

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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάλυση και μελέτη διαμόρφωσης OFDM πομποδέκτη
σε περιβάλλον AWR**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΚΑΝ ΑΡΤΟΥΡ, ΑΜ: 0464

ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, ΑΜ: 0132

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Δρ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ ΜΙΧΑΛΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΝΑΥΠΑΚΤΟΣ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το τέλος της παρούσας πτυχιακής εργασίας σηματοδοτεί και το τέλος των προπτυχιακών μας σπουδών. Στο αυτό σημείο αισθανόμαστε την ανάγκη να απευθύνουμε ευχαριστίες στα άτομα που μας βοήθησαν και χωρίς τη βοήθειά τους πιθανόν να μην ήταν δυνατή η εκπόνησή της.

Καταρχάς, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον καθηγητή μας κ. Μιχάλη Παρασκευά (Επίκουρο Καθηγητή στο τμήμα Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων & Δικτύων του ΤΕΙ Μεσολογγίου) για την επίβλεψη της εργασίας, τις πολύτιμες συμβουλές του και την συμπαράστασή του ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Κλείνοντας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε από τα βάθη της καρδιάς μας τις οικογένειές μας που χωρίς την ψυχική και υλική βοήθειά τους και την αμέριστη συμπαράστασή τους όποτε την χρειαζόμασταν, δε θα ήταν δυνατό να ολοκληρώσουμε τις προπτυχιακές μας σπουδές.

Πίνακας περιεχομένων

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	6
1.1	Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών.....	7
2.	Οι αρχές του OFDM	9
2.1	Το σύστημα διαμόρφωσης ενιαίου μεταφορέα	9
2.2	Διαίρεση της συχνότητας πολυπλεξίας του συστήματος διαμόρφωσης.....	10
2.3	Ορθογωνιότητα και OFDM	10
2.4	Εφαρμογή ενός συστήματος OFDM	12
2.5	Κανάλια πολλαπλών διαδρομών.....	14
2.6	Διασυμβολική παρεμβολή.....	14
2.7	Παρεμβολή Intrasybol	15
2.8	COFDM: Κωδικοποιημένο OFDM	16
2.9	Μη ιδανικά αποτελέσματα σε ένα σύστημα OFDM.....	17
2.10	Συχνότητα του τοπικού ταλαντωτή offset.....	17
2.11	LO μετατόπιση φάσης.....	19
2.12	Offset θέσης παραθύρου FFT	20
2.13	Δειγματοληψία offset συχνότητας	21
2.13.1	Ενιαίος θόρυβος	21
2.13.2	Μη ενιαίος θόρυβος	22
2.13.3	Παλμικός θόρυβος.....	23
2.14	Παρεμβολή Μεταφορέα.....	23
2.14.1	Θόρυβος φάσης.....	24
2.14	Μη γραμμικά κυκλώματα στη συσκευή αποστολής σημάτων και το δέκτη	25
2.15	Σύγχρονες εφαρμογές.....	25
2.16	Συμπεράσματα.....	26
2.17	Περιγραφή της Ορθογώνιας συχνότητας πολυπλεξίας (OFDM).....	26

2.18	Η σημασία του να είναι ορθογώνια	28
2.19	Καθορισμός της εξασθένησης	39
2.20	Φάσμα και απόδοση OFDM	45
2.21	Απόδοση ποσοστού λάθους κομματιών	47
Κεφάλαιο 3ο: ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ		49
3.	Κωδικοποίηση 64QAM με διαμόρφωση OFDM με παρουσία θορύβου (AWGN)	49
3.1	Μετρήσεις και αποτελέσματα	53

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο τμήμα Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Δικτύων, παράρτημα του ΑΤΕΙ Μεσολογγίου.

Θέμα της πτυχιακής μας εργασίας είναι: Η ανάλυση και συγκριτική μελέτη QAM και MPSK διαμορφώσεων.

Το θεωρητικό μέρος της εργασίας αποτελείται από τρία κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελείται από μία εισαγωγή στη θεωρία των Τηλεπικοινωνιών και την εξέλιξή της. Το δεύτερο κεφάλαιο περιγράφει τις αρχές της OFDM και την ορθογώνια συχνότητα πολυπλεξίας (OFDM).

Το πρακτικό μέρος της εργασίας αφορά την προσομοίωση της ψηφιακής διαμόρφωσης OFDM στο περιβάλλον σχεδίασης AWR. Σχεδιάσαμε την παραπάνω διαμόρφωση και σας παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της μελέτης μας.

Λέξεις κλειδιά: Διαμόρφωση, θόρυβος καναλιού, BER, 64QAM, OFDM, AWR

ABSTRACT

Thesis theme is: Analysis and comparative study of QAM and MPSK modulations.

The theoretical part of the thesis consists of two chapters. The first chapter consists an introduction to the theory of Telecommunications and its evolution. The second chapter outlines the principles of OFDM and the orthogonal frequency multiplexing (OFDM).

The practical part of the work concerns the simulating digital modulation OFDM using the design environment AWR. So we designed the above configurations and we present the results of our study.

Key words: Modulation, noise channel, BER, 64QAM, OFDM, AWR

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Επικοινωνία είναι η διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων, με την οποία ένας πομπός Α μεταβιβάζει πληροφορίες, σκέψεις, ιδέες ή συναισθήματα σε ένα δέκτη Β μέσω ενός κοινού συστήματος. Επιπρόσθετα ο πομπός μπορεί να είναι ταυτόχρονα και δέκτης, αφού και στέλνει και λαμβάνει μηνύματα, όπως επίσης και ο δέκτης είναι ταυτόχρονα και πομπός. Η επικοινωνία είναι μια έννοια συνυφασμένη με την καθημερινή ανθρώπινη δραστηριότητα, καθώς θεωρείται «ο μηχανισμός μέσω του οποίου υπάρχουν και αναπτύσσονται οι ανθρώπινες σχέσεις..». Πρόκειται για μια έννοια η οποία εμπλουτίζεται και μεταλλάσσεται συνεχώς για να καλύψει, όπως χαρακτηριστικά έλεγε ο Cooley, «..όλα τα σύμβολα του νου, μαζί με τα μέσα μεταβίβασής τους στο χώρο και διατήρησής τους στο χρόνο».

Η επικοινωνία όμως μπορεί να είναι και προσχεδιασμένη μέσω διάφορων συσκευών. Οποιαδήποτε συσκευή μας βοηθάει να επικοινωνούμε μεταξύ μας ακόμα και σε απόσταση, είναι ένα κομμάτι μιας προσχεδιασμένης επικοινωνίας η οποία γίνεται με τη βοήθεια της τηλεπικοινωνίας.

Στις επικοινωνίες αυτές όπου υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη υποχρεωνόμαστε λόγω ανεπάρκειας του μέσου μετάδοσης να αλλάζουμε την μορφή της πληροφορίας προκειμένου να τη μεταδώσουμε ορθά.

Με τον όρο τηλεπικοινωνία αναφερόμαστε στο σύνολο των μέσων και των απαραίτητων τεχνικών, που χρησιμοποιούνται για την ορθή ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ δύο ή περισσότερων ανταποκριτών, οι οποίοι βρίσκονται σε οποιαδήποτε απόσταση μεταξύ τους, με σκοπό την βέλτιστη επικοινωνία με υψηλή ποιότητα και αξιοπιστία κατά την μεταφορά των δεδομένων.

Οι τηλεπικοινωνίες παλιότερα περιορίζονταν σε ανταλλαγή φωνητικών μηνυμάτων. Σήμερα συνεχώς διευρύνονται και οι προς ανταλλαγή πληροφορίες ποικίλουν στη φύση και το χαρακτήρα τους. Περιοριζόμενοι στις βασικότερες πρέπει να αναφέρουμε:

- Τις ακουστικές πληροφορίες, φωνητικά ή γενικότερα ηχητικά μηνύματα -σήματα.
- Τις οπτικές εικόνες ή γενικότερα τα οπτικά μηνύματα (video) .
- Τα σήματα δεδομένων μεταξύ υπολογιστών ή μεταξύ αυτόματων μηχανών κ.α.

1.1 Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών

Διάφορες μορφές τηλεπικοινωνιών αναπτύχθηκαν, ανάλογα την εποχή, το λαό, τα μέσα, τις ανάγκες και τους σκοπούς, καθώς ήταν απαραίτητη από τότε η ανάγκη για επικοινωνία από πολύ μακριά και στο λιγότερο δυνατό χρόνο. Στο μεγαλύτερο μέρος της ιστορίας της ανθρωπότητας ο έλεγχος των πληροφοριών υπήρξε πηγή ισχύος.

Τα σήματα καπνού ήταν οι πρώτη μορφή τηλεπικοινωνιών και ξεκινάνε από το 1200 π.Χ όπου ο Όμηρος αναφέρει στην Ιλιάδα σήματα φωτιάς στις κορυφές βουνών, τις φρυκτωρίες, προκειμένου να αναγγείλουν την πτώση της Τροίας στις Μυκήνες. Συνέχισαν να χρησιμοποιήθηκαν για στρατιωτικούς σκοπούς ως τους βυζαντινούς χρόνους. Το 700π.Χ την εμφάνισή τους κάνουν τα ταχυδρομικά περιστερία στους ολυμπιακούς αγώνες για τις μεταφορές μηνυμάτων.

Η μέθοδος σηματοδότησης που επινόησαν οι Αλεξανδρινοί τεχνικοί Κλεοξένης και Δημόκλειτος το 150 π.Χ. θα μπορούσε να θεωρηθεί ο πρώτος οπτικός τηλεγράφος που αναφέρεται στην ιστορία. Το σύστημα αποτελούνταν από δύο ομάδες πυρσών. Συνδυασμοί αναμμένων πυρσών αντιστοιχούσαν στα διάφορα γράμματα. Η χρήση του καθρέπτη (Ηλιογράφος) από τον Ρωμαίο αυτοκράτορα Τιβέριο το 37π.Χ αποτελεί επίσης μέσο διάδοσης για την αποστολή μηνυμάτων.

Η χρήση της φωτιάς ως μέσο τηλεπικοινωνίας συνεχίστηκε μέχρι τον 19^ο αιώνα, όπου πλέον το 1821 έχουμε το πρώτο μικρόφωνο και την αναπαραγωγή ήχου σε ένα πρωτόγονο μουσικό κουτί και το 1830 πια αρχίζουμε να μιλάμε για ηλεκτρισμό, παρατηρούμε όμως πως ο ηλεκτρομαγνητισμός μπορεί να κάνει περισσότερα από την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος και την ανύψωση φορτίων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνία. Στη συνέχεια έχουμε το 1837 την ανακάλυψη του τηλεγράφου (από τους Cooke και Wheatstone) και τον Morse να κάνει την πρώτη δημόσια επίδειξη. Το 1844 μάλιστα έχουμε και το πρώτο fax. Ο Morse στέλνει το πρώτο μήνυμα από τις αίθουσες του Ανώτατου Δικαστηρίου των ΗΠΑ, στη Βαλτιμόρη («What hath God wrought») και έτσι γεννιέται μια νέα εποχή στις τηλεπικοινωνίες. Οι δύο ακτές των ΗΠΑ ενώνονται πλέον μέσω τηλεγράφου και πλέον το 1866 έχουμε την εγκατάσταση του δεύτερου υπερατλαντικού καλωδίου τηλεγράφου μεταξύ Ευρώπης και Αμερικής (το πρώτο εγκαταστάθηκε το 1858).

Με το πέρασμα των χρόνων οι τηλεπικοινωνίες εξελίσσονται. Το 1876 ο Bell και ο Grey ανακάλυψαν το γνωστό σε όλους μας τηλέφωνο. Το 1878 και το 1879 άρχισαν να εγκαθίστανται οι πρώτες τηλεφωνικές συσκευές στο Λονδίνο και το New Haven. Το 1906 η εφεύρεση της τριόδου λυχνίας κενού κατέστησε δυνατή την υλοποίηση ενισχυτών σήματος και τη μετάδοση των τηλεφωνικών σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις.

Ο Samuel Morse με τον τηλεγράφο και ο Graham Bell με το τηλέφωνο ουσιαστικά έθεσαν τα θεμέλια των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών. Η χρήση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τον 20^ο αιώνα ήταν κινητήριος μοχλός ανάπτυξης. Η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό και κάθε εφαρμογή συνδέεται με τη χρήση ενός ορισμένου τμήματος από το φάσμα συχνοτήτων.

Το 1918 ο Edwin Armstrong ανακάλυψε τον πρώτο υπερετερώνυμο δέκτη AM που έδωσε σημαντική ώθηση στη ραδιοφωνία. Ο ίδιος κατασκεύασε πρώτος ένα σύστημα επικοινωνίας FM το 1933.

Μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις ήταν το πρώτο σύστημα τηλεόρασης που κατασκευάστηκε το 1929 και το 1936 ξεκίνησαν οι πρώτες τηλεοπτικές εκπομπές από τον σταθμό BBC στην Αγγλία.

Το 1962 ο Robert Hall παρουσίασε την πρώτη ημιαγωγική δίοδο LASER. Οι δίοδοι LASER και οι οπτικές ίνες αύξησαν τις ταχύτητες των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Επίσης το 1962 τέθηκε σε τροχιά ο δορυφόρος Telstar I που χρησιμοποιήθηκε για την αναμετάδοση σήματος TV μεταξύ ΗΠΑ και Ευρώπης. Το 1965 εκτοξεύθηκε ο Early Bird, ο πρώτος εμπορικός τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος.

Το ευρέως διαδεδομένο σε όλους μας Internet προέκυψε από τη χρηματοδότηση της DARPA τη δεκαετία του 70. Το 1975 υλοποιήθηκε η πρώτη δοκιμή επικοινωνίας μεταξύ δικτύων TCP/IP. Τέλος από τα σημαντικότερα επιτεύγματα ήταν και είναι η κινητή τηλεφωνία GSM το 1991.

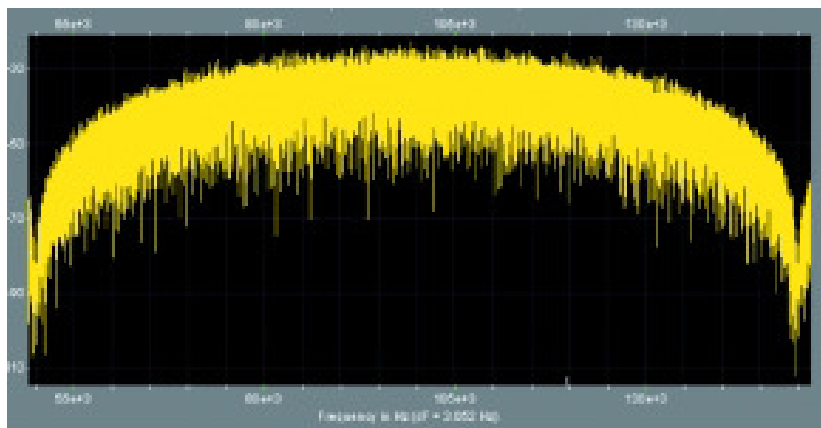
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 20

2. Οι αρχές του OFDM

Οι αρχές της ορθογώνιας πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας (OFDM) υπάρχουν για δεκαετίες. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια οι τεχνικές αυτές έχουν μετακινηθεί γρήγορα από τα εγχειρίδια και τα ερευνητικά εργαστήρια και στην πράξη στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας. Οι τεχνικές χρησιμοποιούνται σε συστήματα παροχής δεδομένων μέσω της τηλεφωνικής γραμμής, του ψηφιακού ραδιοφώνου και της τηλεόρασης, καθώς και στα συστήματα ασύρματης δικτύωσης.

2.1 Το σύστημα διαμόρφωσης ενιαίου μεταφορέα

Ένα χαρακτηριστικό φάσμα διαμόρφωσης ενιαίου μεταφορέα παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Ένα ενιαίο σύστημα μεταφορέα διαμορφώνει τις πληροφορίες επάνω σε έναν μεταφορέα χρησιμοποιώντας τη συχνότητα, τη φάση, ή το πλάτος του μεταφορέα. Για τα ψηφιακά σήματα, οι πληροφορίες είναι υπό μορφή κομματιών, ή συλλογών κομματιών που ονομάζονται σύμβολα, τα οποία είναι διαμορφωμένα επάνω στο μεταφορέα. Καθώς χρησιμοποιούνται υψηλότερα εύρη ζώνης (ταχύτητες δεδομένων) η διάρκεια ενός bit ή το σύμβολο των πληροφοριών γίνεται μικρότερο. Το σύστημα γίνεται πιο επιρρεπές στην απώλεια πληροφοριών από τον παλμικό θόρυβο, τις αντανακλάσεις των σημάτων και άλλες βλάβες. Αυτές οι βλάβες μπορεί να παρεμποδίσουν την ικανότητα να ανακτηθούν οι πληροφορίες που διαβιβάστηκαν. Επιπλέον, καθώς το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται από ένα ενιαίο σύστημα μεταφορέων αυξάνεται, η ευαισθησία στην παρέμβαση από άλλες πηγές συνεχούς σήματος γίνεται μεγαλύτερη.



Σχήμα 1. Παράδειγμα Φάσματος ενιαίου μεταφορέα.

2.2 Διάρθρωση της συχνότητας πολυπλεξίας του συστήματος διαμόρφωσης.

Η πολυπλεξία με διάρθρωση συχνότητας (FDM), διευρύνει την έννοια της διαμόρφωσης του ενιαίου μεταφορέα χρησιμοποιώντας πολλαπλούς υπομεταφορείς μέσα στο ίδιο ενιαίο κανάλι. Ο συνολικός όγκος δεδομένων που αποστέλλεται στο κανάλι διαιρείται μεταξύ των διάφορων υπομεταφορέων. Τα δεδομένα δεν είναι απαραίτητο να είναι ομοιόμορφα κατανομημένα ούτε πρέπει να προέρχονται από την ίδια πηγή πληροφοριών. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν τη χρήση ξεχωριστής διαμόρφωσης / αποδιαμόρφωσης προσαρμοσμένη σε ένα συγκεκριμένο τύπο δεδομένων, ή την αποστολή πινάκων με ανόμοια δεδομένα που μπορούν να σταλούν καλύτερα χρησιμοποιώντας πολλαπλά, και ενδεχομένως διαφορετικά, σχέδια διαμόρφωσης.

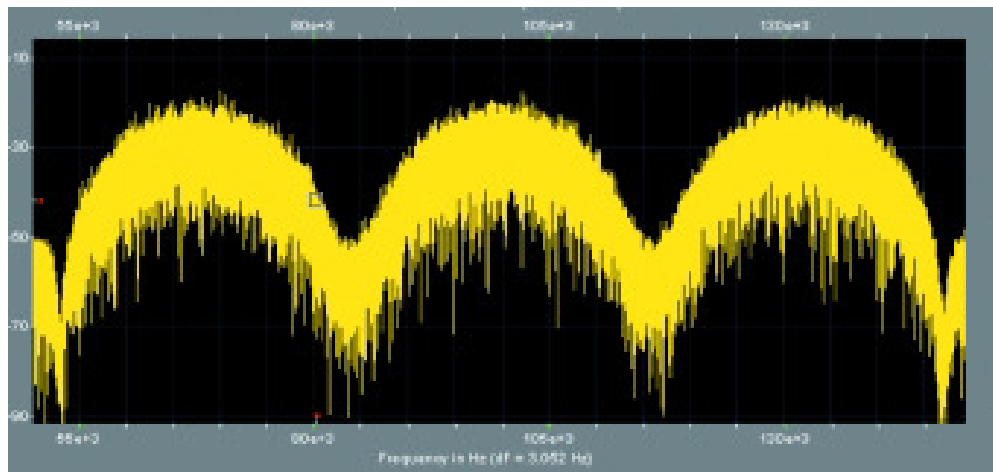
Το NTSC, συντομογραφία του National Television System Committee, είναι αναλογικό τηλεοπτικό σύστημα, το οποίο χρησιμοποιείται σε πολλές περιοχές της Βορείου Αμερικής, στη Μιανμάρ, στο Νότιο Κορέα, στη Ταϊβάν, στην Ιαπωνία, στις Φιλιππίνες και σε περιοχές του Ειρηνικού Ωκεανού, είναι χαρακτηριστικό παραδειγμα χρήσης πολυπλεξίας διαιρέσης συχνότητας FDM. Το FDM προσφέρει ένα πλεονέκτημα πέρα από τη διαμόρφωση του ενιαίου-μεταφορέα, όσον αφορά την περιορισμένη ζώνη παρέμβασης συχνότητας δεδομένου ότι αυτή η παρέμβαση θα επηρεάσει μόνο μια από τις υποζώνες συχνότητας. Οι άλλοι υπομεταφορείς δεν θα επηρεαστούν από την παρέμβαση. Δεδομένου ότι κάθε υπομεταφορέας έχει ένα χαμηλότερο ποσοστό πληροφοριών, οι περίοδοι συμβόλων δεδομένων σε ένα ψηφιακό σύστημα θα είναι πιο μεγάλες, προσθέτοντας κάποια πρόσθετη ανοσία στο παλμικό θόρυβο και τις αντανakλάσεις. Τα συστήματα FDM απαιτούν συνήθως μια ζώνη προστασίας μεταξύ των διαμορφωμένων υπομεταφορέων για να αποτρέψουν το φάσμα ενός υπομεταφορέα να παρεμβαίνει με άλλο. Αυτές οι ζώνες προστασίας μειώνουν το αποτελεσματικό ποσοστό πληροφοριών του συστήματος όταν συγκρίνεται με ένα ενιαίο σύστημα μεταφορέων με παρόμοια διαμόρφωση.

2.3 Ορθογωνιότητα και OFDM

Εάν το παραπάνω σύστημα FDM ήταν σε θέση να χρησιμοποιήσει ένα σύνολο υπομεταφορέων που ήταν ορθογώνιοι ο ένας στον άλλο, ένα υψηλότερο επίπεδο της φασματικής αποδοτικότητας θα μπορούσε να έχει επιτευχθεί. Τα guardbands (ζώνες προστασίας) που χρησιμοποιούνται για να επιτρέψουν τη μεμονωμένη αποδιαμόρφωση των υπομεταφορέων σε ένα σύστημα FDM δεν θα ήταν πλέον απαραίτητα. Η χρήση των ορθογώνιων υπομεταφορέων θα επέτρεπε στα φάσματα των υπομεταφορέων να επικαλύπτονται, αυξάνοντας κατά συνέπεια τη φασματική αποδοτικότητα. Εφ' όσον διατηρείται η ορθογωνιότητα, είναι ακόμα δυνατό να ανακτηθούν τα σήματα των επιμερούς υπομεταφορέων παρά τα επικαλυπτόμενα φάσματά τους. Εάν το εσωτερικό γινόμενο των δύο προσδιοριστικών σημάτων είναι ίσο με μηδέν, τα σήματα αυτά θεωρούνται ότι είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Η ορθογωνιότητα μπορεί επίσης να εξετασθεί από τη σκοπιά των πιθανοτικών διαδικασιών. Εάν δύο τυχαίες διαδικασίες είναι ασυσχέτιστες, τότε είναι ορθογώνιες. Λαμβάνοντας υπόψη την τυχαία φύση των σημάτων σε ένα σύστημα επικοινωνιών, αυτή η πιθανοτική άποψη της ορθογωνιότητας παρέχει μια διαισθητική κατανόηση στις επιπτώσεις της ορθογωνιότητας σε OFDM. Η διαμόρφωση OFDM εφαρμόζεται στην πράξη χρησιμοποιώντας τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier DFT (Discrete Fourier Transform).

Τα ημιτονοειδή σήματα του DFT διαμορφώνουν ένα ορθογώνιο σύνολο βάσης, και ένα σήμα στο διανυσματικό διάστημα του DFT μπορεί να παρασταθεί ως γραμμικός συνδυασμός των ορθογώνιων ημιτονοειδών συνιστωσών του. Με το μετασχηματισμό DFT συσχετίζεται ουσιαστικά το σήμα εισόδου του με κάθε μια από τις ημιτονοειδείς λειτουργίες βάσης. Εάν το σήμα εισόδου έχει κάποια ενέργεια σε μια ορισμένη συχνότητα, θα υπάρξει μια αιχμή στο συσχετισμό του σήματος εισόδου και της ημιτονοειδής βάσης που είναι σε εκείνη την αντίστοιχη συχνότητα. Αυτός ο μετασχηματισμός χρησιμοποιείται στον πομπό OFDM για να αντιστοιχίσει ένα σήμα εισόδου επάνω σε ένα σύνολο ορθογώνιων υπομεταφορέων, δηλ., τις λειτουργίες τις ορθογώνιας βάσης του DFT.

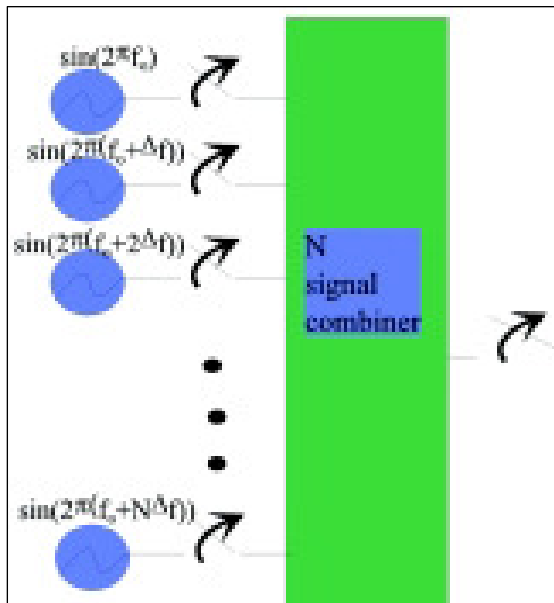
Ομοίως, ο αντίστροφος μετασχηματισμός χρησιμοποιείται πάλι στο δέκτη OFDM για να επεξεργαστεί τους ληφθέντες υπομεταφορείς. Τα σήματα από τους υπομεταφορείς έπειτα συνδυάζονται για να διαμορφώσουν μια εκτίμηση του σήματος πηγής από τη συσκευή αποστολής σημάτων. Η ορθογώνια και ασύνδετη φύση των υπομεταφορέων αξιοποιείται σε OFDM με ισχυρά αποτελέσματα. Δεδομένου ότι οι λειτουργίες βάσης του DFT είναι ασύνδετες, ο συσχετισμός που εκτελείται στο DFT για έναν δεδομένο υπομεταφορέα βλέπει μόνο την ενέργεια για εκείνον τον αντίστοιχο υπομεταφορέα. Η ενέργεια από άλλους υπομεταφορείς δεν συμβάλλει επειδή είναι ασύνδετη. Αυτός ο διαχωρισμός ενέργειας σήματος είναι ο λόγος που τα φάσματα των υποφορέων OFDM μπορούν να επικαλύπτουν χωρίς να προκαλούν παρεμβολές.



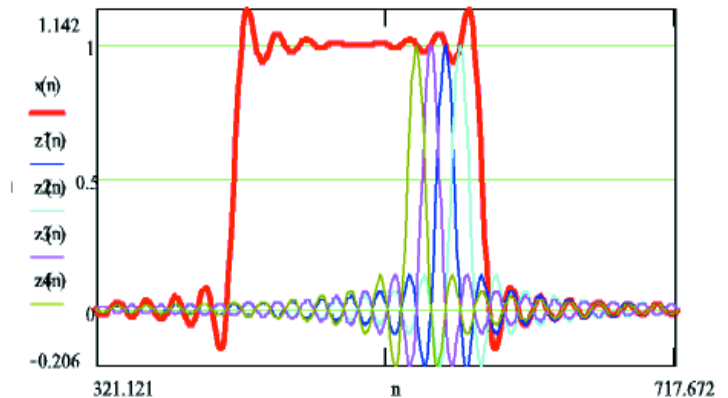
Σχήμα 2. Παράδειγμα φάσματος σημάτων FDM.

Στο Σχημα 3 παρουσιάζεται μια απλή μορφή ενός συστήματος OFDM. Κάθε υπομεταφορέας φέρει ένα κομμάτι των πληροφοριών (N συνολικά κομμάτια) με την παρουσία ή την απουσία του στο φάσμα παραγωγής. Η συχνότητα κάθε υπομεταφορέα επιλέγεται για να διαμορφώσει ένα ορθογώνιο σύνολο σημάτων, και αυτές οι συχνότητες είναι γνωστές στο δέκτη. Παρατηρούμε ότι η παραγωγή ενημερώνεται σε ένα περιοδικό διάστημα T που διαμορφώνει την περίοδο συμβόλων καθώς επίσης και το χρονικό όριο για ορθογωνιότητα. Το σχήμα 4 παρουσιάζει το προκύπτον φάσμα συχνότητας. Στο πεδίο συχνότητας, οι προκύπτοντες δευτερεύοντες λοβοί λειτουργίας ημιτονίου παράγουν επικαλυπτόμενα φάσματα. Οι μεμονωμένες αιχμές των υποζωνών ευθυγραμμίζουν με τις μηδενικές διασταυρώσεις των άλλων υποζωνών. Αυτή η επικάλυψη της φασματικής

ενέργειας δεν παρεμποδίζει την ικανότητα του συστήματος να ανακτηθεί το αρχικό σήμα. Ο δέκτης πολλαπλασιάζει (δηλ., συσχετίζει) το εισερχόμενο σήμα με το γνωστό σύνολο ημιτονοειδών για να παράγει το αρχικό σύνολο κομματιών που στέλνονται. Η ψηφιακή εφαρμογή ενός συστήματος OFDM ενισχύει αυτές τις απλές αρχές και επιτρέπει μια πιο σύνθετη διαμόρφωση.



Σχήμα 3. Μια απλή γεννήτρια OFDM. Υπομεταφορείς N που μεταδίδουν 1 bit πληροφοριών ο καθένας, με ενεργοποίηση και απενεργοποίηση σε χρονικά διαστήματα T.



Σχήμα 4. Γενικό φάσμα του απλού σήματος OFDM που παρουσιάζεται με τέσσερις υπομεταφορείς μέσα. Παρατηρούμε ότι οι μηδενικές διασταυρώσεις όλες αντιστοιχούν στις αιχμές των παρακείμενων υπομεταφορέων.

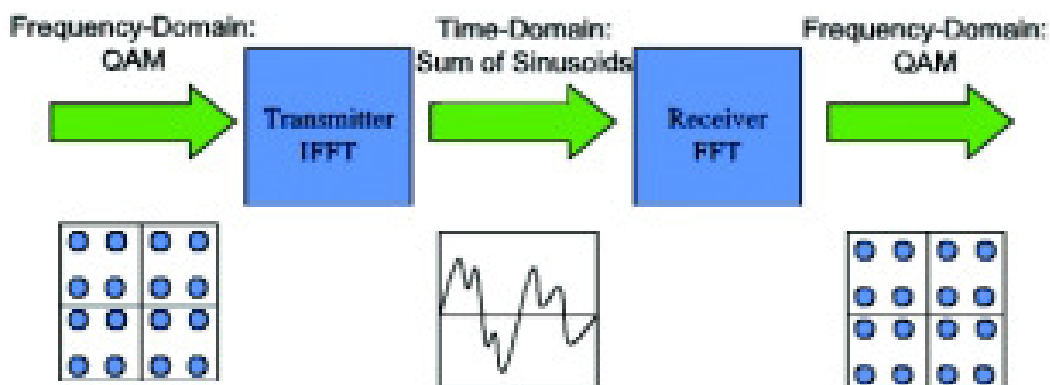
2.4 Εφαρμογή ενός συστήματος OFDM

Η ιδέα πίσω από την αναλογική εφαρμογή OFDM μπορεί να επεκταθεί στον ψηφιακό τομέα με τη χρησιμοποίηση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) και του αντίστοιχού του, αντίστροφου διακριτού μετασχηματισμού Fourier (IDFT). Αυτές οι μαθηματικές διαδικασίες χρησιμοποιούνται ευρέως για το μετασχηματισμό των δεδομένων μεταξύ του χρονικού πεδίου και του πεδίου συχνότητας. Αυτές οι μετατροπές είναι ενδιαφέρουσες από την προοπτική OFDM επειδή μπορούν να θεωρηθούν ως δεδομένα χαρτογράφησης επάνω στους ορθογώνιους υπομεταφορείς. Για παράδειγμα, το IDFT χρησιμοποιείται για να λάβει τα δεδομένα στο πεδίο της συχνότητας και να τα μετατρέψει σε δεδομένα στο πεδίο του χρόνου. Προκειμένου να εκτελεσθεί αυτή η λειτουργία, ο IDFT συσχετίζει τα δεδομένα εισόδου πεδίου συχνότητας με τις ορθογώνιες λειτουργίες βάσης του, οι οποίες είναι ημιτονοειδή σε ορισμένες συχνότητες. Αυτός ο συσχετισμός είναι ισοδύναμος με τη χαρτογράφηση των δεδομένων εισόδου επάνω στις ημιτονοειδείς λειτουργίες βάσης.

Στην πράξη, τα συστήματα OFDM εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) και αντίστροφου γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (IFFT) που είναι από μαθηματική άποψη ισοδύναμες εκδόσεις του DFT και του IDFT, αντίστοιχα, αλλά με αποδοτικότερη εφαρμογή.

Ένα σύστημα OFDM μεταχειρίζεται τα σύμβολα πηγής (π.χ., το QPSK ή σύμβολα QAM που θα ήταν παρόντα σε ένα ενιαίο σύστημα μεταφορέων) στον πομπό σαν να είναι στο πεδίο συχνότητας. Αυτά τα σύμβολα χρησιμοποιούνται ως είσοδοι σε έναν κομμάτι IFFT που φέρνει το σήμα στο πεδίο του χρόνου. Κάθε ένα από αυτά τα σύμβολα εισαγωγής N έχει μια περίοδο συμβόλου T δευτερόλεπτα. Σημειώνουμε ότι οι λειτουργίες βάσης για ένα IFFT είναι ορθογώνια ημιτονοειδή N . Αυτά τα ημιτονοειδή έχουν το κάθε ένα μια διαφορετική συχνότητα και η χαμηλότερη συχνότητα είναι η DC (συνεχές ρεύμα). Κάθε σύμβολο εισόδου ενεργεί σαν ένα πολύπλοκο βάρος για την αντίστοιχη λειτουργία ημιτονοειδούς βάσης. Δεδομένου ότι τα σύμβολα εισαγωγής είναι σύνθετα, η αξία του συμβόλου καθορίζει και το εύρος και τη φάση του ημιτονοειδούς για τον αντίστοιχο υπομεταφορέα. Η παραγωγή IFFT είναι το άθροισμα όλων των ημιτονοειδών N . Κατά συνέπεια, ο μετασχηματισμός IFFT παρέχει έναν απλό τρόπο να διαμορφωθούν τα δεδομένα επάνω στους ορθογώνιους υπομεταφορείς N . Το κομμάτι των δειγμάτων παραγωγής N από το IFFT αποτελεί ένα ενιαίο σύμβολο OFDM. Το μήκος του συμβόλου OFDM είναι $N \cdot T$ όπου το T είναι η περίοδος συμβόλων εισαγωγής IFFT που αναφέρονται παραπάνω.

Μετά από κάποια πρόσθετη επεξεργασία, το πεδίο του χρόνου του σήματος που προκύπτει από το IFFT μεταδίδεται μέσα από το κανάλι. Στο δέκτη, ένας μετασχηματισμός FFT χρησιμοποιείται για να επεξεργαστεί το λαμβανόμενο σήμα και να το φέρει στο πεδίο συχνότητας. Στην ιδανική περίπτωση το αποτέλεσμα του FFT θα είναι τα αρχικά σύμβολα που εστάλησαν από τη συσκευή αποστολής σημάτων (πομπό). Όταν σχεδιάζονται στο σύνθετο επίπεδο, τα δείγματα παραγωγής FFT θα διαμορφώσουν μια κωδικοποίηση, όπως π.χ. μια 16-QAM. Ωστόσο, δεν υπάρχει καμία έννοια της ομαδοποίησης για το σήμα στο πεδίο του χρόνου. Όταν σχεδιάζεται στο σύνθετο επίπεδο, το σήμα του πεδίου του χρόνου σχηματίζει ένα διάγραμμα διασποράς χωρίς κανονικό σχήμα. Έτσι, οποιαδήποτε επεξεργασία δέκτη που χρησιμοποιεί την έννοια της κωδικοποίησης (όπως το σύμβολο σε τεμάχια) πρέπει να προκύπτει στο πεδίο της συχνότητας. Το διάγραμμα στο σχήμα 5 απεικονίζει τη μορφή του σήματος μεταξύ του πεδίου συχνότητας και του πεδίου του χρόνου σε ένα σύστημα OFDM.



Σχήμα 5. Διάγραμμα απλού συστήματος OFDM

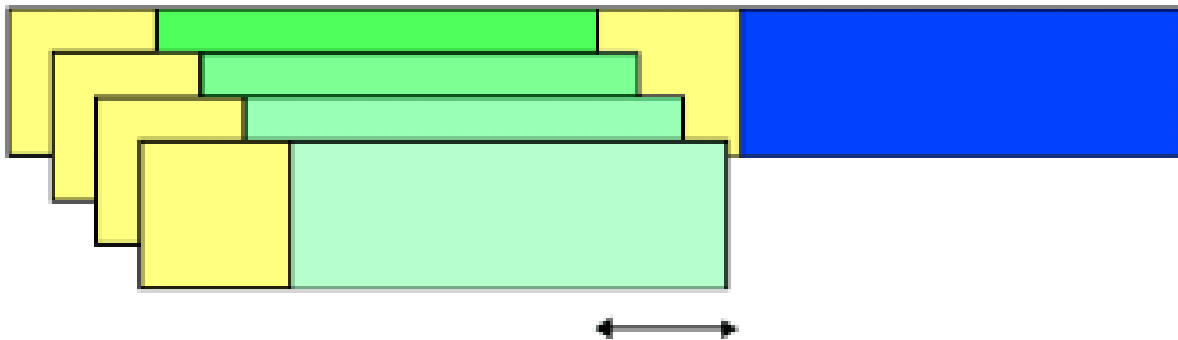
2.5 Κανάλια πολλαπλών διαδρομών

Ένα σημαντικό πρόβλημα στα περισσότερα ασύρματα συστήματα είναι η παρουσία ενός καναλιού πολλαπλών διαδρομών (multipath channel). Σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών, το μεταδιδόμενο σήμα ανακλάται από διάφορα αντικείμενα. Κατά συνέπεια, πολλαπλές καθυστερημένες εκδόσεις του μεταδιδόμενου σήματος φθάνουν στο δέκτη. Οι πολλαπλές εκδόσεις του σήματος προκαλούν το λαμβανόμενο σήμα να παραμορφωθεί. Πολλά ενσύρματα συστήματα έχουν επίσης ένα παρόμοιο πρόβλημα όπου οι αντανακλάσεις εμφανίζονται λόγω της κακής προσαρμογής της σύνθετης αντίστασης στη γραμμή μετάδοσης.

Ένα κανάλι πολλαπλών διαδρομών προκαλεί δύο προβλήματα για ένα σύστημα OFDM.

Το πρώτο πρόβλημα είναι διασυμβολική παρεμβολή. Αυτό το πρόβλημα προκύπτει όταν το λαμβανόμενο σύμβολο OFDM παραμορφώνεται από το προηγούμενο μεταδιδόμενο σύμβολο OFDM. Το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με τη διασυμβολική παρεμβολή που εμφανίζεται σε ένα σύστημα ενιαίου μεταφορέα. Ωστόσο, σε τέτοια συστήματα, η παρεμβολή οφείλεται αποκλειστικά σε διάφορα άλλα σύμβολα αντί για ακριβώς του προηγούμενου συμβόλου - η χρονική περίοδος συμβόλων στα ενιαία συστήματα μεταφορέων είναι συνήθως πολύ μικρότερη από τη χρονική διάρκεια του καναλιού, ενώ η χαρακτηριστική περίοδος συμβόλων OFDM είναι πολύ πιο μεγάλη από τη χρονική διάρκεια του καναλιού.

Το δεύτερο πρόβλημα είναι χαρακτηριστικό των συστημάτων πολυμεταφορέα (multicarrier) και καλείται παρεμβολή Intrasympbol. Είναι το αποτέλεσμα της παρεμβολής μεταξύ των υπομεταφορέων ενός δεδομένου OFDM συμβόλου. Οι επόμενες ενότητες εξηγούν πώς το OFDM αντιμετωπίζει αυτούς τους δύο τύπους παρεμβολών.



Σχήμα 6. Παράδειγμα διασυμβολικής παρεμβολής. Το πράσινο σύμβολο διαβιβάστηκε πρώτο, ακολουθούμενο από το μπλε σύμβολο.

2.6 Διασυμβολική παρεμβολή

Υποθέτουμε ότι η χρονική διάρκεια του καναλιού είναι L_c ανα δείγμα. Αντί ενός ενιαίου μεταφορέα με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων R σύμβολα/δευτερόλεπτο, ένα σύστημα OFDM έχει N υπομεταφορείς, κάθε ένας με ένα ποσοστό δεδομένων R/N σύμβολα/δευτερόλεπτο. Επειδή το ποσοστό δεδομένων διαιρείται κατά έναν παράγοντα N , η περίοδος συμβόλων OFDM αυξάνεται κατά έναν παράγοντα N . Επιλέγοντας μια

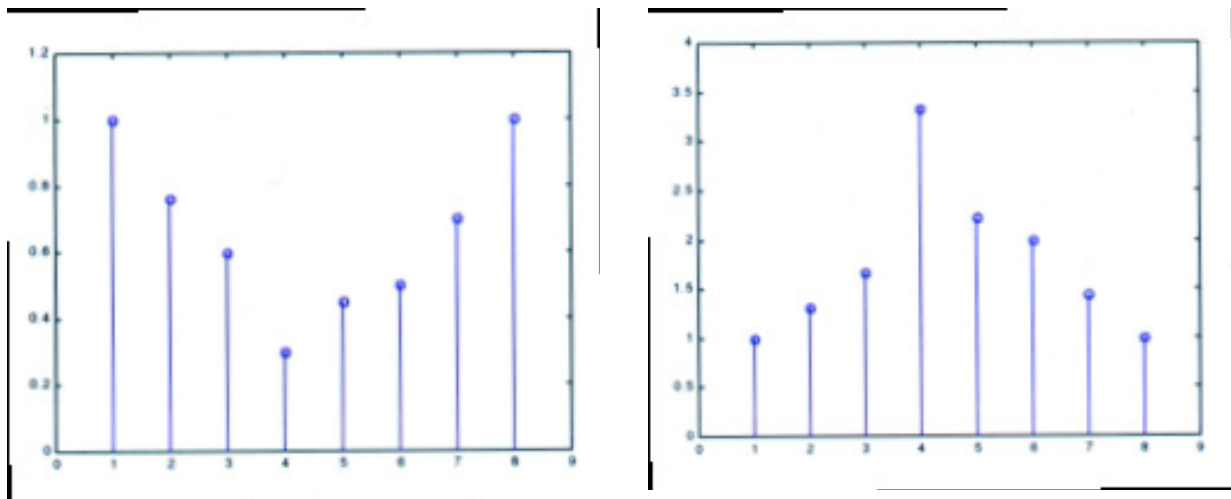
κατάλληλη τιμή για το N , το μήκος του συμβόλου OFDM γίνεται μεγαλύτερο από το χρονικό διάστημα του καναλιού. Λόγω αυτής της διαμόρφωσης, η συνέπεια της διασυμβολικής παρεμβολής είναι η παραμόρφωση των πρώτων L_c δειγμάτων του λαμβανόμενου συμβόλου OFDM. Ένα παράδειγμα αυτής της συνέπειας παρουσιάζεται στο σχήμα 6. Παρατηρούμε ότι μόνο τα πρώτα λίγα δείγματα του συμβόλου παραμορφώνονται, με αποτέλεσμα να μπορούμε να κάνουμε την υπόθεση ότι με τη χρήση ενός διαστήματος προστασίας να μπορούμε αφαιρέσουμε την επίδραση της διασυμβολικής παρεμβολής. Το διάστημα προστασίας θα μπορούσε να είναι ένα τμήμα του συνόλου όλων των μηδενικών δειγμάτων που μεταδίδονται μπροστά από κάθε σύμβολο OFDM. Δεδομένου ότι δεν περιέχει καμία χρήσιμη πληροφορία, το διάστημα προστασίας απορρίπτεται στο δέκτη. Εάν το μήκος του διαστήματος προστασίας επιλέγεται κατάλληλα έτσι ώστε να είναι μακρύτερο από τη χρονική διάρκεια του καναλιού, το ίδιο το σύμβολο OFDM δεν θα παραμορφωθεί. Επομένως, απορρίπτοντας το διάστημα προστασίας, τα αποτελέσματα της διασυμβολικής παρεμβολής αναιρούντε, επίσης.

2.7 Παρεμβολή Intrasymbol

Το διάστημα προστασίας δεν χρησιμοποιείται σε πρακτικά συστήματα επειδή δεν εμποδίζει ένα σύμβολο OFDM από το να παρεμβάλει με τον εαυτό του. Αυτός ο τύπος παρεμβολής καλείται παρεμβολή intrasymbol. Η λύση στο πρόβλημα της παρεμβολής intrasymbol περιλαμβάνει μια ιδιότητα των σημάτων διακριτού χρόνου. Θυμίζουμε ότι σε συνεχή χρόνο, η πράξη της συνέλιξης είναι ισοδύναμη με ένα πολλαπλασιασμό στο πεδίο συχνότητας. Αυτή η ιδιότητα ισχύει σε διακριτό χρόνο μόνο αν τα σήματα είναι απείρου μήκους ή εάν τουλάχιστον ένα από τα σήματα είναι περιοδικά πάνω από το εύρος της συνέλιξης. Δεν είναι πρακτικό να υπάρξει ένα άπειρου μήκους σύμβολο OFDM, ωστόσο, είναι δυνατόν να κάνουμε το σύμβολο OFDM να φαίνεται περιοδικό. Αυτή η περιοδική μορφή επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση του διαστήματος προστασίας με κάτι γνωστό ως ένα κυκλικό πρόθεμα δειγμάτων μήκους L_p . Το κυκλικό πρόθεμα είναι ένα αντίγραφο των τελευταίων δειγμάτων L_p του συμβόλου OFDM όπου $L_p > L_c$. Δεδομένου ότι περιέχει τις περιττές πληροφορίες, το κυκλικό πρόθεμα απορρίπτεται στο δέκτη. Όπως και στην περίπτωση του διαστήματος προστασίας, αυτό το βήμα απομακρύνει τα αποτελέσματα της διασυμβολικής παρεμβολής. Λόγω του τρόπου με τον οποίο το κυκλικό πρόθεμα διαμορφώθηκε, το κυκλικά-εκτεινόμενο σύμβολο OFDM εμφανίζεται περιοδικό, όταν συνελίσσεται με το κανάλι. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα είναι ότι η επίδραση του καναλιού γίνεται πολλαπλασιαστική.

Σε ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνιών, τα σύμβολα που φθάνουν στο δέκτη έχουν υποστεί συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου με την απόκριση παλμού του καναλιού. Κατά συνέπεια, η επίδραση του καναλιού είναι συνελικτική. Προκειμένου να ακυρωθούν τα αποτελέσματα αυτής της πράξης, μια άλλη συνέλιξη πρέπει να εκτελεσθεί στο δέκτη χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο χρονικών περιοχών γνωστό ως ισοσταθμιστή. Το μήκος του ισοσταθμιστή πρέπει να είναι της τάξης του χρονικού διαστήματος του καναλιού. Ο ισοσταθμιστής επεξεργάζεται σύμβολα προκειμένου να προσαρμόσει την αντίδρασή του σε μια προσπάθεια να εξαλείψει τις επιδράσεις του καναλιού. Σε μια διαμόρφωση OFDM, το σήμα στο πεδίο του χρόνου είναι ακόμη σε συνέλιξη με την απόκριση καναλιού. Ωστόσο, τα δεδομένα θα πρέπει τελικά να μετασχηματιστούν πίσω στο πεδίο της συχνότητας από

το FFT στον δέκτη. Λόγω της περιοδικής φύσης του κυκλικά-εκτεινόμενου συμβόλου OFDM, αυτή η συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου θα οδηγήσει στον πολλαπλασιασμό του φάσματος του σήματος OFDM (δηλ., τα σημεία ομαδοποίησης του πεδίου συχνότητας) με την απόκριση συχνότητας του καναλιού. Το αποτέλεσμα είναι ότι το σύμβολο κάθε υπομεταφορέα θα πολλαπλασιαστεί με έναν σύνθετο αριθμό ίσο με την απόκριση συχνότητας του καναλιού, στη συχνότητα εκείνου του υπομεταφορέα. Κάθε λαμβανόμενος υπομεταφορέας αποκτά ένα σύνθετο κέρδος που οφείλεται στο κανάλι. Προκειμένου να αναιρεθούν αυτές οι αλλοιώσεις χρησιμοποιείται ένας ισοσταθμιστής πεδίου συχνότητας. Ένας τέτοιος ισοσταθμιστής είναι πολύ απλούστερος από έναν ισοσταθμιστή χρονικού πεδίου. Ο ισοσταθμιστής πεδίου συχνότητας αποτελείται από έναν ενιαίο σύνθετο πολλαπλασιασμό για κάθε υπομεταφορέα. Για την απλή περίπτωση μηδενικού θορύβου, η τιμή της απόκρισης του ισοσταθμιστή είναι το αντίστροφο της απόκρισης συχνότητας του καναλιού. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 7. Με μια τέτοια ρύθμιση, ο ισοσταθμιστής πεδίου συχνότητας ακύρωνει την πολλαπλασιαστική επίδραση του καναλιού.



Σχήμα 7. Το αριστερό διάγραμμα δείχνει την αντίδραση συχνότητας του καναλιού, και το δεξιό διάγραμμα δείχνει το αντίστοιχο πεδίο της συχνότητας αντίδρασης του ισοσταθμιστή. Σημειώστε ότι η αντίδραση ισοσταθμιστή είναι μεγάλη όταν η αντίδραση καναλιού είναι μικρή προκειμένου να αντισταθμίσει την επίδραση ενός μηδενικού καναλιού.

2.8 COFDM: Κωδικοποιημένο OFDM

Κωδικοποιημένο OFDM, ή COFDM, είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για ένα σύστημα στο οποίο οι διαδικασίες διαμόρφωσης, κωδικοποίησης, ελέγχου σφαλμάτων και της OFDM λειτουργούν και συνεργάζονται στενά. Ένα σημαντικό βήμα σε ένα σύστημα COFDM είναι να εναλλάσσει και να κωδικοποιήσει τα κομμάτια πριν από το IFFT. Το βήμα αυτό εξυπηρετεί το σκοπό της λήψης παρακείμενων κομματιών στα δεδομένα του σήματος και τη διάδοσή τους σε όλους τους πολλαπλούς υπομεταφορείς.

Ένας ή περισσότεροι υπομεταφορείς μπορεί να χαθούν ή να εξασθενίσουν και η απώλεια αυτή θα μπορούσε να προκαλέσει ένα συνεχόμενο ρεύμα σφαλμάτων κομματιών.

Μια τέτοια έντονη συσσώρευση σφαλμάτων είναι τυπικά δύσκολο να διορθωθεί. Η πολύπλεξη στον πομπό διαμοιράζει τα συνεχόμενα κομμάτια, έτσι ώστε τα σφάλματα κομματιών να γίνονται κατανεμημένα σε όλο το εύρος της μετάδοσης. Αυτή η διασπορά του διαστήματος διευκολύνει τον αποκωδικοποιητή να διορθώσει τα λάθη. Ένα άλλο σημαντικό βήμα σε ένα σύστημα COFDM είναι να χρησιμοποιηθούν οι πληροφορίες καναλιών από τον ισοσταθμιστή για να καθορίσει την αξιοπιστία των λαμβανόμενων κομματιών. Οι τιμές της απόκρισης του ισοσταθμιστή χρησιμοποιούνται για να συμπεράνουμε την αντοχή των λαμβανόμενων υπομεταφορέων. Για παράδειγμα, αν η απόκριση ισοσταθμιστή είχε μια μεγάλη τιμή σε μια ορισμένη συχνότητα, αντιστοιχείται σε μια μηδενική συχνότητα σε εκείνο το σημείο στο κανάλι. Η απόκριση ισοσταθμιστή θα είχε μια μεγάλη τιμή σε αυτό το σημείο, επειδή προσπαθεί να αντισταθμίσει το χαμηλής ισχύος λαμβανόμενο σήμα.

Αυτές οι πληροφορίες αξιοπιστίας μεταφέρονται προς τα τμήματα αποκωδικοποίησης έτσι ώστε μπορούν κατάλληλα να σταθμίσουν τα κομμάτια κατά τη λήψη αποφάσεων αποκωδικοποίησης. Στην περίπτωση μιας μηδενικής συχνότητας, τα κομμάτια θα χαρακτηρίζονταν ως «χαμηλής αξιοπιστίας» και εκείνα τα κομμάτια δεν θα σταθμίζονταν τόσο βαριά όσο τα κομμάτια από έναν ισχυρό υπομεταφορέα. Τα συστήματα COFDM είναι σε θέση να επιτύχουν την άριστη απόδοση στα εκλεκτικά κανάλια συχνότητας λόγω των συνδυασμένων οφελών της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης πολυμεταφορέα.

2.9 Μη ιδανικά αποτελέσματα σε ένα σύστημα OFDM

Σε αυτή η ενότητα εξετάζουμε τις επιπτώσεις των μη ιδανικοτήτων σε ένα σύστημα OFDM. Οι επιπτώσεις αυτές περιλαμβάνουν απομειώσεις και μετατοπίσεις του σήματος στον δέκτη. Επειδή ο μετασχηματισμός Fourier είναι μια θεμελιώδης λειτουργία σε OFDM, τα αποτελέσματα των διαφόρων μετατοπίσεων μπορούν να γίνουν κατανοητά διαισθητικά με την εφαρμογή της θεωρίας μετασχηματισμού Fourier.

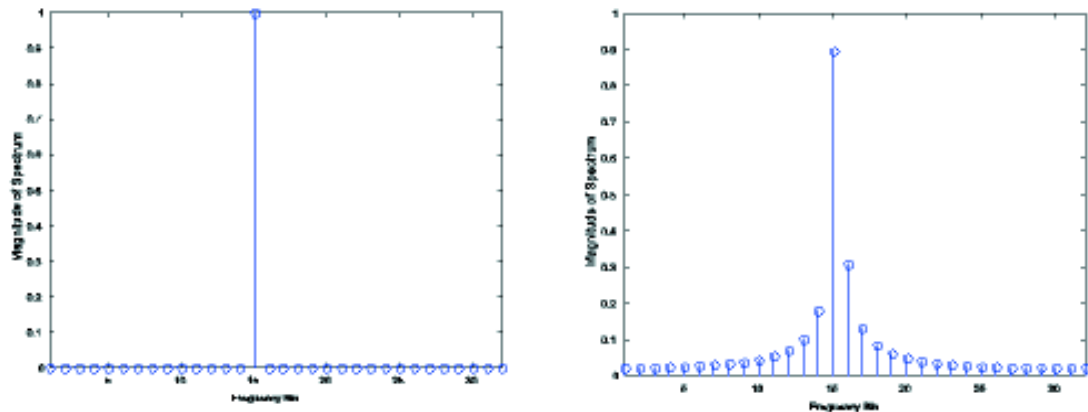
2.10 Συχνότητα του τοπικού ταλαντωτή offset

Κατά την εκκίνηση, η τοπική συχνότητα ταλαντωτών (LO) στο δέκτη είναι χαρακτηριστικά διαφορετική από τη συχνότητα LO στον πομπό. Ένας βρόχος εντοπισμού μεταφορέα χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τη συχνότητα LO του δέκτη, ώστε να ταιριάζει με τη συχνότητα LO του πομπού όσο το δυνατόν περισσότερο. Η επίδραση της ύπαρξης μιας LO συχνότητας μετατόπισης μπορεί να εξηγηθεί από τη θεωρία Μετασχηματισμού Fourier. Η μετατόπιση LO μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με τον πολλαπλασιασμό του λαμβανόμενου σήματος στο πεδίο του χρόνου με έναν σύνθετο εκθέτη του οποίου η συχνότητα είναι ίση με το ποσό μετατόπισης LO. Γνωρίζουμε από τη θεωρία μετασχηματισμού Fourier ότι ο πολλαπλασιασμός από έναν σύνθετο εκθέτη στο πεδίο του χρόνου είναι ισοδύναμος με μια μετατόπιση στο πεδίο της συχνότητας. Η LO offset οδηγεί σε μία μετατόπιση συχνότητας του λαμβανόμενου φάσματος του σήματος. Η μετατόπιση αυτή προκαλεί μια κατάσταση που ονομάζεται «απώλεια ορθογωνιότητας». Η μετατόπιση συχνότητας προκαλεί απώλεια της ορθογωνιότητας των υπομεταφορέων του OFDM.

Η ορθογωνιότητα των υπομεταφορέων χάνεται επειδή τα ελάχιστα του FFT δεν είναι πλέον ευθυγραμμισμένα με τις κορυφές του λαμβανόμενου σήματος από τους παλμούς. Το αποτέλεσμα είναι μια παραμόρφωση που ονομάζεται inter-bin παρεμβολή ή IBI. Το IBI συμβαίνει όταν η ενέργεια από το ένα δοχείο χύνεται πάνω στα παρακείμενα δοχεία και αυτή η ενέργεια στρεβλώνει τους επηρεαζόμενους υπομεταφορείς. Στη θεωρία Μετασχηματισμού Fourier αυτή η επίδραση καλείται παραμόρφωση DFT. Το αριστερό διάγραμμα του σχήματος 8 παρουσιάζει το φάσμα ενός λαμβανόμενου σήματος OFDM χωρίς το offset LO. Για απλότητα παρουσιάζεται μόνο ένας μη μηδενικός υπομεταφορέας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτός ο υπομεταφορέας δεν παρεμβαίνει με τους παρακείμενους υπομεταφορείς του. Το φάσμα του μη μηδενικού υπομεταφορέας εκτείνεται ουσιαστικά σε όλο το εύρος του FFT, ωστόσο, λόγω της ορθογώνια φύσης του σήματος, οι μηδενικές διελεύσεις του φάσματος ακριβώς ευθυγραμμίζονται με τα άλλα δοχεία FFT. Το δεξιό διάγραμμα του σχήματος 8 δείχνει το λαμβανόμενο φάσμα του ίδιου σήματος με έναν μη μηδενικό υποφορέα, ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μια μετατόπιση του LO. Αυτή η μετατόπιση έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της ορθογωνιότητας, και οι μηδενικές διελεύσεις του φάσματος του μη μηδενικού υποφορέα είναι δεν είναι πλέον ευθυγραμμισμένες με τα δοχεία FFT. Το αποτέλεσμα είναι ότι η ενέργεια από το μη μηδενικό υποφορέα απλώνεται μεταξύ όλων των άλλων υπομεταφορέων, με εκείνους τους υπομεταφορείς πλησιέστερα προς το μη μηδενικό υποφορέα να λαμβάνουν πιο πολλές παρεμβολές.

Αυτό το απλό παράδειγμα αφορά την περίπτωση μόνο ενός μη μηδενικού υπομεταφορέα. Σε ένα πρακτικό σύστημα, σχεδόν όλοι οι υπομεταφορείς θα χρησιμοποιούνταν ενεργά για τη διαβίβαση των δεδομένων. Ένας δεδομένος υπομεταφορέας θα βίωνε IBI λόγω της ενέργειας από όλους τους άλλους ενεργούς υπομεταφορείς στο σύστημα. Το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα της θεωρίας των πιθανοτήτων, δηλώνει ότι το άθροισμα ενός μεγάλου αριθμού τυχαίων διαδικασιών θα οδηγήσει σε ένα σήμα που έχει μια γκαουσσισιανή μορφή. Ακολουθεί δηλαδή την Κανονική Κατανομή. Λόγω αυτής της ιδιοτητάς, το IBI θα εκδηλωθεί ως πρόσθετος γκαουσσισιανός θόρυβος, μειώνοντας κατά συνέπεια τον χρήσιμο σηματοθορυβικό λόγο (SNR) του συστήματος. Η επίδραση μιας συχνότητας offset LO μπορεί να διορθωθεί από τον πολλαπλασιασμό του σήματος με ένα συντελεστή διόρθωσης. Ο διορθωτικός συντελεστής είναι ημιτονοειδής με συχνότητα που είναι ιδανικά ίση με το ποσό συχνότητας offset LO. Διάφοροι αλγόριθμοι εντοπισμού μεταφορέα υπάρχουν που μπορούν να καθορίσουν προσαρμοστικά τη συχνότητα που διορθώνει για τη μετατόπιση.



Σχήμα 8. Λαμβανόμενο φάσμα με έναν μη μηδενικό υπομεταφορέα. Το αριστερό διάγραμμα είναι για την περίπτωση που δεν υπάρχει μετατόπιση LO, και το δεξιό διάγραμμα είναι για την παρουσία μιας μετατόπισης LO.

2.11 LO μετατόπιση φάσης

Εκτος της συχνότητας LO offset είναι επίσης δυνατόν να παρουσιαστεί και μια επιπλέον LO μετατόπιση φάσης. Οι δύο αυτές μετατοπίσεις μπορούν να εμφανιστούν σε συνδυασμό ή ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Όπως υποδηλώνει το όνομα, μια μετατόπιση φάσης LO εμφανίζεται όταν υπάρχει μια διαφορά μεταξύ της φάσης της LO εξόδου και της φάσης του λαμβανόμενου σήματος. Αυτή η επίδραση μπορεί εκφραστεί απο μαθηματική άποψη με τον πολλαπλασιασμό του σήματος στο πεδίου του χρόνου, από ένα σύνθετο εκθετικό παράγοντα με σταθερή φάση. Το αποτέλεσμα είναι μια σταθερή περιστροφή φάσης για όλους τους υπομεταφορείς στο πεδίο συχνότητας.

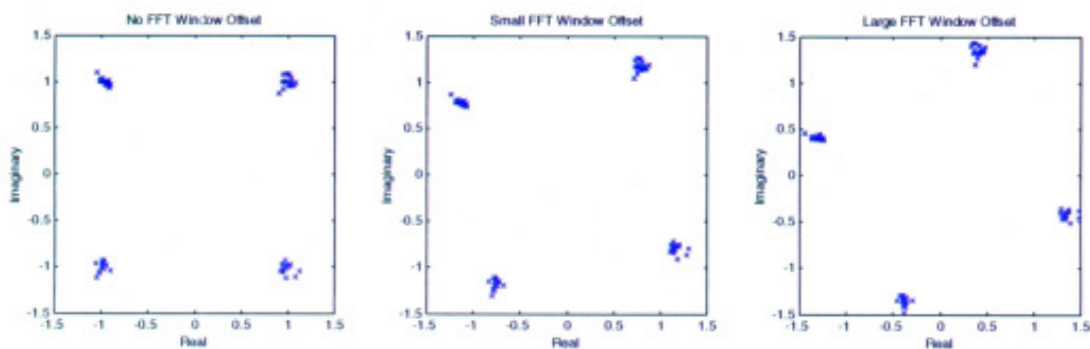
Ο κάθε υποφορέας υπόκειται στον ίδιο βαθμό περιστροφής. Εάν η περιστροφή φάσης είναι μικρή, ο ισοσταθμιστής πεδίου συχνότητας μπορεί να διορθώσει αυτήν την επίδραση. Κάθε συντελεστής φίλτρου σε έναν ισοσταθμιστή πεδίου συχνότητας πολλαπλασιάζει τον αντίστοιχο υπομεταφορέα του με ένα σύνθετο κέρδος (δηλ., κλιμάκωση πλάτους και περιστροφή φάσης). Οι συντελεστές του ισοσταθμιστή χρησιμοποιούντε για να διορθώσουν μια μικρή περιστροφή φάσης, εφόσον η περιστροφή δεν προκαλεί τα σημεία σχηματισμού να περιστραφούν πέρα από τις περιοχές απόφασης σύμβολου. Οι μεγαλύτερες περιστροφές φάσης ,εφόσον εμφανιστούν διορθώνονται από έναν βρόχο παρακολούθησης.

2.12 Offset θέσης παραθύρου FFT

Ένα άλλο μη επιθυμητό αποτέλεσμα που μπορεί να συμβεί σε ένα πραγματικό σύστημα OFDM είναι μία offset (αντιστάθμιση) της θέσης παραθύρου (window position). Ένα N σημείο του FFT στο δέκτη επεξεργάζεται τα δεδομένα σε κομμάτια των N δειγμάτων τη φορά. Ιδανικά, τα N δείγματα που λαμβάνονται από το FFT αντιστοιχούν στα N δείγματα ενός ενιαίου μεταδιδόμενου συμβόλου OFDM. Στην πράξη, ένας συσχετισμός χρησιμοποιείται συχνά με μια γνωστή ακολουθία bits επικεφαλίδας που βρίσκεται στην αρχή της μετάδοσης. Αυτή η λειτουργία συσχετισμού βοηθά το δέκτη να συγχρονίζεται με τα λαμβανόμενα όρια συμβόλων OFDM του σήματος. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν ανακρίβειες, που εκδηλώνονται ως απόκλιση στη θέση παραθύρου FFT. Εάν η μετατόπιση είναι πολύ μεγάλη, ένα μέρος των N δειγμάτων θα είναι από ένα σύμβολο OFDM, και το υπόλοιπο των δειγμάτων θα είναι από άλλο σύμβολο OFDM. Μια τέτοια κατάσταση θα οδηγούσε σε μια σοβαρή παραμόρφωση των λαμβανόμενων σχηματισμών του υπομεταφορέα. Μια τέτοια μεγάλη μετατόπιση συνήθως δεν προκύπτει, εάν χρησιμοποιείται ένας ισχυρός αλγόριθμος συγχρονισμού. Πιο πιθανό είναι, να προκύψει ένα offset θέσης παραθύρου FFT από λίγα διαδοχικά δείγματα.

Η παρουσία του κυκλικού προθέματος επιτρέπει την παρουσία μιας μικρής μετατόπισης χωρίς να λαμβάνει δείγματα από περισσότερα από ένα OFDM σύμβολα. Ωστόσο, ακόμη και μια μόνο μετατόπιση από ένα δείγμα θα προκαλέσει κάποιο βαθμό παραμόρφωσης. Και πάλι, η επίδραση μπορεί να γίνει κατανοητή από τη θεωρία μετασχηματισμού Fourier. Η μετατόπιση μπορεί να θεωρηθεί ως μια μετατόπιση στον χρόνο. Όσο το offset θέσης παραθύρου FFT δεν υπερβαίνει ένα όριο συμβόλου OFDM, αυτή η μετατόπιση στο χρόνο ισοδυναμεί με μια γραμμικά αυξανόμενη περιστροφή φάσης στους σχηματισμούς του πεδίου συχνότητας. Οι σχηματισμοί στους υπομεταφορείς που αντιστοιχούν στις χαμηλές συχνότητες θα περιστραφούν ελαφρώς, ενώ οι σχηματισμοί στους υπομεταφορείς υψηλότερης συχνότητας θα βιώσουν μια μεγαλύτερη περιστροφή.

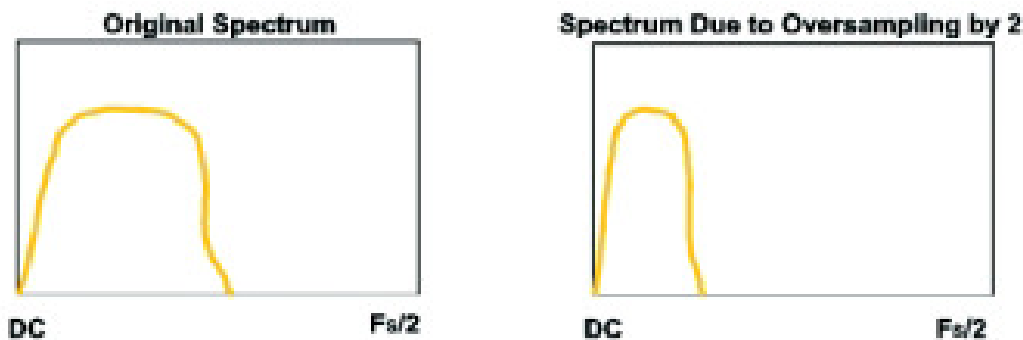
Το ποσό περιστροφής αυξάνεται γραμμικά καθώς η θέση ελαχίστων τιμών του FFT, του υπομεταφορέα αυξάνεται. Τα παραδείγματα των αποτελεσμάτων των διαφορετικών βαθμών offset θέσης παραθύρων FFT παρουσιάζονται στο σχήμα 9. Τα offsets θέσης παραθύρων FFT συχνά διορθώνονται με την εκτέλεση ενός συσχετισμού στο πεδίο χρόνου με μια γνωστή ακολουθία κατάρτισης που ενσωματώνεται στο μεταδιδόμενο σήμα. Η θέση της αιχμής του συσχετισμού επιτρέπει στο δέκτη να συγχρονιστεί με το εισερχόμενο σήμα.



Σχήμα 9. Επίδραση των διαφορετικών offset παραθύρων FFT.

2.13 Δειγματοληψία offset συχνότητας

Μια άλλη ενδεχομένως επιβλαβής κατάσταση είναι η παρουσία μιας offset συχνότητας δειγματοληψίας. Αυτή η κατάσταση εμφανίζεται όταν ο μετατροπέας A/D δειγματοληπτείται είτε πολύ αργά είτε πολύ γρήγορα. Γνωρίζουμε ότι $f_s / 2$ είναι η υψηλότερη δυνατή συχνότητα σε διακριτό χρόνο όπου f_s είναι η συχνότητα δειγματοληψίας. Κάνοντας δειγματοληψία πάρα πολύ γρήγορα ουσιαστικά αυξάνει την τιμή $f_s / 2$ και το αποτέλεσμα είναι να προκύπτει συμπιεσμένο φάσμα. Ομοίως, κάνοντας δειγματοληψία πολύ αργά μειώνει την αξία της $f_s / 2$, και καταλήγει σε ένα διευρυμένο φάσμα. Κάθε τύπος συχνότητας δειγματοληψίας offset οδηγεί σε IBI δεδομένου ότι η επέκταση ή συρρίκνωση του φάσματος εμποδίζει τους λαμβανόμενους υπομεταφορείς να ευθυγραμμιστούν με τις θέσεις δοχείων FFT. Η επίδραση της δειγματοληψίας πάρα πολύ γρήγορα απεικονίζεται στο σχήμα 10 και τα αποτελέσματα προσομοίωσης για αποδείξουν αυτό το αποτέλεσμα φαίνονται στο Σχήμα 11.



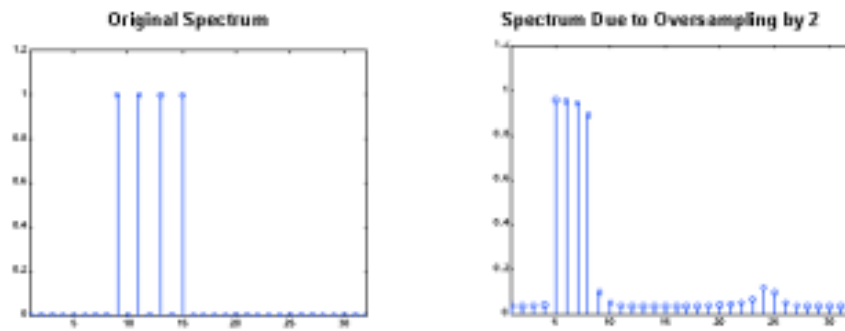
Σχήμα 10. Απεικόνιση της επίδρασης της συχνότητας δειγματοληψίας offset.

2.3.1 Ενιαίος θόρυβος

Ο προσθετικός λευκός γκαουσιανός θόρυβος (AWGN) είναι η πιο κοινή δυσλειτουργία που αντιμετωπίζεται σε ένα σύστημα επικοινωνιών. Σε ένα ασύρματο μέσο, η πηγή θορύβου συνήθως θεωρείται θερμικός θόρυβος που είναι γκαουσιανός και ομοιόμορφος σε όλο το φάσμα συχνοτήτων. Οι πρόσθετες πηγές θορύβου περιλαμβάνουν τις ατμοσφαιρικές πηγές και την ηλιακή ακτινοβολία. Σε ενσύρματα μέσα, όπως ένα ομοαξονικό καλωδιακό σύστημα, ο θερμικός θόρυβος είναι παρών, αλλά το σύστημα μπορεί επίσης να έχει και άλλες πηγές που μπορούν να αυξήσουν το θόρυβο στο σύστημα.

Η επίδραση AWGN σε ένα σύστημα OFDM είναι παρόμοια με την επίδρασή της σε ένα ενιαίο σύστημα μεταφορών.

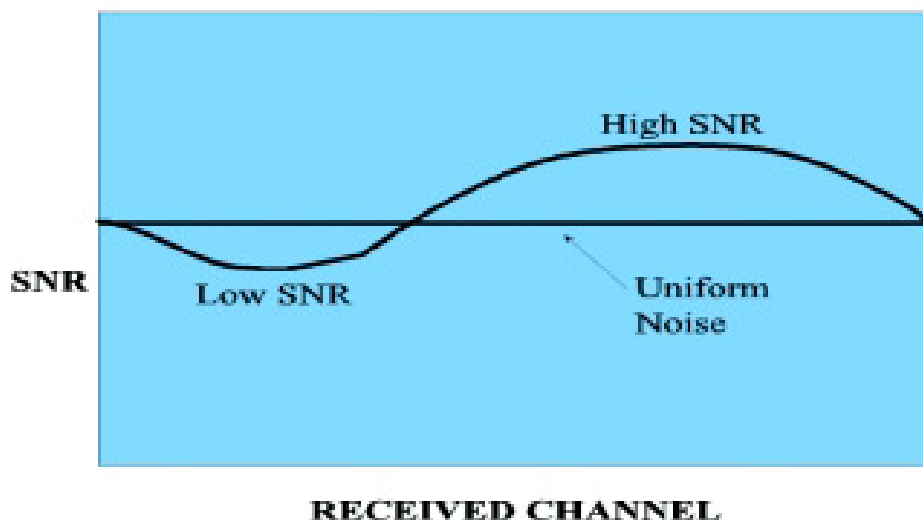
Ο ομοιόμορφος θόρυβος συμβάλλει στο SNR κάθε υπομεταφορέα στο σύστημα OFDM και το τελικό αποτέλεσμα είναι ισοδύναμο με την επίδραση στα συστήματα ενιαίων καναλιών.



Σχήμα 11. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που δείχνουν την επίδραση της συχνότητας δειγματοληψίας που είναι πάρα πολύ υψηλή. Σημειώστε ότι το δείγμα που ήταν αρχικά στο δοχείο 15 είναι τώρα στο δοχείο 8.

2.13.2 Μη ενιαίος θόρυβος

Ο θόρυβος σε ένα κανάλι επικοινωνιών έχει συχνά πολλές αιτίες. Οι αιτίες αυτές περιλαμβάνουν τις ατέλειες σημάτων μετάδοσης, τα χαρακτηριστικά καναλιών μετάδοσης, ή τη διαμόρφωση συχνότητας δεκτών. Οι επιπτώσεις αυτών των αποτελεσμάτων για ένα σύστημα OFDM μπορούν να είναι διαφορετικές σε σύγκριση με τον αντίστοιχο ενιαίο μεταφορέα της. Η διαμόρφωση του συστήματος OFDM μπορεί να προσαρμοστεί για τα χαρακτηριστικά θορύβου. Μια μέθοδος που αναφέρθηκε προηγουμένως περιλαμβάνει τη μείωση της διαφοροποίησης (αριθμός κομματιών/σύμβολο) στους υπομεταφορείς σε ένα χαμηλό περιβάλλον SNR όπως απεικονίζεται στο σχήμα 12. Μία άλλη μέθοδος περιλαμβάνει την αποστολή των ίδιων δεδομένων σε πολλούς υπομεταφορείς, ή την αποστολή δεδομένων που μπορεί να θεωρηθούν μικρότερης προτεραιότητας. Σε ακραίες περιπτώσεις, οι υπομεταφορείς δεν μπορούν να διαβιβάσουν κανένα δεδομένο, κλείνοντας τους ουσιαστικά.



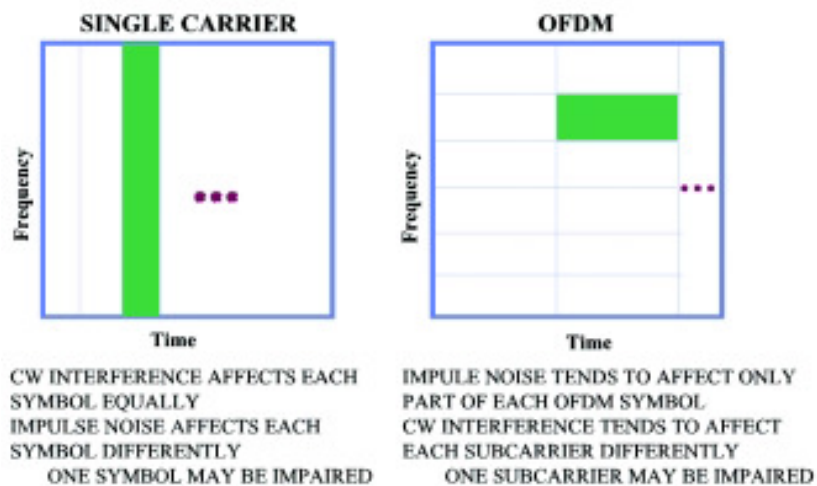
Σχήμα 12. Ενιαίος και μη ενιαίος θόρυβος και SNR. OFDM μπορεί να προσαρμόσει τη διαμόρφωσή του στη μορφή του φάσματος θορύβου.

2.13.3 Παλμικός θόρυβος

Ο παλμικός θόρυβος είναι μια κοινή δυσλειτουργία σε ένα σύστημα επικοινωνιών που προκύπτει από κινητήρες ή κεραυνό. Ο παλμικός θόρυβος τυπικά χαρακτηρίζεται ως μια σύντομη έκρηξη στο πεδίο του χρόνου της ενέργειας. Η έκρηξη μπορεί να είναι επαναλαμβανόμενη ή μπορεί να είναι ένα μεμονωμένο γεγονός. Σε κάθε περίπτωση, το φάσμα συχνότητας από αυτή την έκρηξη ενέργειας είναι ευρείας ζώνης, συνήθως πολύ ευρύτερη από ό, τι το κανάλι, αλλά είναι παρόν μόνο για ένα μικρό χρονικό διάστημα.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει οι ιδιότητες του OFDM σχετίζονται με τον αλγόριθμο μετασχηματισμού FFT, ο οποίος αλλάζει τη φύση του σήματος. Σε ένα σύστημα ενιαίου μεταφορέα, το σύμβολο μπορεί να θεωρηθεί ότι καταλαμβάνει όλο το διαθέσιμο φάσμα συχνότητας για τη χρονική διάρκεια του συμβόλου. Μια ομάδα συμβόλων καταλαμβάνει έπειτα όλο το φάσμα για τη διάρκεια ολόκληρης της ομάδας, αλλά σε μια διάταξη διαίρεσης χρόνου.

Το OFDM, χρησιμοποιώντας το FFT, παίρνει τα σύμβολα και δημιουργεί αυτές τις ομάδες απευθείας και έπειτα τις μετασχηματίζει. Δεν είναι πλέον χρονικού πεδίου πολυπλεκτικές, είναι τώρα πεδίου συχνότητας πολυπλεκτικές. Το σύμβολο OFDM είναι τώρα μια συλλογή αυτών των συμβόλων πηγής, και αυτό το σύμβολο OFDM έχει τώρα μια πολύ μεγαλύτερη διάρκεια. Κάθε αρχικό σύμβολο καταλαμβάνει μόνο μία μικρή περιοχή συχνότητων, αλλά μετά τον μετασχηματισμό καταλαμβάνει την περιοχή αυτή για όλη τη διάρκεια συμβόλου OFDM. Η Εικόνα 13 απεικονίζει αυτή την έννοια. Για τους παλμούς που είναι σύντομοι στη διάρκεια, η ενέργεια παλμού καλύπτει ένα μικρότερο ποσοστό του χρόνου κάθε συμβόλου OFDM σε σύγκριση με την ενιαία περίπτωση μεταφορέων. Ο παλμικός θόρυβος μπορεί επομένως να έχει μικρότερη επίδραση στο σύντομης διάρκειας θόρυβο.



Σχήμα 13. Σύγκριση του ενιαίου φορέα έναντι του φάσματος OFDM.

2.14 Παρεμβολή Μεταφορέα

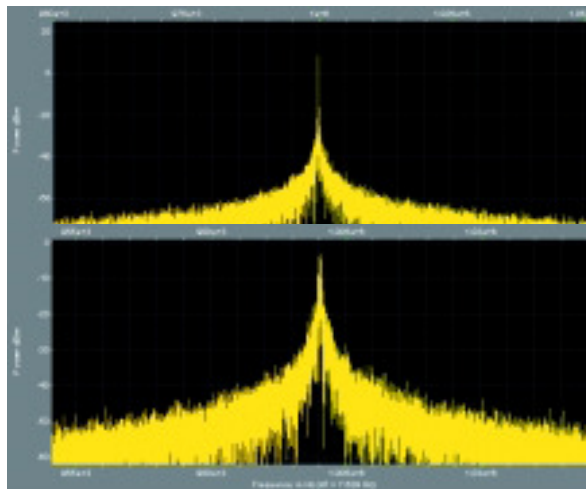
Η παρεμβολή ενιαίου μεταφορέα προκύπτει από άλλες πηγές που μπορεί να συνυπάρχουν στο φάσμα συχνότητας ενδιαφέροντος. Αυτές μπορούν να παραχθούν από τα κοντινά κυκλώματα ή άλλες πηγές μετάδοσης. Το ενιαίο σύστημα μεταφορέων πρέπει να χειριστεί αυτήν την παρεμβολή ως πηγή θορύβου για όλες τις πληροφορίες που στέλνονται. Το

σύστημα OFDM μπορεί να αποφύγει την περιοχή συχνότητας της παρεμβολής με το να θέσει εκτός λειτουργίας ή να κλείσει τους επηρεασμένους υπομεταφορείς. Οι διαμορφωμένες περιορισμένης ζώνης πηγές παρεμβολής μπορούν να θεωρηθούν παρόμοιες με την παρεμβολή μεταφορέων στην εξασθένησή τους.

2.14.1 Θόρυβος φάσης

Θόρυβος μπορεί επίσης να προστεθεί στο σήμα μέσω του σταδίου μετατροπής συχνότητας. Ο τοπικός ταλαντωτής που χρησιμοποιείται στο μετατροπέα έχει εγγενώς κάποιο θόρυβο φάσης (αβεβαιότητα της πραγματικής συχνότητας ή φάση του σήματος) που μεταφέρεται στο επιθυμητό σήμα. Το σχήμα 14 δείχνει την επίδραση του θορύβου φάσης σε έναν τοπικό ταλαντωτή. Ο θόρυβος φάσης διαμορφώνεται και συγκεντρώνεται κυρίως κοντά στο μεταφορέα (ή την κεντρική συχνότητα) του σήματος.

Ένα σύνολο σημάτων OFDM περιέχει πολλαπλούς υπομεταφορείς, καθένας από τους οποίους είναι ένα μικρότερο ποσοστό του συνολικού εύρους ζώνης συχνότητας από ό, τι σε ένα ενιαίο σύστημα μεταφορέα. Κατά συνέπεια, η φάση του θορύβου είναι ένα μικρότερο ποσοστό του εύρους ζώνης σε ένα ενιαίο σύστημα μεταφορέα. Για το λόγο αυτό, ο θόρυβος φάσης υποβιβάζει την απόδοση ενός συστήματος OFDM περισσότερο απ' ό, τι σε ένα ενιαίο σύστημα μεταφορέων. Τα αποτελέσματα θορύβου φάσης σε ένα σύστημα OFDM μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: θόρυβος φάσης που διατηρείται μέσα σε ένα διάστημα υπομεταφορέων, και θόρυβος φάσης που επεκτείνεται στα διαστήματα υπομεταφορέων. Ο θόρυβος φάσης που επεκτείνεται στα διαστήματα υπομεταφορέων θεωρείται ακραίος και οδηγεί σε λάθη αποδιαμόρφωσης. Ο θόρυβος φάσης μέσα σε ένα διάστημα υπομεταφορέων έχει ουσιαστικά μια παρόμοια αλλά κλιμακωτή επίδραση όσον αφορά το ενιαίο σύστημα μεταφορέων. Ο θόρυβος φάσης οδηγεί στην αβεβαιότητα φάσης στο σημείο σχηματισμού παράγοντας ένα τοξοειδές σχέδιο θορύβου στον σχηματισμό κάθε υπομεταφορέα.



Σχήμα 14. Θόρυβος φάσης σε ένα LO. Η πάνω εικόνα δείχνει ένα σήμα με πολύ λίγο θόρυβο φάσης, και η κάτω εικόνα δείχνει ίδιο σήμα με το θόρυβο φάσης προστιθέμενο

Προκειμένου να ενισχυθεί το σύστημα OFDM να χειριστεί το θόρυβο φάσης, χρησιμοποιούνται συχνά πειραματικοί υπομεταφορείς. Αυτοί οι πειραματικοί υπομεταφορείς παράγονται από το IFFT και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν μια σταθερή αναφορά φάσης για τα στοιχεία κυκλώματος δεκτών. Η προσθήκη αυτών των δοκιμών χαμηλώνει το διαθέσιμο ποσοστό δεδομένων του συστήματος επειδή αυτοί οι υπομεταφορείς δεν είναι πλέον διαθέσιμοι για να διαβιβάσουν τα δεδομένα.

2.14 Μη γραμμικά κυκλώματα στη συσκευή αποστολής σημάτων και το δέκτη

Όλοι οι πομποί και οι δέκτες στα συστήματα επικοινωνιών περιέχουν συσκευές όπως οι ενισχυτές και οι μίκτες που έχουν μη γραμμικές λειτουργίες μεταφοράς. Αυτές οι μη γραμμικότητες δημιουργούν έναν πρόσθετο περιορισμό απόδοσης. Η απόδοση δεκτών περιορίζεται χαρακτηριστικά από τη παραμόρφωση που παράγεται στον ενισχυτή ή τον μίκτη εισαγωγής παρουσία των ισχυρών ανεπιθύμητων σημάτων. Η απόδοση του πομπού περιορίζεται κυρίως από τη γραμμικότητα των ενισχυτών ισχύος.

Ένα σήμα OFDM αποτελείται από πολλαπλά ταυτόχρονα σήματα που, για μια δεδομένη μέση ισχύ, έχουν ένα πιά υψηλό μέγιστο επίπεδο σημάτων. Τα σήματα OFDM οδηγούν σε μια αύξηση στη μέγιστη-μέση αναλογία (ισοτιμία) του σήματος. Για τα συστήματα πολυμεταφορέων, η αξία ισοτιμίας εκφράζεται μέσω της στατιστικής και της θεωρίας πιθανοτήτων. Η πιθανότητα ότι όλοι οι υπομεταφορείς θα φθάσουν ταυτόχρονα στο μέγιστο εύρος είναι χαμηλή, ακόμα κι αν η ταυτόχρονη μέγιστη αξία εύρους είναι μεγάλη. Αυτά τα πιά υψηλά μέγιστα επίπεδα εύρους θα δημιουργήσουν σοβαρότερη παραμόρφωση από μια ενιαία περίπτωση μεταφορέων ακόμα κι αν τα μέσα επίπεδα ισχύος του καθενός είναι τα ίδια. Η υψηλότερη παραμόρφωση θα αυξήσει το SNR που απαιτείται για να διατηρήσει επαρκή απόδοση. Οι απαιτήσεις γραμμικότητας και στο δέκτη και στον πομπό πρέπει να ρυθμιστούν ή «να υπαναχωρηθούν» για να δικαιολογήσουν αυτήν την αύξηση στην αξία ισοτιμίας. Η αξία ισοτιμίας, και επίσης το ποσό αποζημίωσης γραμμικότητας, θα εξαρτηθεί από έναν αριθμό παραμέτρων συμπεριλαμβανομένου του αριθμού υπομεταφορέων και του επιπέδου του SNR που πρέπει να διατηρηθούν.

2.15 Σύγχρονες εφαρμογές

Το σύστημα OFDM έχει επιλεγεί για πολλά τρέχοντα και μελλοντικά συστήματα επικοινωνιών σε όλο τον κόσμο. Είναι καλά προσαρμοσμένο για συστήματα στα οποία τα χαρακτηριστικά του καναλιού το καθιστούν δύσκολο να διατηρηθεί επαρκής απόδοση συνδέσεων επικοινωνιών. Η ασύγχρονη ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (ADSL) παραδείγματος χάριν, είναι μια μέθοδος μετάδοσης δεδομένων υψηλής ταχύτητας μέσω της τηλεφωνικής γραμμής. Το σύστημα χρησιμοποιεί OFDM τεχνικές, καλώντας την διακύμανση τους διακριτή πολυτονική DMT (Discrete MultiTone). Το DMT περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που επιτρέπουν την απομάκρυνση των υπομεταφορέων και για τη ρύθμιση του σχήματος διαμόρφωσης (από 1 έως 15 μπιτ ανά σύμβολο) σε μια βάση ανά υπομεταφορέα για να ταιριάζουν καλύτερα τα χαρακτηριστικά καναλιών μετάδοσης. Το σύστημα επιτρέπει επίσης τη «δυναμική κατανομή» αυτών των παραμέτρων.

Η Ευρωπαϊκή ψηφιακή τηλεόραση βασίζεται στην DVB-T ((ψηφιακή τηλεοπτική ραδιοφωνική μετάδοση- επίγεια) πρότυπο που χρησιμοποιεί είτε 2048 (2K) ή 8192 (8K) υπομεταφορέων μέσα σε ένα τυποποιημένο τηλεοπτικό κανάλι 8 MHz. Οι προδιαγραφές του συστήματος και η κωδικοποίηση σχεδιάστηκαν ειδικά για να επιτρέπουν την σηματοδότηση πολλαπλού αναμεταδότη που δημιουργεί σήματα διακαναλικά. Οι συζητήσεις βρίσκονται σε εξέλιξη στις ΗΠΑ για να εξετάσουν ένα παρόμοιο σύστημα και η Ιαπωνία είναι κοντά στην υιοθέτηση ενός παρόμοιου πρότυπου για το μελλοντικό τους ψηφιακό σύστημα τηλεοπτικής μετάδοσης.

Η επόμενη γενιά της ραδιοφωνικής εκπομπής μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει τις τεχνικές OFDM. Στις ΗΠΑ, το σύστημα υπό εξέταση αρχικά «θα συνυπάρξει» στην ίδια υποδοχή συχνότητας με την τρέχουσα αναλογική μετάδοση. Η OFDM επιτρέπει στους σχεδιαστές συστημάτων να διαμορφώσουν το ψηφιακό φάσμα απενεργοποιώντας τους υπομεταφορείς που αντιστοιχούν στο τρέχον αναλογικό φάσμα κατά τη διάρκεια της περιόδου συνύπαρξης. Μετά από την περίοδο συνύπαρξης οι υπομεταφορείς μπορούν να επιτραπούν και το επόμενο ποσοστό δεδομένων να αυξηθεί.

Διάφορα υψηλής ταχύτητας πρότυπα ασύρματης δικτύωσης στην περιοχή συχνοτήτων 5 GHz υιοθετούν τη διαμόρφωση OFDM. Το Αμερικάνικο IEEE 802.11a και τα Ευρωπαϊκά πρότυπα ETSI Hiperlan/2 χρησιμοποιούν παρόμοιες φυσικές δομές στρώματος με 64 το μεταφορέα OFDM και τη διαμόρφωση που κυμαίνεται από BPSK ως 64-QAM ανά υπομεταφορέα. Τα διάφορα ποσοστά δεδομένων από 6 έως 54 Mbps είναι πιθανά. OFDM λειτουργεί καλά στα περιβάλλοντα σπιτιών και γραφείων για το χειρισμό των αντανακλάσεων τοίχων και της μετακίνησης μέσα στη δομή.

2.16 Συμπεράσματα

Οι τεχνικές OFDM γίνονται γρήγορα μια δημοφιλής μέθοδος για τα προηγμένα δίκτυα επικοινωνιών. Οι πρόοδοι στην τεχνολογία VLSI το έχουν καταστήσει πιθανό να εφαρμόσουν αποτελεσματικά έναν φραγμό FFT στο υλικό. Παρά τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει το OFDM, το υλικό για να την υλοποίησή του μπορεί ακόμα να αποτελέσει ένα αρκετά μεγάλο και ακριβό μέρος του σχεδιασμού. Εντούτοις, για ορισμένα συστήματα, οι σύγχρονες τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακού σήματος το καθιστούν πολύ πιθανή και αποτελεσματική λύση ως ένα σύστημα διαμόρφωσης για την βελτίωση της αξιοπιστίας της σύνδεσης επικοινωνιών.

2.17 Περιγραφή της Ορθογωνίας συχνότητας πολυπλεξίας (OFDM)

Ως Διαμόρφωση μπορούμε να ορίσουμε μια χαρτογράφηση των πληροφοριών για τις αλλαγές στη φάση του φέροντος (μεταφορέα), τη συχνότητα ή την ένταση ή τον συνδυασμό αυτών. Με τον όρο Πολυπλεξία εννοούμε μια μέθοδος διαμοιρασμού ενός εύρου ζώνης με άλλα ανεξάρτητα κανάλια δεδομένων.

Η OFDM είναι ένας συνδυασμός της διαμόρφωσης και πολυπλεξίας. Η πολυπλεξία αναφέρεται γενικά σε ανεξάρτητα σήματα, αυτά που παράγονται από διαφορετικές πηγές. Έτσι είναι ένα θέμα για το πώς να μοιραστεί το φάσμα με αυτούς τους χρήστες. Στην OFDM η διαδικασία της πολυπλεξίας εφαρμόζεται ανεξάρτητα σήματα, αλλά αυτά τα ανεξάρτητα

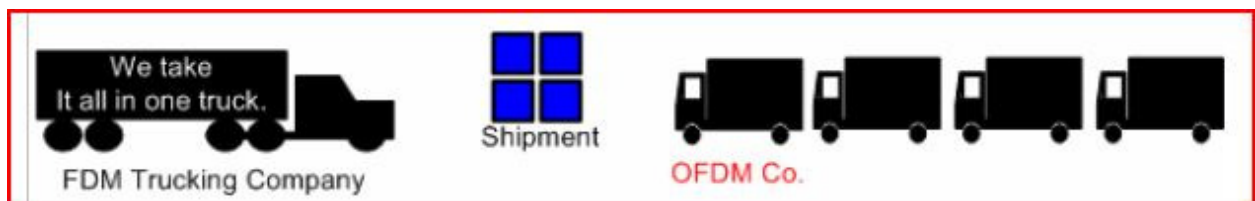
σήματα είναι ένα υποσύνολο του ενός κύριου σήματος. Στην OFDM το ίδιο το σήμα πρώτα χωρίζεται σε ανεξάρτητα κανάλια, διαμορφώνεται από τα δεδομένα και έπειτα ξανά πολυπλέκεται για να δημιουργήσει το μεταφορέα OFDM.

Η OFDM είναι μια πρόσθετη περίπτωση της πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας FDM (Frequency Division Multiplex). Αναλογικά, ένα κανάλι FDM είναι όπως η ροή του νερού από μια βρύση, αντίθετα το σήμα OFDM είναι όπως ένα ντους. Σε μια βρύση όλο το νερό έρχεται σε ένα μεγάλο ρεύμα και δεν μπορεί να υποδιαιρεθεί. Το ντους OFDM αποτελείται από πολλά μικρά ρεύματα.



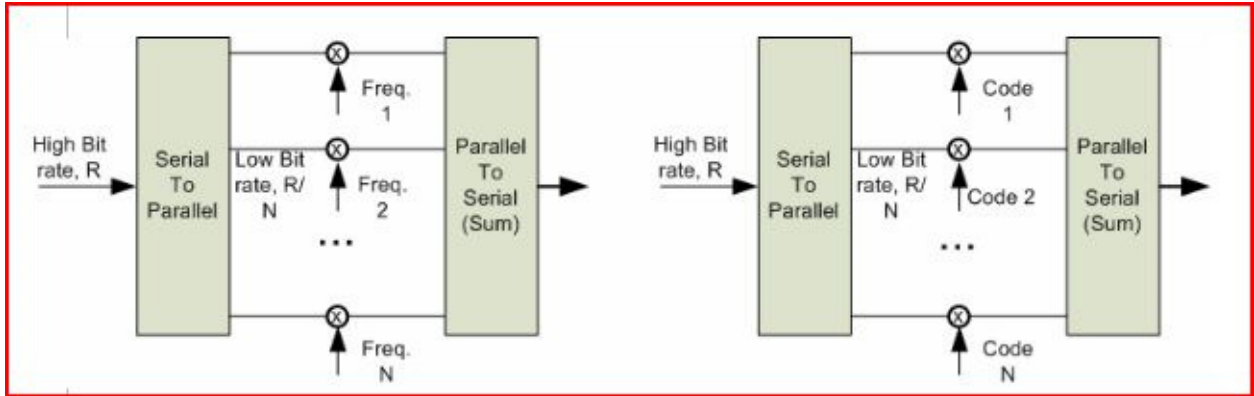
Σχήμα 15. (α) ένας κανονικός ενιαίος μεταφορέας -FDM – ολόκληρη μια δέσμη του νερού που έρχεται όλη σε ένα ρεύμα. (β) ορθογώνιος-FDM – ίδια ποσότητα του νερού που προέρχεται από πολλά μικρά ρεύματα.

Χρησιμοποιώντας την αναλογία αυτή μπορούμε να εντοπίσουμε το σημαντικότερο πλεονέκτημα της OFDM. Ο προφανής λόγος είναι ότι αν τοποθετήσουμε τον αντίχειρα πάνω από την τρύπα της βρύσης, μπορούμε να σταματήσουμε τη ροή του νερού εντελώς, κάτι που είναι αδύνατο στην περίπτωση του ντους. Έτσι, αν και τα δύο συστήματα κάνουν το ίδιο πράγμα, εντούτοις ανταποκρίνονται διαφορετικά σε παρεμβολές.



Σχήμα 16. – όλο το φορτίο σε ένα φορτηγό εναντίον του διαχωρισμού της αποστολής σε περισσότερους του ενός.

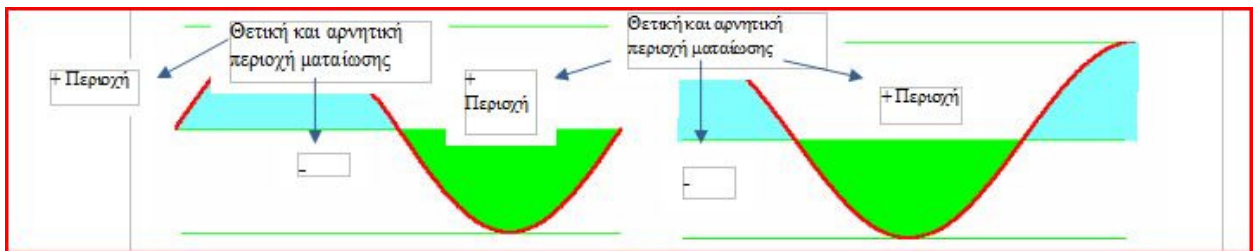
Άλλη μία αναλογία του φυσικού κόσμου , σε σχέση με την λειτουργία της OFDM παρουσιάζεται στο σχήμα 16. Τα τέσσερα μικρότερα φορτηγά όταν τα δούμε ως σήματα , παριστάνουν τους υποφομεταφορείς σε ένα σύστημα OFDM και πρέπει να είναι ορθογώνια για να λειτουργήσει αυτή η ιδέα. Τα ανεξάρτητα υπο-κανάλια μπορούν να πολυπλέκονται με πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM), που ονομάζεται μετάδοση πολυμεταφορέα ή μπορεί να βασίζεται σε μια πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα (CDM), σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται πολυκωδική μετάδοση.



Σχήμα 17. – πολυμεταφορέας FDM και πολυκωδικό τμήμα πολυπλεξίας.

2.18 Η σημασία του να είναι ορθογώνια

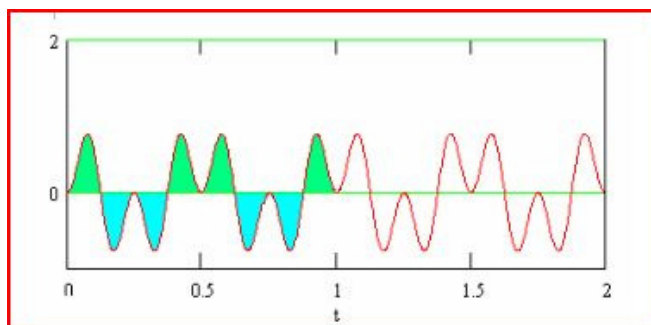
Η κύρια έννοια σε OFDM είναι η ορθογωνιότητα των υπομεταφορέων. Εφόσον οι μεταφορείς είναι όλοι ημίτονο/συνημίτονο κύμα, γνωρίζουμε ότι η περιοχή κάτω από μια περίοδο ημιτόνου ή κύματος συνημιτόνου είναι μηδέν. Αυτή η ιδιότητα παρουσιάζεται στο σχήμα 18.



Σχήμα 18. - Η περιοχή κάτω από ένα ημίτονο και ένα κύμα συνημιτόνου πάνω από μια περίοδο είναι πάντα μηδέν.

Θεωρούμε ένα ημιτονοειδές κύμα συχνότητας m και το πολλαπλασιάσουμε με ένα ημιτονοειδή (ημίτονο ή ένα συνημίτονο) μιας συχνότητας n , όπου τα m και το n είναι ακέραιοι αριθμοί. Το ολοκλήρωμα ή η περιοχή κάτω από αυτό το γινόμενο δίνεται από την σχέση :

$$f(t) = \sin \pi m t * \sin \pi n t$$



Σχήμα 19. - η περιοχή κάτω από ένα κύμα ημιτόνου που πολλαπλασιάζεται με την αρμονική της είναι πάντα μηδέν.

Με την απλή τριγωνομετρική σχέση, αυτή είναι ίση με το άθροισμα δύο ημιτονοειδών συχνοτήτων $(n - m)$ και $(n + m)$

$$= \frac{1}{2} \cos(m - n) - \frac{1}{2} \cos(m + n)$$

Αυτά τα δύο στοιχεία είναι το κάθε ένα ημιτονοειδής, έτσι το ολοκλήρωμα είναι ίσο με μηδέν πάνω από ένα χρονικό διάστημα.

$$= \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cos(m - n) \omega t - \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cos(m + n) \omega t$$

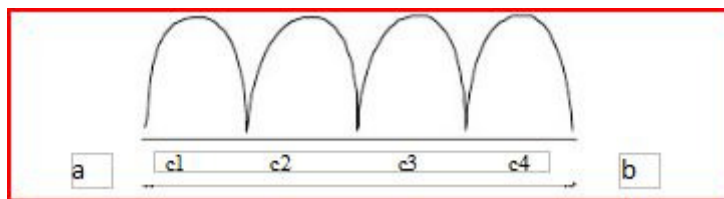
$$= 0 - 0$$

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όταν πολλαπλασιάσουμε μια ημιτονοειδής συχνότητας n με μια ημιτονοειδή συχνότητας m / n , η περιοχή κάτω από το γινόμενο τους είναι μηδέν. Σε γενικές γραμμές για όλους τους ακέραιους αριθμούς n και m , οι όροι $\sin(mx)$, $\cos(mx)$, $\cos(nx)$, $\sin(nx)$ είναι όλοι ορθογώνιοι μεταξύ τους. Οι συχνότητες αυτές ονομάζονται αρμονικές.

Αυτή η ιδέα είναι βασική στην κατανόηση OFDM. Η ορθογωνιότητα επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση σε πολλούς υπομεταφορείς σε ένα μικρό διάστημα συχνότητας χωρίς παρέμβαση μεταξύ τους. Στην ουσία αυτό είναι παρόμοιο με CDMA, όπου οι κώδικες χρησιμοποιούνται για να κάνουν τις ακολουθίες δεδομένων ανεξάρτητες (επίση ζορθογώνιες) όποιος επιτρέπει σε πολλούς ανεξάρτητους χρήστες να διαβιβάζουν στο ίδιο διάστημα επιτυχώς.

Η OFDM είναι μια ειδική περίπτωση του FDM (όπως ακριβώς λέει το όνομά του, OFDM)

Εξετάζουμε αρχικά την λειτουργία της Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας FDM. Εάν έχουμε ένα εύρος ζώνης που πηγαίνει από τη συχνότητα a στη b , μπορούμε να το υποδιαιρέσουμε σε ένα διάστημα συχνότητας τεσσάρων ίσων διαστημάτων. Στο διάστημα συχνότητας οι διαμορφωμένοι μεταφορείς τοποθετούνται διαδοχικά όπως φαίνεται στο σχημα 20.



Σχήμα 20. – οι μεταφορείς FDM τοποθετούνται ο ένας δίπλα στον άλλο.

Οι συχνότητες a και b μπορεί να είναι οποιοσδήποτε, ακέραιος ή μη ακέραιος αριθμός, δεδομένου ότι δεν υπονοείται σχέση μεταξύ των a και b . Το ίδιο ισχύει και για κεντρικές συχνότητες μεταφορέα οι οποίες βασίζονται σε συχνότητες που δεν έχουν καμία ιδιαίτερη σχέση μεταξύ τους.

Αλλά, εάν η συχνότητες c_1 και c_n ήταν τέτοιες που για οποιοδήποτε n , ένας ακέραιος αριθμός, ισχύουν οι σχέσεις :

$$c_n = n * c_1$$

Έτσι ώστε

$$c_2 = 2c_1$$

$$c_3 = 3c_1$$

$$c_4 = 4c_1$$

Και οι τρεις από αυτές τις συχνότητες είναι αρμονικές της c_1 . Σε αυτήν την περίπτωση, δεδομένου ότι αυτοί οι μεταφορείς είναι ορθογώνιοι ο ένας στον άλλο, όταν προστίθενται μαζί, δεν παρεμποδίζουν ο ένας τον άλλο. Σε FDM, δεδομένου ότι δεν έχουμε γενικά τις συχνότητες που ακολουθούν την παραπάνω σχέση, παίρνουμε την παρέμβαση από τους γειτονικούς μεταφορείς.

Το ποσοστό συμβόλων που μπορεί να φερθεί από έναν μεταφορέα PSK του εύρους ζώνης b , δίνεται από την σχέση :

$$R_s = 2B_i = B_p$$

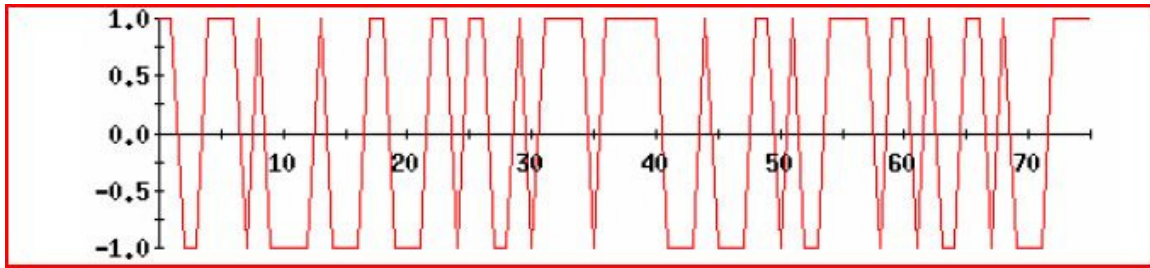
όπου B_i είναι το εύρος ζώνης χαμηλής διέλευσης και η B_p , το εύρος ζώνης διέλευσης ζώνης. Αυτή η σχέση υποθέτει ένα τέλειο φιλτράρισμα Nyquist με μείωση = 0.0. Δεδομένου ότι αυτό είναι ανεπίτευκτο, χρησιμοποιούμε αυξημένη ρίζα φιλτραρίσματος συνημιτόνου που για μια μείωση α δίνει την ακόλουθη σχέση:

$$R_s = \frac{B_p}{1 + \alpha}$$

Έτσι εάν χρειαζόμαστε τρεις μεταφορείς, κάθε έναν με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων $R_s = 20$ Mbps, τότε θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε τους μεταφορείς μιας BPSK όπως φαίνεται στο σχήμα 21. Με $R_s = 20$ και $B = 20 \times 1.25 = 25$ MHz. Κάθε μεταφορέας μπορεί να τοποθετηθεί (25 + 2.5) 27.5 MHz ξεχωριστά επιτρέποντας μια ζώνη φύλαξης 10%. Οι συχνότητες δεν θα είναι ορθογώνιες, αλλά στο FDM, η ορθογωνιότητα δεν αποτελεί ζητούμενο. Είναι η ζώνη προστασίας που βοηθά να διατηρηθεί η παρεμβολή υπό έλεγχο.

Σε OFDM που έχουμε τους N μεταφορείς, το N μπορεί να είναι οπουδήποτε από 16 έως 1024 με την παρούσα τεχνολογία και εξαρτάται από το περιβάλλον στο οποίο το σύστημα θα χρησιμοποιηθεί.

Ας εξετάσουμε την παρακάτω ακολουθία κομματιών που επιθυμούμε να διαβιβάσουμε και να παρουσιάσουμε την ανάπτυξη του σήματος OFDM χρησιμοποιώντας 4 υπομεταφορείς. Το σήμα έχει ένα ποσοστό συμβόλων 1 και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 1 δείγμα ανά σύμβολο, έτσι κάθε μετάβαση είναι ένα κομμάτι.



Σχήμα 21. - Ένα ρεύμα δυαδικών ψηφίων που θα διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας έναν 4 μεταφορέα OFDM.

Τα πρώτα μερικά κομμάτια είναι 1, 1, -1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, 1...

Αν γράψουμε τώρα αυτά τα κομμάτια σε σειρές τετράδων, δεδομένου ότι αυτή η επίδειξη θα χρησιμοποιήσει μόνο τέσσερις υπο-μεταφορείς, πετυχαίνουμε αποτελεσματικά ένα σειριακό σε παράλληλο μετατροπέα.

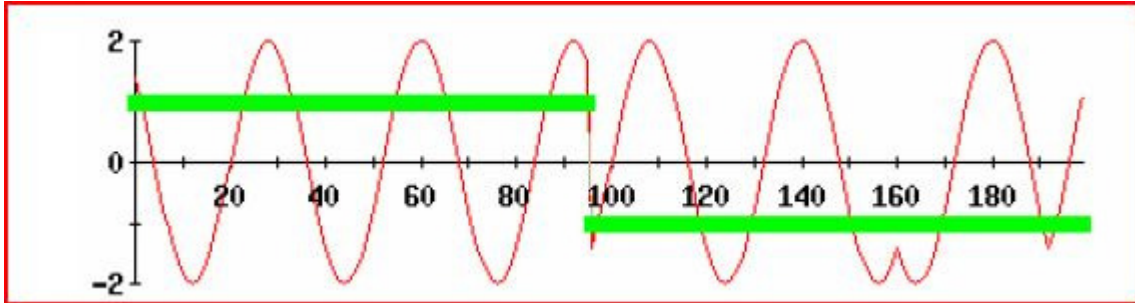
Πίνακας I - σειριακή σε παράλληλη μετατροπή των bits δεδομένων.

c1	c2	c3	c4
1	1	-1	-1
1	1	1	-1
1	-1	-1	-1
-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1
-1	-1	1	1

Κάθε στήλη αντιπροσωπεύει τα κομμάτια που θα μεταφερθούν από έναν υπομεταφορέα. Ξεκινώντας με το πρώτο μεταφορέα, c_1 υπολογίζουμε την συχνότητά της. Από το θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist, ξέρουμε ότι η μικρότερη συχνότητα που μπορεί να μεταβιβάσει τις πληροφορίες πρέπει να είναι δύο φορές το ποσοστό πληροφοριών. Στην περίπτωση αυτή, το ποσοστό πληροφοριών ανά μεταφορέα θα είναι το $1/4$ ή 1 σύμβολο ανά δευτερόλεπτο συνολικά για όλους τους 4 μεταφορείς. Έτσι, η μικρότερη συχνότητα που μπορεί να μεταφέρει ένας ρυθμός κομματιών $1/4$ είναι $1/2$ Hz. Αλλά πήραμε 1 Hz για ευκολία. Αν είχα πάρει $1/2$ Hz ως συχνότητα εκκίνησης, τότε οι αρμονικές θα ήταν 1, $3/2$ και 2 Hz. Θα μπορούσαμε να επιλέξουμε $7/8$ Hz για να ξεκινήσουμε και στην περίπτωση αυτή οι αρμονικές θα ήταν $7/4$, $7/2$, $21/2$ Hz.

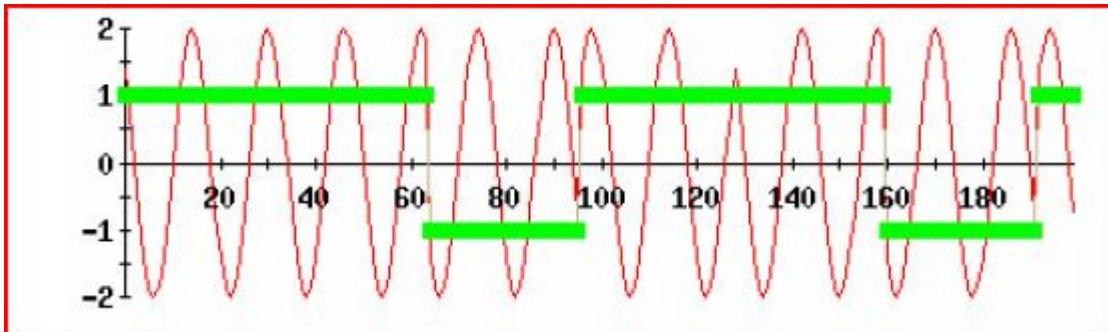
Επιλέγουμε BPSK ως σχέδιο διαμόρφωσης για το συγκεκριμένο παράδειγμα. Σημειώνουμε ότι μπορούμε να επιλέξουμε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο διαμόρφωσης, QPSK, 8PSK 32-QAM ή οτιδήποτε άλλο. Δεν υπάρχει όριο εδώ για το ποιά διαφοροποίηση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Για κάθε έναν από τους μεταφορείς έχουμε :

Μεταφορέας 1 - Θα πρέπει να διαβιβάσουμε 1, 1, 1, -1, -1, -1. Τα τρία πρώτα bits είναι 1 και τρία τελευταία -1. Αν είχαμε επιλέξει το κανάλι Q αυτού του μεταφορέα (ο οποίος θα ήταν ένα συνημίτονο), τότε αυτό θα ήταν μια διαμόρφωση QPSK.



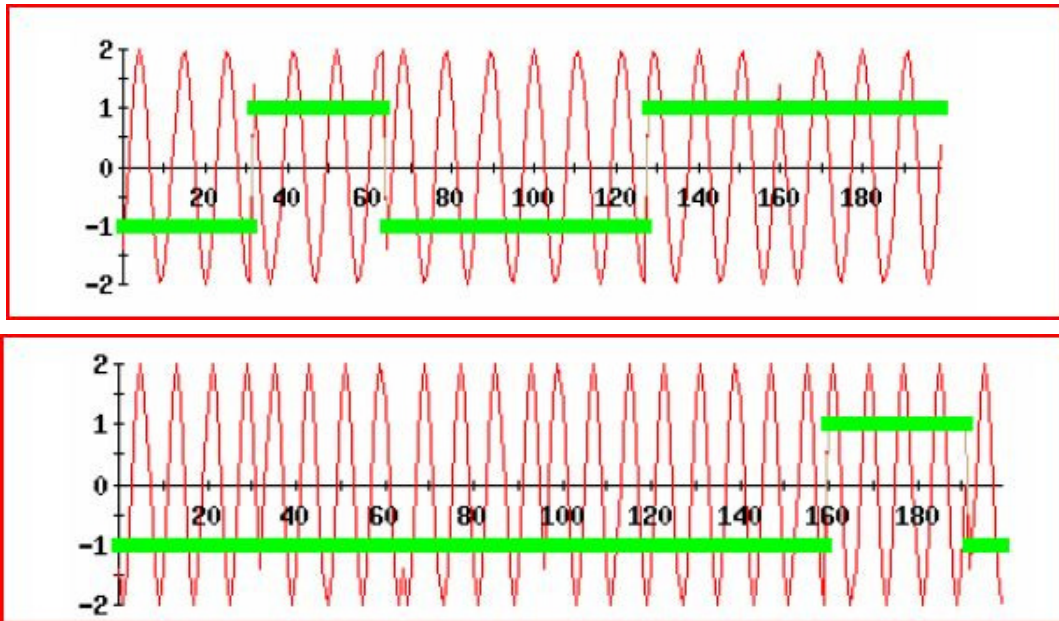
Σχήμα 22. – υπομεταφορέας 1 και τα κομμάτια που διαμορφώνει (η πρώτη στήλη του πίνακα I)

Μεταφορέας 2 - ο επόμενος μεταφορέας είναι συχνότητας 2 Hz. Είναι το επόμενο ορθογώνιο/αρμονικό στη συχνότητα του πρώτου μεταφορέα 1 Hz. Τα κομμάτια στη δεύτερη στήλη, χαρακτηρισμένα ως c_2 , το 1, το 1, -1, το 1, το 1, -1 διαμορφώνουν αυτόν τον μεταφορέα με αυτά τα κομμάτια όπως φαίνεται στο σχήμα 23.



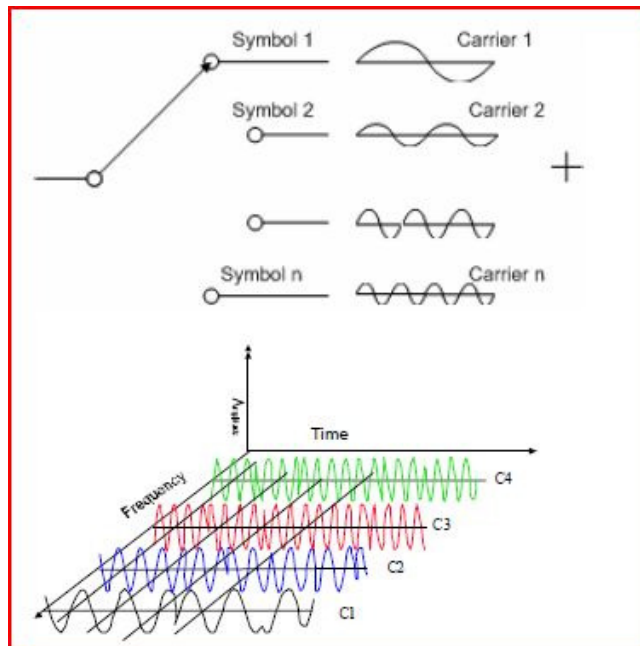
Σχήμα 23. – υπομεταφορέας 2 και τα κομμάτια που διαμορφώνει (η 2η στήλη του πίνακα I)

Μεταφορέας 3 – ο μεταφορέας 3 συχνότητα είναι ίσος με 3 Hz και ο τέταρτος μεταφορέας έχει μια συχνότητα 4 Hz. Ο τρίτος μεταφορέας είναι διαμορφωμένος με -1, 1, 1, -1, -1, 1 και ο τέταρτος με -1, -1, -1, -1, -1, 1 από τον πίνακα I.



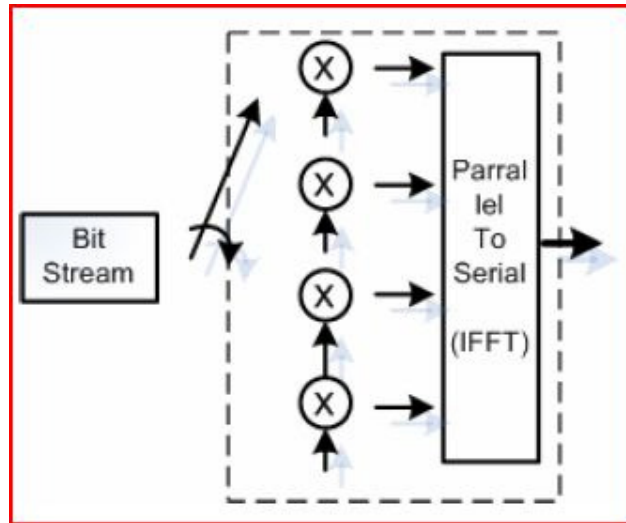
Σχήμα 24. – υπομεταφορέας 3 και 4 και τα κομμάτια που αυτοί που διαμορφώνουν (οι 3ες και 4ες στήλες του πίνακα I)

Με τη μέθοδο αυτή έχουμε διαμορφώσει όλα τα κομμάτια χρησιμοποιώντας τέσσερις ανεξάρτητους μεταφορείς των ορθογώνιων συχνοτήτων 1 έως 4 Hz. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε να λαμβάνεται το ρεύμα κομματιών, και να διέμονται τα κομμάτια, ένα κομμάτι τι φορά στους τέσσερις υπομεταφορείς όπως φαίνεται στο σχήμα 25.

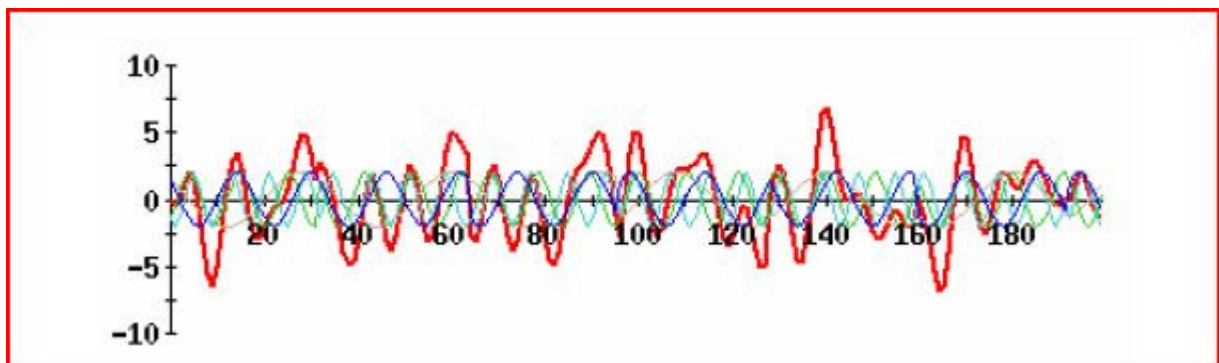


Σχήμα 25. - OFDM σήμα στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.

Προσθέτωντας και τους τέσσερις από αυτούς τους διαμορφωμένους μεταφορείς δημιουργούμε το σήμα OFDM, που παράγεται συχνά από έναν φραγμό αποκαλούμενο IFFT.



Σχήμα 26.– λειτουργικό διάγραμμα μιας δημιουργίας σημάτων OFDM. Το περιγραμμένο μέρος καλείται συχνά IFFT φραγμός.

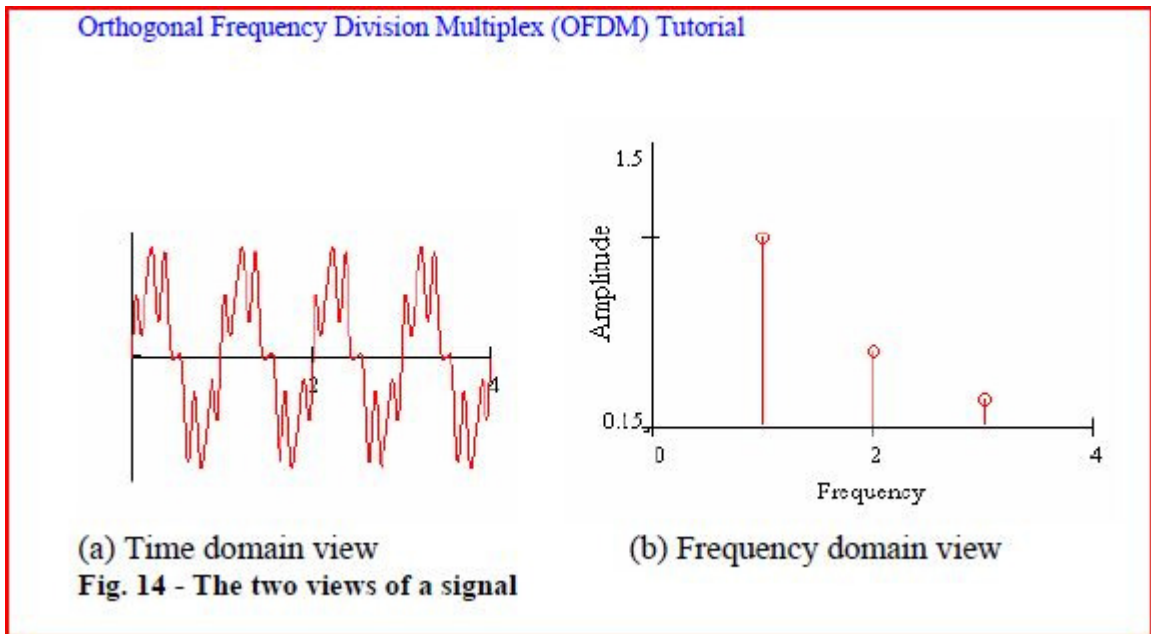
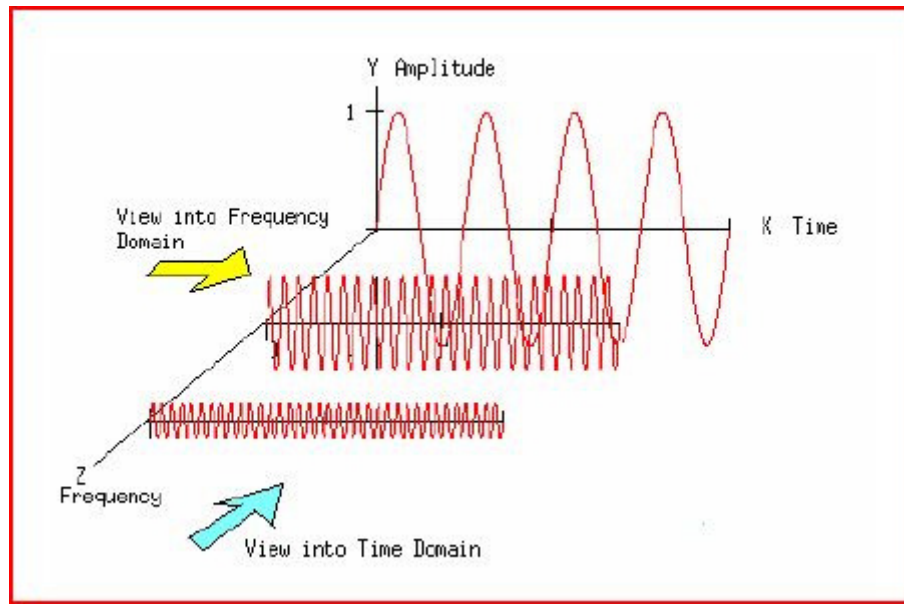


Σχήμα 27. – το παραγμένο σήμα OFDM. Σημειώνεται πόσο ποικίλλει έναντι των υποκείμενων σταθερών υπομεταφορέων εύρους.

Με λίγα λόγια, μπορούμε να γράψουμε την παραπάνω διαδικασία, όπως

$$c(t) = \sum_{n=1}^N m_n(t) \sin(2\pi n t) \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) είναι ουσιαστικά ένα αντίστροφο FFT. Εξετάσουμε εν συντομία τι κάνει ένα FFT/IFFT όπως φαίνεται στο σχήμα 28.



(α) προβολή στον τομέα του χρόνου (β) προβολή περιοχών συχνότητας

Σχήμα 28. - Οι δύο όψεις ενός σήματος

Το μπροστινό FFT παίρνει ένα τυχαίο σήμα, το πολλαπλασιάζει διαδοχικά με τους σύνθετους εκθέτες πέρα από το φάσμα των συχνοτήτων, αθροίζει κάθε προϊόν και σχεδιάζει τα αποτελέσματα ως συντελεστή εκείνης της συχνότητας. Οι συντελεστές καλούνται φάσμα και αντιπροσωπεύουν «πόσο» εκείνης της συχνότητας είναι παρών στο σήμα εισαγωγής. Τα αποτελέσματα του FFT είναι ένα σήμα στο πεδίο της συχνότητας.

Μπορούμε να γράψουμε FFT σε ημιτονοειδή μορφή ως:

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

Στη παραπάνω σχέση το $x(n)$ είναι οι συντελεστές των ημιτόνων και των συνημιτόνων της συχνότητας $2\pi k/N$, όπου το k είναι ο δείκτης των συχνοτήτων πέρα από τις συχνότητες N , και το n είναι ο χρονικός δείκτης. $x(k)$ είναι η τιμή του φάσματος για το k_{th} frequency και το $x(n)$ είναι η αξία του σήματος στο χρόνο n .

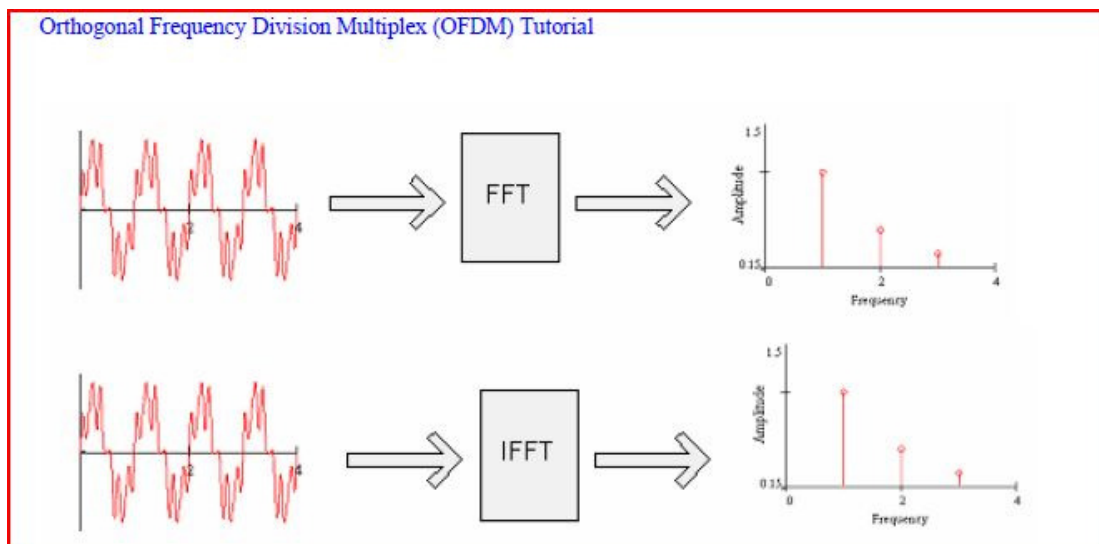
Το αντίστροφο FFT παίρνει αυτό το φάσμα και μετατρέπει το σύνολο πίσω στο σήμα χρονικού πεδίου με το να το πολλαπλασιάζει πάλι διαδοχικά με μια σειρά των ημιτονοειδών.

Η εξίσωση για IFFT είναι

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

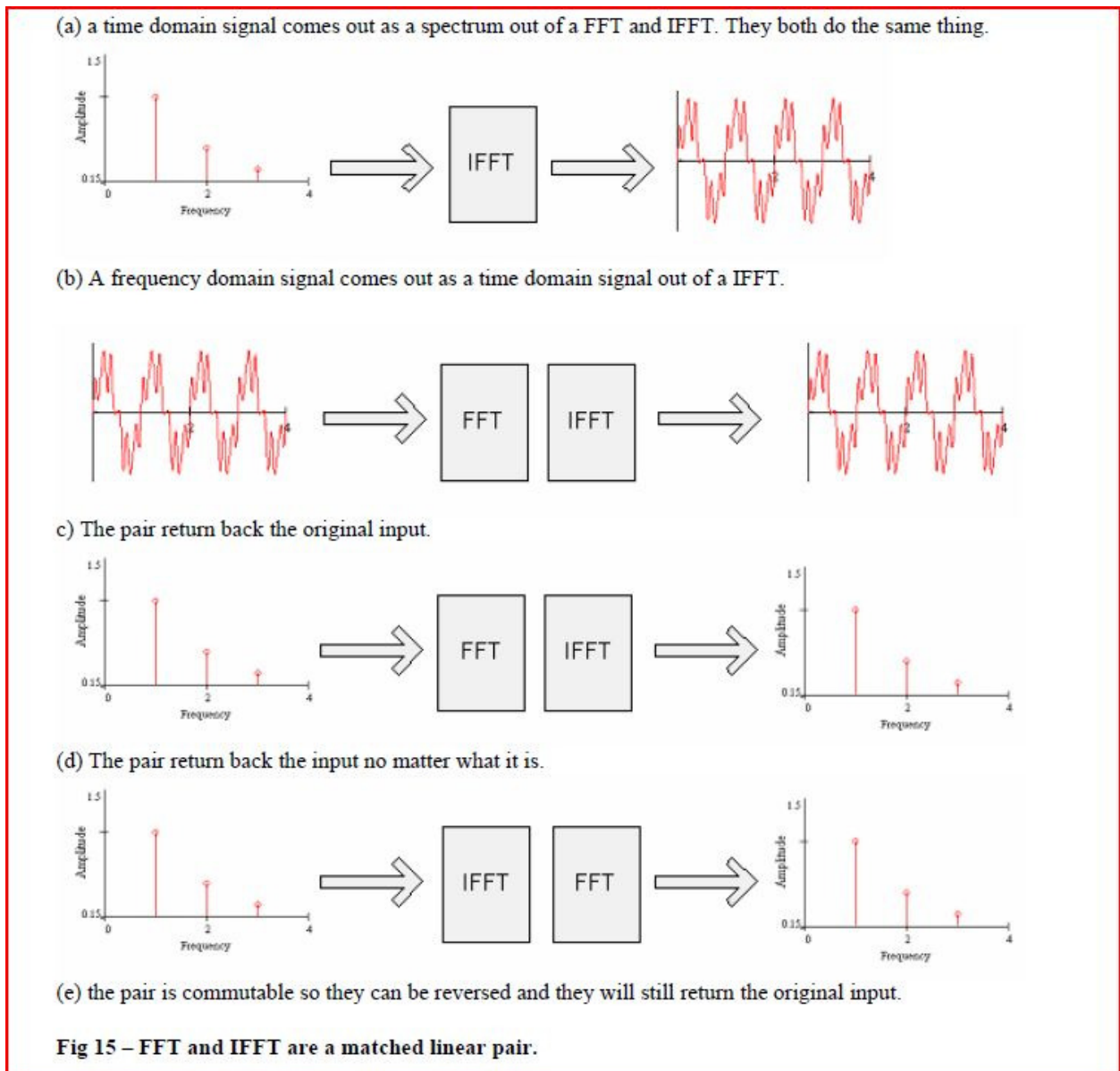
Η διαφορά μεταξύ των εξισώσεων του FFT και IFFT είναι ο τύπος συντελεστών που παίρνουν τα ημιτονοειδή, και το πρόσημο του μείον. Οι συντελεστές από τη σύμβαση ορίζονται ως δείγματα στο πεδίο του χρόνου $x(k)$ για την FFT και $X(n)$ για τις τιμές δοχείων συχνότητας για τη IFFT.

Οι δύο διαδικασίες είναι ένα γραμμικό ζεύγος. Χρησιμοποιώντας και τα δύο στη σειρά θα δώσει το αρχικό αποτέλεσμα πίσω.



(α) ένα σήμα στο πεδίο του χρόνου βγαίνει ως φάσμα από ένα FFT και IFFT.

Και οι δύο κάνουν το ίδιο πράγμα.



(b) ένα σήμα πεδίου συχνότητας βγαίνει ως σήμα στο πεδίου του χρόνου από ένα IFFT.

(c) Η επιστροφή ζευγαριού υποστηρίζει την αρχική εισαγωγή.

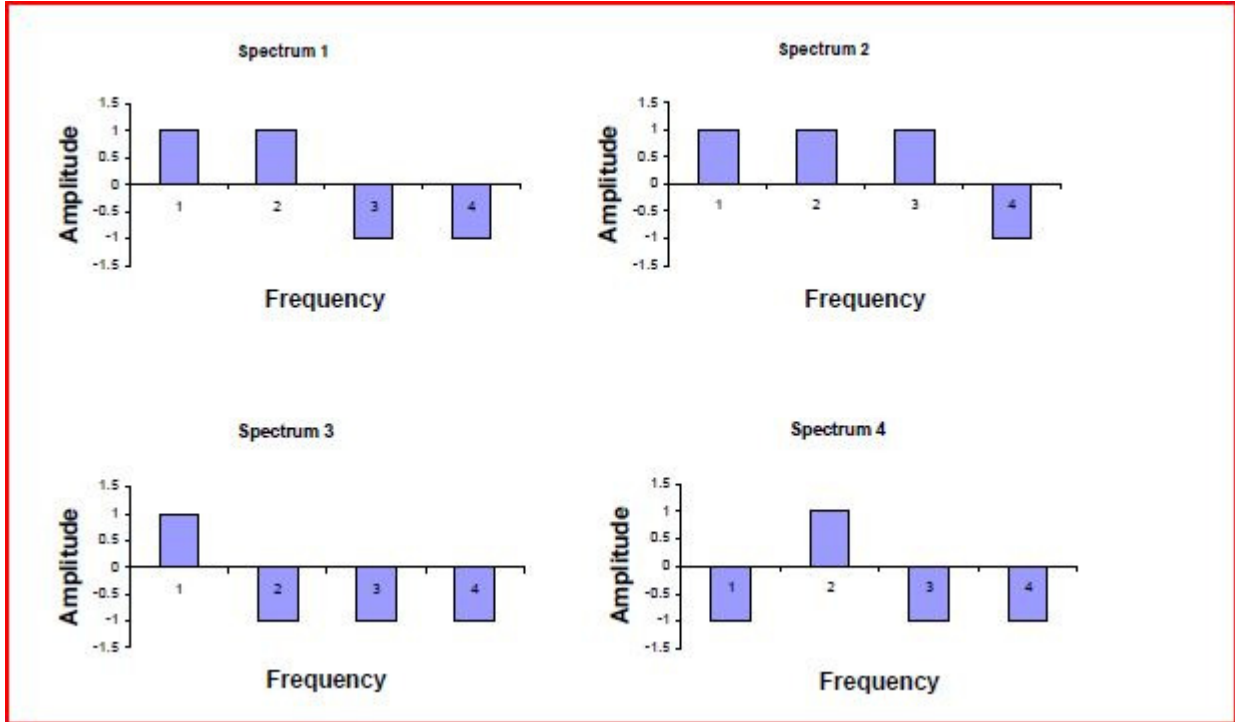
(d) η επιστροφή ζευγαριού υποστηρίζει την εισαγωγή της ανεξαρτήτως τι είναι.

(e) το ζευγάρι είναι μετατρέψιμο έτσι μπορούν να αντιστραφούν και θα επιστρέψουν ακόμα στην αρχική εισαγωγή.

Σχήμα 29. – FFT και IFFT είναι ένα αντιστοιχημένο γραμμικό ζευγάρι.

Ο IFFT είναι μια μαθηματική έννοια και δεν παίζει ρόλο το τί αντιπροσωπεύουν οι μεταβλητές που δέχεται ως ορίσματα. Εφ'όσον ως όρισμα θεωρήσουμε τα εύρη ημιτονοειδών, το IFFT θα σπάσει αυτούς τους αριθμούς για να παράξει ένα σωστό αποτέλεσμα στο πεδίο του χρόνου.

Συνεπώς, κάθε γραμμή του Πίνακα 1 μπορεί να θεωρηθεί ένα φάσμα, όπως απεικονίζονται στο σχήμα 30. Αυτές οι σειρές δεν είναι πραγματικά φάσματα, αλλά αυτό δεν επηρεάζει την ανάλυση μας.. Κάθε φάσμα σειρών έχει μόνο 4 συχνότητες που είναι 1, 2, 3 και 4 Hz. Κάθε ένα από αυτά τα φάσματα μπορεί να μετατραπεί για να παράγει ένα σήμα χρονικού πεδίου που είναι ακριβώς αυτό που κάνει ένα IFFT. Μόνο σε αυτήν την περίπτωση, η εισαγωγή είναι πραγματικά ένα σήμα χρονικού πεδίου που μεταμφιέζεται ως φάσμα.



Σχήμα 30. – ο εισερχόμενος φραγμός των κομματιών μπορεί να θεωρηθεί ως ένα φάσμα τεσσάρων δοχείων, το IFFT μετατρέπει αυτό το «φάσμα» σε ένα σήμα σε ένα πεδίο του χρόνου OFDM για ένα σύμβολο, το οποίο έχει πραγματικά τέσσερα κομμάτια σε αυτό.

Ο IFFT υπολογίζει με ταχύτητα το σήμα στο πεδίο του χρόνου χωρίς να απαιτείται ο υπολογισμός να γίνεται για κάθε υπομεταφορέα ξεχωριστά. Επειδή FFT και IFFT είναι γραμμικές διαδικασίες και απολύτως αντιστρέψιμες, πρέπει να κληθεί FFT αντί IFFT. Τα αποτελέσματα είναι τα ίδια είτε εφαρμόσει FFT είτε IFFT. Στη βιβλιογραφία ωστόσο η διαδικασία αναφέρεται ως IFFT.

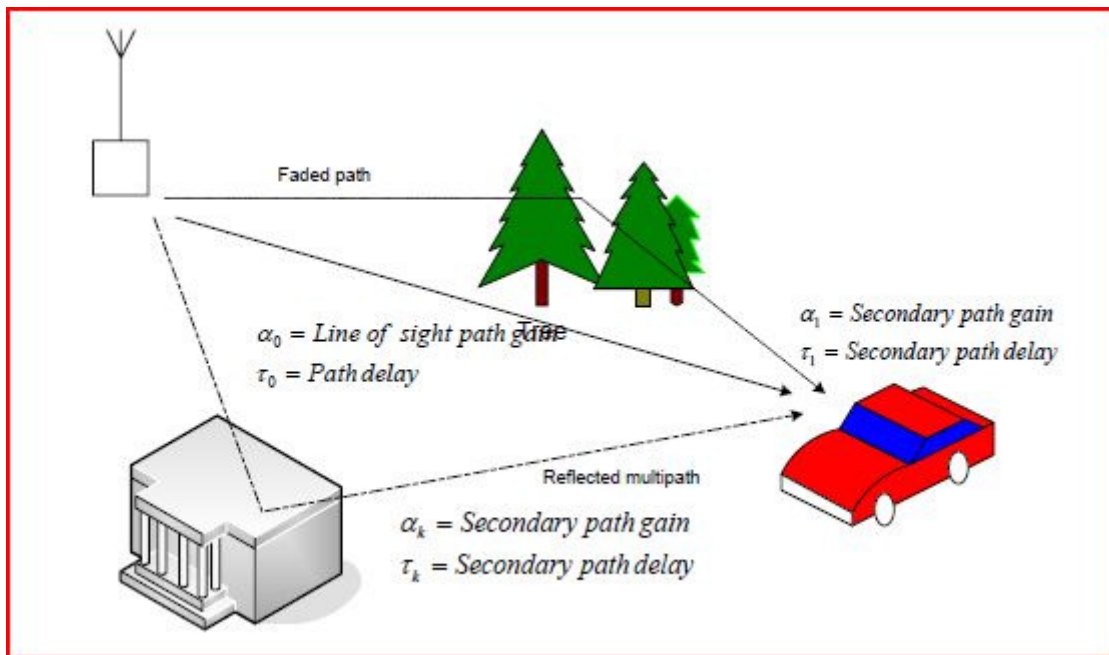
Το λειτουργικό διάγραμμα κομματιού για το πώς το σήμα είναι διαμορφωμένο/αποδιαμορφωμένο δίνεται στο σχήμα 31.



Σχήμα 31. – οι λειτουργίες συνδέσεων OFDM

2.19 Καθορισμός της εξασθένησης

Εάν η διαδρομή από τον πομπό στο δέκτη έχει είτε αντανακλάσεις ή εμπόδια, παρουσιάζεται στη ζεύξη εξασθένηση. Σε αυτήν την περίπτωση, το σήμα φθάνει στο δέκτη από πολλές διαφορετικές διαδρομές (σχήμα 32). Κάθε μια από αυτές τις ακτίνες έχει μια ελαφρώς διαφορετική καθυστέρηση και ένα ελαφρώς διαφορετικό κέρδος. Οι χρονικές καθυστερήσεις οδηγούν σε μετατοπίσεις φάσης προκαλώντας υποβάθμιση του σήματος.



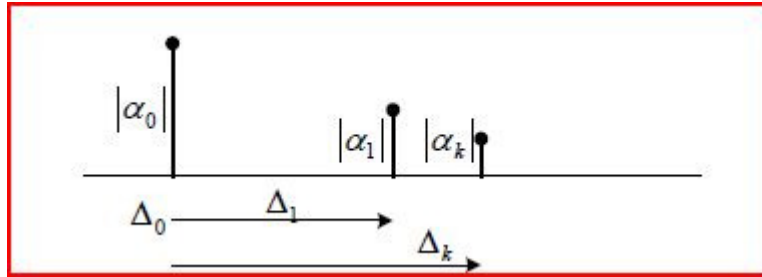
$$h_c(t) = \sum_{k=0}^{K-1} a_k \delta(t - \tau_k)$$

a_k = Σύνθετο κέρδος διαδρομής

τ_0 = Κανονικοποιημένη καθυστέρηση πορεία σε σχέση με το LOS

$\Delta_k = \tau_k - \tau_0$ διαφορά στο χρόνο διαδρομής

Σχήμα 32. – η εξασθένηση είναι μεγάλο πρόβλημα για τα σήματα. Το σήμα χάνεται και η αποδιαμόρφωση πρέπει να έχει έναν τρόπο να το αντιμετωπίσει. Η εξασθένηση είναι ιδιαίτερο πρόβλημα όταν αλλάζει η πορεία συνδέσεων, όπως για ένα κινούμενο αυτοκίνητο ή μέσα σε ένα κτήριο ή σε μια πυκνοκατοικημένη αστική περιοχή με το ψηλό κτίριο.



Σχήμα 33. – τα ανακλώμενα σήματα φθάνουν σε ένα καθυστερημένο χρονικό διάστημα και παρεμποδίζουν την κύρια γραμμή σήματος όψους, εάν υπάρχει μια. Σε καθαρό Raleigh που εξασθενίζει, δεν έχουμε κανένα κύριο σήμα, όλα τα συστατικά απεικονίζονται.

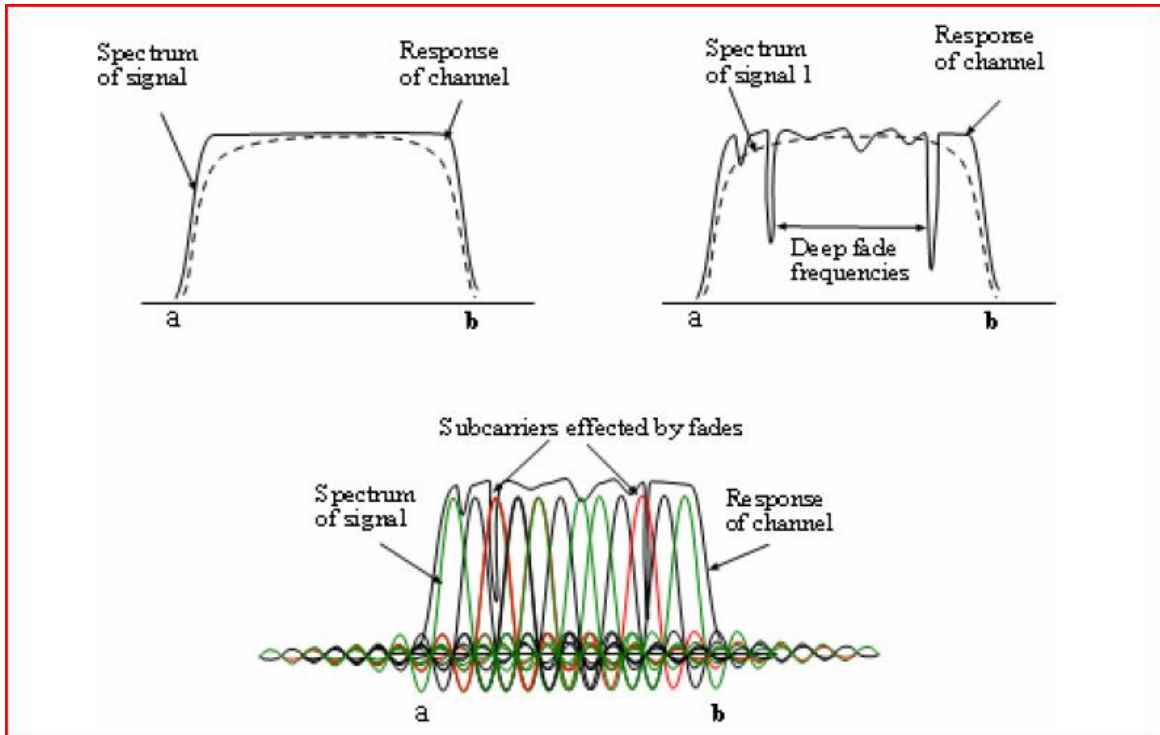
Στην εξασθένηση, τα ανακλώμενα σήματα που καθυστερούν, δρουν προσθετικά στο κύριο σήμα και προκαλούν είτε κέρδη στην ισχύ των σημάτων είτε βαθιές εξασθενήσεις. Και με τις βαθιές εξασθενήσεις, εννοούμε ότι το σήμα έχει σχεδόν εξαφανιστεί. Το επίπεδο της ισχύος των σημάτων είναι τόσο μικρό που ο δέκτης δεν μπορεί να αποφανθεί για την αρχική τιμή του σήματος.

Η μέγιστη χρονική καθυστέρηση που εμφανίζεται ονομάζεται καθυστέρηση διάδοσης του σήματος σε αυτό το περιβάλλον. Αυτή η εξάπλωση καθυστέρησης μπορεί να είναι σύντομη έτσι ώστε να είναι λιγότερη από το χρόνο συμβόλου ή μεγαλύτερη. Και οι δύο περιπτώσεις, προκαλούν διαφορετικούς τύπους υποβάθμισης στο σήμα. Η καθυστέρηση διάδοσης ενός σήματος αλλάζει καθώς το περιβάλλον αλλάζει, όπως παραδείγματος χάριν συμβαίνει στην κινητή τηλεφωνία.

Το Σχήμα 34 δείχνει το φάσμα του σήματος. Η συνεχόμενη γραμμή δείχνει την απόκριση που θέλουμε να έχει το κανάλι. Μια εξασθετισμένη απόκριση των καναλιών φαίνεται στο σχήμα 34 b. Σημειώνουμε ότι σε μερικές συχνότητες στη ζώνη, το κανάλι δεν επιτρέπει σε οποιεσδήποτε πληροφορίες να περάσουν, οι λεγόμενες συχνότητες βαθιών εξασθενίσεων. Αυτή η μορφή απόκρισης συχνότητας καναλιών καλείται εκλεκτική εξασθένηση συχνότητας επειδή δεν εμφανίζεται ομοιόμορφα σε ολόκληρη τη ζώνη. Εμφανίζεται στις επιλεγμένες συχνότητες. Εάν το περιβάλλον αλλάζει όπως για ένα κινούμενο αυτοκίνητο, τότε αυτή η απόκριση αλλάζει επίσης και ο δέκτης πρέπει να έχει κάποιο τρόπο για να την αντιμετωπίσει.

Η εξασθένηση Rayleigh είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχει κανένα άμεσο συστατικό και όλα τα σήματα που φθάνουν στο δέκτη απεικονίζονται. Αυτός ο τύπος περιβάλλοντος καλείται εξασθένηση Rayleigh.

Γενικά όταν η καθυστέρηση που διαδίδεται είναι λιγότερη από ένα σύμβολο, έχουμε αυτό που ονομάζεται επίπεδη εξασθένηση. Όταν η καθυστέρηση που διαδίδεται είναι πολύ μεγαλύτερη από ένα σύμβολο αυτό καλείται συχνότητα επιλεκτικής εξασθένησης.



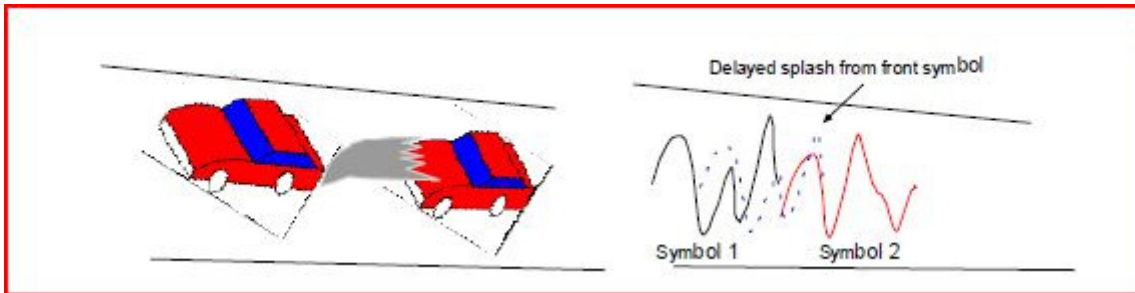
Σχήμα 34. – (α) το σήμα θέλουμε να στείλουμε και η απόκριση συχνότητας καναλιών είναι καλά ταιριασμένα. (β) ένα εξασθετισμένο κανάλι έχει συχνότητες που δεν επιτρέπουν τίποτα να περάσει. Τα δεδομένα χάνονται σποραδικά. (γ) με OFDM, όπου έχουμε πολλούς μικρούς υπομεταφορείς, μόνο ένα μικρό υποσύνολο των δεδομένων χάνεται λόγω της εξασθένησης.

Ένα σήμα OFDM προσφέρει ένα πλεονέκτημα σε ένα κανάλι που έχει μια επιλεκτική εξασθένηση απόκρισης συχνότητας. Όπως μπορούμε να δούμε, όταν βάζουμε ένα φάσμα σήματος OFDM ενάντια στη συχνότητα επιλεκτικής απόκρισης του καναλιού, επηρεάζονται μόνο δύο υπομεταφορείς, όλοι οι άλλοι παραμένουν απολύτως ανεπηρέαστοι. Αντί ολόκληρο το σύνολο του συμβόλου να αλλιωθεί, χάνουμε μόνο ένα μικρό υποσύνολο των $(1 / N)$ bits. Με την κατάλληλη κωδικοποίηση, αυτό μπορεί να ανακτηθεί.

Η απόδοση BER ενός σήματος OFDM σε ένα εξασθετισμένο κανάλι είναι πολύ καλύτερη από την απόδοση του QPSK / FDM που είναι ένα ενιαίο ευρείας ζώνης σήμα μεταφορέων. Αν και το υποκρυπτόμενο BER ενός σήματος OFDM είναι ακριβώς το ίδιο με την υποκρυπτόμενη διαμόρφωση, αυτή είναι εάν 8PSK χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει τους υπομεταφορείς, έπειτα το BER του σήματος OFDM είναι ίδιο με τα BER 8PSK του σήματος στο Gaussian κανάλι. Αλλά στα κανάλια που εξασθενίζουν, το OFDM προσφέρει τα πολύ καλύτερα BER από ένα ευρύ σήμα ζωνών ακριβώς της ίδιας διαμόρφωσης. Το πλεονέκτημα εδώ προέρχεται από την ποικιλομορφία του πολυμεταφορέα έτσι ώστε η εξασθένηση ισχύει μόνο για ένα μικρό υποσύνολο.

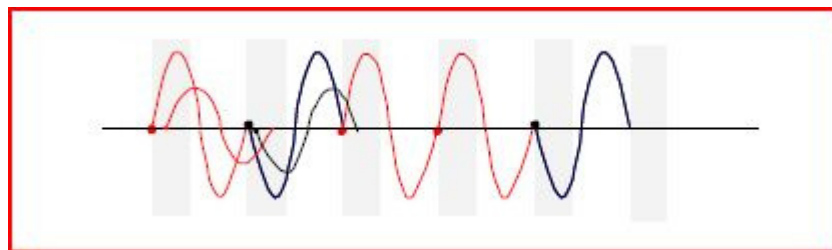
Στους μεταφορείς FDM, συχνά το σήμα διαμορφώνεται με ένα Root Raised Cosine σχήμα για να μειώσει το εύρος ζώνης του. Σε OFDM δεδομένου ότι το διάστημα των μεταφορέων είναι βέλτιστο, υπάρχει ένα φυσικό πλεονέκτημα εύρους ζώνης.

Χρησιμοποιώντας μια ακόμα μεταφορά από τον φυσικό κόσμο προκειμένου να γίνει κατανοητό το πλεονέκτημα της OFDM σε σχέση με την εξασθένιση λόγω πολλαπλών διαδρομών μπορούμε να δώσουμε το εξής παράδειγμα: Υποθέτουμε ότι κινούμαστε με αυτοκίνητο σε βροχερή ημέρα. Το προπορευόμενο αυτοκίνητο καταβρέχει μια δέσμη νερού (πιτσιλιά)- (splash) προς εμάς. Προκειμένου να από φύγουμε την δέσμη, κινούμαστε πιο πίσω, αφήνοντας μικρή απόσταση του μπροστινού αυτοκινήτου, αρκετά μακριά έτσι ώστε η δέσμη να μην φθάσει σε εμάς. Στην ουσία αυξανουμε την απόσταση από το προπορευόμενο αυτοκίνητο έτσι ώστε το εύρος της δέσμης νερού να μην μας επηρεάζει.



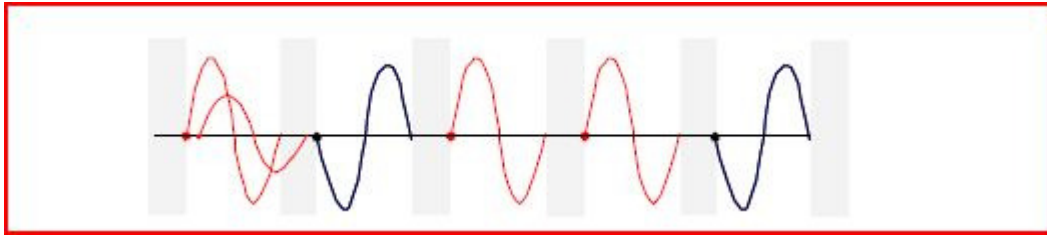
Σχήμα 35. - καθυστέρηση διάδοσης είναι σαν τον ανεπιθύμητη πιτσιλιά που μπορεί να έχετε από το αυτοκίνητο μπροστά σας. Στην εξασθένιση, το μπροστινό σύμβολο ρίχνει ομοίως μια πιτσιλιά προς τα πίσω την οποία θέλουμε να αποφύγουμε.

Η εγγύτητας της δέσμης νερού (πιτσιλίσματος), προσομοιάζει με την καθυστέρηση εξάπλωσης ενός σήματος. Τα Σχήματα 35 , 36 και 37 παρουσιάζουν την περιγραφόμενη κατάσταση στο πεδίο των τηλεπικοινωνιακών σημάτων. Στο φυσικό ανάλογο που περιγράψαμε, αυτές οι δέσμες νερού (πιτσιλιές) γίνονται θόρυβος και έχουν επιπτώσεις στην αρχή του επόμενου συμβόλου όπως φαίνεται στο σχήμα 36 (β).



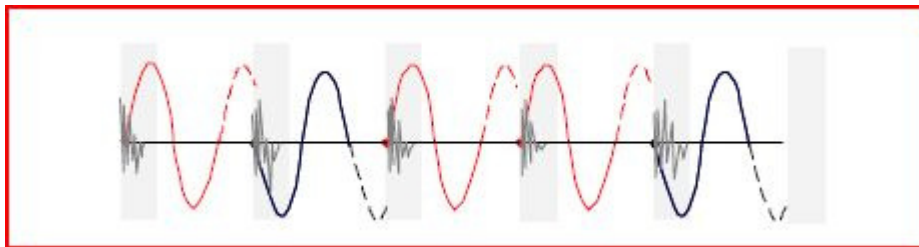
Σχήμα 36. – το σύμβολο PSK και η καθυστερημένη έκδοσή του. (α) το καθυστερημένο, μειωμένο σήμα και (β) σύνθετη παρέμβαση.

Για να μετριάσουμε αυτόν τον θόρυβο στο μπροστινό μέρος του συμβόλου, μετακινούμε το σύμβολό μας πιο μακριά από την περιοχή της εξάπλωσης καθυστέρησης όπως φαίνεται στο σχήμα 37. Ένα μικρό κενό διάστημα έχει προστεθεί μεταξύ των συμβόλων για να αποφύγει την εξάπλωση καθυστέρησης.



Σχήμα 37. - Μετακινήστε το σύμβολο πίσω, ώστε καθυστερημένο σήμα που φθάνει υποχωρεί στην γκρίζα περιοχή. Καμία παρέμβαση στο επόμενο σύμβολο!

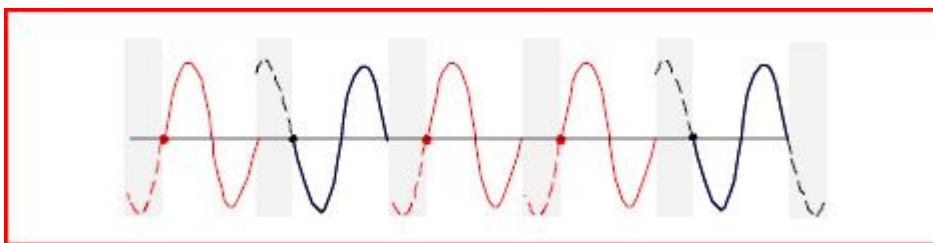
Αλλά δεν μπορούμε να έχουμε κενά διαστήματα στα σήματα. Αυτό δεν λειτουργεί για τον πομπό που επιθυμεί να παράγει σήματα συνεχώς. Έτσι είναι σαφές ότι πρέπει να έχουμε κάτι εκεί.



Σχήμα 38. - Αν επεκτείνουμε απλώς το σύμβολο, τότε το μπροστινό μέρος του συμβόλου που είναι σημαντικό για εμάς, δεδομένου ότι επιτρέπει να υπολογίζετε ποια είναι η φάση αυτού του συμβόλου, είναι πλέον αλλοιωμένο από το "πιτσίλισμα".

Επεκτείνουμε το σύμβολο στο κενό διάστημα, έτσι το πραγματικό σύμβολο είναι περισσότερο από έναν κύκλο.

Με τον τρόπο αυτό η έναρξη του συμβόλου είναι ακόμα στη ζώνη εξάπλωσης, και αυτή η έναρξη είναι το σημαντικότερο πράγμα για το σύμβολό δεδομένου ότι ο δέκτης την χρειάζεται προκειμένου να ληφθεί μια απόφαση για το κομμάτι. Δεν είναι επιθυμητό η έναρξη του συμβόλου να πέσει σε αυτή την περιοχή, οπότε σύρουμε το σύμβολο προς τα πίσω, έτσι ώστε η έναρξη του αρχικού συμβόλου να παραμένει έξω από αυτήν την ζώνη.

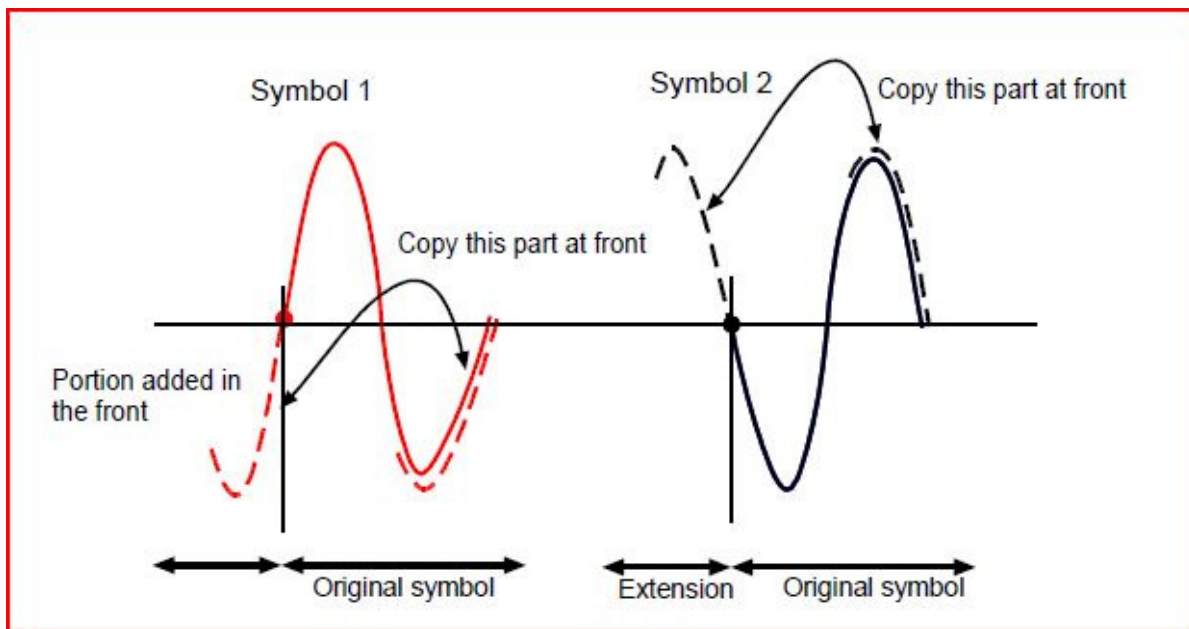


Σχήμα 39. - Αν κινήσουμε το σύμβολο πίσω και απλά βάλουμε το κατάλληλο γέμισμα σε αυτήν την περιοχή, τότε όχι μόνο έχουμε ένα συνεχές σήμα, αλλά ένα που μπορεί να αλλοιωθεί και δεν μας νοιάζει δεδομένου ότι θα απλά θα το κόψουμε έξω ούτως ή άλλως πριν την αποδιαμόρφωση.

Η διαδικασία συνοψίζεται στα εξής :

1. Επιθυμούμε η έναρξη του συμβόλου να είναι έξω από τη ζώνη εξάπλωσης καθυστέρησης, ώστε να μην είναι κατεστραμμένο.
2. Ξεκινάμε το σήμα στο νέο όριο έτσι ώστε η πραγματική άκρη του συμβόλου να αποσυνδέεται από την πλευρά αυτής της ζώνης.

Ακολουθως επεκτείνουμε το σύμβολο έτσι ώστε να είναι 1.25 φορές μεγαλύτερου μήκους. Για να το πετύχουμε αυτό, αντιγράφουμε το πίσω μέρος του συμβόλου και το επισυνάπτουμε στο μπροστινό μέρος. Στην πραγματικότητα, η πηγή συμβόλων είναι συνεχής, έτσι αυτό που κάνουμε είναι να ρυθμίσουμε την αρχική φάση και να κάνουμε την περίοδο συμβόλων πίο μεγάλη. Στην βιβλιογραφία η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται ως «αντιγραφή» του τελευταίου μέρους. Και ο λόγος είναι ότι στην επεξεργασία ψηφιακού σήματος, το κάνουμε με αυτόν τον τρόπο.

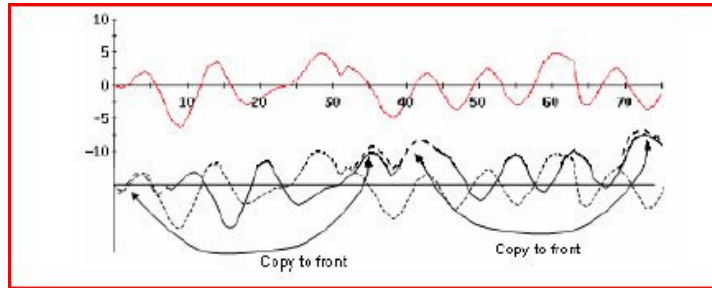


Σχήμα 40. – το κυκλικό πρόθεμα είναι αυτό το περιττό κομμάτι του σήματος που προσθέτουμε στο μπροστινό μέρος του πολύτιμου φορτίου μας, το σύμβολο.

Η διαδικασία αυτή ονομάζεται πρόσθεση κυκλικού πρόθεματος. Εφόσον το OFDM, έχει πολλούς μεταφορείς, το κάναμε αυτό σε κάθε μεταφορέα. Στην πραγματικότητα δεδομένου ότι το σήμα OFDM είναι ένας γραμμικός συνδυασμός, μπορούμε να προσθέσουμε το κυκλικό πρόθεμα μόνο μιά φορά στο σύνθετο σήμα OFDM. Το πρόθεμα είναι οπουδήποτε από 10% σε 25% του χρόνου συμβόλου.

Περιγράφοντας την διαδικασία αναλυτικότερα για ένα σήμα OFDM με περίοδο ίση με 32 δείγματα, επιθυμώντας να προσθέσουμε μια 25% κυκλική μετατόπιση ακολουθούμε τα εξής βήματα :

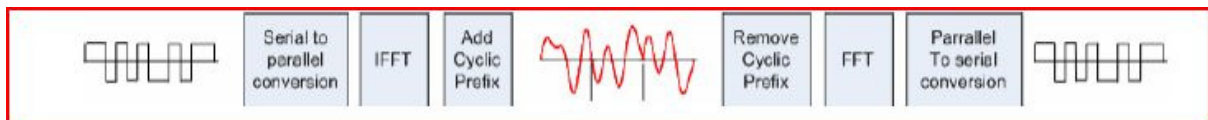
1. Πρώτα κόβουμε τα κομμάτια που είναι 32 δείγματα μακριά.
2. Κατόπιν παίρνουμε το τελευταίο 25% των 32 δειγμάτων δηλαδή 8 δείγματα, τα αντιγράφουμε και τα επισυνάπτουμε εμπρός του σήματος.



Σχήμα 41. – ολόκληρη η διαδικασία μπορεί να γίνει μόνο μία φορά στο σήμα OFDM, παρά να το κάνει για κάθε υπομεταφορέα.

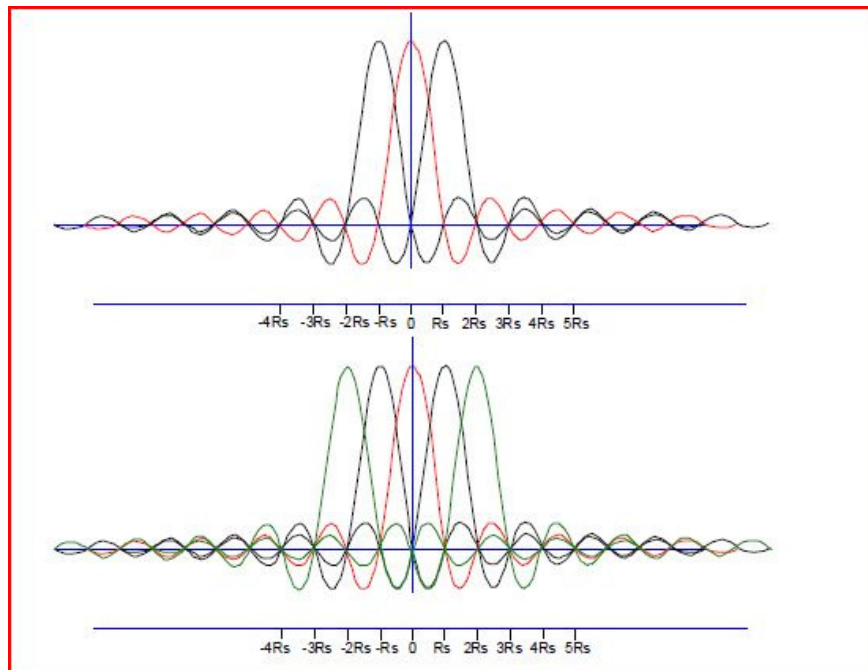
Προσθέτουμε το πρόθεμα αφού κάνουμε το IFFT μόνο μία φορά στο σύνθετο σήμα. Αφότου έχει φθάσει το σήμα στο δέκτη, αφαιρούμε αρχικά αυτό το πρόθεμα, για να ανακτήσουμε το τέλεια περιοδικό σήμα έτσι να μπορεί να εφαρμοστεί ο FFT για να ανακτηθούν τα σύμβολα σε κάθε μεταφορέα.

Εντούτοις, η προσθήκη του κυκλικού προθέματος μετριάζει μεν τα αποτελέσματα της εξασθένησης, αυξάνει δε το εύρος ζώνης.



Σχήμα 42. – η προσθήκη του κυκλικού προθέματος στο σήμα OFDM βελτιώνει περαιτέρω τη δυνατότητά της να αντιμετωπίζει την εξασθένηση και την παρέμβαση.

2.20 Φάσμα και απόδοση OFDM



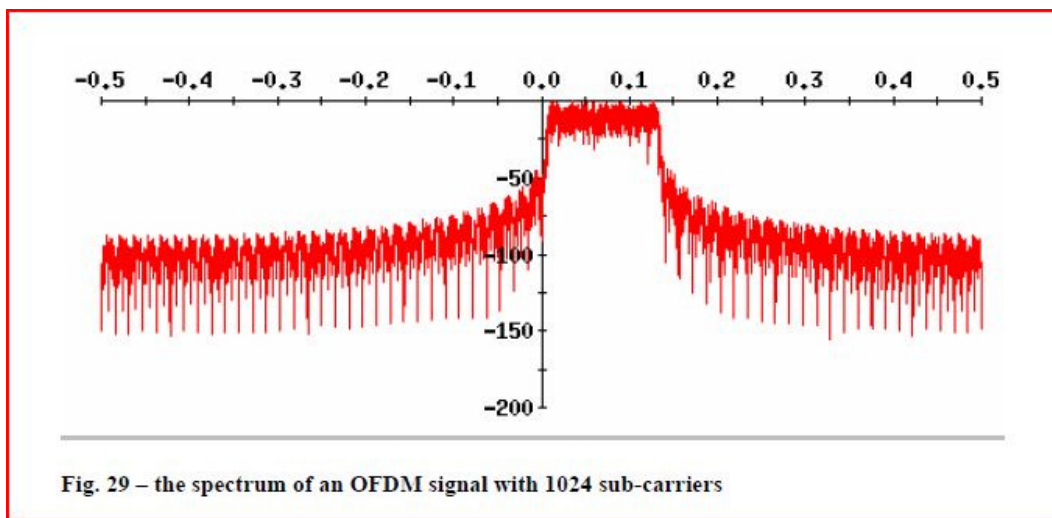
Σχήμα 43. – το φάσμα ενός σήματος OFDM (χωρίς προσθήκη του κυκλικού προθέματος) είναι πολύ περισσότερο αποδοτικό στο εύρος ζώνης από QPSK.

Το σήμα Unshaped QPSK παράγει ένα φάσμα έτσι ώστε το εύρος ζώνης του είναι ίσο με $(1 + \alpha)R_s$. Σε OFDM, οι παρακείμενοι μεταφορείς μπορούν να επικαλύψουν με τον εξής τρόπο: Η προσθήκη δύο μεταφορέων, επιτρέπει $3R_s$ πέρα από ένα εύρος ζώνης $-2R_s, 2R_s$ ή το σύνολο $4T_s$. Αυτό δίνει μια αποδοτικότητα εύρους ζώνης του $4/3$ Hz ανά σύμβολο για 3 μεταφορείς και του $6/5$ Hz ανά σύμβολο για 5 μεταφορείς.

Καθώς όλο και περισσότεροι μεταφορείς προστίθενται, το εύρος ζώνης προσεγγίζει, την τιμή:

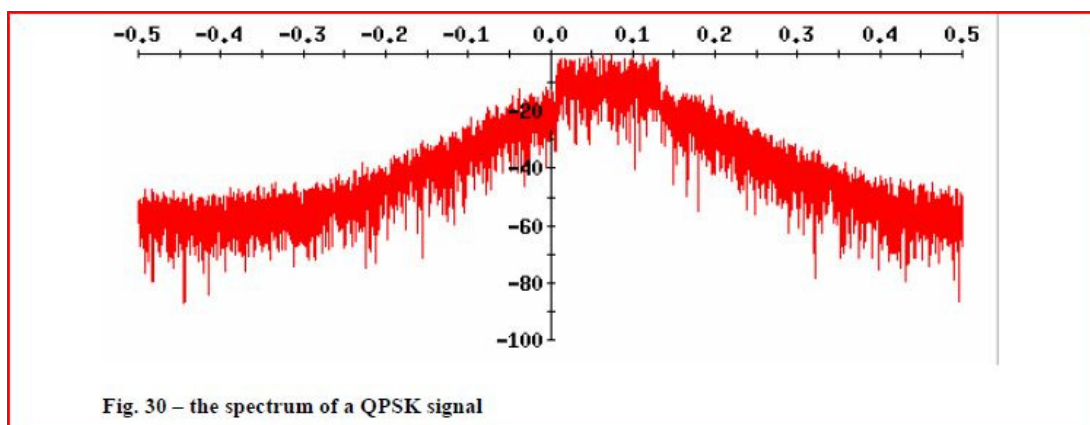
$$\frac{N+1}{N} \text{ bits per Hz}$$

Έτσι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός μεταφορέων, τόσο αποδοτικότερη είναι η διαμόρφωση. Εδώ είναι ένα φάσμα ενός σήματος OFDM. Το εξωτερικό τμήμα της ζώνης σήματος είναι κάτω από 50 dB χωρίς οποιαδήποτε διαμόρφωση παλμού. Σχήμα 44.



Σχήμα 44. – το φάσμα ενός σήματος OFDM με 1024 υπομεταφορείς

Συγκρίνοντας αυτό με το φάσμα ενός σήματος QPSK (σχήμα 45), παρατηρούμε πόσο χαμηλότερες είναι οι πλευρικές ζώνες συχνοτήτων για OFDM και πόσο λιγότερη είναι η διαφορά.



Σχήμα 45. – το φάσμα ενός σήματος QPSK

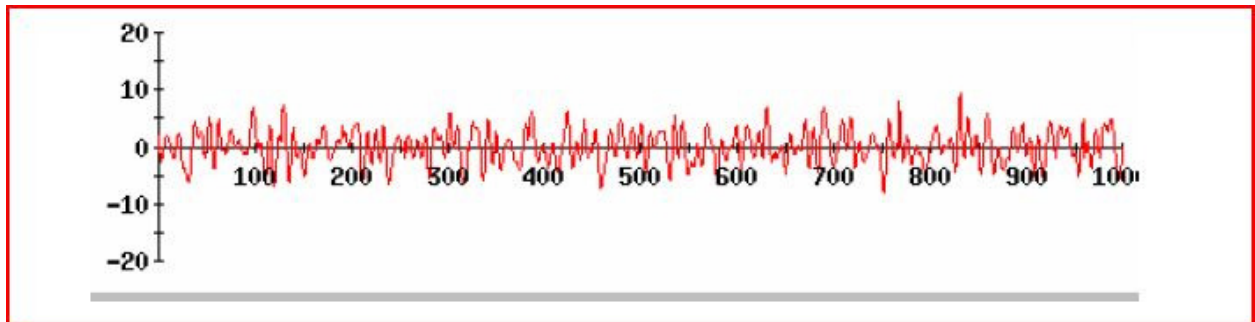
2.21 Απόδοση ποσοστού λάθους κομματιών

Το BER ενός OFDM είναι μόνο ενδεικτικό σε ένα περιβάλλον με έντονη εξασθένηση λόγω πολλαπλών διαδρομών. Δεν χρησιμοποιούμε OFDM σε μια μη γραμμική ζεύξη όπως π.χ μια δορυφορική σύνδεση. Το σήμα OFDM λόγω της παραλλαγής εύρους του δεν συμπεριφέρεται καλά σε ένα μη γραμμικό κανάλι όπως αυτό που δημιουργείται από τους ενισχυτές υψηλής ισχύος στους δορυφόρους. Η χρησιμοποίηση OFDM για έναν δορυφόρο θα απαιτούσε ένα αρκετά μεγάλο backoff, έτσι πρέπει να υπάρξει κάποιος άλλος επιτακτικός λόγος για τη χρήση του όπως όταν το σήμα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για έναν κινούμενο χρήστη. Οι κύριες παράμετροι της απόδοσης ενός OFDM είναι :

- **Αιχμή στη μέση αναλογία ισχύος (PAPR)**

Εάν ένα σήμα είναι ένα άθροισμα N σημάτων καθένα εκ των οποίων με μέγιστο πλάτος ίσο προς 1 Volt, θα μπορούσαμε να πάρουμε ένα ανώτατο εύρος του N που είναι όλα τα σήματα N προστιθέμενα στην μέγιστη τιμή τους. Το PAPR ορίζεται ως :

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



Σχήμα 46. - Ένα σήμα OFDM είναι πολύ θορυβώδης. Μοιάζει σαν ένα σύνθετο multi-FDM σήμα.

Για ένα σήμα OFDM που έχει 128 μεταφορείς, κάθε ένας με την ομαλοποιημένη ισχύ σε τιμή 1 Watt, το ανώτατο PAPR μπορεί να πάρει την τιμή $\log(128)$ ή 21 dB. Αυτό συμβαίνει όταν συνδυαστούν και οι 128 μεταφορείς στο μέγιστο σημείο τους. Το RMS PAPR θα είναι περίπου μισό αυτόν τον αριθμό ή 10-12 dB. Αυτό το ίδιο PAPR παρατηρείται στα σήματα CDMA επίσης.

Η μεγάλη διακύμανση εύρους που βλέπουμε στο σχ. 46 αυξάνει τον θόρυβο εσωτερικής ζώνης και αυξάνει το BER όταν πρέπει το σήμα να περάσει από μη γραμμικούς ενισχυτές. Απαιτείται μεγάλο backoff σε τέτοιες περιπτώσεις. Το γεγονός αυτό καθιστά την OFDM εξίσου προβληματική με τον πολυ-μεταφορέα FDM στις εφαρμογές ενισχυτών υψηλής ισχύος όπως οι δορυφορικές συνδέσεις.

Προκειμένου να μειώσουμε την μεγάλη τιμή του PAPR εφαρμόζουμε τις εξής τεχνικές :

1. *Αποκοπή*

Μπορούμε ακριβώς να κόψουμε το σήμα σε επιθυμητό επίπεδο ισχύος. Αυτό μειώνει το PAPR αλλά εισάγει άλλες παραμορφώσεις και ICI.

2. *Επιλεκτική Χαρτογράφηση*

Πολλαπλασιάζουμε το σήμα δεδομένων με ένα σύνολο κωδικών, εφαρμόζοντας IFFT για το καθένα και στη συνέχεια επιλέγουμε το ένα με το μικρότερο PAPR.

3. *Μερικό IFFT*

Διαιρούμε το σήμα ομοιόμορφα στις ομάδες, εφαρμόζουμε IFFT σε κάθε ένα από τα κομμάτια και τα συνδυάζουμε. Έτσι ώστε εάν υποδιαιρέσουμε το μεταφορέα 128 μέσα σε μια ομάδα τεσσάρων 32 μεταφορέων, η κάθε μία, το ανώτατο PAPR του καθενός θα είναι 12 dB αντί 21 για το σύνολο.

- **Συγχρονισμός**

Ένα άλλο πρόβλημα του OFDM είναι ότι απαιτείται ακριβής συγχρονισμός. Για το σκοπό αυτό συχνά χρησιμοποιούνται τεχνητοί τόνοι (σήματα χωρίς χρήσιμοι πληροφορία), για να κλειδώσουν στη φάση και για να εξισώσουν το κανάλι.

- **Κωδικοποίηση**

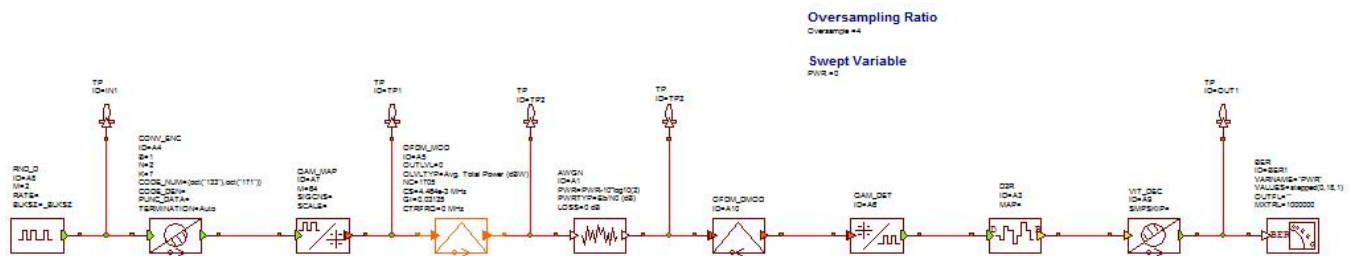
Οι υπομεταφορείς κωδικοποιούνται χαρακτηριστικά με τη συνελκτική κωδικοποίηση πριν από τη μετάβαση μέσω IFFT. Η κωδικοποιημένη έκδοση OFDM καλείται COFDM ή κωδικοποιημένο OFDM.

3 Πρακτικό Μέρος – Υλοποίηση

3. 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**.

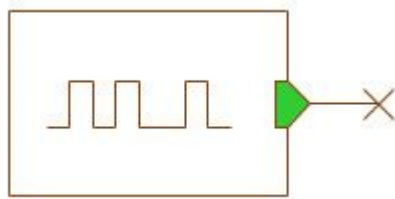
Αρχικά δημιουργήσαμε την τοπολογία της προσομοίωσης:



Σχημα 1. Τοπολογία προσομοίωσης (OFDM BER SYSTEM)

➤ Γεννήτρια τυχαίων Σημάτων

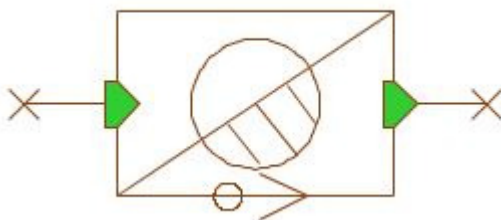
Χρησιμοποιήσαμε αρχικά μια γεννήτρια που παράγει ψευδοτυχαίες ακολουθίες δυαδικών συμβόλων (RND_D)



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**

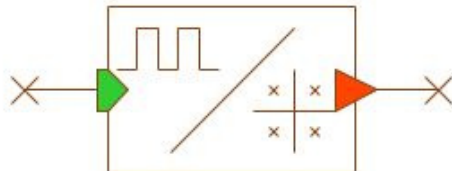
Το λογισμικό προσομοίωσης μας επιτρέπει σε οποιοδήποτε σημείο του κυκλώματος να τοποθετήσουμε μετρητές (test points, TP) τα οποία μετρούν χαρακτηριστικά των σημάτων όπως την ισχύ, το φάσμα, τη συχνότητα, την αντίσταση της γραμμής κ.ο.κ. (TP)



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

➤ **64QAM Mapper**

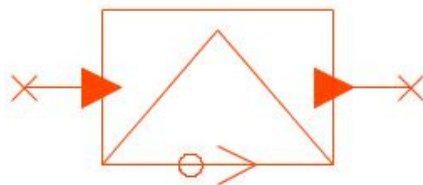
Παράγει ένα Quadrature Amplitude Modulation (QAM) σύνολο I/Q συντελεστών από ένα σήμα εισόδου. Οι συντελεστές μπορούν να τροφοδοτηθούν σε έναν διαμορφωτή για την παραγωγή μιας αναλογικής κυματομορφής. Το μπλοκ δέχεται δυο δυαδικές εισόδους (bits) και M-ary ψηφιακά σύμβολα. Αν η είσοδος είναι δυαδική 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**

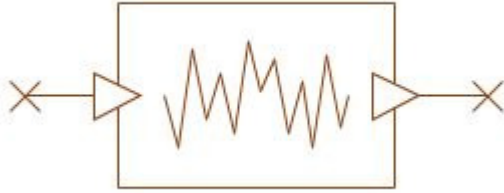
Προσομοιώνει μια ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) διαμορφωτή. Μεταμορφώνει μια ακολουθία μιγαδικών συμβόλων σε μια πολλαπλή OFDM συγκρότημα-φάκελο (CE) κυματομορφή. (OFDM_MOD)



Διαδικασία επιλογής block: [Elements-System Blocks-Modulation-OFDM-OFDM_MOD](#)

➤ **Στοιχείο προσθήκης Αθροιστικού Λεύκου Γκαουσιανού Θορύβου**

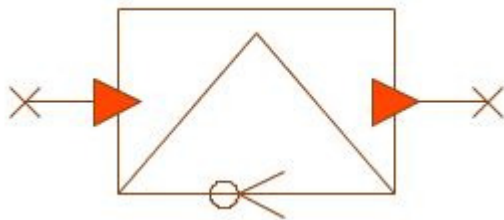
Με το στοιχείο AWGN προσθέτουμε στο σήμα Λευκό Προσθετικό Θόρυβο. Το μοντέλο αυτό προσθέτει πραγματικό ή μιγαδικό θόρυβο στο σήμα εισόδου. (AWGN)



Διαδικασία επιλογής block: [Elements-System Blocks-Channels-AWGN](#)

➤ **OFDM Αποδιαμορφωτής**

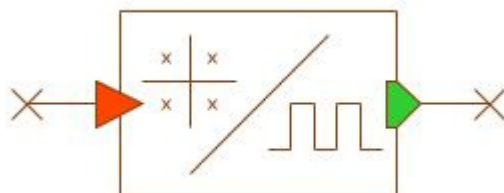
Προσομοιώνει έναν αποδιαμορφωτή OFDM. Λειτουργεί σε μια θορυβωδής συγκρότημα-φάκελο (CE) κυματομορφή δεδομένων δειγματοληψίας για την αποδιαμόρφωση πολυμεταφορικού σήματος. (OFDM_DM0D)



Διαδικασία επιλογής block: [Elements-System Blocks-Modulation-OFDM-OFDM_DM0D](#)

➤ **Ανιχνευτής QAM**

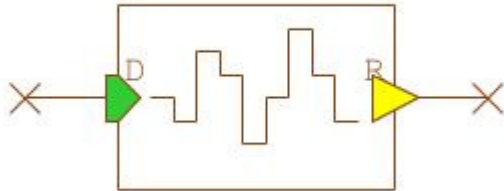
Παράγει μια αλληλουχία ψηφιακών ή δυαδικών συμβόλων από ένα Quadrature Amplitude Modulation (QAM) αποδιαμορφωμένο σήμα I/Q. (QAM_DET)



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

➤ **Μετατροπéας ψηφιακού σε πραγματικό**

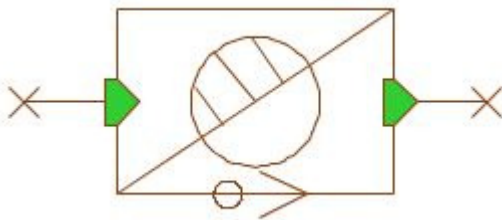
Μετατρέπει μια ψηφιακή είσοδο σε πραγματική έξοδο. Η ψηφιακή είσοδος μπορεί να είναι $\{0,1,\dots,M-1\}$ όπου το M μέγεθος ψηφιακού αλφαβήτου. Αυτό διαφέρει από ένα ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπέα από το ό'τι το σήμα εξόδου δεν είναι μια αναλογική κυματομορφή δειγματοληψίας. (D2R)



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

➤ **Viterbi Αποκωδικοποιητής**

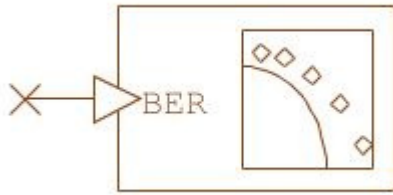
Εκτελεί Viterbi αποκωδικοποίηση των συνελικτικά κωδικοποιημένων δεδομένων. Το μοντέλο δέχεται κανονικές τιμές δεδομένων από την έξοδο του αποδιαμορφωτή για λειτουργία με είσοδο απλών αποφάσεων ή ψηφιακών δεδομένων για λειτουργία πολύπλοκων αποφάσεων. (VIT_DEC)



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)



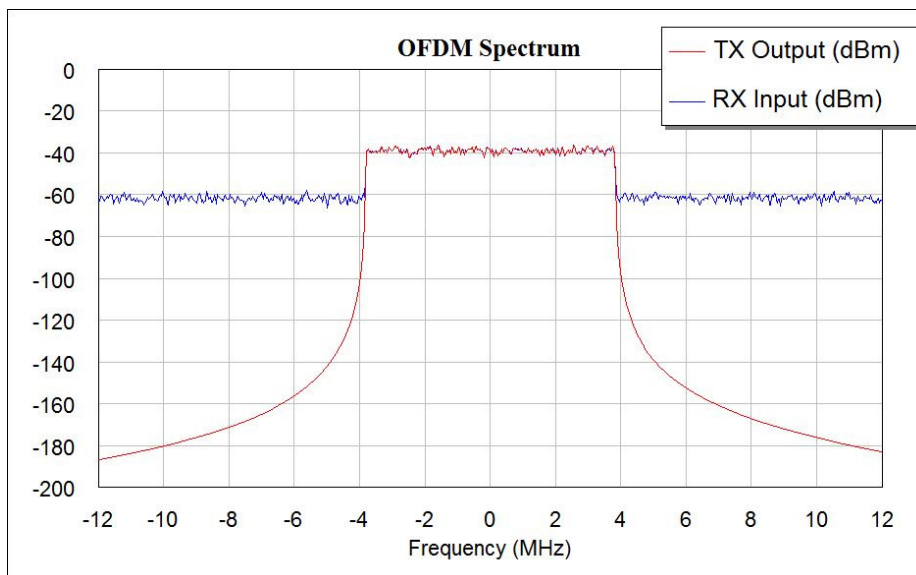
Διαδικασία επιλογής block: **Elements-System Blocks-Meters-BER**

3.1 Μετρήσεις και αποτελέσματα

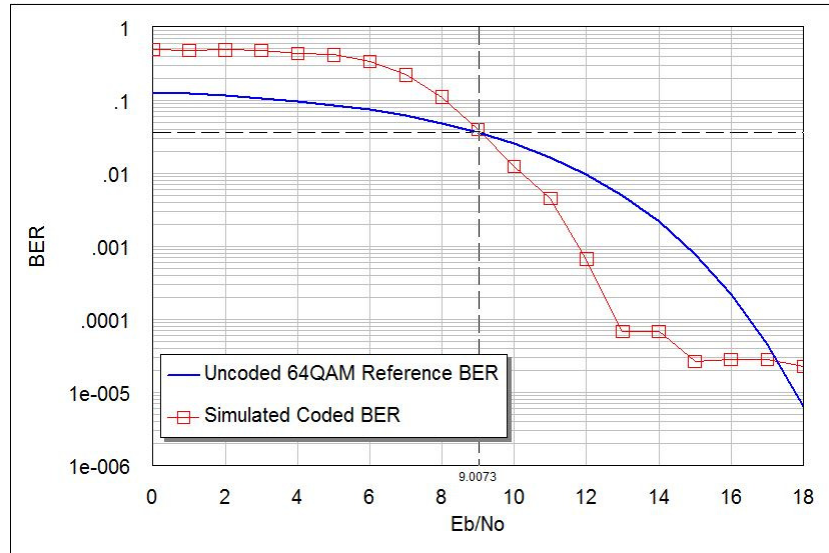
Με την υλοποίηση της προσομοίωσης παράξαμε τα διαγράμματα που παραθέτουμε εδώ. Το πρώτο διάγραμμα παρουσιάζει το φάσμα της OFDM διαμόρφωσης, τόσο στην πλευρά του πομπού όσο και στην πλευρά του δέκτη. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η συχνότητα του σήματος και στον κάθετο άξονα το επίπεδο ισχύος σε 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 σηματοθρομβικού λόγου (E_b/N_0) μικρότερου των 9dB το κωδικοποιημένο σήμα παρουσιάζει χειρότερη επίδοση (μεγαλύτερο BER) από την 64QAM χωρίς κωδικοποίηση. Από τα 9dB όμως και καθώς αυξάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο, η επίδραση της συνελκτικής κωδικοποίησης παράγει μικρότερο BER και άρα καλύτερης ποιότητας μετάδοση.



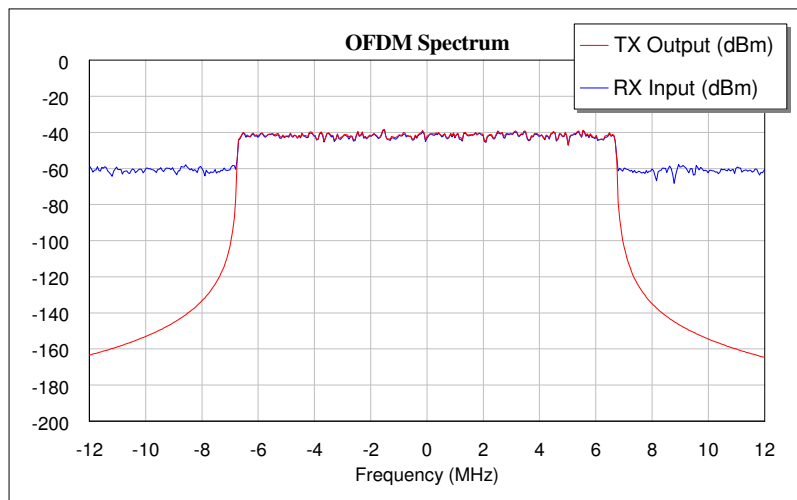
Διάγραμμα 1. OFDM Spectrum graph



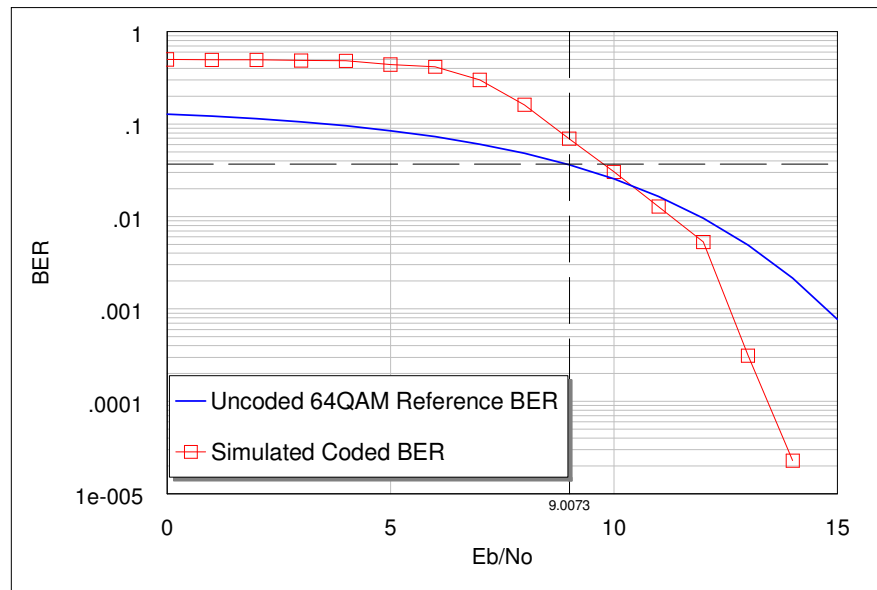
Διάγραμμα 2. BER graph

Σημειώνουμε ότι για την παραγωγή των παραπάνω αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι στον OFDM διαμορφωτή, τιμές που καθορίζονται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο DVB Standard ETSI-30044. Το πρότυπο αυτό προβλέπει συγκεκριμένο πλήθος υπομεταφορέων $NC=1705$, φασματική απόσταση μεταξύ των υπομεταφορέων $CS=4.464 \times 10^{-3}$ MHz, και μέσο τιμή επιπέδου λευκού προσθετικού θορύβου (AWGN) καναλιού $LOSS=0$ dB.

Επαναλαμβάνουμε την προσομοίωση αυξάνοντας το πλήθος των υπομεταφορέων σε $NC=3000$ και τη μέση τιμή του θορύβου σε $LOSS=0.5$ dB. Τα διαγράμματα του φάσματος και του BER παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν :



Διάγραμμα 3. OFDM Spectrum για αυξημένο πλήθος υπομεταφορέων



Διάγραμμα 4. BER graph με αυξημένο επίπεδο θορύβου

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 3 διαπιστώνουμε ότι η αύξηση του πλήθους των υποφορέων του OFDM άφησε το φάσμα του σήματος χωρίς να επηρεάσει εν τούτοις την ισχύ η οποία διατηρήθηκε στο ίδιο επίπεδο με αυτή της αρχικής προσομοίωσης .

Όσον αφορά το BER η αύξηση της μέσης τιμής του επιπέδου θορύβου είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του επιπέδου του σηματοθορυβικού λόγου για τον οποίο εξισώνεται το BER με τη χρήση κωδικοποιητή της 64-QAM και της διαμόρφωσης χωρίς κωδικοποιητή. Σε αυτή την περίπτωση η χρήση του κωδικοποιητή γίνεται αποδοτικότερη για επίπεδο σηματοθορυβικού λόγου (E_b/N_0) , στην τιμή των 11dB, αυξημένη κατά 2 περίπου db σε σχέση με τη περίπτωση της προσομοίωσης με χαμηλότερο επίπεδο θορύβου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Bingham, J.A.C., *Multicarrier Modulation for Data Transmission: An idea whose time has come*, IEEE Communications Magazine, Vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.
- [2] J.M. Cioffi, *A Multicarrier Primer*, in ANSI T1E1.4 Committee Contribution, No. 91-157, Boca Raton, FL, Nov. 1991.
- [3] Weinstein, S.B., Ebert, P.M., *Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform*, IEEE Transactions on Communication Technology, Vol. COM-19, no. 5, pp. 628-634, October 1971.
- [4] J. Stott, *The Effects of Phase Noise in COFDM*, EBU Technical Review, Summer 1998
- [5] P. Shelswell *The COFDM Modulation System, The Heart of Digital Audio Broadcasting*, BBC Research and Development Report, BBC RD 1996/8