

**Τμήμα
Μηχανικών
Πληροφορικής τ.ε.**
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Δυτικής Ελλάδας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Η τεχνική της ορθογωνικής συχνοτικής πολυπλεξίας στο
πρόβλημα της πολυόδευσης»

Λιάς Γεώργιος

Επιβλέπων καθηγητής: Τσακανίκας Βασίλειος

Αντίρριο Ιανουάριος 2019

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Αντίρριο, Ημερομηνία

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή
2. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή
3. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή

Ευχαριστίες

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου για τις πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου που ολοκληρώνονται με την παρούσα εργασία. Πολλές ευχαριστίες οφείλω στους γονείς μου που χωρίς την αμέριστη υλική και ηθική τους υποστήριξη θα ήταν αδύνατον να καταφέρω τον σκοπό μου. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Τσακανίκα για την καθοδήγηση και την επίβλεψη της παρούσας πτυχιακής εργασίας

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : ΕΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ4

- 1.1 Ιστορική Αναδρομή4
- 1.2 Ασύρματα Συστήματα Μετάδοσης7
- 1.2 Φάσμα συχνοτήτων12
- 1.3 Αναλογικά και Ψηφιακά Συστήματα Ασύρματης μετάδοσης16
 - 1.3.1 Αναλογικά συστήματα16
 - 1.3.2 Ψηφιακά συστήματα18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΟΛΥΟΔΕΥΣΗΣ (MULTIPATH FADING)22

- 2.1 Πολυόδευση22
 - 2.1.1 Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας23
 - 2.1.2 Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας24
- 2.2 Ανάκλαση24
- 2.3 Σκέδαση25
- 2.4 Περίθλαση26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ27

- 3.1 Εισαγωγή27
- 3.2. Κωδικοποίηση και Πολυπλεξία27
- 3.3. Τι είναι η Πολυπλεξία28
- 3.4 Τεχνικές Πολυπλεξίας /Διαμόρφωσης29
 - 3.4.1 Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM)29
 - 3.4.2 FDMA33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (OFDM)36

- 4.1 Περιγραφή της τεχνικής OFDM37
 - 4.1.1 Ανάλυση ορθογωνιότητας37
 - 4.1.2 Συνθήκες διατήρησης ορθογωνιότητας40
 - 4.1.3 Διάστημα-φρουρός (Guard Interval)43
 - 4.1.4 Εκπαράθωση46
- 4.2 Δομή Συστήματος OFDM47
- 4.3 Συμπεράσματα51

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ62

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : ΕΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Γύρω στο 1865 η ασύρματη επικοινωνία ή ραδιοτηλεγραφία εκφράστηκε σαν θεωρία από τον Μάξγουελ (J. C. Maxwell). Ο Μάξγουελ υποστήριξε την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που έχουν τα ίδια φυσικά χαρακτηριστικά με το φως και διαφέρουν από αυτό αποκλειστικά και μόνο στο μήκος του κύματος. Όμως ο Φαραντάι (M. Faraday) ήταν ο πρώτος που έβαλε τα θεμέλια για το δόγμα του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου (1837-46) και ήταν αυτός που προώθησε την ιδέα ότι η διάδοση των ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων γίνεται με πεπερασμένη ταχύτητα και αποτελεί κυματική διαδικασία. Η θεωρία του Μάξγουελ έγινε δεκτή με πολλές επιφυλάξεις από τον επιστημονικό κόσμο της εποχής του, όμως τα πειράματα του Χερτζ (H. Hertz) επαλήθευσαν αυτή τη θεωρία (1886-89). Ο Χερτζ κατάφερε να παράξει, να παρατηρήσει και να μελετήσει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και, με τα πειράματά του, κατέληξε στις ίδιες διαπιστώσεις με αυτές του Μάξγουελ, οι οποίες ήταν μόνο θεωρητικές. Κατά συνέπεια, μπορούμε να πούμε ότι από την εποχή του Χερτζ εφευρέθηκε η ραδιοτηλεγραφία. Η κεραία είχε επινοηθεί εν τω μεταξύ από τον Ρώσο Αλέξανδρο Ποπόφ (1859-1905). Το 1898 κατασκευάστηκε ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ της πόλης Dover και του πλοίου-φάρος «East Goodwin», το οποίο έπλεε σε απόσταση 15 ναυτικών μιλίων μέσα στην ανοικτή θάλασσα. Ο Ιταλός Μαρκόνι (G. Marconi) συνδύασε τον πομπό του Χερτζ, με κάποιες βασικές τροποποιήσεις, με το δέκτη του Ποπόφ και πραγματοποίησε την πρώτη ραδιοτηλεγραφική σύνδεση μεγάλης εμβέλειας. Τα χαρακτηριστικά της συσκευής του Μαρκόνι συμπίπτουν με αυτά της συσκευής του Ποπόφ. Τα πρώτα πειράματα έγιναν στην Αγγλία το 1896, όμως το 1897 υπήρχε ήδη ραδιοτηλεγραφική επικοινωνία μεταξύ δύο σημείων που απείχαν 16 χιλιόμετρα μεταξύ τους, στην περιοχή Σπέτσια της Ιταλίας. Το 1896 ο Ποπόφ είχε πραγματοποιήσει τη σύνδεση δύο σημείων του λιμανιού της Κροστάνδης, τα οποία απείχαν μεταξύ τους 640 μέτρα. Τελικά, ο πατέρας της ραδιοτηλεγραφίας θεωρείται ο Μαρκόνι. Ο Guglielmo Marconi (Μαρκόνι, 1874-1937) πραγματοποίησε το έτος 1895 σε ηλικία 21 ετών,

χωρίς ακόμα πολλές θεωρητικές ανησυχίες, τις πρώτες ασύρματες εκπομπές σημάτων Μορς και εισήγαγε την παγκόσμια κοινότητα στην εποχή της ασύρματης επικοινωνίας. Οι πομποί και οι δέκτες του Μαρκόνι, εφοδιασμένοι πλέον και με κεραίες, απαιτούσαν σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας και γι' αυτό χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την επικοινωνία με πλοία σε υπερπόντια ταξίδια. Το έτος 1898 ο Μαρκόνι διαπίστωσε ότι η εμβέλεια ενός πομπού μεγάλωνε σημαντικά, όταν πομπός και δέκτης ήταν συντονισμένοι στην ίδια συχνότητα. Τις ίδιες διαπιστώσεις έκαναν κι άλλοι ερευνητές, οι οποίοι αναζητούσαν πυκνωτές με μεταβαλλόμενη χωρητικότητα, για να μπορούν να επιλέγουν τη συχνότητα συντονισμού. Ακόμα ένα ενδιαφέρον φαινόμενο που παρατήρησε ο Μαρκόνι στα πειράματά του ήταν η μεγαλύτερη εμβέλεια των εκπομπών κατά τις νυκτερινές ώρες. Το 1901, ο ίδιος πέτυχε ασύρματη ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ Αγγλίας και της ανατολικής ακτής της Αμερικής, πάνω από τα νερά του Ατλαντικού. Εκείνη την εποχή αυτό το γεγονός θεωρήθηκε πρωτοφανής επιτυχία και συζητήθηκε ευρέως στον τύπο και στους επιστημονικούς κύκλους, προκαλώντας και τις απαραίτητες μελλοντολογικές προβλέψεις. Ήδη το έτος 1907 κατάφερε ο ίδιος ερευνητής να κατασκευάσει δύο πομπούς με διαμόρφωση πλάτους, οι οποίοι είχαν εμβέλεια περί τα 450 χλμ. Ήταν ο λεγόμενος ασύρματος του Μαρκόνι, ο οποίος άρχισε να πειραματίζεται με τον ηλεκτρομαγνητισμό το 1894 και πέτυχε την πρώτη μετάδοση μηνύματος χωρίς την χρήση συρμάτων. Αυτή του η εφεύρεση χρησιμοποιήθηκε στα πλοία και χρησιμοποιούταν ακόμα και πριν από λίγα χρόνια. Συχνά δε τον ασυρματιστή του πλοίου τον αποκαλούσαν μαρκόνι. Το 1909, του απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ Φυσικής. Αυτή η περίοδος καινοτομιών στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών έκλεισε το 1904, όταν ο Reginald Fessenden (Φέσεντεν, 1866- 1932), Καναδός μηχανικός και πανεπιστημιακός καθηγητής, μετέδωσε ασύρματα φωνή και μουσική. Οι πειραματικές εκπομπές του στην ακτή του Ατλαντικού προκάλεσαν τεράστια έκπληξη στους χειριστές ασύρματων τηλεγράφων, τους «μαρκόνηδες» των πλοίων, όταν άκουσαν στα ακουστικά τους ομιλία και μουσική, ένα μουσικό κομμάτι του Χαίντελ. Ο Φέσεντεν χρησιμοποίησε στα πειράματά του ένα μικρόφωνο άνθρακα, δικής του επινόησης. Reginald Fessenden Αργότερα άρχισε η εφαρμογή της ασύρματης επικοινωνίας- τηλεφωνίας (ραδιοφωνίας) στα Μακρά (LW) και Μεσαία (MW) κύματα. Ραγδαία ήταν η εξέλιξη των επικοινωνιών με τη μετέπειτα χρήση των Υψηλών (HF), Λίαν Υψηλών (VHF), Υπερυψηλών (UHF) και Υπέρ- υπερυψηλών (SHF) συχνοτήτων που βοήθησαν στην επικοινωνιακή κάλυψη τεράστιων

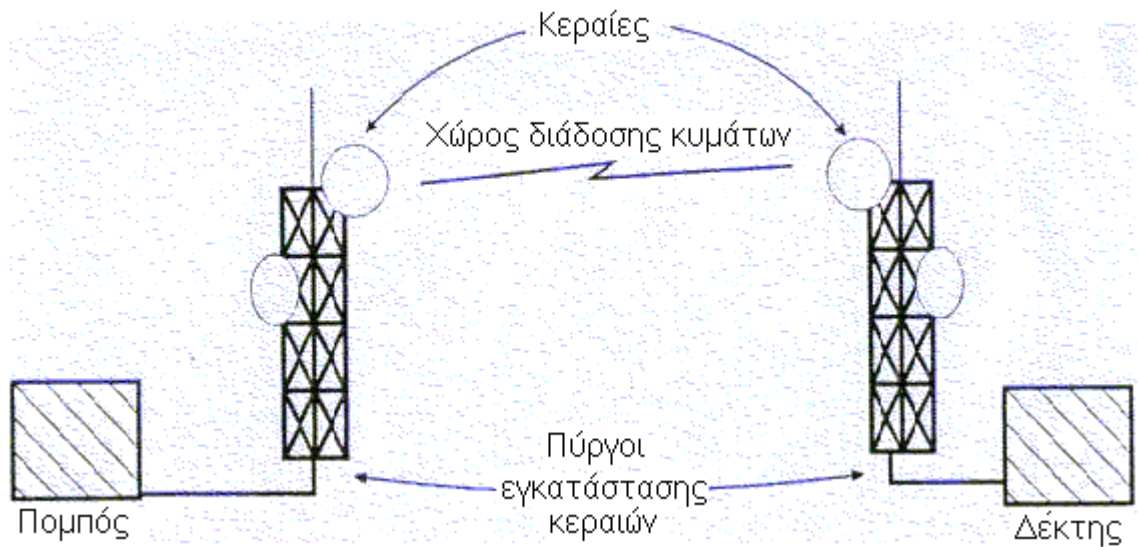
αποστάσεων. Η εφεύρεση και η εξέλιξη της ασπρόμαυρης και της έγχρωμης τηλεόρασης έδωσαν νέες διαστάσεις στον τομέα των επικοινωνιών. Οι πρώτες προσπάθειες για τη δημιουργία ενός ασύρματου τοπικού δικτύου έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 χρησιμοποιώντας τη τεχνολογία των υπέρυθρων ακτινών (Infrared – IR), αλλά λόγω χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (1Mbps) η προσπάθεια απέτυχε. Στη χρήση των υπέρυθρων ακτίνων υπήρχε μια απαίτηση, η οποία στην πορεία αποδείχθηκε μειονέκτημα: η ανάγκη οπτικής επαφής μεταξύ των συνδεδεμένων συσκευών, οι οποίες πρέπει πάντα να διατηρούν μικρές αποστάσεις μεταξύ τους. Καθώς η τεχνολογία εξελισσόταν και όλο και περισσότερες νέες συσκευές εμφανίζονταν, το μειονέκτημα αυτό δυσχέραινε ακόμα περισσότερο τα πράγματα. Στη συνέχεια έγιναν κι άλλες προσπάθειες με χρήση ραδιοκυμάτων στα 900 MHz (HP, 1980) και λίγο αργότερα στα 1,73 GHz (Motorola), αλλά απέτυχαν λόγω της πολυπλοκότητας και της αδυναμίας εξασφάλισης μόνιμης άδειας χρήσης φάσματος. Το 1985 η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών (Federal Communications Commission, FCC) εξουσιοδότησε την δημόσια χρήση της Βιομηχανικής, Επιστημονικής, Ιατρικής ζώνης (ISM bands) που περιλαμβάνει τις συχνότητες 902 MHz ως και 5.85GHz. Η κίνηση αυτή της FCC έδωσε τεράστια ώθηση στην αγορά των ασυρμάτων δικτύων, γιατί στις περισσότερες χώρες του κόσμου δεν απαιτείται καμία ειδική άδεια για την εκπομπή στην περιοχή των ISM ζωνών, εκτός βέβαια από περιορισμούς στην ισχύ εκπομπής που ποικίλλουν από χώρα σε χώρα. Έτσι πολλοί κατασκευαστές ασχολήθηκαν με την μαζική παράγωγή ασύρματων προϊόντων, πράγμα που οδήγησε στην αύξηση του αριθμού των WLANs (ασύρματων τοπικών δικτύων). Δύο πρότυπα είναι αυτή τη στιγμή σε εξέλιξη όσον αφορά τα ασύρματα δίκτυα. Το ένα αναπτύσσεται στην Ευρώπη από το ETSI (European Telecommunications Standard Institute) και ονομάζεται HIPERLAN (High Performance European Radio LAN). Το άλλο, που είναι και το πιο διαδεδομένο σήμερα, αναπτύσσεται από την IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) και ονομάζεται 802.11 WLAN. Το 1997 η IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), η οποία είχε αναλάβει την προτυποποίηση των τοπικών δικτύων (LAN) μέσω της ομάδας 802, δημοσίευσε το 802.11, ένα πρότυπο το οποίο σχεδιάστηκε αρχικά να παρέχει μέγιστη ταχύτητα 2Mbps στην ζώνη των 900MHz. Το γεγονός αυτό δημιούργησε πολλά προβλήματα γιατί η ζώνη των 900MHz χρησιμοποιείτο και από άλλες συσκευές, όπως π.χ. από ασύρματα τηλέφωνα και από το GSM (Global System for Mobile communications - Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών

Επικοινωνιών). Δύο χρόνια αργότερα, το 1999 η IEEE παρουσίασε δύο βελτιωμένες εκδοχές του πρωτοκόλλου 802.11 (τα 802.11a και 802.11b) με σκοπό να αυξήσει την απόδοση των ασύρματων δικτύων ως τα 54Mbps. Το πρωτόκολλο 802.11b λειτουργεί στην συχνότητα των 2,4GHz και παρέχει διέλευση μέχρι και 11Mbps ενώ το 802.11a λειτουργεί σε μία ζώνη που “πάσχει” από λιγότερες παρεμβολές στα 5GHz ενώ ο ρυθμός απόδοσης φτάνει μέχρι τα 54Mbps. Η αποδοχή του 802.11b ήταν σχεδόν καθολική από τους κατασκευαστές και έτσι η συντριπτική πλειοψηφία των ασύρματων δικτύων που λειτουργούν σήμερα χρησιμοποιεί αυτό το πρότυπο, παρά τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει. Παράλληλα με τα 802.11a και 802.11b υπάρχει και το 802.11g το οποίο έχει τον ίδιο ρυθμό απόδοσης με το 802.11a, 54Mbps αλλά λειτουργεί στην ζώνη των 2,4GHz.

1.2 Ασύρματα Συστήματα Μετάδοσης

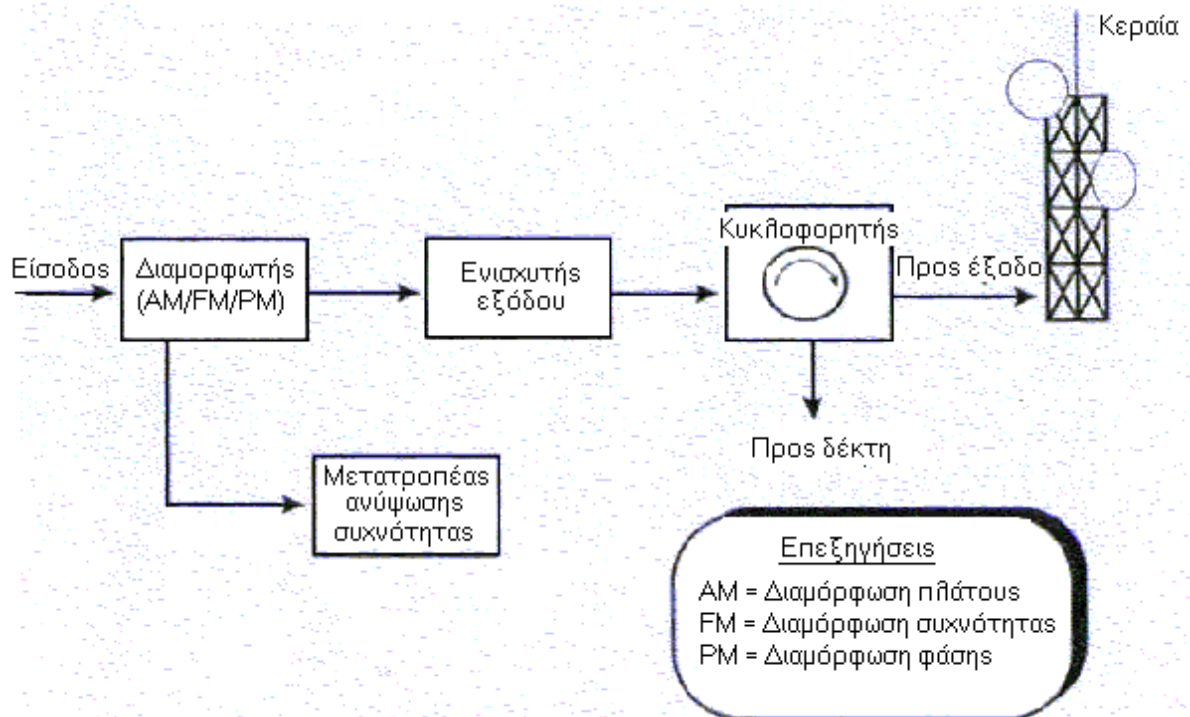
Με τον όρο ασύρματη τηλεπικοινωνία ή ραδιοζεύξεις, εννοούμε τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (τα οποία μεταφέρουν τις πληροφορίες), στον χώρο υπεράνω της επιφάνειας της γης. Ένα σύστημα ασύρματης τηλεπικοινωνίας αποτελείται από τα εξής στοιχεία (σχήμα 1.1):

- τον **πομπό** (transmitter)
- τη **γραμμή τροφοδοσίας** (feeder) του πομπού με την κεραία εκπομπής
- την **κεραία εκπομπής** (transmitting antenna)
- το **χώρο διαδόσεως** ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (path)
- την **κεραία λήψεως** (receiving antenna)
- τη **γραμμή σύνδεσης** (feeder) της κεραίας λήψεως με το δέκτη
- το **δέκτη** (receiver)
- τους **πύργους εγκατάστασης** (tower) των κεραιών (όπου κρίνεται απαραίτητο)



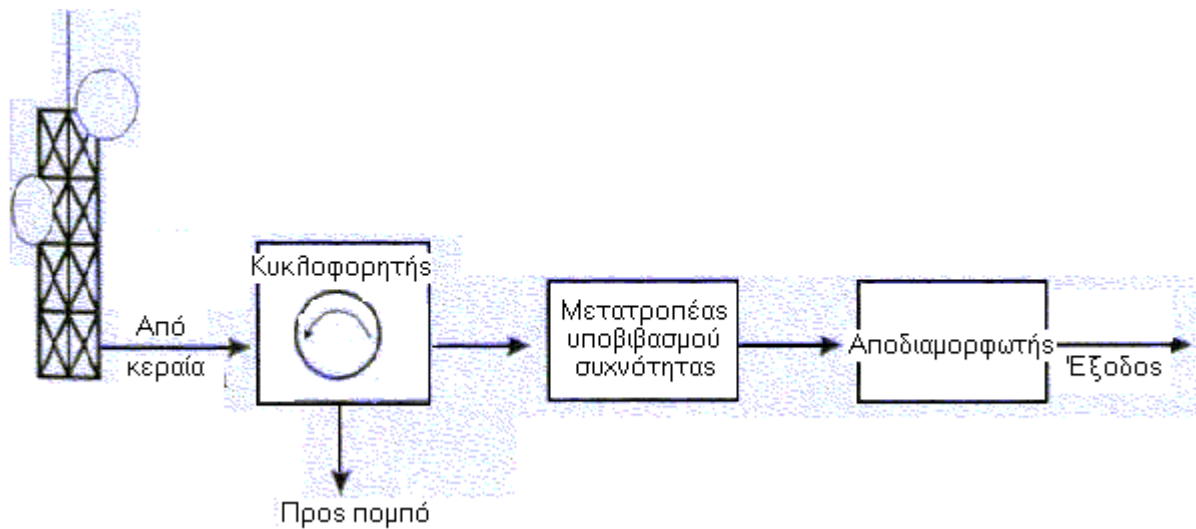
Σχήμα 1.1: Βασικά στοιχεία ενός ασύρματου ραδιοσυστήματος.

Ο πομπός (σχήμα 1.2) αποτελείται από τον διαμορφωτή (modulator) ο οποίος εφαρμόζει την προς μετάδοση πληροφορία σε ένα φέρον (carrier) σήμα, έναν προαιρετικό μετατροπέα συχνότητας (frequency up-converter) που ανυψώνει τη συχνότητα εισόδου – εξόδου, τον ενισχυτή εξόδου (output amplifier) ο οποίος ενισχύει το σήμα για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις και τον συζεύκτη κεραιάς που χρησιμοποιεί έναν κυκλοφορητή (circulator) για να ενώσει ή να διαχωρίσει το λαμβανόμενο από το μεταδιδόμενο σήμα έτσι ώστε να χρησιμοποιείται η ίδια κεραία για εκπομπή και λήψη.



Σχήμα 1.2: Βασικά στοιχεία ενός πομπού.

Ο δέκτης (σχήμα 1.3) αποτελείται από επίσης έναν κυκλοφορητή (circulator) για το διαχωρισμό του λαμβανόμενου από το μεταδιδόμενο σήμα χρησιμοποιώντας την ίδια κεραία, το μετατροπέα συχνότητας (frequency down-converter) για τον υποβιβασμό της συχνότητας προς τα κάτω και τον αποδιαμορφωτή (demodulator) ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανάκτηση της πληροφορίας από το φέρον κύμα.



Σχήμα 1.3: Βασικά στοιχεία ενός δέκτη.

Οι κεραίες εκπομπής και λήψεως πρέπει να επιλέγονται έτσι, ώστε να παρέχουν βέλτιστη απόδοση, υψηλή αξιοπιστία στη μετάδοση, ευκολία στην επιλογή συχνότητας και να εναρμονίζονται με τις διεθνείς συστάσεις. Για μετάδοση σημείου προς σημείο (point to point) οι κεραίες είναι ισχυρά κατευθυντικές σχήματος παραβολικού ή χοάνης. Οι πύργοι εγκατάστασης των κεραιών παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιτυχή διάδοση των ραδιοκυμάτων. Γι' αυτό, θα πρέπει να είναι ανυψωμένοι πάνω από τυχόν εμπόδια που υπάρχουν στη διαδρομή των ραδιοκυμάτων ώστε να εξασφαλίζεται η οπτική επαφή και να λαμβάνουν υπόψη τη σφαιρικότητα της γης. Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή ενός πύργου είναι το κόστος, οι περιορισμοί λόγω νομοθεσίας, η κίνηση αεροσκαφών στην περιοχή, οι συνθήκες του εδάφους, ο καιρός (φόρτιση λόγω ανέμου) και τα χαρακτηριστικά των κυματοδηγών. Η διάδοση κατά μήκος των γραμμών τροφοδοσίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των γραμμών και των συνθέτων αντιστάσεων στα άκρα τους. Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την κεραία εκπομπής στην κεραία λήψεως εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των κεραιών εκπομπής και λήψεως και από τις φυσικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας όπου πραγματοποιείται η διάδοση. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάδοση στην ατμόσφαιρα, υφίστανται μεταβολές τόσο τα πλάτη όσο και οι φάσεις των ηλεκτρικών σημάτων.

Για να μεταβιβαστεί η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια από την κεραία εκπομπής στην κεραία λήψεως, απαιτείται η συχνότητα των ρευμάτων που πραγματοποιούν την ακτινοβολία της ενέργειας να είναι αρκετά υψηλή και μεγαλύτερη ενός ορισμένου κατώτερου ορίου, το οποίο εξαρτάται από τις διαστάσεις των κεραιών. Επίσης ο χώρος υπεράνω της γης θεωρείται ως ένα μέσο ενιαίο, ομοιογενές και ισότροπο, έτσι ώστε μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή που παράγεται σε ένα σημείο του ελεύθερου χώρου, διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω από το σημείο αυτό. Συνεπώς για να πραγματοποιήσουμε ταυτόχρονα δύο ή περισσότερες ραδιοηλεκτρικές ζεύξεις, απαιτούνται ειδικά τεχνάσματα ώστε να διακρίνουμε τα σήματα της μίας ζεύξεως από αυτά της άλλης. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Χρησιμοποίηση ζωνοπερατών φίλτρων, τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση χωρίς εξασθένηση κυματομορφών ορισμένων συχνοτήτων, ενώ εξασθενούν σημαντικά κυματομορφές άλλων συχνοτήτων. Για την πραγματοποίηση δύο ταυτόχρονων ραδιοζεύξεων, παράγονται δύο διαφορετικές φέρουσες συχνότητες και μετά την εκπομπή τους στον ελεύθερο χώρο υπάρχουν ταυτόχρονα και τα δύο ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Έτσι, τοποθετούμε στην είσοδο του δέκτη ένα φίλτρο, το οποίο επιτρέπει τη διέλευση σημάτων της επιθυμητής συχνότητας που είναι ίση ή παραπλήσια εκείνης που παράγεται στον πομπό.

- Χρησιμοποίηση κατάλληλων κατευθυντικών κεραιών εκπομπής και λήψεως. Υπάρχουν κεραιές εκπομπής, οι οποίες εκπέμπουν ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά κύματα εντός ενός περιορισμένου κώνου, ενώ εκτός αυτού τα εκπεμπόμενα κύματα είναι τόσο εξασθενημένα που δεν επιδρούν σε άλλους δέκτες. Το ίδιο συμβαίνει και με τις κεραιές λήψεως. Η δυσκολία που προκύπτει από τον περιορισμό της ενέργειας εντός μιας προκαθορισμένης γωνίας, εξαρτάται από τις απαιτούμενες διαστάσεις των κεραιών σε συνάρτηση με τη συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Για παράδειγμα, η γωνία ακτινοβολίας μιας κεραιάς στο οριζόντιο επίπεδο, δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση $\alpha = 60\lambda/l$ μοίρες, όπου λ είναι το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος και l η οριζόντια διάσταση της κεραιάς. Έτσι, για μια στενή δέσμη ακτινοβολίας της τάξεως της 1 μοίρας, απαιτείται $l = 60\lambda$. Συνεπώς αν η χρησιμοποιούμενη συχνότητα είναι $f = 1\text{ MHz}$, τότε προκύπτει $l = 18\text{ Km}$ (!), ενώ αν $f = 1\text{ GHz}$ θα είναι $l = 18\text{ m}$ (ισχύει $\lambda = c/f$, όπου $c = 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$ είναι η ταχύτητα του φωτός). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για κεραιές μεγάλης κατευθυντικότητας

πρέπει να χρησιμοποιούνται οι υψηλότερες συχνότητες του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων.

- Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ορισμένης συχνότητας υφίστανται ισχυρή απόσβεση κατά τη διάδοσή τους πέραν ορισμένων αποστάσεων. Έτσι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα της ίδιας συχνότητας σε ταυτόχρονες ζεύξεις, σε περιοχές όμως που δεν βρίσκονται σε οπτική επαφή.

Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος ασύρματης τηλεπικοινωνίας, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εξής:

- Όσο υψηλότερη είναι η φέρουσα συχνότητα, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης και τόσο μικρότερες οι διαστάσεις των κεραιών για ορισμένο κέρδος (gain) των κεραιών. Αυτό όμως συνεπάγεται μικρότερη απόδοση και αξιοπιστία των ενισχυτών.
- Μεγάλες κεραιές, σημαίνει μεγάλο κέρδος αλλά και αύξηση του κόστους του σταθμού.
- Η τοποθέτηση κεραιών σε ψηλούς πύργους ή σε ψηλά βουνά, έχει ως αποτέλεσμα την κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων αλλά και την αύξηση του κόστους κατασκευής και συντήρησης των σταθμών.
- Η πραγματοποίηση ραδιοζεύξεων με μεγάλο εύρος ζώνης είναι επιθυμητή διότι αυξάνεται η ικανότητα του συστήματος, όμως πολλές φορές μια δεύτερη παράλληλη ζεύξη μπορεί να αποτελεί μια καλύτερη οικονομικά και τεχνικά λύση.

1.2 Φάσμα συχνοτήτων

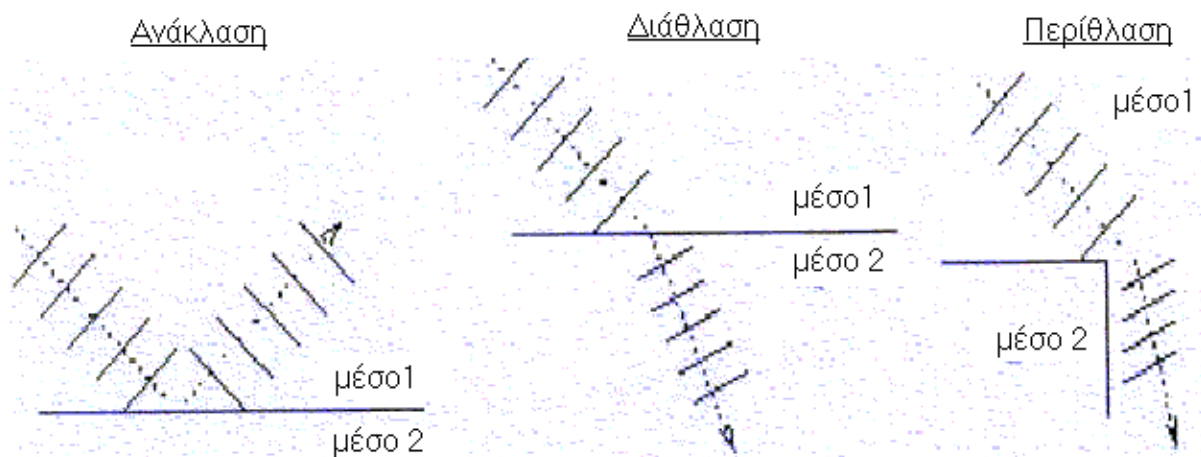
Το φάσμα συχνοτήτων που χρησιμοποιείται στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες περιγράφεται στον πίνακα 1.1. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στον ελεύθερο χώρο (το κενό) με ταχύτητα που είναι σταθερή και ανεξάρτητη της συχνότητας και είναι ίση με $c=3 \cdot 10^8$ m/s. Το μήκος κύματος λ του ηλεκτρομαγνητικού κύματος συχνότητας f δίνεται από τη σχέση $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8/f$, όπου λ δίνεται σε m και η συχνότητα f σε Hertz. Οι υψηλότερες συχνότητες του φάσματος συχνοτήτων χρησιμοποιούνται γενικά σε ζεύξεις οπτικής επαφής. Για

μικρότερες συχνότητες, ο περιορισμός της οπτικής επαφής έχει μικρότερη σημασία, επειδή τα κύματα αυτά εισχωρούν – λόγω του φαινομένου της περιθλάσεως (diffraction) – σε εκείνες τις περιοχές οι οποίες θα βρίσκονταν «υπό σκιάν». Το φαινόμενο της περιθλάσεως παίζει σημαντικό ρόλο στη ραδιοφωνία, αφού με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ραδιοφωνική κάλυψη περιοχών που βρίσκονται υπό τη «σκιά» βουνών, οικημάτων κλπ. Επί της τροχιάς των ραδιοηλεκτρικών ακτίνων και κατά τρόπο που εξαρτάται από τις χρησιμοποιούμενες συχνότητες επιδρούν και άλλα φαινόμενα, όπως ανάκλαση (reflection), διάθλαση (refraction), διάχυση (diffusion) και απορρόφηση (absorption). Μερικά από τα προαναφερθέντα φαινόμενα περιγράφονται στο σχήμα 1.4.

Πίνακας 1.1: Ταξινόμηση ραδιοηλεκτρικών κυμάτων

Ζώνη συχνότητας	Μήκος κύματος	Ονομασία συχνότητας (κυμάτων)	Σύμβολο	Χαρακτηρισμός κυμάτων	Χρήση
3 – 30 KHz	100–10 Km	Πολύ χαμηλή (μυριομετρικά)	VLF (Very low freq.)		Τηλεπ/νίες μεγάλης αποστάσεως
30–300 KHz	10 – 1 Km	Χαμηλή (χιλιομετρικά)	LF (Low freq)	Μακρά	Ραδιοφωνία, Ραδιοναυσιπλοΐα
0,3 – 3 MHz	1Km – 100m	Μέση (εκατομετρικά)	MF (Medium freq.)	Μεσαία	Ραδιοφωνία
3 – 30 MHz	100 – 10 m	Υψηλή (δεκαμετρικά)	HF (High Frequency)	Βραχεία	Ασύρματη τηλεφωνία μεγάλων αποστάσεων

30 – 300 MHz	10 – 1 m	Πολύ υψηλή (μετρικά)	VHF (Very High Frequency)	Υπερβραχέα	FM Ραδιοφωνία, Τηλεόραση, Τηλεπ/νία μεταξύ κινητών σημείων, Ραδιοναυσιπλοΐα
0,3 – 3 GHz	100 – 10 cm	Εξαιρετικά υψηλή (δεκατομετρικά)	UHF (Ultra High Freq)	Μικροκύματα	Τηλεόραση, Τηλεπ/νία μεταξύ κινητών σημείων, Ραδιοναυσιπλοΐα, Ραντάρ
3 – 30 GHz	10 – 1 cm	Υπερύψηλη (Εκατοστομετρικά)	SHF (Super High Freq)	Μικροκύματα	Ασύρματη τηλεφωνία, ραντάρ, δορυφορικές τηλεπ/νίες
30 – 300 GHz	10 – 1 mm	Υπερβολικά υπερύψηλη (χιλιοστομετρικά)	EHF (Extra High Freq.)		



Σχήμα 1.4: Φαινόμενα ανάκλασης, διάθλασης και περίθλασης.

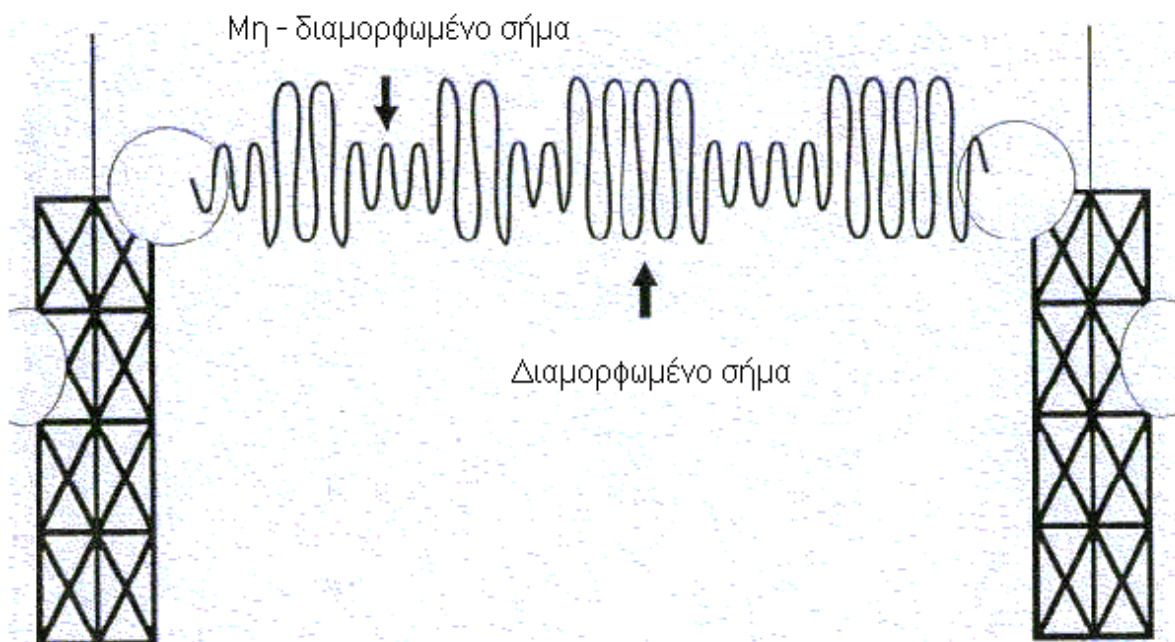
Η εξασθένιση (attenuation) των ραδιοηλεκτρικών κυμάτων είναι συνάρτηση της χρησιμοποιούμενης συχνότητας και οφείλεται στα συστατικά της ατμόσφαιρας. Για συχνότητες μικρότερες των 3 GHz περίπου, τα αέρια της ατμόσφαιρας δεν παράγουν εξασθένιση των κυμάτων. Όμως για συχνότητες άνω των 3 GHz , η εξασθένιση που οφείλεται στην απορρόφηση ενέργειας από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο και τους υδρατμούς, γίνεται αισθητή. Με την αύξηση της συχνότητας παρατηρείται και αύξηση της εξασθένισης, ενώ παράλληλα εμφανίζονται φαινόμενα «συντονισμού» για συχνότητες άνω των 20 GHz . Έτσι είναι δυνατόν σε ορισμένες συχνότητες άνω των 20 GHz , οι αποσβέσεις να είναι τόσο μεγάλες ώστε να προκαλούν διακοπή της ζεύξεως ακόμη και μικρού μήκους, της τάξεως μερικών km . Άλλοι παράγοντες όπως η βροχή, το χαλάζι, η ομίχλη και η νέφωση προκαλούν ισχυρές εξασθενήσεις στην περιοχή των μικροκυμάτων. Για ραδιοζεύξεις της τάξεως μερικών χιλιάδων km επί της επιφάνειας της γης, σημαντικό ρόλο παίζει η ιονόσφαιρα, δηλαδή εκείνη η περιοχή της ατμόσφαιρας που βρίσκεται σε ύψος μεταξύ περίπου 80 και 1000 km . Για συχνότητες μέχρι περίπου 30 MHz η ιονόσφαιρα δρα σαν κάτοπτρο ή καλύτερα σαν το μέσο που προκαλεί διάθλαση των ραδιοηλεκτρικών ακτίνων, δηλαδή προοδευτική κάμψη τους προς τα κάτω, ώστε οι ακτίνες να επιστρέφουν στη γη. Το ύψος όπου το κύμα υφίσταται ανάκλαση είναι συνάρτηση της συχνότητας του και της ηλεκτρονικής πυκνότητας της ιονόσφαιρας. Η ηλεκτρονική πυκνότητα εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και συνεπώς η ιονοσφαιρική διάδοση είναι συνάρτηση του ημερήσιου χρόνου και της εποχής του έτους. Άρα, για να είναι εφικτή μία ζεύξη πρέπει να γνωρίζουμε τη σύνθεση και το ύψος της ιονόσφαιρας, ώστε να μεταβάλλεται η συχνότητα ζεύξεως μέσα σε διάστημα λίγων ωρών. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η εκλογή συχνότητας είναι καθοριστικός παράγοντας για την υλοποίηση μιας ασύρματης ζεύξεως, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές μεταξύ των διαφόρων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

1.3 Αναλογικά και Ψηφιακά Συστήματα Ασύρματης μετάδοσης

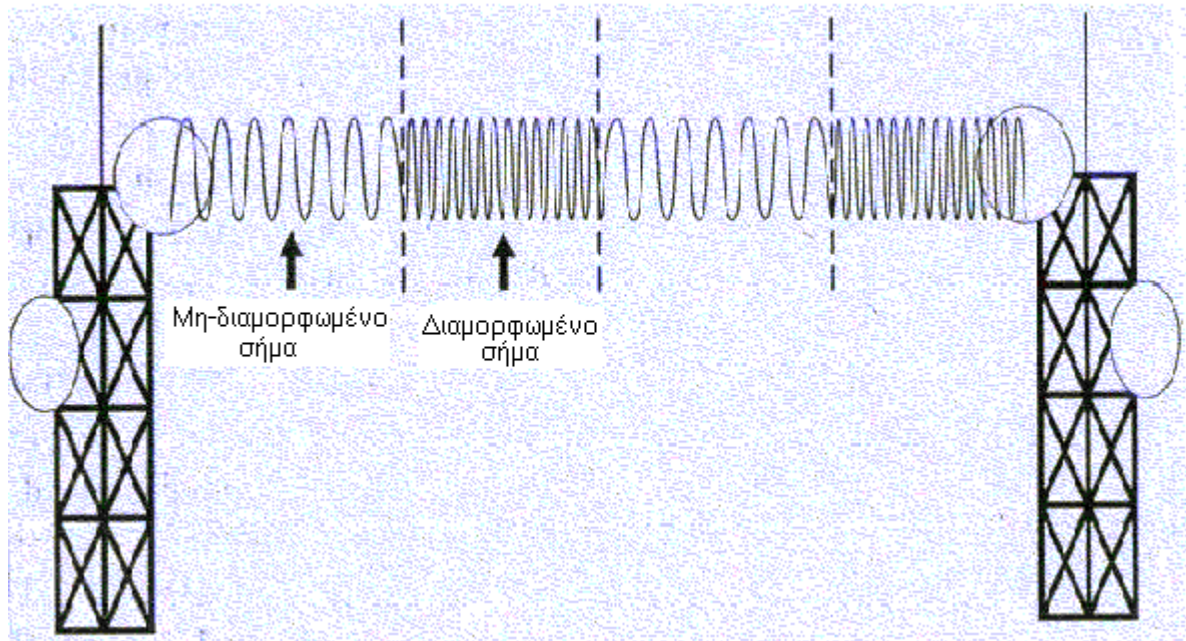
Τα μικροκυματικά ασυρματικά συστήματα κατατάσσονται ευρέως σε αναλογικά και ψηφιακά, γεγονός που εξαρτάται από την τεχνική διαμόρφωσης.

1.3.1 Αναλογικά συστήματα

Τα αναλογικά συστήματα χρησιμοποιούν είτε την διαμόρφωση πλάτους (*AM*) είτε τη διαμόρφωση συχνότητας (*FM*), με περισσότερο ευρέως χρησιμοποιούμενη την *FM*. Για εύρος ζώνης 30 MHz ενός κοινού φορέα 6 GHz , η υποθετική χωρητικότητα της *FM* τεχνολογίας είναι 2400 κανάλια ομιλίας. Άλλες χωρητικότητες καναλιών χρησιμοποιούν διαμόρφωση πλάτους (*AM*) και μετάδοση απλής πλευρικής ζώνης (*Single Side Band - SSB*). Για το ίδιο εύρος ζώνης των 30 MHz , ένα σύστημα *AM SSB*, μπορεί να μεταφέρει 6000 κανάλια. Σχηματικά, τα δύο είδη διαμορφώσεων *AM* και *FM* στα αναλογικά συστήματα παριστάνονται στα σχήματα 2.1 και 2.2.

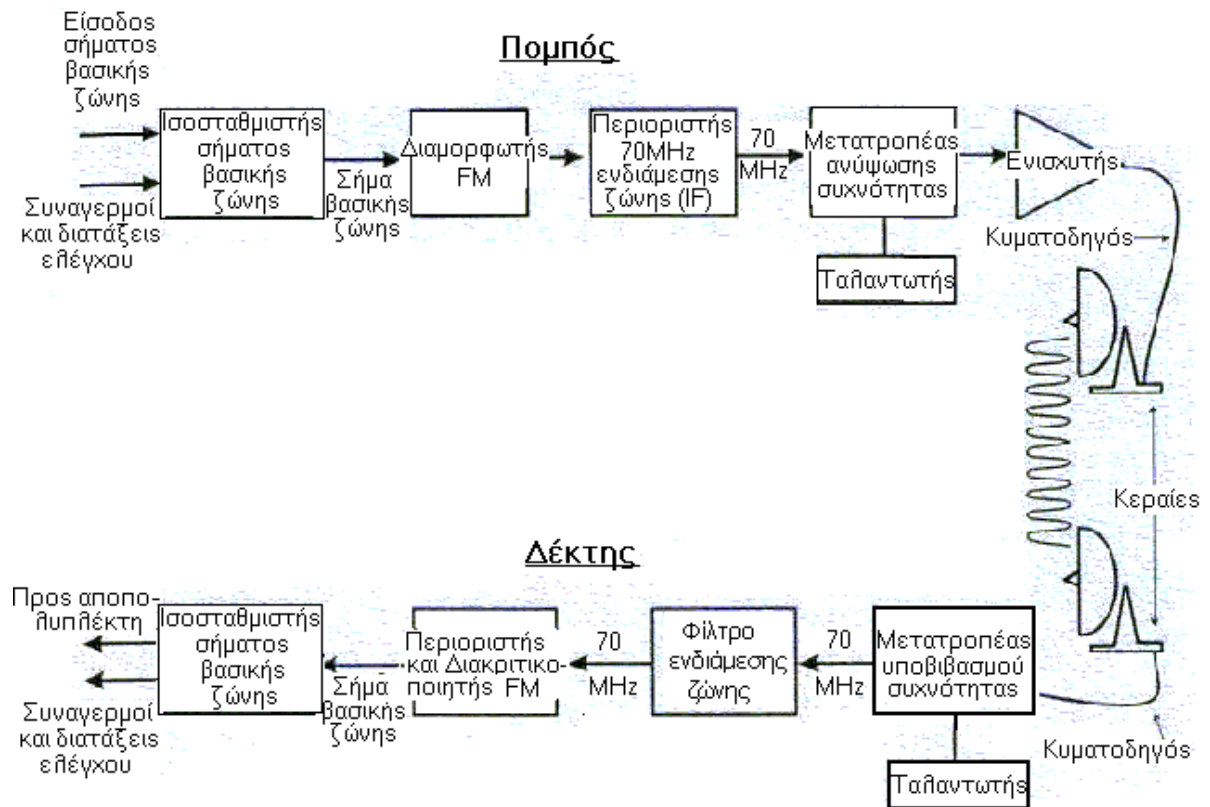


Σχήμα 1.5: Διαμόρφωση AM. Το φέρον σήμα συνδυάζεται με το διαμορφώνον σήμα ώστε να παράγει μια αύξηση στο πλάτος η οποία παριστάνει την πραγματική πληροφορία.



Σχήμα 1.6: Διαμόρφωση FM. Το φέρον σήμα συνδυάζεται με το διαμορφώνον σήμα ώστε να παράγει έναν υψηλότερο ρυθμό συχνότητας ο οποίος παριστάνει την πραγματική πληροφορία.

Ένα block διάγραμμα ενός πλήρους μικροκυματικού συστήματος αναλογικής διαμόρφωσης συχνότητας παριστάνεται στο σχήμα 2.3. Το σήμα βασικής ζώνης (baseband input) αφού περάσει από έναν ισοσταθμιστή (equaliser) διαμορφώνει το φέρον κύμα με τη χρήση του διαμορφωτή *FM* (*FM modulator*). Το διαμορφωμένο σήμα μετατρέπεται σε μια ενδιάμεση συχνότητα (*IF*) των 70 MHz , το οποίο στη συνέχεια αυξάνει στη χρησιμοποιούμενη συχνότητα με τη χρήση του up-converter. Στο δέκτη πραγματοποιείται η αντίστροφη διαδικασία. Ο δέκτης λαμβάνει το διαμορφωμένο σήμα και το υποβαθμίζει στην ενδιάμεση συχνότητα (*IF*) των 70 MHz με τη χρήση του down-converter. Στη συνέχεια το σήμα περνάει μέσα από ένα φίλτρο και έναν ενισχυτή (gain control) ώστε να εξομαλυνθεί οποιαδήποτε παραμόρφωση καθυστέρησης στα φίλτρα. Στη συνέχεια οδηγείται στον διακριτικοποιητή (discriminator) όπου ακολουθείται η διαδικασία αποδιαμόρφωσης. Συστήματα που χρησιμοποιούν αναλογική μετάδοση, μπορούν τυπικά να μεταφέρουν από 24 μέχρι 2700 κανάλια ομιλίας.

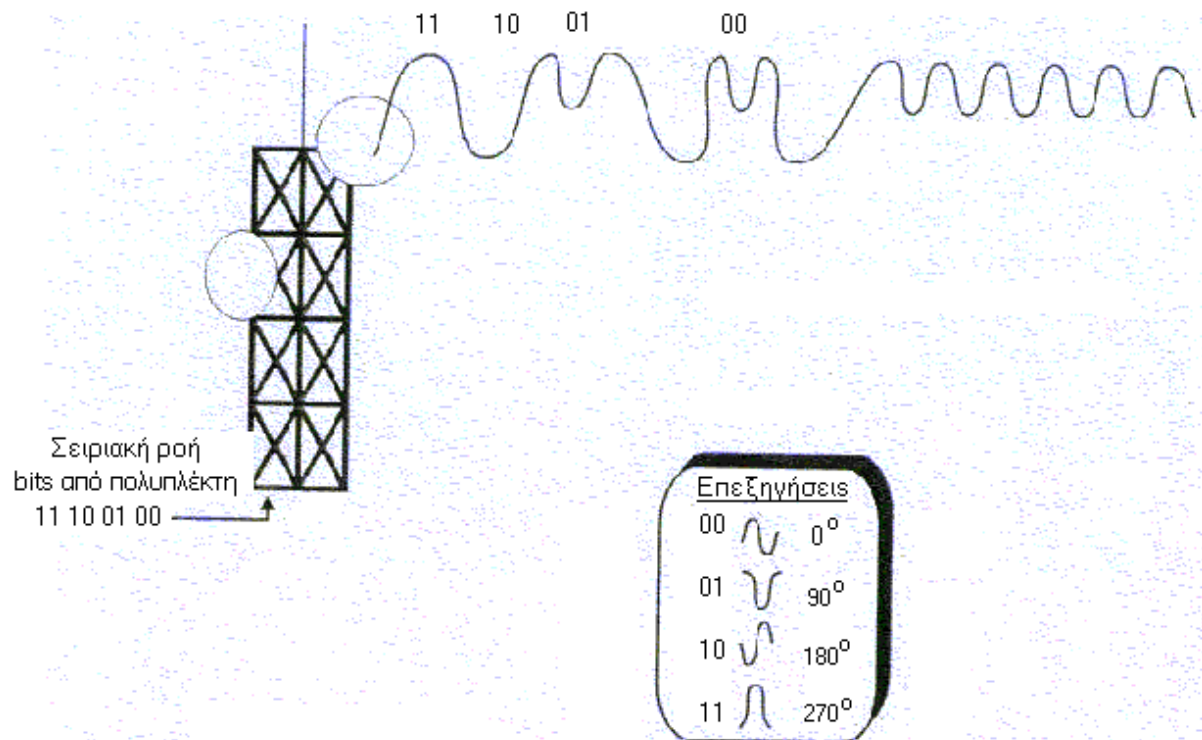


Σχήμα 1.7: Τυπικό ασυρματικό αναλογικό δίκτυο διαμορφώσεως FM.

1.3.2 Ψηφιακά συστήματα

Μικροκυματικά συστήματα ψηφιακής μετάδοσης άρχισαν να χρησιμοποιούνται από τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Στην ψηφιακή μετάδοση χρησιμοποιείται συνήθως η διαμόρφωση μετατόπισης φάσεως (phase shift keying-PSK, σχήμα 1.8) ή η διαμόρφωση τετραγωνικού παλμού (quadrature amplitude modulation=QAM). Έτσι ένας συνολικός αριθμός από 1344 κανάλια φωνής μπορούν να πολυπλεχθούν σε 30 MHz ραδιοσυχνότητας και να έχουμε μια φασματική απόκριση περίπου 3 bits/Hz.

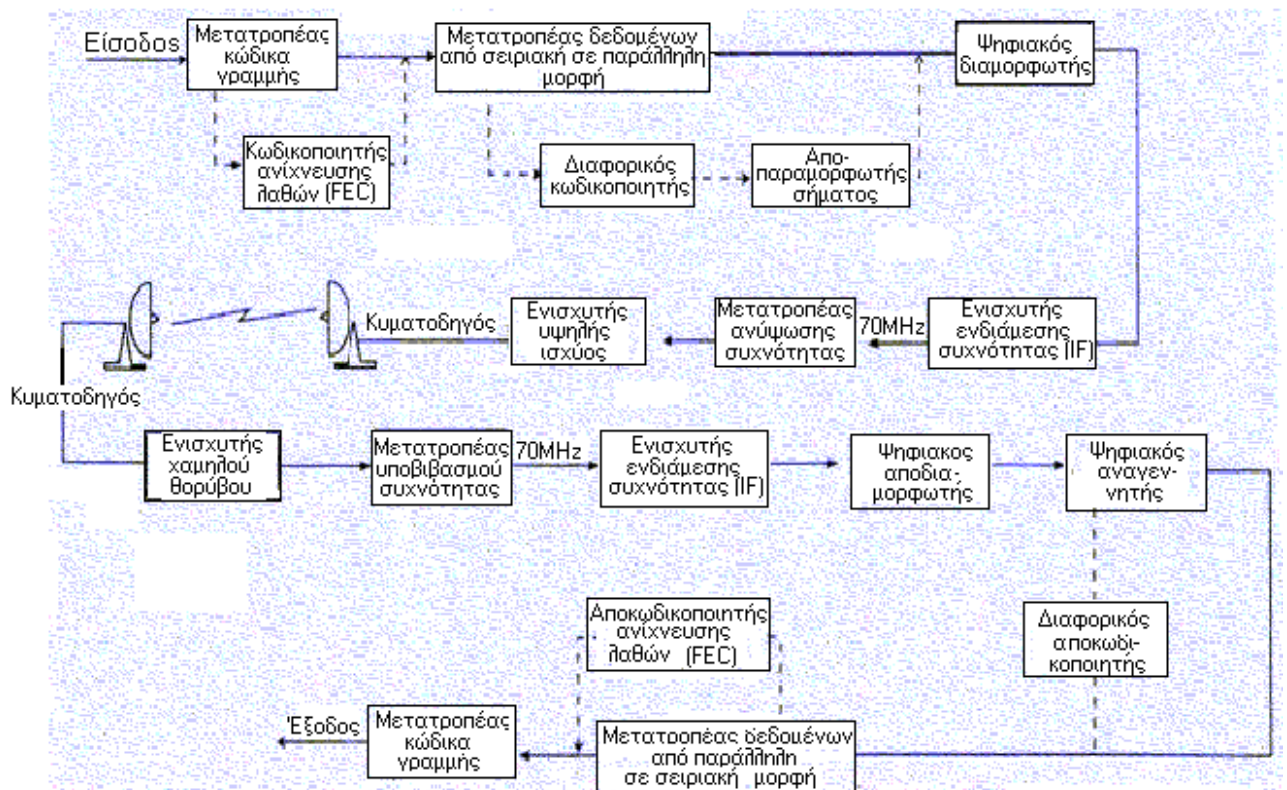
Καινούργιες τεχνικές των 64 QAM υποστηρίζουν 2014 κανάλια ομιλίας σε 30 MHz ραδιοσυχνότητας και η φασματική απόκριση είναι τώρα 4,5 bits/Hz.



Σχήμα 1.8: Διαμόρφωση μετατόπισης 4 φάσεων για τη μετάδοση 2 bits/Hz.

Στο σχήμα 1.9 παρουσιάζεται ένα ψηφιακό ασύρματο μικροκυματικό σύστημα. Μερικά από τα υποσυστήματα που παρουσιάζονται στο σχήμα είναι προαιρετικά. Ο μετατροπέας γραμμής κώδικα (line code converter) λαμβάνει ένα τυποποιημένο κώδικα γραμμής παλμοκωδικής διαμόρφωσης (PCM) και την μετατρέπει σε μορφή non-return to zero (NRZ). Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας κωδικοποιητής ανιχνεύσεως και διορθώσεως λαθών [Forward Error Check (FEC) coder] αν και αυτή η διαδικασία δεν υλοποιείται πάντα. Η μετατροπή από σειριακή σε παράλληλη γίνεται από τον κατάλληλο μετατροπέα (serial to parallel converter) και διαχωρίζει τη ροή των σειριακών δεδομένων σε δύο διαφορετικές εισόδους: την (I) φάση και την

τετραγωνική (q) φάση ώστε να εκτελεστεί η τεχνική διαμόρφωσης φάσεως. Ένας προαιρετικός διαφορικός κωδικοποιητικής (differential coder) χρησιμοποιείται για να ισοσταθμίσει ασάφειες στις φάσεις των δεδομένων. Η συσκευή pre-distorter που είναι επίσης προαιρετική, χρησιμοποιείται για τη διόρθωση τυχόν παραμόρφωσης του σήματος λόγω ενίσχυσης. Ο διαμορφωτής (digital modulator) παρέχει τη συνάρτηση διαμόρφωσης του σήματος βασικής ζώνης (baseband signal). Το διαμορφωμένο σήμα στη συνέχεια μετατρέπεται σε μια ενδιάμεση συχνότητα, ενισχύεται και αποστέλλεται στον μετατροπέα συχνότητας προς τα άνω (up-converter), ο οποίος μετατρέπει το σήμα βασικής ζώνης στη χρησιμοποιούμενη συχνότητα του ραδιοσυστήματος. Το σήμα στη συνέχεια περνά από τον ενισχυτή υψηλής ισχύος (high-power amplifier) και μέσω κυματοδηγού (waveguide) οδηγείται στην κεραία για εκπομπή. Στο δέκτη ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία ώστε να ανακτάται η πληροφορία στην αρχική της μορφή.



Σχήμα 1.9 : Τυπικό ψηφιακό ασυρματικό σύστημα.

Οι συνήθεις χωρητικότητες των ψηφιακών ασυρματικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές ραδιοζεύξεις είναι οι εξής: 2 Mbits/s, 2x2 Mbits/s, 4x2 Mbits/s, 8x2 Mbits/s, 16x2 Mbits/s, 34 Mbits/s, 51 Mbits/s και 155 Mbits/s.

Για να αξιολογήσουμε την καλή λειτουργία μιας ραδιοζεύξεως ορίζουμε τις ακόλουθες παραμέτρους:

BER (Bit Error Rate): Ρυθμός λαθών στο χρόνο μέτρησης

EFS (Error Free Seconds): Δευτερόλεπτα χωρίς λάθη

ES (Errored Seconds): Δευτερόλεπτα με λάθη

SES (Severely Errored Seconds): Δευτερόλεπτα με πάρα πολλά λάθη

DM (Degraded Minutes): Πρώτα λεπτά με λάθη

US (Unavailable Seconds): Μη διαθέσιμα δευτερόλεπτα

Η επίδραση των λαθασμένων bits στη μετάδοση φωνής παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1. Στις πρακτικές ραδιοζεύξεις, θεωρούμε συνήθως ως αποδεκτή τιμή του BER το 10^{-3} .

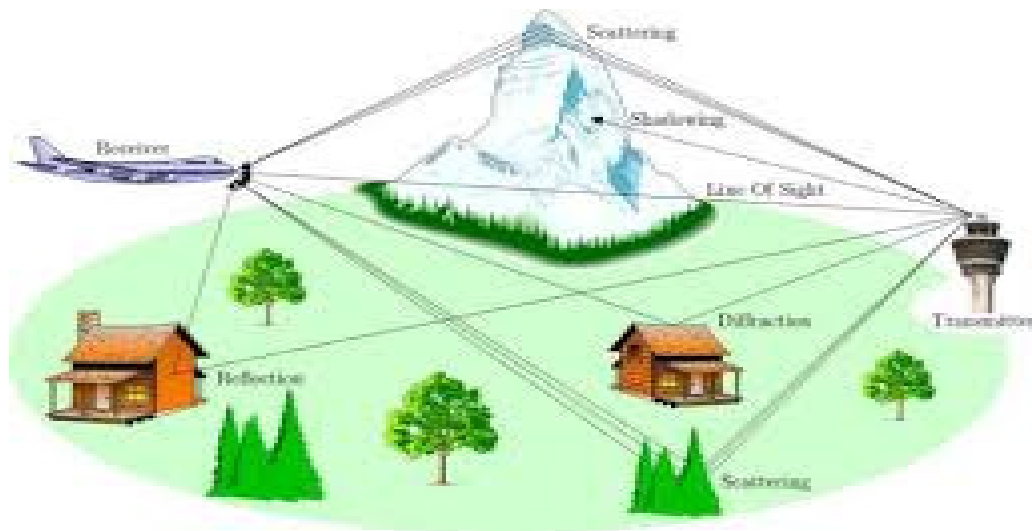
Πίνακας 1.2: Επίδραση των λαθεμένων bits στη μετάδοση φωνής

Ρυθμός λαθών (BER)	Υποκειμενική εντύπωση των λαθεμένων bits
10^{-6}	Όχι αντιληπτή.
10^{-5}	Σποραδικοί κρουστικοί θόρυβοι στις χαμηλές στάθμες ομιλίας, μόλις αντιληπτή
10^{-4}	Σποραδικοί κρουστικοί θόρυβοι μερικών επιδράσεων, στις χαμηλές στάθμες ομιλίας
10^{-3}	Παρενόχληση σε κάθε στάθμη ομιλίας
10^{-2}	Υψηλός βαθμός παρενόχλησης, κατανόηση ομιλίας ουσιαστικά ελαττωμένη
5×10^{-2}	Σχεδόν ακατανόητη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΟΛΥΟΔΕΥΣΗΣ (MULTIPATH FADING)

2.1 Πολυόδευση

Βασικός παράγοντας απωλειών είναι η πολυόδευση ή διάδοση με διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών(multipath fading). Η πολυόδευση οδηγεί σε ραγδαίες διακυμάνσεις της φάσης και του πλάτους του σήματος. Το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης δεν περιέχει μόνο το κύμα της άμεσης οπτικής ευθείας, αλλά και μεγάλο αριθμό ραδιοκυμάτων που φτάνουν μέσω ανάκλασης και περίθλασης. Τα πολλαπλά επίπεδα κύματα συνδυάζονται στην κεραία του δέκτη για να παράγουν ένα σύνθετο λαμβανόμενο σήμα.



Σχήμα 2.1: Πολυόδευση

Το περιβάλλον που υπάρχει μεταξύ του πομπού και του δέκτη αποτελείται από αντικείμενα, κτίρια, αυτοκίνητα και ανθρώπους. Μερικά από αυτά, όπως και ο δέκτης, αλλάζουν θέση κατά τη διάρκεια μιας τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης δημιουργώντας ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον, που περιλαμβάνει κινητά εμπόδια και σκεδαστές του σήματος. Έτσι, το σήμα φθάνει στο δέκτη από πολλές διαφορετικές διευθύνσεις, έχοντας ακολουθήσει διαφορετικές διαδρομές. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται πολυδιαδρομική διάδοση. Στην πολυδιαδρομική διάδοση συμβάλλουν τα φαινόμενα της ανάκλασης, της περίθλασης και της σκέδασης. Οι

πολυδιαδρομικές συνιστώσες που φθάνουν στο δέκτη διαφέρουν ως προς το πλάτος, τη φάση, τη γωνία άφιξης και το χρόνο άφιξης σε σχέση με την απευθείας συνιστώσα. Η πολυδιαδρομική διάδοση έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση ή την ενίσχυση του σήματος ανάλογα με τον τρόπο συμβολής των πολυδιαδρομικών συνιστωσών στο δέκτη. Όπως αναφέραμε παραπάνω ένας από τους βασικούς παράγοντες είναι πολυόδευση ή διάδοση με διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών. Με τον όρο διαλείψεις στις τηλεπικοινωνίες εννοούμε διακυμάνσεις του σήματος στο δέκτη όσον αφορά το πλάτος ή τη φάση ή τη γωνία αφίξεώς του. Η αιτία αυτών των διακυμάνσεων είναι η πρόσθεση των συνιστωσών πολλαπλών διαδρομών του σήματος, εφόσον το κύμα κατά τη διάδοσή του στο ασύρματο κανάλι δύναται να ακολουθήσει πολλές και διαφορετικές διαδρομές στη μετάδοση από τον πομπό στο δέκτη, υπόκειται δηλαδή στο φαινόμενο της πολυόδευσης (multipath). Υπάρχουν δύο είδη διαλείψεων:

- διαλείψεις μεγάλης κλίμακας
- διαλείψεις μικρής κλίμακας

2.1.1 Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας

Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας πραγματεύονται την εξασθένηση της μέσης τιμής της ισχύος του σήματος λήψης εξαιτίας απώλειας στη διαδρομή και τη μεταβολή της τιμής αυτής λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ πομπού-δέκτη. Η ύπαρξη αυτού του φαινομένου είναι αποτέλεσμα της παρεμβολής μεταξύ πομπού και δέκτη, καθώς αλλάζει η σχετική τους θέση, διαφόρων εμποδίων (κτίρια, λόφοι, δασώδεις εκτάσεις κ.λ.π.). Έχουμε λοιπόν μια συνεχή αλλαγή του χώρου που παρεμβάλλεται μεταξύ πομπού και δέκτη που οδηγεί σε μια μεταβαλλόμενη «σκίαση» του δέκτη. Για τον λόγο αυτό, η μεταβολή της μέσης τιμής του σήματος λήψης αναφέρεται ως διαλείψεις σκίασης (Shadow Fading). Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας χαρακτηρίζονται από μία lognormal συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας παρέχοντας έναν τρόπο εκτίμησης των απωλειών διάδοσης ως συνάρτηση του χρόνου.

2.1.2 Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας

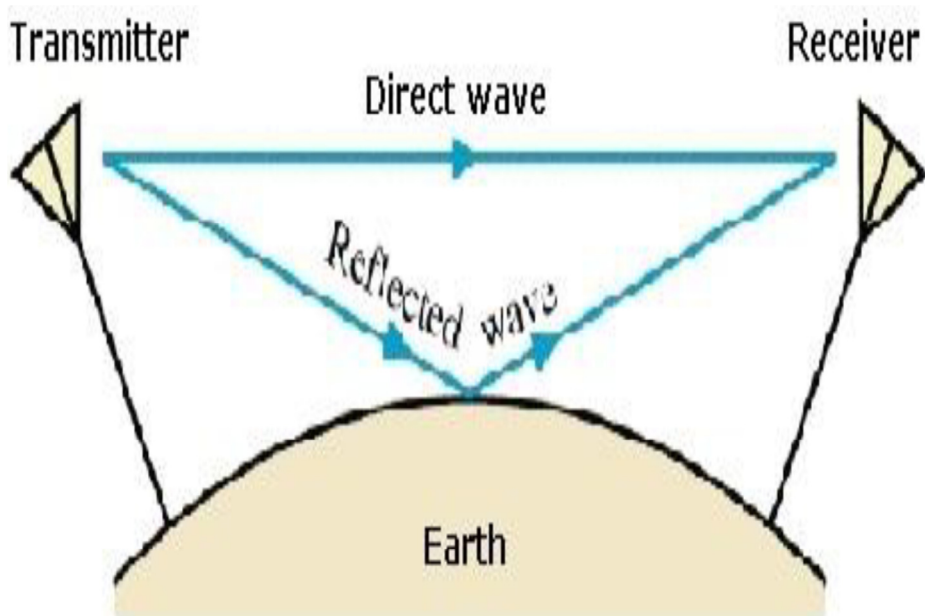
Στις διαλείψεις μικρής κλίμακας έχουμε απότομες μεταβολές του πλάτους και της φάσης του λαμβανόμενου σήματος που μπορούν να θεωρηθούν ως αποτέλεσμα μικρών αλλαγών (της τάξης του μισού μήκους κύματος) της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη ή ως αποτέλεσμα της αλλαγής θέσης, ταχύτητας ή πυκνότητας των σωμάτων που επηρεάζουν έμμεσα τις επικοινωνίες. Τέτοια σώματα είναι τα διάφορα κτίρια, οχήματα και ζωντανοί οργανισμοί που συναντιούνται στις πόλεις, καθώς επίσης και τα διάφορα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας εκδηλώνονται με δύο μηχανισμούς όσον αφορά την παραμόρφωση του λαμβανόμενου σήματος, τη χρονική διασπορά του σήματος (signal dispersion) και τη χρονική διακύμανση της συμπεριφοράς του καναλιού (variance). Η διασπορά είναι ο μηχανισμός που εκφράζεται με τον διασκορπισμό της χρονικής διάρκειας των συμβόλων πληροφορίας στη λήψη του σήματος πληροφορίας λόγω των πολλαπλών διαδρομών που μεσολαβούν. Η διακύμανση είναι ο μηχανισμός που εκφράζεται ως η διαφορετική από στιγμή σε στιγμή συμπεριφορά του καναλιού εξαιτίας της σχετικής κίνησης πομπού-δέκτη ή της κίνησης σωμάτων του περιβάλλοντα χώρου. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας καλούνται διαλείψεις Rayleigh, εάν υπάρχουν πολλές διαφορετικές διαδρομές και δεν υπάρχει ισχυρή συνιστώσα λόγω οπτικής επαφής. Στην περίπτωση που υπάρχει μία ισχυρή LOS συνιστώσα, η κατανομή των διαλείψεων μικρής κλίμακας περιγράφεται από μια Rice σ.π.π.

2.2 Ανάκλαση

Με τον όρο ανάκλαση περιγράφουμε το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει πάνω σε εμπόδιο με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με το μήκος κύματος. Παραδείγματα ανάκλασης έχουμε από την επιφάνεια του εδάφους, από την επιφάνεια της γης, από τα κτίρια, από βουνά, από τοίχους κλπ. Τα ανακλώμενα κύματα μπορούν ανάλογα με τη φάση και το μέτρο τους, να συμβάλουν είτε θετικά είτε αρνητικά στο συνολικό σήμα. Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα περάσει από ένα μέσο σε ένα άλλο με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, ένα ποσοστό του κύματος ανακλάται ενώ ένα άλλο διαδίδεται. Αν τα σώματα αυτά είναι διηλεκτρικά, μέρος της ακτινοβολίας μεταδίδεται από το

ένα στο άλλο σώμα και μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στο αρχικό σώμα, ενώ δεν υπάρχει καθόλου απώλεια ενέργειας ή απορρόφηση. Αν όμως το δεύτερο σώμα είναι τέλειος αγωγός, τότε όλη η ενέργεια ανακλάται πίσω στο πρώτο σώμα. Το ποσοστό του κύματος που ανακλάται ορίζει τον συντελεστή ανάκλασης ο οποίος ονομάζεται και συντελεστής ανάκλασης Fresnel. Ο συντελεστής ανάκλασης εξαρτάται από την πόλωση, την γωνία πρόσπτωσης και την συχνότητα του διαδιδόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Τέλος αν Γ είναι ο συντελεστής ανάκλασης και T ο συντελεστής μετάδοσης, οι δύο συντελεστές συνδέονται μεταξύ τους μέσω της παρακάτω βασικής σχέσης η οποία εξασφαλίζει ότι δεν έχουμε απώλεια ενέργειας :

$$T = 1 + \Gamma$$



Σχήμα 2.2 : Ανάκλαση

2.3 Σκέδαση

Το φαινόμενο της σκέδασης συμβαίνει όταν το μέσο στο οποίο ταξιδεύει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από μεγάλο πλήθος εμποδίων ανά μονάδα όγκου, τα οποία κατά τη συνήθη θεώρηση έχουν ίσες ή μικρότερες διαστάσεις σε σχέση με το μήκος κύματος. Αποτέλεσμα της σκέδασης είναι η μεταβολή του λαμβανόμενου σήματος στον δέκτη, η οποία δεν δικαιολογείται από τις μεθόδους

διάδοσης της ανάκλασης ή της περίθλασης. Με τη σκέδαση έχουμε επανεκπομπή της ενέργειας του πομπού προς πολλές και διαφορετικές κατευθύνσεις. Τα κύματα που οφείλονται στην σκέδαση παράγονται συνήθως από αιχμηρές επιφάνειες, μικρά αντικείμενα. Μερικά από αυτά, που επηρεάζουν τη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στους εξωτερικούς χώρους, είναι για παράδειγμα τα σήματα οδικής κυκλοφορίας, οι λαμπτήρες φωτισμού των δρόμων καθώς και το φύλλωμα των δέντρων. Η λαμβανόμενη ισχύς σε περιβάλλοντα όπου τον ρόλο του σκεδαστή παίζουν αντικείμενα μεγάλων διαστάσεων όπως κτίρια μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους, μπορεί να προβλεφθεί με το μοντέλο της ραδιοτομής (Radar Cross Section, RCS). Ο παράγοντας RCS έχει διαστάσεις επιφανείας (m^2) και ορίζεται από το λόγο της πυκνότητας ισχύος του σκεδαζόμενου σήματος κατά τη διεύθυνση του δέκτη, προς την πυκνότητα ισχύος του προσπίπτοντος ραδιοκύματος στο αντικείμενο που προκαλεί την σκέδαση. Σε αυτή την περίπτωση το σκεδαζόμενο πεδίο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την γεωμετρική θεωρία της περίθλασης ή ανάλογες θεωρίες της οπτικής.

2.4 Περίθλαση

Με τον όρο περίθλαση περιγράφουμε το φαινόμενο κατά το οποίο ένα αδιαπέραστο και συνήθως αιχμηρό σώμα, παρεμβάλλεται μεταξύ της ασύρματης ζεύξης πομπού και δέκτη. Με βάση την αρχή του Huygen, πίσω από το εμπόδιο παράγονται δευτερογενή κύματα τα οποία φτάνουν στον δέκτη, ακόμα και αν δεν υπάρχει καμία οπτική επαφή με τον πομπό. Το φαινόμενο της περίθλασης είναι το πλέον συχνό σε αστικές, πυκνοκατοικημένες περιοχές. Σε υψηλές συχνότητες το φαινόμενο της περίθλασης εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εμποδίου, όπως και από το πλάτος, την φάση και την πόλωση του προσπίπτοντος κύματος στο σημείο στο οποίο λαμβάνει χώρα η περίθλαση. Όπως φαίνεται από τον ορισμό της, η περίθλαση αφορά την εκτροπή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την ευθύγραμμη διάδοση. Θεωρητικά οι χαμηλές συχνότητες υφίστανται εντονότερη περίθλαση από τις πιο υψηλές συχνότητες με ακριβώς το αντίθετο να συμβαίνει στην διάθλαση. Το φαινόμενο της περίθλασης είναι ένας πολύ βασικός μηχανισμός διάδοσης και λόγω αυτού καθίσταται δυνατή η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών, αλλά και άλλων ειδών κυμάτων, γύρω από εμπόδια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Στον τομέα «τηλεπικοινωνίες και «δίκτυα υπολογιστών», μια μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης επιτρέπει σε πολλά τερματικά - τα οποία είναι συνδεδεμένα στο ίδιο μέσο μετάδοσης πολλαπλών σημείων, να μεταδώσουν και να μοιραστούν την χωρητικότητα του μέσου. Παραδείγματα των φυσικών μέσων είναι τα ασύρματα δίκτυα, τα δίκτυα λεωφορείων, τα αστεροειδή δίκτυα και οι half-duplex point-to-point συνδέσεις . Ένα σύστημα καναλιών πρόσβασης βασίζεται σε μια μέθοδο πολυπλεξίας, η οποία επιτρέπει σε πολλές ροές δεδομένων ή σε πολλά σήματα να μοιράζονται το ίδιο κανάλι επικοινωνίας ή το ίδιο φυσικό μέσο. Η πολυπλεξία παρέχεται από το φυσικό στρώμα (επιπέδου 1 -physical layer) και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε full-duplex point-to-point συνδέσεις μεταξύ κόμβων σε ένα δίκτυο μεταγωγής, το οποίο δεν πρέπει να θεωρείται πολλαπλής πρόσβασης. Ένα σύστημα καναλιών πρόσβασης βασίζεται επίσης σε ένα πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης και τον μηχανισμό ελέγχου, γνωστό και ως έλεγχος πρόσβασης μέσων (MAC). Το πρωτόκολλο αυτό ασχολείται με θέματα όπως η διεύθυνση, η ανάθεση πολλαπλών καναλιών σε διαφορετικούς χρήστες, και η αποφυγή συγκρούσεων. Το στρώμα MAC είναι ένα υπόστρωμα (επιπέδου 2 - data link layer) του μοντέλου OSI και ένα συστατικό του link layer του μοντέλου TCP/ IP.

3.2. Κωδικοποίηση και Πολυπλεξία

Με τις χιλιάδες τηλεφωνικές κλήσεις από κινητά τηλέφωνα που διεξάγονται ανά πάσα χρονική στιγμή μέσα στην πόλη, σίγουρα δεν θα μπορούσε να μιλάει ο καθένας σε κάποιο συγκεκριμένο κανάλι με τη μία, χωρίς προβλήματα. Ως εκ τούτου, αναπτύχθηκαν πολλές διαφορετικές τεχνικές από τους κατασκευαστές κινητών

τηλεφώνων έτσι ώστε να χωρίσουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλά κανάλια έτσι ώστε να είναι εφικτό να υποστηριχτούν όλες οι συνομιλίες ανά πάσα χρονική στιγμή. Κάπου εδώ θα αναφερθούμε και στα δύο είδη μετάδοσης του ήχου, αναλογική και ψηφιακή μετάδοση. Ουσιαστικά, οι αναλογικές μεταδόσεις ήχου είναι μια σειρά από συνεχείς αλλαγές, με τα επίπεδα τάσης να αντιπροσωπεύουν το πλάτος της φωνητικής συνομιλίας. Όταν η κλήση αποστέλλεται στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, χρησιμοποιώντας το πρότυπο διαμόρφωσης συχνότητας (δηλαδή τα επίπεδα τάσης μεταφράζονται σε μετατοπίσεις συχνότητας) σε κανάλια που χωρίζονται ανά 30 kHz, διαπιστώνουμε ότι το πλάτος μπορεί να μεταδοθεί αποτελεσματικά σε 15 kHz, λόγω των περιορισμών. Όσο αφορά τώρα τις ψηφιακές μεταδόσεις, αντί να στέλνουμε δεδομένα ως διάφορα επίπεδα τάσης, το συγκεκριμένο είδος σήματος κβαντίζει τα επίπεδα τάσης σε έναν αριθμό αποθηκών (συνήθως το 28 ή το 256 αντιπροσωπεύει μια κωδικοποίηση 8-bit). Αυτές οι αποθήκες κωδικοποιούνται σε ένα δυαδικό αριθμό και αποστέλλονται ως μια σειρά από άσσους και μηδενικά. Αυτό επιτρέπεται για την ψηφιακή συμπίεση στο στάδιο που κωδικοποιείται η φωνή έτσι ώστε να σταλεί σε 8000 bits ανά δευτερόλεπτο.

3.3. Τι είναι η Πολυπλεξία

Στις τηλεπικοινωνίες και στα δίκτυα υπολογιστών, η πολυπλεξία είναι μία μέθοδος με την οποία πολλαπλά αναλογικά σήματα μηνυμάτων ή ψηφιακές ροές δεδομένων συνδυάζονται σε ένα σήμα σε ένα κοινόχρηστο μέσο. Ο σκοπός της πολυπλεξίας είναι να μοιράζεται ένας πόρος σε πολλούς χρήστες, όπως για παράδειγμα να μπορούν πολλές τηλεφωνικές κλήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας ένα κοινό κανάλι επικοινωνίας. Σε αυτή την περίπτωση το κανάλι αποτελεί τον πόρο του συστήματος. Για να μπορούν πολλαπλοί χρήστες να μοιράζονται έναν κοινόχρηστο πόρο με κάποιον προκαθορισμένο και αποδοτικό τρόπο, τότε θα έπρεπε να υπάρχει κάποιο πρωτόκολλο το οποίο θα καθόριζε πότε και πως θα πραγματοποιείται η κοινή χρήση του πόρου, όπως επίσης και τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα αναγνωρίζει τα διαφορετικά μηνύματα του καναλιού από κάθε χρήστη. Η διαδικασία που μόλις περιγράψαμε ονομάζεται πολυπλεξία στα ενσύρματα συστήματα επικοινωνίας, ενώ στις ασύρματες επικοινωνίες ονομάζεται πολλαπλή προσπέλαση. Στις τηλεπικοινωνίες και στα δίκτυα υπολογιστών, ο όρος πολυπλεξία αναφέρεται στη μέθοδο την οποία επιτρέπει σε ψηφιακά δεδομένα ή σε

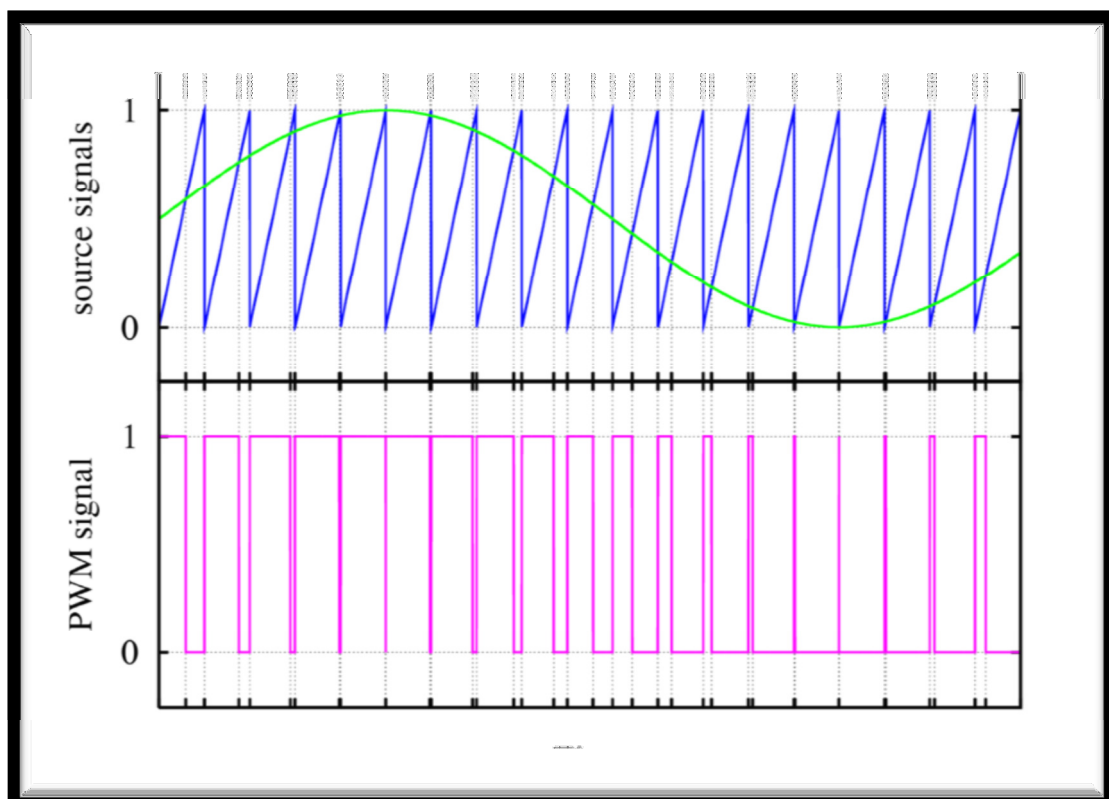
αναλογικά σήματα από διαφορετικές πηγές να διέλθουν μέσα από το ίδιο φυσικό μέσο. Πιο συγκεκριμένα, ψηφιακά δεδομένα ή αναλογικά σήματα από διαφορετικές δικτυακές συνδέσεις μπορούν να διέλθουν είτε μέσα από το ίδιο καλώδιο στην ενσύρματη επικοινωνία είτε μέσα από κοινό ελεύθερο χώρο στην ασύρματη επικοινωνία. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται συνδυασμός πολλών αναλογικών ή ψηφιακών σημάτων για το σχηματισμό ενός σήματος με μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Έτσι, όπως προαναφέραμε, έχουμε καλύτερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του κοινού μέσου, εφόσον μέσω της πολυπλεξίας το χρησιμοποιούν πολλαπλοί χρήστες ταυτόχρονα. Με αυτή λοιπόν την τεχνική, κάποιος πόρος, ο οποίος είτε είναι σπάνιος είτε είναι ακριβός, διαμοιράζεται σε πολλαπλούς χρήστες. Η πολυπλεξία διαιρεί τη χωρητικότητα του τηλεπικοινωνιακού καναλιού σε λογικά κανάλια. Κάθε λογικό κανάλι αντιστοιχεί σε ένα μεταδιδόμενο πακέτο ψηφιακών δεδομένων ή σε κάθε αναλογικό σήμα αντίστοιχα, τα οποία διέρχονται συνδυασμένα από το κανάλι. Η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται αποπολυπλεξία και εκτελείτε από τον παραλήπτη, έτσι ώστε να απομονωθεί το ζητούμενο πακέτο δεδομένων ή το αναλογικό σήμα αντίστοιχα.

3.4 Τεχνικές Πολυπλεξίας /Διαμόρφωσης

3.4.1 Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM)

Pulse Width Modulation (Διαμόρφωση Εύρους Παλμών) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί ένα ψηφιακό κύκλωμα για να δημιουργήσει ένα μεταβλητό αναλογικό σήμα. Το P.W.M. σαν έννοια είναι απλή, ανοίγει και να κλείνει ένα διακόπτη με ομοιόμορφα, επαναλαμβανόμενα χρονικά διαστήματα. Σήμερα η τεχνική P.W.M. έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως τον έλεγχο τάσης, ρεύματος, ηλεκτροκινητήρα, ισχύος, στα U.P.S, στους Inverters κ.α. Η διαμόρφωση εύρους παλμών (P.W.M) είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος παροχής ενδιάμεσων ποσών ηλεκτρικής ισχύος μεταξύ πλήρους τάσης και μηδενικής τάσης. Ένας απλός διακόπτης ισχύος με μία τυπική πηγή παρέχει πλήρη ισχύ μόνο όταν ο διακόπτης είναι κλειστός. Είναι μία σχετικά πρόσφατη τεχνική που υλοποιείται από σύγχρονους ηλεκτρονικούς διακόπτες

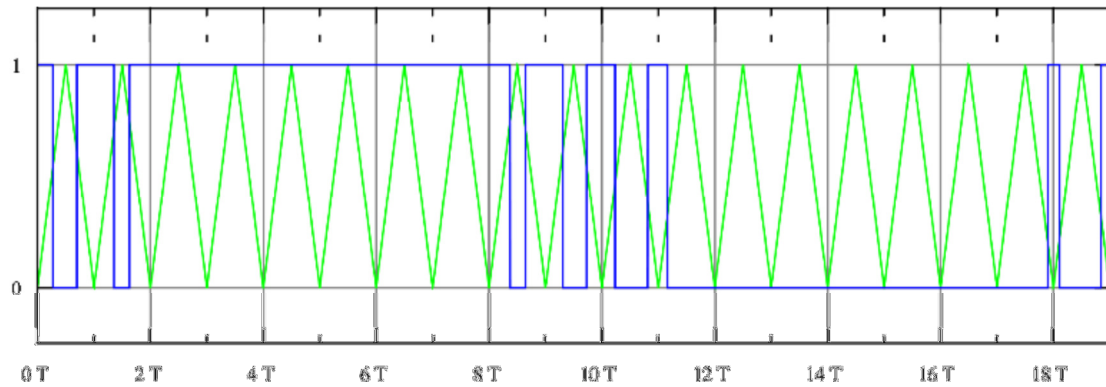
ισχύος. Παλιότερα, όταν χρειαζόταν μερική ισχύς (για παράδειγμα στις ραπτικές μηχανές), ένας ροοστάτης (ο οποίος υπήρχε στη ραπτική μηχανή ως πετάλι στο πόδι) συνδεδεμένος σε σειρά με τον κινητήρα, ρύθμιζε το μέγεθος της έντασης του ρεύματος που θα περνούσε από τον κινητήρα, έχανε όμως, με τη μορφή θερμότητας, ισχύ στο στοιχείο αντίστασης. Ωστόσο, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για την εφαρμογή μερικής ισχύος σε άλλες συσκευές, όπως ηλεκτρικές θερμάστρες, ροοστάτες φωτός και ρομποτικούς σερβοκινητήρες. Βασικά, ένα μεταβλητό P.W.M σύστημα ισχύος διακόπτει την ισχύ γρήγορα μεταξύ πλήρως on και πλήρως off, για παράδειγμα, αρκετές φορές το λεπτό, σε έναν ηλεκτρικό φούρνο 120 Hz, σε ένα ροοστάτη λαμπτήρα καθώς και σε δεκάδες ή εκατοντάδες kHz σε ένα τροφοδοτικό υπολογιστή (το οποίο έχει ρυθμιστή εξόδου). Εν πάσει περιπτώσει, το ποσοστό εναλλαγών είναι πολύ πιο μεγάλο σε σχέση με το ποσοστό που θα μπορούσε να επηρεάσει το φορτίο, δηλαδή τη συσκευή που καταναλώνει την ισχύ. Στην πράξη, εφαρμόζοντας πλήρως την ισχύ, αυτό δεν θα προκαλέσει κανένα πρόβλημα για ένα μέρος χρόνου. Γενικώς, P.W.M είναι πολύ πρακτική.



Σχήμα 3.1 : Σήμα PWM

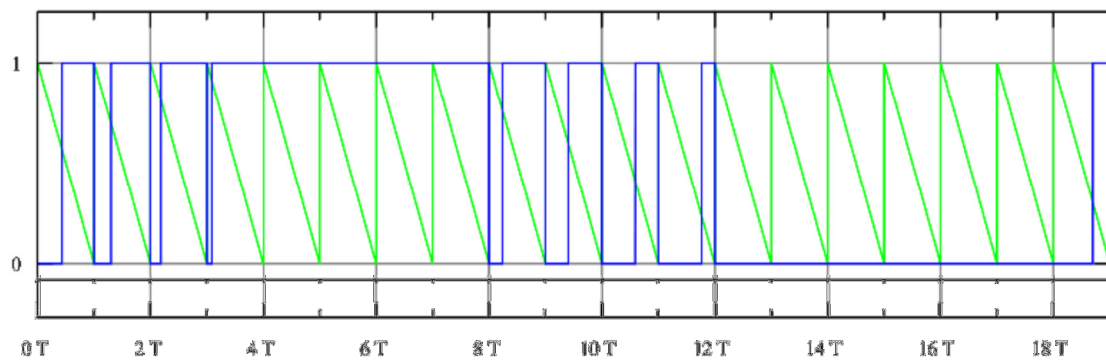
Τα είδη των P.W.M σημάτων είναι τέσσερα.

1. Το κέντρο του παλμού που ρυθμίζεται να είναι στο κέντρο του διαστήματος του χρόνου και τα δύο άκρα του παλμού να μετακινούνται ώστε να συρρικνώνεται ή να αυξάνεται το πλάτος του παλμού.



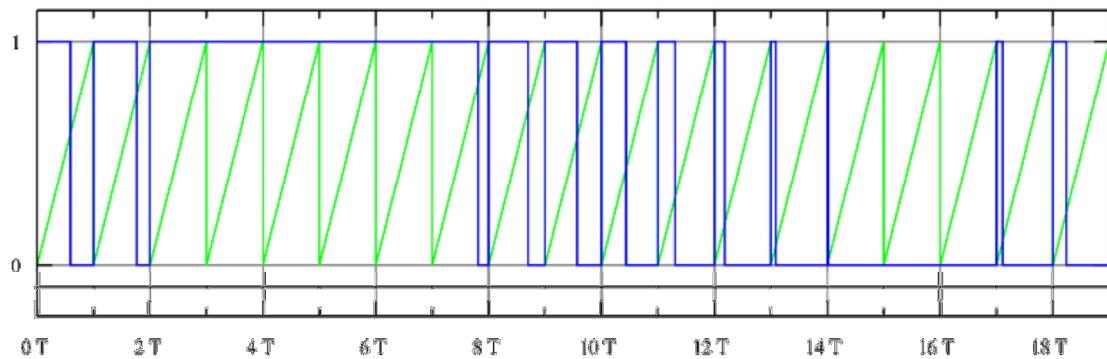
Σχήμα 3.2 : 1^ο είδος σήματος PWM

2. Η οδηγούμενη ακμή (άκρο) μπορεί να διατηρηθεί στο οδηγούμενο άκρο του διαστήματος και στο διαμορφωμένο άκρο της ουράς.



Σχήμα 3.3 : 2^ο είδος σήματος PWM

3. Το άκρο της ουράς μπορεί να διατηρηθεί και να διαμορφώνει το οδηγούμενο άκρο.



Σχήμα 3.4 : 3^ο είδος σήματος PWM

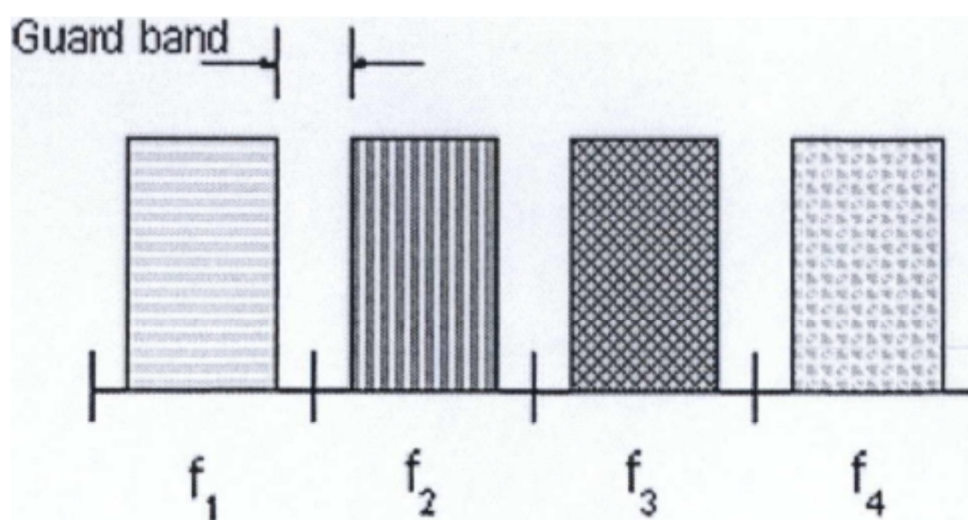
4. Η συχνότητα επανάληψης των παλμών μπορεί να ποικίλει ανάλογα με το σήμα και τα πλάτη των παλμών να είναι σταθερά. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος έχει ένα πιο περιορισμένο φάσμα μέσης στάθμης εξόδου από ότι οι άλλες τρεις.

Πολλά ψηφιακά κυκλώματα μπορούν να παράγουν P.W.M σήματα (π.χ. πολλοί μικροελεγκτές έχουν P.W.M εξόδους). Συνήθως χρησιμοποιούν μετρητές οι οποίοι αυξάνουν περιοδικά τα σήματα (είναι συνδεδεμένα άμεσα ή έμμεσα με το ρολόι του συστήματος), τα οποία επανατίθενται στο τέλος κάθε περιόδου της P.W.M . Όταν η τιμή του μετρητή είναι πάνω από την τιμή αναφοράς, η έξοδος P.W.M αλλάζει κατάσταση από υψηλή σε χαμηλή (ή το αντίστροφο). Η αύξηση και η περιοδική επανατοποθέτηση του μετρητή είναι η διακριτή εκδοχή του πριονωτού σήματος. Ο αναλογικός συγκριτής υλοποιείται με έναν απλό συγκριτή ακέραιων τιμών ανάμεσα στην τιμή του υπάρχοντος μετρητή και την ψηφιακή τιμή αναφοράς. Ο κύκλος λειτουργίας μπορεί να κυμαίνεται μόνο σε διακριτές τιμές ως αποτέλεσμα της διακριτικότητας του μετρητή. Όμως, ένας μετρητής πολύ υψηλής διακριτικότητας μπορεί να παρέχει αρκετά ικανοποιητική απόδοση. Οι μέθοδοι έχουν ως στόχο την αύξηση του πλάτους της βασικής αρμονικής της πολικής τάσης και παράλληλα τη μείωση του πλάτους των ανώτερων αρμονικών. Συνήθως το μόνο που αλλάζει, σε σχέση πάντα με την κλασική μέθοδο, είναι η κυματομορφή αναφοράς, ενώ η υπόλοιπη λογική παραμένει ίδια. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν τεχνικές με ημίτονα αναφοράς εμπλουτισμένα σε ανώτερες αρμονικές 3^ν-τάξης, με τις οποίες είναι δυνατή η δημιουργία τάσεων εξόδου ενεργού τιμής όσο και της τάσης εισόδου. Αξίζει εδώ να αναφέρουμε ότι οι σκόπιμα δημιουργημένες αρμονικές της τάξης 3^ν

στη έξοδο αλληλοαναιρούνται και δεν επηρεάζουν καθόλου τη λειτουργία των αντιστροφών ούτε και το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος.

3.4.2 FDMA

Το FDMA(Frequency Division Multiple Access) είναι μια μέθοδος πρόσβασης καναλιών που διαιρεί τη συνολική συχνότητα σε ένα αριθμό διαύλων, όπου κάθε διάυλος-κανάλι μπορεί να ανατεθεί σε διαφορετικό χρήστη. Συγκεκριμένα, το FDMA δίνει στους χρήστες μια ατομική κατανομή ενός ή περισσοτέρων ζωνών συχνοτήτων ή καναλιών, συντονίζοντας έτσι την πρόσβαση μεταξύ πολλών χρηστών. Κάθε χρήστης μεταφέρει δεδομένα χωρίς περιορισμούς στο χρόνο αλλά χρησιμοποιώντας μόνο ένα τμήμα του διαθέσιμου συνόλου εύρους ζώνης συχνοτήτων. Επιπλέον, οι διαφορετικοί χρήστες διαχωρίζονται στο πεδίο συχνοτήτων.



Σχήμα 3.5 : Η αρχή του FDMA

Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στο σύστημα πολυπλεξίας διαίρεσης της συχνότητας (FDM), το οποίο παρέχει διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων σε διαφορετικές ροές δεδομένων. Στην περίπτωση του FDMA συστήματος, οι ροές δεδομένων κατανέμονται σε διαφορετικούς κόμβους ή συσκευές. Ένα αντιπροσωπευτικό

παράδειγμα του συγκεκριμένου συστήματος είναι τα συστήματα κινητών τηλεφώνων της πρώτης γενιάς (1G), όπου για κάθε τηλεφώνημα γινόταν ανάθεση σε ένα συγκεκριμένο κανάλι συχνότητας άνω ζεύξης (uplink) και σε ένα άλλο κανάλι συχνότητα κατερχόμενης ζεύξης (downlink). Ακόμη, το FDMA, εκτός από την σταθερή ανάθεση υποστηρίζει και ανάθεση με βάση τη ζήτηση. Πιο αναλυτικά, η ανάθεση της ζήτησης επιτρέπει φαινομενικά σε όλους τους χρήστες συνεχή πρόσβαση του ραδιοφάσματος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ανάθεσης των συχνοτήτων μεταφορέα σε προσωρινή βάση, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία στατιστικής ανάθεσης.

Το FDMA χρησιμοποιείται συνήθως στην αναλογική κινητή τηλεφωνία, συμπεριλαμβανομένων των αναλογικών κυψελοειδών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας, όπως είναι το AMPS, NMT και των TAC. Επιπλέον, κάθε τηλεφώνημα διαμορφώνεται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα φορέα και μεταξύ των διαφορετικών καναλιών συχνότητας που χρησιμοποιούνται υπάρχει και ένα μικρό ποσό του εύρους ζώνης που δεν χρησιμοποιείται. Ο χώρος αυτός ονομάζεται ζώνη προστασίας (guard band) και είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη για την αστάθεια του αποστολέα, τις μετατοπίσεις συχνότητας λόγω της κίνησης (το φαινόμενο Doppler) και το μη ιδανικό φιλτράρισμα.

Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου FDMA είναι :

- Όλοι οι χρήστες μοιράζονται το δορυφορικό αναμεταδότη ή το κανάλι συχνότητας ταυτόχρονα, αλλά κάθε χρήστης μεταδίδει σε μόνο μία συχνότητα.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο με αναλογικό όσο και με ψηφιακό σήμα.
- Κάθε χρήστης εκπέμπει και λαμβάνει σε διαφορετικές συχνότητες, εφόσον κάθε χρήστης παίρνει μία μοναδική σχισμή συχνότητας.

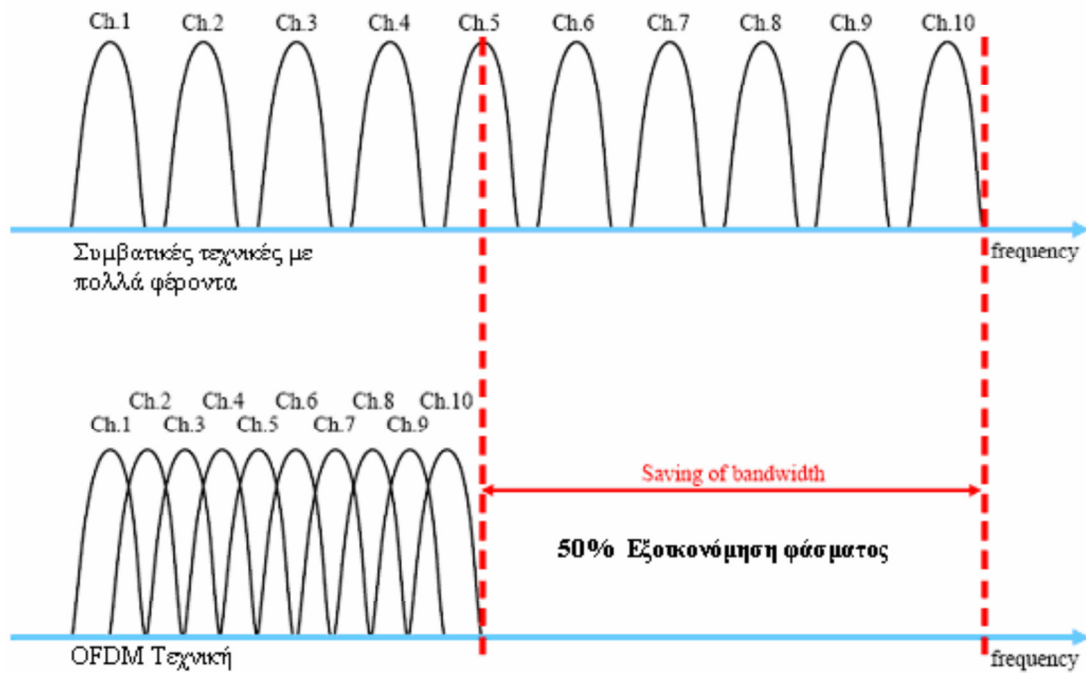
3.4.2.1 Χαρακτηριστικά του FDMA

- Διαμοιρασμός καναλιού: Όλοι οι χρήστες μοιράζονται τον δορυφορικό αναμεταδότη ή το κανάλι συχνότητας ταυτόχρονα, αλλά κάθε χρήστης μεταδίδει μόνο σε μία μοναδική συχνότητα.
- Σήμα: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο με αναλογικό όσο και με ψηφιακό σήμα.
- Πρόβλημα Χρονισμού: Δεν είναι ευάλωτο στα προβλήματα χρονισμού. Δεδομένου ότι μια προκαθορισμένη ζώνη συχνοτήτων είναι διαθέσιμη για ολόκληρη την περίοδο της επικοινωνίας, η ροή των δεδομένων (μια συνεχής ροή των δεδομένων που δεν μπορεί να μπει σε πακέτα) μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί με FDMA.
- Πρόβλημα Near-Far: Λόγω της συχνότητας φιλτραρίσματος, FDMA δεν είναι ευαίσθητο στο πρόβλημα "near- far"
- Συχνότητες: Κάθε χρήστης εκπέμπει και λαμβάνει σε διαφορετικές συχνότητες, εφόσον κάθε χρήστης παίρνει μία μοναδική σχισμή συχνότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (OFDM)

Η πολυπλεξία ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας (OFDM) είναι μία μέθοδος μετάδοσης όπου χρησιμοποιούνται πολλά φέροντα για τη μετάδοση πληροφορίας. Στην παραπάνω τεχνική διαιρείται το διαθέσιμο φάσμα σε πολλά κανάλια, κάθε ένα από τα οποία διαμορφώνεται από ένα χαμηλό ρυθμό δεδομένων. Η OFDM μέθοδος δεν είναι πολλαπλής προσπέλασης σε αντίθεση με την OFDMA, όπου μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα πολλοί χρήστες. Εδώ το συνολικό εύρος ζώνης καλύπτεται από δεδομένα που προέρχονται από μία μοναδική πηγή και διαμορφώνονται με παράλληλο τρόπο όπως θα φανεί αναλυτικότερα στη συνέχεια. Η ομοιότητα του OFDM με την πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης συχνότητας είναι ότι η πολλαπλή πρόσβαση χρηστών επιτυγχάνεται διαιρώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλά κανάλια, τα οποία έπειτα κατανέμονται στους χρήστες. Ωστόσο, η μέθοδος OFDM χρησιμοποιεί το φάσμα πιο αποτελεσματικά καθώς μειώνει την απόσταση μεταξύ των καναλιών και ταυτόχρονα, με τη βοήθεια της ορθογωνιότητας, παρεμποδίζει παρεμβολές μεταξύ γειτονικών φερόντων. Τα μεταδιδόμενα σύμβολα μορφοποιούνται από ένα φίλτρο που χρησιμοποιείται στην έξοδο του αποστολέα. Μετά από τη διέλευση από το κανάλι, όπου και υφίσταται διαλείψεις λόγω πολλαπλών διόδευσεων, το σήμα εισέρχεται στο λήπτη, στην είσοδο του οποίου υπάρχει προσαρμοσμένο φίλτρο για τη βελτιστοποίηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) αλλά και για την απόσπαση της πληροφορίας. Η τεχνική OFDM ξεπερνά τα περισσότερα προβλήματα προηγούμενων μεθόδων πολλαπλής προσπέλασης (FDMA, TDMA). Με την OFDM χωρίζουμε το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλά κανάλια στενής ζώνης (συνήθως 100-8000). Τα φέροντα για κάθε κανάλι διατηρούνται ορθογώνια και αυτό τους επιτρέπει να βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Σε αντίθεση με την παραπάνω αποτελεσματική χρησιμοποίηση εύρους ζώνης, προηγούμενες τεχνικές (FDM) το κατασπαταλούσαν. Σε αυτές το κατανεμημένο εύρος ζώνης ήταν πολύ μεγαλύτερο από το ελάχιστο απαιτούμενο (που σε υπηρεσίες φωνής είναι μόνο 3kHz), ώστε να αποφευχθούν παρεμβολές μεταξύ των γειτονικών καναλιών. Το πρόβλημα αυτό και το πλεονέκτημα που προσφέρει η OFDM εικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα, όπου παρατηρούμε ότι έχουμε εξοικονόμηση φάσματος γύρω στο 50%. Επιπλέον στο παρακάτω σχήμα είναι φανερό και η

κατασπατάληση του εύρους ζώνης με την τεχνική FDM, καθώς είναι απαραίτητη η χρήση απόστασης ασφαλείας μεταξύ γειτονικών φερόντων.



Σχήμα 4.1 : Σύγκριση τεχνικών OFDM με FDM πάνω στη χρησιμοποίηση εύρους ζώνης.

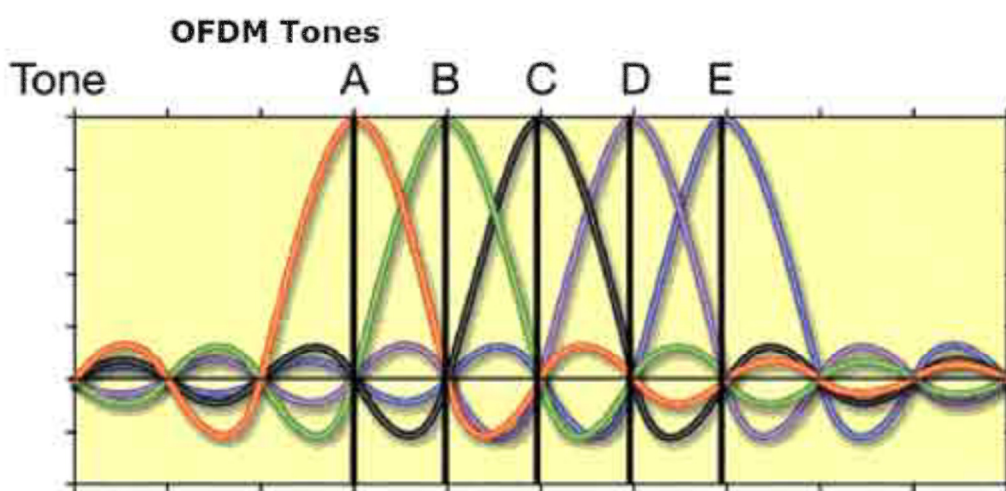
4.1 Περιγραφή της τεχνικής OFDM

Τα κύρια ζητήματα που θα μας απασχολήσουν σε αυτή την παράγραφο είναι:

- Ανάλυση της ορθογωνιότητας.
- Συνθήκες διατήρησής της.
- Διάστημα-φρουρός (Guard interval).
- Εκπαραθύρωση (windowing).

4.1.1 Ανάλυση ορθογωνιότητας

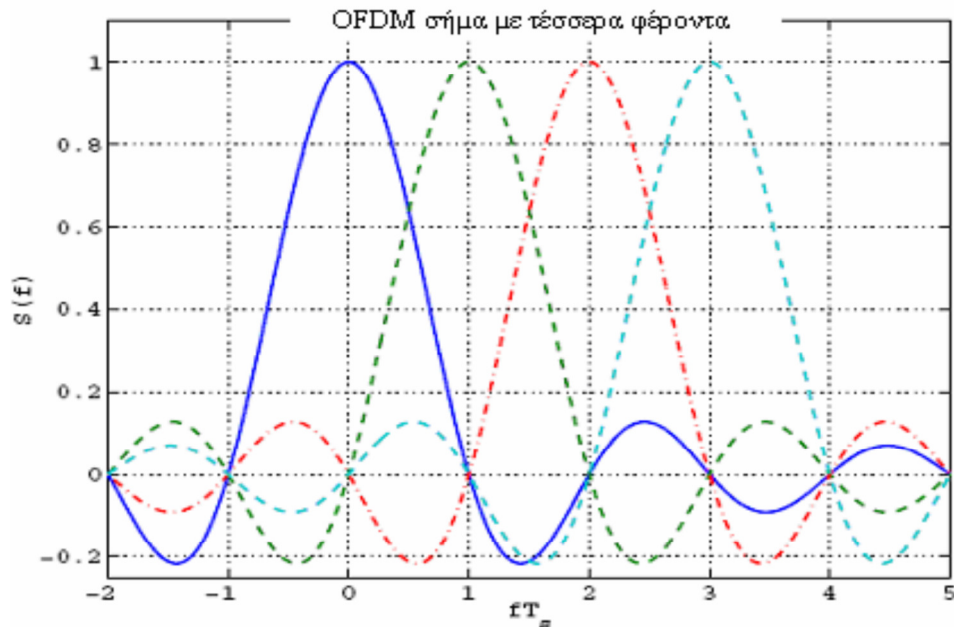
Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως η τεχνική OFDM διαιρεί το φάσμα σε έναν αριθμό τόνων, ίσης διάρκειας, και τοποθετεί ένα μέρος της πληροφορίας χρήστη σε κάθε έναν. Κάθε τόνος μπορεί να αναπαρασταθεί με μια συχνότητα, ενώ σημαντικό στοιχείο είναι η ύπαρξη ορθογωνιότητας μεταξύ τους, που επιτρέπει στα φάσματα των διαφορετικών φερόντων να συμπίπτουν εξοικονομώντας πολύτιμο εύρος ζώνης. Στο σχήμα που ακολουθεί έχουμε την απεικόνιση πέντε διαφορετικών φερόντων στο πεδίο της συχνότητας, όπου διακρίνεται καθαρά η ορθογωνιότητα που έχουν μεταξύ τους.



Σχήμα 4.2 : Απεικόνιση πέντε φερόντων στο πεδίο της συχνότητας πολυπλεγμένων με την τεχνική OFDM.

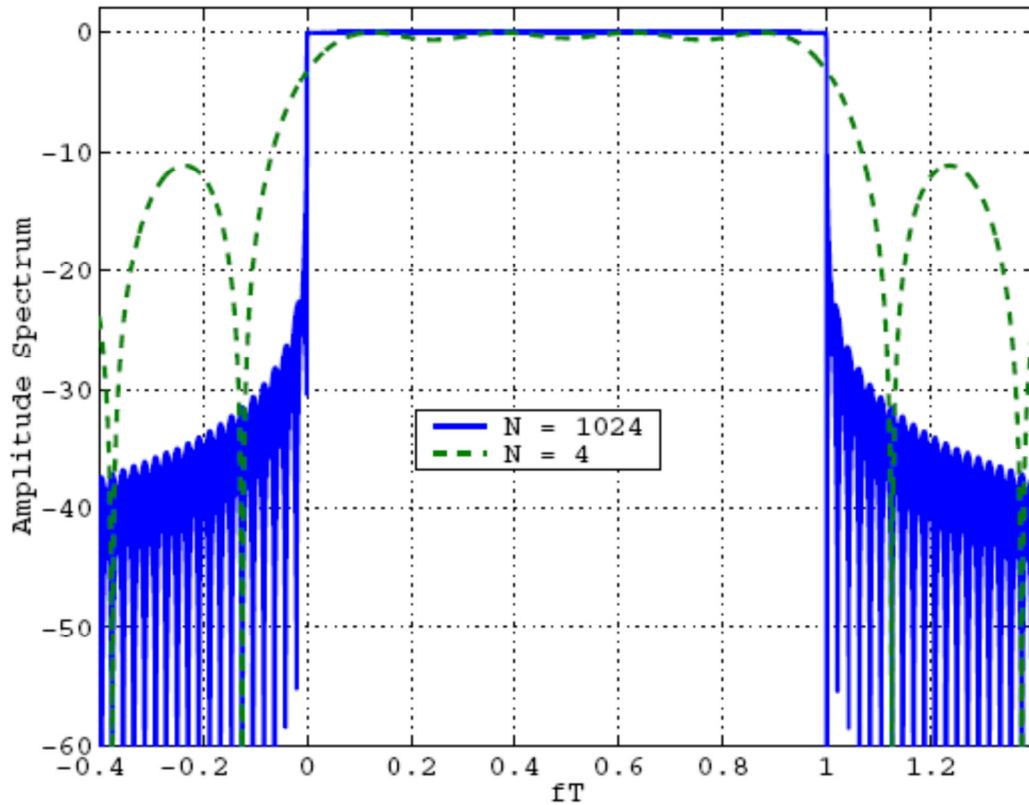
Αρχικά αυτό που παρατηρούμε με μεγάλη ευκολία και ουσιαστικά είναι το κύριο χαρακτηριστικό της ορθογωνιότητας είναι πως όταν ένα φέρον για μια συγκεκριμένη συχνότητα παίρνει τη μέγιστη τιμή του, τα υπόλοιπα βρίσκονται στο μηδέν. Αυτό έχει σαν επακόλουθο να μη δημιουργούνται παρεμβολές μεταξύ των φερόντων. Έτσι όταν ο αποδέκτης προσπαθεί να διαχωρίσει τα μεταδιδόμενα σήματα και απομονώσει με τα απαραίτητα φίλτρα την κεντρική συχνότητα κάθε ενός φερόντος η μόνη ενέργεια που θα λάβει θα είναι από το επιθυμητό σήμα μαζί με κάποιο θόρυβο που προστίθεται στο κανάλι. Όπως είναι γνωστό, η ορθογωνιότητα μας δίνει τη δυνατότητα να στείλουμε δύο σήματα την ίδια χρονική στιγμή που απέχουν ελάχιστα μεταξύ τους στον άξονα της συχνότητας με μηδενικές παρεμβολές εξοικονομώντας έτσι πολύτιμο φάσμα. Συγκεκριμένα, για να διατηρηθεί η ορθογωνιότητα των φερόντων πρέπει η διαφορά συχνότητας δύο διαδοχικών κορυφών των κυματομορφών των υποφερόντων να είναι ίση με το αντίστροφο της διάρκειας ενός

OFDM συμβόλου. Η περίπτωση αυτή εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου παρατηρούμε ότι στη συχνότητα που μεγιστοποιείται ένα υποφέρον τα υπόλοιπα μηδενίζονται, ενώ το διαδοχικό του μεγιστοποιείται μετά από $\Delta f=1/T_s$.



Σχήμα 4.3 : OFDM σήμα με τέσσερα διαφορετικά φέροντα όπου διακρίνεται η ορθογωνιότητα

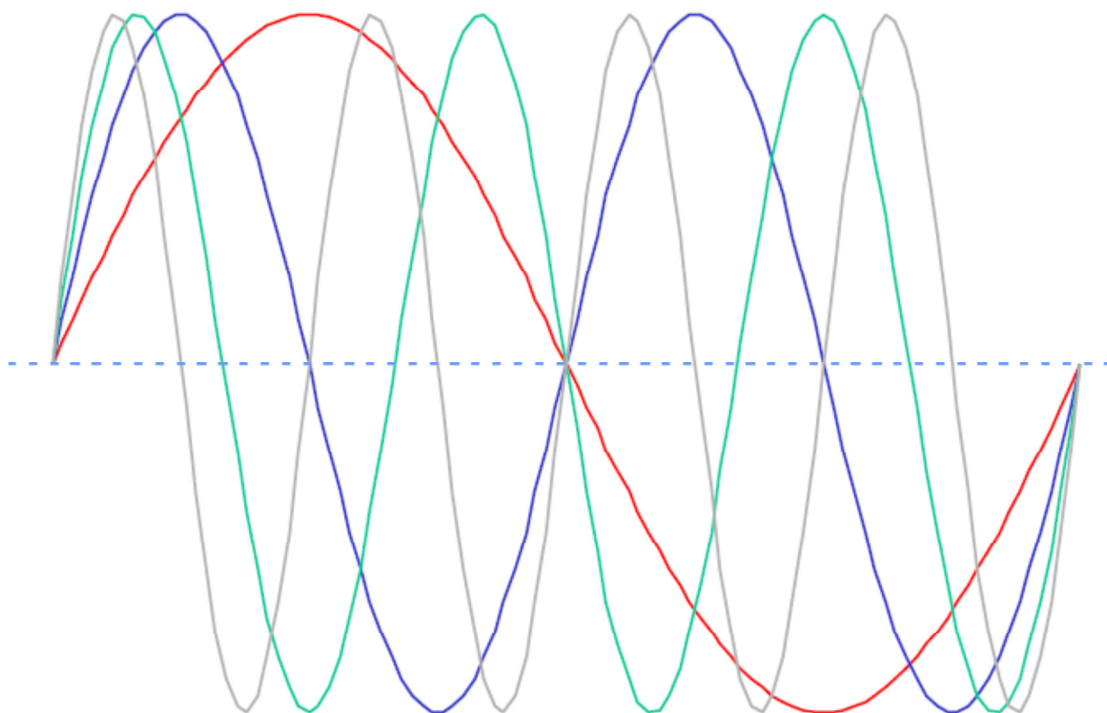
Στο επόμενο σχήμα εικονίζονται προς σύγκριση τα φάσματα δύο OFDM σημάτων, ένα με 4 και ένα με 1024 υποφέροντα με κανονικοποιημένη συχνότητα. Παρατηρούμε ότι όσο περισσότερα φέροντα έχουμε τόσο πιο απότομη είναι η αύξηση της εξασθένησης του φάσματος έξω από την επιλεγμένη περιοχή. Επίσης παρατηρούμε ότι όταν έχουμε λίγα φέροντα το φάσμα δεν είναι επίπεδο, στην περιοχή που μας ενδιαφέρει, που σημαίνει ότι έχουμε παρεμβολή σημάτων σε γειτονικές συχνότητες.



Σχήμα 4.4 : Σύγκριση φασμάτων δύο OFDM σημάτων με διαφορετικό αριθμό φερόντων.

4.1.2 Συνθήκες διατήρησης ορθογωνιότητας

Για να διατηρηθεί η ορθογωνιότητα μεταξύ των φερόντων, είναι απαραίτητο αρχικά να εξασφαλιστεί ότι το κάθε φέρον έχει έναν ακέραιο αριθμό κύκλων μιας ημιτονοειδούς κυματομορφής περιόδου ενός συμβόλου. Στο παρακάτω σχήμα δείχνονται τρεις κυματομορφές που αποτελούνται από ακέραιο αριθμό ημιτονοειδών περιόδων:



Σχήμα 4.5 : Τρεις κυματομορφές που αποτελούνται από ακέραιο αριθμό ημιτονοειδών περιόδων.

Μία ακόμα πολύ σημαντική συνθήκη για τη διατήρηση της ορθογωνιότητας είναι ο απόλυτος συγχρονισμός μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη. Ο συγχρονισμός αυτός περιλαμβάνει τέσσερα διαφορετικά θέματα:

1. Συγχρονισμός στο χρόνο. Από τη στιγμή που είναι άγνωστο στον παραλήπτη η ακριβής χρονική στιγμή που μεταδόθηκε το σήμα και πόση είναι η διασκόρπιση του καναλιού, ένα σημαντικό ζήτημα είναι να προσδιοριστεί η αρχή του λαμβανόμενου OFDM συμβόλου.
2. Συγχρονισμός στη συχνότητα. Το σήμα δε μεταδίδεται σε μια περιοχή συχνοτήτων αλλά διαμορφώνεται από ένα φέρον σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Αν και αυτή η συχνότητα είναι γνωστή στον αποδέκτη λόγω της περιορισμένης ανοχής των RF συστατικών του καναλιού θα προκύψει μια απόκλιση της συχνότητας από την αρχική της τιμή. Σε πολλές περιπτώσεις αυτή η απόκλιση είναι αρκετά μεγάλη και έτσι δεν έχουμε αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να εκτιμηθεί και να συνυπολογιστεί στον αποδέκτη.

3. Συγχρονισμός του ρολογιού. Το σήμα που παράγεται από τον γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT, που θα μελετηθεί στη συνέχεια) μετατρέπεται σε ένα αναλογικό σήμα έχοντας ένα σταθερό χρονικό διάστημα μεταξύ δύο τιμών. Στον αποδέκτη το RF σήμα που προκύπτει από την κάτω μετατροπή συχνότητας δειγματοληπτείται με στόχο να παράγει ένα σήμα διακριτό στο χρόνο για περαιτέρω ψηφιακή επεξεργασία. Οι στιγμές που γίνεται η δειγματοληψία στον αποδέκτη πρέπει να ταιριάζουν απόλυτα ώστε να μην προκύψει υποβιβασμός της απόδοσης. Τυχόν απόκλιση των παραπάνω στιγμών μεταξύ πομπού και αποδέκτη πρέπει να εκτιμηθεί και να συνυπολογιστεί.
4. Εκτίμηση καναλιού (Channel estimation). Στα επικοινωνιακά συστήματα με εκρηκτική ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων χρησιμοποιούνται στην αρχή κάθε μετάδοσης κάποια επιπλέον σύμβολα. Στην περίπτωση που η ζεύξη είναι σύντομη, το κανάλι θεωρείται στατικό σε όλη τη διάρκεια μετάδοσης. Συνεπώς από τη στιγμή που υπολογιστεί το κανάλι θα χρησιμοποιηθεί η αντιστροφή του για την αντιστάθμιση του σήματος σε όλη τη διάρκεια της μετάδοσης.

Για τη διατήρηση της ορθογωνιότητας πρέπει να συντρέχουν και δυο ακόμα προϋποθέσεις, αφ' ενός τα αναλογικά μέρη τόσο στο πομπό όσο και στον αποδέκτη να είναι πολύ καλής ποιότητας ώστε να μην παραμορφώνουν το σήμα αλλά και να μην αυξάνουν κατά πολύ το σηματοθορυβικό λόγο, και αφ' ετέρου να μην υπάρχει κανάλι πολλαπλών διαδεδύσεων. Αντιλαμβανόμαστε όμως ότι η δεύτερη προϋπόθεση από τις παραπάνω είναι αδύνατο να αποφευχθεί καθώς είναι από τους βασικούς λόγους που επινοήσαμε τη διαμόρφωση OFDM. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε άλλες τεχνικές που επιτρέπουν στο μεταδιδόμενο σήμα να μην επηρεάζεται από το φαινόμενο των πολλαπλών διαδεδύσεων και χάνει την ορθογωνιότητά του, ή απλώς να αλλοιώνεται μέσα σε ανεκτά όρια. Παρακάτω εξετάζουμε την εισαγωγή του διαστήματος-φρουρού που εξαλείφει το ISI και περιορίζει αισθητά το ICI, καθώς και την τεχνική της εκπαραθύρωσης (windowing) που μειώνει την εκπεμπόμενη έξω από την επιθυμητή μπάνα ενέργεια του σήματος.

4.1.3 Διάστημα-φρουρός (Guard Interval)

Αν θέλουμε να παράγουμε έναν ακριβή ημιτονοειδή τόνο πρέπει το σήμα να καταλήγει στο άπειρο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί οι τόνοι είναι η μόνη κυματομορφή που μπορεί να εξασφαλίσει την ορθογωνιότητα. Ευτυχώς όμως, η απόκριση του καναλιού μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν εκτείνεται στο άπειρο, καθώς με το πέρας του χρόνου έχουμε φθορά των συστατικών λόγω των πολλαπλών διοδεύσεων και έτσι το κανάλι θεωρείται τελικά περιορισμένο. Αν η ορθογωνιότητα μπορούσε να διατηρηθεί, τα υποκανάλια θα μπορούσαν να απομονωθούν πλήρως με τη χρήση ενός κυκλώματος ορθού Fourier στον δέκτη. Όμως στην πράξη λόγω διασυμβολικής και διακαναλικής παρεμβολής το παραπάνω δεν είναι πάντα εφικτό, διότι το σήμα OFDM δεν είναι αυστηρά ζωνοπεριορισμένο. Η παραμόρφωση, λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης, προκαλεί σε κάθε κανάλι εξάπλωση της ισχύος και στο γειτονικό του. Επιπλέον ένα καθυστερημένο σήμα με χρόνο καθυστέρησης μεγαλύτερο του χρόνου ενός συμβόλου επηρεάζει το επόμενο σύμβολο. Για την μείωση της παραμόρφωσης, μία απλή λύση θα ήταν η αύξηση της διάρκειας συμβόλου ή του αριθμού των φερόντων. Αυτό όμως είναι δύσκολο να υλοποιηθεί λόγω φαινομένου Doppler αλλά και λόγω της απότομης αύξησης της πολυπλοκότητας των αποδιαμορφωτών. Προσθέτοντας ένα επιπλέον χρονικό διάστημα στο μεταδιδόμενο σύμβολο, που ονομάζεται διάστημα-φρουρός (Guard Interval), το κανάλι μπορεί να συμπεριφερθεί σαν οι μεταδιδόμενες κυματομορφές να είναι απεριόριστες. Έτσι εξασφαλίζεται η ορθογωνιότητα και τελικά παρεμποδίζεται η παρεμβολή μεταξύ γειτονικών φερόντων. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix) για δύο λόγους:

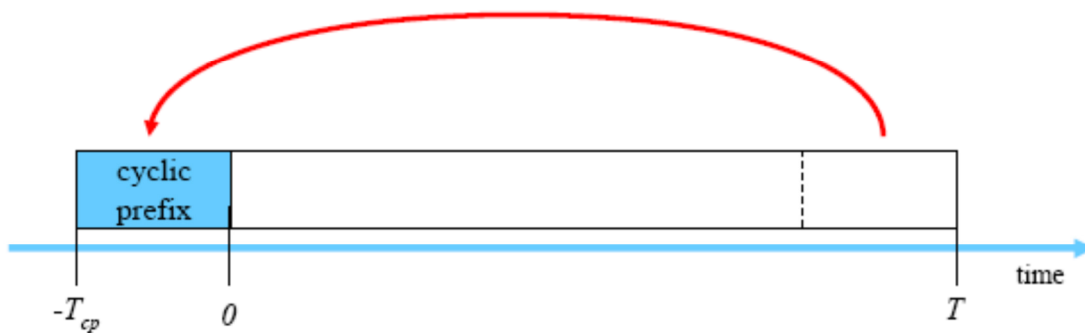
1. Για τη διατήρηση συγχρονισμού του φέροντος στον αποδέκτη.

Ορισμένα σήματα πρέπει να μεταδίδονται συνεχώς.

2. Το κυκλικό πρόθεμα μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί μεταξύ του σήματος OFDM και της απόκρισης καναλιού για τη μοντελοποίηση του συστήματος μετάδοσης.

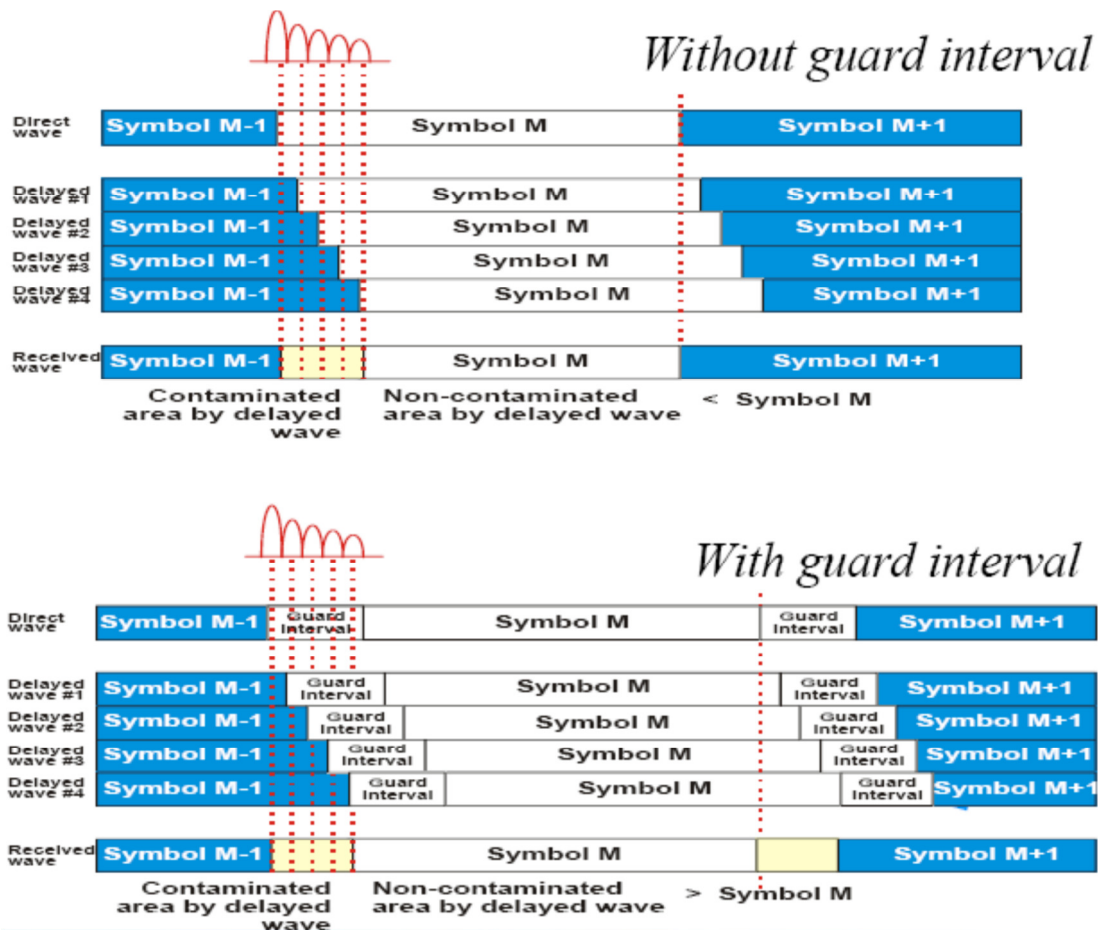
Η διαφορά ανάμεσα σε ένα απλό κενό διάστημα στην αρχή του συμβόλου και σε ένα κυκλικό πρόθεμα εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου θεωρούμε κανάλι δύο

μονοπατιών. Σε αυτή την περίπτωση το λαμβανόμενο OFDM σήμα αποτελείται από δύο αντίγραφα του αρχικά μεταδιδόμενου σήματος, όπου πιθανώς το ένα είναι εξασθενημένο και καθυστερημένο σε σχέση με το άλλο. Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα το κυκλικό πρόθεμα ουσιαστικά είναι ένα αντίγραφο του τελευταίου μέρους του μεταδιδόμενου συμβόλου, που περιέχει και την επιθυμητή πληροφορία, και το οποίο τοποθετείται στην αρχή του συμβόλου.



Σχήμα 4.6 : Το κυκλικό πρόθεμα αποτελεί ουσιαστικά αντίγραφο του τελευταίου μέρους του μεταδιδόμενου συμβόλου.

Η χρονική διάρκεια του κυκλικού προθέματος πρέπει να υπερβαίνει τη μέγιστη καθυστέρηση που εισάγει το κανάλι σε κάποιο μεταδιδόμενο σύμβολο, δηλαδή πρέπει να ισχύει: $t_{max} < T_x < T_g$. Ένας βασικός περιορισμός είναι ότι το κυκλικό πρόθεμα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο για να προστατέψει το σύστημα από την προβλεπόμενη καθυστέρηση λόγω καναλιού. Καθώς μεγαλώνουμε όμως το κυκλικό πρόθεμα αυξάνεται και ο βαθμός που αυτό υπερβαίνει το αρχικό σήμα πληροφορίας. Τελικά η χρονική διάρκεια του κυκλικού προθέματος περιορίζεται από την καθυστέρηση μετάδοσης που είναι αποδεκτή για το σύστημα και από φαινόμενο ολίσθησης συχνότητας κατά Doppler που επίσης κινείται σε αποδεκτά όρια (Συνήθως έχουμε χρονική διάρκεια του διαστήματος-φρουρού μικρότερη από $T/4$). Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, όταν ισχύει $t_{max} < T_x < T_g$, δεν έχουμε διασυμβολική παρεμβολή καθώς το προηγούμενο μεταδιδόμενο σύμβολο θα επιδράσει σε δείγματα μέσα στο διάστημα $[0, t_{max}]$, όπου δεν υπάρχει σημαντική πληροφορία και έτσι δεν επηρεάζει την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών.

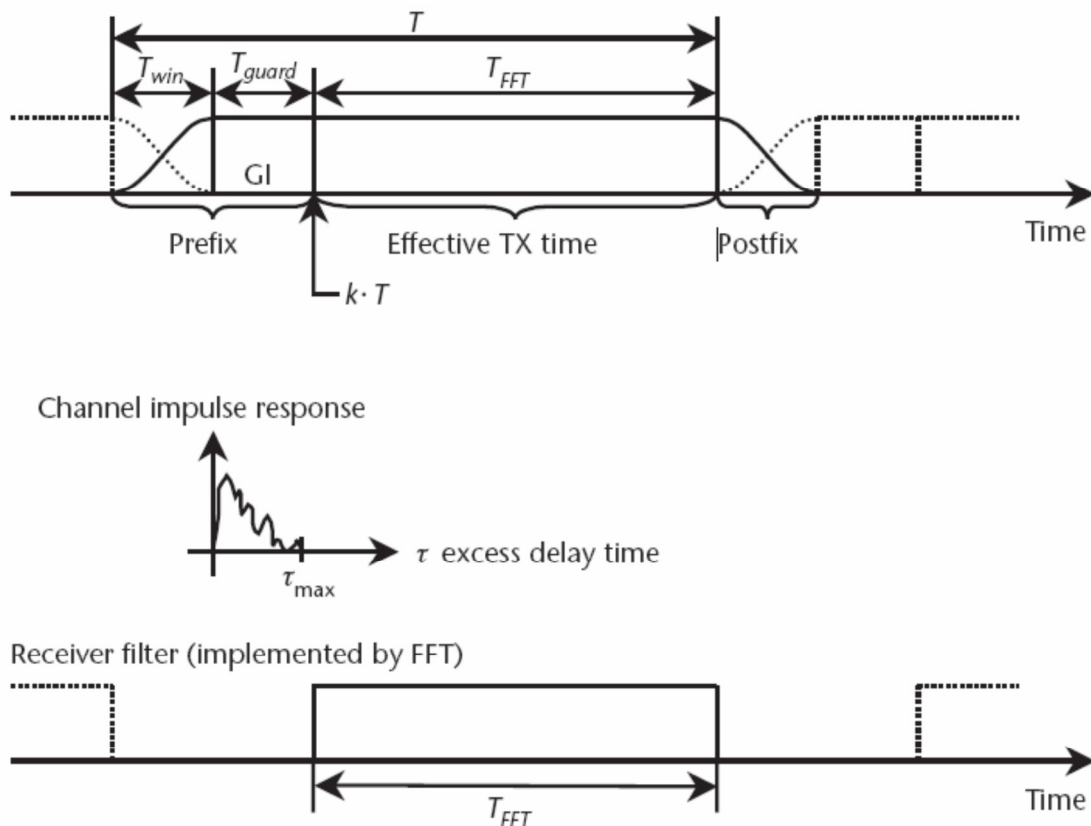


Σχήμα 4.7 : Μείωση ICI με χρήση κυκλικού προθέματος.

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτει και μια ακόμα σημαντική πληροφορία που έχει σχέση με την παρεμβολή μεταξύ γειτονικών φερόντων (ICI). Συγκεκριμένα, η περίοδος των δειγμάτων που ξεκινάει μετά από το πέρας χρονικού διαστήματος T_x θα περικλείει τη συνεισφορά από τα συστατικά όλων των διαφορετικών μονοπατιών και έτσι τα δείγματα θα χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι και δε θα υπάρχει παρεμβολή μεταξύ αυτών. Ένα πρόβλημα που ανακύπτει από τη χρησιμοποίηση του διαστήματος-φρουρού, αν και όχι ιδιαίτερα σημαντικό, είναι η απώλεια ενός μέρους της ισχύος μετάδοσης που απαιτεί το κυκλικό πρόθεμα για να φτάσει στον αποδέκτη. Γι' αυτό το λόγο, όπως προαναφέραμε, αλλά και για να μην υπερκαλύψει πλήρως το σήμα πληροφορίας, το διάστημα-φρουρός έχει διάρκεια από $T/10$ έως $T/4$ (όπου T η περίοδος του συμβόλου), και οδηγεί σε απώλεια του σηματοθορυβικού λόγου της τάξης του 0.5-1 dB.

4.1.4 Εκπαραθύρωση

Ένας τετραγωνικός παλμός έχει αρκετά μεγάλο εύρος ζώνης εξαιτίας των πλευρικών λοβών που προκύπτουν μετά από μετασχηματισμό Fourier. Η εκπαραθύρωση είναι μια διαδεδομένη τεχνική για τη μείωση του επιπέδου αυτών των πλευρικών λοβών και ταυτόχρονα την ελαχιστοποίηση της εκπεμπόμενης έξω από την επιθυμητή μπάντα ενέργειας του σήματος. Σε ένα OFDM σύστημα, το παράθυρο που εφαρμόζεται με τον παραπάνω στόχο δεν πρέπει να επηρεάζει το μεταδιδόμενο σήμα κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης διάρκειάς του. Για το λόγο αυτό, όπως εικονίζεται και στο παρακάτω σχήμα, τα κυκλικά μέρη του συμβόλου που εκτείνονται στην αρχή και στο τέλος του διαμορφώνονται από παλμό.

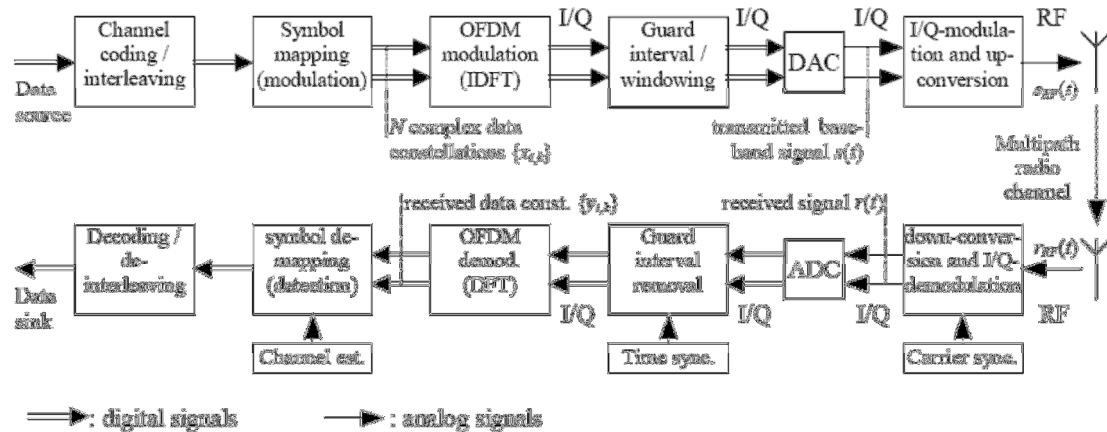


Σχήμα 4.8 : εκπαραθύρωση

Αναλύοντας το παραπάνω σχήμα μπορούμε να ισχυριστούμε ότι με την παραπάνω τεχνική τα κυκλικά προθέματα του σήματος επεκτείνουν πλέον ακόμα περισσότερο το διάστημα-φρουρό και έτσι το σύστημα αποκτά ακόμα μεγαλύτερη ανεκτικότητα στην καθυστέρηση μετάδοσης. Από την άλλη μεριά όμως, η αποτελεσματικότητα

μειώνεται ακόμα περισσότερο καθώς ο αποδέκτης είναι αναγκασμένος να προβεί σε μια επιπλέον ενέργεια και να απομονώσει το παράθυρο.

4.2 Δομή Συστήματος OFDM



Σχήμα 4.9 : Βασική δομή συστήματος μετάδοσης

Στο παραπάνω σχήμα εικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος OFDM. Για να παραχθούν OFDM σήματα επιτυχώς πρέπει να ελεγχθεί προσεκτικά η σχέση μεταξύ των φερόντων ώστε να διατηρηθεί η ορθογωνιότητά τους. Έτσι:

1. Το OFDM παράγεται αφού επιλεγθεί αρχικά το αναγκαίο φάσμα βασιζόμενο στα αρχικά δεδομένα εισόδου.
2. Έπειτα υπολογίζεται το απαιτούμενο πλάτος και η απαιτούμενη φάση του σήματος βασιζόμενα στο σχήμα διαμόρφωσης που έχει επιλεγθεί (BPSK, QPSK, QAM).
3. Τέλος με τη βοήθεια του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier, το σήμα που καταλαμβάνει συγκεκριμένο φάσμα, μετατρέπεται σε σήμα συναρτήσεως του χρόνου.

Οι περιορισμοί που εισάγονται στην παραπάνω αλυσίδα και πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν ώστε να έχουμε ένα ρεαλιστικό κανάλι επικοινωνίας είναι:

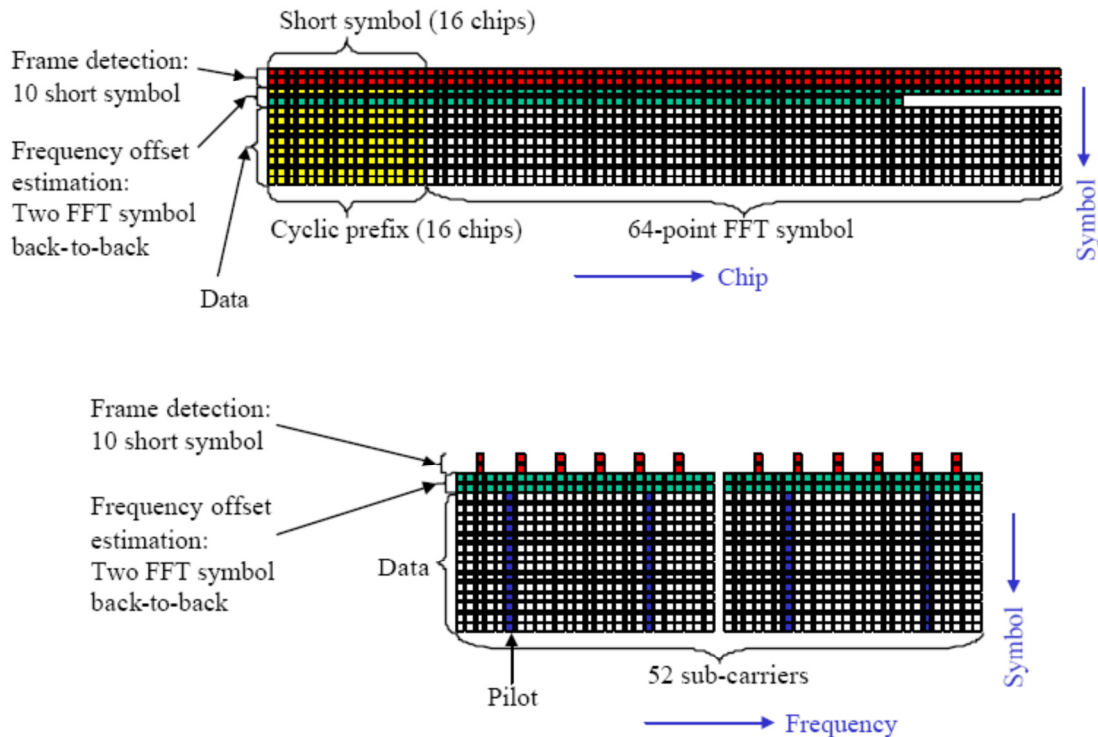
1. Η διασπορά ως προς το χρόνο του καναλιού κινητών επικοινωνιών με την οποία το σύστημα εκπομπής και λήψης πρέπει να συνεργαστεί αρμονικά.
2. Ο περιορισμός ως προς το εύρος ζώνης του καναλιού. Το σήμα πρέπει να δεσμεύει όσο δυνατόν λιγότερο φάσμα και ταυτόχρονα να εισάγει αμελητέα παρεμβολή στα γειτονικά κανάλια του συστήματος.
3. Η συνάρτηση μεταφοράς του υλικού του πομπού και του δέκτη. Αυτή η συνάρτηση μεταφοράς μειώνει το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε σύγκριση με το θεωρητικά αναμενόμενο.
4. Η απόκλιση της φάσης και η αντιστάθμιση της συχνότητας στους μετατροπής πάνω και κάτω ζώνης, καθώς και εμφάνιση του φαινομένου Doppler στο κανάλι.

Παρατηρούμε από το σχήμα που παρατίθεται στην προηγούμενη σελίδα ότι οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στον αποδέκτη είναι ακριβώς αντίστροφες και με αντίστροφη σειρά αυτών που γίνονται στον πομπό και οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία και εκπομπή OFDM συμβόλων. Οι τέσσερις βασικές διαδικασίες που συγχωνεύονται στο παραπάνω σχήμα είναι:

- Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (IDFT) και ο ευθύς μετασχηματισμός Fourier (DFT) χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των δεδομένων, αντίστοιχα, στα ορθογώνια φέροντα. Τα N διαφορετικά διανύσματα που εμφανίζονται στην έξοδο του διαμορφωτή IDFT, εκφρασμένα στο πεδίο του χρόνου $\{x_i, k\}$, διαμορφώνουν στη συνέχεια το φέρον ώστε να προκύψουν N ορθογώνια φέροντα έτοιμα για μετάδοση. Βέβαια, όπως θα δείξουμε στη συνέχεια όταν και θα μελετήσουμε τα βαθυπερατά φίλτρα, σε ένα ρεαλιστικό σύστημα δε χρησιμοποιούνται και τα N διανύσματα. Επιπλέον, πρέπει να αναφέρουμε ότι ο αριθμός N συνήθως επιλέγεται ως ακέραιο πολλαπλάσιο του δύο, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή του πολύ πιο αποδοτικού αλγορίθμου IFFT και FFT (αντίστροφος ταχύς και ταχύς μετασχηματισμός Fourier) για διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση αντίστοιχα.
- Η δεύτερη βασική διαδικασία είναι η εισαγωγή του κυκλικού προθέματος, του οποίου η διάρκεια πρέπει να ξεπερνάει τη μέγιστη καθυστέρηση που

εισάγεται από το κανάλι διέλευσης. Το κυκλικό πρόθεμα που χρησιμοποιείται ως διάστημα-φρουρός έχει μελετηθεί αναλυτικά σε προηγούμενη παράγραφο. Επιπλέον η εξισορρόπηση (symbol de-mapping) απαιτείται για τον εντοπισμό των διανυσμάτων (I και Q κανάλια) που περιέχουν τα δεδομένα και ακολουθεί τον DFT μετασχηματισμό στον δέκτη.

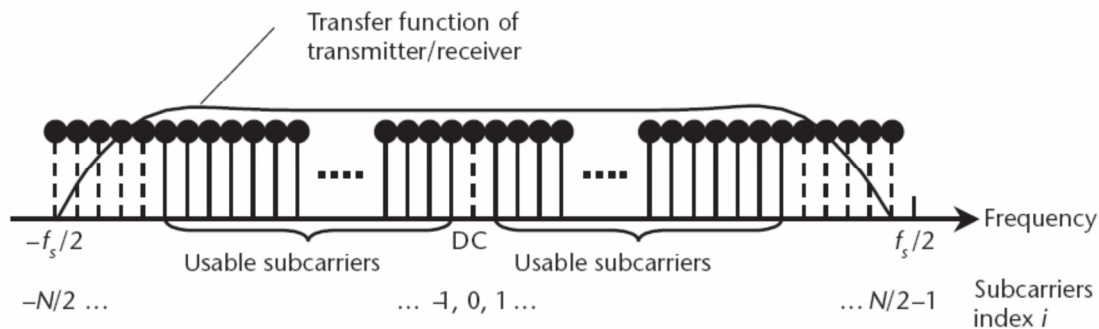
- Δοκιμαστική συγκρότηση (Pilot structure). Σε ένα OFDM σύστημα, ο συγχρονισμός μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις κατηγορίες: συγχρονισμός λόγω απόκλισης συχνότητας στο φέρον, συγχρονισμός στο χρονισμό του DFT παραθύρου και ανάκτηση του υποφέροντος στο δέκτη. Όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια το σύστημα OFDM είναι πολύ ευαίσθητο στην απόκλιση συχνότητας που μπορεί να προκληθεί από το ραδιοδιάλυο, και επομένως ο ακριβής συγχρονισμός είναι απαραίτητος. Για το λόγο αυτό προστίθενται στο μεταδιδόμενο σήμα πιλοτικά σύμβολα (pilot symbols), που ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιούμε μπορούν να κάνουν εκτίμηση του καναλιού, να υπολογίσουν την απόκλιση συχνότητας στο φέρον, και να συμβάλλουν στην αναγνώριση πλαισίου. Τα σύμβολα αυτά φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (για το πρότυπο 802.11a) τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας.



Σχήμα 4.10 : Παράδειγμα χρήσης πιλοτικών συμβόλων από το πρότυπο 802.11a.

Τα δέκα πρώτα σύμβολα στο πρότυπο 802.11a χρησιμοποιούνται για αναγνώριση πλαισίου και υπολογισμό συχνότητας. Κάθε ένα από τα σύμβολα είναι 16chip σε μήκος ή αντίστοιχα 0,8μs. Το επόμενο πλαίσιο OFDM περιέχει δύο FFT σύμβολα back-to-back που χρησιμοποιούνται για υπολογισμό της απόκλιση η αντιστάθμιση συχνότητας αλλά και για εκτίμηση καναλιού. Από την πλευρά της συχνότητας, τα πρώτα 10 σύμβολα χρησιμοποιούν από 12 φέροντα το κάθε ένα. Τέσσερα από τα 52 φέροντα χρησιμοποιούνται σαν οδηγοί για διόρθωση των λαθών που προκύπτουν κατά την απόκλιση της συχνότητας και που τείνουν να συσσωρευτούν στα σύμβολα.

- Τελευταία βασική διαδικασία που επιτελείται και εικονίζεται στο μπλοκ διάγραμμα του συστήματος είναι η διέλευση του σήματος από φίλτρα και αναλογικούς-ψηφιακούς μετατροπείς (ADCs, DACs, IF-Filters, RF Front end).



Σχημα 4.11 : Διέλευση σήματος από φίλτρα

Το σήμα πριν μεταδοθεί περνάει από ένα βαθυπερατό φίλτρο, για τον περιορισμό των πλευρικών συχνοτήτων που δεν περιέχουν κάποια χρήσιμη πληροφορία, έπειτα από έναν ψηφιακό-αναλογικό μετατροπέα και τέλος υπόκειται σε κάτω μετατροπή συχνότητας. Εξ' αιτίας των βαθυπερατών φίλτρων που απαιτούνται για τη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και αντίστροφα δε χρησιμοποιούνται και τα N φέροντα σε έναν αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier. Τα φέροντα που βρίσκονται κοντά στη συχνότητα Nyquist $f_s/2$ θα εξασθενήσουν από τα παραπάνω φίλτρα και έτσι δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση δεδομένων.

4.3 Συμπεράσματα

Η χρήση του συστήματος OFDM προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα σε ένα επικοινωνιακό δίκτυο. Επιτρέποντας την υπερκάλυψη των φερόντων έχει σαν αποτέλεσμα να πετυχαίνει αποτελεσματική χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης. Διαιρώντας το κανάλι σε πολλά μικρότερα, με μικρότερο εύρος ζώνης γίνεται πιο ανθεκτική στην εξασθένηση συχνότητας. Με τη χρησιμοποίηση του κυκλικού προθέματος εξουδετερώνει τη διασυμβολική παρεμβολή ISI. Η εξισορρόπηση του καναλιού γίνεται απλούστερη από άλλες τεχνικές που χρησιμοποιούν κυκλώματα εξισορροποιητών (equalizers). Χρησιμοποιώντας τεχνικές ταχύ μετασχηματισμού Fourier γίνεται πιο αποτελεσματική. Προσφέρει καλή προστασία στις παρεμβολές μεταξύ των καναλιών. Οι διαδικασίες για τη διατήρηση της ορθογωνιότητας είναι πιο εύκολα υλοποιήσιμες από άλλες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε τεχνικές όπως

CDMA, TDMA. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων σε ταχύτητα με αρκετά χαμηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Από την άλλη πλευρά παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα όπως το ότι είναι περισσότερο ευαίσθητη στην αντιστάθμιση συχνότητας φέροντος και στην ολίσθηση συχνότητας, σε σχέση με τα συστήματα που χρησιμοποιούν ένα μόνο φέρον, εξ' αιτίας της διαρροής ενέργειας με το DFT. Στα σήματα OFDM προστίθεται θόρυβος που εξαρτάται από το πλάτος των σημάτων και για το λόγο αυτό απαιτεί την ύπαρξη RF ενισχυτών ισχύος με μεγάλο λόγο πλάτους ισχύος προς μέσης τιμής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 Κωδικοποίηση 64QAM με διαμόρφωση OFDM με παρουσία θορύβου (AWGN)

Στο παρακατω παραδειγμα θα παρουσιάσουμε τη συνελκτική κωδικοποίηση για την απόδοση BER καθώς και τη χρήση της 64QAM mapper και OFDM μεταφορέα με χρήση του προσομοιωτή **AWR**.

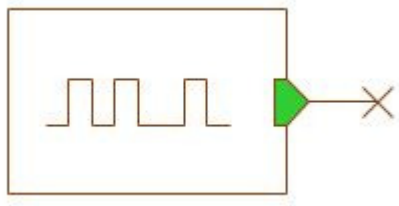
Αρχικά δημιουργήσαμε την τοπολογία της προσομοίωσης:



Σχημα 1. Τοπολογία προσομοίωσης (OFDM BER SYSTEM)

➤ Γεννήτρια τυχαίων Σημάτων

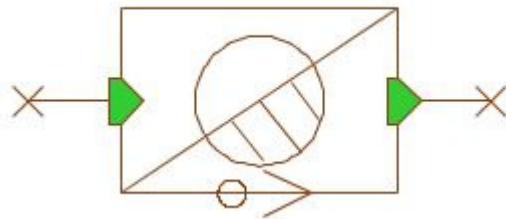
Χρησιμοποιήσαμε αρχικά μια γεννήτρια που παράγει ψευδοτυχαίες ακολουθίες δυαδικών συμβόλων (RND_D)



Διαδικασία επιλογής block: [Elements-System Blocks-Sources-Random-RND_D](#)

➤ Συνελκτικός Κωδικοποιητής

Είναι ένας δυαδικός συνελκτικός κωδικοποιητής με προαιρετική διάτρηση κώδικα. Αυτή η μονάδα υποστηρίζει επίσης αναδρομικούς συνελκτικούς κώδικες. (CONV_ENC)



Διαδικασία επιλογής block: [Elements-System Blocks-Coding/Mapping-Channel Encoding-CONV_ENC](#)

➤ Μετρητής σημείου

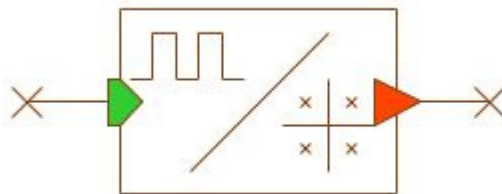
Το λογισμικό προσομοίωσης μας επιτρέπει σε οποιοδήποτε σημείο του κυκλώματος να τοποθετήσουμε μετρητές (test points, TP) τα οποία μετρούν χαρακτηριστικά των σημάτων όπως την ισχύ, το φάσμα, τη συχνότητα, την αντίσταση της γραμμής κ.ο.κ. (TP)



Διαδικασία επιλογής block: [Elements-System Blocks-Meters-TP](#)

➤ **64QAM Mapper**

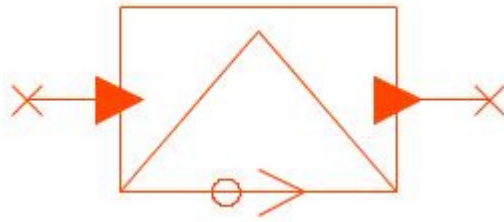
Παράγει ένα Quadrature Amplitude Modulation (QAM) σύνολο I/Q συντελεστών από ένα σήμα εισόδου. Οι συντελεστές μπορούν να τροφοδοτηθούν σε έναν διαμορφωτή για την παραγωγή μιας αναλογικής κυματομορφής. Το μπλοκ δέχεται δυο δυαδικές εισόδους (bits) και M-ary ψηφιακά σύμβολα. Αν η είσοδος είναι δυαδική τα bits ομαδοποιούνται σε σύνολα των $\log_2 M$ προτού χαρτογραφηθούν σε ένα από τα σημεία M στον αστερισμό έξοδου. (QAM_MAP)



Διαδικασία επιλογής block: [Elements-System Blocks-Modulation-QAM-QAM_MAP](#)

➤ **Διαμορφωτής OFDM**

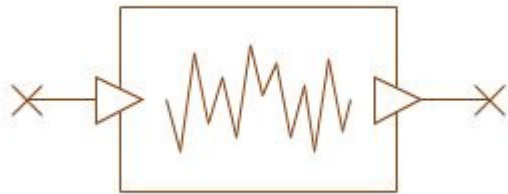
Προσομοιώνει μια ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) διαμορφωτή. Μεταμορφώνει μια ακολουθία μιγαδικών συμβόλων σε μια πολλαπλή OFDM συγκρότημα-φάκελο (CE) κυματομορφή. (OFDM_MOD)



Διαδικασία επιλογής block: **Elements-System Blocks-Modulation-OFDM-OFDM_MOD**

➤ **Στοιχείο προσθήκης Αθροιστικού Λεύκου Γκαουσιανού Θορύβου**

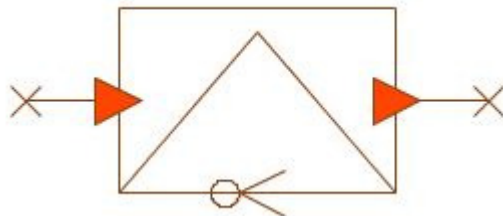
Με το στοιχείο AWGN προσθέτουμε στο σήμα Λευκό Προσθετικό Θόρυβο. Το μοντέλο αυτό προσθέτει πραγματικό ή μιγαδικό θόρυβο στο σήμα εισόδου. (AWGN)



Διαδικασία επιλογής block: **Elements-System Blocks-Channels-AWGN**

➤ **OFDM Αποδιαμορφωτής**

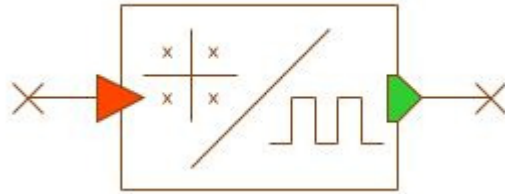
Προσομοιώνει έναν αποδιαμορφωτή OFDM. Λειτουργεί σε μια θορυβώδης συγκρότημα-φάκελο (CE) κυματομορφή δεδομένων δειγματοληψίας για την αποδιαμόρφωση πολυμεταφορικού σήματος. (OFDM_DMOD)



Διαδικασία επιλογής block: **Elements-System Blocks-Modulation-OFDM-OFDM_DMOD**

➤ **Ανιχνευτής QAM**

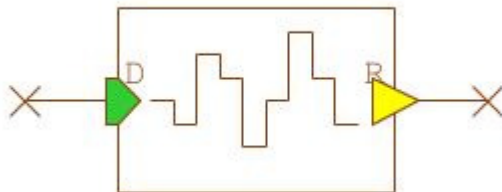
Παράγει μια αλληλουχία ψηφιακών ή δυαδικών συμβόλων από ένα Quadrature Amplitude Modulation (QAM) αποδιαμορφωμένο σήμα I/Q. (QAM_DET)



Διαδικασία επιλογής block: [Elements-System](#) [Blocks-Modulation-QAM-QAM_DET](#)

➤ **Μετατροπέας ψηφιακού σε πραγματικό**

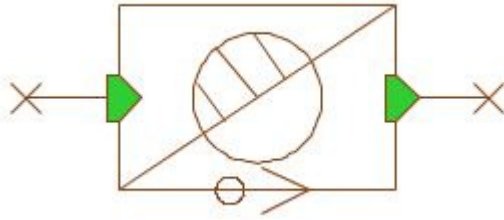
Μετατρέπει μια ψηφιακή είσοδο σε πραγματική έξοδο. Η ψηφιακή είσοδος μπορεί να είναι $\{0,1,\dots,M-1\}$ όπου το M μέγεθος ψηφιακού αλφαβήτου. Αυτό διαφέρει από ένα ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπέα από το ο'τι το σήμα εξόδου δεν είναι μια αναλογική κυματομορφή δειγματοληψίας. (D2R)



Διαδικασία επιλογής block: [Elements-System](#) [Blocks-Converters-Data Type-D2R](#)

➤ **Viterbi Αποκωδικοποιητής**

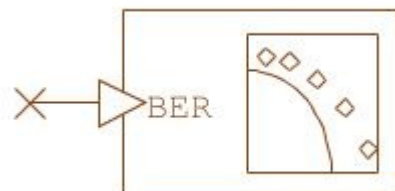
Εκτελεί Viterbi αποκωδικοποίηση των συνελκτικά κωδικοποιημένων δεδομένων. Το μοντέλο δέχεται κανονικές τιμές δεδομένων από την έξοδο του αποδιαμορφωτή για λειτουργία με είσοδο απλών αποφάσεων ή ψηφιακών δεδομένων για λειτουργία πολύπλοκων αποφάσεων. (VIT_DEC)



Διαδικασία επιλογής block: [Elements-System Blocks-Coding/Mapping-Channel Encoding-VIT_DEC](#)

Μετρητής BER (BER meter)

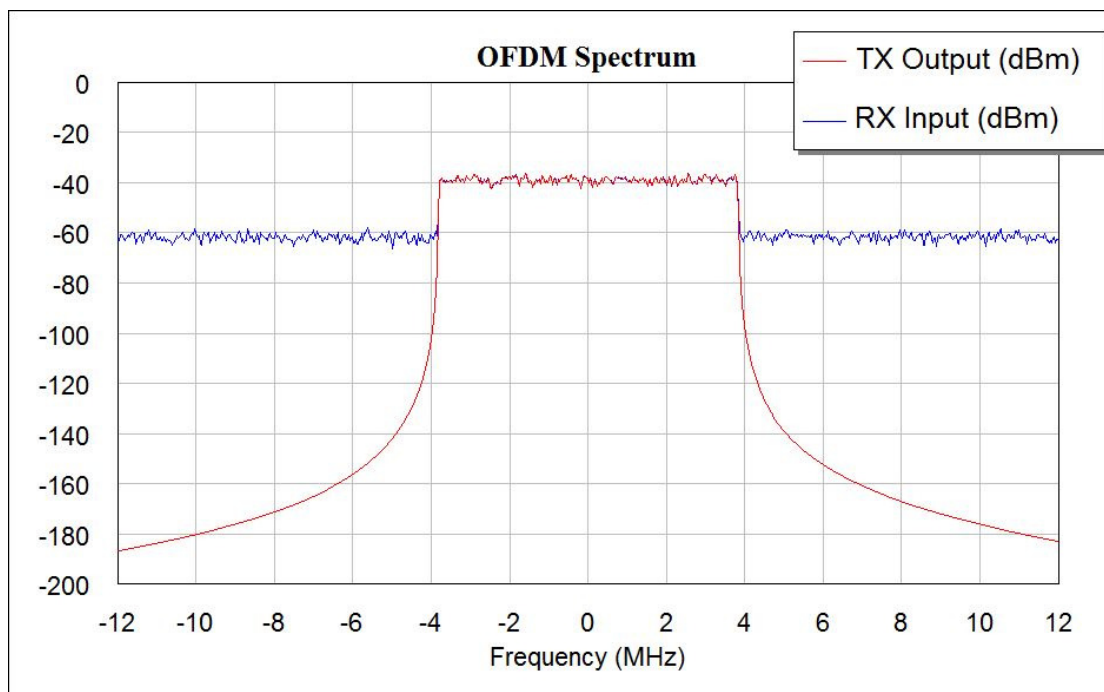
Ο μετρητής BER υπολογίζει το the bit error rate (BER) ενός ψηφιακού σήματος . Το μπλοκ αυτό χρησιμοποιείται για την δημιουργία της γραφικής απεικόνισης του BER καθώς και για την παρουσίαση του σε μορφή παραθύρου τιμών. Ο μετρητής BER εντοπίζει αυτόματα την διαμόρφωση του σήματος αναφοράς αν πρόκειται για πηγές [QAM_SRC](#), [QAM_TX](#) ή [QPSK_TX](#). Για οποιαδήποτε άλλη πηγή ο μετρητής επιχειρεί την αναγνώριση της διαμόρφωσης . Τα πεδία VARNAME , VALUES και OUTFL παραμένουν κενά διότι η αναγνώριση γίνεται αυτομάτως. (BER)



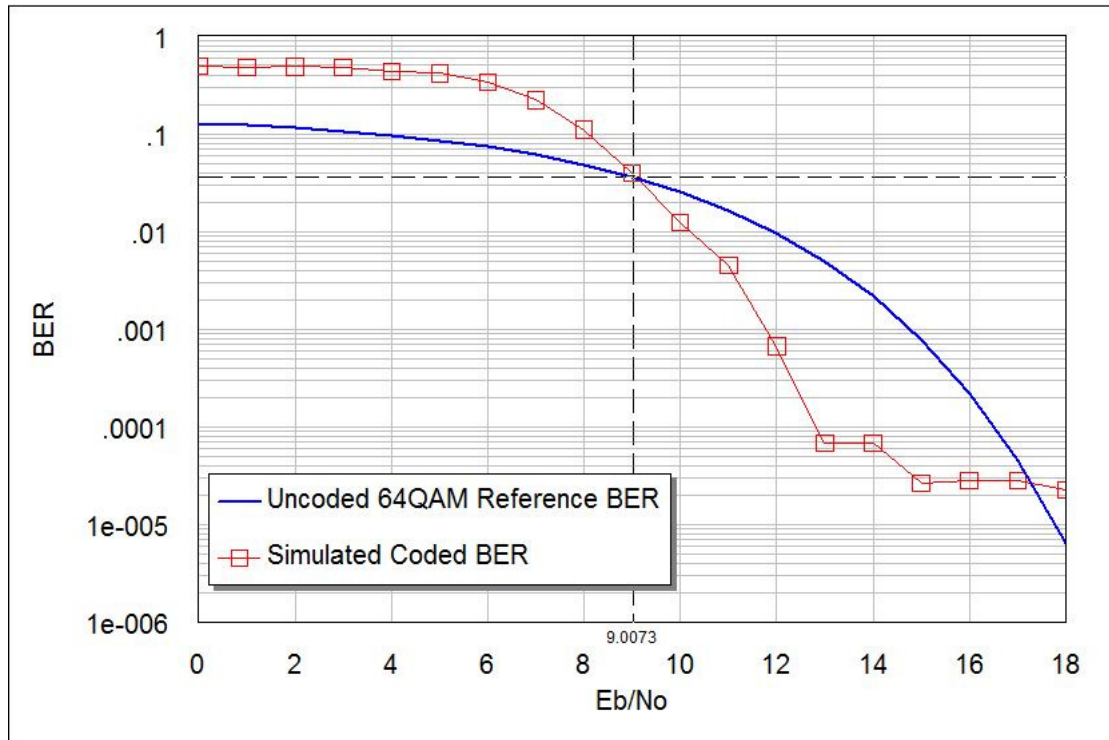
Διαδικασία επιλογής block: [Elements-System Blocks-Meters-BER](#)

Με την υλοποίηση της προσομοίωσης παράξαμε τα διαγράμματα που παραθέτουμε εδώ. Το πρώτο διάγραμμα παρουσιάζει το φάσμα της OFDM διαμόρφωσης , τόσο στην πλευρά του πομπού όσο και στην πλευρά του δέκτη. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η συχνότητα του σήματος και στον κάθετο άξονα το επίπεδο ισχύος σε

dB. Στο δεύτερο διάγραμμα παριστάνεται το BER του σήματος στο δέκτη μέσω της προσομοίωσης που δημιουργήσαμε. Το διάγραμμα περιλαμβάνει δύο καμπύλες : Η πρώτη καμπύλη (μπλε τμήμα) αφορά το θεωρητικά αναμενόμενο BER για την 64QAM διαμόρφωση χωρίς κωδικοποίηση. Η δεύτερη καμπύλη (κόκκινο τμήμα) παριστάνει το BER που προέκυψε από την προσομοίωση του συστήματος με τη χρήση κωδικοποιητή. Παρατηρούμε ότι για επίπεδο σηματοθορυβικού λόγου (E_b/N_0) μικρότερου των 9 dB το κωδικοποιημένο σήμα παρουσιάζει χειρότερη επίδοση (μεγαλύτερο BER) από την 64 QAM χωρίς κωδικοποίηση. Από τα 9 dB όμως και καθώς αυξάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο , η επίδραση της συνελκτικής κωδικοποίησης παράγει μικρότερο BER και άρα καλύτερης ποιότητας μετάδοση.



Διάγραμμα 1. OFDM Spectrum graph



Διάγραμμα 2. BER graph

5.2 Κωδικοποίηση 64QAM με διαμόρφωση OFDM με παρουσία απωλειών πολυόδευσης (Mutlipath Fading)

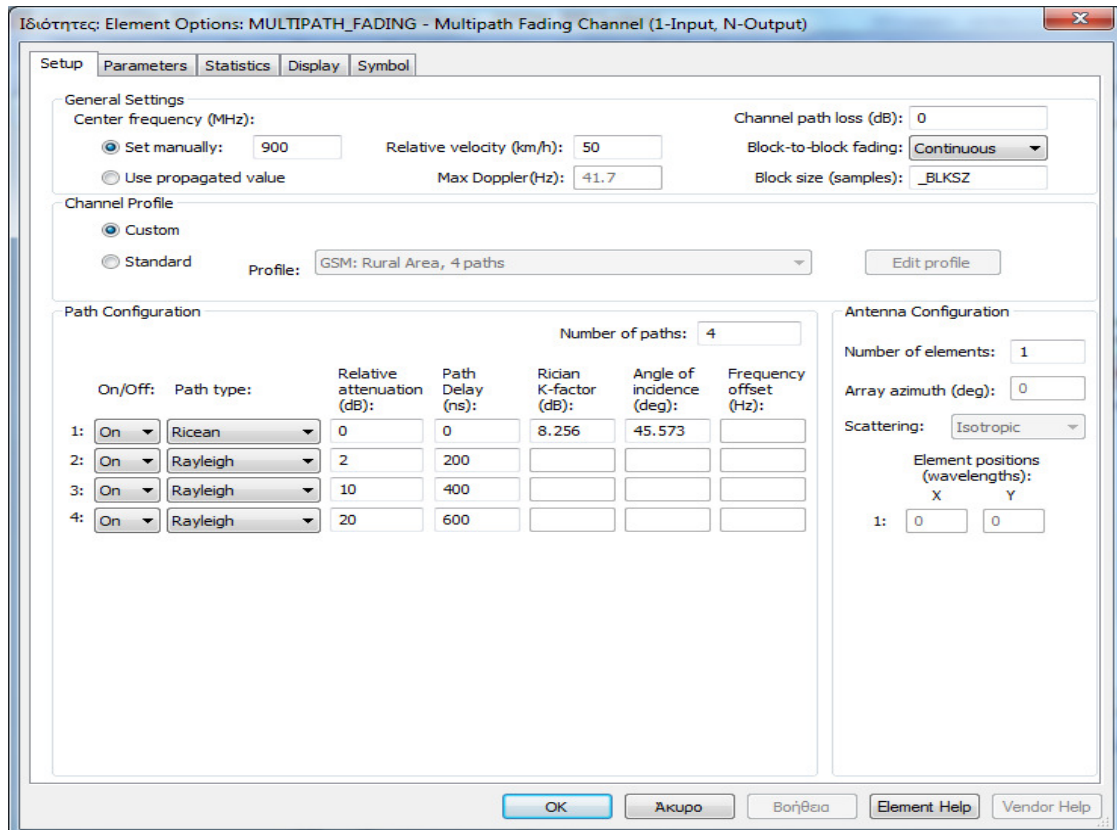
Επαναλαμβάνουμε την προσομοίωση της κωδικοποίησης 64QAM αντικαθιστώντας το Στοιχείο Αθροιστικού Λεύκου Γκαουσιανού Θορύβου (AWGN) με το στοιχείο Multipath Fading :



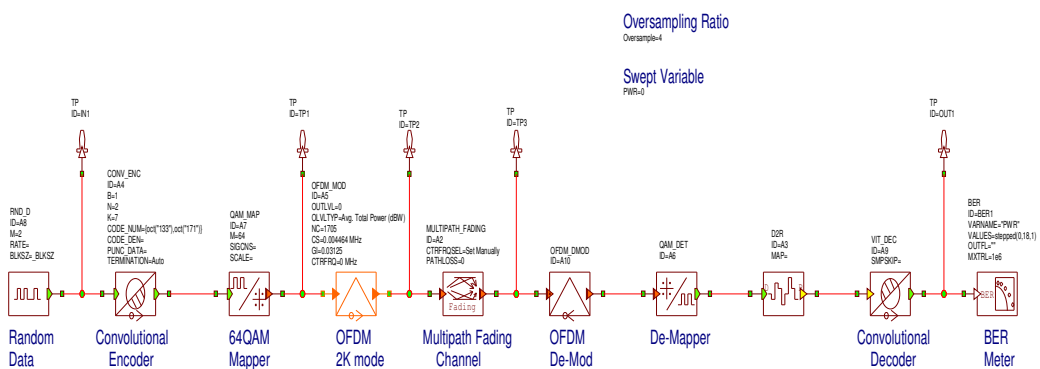
Multipath Fading Element

Το MULTIPATH_FADING προσομοιώνει ένα πολύ προσαρμόσιμο κανάλι διαφυγής πολλαπλών διαδρομών για το οποίο μπορούμε να ρυθμίσουμε την απώλεια διαδρομής καναλιού, τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του πομπού και του δέκτη και τη μέγιστη

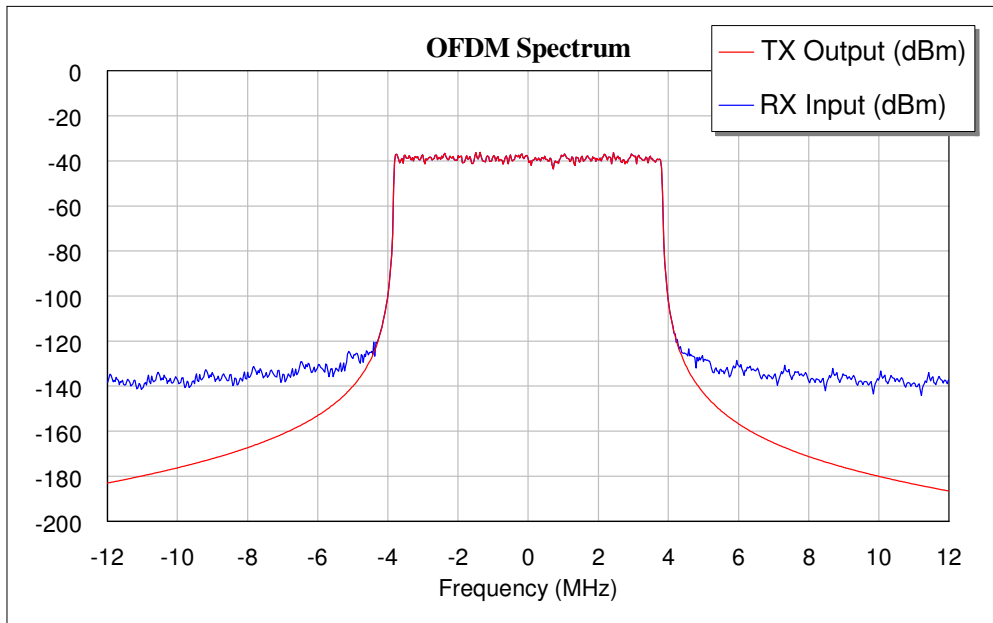
εξάπλωση του Doppler. Η μονάδα υποστηρίζει ανεξάρτητη ή συνεχή λειτουργία μπλοκ με μπλοκ. Το κανάλι μπορεί να περιέχει πολλαπλές διαδρομές που μπορούν να διαμορφωθούν μεμονωμένα σε σχέση με τους τύπους εξασθένησης, τις καθυστερήσεις, τα σχετικά κέρδη και άλλες εφαρμοστέες λειτουργίες. Οι ρυθμίσεις που θέσαμε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :



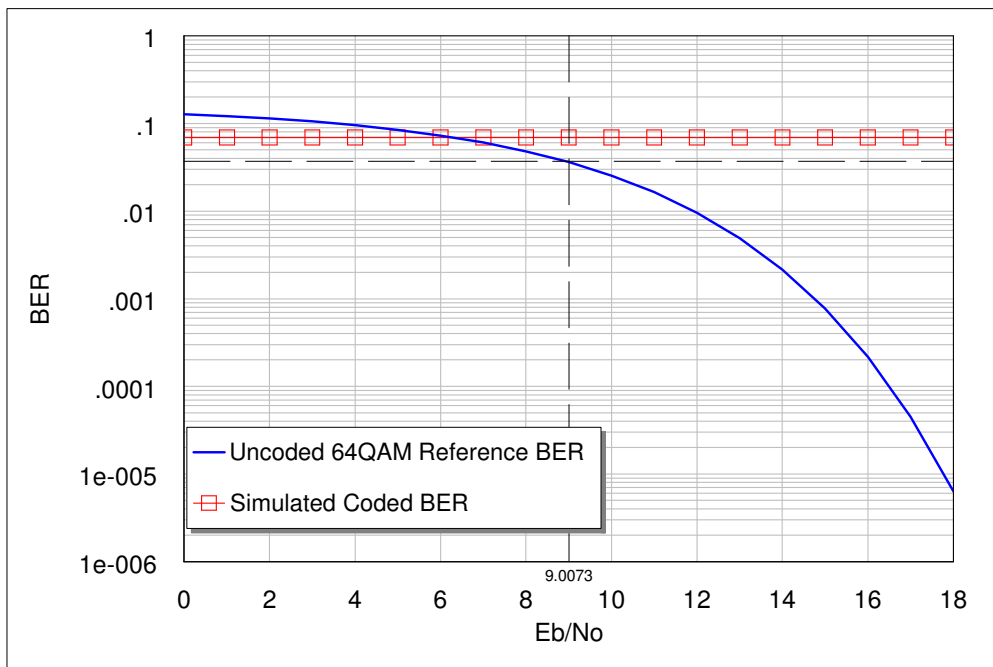
Η νέα τοπολογία της προσομοίωσης έχει ως εξής :



Παραθέτουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης :



Διάγραμμα 3. OFDM Spectrum graph (Multipath Fading)

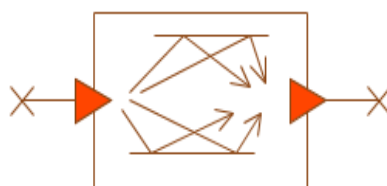


Διάγραμμα 4. BER graph (Multipath Fading)

Παρατηρούμε στο Διάγραμμα 3 το φάσμα της προσομοίωσης και συγκρίνοντάς το με το φάσμα της OFDM κωδικοποίησης παρουσία λευκού θορύβου , είναι εμφανής η επίδρασή του στην ισχύ της εισόδου που βρίσκεται σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο (-140 dBm) . Επίσης οι επιδόσεις του συστήματος στο BER παρουσιάζονται πολύ χαμηλότερες σε σχέση με το BER της κωδικοποίησης με απλό προσθετικό λευκό θόρυβο. Βλέπουμε ότι το BER παρουσία του Multipath Fading είναι σταθερά υψηλό σε επίπεδο κοντά στο 0.1 (ένα εσφαλμένο bit σε κάθε δέκα). Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η πολυόδευση επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στην κωδικοποίηση OFDM της 64QAM και πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη για την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων.

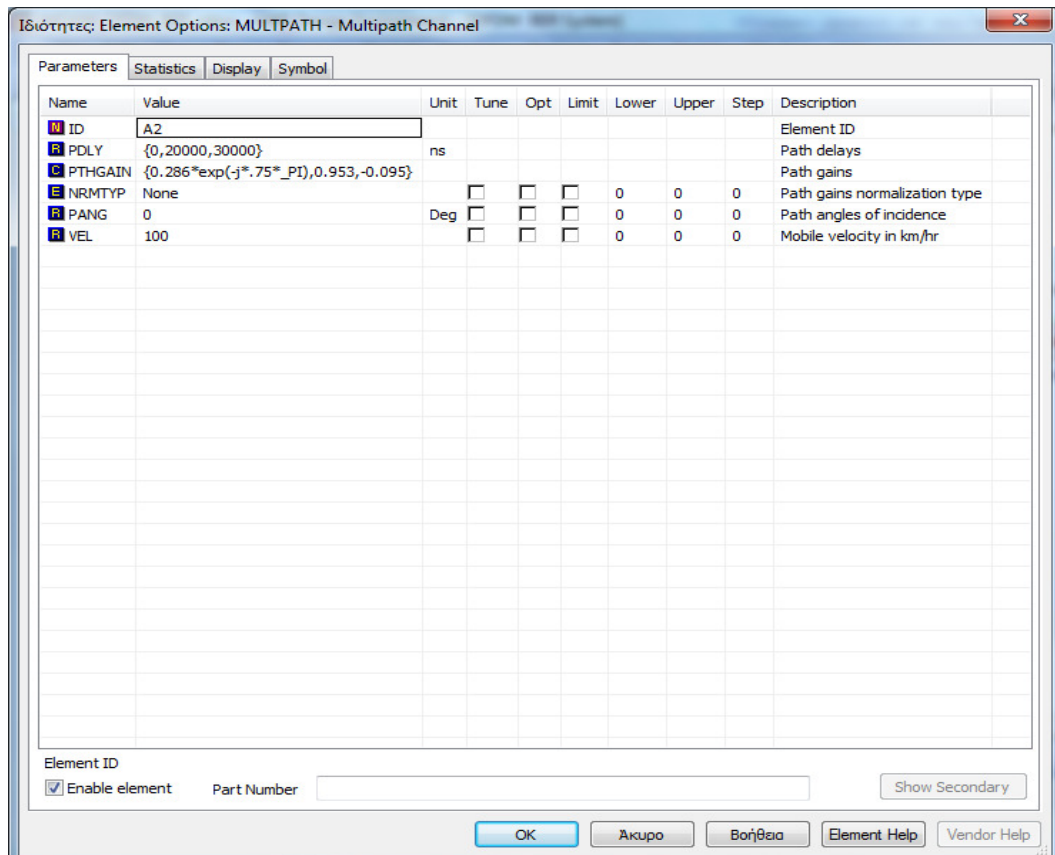
5.3 Κωδικοποίηση 64QAM με διαμόρφωση OFDM υπό συνθήκες πολυόδευσης (Multipath)

Επαναλαμβάνουμε την προσομοίωση του συστήματος , λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη πολλαπλών διαδρομών όδευσης του σήματος (Multipath). Το MULTIPATH επιτρέπει την προσομοίωση πολλαπλών διαδρομών μετάδοσης. Το σήμα θεωρείται ότι μεταδίδεται μέσω πολλαπλών ανεξάρτητων καναλιών, το καθένα από τα οποία έχει διαφορετική καθυστέρηση και πολύπλοκο κέρδος. Οι διαδρομές αθροίζονται μαζί πριν από την έξοδο. Στην πλατφόρμα προσομοίωσης η ύπαρξη πολυόδευσης υλοποιείται με το εξής στοιχείο :

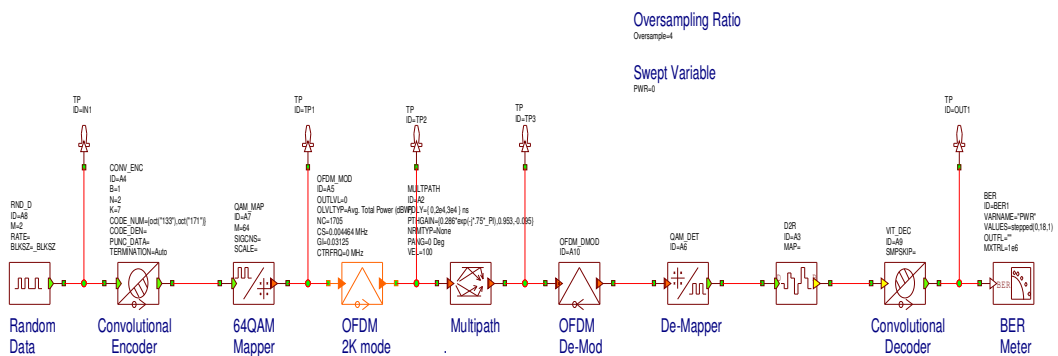


Fading Element

Από την επιλογή Properties ορίζουμε το πλήθος των διαφορετικών οδεύσεων του σήματος σε 20000 και 30000 σε κάθε κατεύθυνση :

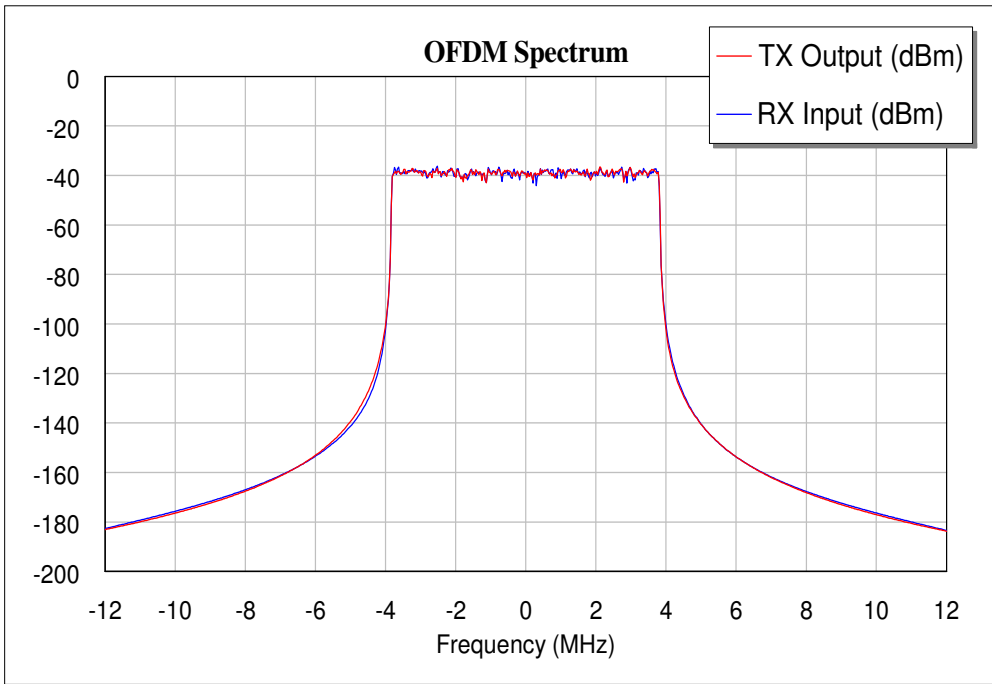


Η νέα τοπολογία της προσομοίωσης γίνεται τώρα :

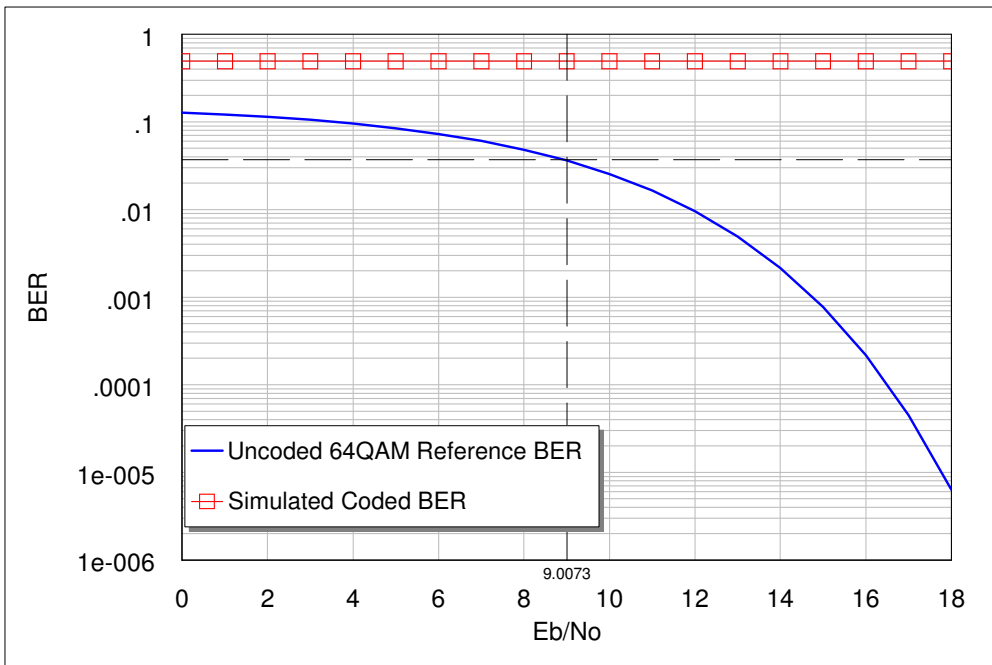


«Τρέχουμε» την προσομοίωση και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν

:



Διάγραμμα 5. OFDM Spectrum graph (Multipath)



Διάγραμμα 6. BER graph (Multipath)

Σχολιάζοντας τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι όσον αφορά το φάσμα έχουμε πολύ καλή προσαρμογή στον δέκτη , γεγονός που αναμέναμε και θεωρητικά εφόσον στην πολυόδευση οι επιπτώσεις έχουν πιθανοτικά προσθετικό ή αφαιρετικό χαρακτήρα. Στο BER όμως η επίδραση των πολλαπλών οδεύσεων είναι «καταστροφική» , με σχεδόν ένα σφάλμα αν bit. Υπό αυτές τις συνθήκες η μετάδοση θεωρείται αδύνατη και θα πρέπει να επανεξεταστεί.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1]: Χ.Καψάλης και Π.Κωττής, 'Κεραίες-Ασύρματες Ζεύξεις', Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2003.

[2]: Μ.Ε.Θεολογου, 'Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών', Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Μάρτιος 2004.

[3]: Α. Κανατάς και Κ.Κωνσταντίνου, 'Συστήματα Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών', Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, 13 Μαρτίου 2001.

[4]: G.V.Tsoulos, 'Adaptive Antennas and MIMO Systems for Mobile Communications', Institute of Communications and Computer Systems, Department of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens, technical report, 2003.

[5]: Simon Haykin, 'Συστήματα Επικοινωνίας', Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1995.

[6]: Παναγιώτης Γ. Κωττής, 'Διαμόρφωση και μετάδοση σημάτων', Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2003.

[7]: Ν. Μήτρου, 'Ψηφιακές Επικοινωνίες', Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου

Πολυτεχνείου, 2002.

[8] Γεώργιος Δ. Παντος. “Μετάδοση Δεδομένων Ευρείας Ζώνης με Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας(OFDM)”.

[9] Αθανάσιος Κανάτας, Φίλιππος Κωνσταντίνου , Γεώργιος Πάντος.
“Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών”.

[10] «Ασύρματα Δίκτυα». Computer Networks & Telematics Applications. [Online], Διαθέσιμο στο:
http://conta.uom.gr/conta/ekpaidevsh/metapyxiaka/technologies_diktywn/ergasies/2008/4G%20Wireless%20Networks.pdf

[11] «OFDM». Wireless Cationic. [Online]. Διαθέσιμο στο:
<http://www.wirelesscationnc.nl/referee/chaptr05/ofdm/ofdmhist.htm>

[12] «Πολυπλεξία». Wikipedia. [Online]. Διαθέσιμο στο:
<<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CF%85%CF%80%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%AF%CE%B1>>

[13] Φλώρου, Α. (n.d.). *Διαμόρφωση Ηχητικών Σημάτων Κατά P.W.M Για Υλοποίηση*.
Ανάκτηση από <http://www.ionio.gr/~floros/pubs/FlorosPhD.pdf>

[14] "Μελέτη και Προσομοίωση MIMO Κωδίκων Χώρου και Συχνότητας σε OFDM Συστήματα", Χαρίλαος Η. Κουρόγιωργας, Διπλωματική Εργασία

[15] "Βασικές έννοιες και ιστορική αναδρομή", Ευάγγελος Παπαπέτρου
ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ