύλαξης



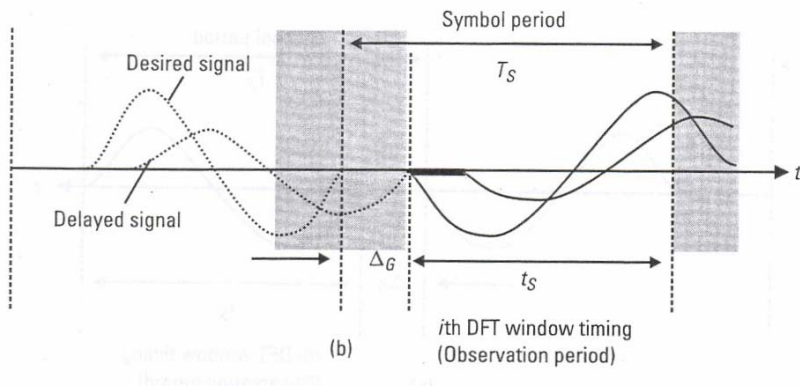
Εκπεμπόμενο σήμα με διάστημα φύλαξης



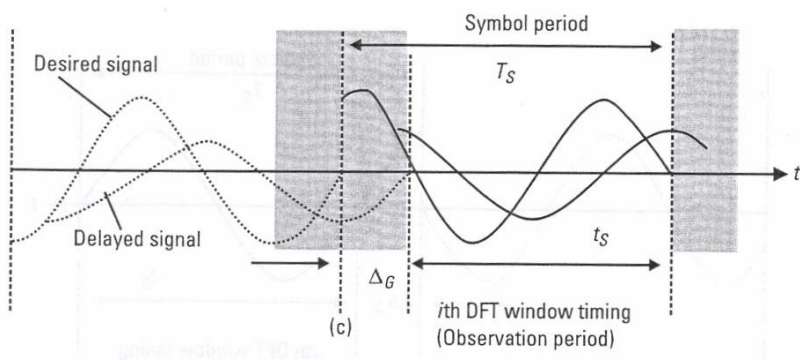
Εκπεμπόμενο σήμα με διάστημα φύλαξης και κυκλικό πρόθεμα



Λαμβανόμενο σήμα χωρίς διάστημα φύλαξης



Λαμβανόμενο σήμα με διάστημα φύλαξης



Λαμβανόμενο σήμα με διάστημα φύλαξης και κυκλικό πρόθεμα

Οι εξισώσεις για το εκπεμπόμενο σήμα με την κυκλική επέκταση, λοιπόν, γίνονται:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{N_{SC}} c_{ki} e^{j2\pi f_k(t-iT_s)} f(t-iT_s)$$

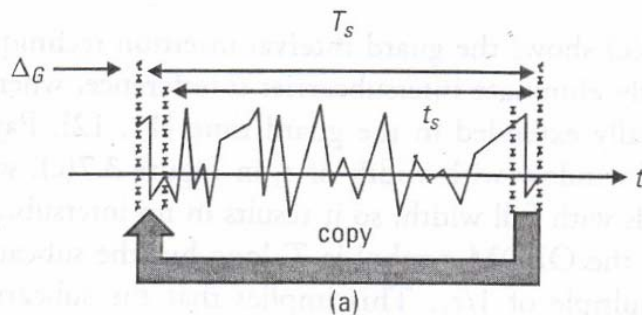
$$f(t) = \begin{cases} 1, & (-\Delta_G < t \leq t_s) \\ 0, & (t \leq -\Delta_G, t > t_s) \end{cases}$$

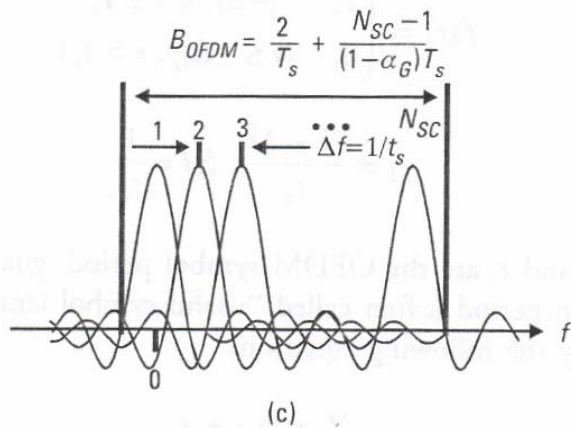
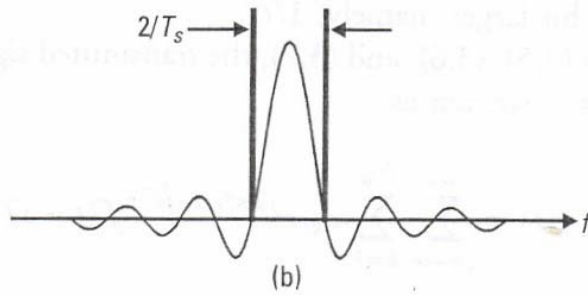
$$f_k = \frac{(k-1)}{t_s}, \Delta f = \frac{1}{t_s}$$

όπου T_s , Δ_G και t_s είναι η περίοδος του συμβόλου OFDM, η διάρκεια του διαστήματος φύλαξης και η περίοδος παρατήρησης (συχνά αποκαλείται και «χρήσιμη διάρκεια συμβόλου») αντίστοιχα και ικανοποιούν την εξίσωση:

$$T_s = \Delta_G + t_s$$

Το επόμενο σχήμα δείχνει την τεχνική κυκλικής προέκτασης, φάσμα συχνοτήτων της παλμικής κυματομορφής και φάσμα του εκπεμπόμενου σήματος ως συμβολο OFDM.





Current form of OFDM: (a) cyclic extension technique; (b) frequency spectrum of pulse waveform; and (c) frequency spectrum of OFDM signal.

Για το σύμβολο OFDM, ο ολικός ρυθμός εκπομπής συμβόλου δίνεται από την εξίσωση:

$$R = 1/T = N_{SC} / T_s$$

Και το εύρος ζώνης του κυρίου λοβού γράφεται ως εξής:

$$B_{OFDM} = \frac{2}{T_s} + \frac{N_{SC} - 1}{(1 - \alpha_G)T_s}$$

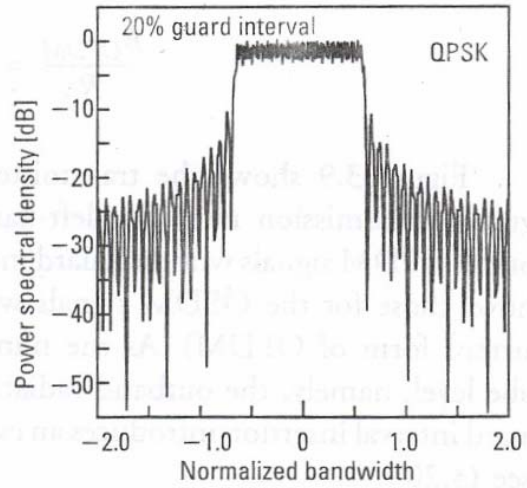
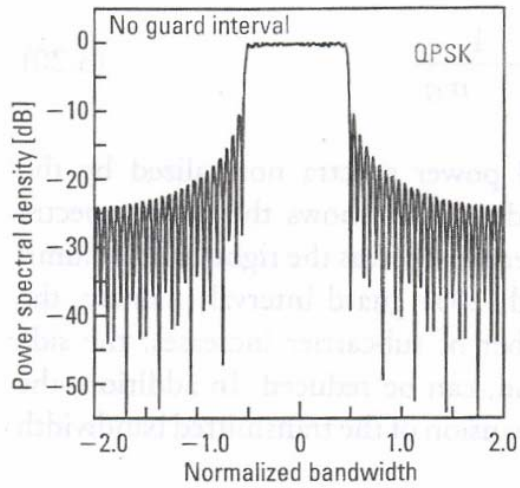
όπου α_G είναι ο παράγοντας διαστήματος φύλαξης, ο οποίος καθορίζεται ως:

$$\alpha_G = \frac{\Delta_G}{T_s}$$

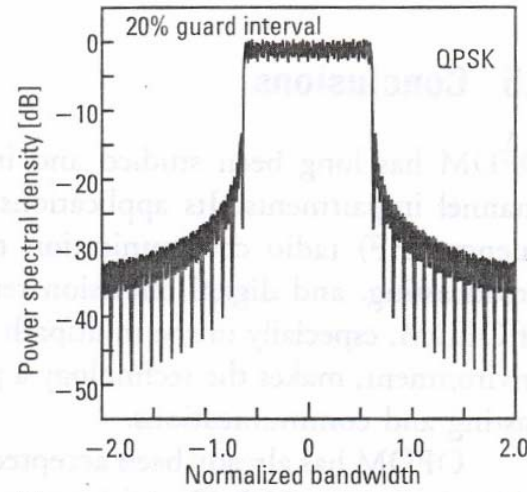
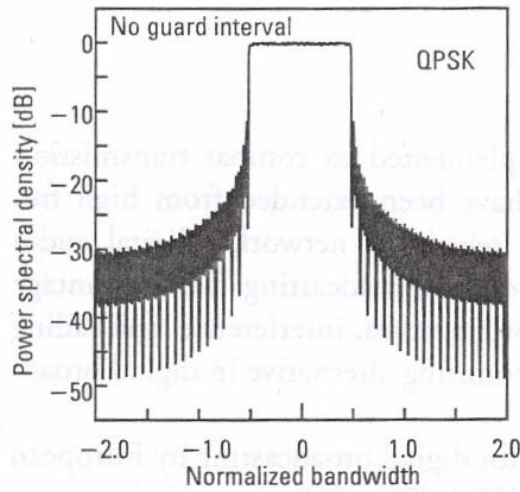
Όταν ο αριθμός των υπο-φερόντων είναι μεγάλος, το εύρος ζώνης του OFDM συμβόλου κανονικοποιημένου κατά R γράφεται ως:

$$\frac{B_{OFDM}}{R} = \frac{1}{1 - \alpha_G}$$

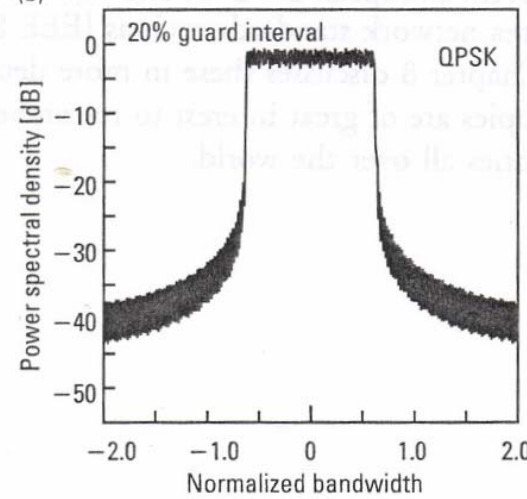
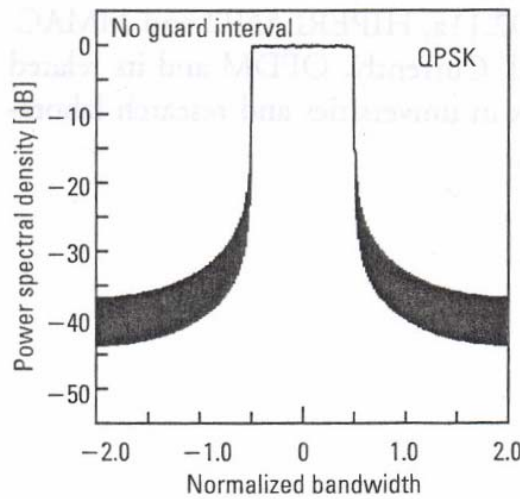
Το παρακάτω σχήμα δείχνει τα φάσματα ισχύος εκπομπής κανονικοποιημένα από το ρυθμό εκπομπής συμβόλου. Η αριστερή στήλη δείχνει τα φάσματα ισχύος για τα σήματα OFDM χωρίς διάστημα φύλαξης, ενώ η δεξιά στήλη δείχνει αυτά για τα σήματα OFDM με 20% διάστημα φύλαξης (δηλαδή, το κανονικό σύμβολο OFDM). Καθώς ο αριθμός των υπο-φερόντων αυξάνει, το επίπεδο των πλευρικών λοβών, δηλαδή, η ακτινοβολία εκτός ζώνης, μπορεί να μειωθεί. Επίσης, η εισαγωγή διαστήματος φύλαξης παρουσιάζει μια επέκταση του εκπεμπόμενου εύρους ζώνης.



(a)



(b)



(c)

Φάσματα ισχύος των σημάτων OFDM:

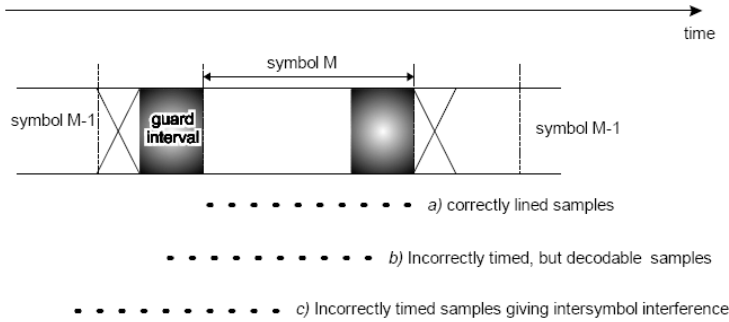
- a) Με 16 υπο-φέροντα
- b) Με 64 υπο-φέροντα
- c) Με 256 υπο-φέροντα

2.4.2 Συνέπειες από την κυκλική επέκταση του συμβόλου [12]

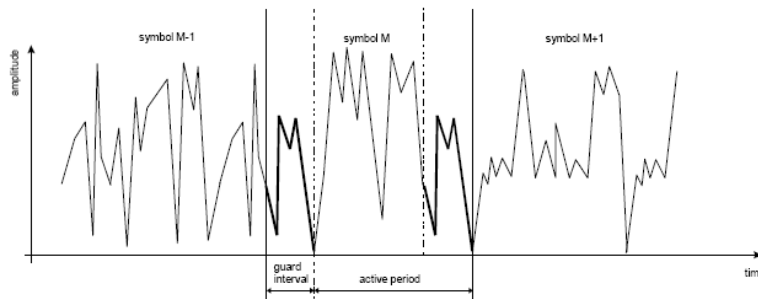
Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες είναι η εξάπλωση της καθυστέρησης λόγω των πολλαπλών διαδρομών του σήματος. Το OFDM το αντιμετωπίζει πολύ αποδοτικά. Η παράλληλη εκπομπή υποδεικνύει ότι το εισερχόμενο ρεύμα δεδομένων διαιρείται σε N_s υπο-φέροντα και ότι η διάρκεια του συμβόλου γίνεται N_s φορές μικρότερη, το οποίο επίσης μειώνει τη σχετική εξάπλωση καθυστέρησης λόγω πολυδιόδευσης, σχετικό με τη διάρκεια του συμβόλου, από τον ίδιο παράγοντα. Η διασυμβολική παρεμβολή εξαλείφεται σχεδόν πλήρως καθώς εισάγουμε ένα χρόνο φύλαξης για κάθε σύμβολο OFDM. Ο χρόνος φύλαξης επιλέγεται μεγαλύτερος από την αναμενόμενη εξάπλωση καθυστέρησης έτσι ώστε τα προϊόντα της πολυδιόδευσης από το ένα σύμβολο να μην μπορούν να επιδράσουν με το επόμενο σύμβολο. Αυτός ο χρόνος φύλαξης μπορεί να είναι και καθόλου σήμα, αλλά το πρόβλημα της παρεμβολής μεταξύ των φερόντων μπορεί να προκύψει. Τότε, το σύμβολο OFDM επεκτείνεται κυκλικά στο χρόνο φύλαξης. Χρησιμοποιώντας αυτήν τη μέθοδο, τα αντίγραφα καθυστέρησης του συμβόλου OFDM έχουν πάντα έναν ακέραιο αριθμό κύκλων μέσα στο διάστημα του FFT, όταν η καθυστέρηση είναι μικρότερη από το χρόνο φύλαξης. Τα πολυδιαδρομικά σήματα με καθυστερήσεις μικρότερες από το χρόνο φύλαξης δεν μπορούν να προκαλέσουν διασυμβολική παρεμβολή. Αν η καθυστέρηση λόγω πολυδιόδευσης ξεπερνά το χρόνο φύλαξης κατά ένα μικρό ποσοστό του διαστήματος FFT (για παράδειγμα 3%), τα υπο-φέροντα δεν είναι ορθογώνια πια, αλλά η παρεμβολή είναι ακόμα αρκετά μικρή ώστε να έχουμε ένα λογικό αστερισμό. Υποθέτοντας ότι η καθυστέρηση πολυδιόδευσης ξεπερνά το χρόνο φύλαξης κατά 10% του διαστήματος FFT, ο αστερισμός επηρεάζεται σημαντικά και προκύπτει ένας μη αποδεκτός ρυθμός λαθών.

2.4.3 Το διάστημα φύλαξης και η υπολοίπιση του [11]

Η ορθογωνιότητα των υπο-καναλιών στο OFDM μπορεί να συντηρηθεί και τα μεμονωμένα υπο-κανάλια μπορούν να διαχωριστούν πλήρως με χρήση FFT στο δέκτη όταν δεν υπάρχει καθόλου διασυμβολική παρεμβολή και παρεμβολή μεταξύ των φερόντων που εισάγεται από την παραμόρφωση του καναλιού εκπομπής. Στην πράξη, αυτές οι συνθήκες δεν μπορούν να ισχύσουν. Καθώς τα φάσματα συχνοτήτων ενός σήματος OFDM δεν είναι αυστηρώς περιορισμένης ζώνης (συνάρτηση $\text{sinc}(f)$), η γραμμική παραμόρφωση όπως η πολυδιόδευση προκαλούν κάθε υπο-κάνάλι να μοιράζει ενέργεια στα γειτονικά κανάλια και συνεπώς να προκαλεί διασυμβολική παρεμβολή. Μια απλή λύση είναι να αυξήσουμε τη διάρκεια του συμβόλου ή των αριθμό των υπο-φερόντων έτσι ώστε η παραμόρφωση να γίνει ασήμαντη. Πάντως, αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι δύσκολο να υλοποιηθεί λόγω πρόκλησης αστάθειας στα υπο-φέροντα, αλλαγή Doppler, μέγεθος FFT και καθυστέρηση.



Το παραπάνω σχήμα δείχνει την επίπτωση στη χρονική ανοχή της προσθήκης ενός διαστήματος φύλαξης. Με ένα διάστημα φύλαξης στο σήμα, η ανοχή στο συγχρονισμό των δειγμάτων είναι αρκετά πιο χαλαρή.



Το παραπάνω σχήμα δείχνει ένα παράδειγμα του διαστήματος φύλαξης. Κάθε σύμβολο αποτελείται από δύο μέρη. Ολόκληρο το σύμβολο περιέχεται στο ενεργό σύμβολο (δείχνεται έντονο για το σύμβολο M). Το τελικό μέρος του συμβόλου (που επίσης φαίνεται με έντονο χρώμα) επίσης επαναλαμβάνεται στην αρχή του συμβόλου και καλείται το διάστημα φύλαξης.

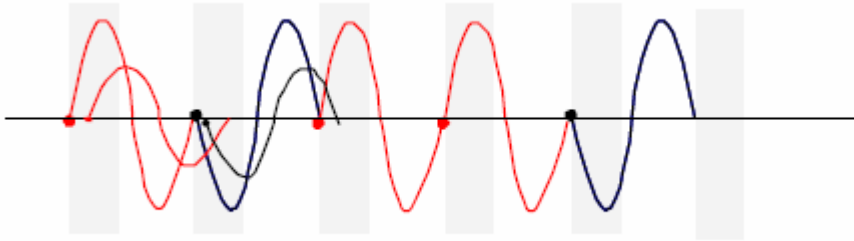
Ένας τρόπος να αποφύγουμε τη διασυμβολική παρεμβολή είναι να δημιουργήσουμε ένα διάστημα φύλαξης που να επεκτείνεται κυκλικά, όπου σε κάθε σύμβολο OFDM προηγείται μια περιοδική επέκταση του ίδιου του σήματος. Η συνολική διάρκεια του σήματος είναι $T_{total} = T_g + T$, όπου T_g είναι το διάστημα φύλαξης και T είναι η χρήσιμη (ωφέλιμη) διάρκεια συμβόλου. Όταν το διάστημα φύλαξης είναι μακρύτερο από την κρουστική απόκριση του καναλιού, ή την καθυστέρηση λόγω πολυδιάθρυσης, η διασυμβολική παρεμβολή μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως. Πάντως, η παρεμβολή μεταξύ των φερόντων ή η εντός ζώνης εξασθένιση, εξακολουθεί να υπάρχει. Ο λόγος του διαστήματος φύλαξης προς την ωφέλιμη διάρκεια συμβόλου είναι εξαρτημένη από την εφαρμογή. Καθώς η εισαγωγή του διαστήματος φύλαξης μειώνει το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων, το T_g είναι συνήθως μικρότερο από $T/4$.

Οι λόγοι που χρησιμοποιείται το διάστημα φύλαξης είναι:

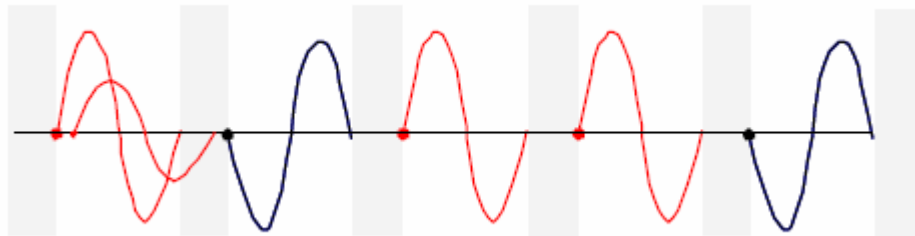
- Η διατήρηση του συγχρονισμού των φερόντων στο δέκτη. Μερικά σήματα πρέπει πάντα να εκπέμπονται αντί για μια μακρά σιωπή.
- Η κυκλική συνέλιξη μπορεί ακόμα να εφαρμοστεί ανάμεσα στο σήμα OFDM και την απόκριση του καναλιού ώστε να μοντελοποιηθεί το σύστημα εκπομπής.

Πώς γίνεται όμως ακριβώς αυτό; [13]

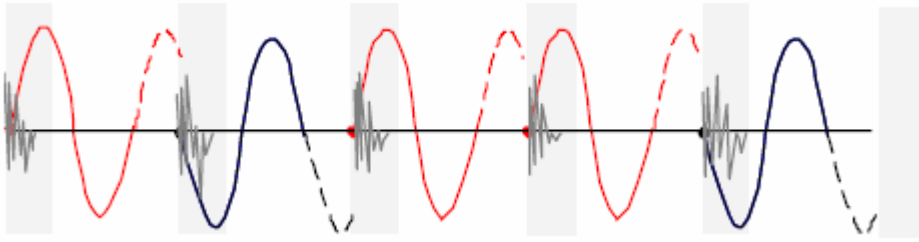
Έστω ότι έχουμε το παρακάτω σήμα και το ένα σύμβολο παρεμβαίνει στο άλλο (διασυμβολική παρεμβολή):



Για να αποφύγουμε αυτήν την παρεμβολή (θόρυβο) στο μπροστινό μέρος του συμβόλου, μετακινούμε το σύμβολό μας μακρύτερα από την περιοχή της εξάπλωσης καθυστέρησης, όπως φαίνεται παρακάτω. Έχει εισαχθεί ένα μικρό κενό διάστημα μεταξύ των συμβόλων για να αποφύγουμε την εξάπλωση καθυστέρησης.

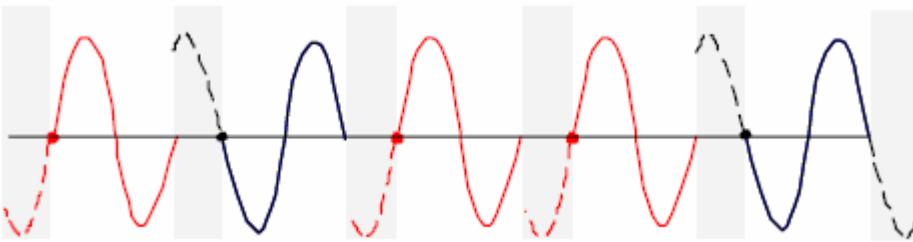


Αλλά δεν μπορούμε να έχουμε κενά διαστήματα στα σύμβολα. Αυτό δεν είναι καθόλου λειτουργικό για το hardware το οποίο αρέσκεται στο να παράγει μηχανικά σήματα ταυτόχρονα. Έτσι είναι ξεκάθαρο ότι χρειαζόμαστε να έχουμε κάτι άλλο. Γι' αυτό θα αφήσουμε το σύμβολο να διαρκέσει περισσότερο από ότι πριν.



Επεκτείνουμε το σύμβολο στο ελεύθερο διάστημα, έτσι ώστε το πραγματικό σύμβολο να διαρκεί περισσότερο από έναν κύκλο.

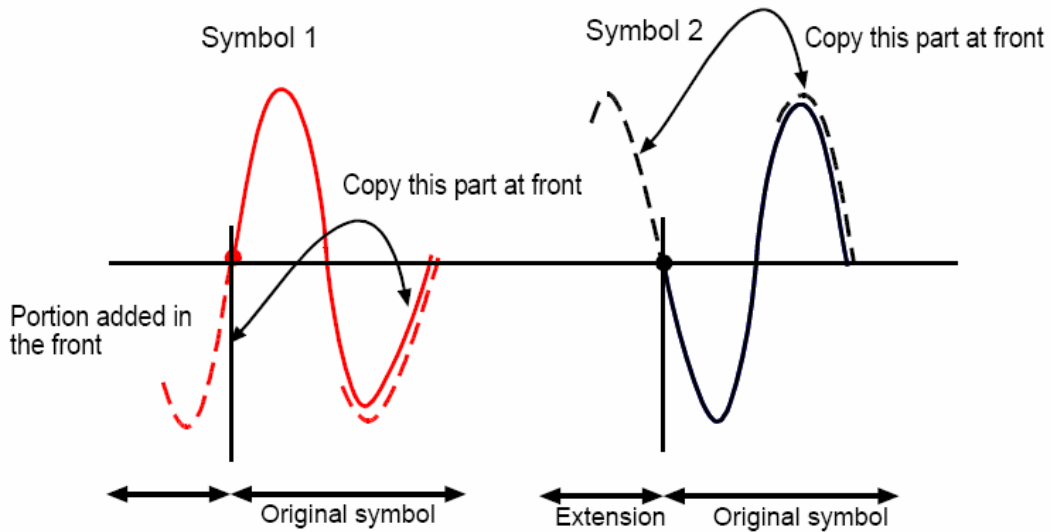
Αλλά τώρα η αρχή του συμβόλου είναι ακόμα στη ζώνη κινδύνου και αυτή η αρχή είναι το πιο σημαντικό πράγμα για το σύμβολό μας καθώς ο δέκτης το χρειάζεται ώστε να κάνει την απόφαση για το bit. Δε θέλουμε την αρχή του συμβόλου να πέσει σε αυτήν την περιοχή, έτσι ας μετακινήσουμε απλώς το σύμβολο προς τα πίσω, έτσι ώστε η αρχή του αυθεντικού συμβόλου να βρίσκεται εκτός αυτής της ζώνης. Και τότε συμπληρώνουμε αυτήν την περιοχή με κάτι.



Μετακινούμε το σύμβολο ώστε να αρχίσει στην ακμή του χρόνου της εξάπλωσης καθυστέρησης και τότε συμπληρώνουμε το διάστημα φύλαξης με ένα αντίγραφο του τέλους του συμβόλου.

1. Θέλουμε η αρχή του συμβόλου να είναι εκτός της ζώνης της εξάπλωσης καθυστέρησης έτσι ώστε να μην παραμορφώνεται και
2. Αρχίζουμε το σήμα στο νέο όριο τέτοιο ώστε η ακμή του πραγματικού συμβόλου πέφτει έξω από αυτή τη ζώνη.

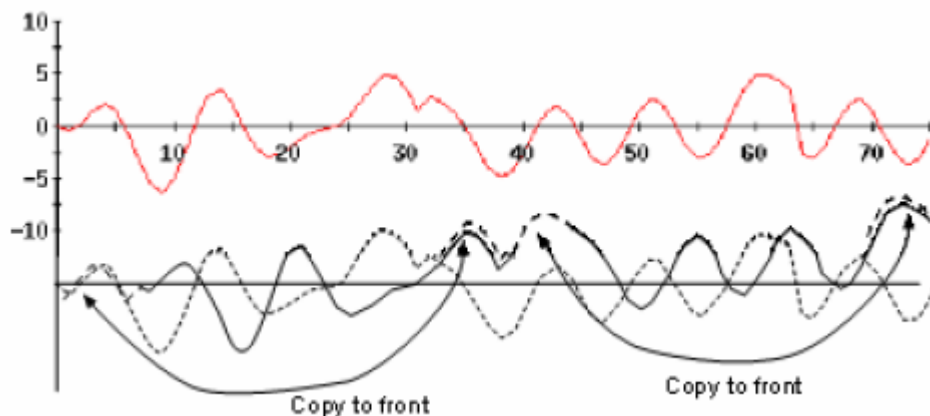
Θα επεκτείνουμε το σύμβολο έτσι ώστε να γίνει 1.25 φορές μακρύτερο. Για να γίνει αυτό, αντιγράφουμε το πίσω μέρος του συμβόλου και το επικολλούμε στο μπροστινό. Στην πραγματικότητα, η πηγή των συμβόλων είναι συνεχής, έτσι αυτό που κάνουμε είναι να ρυθμίσουμε την αρχική φάση και να κάνουμε την περίοδο του συμβόλου μακρύτερη. Αλλά όλα σχεδόν τα βιβλία μιλάνε για αυτό ως μια αντιγραφή της ουράς. Και ο λόγος γι' αυτό είναι ότι στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος, το κάνουμε με αυτόν τον τρόπο.



Αυτή διαδικασία καλείται προσθήκη ενός κυκλικού προθέματος. Καθώς το OFDM έχει πολλά φέροντα, θα έπρεπε να το κάνουμε σε κάθε φέρον. Αλλά αυτό μόνο στη θεωρία. Στην πράξη, καθώς το σήμα OFDM είναι ένας γραμμικός συνδυασμός, μπορούμε να προσθέσουμε κυκλικό πρόθεμα μόνο μια φορά στο σύνθετο σήμα OFDM. Το πρόθεμα είναι οποιοδήποτε από 10% ως 25% του χρόνου συμβόλου.

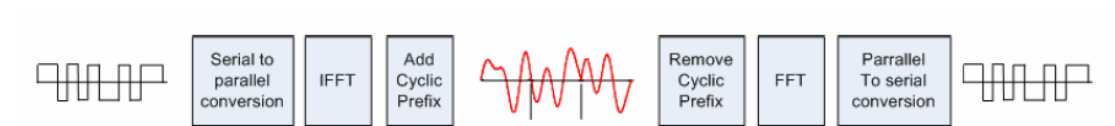
Παρακάτω φαίνεται ένα σήμα OFDM με περίοδο ίση με 32 δείγματα. Θέλουμε να προσθέσουμε μια 25% κυκλική μετακίνηση στο σήμα.

1. Πρώτα, κόβουμε κομμάτια που διαρκούν 32 δείγματα.
2. Μετά παίρνουμε τα τελευταία $0.25 \times 32 = 8$ δείγματα, τα αντιγράφουμε και να επικολλούμε στο μπροστινό μέρος όπως φαίνεται.



Προσθέτουμε το πρόθεμα αφού εφαρμόσουμε τον IFFT μόνο μια φορά στο σύνθετο σήμα. Αφού το σήμα έχει φτάσει στο δέκτη, πρώτα αφαιρούμε το πρόθεμα, για να πάρουμε το τέλεια περιοδικό σήμα, έτσι ώστε με χρήση FFT να μπορέσουμε να πάρουμε πίσω τα σύμβολα σε κάθε φέρον.

Πάντως, η πρόσθεση του κυκλικού προθέματος το οποίο καταπολεμά τις επιπτώσεις της εξασθένησης της ζεύξης και της διασυμβολικής παρεμβολής, αυξάνει το εύρος ζώνης.

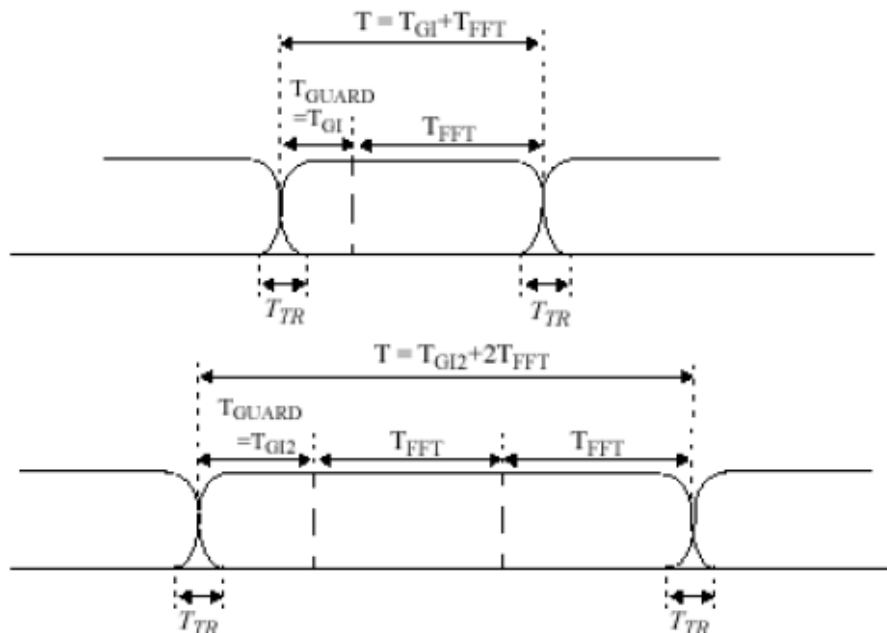


2.5 Windowing (Παραθυροποίηση)

Αναγκαστικά, ένα σήμα OFDM αποτελείται από έναν αριθμό αφιλτράριστων QAM υπο-φερόντων. Αυτό σημαίνει ότι το φάσμα εκτός ζώνης μειώνεται σχετικά αργά, ακολουθώντας μια συνάρτηση sinc. Για μεγαλύτερο αριθμό υπο-φερόντων, το φάσμα συχνοτήτων μειώνεται γρήγορα στο ξεκίνημα, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι οι πλευρικοί λοβοί είναι σε κοντινότερη απόσταση μεταξύ τους. Για να κάνουμε το φάσμα να μειώνεται γρηγορότερα, εφαρμόζεται ένα παράθυρο στο σήμα OFDM. Το πρωτόκολλο δε συγκεκριμενοποιεί το είδος του παραθύρου που θα χρησιμοποιηθεί, αλλά ένα παράδειγμα περιλαμβάνεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση: [12]

$$w_T(t) = \begin{cases} \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\left(0.5 + \frac{t}{T_{TR}}\right)\right) & \text{for } \left(-\frac{T_{TR}}{2} < t < \frac{T_{TR}}{2}\right) \\ 1 & \text{for } \left(\frac{T_{TR}}{2} \leq t < T - \frac{T_{TR}}{2}\right) \\ \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\left(0.5 - \frac{t-T}{T_{TR}}\right)\right) & \text{for } \left(T - \frac{T_{TR}}{2} \leq t < T + \frac{T_{TR}}{2}\right) \end{cases}$$

υποθέτουμε ότι το T_{TR} είναι ο χρόνος μετάβασης ανάμεσα σε δύο συνεχόμενες περιόδους FFT, όπως μπορεί να φανεί στο επόμενο σχήμα:

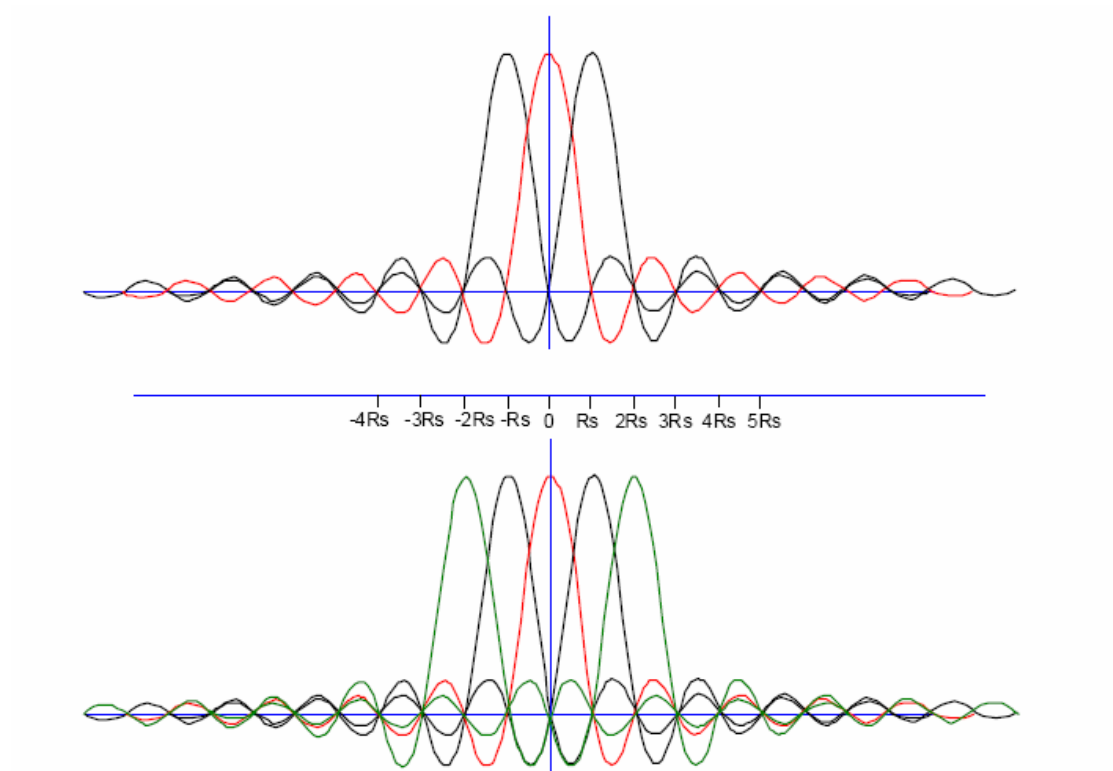


Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ένα πλαίσιο OFDM με κυκλική επέκταση και παραθυροποίηση για μία και δύο λήψεις της περιόδου FFT. Επίσης φαίνεται η δυνατότητα επέκτασης της συνάρτησης του παραθύρου για περισσότερο από μία περίοδο, T_{FFT} και επιπρόσθετα δείχνει ήρεμες μεταβάσεις με την εφαρμογή μιας συνάρτησης παραθύρου, όπως δείξαμε στις παραπάνω εξισώσεις. Ειδικότερα, οι συναρτήσεις παραθύρου που επεκτείνονται σε πολλαπλές περιόδους FFT

χρησιμοποιούνται στον καθορισμό του προοιμίου. Πολλαπλά άλλα συμβατικά παράθυρα εξομοιώθηκαν περιλαμβάνοντας ανυψωμένου συνημιτόνου, Hann, Hamming, Blackman και Kaiser. Η καλύτερη επίδοση επιτεύχθηκε για το παράθυρο Blackman, υποθέτοντας την παραγόμενη εξασθένιση και το εύρος ζώνης της μετάβασης.

2.6 Ιδιότητες του OFDM

2.6.1 Φάσμα και επίδοση [13]



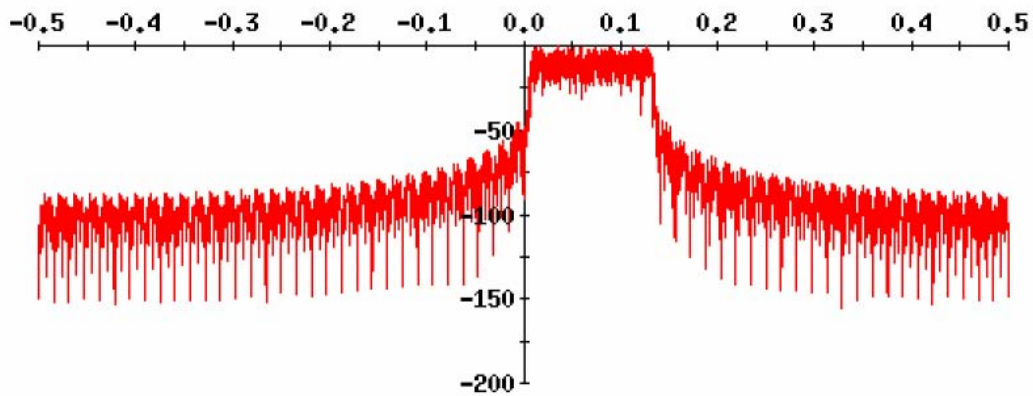
Το αδιαμόρφωτο QPSK σήμα παράγει ένα φάσμα ώστε το εύρος ζώνης του να είναι ίσο με $(1+\alpha)R_s$. Στο OFDM, τα γειτονικά φέροντα μπορούν να υπερκαλύπτονται με τον τρόπο που φαίνεται παραπάνω. Η προσθήκη δύο φερόντων, τώρα επιτρέπει την εκπομπή $3R_s$ σε ένα εύρος ζώνης από $-2R_s$ ως $2R_s$ ή ολικά $4R_s$. Αυτό δίνει μια ικανότητα εύρους ζώνης των $4/3$ Hz ανά σύμβολο για 3 φέροντα και $6/5$ για 5 φέροντα.

Όσο περισσότερα φέροντα προστίθενται, το εύρος ζώνης προσεγγίζεται από:

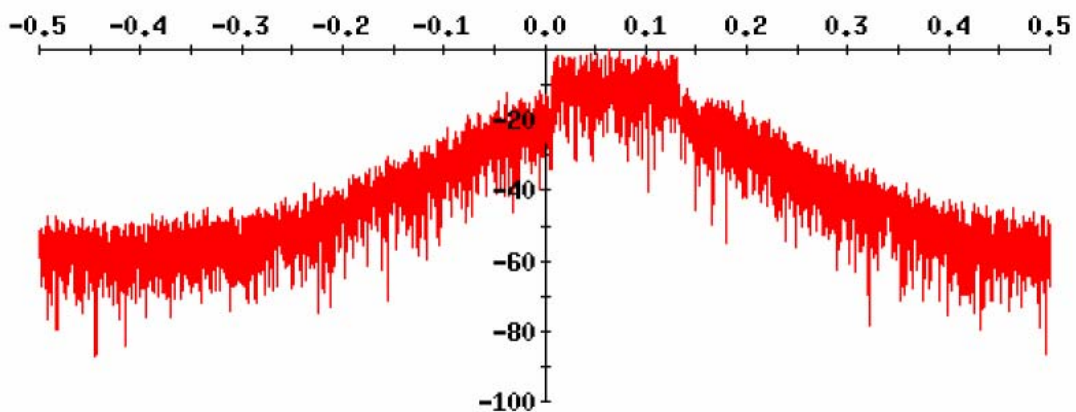
$N+1/N$ bits ανά Hz.

Έτσι, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των φερόντων, τόσο το καλύτερο.

Παρακάτω φαίνεται το φάσμα ενός σήματος OFDM. Σημειώνουμε ότι το σήμα εκτός ζώνης είναι πεσμένο κατά 50 dB χωρίς κάποια μορφοποίηση παλμών.



Συγκρίνετε το παραπάνω με ένα φάσμα του σήματος QPSK, για να δείτε πόσο χαμηλότερες οι πλευρικές ζώνες είναι για το OFDM και πόσο μικρότερη είναι η διασπορά.



2.6.2 Επίδοση Bit Error Rate

Το BER ενός OFDM συστήματος είναι μόνο υποδειγματικό σε ένα περιβάλλον με εξασθένιση. Δε θα χρησιμοποιούσαμε το OFDM σε μία ευθύγραμμη ζεύξη οπτικής επαφής όπως μία δορυφορική ζεύξη. Το σήμα OFDM λόγω της ποικιλότητας του πλάτους του δε συμπεριφέρεται καλά σε ένα μη γραμμικό κανάλι όπως αυτό που δημιουργείται από ενισχυτές υψηλής ισχύος στους δορυφόρους. Χρησιμοποιώντας το OFDM για ένα δορυφόρο θα απαιτούσε ένα σχετικά μεγάλο backoff, στην τάξη των 3dB, έτσι πρέπει να υπάρχει κάποιος άλλος υποχρεωτικός λόγος για τη χρήση του όπως όταν το σήμα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για έναν κινούμενο χρήστη.

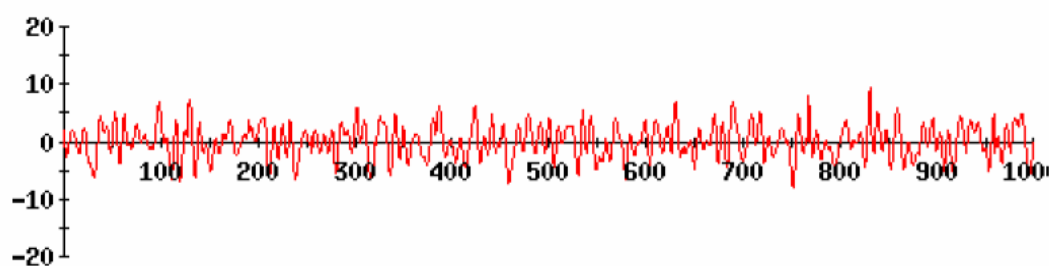
2.6.3 Peak to average power ratio (PARP)

Αν ένα σήμα είναι ένα άθροισμα από N σήματα καθένα από τα οποία έχει μέγιστο πλάτος ίσο με 1 v , τότε είναι κατανοητό ότι θα πάρουμε ένα μέγιστο πλάτος ίσο με N , αυτό σημαίνει ότι όλα τα N σήματα προστίθενται τη στιγμή που έχουν μέγιστο πλάτος. Το PARP καθορίζεται ως:

$$R = \frac{|x(t)|^2}{P_{avg}}$$

Για ένα σήμα OFDM το οποίο έχει 128 φέροντα, καθένα με κανονικοποιημένη ισχύ 1 w , τότε η μέγιστη PARP μπορεί να έχει τιμή ως $\log(128)$ ή 21 dB. Αυτό γίνεται τη στιγμή όταν όλα τα 128 φέροντα συνδυάζονται στο μέγιστό τους, το οποίο είναι σχεδόν απίθανο, αλλά δεν πρέπει να αποκλείεται. Η RMS τιμή του PARP θα είναι γύρω στο μισό του προηγούμενου νούμερου ή 10-12 dB. Η ίδια PARP παρατηρείται και στα σήματα CDMA επίσης.

Η μεγάλη διασπορά πλάτους που παρατηρούμε και στο παρακάτω σχήμα αυξάνει το θόρυβο εντός ζώνης και αυξάνει το BER όταν το σήμα πρέπει να περάσει μέσω μη γραμμικότητες ενισχυτών. Μεγάλο back off απαιτείται σε τέτοιες περιπτώσεις. Αυτό κάνει τη χρήση του OFDM τόσο προβληματική όσο η πολυφαινοτική διαμόρφωση FDM σε εφαρμογές ενισχυτών υψηλής ισχύος όπως οι δορυφορικές ζεύξεις.



Τι μπορεί να γίνει για το μεγάλο PARP; Πολλαπλές ιδέες χρησιμοποιούνται για την εξάλειψή του.

1. Αποκοπή. Μπορούμε απλά να κόψουμε το σήμα στο επιθυμητό επίπεδο ισχύος. Αυτό μειώνει το PARP αλλά εισάγει άλλες παραμορφώσεις και διασυμβολική παρεμβολή.

2. Επιλεκτική Διαμόρφωση - Αστερισμός. Πολλαπλασιάζουμε το σήμα δεδομένων με ένα σύνολο από κώδικες, εφαρμόζουμε τον IFFT στο καθένα και μετά επιλέγουμε το ένα με το ελάχιστο PARP. Αυτό πρέπει αναγκαστικά να γίνει πολλές φορές όταν χρησιμοποιούμε έναν κώδικα όπως το CDMA.

3. Μερικός M/Σ IFFT

Διαιρούμε το σήμα σε δέσμες, εφαρμόζουμε τον IFFT σε καθένα και μετά τα συνδυάζουμε. Έτσι ώστε αν υπο-διαιρέσουμε 128 φέροντα σε ένα γκρουπ από 4 σελ

32 φερόντων, καθένα, το μέγιστο PARP του οποίου θα είναι 12 dB αντί των 21 για το πλήρες. Συνδυάζουμε αυτές τις 4 ακολουθίες για να δημιουργήσουμε το εκπεμπόμενο σήμα.

Αυτά είναι μερικά από τα πράγματα που οι άνθρωποι κάνουν για να μειώσουν τις επιπτώσεις της μη γραμμικότητας.

2.6.4 Συγχρονισμός

Το άλλο πρόβλημα είναι ότι χρειάζεται στενός συγχρονισμός. Συχνά οι πιλοτικοί τόνοι βρίσκονται στο χώρο των υπο-φερόντων. Αυτά χρησιμοποιούνται για να κλειδώσουν τη φάση και να εξισώνουν το κανάλι.

2.6.5 Κωδικοποίηση

Τα υπο-φέροντα κωδικοποιούνται τυπικά με συνελκτικό κώδικα αντί να περνούν μέσω IFFT. Η κωδικοποιημένη εκδοχή του OFDM καλείται COFDM ή Coded OFDM.

2.6.6 Καταπολέμηση της εξασθένησης που είναι επιλεκτική στη συχνότητα

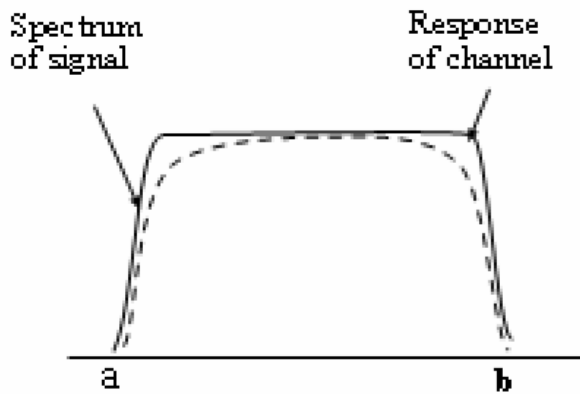
Γενικά, όταν η εξάπλωση καθυστέρησης είναι μικρότερη από ένα σύμβολο, στο κανάλι έχουμε επίπεδη εξασθένηση (flat fading). Όταν η εξάπλωση καθυστέρησης είναι πολύ μεγαλύτερη από ένα σύμβολο αυτό καλείται εξασθένηση επιλεκτική στη συχνότητα (frequency selective fading) και αυτό είναι ένας από τους κύριους λόγους εξασθένησης στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες. Ας δούμε πως αποφεύγεται αυτό με τη χρήση του OFDM.

Ένα σήμα OFDM προσφέρει ένα πλεονέκτημα σε ένα κανάλι που έχει απόκριση εξασθένησης επιλεκτικής στη συχνότητα. Όπως μπορούμε να δούμε, όταν αντιπαραθέτουμε ένα φάσμα του OFDM σήματος απέναντι στην επιλεκτική στη συχνότητα απόκριση του καναλιού, μόνο 2 υπο-φέροντα επηρεάζονται, όλα τα άλλα είναι απολύτως OK. Αντί να χάσουμε όλο το σύμβολο, χάνουμε μόνο ένα μικρό υποσύνολο από τα $(1/N)$ bits. Με κατάλληλη κωδικοποίηση, αυτό μπορεί να ανακτηθεί.

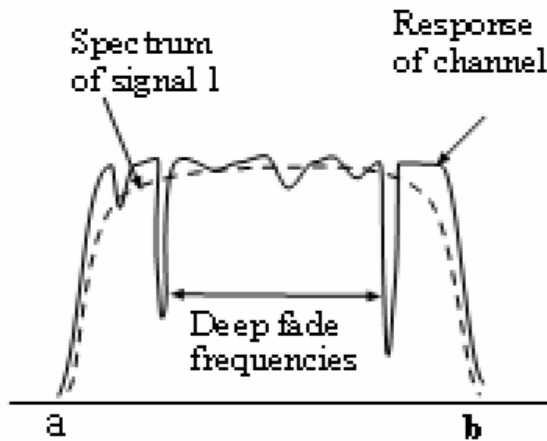
Η επίδοση BER ενός OFDM σήματος σε ένα κανάλι με εξασθένηση είναι πολύ καλύτερη από την επίδοση ενός QPSK/FDM το οποίο είναι ένα σήμα ευρείας ζώνης μονού φέροντος. Αν και το δυνατό BER ενός OFDM σήματος είναι ακριβώς το ίδιο με τη δυνατή διαμόρφωση, αν χρησιμοποιείται η 8PSK για να διαμορφωθούν τα υπο-φέροντα, τότε το BER του OFDM σήματος είναι ίδιο με το BER του 8PSK σήματος σε ένα γκαουσιανό κανάλι. Αλλά σε κανάλια που είναι εξασθένησης, το OFDM προσφέρει αρκετά καλύτερο BER από ένα σήμα ευρείας ζώνης της ίδιας ακριβώς διαμόρφωσης. Το πλεονέκτημα εδώ προέρχεται από την ποικιλία των πολλών φερόντων έτσι ώστε η εξασθένηση να εφαρμόζεται μόνο σε ένα μικρό υποσύνολο.

Στα FDM υπο-φέροντα, συχνά το σήμα σχηματίζεται με ένα Root Raised Cosine σχήμα για να μειώσει το εύρος ζώνης του. Στο OFDM, καθώς ο διαχωρισμός

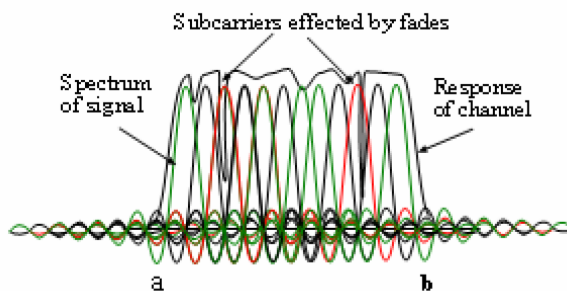
των φερόντων είναι optimal, υπάρχει ένα πλεονέκτημα φυσικού εύρους ζώνης και η χρήση του RRC δε μας απασχολεί.



Σε αυτό το σχήμα το σήμα που θέλουμε να στείλουμε και η απόκριση συχνότητας του καναλιού συμβαδίζουν.



Σε αυτό το σχήμα έχουμε ένα κανάλι εξασθένησης που έχει συχνότητες οι οποίες δεν επιτρέπουν τη διέλευση καθόλου σήματος. Τα δεδομένα χάνονται σποραδικά.



Σε αυτό το σχήμα, χρησιμοποιώντας OFDM, όπου έχουμε πολλά μικρά υπο-φέροντα, μόνο ένα μικρό υποσύνολο από τα δεδομένα χάνεται λόγω της εξασθένησης.

2.7 Εισαγωγή στο Θόρυβο Φάσης (Phase Noise)

2.7.1 Τι είναι ο θόρυβος φάσης και πλάτους; [14]

Ένας τέλειος ημιτονικός ταλαντωτής παράγει ένα ιδανικό ημιτονικό κύμα:

$$s(t) = A \sin(\omega t)$$

αλλά στην πράξη το σήμα πάντα περιέχει κάποιο θόρυβο. Αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί από διαταραχές στο πλάτος του σήματος (διαταραχή στο A) και από διαταραχές στο στη φάση του σήματος (έτσι η φάση γίνεται $\omega(t) + \text{phase noise}$).

Γενικά, μπορούμε να αναπαραστήσουμε το σήμα του θορυβώδους ταλαντωτή ως εξής:

$$s(t) = (A + a(t)) \sin(\omega t + \varphi(t))$$

όπου:

$a(t)$ είναι η διαταραχή του πλάτους στο σήμα – ο θόρυβος πλάτους (amplitude noise) και $\varphi(t)$ είναι η διαταραχή στη φάση του σήματος – ο θόρυβος φάσης (phase noise).

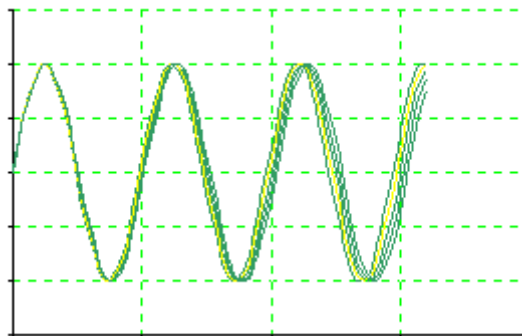
Παρατηρήστε ότι ο θόρυβος πλάτους δεν επηρεάζει τα zero crossings και ότι ο θόρυβος φάσης δεν επηρεάζει το πλάτος των μεγίστων του σήματος.

Οι καλά σχεδιασμένες πηγές έχουν μικρό θόρυβο πλάτους. Ο θόρυβος πλάτους μπορεί επίσης να απομακρυνθεί χρησιμοποιώντας automatic level control (ALC) συστήματα, ή περνώντας το σήμα από έναν περιοριστικό ενισχυτή. (Η έξοδος ενός ιδανικού περιοριστικού ενισχυτή καθορίζεται μόνο από τα zero crossings του σήματος και αυτά δεν επηρεάζονται από το θόρυβο πλάτους.) Ο θόρυβος πλάτους επίσης απορρίπτεται σε κάποιο βαθμό από πολλούς από τους μείκτες που χρησιμοποιούνται στα ραδιοσυστήματα.

Ο θόρυβος φάσης είναι άλλη κατάσταση. Αν υπάρχει σε ένα σήμα, είναι πολύ δύσκολο να απομακρυνθεί και όπως θα εξηγηθεί αργότερα, μπορεί να έχει αρκετές επιπτώσεις στην επίδοση του συστήματος. Για τη συνέχεια, θα υποθέτουμε ότι το σήμα περιέχει μόνο θόρυβο φάσης και είναι της μορφής:

$$s(t) = A \sin(\omega t + \varphi(t))$$

Στο πεδίο του χρόνου, αν το σήμα $s(t)$ παρίστατο σε έναν ιδανικό παλμογράφο, η επίδραση του $\varphi(t)$ θα ήταν να προκαλέσει χρονική ταλάντωση στα zero crossings της κυματομορφής.



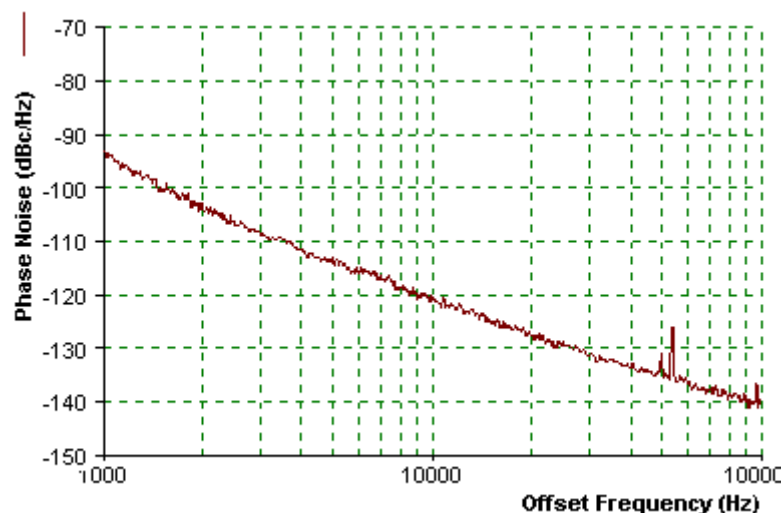
Σχήμα: Σήμα με πολύ άσχημο θόρυβο φάσης

Αυτή η χρονική ταλάντωση μπορεί να είναι σημαντική σε πολλές εφαρμογές, για παράδειγμα αν το $s(t)$ χρησιμοποιείται σε ρολόι δεδομένων σε συστήματα ψηφιακής εκπομπής, η χρονική αυτή παραμόρφωση μπορεί να προκαλέσει λανθασμένη δειγματοληψία δεδομένων. Αυτή δεν είναι η κύρια ανησυχία των μηχανικών επικοινωνιών, ο θόρυβος φάσης συνήθως πρέπει να είναι πολύ μεγάλος (όπως στο παραπάνω σχήμα) ώστε να προκαλέσει σημαντικά λάθη χρονισμού.

Τα επίπεδα του θορύβου φάσης τα οποία είναι πολύ μικρά για να εντοπιστούν σε ένα παλμογράφο μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στο φάσμα ενός σήματος που μπορεί να είναι πολύ σημαντικό στις ραδιοεφαρμογές. Τέτοιες ποσότητες θορύβου φάσης σε ένα εκπεμπόμενο σήμα μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση σημαντικές παρεμβολές σε άλλες υπηρεσίες, ενώ ποσότητες θορύβου φάσης σε έναν τοπικό ταλαντωτή δέκτη μπορεί να μειώσει την επιλεξιμότητα του δέκτη ή να προκαλέσει άλλες ανεπιθύμητες συνέπειες. Αυτές οι συνέπειες απασχολούν πάρα πολύ τους μηχανικούς επικοινωνιών.

2.7.2 Καθορισμός Μονόπλευρού Θορύβου Φάσης

Οι γεννήτριες σήματος, οι ταλαντωτές ελεγχόμενοι από τάση και άλλες πηγές σήματος συχνά έχουν παραμέτρους θορύβου φάσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα: Θόρυβος Φάσης VCO

Αυτός είναι ο θόρυβος φάσης ενός από τα σχήματα VCO στα 450 MHz. Η οθόνη ενός αναλυτή φάσματος δίνεται παρακάτω στο σχήμα 1.3.

Ο μονόπλευρος θόρυβος φάσης, συχνά δίνεται από το σύμβολο $L\phi(f_m)$, το οποίο είναι ένας λόγος ισχύος. Είναι ο λόγος της ισχύος σε εύρος ζώνης 1 Hz σε μια συχνότητα f_m μακριά από το φέρον προς την ισχύ του ίδιου φέροντος. Καθώς είναι λόγος ισχύος, για τη μετατροπή σε dBc/Hz, χρησιμοποιούμε $10\log_{10}(L\phi(f_m))$.

Παράδειγμα: Κοιτώντας το σχήμα 1.2, βλέπουμε ότι ο μονόπλευρος θόρυβος φάσης σε μία offset συχνότητα των 10 kHz είναι περίπου -120dBc/Hz, ($L\phi(10kHz) = 10^{-12}$).

Σημειώνουμε ότι ο καθορισμός του θορύβου φάσης υποθέτει ότι το φάσμα είναι συμμετρικό, όπως είναι για ένα σήμα το οποίο έχει μόνο θόρυβο φάσης και καθόλου

θόρυβο πλάτους. Τα σήματα με ασυμμετρικό φάσμα (π.χ. φάσμα στο $f_c + f_m$ είναι διαφορετικό από το φάσμα στο $f_c - f_m$), έχουν συνδυασμό θορύβου πλάτους και φάσης και είναι απαραίτητο να αφαιρέσουμε το θόρυβο πλάτους πριν μετρήσουμε $L\phi(f_m)$ στον αναλυτή φάσματος.

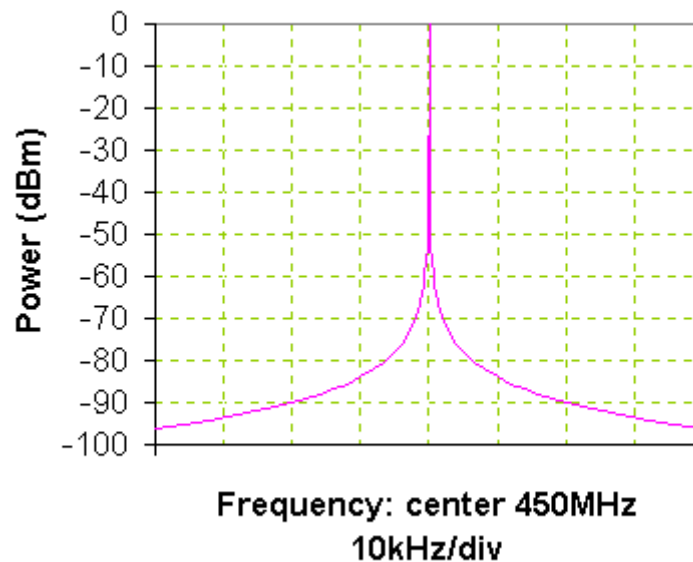
Αν και ο μονόπλευρος θόρυβος φάσης κατά σύμβαση καθορίζεται σε εύρος ζώνης 1 Hz, στην πράξη είναι χρήσιμο να καθορίζουμε την ισχύ του θορύβου στα άλλα εύρη ζώνης. Αν ο μονόπλευρος θόρυβος φάσης είναι σχεδόν σταθερός στο εύρος ζώνης του ενδιαφέροντος τότε η ισχύς του θορύβου σε εύρος ζώνης B Hz κεντραρισμένη σε μια απόσταση f_m από το φέρον (π.χ. κεντραρισμένο στο $f_c + f_m$ ή στο $f_c - f_m$) δίνει περίπου από τη σχέση:

$$\text{Ισχύς σε } B \text{ Hz} = B L\phi(f_m) P_c$$

Όπου P_c είναι η ισχύς του φέροντος. Είναι γενικά πιο βολικό να δουλεύουμε σε dB, έτσι η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\text{Ισχύς σε } B \text{ Hz [dBm]} = 10 \log_{10}(B) + L\phi(f_m) [\text{dBc/Hz}] + P_c [\text{dBm}]$$

Παράδειγμα: Κοιτώντας στο σχήμα 1.2 ξανά και παρατηρώντας ότι ο μονόπλευρος θόρυβος φάσης σε μια offset συχνότητα των 10 kHz είναι -120dBc/Hz. Αν ο VCO παρήγαγε 0dBm στα 450MHz, τότε ένα φίλτρο με εύρος 3kHz στα 450.01MHz θα λάμβανε περίπου -85dBm και ένα δεύτερο φίλτρο (του ίδιου εύρους) στα 449.99MHz επίσης θα λάμβανε περίπου -85dBm. Αυτό φαίνεται από τον ακόλουθο αναλυτή φάσματος για τον VCO με θόρυβο φάσης όπως δίνεται στο σχήμα 1.2, όπου η ανάλυση του εύρους ζώνης είναι 3kHz. Αυτός ο αναλυτής φάσματος δείχνει την ισχύ που λαμβάνεται από ένα φίλτρο εύρους 3 kHz καθώς η κεντρική συχνότητα ποικίλει στην επιθυμητή ακτίνα.



Σχήμα: Απεικόνιση αναλυτή φάσματος του VCO

Η ακρίβεια της (1.10) μειώνεται καθώς το εύρος ζώνης B αυξάνεται, όταν η κλίση του θορύβου φάσης δεν είναι γραμμική (φαίνεται γραμμική στο σχήμα 1.2, αλλά αυτό έχει λογαριθμικές κλίμακες, ποικίλει τυπικά ως $1/f_m^2$). Για να καθορίσουμε

την ισχύ σε γειτονικά κανάλια, είναι αναγκαίο να ολοκληρώνουμε στην κλίση του θορύβου φάσης. Αν υπάρχουν μετρήσεις του θορύβου φάσης ολοκληρώνονται αριθμητικά, αλλιώς οι πράξεις γίνονται με κάποιον εξομοιωτή.

2.7.3 Φάσμα ενός VCO διαμορφωμένου από Λευκό Θόρυβο.

Για να αποδείξουμε την παραπάνω θεωρία, θα αναλύσουμε το πρακτικό παράδειγμα του λευκού θορύβου που διαμορφώνει έναν VCO.

Έχουμε έναν VCO με ευαισθησία K_v (Hz/Volt). Η τάση ελέγχου του VCO έχει ένα επίπεδο DC, το οποίο δίνει μια παραγόμενη συχνότητα f_c και μια τάση θορύβου v_n η οποία έχει φάσμα λευκού θορύβου e_n volts/sqrt(Hz).

Για να καθορίσουμε το παραγόμενο φάσμα εργαζόμαστε ως ακολούθως:

- Υποθέτουμε ότι η τάση θορύβου αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ημιτονοειδών σημάτων.
- Σημειώνουμε ότι κάθε ημιτονοειδές σήμα έχει ως αποτέλεσμα πολύ χαμηλό επίπεδο διαμόρφωσης φάσης
- Έτσι για κάθε ημιτονοειδές σήμα καθορίζουμε την ισχύ στους πλευρικούς λοβούς.
- Προσθέτουμε την ισχύ των πλευρικών λοβών από κάθε ημιτονοειδές σήμα.

Υποθέτουμε ότι το σήμα αποτελείται από ημιτονικά κύματα με διαστήματα 1Hz (για την ακρίβεια θα έπρεπε να υποθέσουμε το όριο καθώς το διάστημα συχνότητας πάει στο 0). Καθώς ο θόρυβος είναι λευκός, υπάρχει ίση ισχύς σε κάθε περιοχή 1Hz, έτσι μπορούμε να αναπαραστήσουμε κάθε περιοχή 1Hz στη συχνότητα f_m ως εξής:

$$v(f_m) = \sqrt{2} e_n \sin(2\pi f_m t + \varphi_m)$$

Σημειώνουμε ότι το rms επίπεδο σε κάθε 1Hz είναι e_n όπως απαιτείται, αλλά με τυχαία φάση φ_m . Καθένα από αυτά τα ημίτονα αποτελεί σε διαμόρφωση συχνότητας στενής ζώνης, με δείκτη διαμόρφωσης που δίνεται ως εξής:

$$\beta(f_m) = \sqrt{2} e_n K_v / f_m$$

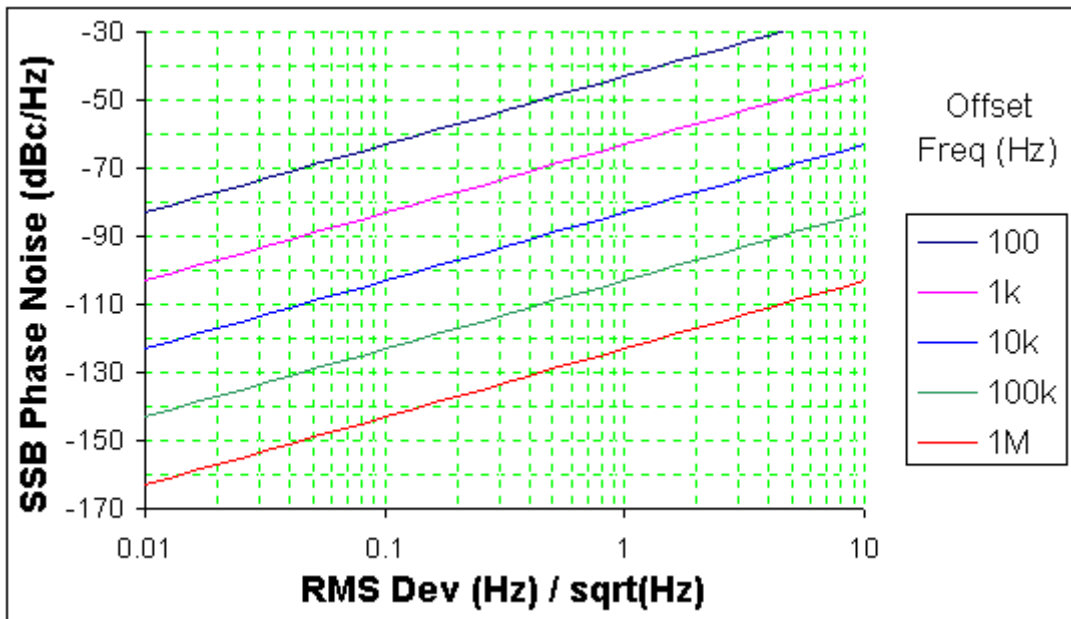
Σημειώνουμε ότι το K_v είναι σε Hz/volt και η f_m σε Hz. Όσο ο δείκτης ολικής διαμόρφωσης είναι μικρός (όπως και τυπικά είναι) τότε κάθε περιοχή 1Hz της v_n συμβάλλει σε πλευρικές περιοχές πλάτους.

$$\text{Noise Sideband Amplitude} = e_n K_v / (\sqrt{2} f_m)$$

σχετική με το φέρον. Έτσι ο μονόπλευρος θόρυβος φάσης δίνεται από την εξίσωση:

$$L\phi(f_m) = e_n^2 K_v^2 / (2 f_m^2)$$

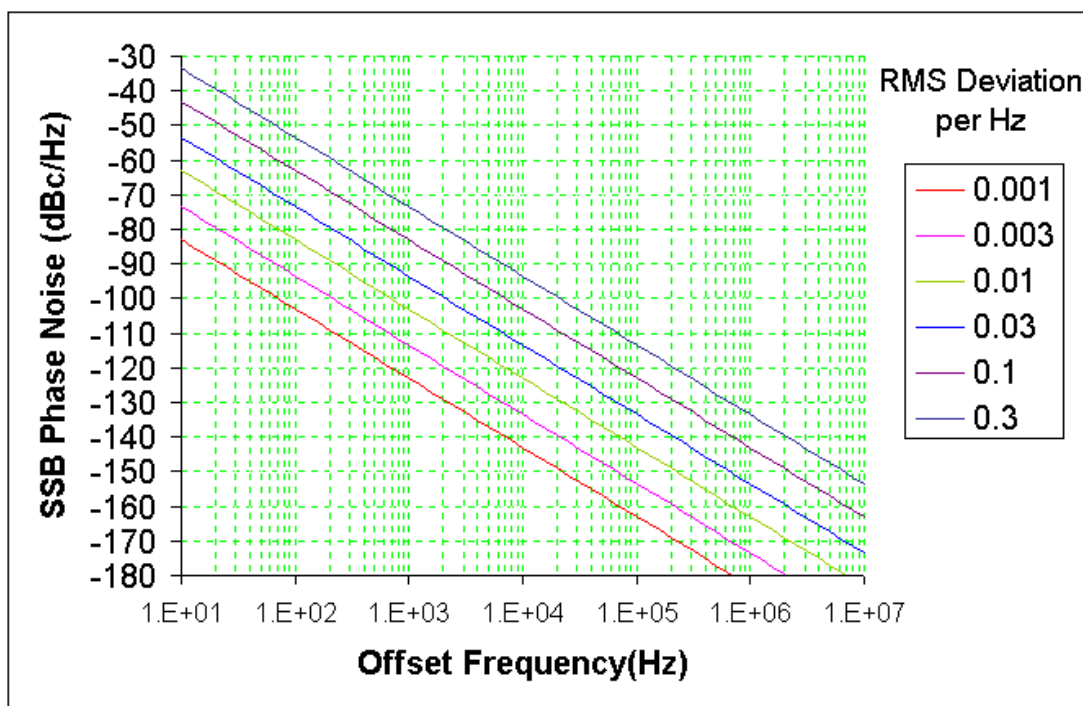
Σημειώνουμε ότι η $(e_n K_v)$ είναι η rms απόκλιση ανά Hz, επιτρέποντας τη χρήση των ακόλουθων παγκοσμίων χαρτών.



Σχήμα: Universal VCO Noise Modulation Chart 1

Το παραπάνω σχήμα δείχνει πως ο θόρυβος φάσης σε συγκεκριμένες offset συχνότητες (100Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz και 1MHz) ποικίλει σύμφωνα με την RMS απόκλιση συχνότητας εύρους ζώνης ανά Hz – αυτή είναι η e_n .

Παράδειγμα: Ο θόρυβος από έναν αντιστάτη $1k\Omega$ ($4nV/\sqrt{Hz}$) που διαμορφώνει έναν $10MHz/V$ VCO έχει ως αποτέλεσμα μία rms απόκλιση $0.04Hz$, έτσι ώστε το διάγραμμα αποκαλύπτει ότι ο θόρυβος φάσης θα είναι $-111dBc/Hz$ σε $10kHz$ offset.



Σχήμα: Universal VCO Noise Modulation Chart 2

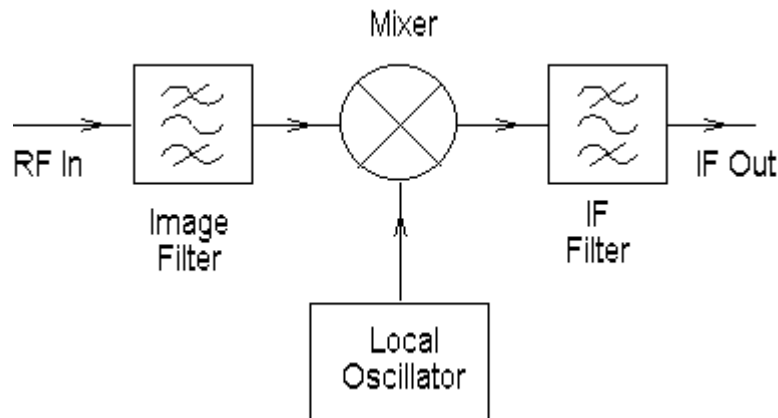
Το παραπάνω σχήμα δείχνει το τυπικό παραγόμενο φάσμα με διαλεγμένες τιμές $e_n K_v$, η RMS απόκλιση ανά Hz.

Παράδειγμα: Ο θόρυβος από έναν αντιστάτη $1k\Omega$ ($4nV/\sqrt{Hz}$) που διαμορφώνει έναν $10MHz/V$ VCO, η rms απόκλιση που προκύπτει είναι $0.04Hz$ και θα δώσει ένα φάσμα λίγο χειρότερο από την τρίτη κλίση από την κορυφή.

2.7.4 Αμοιβαία Μείξη – πως ο θόρυβος φάσης του τοπικού ταλαντωτή επηρεάζει την επιλεκτικότητα

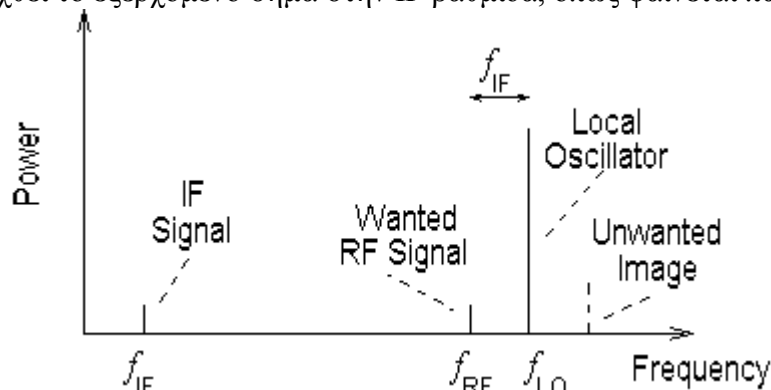
Το Reciprocal mixing (αμοιβαία μείξη) συμβαίνει σε ένα υπερετερόδουνο δέκτη όταν ο θόρυβος του τοπικού ταλαντωτή αναμιγνύεται με ισχυρά σήματα, τα οποία είναι κοντινά στη συχνότητα του επιθυμητού σήματος, παράγοντας ανεπιθύμητα προϊόντα θορύβου στην ενδιάμεση συχνότητα υποβαθμίζοντας την ευαισθησία του δέκτη.

Ένα τυπικό διάγραμμα δέκτη φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα: Δέκτης – $1^{ος}$ μείκτης

Εδώ το εισερχόμενο RF σήμα αναμιγνύεται με τον τοπικό ταλαντωτή ώστε να παραχθεί το εξερχόμενο σήμα στην IF βαθμίδα, όπως φαίνεται παρακάτω.



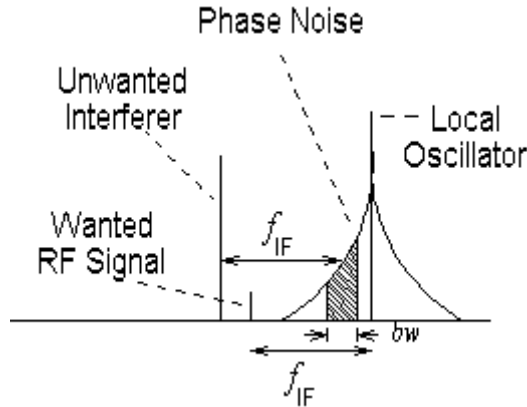
Σχήμα: Σχέσεις συχνότητας κατά την Down Conversion

Υποθέτουμε ότι η συχνότητα του τοπικού ταλαντωτή είναι μικρότερη της RF συχνότητας, Για να ρυθμίσουμε το δέκτη στην f_{IF} ο τοπικός ταλαντωτής τίθεται σε μια

$$f_{LO} = f_{RF} + f_{IF}$$

Το είδωλο του φίλτρου μπροστά από το μείκτη έχει ως ασχολία τη θέση των σημάτων στη συχνότητα ειδώλου ($f_{image} = f_{LO} + f_{IF} = f_{RF} + 2 f_{IF}$) έτσι ώστε αυτά να μην γίνονται επίσης f_{IF} . Η επιλεξιμότητα του δέκτη καθορίζεται από την επιλεξιμότητα του IF φίλτρου.

Στην πραγματικότητα, όπου ο τοπικός ταλαντωτής έχει θόρυβο φάσης, το φάσμα του δεν είναι η ιδανική συνάρτηση δέλτα, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα: Αμοιβαία μείξη

Εδώ φαίνεται ο θόρυβος φάσης στον τοπικό ταλαντωτή. Για να δει κανείς τις συνέπειες που αυτό έχει στην επιλεξιμότητα, φανταστείτε ένα ισχυρό σήμα που παρεμβάλλεται κοντά στο επιθυμητό RF σήμα. Το ανεπιθύμητο αυτό σήμα μπορεί να αναμιχθεί με τον πλευρικό θόρυβο του τοπικού ταλαντωτή για να παράγει επίσης ένα αποτέλεσμα στην IF βαθμίδα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αμοιβαία ανάμειξη. Οι πλευρικές περιοχές του θορύβου φαίνονται σκιασμένες στο παραπάνω σχήμα.

Για να καθορίσουμε τη σχετική ισχύ που παράγεται στο IF για το επιθυμητό σήμα και το παρεμβαλλόμενο, πρώτα παρατηρούμε ότι το επιθυμητό σήμα αναμιγνύεται με το φέρον του τοπικού ταλαντωτή, ενώ το παρεμβαλλόμενο αναμιγνύεται με ένα σήμα που έχει την ισχύ στις πλευρικές περιοχές του θορύβου.

$$P_{rm} = L\phi(f_m) B_w \text{ (ανάλογη με το φέρον)}$$

B_w είναι το εύρος ζώνης του IF φίλτρου. Σημειώνουμε ότι αυτό είναι προσεγγιστικό – αν η καμπύλη του θορύβου φάσης έχει ασυνήθιστα σημεία καμπής, ή αν το B_w είναι πολύ μεγάλο, ή το IF φίλτρο έχει ένα ασυνήθιστο σχήμα, τότε για να καθορίσουμε ακριβώς το θόρυβο, πρέπει να ολοκληρώσουμε την καμπύλη.

Έτσι στην έξοδο του μετατροπέα στο downlink υπάρχουν δύο σήματα: το επιθυμητό σήμα και τα ανεπιθύμητα προϊόντα του θορύβου. Για να καθορίσουμε τα σχετικά επίπεδα ισχύος, σημειώνουμε ότι κανονικοποιούνται με μέγιστο τη μονάδα. Έτσι, αν το επιθυμητό και τα ανεπιθύμητα σήματα έχουν ίσες ισχύεις εισερχόμενα στο μετατροπέα στο downlink (downconverter), τότε το επιθυμητό σήμα συγχωνεύεται με τα ανεπιθύμητα θορυβώδη σήματα. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της ποσότητας του παρόντος θορύβου στη βαθμίδα IF λόγω της αμοιβαίας ανάμειξης.

Καθώς η αμοιβαία ανάμειξη προσθέτει το ανεπιθύμητο σήμα αναμειγμένο με τον πλευρικό θόρυβο του τοπικού ταλαντωτή στην έξοδο του IF, κάθε διαμόρφωση φάσης ή συχνότητας στο παρεμβαλλόμενο σήμα χάνεται στην πορεία. Παρολαυτά, η διαμόρφωση πλάτους διατηρείται και διαμορφώνει τον προστιθέμενο θόρυβο

2.7.5 Φασματικές μάσκες για πομπούς

Οι πομποί θα έπρεπε, ιδανικά, να εκπέμπουν όλη την ισχύ τους μέσα στη δεσμευμένη περιοχή συχνότητάς τους. Δυστυχώς, ακόμα και χωρίς θόρυβο φάσης, αυτό δεν είναι πιθανό, έτσι πρέπει να κατανοήσουμε τις επιπτώσεις της εκπομπής εκτός της δεσμευμένης ζώνης συχνότητας και τις συνέπειες στον ίδιο τον εξοπλισμό.

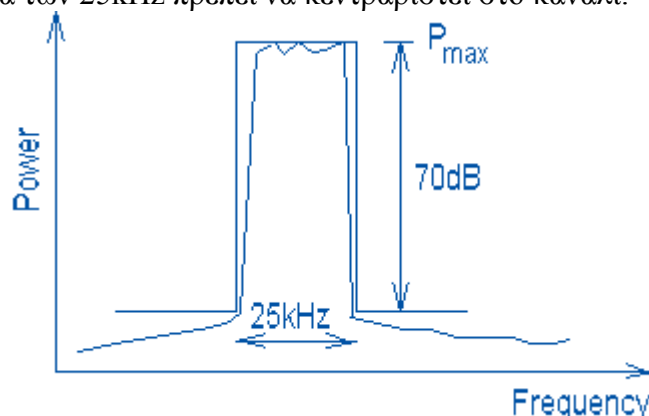
Υπάρχουν δύο κύριες συνέπειες του θορύβου φάσης στο παραγόμενο φάσμα του πομπού:

- Ο κοντινός θόρυβος φάσης (close-in phase noise) συχνά ευθύνεται για λάθη στη φασματική μάσκα που πρέπει να έχει ο πομπός.
- Ο ευρύς θόρυβος φάσης (wideband phase noise floor) – επιφέρει ασυμβατότητες με το δέκτη.

Close-in Phase Noise

Το περισσότερο μέρος της ενέργειας του θορύβου φάσης είναι συγκεντρωμένη κοντά στο φέρον. Αυτό, ενόσω στο κανάλι, συνήθως έχει επίπτωση μόνο μέσα στο σύστημα, κατά ανάγκη εκπέμπουμε θόρυβο μαζί με το σήμα. Ο θόρυβος φάσης που γειτονεύει με το κανάλι μας μπορεί να επιφέρει μεταφορά σημαντικής ενέργειας στο διπλανό κανάλι. Αυτός ο πομπός μπορεί να επιφέρει πρόβλημα (*jam*) τους κοντινούς δέκτες που λειτουργούν στο γειτονικό κανάλι.

Παράδειγμα: Η ακόλουθη μάσκα φάσματος για μια εκπομπή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η καθορισμένη μάσκα έχει πρόσθετες πληροφορίες τις οποίες πρέπει να ικανοποιεί το σήμα όταν μετράται σε ένα εύρος ζώνης 3kHz. Η πλευρική μάσκα των 25kHz πρέπει να κεντραριστεί στο κανάλι.



Σχήμα: Απλή μάσκα εκπομπής

Σύμφωνα, λοιπόν, με το παραπάνω σχήμα, για να καθορίσουμε τις παραμέτρους για αυτή τη μάσκα, σημειώνουμε ότι για το κρίσιμο σημείο που βρίσκεται σε μια offset συχνότητα των 12.5kHz, η ισχύς πρέπει να βρίσκεται 70dB χαμηλότερα σε σχέση με την P_{max} . Μέσω προσομοίωσης ή ανάλυσης, πρέπει να συσχετίσουμε την P_{max} στο επίπεδο του φέροντος. Για να είμαστε 70dB χαμηλότερα στα 12.5kHz σε

ένα εύρος ζώνης 3kHz απαιτούμε μονόπλευρο θόρυβο φάσης στα 12.5kHz της τάξης των:

$$-70\text{dBc/Hz} - 10 \cdot \log_{10}(3\text{kHz}) = -104.8\text{dBc/Hz}.$$

Παρόλαυτά, αυτό θα χαμηλώσει τη μέση ισχύ στο κανάλι των 3kHz κατά 70dB. Για να φτάσουμε τη μέγιστη ισχύ σε αυτό το επίπεδο χρειαζόμαστε περίπου 10dB ακόμα (ένα τυπικό νούμερο για τη διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη και τη μέση ισχύ του θορύβου σε έναν αναλυτή φάσματος). Έτσι, για να καταφέρουμε να φτάσουμε το θόρυβο ισχύος να φτάσει τα όρια της μάσκας απαιτούμε μονόπλευρο θόρυβο φάσης της τάξης των -115dBc/Hz στα 12.5kHz.

Φυσικά, αν η διαμόρφωση παράγει σημαντική ισχύ σε αυτές τις offset συχνότητες, τότε και αυτός ο παράγοντας θα πρέπει να συμπεριληφθεί στην ανάλυση.

Wideband Phase Noise

Όπως όλοι οι ενισχυτές παράγουν κάποιον ευρυζωνικό θόρυβο, έτσι κάνουν και οι πομποί. Αυτός ο ευρυζωνικός θόρυβος είναι σε ένα σημαντικά χαμηλότερο επίπεδο από τον κοντινό θόρυβο φάσης, αλλά είναι αρκετά υψηλού επιπέδου ώστε να αποσυντονίσει ένα κοντινό δέκτη.

Κεφάλαιο 3^ο: Υλοποίηση του πομπού, του κομματιού RF και του ενισχυτή με χρήση του προγράμματος Advanced Design System 2005A της Agilent ©

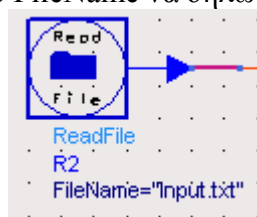
3.1 Υλοποίηση του κομματιού του πομπού με χρήση του προγράμματος Advanced Design System 2005A της Agilent ©

3.1.1 Εισερχόμενα Δεδομένα και Διαμόρφωσή τους (Input Data – Modulation)

Για την υλοποίηση των εισερχόμενων bits, χρησιμοποίησα το component Bits της βιβλιοθήκης Numeric, Sources του προγράμματος.

Στις παραμέτρους του component αυτού το πεδίο Type πρέπει να έχει την τιμή Random και το πεδίο ProbOfZero να έχει την τιμή 0.5.

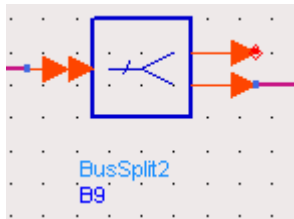
Εναλλακτικά, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το component ReadFile της βιβλιοθήκης Numeric, Sources του προγράμματος που μας επιτρέπει να διαβάζουμε δεδομένα από αρχεία. Αν, λοιπόν, χρησιμοποιήσουμε αυτό component, πρέπει στο πεδίο FileName να δηλώσουμε τη διαδρομή του αρχείου που θα διαβαστεί στο δίσκο.



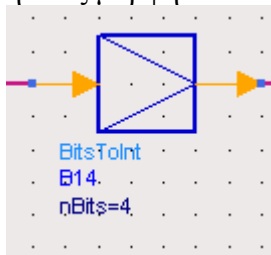
Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε το component Asynchronous Data Distributor της βιβλιοθήκης Numeric, Control, το οποίο μεταφέρει μέρος των εισερχόμενων δεδομένων στη συνέχεια του κομματιού του πομπού. Εδώ, το μέγεθος των μπλοκ που θα μεταφερθεί είναι ίσο με τα bytes που θέλουμε να μεταφερθούν, δηλαδή ίσο με $192 \cdot \text{Nubs}$, όσα και τα φέροντα της πληροφορίας.



Ακολουθεί το component Bus Splitter της βιβλιοθήκης Numeric, Control. Αυτό μας επιτρέπει να δώσουμε το μέγεθος των μπλοκ που θα χρησιμοποιηθεί, είναι ωστόσο χρήσιμο για numeric μετρήσεις. Ουσιαστικά βολεύει για απομόνωση των δεδομένων.



Έπειτα χρησιμοποιούμε ένα component Bits to Integer Converter της βιβλιοθήκης Signal Converters. Το χρησιμοποιούμε, γιατί οι κωδικοποιήσεις που θα γίνουν αφορούν στην αέραια μορφή των bits μας και δεν μπορούν να γίνουν στην αρχική τους μορφή.



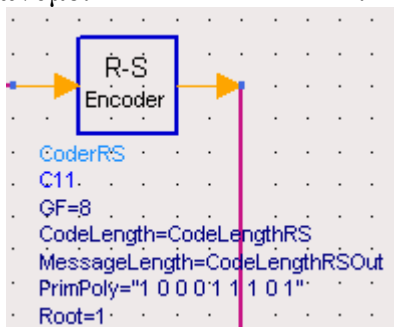
Προχωρώντας, χρησιμοποιούμε το component Reed Solomon Encoder της βιβλιοθήκης Numeric, Communications. Αυτό αντιπροσωπεύει τον κωδικοποιητή που ακολουθεί την είσοδο των bits στον πομπό. Σε αυτόν, συμπληρώνουμε τα πεδία ως εξής:

GF: Συμπληρώνεται με τον αριθμό 8. Αυτό ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το πεδίο Galois. Στην περίπτωσή μας, είναι 2^8 .

CodeLength: Συμπληρώνεται σύμφωνα με τον πίνακα που έχει δοθεί από την IEEE.

MessageLength: Συμπληρώνεται σύμφωνα με τον πίνακα που έχει δοθεί από την IEEE.

PrimPoly: Συμπληρώνεται με 1 0 0 0 1 1 1 0 1 για να αναπαραστήσει το πολυώνυμο: $x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$.

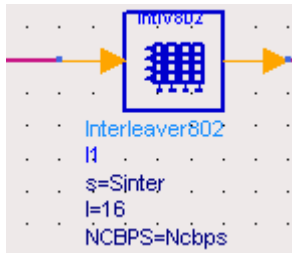


Ακολουθεί το component Interleaver802 της βιβλιοθήκης Numeric, Advanced Comm, το οποίο είναι αυτό που υλοποιεί τη διαδικασία του interleaving. Τα πεδία συμπληρώνονται ως εξής:

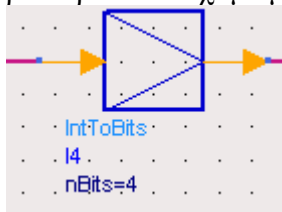
s (modular factor of interleaving): Συμπληρώνεται με τη μεταβλητή Sinter, η οποία ορίζεται με βάση τον πίνακα της IEEE.

l (divisor factor of interleaving): Συμπληρώνεται με τον αριθμό 12.

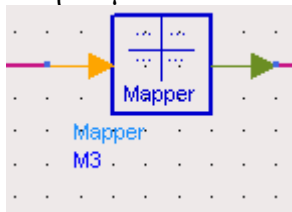
NCBPS (number of coded bits per second): Συμπληρώνεται με τη μεταβλητή Ncbps, η οποία ορίζει τα bits τα οποία θα κωδικοποιηθούν κατά την IEEE.



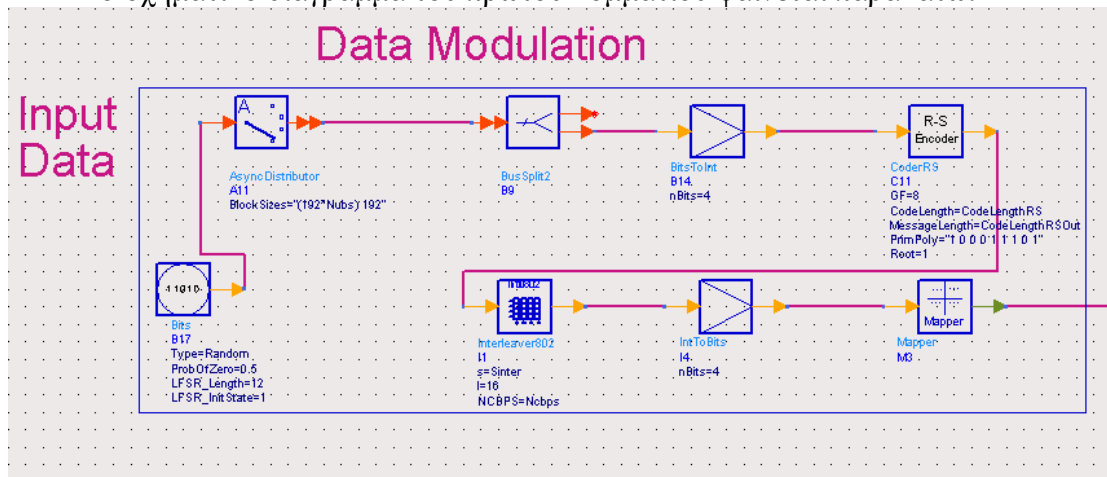
Ακολουθεί το component Integer to Bits Converter της βιβλιοθήκης Signal Converters. Αυτό γίνεται, για να μπορέσουμε να ξαναέχουμε το ρεύμα των bits μας που προσωρινά το είχαμε μετατρέψει στην ακέραιά του μορφή.



Τώρα είμαστε έτοιμοι να μεταφέρουμε τα bits μας σε αστερισμό. Γι' αυτό χρησιμοποιούμε το component Mapper της βιβλιοθήκης Numeric, Advanced Comm. Στο πεδίο ModType ορίζουμε τον τύπο της διαμόρφωσης που θέλουμε να ακολουθήσουμε.

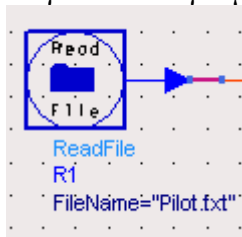


Το σχηματικό διάγραμμα του πρώτου κομματιού φαίνεται παρακάτω:

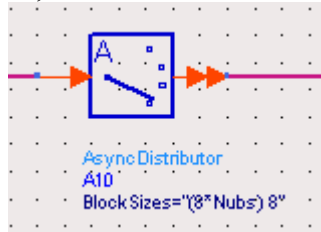


3.1.2 Πιλοτικά Δεδομένα και Διαμόρφωσή τους (Pilot Data – Modulation)

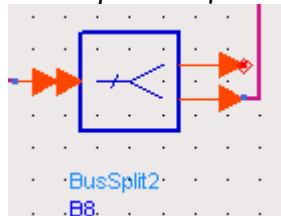
Αρχικά χρησιμοποιούμε το component ReadFile της βιβλιοθήκης Numeric, Sources για να εισάγουμε τα δεδομένα για τα πιλοτικά φέροντα.



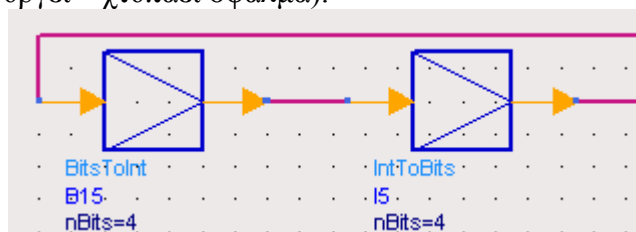
Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε το component Asynchronous Data Distributor της βιβλιοθήκης Numeric, Control, το οποίο μεταφέρει μέρος των εισερχόμενων δεδομένων στη συνέχεια του κομματιού του πομπού. Εδώ, το μέγεθος των μπλοκ που θα μεταφερθεί είναι ίσο με τα bytes που θέλουμε να μεταφερθούν, δηλαδή ίσο με $8 \cdot N_{\text{ubs}}$, όσα και τα πιλοτικά φέροντα.



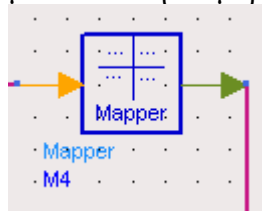
Ακολουθεί το component Bus Splitter της βιβλιοθήκης Numeric, Control. Αυτό μας επιτρέπει να μη χρησιμοποιηθεί, είναι ωστόσο χρήσιμο για numeric μετρήσεις. Ουσιαστικά βολεύει για απομόνωση των δεδομένων.

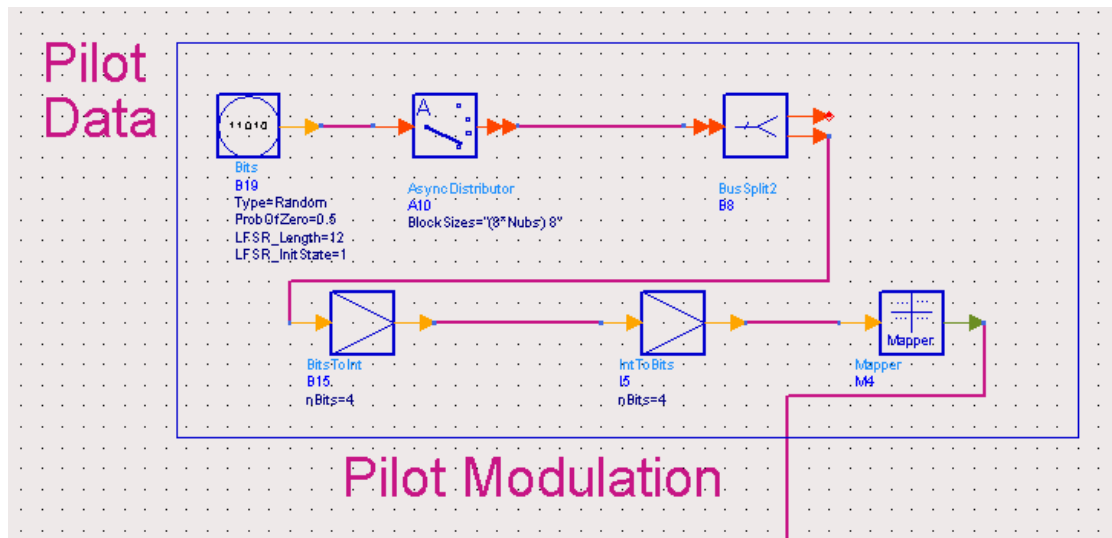


Μετά χρησιμοποιούμε τα component μετατροπής σήματος Bit to Integer και αμέσως μετά Integer to Bits της βιβλιοθήκης Signal Converters (για έναν περίεργο λόγο, χωρίς αυτήν την περίεργη ακολουθία μετατροπών, ο αστερισμός των bits δε λειτουργεί – χτυπάει σφάλμα).



Έπειτα, χρησιμοποιούμε το component Mapper, της βιβλιοθήκης Numeric, Advanced Comm, ώστε να μεταφερθούν τα πιλοτικά bits στον αστερισμό. Συνήθως χρησιμοποιείται η διαμόρφωση BPSK, αν και είναι σχετικά ελεύθερη η επιλογή.





3.1.3 Διαμόρφωση OFDM (OFDM Modulation)

Ακολουθεί το κομμάτι της OFDM διαμόρφωσης ή καλύτερα πολυπλεξίας, όπως είναι η πιο ακριβής έννοια του OFDM.

Αρχικά, τα εισερχόμενα bits του πομπού και τα πιλοτικά, που έχουν μετατραπεί σε μιγαδικούς αριθμούς χάρη στους αστερισμούς που έχουν μεταφερθεί (το λεγόμενο mapping) πρέπει να πολυπλεχθούν ώστε να γίνουν ένα ενιαίο σύνολο που θα μπορεί να επεξεργαστεί ως ένα.

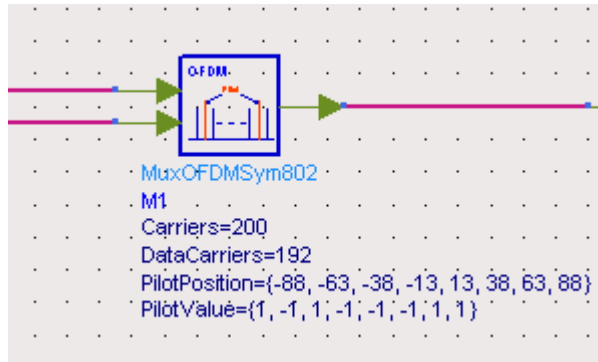
Γι' αυτό, χρησιμοποιούμε το component MuxOFDMSym802 της βιβλιοθήκης Numeric, Advanced Comm. Με αυτό γίνεται πολυπλεξία μεταξύ των μιγαδικών συμβόλων των bits του πομπού και των μιγαδικών συμβόλων των πιλοτικών bits. Συμπληρώνουμε τα πεδία ως εξής:

Carriers: Ισούται με 200, γιατί τόσος είναι ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων φερόντων στο OFDM του 802.16TM της IEEE.

DataCarriers: Ισούται με 192, γιατί τόσα είναι τα φέροντα που μεταφέρουν ωφέλιμη πληροφορία στο OFDM του 802.16TM της IEEE.

PilotPosition: Εδώ δηλώνουμε τη θέση που καταλαμβάνουν τα πιλοτικά δεδομένα. Υπενθυμίζουμε ότι τα πιλοτικά φέροντα είναι 8, οπότε είναι προφανές ότι αφού 200 είναι τα χρησιμοποιούμενα φέροντα και 192 τα ωφέλιμα, τα πιλοτικά είναι $200 - 192 = 8$ πιλοτικά φέροντα. Οι θέσεις τους, σύμφωνα με το πρωτόκολλο της IEEE είναι $\{-88, -63, -38, -13, 13, 38, 63, 88\}$ αν θεωρήσουμε ότι για τις 256 θέσεις-σημεία του FFT (ή πιο σωστά, του IFFT που θα ακολουθήσει) έχουμε αρίθμηση από -128 έως +127 (δηλαδή 256 σημεία).

PilotValues: Εδώ θέτουμε τις μιγαδικές τιμές των πιλοτικών φερόντων που έχουν οριστεί από το πρωτόκολλο και είναι $\{1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, 1\}$.



Έτσι, τώρα ως έξοδο έχουμε ένα ακατέργαστο σύμβολο OFDM με συμπληρωμένα 200 φέροντα με μιγαδικές τιμές. Σε αυτό συνυπάρχουν τα δεδομένα με τις πιλοτικές τιμές. Όπως έχουμε προαναφέρει, οι πιλοτικές τιμές χρησιμεύουν στο να μπορούμε να έχουμε έλεγχο ανά κάθε frame και πιο βασικό, να μπορούμε να επιτύχουμε εύκολο συγχρονισμό και equalization κατά τη δημιουργία του δέκτη.

Εν συνεχεία, χρησιμοποιούμε το component LoadIFFTBuf802 της βιβλιοθήκης Numeric, Advanced Comm. Αυτό το component χρησιμοποιείται για να μεταφέρει τα (μιγαδικά) πολυπλεγμένα δεδομένα στην είσοδο του IFFT. Επίσης, κάνει τη διαδικασία του zero padding, όπου υπάρχουν κενά φέροντα. Τα πεδία συμπληρώνονται ως εξής:

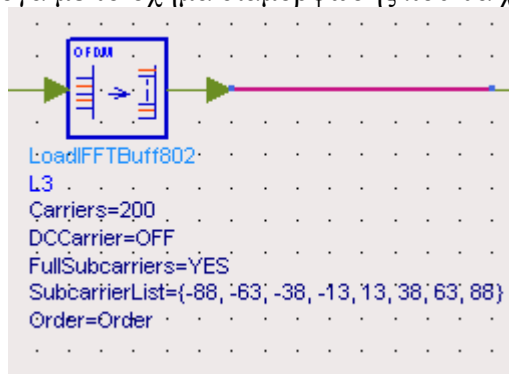
Carriers: Ισούται με 200, όσα και τα φέροντα που μεταφέρουν πληροφορία (δεδομένα και πιλοτικά).

DCCarrier: Ισούται με OFF, καθότι το πρωτόκολλο δε χρειάζεται DC συνιστώσα (DC Carrier Nulled, όπως χαρακτηριστικά αναφέρει το πρωτόκολλο).

FullSubcarriers: YES, γιατί θέλουμε να υπολογιστούν όλα τα φέροντα.

SubcarrierList: {-88, -63, -38, -13, 13, 38, 63, 88}, όπως και οι θέσεις των πιλοτικών φερόντων. Χρησιμοποιούμε αυτές τις θέσεις για θέσεις ελέγχου.

Order: Πρόκειται για την τάξη του 2 που αντιπροσωπεύει τα σημεία του IFFT. Συμπληρώνεται με τη μεταβλητή Order, που ορίζεται στα variables και παίρνει τιμή ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί.



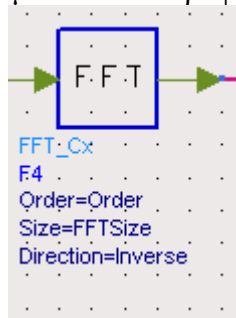
Τώρα πια είμαστε έτοιμοι να περάσουμε στη διαδικασία του IFFT. Γι' αυτό χρησιμοποιούμε το component FFT_Cx της βιβλιοθήκης Numeric, Signal Processing. Τα πεδία συμπληρώνονται ως εξής:

Order: Ο εκθέτης του 2 που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των σημείων του IFFT μετασχηματισμού. Συνήθως ισούται με 8 ($2^8=256$, όπως θέλουμε), αλλά καλύτερα

θέτουμε τη μεταβλητή Order για να λαμβάνουμε υπόψιν μας και το σχήμα διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιήσουμε.

Size: Ο αριθμός των εισερχόμενων δειγμάτων που θα διαβάσει ο IFFT. Ισούται με τη μεταβλητή FFTSize, που μας δίνει το μέγεθος του FFT (ουσιαστικά τα σημεία του μετασχηματισμού) και ισούται με 2^{Order} .

Direction: Η κατεύθυνση του μετασχηματισμού. Επιλέγουμε Inverse, γιατί θέλουμε τον αντίστροφο μετασχηματισμό FFT, δηλαδή IFFT.

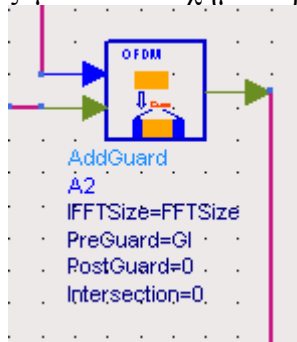


Στη συνέχεια, αφού έχουμε το ολοκληρωμένο σύμβολο OFDM (δηλαδή, τα μιγαδικά σύμβολα αφού έχουν μπει σε φέροντα συχνοτήτων και έχουν δημιουργήσει ημίτονα με διαφορετικές συχνότητες προτίθενται για να συνθέσουν το ολοκληρωμένο σύμβολο OFDM), πρέπει να ακολουθηθεί η διαδικασία του διαστήματος φύλαξης (guard interval). Γι' αυτό χρησιμοποιούμε το component AddGuard της βιβλιοθήκης Numeric, Advanced Comm. Τα πεδία του συμπληρώνονται ως εξής:

IFFTSize: Συμπληρώνεται με το μέγεθος των σημείων του μετασχηματισμού που ισούται με τη μεταβλητή FFTSize.

PreGuard: Δίνει το μέγεθος του διαστήματος φύλαξης. Ισούται με τη μεταβλητή GI, που δίνει το διάστημα φύλαξης σε συνάρτηση με τη μεταβλητή GuardInterval.

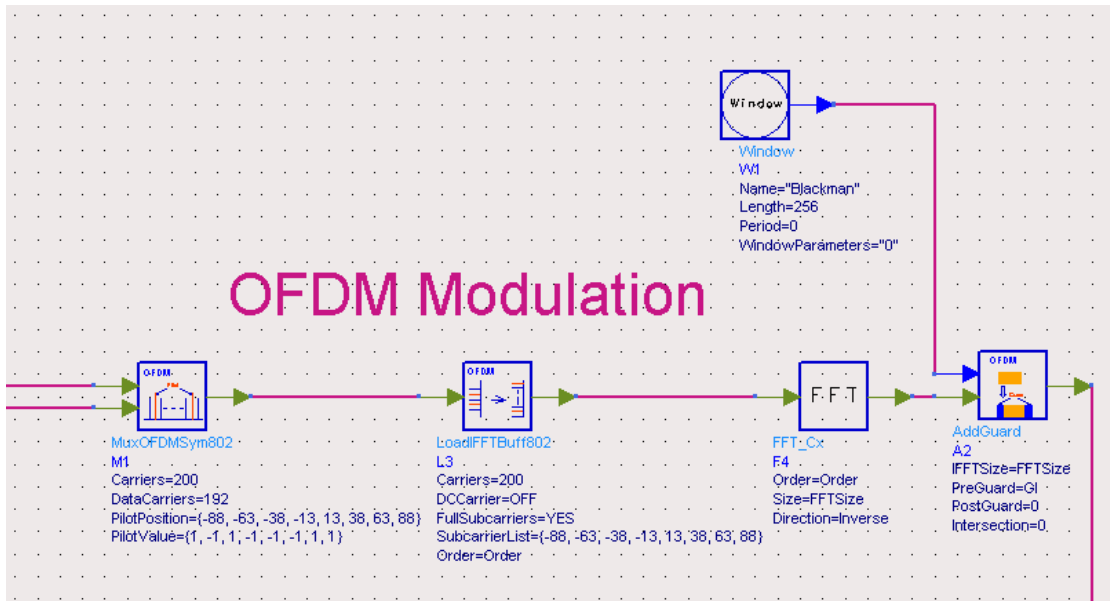
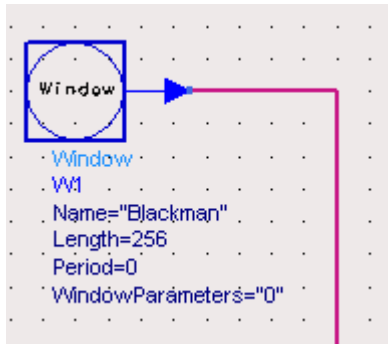
Στο component αυτό, όμως δεν εισέρχεται μόνο το σύμβολο OFDM, αλλά χρειαζόμαστε και σχήμα παραθυροποίησης (windowing).



Αυτό επιτυγχάνεται με το component Window της βιβλιοθήκης Numeric, Sources. Τα πεδία συμπληρώνονται ως εξής:

Name: Συμπληρώνουμε το όνομα της συνάρτησης παραθυροποίησης που θα χρησιμοποιήσουμε. Εμείς, χρησιμοποιούμε το Blackman, καθώς έχει αποδειχτεί ότι έχει καλύτερη απόδοση.

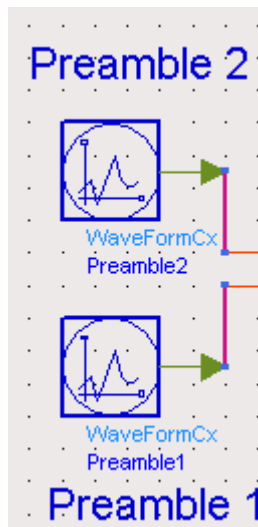
Length: Μήκος του παραθύρου. Δηλώνουμε το 256, όπως και το DataLength.



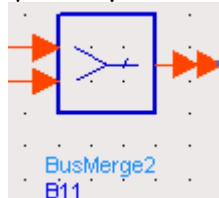
3.1.4 Διαμόρφωση Προοιμίου (Preamble Modulation)

Για να μπορέσουμε να συνεχίσουμε τη διαμόρφωση, χρειαζόμαστε τη διαμόρφωση των προοιμίων. Σύμφωνα με την IEEE, χρειαζόμαστε τα 2 προοίμια να πολυπλεχθούν και έπειτα να ακολουθηθεί η διαμόρφωσή τους.

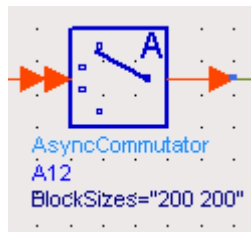
Αρχικά, λοιπόν, χρειαζόμαστε 2 components WaveFormCx της βιβλιοθήκης Numeric, Sources. Εδώ, ουσιαστικά χρειαζόμαστε μόνο το πεδίο Value του component όπου δηλώνουμε τα bits του προοιμίου ή ένα ολόκληρο αρχείο.



Έπειτα χρειαζόμαστε ένα component για την πολυπλεξία των 2 προοιμίων. Αυτό γίνεται με το component BusMerge2 της βιβλιοθήκης Numeric, Control.

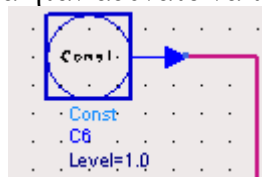


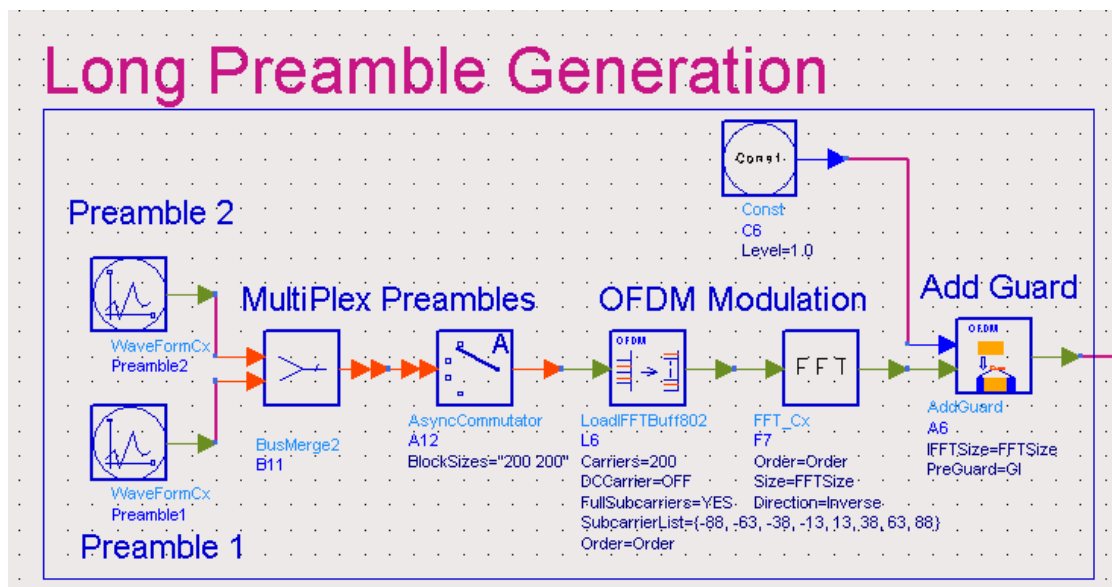
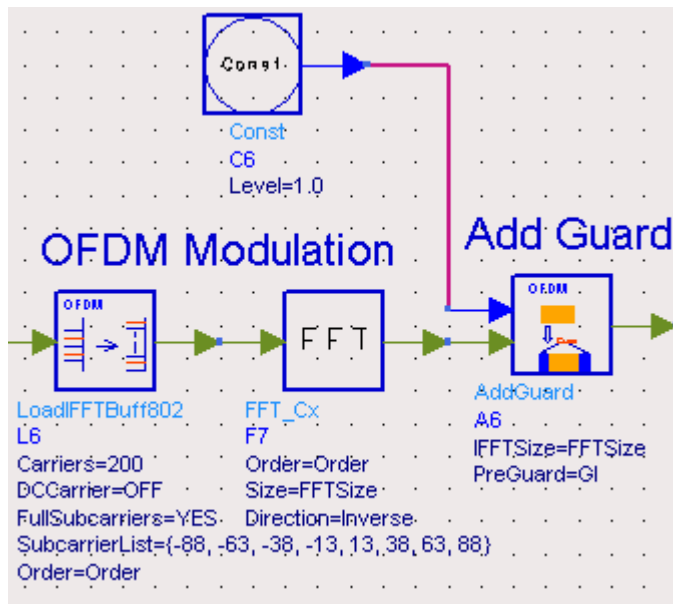
Για να καθορίσουμε τα μεγέθη της πολυπλεξίας, χρησιμοποιούμε στη συνέχεια το component AsyncCommutator της βιβλιοθήκης Numeric, Control. Στο πεδίο BlockSizes καθορίζουμε το μέγεθος των μπλοκ που θα διαβαστούν από το component. Το ορίζουμε και στις 2 περιπτώσεις ίσο με 200, όσα και τα φέροντα του 802.16™



Στη συνέχεια, τα (μικρά) μπλοκ πρέπει να μεταφερθούν στο μετασχηματισμό IFFT. Γι' αυτό, χρησιμοποιείται η ακολουθία των components LoadIFFTBuf802, FFT_Cx, AddGuard και Const όπως και πριν.

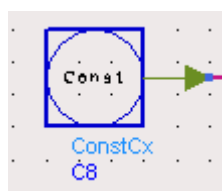
Η μόνη αλλαγή έγκειται στο component Const της βιβλιοθήκης Numeric, Sources. Η χρήση αυτού του component αντί του Window, χρησιμεύει στο να αφήνει τους πλευρικούς λοβούς στο φάσμα. Αν χρησιμοποιούσαμε το component Window δε θα μπορούσαμε να μελετήσουμε τους λοβούς του φάσματος, θα είχαν συρρικνωθεί και θα ήταν αδύνατο να τους ξεχωρίσουμε.





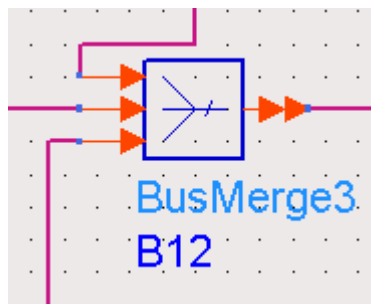
3.1.5 Εισαγωγή Κενού Διαστήματος (Idle Generation)

Για να γίνει σωστά η διαμόρφωση των frames, χρειαζόμαστε και ένα κενό (idle) διάστημα μεταξύ των frames. Γι' αυτό χρησιμοποιούμε ένα component ConstCx της βιβλιοθήκης Numeric, Sources.

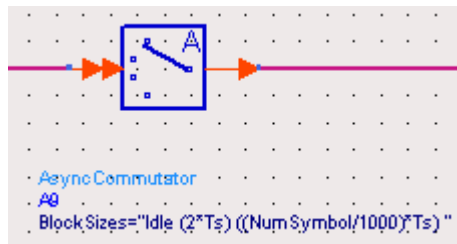


3.1.6 Διαμόρφωση RF (RF Modulation)

Για να αρχίσουμε την RF διαμόρφωση, πρέπει να σήματα δεδομένων, προοιμίου και idle να πολυπλεχθούν. Γι' αυτό χρησιμοποιούμε το component BusMerge3 της βιβλιοθήκης Numeric, Control.

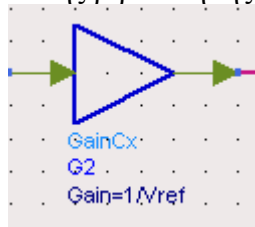


Στη συνέχεια, για να καθορίσουμε το μέγεθος των μπλοκ, χρησιμοποιούμε ένα component AsyncCommutator της βιβλιοθήκης Numeric, Control. Σε αυτόν, συμπληρώνουμε το πεδίο BlockSizes με Idle ($2 \cdot T_s$) ($\text{NumSymbol} \cdot T_s$), που σημαίνει ότι τα μπλοκ για το κενό διάστημα είναι ίσο με τη μεταβλητή Idle, τα μπλοκ για το προοίμιο ισούνται με $2 \cdot T_s$ καθώς θέλουμε το προοίμιο να καταλαμβάνει χώρο 2 συμβόλων και τέλος τα μπλοκ για τα δεδομένα ισούνται με $\text{NumSymbol} \cdot T_s$ για να χωρέσουν τα μπλοκ δεδομένων και τα πιλοτικά δεδομένα, δηλαδή τα δεδομένα του συμβόλου.

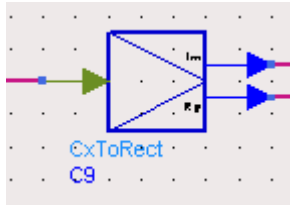


(Στο σχήμα φαίνεται αντί για $\text{NumSymbol} \cdot T_s$, η σχέση $(\text{NumSymbol}/1000) \cdot T_s$, γιατί το simulation έγινε για χρόνο προσομοίωσης 1 msec και ως αριθμό συμβόλων (NumSymbol) έχουμε υπολογίσει τον αριθμό συμβόλων για 1 sec. Ως εκ τούτου, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το 1/1000 του αριθμού των υπολογιζομένων συμβόλων.)

Έπειτα χρησιμοποιούμε έναν ενισχυτή. Γι' αυτό χρησιμοποιούμε το component GainCx της βιβλιοθήκης Numeric, Math. Στο πεδίο Gain θέτουμε $1/V_{ref}$.



Για να μπορέσουμε να κάνουμε την RF διαμόρφωση, κάνουμε πρώτα τη μετατροπή μιγαδικό σε ορθογώνιο. Γι' αυτό χρησιμοποιούμε το component CxToRect της βιβλιοθήκης Signal Converters.

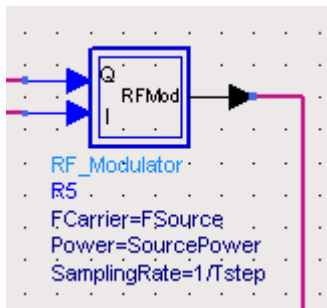


Εν συνεχεία, χρησιμοποιούμε το component RF_Modulator της βιβλιοθήκης Timed, RF Subsystems. Τα πεδία του συμπληρώνονται ως εξής:

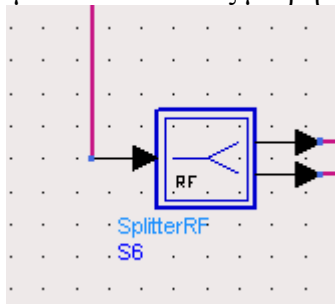
FCarrier: Τίθεται ίσο με τη μεταβλητή FSource. Στις δικές μας προσομοιώσεις είναι ίση με 3.5 GHz.

Power: Τίθεται ίσο με τη μεταβλητή SourcePower. Στην προσομοίωσή μας ισούται με 20 dBm.

SamplingRate: Τίθεται ίσο με 1/Tstep. Η μεταβλητή Tstep ισούται με τον ωφέλιμο χρόνο του συμβόλου προς το μέγεθος του FFT, όπως ακριβώς ορίζεται από την IEEE.



Έπειτα χρησιμοποιούμε ένα component SplitterRF της βιβλιοθήκης Timed, Linear. Αυτό γίνεται για να μπορούμε να πάρουμε το ίδιο σήμα σε 2 θύρες για να κάνουμε πιο εύκολα τις μετρήσεις.



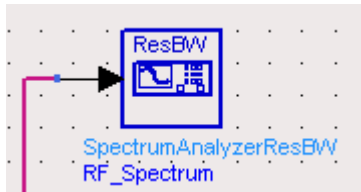
Για να μπορούμε να αποσπάσουμε το φάσμα του σήματος, χρησιμοποιούμε το component SpectrumAnalyzerResBW της βιβλιοθήκης Sinks. Τα πεδία συμπληρώνονται ως εξής:

Start: TimeDelay+BurstTime. Stop: TimeDelay+2*BurstTime

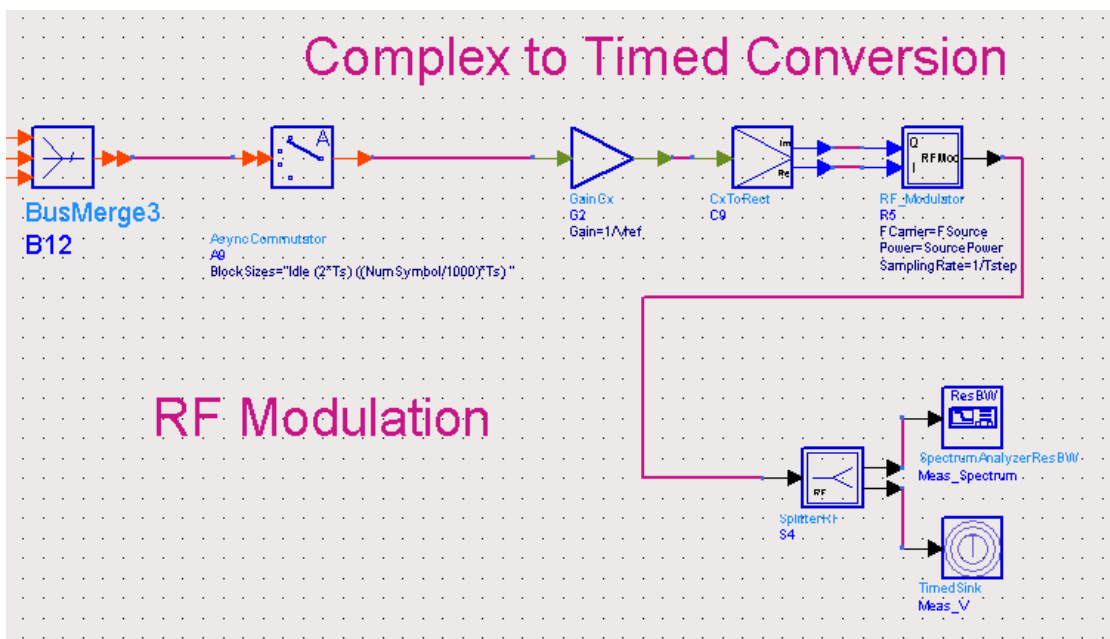
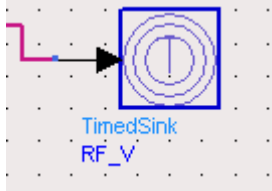
ResBW: 30 kHz

SegmentTime: BurstTime

(Το TimeDelay ορίζεται ως $200 \cdot T_{step}$ ώστε να εξασφαλίσουμε η αρχή της μέτρησης θα γίνει αφού έχουν μεταδοθεί τα 200 φέροντα με την πληροφορία. Το BurstTime ισούται με $IdleInterval + (NumSymbol + 3) \cdot (1 + GuardInterval) \cdot UsefulOFDMSymbolTime$ για να συμπεριλάβουμε την κάθε είδους καθυστέρηση διάδοσης.)



Στην άλλη θύρα του splitter, χρησιμοποιούμε το component TimedSink της βιβλιοθήκης Sinks. Χρησιμοποιείται για να γίνουν οι κατάλληλες χρονικές μετρήσεις.



Τα σχήματα διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθούν είναι τα εξής:

RateID	Modulation	Coding Rate
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	3/4
3	16QAM	1/2
4	16QAM	3/4
5	64QAM	2/3
6	64QAM	3/4

Το μέγεθος του εύρους ζώνης που θα μετρηθεί είναι της παρακάτω τάξης:

BandOption	Bandwidth
0	1.75 MHz
1	3.5 MHz
2	4.5 MHz
3	7.0 MHz
4	8.25 MHz
5	10.0 MHz
6	14.0 MHz
7	20.0 MHz
8	28.0 MHz

Το μέγεθος των σημείων FFT που θα χρησιμοποιηθεί είναι της τάξης των παρακάτω:

OversamplingOption	FFT Size
0	256
1	512
2	1024
3	2048
4	4096

3.2 Μετρήσεις στο κομμάτι του πομπού

Με αυτό το σχηματικό, θα πάρουμε τις εξής μετρήσεις:

Οι μετρήσεις που θα αφορούν στο κομμάτι του πομπού, θα εξαρτώνται κάθε φορά από:

- 1) Το εύρος ζώνης που θα χρησιμοποιείται.
- 2) Τον αριθμό σημείων FFT που θα χρησιμοποιείται.
- 3) Το σχήμα διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιείται και
- 4) Το διάστημα φύλαξης που θα χρησιμοποιείται.

Αρχίζουμε την ανάλυση των μετρήσεων:

3.2.1 Μετρήσεις με ένα σταθερό σχήμα διαμόρφωσης, σταθερό αριθμό σημείων FFT και σταθερό διάστημα φύλαξης και με μεταβλητό μέγεθος εύρους ζώνης.

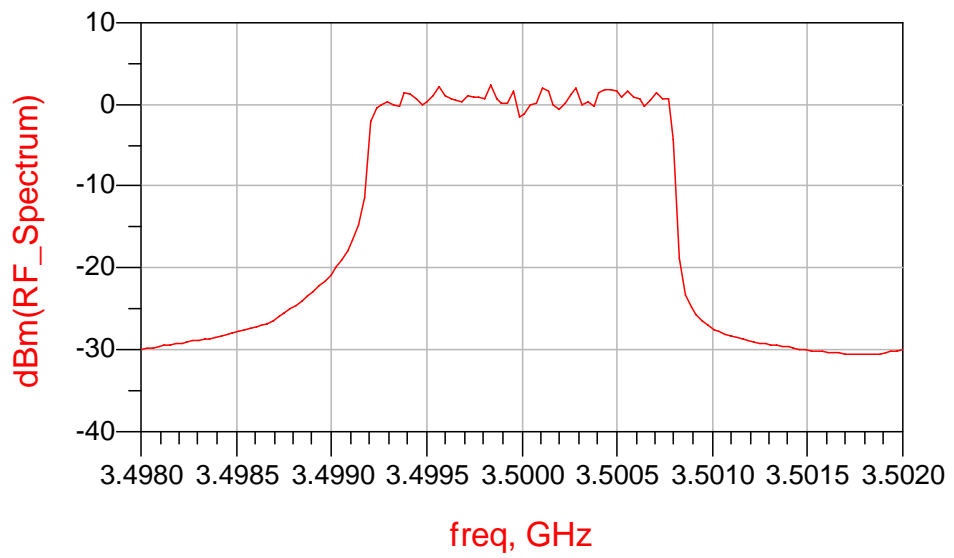
Το σχήμα διαμόρφωσης είναι το 16-QAM με Coding Rate $\frac{1}{2}$.

Ο αριθμός σημείων FFT είναι 256.

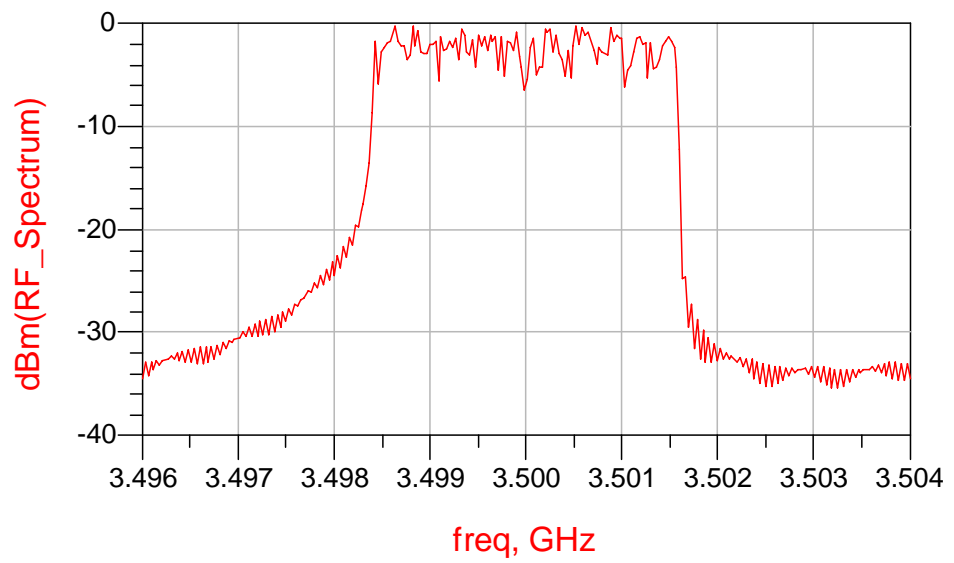
Το διάστημα φύλαξης είναι $0.25 * \text{το χρόνο του συμβόλου}$.

Το εύρος ζώνης μεταβάλλεται από 1.75 MHz έως 28 MHz.

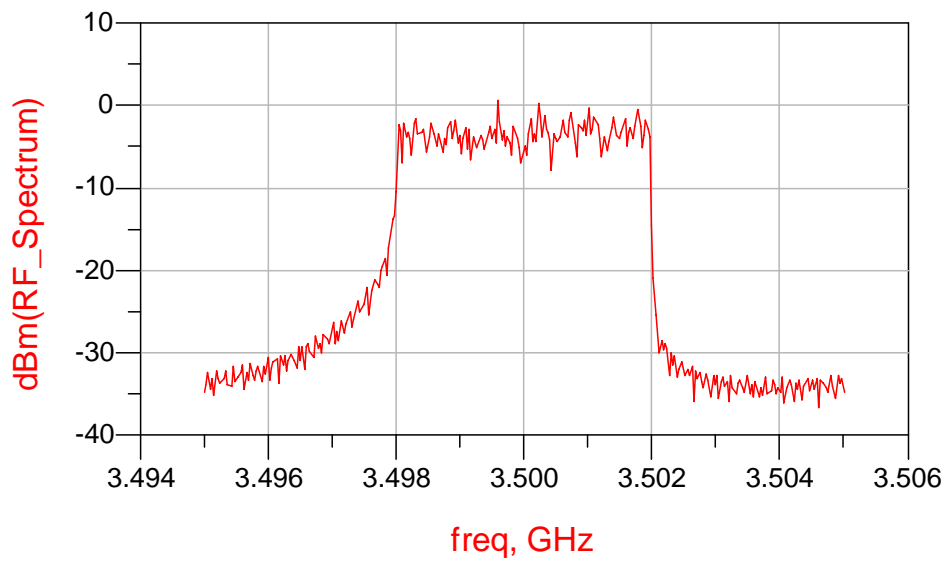
Μετρήσεις με εύρος ζώνης 1.75 MHz



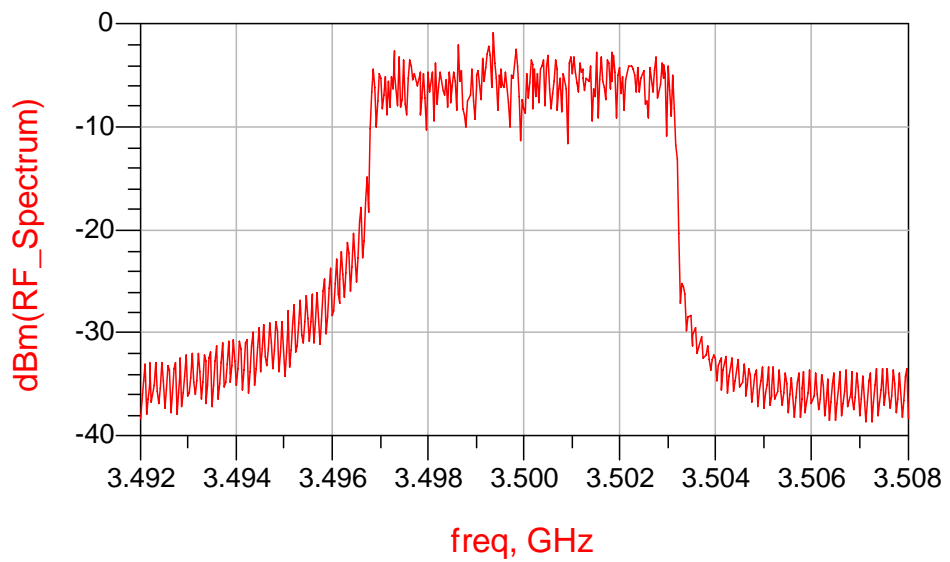
Μετρήσεις με εύρος ζώνης 3.5 MHz



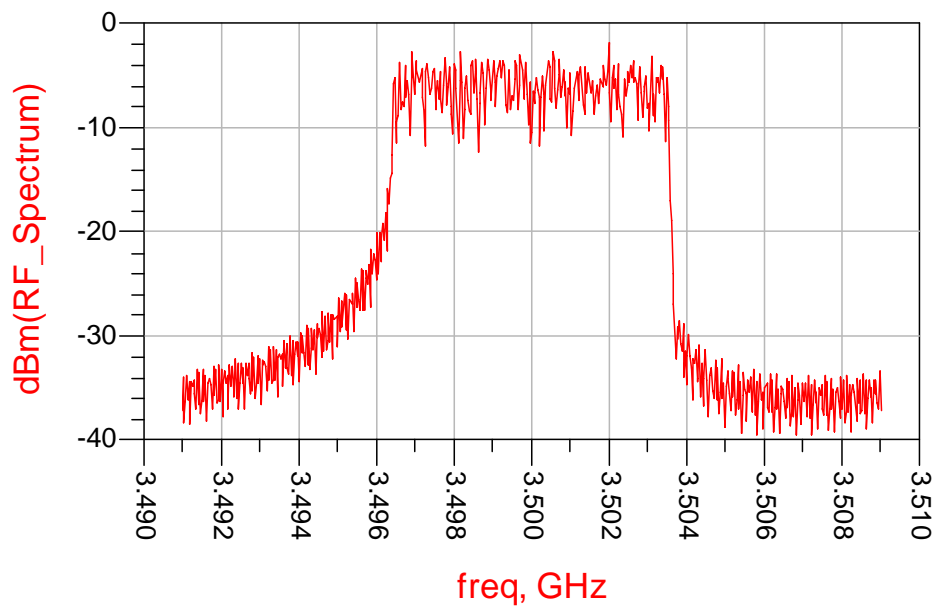
Μετρήσεις με εύρος ζώνης 4.5 MHz



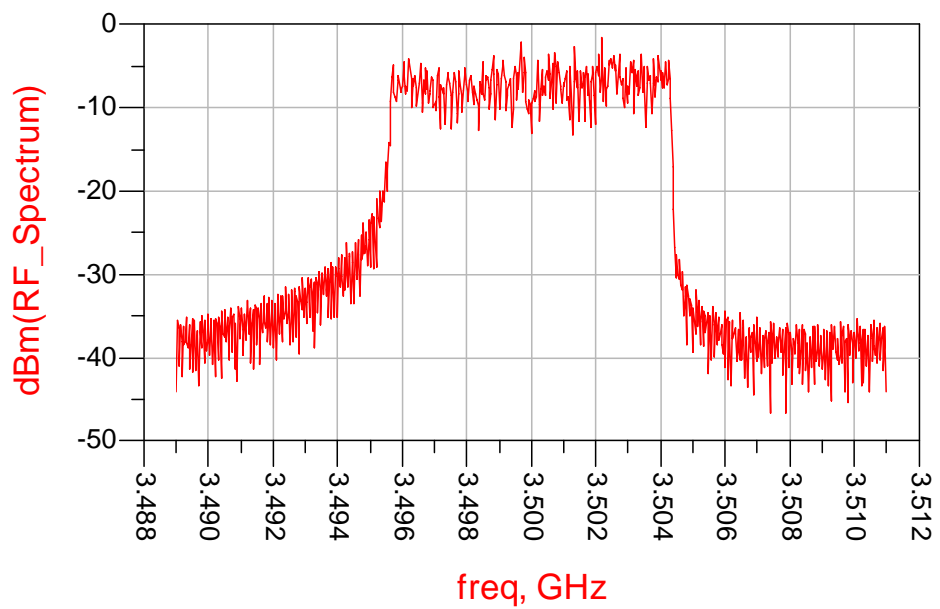
Μετρήσεις με εύρος ζώνης 7 MHz



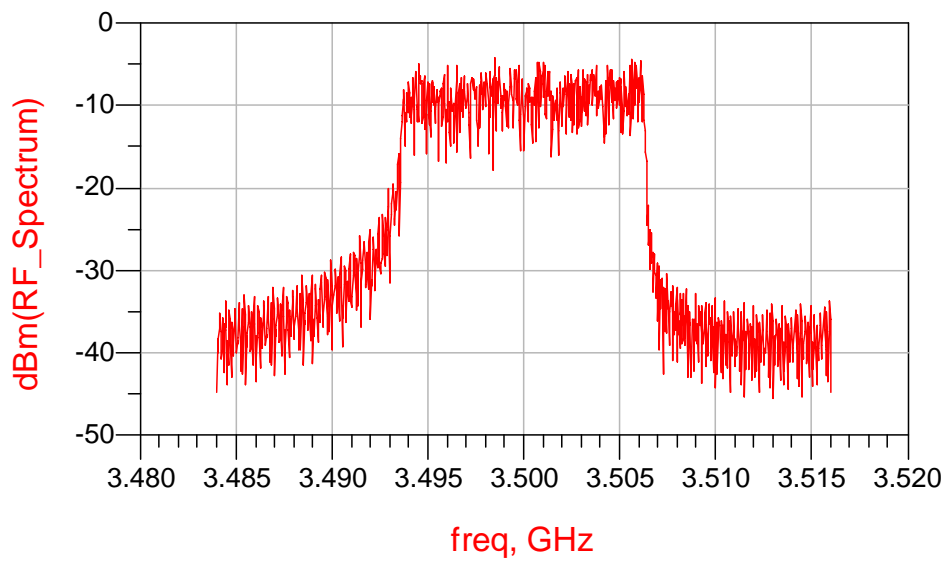
Μετρήσεις με εύρος ζώνης 8.25 MHz



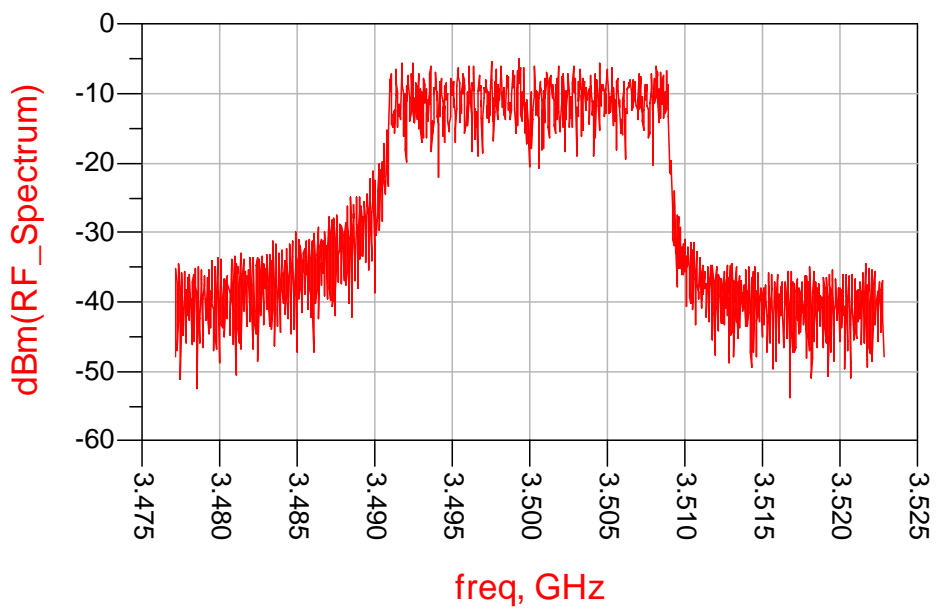
Μετρήσεις με εύρος ζώνης 10 MHz



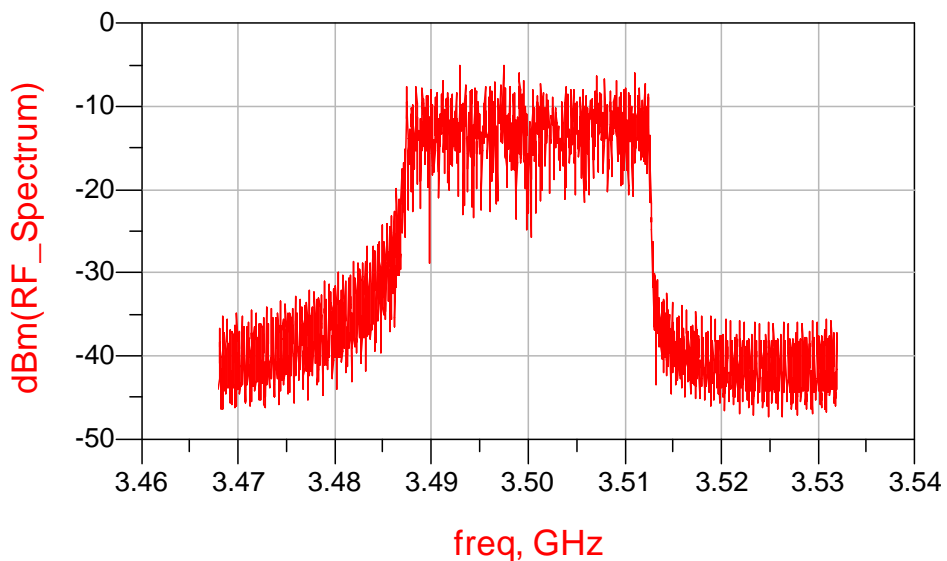
Μετρήσεις με εύρος ζώνης 14 MHz



Μετρήσεις με εύρος ζώνης 20 MHz



Μετρήσεις με εύρος ζώνης 28 MHz



Συμπεράσματα: Από τις παραπάνω προσομοιώσεις παρατηρούμε καταρχάς ότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήσαμε είναι ακριβής και λειτουργικός. Σύμφωνα με την IEEE, η συχνότητα δειγματοληψίας δίνεται από τον τύπο: Καταρχάς, υπολογίζουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας, ως εξής: $F_s = \text{floor}(n \cdot BW / 8000) \cdot 8000$. Έπειτα, υπολογίζουμε το διάστημα μεταξύ των υπο-φερόντων, ως εξής: $\Delta f = F_s / N_{\text{FFT}}$. Τέλος, ο ωφέλιμος χρόνος είναι: $T_b = 1 / \Delta f$, ενώ ο χρόνος δειγματοληψίας είναι: T_b / N_{FFT} .

Το διάστημα (σε συχνότητα) μεταξύ των φερόντων είναι η συχνότητα δειγματοληψίας προς τον αριθμό των σημείων FFT. Έτσι, ο ωφέλιμος χρόνος του συμβόλου είναι το αντίστροφο του διαστήματος μεταξύ των συχνοτήτων. Θέτοντας, λοιπόν, το T_{step} (χρονικό βήμα για τις timed μετρήσεις) ως ωφέλιμο χρόνο συμβόλου προς αριθμό σημείων FFT, δηλαδή το αντίστροφο της συχνότητας δειγματοληψίας, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος στο ADS λειτουργεί σωστά.

Επίσης, παρατηρούμε ότι με την αύξηση του εύρους ζώνης, αυξάνεται και η κυμάτωση (δηλαδή η αυξομείωση του πλάτους) του σήματος μειώνεται, ενώ οι ανεπιθύμητοι πλευρικοί λοβοί καταπιέζονται μέχρι και 35 dBm κάτω από την κανονικοποιημένη στάθμη του σήματος. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στα φίλτρα που χρησιμοποιούμε να λειτουργούν ομαλά, καθώς όλο το σήμα δεδομένων περιέχεται στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων.

Κατά την αυξομείωση, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων επηρεάζεται, καθώς η αλλαγή του εύρους ζώνης επηρεάζεται άμεσα από τον αριθμό των συμβόλων, που επηρεάζεται από το διατιθέμενο εύρος ζώνης.

Παρατηρούμε, όμως, ότι καθώς αυξάνεται το εύρος ζώνης, η συχνότητα δειγματοληψίας αυξάνεται, όπως και το διάστημα συχνοτήτων ανάμεσα στα υπο-φέροντα. Παράλληλα, μειώνεται συνεχώς ο χρόνος συμβόλου, όπως και ο χρόνος δειγματοληψίας. Έτσι, όσο αυξάνουμε το εύρος ζώνης, τόσο περισσότερα δεδομένα δειγματοληπτούνται και γι' αυτό έχουμε μεγαλύτερη κυμάτωση στο σήμα.

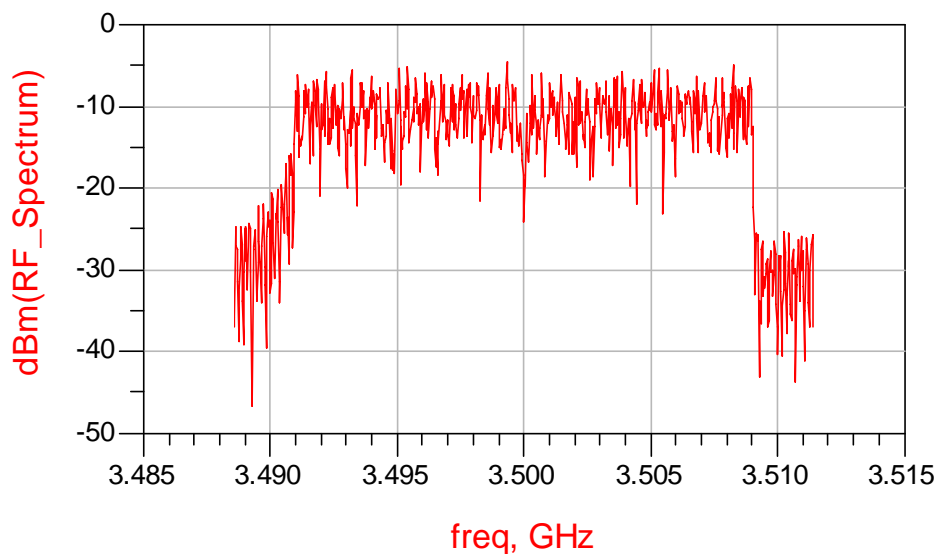
Ο αριθμός των δειγμάτων ανά σύμβολο παραμένει σταθερός και ίσος με 280 στο πρωτόκολλο της IEEE. Αυτό, όμως που αλλάζει είναι ο αριθμός των συμβόλων που δειγματοληπτούνται τελικά. Παρατηρούμε ότι για εύρος ζώνης 1.75 MHz έχουμε 6250 σύμβολα, για 20 MHz έχουμε 71429 σύμβολα, ενώ για εύρος ζώνης 28 MHz έχουμε 100000 σύμβολα.

Γι' αυτό, λοιπόν, όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης, αυξάνεται και ο αριθμός των συμβόλων κι έτσι, λόγω των πολλών συμβόλων που εισέρχονται στον αστερισμό, έχουμε διαφοροποιήσεις και κυμάτωση στο σήμα μας.

3.2.2 Μετρήσεις με ένα σταθερό σχήμα διαμόρφωσης, σταθερό εύρος ζώνης και σταθερό διάστημα φύλαξης και μεταβλητό αριθμό σημείων FFT.

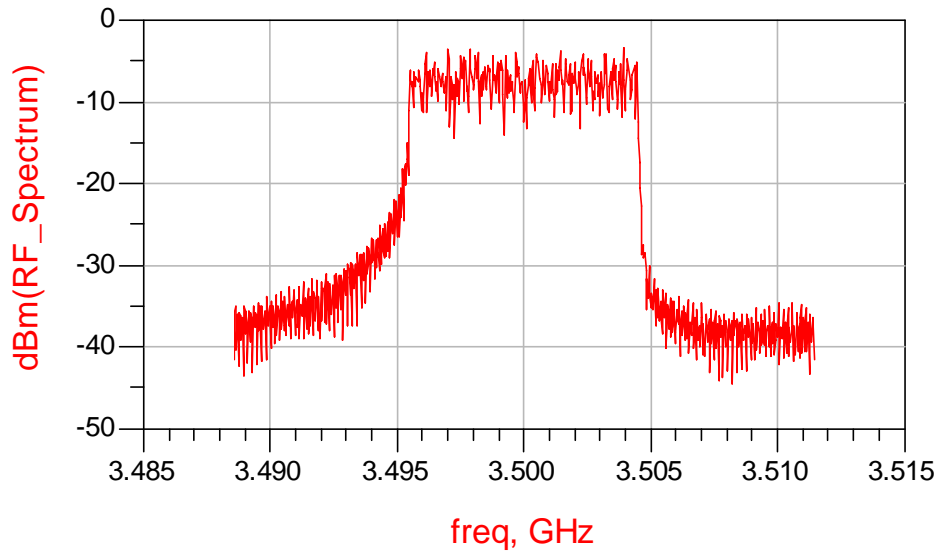
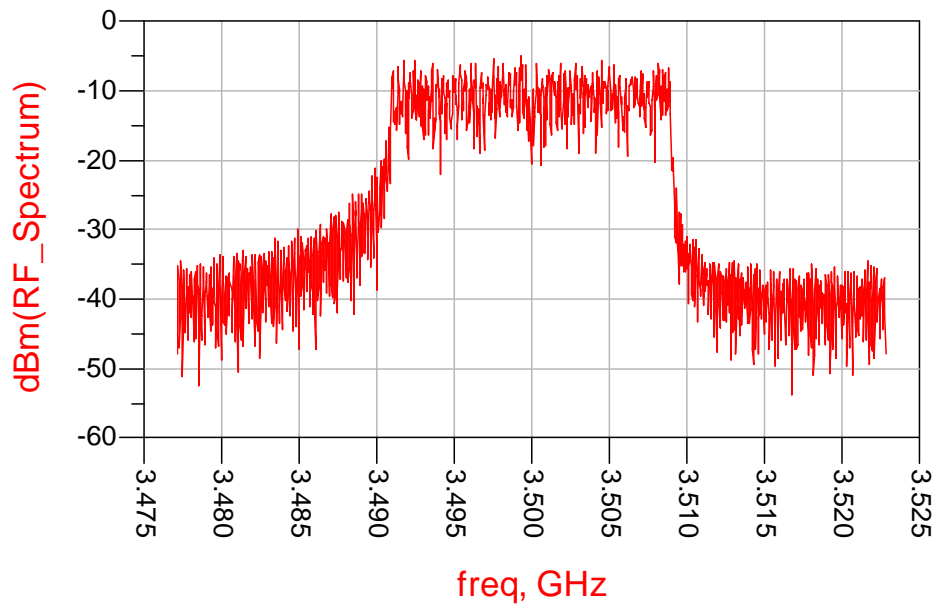
Το σχήμα διαμόρφωσης είναι το 16-QAM με Coding Rate $\frac{1}{2}$.
Ο αριθμός σημείων FFT μεταβάλλεται από 256 έως 4096.
Το διάστημα φύλαξης είναι $0.25 * \text{το χρόνο του συμβόλου}$.
Το εύρος ζώνης είναι 20 MHz.

Μετρήσεις με 256 σημεία FFT

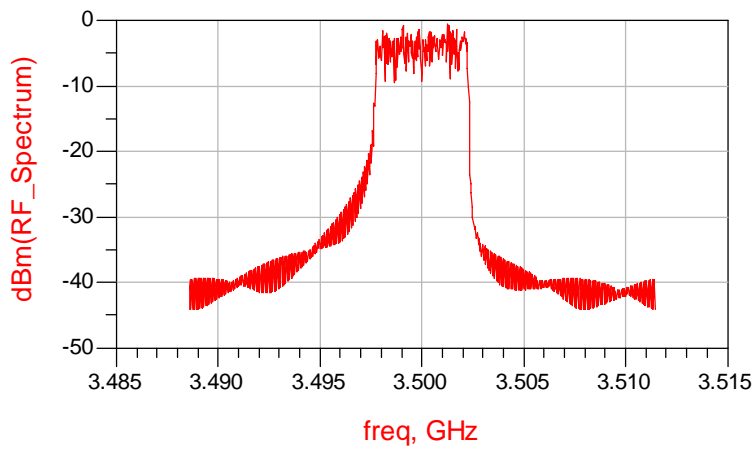
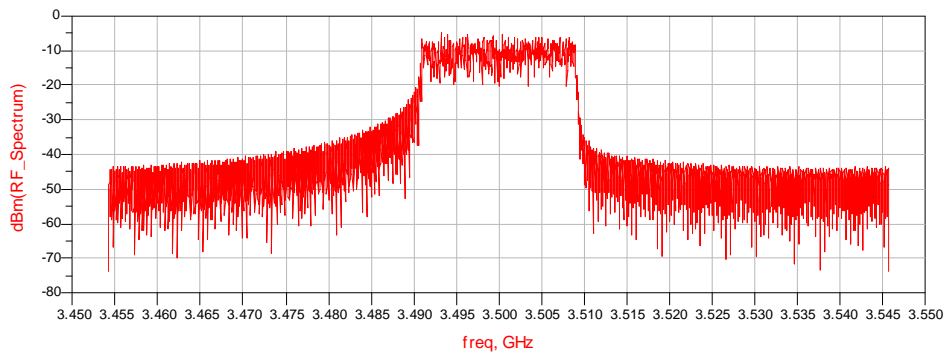
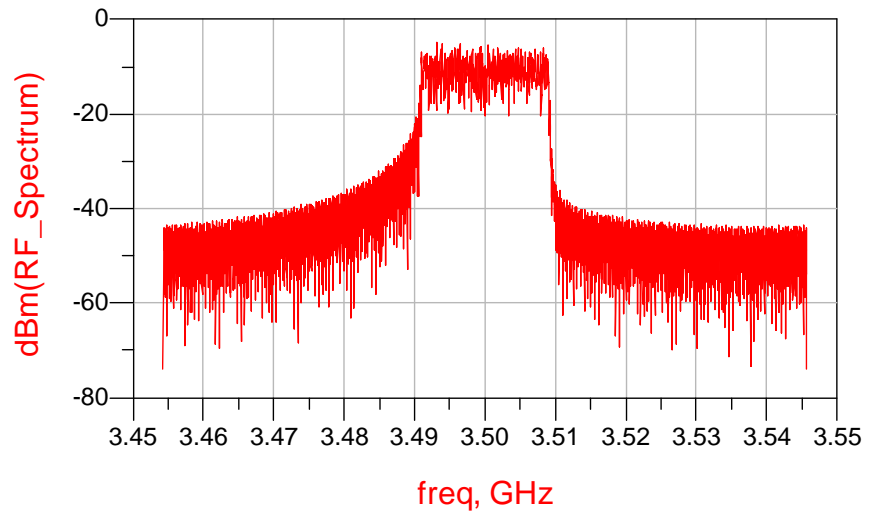


Για τις επόμενες μετρήσεις, λόγω του γεγονότος ότι το simulation διαεξάγεται σε χρόνο προσομοίωσης 1 msec αντί για 1 sec, θα δείξουμε τις θεωρητικές κυματομορφές με τα συνολικά σύμβολα στα φέροντα στις 2 πρώτες εικόνες, ενώ η τελευταία εικόνα δείχνει το αποτέλεσμα της εξομοίωσής μας στο simulation. Παρατηρούμε, ότι στην εικόνα του simulation, το εύρος ζώνης μειώνεται, καθώς το σήμα 'μαζεύεται' στο κέντρο, όπου είναι λογικό, καθώς π.χ. για 4096 σημεία FFT, όπου θα είχαμε 4453 σύμβολα, δηλαδή στο simulation μας, μόνο 4. Προφανώς, επειδή δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα με αυτά τα σύμβολα, παραθέτουμε και τα θεωρητικά αποτελέσματα.

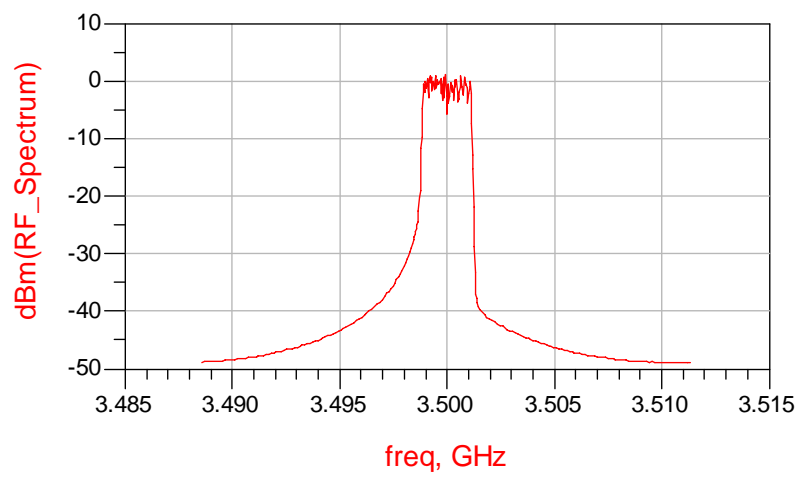
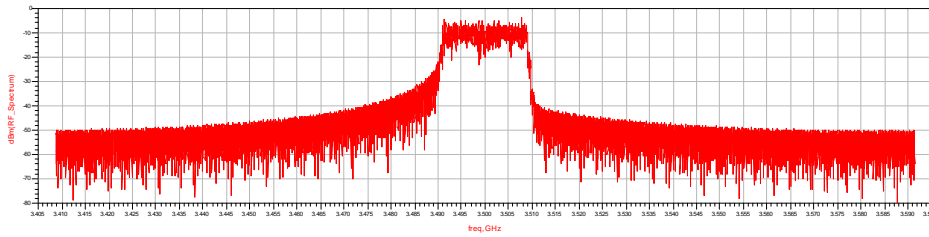
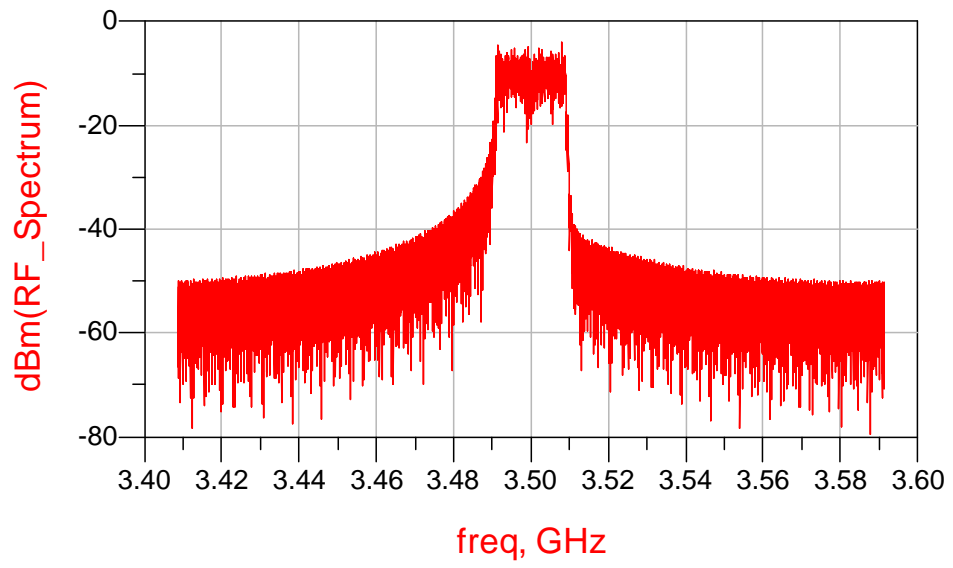
Μετρήσεις με 512 σημεία FFT



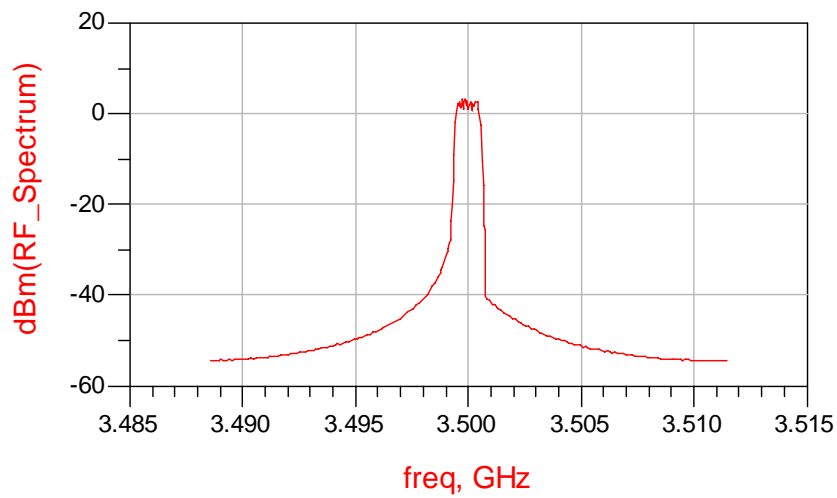
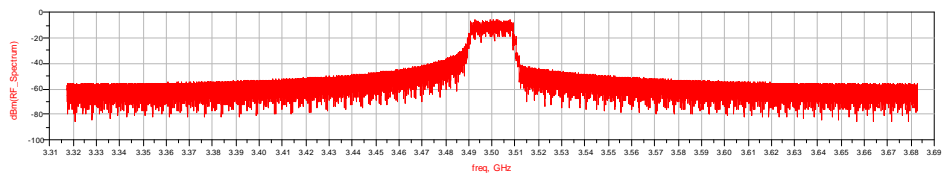
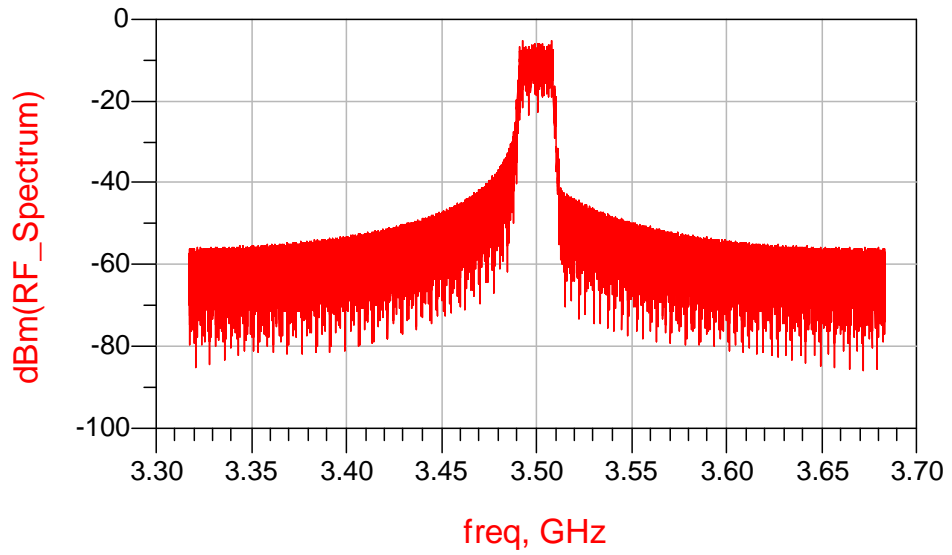
Μετρήσεις με 1024 σημεία FFT



Μετρήσεις με 2048 σημεία FFT



Μετρήσεις με 4096 σημεία FFT



Συμπεράσματα: Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των σημείων του μετασχηματισμού FFT, τόσο μειώνεται η κυμάτωση του σήματος και οι πλευρικοί λοβοί καταπιέζονται τόσο, που φτάνουν μέχρι και 55 dBm κάτω από τη στάθμη του σήματος, μειώνοντας τη διασυμβολική παρεμβολή ανάμεσα στα σύμβολα του OFDM. Αυτό συμβαίνει γιατί η χρήση πολλών σημείων στο μετασχηματισμό FFT μας δίνει την ευκαιρία υπολογισμού πιο ακριβής τιμής (πλάτους) του σήματος (καθώς τα δεδομένα πολυπλέκονται ανά περισσότερα στο OFDM σύμβολο και έτσι δεν έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις στο πλάτος) και έτσι αποφεύγεται η μεγάλη διαφορά στην κυμάτωση.

Όταν αυξάνεται ο αριθμός σημείων του FFT, έχουμε ουσιαστικά μείωση του διαστήματος συχνοτήτων ανάμεσα στα υπο-φέροντα. Αντιθέτως, έχουμε αύξηση του χρόνου του συμβόλου, ενώ ο χρόνος δειγματοληψίας παραμένει ο ίδιος. Το τελευταίο γεγονός μας επιτρέπει να λαμβάνουμε περισσότερα δείγματα ανά σύμβολο.

Τα παραπάνω μας εξηγούν το γιατί το σύμβολό μας έχει απλωθεί πάρα πολύ στο πεδίο της συχνότητας. Όταν έχουμε 256 σημεία FFT, έχουμε 280 δείγματα ανά σύμβολο, ενώ όταν έχουμε 4096 σημεία FFT, έχουμε 4480 δείγματα ανά σύμβολο.

Καταλαβαίνει κανείς ότι για να δειγματοληφθούν όλα αυτά τα σημεία FFT, χρειάζεται αρκετή υπολογιστική ισχύς και αρκετός φασματικός χώρος για να αναπαρασταθούν στο φάσμα. Πάντως, τα πάρα πολλά δείγματα ανά σύμβολο, είναι προφανές ότι οδηγούν σε πολύ λίγα σύμβολα ανά δευτερόλεπτο. Αυτό γίνεται, γιατί ισχύει: Σύμβολα/δευτερόλεπτο = (Δείγματα/δευτερόλεπτο)/(Δείγματα/σύμβολο).

Έτσι, σε εύρος ζώνης 20 MHz, για 280 δείγματα/σύμβολο, έχουμε 71429 σύμβολα/δευτερόλεπτο, ενώ για 4480 δείγματα/σύμβολο, έχουμε 4464 σύμβολα/δευτερόλεπτο.

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι τα πολλά σημεία FFT δεν οδηγούν σε αυξημένο ρυθμό εκπομπής, αλλά σε υπερδειγματοληψία του σήματος που μπορεί να μειώνει την κυμάτωση του, αλλά το απλώνει στο χώρο της συχνότητας και έτσι μπορεί να οδηγήσει σε διασυμβολική παρεμβολή.

3.2.3 Μετρήσεις με σταθερό εύρος ζώνης, σταθερό αριθμό σημείων FFT, σταθερό διάστημα φύλαξης και μεταβλητό σχήμα διαμόρφωσης.

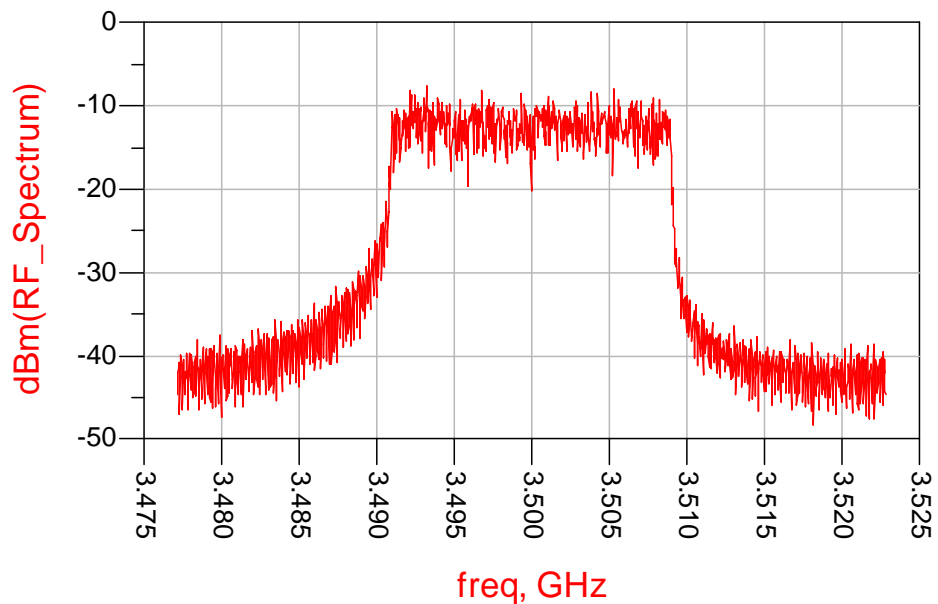
Το σχήμα διαμόρφωσης μεταβάλλεται από BPSK $\frac{1}{2}$ έως 64-QAM με Coding Rate $\frac{3}{4}$.

Ο αριθμός σημείων FFT είναι 256.

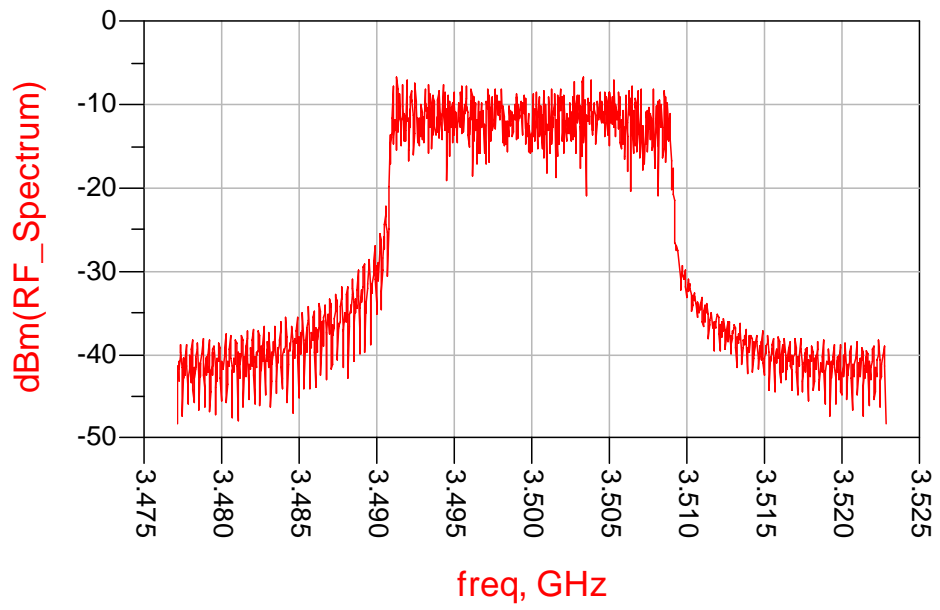
Το διάστημα φύλαξης είναι $0.25 * \text{το χρόνο του συμβόλου}$.

Το εύρος ζώνης είναι 20 MHz.

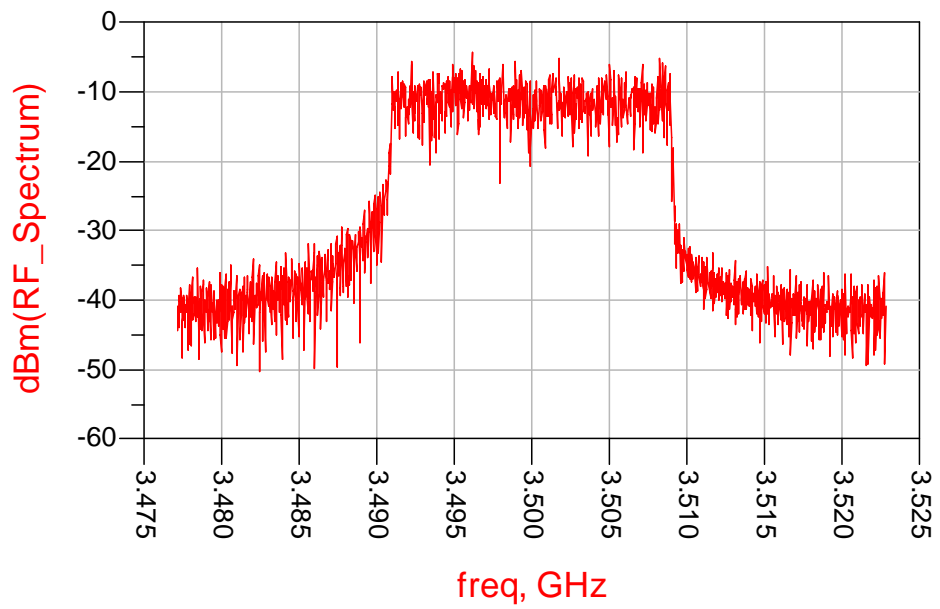
Μετρήσεις με σχήμα διαμόρφωσης BPSK $\frac{1}{2}$ (χωρίς RS Encoder, όπως προστάζει το πρωτόκολλο της IEEE).



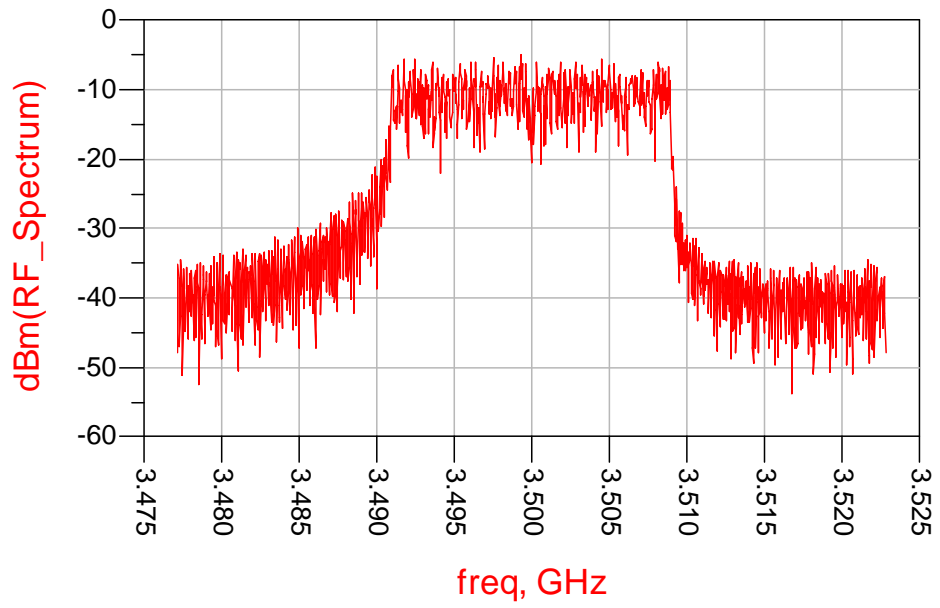
Μετρήσεις με σχήμα διαμόρφωσης QPSK $\frac{1}{2}$



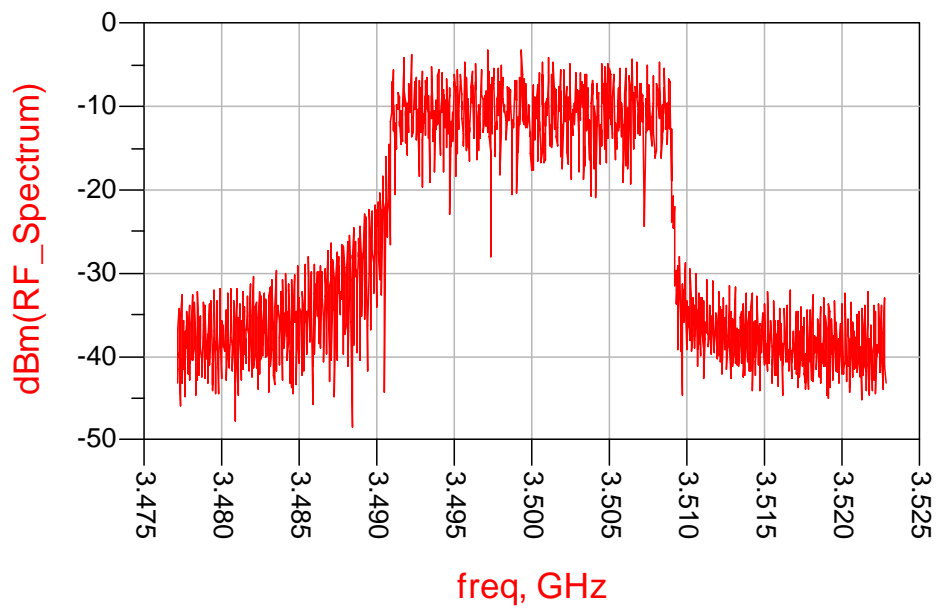
Μετρήσεις με σχήμα διαμόρφωσης QPSK $\frac{3}{4}$



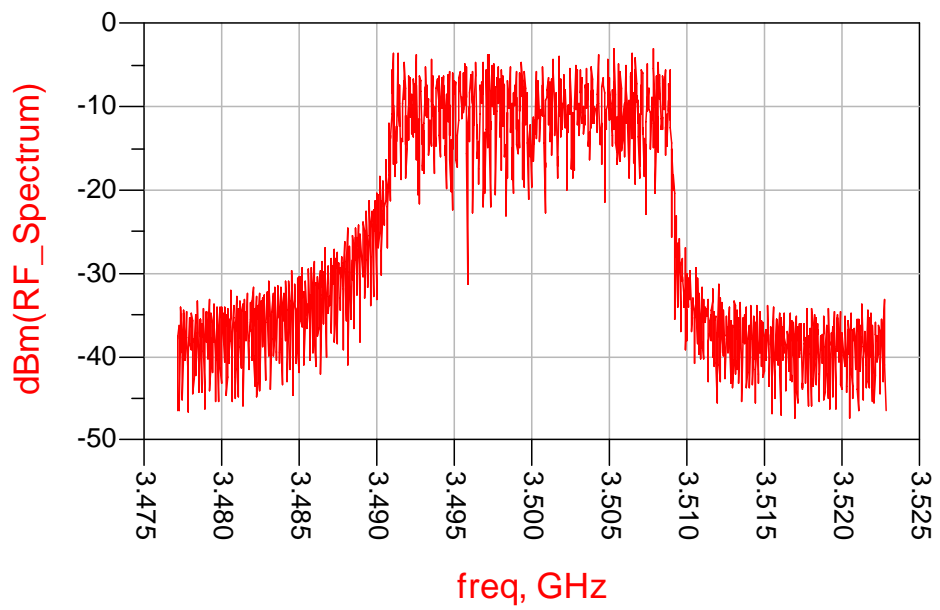
Μετρήσεις με σχήμα διαμόρφωσης 16QAM ½



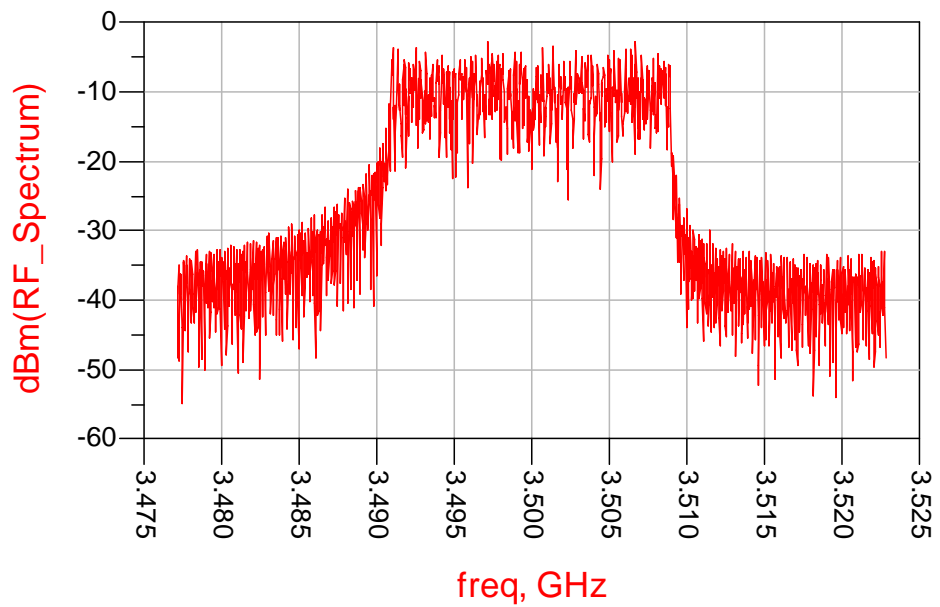
Μετρήσεις με σχήμα διαμόρφωσης 16QAM ¾



Μετρήσεις με σχήμα διαμόρφωσης 64QAM $2/3$



Μετρήσεις με σχήμα διαμόρφωσης 64QAM $3/4$



Συμπεράσματα: Καταρχάς, παρατηρούμε ότι η κυμάτωση στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις αυξάνεται με την αλλαγή του σχήματος διαμόρφωσης από την απλή BPSK στην πιο πολύπλοκη QAM 64 σημείων. Αυτό συμβαίνει καθώς όσο αυξάνονται τα σημεία στον αστερισμό, μπορεί να αυξάνουμε τα σύμβολα που εκπέμπουμε, αλλά επίσης τα σημεία είναι τόσο κοντά, που χρησιμοποιούμε πολλαπλά φέροντα για να τα αναπαραστήσουμε, που δημιουργούνται αυξομειώσεις στο σήμα και πιθανά λάθη κατά την αναπαράστασή τους στο πεδίο της συχνότητας. Κατά τη διαμόρφωση BPSK, χρησιμοποιούμε 1 bit ανά φέρον, στην QPSK διαμόρφωση 2 bits ανά φέρον, στην 16QAM 4 bits ανά φέρον, ενώ στην 64QAM 6 bits ανά φέρον. Το γεγονός αυτό πιθανό να δημιουργήσει αρκετά λάθη κατά την αποδιαμόρφωση του σήματος και να οδηγήσει σε μεγάλο BER.

3.2.4 Μετρήσεις των εκπεμπομένων συμβόλων ανά δευτερόλεπτο διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης, σταθερό αριθμό σημείων FFT και σταθερό εύρος ζώνης και σταθερό διάστημα φύλαξης.

Το σχήμα διαμόρφωσης μεταβάλλεται από BPSK $\frac{1}{2}$ έως 64-QAM με Coding Rate $\frac{3}{4}$.

Ο αριθμός σημείων FFT είναι 256.

Το διάστημα φύλαξης είναι $0.25 * \text{το χρόνο του συμβόλου}$.

Το εύρος ζώνης είναι 20 MHz.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις, οι τιμές των εκπεμπομένων συμβόλων ανά δευτερόλεπτο προκύπτουν πολύ ικανοποιητικές.

Κατά την BPSK $\frac{1}{2}$ διαμόρφωση, έχουμε 6,857 Mbps.

Κατά την QPSK $\frac{1}{2}$ διαμόρφωση, έχουμε 13,7 Mbps.

Κατά την QPSK $\frac{3}{4}$ διαμόρφωση, έχουμε 20,57 Mbps.

Κατά την 16-QAM $\frac{1}{2}$ διαμόρφωση, έχουμε 27,429 Mbps.

Κατά την 16-QAM $\frac{3}{4}$ διαμόρφωση, έχουμε 41,143 Mbps.

Κατά την 64-QAM $\frac{2}{3}$ διαμόρφωση, έχουμε 54,857 Mbps.

Κατά την 64-QAM $\frac{3}{4}$ διαμόρφωση, έχουμε 61,714 Mbps.

Οι τιμές αυτές προκύπτουν από την εφαρμογή του τύπου:

Ρυθμός Δεδομένων = Αριθμός φερόντων πληροφορίας * Αριθμός bits ανά φέρον * Ρυθμός κωδικοποίησης * Αριθμός εκπεμπομένων συμβόλων ανά δευτερόλεπτο.

Έτσι, κρατώντας σταθερό τον αριθμό φερόντων πληροφορίας στο 192 και συμπληρώνοντας με τις τιμές των σχημάτων κωδικοποίησης, π.χ. για 16QAM $\frac{1}{2}$ στα 20 MHz, έχουμε:

$$\text{Ρυθμός Δεδομένων} = 192 * 4 * \frac{1}{2} * 71429 = 27428736 = 27,429 \text{ Mbps.}$$

Οι ρυθμοί δεδομένων δίνονται για όλα τα εύρη ζώνης και τα σχήματα διαμόρφωσης στον παρακάτω πίνακα.

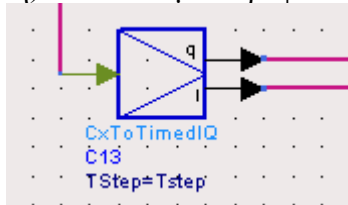
Bandwidth (MHz)	BPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 2/3	64QAM 3/4
1,75	0,6	1,2	1,8	2,4	3,6	4,8	5,4
3,5	1,2	2,4	3,6	4,8	7,2	9,6	10,8
4,5	1,548	3,096	4,644	6,192	9,288	12,384	13,932
7	2,4	4,8	7,2	9,6	14,4	19,2	21,6
8,25	2,844	5,688	8,532	11,376	17,064	22,752	25,596
10	3,42	6,84	10,26	13,68	20,52	27,36	30,78
14	4,8	9,6	14,4	19,2	28,8	38,4	43,2
20	6,84	13,68	20,52	27,36	41,04	54,72	61,56
28	9,6	19,2	28,8	38,4	57,6	76,8	86,4

Παρατηρούμε, λοιπόν, 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 BPSK. 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 μειονέκτημά 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 86 Mbps για εύρος ζώνης 28 MHz, αριθμός αρκετά ικανοποιητικός για το νέο αυτό και πολλά υποσχόμενο πρωτόκολλο της IEEE. Υπάρχει πάντα και το λεγόμενο turbo mode, για εύρος ζώνης 40 MHz, που εκτοξεύει το ρυθμό δεδομένων στα 120 Mbps.

3.3 Υλοποίηση του κομματιού του ενισχυτή RF με χρήση του προγράμματος Advanced Design System 2005A της Agilent ©

Στο κομμάτι του ενισχυτή, το κύκλωμά μας διαφοροποιείται λίγο από το προηγούμενο κύκλωμα που φτιάξαμε για τον πομπο. Η διαφοροποίηση αυτή είναι η εξής:

Επειδή στο κομμάτι του ενισχυτή χρειαζόμαστε και μια πηγή θορύβου, κατά τη διαμόρφωση χρησιμοποιούμε τις timed και όχι τις rect τιμές του πηγαίου μας σήματος. Γι' αυτό, ακριβώς μετά τον ενισχυτή της πρώτης βαθμίδας μας, χρησιμοποιούμε το component CxToTimedIQ της βιβλιοθήκης Signal Converters. Αυτό το component μετατρέπει το σήμα από τη μιγαδική του μορφή στην χρονικά επεξεργάσιμη μορφή του. Μάλιστα, στις εξόδους του παίρνουμε τις συνισταμένες I και Q του σήματος μας, που χρειάζονται για την παρακάτω RF διαμόρφωσή του. Στο πεδίο TStep εισάγουμε τη μεταβλητή Tstep, η οποία ορίζει το βήμα σύμφωνα με το οποίο ο μετατροπέας θα κάνει τη δειγματοληψία του σήματος (με συχνότητα $1/Tstep$, δηλαδή) και θα το μετατρέψει σε χρονικά επεξεργάσιμο.

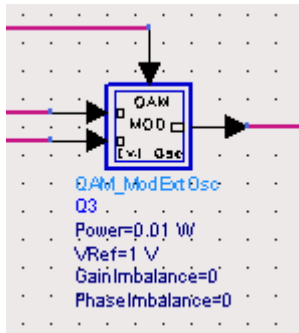


Ύστερα, χρησιμοποιούμε το component QAM_ModExtOsc (αφού οι μετρήσεις γίνονται με QAM διαμόρφωση, αν χρησιμοποιούσαμε QPSK διαμόρφωση, θα χρησιμοποιούσαμε το component QPSK_ModExtOsc) της βιβλιοθήκης Timed, Modem. Η λειτουργία του είναι να δέχεται το (baseband) σήμα μας και να το διαμορφώνει σε χρονικό σήμα, έτοιμο για RF διαμόρφωση. (Ισχύει μόνο για το QPSK_ModExtOsc: Στο πεδίο SymbolTime συμπληρώνουμε τη μεταβλητή Tstep, για να μπορεί η δειγματοληψία να γίνει σύμφωνα με τη δειγματοληψία του component CxToTimedIQ).

Οι εισοδοί του component αυτού είναι τρεις:

- 1) και 2) είναι οι συνισταμένες I και Q του timed σήματός μας. Έχουν προέλθει από τις εξόδους του component CxToTimedIQ.
- 3) είναι η έξοδος της πηγής θορύβου που προκαλεί phase noise κατά την RF διαμόρφωσή μας. Αυτό το σημείο εξετάζεται αμέσως παρακάτω.

Η έξοδος του component είναι το σήμα μας με θόρυβο, έτοιμο να εισέλθει στο φίλτρο.



Ως πηγή θορύβου, χρησιμοποιούμε το component N_tones της βιβλιοθήκης Timed, Sources. Σε αυτό συμπληρώνουμε τα πεδία ως εξής:

TStep: Ισούται με τη μεταβλητή Tstep, για να συνάδει η δειγματοληψία μας με αυτήν του component CxToTimedIQ.

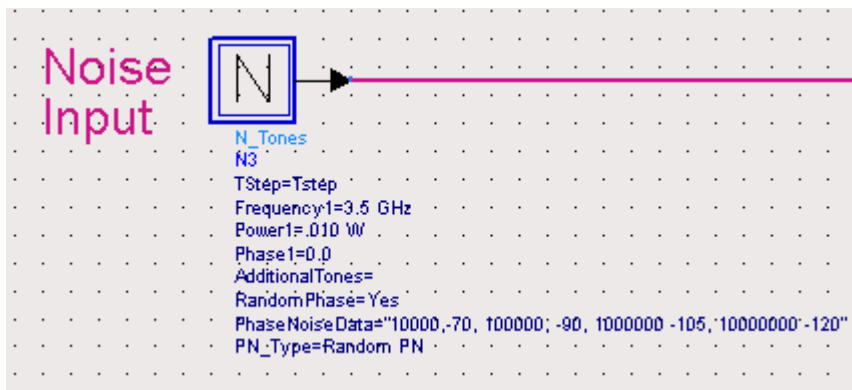
Frequency: Θέτουμε την τιμή 3.5 GHz.

Power: Θέλουμε ισχύ 10 mW, οπότε έχουμε 0.010 W.

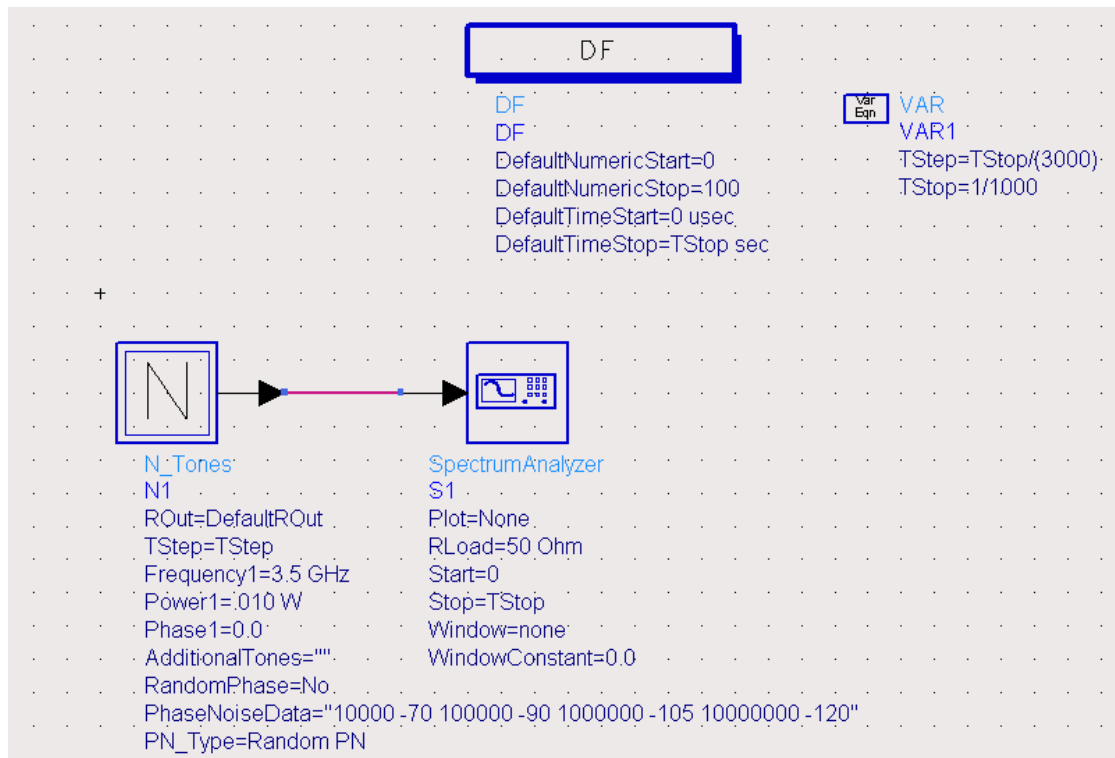
PhaseNoiseData: Θέτουμε ως δεδομένα για το phase noise, τα εξής: 10000,-70, 100000, -90, 1000000 -105, 10000000 -120.

Αυτό μας εξασφαλίζει ότι τα phase noise data είναι όπως ο κάτωθι πίνακας:

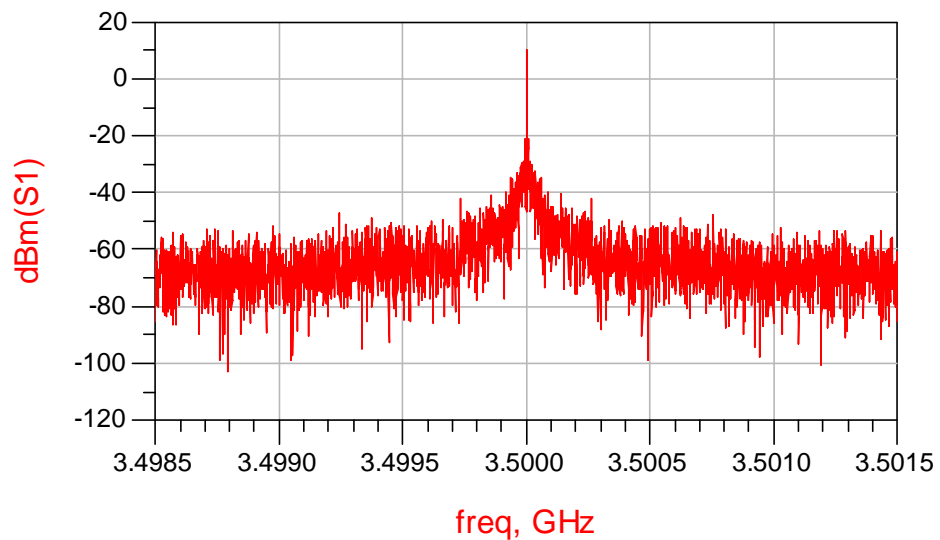
Offset (kHz)	Phase noise (dBc/Hz)
10	-70
100	-90
1000	-105
10000	-120



Μπορούμε να μετρήσουμε το φάσμα του phase noise, χρησιμοποιώντας την εξής διάταξη στο ADS:



Κάνοντας την προσομοίωση, εξάγουμε το εξής αποτέλεσμα:

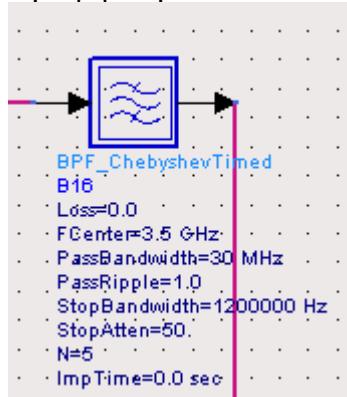


Το οποίο είναι το φάσμα του phase noise σε εμφανή μορφή.

Έπειτα, το σήμα μας εισάγεται στο φίλτρο. Χρησιμοποιούμε το component BPF_ChebyshevTimed της βιβλιοθήκης Timed, Filters. Αυτό είναι ένα ζωνοπερατό φίλτρο τύπου Chebyshev. Τα πεδία συμπληρώνονται ως εξής:

FCenter: Εισάγουμε την κεντρική συχνότητα, γύρω από την οποία θα περάσει το ζωνοπερατό μας φίλτρο. Εδώ συμπληρώνουμε την τιμή 3.5 GHz, ή τη γενική μεταβλητή FSource, που εκτελεί την ίδια ακριβώς λειτουργία.

PassBandwidth: Εισάγουμε την τιμή 30 MHz, ώστε να εξασφαλιστεί ότι όλο το προς μέτρηση σήμα θα είναι παρόν στο φίλτρο μας, καθώς το μέγιστο εύρος ζώνης που θα μετρήσουμε είναι 28 MHz.



Στη συνέχεια, ακολουθεί ο ενισχυτής RF. Αυτός παριστάνεται με το component GainRF της βιβλιοθήκης Timed, Nonlinear. Τα πεδία του ενισχυτή συμπληρώνονται ως εξής:

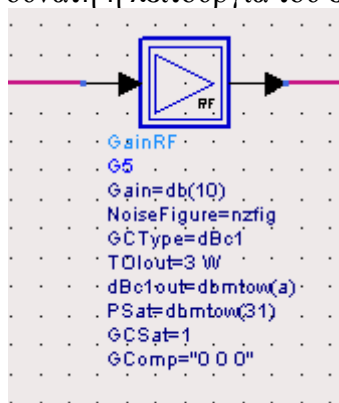
Gain: Συμπληρώνεται με την τιμή db(10), ώστε να έχουμε κέρδος 20 dB.

NoiseFigure: Συμπληρώνεται με τη μεταβλητή nzfig, η οποία θα γίνει στη συνέχεια sweep, για να πάρουμε μετρήσεις σχετικά με το noise figure του ενισχυτή.

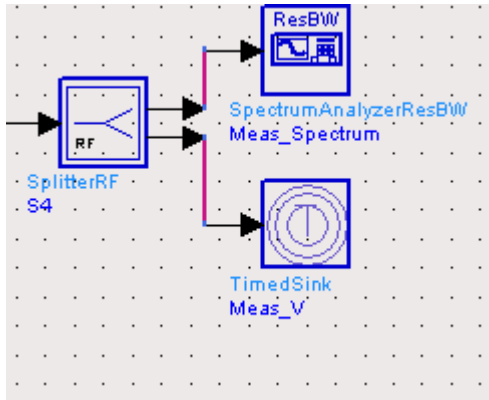
GCType: Εδώ πρέπει να εισάγουμε τον τύπο του Gain Compression. Επειδή θέλουμε να κάνουμε sweep μόνο με το dBc1, επιλέγουμε την τιμή dBc1.

dBc1out: Εδώ εισάγουμε την τιμή της ισχύος του σημείου συμπίεσης 1 dB. Χρησιμοποιούμε τη μεταβλητή a, η οποία θα γίνει sweep. Επειδή θέλουμε οι τιμές να είναι του εύρους 21-29 dBm, συμπληρώνουμε το πεδίο ως εξής: dbmtow(a).

PSat: Εδώ θέλουμε την τιμή της ισχύος του κορεσμού. Τη θέτουμε 31 dBm, ως εξής: dbmtow(31). Παρατηρούμε ότι η τιμή της ισχύος κορεσμού πρέπει να είναι πάντα μεγαλύτερη από την τιμή της ισχύος του σημείου συμπίεσης 1dB (αλλιώς δεν είναι δυνατή η λειτουργία του ενισχυτή).



Ύστερα, ακολουθεί η ακολουθία των components: SplitterRF της βιβλιοθήκης Timed, Linear, SpectrumAnalyzerResBW της βιβλιοθήκης Sinks και TimedSink της βιβλιοθήκης Sinks. Αυτή η ακολουθία μας βοηθάει να πάρουμε μετρήσεις φάσματος με τον SpectrumAnalyzerResBW και χρονικές μετρήσεις με το TimedSink.



Για να κάνουμε τις μετρήσεις, χρησιμοποιούμε το εργαλείο ParameterSweep. Στα πεδία αυτού του component, συμπληρώνουμε τα εξής:

Στο tab Sweep:

Parameter to sweep: Εισάγουμε την παράμετρο που θέλουμε να μεταβάλλουμε.

Στο πρώτο sweep, εισάγουμε τη μεταβλητή a και στο δεύτερο τη μεταβλητή nzfig.

Start: Εισάγουμε την αρχική τιμή της μεταβλητής. Στο πρώτο sweep, εισάγουμε την τιμή 21 και στο δεύτερο την τιμή 3.

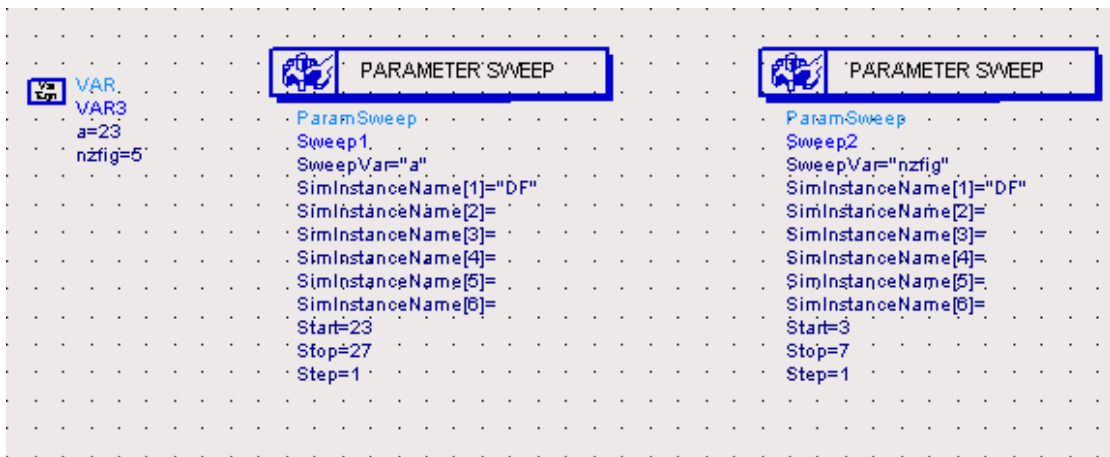
Stop: Εισάγουμε την τελική τιμή της μεταβλητής. Στο πρώτο sweep, εισάγουμε την τιμή 29 και στο δεύτερο την τιμή 7.

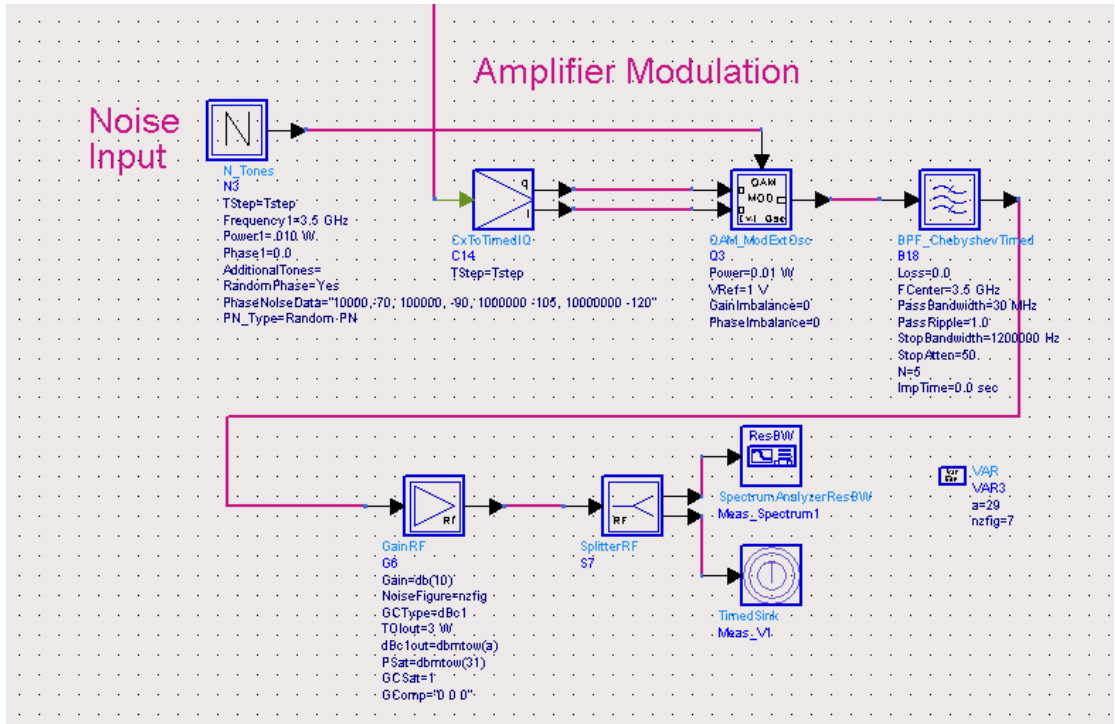
Step-size: Εισάγουμε το βήμα της μέτρησης για τις μεταβλητές. Και στα δύο sweeps, εισάγουμε την τιμή 2.

Στο tab Simulations:

Simulations to perform:

Simulation1: Εισάγουμε την τιμή του DF simulator. Εν προκειμένω, την τιμή DF.

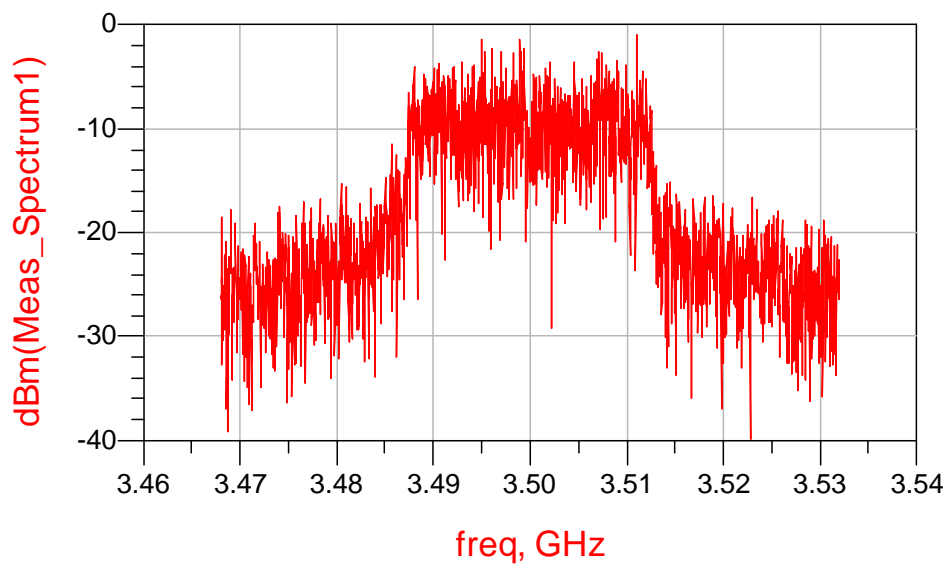




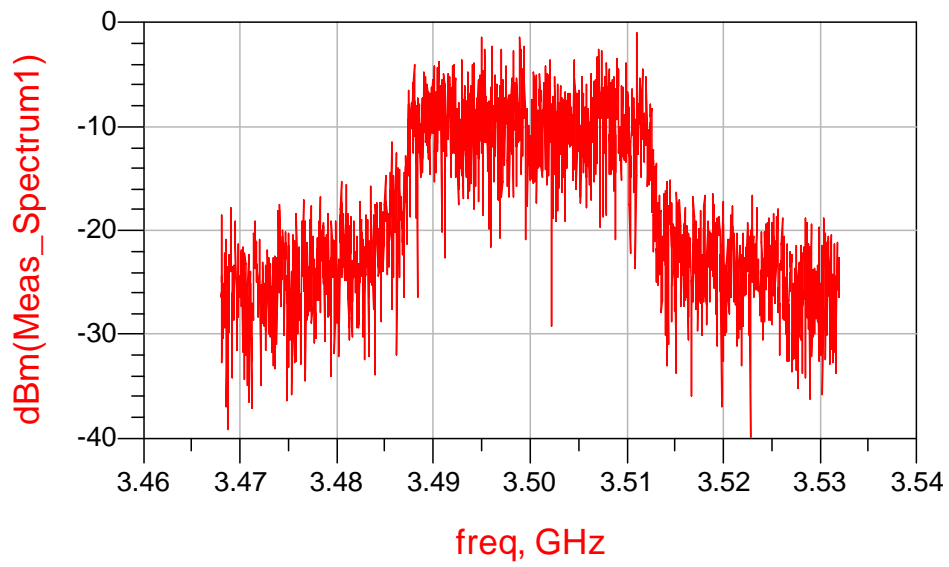
3.4 Μετρήσεις στο κομμάτι του ενισχυτή

Ακολουθεί το κομμάτι των μετρήσεων του κομματιού του ενισχυτή που αφορά στις διαφορετικές τιμές των παραμέτρων dBc1out και noise figure. Ακολουθούν τα αποτελέσματα:

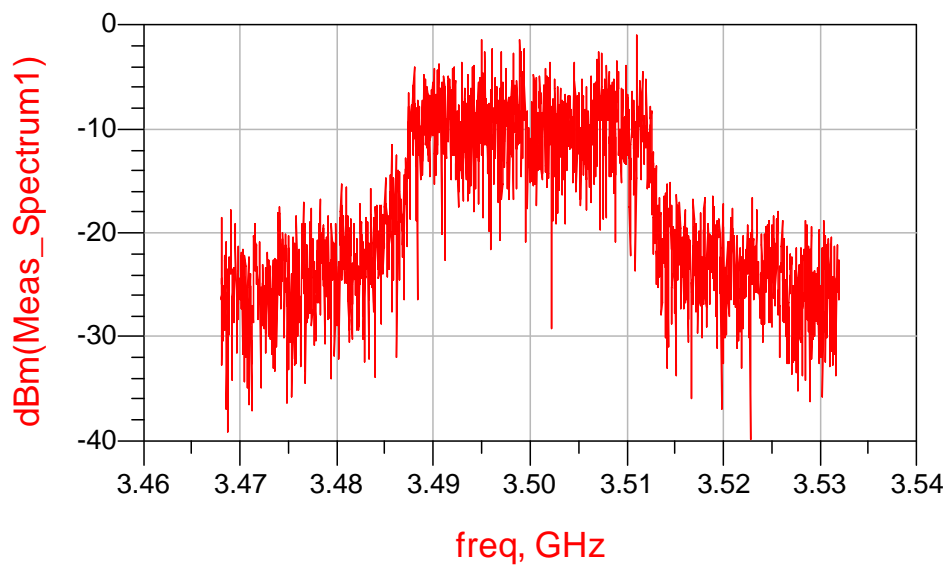
Φάσμα με dBc1out = 21 και noise figure = 3



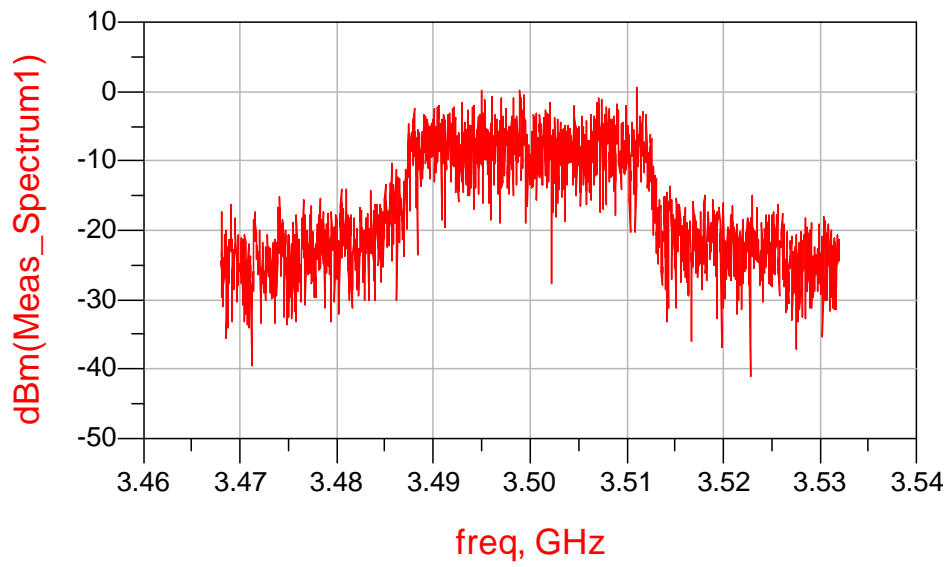
Φάσμα με dBc1out = 21 και noise figure = 5



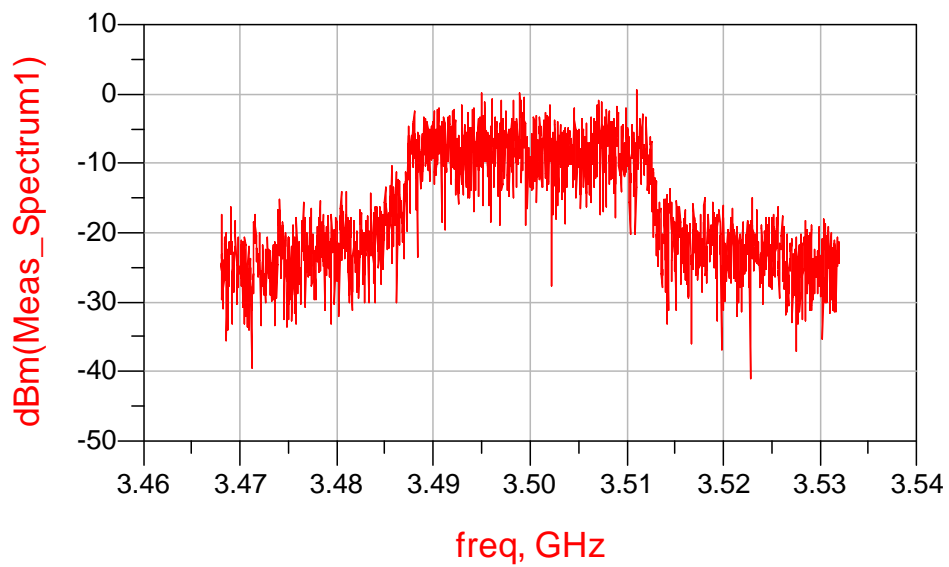
Φάσμα με dBc1out = 21 και noise figure = 7



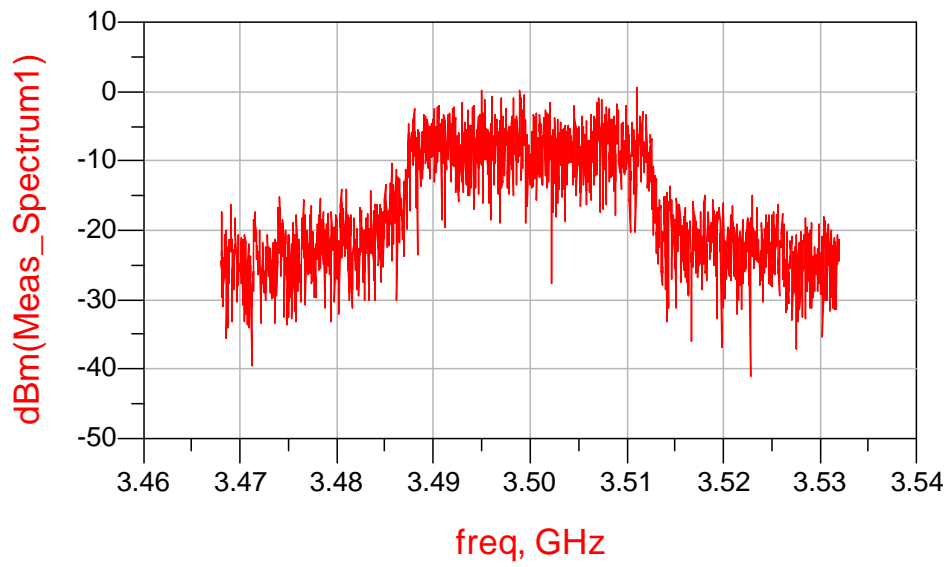
Φάσμα με dBc1out = 23 και noise figure = 3



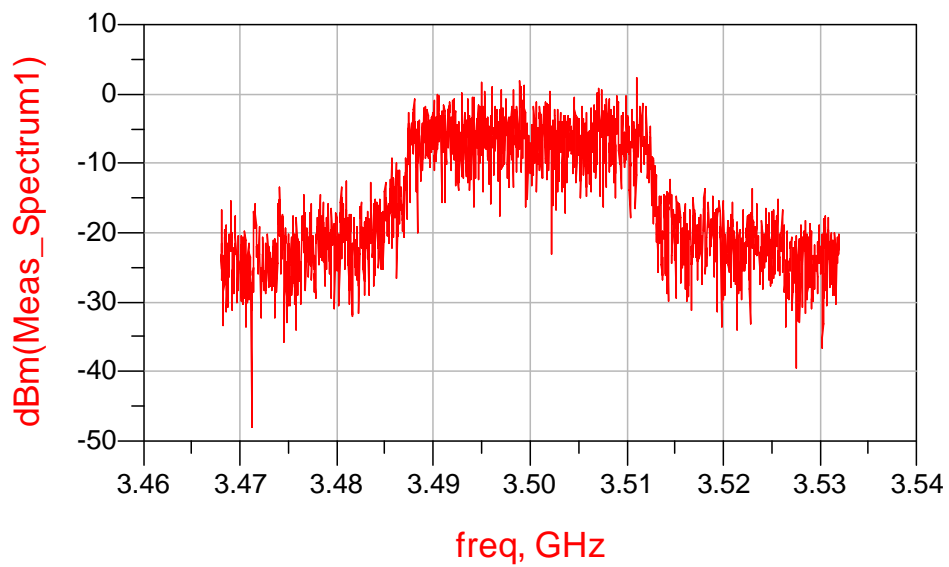
Φάσμα με dBc1out = 23 και noise figure = 5



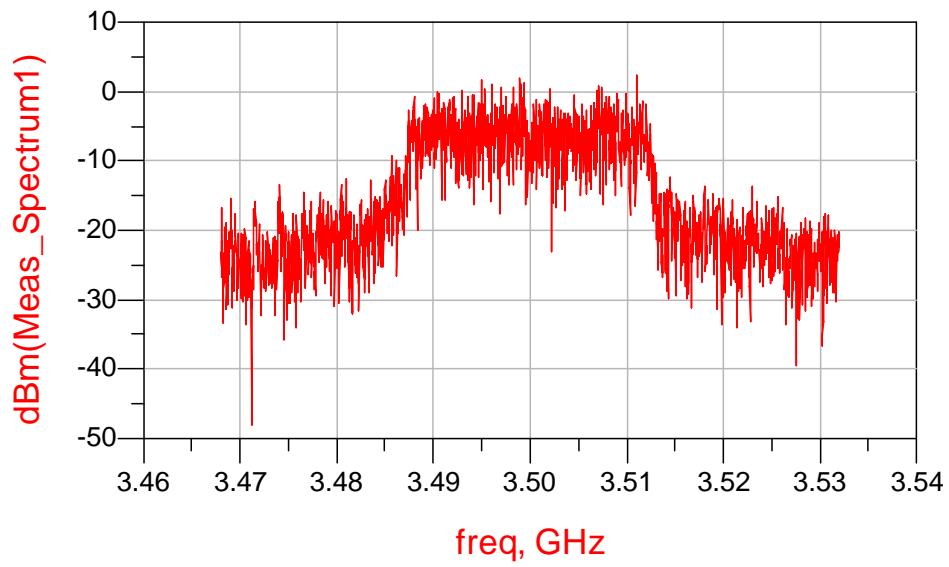
Φάσμα με dBc1out = 23 και noise figure = 7



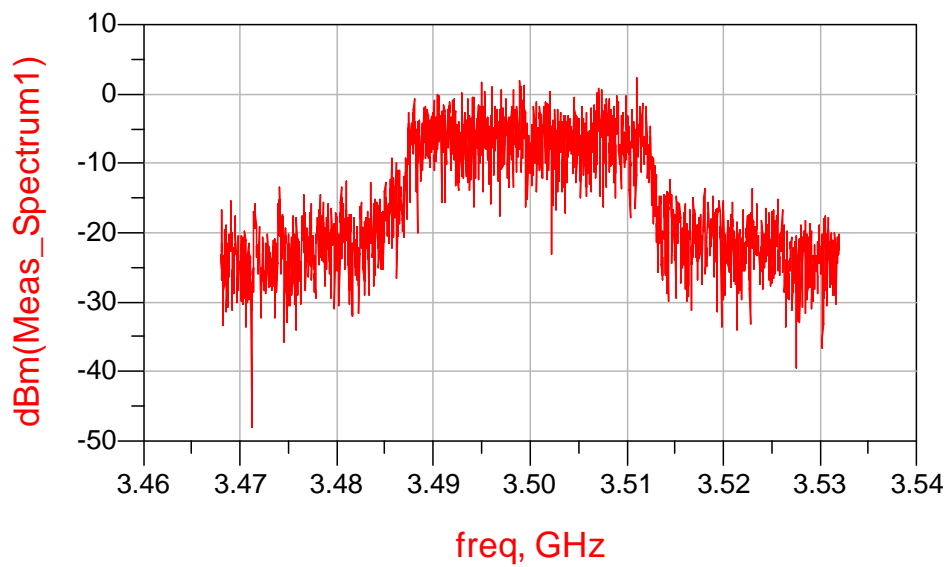
Φάσμα με dBc1out = 25 και noise figure = 3



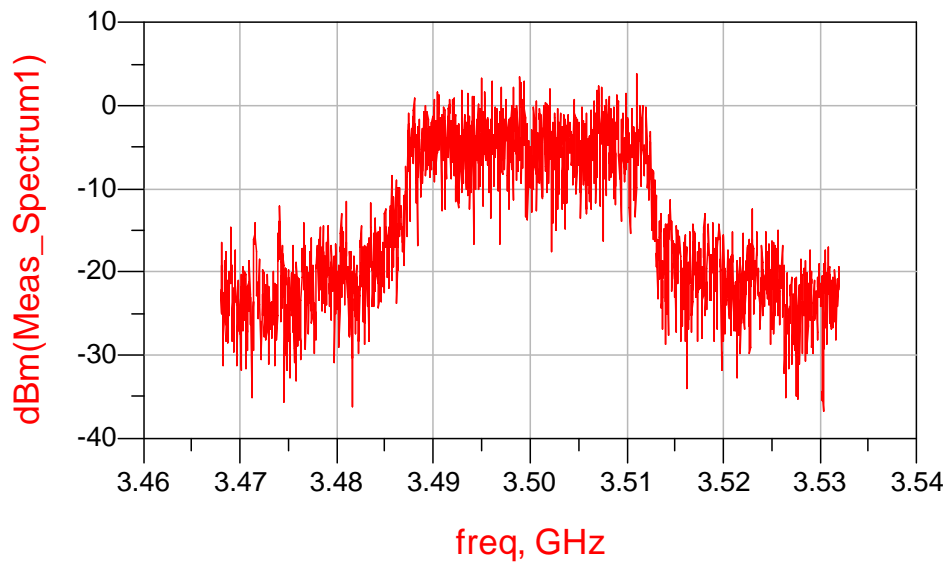
Φάσμα με dBc1out = 25 και noise figure = 5



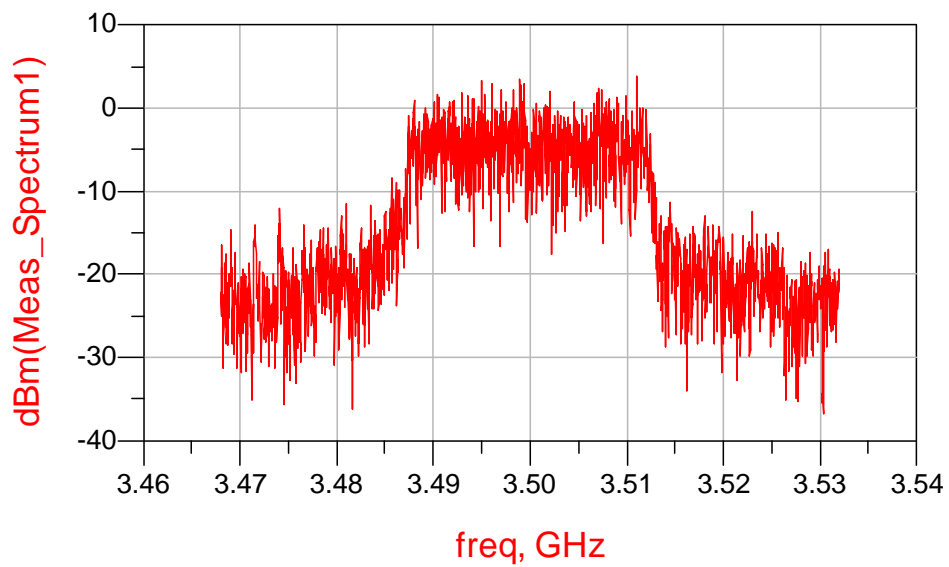
Φάσμα με dBc1out = 25 και noise figure = 7



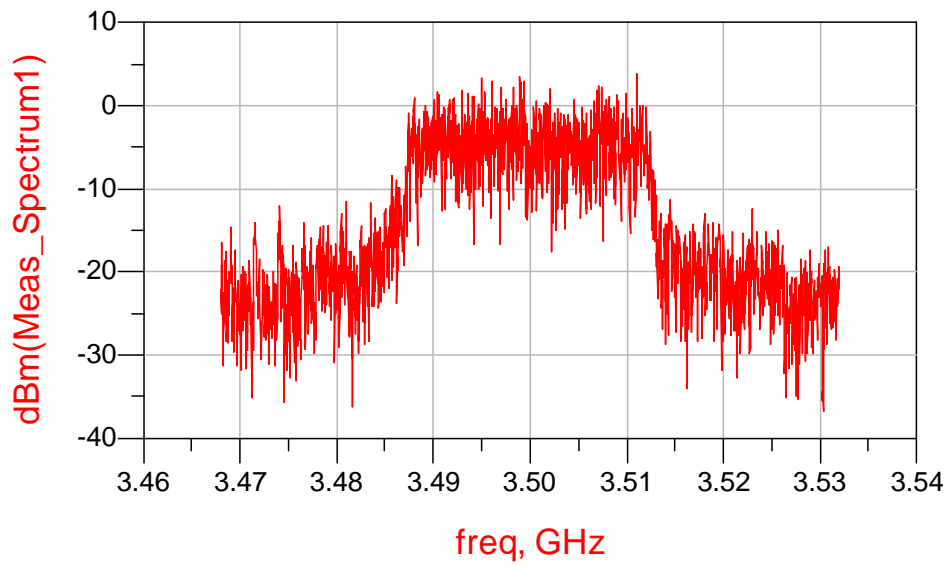
Φάσμα με dBc1out = 27 και noise figure = 3



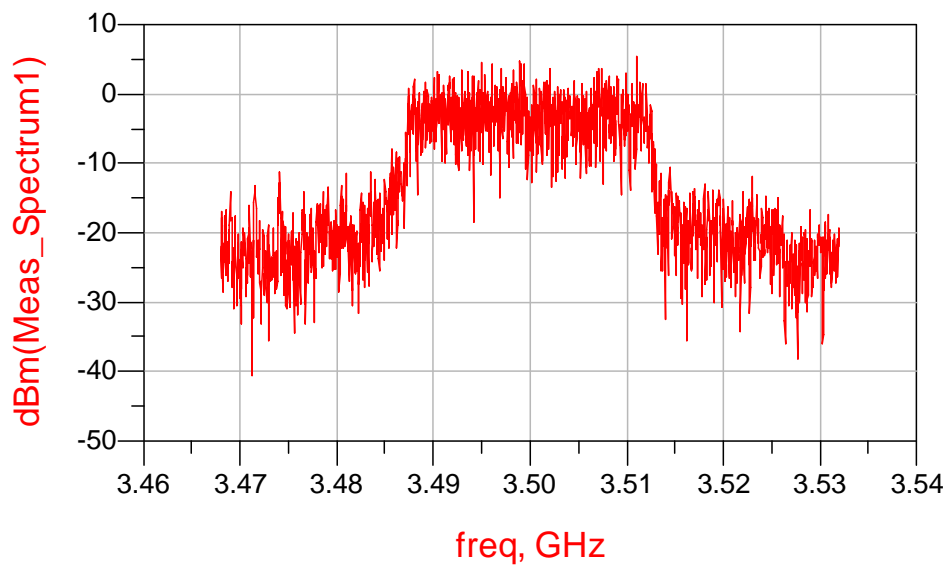
Φάσμα με dBc1out = 27 και noise figure = 5



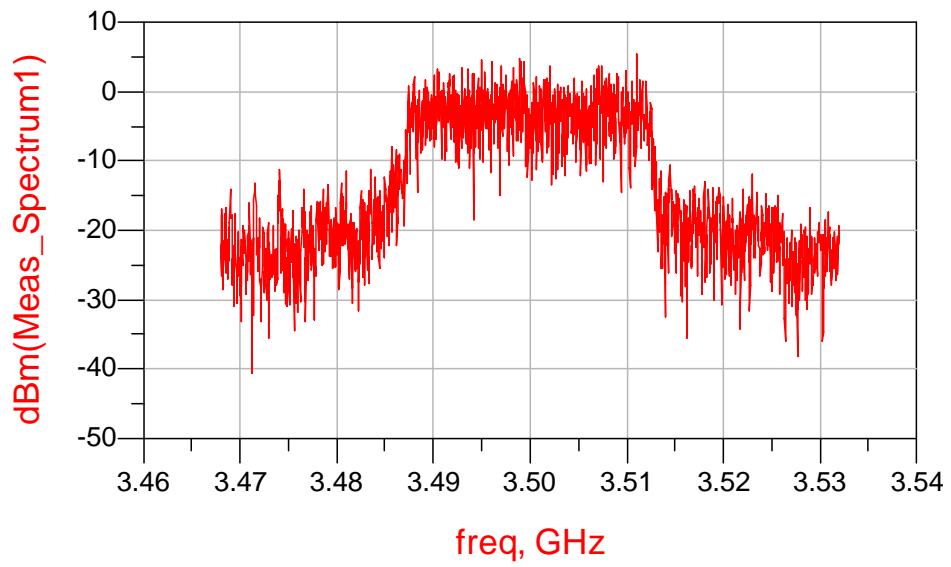
Φάσμα με dBc1out = 27 και noise figure = 7



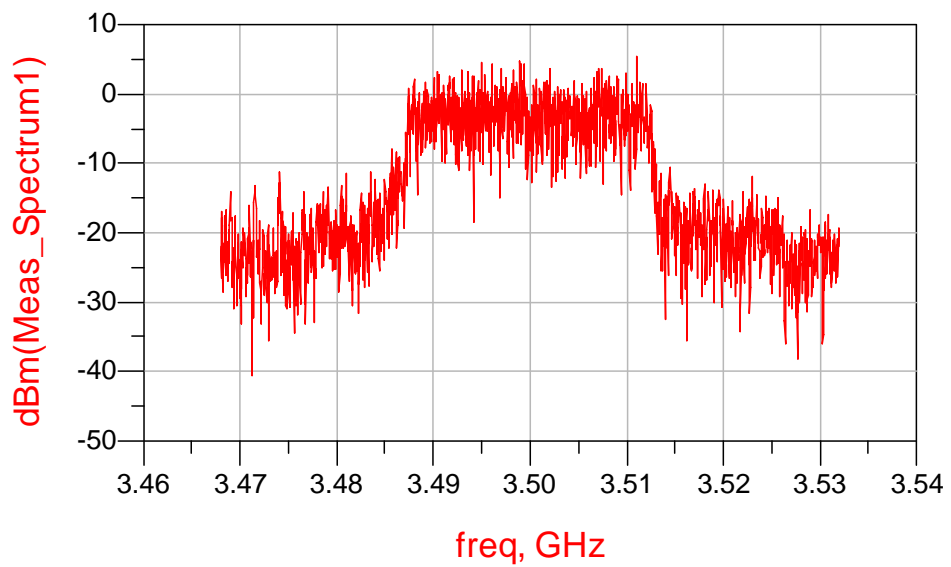
Φάσμα με dBc1out = 29 και noise figure = 3



Φάσμα με dBc1out = 29 και noise figure = 5



Φάσμα με dBc_{1out} = 29 και noise figure = 7



Συμπεράσματα: Από τις παραπάνω μετρήσεις, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνουμε την ισχύ του 1 dB compression point, τόσο η στάθμη του σήματός μας, επιθυμητό και θορυβώδες, χωρίς διάκριση αυξάνεται και μάλιστα αισθητά, καθώς στα 21 dB η κορυφή της κυματομορφής βρίσκεται κάτω από τα 0 dBm, ενώ για 29 dB τα υπερβαίνει προσεγγίζοντας μάλιστα τα 5 dBm. Επίσης, κατά την αύξηση αυτή παρατηρούμε ότι οι πλευρικοί (και ανεπιθύμητοι) λοβοί αρχίζουν να εξασθενούν, γεγονός το οποίο επιθυμούμε κι εμείς για να μειώνεται η διασυμβολική παρεμβολή. Σημειώνουμε σε αυτό το σημείο ότι οι μετρήσεις μας γίνονται μέχρι τα 29 dB για το dBc1out, καθώς έχουμε θέσει σημείο κορεσμού του ενισχυτή τα 31 dB και αυτή η τιμή δεν πρέπει να ξεπεραστεί.

Επίσης, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η τιμή του noise figure (παράγοντας που μεταβάλλει το θόρυβο), αυξάνεται και η παρεμβολή του θορύβου στο σήμα μας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση της στάθμης ολόκληρου του σήματος του συμβόλου. Μαζί όμως με την κυματομορφή του σήματος πληροφορίας, ανυψώνεται και το σήμα του θορύβου, γεγονός που είναι ανεπιθύμητο. Έτσι, για να κρίνουμε ποια αντιστοιχία (dBc1out, noise figure) είναι η καλύτερη θα χρησιμοποιήσουμε τις προδιαγραφές της IEEE για τη μάσκα φάσματος. Σκεφτόμαστε ότι μεγάλο noise figure θα είναι σίγουρα ανεπιθύμητο, όπως επίσης και η μικρή ισχύς του 1 dB compression point.

Καταλήγουμε, λοιπόν, στην δυάδα (27,5) και (29,3). Αν πρέπει να διαλέξουμε ένα ζευγάρι μεταβλητών, διαλέγουμε το (29,3), καθώς έχει λιγότερη κυμάτωση και ελαφρώς πιο πεσμένους πλευρικούς λοβούς.

Παράρτημα

Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα:

Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήσαμε και είναι απόλυτα συνυφασμένες με τα πρότυπα της IEEE, είναι οι εξής:

- $F_{Source}=3500$ MHz
Εδώ θέτουμε την κεντρική συχνότητα του σήματός μας.
- $N_{cbps} = \text{if (Rate_ID==0) then 192 elseif (Rate_ID==1) then 384 elseif (Rate_ID==2) then 384 elseif (Rate_ID==3) then 768 elseif (Rate_ID==4) then 768 else 1152 endif}$
Εδώ υπολογίζεται ο αριθμός των κωδικοποιημένων bits/sec.
- $S_{inter} = \text{if (Rate_ID==0) then 1 elseif (Rate_ID==1) then 1 elseif (Rate_ID==2) then 1 elseif (Rate_ID==3) then 2 elseif (Rate_ID==4) then 2 else 3 endif}$
Εδώ υπολογίζεται ο παράγοντας s του interleaving ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούμε.
- $C_{lengthRS} = \text{if (Rate_ID==0) then 12 elseif (Rate_ID==1) then 32 elseif (Rate_ID==2) then 40 elseif (Rate_ID==3) then 64 elseif (Rate_ID==4) then 88 elseif (Rate_ID==5) then 108 else 120 endif}$
Εδώ υπολογίζεται το μήκος του κώδικα στον κωδικοποιητή RS Encoder, ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης. Παρατήρηση: Στη BPSK διαμόρφωση, δε θα χρησιμοποιηθεί ο κωδικοποιητής.
- $C_{lengthRSOut} = \text{if (Rate_ID==0) then 12 elseif (Rate_ID==1) then 24 elseif (Rate_ID==2) then 36 elseif (Rate_ID==3) then 48 elseif (Rate_ID==4) then 72 elseif (Rate_ID==5) then 96 else 108 endif}$
Εδώ υπολογίζεται το μήκος του κώδικα που θα εξέλθει του κωδικοποιητή, ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης.
- $N_{data} = 192 * \text{BitsperCarrier} * \text{CodingRate} * \text{NumSymbol}$
Εδώ υπολογίζεται ο αριθμός των δεδομένων που θα εκπεμφθούν. Ισούται με τον αριθμό φερόντων δεδομένων επί τα bits ανά φέρον επί το ρυθμό κωδικοποίησης επί τον αριθμό των συμβόλων που θα εκπεμφθούν.
- $\text{BitsperCarrier} = \text{if (Rate_ID==0) then 1 elseif (Rate_ID==1) then 2 elseif (Rate_ID==2) then 2 elseif (Rate_ID==3) then 4 elseif (Rate_ID==4) then 4 else 6 endif}$
Εδώ υπολογίζεται ο αριθμός των bits ανά φέρον, ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης. Στην BPSK διαμόρφωση χρειαζόμαστε 1 bit/φέρον, στην QPSK 2 bits/φέρον, στην 16-QAM 4 bits/φέρον και στην 64-QAM 6 bits/φέρον.

- CodingRate=if (Rate_ID==0) then 1/2 elseif (Rate_ID==1) then 1/2 elseif (Rate_ID==2) then 3/4 elseif (Rate_ID==3) then 1/2 elseif (Rate_ID==4) then 3/4 elseif (Rate_ID==5) then 2/3 else 3/4 endif

Εδώ υπολογίζεται ο ρυθμός κωδικοποίησης ανά σχήμα διαμόρφωσης.

- Carriers=200

Εδώ θέτουμε τον αριθμό συνολικών φερόντων (δεδομένων και πιλοτικά).

- NumSymbol=1/((GuardInterval+1)*UseTim)

Εδώ υπολογίζεται ο αριθμός των συμβόλων που θα εκπεμφθούν. Το πώς βγαίνει αυτός ο τύπος, συζητείται αργότερα, κατά τον υπολογισμό των εκπεμπόμενων bits/sec.

- Ncbs=if (Rate_ID==0) then 24 elseif (Rate_ID==1) then 48 elseif (Rate_ID==2) then 48 elseif (Rate_ID==3) then 96 elseif (Rate_ID==4) then 96 elseif (Rate_ID==5) then 144 else 144 endif

Εδώ υπολογίζεται ο αριθμός κωδικοποιημένων bits ανά σχήμα διαμόρφωσης (πιο σωστά ανά ρυθμό κωδικοποίησης του σχήματος διαμόρφωσης).

- Nubs=if (Rate_ID==0) then 12 elseif (Rate_ID==1) then 24 elseif (Rate_ID==2) then 36 elseif (Rate_ID==3) then 48 elseif (Rate_ID==4) then 72 elseif (Rate_ID==5) then 96 else 108 endif

Εδώ υπολογίζεται ο αριθμός μη κωδικοποιημένων bits ανά σχήμα διαμόρφωσης (πιο σωστά ανά ρυθμό κωδικοποίησης του σχήματος διαμόρφωσης).

- SourcePower=dbmtow(20)

Εδώ θέτουμε την ισχύ του πομπού μας (ουσιαστικά πρόκειται για την ισχύ του RF Modulator κατά το I-Q to timed conversion).

- BandOption=8

Εδώ θέτουμε την τιμή του εύρους ζώνης που θέλουμε.

- BandOption_=limit_warn(BandOption,0,8,8,"BandOption_Value")

Ουσιαστικά, μήνυμα σφάλματος αν θέσουμε τιμή μεγαλύτερη του 8.

- RateID=3

Εδώ θέτουμε την τιμή του σχήματος διαμόρφωσης που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε.

- Rate_ID=limit_warn(RateID,0,6,2,"RateID Value")

Ουσιαστικά, μήνυμα σφάλματος αν θέσουμε τιμή μεγαλύτερη του 6.

- OversamplingOption=1

Εδώ θέτουμε την τιμή των αριθμών σημείων FFT που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε.

- OversamplingOption_=limit_warn(OversamplingOption,0,4,1,"OversamplingOption_Value")

Ουσιαστικά, μήνυμα σφάλματος αν θέσουμε τιμή μεγαλύτερη του 4.

- $Order = \text{if } (OversamplingOption == 0) \text{ then } 8 \text{ elseif } (OversamplingOption == 1) \text{ then } 9 \text{ elseif } (OversamplingOption == 2) \text{ then } 10 \text{ elseif } (OversamplingOption == 3) \text{ then } 11 \text{ else } 12 \text{ endif}$

Εδώ υπολογίζεται η τάξη του αριθμού 2 η οποία θα χρησιμοποιηθεί κατά τον Μ/Σ FFT.

- $FFTSize = 2^{Order}$

Εδώ υπολογίζεται ο αριθμός σημείων FFT.

- $UsefulOFDMSymbolTime = \text{if } (BandOption == 0) \text{ then } (128 \text{ usec} * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 1) \text{ then } (64 \text{ usec} * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 2) \text{ then } (51.2 \text{ usec} * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 3) \text{ then } (32 \text{ usec} * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 4) \text{ then } (28.4 \text{ usec} * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 5) \text{ then } (23.3 \text{ usec} * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 6) \text{ then } (16 \text{ usec} * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 7) \text{ then } (11.2 \text{ usec} * (FFTSize/256)) \text{ else } (8 \text{ usec} * (FFTSize/256)) \text{ endif}$

Εδώ υπολογίζεται ο χρόνος του ωφέλιμου συμβόλου του OFDM. Ο υπολογισμός γίνεται ως εξής:

Καταρχάς, υπολογίζουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας, ως εξής:
 $F_s = \text{floor}(n * BW / 8000) * 8000$.

Έπειτα, υπολογίζουμε το διάστημα μεταξύ των υπο-φερόντων, ως εξής: $\Delta f = F_s / NFFT$.

Τέλος, ο ωφέλιμος χρόνος είναι: $T_b = 1 / \Delta f$.

Έτσι, έχοντας υπολογίσει τον ωφέλιμο χρόνο για 256 σημεία FFT, υπολογίζουμε και για τα άλλα σημεία, ως: $(FFTSize/256) * \text{Χρόνος για 256 σημεία FFT}$.

- $UseTim = \text{if } (BandOption == 0) \text{ then } (0.000128 * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 1) \text{ then } (0.000064 * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 2) \text{ then } (0.0000512 * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 3) \text{ then } (0.000032 * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 4) \text{ then } (0.0000284 * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 5) \text{ then } (0.0000233 * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 6) \text{ then } (0.000016 * (FFTSize/256)) \text{ elseif } (BandOption == 7) \text{ then } (0.0000112 * (FFTSize/256)) \text{ else } (0.000008 * (FFTSize/256)) \text{ endif}$

Ίδιο νόημα με την παραπάνω συνάρτηση, μόνο που επιστρέφει τις τιμές καθαρές, χωρίς usec, ώστε να χρησιμοποιηθούν κατά τον υπολογισμό του αριθμού των συμβόλων.

- $TimeDelay = 200 * Tstep$

Εδώ υπολογίζουμε την καθυστέρηση διάδοσης, χρήσιμη κατά τις μετρήσεις του Spectrum Analyzer. Ισούται με το συνολικό αριθμό των φερόντων επί το χρόνο δειγματοληψίας.

- $Tstep = UsefulOFDMSymbolTime / FFTSize$

Εδώ υπολογίζουμε το χρόνο δειγματοληψίας. Ισούται με τον ωφέλιμο χρόνο του OFDM συμβόλου δια τον αριθμό σημείων FFT.

- $BurstTime = IdleInterval + (NumSymbol + 3) * (1 + GuardInterval) * UsefulOFDMSymbolTime$

Εδώ υπολογίζουμε το χρόνο ροής δεδομένων. Ισούται με το χρόνο του αρχικού κενού διαστήματος συν $1 + \text{GuardInterval}$ επί το χρόνο συμβόλου και αυτό 3 φορές για να συμπεριλάβουμε και το χρόνο προοιμίου.

- $\text{IdleInterval} = 2 \text{ usec}$

Εδώ θέτουμε το χρόνο του αρχικού κενού διαστήματος $2 \mu\text{sec}$.

- $\text{GuardInterval} = 0.25$

Εδώ θέτουμε τον παράγοντα του διαστήματος φύλαξης. Παίρνει τομές 0.25, 0.125, 0.0625, 0.03125.

- $\text{GI} = \text{GuardInterval} * \text{UsefulOFDMSize}$

Εδώ υπολογίζουμε το χρόνο του διαστήματος φύλαξης. Ισούται με τον παράγοντα του διαστήματος φύλαξης επί τον ωφέλιμο χρόνο του συμβόλου.

- $\text{Ts} = \text{GI} + \text{UsefulOFDMSymbolTime}$

Εδώ υπολογίζουμε το συνολικό χρόνο του συμβόλου. Ισούται με το χρόνο του διαστήματος φύλαξης συν τον ωφέλιμο χρόνο του συμβόλου.

- $\text{Vref} = 0.121 / 2^{(\text{Order} - 7)}$

Εδώ υπολογίζουμε την τάση του ενισχυτή για να φέρουμε το σήμα μας σε κανονικοποιημένο επίπεδο.

Χρήσιμες σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των σωστών συμπερασμάτων:

Συχνότητα Δειγματοληψίας: $F_s = \text{floor}(n * \text{BW} / 8000) * 8000$

Διάστημα μεταξύ των υπο-φερόντων: $\Delta f = F_s / \text{NFFT}$

Ωφέλιμος χρόνος του συμβόλου OFDM: $T_b = 1 / \Delta f$

Χρόνος κυκλικού προθέματος: $T_g = G * T_b$

Συνολικός χρόνος συμβόλου OFDM: $T_s = T_b + T_g$

Χρόνος Δειγματοληψίας: T_b / NFFT

Δείγματα ανά Σύμβολο: Εύρος Ζώνης * Συνολικός χρόνος συμβόλου OFDM

Αριθμός Συμβόλων ανά Δευτερόλεπτο: Εύρος Ζώνης / Δείγματα ανά Σύμβολο

ή

Αριθμός Συμβόλων ανά Δευτερόλεπτο: $1 / \text{Συνολικός χρόνος συμβόλου OFDM}$

Αναφορές

- [1] <http://www.techteam.gr/wiki/WiMAX>, 'Techteam.gr Wiki', 2006
 - [2] Todor Cooklev, 'Wireless Communication Standards: a study of IEEE 802.11™, 802.15™, and 802.16™', Artech House, 2002
 - [3] <http://ru6.cti.gr/broadband/el/wimax.php>, 'Προώθηση της Ευρυζωνικότητας στην Περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας', 2006
 - [4] Westech Communications Inc. on behalf of the WiMAX Forum, 'Can WiMAX Address Your Applications?', WiMAX Forum, 2005
 - [5] Wikipedia, 'WiMAX Technology', 2005
 - [6] Edward Grabianowski and Marshall Brain, 'How WiMAX Works', <http://computer.howstuffworks.com/wimax5.htm>
 - [7] SR Telecom White Paper 033-100596-001, Issue 1, 'WiMAX Technology, LOS and NLOS Environments', Αύγουστος 2004
 - [8] Advanced Design System 2005A Documentation, 'WMAN IEEE 802.16™ Specifications', 2005
 - [9] IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society Sponsored by the LAN/MAN Standards Committee, '802.16™ IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems', 1 Οκτωβρίου 2004
 - [10] Shinsuke Hara, Ramjee Prasad, 'Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications', Artech House 2003
 - [11] Dusan Matiae, 'OFDM as a possible modulation technique for multimedia applications in the range of mm waves', 30 Οκτωβρίου 1998
 - [12] Anibal Luis Intini, 'Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Networks', University of California, Santa Barbara, December 2000
 - [13] Charal Langton, 'Intuitive Guide to Principles of Communications, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Tutorial', <http://www.complextoreal.com>
 - [14] Applied Radio Labs, 'Phase Noise Reference', <http://www.radiolab.com.au/DesignFile/PNRef/PNRef.htm>, 25 Απριλίου 2003
-