



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**<<ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ  
ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ>>**

**ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΣΩΤΗΡΑΚΗΣ**

**A.M. 71347136**

**Εισηγητής:**

**κ. Νικόλαος Μυριδάκης Επίκουρος Καθηγητής**

ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ  
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ  
ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ  
ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ**

**ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΣΩΤΗΡΑΚΗΣ**

**A.M. 71347136**

**Εισηγητής:**

κ. Νικόλαος Μυριδάκης Επίκουρος Καθηγητής

**Εξεταστική Επιτροπή:**

κ. Παναγιώτης Καρκαζής Αναπληρωτής Καθηγητής

κ. Κωνσταντίνος Μαυρομμάτης Λέκτορας

ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ  
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Ο/Η Δηλών/ούσα



ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ  
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε μετά από επίμονες προσπάθειες σε ένα ενδιαφέρον γνωστικό αντικείμενο, που αφορά “ Ραδιοπόρα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών με χρήση κόμβων επανεκπομπής και ορθογωνικής συχνοτικής πολυπλεξίας ”.

Την παρούσα μου προσπάθεια αυτή υποστήριξε ο επιβλέπων καθηγητής μου κ. Νικόλαος Μυριδάκης, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και περισσότερο τους γονείς μου Γιώργο , Φανή και τον αδερφό μου Κωνσταντίνο, για τη συμπαράσταση και τη βοήθεια που μου πρόσφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών και συνεχίζουν να μου προσφέρουν.

ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ  
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τα συστήματα OFDM και τις δυνατότητες που μπορούν να προσφέρουν τα OFDM στην καθημερινότητα του ανθρώπου, στις επικοινωνίες ενσύρματες και ασύρματες. Στην εργασία γίνεται μία βιβλιογραφική έρευνα για τις τεχνολογίες αιχμής στον εν λόγω τομέα και ανάλυση διαφόρων τοπολογιών. Πιο συγκεκριμένα αρχικά αναλύεται η ιστορική αναδρομή του OFDM και δίνεται ο ορισμός του θέματος. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση στις διαμορφώσεις σήματος. Επίσης παρουσιάζονται όλοι οι τύποι ασύρματων επικοινωνιών και τα ασύρματα συστήματα με χρήση κόμβων επανεκπομπής. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται τα χαρακτηριστικά του OFDM συστήματος, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που υπάρχουν. Η ορθογωνικότητα, που αποτελεί το δομικό στοιχείο του OFDM αναλύεται εξίσου και γίνεται σύγκριση του OFDMA που αποτελεί επέκταση του OFDM. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή όλων των μελών που συνθέτουν ένα OFDM σύστημα και οι διαμορφώσεις σήματος που χρησιμοποιούνται στα OFDM συστήματα. Τέλος, δίνεται ανάλυση τοπολογιών OFDM συστημάτων που υπάρχουν στις μέρες μας.

Επιστημονική Περιοχή:

Τηλεπικοινωνίες

Λέξεις Κλειδιά :

OFDM, MIMO, Διαμόρφωση Σήματος, Ορθογωνικότητα, IFFT, FFT

## **ABSTRACT**

This thesis deals with OFDM systems and the possibilities that OFDM can offer in everyday life, in wired and wireless communications. In the paper, a bibliographic research is carried out on the state-of-the-art technologies in this field and an analysis of various topologies. More specifically, first the historical review of OFDM is analyzed and the definition of the subject is given. Analysis is then performed on the signal configurations. Also presented are all types of wireless communications and wireless systems using rebroadcast nodes. The third chapter analyzes the characteristics of the OFDM system, the advantages and disadvantages that exist. The orthogonality, which is the structural element of OFDM is analyzed equally and a comparison is made of OFDMA which is an extension of OFDM. In the fourth chapter there is a detailed description of all the members that make up an OFDM system and the signal configurations used in OFDM systems. Finally, an analysis of the topologies of OFDM systems that exist nowadays is given.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	16
<b>1.1. Περιγραφή του αντικειμένου ενασχόλησης της διπλωματικής εργασίας</b> .....	16
<b>1.2. Ιστορική αναδρομή και ορισμός του θέματος</b> .....	16
<b>2. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ</b> .....	19
<b>2.1. Διαμορφώσεις Σήματος</b> .....	19
<b>2.2. Ασύρματες Επικοινωνίες</b> .....	20
<b>2.3. Ασύρματα Συστήματα Επικοινωνίας με Χρήση Κόμβων Επανεκπομπής</b> .....	25
<b>3. OFDM ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ</b> .....	27
<b>3.1. Τι είναι το OFDM;</b> .....	27
<b>3.2. Βασικά Χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα, εφαρμογές και προκλήσεις</b> .....	28
<b>3.3. Ορθογωνικότητα</b> .....	31
<b>3.4. OFDMA μία επέκταση του κλασσικού OFDM</b> .....	33
<b>3.5. Σύγκριση OFDM και OFDMA</b> .....	35
<b>4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ OFDM</b> .....	38
<b>4.1. Ανάλυση του πομπού, του δέκτη και του καναλιού μετάδοσης</b> .....	38
<b>4.2. Σύνδεση του IFFT και του FFT με το OFDM</b> .....	42
<b>4.3. Διαμορφώσεις σήματος σε OFDM συστήματα</b> .....	45
<b>5. OFDM ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ</b> .....	50
<b>5.1. Τοπολογία διαλόγου για δίκτυα Industry 4.0</b> .....	50
<b>5.2. Ανάλυση συστήματος MIMO κινητής επικοινωνίας 5G με OFDM</b> .....	54
<b>5.3. Ασύρματα δίκτυα σε τσιπς με χρήση ελαστικού πομποδέκτη OFDM</b> .....	59
<b>5.4. Ασύρματη οπτική υλοποίηση OFDM για ζεύξεις επικοινωνίας καμπίνας αεροσκαφών</b> .....	65
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	71
<b>7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	73

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1:</b> Μείωση bandwidth – Ιδέα OFDM.....	17
<b>Εικόνα 2:</b> OFDM από τον Chang.....	17
<b>Εικόνα 3:</b> Wi-Fi Συνδέσεις.....	20
<b>Εικόνα 4:</b> Bluetooth Συνδέσεις.....	21
<b>Εικόνα 5:</b> Σύγκριση των Τεχνολογιών.....	21
<b>Εικόνα 6:</b> Δορυφορική Επικοινωνία.....	22
<b>Εικόνα 7:</b> WLAN Επικοινωνία.....	22
<b>Εικόνα 8:</b> NFC Επικοινωνία.....	23
<b>Εικόνα 9:</b> RFID Χρήσεις.....	23
<b>Εικόνα 10:</b> IoT Συσκευές.....	24
<b>Εικόνα 11:</b> Επικοινωνία με έναν ενδιάμεσο κόμβο.....	26
<b>Εικόνα 12:</b> Επικοινωνία με περισσότερους ενδιάμεσους κόμβους.....	26
<b>Εικόνα 13:</b> OFDM Transmitter & Receiver.....	27
<b>Εικόνα 14:</b> Ορθογωνικότητα καναλιών.....	32
<b>Εικόνα 15:</b> OFDM παράδειγμα.....	36
<b>Εικόνα 16:</b> OFDMA παράδειγμα.....	37
<b>Εικόνα 17:</b> Κυκλικό Πρόθεμα.....	39
<b>Εικόνα 18:</b> Αναλυτική αναπαράσταση ενός OFDM συστήματος.....	42
<b>Εικόνα 19:</b> IFFT και FFT σε OFDM σύστημα.....	43
<b>Εικόνα 20:</b> BPSK Διαμορφωτής.....	47
<b>Εικόνα 21:</b> BPSK Διαμόρφωση – Αστερισμός φάσεων.....	47
<b>Εικόνα 22:</b> QPSK Αστερισμός φάσεων.....	48
<b>Εικόνα 22:</b> QAM Αστερισμός φάσεων (2 περιπτώσεις 16-QAM 64-QAM).....	49
<b>Εικόνα 24:</b> Εφαρμογές Industry 4.0.....	50
<b>Εικόνα 25:</b> Fieldbus αισθητήρες και ελεγκτές.....	51
<b>Εικόνα 26:</b> Τοπολογία διαύλου ( απλός ηλεκτρικός δίαυλος ).....	53
<b>Εικόνα 27:</b> Ισοδύναμο κυκλώματος ηλεκτρικού διαύλου.....	53
<b>Εικόνα 28:</b> Χαρακτηριστικά 5G Δικτύου.....	55
<b>Εικόνα 29:</b> Αρχιτεκτονική 5G Δικτύου με ποικιλία διακομιστών.....	55
<b>Εικόνα 30:</b> Αρχιτεκτονική 5G Δικτύου.....	56
<b>Εικόνα 31:</b> Σύστημα επικοινωνίας 5G.....	57

<b>Εικόνα 32:</b> Στιγμιότυπο κόμβων της κινητής επικοινωνίας 5G.....	58
<b>Εικόνα 33:</b> Κόμβοι κινητής επικοινωνίας μετά την εφαρμογή των τεχνικών OFDM και MIMO.....	59
<b>Εικόνα 34:</b> Τρισδιάστατο περιβάλλον στο τσιπ με υπόστρωμα πυριτίου, διασυνδέσεις χαλκού και διοξείδιο του πυριτίου για εκτίμηση ασύρματων καναλιών.....	61
<b>Εικόνα 35:</b> Απώλεια διαδρομής με απόσταση για διαφορετικές κεραίες.....	62
<b>Εικόνα 36:</b> Διασπορά καθυστέρησης καναλιού με απόσταση για διαφορετικές δομές κεραίας.....	62
<b>Εικόνα 37:</b> Πομποδέκτης OFDM για WNoC.....	63
<b>Εικόνα 38:</b> BER για διαφορετικές προδιαγραφές OFDM.....	65
<b>Εικόνα 39:</b> Σύστημα επικοινωνίας εντός καμπίνας δύο μηκών κύματος.....	66
<b>Εικόνα 40:</b> Διάταξη κατασκευής οπτικού σήματος OFDM.....	67
<b>Εικόνα 41:</b> OFDM σήμα που λήφθηκε.....	69
<b>Εικόνα 42:</b> Διάγραμμα αστερισμού της οπτικής μετάδοσης OFDM-QPSK.....	69

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1:</b> Αρχιτεκτονικές - Αλγόριθμοι και Εφαρμογές OFDM.....	45
<b>Πίνακας 2:</b> Απόδοση πομποδεκτών για WNoC.....	64

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

**OFDM** - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

**FDM** - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

**OFDMA** - Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

**AM** - Amplitude modulation

**FM** - Frequency modulation

**PM** - Phase modulation

**FSK** - Frequency-shift keying

**ASK** - Amplitude-shift keying

**PSK** - Phase-shift keying

**QAM** - Quadrature amplitude modulation

**LAN** - Local Area Network

**IoT** – Internet of Things

**DSL** - Digital Subscriber Loop

**IFFT** - Inverse Fast Fourier Transform

**FFT** - Fast Fourier Transform

**Wi-Fi** – Wireless Fidelity

**LTE** - Long Term Evolution

**DAC** – Digital to Analog Converter

**ADC** – Analog to Digital Converter

**MIMO** – Multiple Input and Multiple Output

**AWGN** - Additive white Gaussian noise

**IDFT** - Inverse Discrete Fourier Transform

**DFT** - Discrete Fourier Transform

**GSM** - Global System for Mobile Communications

**CDMA** - Code-division multiple access

**WiMAX** - Worldwide Interoperability for Microwave Access

**BER** - Bit Error Rate

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

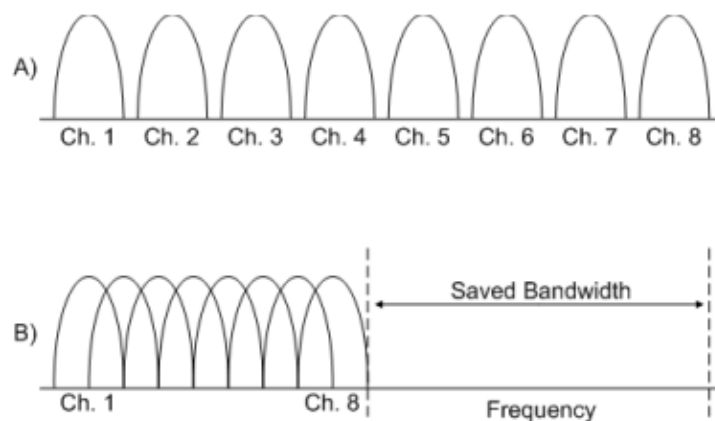
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας, επίσης γίνεται μια ιστορική αναδρομή επί του θέματος και δίνεται ένας ορισμός.

#### 1.1. Περιγραφή του αντικειμένου ενασχόλησης της διπλωματικής εργασίας

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία το θέμα το οποίο αναπτύσσεται αφορά την ανάλυση και την αξιολόγηση ασύρματων επικοινωνιών που λειτουργούν με τη χρήση ενδιάμεσων κόμβων επανεκπομπής. Θα γίνει μια βιβλιογραφική έρευνα για τις τεχνολογίες αιχμής στον εν λόγω τομέα καθώς και ανάλυση διαφόρων τοπολογιών.

#### 1.2. Ιστορική αναδρομή και ορισμός του θέματος

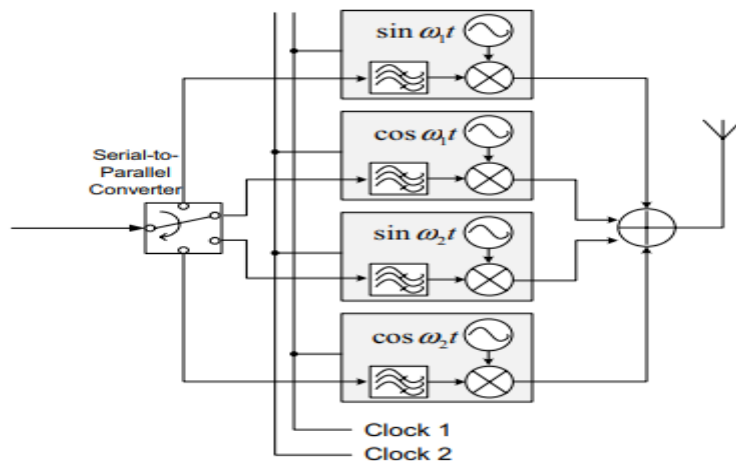
Τα πρώτα δείγματα για παράλληλη μετάδοση κάνουν την εμφάνιση τους στα μέσα της δεκαετίας του 1960, αλλά όσο αφορά στην ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων, λίγο νωρίτερα, το 1950. Μία πρόιμη παράλληλη μετάδοση ήταν από στρατιωτικές εφαρμογές, όπως το 1957 το σύστημα Kineplex, αλλά είχε μεγάλο ξεθώριασμα πολλαπλών διαδρομών.[1] Αρχικά έγινε η εμφάνιση του FDM που ήταν ο τηλεγράφος, καθώς πολλά σήματα μικρού ρυθμού μεταφέρονταν σ' ένα μεγάλο κανάλι εύρους ζώνης. Οι φέρουσες συχνότητες είχαν αρκετό χώρο για να μην εμφανίζεται το φαινόμενο της επικάλυψης, αλλά και ζώνες προστασίας ή κάποια κενά διαστήματα φάσματος. Όπως φαίνεται και την παρακάτω εικόνα, στο μέρος A φαίνεται πως ο κάθε φορέας μεταφέρει διαφορετικό bit ενός μηνύματος, ενώ θα ήταν πιο εύρηστο και αποτελεσματικό αν το κάθε κανάλι μετέφερε ένα ξεχωριστό μήνυμα. Ενώ από την άλλη στο μέρος B της εικόνας, όπου οι φορείς είναι μαθηματικά ορθογώνιοι μεταξύ τους.





**Εικόνα 1:** Μείωση bandwidth – Ιδέα OFDM

Με βάση αυτό τον περιορισμό γεννήθηκε η ιδέα του OFDM ( Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας ). Το OFDM, πρωτοεμφανίστηκε το 1966 ως ένα σχήμα διαίρεση συχνότητας ( FDM ) από τον Robert W. Chang, όπου η εισερχόμενη ροή από bits που στέλνονται χωρίζονται σε πολλαπλές ροές. Ο Chang δημιούργησε την ορθογωνικότητα μεταξύ των υποκαναλιών χρησιμοποιώντας άθροισμα ημιτόνου και συνημίτονο. Η σωστή διατήρηση της ορθογωνικότητας σε κάθε κανάλι επιτρέπει τον καθορισμό μεμονωμένων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων που είναι ίσοι με το εύρος ζώνης του κάθε καναλιού. Γενικά, για να διατηρηθεί η ορθογωνικότητα είναι αρκετά δύσκολο πρόβλημα σ' ένα αναλογικό σύστημα κυρίως όταν απαιτείται μεγάλος αριθμός δευτερέων φορέων. Το σχήμα που πρότεινε ο Chang εφαρμόζει μετασχηματισμούς Fourier και παρέχει ορθογωνικότητα μεταξύ των υποφορέων.



**Εικόνα 2:** OFDM από τον Chang

Η μετάδοση των πολλαπλών ροών γίνεται σε μικρή απόσταση σε ορθογώνια σήματα υποφέροντος με επικαλυπτόμενα φάσματα, έτσι ο κάθε φορέας διαμορφώνεται με bit από την εισερχόμενη ροή, γιατί πρέπει τα πολλαπλά bits να μεταδίδονται παράλληλα. Πήρε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1970. Η αποδιαμόρφωση βασίζεται σε αλγορίθμους γρήγορου μετασχηματισμού Fourier. Μετέπειτα το 1971 υπήρξε σημαντική βελτίωση από τους Ebert και Weinstein, όπου εισήγαγαν ένα μικρό διάστημα προστασίας που βοηθάει τα κανάλια μετάδοσης να μην επηρεάζονται από την πολλαπλή διάδοση και να έχουν καλύτερη ορθογωνικότητα. Το 1988 η IEEE, το ήθελε ως αρχή για ένα νέο πρότυπο 5GHz και είχε ως στόχο μια σειρά από ροές δεδομένων της τάξης των 6 – 54 Mbps.

Το κύριο πλεονέκτημα του OFDM σε σύγκριση με τα συστήματα του ενός φορέα είναι η ικανότητά του να αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα που υπάρχουν στο κανάλι[2], όπως η εξασθένηση των υψηλών συχνοτήτων, οι παρεμβολές και η εξασθένηση της συχνότητας

## ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

εξαιτίας των πολλαπλών διαδρομών. Η τεχνική OFDM εφαρμόζεται στα συστήματα των ασύρματων επικοινωνιών καθώς και στις ενσύρματες, όπως το DSL, στις γραμμές ρεύματος (PLC), επίσης είναι η αρχή για τις επικοινωνίες της 4<sup>ης</sup> γενιάς. Το OFDM χρειάστηκε αρκετό χρόνο και αλλαγές για να φτάσει στη μορφή που το έχουμε σήμερα, για να χρησιμοποιείται από διάφορα πρότυπα, όπως το 802.11 και 802.16.

Η ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας ( OFDM ), παρουσιάζεται ως ειδική περίπτωση μετάδοσης πολλαπλών φορέων, η οποία στις μέρες μας έχει εμφανιστεί συχνά σε αρκετές εφαρμογές τηλεπικοινωνιών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται αναφορά γενικά στις διαμορφώσεις σήματος, τι είναι ασύρματες επικοινωνίες και για ασύρματα συστήματα επικοινωνιών με χρήση κόμβων επανεκπομπής.

#### 2.1. Διαμορφώσεις Σήματος

Με τον όρο διαμόρφωση, εννοούμε τη διαδικασία που γίνεται για τη μετατροπή περιοδικού σήματος, συνήθως ενός που βρίσκεται σε υψηλή συχνότητα με σκοπό την κωδικοποίηση του συγκεκριμένου σήματος σε ένα σήμα πιο χαμηλής συχνότητας. Η διαμόρφωση είναι απαραίτητη έτσι ώστε να καταφέρει το σήμα να εισέλθει σε κάποιο κανάλι επικοινωνίας [3], π.χ. καλώδιο ή ελεύθερος χώρος, για τις ενσύρματες και τις ασύρματες επικοινωνίες αντίστοιχα. Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται ένας διαμορφωτής και ένας αποδιαμορφωτής, ο πρώτος δέχεται ως είσοδο μια ακολουθία από δυαδικά ψηφία και τη μετατρέπει σε κυματομορφή έτοιμη για μετάδοση. Στην απέναντι πλευρά για να γίνει σωστά η επικοινωνία με τον παραλήπτη και να παραλάβει σωστά το σήμα γίνεται η διαδικασία της αποδιαμόρφωσης.

Οι διαμορφώσεις σήματος χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες οι οποίες είναι αρχικά:

- Οι αναλογικές διαμορφώσεις και εκείνες με τη συνέχεια χωρίζονται σε κάποιες τεχνικές οι οποίες είναι:
  - a) η διαμόρφωση πλάτους ( AM - Amplitude Modulation ),
  - b) η διαμόρφωση συχνότητας ( FM – Frequency Modulation ) και
  - c) η διαμόρφωση φάσης ( PM – Phase Modulation ).
  
- Υπάρχουν και οι ψηφιακές διαμορφώσεις, οι οποίες έχουν ως κύριες τεχνικές τις εξής:
  - a) η διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας ( FSK – Frequency Shift Keying ),
  - b) η διαμόρφωση μετατόπιση πλάτους ( ASK - Amplitude Shift Keying ),
  - c) η διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους ( PSK – Phase Shift Keying ) και
  - d) η διαμόρφωση πλάτους τετραγωνισμού ( QAM - Quadrature Amplitude Modulation )
  - e) η δυαδική μετατόπιση φάσης ( BPSK - Binary Phase Shift Keying )
  - f) η μετατόπιση τετραγωνικής φάσης ( QPSK - Quadrature Phase Shift Keying ).

## 2.2. Ασύρματες Επικοινωνίες

Η πρώτη εμφάνιση των ασύρματων επικοινωνιών γίνεται το 1896 με τη δημιουργία του πρώτου ασύρματου τηλεγράφου από τον Γουλιέλμο Μαρκόνι, ο οποίος μάλιστα το 1897 δημιούργησε τον πρώτο ασύρματο σταθμό. Έτσι λοιπόν παρουσιάζεται το 1906 την πρώτη ραδιοφωνική μετάδοση από το Φεσσέντεν. Λίγο αργότερα, το 1957, επιτυγχάνεται ένα νέο τεχνολογικό επίτευγμα η αποστολή του δορυφόρου Sputnik. Ολοένα και περισσότερες εφευρέσεις εμφανίζονται με την πάροδο των χρόνων, έτσι στις αρχές του 1980 ξεκινάει να κάνουν την εμφάνισή τους σε Ευρώπη και Ιαπωνία τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Το 1991 εμφάνιση για το TCP/IP δίκτυο. Από το σημείο αυτό και έπειτα η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών είναι ραγδαία και συνεχής.

Ως ασύρματες επικοινωνίες ορίζουμε τις επικοινωνίες[5] που αφορούν τη μεταφορά πληροφοριών ή δεδομένων μεταξύ δύο ή περισσότερων κόμβων χωρίς να γίνεται η χρήση καλωδίων ή φυσικών συνδέσεων. Οι τεχνικές αυτές γίνονται εφικτές με τη βοήθεια της χρήσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, π.χ. ραδιοσυχνοτήτων, μικροκυμάτων ή και υπέρυθρων, το μέσο μετάδοσης είναι ο αέρας. Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν γίνει απαραίτητες πλέον στην καθημερινότητα μας.

Οι βασικές τεχνολογίες που σχετίζονται με τις ασύρματες επικοινωνίες είναι οι εξής:

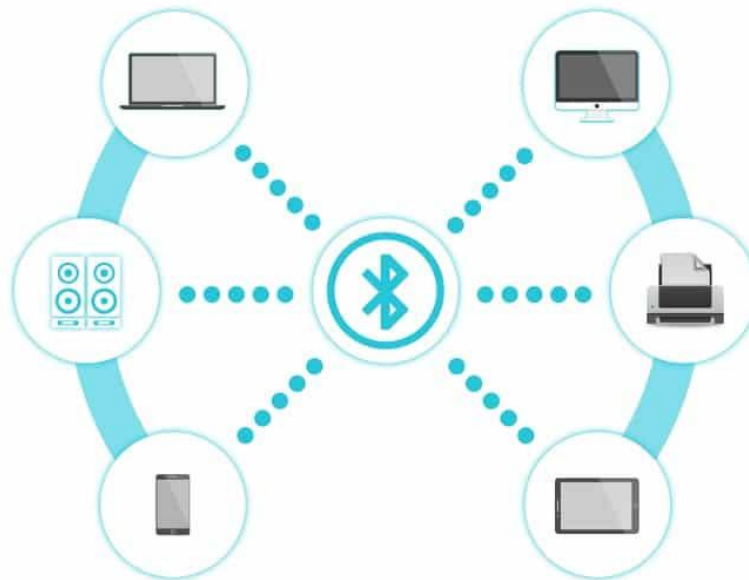
- Ασύρματη Δικτύωση,
  - a) Wi-Fi: Είναι η πιο δημοφιλής τεχνολογία που επιτρέπει στις συσκευές να συνδέονται στο διαδίκτυο και να μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσα σ' ένα τοπικό δίκτυο ( LAN ) π.χ. σπίτι, γραφείο και δημόσιοι χώροι



Εικόνα 3: Wi-Fi Συνδέσεις

ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

- b) Bluetooth: Χρησιμοποιείται ευρέως ως τεχνολογία για να συνδεθούν συσκευές που βρίσκονται σε μικρή εμβέλεια μεταξύ τους, όπως π.χ. smartphones, tablets, ακουστικά αλλά και περιφερειακές συσκευές.



Εικόνα 4: Bluetooth Συνδέσεις

- Κυβελοειδής επικοινωνία,
  - a. Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών: τα δίκτυα κινητών επικοινωνίας, τα οποία είναι, 1G, 2G, 3G, 4G, 5G, από το παλαιότερο στο νεότερο, επιτρέπουν την κινητή επικοινωνία και προσφέρουν υπηρεσίες φωνής και δεδομένων σε κινητές συσκευές σε μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις.

**1G vs. 2G vs. 3G vs. 4G vs. 5G**

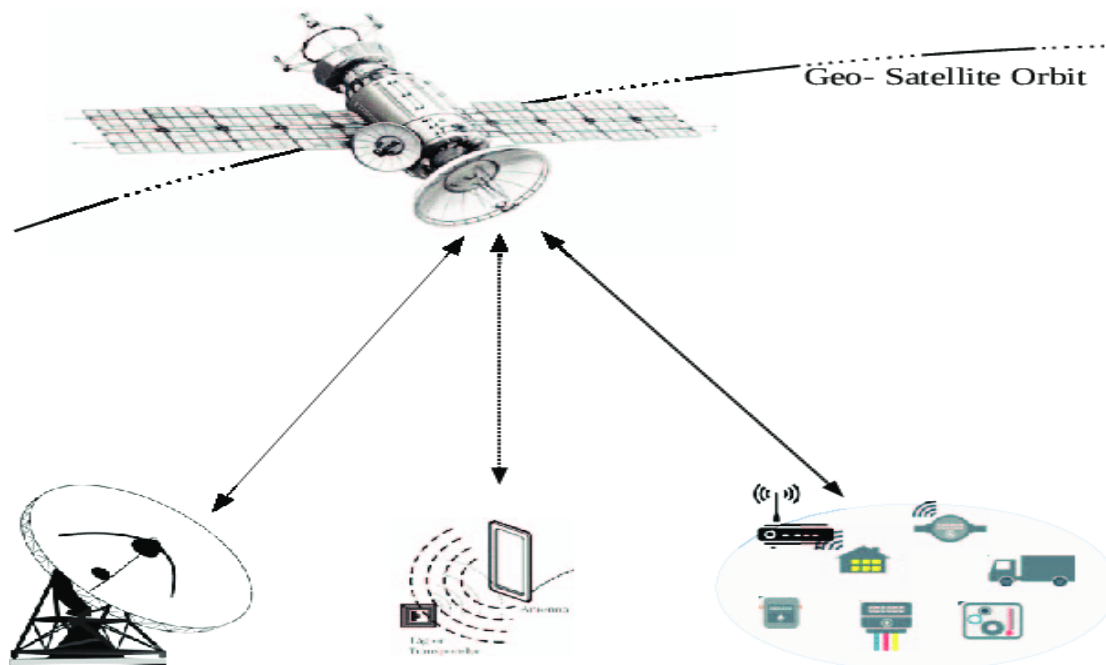
This slide depicts the difference between 1G, 2G, 3G, 4G, and 5G based on development, technology, frequency, bandwidth, access system, and core network.

Features	1G	2G	3G	4G	5G
Start/development	1970/1984	1980/1999	1990/2002	2000/2010	2010/2015
Technology	AMPS, NMT, TACS	GSM	WCDMA	LTE, WiMax	MIMO, mm Waves
Frequency	30KHz	1.8Ghz	1.6 – 2Ghz	2 – 8 Ghz	3-30 Ghz
Bandwidth	2Kbps	14.4 – 64Kbps	2Mbps	2000 Mbps to 1 Gbps	1 Gbps and higher
Access system	FDMA	TDMA/CDMA	CDMA	CDMA	OFDM/BDMA
Core network	PSTN	PSTN	Packet network	Internet	Internet

This slide is 100% editable. Adapt it to your needs and capture your audience's attention.

Εικόνα 5: Σύγκριση των Τεχνολογιών

- b. Δορυφορική Επικοινωνία: η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται για υπάρχει διευκόλυνση της ασύρματης επικοινωνίας σε πολύ μεγάλες αποστάσεις κυρίως όμως σε πολύ απομακρυσμένες περιοχές όπου συνήθως η παραδοσιακή υποδομή δεν είναι εφικτή



Εικόνα 6: Δορυφορική Επικοινωνία

- Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα ( WLANS ),

Τα WLANS, χρησιμοποιούνται για να πετυχάινεται η σύνδεση σε περιορισμένη έκταση, π.χ. σπίτι, γραφείο, για να μην υπάρχει η ανάγκη φυσικού καλωδίου. Η πιο κοινή τεχνολογία είναι αυτή που έχει αναφερθεί και πιο πάνω το Wi-Fi.

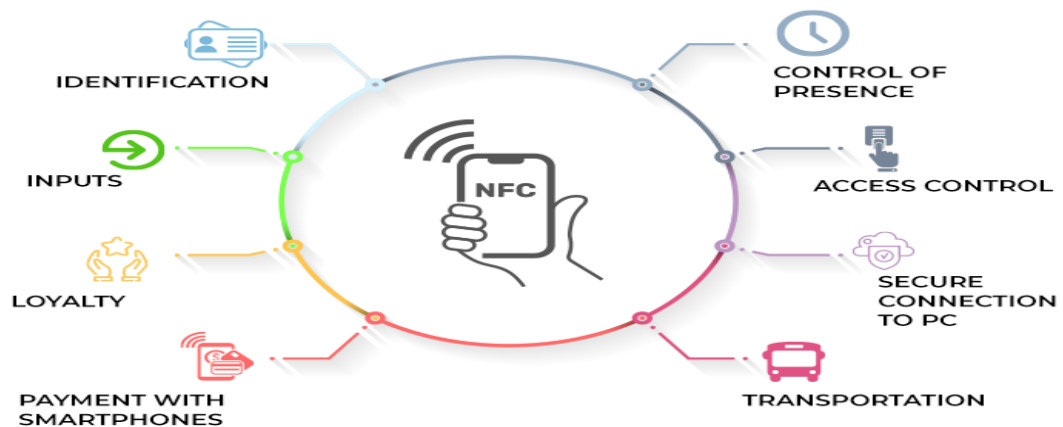


Εικόνα 7: WLAN Επικοινωνία

- Επικοινωνία Κοντινού Πεδίου ( NFC ),  
Το NFC, επιτρέπει ασύρματη επικοινωνία μικρής εμβέλειας μεταξύ συσκευών, δηλαδή σε ελάχιστη απόσταση. Η εφαρμογή του είναι εμφανής στην καθημερινότητα μας, σε ανέπαφες χρηματικές συναλλαγές ή σε μεταφορές δεδομένων μεταξύ συσκευών.

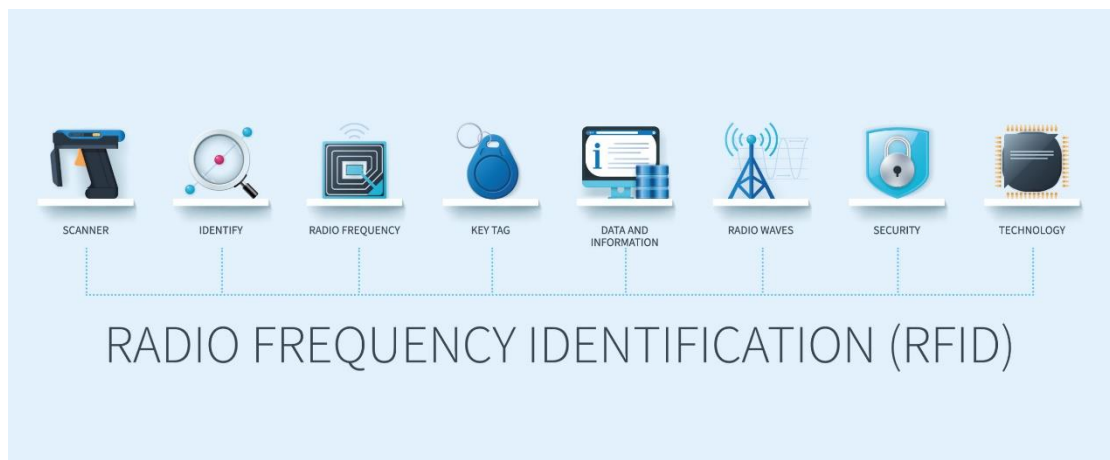


### FACETS OF NFC AND ITS IMPACTS



Εικόνα 8: NFC Επικοινωνία

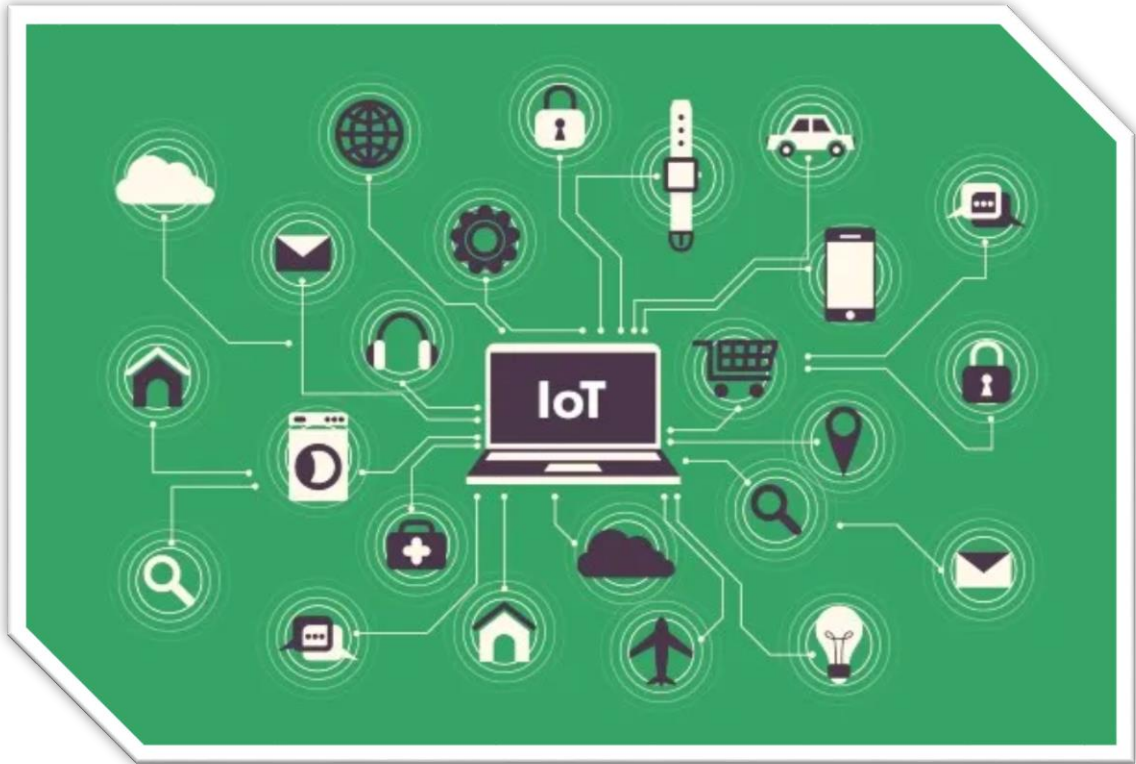
- Αναγνώριση Ραδιοσυχνοτήτων ( RFID ),  
Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται για εντοπισμό ή παρακολούθηση ανθρώπων ή αντικειμένων. Οι κύριες χρήσεις της είναι , για logistics, διαχείριση αποθεμάτων και για έλεγχο πρόσβασης.



Εικόνα 9: RFID Χρήσεις



- Internet of Things ( IoT ),  
Ολοένα και περισσότερες συσκευές που συνδέονται στο διαδίκτυο και στηρίζονται και αυτές στην ασύρματη επικοινωνία για τη σύνδεση μεταξύ τους αλλά και για την ανταλλαγή δεδομένων. Τέτοιες συσκευές είναι: αισθητήρες, οικιακές συσκευές, βιομηχανικά μηχανήματα, συστήματα παρακολούθησης και πολλά ακόμα.



**Εικόνα 10:** IoT Συσκευές

Μέσα σε όλες αυτές τι δυνατότητες που δίνονται καθημερινά στους χρήστες λόγω των ασύρματων επικοινωνιών ελλοχεύουν και πάρα πολλοί κίνδυνοι για το λόγο αυτό εφαρμόζονται και αρκετά πρωτόκολλα ασφαλείας καθώς και πολλοί μηχανισμοί ταυτότητας για την προστασία δεδομένων κατά τη μεταφορά.

Ταυτόχρονα υπάρχουν και αρκετές προκλήσεις , όπως είναι οι παρεμβολές, η υποβάθμιση σήματος, στην περίπτωση της μεγάλης απόστασης και η ανάγκη που δημιουργείται για την καλύτερη φασματική διαχείριση. Η εξέλιξη είναι συνεχής και ραγδαία, εμφανίζοντας αδιάκοπα καινούργιες ευκαιρίες αλλά και προκλήσεις.



### 2.3. Ασύρματα Συστήματα Επικοινωνίας με Χρήση Κόμβων Επανεκπομπής

Τα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας με χρήση κόμβων επανεκπομπής, αναφέρονται σ' ένα σενάριο το οποίο στην πιο απλή μορφή του περιλαμβάνει τρεις κόμβους, βέβαια στη συγκεκριμένη τεχνική υπάρχουν και σενάρια με πολλούς ενδιάμεσους κόμβους για καλύτερη επικοινωνία ή για κάλυψη μεγαλύτερης γεωγραφικής περιοχής, αλλά και για λόγους που θα αναφερθούν παρακάτω. Στην πιο απλή μορφή οι τρεις κόμβοι είναι οι εξής: ο κόμβος αφετηρίας ή πηγής, τον ενδιάμεσο κόμβο ο οποίος χαρακτηρίζεται και ως κόμβος επανεκπομπής και τον τελικό κόμβο ή κόμβο προορισμού [4]. Έτσι λοιπόν οι πληροφορίες μεταδίδονται από την πηγή στον προορισμό μέσω ενός ενδιάμεσου κόμβου, δηλαδή η μεταφορά γίνεται σε δύο βήματα ή αλλιώς “πηδήματα” – hops.

Η διαδικασία της επικοινωνίας γίνεται με δύο βήματα:

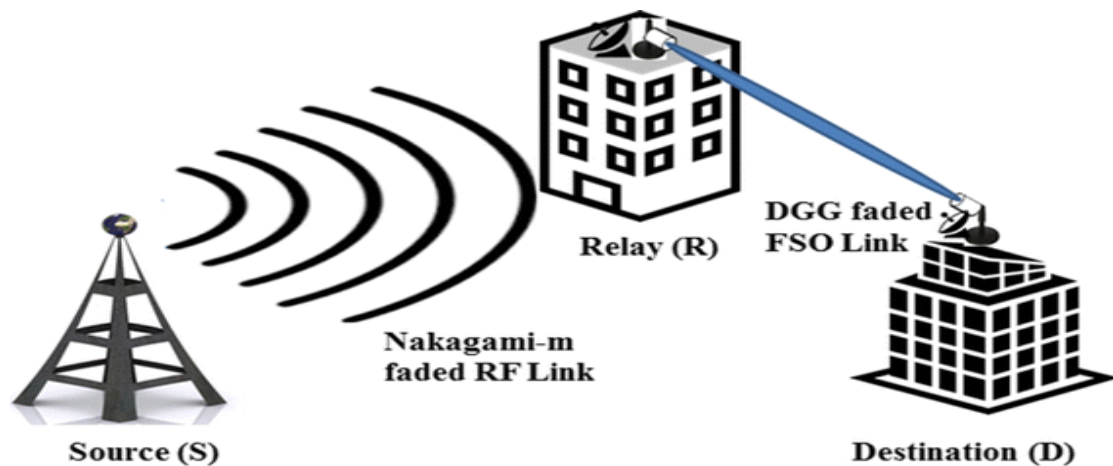
- a) Ο κόμβος αφετηρίας ξεκινάει να στέλνει δεδομένα στον ενδιάμεσο κόμβο. Στη συνέχεια ο κόμβος επανεκπομπής λαμβάνει τα δεδομένα και τα μεταδίδει στον προορισμό.
- b) Ο κόμβος επανεκπομπής, αφού έχει λάβει τα δεδομένα από την πηγή έρχεται εκείνος σε κατάσταση πομπού και στέλνει τα δεδομένα στον τελικό κόμβο.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της επικοινωνίας με χρήση κόμβων επανεκπομπής είναι τα εξής:

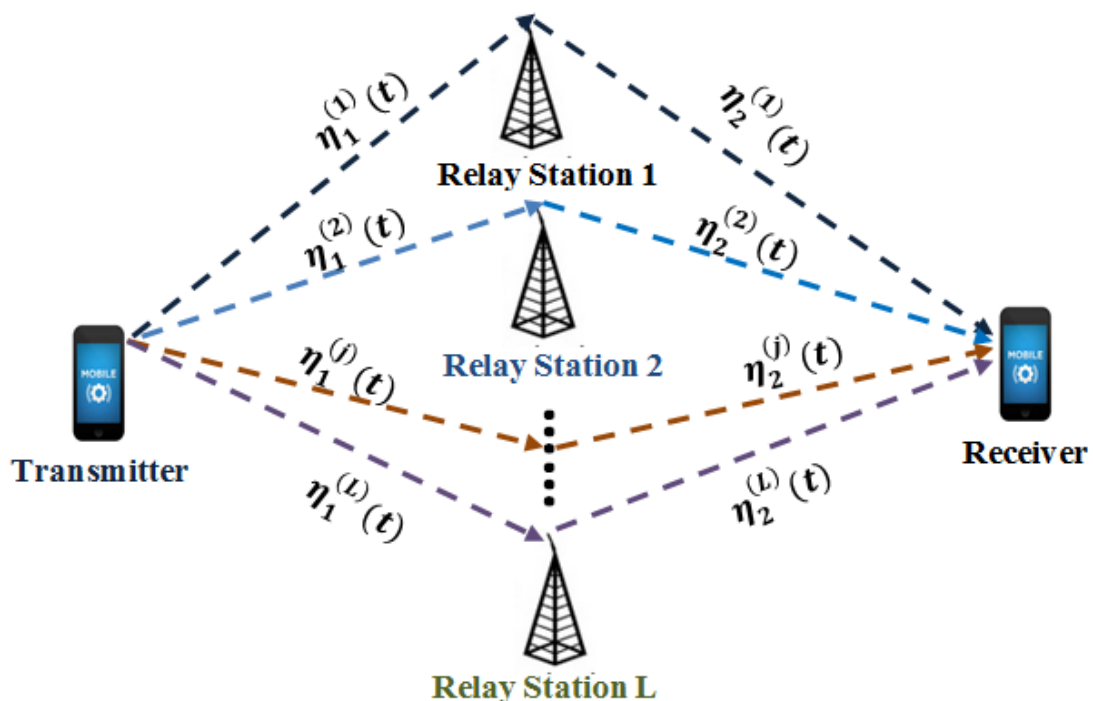
- Επέκταση εύρους επικοινωνίας, το ενεργό εύρος επικοινωνίας επεκτείνεται γεγονός που το καθιστά σημαντικό στην περίπτωση που οι κόμβοι πηγής και προορισμού είναι σε μεγάλη απόσταση για να υπάρξει απευθείας σύνδεση.
- Βελτίωση της αξιοπιστίας, γίνεται αύξηση της αξιοπιστίας της επικοινωνίας μειώνοντας σημαντικά τις παρεμβολές ή τις εξασθενίσεις του σήματος, αυτό σημαίνει πως όταν υπάρξει μεγάλη μείωση της ισχύος του σήματος, ο ενδιάμεσος κόμβος βοηθάει στην αντιμετώπιση και στην αύξηση της ισχύος.
- Μείωση της ενέργειας, επειδή εξαλείφονται οι αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη εμφανίζεται σημαντική μείωση στην ενέργεια που δαπανάται για την επικοινωνία.
- Εξισορρόπηση φορτίου, οι επικοινωνίες με χρήση κόμβων επανεκπομπής έχουν τη δυνατότητα να κατανέμουν το φορτίο της επικοινωνίας σε περισσότερους κόμβους, για να αυξηθεί συνολικά η απόδοση του δικτύου, αλλά και για να μειωθεί η συμφόρησή του.
- Μετριασμός παρεμβολών, όταν υπάρχει κάποια παρεμβολή ή συμφόρηση στο κανάλι επικοινωνίας οι κόμβοι θα συμμετέχουν στην αποφυγή των συγκεκριμένων προκλήσεων και βοηθήσουν στην παροχή νέων διαδρομών για τη μετάδοση.
- Εφαρμογές, οι ασύρματες επικοινωνίες με χρήση κόμβων επανεκπομπής έχουν κάνει την εμφάνισή τους σε διάφορα σενάρια κάποια εκ των οποίων είναι, τα ασύρματα

δίκτυα αισθητήρων, τα κινητά δίκτυα και ορισμένες εμφανίσεις στα κυψελοειδή σενάρια επικοινωνίας.

Οι συγκεκριμένες επικοινωνίες με χρήση κόμβων επανεκπομπής χρησιμοποιούνται σε ασύρματα δίκτυα για καλύτερη συνολική απόδοση των συστημάτων αλλά και για επέκταση του εύρους επικοινωνίας. Επίσης είναι πολύ σημαντική όταν η επικοινωνία μεταξύ πηγής και προορισμού είναι μη αξιόπιστη. Γενικά υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα αλλά και πολλές προκλήσεις, όπως είναι η διαχείριση των παρεμβολών και η αντιμετώπιση των καθυστερήσεων που υπάρχουν στους κόμβους επαναμετάδοσης.



Εικόνα 11: Επικοινωνία με έναν ενδιάμεσο κόμβο



Εικόνα 12: Επικοινωνία με περισσότερους ενδιάμεσους κόμβους

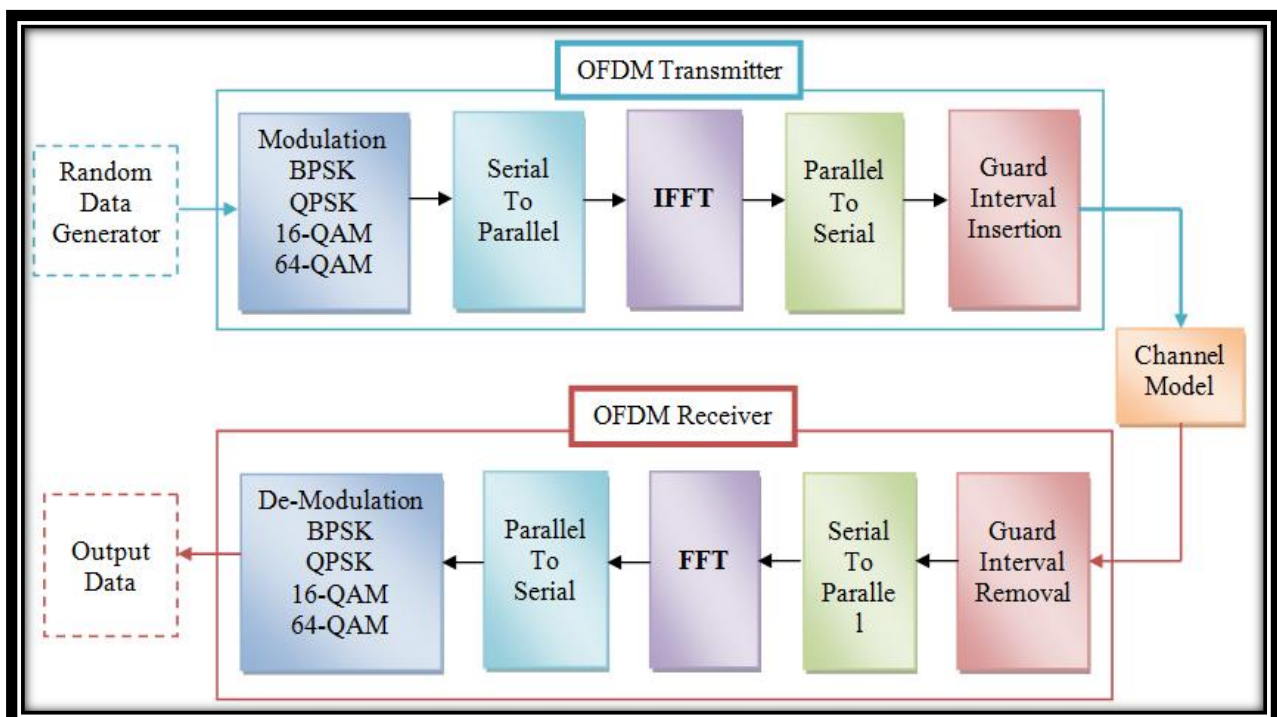
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3. OFDM ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στο τι είναι το OFDM, τα πλεονεκτήματα, τις προκλήσεις που υπάρχουν, τις εφαρμογές του, στην ορθογωνικότητα, στην επέκταση του OFDM το OFDMA και στη σύγκριση του OFDM με το OFDMA.

#### 3.1. Τι είναι το OFDM;

Το OFDM, δηλαδή η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης της συχνότητας χρησιμοποιείται σε διάφορα συστήματα και είναι ένας τύπος ψηφιακής διαμόρφωσης για την κωδικοποίηση δεδομένων σε πολλαπλές φέρουσες συχνότητες [6]. Εμφανίζεται επίσης για να αντιμετωπίζει τις προκλήσεις που υπάρχουν για τη μετάδοση υψηλού ρυθμού δεδομένων μέσω των ενσύρματων και ασύρματων καναλιών επικοινωνίας. Πλέον έχει εξελιχθεί ως ένα αρκετά δημοφιλές σχήμα ψηφιακής επικοινωνίας και χρησιμοποιείται στη ψηφιακή τηλεόραση, σε ηχητικές μεταδόσεις, για πρόσβαση στο διαδίκτυο DSL, στα ασύρματα δίκτυα, στα δίκτυα του ηλεκτρικού ρεύματος αλλά και στις κινητές επικοινωνίες.



Εικόνα 13: OFDM Transmitter & Receiver

### 3.2. Βασικά Χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα, εφαρμογές και προκλήσεις

Στη συνέχεια λοιπόν, γίνεται ανάλυση των χαρακτηριστικών, των πλεονεκτημάτων, των εφαρμογών αλλά και των προκλήσεων που υπάρχουν στη συγκεκριμένη τεχνική.

Το βασικό χαρακτηριστικό του OFDM είναι:

- Έχει την ικανότητα να διαιρεί το εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο από το κανάλι σε πολλούς υποφορείς, δηλαδή χωρίζει μια ροή υψηλού ρυθμού δεδομένων σε ροές χαμηλότερου ρυθμού δεδομένων. Οι υποφορείς έχουν μεγάλη διαφορά σε ότι αφορά τη συχνότητα μεταξύ τους, αλλά χρησιμοποιούν και διάφορα σχήματα διαμόρφωσης, όπως το QAM, που σημαίνει ότι είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους.

Η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας ( OFDM ) προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, τα οποία έχουν συμβάλει στην ευρεία υιοθέτησή της σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας:

- Ανθεκτικότητα – Ισχυρότητα σε εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών, δηλαδή το OFDM είναι το κατάλληλο για τις διάφορες καταστάσεις του καναλιού, όπου πολλαπλά αντίγραφα του εκπεμπόμενου σήματος φτάνουν στο τελικό σημείο με διαφορετικές καθυστερήσεις. Αυτό το καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε ασύρματα και ευρυζωνικά συστήματα επικοινωνίας.
- Διαστήματα Φύλαξης, για να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις από τη διάδοση των πολλαπλών διαδρομών και να μην εξαπλωθεί η καθυστέρηση, συχνά κάνουν την παρεμβολή τους διαστήματα προστασίας, κυκλικά προθέματα μεταξύ των συμβόλων. Τα διαστήματα αυτά προσφέρουν ένα buffer ενάντια στις καθυστερήσεις του εκπεμπόμενου σήματος.
- Φασματική απόδοση, το OFDM έχει τη δυνατότητα να επιτυγχάνει υψηλή φασματική απόδοση “ πακετάροντας” στενά τους υποφορείς στο εύρος ζώνης που έχουμε διαθέσιμο, έτσι ώστε να μη δημιουργούνται πολύ σημαντικές παρεμβολές, δηλαδή ελαχιστοποιεί την παρεμβολή διασυμβολικών (ISI) και τη φασματική διαρροή.
- Μείωση παρεμβολών, η ορθογωνικότητα μεταξύ των υποφορέων βοηθάει σημαντικά στην ελαχιστοποίηση των μεταξύ τους παρεμβολών, αυξάνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος και την ευρωστία παρά την παρουσία του θορύβου και των υπολοίπων σημάτων που ενδεχομένως υπάρχουν.
- Χαμηλή ευαισθησία στην εξάπλωση καθυστερήσεων, τα συστήματα OFDM παρουσιάζουν χαμηλή ευαισθησία στη διασπορά καθυστερήσεων, καθιστώντας τα κατάλληλα για μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας σε περιβάλλοντα με

σημαντική εξάπλωση καθυστέρησης, όπως σενάρια ασύρματης επικοινωνίας σε εσωτερικούς και αστικούς χώρους.

- Ευέλικτη προσαρμογή σε συνθήκες καναλιού: Τα συστήματα OFDM μπορούν να προσαρμόσουν δυναμικά τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σε βάση δευτερευόντων φορέων, επιτρέποντας προσαρμοστικές τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για βελτιστοποίηση της απόδοσης σε διαφορετικές συνθήκες καναλιού. Αυτή η προσαρμοστικότητα ενισχύει τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία του συστήματος.
- Ευκολία εξισορρόπησης: Η εξίσωση ενός σήματος OFDM είναι απλούστερη σε σύγκριση με τα σχήματα διαμόρφωσης ενός φορέα, καθώς η εξισορρόπηση μπορεί να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα σε κάθε υποφορέα. Αυτό απλοποιεί τον σχεδιασμό του δέκτη και επιτρέπει αποτελεσματικές τεχνικές εκτίμησης και εξισορρόπησης καναλιών.

Συνολικά, ο συνδυασμός υψηλής φασματικής απόδοσης, ανθεκτικότητας σε διάφορες βλάβες καναλιών και αποτελεσματικής εφαρμογής του OFDM το καθιστούν μια προτιμώμενη τεχνική διαμόρφωσης για σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας

Όσον αφορά την αναπαράσταση στον τομέα του χρόνου και τη συχνότητα η υλοποίηση πραγματοποιείται ως εξής:

- Στον τομέα του χρόνου, η ροή των δεδομένων υψηλής ταχύτητας μετατρέπεται σε παράλληλες ροές, η οποία έχει αντιστοίχιση έκαστη σε έναν υποφορέα. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρήση του Αντίστροφου Μετασχηματισμού Φουριέ ( IFFT ).
- Από την άλλη στον τομέα της συχνότητας, το OFDM σήμα κάνει την εμφάνιση του ως ένα σύνολο υποφορέων σε μικρή απόσταση, όπου ο κάθε ένας φέρει τις δικές του πληροφορίες.

Η εφαρμογή στην καθημερινότητα μας του OFDM υπάρχει στην:

- Ασύρματη επικοινωνία, το OFDM χρησιμοποιείται αρκετά στα πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας, όπως το Wi-Fi, το LTE αλλά και στο 5G, εξαιτίας της ικανότητας που παρέχει υψηλούς ρυθμούς και μεγάλης απόδοσης στις δύσκολες συνθήκες που υπάρχουν στα κανάλια επικοινωνίας.
- Ψηφιακή μετάδοση, επίσης χρησιμοποιείται το OFDM στα συστήματα της ψηφιακής τηλεόρασης ( DTV ) και ψηφιακής εκπομπής σήματος ( DAB ).

- Επικοινωνία γραμμής τροφοδοσίας, το OFDM έχει κάνει την εμφάνιση του και στην επικοινωνία των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, επιτρέποντας έτσι να γίνεται μετάδοση δεδομένων μέσω των έξυπνων δικτύων για τις διάφορες εφαρμογές.

Ενώ η Ορθογώνια Πολυπλεξία Διάρθρωσης Συχνότητας ( OFDM ) έχει πολλά πλεονεκτήματα, έχει να αντιμετωπίσει παρόλα αυτά και κάποιες προκλήσεις [20]:

- Η αναλογία της κορυφής ( peak ) σε σχέση με τη μέση ισχύ ( PAPR ), τα σήματα OFDM μπορεί να έχουν υψηλά πλάτη αιχμής δηλαδή και υψηλές απαιτήσεις σε ό,τι αφορά την ισχύ, την πιθανή μη-γραμμική παραμόρφωση, άρα συνεπώς απαιτητικούς και πολύπλοκους ενισχυτές σήματος
- Συγχρονισμός, τα συστήματα OFDM απαιτούν ακριβή συγχρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη για να υπάρξει η διατήρηση της ορθογωνικότητας. Η επίτευξη ακριβούς συγχρονισμού μεταξύ πολλαπλών υποφορέων σε ένα σύστημα OFDM απαιτεί σύνθετους και αποτελεσματικούς αλγόριθμους συγχρονισμού, ειδικά σε περιβάλλοντα με κανάλια εξασθένησης επιλεκτικής συχνότητας.
- Εξαιτίας της απαίτησης υψηλού συγχρονισμού τα συστήματα OFDM, αλλά και καθώς και οι τεχνικές που χρειάζονται για την εκτίμηση της εξισορρόπησης καναλιών, αυξάνουν την πολυπλοκότητα του δέκτη, αλλά εξίσου όμως και του πομπού.
- Επιβάρυνση διαστήματος προστασίας: Τα συστήματα OFDM απαιτούν συνήθως ένα διάστημα προστασίας ( κυκλικό πρόθεμα ) για τον μετριασμό της παρεμβολής μεταξύ συμβόλων ( ISI ) που προκαλείται από τη διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Αυτό το διάστημα προστασίας προσθέτει επιβάρυνση στο μεταδιδόμενο σήμα, μειώνοντας τη φασματική απόδοση.
- Περιορισμένη ανθεκτικότητα σε παρεμβολές στενής ζώνης: Ενώ το OFDM είναι ανθεκτικό έναντι του ξεθωριάσματος επιλεκτικής συχνότητας, ενδέχεται να υποστεί υποβάθμιση της απόδοσης παρουσία παρεμβολών στενής ζώνης, όπως σήματα παρεμβολής στενής ζώνης ή παρεμβολές στενής ζώνης ομοκαναλιού.
- Μη γραμμική παραμόρφωση: Σε πρακτικές εφαρμογές, τα συστήματα OFDM μπορεί να υποφέρουν από μη γραμμικά φαινόμενα παραμόρφωσης, όπως παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης και μη γραμμικότητες ενισχυτή, που μπορεί να υποβαθμίσουν την ποιότητα του σήματος και να αυξήσουν το ποσοστό σφάλματος bit ( BER ).
- Ευαισθησία στη μετατόπιση συχνότητας και στο θόρυβο φάσης: Τα συστήματα OFDM είναι ευαίσθητα στη μετατόπιση συχνότητας φορέα και στο θόρυβο φάσης, που μπορεί να οδηγήσει σε παρεμβολές μεταξύ φορέων ( ICI ) και υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος, ειδικά σε σενάρια κινητικότητας υψηλής ταχύτητας.

Συνοπτικά το OFDM είναι μια καινοτόμα τεχνική διαμόρφωσης που έχει γίνει απαραίτητη στα σημερινά συστήματα επικοινωνίας αντιμετωπίζοντας έτσι πολλές προκλήσεις και προσφέροντας μια ισορροπία ανάμεσα στη φασματική απόδοση και τους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Το OFDM επιπλέον, παραμένει μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική διαμόρφωσης στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας λόγω της ικανότητάς του να χρησιμοποιεί αποτελεσματικά φασματικούς πόρους και την καταλληλότητά του για εφαρμογές ευρυζωνικής επικοινωνίας.

### 3.3. Ορθογωνικότητα

Το πιο σημαντικό ίσως ρόλο στην Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM) είναι η ορθογωνικότητα, η οποία είναι μια πολύ διαδεδομένη τεχνική διαμόρφωσης και πολυπλεξία. Το βασικό χαρακτηριστικό ενός OFDM συστήματος είναι ότι οι δευτερευών φορείς είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους [7], δηλαδή ουσιαστικά ορθογωνικότητα σημαίνει ότι οι κυματομορφές διαφορετικών υποφορέων είναι κάθετες μεταξύ τους για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (περίοδο), έχοντας ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ελάχιστων παρεμβολών, άρα δεν απαιτούνται ζώνες προστασίας μεταξύ των φορέων. Γεγονός που κάνει αισθητά πιο απλή τη σχεδίαση του πομπού και του δέκτη, αντίθετα με ένα συμβατικό FD, όπου απαιτείται ξεχωριστό φίλτρο σε κάθε υποκανάλι. Αν χαθεί το πλεονέκτημα του OFDM, δηλαδή να μην μπορεί να διατηρηθεί η ορθογωνικότητα ανάμεσα στους υποφορείς, τότε εμφανίζεται η ανάγκη από αύξηση υποφορέων, άρα η διαμόρφωση, ο συγχρονισμός και η αποδιαμόρφωση παράγουν ένα πολύ πιο σύνθετο OFDM σύστημα – κύκλωμα, άρα αυξάνεται και το συνολικό κόστος. Επιπλέον για την υλοποίηση των μετασχηματισμών Fourier αυξάνονται οι ταλαντωτές που χρησιμοποιούνται για τις απαιτούμενες συχνότητες.

Η ορθογωνικότητα υπολογίζει την απόσταση μεταξύ των υποφερόντων με τον τύπο που αναφέρεται παρακάτω:  $\Delta f = \frac{k}{Tu}$ ,

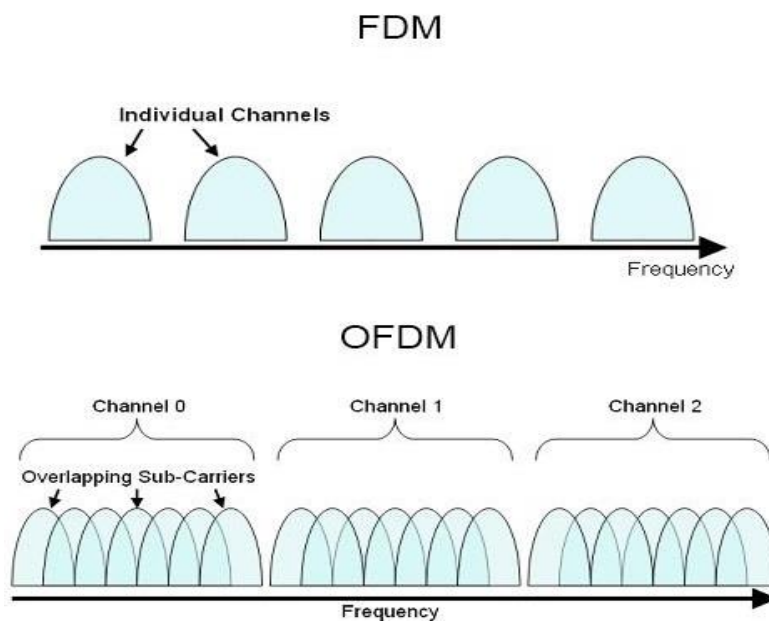
όπου  $Tu$  είναι η χρήσιμη διάρκεια συμβόλου (το “παράθυρο” από την πλευρά του δέκτη) και το  $k$  είναι ένας ακέραιος αριθμός ( $k > 0$ ), τις περισσότερες φορές ισούται με 1 ( $k = 1$ ). Αυτό σημαίνει ότι κάθε φέρουσα συχνότητα δέχεται  $k$  περισσότερους ολοκληρωμένους κύκλους ανά περίοδο συμβόλου με τον προηγούμενο υποφορέα. Συνεπώς, αν έχουμε έναν αριθμό από  $N$  υποφορείς, το συνολικό εύρος ζώνης διέλευσης δίνεται από τον τύπο:

$$B \cong N \times \Delta f (Hz)$$

Παράλληλα η ορθογωνικότητα επιτρέπει και την υψηλή φασματική απόδοση.

Τα κύρια χαρακτηριστικά που αφορούν την ορθογωνικότητα στο OFDM είναι τα εξής:

- Οι υποφορείς του OFDM συστήματος, όπως έχει γίνει αναφορά αρκετές φορές νωρίτερα, είναι με τέτοιο τρόπο τοποθετημένοι ώστε να αποτελούν ακέραια πολλαπλάσια μία θεμελιώδους συχνότητας, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο την ορθογωνικότητα στον τομέα της συχνότητας. Η ορθογωνικότητα βοηθάει στην αποτελεσματικότερη χρήση του συνολικού φάσματος, διότι κάθε υποφορέας μεταφέρει ανεξάρτητα δεδομένα.
- Για να διασφαλιστεί η ορθογωνικότητα στον τομέα του χρόνου, το OFDM διαιρεί ολόκληρο το εύρος ζώνης σ' έναν μεγάλο αριθμό υποφορέων στενής ζώνης. Η διάρκεια που θα έχει το κάθε σύμβολο επιλέγεται προσεκτικά έτσι ώστε να μην υπάρχει επικάλυψη χρονικά.
- Επιπλέον για την περαιτέρω ενίσχυση της ορθογωνικότητας χρησιμοποιείται το κυκλικό πρόθεμα το οποίο είναι ένα αντίγραφο από το τέλος ενός συμβόλου και τοποθετείται στην αρχή για να μειωθούν οι επιπτώσεις που αφορούν την καθυστέρηση εξαιτίας του καναλιού.
- Επίσης, ένα ακόμα χαρακτηριστικό της ορθογωνικότητας [20] είναι τα διαστήματα φύλαξης ή διαστήματα προστασίας, όπως ονομάζονται, βοηθούν και αυτά με τη σειρά τους στην περαιτέρω προστασία της ορθογωνικότητας. Τα συγκεκριμένα διαστήματα αποτελούν κάποιες χρονικές, όπου δεν πραγματοποιείται η μετάδοση δεδομένων.



Εικόνα 14: Ορθογωνικότητα καναλιών



Εν κατακλείδι, η τέλεια ορθογωνικότητα σε πραγματικό χρόνο είναι αδύνατη να πραγματοποιηθεί, λόγω των εξαιρετικών παραγόντων που πιθανώς θα επηρεάζουν τα συστήματα και οι μη ιδανικές συνθήκες στον πομπό και στο δέκτη. Συνεπώς οι μέθοδοι και οι τεχνικές που πραγματοποιούνται βοηθούν σε αυτές τις προκλήσεις για τη βελτίωση του κάθε συστήματος.

### 3.4. OFDMA μία επέκταση του κλασσικού OFDM

Μια επέκταση, όπως θα χαρακτηριζόταν, του OFDM αποτελεί το OFDMA ( Orthogonal Frequency Division Multiple Access ), είναι μια εκδοχή που περιέχει πολλαπλούς χρήστες με διαφορετικά ποσά κατανάλωσης δεδομένων και κάνει συνήθως την εμφάνιση του σε ασύρματα συστήματα επικοινωνιών π.χ. Wi-Fi, WiMAX και LTE. Αυτή η διαδικασία διευκολύνεται με το διαχωρισμό των καναλιών σε μικρότερες συχνότητες γνωστές ως μονάδες πόρων ή ( RU's ) [9]. Για μια εργασία που απαιτεί μεγάλο όγκο δεδομένων, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η RU. Το OFDMA έχει βοηθήσει σημαντικά στην επίλυση προβλημάτων συμφόρησης του δικτύου.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που το έχουν καθιστούν κατάλληλο για τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών είναι τα εξής:

- Η ορθογωνικότητα όπως και στο κλασσικό OFDM έτσι και στο OFDMA είναι αναπόσπαστο κομμάτι. Το OFDMA κάνει την ίδια λειτουργία όσον αφορά την ορθογωνικότητα, δηλαδή διαιρεί το φάσμα που είναι διαθέσιμο για τις συχνότητες σε πολλαπλούς ορθογώνιους υποφορείς. Υπάρχει κάποια απόσταση μεταξύ των υποφορέων για να αποφεύγονται οι παρεμβολές, ακόμα και όταν η μετάδοση είναι ταυτόχρονη.
- Υποστηρίζει πολλαπλούς χρήστες, δίνεται η δυνατότητα σε μεγάλο αριθμό χρηστών να λαμβάνουν και να στέλνουν δεδομένα ταυτόχρονα και στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Στον κάθε χρήστη παρέχεται ένα υποσύνολο διαθέσιμων υποφορέων κάνοντας τις μεταδόσεις να πολυπλέκονται στον τομέα συχνοτήτων. Παρά την πολυπλεξία η χωρητικότητα του συστήματος αυξάνεται και εμφανίζεται μία αρκετά μεγάλη βελτίωση στην απόδοση του φάσματος.
- Από την άλλη όταν εμφανίζεται ισοστάθμιση χαμηλής πολυπλοκότητας στα OFDMA συστήματα που κάνουν χρήση απλών τεχνικών εξισορρόπησης, που προκαλούν μείωση της πολυπλοκότητας της επεξεργασίας του δέκτη διατηρώντας παράλληλα την απόδοση στις δύσκολες συνθήκες που ενδεχομένως θα προκύψουν στο κανάλι μετάδοσης.

- Επεκτασιμότητα, το OFDMA προσφέρει επεκτάσεις για να μπορέσει να υποστηρίξει διάφορα εύρη ζώνης και σενάρια ανάπτυξης. Παράλληλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα επικοινωνίας στενής ζώνης, με τον τρόπο αυτό εμφανίζεται κατάλληλο για τα ασύρματα πρότυπα WiMAX, Wi-Fi και 4G\_LTE, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που είναι τα εξής τρία:

- Ευελιξία στην κατανομή των πόρων, η μοναδική διαφορά που υπάρχει ανάμεσα σε OFDM και OFDMA είναι ότι το OFDMA προσφέρει δυναμική κατανομή των διαθέσιμων πόρων.
- Ανθεκτικότητα σε επιλεκτική εξασθένιση συχνότητας, όπως συμβαίνει και στο OFDM.
- Στο OFDMA, αλλά και στο OFDM, η απόσταση ανάμεσα στους υποφορείς είναι προσεκτικά επιλεγμένη για να διασφαλίζεται η ορθογωνικότητα.

Το OFDMA παρά όμως τα θετικά χαρακτηριστικά που έχει, κάνουν την εμφάνιση τους και κάποια μειονεκτήματα:

- Συγχρονισμός συχνότητας και χρονισμού, το OFDMA συστήματα έχουν υψηλές απαιτήσεις σε ό,τι αφορά τον ακριβή συγχρονισμό ανάμεσα στο πλήθος χρηστών που διαμοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων [8]. Κάτι που είναι ιδιαίτερα δύσκολο, λόγω του γεγονότος ότι οι συνθήκες των καναλιών μετάδοσης συνεχώς μεταβάλλονται.
- Παράλληλα όμως υπάρχει το ενδεχόμενο να υπάρξουν παρεμβολές ανάμεσα στους χρήστες, ενώ το OFDMA τις ελαχιστοποιεί όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, λόγω το μη γραμμικών επιδράσεων των στοιχείων του πομπού και του δέκτη. Με τις παρεμβολές κάνει την εμφάνισή της η μειωμένη απόδοση του συστήματος, ειδικά όταν υπάρχουν περιπτώσεις σημαντικής πυκνής ανάπτυξης.
- Οι OFDMA δέκτες χρειάζονται στις περισσότερες περιπτώσεις σύνθετους αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος, όπως είναι ο Γρήγορος Μετασχηματισμός Φουριέ που χρησιμοποιείται συνήθως, για να πραγματοποιηθεί η σωστή αποδιαμόρφωση και αποκωδικοποίηση των σημάτων που λαμβάνει ο δέκτης. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας εμφανίζεται αύξηση των χρηστών και των υποφορέων, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο το κόστος υλοποίησης και την κατανάλωση ενέργειας.
- Αυξημένη επιβάρυνση, λόγω της κατανομής των πόρων, τα OFDMA συστήματα παρουσιάζουν δυναμική κατανομή πόρων, όπως έγινε αναφορά και προηγουμένως,

όμως εξαιτίας των πληροφοριών σήματος και των ελέγχων που ανταλλάσσονται μεταξύ του σταθμού βάσης και των χρηστών η μετάδοση μικρών πακέτων μειώνει την αποτελεσματική απόδοση του συστήματος.

- Στα OFDMA συστήματα όταν υπάρχει εξάπλωση του φαινομένου Doppler ή επιλεκτική εξασθένηση συχνότητας, κυρίως σε κινητά και εσωτερικά περιβάλλοντα, παρουσιάζονται δύο είδη παρεμβολών:
  - a) Η πρώτη είναι οι παρεμβολές μεταξύ των συμβόλων, που απαιτούν εξελιγμένες τεχνικές εξισορρόπησης για τον περιορισμό τους και
  - b) Η δεύτερη αφορά τις παρεμβολές των χρηστών, που μειώνει τη χωρητικότητα του συστήματος, τη φασματική απόδοση, αλλά παρουσιάζεται και υποβάθμιση στη ορθογωνικότητα.

Τα OFDMA συστήματα, όπως αναφέρθηκε προσφέρουν έναν αριθμό από πλεονεκτήματα. Υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα, όπως υπάρχουν σε οτιδήποτε στον πραγματικό κόσμο, παρά τα συγκεκριμένα μειονεκτήματα αυτά παραμένουν τα συστήματα OFDMA πολύ σημαντικά για τις τεχνολογίες 4G, 5G και για πλήθος ακόμα τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στις ασύρματες επικοινωνίες. Με τις συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις που υπάρχουν στην επεξεργασία σήματος, τη διαχείριση των παρεμβολών και στις τεχνικές συγχρονισμού, οι προκλήσεις μειώνονται και η βελτίωση του OFDMA συστημάτων είναι συνεχής.

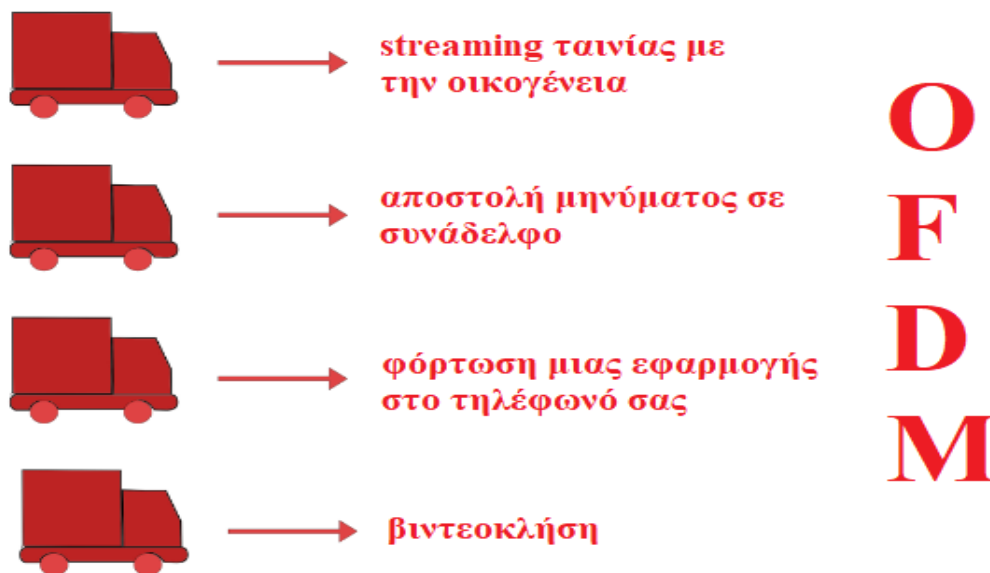
### 3.5. Σύγκριση OFDM και OFDMA

Συγκριτικά τώρα OFDM και OFDMA συστήματα είναι ρητά συνδεδεμένες τεχνολογίες, αλλά οι σκοποί που εξυπηρετούν στα συστήματα επικοινωνιών είναι διαφορετικοί. Το OFDM, συνήθως κάνει την εμφάνιση του σε ενσύρματα συστήματα επικοινωνίας, δηλαδή DSL, επίσης υπάρχει στα ασύρματα LAN και στη ψηφιακή μετάδοση ήχου ή βίντεο ( DAB / DVB ). Το OFDMA έχει ευρεία χρήση στα συστήματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών ( 4G / LTE, 5G ), WiMAX και στα δίκτυα Wi-Fi. Επίσης το OFDM αποτελεί τεχνική διαμόρφωσης που εμφανίζεται συνήθως στην επικοινωνία από ένα σημείο σε πολλαπλά σημεία, από την άλλη πλευρά το OFDMA αποτελεί επέκταση του OFDM, καθώς υποστηρίζει την επικοινωνία μεγάλου αριθμού χρηστών με δυναμική κατανομή των υποφορέων σε διαφορετικούς χρήστες.

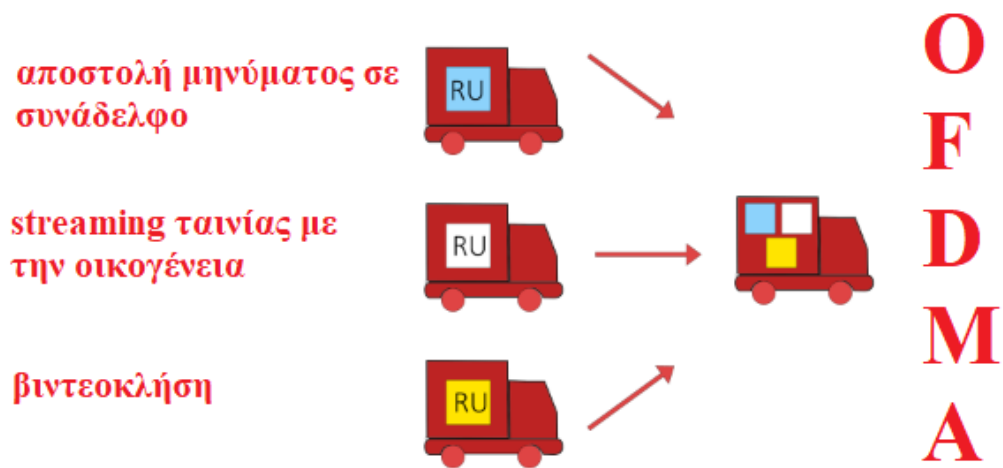
Στις παρακάτω εικόνες θα δεχτούμε ότι το OFDM και το OFDMA είναι δύο φορητά. Συγκρίνοντας τις εικόνες βλέπουμε ότι στην εικόνα 15, που εμφανίζεται το OFDM,

## ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

χρειαζόμαστε τέσσερα φορτηγά (υποφορείς) για να μεταφέρουν τα διάφορα εμπορεύματα (δεδομένα) μας στον ίδιο προορισμό, για να συμβεί αυτό πρέπει όμως το κάθε φορτηγό (πλαίσιο δεδομένων), είναι υποχρεωτικό, να παραδώσει για να ξεκινήσει η επόμενη παράδοση, με αυτό τον τρόπο η παράδοση των δεδομένων γίνεται μεμονωμένα. Επίσης υπάρχει ενδεχόμενο να υπάρχει επιπλέον χώρος στο κάθε πλαίσιο δεδομένων, αλλά λόγω του διαμοιρασμού πόρων το κάθε πλαίσιο δέχεται σταθερό όγκο δεδομένων. Στην εικόνα 16 γίνεται απεικόνιση του OFDMA, στη προκειμένη περίπτωση χρειαζόμαστε μόλις ένα φορτηγό (χρήστη), ανεξάρτητα από τον τύπο των δεδομένων για να μεταφερθούν τα εμπορεύματα (δεδομένα) σε ένα προορισμό. Στο OFDMA, τα κανάλια χωρίζονται σε RU ή μονάδες πόρων, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα. Η συγκεκριμένη διαδικασία διαχωρίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού αποτελεσματικότερα. Το OFDMA κατανοεί πόσο φορτίο υπάρχει στο κάθε φορτηγό και δημιουργεί το μοναδικό φορτηγό για την καλύτερη μεταφορά των δεδομένων.



Εικόνα 15: OFDM παράδειγμα



Εικόνα 16: OFDMA παράδειγμα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ OFDM

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται ανάλυση όλων των μελών που συνθέτουν ένα OFDM σύστημα για να λειτουργήσει. Αναλύεται η λειτουργία του πομπού ( transmitter ), του δέκτη ( receiver ) και του καναλιού μετάδοσης ( channel ). Επιπλέον γίνεται ανάλυση του Αντίστροφου Γρήγορου Μετασχηματισμού Φουριέ ( IFFT ), του Γρήγορου Μετασχηματισμού Φουριέ ( FFT ), και παρουσιάζονται οι διαμορφώσεις σήματος σε OFDM συστήματα

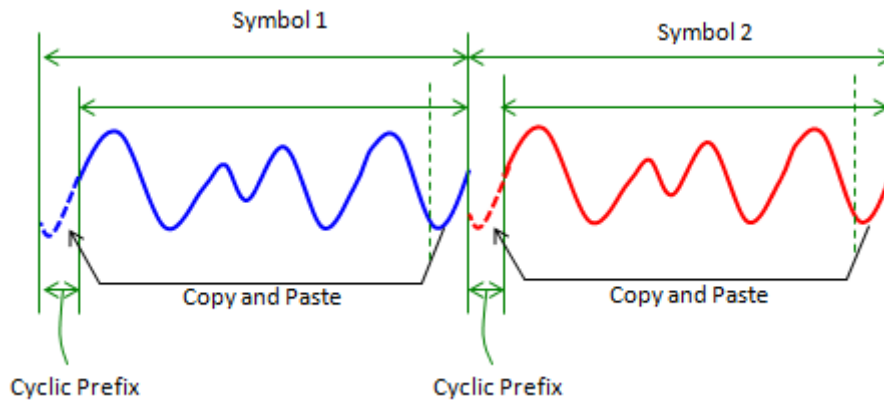
#### 4.1. Ανάλυση του πομπού, του δέκτη και του καναλιού μετάδοσης

Ο πομπός σ' ένα σύστημα OFDM, έχει την αρμοδιότητα για τη μετατροπή των ψηφιακών δεδομένων σε σύμβολα που είναι κατανοητά για το OFDM, επιπλέον είναι υπεύθυνο για να κάνει τη μετάδοση μέσω του καναλιού επικοινωνίας στο δέκτη [10].

Έπειτα γίνεται ανάλυση για τη διαδικασία και για τα βήματα που ακολουθούνται από το δέκτη:

- Αρχικά η πηγή δεδομένων στέλνει τα ψηφιακά δεδομένα που πρέπει να μεταδοθούν.
- Μετά γίνεται μια κωδικοποίηση για τη διόρθωση πιθανού σφάλματος, δηλαδή ενισχύεται η αξιοπιστία του σήματος παρουσίας του θορύβου και των παρεμβολών.
- Έτσι ξεκινάει η διαμόρφωση αυτό σημαίνει ότι, τα δεδομένα που προηγουμένως έχουν διορθωθεί δέχονται ένα συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης. Συνήθως οι διαμορφώσεις που συμβαίνουν σ' ένα OFDM σύστημα είναι μία εκ των εξής:
  - a) δυαδική μετατόπιση φάσης ( BPSK ),
  - b) μετατόπιση τετραγωνική φάσης ( QPSK ),
  - c) διαμόρφωση τετραγωνικού εύρους ή υψηλότερης τάξης ( QAM ).
- Μετατροπή σειριακής σε παράλληλη ροή δεδομένων, η διαμορφωμένη ροή δεδομένων δέχεται μετατροπή από σειριακή σε παράλληλη μορφή, μια διαδικασία που είναι απαραίτητη για να υπάρξει η παράλληλη μετάδοση δεδομένων δια μέσω των υποφορέων.
- Αντίστροφο Γρήγορο Μετασχηματισμός Φουριέ ( IFFT ), οι παράλληλες ροές δέχονται επεξεργασία μέσω ενός Αντίστροφου Γρήγορου Μετασχηματισμού Φουριέ. Το IFFT, κάνει τη μετατροπή των δεδομένων από τον τομέα της συχνότητας στον τομέα του χρόνου, για να υπάρξει η δημιουργία ενός σήματος στον τομέα του χρόνου που θα αντιπροσωπεύει το OFDM σύμβολο.
- Προσθήκη κυκλικού προθέματος, όσο προχωράει η διαδικασία γίνεται προσθήκη του κυκλικού προθέματος που είναι αντίγραφο του τελευταίου τμήματος του συμβόλου OFDM. Το συγκεκριμένο βήμα γίνεται για να υπάρξει μία επιπλέον προστασία από τις

παρεμβολές που θα προκληθούν μεταξύ των συμβόλων από την εξάπλωση της καθυστέρησης που θα υπάρχει στο κανάλι κατά τη μετάδοση.



Εικόνα 17: Κυκλικό Πρόθεμα

- Μετατροπή ψηφιακού σήματος σε αναλογικό ( DAC ), με τη χρήση ενός μετατροπέα λαμβάνει χώρα η αλλαγή από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα.
- Διαμόρφωση RF, στη συνέχεια το αναλογικό σήμα διαμορφώνεται στη φέρουσα συχνότητα για να γίνει η διαδικασία της μετάδοσης μέσω του καναλιού.
- Μετάδοση, το σήμα που έχει διαμορφωθεί τώρα έχει πολλαπλούς υποφορείς.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πολυπλοκότητα του OFDM πομπού εξαρτάται σημαντικά από τις απαιτήσεις που έχει το εκάστοτε σύστημα, δηλαδή μπορεί να γίνει ενσωμάτωση κάποιων επιπλέον χαρακτηριστικών όπως, η προσαρμοστική διαμόρφωση, τεχνικές πολλαπλών εξόδων ( MIMO ) και η εκτίμηση των καναλιών για καλύτερη απόδοση στον πραγματικό κόσμο.

Ακολουθώς, δίνεται η ανάλυση για τα βήματα που ακολουθούνται στο δέκτη του συστήματος. Ο OFDM δέκτης, είναι πολύ σημαντικός, γιατί είναι υπεύθυνος για να γίνει σωστά η διαδικασία της ανάγνωσης των δεδομένων που έχουν σταλθεί από τον πομπό.

Κατόπιν τα βασικά βήματα που ακολουθούνται στο δέκτη OFDM είναι τα εξής:

- Λήψη σήματος, ο δέκτης αρχικά λαμβάνει το σήμα που έχει φτάσει σ' αυτόν από το κανάλι μετάδοσης.
- Αποδιαμόρφωση ραδιοσυχνοτήτων ( RF ), το αναλογικό σήμα που έχει ληφθεί διαμορφώνεται για να παραχθεί ένα σήμα ζώνης βάσης.
- Μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακού σήματος ( ADC ), πραγματοποιείται η μετατροπή του αποδιαμορφωμένου αναλογικού σήματος σε ψηφιακό με τη χρήση του κατάλληλου μετατροπέα.
- Γρήγορος Μετασχηματισμός Φουριέ ( FFT ), το ψηφιακό σήμα υποβάλλεται σ' ένα Γρήγορο Μετασχηματισμό Φουριέ ο οποίος κάνει τη μετατροπή από τον τομέα της συχνότητας στον τομέα του χρόνου, που ήταν προηγουμένως όπως είχε έρθει από τον

πομπό. Το συγκεκριμένο που είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι γίνεται ο διαχωρισμός του σήματος από πολλαπλούς υποφορείς σε μεμονωμένους.

- Αφαίρεση του κυκλικού προθέματος, πραγματοποιείται αφαίρεση του κυκλικού προθέματος που είχε προστεθεί από τον πομπό νωρίτερα, για να αποφευχθούν οι οποιεσδήποτε παρεμβολές.
- Εξισορρόπηση, πραγματοποιείται η συγκεκριμένη διαδικασία για να υπάρξει μία αντιστάθμιση μεταξύ των παρεμβολών και των παραμορφώσεων του καναλιού.
- Αποδιαμόρφωση, με την πραγματοποίηση του συγκεκριμένου βήματος μεταβιβάζονται τα σύμβολα στον κάθε ένα υποφορέα. Εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται από το σύστημα π.χ. BPSK, QPSK, QAM.
- Μετατροπή παράλληλης σε σειριακή ροή δεδομένων, τα αποδιαμορφωμένα σύμβολα από τον κάθε υποφορέα συνδυάζονται για να δημιουργηθεί με αυτόν τον τρόπο μια σειριακή ροή δεδομένων.
- Ανάκτηση δεδομένων, τα δεδομένα που έχουν ληφθεί θέτονται στη διαδικασία της αποκωδικοποίησης και της διόρθωσης σφαλμάτων προκειμένου να υπάρξει η ανάκτηση των αρχικών μεταδιδόμενων πληροφοριών.
- Εξαγωγή δεδομένων, φτάνοντας στην τελική έξοδο τα ψηφιακά δεδομένα, που έχουν ανακτηθεί προηγουμένως, υπάρχει πιθανότητα να δεχθούν κάποια περαιτέρω επεξεργασία ή παραδίδονται στον τελικό προορισμό

Ο δέκτης σε OFDM σύστημα, κυρίως σε επικοινωνία ασύρματων δικτύων, παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο σε ό,τι συνεπάγεται για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος.

Το κανάλι μετάδοσης είναι εξίσου σημαντικό για το OFDM σύστημα, διότι δια μέσου αυτού τα σήματα μεταφέρονται από τον πομπό στο δέκτη. Στο κανάλι το σήμα πιθανόν να δεχθεί κάποιες “βλάβες” ή παραμορφώσεις, εξαιτίας του θορύβου, των παρεμβολών και των αποτελεσμάτων από τις πολλαπλές διαδρομές. Το σημαντικό είναι να γίνουν κατανοητές και να μετριάστουν στο ελάχιστο οι επιπτώσεις που προέρχονται από το κανάλι ή από εξωτερικούς παράγοντες, για να υπάρξει αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος OFDM.

Ακολουθούν τα βασικά ζητήματα που έχουν άμεση σχέση με το κανάλι στο OFDM σύστημα:

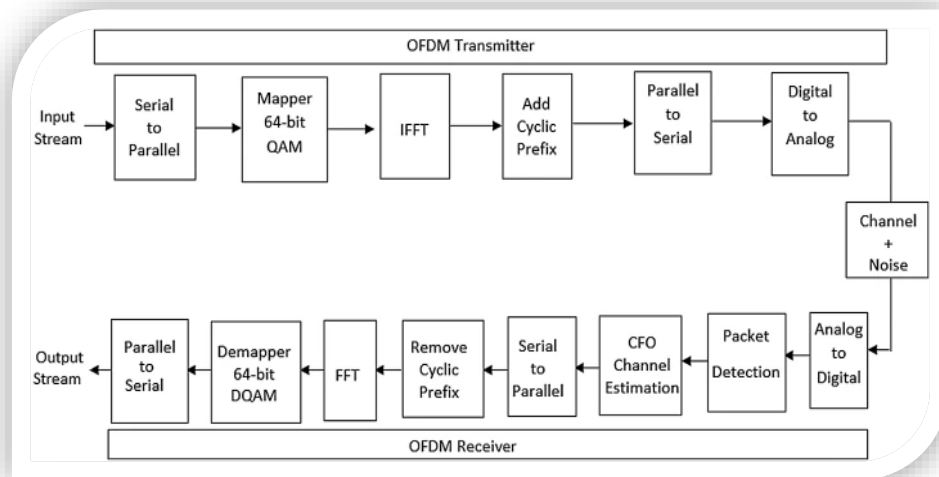
- Πρώτο ζήτημα είναι η εξασθένιση εξαιτίας των πολλαπλών διαδρομών, το OFDM μπορεί να αντιμετωπίζει το ξεθώριασμα που πιθανόν υπάρχει εξαιτίας των πολλαπλών διαδρομών, δηλαδή οι πολλές καθυστερημένες εκδόσεις του σήματος που φτάνουν στο δέκτη εξαιτίας των φαινομένων της ανάκλασης, της περίθλασης και τη σκέδασης. Με το κυκλικό πρόθεμα που προστίθεται, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, γίνεται η σωστή καταπολέμηση των παρεμβολών.
- Συχνотικό – Επιλεκτικό ξεθώριασμα, το κανάλι εμφανίζει διακυμάνσεις στην εξασθένιση σε διάφορες συχνότητες, οι οποίες είναι ως και επιλεκτική απόσβεση συχνότητας. Με αυτή την ικανότητα που έχει το OFDM, καταφέρνει να διαιρεί το



κανάλι σε πολυπληθείς υποφορείς, επιτρέπει και την προσαρμοστική διαμόρφωση, άρα και την πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος που είναι διαθέσιμο.

- Πρόσθετος Λευκός Γκαουσιανός Θόρυβος ( AWGN ), ο θόρυβος του καναλιού, που αρκετά συχνά παίρνει μορφή και ως πρόσθετος λευκός γκαουσιανός θόρυβος υποβαθμίζει την ποιότητα του σήματος, όμως η δομή του υποφορέα του OFDM δίνει τη δυνατότητα ώστε να γίνει χρήση διαφόρων κωδικών διόρθωσης σφαλμάτων και προσφέρει επιπλέον ανθεκτικότητα ενάντια στο θόρυβο.
- Εξωτερική παρέμβαση, οι παρεμβολές από πηγές ή από άλλα σήματα επηρεάζουν το OFDM σύστημα στην απόδοση του καναλιού. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, όπως είναι ο σχεδιασμός της συχνότητας, η αποφυγή παρεμβολών και η προηγμένη επεξεργασία σήματος, χρησιμοποιούνται για τον μετριασμό των παρεμβολών.
- Εξίσου σημαντικό είναι να γίνει εκτίμηση του καναλιού, δηλαδή τα OFDM συστήματα με τη βοήθεια ορισμένων μηχανισμών που διαθέτουν εκτιμούν τα χαρακτηριστικά που έχει το κανάλι μετάδοσης. Οι πληροφορίες αυτές βοηθούν για να υπάρξει εξισορρόπηση και προσαρμοστική διαμόρφωση για βελτίωση και καλύτερη αξιοπιστία της επικοινωνίας.
- Φαινόμενο Doppler, όταν υπάρχει το σενάριο κινητής επικοινωνίας εμφανίζεται μετατόπιση Doppler, δηλαδή μετατοπίσεις στη συχνότητα εξαιτίας της κίνησης που υπάρχει ανάμεσα στο δέκτη και στον πομπό. Ο μετριασμός των επιπτώσεων από τη μετατόπιση επιτυγχάνεται και πάλι από τους κοντινούς και πολλούς υποφορείς.
- Εξισορρόπηση καναλιών, εφαρμογή τεχνικών εξισορρόπησης στο δέκτη για να μειωθούν οι παραμορφώσεις που θα εισαχθούν στο κανάλι επικοινωνίας.

Γενικά, το πιο σημαντικό που πρέπει να συμβεί είναι η κατανόηση του καναλιού για να γίνει υπαρκτό το σενάριο των ισχυρών συστημάτων OFDM. Επιπλέον, σε διαφορετικές και δυναμικές συνθήκες καναλιού και για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης στην επικοινωνία, η προσαρμοστική διαμόρφωση, η σωστή κωδικοποίηση και οι διάφορες τεχνικές επεξεργασίας σήματος βοηθούν τα μέγιστα.



Εικόνα 18: Αναλυτική αναπαράσταση ενός OFDM συστήματος

#### 4.2. Σύνδεση του IFFT και του FFT με το OFDM

Σ' ένα σύστημα OFDM οι όροι Αντίστροφος Γρήγορος Μετασχηματισμός Φουριέ ( IFFT ) και Γρήγορος Μετασχηματισμός Φουριέ ( FFT ) είναι απαραίτητοι, γιατί χρησιμοποιούνται για να είναι αποτελεσματικοί και γρήγοροι οι αλγόριθμοι στον υπολογισμό του Αντίστροφου Διακριτού Μετασχηματισμού Φουριέ ( DFT ) και Διακριτού Μετασχηματισμού Φουριέ ( IDFT ) αντίστοιχα [12]. Γενικά το IFFT και το FFT στην καθημερινότητα χρησιμοποιείται αρκετά σε εφαρμογές για την επεξεργασία ψηφιακών σημάτων και γι' αυτό βρίσκεται συνεχώς σε μια κατάσταση έρευνας, ώστε να υπάρχει αποτελεσματική εφαρμογή.

Η εμφάνιση του IFFT και του FFT στα OFDM συστήματα επικοινωνίας αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την περαιτέρω έρευνα των αλγορίθμων. Τα OFDM συστήματα βασίζονται αρκετά στο IFFT, όσον αφορά την πλευρά του πομπού για να υπάρξει αποτελεσματική εφαρμογή στη διαμόρφωση του σήματος, διότι είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή των συμβόλων από τον τομέα της συχνότητας στον τομέα του χρόνου, προετοιμάζοντας τα κατάλληλα για τη μετάδοση. Από την άλλη πλευρά το FFT έχει ως αρμοδιότητα, στην πλευρά του δέκτη, να πετυχαίνει την αποτελεσματική και σωστή αποδιαμόρφωση του σήματος.

Στη συνέχεια δίνεται μια πιο αναλυτική εξήγηση για το ρόλο του IFFT σε σύστημα OFDM:

- Σειριοποίηση των δεδομένων, τα δεδομένα που υπάρχουν στην είσοδο το OFDM τα οργανώνει με τους μηχανισμούς του σε πολλαπλές παράλληλες ροές και η καθεμία από εκείνες αντιστοιχεί σε έναν υποφορά. Πριν από την εφαρμογή του IFFT, αυτές οι παράλληλες ροές δεδομένων μετατρέπονται σε σειριακή ροή.
- Αντιστοίχιση σε υποφορές, κάθε σύμβολο στη σειριακή ροή έχει αντιστοίχιση σε κάποιον συγκεκριμένο δευτερεύοντα υποφορέα. Οι υποφορές διαμοιράζονται ομοιόμορφα σ' όλο το εύρος ζώνης και οι υπομεταφορές επιλέγονται συνεχώς για να υπάρξει η διασφάλιση της ορθογωνικότητας.

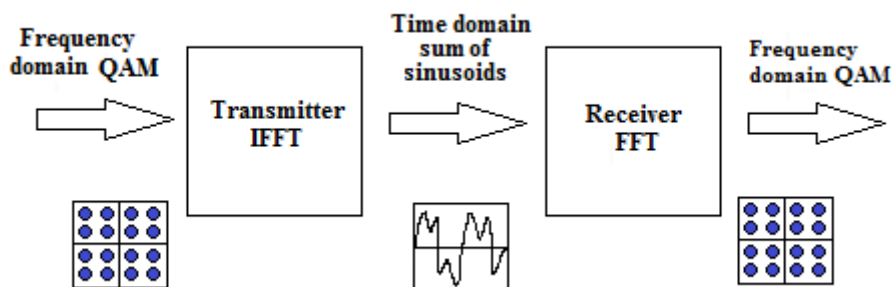
- IFFT επεξεργασία, το γενικό σύνολο από αντιστοιχισμένα σύμβολα υποβάλλονται στη συγκεκριμένη επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, το IFFT μετατρέπει τα σύμβολα από τον τομέα της συχνότητας σε εκείνον στον τομέα του χρόνου.
- Μετάδοση, το σήμα που προκύπτει στον τομέα του χρόνου με ή χωρίς το κυκλικό πρόθεμα ( κάποιες φορές ) μεταδίδεται δια μέσω του καναλιού.

Η εφαρμογή του Αντίστροφου Γρήγορου Μετασχηματισμού Φουριέ ( IFFT ) βοηθάει σημαντικά στη μετάδοση των συμβόλων στον τομέα του χρόνου δια μέσω των υποφορέων, προσφέροντας με αυτό τον τρόπο πολλά πλεονεκτήματα στην παράλληλη μετάδοση.

Έπειτα ακολουθεί αναλυτική εξήγηση του FFT σε σύστημα OFDM:

- Γρήγορος Μετασχηματισμός Φουριέ ( FFT ), το ψηφιακό σήμα που έχει ληφθεί υποβάλλεται σε διαδικασία ενός FFT (Γρήγορου Μετασχηματισμού Φουριέ), δηλαδή γίνεται η μετατροπή από το φορέα του χρόνου που είναι το σήμα που έχει ληφθεί στον τομέα της συχνότητας.
- Αφαίρεση κυκλικού προθέματος,
- Αποδιαμόρφωση ανεξάρτητα του κάθε υποφορέα
- Πραγματοποιείται μία τελική FFT επεξεργασία
- Ανάκτηση των πληροφοριών μετά την τελική επεξεργασία

Συνεπώς οι λειτουργίες του FFT (Γρήγορου Μετασχηματισμού Φουριέ) είναι θεμελιώδεις για την αποδιαμόρφωση σε πολλούς υποφορείς και για να παραληφθούν σωστά τα δεδομένα που υπάρχουν στο τομέα της συχνότητας.



Εικόνα 19: IFFT και FFT σε OFDM σύστημα

Για τους λόγους αυτούς είναι και τόσο σημαντικά στοιχεία σ' ένα OFDM σύστημα. Επιπλέον, η υλοποίηση του IFFT και του FFT είναι αναγκαίο να βελτιώνεται για εμφανίζεται βελτίωση στο κόστος και το μέγεθος του συστήματος. Εξαιτίας λοιπόν των συνεχόμενων αυξανόμενων απαιτήσεων τα OFDM συστήματα αναγκάζονται να χρησιμοποιούν υλικά ειδικού σκοπού για τα πιο απαιτητικά μέρη του πομποδέκτη τους. Στη συνθηθέστερη μορφή το IFFT και το FFT υλοποιούνται ως ένα κύκλωμα μεγάλης κλίμακας, γνωστό και ως VLSI. Και οι δυο μετασχηματισμοί χρησιμοποιούν τις ίδιες τεχνικές.

Υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις για τους IFFT και τους FFT αλγόριθμους, αλλά οι πιο δημοφιλείς προσεγγίζονται από τους James W. Cooley και John W. Turkey, για τα OFDM συστήματα. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι, γνωστοί και ως Cooley – Turkey ( CT ) διευκολύνουν την πιο αποτελεσματική υλοποίηση. Για να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί του FFT , γίνεται διαχωρισμός σε κάποια στάδια, ο  $\log_2(N)$ , όπου  $N$  είναι ο αριθμός σημείων που έχει το FFT και  $r$  ονομάζεται η ρίζα του αλγορίθμου. Σε κάθε στάδιο πραγματοποιείται κάποιο ανακάτεμα των δεδομένων και λαμβάνουν χώρα διάφοροι υπολογισμοί. Με τους υπολογισμούς αυτούς δημιουργείται ένα μοτίβο, γιατί όλοι οι υπολογισμοί είναι όμοιοι μεταξύ

ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

τους. Στους αλγορίθμους CT, έχουν δημιουργηθεί διαφορετικές τεχνικές όσον αφορά το υλικό. Οι αρχιτεκτονικές αυτές χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Μονοεπεξεργαστής, χρησιμοποιείται μονάχα μόνο ένα και μοναδικό στοιχείο υλικού για την πραγματοποίηση όλων των υπολογισμών.
- Παράλληλη, οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σ' ένα στάδιο με τη χρήση πολλαπλών στοιχείων επεξεργασίας.
- Pipeline, ένα μονάχα στοιχείο υλικού χρησιμοποιείται για την εκτέλεση όλων των υπολογισμών, αλλά σε σύγκριση με τις άλλες δύο κατηγορίες χρησιμοποιεί διαφορετικό στοιχείο υλικού.

Ανάλογα με τον αριθμό των γραμμών δεδομένων οι αρχιτεκτονικές των αγωγών που χρησιμοποιούνται είναι single-path ή multi-path. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ορισμένων επεξεργαστών FFT/IFFT για τα OFDM συστήματα [11].

Reference	FFT points	Architecture	Algorithm	Application
(Jung et al., 2005)	64	Pipeline-MDC	$r-2$ DIT	WLAN
(Maharatna et al., 2004)	64	Pipeline	$r-2$ DIT	WLAN
(Serrá et al., 2004)	64	Monoprocessor	$r-2$ DIT	WLAN
(Lin et al., 2005)	128	Pipeline-MRMD	MR $2/2^3$ DIF	UWB
(Saberinia, 2006)	128	Pipeline-BRMDC	$r-2$ DIF	UWB
(Lee et al., 2006)	128	Pipeline-SDF	$r-2^4$ DIF	UWB
(Liu et al., 2007)	64/128	Pipeline 8-path DF	MR DIF	UWB
(Cortés et al., 2007)	128	Pipeline	$r-2^4$ DIF	UWB
(Bidet et al., 1995)	8192	Pipeline-SDC	$r-4/2$ DIF	DVB-T
(Lin, Liu & Lee, 2004)	8192	Parallel	$r-2^3$ DIT	DVB-T
(Wang et al., 2005)	2 / 8 K	Pipeline-SDF	$r-4/2$ DIF	DVB-T
(Lenart & Owal, 2006)	2 / 4 / 8 K	Pipeline-SDF	$r-2^2$ DIF	DVB-T/H
(Lee & Park, 2007)	8 K	Pipeline-SDF	BD	DVB-T
(He & Torkelson, 1998)	1024	Pipeline-SDF	$r-2^2$ DIF	OFDM

(Kuo et al., 2003)	64–2048	Cached memory	r–2 DIT	OFDM
(Chang & Park, 2004)	1024	Monoprocessor	r–2 <sup>2</sup> DIF	OFDM
(Jiang et al., 2004)	64	Parallel	r–2 DIT	OFDM
(Lin, Lin, Chen & Chang, 2004)	64	Pipeline	r–2 DIF	MIMO
(Rudagi et al., 2010)	64	Pipeline	r–2 DIT	OFDM
(Yu et al., 2011)	64	Pipeline	r–2 DIF	OFDM
(Tsai et al., 2011)	64	Pipeline	MR	OFDM
(Turrillas et al., 2010)	32 K	Pipeline	r–2 <sup>k</sup> DIF	DVB–T2

**Πίνακας 1:** Αρχιτεκτονικές - Αλγόριθμοι και Εφαρμογές OFDM

Στον πίνακα 1 φαίνεται ότι υπάρχουν αρκετές αρχιτεκτονικές αλλά και διαφορετικοί αλγόριθμοι που έχουν προταθεί για τα OFDM συστήματα. Άρα, ο κατασκευαστής ενός OFDM συστήματος οφείλει να αποφασίσει εκείνος για το ποιος είναι ο καταλληλότερος αλγόριθμος και η αρχιτεκτονική που θα φέρει το καλύτερο αποτέλεσμα ανάλογα με τις προδιαγραφές του συστήματος.

### 4.3. Διαμορφώσεις σήματος σε OFDM συστήματα

Το OFDM, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως αποτελεί ένα σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης. Ο κάθε υποφορέας διαμορφώνεται ανεξάρτητα για να επιτευχθεί καλύτερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, καθώς παρέχει και μία αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση στην εξασθένιση επιλεκτικής συχνότητας. Τα σχήματα διαμόρφωσης που μπορούν να εφαρμοστούν σ' ένα σύστημα OFDM εξαρτάται ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού, τις απαιτήσεις του ρυθμού δεδομένων και τους παράγοντες σχεδιασμού του εκάστοτε συστήματος. Τα πιο διαδεδομένα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούν τα OFDM συστήματα είναι τα εξής:

- a. Δυαδική ηλεκτρολόγηση μετατόπιση φάσης ( BPSK ), το BPSK είναι μια μορφή διαμόρφωσης σχετικά απλή, όπου τα δυαδικά δεδομένα αποτελούνται από δύο διαφορετικές φάσεις του φέροντος σήματος ( 0 και 180 μοίρες ), δηλαδή κάθε μετατόπιση 180 μοιρών δηλώνει δυαδικό 0 , ενώ αν δεν υπάρχει μετατόπιση φάσης τότε αντιπροσωπεύεται από δυαδικό 1. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται μέγιστος διαχωρισμός φάσης μεταξύ γειτονικών σημείων για να υπάρξει καλύτερη μείωση της διαφθοράς. Η τοποθέτηση τους σε κύκλο με ομοιόμορφη γωνιακή απόσταση συμβαίνει για να μεταδίδονται όλα τα σήματα με την ίδια ενέργεια. Το BPSK εφαρμόζεται καθημερινά στο Wi-Fi, στο Bluetooth και στη δορυφορική επικοινωνία. Επιπλέον εγγυάται αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των καναλιών.

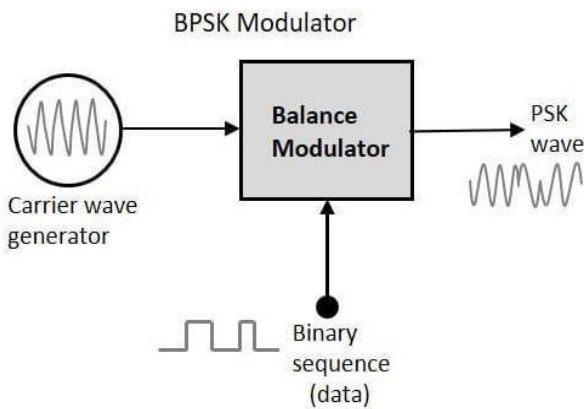
Γενικά έχει αρκετά πλεονεκτήματα το BPSK τα οποία είναι:

- Απλότητα, το BPSK με τις δύο φάσεις που έχει είναι σχετικά απλό στην υλοποίησή του.
- Αποτελεσματική λειτουργία με αξιοπιστία, έχει αποτελεσματική λειτουργία παρά την παρουσία θορύβου ή παρεμβολών.
- Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, είναι αρκετά μειωμένη η ενέργεια που χρειάζεται συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους, άρα αποτελεί επιλογή για συσκευές που λειτουργούν με τη χρήση μπαταρίας.
- Εύκολη ανίχνευση, οι δέκτες κάνουν εύκολα αντιληπτό το BPSK προσδιορίζοντας με άνεση και ακρίβεια τη συχνότητα και τη φάση του μεταδιδόμενου σήματος.
- Συμβατότητα, χρησιμεύει το BPSK ως δομικό στοιχείο για τα πολύπλοκα σχήματα διαμόρφωσης QPSK και QAM.

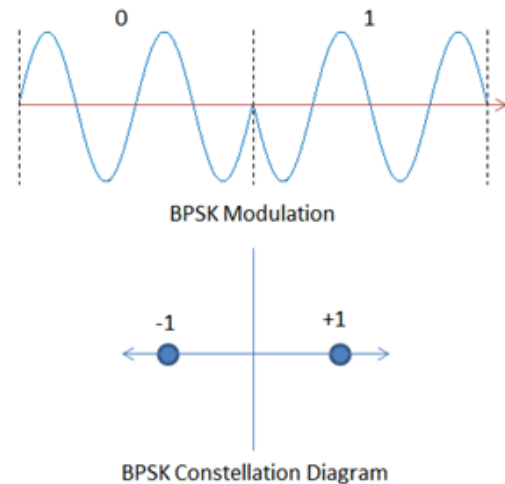
Εκτός από τα αρκετά πλεονεκτήματα κάνουν την εμφάνιση τους και κάποια αρνητικά στοιχεία τα οποία είναι:

- Λιγότερο αποτελεσματικό, καθώς χρησιμοποιεί αναποτελεσματικά το χώρο του σήματος.
- Περιορισμένη διόρθωση σφαλμάτων, το BPSK δεν έχει τόσο μεγάλη ικανότητα να διορθώσει τα σφάλματα που υπάρχουν ή που προκύπτουν, για το λόγο αυτό τα συστήματα OFDM που χρησιμοποιούν το BPSK προσθέτουν ξεχωριστά τη διόρθωση σφαλμάτων γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος.
- Δεν είναι η βέλτιστη λύση για την αποστολή μεγάλου όγκου δεδομένων με ταχύτητα.

Συνοπτικά, το BPSK είναι ανθεκτικό στις βλάβες των καναλιών καθώς χρησιμοποιεί αποκλειστικά δύο φάσεις κάνοντας με αυτό τον τρόπο τη διαδικασία αποδιαμόρφωσης εξαιρετικά απλή. Αυτό που προκύπτει και φαίνεται τελικά είναι ότι το OFDM και το BPSK συμπληρώνουν το ένα το άλλο σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας.



Εικόνα 20: BPSK Διαμορφωτής



Εικόνα 21: BPSK Διαμόρφωση – Αστερισμός φάσεων

b. Τετραγωνική Μετατόπιση Φάσης ( QPSK ),

το QPSK είναι μία από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης. Έχει διαδεδομένη χρήση στα κυψελοειδή ασύρματα πρότυπα επικοινωνίας [18] , όπως το GSM, CDMA, LTE, σταθερές και κινητές εφαρμογές WiMAX, επίσης στη δορυφορική και στην καλωδιακή τηλεόραση. Στο QPSK, δύο bit ομαδοποιούνται και κάθε σύμβολο αποτελούμενο από δύο bits αντιστοιχίζονται σε μία συγκεκριμένη φάση του φέροντος σήματος. Υπάρχουν τέσσερις μετατοπίσεις φάσης ( όλες σε κύκλο ), οι οποίες είναι 0, 90, 180 και 270 μοίρες, αντιπροσωπεύοντας με αυτό τον τρόπο τέσσερα διαφορετικά σύμβολα. Επιτυγχάνοντας έτσι υψηλότερο ρυθμό δεδομένων bit σήματος σε σύγκριση με το BPSK, διατηρεί το ίδιο εύρος ζώνης ή το μειώνει στο μισό και διατηρεί τον ίδιο ρυθμό μετάδοση με το BPSK.

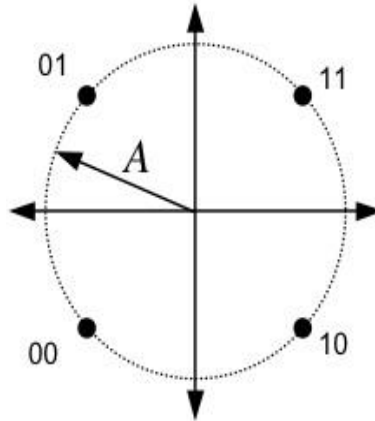
Το QPSK προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα τα οποία είναι:

- Βελτιωμένη φασματική απόδοση, με τη χρήση του QPSK ανά υποφορέα επιτυγχάνεται αυξανόμενη απόδοση φάσματος σε σχέση με τα σχήματα διαμόρφωσης μονού φορέα.
- Ευρωστία, το QPSK παρέχει καλύτερη αντιμετώπιση στο θόρυβο και στις παρεμβολές, που υπάρχουν συνήθως, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να κάνει την εμφάνιση του σε συστήματα επικοινωνιών όπου το εξωτερικό περιβάλλον είναι δύσκολο ( π.χ. εξωτερικοί θόρυβοι κ.ά. )

Όμως και στη συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται και εδώ η εμφάνιση κάποιων μειονεκτημάτων τα οποία είναι:

- Απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ για τη μετάδοση, γιατί μεταδίδει ένα σύμβολο, δηλαδή δύο bits, σε σχέση με άλλες τεχνικές διαμόρφωσης.
- Πιο περίπλοκο σε αντίθεση με το BPSK, διότι απαιτούνται τέσσερις καταστάσεις για να πραγματοποιηθεί η ανάκτηση πληροφοριών δυαδικών δεδομένων.

Συμπερασματικά, η QPSK τεχνική διαμόρφωσης μπορεί να έχει εφαρμογή σε κάθε OFDM υποφορέα, επιτυγχάνοντας αποτελεσματική και ισχυρή επικοινωνία σε ασύρματες και ευρυζωνικές εφαρμογές.



Εικόνα 22: QPSK Αστερισμός φάσεων

- c. Διαμόρφωση Τετραγωνικού Πλάτους (QAM),  
το QAM αποτελεί μία ακόμη ψηφιακή διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στα OFDM συστήματα. Επιπλέον, είναι ένα σχήμα διαμόρφωσης που μεταφέρει δεδομένα κάνοντας μεταβολή στο πλάτος, αλλά και στη φάση ενός φέροντος σήματος. Χρησιμοποιείται εκτενώς στα σύγχρονα πρότυπα επικοινωνίας 4G/LTE και Wi-Fi. Επίσης έχει εφαρμογή όπου χρειάζεται να επιτευχθεί υψηλό επιπέδου απόδοσης. Στα OFDM συστήματα το QAM [13] έχει τη δυνατότητα να διαμορφώνει κάθε υποφορέα ανεξάρτητα. Επιπλέον, όπου εφαρμόζεται το QAM στη ροή δεδομένων του εκάστοτε ανεξάρτητου υποφορέα επιτρέπει τη μετάδοση πολλαπλών bit ανά σύμβολο. Με τη χρήση του QAM παρέχεται η ικανότητα στο δευτερεύοντα φορέα να πιάνουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, επειδή κάθε σύμβολο αντιπροσωπεύει μεγαλύτερο αριθμό bit σε σχέση με τα προηγούμενα σχήματα διαμόρφωσης, για παράδειγμα BPSK ή QPSK. Το QAM γενικά έχει αρκετές παραλλαγές, όπως το QAM16, QAM64 ή QAM256, όπου οι αριθμοί δηλώνουν τις διαφορετικές καταστάσεις. Στη γενική του περίπτωση εκφράζεται ως QAM(N), με N το σύνολο των καταστάσεων που θα αναπαρασταθούν με μόλις ένα σύμβολο.

Τα πλεονεκτήματα που έχει το QAM είναι τα εξής και παρουσιάζονται παρακάτω:

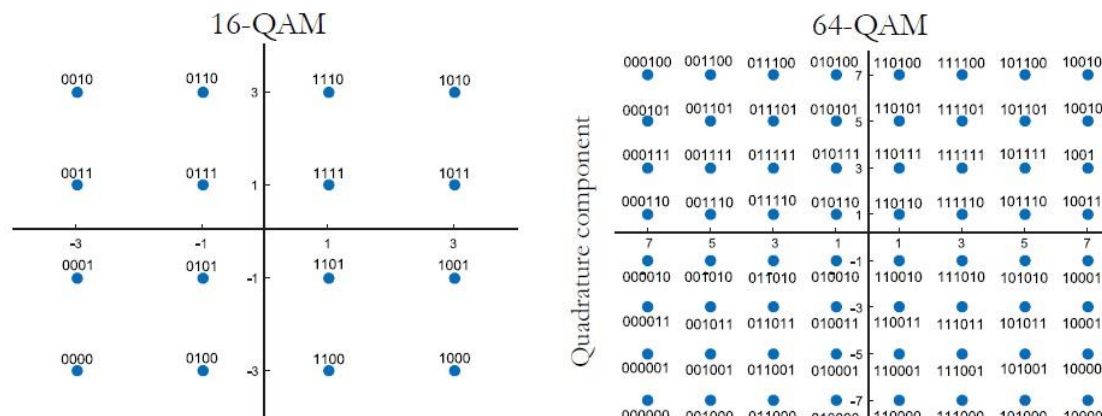
- Υψηλή φασματική απόδοση, η διαμόρφωση QAM καθιστά δυνατό τον υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε κάθε υποφορέα, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος.
- Ευελιξία, το QAM έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί οποιαδήποτε και αν είναι η συνθήκη του καναλιού μετάδοσης την ώρα που είναι έτοιμο το σύστημα για τη μεταφορά δεδομένων. Επίσης το QAM των υψηλότερων τάξεων χρησιμοποιείται για να επιτευχθούν μεγάλες ταχύτητες στη μετάδοση των δεδομένων.



Τα αρνητικά που εμφανίζει το QAM από την άλλη είναι:

- Τα σχήματα υψηλότερων τάξεων δεν είναι τόσο ανεκτικά στο θόρυβο και στην παραμόρφωση που ενδεχομένως να εμφανίζεται, είναι συχνό φαινόμενο, γιατί οι καταστάσεις μετάδοσης είναι κοντά μεταξύ τους και χρειάζεται χαμηλότερα επίπεδα θορύβου για τη μετακίνηση του σήματος από το ένα σημείο στο άλλο, άρα η σωστή επιλογή της σειράς διαμόρφωσης βασίζεται στις συνθήκες του καναλιού και στις απαιτήσεις που έχει η κάθε σύνδεση.
- Επιπλέον είναι συχνό φαινόμενο να περιέχουν μια συνιστώσα πλάτους για να διατηρείται η γραμμικότητά τους, όμως οι γραμμικοί ενισχυτές υστερούν σε ό,τι αφορά στην απόδοση και στην κατανάλωση της ισχύς που είναι αισθητά αυξημένη.
- Ακόμα ένα μειονέκτημα που προστίθεται είναι ότι οι δέκτες QAM είναι συγκριτικά πιο περίπλοκοι με τους άλλους τύπους των συστημάτων διαμόρφωσης.

Εν κατακλείδι, η ενσωμάτωση της QAM διαμόρφωσης στα OFDM συστήματα επιτρέπει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, παράλληλα προσφέρει φασματική απόδοση, ευελιξία στα συστήματα επικοινωνίας και επιτυγχάνει επιπλέον αποτελεσματική και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων, με όποια αρνητικά εμφανίζει.



**Εικόνα 23:** QAM Αστερισμός φάσεων (2 περιπτώσεις 16-QAM 64-QAM)

Γενικά, η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης είναι μια συνθήκη που αντισταθμίζεται ανάμεσα στο ρυθμό δεδομένων, της φασματικής απόδοσης και της ευρωστίας απέναντι στις συνθήκες των καναλιών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

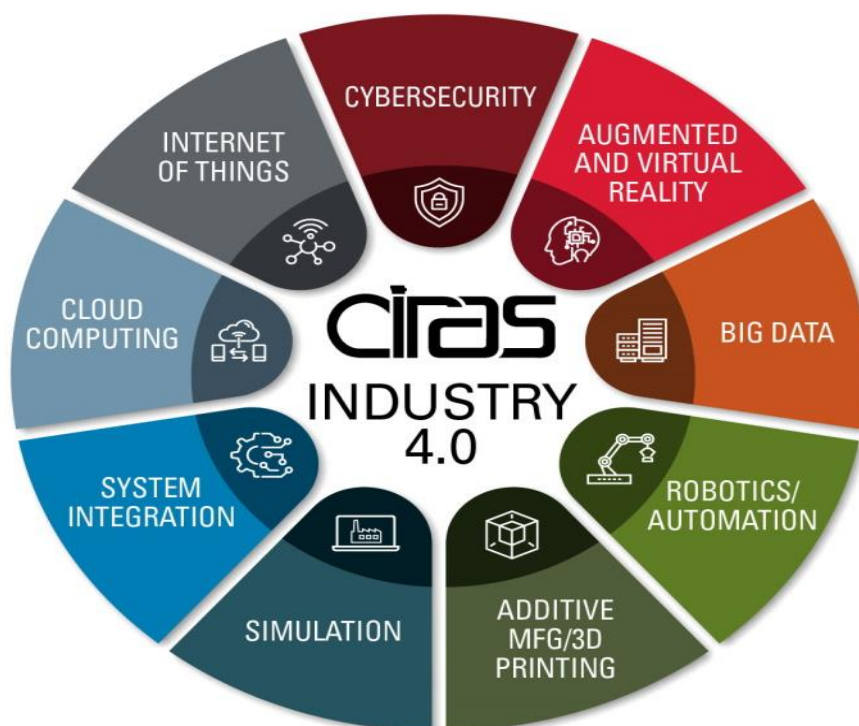
### 5. OFDM ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ

Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται ανάλυση διαφόρων τοπολογιών που υπάρχουν στην καθημερινότητα και χρησιμοποιούν το OFDM.

#### 5.1. Τοπολογία διαλόγου για δίκτυα Industry 4.0

Αρχικά υπάρχει αναφορά πάνω σε επικοινωνίες που βασίζονται στο OFDM και πιο συγκεκριμένα σε τοπολογία διαύλου ( fieldbus ) συγκριτικά με το Ethernet και βασικά στοιχεία για τα δίκτυα Industry 4.0.

Το Industry 4.0 κάνει ουσιαστικά αναφορά για ένα κυβερνο-φυσικό πλαίσιο υποστήριξης στην διαδικασία παραγωγής των έξυπνων εργοστασίων. Γενικά υπάρχουν πολυπληθείς λύσεις σε ότι σχετίζεται με τις ενσύρματες επικοινωνίες στο επίπεδο του πεδίου, που κάνει είτε χρήση διαύλου πεδίου, αν και συχνά γίνεται εμφάνιση μεγάλης απόστασης αλλά ελατούμενου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων είτε κάποιες τεχνολογίες που έχουν ως βάση τη χρήση Ethernet, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα ώστε ο ρυθμός δεδομένων να είναι αυξημένος, αλλά δυστυχώς υπάρχει ζήτημα στην απόσταση σε μία τοπολογία δακτυλίου για παράδειγμα. Για το λόγο αυτό η Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεση Συχνότητας ( OFDM ) δίνει τη λύση καθώς αυξάνεται σημαντικά ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για μεγάλες αποστάσεις.



Εικόνα 24: Εφαρμογές Industry 4.0

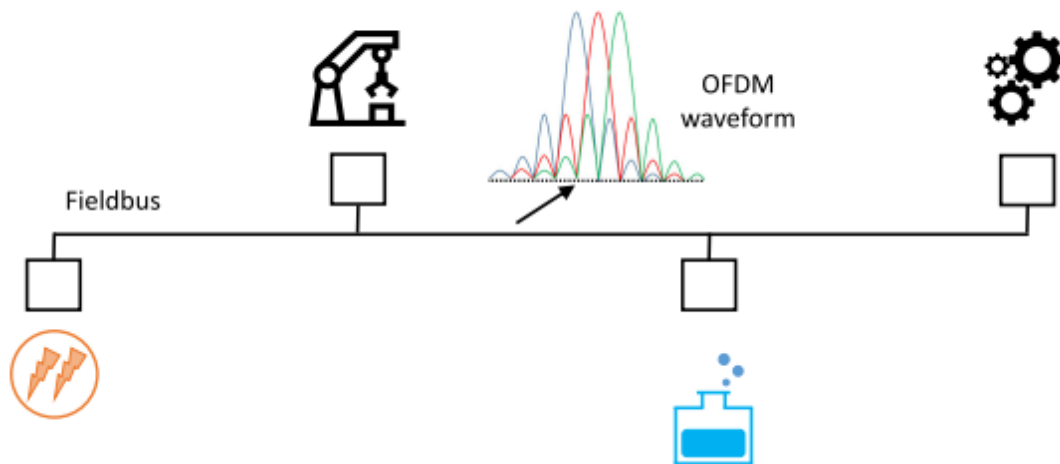
Για την πραγματοποίηση και την εφαρμογή δικτύων στο Industry 4.0, τη σωστή ενσωμάτωση των εργαζομένων και των μηχανημάτων που θα υποστηρίξουν στο σύντομο

## ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

μέλλον τα εργοστάσια, πρέπει πρώτα απ' όλα να πραγματοποιηθεί εφαρμογή συστημάτων παραγωγής για να υπάρξει σωστή και αποτελεσματική ενοποίηση υπολογιστών, ελέγχου και επικοινωνίας, δημιουργώντας το γνωστό σήμερα Cyber – Physical Production Systems, που αποτελεί την αρχή των πάντων για την ενοποίηση. Βασικό σημείο για τη διαδικασία είναι η ψηφιακή υποδομή επικοινωνίας. Στα εργοστάσια οι πιο συχνοί τύποι συστημάτων επικοινωνίας είναι οι εξής:

- Fieldbuses,
- Βιομηχανικό Ethernet,
- Βιομηχανικά ασύρματα δίκτυα.

Το κάθε δίκτυο έχει τη δική του χρήση, δηλαδή τα δίκτυα fieldbus ( που έχουν βάση και αυτά το Ethernet ) είναι απαραίτητα για αισθητήρες και ελεγκτές μέσω των ενσύρματων διαύλων.



**Εικόνα 25:** Fieldbus αισθητήρες και ελεγκτές

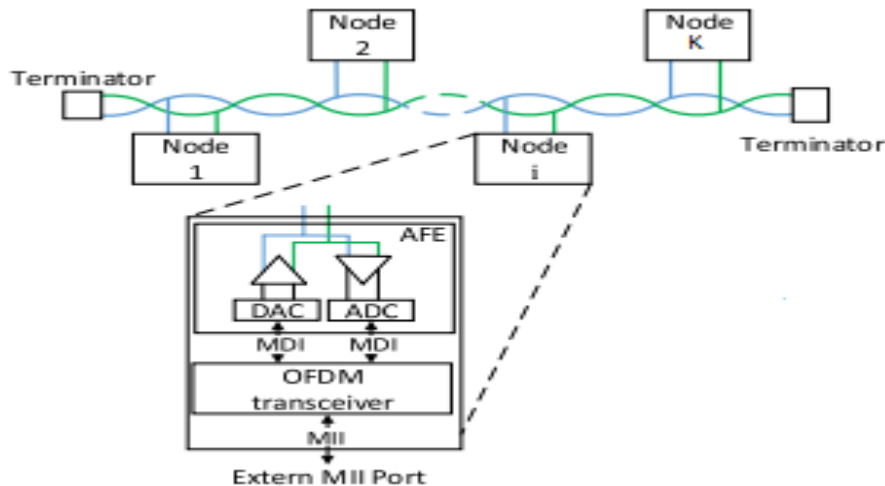
Οι ασύρματες λύσεις βοηθούν με την ευελιξία και το χαμηλό κόστος που παρέχουν, αλλά σε επίπεδο βιομηχανιών ή εργοστασίων υπάρχουν αρκετά προβλήματα στη διασύνδεση. Τα ενσύρματα δίκτυα αποτελούν “ πολύτιμο λίθο ” για τις βιομηχανίες, λόγω της αξιοπιστίας που προσφέρουν [14] . Υπάρχουν όμως και περιορισμοί, στις κλασικές λύσεις τα fieldbuses δίκτυα στις βιομηχανίες φτάνουν σε συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων ( μέχρι 1 χιλιόμετρο ), αλλά δε βοηθούν σε ότι έχει να κάνει με τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, δεν υπάρχει επίσης υποστήριξη για ταχύτητες μεγαλύτερες των 100 Mbit \ sec , επιπλέον έχουν χαμηλό εύρος ζώνης. Για την ανάπτυξη υψηλών ρυθμών δεδομένων γίνεται χρήση του Ethernet, καθώς είναι εύκολο ως προς την ανάπτυξη του, είναι γνωστό σε όλους και το πιο σημαντικό προσφέρει υψηλές ταχύτητες δεδομένων. Τα αρνητικά στοιχεία παρόλα αυτά δε λείπουν από τη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς κάνει την εμφάνιση του το ζήτημα της απόστασης, οι συνδέσεις κόμβων φτάνουν έως τα 100 μέτρα. Παράλληλα υπάρχει υψηλό κόστος συγκριτικά με το fieldbus, γιατί χρειάζονται Ethernet switches σε κάθε fieldbus στοιχείο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα οι επικοινωνίες υψηλού ρυθμού δεδομένων παίρνουν μορφή με τα fieldbuses με την αντιμετώπιση κυματομορφών ευρείας ζώνης πολλαπλών φορέων ( OFDM ) συγκριτικά με τα σήματα στενής ζώνης που υπάρχουν στους κλασσικούς διαύλους πεδίου. Για το λόγο αυτό το OFDM κάνει τη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις, όπου χρησιμοποιούνται οι δίαυλοι πεδίου ( fieldbuses ). Η χρήση κυματομορφών OFDM προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Όταν παρατηρηθούν παρεμβολές, η χρήση αλγορίθμων bit βοηθάει στην αποφυγή συγκεκριμένων περιοχών. Μέσω του OFDM θα υπάρξει αποφυγή των πιθανών συγκρούσεων που θα προκύψουν στο δίαυλο κατά τη μετάδοση, ενώ παράλληλα θα υπάρξει και σωστή κατανομή των ήδη υπάρχων διαθέσιμων πόρων. Επίσης η επικοινωνία πολλαπλών φορέων είναι μια τεχνολογία που έχει εξελιχθεί αρκετά στις ευρυζωνικές υπηρεσίες επικοινωνίας με τη χρήση καλωδίου. Παράδειγμα αποτελούν οι ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές ( DSL ) και των επικοινωνιών με γραμμή ισχύος ( PLC ), σε όλες αυτές τις περιπτώσεις το κοινό συνθετικό αποτελεί το OFDM, αλλά και οι πομποδέκτες OFDM που βρίσκονται εκεί. Παρόλα αυτά η ανάπτυξη στα ενσύρματα fieldbus συστήματα δεν είναι αυξημένη, αν και μπορούν να παρέχουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων για μεγάλες αποστάσεις.

Τα fieldbuses και οι λύσεις που δίνονται από το Ethernet προσδιορίζονται από συγκεκριμένο πρότυπο ( IEC 61158 ) με 26 διαφορετικές επιλογές στα προφίλ επικοινωνίας που υπάρχουν. Στις τοπολογίες διαύλου καλύτερη απόδοση παρέχει και πάλι το Ethernet. Επίσης σε μία περίπτωση τοπολογίας δακτυλίου και πάλι βασίζονται κυρίως σε Ethernet, λόγω του γεγονότος ότι παρέχεται καλύτερη ισορροπία στη διασύνδεση μεταξύ των κόμβων. Υπάρχουν και πολλές επιλογές ή λύσεις που είναι συμβατές με απλούς καθαρούς κόμβους Ethernet, κυρίως για τα πρωτόκολλα που εκτελούνται σε TCP / UDP / IP. Η πλέον πιο διαδομένη λύση αποτελεί το Ethernet γιατί εφαρμόζονται πρωτόκολλα συγχρονισμού στους μεταγωγείς και παρέχει εγγύηση σχετικά με τον περιορισμό σχετικά με τον περιορισμό των καθυστερήσεων από άκρο σε άκρο επικοινωνίες.

Αντίθετα τα fieldbus θεωρείται ότι παρέχουν αποτελεσματικές μεταδόσεις με τη χρήση σύντομων μηνυμάτων και ελαχιστοποιημένες υπολογιστικές δυνατότητες στους κόμβους. Όμως η συγκεκριμένη λογική αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για τις βιομηχανικές εφαρμογές. Οι λύσεις που υποστηρίζει το Ethernet σε επίπεδο βιομηχανιών συνεχώς βελτιώνεται με νέα σχέδια φυσικών επιπέδων. Όπου εφαρμόζονται οι OFDM πομποδέκτες, συγκριτικά με τη δυαδική σηματοδότηση, δηλαδή Ethernet ή διαύλους πεδίου που τα πλεονεκτήματα που παρέχουν σχετικά με τη ευέλικτη κυματομορφή και το σχεδιασμό των παραμέτρων πλαισίου έρχονται σε αντιπαράθεση με τους βελτιστοποιημένους χρονοπρογραμματιστές κατανομής πόρων προσαρμοσμένους στις συνθήκες του εκάστοτε καναλιού μετάδοσης.

Παρακάτω αναλύεται ένας σχεδιασμός για μια τοπολογία fieldbus υψηλής χωρητικότητας μετάδοσης ( μεγαλύτερη από 100 Mbit / sec ) και αρκετά μεγάλης απόστασης ( μέχρι 1 χιλιόμετρο ), για να υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στην ενεργοποίηση και στη διασύνδεση αισθητήρων συγκριτικά με τις πιθανές λύσεις που προσφέρει το Ethernet. Όπως φαίνεται και στην τοπολογία διαύλου, εικόνα παρακάτω, παρουσιάζεται ένας απλός ηλεκτρικός δίαυλος, όπου όλοι οι κόμβοι μπορούν να λαμβάνουν και να εκπέμπουν ταυτόχρονα, με ένα μονάχα περιορισμό την αποφυγή συγκρούσεων.

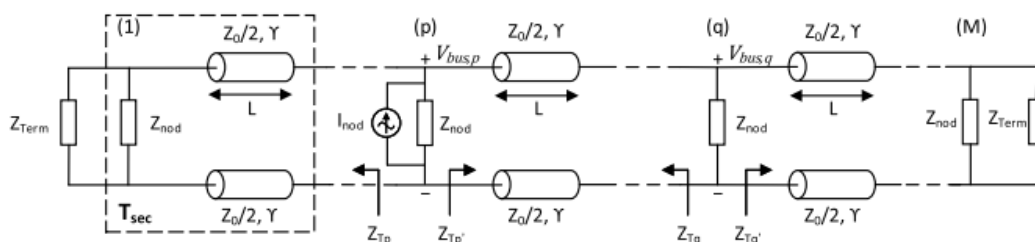


**Εικόνα 26:** Τοπολογία διαύλου ( απλός ηλεκτρικός διάυλος )

Η μονάδα επικοινωνίας αποτελείται από τον OFDM πομποδέκτη και από το κύκλωμα αναλογικού μπροστινού άκρου ( AFE ). Η δουλειά του OFDM πομποδέκτη είναι να ενσωματώνει το ψηφιακό κύκλωμα για το συγχρονισμό και να πραγματοποιείται η υλοποίηση του Αντίστροφου Μετασχηματισμού Fourier, για τη σωστή μετάδοση και λήψη της κυματομορφής OFDM από την εξαρτώμενη από το μέσο διεπαφή MDI. Το AFE αποτελείται από τα εξής μέλη, τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα ( ADC ), ένα μετατροπέα από ψηφιακό σε αναλογικό ( DAC ) και ενισχυτές για τη διασύνδεση του διαύλου. Το σύστημα αποτελείται από άγνωστο αριθμό κόμβων, έστω K. Ο κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να εκπέμπει και λαμβάνει OFDM κυματομορφές. Η πολλαπλή πρόσβαση στο κανάλι υποστηρίζεται από το OFDMA, δηλαδή ένας μηχανισμός προγραμματισμού εκχωρεί τους χρήστες σε διαθέσιμους πόρους για να εξαλείφονται οι πιθανότητες συγκρούσεων, χρησιμοποιούνται μπλοκ από πόρους. Οι καθυστερήσεις που εισάγονται από το σύστημα είναι ντετερμινιστικού χαρακτήρα.

Η συγκεκριμένη τοπολογία αποτελεί μια απλή περίπτωση OFDM, αλλά μας βοηθάει να κατανοήσουμε αρκετά πράγματα πάνω στις τοπολογίες με κόμβους και πως χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικούς διαύλους το OFDM.

Στο επόμενο σχήμα γίνεται αναπαράσταση του ισοδύναμου κυκλώματος για τη σύνδεση μεταξύ των κόμβων. Οι κόμβοι βρίσκονται στην ίδια απόσταση μεταξύ τους πάνω στο μήκος του καλωδίου, έστω L μέτρων. Οι  $Z_{nod}$  είναι οι αντιστάσεις που υπάρχουν στο κύκλωμα. Ο διάυλος όπως φαίνεται χρησιμοποιεί την ίδια σύνθεση στην αντίσταση σε κάθε κόμβο.



**Εικόνα 26:** Ισοδύναμο κυκλώματος ηλεκτρικού διαύλου

Παράλληλα για να είναι πιο απλοϊκό εμφανίζεται μονάχα μία πηγή που παράγει το σήμα. Όλοι οι κόμβοι λαμβάνουν, αλλά και στέλνουν συγχρόνως.

Γενικά υπάρχει η δυνατότητα να προκύψουν και περαιτέρω βελτιώσεις με τη μετάδοση κυματομορφών πολλαπλών φορέων στα ενσύρματα δίκτυα που έχουν οι βιομηχανίες και τα εργοστάσια. Η τοπολογία διαύλου σε ότι έχει να κάνει με τη χωρητικότητα εμφανίζει υψηλότερες τιμές στις μεγάλες αποστάσεις συγκριτικά με τα δίκτυα που βασίζονται σε διαύλους πεδίου και Ethernet. Ακόμη η ευελιξία που προσφέρουν οι OFDM κυματομορφές βοηθούν στην αντιμετώπιση της ανθεκτικότητας των περιβαλλόντων της βιομηχανίας.

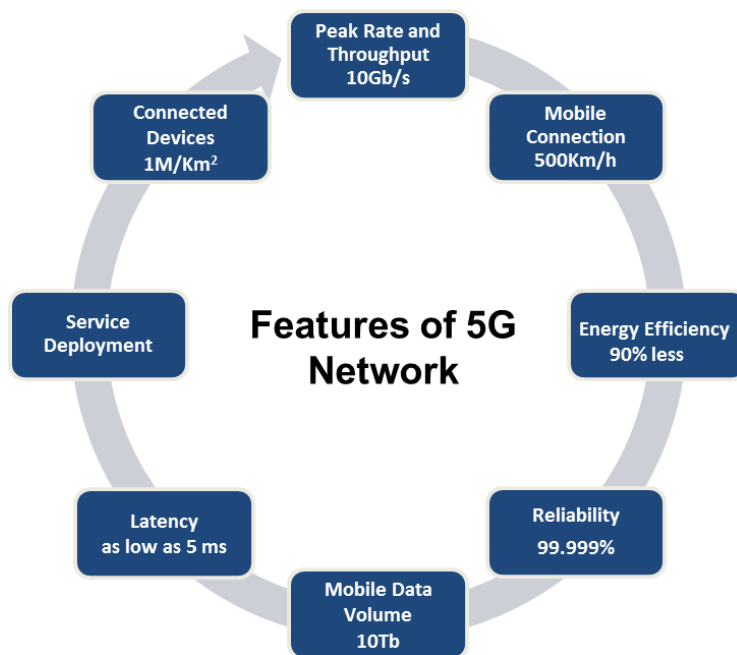
## 5.2. Ανάλυση συστήματος MIMO κινητής επικοινωνίας 5G με OFDM

Στη σημερινή εποχή η ταχύτητα των συστημάτων κινητής επικοινωνίας έχει σημαντικό ρόλο στη ζωή του ανθρώπου. Η ανάγκη για συνεχής βελτίωση της ταχύτητας του δικτύου με όσο το δυνατόν μικρότερη καθυστέρηση εμφανίζεται όλο και περισσότερο από τους πελάτες. Το 5G που έχει εμφανιστεί σιγά – σιγά προσπαθεί να φέρει μεγαλύτερη χωρητικότητα συγκριτικά με το 4G και επιπλέον πυκνότητα των πελατών ευρυζωνικής κινητής τηλεφωνίας. Παρακάτω παρουσιάζεται ο σχεδιασμός κινητής επικοινωνίας 5G με βάση το 802.11 με τεχνικές MIMO και OFDM. Επίσης γίνεται χρήση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης AODV. Με τη συγκεκριμένη τεχνική επιτυγχάνεται υψηλότερο κέρδος και καλύτερη φασματική απόδοση.

Η κινητή επικοινωνία βοηθάει καθημερινά ώστε να μπορεί να υπάρχει μετάδοση φωνής και πολυμέσων με τη χρήση κάποιου υπολογιστή ή κάποιου κινητού. Το 5G είναι η πέμπτη γενιά της τεχνολογίας [15]. Προσφέρει πάρα πολλές δυνατότητες καλύτερης απόδοσης σε σχέση με την προηγούμενη γενιά 4G. Οι ταχύτητες που δίνει στο χρήστη είναι αρκετά μεγάλες. Επίσης, με όλα τα θετικά που προσφέρει μετατρέπει το κινητό τηλέφωνο σαν ένα φορητό υπολογιστή. Κάποια από τα επιπλέον χαρακτηριστικά που έχει είναι τα εξής:

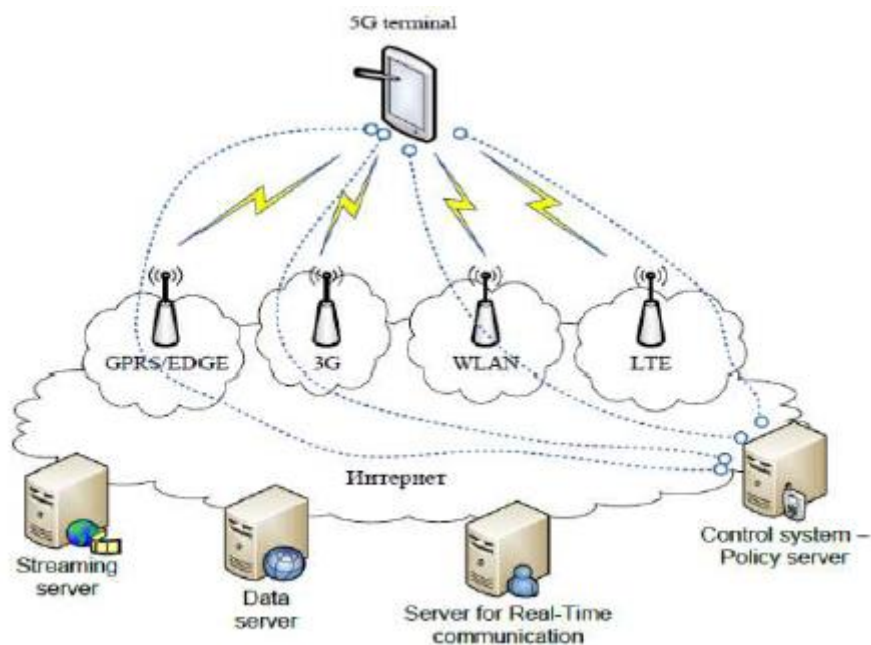
- Συνδεσιμότητα σε όποιο σημείο και να βρίσκεται ο πελάτης.
- Ταχύτερη απόκριση και καλύτερη ποιότητα ήχου.
- Βίντεο με αυξημένη ανάλυση ( π.χ. HD ή 4K ) μπορούν να διαβιβαστούν σε άλλη συσκευή χωρίς να χαθεί η υψηλή ποιότητα ήχου και εικόνας
- Μεγάλη φασματική απόδοση.

Στην εικόνα 27 παρουσιάζονται μερικά από τα χαρακτηριστικά που προσφέρει η τεχνολογία 5G.



Εικόνα 28: Χαρακτηριστικά 5G Δικτύου

Στις εικόνες 28 και 29 εμφανίζονται 2 αρχιτεκτονικές 5G δικτύων και φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις ότι αποτελούνται από ποικιλία διακομιστών.



Εικόνα 29: Αρχιτεκτονική 5G Δικτύου με ποικιλία διακομιστών



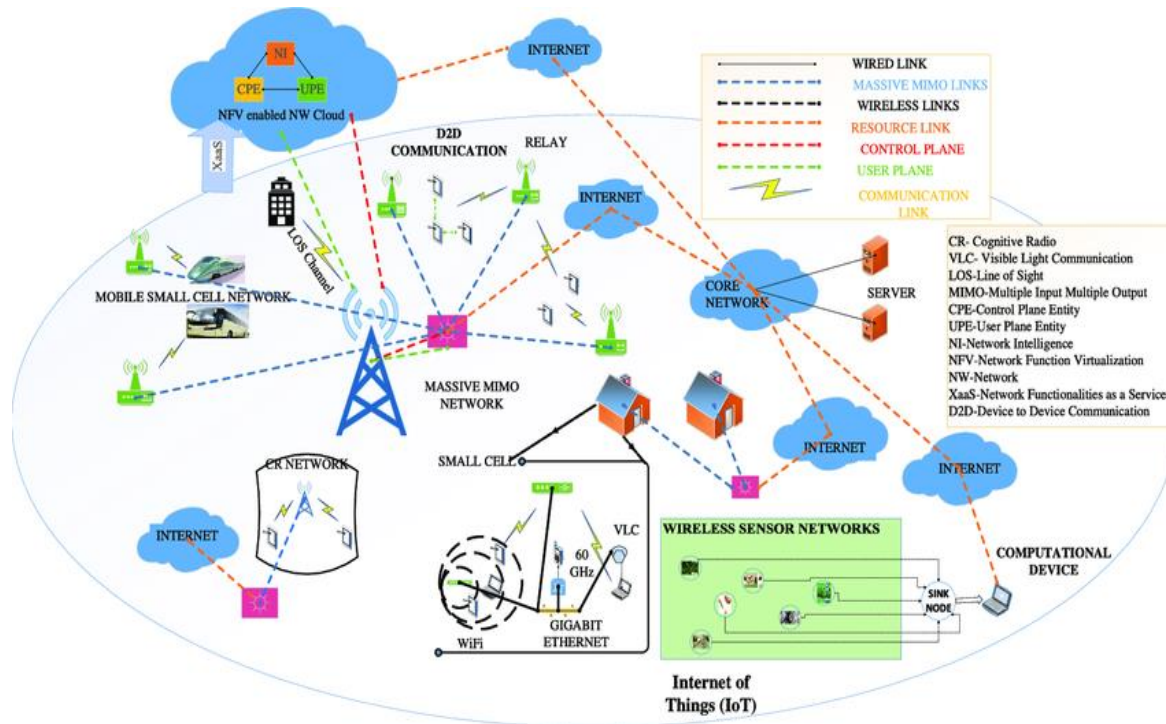




## ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

Επιπλέον το OFDM επιτρέπει επικάλυψη και βοηθάει σημαντικά στις παρεμβολές και στα παράσιτα θορύβου που πιθανόν να κάνουν την εμφάνιση τους.

Η λειτουργία των κεραιών σε 5G δίκτυο είναι να κάνουν τη μετάδοση και την παραλαβή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Στην παρακάτω εικόνα γίνεται διακριτό ένα σύστημα επικοινωνίας 5G.



Εικόνα 31: Σύστημα επικοινωνίας 5G

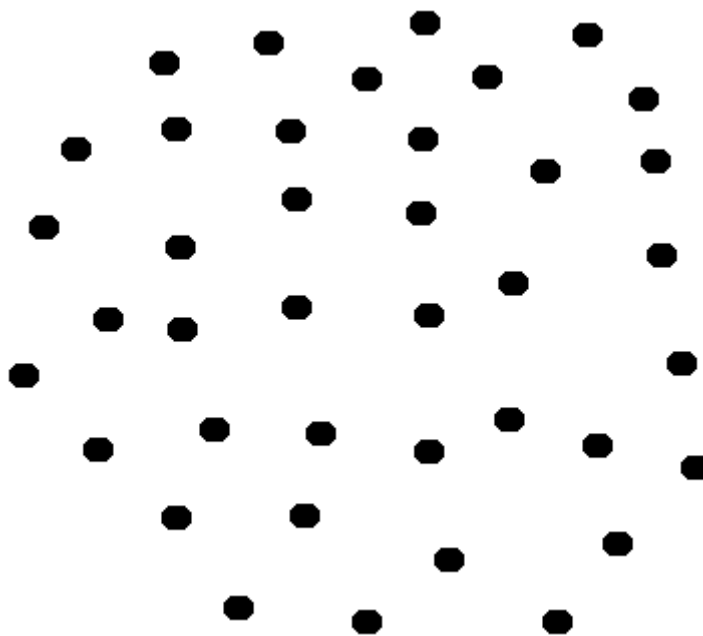
Στη συγκεκριμένη εικόνα η επικοινωνία συσκευής με συσκευή πραγματοποιείται χωρίς ενδιάμεσους κόμβους. Το τμήμα υποδομής δικτύου αποτελείται από μπλοκ επεξεργασίας, μεταγωγής και αποθήκευσης που αποτελεί την καρδιά όλου του συστήματος επικοινωνίας.

Στην παρακάτω τοπολογία αναλύεται ένα σύστημα κινητής επικοινωνίας 5G που έχει ως βάση το Wi-Fi. Αρχικά ρυθμίζονται οι σωστοί παράμετροι π.χ. ισχύς, τύπος συχνότητας, κανάλια μετάδοσης κ.ά. Στη συγκεκριμένη τοπολογία αυτό που κάνει την εμφάνιση του είναι ότι οι κόμβοι κινούνται από μία θέση σε κάποια άλλη με διαφορετικές ταχύτητες. Μεταφέρονται πακέτα από την στον προορισμό. Για τον τερματισμό των δεδομένων χρησιμοποιείται ένας NULL Agent από το δέκτη. Γίνεται έπειτα σύνδεση του δέκτη και του πομπού. Η χρήση των τεχνικών MIMO και OFDM βοηθούν για να σχεδιαστεί ένα κύκλωμα με αισθητή απόδοση του δικτύου και μείωση των παρεμβολών. Το MIMO παρουσιάζει κεραιές πολλαπλών εισόδων και εξόδων. Εξαιτίας των πολλών κεραιών εμφανίζονται πολλαπλά κανάλια και η μέγιστη ποσότητα δεδομένων που μπορεί να μεταδοθεί κάθε προσομοιωμένη χρονική περίοδο.

Η ζώνη συχνοτήτων είναι της τάξης των 5 GHz και έχει εύρος ζώνης 20 MHz, για το σχεδιασμό του συγκεκριμένου δικτύου κινητής επικοινωνίας. Το κανάλι μετάδοσης είναι ασύρματο, αφού το δίκτυο είναι κινητής επικοινωνίας. Γίνεται χρήση δύο μοντέλων διάδοσης για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη φασματική απόδοση. Ο τύπος MAC είναι το 802.11 ac για καλύτερη προσφερόμενη ταχύτητα δικτύου. Η κεραιά Omni χρησιμοποιήθηκε ως

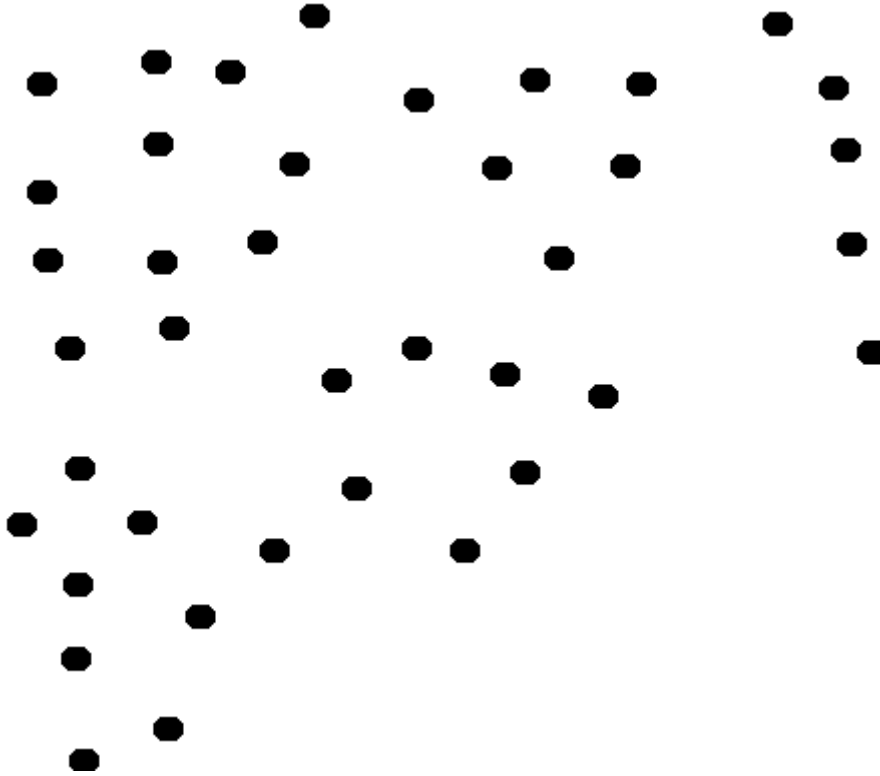
κατευθυντήρια, για τη μετάδοση και τη λήψη των σημάτων προς όλες τις κατευθύνσεις με το ίδιο μέγεθος. Το μήκος της ουράς είναι 40, δηλαδή μετά την παραλαβή του πρώτου πακέτου αν παραληφθεί και δεύτερο πακέτο χωρίς να έχει ολοκληρωθεί η επεξεργασία του πρώτου πακέτου, τότε αυτομάτως μπαίνει την ουρά το πακέτο ή τα πακέτα που έχουν παραληφθεί. Ο συνολικός αριθμός των πακέτων που μπορούν να παραληφθούν χωρίς να χαθεί κάποιο είναι σαράντα. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV χρησιμοποιείται για να δείξει την καλύτερη διαδρομή για τη μεταφορά των πακέτων. Τα πακέτα δεδομένων στην κινητή επικοινωνία είναι μεταβλητά, δηλαδή δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να έχει ελευθερία να μεταδίδει δεδομένα ανεξάρτητα από το μέγεθος.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μας δείχνουν ότι, οι σαράντα κινητοί κόμβοι που υπάρχουν αλλάζουν θέσεις συνεχώς. Ο κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται ως Κινητό Σταθμός. Η μετάδοση δεδομένων λαμβάνει χώρα εντός του εύρους κάλυψης μετάδοσης και λήψης. Στα κινητά συστήματα επικοινωνιών οι κινητοί κόμβοι μετακινούνται από το ένα σύμπλεγμα στο άλλο, άρα να η κάλυψη του δικτύου δεν είναι διαθέσιμη σε εκείνο το σύμπλεγμα τότε τα πακέτα χάνονται.



**Εικόνα 32:** Στιγμιότυπο κόμβων της κινητής επικοινωνίας 5G

Μετά την εφαρμογή των τεχνικών MIMO και OFDM, η απόδοση και η αναλογία παράδοσης πακέτων του συστήματος αυξάνεται σημαντικά.



**Εικόνα 33:** Κόμβοι κινητής επικοινωνίας μετά την εφαρμογή των τεχνικών OFDM και MIMO.

Ως συμπέρασμα μένει ότι αυτό που φαίνεται από τη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι ότι τα συστήματα κινητής επικοινωνίας που βασίζονται σε Wi-Fi προσφέρουν υψηλή απόδοση και αναλογία παράδοσης πακέτων συγκριτικά με το 4G. Επίσης, οι παρεμβολές σε σχέση με παλαιότερες τεχνολογίες είναι ελάχιστες, σχεδόν ανύπαρκτες.

### **5.3. Ασύρματα δίκτυα σε τσιπς με χρήση ελαστικού πομποδέκτη OFDM**

Η εμφάνιση ασύρματων ζεύξεων σε chips που λειτουργούν σε πολύ χαμηλές συχνότητες κυμάτων ( χιλιοστού ) δίνουν μία ελπιδοφόρα λύση για να εξαλειφθεί η καθυστέρηση που προκύπτει εξαιτίας των πολλαπλών πηδημάτων και η υψηλή κατανάλωση ενέργειας στις μεταλλικές διασυνδέσεις σε πλατφόρμες Network-on-Chip ( NoC ) [16] . Όλα αυτά οδηγούν στο σχεδιασμό αποτελεσματικών πομποδεκτών, που είναι ανθεκτικοί και χρειάζονται για την επίτευξη υψηλής απόδοσης στην ασύρματη επικοινωνία στο τσιπ. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας φασματικά αποδοτικός πομποδέκτης που έχει ως βάση το OFDM λειτουργεί σε συχνότητες κυμάτων χιλιοστών για ασύρματες διασυνδέσεις. Η συγκεκριμένη σχεδίαση βοηθάει στην παροχή υψηλού ρυθμού δεδομένων με μικρά έξοδα ισχύς, ενώ παράλληλα χειρίζεται τα εφέ που υπάρχουν στο κανάλι και στις παρεμβολές των συμβόλων.

Το NoC ( Network-on-Chip ) είναι η τεχνολογία που δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης πολλών πυρήνων σε ένα μόνο τσιπ. Όταν υπάρχει αύξηση στον αριθμό των πυρήνων σε ένα τσιπ, η επικοινωνία πολλαπλών πηδημάτων εμφανίζει μεγάλη καθυστέρηση και κατανάλωση ενέργειας ανάμεσα στους πιο απομακρυσμένους κόμβους. Λόγω της

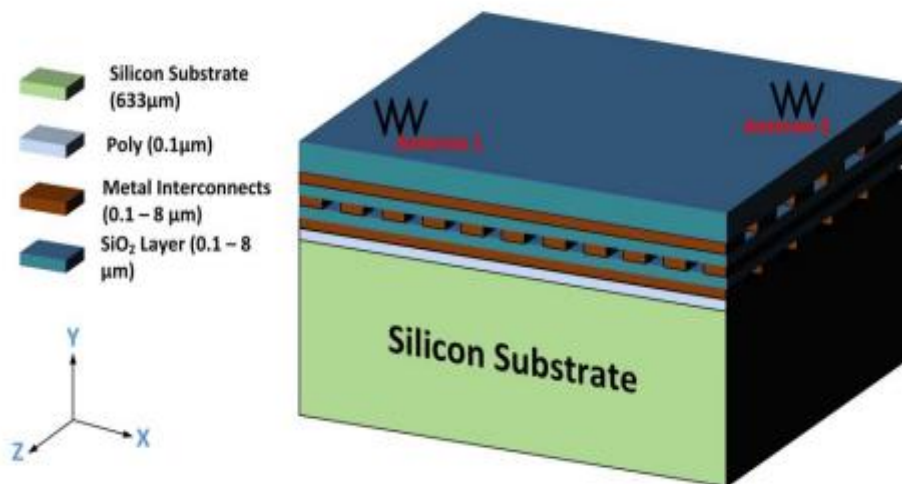
αυξανόμενης ζήτησης για NoC απόδοσης, οι τοπολογίες για ασύρματες NoC εμφανίζονται όλο και περισσότερο. Στη συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιούνται ελάχιστες ασύρματες διεπαφές ( WI ) με βέλτιστο τρόπο τοποθετημένες, για τη διασύνδεση αποστάσεων δια μέσω ασύρματων συνδέσεων χαμηλής καθυστέρησης και χαμηλής ενέργειας, για καλύτερη απόδοση επικοινωνίας. Μια ασύρματη διεπαφή έχει τις περισσότερες φορές τα εξής μέλη:

- Σειριακές ή παράλληλες διεπαφές buffer.
- Πομποδέκτη ( διαμορφωτής / αποδιαμορφωτής, ενισχυτής ισχύς και ενισχυτής χαμηλού θορύβου ).
- Κεραία.

Η σωστή επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης καθώς και ο ορθός σχεδιασμός του πομποδέκτη επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Το σχήμα διαμόρφωσης On - Off – Keying ( OOK ) έχει ευρεία χρήση για καλύτερα αποδοτικό πομποδέκτη. Συνήθως λειτουργεί στα 60 GHz με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων τα 10,7 Gbps και κατανάλωση ισχύος 67 mW. Παρόλο που οι πομποδέκτες έχουν μικρό εμβαδόν και επιβάρυνση ισχύος, εμφανίζεται χαμηλή φασματική απόδοση και ευαισθησία στα εφέ του καναλιού. Υποβάθμιση του σήματος αυξάνοντας την πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων φιλτραρίσματος και μειωμένη απόδοση. Άμα συγκριθούν διάφορα σχήματα πληκτρολόγησης μετατόπισης, φαίνεται ότι το QPSK έχει διπλάσιο εύρος ζώνης από το OOK. Πρώτα από όλα για να σχεδιαστεί ένας πομποδέκτης με ελαστικότητα καναλιού, γίνεται ανάλυση αρχικά του ασύρματου καναλιού εκτός του τσιπ. Ο πομποδέκτης OFDM λειτουργεί σε συχνότητες κυμάτων χιλιοστού. Για την κατανόηση του καναλιού, γίνεται μια προσομοίωση ενός ασύρματου σήματος δύο κεραίων, επίσης βρίσκουμε τις προδιαγραφές του πομποδέκτη OFDM.

Για το σχεδιασμό του ασύρματου πομποδέκτη σε τσιπ είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει κατανόηση των χαρακτηριστικών των ασύρματων καναλιών μέσα στο τσιπ. Τα διάφορα χαρακτηριστικά του OFDM, είναι απόλυτα εξαρτημένο με την καθυστέρηση καναλιού, την εξάπλωση καθυστέρησης και την απώλεια διαδρομής.

Οι περίπλοκες γεωμετρίες στο εσωτερικό του τσιπ δημιουργούν αντανάκλασεις από διαφορετικά στρώματα και άκρες τσιπ, μαζί με το στοιχείο γραμμής όρασης. Οι πολλαπλές διαδρομές δημιουργούν την εξάπλωση υψηλής καθυστέρησης. Οι εκτιμήσεις που υπάρχουν για κλασικό κανάλι είναι μη επιτρεπτές, γιατί η ασύρματη μετάδοση σε συχνότητες κυμάτων χιλιοστών είναι για κεραίες κοντινού πεδίου ( μακρινό πεδίο, απόσταση  $r \gg 10 \lambda$  ). Πραγματοποιώντας μοντελοποίηση στο εσωτερικό περιβάλλον του τσιπ κάνοντας χρήση μιας τρισδιάστατης δομής πολλών επιπέδων, όπως φαίνεται και στην εικόνα παρακάτω. Είναι εμφανείς όλοι οι παράμετροι που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του καναλιού. Το υπόστρωμα πυριτίου δείχνει τον όγκο πυριτίου και τις συσκευές του κυκλώματος στο τσιπ. Το στενό στρώμα Poly, πάνω από το πυρίτιο, χρησιμοποιείται για επαφής πύλης στο CMOS. Επιπλέον διακρίνονται οι πολλαπλές διασυνδέσεις που είναι ενσωματωμένες στο SiO<sub>2</sub> υλικό. Εξετάζεται η διεργασία εννέα μεταλλικών στρωμάτων ( M1 – M9 ) από την τεχνολογία 32nm. Οι κεραίες εμφανίζονται στο επάνω μεταλλικό στρώμα και για να αποφευχθεί κάποιο βραχυκύκλωμα των κεραίων, τοποθετείται ένα παχύ στρώμα SiO<sub>2</sub> πάνω από την άμεση διασύνδεση. Οι κεραίες είναι εκτεθειμένες στον ελεύθερο χώρο. Επίσης αγνοούνται οι πιθανές επιπτώσεις της συσκευασίας των τσιπ.

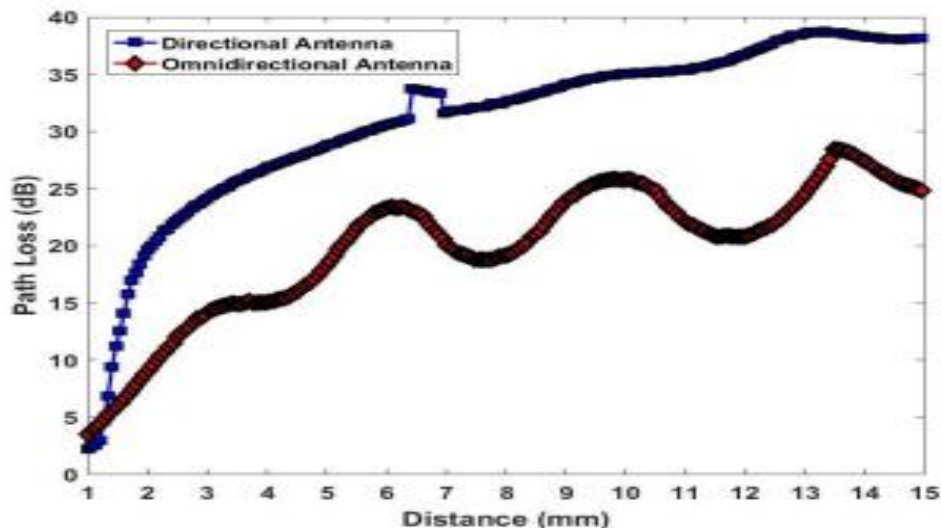


**Εικόνα 34:** Τρισδιάστατο περιβάλλον στο τσιπ με υπόστρωμα πυριτίου, διασυνδέσεις χαλκού και διοξείδιο του πυριτίου για εκτίμηση ασύρματων καναλιών

Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται είναι κατευθυντικές και πανκατευθυντικές, για να διασφαλιστεί η καταγραφή όλων των πιθανών ανακλάσεων. Οι κατευθυντικές κεραίες ακτινοβολούν μόνο ως προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, μειώνουν όμως τον αριθμό των ανακλάσεων, δηλαδή μειώνεται το αντίκτυπο των φαινομένων διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Οι πανκατευθυντικές κεραίες στέλνουν σήμα προς όλες τις κατευθύνσεις και το σήμα που ανακλάται από διάφορες διεπαφές από διάφορες διεπαφές φτάνει στο δέκτη, έχοντας επηρεάσει την ισχύ και την εξάπλωση της καθυστέρησης σε μεγάλο βαθμό.

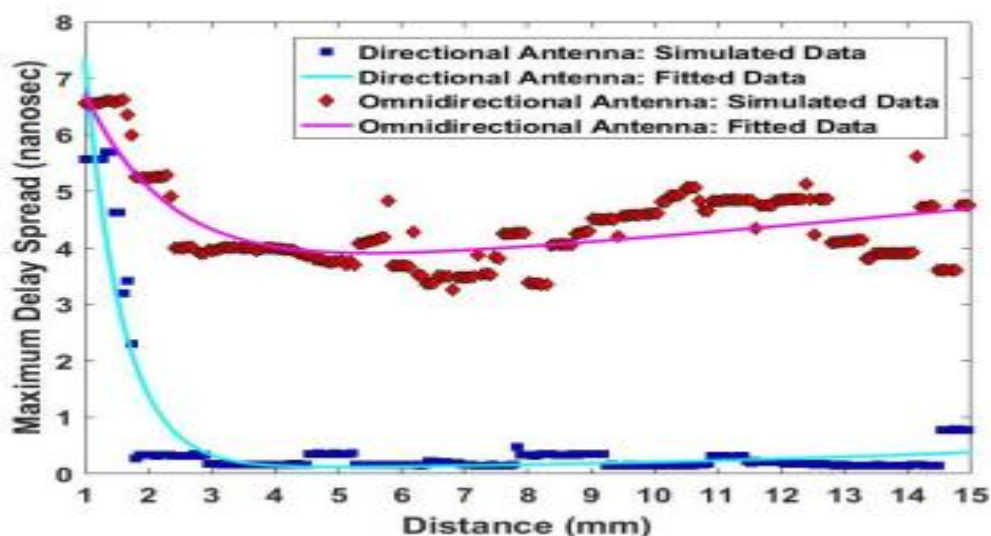
Στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση της απώλειας διάδοσης και της διασποράς του ασύρματου καναλιού στο τσιπ. Με τα δεδομένα αυτά προσδιορίζεται ο σχεδιασμός του OFDM πομποδέκτη και αξιολογείται η απόδοση του δικτύου.

Η απώλεια διαδρομής του ασύρματου καναλιού ορίζει τις απαιτήσεις ισχύος για την αξιόπιστη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων μέσω ασύρματης επικοινωνίας. Στην εικόνα 34 φαίνεται η διακύμανση της απώλειας διαδρομής συγκριτικά με περιοχή μακρινού πεδίου. Ανάλογα με την απόσταση που υπάρχει, δηλαδή σε κοντινή απόσταση από την κεραία η ισχύς του σήματος εξασθενεί με πολύ γρήγορο ρυθμό. Όσο η απόσταση αυξάνεται ο ρυθμός εξασθένισης γίνεται πιο αργός. Αυτό που διακρίνεται είναι ότι η απώλεια διαδρομής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις θέσεις της κεραίας και από την ακτινοβολία μαζί με τα χαρακτηριστικά του καναλιού. Όλοι οι πομποδέκτες πρέπει να βαθμονομηθούν για τη χειρότερη περίπτωση απώλειας διαδρομής.



Εικόνα 35: Απώλεια διαδρομής με απόσταση για διαφορετικές κεραίες

Η απώλεια χρόνου λόγω των πολλαπλών διαδρομών και παραμορφώσεων φάσης, αποτελεί μία ακόμη επίπτωση των σύνθετων γεωμετρικών τσιπ. Προκαλείται εξαιτίας των διαφορετικών διαδρομών διάδοσης που φτάνουν στο δέκτη σε διαφορετικές καθυστερήσεις διάδοσης. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η διακύμανση της μέγιστης κατανομής καθυστέρησης με την απόσταση μετάδοσης. Η εξάπλωση καθυστέρησης με κατευθυντική κεραία παρουσιάζει εκθετικά πτωτική τάση με την απόσταση και σχεδόν μηδενίζεται πέρα από την απόσταση των 5 mm. Στην πανκατευθυντική κεραία, η διασπορά της καθυστέρησης μένει υψηλή εξαιτίας του μεγάλου αριθμού ανακλάσεων. Με αυτά τα στοιχεία γίνεται ο σχεδιασμός του OFDM πομποδέκτη. Η σχεδίαση του πομποδέκτη και η στιβαρότητα ενάντια στα εφέ των καναλιών επηρεάζεται κυρίως από το συνολικό αριθμό των ορθογώνιων υποκαναλιών και του σχήματος κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται.

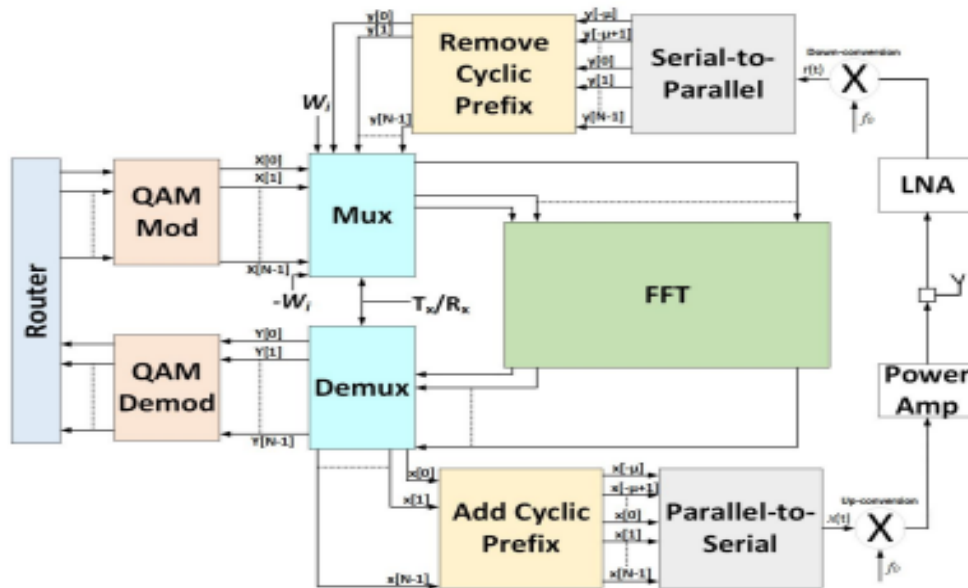


Εικόνα 36: Διασπορά καθυστέρησης καναλιού με απόσταση για διαφορετικές δομές κεραίας

Ο πομποδέκτης OFDM που εφαρμόζεται για τα WNoCs φαίνεται στην εικόνα 36. Ο σχεδιασμός ενός πομποδέκτη OFDM χωρίζεται σε τρία μέρη:

- Κωδικοποίηση δεδομένων
- Υλοποίηση DFT / αντίστροφου DFT.
- Κυκλικό πρόθεμα και σειριακές / παράλληλες διεπαφές.

Γίνεται χρήση σχήματος κωδικοποίησης M – QAM για διασφάλιση υψηλής φασματικής απόδοσης με επαρκή BER. Κωδικοποιούνται σύμβολα δεδομένων  $\log_2 M$  ανά σύμβολο τόσο στη φάση όσο και στο πλάτος του φέροντος σχήματος. Η FFT μονάδα διαμορφώνει τα κωδικοποιημένα σύμβολα και bits σε συχνότητα υποκαναλιού κάνοντας χρήση Διακριτού Μετασχηματισμού Φουριέ ( DFT ). Το σήμα που προκύπτει στον τομέα του χρόνου μετατρέπεται σε συχνότητα φορέα μετάδοσης (  $f_0$  ) και ενισχύεται με τη χρήση ενισχυτή ισχύος. Στον αποδιαμορφωτή, το σήμα μετατρέπεται σε παράλληλες ροές. Τα bits και τα σύμβολα κυκλικού προθέματος δέχονται αποδιαμόρφωση στην FFT μονάδα. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα WNoC εφαρμόζουν παράλληλες διεπαφές με ρύθμιση μίας κεραίας και ενός καναλιού, για μείωση των εξόδων. Άρα, μόνο ο πομπός ή ο δέκτης είναι ενεργός ανάλογα με το σήμα γίνεται διαμόρφωση ή αποδιαμόρφωση. Τα σύμβολα QAM στη διαμόρφωση σχηματίζουν τις συνιστώσες συχνότητες του OFDM συστήματος.



Εικόνα 37: Πομποδέκτης OFDM για WNoC

Για τη σωστή αξιολόγηση της απόδοσης του OFDM συστήματος πραγματοποιείται προσομοίωση με MATLAB, για άκρο σε άκρο επικοινωνία και όλα τα χαρακτηριστικά που χρειάζεται το ασύρματο κανάλι. Γίνεται εξέταση με δύο δομές κεραίας, για όλες τις περιπτώσεις, με 25 GHz και 6 GHz. Ο αριθμός καθυστέρησης φτάνει έως 5 nsec. Ο αριθμός bit κυκλικού προθέματος είναι 24 bits. Παράλληλα δίνονται μετρήσεις του BER, της κατανάλωσης ενέργειας και της απόδοσης ρυθμού.



ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

Ο ρυθμός δεδομένων υπολογίζεται με 64 και 256 πιλοτικά υποκανάλια, με 4 και 16 σήματα αντίστοιχα. Ως σχήμα κωδικοποίησης χρησιμοποιείται το 256 – QAM, κωδικοποιεί  $K = 8$  bit ανά σύμβολο. Ο ρυθμός δεδομένων δίνεται από τον εξής τύπο:

$$R = \frac{K \times (Nd + Np + Ng)}{(Tg + Tn)}$$

Όπου  $Tn = \frac{1}{Bn}$  και  $Tg = \frac{\mu}{B}$ ,

$Nd$ ,  $Np$ ,  $Ng$  είναι τα υποκανάλια δεδομένων, πιλοτικά υποκανάλια και κυκλικό πρόθεμα αντίστοιχα,

$Tn$  η διάρκεια συμβόλου και  $Tg$  είναι η διάρκεια του κυκλικού προθέματος.

Με μέγιστη διαφορά καθυστέρησης, ο ρυθμός δεδομένων είναι 43,6 Gbps και 195,32 Gbps. Με χρήση κυκλικού προθέματος υπάρχει βελτίωση στα 47,4 Gbps. Το σχήμα OFDM επιτυγχάνει μέγιστη φασματική απόδοση 7,2 bps / Hz, έχοντας εις γνώση την εξάπλωση καθυστέρησης στη χειρότερη περίπτωση. Στον πίνακα 2 φαίνεται ότι το OFDM επιτυγχάνει υψηλό ρυθμό δεδομένων συγκριτικά με τις άλλες διαμορφώσεις και επιπλέον υπερισχύει ενάντια στις πιθανές επιπτώσεις που έχει το ασύρματο κανάλι.

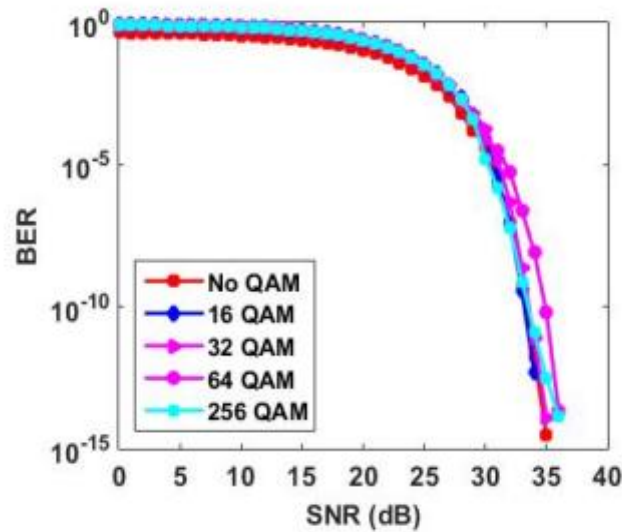
Modulation	Tech	Data Rate Energy Area (Gbps)	Energy (pJ/bit)	Area (mm <sup>2</sup> )
OOK	90nm	10.7	6.26	0.44
OOK	65nm	18.7	1.2	0.12
OFDM	32nm	43.6	0.498	0.073
		195.32	0.132	0.092

**Πίνακας 2:** Απόδοση πομποδεκτών για WNoC

Το συνολικό ποσοστό σφάλματος bit, ενσωματώνεται μαζί με τα χαρακτηριστικά του καναλιού μέσα στο τσιπ του OFDM σχήματος διαμόρφωσης. Ο θόρυβος, που σίγουρα υπάρχει στο κανάλι, διαμορφώνεται ως πρόσθετος λευκός Gaussian θόρυβος. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το BER ως παραλλαγή του λόγου σήματος προς θόρυβο ( SNR ) για τα διάφορα σχήματα κωδικοποίησης. Το BER που συχνά υπάρχει στις ασύρματες συνδέσεις είναι του μεγέθους 35 dB και της τάξης  $10^{-14}$ .

Στον πίνακα 2 επίσης φαίνεται η σύγκριση για την κατανάλωση ενέργειας του OFDM σχήματος με άλλα σχήματα.





Εικόνα 38: BER για διαφορετικές προδιαγραφές OFDM

Κατά μέσο όρο, το WNoC που στηρίζεται στο OFDM επιτυγχάνει την εκτέλεση εφαρμογής σε σύγκριση με WNoC που βασίζεται στο OOK, γιατί για κάθε μεταφορά πακέτου χρειάζονται λιγότεροι κύκλοι. Επίσης, το WNoC που βασίζεται στο OFDM μειώνει το λανθάνοντα χρόνο σε σχέση με το WNoC που βασίζεται στο OOK. Τέλος το OFDM στο WNoC βοηθάει στη συνολική μείωση ενέργειας, λόγω της χαμηλής αποδοτικής εφαρμογής του FFT.

Εν κατακλείδι, το σχήμα διαμόρφωσης OFDM προσφέρει υψηλή ταχύτητα δεδομένων, χαμηλή ενέργεια σε συχνότητες χιλιοστού ( mm ) για WNoC. Ενώ ο πομποδέκτης που βασίζεται με την εφαρμογή του FFT, επιτρέπει μικρή επιβάρυνση και αποδιαμόρφωση. Η αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο σχήμα σε σύστημα 64 πυρήνων δείχνει ότι μειώνει το χρόνο εκτέλεσης της εφαρμογής, την καθυστέρηση δικτύου και την ενέργεια κατά 15,9%, 42% και 61,6% αντίστοιχα

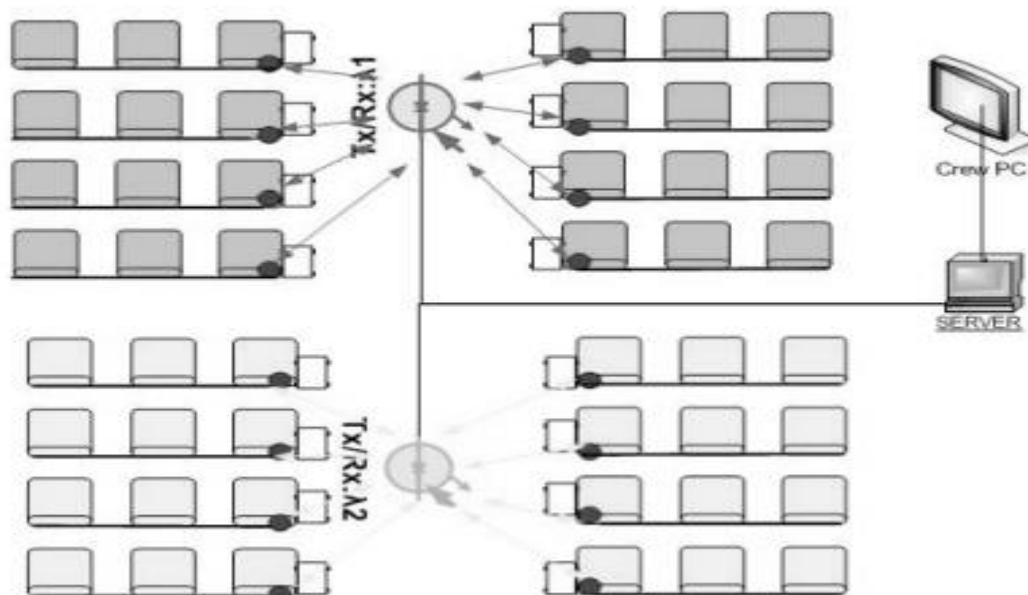
#### 5.4. Ασύρματη οπτική υλοποίηση OFDM για ζεύξεις επικοινωνίας καμπίνας αεροσκαφών

Η συνεχής ανάπτυξη των οπτικών συσκευών έχουν οδηγήσει σε αύξηση του ενδιαφέροντος για τα συστήματα ασύρματων οπτικών επικοινωνιών υψηλών ταχυτήτων δεδομένων και αποτελούν μία βιώσιμη εναλλακτική λύση στις σημερινές συμβατικές τεχνολογίες. Στην παρακάτω ενότητα αναλύεται μία ασύρματη οπτική σύνδεση με υψηλή ταχύτητα δεδομένων που έχει βασιστεί στη διαμόρφωση OFDM με 64 υποφορείς με διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης σε κάθε υποφορέα ( BSPK, QPSK ). Όλα αυτά συμβαίνουν σε μία τοπολογία καμπίνας αεροσκάφους.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των ασύρματων επικοινωνιών είναι η ευέλικτη διαθεσιμότητα που προσφέρουν. Παρόλα αυτά, η καμπίνα ενός αεροσκάφους επιλέγεται

δύσκολα για την ανάπτυξη συμβατικών συστημάτων, εξαιτίας των περιορισμών που υπάρχουν στις ραδιοσυχνότητες. Η διάχυτη οπτική επικοινωνία προσφέρει μια εναλλακτική λύση [19], με λιγότερη όμως ευελιξία συγκριτικά με τις ραδιοσυχνότητες για λειτουργία σε εσωτερικούς χώρους, αλλά με πλεονεκτήματα, όπως το μεγαλύτερο εύρος ζώνης, ελευθερία από ρυθμιστικούς περιορισμούς και στιβαρότητα παρουσίας των παρεμβολών. Οι τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στις ραδιοσυχνότητες χρειάζονται τροποποιήσεις στην οπτική μετάδοση, γιατί υπάρχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά.

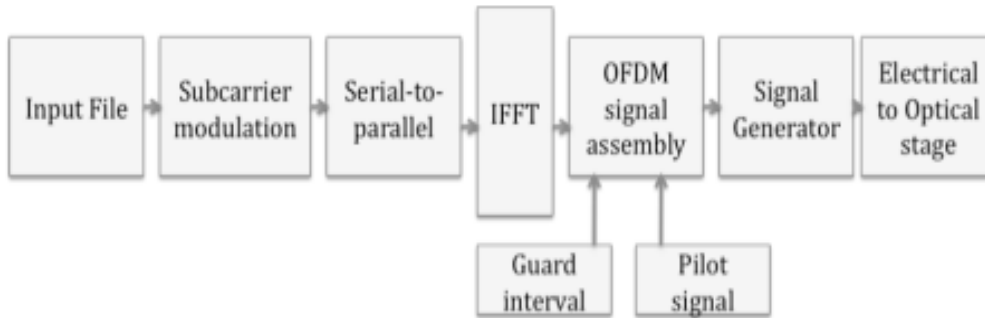
Ακολουθεί η περιγραφή του δικτύου καμπίνας. Για να επιτευχθεί υποστήριξη εφαρμογών υψηλού ρυθμού δεδομένων, ορίζεται μία αρχιτεκτονική δικτύου με δύο μήκη κύματος σε τύπο κυψέλης, για την κάλυψη ολόκληρης της καμπίνας.



**Εικόνα 39:** Σύστημα επικοινωνίας εντός καμπίνας δύο μηκών κύματος

Ο βασικός στόχος για ένα τέτοιο περιβάλλον δικτύου είναι η αύξηση της χωρητικότητας για κάθε κυψέλη μειώνοντας στο ελάχιστο ή εξαφανίζοντας τα φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών και την παραμόρφωση σήματος, που επηρεάζουν το BER, άρα και την ποιότητα των υπηρεσιών, π.χ. streaming βίντεο υψηλής ποιότητας, ηχητική διάσκεψη κ.ά. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα κάθε κελί περιέχει πολλές σειρές με καθίσματα. Με δύο μήκη κύματος ( 980 nm και 850 nm ) πραγματοποιείται ο φυσικός διαχωρισμός ανάμεσα σε γειτονικές κυψέλες. Κάθε επιβάτης ( κάθισμα ), συνδέεται ασύρματα μέσω της οπτικής σύνδεσης σ' έναν κεντρικό σταθμό βάσης. Όλοι οι οπτικοί σταθμοί βάσης ανήκουν στο ίδιο δίκτυο κορμού Ethernet.

Ο πρωτεύων στόχος του οπτικού OFDM, με το πλεονέκτημα της μηδενικής [17] παρεμβολής, είναι η αύξηση του ρυθμού δεδομένων σύμφωνα με τις καθιερωμένες τεχνικές οπτικής διαμόρφωσης π.χ. PPM. Στο πλαίσιο της υλοποίησης, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος διαμόρφωσης που περιγράφεται από το σχήμα της εικόνας που ακολουθεί.



**Εικόνα 40:** Διάταξη κατασκευής οπτικού σήματος OFDM

Στη συνέχεια σύμφωνα με τον κώδικα που αναπτύχθηκε παράγεται μία ακολουθία σημάτων που είναι απαραίτητη για την περιγραφή του οπτικού σήματος OFDM, που θα μεταδοθεί μέσω της ασύρματης υπέρυθρης ζεύξης, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά π.χ. αριθμός υποφορέων, τεχνική διαμόρφωσης ( QPSK, BPSK ), μήκος διαστήματος προστασίας το σήμα φάσης δέχεται μετατροπή σ' ένα δεύτερο σήμα πλάτους καθώς η φάση του οπτικού είναι μη προσβάσιμη και αντιστοιχίζεται ως εξής:

$$\begin{array}{ll} 00 = -1 - j & 10 = 1 - j \\ 01 = -1 + j & 11 = 1 + j \end{array}$$

Τα αντιστοιχισμένα σύμβολα εισέρχονται σε μία προσωρινή μνήμη και αναμορφώνονται. Έπειτα δημιουργούνται τα 64 σύμβολα που χρειάζονται για την IFFT λειτουργία. Για τη λήψη μόνο πραγματικών αριθμών από τον IFFT, γίνεται προσθήκη μία συνιστώσας ( DC ) με πραγματική αξία μπροστά από τους 31 διαμορφωμένους υποφορείς. Στο δεύτερο μέρος του OFDM συμβόλου οι συζυγείς αριθμοί συνενώνονται σε αντίστροφο σχηματισμό των ήδη 31 συμβόλων που έχουν χρησιμοποιηθεί, όπως φαίνεται στην εξίσωση που ακολουθεί:

$$X(k) = 0, a + bi, c + di, \dots, c - di, a - bi$$

$X(k)$  είναι τα 64 δείγματα που εισάγονται στον IFFT. Η επόμενη εξίσωση αποτελεί το γενικό τύπο για την IFFT :

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

Μετά την τροποποίηση του IFFT, ο μετασχηματισμός που προκύπτει έχει αρνητική επίδραση συνολικά στο σύστημα. Επιπλέον, όμως παρατηρείται βελτίωση του ποσοστού σφάλματος bit. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται και οι παρεμβολές.

Όταν παραληφθεί το σήμα από το δέκτη, τότε τα δείγματα αποθηκεύονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία, με τη χρήση MATLAB. Η ασύρματη οπτική σύνδεση επικοινωνίας OFDM που αναλύεται λειτουργεί ως σύστημα εν μέρει σε πραγματικό χρόνο, αλλά και η διαδικασία μετάδοσης και αποδιαμόρφωσης, αναπτύσσεται σύμφωνα με τυπικές διαδικασίες σε πραγματικό χρόνο. Τα δείγματα που εισάγονται στο MATLAB από τον εξής τύπο:

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-\frac{2\pi i k n}{N}}$$

Όπου  $Y(k)$  είναι το σήμα που έχει ληφθεί.

Η εφαρμογή αυτή πραγματοποιείται σε εργαστηριακό εξοπλισμό που έχει τη δυνατότητα να μεταδίδει αλλά και να λαμβάνει ένα οπτικό OFDM σήμα. Η πραγματική συχνότητα δειγματοληψίας διαιρεμένη με τον αριθμό των δειγμάτων που παρέλαβε η γεννήτρια σήματος είναι η εξής:

$$f_{\text{signal}} = \frac{f_{\text{simpling}}}{n}$$

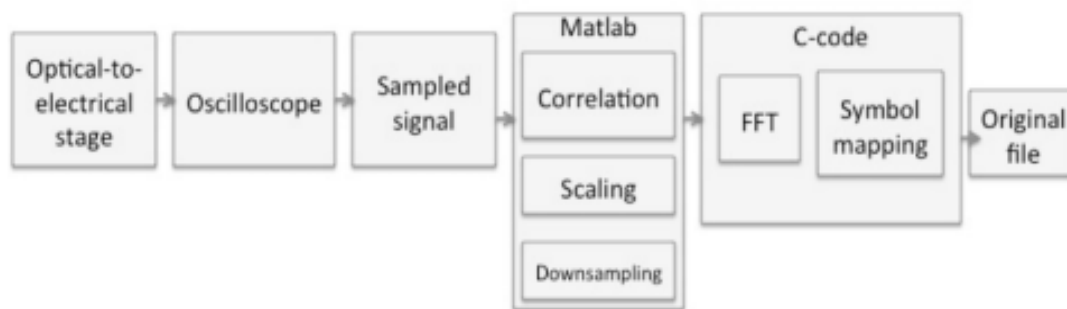
Χρησιμοποιήθηκαν εργαστηριακά για τη μετάδοση:

- ένας φωτοδίοδος λείζερ,
- οι ενισχυτές – ανιχνευτές που πληρούν κάποιες απαιτήσεις ειδικό για τη μετάδοση OFDM,
- ενισχυτές για χαμηλό θόρυβο,
- ενισχυτής σήματος,
- συσκευή τροποποίησης του εύρους ζώνης αλλάζοντας την εσωτερική συχνότητα δειγματοληψίας.

Όλα αυτά και άλλα συστήματα π.χ. παλμογράφος, αποτελούν ένα ασύρματο οπτικό OFDM σύστημα χωρίς σύνδεση.

Για να αποφευχθεί το κύριο πρόβλημα των πολλαπλών διαδρομών, γίνεται χρήση του διαστήματος προστασίας του OFDM σήματος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται αναλογία συμβόλων που υπάρχει σ' άλλα επιτυχημένα OFDM συστήματα π.χ. Wi-Fi, δηλαδή τα ενισχυμένα σύμβολα είναι 16 από τα 80 συνολικά σύμβολα που προέκυψαν τελικά.

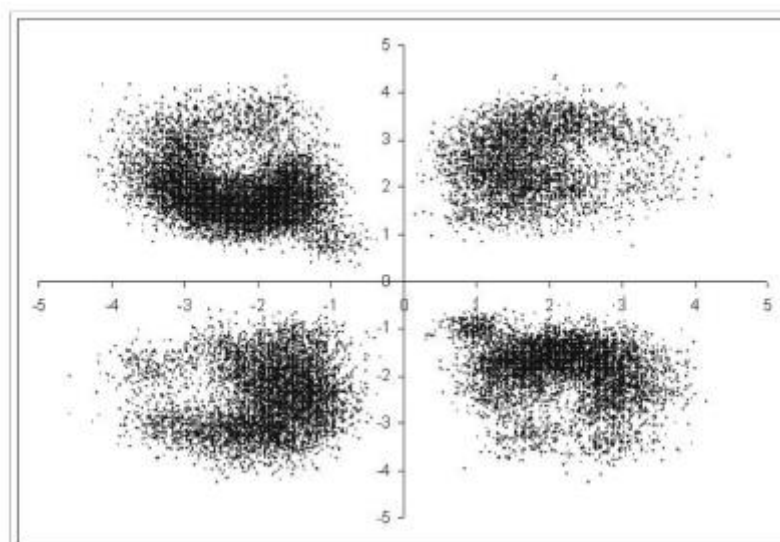
Στο τέλος εισέρχεται ένα πιλοτικό σήμα που περιέχει δύο ευρείες χαμηλές κορυφές και μία αιχμηρή στη μέση, όπως εμφανίζεται και στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 41:** OFDM σήμα που λήφθηκε

Το πιλοτικό σήμα βοηθάει στο συγχρονισμό του σήματος στη λήψη, αλλά επίσης γίνεται κλιμάκωση του συνολικού σήματος διατηρώντας σταθερές τις αναλογίες που αφορούν το πλάτος.

Το σύστημα που αναλύθηκε έκανε χρήση μαθηματικής τροποποίησης του συνηθισμένου IFFT. Οι δοκιμές που έγιναν έδωσαν τη δυνατότητα επιλογής του αριθμού των υποφορέων, τεχνικής διαμόρφωσης σε κάθε υποφορέα ( BPSK, QPSK ) και μήκος διαστήματος προστασίας ανά σύμβολο που εκπέμπει το OFDM. Επιπλέον οι δύο τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν, αρχικά BPSK με 64 υποφορείς. Η υπάρχουσα απώλεια διαδρομής δημιουργεί υποβάθμιση του σήματος. Ο συνολικός αριθμός από bits που μεταδόθηκαν μέτρησαν BER της τάξης του  $10^{-4}$ , δηλαδή το σύστημα έχει πετύχει μετάδοση χωρίς σφάλματα μέχρι το συγκεκριμένο επίπεδο. Για SNR που ισούται με 19 dB και συνολικές συχνότητες από 1 MHz έως 25MHz, πραγματοποιήθηκε μετάδοση χωρίς σφάλματα. Στη δεύτερη τεχνική, 64 – QPSK, παρατηρείται διπλασιασμός του ρυθμού μετάδοσης. Επίσης, τα όρια του αστερισμού είναι αρκετά μεγάλα, άρα ανεκτικά στο θόρυβο και στα σφάλματα που εισάγονται από τις συσκευές του συστήματος. Στην επόμενη εικόνα φαίνονται τα διαγράμματα αστερισμού της μετάδοσης OFDM – QPSK



**Εικόνα 42:** Διάγραμμα αστερισμού της οπτικής μετάδοσης OFDM-QPSK

## ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

Συμπερασματικά το συγκεκριμένο παράδειγμα που αποσκοπούσε στη χρήση οπτικής μετάδοσης OFDM για να επιτευχθεί σύνδεση υψηλού ρυθμού δεδομένων, όπως η καμπίνα ενός αεροπλάνου που τα σχήματα μετάδοσης με υψηλή ποιότητα εξυπηρέτησης είναι αναγκαία. Όλα αυτά στηρίχθηκαν σε μία εργαστηριακή μελέτη και εγκατάσταση με τη χρήση εμπορικών στοιχείων – εξαρτημάτων, για να αποδειχθεί ο ορισμός της διαμόρφωσης OFDM στις ασύρματες οπτικές συνδέσεις. Γενικός σκοπός αποτελούσε η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων του καναλιού και η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δίνεται ο ορισμός, η ιστορική αναδρομή και η περιγραφή του OFDM ( Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας ). Επίσης, αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχει το OFDM. Δίνονται επίσης γενικά πληροφορίες για τις διαμορφώσεις σήματος και τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών με χρήση κόμβων επανεκπομπής αλλά και με χωρίς κόμβους επανεκπομπής. Το OFDM αποτελεί μια διαμόρφωση σήματος που αποδίδει σημαντικά, εξαιτίας των ικανοτήτων και των δυνατοτήτων που έχει οι οποίες είναι οι εξής:

- Αντιμετώπιση του ξεθωριάσματος της επιλεκτικής συχνότητας
- Υψηλή φασματική απόδοση
- Σωστός χειρισμός του διαθέσιμου φάσματος
- Ευέλικτη κατανομή των πόρων
- Υποστήριξη πολλών χρηστών
- Διαστήματα φύλαξης για μείωση καθυστερήσεων
- Μείωση παρεμβολών
- Ευέλικτη προσαρμογή στις συνθήκες καναλιών

Υπάρχουν βέβαια και κάποια μειονεκτήματα όπως:

- Συγχρονισμός, απαιτείται ακριβής συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη.
- Απαιτητικοί και πολύπλοκοι ενισχυτές σήματος, εξαιτίας της αναλογίας κορυφής συγκριτικά με τη μέση ισχύ.
- Μη γραμμική παραμόρφωση σε πρακτικές εφαρμογές.
- Ευαισθησία στη μετατόπιση συχνότητας και στο θόρυβο φάσης.
- Περιορισμένη ανθεκτικότητα σε παρεμβολές στενής ζώνης.
- Επιβάρυνση του διαστήματος προστασίας στη φασματική απόδοση,

αναμφίβολα όμως τα συγκεκριμένα στοιχεία καθιστούν το OFDM απαραίτητο στα σημερινά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών και στις εν λόγω ασύρματες τεχνολογίες, όπως π.χ. το Wi – Fi, το LTE και η ψηφιακή τηλεόραση.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση σε όλα τα μέλη που συνθέτουν ένα OFDM σύστημα όπου και παρατηρείται πως κάθε μέρος αποτελεί σημαντικό στοιχείο για να επιτευχθεί η σωστή λειτουργία του συστήματος και το OFDM να προσφέρει όλα αυτά τα θετικά στοιχεία που του δίνουν μία τόσο σημαντική θέση στις επικοινωνίες. Αυτό που αποτελεί αξιοσημείωτο είναι ότι κάθε υποφορέας που έχει το OFDM σύστημα μπορεί να έχει τη δική του διαμόρφωση σήματος π.χ. QPSK, BPSK και QAM.

Επίσης αναλύονται τοπολογίες και προσομοιώσεις που έχουν να κάνουν με τη χρήση του OFDM στην καθημερινότητα. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί η ύπαρξη του OFDM στη βιομηχανία για διασυνδέσεις μεγάλης απόστασης. Παράλληλα το OFDM εμφανίζεται στις

τηλεπικοινωνίες και πιο συγκεκριμένα στο 5G που αναλύθηκε και αποδείχθηκε πως βοηθάει σημαντικά στις μεγάλες ταχύτητες που προσφέρονται πλέον στις τηλεπικοινωνίες με αποτέλεσμα να παρέχονται περισσότερα πλεονεκτήματα για τη διευκόλυνση των χρηστών. Επιπλέον αναλύονται ασύρματα δίκτυα άνω σε τσιπς ( WNoC ). Το σχήμα διαμόρφωσης OFDM προσφέρει υψηλή ταχύτητα δεδομένων, χαμηλή ενέργεια σε συχνότητες χιλιοστού ( mm ) για WNoC. Η αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο σχήμα σε σύστημα 64 πυρήνων δείχνει ότι μειώνει το χρόνο εκτέλεσης της εφαρμογής, την καθυστέρηση δικτύου και την ενέργεια που χρειάζεται. Τέλος, πραγματοποιείται ανάλυση οπτικού δικτύου για ζεύξη επικοινωνίας σε καμπίνες αεροπλάνων. Μετά τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αποδεικνύεται ότι το OFDM βοηθάει σημαντικά στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων του καναλιού και στην αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, ακόμα και στη δύσκολη περίπτωση της καμπίνας ενός αεροσκάφους, λόγω των παρεμβολών εξαιτίας των ραδιοσυχοτήτων.

Συνοψίζοντας λοιπόν, το OFDM είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο, απαραίτητο για τα σημερινά δεδομένα στα θέματα επικοινωνίας, γιατί έχει την ικανότητα να χρησιμοποιεί αποτελεσματικά τα πλεονεκτήματά του και ταυτόχρονα να είναι ενδεδειγμένο για εφαρμογές ευρυζωνικής επικοινωνίας



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Nick LaSorte, W. Justin Barnes, Hazem H. Refai. "The History of Orthogonal Frequency Division Multiplexing " 2008.
- [2] Kabir, Waziha. "Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)." 2008.
- [3] Patrick Marsch, Jyrki Penttinen. "Modulation and Demodulation." 2013.
- [4] Ming Jiang, Lajos Hanzo. "Multiuser MIMO-OFDM for Next-Generation Wireless Systems." 2007.
- [5] Stallings, William. Wireless Communications and Networks. 2011.
- [6] Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang. "Introduction to OFDM." 2010.
- [7] Yang Song, Songlin Sun, Xiaojun Jing, Hai Huang. "Orthogonality analysis and improvement of MSE-OFDM system." 2010.
- [8] Adrian Loch, Robin Klose, Matthias Hollick, Alexander Kuehne, Anja Klein. "Practical OFDMA in wireless networks with multiple transmitter-receiver pairs." 2013.
- [9] Hashim, Babar. "What is Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)?" 2022.
- [10] Rohling, Hermann. OFDM: Concepts for Future Communication Systems. 2011.
- [11] Ainhoa Cortés, Igone Velez, Juan Francisco Sevillano. "Fast Fourier Transform Processors: Implementing FFT and IFFT Cores for OFDM Communication Systems." 2012.
- [12] Yu-Wei Lin, Chen-Yi Lee. "Design of an FFT/IFFT Processor for MIMO OFDM Systems." 2007.
- [13] Seema Arora, Vinay Kumar Chandna, Mini S. Thomas. "Performance Analysis of 16-QAM using OFDM for Transmission of Data over Power Lines." 2012.
- [14] Gómez, Rios, Sharma, Dressler, García. "Wideband OFDM-Based Communications in Bus Topology as a Key Enabler for Industry 4.0 Networks." 2021.
- [15] Saurabh B. Ramteke, A.Y. Deshmukh, K. N. Dekate. "A Review on Design and Analysis of 5G Mobile Communication MIMO System with OFDM." 2018.
- [16] Sri Harsha Gade, Sakshi Garg, Sujay Deb. "OFDM Based High Data Rate, Fading Resilient Transceiver for Wireless Networks-on-Chip." 2017.
- [17] D. Marinos, C. Aidinis, N. Schmitt, J. Klaue, J. Schalk, T. Pistner, P. Kouros. "Wireless optical OFDM implementation for aircraft cabin communication links." 2010.
- [18] Jain, Kesharwani, Malviya, Khare, Shandilya, Haldar, Rai, Aggarwal. "Performance optimized digital QPSK modulator." 2017.

ΡΑΔΙΟΠΟΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ  
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ

[19] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, E. A. Varvarigos. "Elastic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM-Based Optical Networks." 2011.

[20] <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/EE799/OFDM.pdf>