



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας &
Τεχνολογίας Υλικών

**Σχεδιασμός και υλοποίηση αναλογικών κυματομορφών σε
πλατφόρμες προγραμματιζόμενων πυλών για ευέλικτα
οπτικά δίκτυα 5ης γενιάς**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΠΡΕΣΤΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Επιβλέπων : Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας &
Τεχνολογίας Υλικών

**Σχεδιασμός και υλοποίηση αναλογικών κυματομορφών σε
πλατφόρμες προγραμματιζόμενων πυλών για ευέλικτα
οπτικά δίκτυα 5ης γενιάς**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΠΡΕΣΤΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Επιβλέπων : Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17η Ιουλίου 2020.

.....
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δημήτριος Σούντρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020

.....
Μπρέστας Γεώργιος

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

Copyright © Μπρέστας Γεώργιος, 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Καθώς οι προκλήσεις για την επόμενη γενιά ασυρμάτων δικτύων είναι μεγάλες και τα πρότυπα διαμορφώνονται για να τεθούν τα θεμέλια των ασύρματων δικτύων 5G, υπάρχει κοινή συναίνεση σχετικά με την ανάγκη χρήσης της Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM) που εξυπηρετεί τις απαιτητικές ανάγκες του 5G. Το 5G χρησιμοποιεί το OFDM, μια τεχνική διαμόρφωσης κυματομορφής που χρησιμοποιείται επίσης από το LTE και το IEEE 802.11 (Wi-Fi). Η τεχνολογία αυτή παρέχει στο 5G βελτιωμένη ευελιξία για πολλές περιπτώσεις χρήσης, επιτρέποντάς της να υποστηρίξει διαφορετικές ζώνες φάσματος, συμπεριλαμβανομένων των ζωνών mmWave με πολύ υψηλότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης, μέσω της χρήσης εξειδικευμένων τεχνολογιών, όπως η κλιμάκωση του διαστήματος των υπο-φερόντων και τεράστιο MIMO, απολύτως απαραίτητο για τον μετριασμό των προκλήσεων διάδοσης στις επικοινωνίες στο mmWave. Η βασική αρχή της κυματομορφής του OFDM είναι η ψηφιακή μέθοδος διαμόρφωσης πολλαπλών φορέων, στην οποία ένας μεγάλος αριθμός ορθογώνιων σημάτων, υπό μικρή απόσταση μεταξύ αυτών των υπο-φερόντων, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων σε πολλές παράλληλες ροές ή κανάλια. Αυτό σημαίνει ότι οι πληροφορίες μεταδίδονται σε έναν αριθμό παράλληλων, στενών ζωνών αντί για μία απλή ευρεία ζώνη.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία μιας προσομοίωσης ενός τέτοιου OFDM πομπού. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση διαφόρων υπολογιστικών περιβαλλόντων, καθένα εκ των οποίων επιτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία στην αλυσίδα του πομπού. Τέλος παρουσιάζονται τα OFDM σύμβολα των παραδειγμάτων που έχουμε ορίσει τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας και αξιολογείται η αποτελεσματικότητα του πομπού.

Λέξεις κλειδιά

5G, CRAN, QAM, AIFoF, OFDM πομπός, Αντίστροφος Μετασχηματισμός Fourier, κυκλικό πρόθεμα, μπάνα ελέγχου, χρήση του FPGA

Abstract

As the challenges for the next generation of wireless networks are great and the standards are being laid to lay the foundations for 5G wireless networks, there is a common consensus on the need for the use of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) that serves the demanding needs of 5G. 5G uses OFDM, a waveforming technique also used by LTE and IEEE 802.11 (Wi-Fi). The technology gives 5G enhanced flexibility for a multitude of use cases, enabling it to support diverse spectrum bands, including mmWave bands with far higher available bandwidth, through the use of specialized technologies like scalable subcarrier spacing and massive MIMO, absolutely necessary for the forming to mitigate propagation challenges in mmWave communications. The waveform principle of OFDM is a digital multi-carrier modulation method, in which a large number of closely spaced orthogonal sub-carrier signals are used to carry data on several parallel streams or channels. This means that information is transmitted across a number of parallel, narrow bands instead of a single wide band. The goal of this diploma thesis is to create a simulation of such an OFDM transmitter. This is achieved by using various computer environments, each of which performs a specific function in the transmitter chain. Finally, the OFDM symbols of the examples that we have defined, both in the time and in the frequency domain are presented and the efficiency of the transmitter is evaluated.

Key words

5G, CRAN, QAM, AIFoF, OFDM transmitter, Inverse Fourier Transform , cyclic prefix, guardband, use of FPGA

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κύριο Ηρακλή Αβραμόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους διδακτορικούς ερευνητές Κωνσταντίνα Καντά, Παναγιώτη Τουμάση και Ιωάννη Στρατάκο για την καθοδήγηση που μου παρείχαν σε κάθε βήμα της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδελφή μου, για την απόλυτη στήριξή τους με οποιοδήποτε τρόπο, όλα αυτά τα χρόνια της φοιτητικής μου πορείας καθώς και τους φίλους μου οι οποίοι όλο αυτόν τον καιρό στάθηκαν δίπλα μου σε δύσκολες στιγμές ενώ χάρηκαν μαζί μου σε όμορφες.

Μπρέστας Γεώργιος,
Αθήνα, 17η Ιουλίου 2020

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος σχημάτων	13
Κατάλογος πινάκων	15
1. Εισαγωγή	17
1.1 Ασύρματα συστήματα 5ης γενιάς (5G)	17
1.1.1 Ιστορική αναδρομή - Προηγούμενες γενιές	18
1.1.2 Κυματομορφή, προδιαγραφές και δομή πλαισίου	19
1.1.3 Κωδικοποίηση, Πόροι, Φορείς και Εύρος Ζώνης	20
1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	21
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	23
2.1 Radio Access Network	23
2.1.1 C-RAN	24
2.2 Διαμόρφωση Φάσης/Πλάτους	26
2.2.1 Διαμόρφωση MPSK	27
2.2.2 Διαμόρφωση MQAM	28
2.3 Analog IF over Fiber	30
2.4 Εφαρμογές των FPGA στις 5G τοπολογίες	31
2.4.1 Σχεδιασμός βασικού συστήματος FPGA για C-RAN	32
2.4.2 Μετάδοση του σήματος στο οπτικό μέσο	33
2.4.3 Το Xilinx RFSoc σε CRAN αρχιτεκτονικές	33
3. Η μέθοδος διαμόρφωσης OFDM	37
3.1 Η αρχή λειτουργίας της διαμόρφωσης OFDM	37
3.1.1 Μονοδιαυλική Διαμόρφωση	37
3.1.2 Βασικές Αρχές του συστήματος μετάδοσης FDM	38
3.2 Ανάλυση της διαμόρφωσης OFDM	39
3.2.1 Η χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier στη Διαμόρφωση OFDM	41
3.2.2 Παραγωγή των φερουσών με τη χρήση του iFFT	42
3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διαμόρφωσης OFDM	43
3.3.1 Διασυμβολική παρεμβολή και παρεμβολή μεταξύ φορέων	44
3.3.2 Μετατόπιση συχνότητας του φορέα (CFO)	45
3.3.3 Υλοποίηση συστήματος OFDM	47
3.3.4 Εφαρμογές της παραπάνω τεχνολογίας	49

4. Πειραματική Αξιολόγηση	51
4.1 Περιγραφή Παραδειγμάτων OFDM Συμβόλων - Κώδικα C	51
4.1.1 Υλοποίηση Συστήματος Διαμόρφωσης 16 QAM	54
4.2 Υλοποίηση FFT ip core	55
4.3 Υλοποίηση DAC	56
4.4 Αποτελέσματα	57
5. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	61
5.1 Σύνοψη συμπερασμάτων προσομοίωσης	61
5.2 Μελλοντική Εργασία	61

Κατάλογος σχημάτων

1	Οι διαφορετικές γενιές που έχουν αναπτυχθεί	18
2	Απεικόνιση της δομής πλαισίου 5G NR και των βασικών ορολογιών	19
3	Μια γενική αρχιτεκτονική κυψελωτών δικτύων που βασίζονται στο C-RAN. . .	24
4	Ορθογώνιος διαμορφωτής φάσης/πλάτους	27
5	Κωδικοποίηση Gray για τη διαμόρφωση MPSK	28
6	Περιοχές απόφασης για τη διαμόρφωση MPSK	28
7	Κωδικοποίηση Gray για τις διαμορφώσεις 4QAM και 16QAM	30
8	Περιοχές απόφασης για τη διαμόρφωση 16QAM	30
9	Διάγραμμα ενός συστήματος AIFoF για καθοδική ζεύξη	31
10	Διαμερισμός εύρους ζώνης σε υποδιαύλους με «ορθογώνιες» κεντρικές συχνότητες	37
11	Μονοδιαυλική Διαμόρφωση [22]	38
12	Πολυδιαυλική Διαμόρφωση [22]	38
13	Πολυδιαυλικό σύστημα με επικάλυψη υποδιαύλων	40
14	Σχηματισμός κυκλικού προθέματος μήκους μ	42
15	Σχηματικό διάγραμμα ενός OFDM συστήματος. [23]	43
16	Εμφάνιση του φαινομένου της διασυμβολικής παρεμβολής και εξάλειψη του με την προσθήκη guardband [24].	45
17	Εμφάνιση του φαινομένου της παρεμβολής μεταξύ φορέων λόγω της μετατόπισης συχνότητας [24].	45
18	Απεικόνιση της μετατόπισης συχνότητας	46
19	Μετατόπιση συχνότητας (δf)	46
20	Ένας διαμορφωτής OFDM αθροίζει σήματα διαφορετικών συχνοτήτων	47
21	Αυτό το σήμα OFDM περιέχει τέσσερις φορείς που απέχουν μεταξύ τους με Δf που αντιστοιχεί στα f_0, f_1, f_2, f_3	47
22	Αναπαράσταση στο πεδίο της συχνότητας ενός σήματος OFDM τεσσάρων φορέων	48
23	Ένα πλήρες σύστημα OFDM περιλαμβάνει πομπό (αριστερά) και δέκτη (δεξιά)	48
24	Προβολή στο πεδίου χρόνου / συχνότητας ενός σήματος OFDM	49
25	Σχηματική περιγραφή του FFT ip core όπως χρησιμοποιείται στο Vivado	55
26	Αποτελέσματα προσομοίωσης (testbench) στο Xilinx Vivado	56
28	Αποτελέσματα της υλοποίησης του DAC στο MATLAB (για το κάθε παράδειγμα)	58
29	Constellation Map του κάθε παραδείγματος	59

Κατάλογος πινάκων

1	Προσδιορισμός των Χαρακτηριστικών των Παραδειγμάτων OFDM συμβόλων	52
2	Αναλυτική Περιγραφή των subcarrier του πρώτου παραδείγματος	53
3	Αναλυτική Περιγραφή των subcarrier του δεύτερου παραδείγματος	53
4	Αναλυτική Περιγραφή των subcarrier του τρίτου παραδείγματος	54
5	Αναλυτική Περιγραφή των subcarrier του τέταρτου παραδείγματος	54
6	Προσδιορισμός διαφόρων χαρακτηριστικών προσομοίωσης	58

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ασύρματα συστήματα 5ης γενιάς (5G)

Τα ασύρματα συστήματα 5ης γενιάς, με συντομογραφία 5G, είναι βελτιωμένες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων. Οι πρωτογενείς τεχνολογίες περιλαμβάνουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ζώνες χιλιοστομετρικών κυμάτων (26, 28, 38 και 60 GHz) που προσφέρουν απόδοση έως και 20 gigabits ανά δευτερόλεπτο.
- Το μαζικό MIMO προσφέρει απόδοση έως και δέκα φορές γρηγορότερο δίκτυο από τα 4G
- Τα συστήματα χιλιοστομετρικών κυμάτων έχουν σχεδιαστεί για λήψεις αιχμής 20 gigabit.
- Το εκτιμώμενο μέσο εύρος ζώνης τους είναι 3,5 gigabits.
- Το εκτιμώμενο διάμεσο εύρος ζώνης για τη ζώνη των 3,5 GHz-4,2 GHz με πρόσθετες κεραίες MIMO είναι 490 megabits.

Τα περισσότερα μεγάλα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δοκιμάζουν και τις τρεις προσεγγίσεις. Η Verizon και η AT&T ανακοίνωσαν τις εμπορικές αναπτύξεις σε ζώνες mmWave για το 2018. Η Softbank χρησιμοποίησε το Massive MIMO ήδη από το 2016. Η Sprint έχει αναπτύξει επίσης ασύρματα συστήματα 5ης γενιάς στα 2.5 GHz (midband) το 2018. Την ίδια χρονιά η T-Mobile ανακοίνωσε τη χαμηλή ζώνη 5G (600-700MHz) για 30 πόλεις. Η αρχική ανάπτυξη 5G της China Telecom θα αφορά την μεσαία ζώνη (2.5/3.5GHz).

Από το 2017, η ανάπτυξη του 5G βρίσκεται στο επίκεντρο πολλών εταιριών, όπως η Samsung, η Intel, η Qualcomm, η Nokia, η Huawei, η Ericsson, η ZTE και άλλες. Παρόλο που το 5G σχεδιάζεται να είναι εμπορικά διαθέσιμο σε όλο τον κόσμο μέχρι το 2020, η Νότια Κορέα παρείχε 5G δίκτυο στους χειμερινούς Ολυμπιακούς Αγώνες του 2018 για τους επισκέπτες της. Το 2018, η Verizon κυκλοφόρησε το 5G FWA (Fixed Wireless Access) σε 4 πόλεις στις Η.Π.Α., στο Sacramento, στο Los Angeles, στην Indianapolis και στο Houston. Οι κλάδοι που αναμένεται να επηρεαστούν από την ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G είναι οι λεγόμενες "κάθετες" αγορές (B2B Verticals) όπως η Αυτοκινητοβιομηχανία, οι Μεταφορές, η Βιομηχανία, τα Δίκτυα Υποδομών και η Υγεία. Η πρώτη πόλη στην Ελλάδα με δίκτυο 5G είναι τα Τρίκαλα από τις 16 Μαρτίου 2018 ενώ η επόμενη θα είναι η Πάτρα [1].

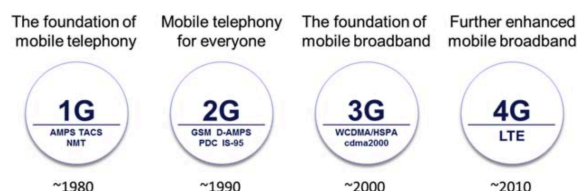
1.1.1 Ιστορική αναδρομή - Προηγούμενες γενιές

Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν αναπτυχθεί 4 γενιές κινητής επικοινωνίας (Σχήμα 1). Η πρώτη γενιά κινητής επικοινωνίας, που πρωτοεισήχθη γύρω στο 1980, βασίστηκε σε αναλογική μετάδοση με τις κύριες τεχνολογίες να είναι το AMPS (Advanced Mobile Phone System) που αναπτύχθηκε στη Βόρεια Αμερική, το NMT (Nordic Mobile Telephony) που χρησιμοποιήθηκε στις σκανδιναβικές χώρες και το TACS (Total Access Communication System) που χρησιμοποιείται, για παράδειγμα, στο Ηνωμένο Βασίλειο. Τα συστήματα κινητής επικοινωνίας που βασίζονται σε τεχνολογία πρώτης γενιάς περιορίστηκαν σε υπηρεσίες φωνής και, για πρώτη φορά, κατέστησαν την κινητή τηλεφωνία προσβάσιμη σε απλούς πολίτες.

Η δεύτερη γενιά κυκλοφόρησε εμπορικά στο πρότυπο GSM στη Φινλανδία από την Radiolinja το 1991. Τρία βασικά οφέλη των δικτύων 2G έναντι των προκατόχων τους ήταν ότι οι τηλεφωνικές συνομιλίες κρυπτογραφήθηκαν ψηφιακά, σημαντικά πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων που επιτρέπει περισσότερους χρήστες ανά ζώνη συχνοτήτων και υπηρεσίες δεδομένων για κινητά, ξεκινώντας με μηνύματα κειμένου SMS. Ακόμα και σήμερα υπάρχουν πολλά μέρη στον κόσμο όπου το GSM είναι η κυρίαρχη, και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και η μόνη διαθέσιμη τεχνολογία για την κινητή επικοινωνία, παρά την μετέπειτα εισαγωγή τεχνολογιών τρίτης και τέταρτης γενιάς.

Η τρίτη γενιά κινητών επικοινωνιών, που συχνά αναφέρεται ως 3G, παρουσιάστηκε στις αρχές του 2000. Με το 3G έγινε το πραγματικό βήμα για υψηλής ποιότητας κινητή ευρυζωνική σύνδεση, επιτρέποντας γρήγορη ασύρματη πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Επιπλέον, ενώ οι παλαιότερες τεχνολογίες κινητής επικοινωνίας είχαν σχεδιαστεί για λειτουργία σε ζεύγη φασμάτων (ξεχωριστό φάσμα για συνδέσεις ανοδικής και καθοδικής ζεύξης) με βάση το Frequency-Division Duplex (FDD), το 3G εισήγαγε την τεχνολογία TD-SCDMA, που βασιζόταν στο Time Division Duplex (TDD).

Η τέταρτη γενιά, στην οποία και βρισκόμαστε ακόμη, βασίστηκε στο LTE πρότυπο. Εμπορικά εμφανίστηκε στη Νορβηγία και την Σουηδία το 2009, και σταδιακά υιοθετήθηκε από τις περισσότερες χώρες του πλανήτη. Με την χρήση μετάδοσης με βάση το OFDM, που θα αναλυθεί σε επόμενα κεφάλαια, επιτεύχθηκε η χρήση μεγαλύτερου εύρους ζώνης και επιτράπηκε η χρήση προηγμένων πολλαπλών κεραιών. Σε αυτό το σημείο να τονιστεί πως το 4G υποστηρίζει τόσο TDD όσο και FDD (Frequency Division Duplex) λειτουργίες [2].



Σχήμα 1: Οι διαφορετικές γενιές που έχουν αναπτυχθεί

Οι συζητήσεις για την πέμπτη γενιά (5G) ξεκίνησαν γύρω στο 2012. Το 5G NR (New Radio) είναι μια νέα τεχνολογία ραδιοπρόσβασης (RAT) που αναπτύχθηκε από το 3GPP (Third Generation Partnership Project) για το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5G (πέμπτης γενιάς). Η σειρά προδιαγραφών 3GPP 38 παρέχει τις τεχνικές λεπτομέρειες πίσω από το NR.

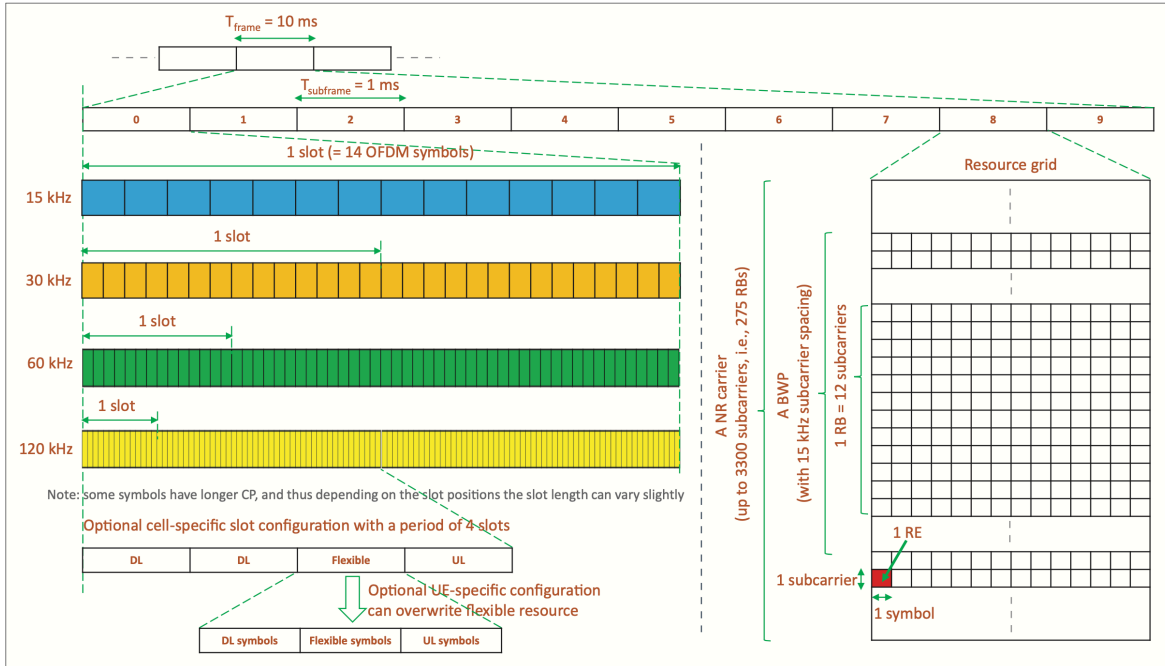
Η μελέτη του NR εντός του 3GPP ξεκίνησε το 2015 και η πρώτη έκθεση προδιαγραφών διατέθηκε μέχρι το τέλος του 2017. Ενώ η διαδικασία τυποποίησης της 3GPP ήταν σε εξέλιξη, η βιομηχανία είχε ήδη ξεκινήσει προσπάθειες για την υλοποίηση υποδομής συμβατή με το σχέδιο του προτύπου, με την προσδοκία ότι η πρώτη μεγάλης κλίμακας εμπορική έναρξη του 5G NR θα πραγματοποιούταν το 2019.

Ο οργανισμός Third Generation Partnership Project (3GPP) καλύπτει τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών, όπως ραδιοπρόσβαση και βασικά δίκτυα μεταφορών. Το 3GPP έχει παράσχει πλήρεις προδιαγραφές συστήματος για την αρχιτεκτονική του δικτύου 5G. Οι υπηρεσίες παρέχονται μέσω ενός κοινού πλαισίου για λειτουργίες δικτύου που επιτρέπεται να κάνουν χρήση αυτών των υπηρεσιών. Η

λειτουργικότητα, η επαναχρησιμοποίηση και η αυτονομία των λειτουργιών του δικτύου είναι επιπρόσθετα σχεδιαστικά ζητήματα για την αρχιτεκτονική του δικτύου 5G που περιγράφεται από τις προδιαγραφές αυτές [3].

1.1.2 Κυματομορφή, προδιαγραφές και δομή πλαισίου

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις έννοιες του σχεδιασμού 5G NR και οι βασικές ορολογίες, με μια απεικόνιση της δομής του πλαισίου που δίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Απεικόνιση της δομής πλαισίου 5G NR και των βασικών ορολογιών

Η επιλογή της κυματομορφής είναι η βασική απόφαση του φυσικού επιπέδου για οποιαδήποτε τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης. Μετά από αξιολογήσεις όλων των προτάσεων για την φύση της κυματομορφής, το 3GPP συμφώνησε να υιοθετήσει την ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) με κυκλικό πρόθεμα (CP) για τις μεταδόσεις καθοδικής και ανοδικής ζεύξης (DL και UL). Το CP-OFDM μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης και χαμηλό κόστος για λειτουργίες ευρείας ζώνης και τεχνολογίες πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO). Το NR υποστηρίζει επίσης τη χρήση διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) OFDM spread (DFT-S-OFDM) στην ανερχόμενη ζεύξη για τη βελτίωση της κάλυψης.

Το NR υποστηρίζει τη λειτουργία σε φάσμα το οποίο κυμαίνεται από ζώνες κυμάτων κάτω των 1 GHz έως χιλιοστόμετρου (mmWave). Γενικά, ορίζονται δύο περιοχές συχνοτήτων (FR):

- **FR1:** 450 MHz - 6 GHz, συνήθως αναφέρεται ως sub-6 GHz.
- **FR2:** 24,25 GHz - 52,6 GHz, που συνήθως αναφέρεται ως millimeter wave (mmWave).

Οι κλιμακούμενες αριθμολογίες είναι το κλειδί για την υποστήριξη της ανάπτυξης του NR σε ένα τόσο ευρύ φάσμα. Το NR υιοθετεί εύκαμπτο μεσοδιάστημα μεταξύ των υπο-φερόντων (που από εδώ και πέρα θα αναφέρεται ως subcarrier spacing) $2^\mu * 15 \text{ kHz}$ ($\mu = 0, 1, \dots, 4$) κλιμακούμενο από το βασικό subcarrier spacing ίσο με 15 kHz στο LTE. Αναλόγως, το κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix) μειώνεται με συντελεστή $2^{-\mu}$ από το αντίστοιχο κυκλικό πρόθεμα του LTE μήκους 4,7 μs .

Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει την υποστήριξη για ένα ευρύ φάσμα σεναρίων ανάπτυξης και συχνότητας φορέα. Σε χαμηλότερες συχνότητες, κάτω από 6 GHz, τα κελιά μπορεί να είναι μεγαλύτερα

και είναι πιο κατάλληλη η χρήση subcarrier spacing 15 kHz και 30 kHz. Σε υψηλότερες συχνότητες φορέα, ο θόρυβος φάσης γίνεται πιο έντονος και στο FR2, το NR υποστηρίζει subcarrier spacing 60 kHz και 120 kHz για κανάλια δεδομένων και 120 kHz και 240 kHz για τα μπλοκ SS / PBCH (SSB) που χρησιμοποιούνται για την αρχική πρόσβαση. Σε υψηλότερες συχνότητες, τα κελιά και η εξάπλωση καθυστέρησης είναι συνήθως μικρότερα και τα μήκη των κυκλικών προθεμάτων που παρέχονται από τις αριθμολογίες 60 και 120 kHz είναι επαρκή.

Ένα πλαίσιο (frame) έχει διάρκεια 10 ms και αποτελείται από 10 υποπλαίσια (subframes). Αυτό παραμένει ίδιο με την τεχνολογία LTE, διευκολύνοντας τη συνύπαρξη NR και LTE. Κάθε υποπλαίσιο αποτελείται από 2^μ θυρίδες (slots) με 14 OFDM σύμβολα το καθένα. Αν και η θυρίδα είναι μια τυπική μονάδα μετάδοσης, το NR επιτρέπει την εκκίνηση της μετάδοσης σε οποιοδήποτε OFDM σύμβολο και διαρκεί μόνο όσα σύμβολα χρειάζονται για την επικοινωνία. Αυτός ο τύπος “mini-slot” μετάδοσης μπορεί να εισάγει πολύ χαμηλό λανθάνοντα χρόνο για κρίσιμα δεδομένα καθώς και να ελαχιστοποιήσει τις παρεμβολές σε άλλους συνδέσμους.

1.1.3 Κωδικοποίηση, Πόροι, Φορείς και Εύρος Ζώνης

Ένα μπλοκ πόρων (RB) αποτελείται από 12 διαδοχικά OFDM σύμβολα πολυπλεγμένα στον τομέα της συχνότητας. Ένας φορέας NR περιορίζεται σε 3300 ενεργά subcarrier και σε εύρος ζώνης το πολύ 400 MHz. Το μέγιστο εύρος ζώνης στο FR1 είναι τα 100 MHz και το μέγιστο εύρος ζώνης στο FR2 είναι τα 400 MHz. Και τα δύο είναι πολύ μεγαλύτερα από το μέγιστο εύρος ζώνης στο LTE, μεγέθους 20 MHz. Παρά το μεγάλο εύρος ζώνης, η εξαιρετικά λιτή σχεδίαση στο NR οδηγεί σε υψηλότερη ενεργειακή απόδοση δικτύου και χαμηλότερες παρεμβολές.

Το 5G NR υποστηρίζει τη δυνατότητα να υπάρχει ένας NR φορέας και ένας LTE φορέας που αλληλεπικαλύπτονται μεταξύ τους στο πεδίο της συχνότητας, επιτρέποντας έτσι την δυναμική κατανομή του φάσματος μεταξύ NR και LTE. Αυτό διευκολύνει την ομαλή μετάβαση στο NR από το LTE.

Τέλος, τα σχήματα διαμόρφωσης στο NR είναι παρόμοια με αυτά του LTE, συμπεριλαμβανομένων των διαμορφώσεων B/QPSK και QAM της τάξης των 16, 64 και 256 με χαρτογράφηση κατά Gray [4].

1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Σήμερα, η 5η γενιά (5G) συστημάτων κινητής επικοινωνίας γίνεται όλο και πιο δημοφιλής λόγω του υψηλού ρυθμού δεδομένων, του μειωμένου λανθάνοντος χρόνου, της εξοικονόμησης ενέργειας, της μείωσης κόστους, της υψηλότερης χωρητικότητας συστήματος και της τεράστιας σύνδεσης συσκευών. Το New Radio (NR) και το Long Term Evolution (LTE) αποτελούν αναπόσπαστα μέρη της ραδιοπρόσβασης 5G, το LTE αναμένεται να λειτουργεί κάτω από τις συχνότητες των 6 GHz, ενώ το NR προβλέπεται να λειτουργεί από συχνότητες κάτω του 1 GHz έως 100 GHz. Ένα από τα καθοριστικά στοιχεία οποιουδήποτε συστήματος κινητής επικοινωνίας είναι η κυματομορφή που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN). Κατά τη διάρκεια της φάσης ανάπτυξης για την τεχνολογία 5G, διατυπώθηκε μια ποικιλία τεχνικών διαμορφώσεων, αλλά για το 5G New Radio, η διαμόρφωση OFDM με κυκλικό πρόθεμα (CP-OFDM) επιλέχθηκε ως ο κύριος υποψήφιος. Το OFDM παρέχει καλή φασματική απόδοση ενώ εγγυάται ανθεκτικότητα στην επιλεκτική εξασθένιση και επιτρέπει επίσης την πολλαπλή πρόσβαση.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση ενός τέτοιου πομπού βασισμένου στην διαμόρφωση OFDM. Η αλυσίδα του πομπού, που αναλύεται εκτενέστερα παρακάτω, προσομοιάζεται σε διάφορα υπολογιστικά περιβάλλοντα όπως το MATLAB, το Xilinx Vivado κ.α. Μέσα σ' αυτή επιτελούνται διάφορες λειτουργίες, όπως οι αντιστοίχιση των δυαδικών αριθμών στους κατάλληλους αστερισμούς σύμφωνα με την διαμόρφωση 16QAM, η εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier, η προσθήκη κατάλληλου κυκλικού προθέματος και γενικά επιτελείται η ψηφιακή επεξεργασία του σήματος (DSP). Τέλος, επισημαίνεται πως η διαμόρφωση των υπο-φερόντων του κάθε παραδείγματος είναι σύμφωνη με τα πρότυπα που έχουν προταθεί για το 5G NR.

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 5 κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται αναγκαίοι ορισμοί αλλά και έννοιες που θα χρειαστούν στην πορεία. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της διαμόρφωσης OFDM καθώς και η υλοποίηση ενός OFDM συστήματος. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και τέλος, στο Κεφάλαιο 5 αναλύονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής, καθώς και προτάσεις για την μελλοντική εξέλιξη της εργασίας αυτής.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναγκαίοι ορισμοί και μαθηματικές έννοιες για την καλύτερη κατανόηση της εργασίας αυτής.

Τα τελευταία χρόνια, ο κόσμος έχει δει μια τεράστια αύξηση στις συνδρομές για κινητές υπηρεσίες και μια αντίστοιχη έκρηξη στην διαβίβαση δεδομένων [5]. Μία από τις μελέτες διαπίστωσε ότι ο αριθμός των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας στον κόσμο μπορεί να φτάσει από 5,4 δισεκατομμύρια το 2017 στα 6,2 δισεκατομμύρια μέχρι το τέλος του 2023. Οι κινητήριοι παράγοντες πίσω από αυτήν την άνευ προηγουμένου αύξηση της παγκόσμιας αγοράς των κινητών συσκευών περιλαμβάνουν μια αυξανόμενη τάση αποδοχής της τεχνολογίας αυτής που οφείλεται στην εξέλιξη της τέταρτης γενιάς (4G-LTE), εισαγωγή προσιτών έξυπνων συσκευών με βελτιωμένες δυνατότητες (π.χ. smartphone και tablet) και ποικίλες φιλικές προς τον χρήστη εφαρμογές. Η εισαγωγή της πέμπτης γενιάς (5G) και η αύξηση των εφαρμογών εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας, θα κάνουν ακόμη πιο δημοφιλείς τις κινητές συσκευές.

Εκτός από την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, τα μελλοντικά δίκτυα 5G πρέπει επίσης να υποστηρίζουν τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών (δεκάδες χιλιάδες ανά μακροκύτταρο), υψηλό ρυθμό δεδομένων (~ δεκάδες Gbps), βελτιωμένη φασματική απόδοση (SE), βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση (EE), ισχυρή αξιοπιστία (99,999%), σχεδόν «οποτεδήποτε -οπουδήποτε» συνδεσιμότητα και εξαιρετικά χαμηλό λανθάνων χρόνο (~ 1 ms) για εφαρμογές δεδομένων, κρίσιμες ως προς την εφαρμογή και το χρόνο. Τα κυψελωτά δίκτυα με βάση το δίκτυο C-RAN έχουν όλες τις δυνατότητες για την ικανοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων [6].

2.1 Radio Access Network

Μία σημαντική οντότητα που θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε καλύτερα το δίκτυο 5G όπως επίσης και πως δουλεύει το network slicing είναι το RAN. Το Radio Access Network είναι ένα μέρος του συστήματος των κινητών επικοινωνιών, το οποίο χρησιμοποιεί RAT (Radio Access Technology) προκειμένου να συνδέσει μία συσκευή (UE) όπως για παράδειγμα ένα κινητό τηλέφωνο, έναν υπολογιστή κτλ. με το CN (Core Network) μέσω του backhaul link [7].

Παραδείγματα Radio Access Networks είναι:

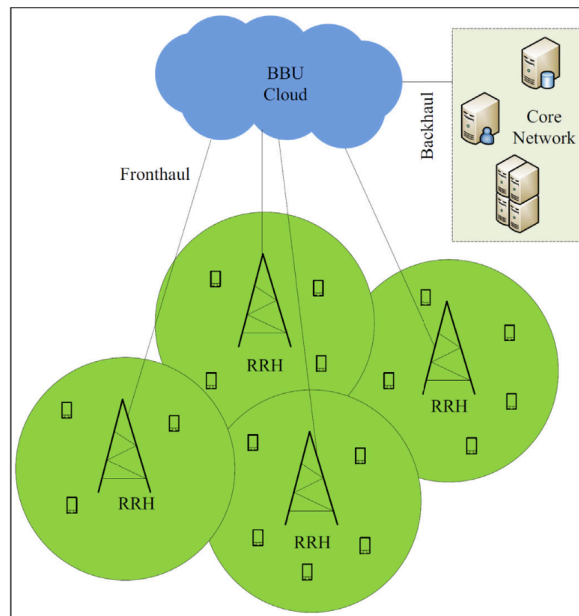
- **GRAN:** GSM (Global System for Mobile Communications) Radio Access Network.
- **GERAN:** παρόμοιο με το GRAN με επιπλέον υποστήριξη για EDGE packet radio υπηρεσίες.
- **UTRAN:** UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) Radio Access Network.

Στοιχεία του RAN είναι οι κεραίες και οι σταθμοί βάσης (base stations) που χρησιμοποιούνται για να παρέχουν την απαραίτητη κάλυψη για κάθε περιοχή ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες της. Γενικότερα το RAN έχει παίξει πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των δικτύων 3G και 4G καθώς και στην εξέλιξη τους. Επομένως οι ερευνητές θεωρούν πως θα είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στο 5G δίκτυο [7]. Λόγω της πρόκλησης που εισάγει το 5G όσο αφορά τις υψηλές απαιτήσεις σε πόρους και υπηρεσίες, το RAN στο 5G θα πρέπει να λαμβάνει υπόψην αυτά τα χαρακτηριστικά. Για να γίνουν

φυσικά όλα αυτά θα πρέπει το δίκτυο 5G να είναι προγραμματίσιμο προκειμένου να υπάρχει ευελιξία και ευκολία στην εύρεση αποδοτικών λύσεων.

2.1.1 C-RAN

Το C-RAN (Cloud-RAN / Centralized-RAN) , αναφέρεται σε μια αρχιτεκτονική κυψελωτού δικτύου όπου οι λειτουργίες βασικής ζώνης και υψηλότερου επιπέδου των BS (Base Stations) εκτελούνται στο σύννεφο (cloud) . Η αρχιτεκτονική C-RAN έχει τρία βασικά στοιχεία - μια οντότητα, αποκαλούμενη ως BBU pool/hotel, που αποτελείται από πολλές μονάδες επεξεργασίας βασικής ζώνης (BBU's) με κεντρικούς επεξεργαστές, απομακρυσμένες συσκευές επεξεργασίας ραδιοσυχνότητας (RRHs) με κεραίες και ένα δίκτυο fronthaul που συνδέει τα RRH με την BBU pool [8].



Σχήμα 3: Μια γενική αρχιτεκτονική κυψελωτών δικτύων που βασίζονται στο C-RAN.

Στο C-RAN , οι παραδοσιακοί σταθμοί βάσης (Base Stations) διαχωρίζονται σε δύο μέρη - στα RRH's και στα BBU's, τα οποία συγκεντρώνονται σε μια οντότητα (pool). Η οντότητα αυτή τοποθετείται σε μια κεντρική τοποθεσία (cloud) που περιέχει ένα σύνολο από BBU. Αυτό σημαίνει ότι οι πόροι διαφορετικών BBU μπορούν να μοιραστούν για να ικανοποιήσουν δυναμικά τη ζήτηση του χρήστη. Το σύννεφο ελέγχει τα RRH και είναι αναδιαμορφώσιμο, δηλαδή, ο αριθμός των BBU μπορεί να αλλάξει με το χρόνο. Στο cloud εκτελούνται διάφορες λειτουργίες, όπως η διαμόρφωση, η κωδικοποίηση και η επιλογή κατάλληλης συχνότητας ή καναλιού.

Από την άλλη πλευρά, οι RRH που είναι εξοπλισμένες με κεραίες μεταδίδουν ραδιοφωνικά σήματα από το BBU pool στους χρήστες στην καθοδική ζεύξη (downlink) και προωθούν τα σήματα βασικής ζώνης από τους χρήστες στο cloud για επεξεργασία (uplink). Οι κύριες λειτουργίες των RRH περιλαμβάνουν ενίσχυση ραδιοσυχνότητας (RF), φιλτράρισμα, ψηφιακή επεξεργασία, αναλογική σε ψηφιακή μετατροπή, ψηφιακή σε αναλογική μετατροπή και προσαρμογή της διεπαφής. Καθώς οι περισσότερες από τις λειτουργίες επεξεργασίας σήματος εκτελούνται στο cloud, οι RRH's έχουν ένα σχετικά απλό και οικονομικά αποδοτικό τρόπο υλοποίησης [9].

Όσο αφορά την υπάρχουσα τεχνολογία, τα RRH's αντιστοιχίζονται στατικά σε BBU's. Ένα BBU μπορεί να εξυπηρετήσει πολλά RRH. Τα RRH μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με τη λεγόμενη αλυσιδωτή σύνδεση. Ορίζεται μια διεπαφή, η οποία συνδέει RRH και BBU. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας CPRI [10] είναι το πρωτόκολλο ραδιοεπαφής που χρησιμοποιείται ευρέως για μετάδοση δεδομένων IQ μεταξύ RRH's και BBU's .Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο σταθερού ρυθμού μετάδοσης που απαιτεί ακριβή συγχρονισμό και αυστηρό έλεγχο της καθυστέρησης. Άλλα πρωτόκολλα που

μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι το Open Base Station Architecture Initiative (OBSAI) [11] και το Open Radio Equipment Interface (ORI) [8].

Το C-RAN έχει μερικά μεγάλα πλεονεκτήματα έναντι του υπάρχοντος, όπως:

- **Μειωμένες κεφαλαιακές και λειτουργικές δαπάνες (CAPEX/OPEX):** Η ανάπτυξη και η ανάθεση ενός macrocell BS (MBS) είναι δαπανηρή και χρονοβόρα. Αντίθετα, το C-RAN χαρακτηρίζεται από μικρότερο κόστος, χώρο και χρόνο για την ανάπτυξη, εγκατάσταση και λειτουργία των RRH's. Επιπλέον, το C-RAN μπορεί να καταστήσει δυνατή την αποτελεσματικότερη κοινή χρήση εξοπλισμού που οδηγεί σε μειωμένες κεφαλαιακές δαπάνες. Μια ποσοτική ανάλυση έδειξε ότι τα CRAN's έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν το CAPEX έως και 15% ανά χιλιόμετρο. Εκτός αυτού, οι υπολογιστικοί πόροι στο C-RAN συγκεντρώνονται σε λίγα μεγάλα νέφη αφήνοντας απλούστερες λειτουργίες στα RRH's, τα οποία μπορούν να εξοικονομήσουν μεγάλο μέρος των λειτουργικών δαπανών και του κόστους διαχείρισης.
- **Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση (EE):** Ο αριθμός των BBU που απαιτούνται σε ένα C-RAN είναι μικρότερος από ένα συμβατικό RAN που οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης ισχύος. Εκτός αυτού, ο κλιματισμός ραδιομονάδων σε C-RAN μπορεί να μειωθεί κατά περίπου 90% καθώς τα RRH's ψύχονται φυσικά από τον αέρα αφού βρίσκονται σε τοίχους κτιρίων. Επιπλέον, το C-RAN επιτρέπει να εκφορτώνονται οι υπολογιστικές διαδικασίες που καταναλώνουν ενέργεια σε ένα κοντινό σύννεφο. Μία μελέτη που διενήργησε η ZTE εκτιμά ότι το C-RAN μπορεί να επιτύχει εξοικονόμηση ενέργειας έως και 80% σε σύγκριση με το παραδοσιακό RAN.
- **Βελτιωμένη φασματική απόδοση (SE):** Το C-RAN μπορεί επίσης να βελτιώσει τη φασματική απόδοση του δικτύου. Για παράδειγμα, η εφαρμογή συντονισμένων και συνεργατικών στρατηγικών μετάδοσης/λήψης, όπως ο ενισχυμένος συντονισμός παρεμβολών μεταξύ των κυττάρων (eICIC) και η συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων (CoMP) μέσω των RRH's που συνδέονται με το ίδιο σύννεφο θα είναι πολύ απλούστερα και πιο αποτελεσματικά.
- **Μειωμένος χρόνος καθυστέρησης:** Το C-RAN έχει τη δυνατότητα να μειώσει τον χρόνο καθυστέρησης στην εκτέλεση διαφόρων λειτουργιών. Για παράδειγμα, ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση μεταβιβάσεων θα μειωθεί, καθώς μπορεί να γίνει μέσα σε ένα σύννεφο αντί μεταξύ των BS. Το ποσοστό αποτυχίας στην παράδοση μπορεί επίσης να μειωθεί.
- **Διευκόλυνση της εναλλαγής μεταξύ των BBU:** Το C-RAN χαλαρώνει τον περιορισμό της συνεχούς λειτουργίας του κάθε BS. Καθώς όλες οι λειτουργίες επεξεργασίας τελούνται στο cloud, η κατανάλωση ισχύος και η συμφόρηση δεδομένων μπορούν να μειωθούν με τη δυναμική κατανομή των διαφόρων ψηφιακών λειτουργιών στο BBU pool. Έτσι, πολλά BBU μπορούν να μεταβούν σε κατάσταση αδράνειας χαμηλής ισχύος ή ακόμη και να κλείσουν για εξοικονόμηση ενέργειας.
- **Ευκολία συντήρησης και επέκτασης:** Η κεντρική αρχιτεκτονική του C-RAN το καθιστά εύκολα επεκτάσιμο και έτσι απλοποιεί την αναβάθμιση και συντήρηση του δικτύου. Για παράδειγμα, ένας διαχειριστής δικτύου χρειάζεται μόνο να προσθέσει νέα RRH που συνδέονται με το cloud για κάλυψη περισσότερων περιοχών εξυπηρέτησης ή διαίρεση του κελιού για μεγαλύτερη χωρητικότητα. Το C-RAN διευκολύνει επίσης την κατ' απαίτηση εγκατάσταση εικονικών πόρων στο cloud. Εκτός αυτού, παρέχει έναν ομαλό τρόπο εισαγωγής νέων προτύπων, καθώς το υλικό πρέπει να τοποθετηθεί σε λίγες κεντρικές τοποθεσίες. Επιπλέον, η συγκέντρωση των BBU's στο cloud επιτρέπει την εύκολη και συχνότερη ενημέρωση της CPU απ' ότι στα παραδοσιακά συστήματα.

Το C-RAN έχει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν από την εφαρμογή του. Για παράδειγμα, η αδυναμία ασφάλειας του είναι ένα από τα μεγάλα του προβλήματα, το οποίο έχει προκαλέσει ιδιαίτερη ανησυχία. Σε ένα ασύρματο δίκτυο, λόγω της ανοιχτής

φύσης του, ένας χρήστης είτε εξουσιοδοτημένος είτε μη, μπορεί να έχει πρόσβαση σε αυτό. Επιπλέον, καθώς τα BBU πολλών BS συσσωρεύονται στο cloud, το C-RAN έχει τον τεράστιο κίνδυνο ολικής αποτυχίας ενός σημείου, δηλαδή, εάν το cloud αποτύχει, ολόκληρο το δίκτυο θα είναι εκτός λειτουργίας.

Ακόμα, η αρχιτεκτονική αυτή φέρνει μια τεράστια επιβάρυνση στις οπτικές συνδέσεις μεταξύ RRH's και cloud, οι οποίες απαιτούν ταχύτητες έως και 50 φορές μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις υπάρχουσες απαιτήσεις.

2.2 Διαμόρφωση Φάσης/Πλάτους

Άλλη μία σημαντική έννοια που θα αναλυθεί παρακάτω είναι αυτή της διαμόρφωσης. Στις τηλεπικοινωνίες διαμόρφωση ονομάζεται η διαδικασία μεταβολής ενός περιοδικού σήματος, συνήθως υψίσυχνου, με στόχο την κωδικοποίηση σε αυτό ενός σήματος χαμηλής συχνότητας το οποίο μεταφέρει κωδικοποιημένη πληροφορία. Το υψίσυχνο σήμα τότε καλείται φέρον και συνήθως είναι σήμα μονής συχνότητας (π.χ. μία ημιτονοειδής κυματομορφή). Η διαμόρφωση απαιτείται για να μπορέσει να διέλθει ένα σήμα από κάποιο τηλεπικοινωνιακό κανάλι (ένα καλώδιο, στις ενσύρματες επικοινωνίες, ή ο ελεύθερος χώρος, στις ασύρματες επικοινωνίες) το φάσμα του οποίου δεν επικαλύπτεται με άλλα σήματα στο ίδιο μέσο.

Στις ψηφιακές διαμορφώσεις το σήμα πληροφορίας που διαμορφώνεται είναι σε ψηφιακή μορφή. Οι κυριότερες μέθοδοι των ψηφιακών διαμορφώσεων είναι, μεταξύ άλλων, η διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (MPSK) και η διαμόρφωση MQAM (multiple QAM) που θα αναλυθούν παρακάτω [12] και θα χρησιμοποιηθούν για την διαμόρφωση των υπο-φερόντων του OFDM πομπού.

Κατά τη διαμόρφωση φάσης/πλάτους η ροή ψηφίων πληροφορίας μεταδίδεται μέσω του πλάτους ή/και της φάσης του διαμορφωμένου σήματος. Συγκεκριμένα για διάστημα ίσο προς τη διάρκεια συμβόλου T_s ένα σύμβολο που αποτελείται από $K = \log_2 M$ ψηφία κωδικοποιείται (αντιστοιχίζεται) στο πλάτος ή/και τη φάση του σήματος εκπομπής $s(t)$, $0 \leq t \leq T_s$.

Το σήμα $s(t) = s_I(t)\cos(2\pi f_c t + \psi_0) - s_Q(t)\sin(2\pi f_c t + \psi_0)$ που εκπέμπεται κατά τη συγκεκριμένη χρονική διάρκεια γράφεται σύμφωνα με τη μέθοδο παράστασης των σημάτων στο χώρο ως $s(t) = s_{i1}\phi_1(t) + s_{i2}\phi_2(t)$. Οι συναρτήσεις βάσης είναι $\phi_1(t) = g(t)\cos(2\pi f_c t + \psi_0)$ και $\phi_2(t) = -g(t)\sin(2\pi f_c t + \psi_0)$ όπου $g(t)$ ο παλμός μορφοποίησης. Η συμφασική και η ορθογώνια συνιστώσα του διαμορφωμένου σήματος $s(t)$ είναι σήματα βασικής ζώνης, τα φασματικά χαρακτηριστικά των οποίων καθορίζονται από τη μορφή του παλμού μορφοποίησης $g(t)$.

Συγκεκριμένα, το εύρος ζώνης B_u της συμφασικής και της ορθογώνιας συνιστώσας είναι ίσο με το εύρος ζώνης τον παλμού μορφοποίησης $g(t)$, ενώ το σήμα εκπομπής $s(t)$ είναι ζωνοπερατό σήμα με κεντρική συχνότητα f_c και εύρος ζώνης $B = 2B_u$. Στην πράξη, $B_u = \frac{K_g}{T_s}$, όπου K_g παράμετρος που εξαρτάται από τη μορφή του παλμού με $0.5 < K_g < 2$.

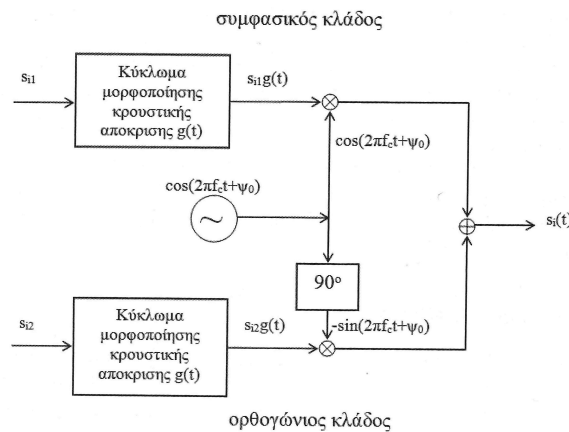
Κατά τη διαμόρφωση φάσης/πλάτους ο αστερισμός του σήματος ορίζεται από τα σημεία $(s_{i1}, s_{i2}) \in \mathbb{R}^2$, $i = 1, \dots, M$. Κάθε σημείο $s_i = (s_{i1}, s_{i2})$ του αστερισμού αντιπροσωπεύει σύμβολο που αποτελείται από $\log_2 M$ ψηφία. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι $R = \frac{\log_2 M}{T_s}$ ψηφία ανά δευτερόλεπτο (bps), αφού κατά τη διάρκεια μετάδοσης ενός συμβόλου μεταδίδονται $K = \log_2 M$ ψηφία.

Οι κύριες κατηγορίες διαμόρφωσης φάσης/πλάτους είναι:

- **Διαμόρφωση MPAM (multiple PAM):** η πληροφορία κωδικοποιείται μόνο κατά το πλάτος του σήματος. Τα σημεία του αστερισμού σχηματίζουν ευθεία.
- **Διαμόρφωση MPSK (multiple PSK):** η πληροφορία κωδικοποιείται μόνο κατά τη φάση του σήματος. Τα σημεία του αστερισμού σχηματίζουν κύκλο.
- **Διαμόρφωση MQAM (multiple QAM):** η πληροφορία κωδικοποιείται κατά το πλάτος και τη φάση του σήματος. Τα σημεία του αστερισμού σχηματίζουν ορθογώνιο πλέγμα.

- **Διαμόρφωση MAPSK (multiple APSK):** η πληροφορία κωδικοποιείται κατά το πλάτος και τη φάση του σήματος. Τα σημεία του αστερισμού σχηματίζουν ομόκεντρους κύκλους.

Η διαμόρφωση φάσης/πλάτους μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση του διαμορφωτή του παρακάτω σχήματος. Σημειώνεται ότι οι συναρτήσεις βάσης στο συγκεκριμένο σχήμα έχουν τυχαία αρχική φάση ψ_0 που οφείλεται στην τυχαία έναρξη λειτουργίας του ταλαντωτή του διαμορφωτή. Συνήθως, ο δέκτης περιλαμβάνει και πρόσθετα κυκλώματα για την ανάκτηση της φάσης του φέροντος, δηλαδή για την ελαχιστοποίηση της απόκλισης της φάσης ϕ του σήματος λήψης από τη φάση του διαμορφωμένου σήματος ψ_0 στον πομπό. Η διαδικασία αποδιαμόρφωσης αυτή είναι γνωστή ως σύμφωνη αποδιαμόρφωση (coherent detection). Όταν $\phi \neq \psi_0$, στο συμφασικό κλάδο εμφανίζονται ανεπιθύμητοι όροι που οφείλονται στον ορθογώνιο κλάδο και αντιστρόφως. Επίσης, θεωρείται ότι η δειγματοληψία που πραγματοποιείται στο δέκτη είναι συγχρονισμένη με τη διάρκεια συμβόλου, δηλαδή πραγματοποιείται ανά T_s . Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως συγχρονισμός (synchronization). Η επίτευξη συγχρονισμού στην πράξη είναι κρίσιμη για την καλή λειτουργία του δέκτη και απαιτεί τη χρήση πολύπλοκων κυκλωμάτων.



Σχήμα 4: Ορθογώνιος διαμορφωτής φάσης/πλάτους

2.2.1 Διαμόρφωση MPSK

Κατά τη διαμόρφωση MPSK η πληροφορία αντιστοιχίζεται στις μεταβολές της φάσης του σήματος εκπομπής σύμφωνα με τη σχέση:

$$s_i(t) = Ag(t) \cos[2\pi f_c t + \psi_0 + (i - 1) \frac{2\pi}{M}] = Ag(t) \cos[(i - 1) \frac{2\pi}{M}] \cos[2\pi f_c t + \psi_0] - Ag(t) \sin[(i - 1) \frac{2\pi}{M}] \sin[2\pi f_c t + \psi_0]$$

Η παραπάνω έκφραση αποτελεί τη ζωνοπερατή έκφραση ενός MPSK σήματος. Επομένως τα σημεία του αστερισμού (σύμβολα) είναι τα σημεία $s_i = (s_{i1}, s_{i2})$ όπου $s_{i1} = A \cos[(i - 1) \frac{2\pi}{M}]$ και $s_{i2} = A \sin[(i - 1) \frac{2\pi}{M}]$, $i = 1, \dots, M$. Οι δυνατές φάσεις των σημάτων που μεταφέρουν τα σύμβολα

πληροφορίας είναι $\theta_i = (i - 1) \frac{2\pi}{M}$, $i = 1, \dots, M = 2^k$. Υποθέτοντας ότι έχοντας λάβει υπόψη τον παλμό μορφοποίησης $g(t)$ ισχύει η συνθήκη ορθοκανονικότητας, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σημείων του αστερισμού είναι $d_{min} = 2A \sin(\frac{2\pi}{M})$ όπου η παράμετρος A εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής που είναι κοινή για όλα τα σημεία του αστερισμού. Σημειώνεται ότι η 2PSK αναφέρεται και ως δυαδική PSK ή BPSK, ενώ η 4PSK και ως QPSK.

Λαμβάνοντας υπόψη την ορθοκανονικότητα που οφείλουν να ικανοποιούν τα σήματα πολυσταθμικής διαμόρφωσης όταν χρησιμοποιούνται παλμοί μορφοποίησης, όλες οι εκδοχές του σήματος εκπομπής $s_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, M$, διαθέτουν την ίδια ενέργεια συμβόλου.

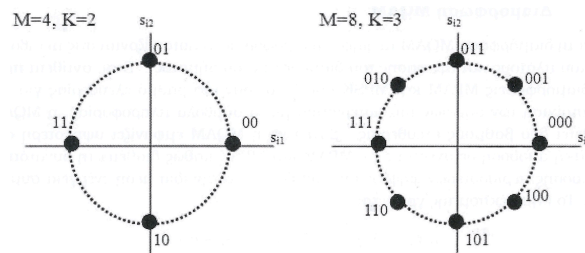
$$E_{s_i} = \int_0^{T_s} s_i^2(t) dt = A^2$$

Όταν ο παλμός μορφοποίησης είναι παλμός NRZ μοναδιαίας ισχύος, το σήμα MPSK διαθέτει σταθερή περιβάλλουσα. Από την άλλη πλευρά, αν αντί παλμών NRZ που οδηγούν σε χαμηλή φασματική απόδοση επιλεγούν άλλου τύπου παλμοί μορφοποίησης, η διαμόρφωση MPSK δεν διαθέτει την ιδιότητα της σταθερής περιβάλλουσας. Η αντιστοίχιση των συμβόλων με τα σημεία του αστερισμού πραγματοποιείται με κωδικοποίηση Gray, οπότε αμέσως γειτονικά σημεία του αστερισμού διαφέρουν μόνο κατά ένα ψηφίο.

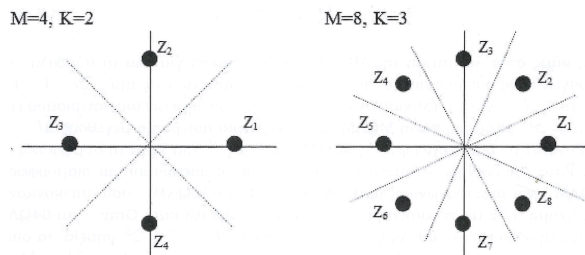
Οι περιοχές απόφασης $Z_i, i = 1, \dots, M$, της MPSK απεικονίζονται για $M = 4$ και $M = 8$ στο Σχήμα 6. Η γενική έκφραση των περιοχών Z σε πολικές συντεταγμένες είναι:

$$Z_i = (i - 1.5) \frac{2\pi}{M} \leq \theta < (i - 0.5) \frac{2\pi}{M}$$

Από τη παραπάνω ζωνοπερατή έκφραση προκύπτει ότι η διαμόρφωση MPSK διαθέτει συμφασική και ορθογώνια συνιστώσα. Συνεπώς, για την αποδιαμόρφωση της μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ορθογώνιος αποδιαμορφωτής που συζητήθηκε παραπάνω. Στην ειδική περίπτωση της BPSK, οι περιοχές απόφασης απλοποιούνται στις περιοχές $Z_1 = (r : r > 0)$ και $Z_2 = (r : r < 0)$. Επίσης, η BPSK περιγράφεται με μια μόνο συνάρτηση βάσης $\phi_1(t) = g(t) \cos(2\pi f_c t)$, δηλαδή διαθέτει μόνο τη συμφασική συνιστώσα, και αφού μεταδίδεται ένα ψηφίο κατά τη διάρκεια εκπομπής συμβόλου, ισχύει $T_b = T_s$. Αντίστοιχα, η αποδιαμόρφωση της BPSK μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα μόνο κλάδο, στον οποίο το κύκλωμα απόφασης απλώς ελέγχει αν το σημείο λήψης ανήκει στο θετικό ή τον αρνητικό ημιάξονα [13].



Σχήμα 5: Κωδικοποίηση Gray για τη διαμόρφωση MPSK



Σχήμα 6: Περιοχές απόφασης για τη διαμόρφωση MPSK

2.2.2 Διαμόρφωση MQAM

Κατά τη διαμόρφωση MQAM τα ψηφία πληροφορίας αντιστοιχίζονται στις μεταβολές και του πλάτους και της φάσης του διαμορφωμένου σήματος. Έτσι, αντίθετα προς τις διαμορφώσεις MPAM και MPSK που διαθέτουν ένα βαθμό ελευθερίας για την αντιστοίχιση των σημείων του αστερισμού με τα σύμβολα πληροφορίας, η MQAM διαθέτει δύο βαθμούς ελευθερίας. Συνεπώς, η MQAM εμφανίζει

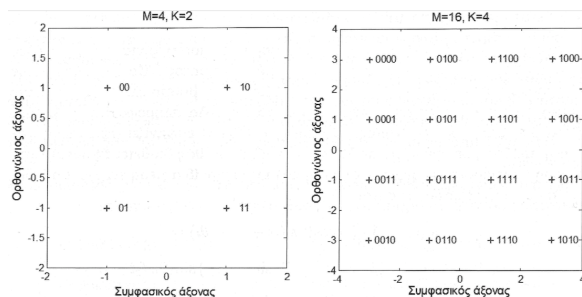
υψηλότερη φασματική απόδοση σε σχέση με τις MPAM και MPSK καθώς διαθέτει τη δυνατότητα μετάδοσης περισσότερων ψηφίων ανά σύμβολο υπό την ίδια μέση ενέργεια συμβόλου. Το σήμα εκπομπής γράφεται:

$$\begin{aligned} s_i(t) &= A_i g(t) \cos(2\pi f_c t + \psi_0 + \theta_i) = \\ &= A_i \cos(\theta_i) g(t) \cos(2\pi f_c t + \psi_0) - A_i \sin(\theta_i) g(t) \sin(2\pi f_c t + \psi_0) = \\ &= \operatorname{Re}\{A_i \exp[j\theta_i] g(t) \exp[j(2\pi f_c t + \psi_0)]\}, 0 \leq t < T_s \end{aligned}$$

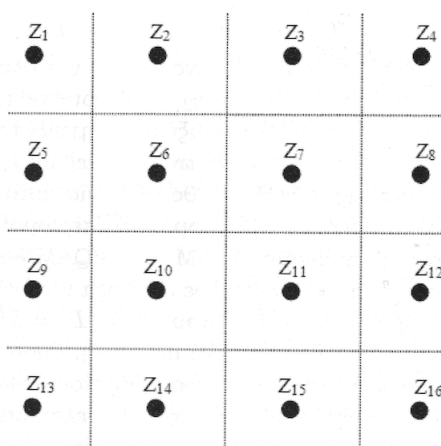
Η ενέργεια συμβόλου είναι:

$$E_{s_i} = \int_0^{T_s} s_i^2(t) dt = A_i^2$$

και, όπως στην περίπτωση της MPAM, δεν είναι κοινή για όλα τα σύμβολα. Για τετραγωνικούς αστερισμούς, όπου τα s_{i1} και s_{i2} λαμβάνουν τις τιμές $(2i - 1 - L)d$, $i = 1, \dots, L = \sqrt{M}$, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σημείων του αστερισμού είναι $d_{min} = 2d$. Η διαμόρφωση MQAM με τετραγωνικό αστερισμό μεγέθους $M = L^2$ ισοδυναμεί με δύο διαμορφώσεις MPAM μεγέθους L , μία κατά τη συμφασική και μία κατά την ορθογώνια συνιστώσα. Καθιερωμένοι αστερισμοί για διαμορφώσεις MQAM είναι οι τετραγωνικοί αστερισμοί 4QAM και 16QAM - που απεικονίζονται στο Σχήμα 7 με αντιστοίχιση των ψηφίων σε σύμβολα κατά Gray - και 64QAM. Οι τετραγωνικοί αυτοί αστερισμοί περιλαμβάνουν $M = L^2 = 2^{2l}$ σημεία, τα οποία μεταφέρουν $2l$ ψηφία/σύμβολο ή l ψηφία ανά διάσταση, όπου $l = 0.5 \log_2 M$. Σε τετραγωνικούς αστερισμούς για την αποστολή ενός επιπλέον ψηφίου ανά διάσταση (ή 2 ψηφίων/σύμβολο) διατηρώντας, ταυτόχρονα, την ίδια ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σημείων του αστερισμού απαιτείται κατά 6 dB υψηλότερη ισχύς εκπομπής. Οι περιοχές απόφασης για την 16QAM απεικονίζονται στο Σχήμα 8 [14].



Σχήμα 7: Κωδικοποίηση Gray για τις διαμορφώσεις 4QAM και 16QAM



Σχήμα 8: Περιοχές απόφασης για τη διαμόρφωση 16QAM

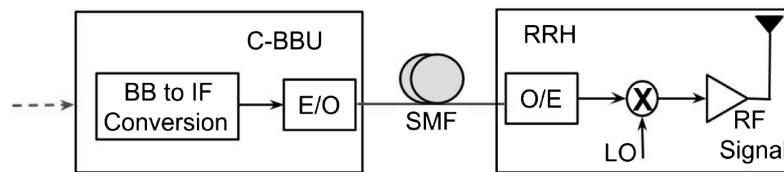
2.3 Analog IF over Fiber

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην αρχιτεκτονική C-RAN, οι λειτουργίες του σταθμού βάσης χωρίζονται μεταξύ της μονάδας επεξεργασίας βασικής ζώνης (BBU) και των απομακρυσμένων συσκευών επεξεργασίας ραδιοσυχνότητας (RRH). Η μονάδα BBU pool εκτελεί την επεξεργασία βασικής ζώνης των πολλαπλών BBU σε μια κοινή θέση, ενώ οι απλούστερες μονάδες RRH εκτελούν τις απλές διεργασίες που αναλύθηκαν με μειωμένη κατανάλωση ενέργειας στη θέση της κεραίας. Αυτό απαιτεί τη σύνδεση των μονάδων BBU και RRH μέσω δικτύου υψηλής ταχύτητας, χαμηλής καθυστέρησης και συγχρονισμού, που αναφέρεται ως fronthaul. Αυτές οι απαιτήσεις καθιστούν τις οπτικές ίνες μια προφανή επιλογή για τη σύνδεση των BBU και RRH. Τα σήματα μπορούν να μεταδοθούν μέσω του δικτύου fronthaul στο αναλογικό ή ψηφιακό πεδίο στη βασική ζώνη ή ζώνη διέλευσης σε σχέση με έναν οπτικό φορέα.

Το ψηφιοποιημένο σήμα βασικής ζώνης μέσω οπτικής ίνας (DBBoF) βασισμένο σε σήμα CPRI απαιτεί ρυθμό οπτικής γραμμής 32 Gb/s για την εξυπηρέτηση μιας κεραίας 8×8 MIMO για ασύρματο κανάλι εύρους ζώνης 20 MHz. Η αρχιτεκτονική αυτή γίνεται ακόμη πιο αναποτελεσματική και πολύπλοκη όταν αφορά την παροχή πολλαπλών υπηρεσιών μέσω της ίδιας ίνας. Τα Analog-domain radio frequency over fiber σήματα (ARFoF) αυξάνουν την απόδοση του εύρους ζώνης και μειώνουν τον χρόνο καθυστέρησης αποφεύγοντας τη χρήση ακριβών μετατροπέων A/D και D/A στο RRH για τη διαδικασία ψηφιοποίησης, όπως απαιτείται από το CPRI. Το παραδοσιακό ARFoF, ωστόσο, απαιτεί οπτικά στοιχεία που λειτουργούν σε εύρος ζώνης τουλάχιστον των συχνοτήτων του φορέα.

Η μετάδοση ραδιοσημάτων αναλογικού πεδίου σε ενδιάμεσες συχνότητες (IF) μέσω οπτικών ινών (AIFoF) παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία και χρησιμοποιεί οπτικά στοιχεία χαμηλότερου εύρους ζώνης που απαιτείται για τη μετάδοση σήματος 5G. Ένα σχήμα μιας διάταξης AIFoF για ένα σενάριο καθο-

δικής ζεύξης (downlink) εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου το σήμα βασικής ζώνης (baseband signal) μετατρέπεται στις συχνότητες IF στο BBU πριν από τη μετάδοση μέσω οπτικών ινών, το οποίο μετατρέπεται περαιτέρω στο επιθυμητό σήμα RF στο RRH [15].



Σχήμα 9: Διάγραμμα ενός συστήματος AIFoF για καθοδική ζεύξη

Η διαμόρφωση OFDM έχει υιοθετηθεί στην πλειονότητα των ασύρματων προτύπων, όπως η τεχνολογία 4G LTE και η τεχνολογία ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN), λόγω των πλεονεκτημάτων σε περιβάλλοντα με διαλείψεις.

Το Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) είναι μια αποτελεσματική μορφή διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται σε σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των 5G. Το OFDM συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του Quadrature Amplitude Modulation (QAM) και του Frequency Division Multiplexing (FDM) για να παράγει ένα σύστημα επικοινωνίας υψηλού ρυθμού δεδομένων. Το QAM αναφέρεται σε μια ποικιλία ειδικών τύπων διαμόρφωσης: BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16QAM (16-state QAM), 64QAM (64-state QAM) κ.λ.π.

2.4 Εφαρμογές των FPGA στις 5G τοπολογίες

Κατά την αρχική κατασκευή των υποδομών για 5G αλλά και κατά την ετήσια συντήρηση, οι λειτουργικές δαπάνες (OPEX) πρέπει να μειωθούν έτσι ώστε οι υπηρεσίες να μπορούν να παρέχονται με μειωμένους συντελεστές. Δεδομένου ότι η αύξηση των χρηστών θα αυξήσει σημαντικά τον αριθμό των σταθμών βάσης, αυτό θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και θα επιβαρύνει περισσότερο το λειτουργικό κόστος. Έτσι, οι τηλεπικοινωνιακοί φορείς εστιάζουν στην ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους και στη βελτίωση της αποδοτικότητας του υλικού και της μετάδοσης. Επίσης, το ζήτημα της ανισορροπίας φόρτου σε διαφορετικές περιοχές και χρονικές στιγμές οδηγεί στην ανεπαρκή χρήση των πόρων του δικτύου.

Η ευελιξία των FPGA μας επιτρέπει να προγραμματίζουμε διάφορες εφαρμογές σε διαφορετικές περιπτώσεις. Η ικανότητα του FPGA να επαναδιαμορφώνεται δυναμικά μας επιτρέπει να αλλάζουμε τη χωρητικότητα της μετάδοσης δεδομένων μαζί με την εναλλαγή μεταξύ υπηρεσιών σύμφωνα με την απαίτηση ανά πάσα στιγμή. Όλες αυτές οι ικανότητες του FPGA ωθούν τους κορυφαίους κατασκευαστές FPGA να επενδύσουν περισσότερο για να κάνουν το προϊόν τους ικανό να αντιμετωπίζει τις αναπτυσσόμενες τεχνολογίες επικοινωνίας. Καθώς τα FPGA αποδίδουν αρκετά καλά στην επεξεργασία σήματος, παρέχοντας γρηγορότερα αποτελέσματα στην έξοδο του συστήματος και υψηλότερη απόδοση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το φιλτράρισμα του σήματος στις τηλεπικοινωνίες.

Η Xilinx παρέχει υποστήριξη για την επίλυση των προκλήσεων απόδοσης, χωρητικότητας και συνδεσιμότητας. Παρέχει FPGA που έχουν ενσωματωμένα μεταξύ άλλων και τη δυνατότητα προγραμματισμού του λογισμικού, πολλαπλών ζωνών και προδιαγραφών βελτιστοποίηση υλικού, καθώς και ασφάλεια σε επιπέδου υλικού. Η Xilinx έχει αναπτύξει Zynq MPSoC, RFSoc, Ultrascale + FPGA και πλατφόρμες λογισμικού, όπως το Vivado High-level synthesis, SDSoc και SDAccel για τους πελάτες για να δημιουργήσουν τις εφαρμογές τους [16]. Ομοίως, η Intel έχει σχεδιάσει επιταχυντές βασισμένους σε FPGA για το χειρισμό μετάδοσης δεδομένων υψηλής ταχύτητας και μεγαλύτερου

εύρους. Υπάρχουν διάφορα δομικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής 5G που μπορούν να σχεδιαστούν με τη βοήθεια FPGA.

2.4.1 Σχεδιασμός βασικού συστήματος FPGA για C-RAN

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, το δίκτυο CRAN έχει σχεδιαστεί για να επικοινωνεί μεταξύ των σταθμών βάσης και των τελικών χρηστών. Το C-RAN (Cloud Radio Access Network) είναι μια νέα αρχιτεκτονική που προορίζεται για κεντρική και βασισμένη σε cloud επεξεργασία, όπου τα BBU's μεταφέρονται σε μια κεντρική μονάδα που ονομάζεται BBU pool. Αυτές οι μονάδες BBU pool συνδέονται με τους σταθμούς δικτύου μέσω υψηλής ταχύτητας οπτική ίνα. Η αρχιτεκτονική C-RAN μπορεί να γίνει αντιληπτή ως περιβάλλον υπολογιστικού νέφους όπου η επεξεργασία της βασικής ζώνης και του καναλιού εικονοποιείται και μοιράζεται μεταξύ των χειριστών στην BBU pool, γεγονός που οδηγεί σε καλύτερο χειρισμό κυκλοφορίας και μέγιστη αξιοποίηση πόρων. Υπάρχουν διάφορες προκλήσεις στην

ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής C-RAN, μερικές από αυτές με πιθανές λύσεις παρατίθενται παρακάτω:

- **Συνεργασία μεταξύ των BBU's:** Τα BBU που βρίσκονται ομαδοποιημένα στην ίδια οντότητα (pool) θα πρέπει να συνεργάζονται μεταξύ τους για να διαμοιράζουν τα δεδομένα και να τα προγραμματίζουν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χρήστη. Ωστόσο, αυτή η συνεργασία δεν είναι καθορισμένη και αυτό δημιουργεί προκλήσεις για τη διασφάλιση χαμηλού λανθάνοντος χρόνου, υψηλής ταχύτητας επικοινωνίας μεταξύ των BBU και επηρεάζει επίσης το απόρρητο των χρηστών. Η λογική υψηλής απόδοσης στο FPGA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του λανθάνοντος χρόνου διασύνδεσης μεταξύ των μονάδων βασικής ζώνης. Σε σταθμούς βάσης υψηλής χωρητικότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενσωματωμένο μπλοκ για εναλλαγή μεταξύ των BBU.
- **Εικονική παρουσίαση:** Οι τεχνικές εικονικής παρουσίασης προάγουν την ανάγκη τα BBU να μοιράζονται τους πόρους αυτόνομα και να αυξάνουν τον κύκλο ζωής των λειτουργιών του RAN. Όμως, η δυναμική αλλαγή φορτίων και η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο απαιτεί μια ισχυρή τεχνική εικονικής παρουσίασης που διαφέρει από τις τρέχουσες τεχνικές, όπως το υποσύστημα εικονικών πολυμέσων IP, όπου πολλά λειτουργικά συστήματα και εφαρμογές εκτελούνται στον ίδιο διακομιστή ενός φυσικού μηχανήματος που περιλαμβάνει πόρους δικτύου, αποθήκευσης και συμπίεσης. Στο πλαίσιο του C-RAN, η εικονικοποίηση γίνεται στο επίπεδο του BBU pool, όπου κάθε BBU ενεργεί ως εικονικός κόμβος που εφαρμόζεται στην εικονική μηχανή και επικοινωνεί μέσω εικονικών συνδέσμων. Η εικονικοποίηση C-RAN απαιτεί εξελιγμένους διακόπτες και δρομολογητές, οι οποίοι αποσκοπούν στην αντικατάσταση της εφαρμογής λογισμικού σε διακομιστές μεγάλου όγκου και μονάδες αποθήκευσης σε περίπτωση cloud IT, για τη μείωση του συνολικού κόστους και της ισχύος. Ως εκ τούτου, η ικανοποίηση των απαιτήσεων χαμηλού λανθάνοντος χρόνου και υψηλότερου εύρους ζώνης για τον συγκεντρωτισμό των λειτουργιών του RAN δημιουργεί μια πρόκληση για την υλοποίηση της εικονικής παρουσίασης στην τρέχουσα τεχνολογία του C-RAN [17]. Η ικανότητα του FPGA να τροποποιεί τη λειτουργία του στο χρόνο εκτέλεσης με ασφαλή λειτουργία κατάτμησης, το κάνει ένα ιδανικό κοινόχρηστο πόρο υπολογισμού στο C-RAN. Τα FPGA μπορούν να εκτελούν πολλές εφαρμογές εικονοποιώντας υπολογιστικούς πόρους και επίσης προσφέρουν προστασία μέσω της απομόνωσης εφαρμογών μεταξύ τους.
- **Πολλαπλή συνδεσιμότητα:** Καθώς η δυνατότητα διπλής συνδεσιμότητας στο LTE βοηθά τις συσκευές να έχουν πρόσβαση σε σταθμούς βάσης με διαφορετικές συχνότητες (π.χ. μακροεντολές και μικρά κελιά). Παρομοίως, η συνδεσιμότητα πολλαπλών δικτύων στο 5G με σταθμούς βάσης πολλαπλών λειτουργιών, όπως GSM, LTE, UMTS και WiFi, βελτιώνει την μέγιστη απόδοση των συσκευών. Αλλά η ανάπτυξη ενός τέτοιου, πολλαπλών λειτουργιών, σταθμού βάσης αυξάνει το κόστος κεφαλαίου. Η πολλαπλή συνδεσιμότητα μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας το Software Defined Network (SDN) και το Software DeFined Radio (SDR), καθώς

προσφέρουν φθηνότερη προσέγγιση από έναν σταθμό πολλαπλών λειτουργιών. Τα SDN και τα SDR έχουν σχεδιαστεί με μια προσέγγιση ενσωμάτωσης υποδομής λογισμικού και υλικού, όπου το λογισμικό μπορεί να εκτελεί τον έλεγχο και το υλικό να χρησιμοποιηθεί ως υπολογιστικός πόρος. Η δυνατότητα μερικής αναδιαμόρφωσης των FPGA's, τους επιτρέπει να χειρίζονται πολλαπλές λειτουργίες και ενεργεί ως επιταχυντής υλικού για πολύπλοκους υπολογισμούς [18].

2.4.2 Μετάδοση του σήματος στο οπτικό μέσο

Οι οπτικές επικοινωνίες αποτελούν ένα σημαντικό μέρος των σύγχρονων τεχνικών επικοινωνίας λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης του φάσματος του φωτός. Θεωρητικά, στις οπτικές επικοινωνίες έχουμε πολύ μεγαλύτερη απόδοση του συστήματος από τις αντίστοιχες επικοινωνίες με ραδιοσυχνότητες (RF). Μερικά τυπικά παραδείγματα οπτικής επικοινωνίας περιλαμβάνουν την επικοινωνία μέσω οπτικών ινών, την οπτική επικοινωνία ελεύθερου χώρου και την επικοινωνία με το ορατό φως. Σε αυτά τα σενάρια επικοινωνίας, η διαμόρφωση έντασης και η άμεση ανίχνευση (intensity modulation and direct detection - IM / DD) αποτελεί μία οικονομικά αποδοτική λύση. Στο IM / DD, η ένταση (ή ισχύς) της δέσμης φωτός από λέιζερ ή από δίοδο εκπομπής φωτός (LED) διαμορφώνεται σύμφωνα με τα bit πληροφοριών και δεν απαιτείται επιπλέον πληροφορία για την φάση. Λόγω αυτού, δεν απαιτείται τοπικός ταλαντωτής (local oscillator) για την επικοινωνία IM / DD, γεγονός που μειώνει σημαντικά το κόστος του υλικού.

Στο IM / DD, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένοι μη ιδανικοί παράγοντες που ενδέχεται να επιδεινώσουν την ποιότητα της επικοινωνίας. Ένας βασικός παράγοντας είναι η παρουσία περιβάλλοντος πολλαπλών διαδρομών. Αυτό το φαινόμενο προκαλείται από διάφορα αίτια. Πρώτον, στις ασύρματες επικοινωνίες, το φως μπορεί να ανακλάται σε πολλές επιφάνειες και πολλές φορές στον περιβάλλοντα χώρο πριν φτάσει στον δέκτη. Δεύτερον, το εύρος ζώνης διαμόρφωσης των LED είναι περιορισμένο, συνήθως κάτω από 100 MHz. Όταν το εύρος ζώνης του σήματος υπερβαίνει το εύρος ζώνης διαμόρφωσης των LED, εμφανίζεται το πρόβλημα των πολλαπλών διαδρομών. Τρίτον, στην επικοινωνία με ίνες, ελαφριά συστατικά διαφορετικού μήκους κύματος διαδίδονται μέσω διαφορετικών διαδρομών, οι οποίες προκαλούν επίσης την παρουσία του προβλήματος των πολλαπλών διαδρομών. Επομένως, αποτελεσματικά μέσα άμβλυνσης του προβλήματος των πολλαπλών διαδρομών είναι απαραίτητα στις οπτικές επικοινωνίες IM / DD.

Στην επικοινωνία μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RF), η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) αποτελεί έναν ισχυρό υποψήφιο διαμόρφωσης πολλαπλών φορέων για την καταπολέμηση του φαινομένου πολλαπλών διαδρομών. Σε σύγκριση με τη μονοδιαυλική διαμόρφωση, το OFDM αποφεύγει τη χρήση ενός πολύπλοκου, υψηλής τάξης, ισοσταθμιστή στο πεδίο του χρόνου. Αντ' αυτού, χρησιμοποιεί ισοσταθμιστή στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό απλοποιεί σημαντικά την διαδικασία της εξισορρόπησης και μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα των πολλαπλών διαδρομών. Έτσι, η εισαγωγή της διαμόρφωσης OFDM στην οπτική επικοινωνία IM / DD αποτελεί μια ιδανική επιλογή. Ωστόσο, σε αναντιστοιχία με την επικοινωνία μέσω ραδιοσυχνοτήτων, το IM / DD απαιτεί το μεταδιδόμενο σήμα να είναι πραγματικό και θετικό, πράγμα που επιβάλλει αυστηρούς περιορισμούς στο σχήμα διαμόρφωσης και ο αρχικός πομποδέκτης OFDM πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά για να ικανοποιήσει αυτή την απαίτηση. Επιπλέον, διαφορετικές εφαρμογές μπορεί να δίνουν έμφαση σε διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως την φασματική απόδοση, την απόδοση ισχύος, την ικανότητα ανίχνευσης, καθώς και την υπολογιστική πολυπλοκότητα [19].

2.4.3 Το Xilinx RFSoc σε CRAN αρχιτεκτονικές

Ο μετασχηματισμός Fast Fourier (FFT) είναι ένα θεμελιώδες δομικό στοιχείο στην επεξεργασία των φυσικών επιπέδων βασικής ζώνης με βάση τη διαμόρφωση OFDM. Η Xilinx παρέχει τέσσερις διαφορετικές εξαιρετικά βελτιστοποιημένες αρχιτεκτονικές FFT. Ο FFT παρέχει στους χρήστες τη δυνατότητα να κάνουν όλες τις απαραίτητες αλγοριθμικές και άλλες αλλαγές που απαιτούνται από τους αλγόριθμους ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP) και από τον σχεδιασμό του υλικού. Αυτές οι αλλαγές επιτρέπουν στους χρήστες να επιλέγουν τις πιο αποδοτικές λύσεις πόρων και ενέργειας για

ένα συγκεκριμένο μέγεθος FFT και χρόνο επεξεργασίας που απαιτείται για διάφορες εφαρμογές. Οι λύσεις αυτές υποστηρίζουν, μεταξύ άλλων, ρυθμιζόμενο χρόνο εκτέλεσης, είτε ευθύ είτε αντίστροφο μετασχηματισμού Fourier (FFT ή iFFT) μιγαδικών αριθμών με μεγέθη FFT που κυμαίνονται από 8 έως 65536 ακέραιων δυνάμεων του δύο. Ακόμη, επεκτείνουν την εστίαση στο αυξημένο δυναμικό εύρος αυξάνοντας τους συντελεστές πλάτους και φάσης έως και σε ακρίβεια 34-bit για να επιτρέψουν την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων κινητής υποδιαστολής (floating point numbers).

Επιπλέον, η Xilinx παρέχει υψηλής απόδοσης (έως 4Gb/s), χαμηλής ισχύος (λιγότερο από 350mW/Gb/s) LDPC (low-density parity check) ip core κωδικοποίησης / αποκωδικοποίησης για ενσύρματες / ασύρματες εφαρμογές backhaul, οι οποίες μπορεί να είναι ιδιαίτερα κατάλληλες και εφαρμόσιμες σε σενάρια 5G όπου στοχεύονται μικρά ωφέλιμα φορτία και εξαιρετικά χαμηλά ποσοστά σφάλματος. Υποστηρίζει διάφορα μήκη πλαισίων (64 έως 32.768 bits ανά πλαίσιο) και διάφορα σχήματα διαμόρφωσης (QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM). Χρησιμοποιεί αλγόριθμο αποκωδικοποίησης σε στρώσεις και (LLR) log-likelihood ratio λογική σε συνδυασμό με τον αποκωδικοποιητή για την αύξηση του ρυθμού σύγκλισης επανάληψης και για την επίτευξη χαμηλότερου ορίου σφάλματος.

Η χρήση συστημάτων πολλαπλών κεραιών στον πομπό και το δέκτη μπορεί να αυξήσει τη φασματική απόδοση της ασύρματης σύνδεσης. Όταν ο αριθμός των κεραιών της συσκευής του χρήστη είναι πολύ μικρότερος από τις κεραιές του σταθμού βάσης, πολλοί χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας τους ίδιους πόρους χρονικής συχνότητας (MIMO πολλαπλών χρηστών). Αυτό απαιτεί γνώση του καναλιού μεταξύ των κεραιών του σταθμού βάσης και των κεραιών του δέκτη, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες μέθοδοι κωδικοποίησης για την εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ χρηστών. Το MIMO ενός χρήστη (Single-user MIMO) και το MIMO πολλαπλών χρηστών (multi-user MIMO) ήταν και τα δύο μέρος των προτύπων LTE.

Το Massive MIMO (mMIMO) επεκτείνει την ιδέα MIMO πολλαπλών χρηστών (multi-user MIMO) αυξάνοντας δραματικά τον αριθμό των κεραιών στο σταθμό βάσης. Ο αριθμός των κεραιών σταθμού βάσης σε αυτήν την περίπτωση είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται ταυτόχρονα. Με εκατοντάδες κεραιές που εξυπηρετούν δεκάδες χρήστες ταυτόχρονα, η φασματική απόδοση μπορεί να αυξηθεί πέντε έως δέκα φορές, ενώ οι χρήστες θα έχουν υψηλότερη απόδοση. Η απόδοση ενός συστήματος σχεδιασμένου με βάση την τεχνική mMIMO αυξάνεται εκθετικά σε σύγκριση με τα τρέχοντα συστήματα (multi-antenna schemes) και υπόσχεται ενεργειακή απόδοση και εκμετάλλευση αρκετών βαθμών ελευθερίας.

Η Xilinx προσφέρει ένα ευρύ φάσμα βελτιστοποιημένων IP block για γρήγορη και αποτελεσματική επεξεργασία αλγορίθμων κωδικοποίησης / αποκωδικοποίησης MIMO με βάση τα FPGAs και τα MPSoCs. Σε γενικές γραμμές, ο τύπος υλικού που μπορεί να εξεταστεί με βάση τα FPGAs περιλαμβάνει επεξεργασία βασικού σήματος (baseband signal processing), επιτάχυνση της μεταφοράς, και προεπεξεργασία των σημάτων.

Πέρα από το DSP (Digital signal processing) για ARoF to RFSoc μπορεί να εξυπηρετήσει και άλλες αρχιτεκτονικές προσανατολισμένες στο 5G NR (eCPRI) και να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία του σήματος είτε στο fronthaul είτε στο backhaul. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην αρχιτεκτονική C-RAN, τα BBU's και τα RRH's διαχωρίζονται μεταξύ τους, όπου τα BBU's βρίσκονται συνήθως σε μία κεντρική οντότητα (pool) ή στο cloud ενώ τα RRH's κατανέμονται σε όλες τις επιθυμητές τοποθεσίες. Αυτές οι φυσικά διαχωρισμένες μονάδες συνδέονται συνήθως μέσω της διεπαφής CPRI, όπου κάθε RRH συνδέεται με το αντίστοιχο BBU. Εάν κάθε RRH έχει δύο κεραιές με εύρος ζώνης καναλιού τα 20MHz, η χωρητικότητα της διεπαφής CPRI πρέπει να είναι 2,45Gb/s για την μεταφορά IQ δειγμάτων. Όταν χρησιμοποιείται massive MIMO, η χωρητικότητα του CPRI από σημείο σε σημείο μεταξύ BBU και RRH δεν επαρκεί και πρέπει να αυξηθεί δραστικά για να επιτρέψει τη μεταφορά των IQ δειγμάτων. Για παράδειγμα, εάν το εύρος ζώνης του καναλιού είναι 20MHz και το RRH έχει 16 κεραιές, τότε απαιτείται 19,66Gb/s χωρητικότητας CPRI μεταξύ του BBU και του RRH. Το πρόβλημα θα επιδεινωθεί εάν το εύρος ζώνης του καναλιού επεκταθεί πέρα από τα 100MHz. Αυτό σημαίνει ότι η σημερινή αρχιτεκτονική C-RAN, όσο αφορά το fronthaul δίκτυο, δεν θα είναι πλέον σε θέση να χειριστεί τέτοιες αυξημένες απαιτήσεις χωρητικότητας σε μια αρχιτεκτονική δικτύου 5G. Επί

του παρόντος, η μέγιστη χωρητικότητα μετάδοσης ανά θύρα CPRI είναι 10–25Gb/s. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, θα απαιτηθεί μια ευέλικτη διάσπαση μεταξύ των BBU και RRH's ώστε να επιτρέπεται η εκτέλεση αρκετών λειτουργιών στα RRH's. Επιπλέον, η διασύνδεση μεταξύ BBU και RRH's πρέπει να αλλάξει από την διεπαφή CPRI σε Ethernet για να κάνει τη μεταφορά δεδομένων πιο αποτελεσματική.

Οι προγραμματιστικές και υπολογιστικές δυνατότητες των συσκευών Xilinx FPGA και MPSoC διευκολύνουν εξαιρετικά τον αποτελεσματικό σχεδιασμό και τις ευέλικτες λειτουργικές διασπάσεις C-RAN μεταξύ των RRH's και BBU. Τα single-chip RRH που περιλαμβάνουν διάφορες υπολογιστικές λειτουργίες, οι πύλες CPRI (CPRI gateways) και οι NGFI (Next Generation Fronthaul Interface) διεπαφές, οι λειτουργίες βασικής ζώνης στα BBU σε συνδυασμό με συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας για το backhaul δίκτυο, παρέχουν μεγάλη ευελιξία και ευκολία αναβάθμισης για το δίκτυο 5G.

Λαμβάνοντας υπόψη την έντονη επιθυμία εύκολου επαναπρογραμματισμού και διαμόρφωσης στα δίκτυα 5G, τα FPGA, οι επεξεργαστές γενικού σκοπού και τα DSP (Digital signal processing) είναι οι υποψήφιοι που μπορούν να προσφέρουν διαφορετικές επιλογές σχεδίασης και ευελιξία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες φάσεις του σχεδιασμού. Σε σύγκριση με τα ASIC (application-specific integrated circuit), τα FPGA μπορούν να παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα στους σχεδιαστές, όπως η ευελιξία και ο ταχύτερος κύκλος ανάπτυξης προϊόντων. Σε αντίθεση με τα GPP (general-purpose processors) και τα DSP (digital-signal-processor), τα FPGA μπορούν να χρησιμοποιούν διάφορες λειτουργίες σε πραγματικό χρόνο, να επιταχύνουν και να επεξεργάζονται παράλληλα υπολογιστικά απαιτητικούς αλγόριθμους. Ενώ τα FPGA's συνήθως επιλεγόταν για χαμηλότερων ταχυτήτων εφαρμογές στο παρελθόν, τα σημερινά FPGA's φτάνουν εύκολα το φράγμα απόδοσης των 500MHz. Με άνευ προηγουμένου αύξηση της λογικής πυκνότητας και ενσωμάτωση νέων δυνατοτήτων, όπως οι ενσωματωμένοι επεξεργαστές, το DSP μπλοκ και οι οικονομικά προσιτές σειριακές διεπαφές υψηλής ταχύτητας, οι νέες γενιές FPGA αποτελούν μια ανταγωνιστική πρόταση σχεδόν για κάθε τύπο σχεδιασμού στην διαμόρφωση των δικτύων 5G [20].

Κεφάλαιο 3

Η μέθοδος διαμόρφωσης OFDM

3.1 Η αρχή λειτουργίας της διαμόρφωσης OFDM

Η OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), ελληνιστί Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας, είναι μια τεχνική διαμόρφωσης πολλαπλών φερουσών, η οποία ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου η χρονική απόκριση του δίαυλου είναι διάρκειας μεγαλύτερης της διάρκειας των συμβολών σήματος ή, ισοδύναμα, η απόκριση συχνότητας αυτού παρουσιάζει παραμορφώσεις εντός της χρήσιμης ζώνης του σήματος. Τέτοια συμπεριφορά εμφανίζουν ασύρματοι δίαυλοι με πολλαπλές τοπικές ανακλάσεις σε σχετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (> 2 bits/Hz/s), όπως π.χ. δίαυλοι επίγειας ευρυεκπομπής ψηφιακής τηλεόρασης (DVB-T, [ETSI2004]) και δίαυλοι ασυρμάτων τοπικών δικτύων υψηλού ρυθμού (WLAN, IEEE802.11a στα 54Mbps/20MHz, WiMax ... [IEEE2003], [IEEE2007]).

Κατά την διαμόρφωση OFDM, το διαθέσιμο εύρος ζώνης W διαιρείται σε πολλούς υποδιαύλους $W_k, k = 1, 2, \dots, K$, (Σχήμα 10), με τις αντίστοιχες κεντρικές συχνότητες f_k να διαμορφώνονται ανεξάρτητα (π.χ. κατά QAM) και να μεταφέρουν η καθεμιά μέρος της προς μετάδοσης πληροφορίας. Για ίδιο συνολικό ρυθμό μετάδοσης, το σύνθετο σύμβολο OFDM είναι πλέον πολλαπλάσιας διάρκειας (χονδρικά, K φορές) αυτού που αντιστοιχεί σε μετάδοση μονής φέρουσας και, συνεπώς, λιγότερο ευαίσθητο στη χρονική διασπορά που προκαλεί ο δίαυλος [21].

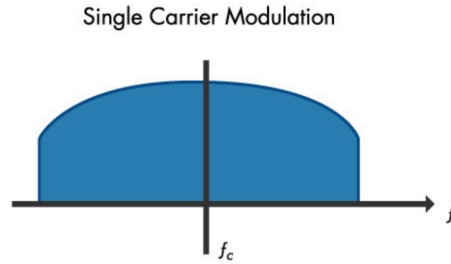


Σχήμα 10: Διαμερισμός εύρους ζώνης σε υποδιαύλους με «ορθογώνιες» κεντρικές συχνότητες

3.1.1 Μονοδιαυλική Διαμόρφωση

Ένα τυπικό παράδειγμα φάσματος μονοδιαυλικής διαμόρφωσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ένα τέτοιο σύστημα διαμορφώνει την προς μετάδοση πληροφορία σε έναν φορέα χρησιμοποιώντας την προσαρμογή της συχνότητας, της φάσης ή του πλάτους του φορέα.

Για τα ψηφιακά σήματα, οι πληροφορία έχει τη μορφή δυαδικών ψηφίων ή συλλογών δυαδικών ψηφίων που ονομάζονται σύμβολα, τα οποία διαμορφώνονται στον φορέα. Καθώς χρησιμοποιούμε υψηλότερο εύρος ζώνης (ρυθμό δεδομένων), η διάρκεια ενός bit ή σύμβολου πληροφοριών γίνεται μικρότερη. Το σύστημα γίνεται πιο ευαίσθητο στην απώλεια πληροφοριών από τον κρουστικό θόρυβο, τις ανακλάσεις σήματος και άλλες βλάβες. Αυτά τα μειονεκτήματα μπορούν να εμποδίσουν την ικανότητα ανάκτησης των πληροφοριών που αποστέλλονται. Επιπλέον, καθώς αυξάνεται το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται από ένα μονοδιαυλικό σύστημα, αυξάνονται και οι παρεμβολές που επιδρούν στην ποιότητα του σήματος στον δέκτη. Αυτός ο τύπος παρεμβολής χαρακτηρίζεται συνήθως ως κύμα φορέα (CW) ή παρεμβολή συχνότητας.

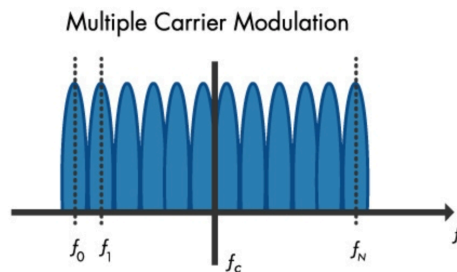


Σχήμα 11: Μονοδιαυλική Διαμόρφωση [22]

3.1.2 Βασικές Αρχές του συστήματος μετάδοσης FDM

Η πολυπλεξία διαίρεσης συχνοτήτων (FDM) επεκτείνει την έννοια της μονοδιαυλικής διαμόρφωσης χρησιμοποιώντας πολλαπλά υπο-φέροντα μέσα στο ίδιο κανάλι. Ο συνολικός ρυθμός δεδομένων που πρέπει να σταλεί στο κανάλι διαιρείται μεταξύ των διαφόρων υπο-φερόντων. Τα δεδομένα δεν απαιτείται να διαιρούνται ομοιόμορφα ούτε να προέρχονται από την ίδια πηγή πληροφοριών.

Η τρέχουσα εθνική επιτροπή τηλεοπτικών συστημάτων (NTSC) και ο στερεοφωνικός πολυπλέκτης FM είναι κάποια παραδείγματα του FDM. Το FDM προσφέρει ένα πλεονέκτημα έναντι της μονοδιαυλικής διαμόρφωσης όσον αφορά την παρεμβολή συχνότητας στενής ζώνης, καθώς αυτή η παρεμβολή θα επηρεάσει μόνο κάποια από τα υπο-φέροντα. Τα άλλα υπο-φέροντα δεν θα επηρεαστούν από την παρεμβολή. Δεδομένου ότι κάθε υπο-φέρον έχει χαμηλότερο ποσοστό πληροφοριών, οι περίοδοι συμβόλων δεδομένων σε ένα ψηφιακό σύστημα θα είναι μεγαλύτερες, προσθέτοντας κάποια μεγαλύτερη ανοχή στον κρουστικό θόρυβο και στις ανακλάσεις. Τα συστήματα FDM συνήθως απαιτούν μια ζώνη φύλαξης (guardband) ανάμεσα στα διαμορφωμένα υπο-φέροντα για να αποτρέψουν την παρεμβολή του φάσματος ενός υπο-φερόντος σε ένα άλλο.



Σχήμα 12: Πολυδιαυλική Διαμόρφωση [22]

Εάν το παραπάνω σύστημα FDM μπορούσε να χρησιμοποιήσει ένα σύνολο υπο-φερόντων που ήταν ορθογώνια μεταξύ τους, θα μπορούσε να επιτευχθεί υψηλότερο επίπεδο φασματικής απόδοσης. Οι ζώνες φύλαξης που ήταν απαραίτητες για να επιτρέψουν την αποδιαμόρφωση του κάθε υπο-φερόντος σε ένα σύστημα FDM δεν θα ήταν πλέον απαραίτητες. Η χρήση ορθογώνιων υπο-φερόντων θα επέτρεπε την αλληλεπικάλυψη των φασμάτων, αυξάνοντας έτσι την φασματική απόδοση. Εφ' όσον διατηρείται η ορθογωνικότητα, είναι ακόμη δυνατό να ανακτηθούν τα σήματα των επιμέρους υπο-φερόντων παρόλο που επικαλύπτονται.

Εάν το τελικό προϊόν των δύο ντετερμινιστικών σημάτων είναι ίσο με το μηδέν, αυτά τα σήματα λέγεται ότι είναι ορθογώνια. Η ορθογωνικότητα μπορεί να παρατηρηθεί και από τις στοχαστικές διαδικασίες. Αν δύο τυχαίες διεργασίες είναι ασυσχέτιστες, τότε είναι ορθογώνιες. Δεδομένης της τυχαίας φύσης των σημάτων σε ένα σύστημα τηλεπικοινωνίας, αυτή η πιθανοτική άποψη της ορθογωνικότητας καθορίζει μια διαισθητική αντίληψη των επιπτώσεων της ορθογωνικότητας στο OFDM. Παρακάτω αναλύεται η τεχνική διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) καθώς και η εφαρμογή της στην πράξη χρησιμοποιώντας τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT).

3.2 Ανάλυση της διαμόρφωσης OFDM

Η διαμόρφωση OFDM ανήκει στις τεχνικές πολυδιαλικής (multicarrier) διαμόρφωσης. Η βασική ιδέα της πολυδιαλικής διαμόρφωσης είναι ο χωρισμός μιας ροής ψηφίων πληροφορίας σε πολλές επιμέρους ροές (substreams) και η μετάδοσή τους σε αντίστοιχο αριθμό υποδιαύλων (subchannels). Τα πολλαπλά υπο-φέροντα (subcarriers) επιλέγεται να είναι ορθογώνια μεταξύ τους υπό ιδανικές συνθήκες διάδοσης. Ο ρυθμός μετάδοσης και το εύρος ζώνης εκάστου των υποδιαύλων είναι υποπολλαπλασία του συνολικού ρυθμού μετάδοσης και του συνολικού εύρους ζώνης. Στις πολυδιαλικές διαμορφώσεις το πλήθος των υποδιαύλων καθορίζεται με στόχο τη διασφάλιση ότι το εύρος ζώνης τους είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης συνοχής του ασυρμάτου διαύλου, οπότε κάθε υποδιαύλος υποφέρει από μη επιλεκτικές διαλείψεις. Κατ' αυτό τον τρόπο μειώνεται δραστικά η παρεμβολή μεταξύ γειτονικών συμβόλων (ISI).

Ας θεωρηθεί ευρυζωνικό σύστημα που χρησιμοποιεί γραμμική διαμόρφωση με ρυθμό μετάδοσης R καταλαμβάνοντας εύρος ζώνης B . Όταν το τελευταίο υπερβαίνει το εύρος ζώνης συνοχής του ασυρμάτου διαύλου B_c , προκαλούνται επιλεκτικές διαλείψεις. Μέσω της πολυδιαλικής διαμόρφωσης το υπόψη ευρυζωνικό σύστημα διαιρείται σε N υποδιαύλους, έκαστος των οποίων καταλαμβάνει εύρος ζώνης $B_N = \frac{B}{N}$ και υποστηρίζει ρυθμό μετάδοσης $R_N = \frac{R}{N}$. Επιλέγοντας την τιμή του N ώστε να ισχύει $B_N < B_c$, διασφαλίζεται ότι κάθε υποδιαύλος προκαλεί μη επιλεκτικές διαλείψεις. Στο πεδίο του χρόνου, η διάρκεια συμβόλου σε κάθε υποδιαύλο, T_N , είναι ανάλογη του $\frac{1}{B_N}$, οπότε, εφόσον $B_N < B_c$, $T_N \approx \frac{1}{B_N} > \frac{1}{B_c} \approx \sigma_\tau$ όπου σ_τ η διασπορά καθυστέρησης του διαύλου. Συνεπώς, εφόσον το N λάβει επαρκώς υψηλή τιμή, η διάρκεια συμβόλου σε κάθε υποδιαύλο υπερβαίνει τη διασπορά καθυστέρησης που εμφανίζει ο διάυλος μετάδοσης, οπότε σε κάθε υποδιαύλο προκαλείται χαμηλή παρεμβολή ISI.

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία της πολυδιαλικής διαμόρφωσης έχει ως αφετηρία τη διαίρεση της αρχικής ροής ψηφίων πληροφορίας σε N επιμέρους ροές, έκαστη των οποίων διέρχεται από ένα μετατροπέα σειριακού- προς-παράλληλο και διαμορφώνει κατά MQAM ή MPSK ένα υπο-φέρον συχνότητας f_N και εύρους ζώνης B_N . Αν για τη μορφοποίηση του σήματος επιλεγεί παλμός ανυψωμένου συνημίτονου με παράγοντα διαπλάτυνσης β , η διάρκεια συμβόλου σε κάθε υποδιαύλο είναι $T_N = \frac{1+\beta}{B_N}$. Το συνολικό διαμορφωμένο σήμα των N ροών εκφράζεται από τη μορφή:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n p(t) \cos(2\pi f_n t + \psi_n)$$

όπου s_n το σύμβολο που μεταδίδεται διαμορφωμένο στο n -οστό υπο-φέρον. Προκειμένου να μην επικαλύπτονται φασματικά οι υποδιαύλοι, έκαστος των οποίων καταλαμβάνει εύρος ζώνης B_N , απαιτείται η ικανοποίηση της σχέσης ορθογωνιότητας. Η απαίτηση αυτή επιβάλλει η συχνότητα κάθε υποδιαύλου να επιλέγεται σύμφωνα με την σχέση $f_n = f_c + nB_N$, $n = 0, \dots, N - 1$. Για την ανάκτηση των ροών, κάθε υποδιαύλος διέρχεται από κατάλληλο ζωνοπερατό φίλτρο που καταπιέζει τους υπόλοιπους υποδιαύλους.

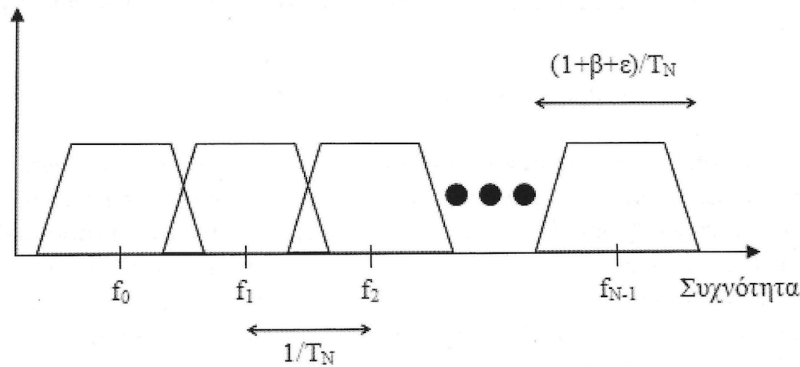
Η πολυδιαλική διαμόρφωση χαρακτηρίζεται από τα εξής πλεονεκτήματα :

- Σε ευρυζωνικά συστήματα που εμφανίζουν εύρος ζώνης που υπερβαίνει το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου η πολυδιαλική διαμόρφωση επιτρέπει, μέσω της κατάλληλης διαίρεσης της ροής πληροφορίας σε επιμέρους ροές, την αντιμετώπιση των δυσμενών επιπτώσεων των επιλεκτικών διαλείψεων. Μέσω της ανωτέρω διαδικασίας, επιτυγχάνεται υψηλότερη επίδοση και αξιοποιείται αποδοτικότερα το φάσμα σε σχέση με ευρυζωνικά συστήματα μοναδικού φέροντος.
- Προσφέρει υψηλή ευελιξία στο στρώμα MAC του ασύρματου ευρυζωνικού συστήματος.
- Εξαλείφει την παρεμβολή ISI μέσω της χρήσης του κυκλικού προθέματος.

Από την άλλη πλευρά, η πολυδιαυλική διαμόρφωση χαρακτηρίζεται από τα εξής μειονεκτήματα:

Κατά την πρακτική υλοποίησή της, κάθε υποδιαύλος καταλαμβάνει εύρος ζώνης που υπερβαίνει το $\frac{1}{T_N}$, οπότε το συνολικό απαιτούμενο εύρος ζώνης υπερβαίνει το αρχικά διαθέσιμο B . Αν β ο παράγοντας διαπλάτυνσης του παλμού μορφοποίησης ανυψωμένου συνημίτονου που χρησιμοποιείται και $\frac{\epsilon}{T_N}$, το επιπλέον εύρος ζώνης λόγω ανάγκης περαιτέρω περιορισμού του παλμού $p(t)$ ώστε να μην προκαλείται ISI, οι υποδιαύλοι διαχωρίζονται στο πεδίο της συχνότητας κατά $\frac{1+\beta+\epsilon}{T_N}$. Επομένως, το συνολικό απαιτούμενο εύρος ζώνης για N υποδιαύλους είναι:

$$B = N \frac{1+\beta+\epsilon}{T_N}$$



Σχήμα 13: Πολυδιαυλικό σύστημα με επικάλυψη υποδιαύλων

- Προκειμένου να διατηρείται η ορθογωνικότητα των υπο-φερόντων ώστε να μην υπάρχει μεταξύ τους αμοιβαία παρεμβολή στο δέκτη απαιτείται η χρήση σχεδόν ιδανικών (και άρα υψηλό κόστους) ζωνοπερατών φίλτρων.
- Η διαμόρφωση FDM χρησιμοποιεί N ανεξάρτητους διαμορφωτές και αποδιαμορφωτές, απαίτηση που συνεπάγεται υψηλό κόστος, μεγάλο μέγεθος πομποδεκτών και υψηλή κατανάλωση ισχύος.
- Είναι περισσότερο ευαίσθητη σε προβλήματα συγχρονισμού του δέκτη σε σχέση με τις διαμορφώσεις μοναδικού φέροντος.

Οι περιορισμοί αυτοί οδήγησαν στην εναλλακτική μέθοδο πολυδιαυλικής διαμόρφωσης που περιγράφεται αμέσως μετά και επιτρέπει τη μερική φασματική επικάλυψη των υποδιαύλων και, συνεπώς, την καλύτερη αξιοποίηση τον ραδιοφάσματος. Έστω ότι κάθε υποδιαύλος του πολυδιαυλικού συστήματος καταλαμβάνει εύρος ζώνης $B_N = \frac{1+\beta+\epsilon}{T_N}$. Η συχνότητα του n -οστού υποφέροντος είναι $(f_c + \frac{n}{T_N})$, $n = 0, \dots, N - 1$, όπου f_c η πρώτη συχνότητα του υπο-φέροντος. Δηλαδή διαδοχικά υπο-φέροντα απέχουν φασματικά κατά $\frac{1}{T_N}$. Ωστόσο, το εύρος ζώνης κάθε υποδιαύλου είναι $B_N = \frac{1+\beta}{T_N} > \frac{1}{T_N}$, με αποτέλεσμα οι υποδιαύλοι να επικαλύπτονται μερικώς, ενώ το επιπλέον εύρος ζώνης που απαιτείται για περαιτέρω χρονικό περιορισμό των παλμών είναι $\frac{\epsilon}{T_N}$. Εντούτοις, όπως δείχνει το Σχήμα 13, λόγω της φασματικής επικάλυψης των υποδιαύλων οι παράμετροι β και ϵ δεν επηρεάζουν το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος, εκτός από την αύξηση του εύρους του πρώτου και τον τελευταίου υποδιαύλου. Συνεπώς, το συνολικό εύρος ζώνης ενός OFDM σήματος με επικαλυπτόμενους υποδιαύλους είναι ίσο προς:

$$B = \frac{N-1}{T_N} + \frac{1+\beta+\epsilon}{T_N} \approx \frac{N}{T_N}$$

3.2.1 Η χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier στη Διαμόρφωση OFDM

Μολονότι η πολυδιαυλική διαμόρφωση ήταν γνωστή από τη δεκαετία του 1950, η απαίτηση για ξεχωριστούς διαμορφωτές και αποδιαμορφωτές σε κάθε υποδίαυλο έθετε τεχνικά ανυπέρβλητες δυσκολίες για την υλοποίησή της. Με την ανάπτυξη, μερικές δεκαετίες αργότερα, απλών και οικονομικών υλοποιήσεων του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (discrete Fourier Transform, DFT) και τον αντίστροφο DFT (inverse DFT, IDFT), η πολυδιαυλική διαμόρφωση υλοποιήθηκε απλούστερα και φθηνότερα και, ως εκ τούτου, αξιοποιήθηκε ευρέως. Έστω $x[n], 0 \leq n \leq N-1$, μια ακολουθία διακριτού χρόνου. Ο μετασχηματισμός DFT N σημείων της $x[n]$ είναι:

$$DFTx[n] = X(i) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp(-j \frac{2\pi}{N} ni), 0 \leq i \leq N-1$$

Ο μετασχηματισμός DFT είναι ισοδύναμος τον μετασχηματισμού Fourier σε διακριτό χρόνο, οπότε το $X(i)$ αντιστοιχεί στο φάσμα των χρονικών δειγμάτων $x[n]$ του αρχικού σήματος $x(t)$. Όταν είναι γνωστός ο μετασχηματισμός DFT $X(i)$, η ακολουθία $x[n]$ μπορεί να ανακτηθεί εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό IDFT επί της ακολουθίας $X(i), i = 0, 1, \dots, N-1$

$$IDFT\{X(i)\} = x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} X(i) \exp(j \frac{2\pi}{N} ni), 0 \leq n \leq N-1$$

Οι μετασχηματισμοί DFT και IDFT υλοποιούνται στην πράξη μέσω του ταχέως μετασχηματισμού

Fourier (fast Fourier transform, FFT) και του αντιστρόφου FFT (inverse FFT, iFFT), αντίστοιχα, ο οποίος και αναλύεται παρακάτω.

Κατά τα γνωστά, όταν σήμα $x[n]$ διέλθει μέσω γραμμικού δικτύου διακριτού χρόνου με κρουστική απόκριση $h[n]$, η έξοδος $y[n]$ του δικτύου προσδιορίζεται μέσω της συνέλιξης $x[n] * h[n]$. Επιπλέον, η κυκλική συνέλιξη N σημείων του $x[n]$ με το $h[n]$ ορίζεται μέσω της σχέσης

$$y[n] = x[n] \otimes h[n] = h[n] \otimes x[n] = \sum_k h[k] x[n-k]_N \text{ όπου } [n-k]_N = (n-k) \bmod N \text{ το}$$

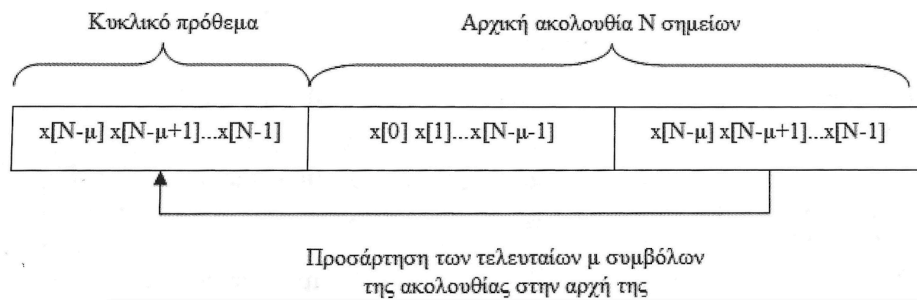
υπόλοιπο της διαίρεσης του $(n-k)$ με το N . Δηλαδή το $x[n-k]_N$ αποτελεί περιοδική επανάληψη του $x[n-k]$ με περίοδο N . Εύκολα διαπιστώνεται ότι η $y[n]$ είναι επίσης περιοδική ακολουθία με περίοδο N . Από τον ορισμό του μετασχηματισμού DFT προκύπτει ότι η κυκλική συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου ισοδυναμεί με πολλαπλασιασμό στο πεδίο της συχνότητας. Συνεπώς, η ακολουθία $x[n]$ μπορεί να ανακτηθεί εφαρμόζοντας IDFT επί της ακολουθίας $\frac{Y[i]}{H[i]}$, όπου $Y[i]$ και $H[i]$ οι μετασχηματισμοί DFT του σήματος εξόδου $y[n]$ και της κρουστικής απόκρισης του διαύλου $h[n]$, αντίστοιχα. Ωστόσο, δεδομένου ότι η έξοδος του διαύλου δεν είναι κυκλική αλλά γραμμική συνέλιξη, και προκειμένου να αξιοποιηθεί η προαναφερθείσα χρήσιμη ιδιότητα, είναι απαραίτητη η προσθήκη μιας επιπλέον ακολουθίας στην αρχή του μηνύματος $x[n]$ που ονομάζεται κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix).

Η προσθήκη αυτή μετατρέπει τη γραμμική συνέλιξη σε κυκλική. Έστω, λοιπόν, η ακολουθία δεδομένων $x[n] = x[0], \dots, x[N-1]$ μήκους N και διακριτός διάυλος με κρουστική απόκριση $h[n] = h[0], \dots, h[\mu]$ μήκους $\mu+1 = \frac{\sigma_T}{T_s}$, όπου σ_T η διασπορά καθυστέρησης του διαύλου και $T_s = \frac{1}{B}$ η περίοδος δειγματοληψίας της ακολουθίας. Ως κυκλικό πρόθεμα της ακολουθίας $x[n]$ επιλέγονται τα σημεία $x[N-\mu], \dots, x[N-1]$, δηλαδή οι τελευταίες μ τιμές της ακολουθίας $x[n]$. Δηλαδή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 14, τα τελευταία μ χρονικά δείγματα κάθε ακολουθίας δεδομένων μήκους N προσαρτώνται στην αρχή της. Κατ' αυτό τον τρόπο προκύπτει μια νέα ακολουθία $\tilde{x}[n], -\mu \leq n \leq N-1$, μήκους $N+\mu$ όπου $\tilde{x}[-\mu], \tilde{x}[-\mu+1], \dots, \tilde{x}[N-1] = x[N-\mu], \dots, x[N-1], x[0], \dots, x[N-1]$.

Επομένως, αν αντί της ακολουθίας $x[n]$ εισαχθεί στο δίαυλο με κρουστική απόκριση $h[n]$ η ακολουθία $\tilde{x}[n]$, η έξοδος του διαύλου $y[n], 0 \leq n \leq N-1$ είναι:

$$y[n] = \tilde{x}[n] * h[n] = \sum_{k=0}^{\mu-1} h[k] \tilde{x}[n-k] = \sum_{k=0}^{\mu-1} h[k] x[n-k]_N = x[n] \otimes h[n]$$

Συνεπώς, μέσω της προσάρτησης του κυκλικού προθέματος η γραμμική συνέλιξη που περιγράφει την επίδραση του διαύλου μετατρέπεται σε κυκλική. Επίσης, απαλείφεται η παρεμβολή ISI καθώς τα πρώτα μ δείγματα της εξόδου του διαύλου που επηρεάζονται από την παρεμβολή αυτή μπορούν να απορριφθούν χωρίς η απόρριψη αυτή να επιφέρει απώλεια πληροφορίας. Τα οφέλη λόγω της προσθήκης του κυκλικού προθέματος αποκτώνται με συγκεκριμένο κόστος. Δεδομένου ότι προστίθενται μ σύμβολα στα N σύμβολα πληροφορίας, ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων πληροφορίας πολλαπλασιάζεται επί $\frac{N}{\mu+N}$. Επίσης, για τη μετάδοση του κυκλικού προθέματος που έχει βοηθητικό/προστατευτικό ρόλο και δεν αποτελεί πληροφορία καταναλώνεται επιπλέον ισχύς.



Σχήμα 14: Σχηματισμός κυκλικού προθέματος μήκους μ

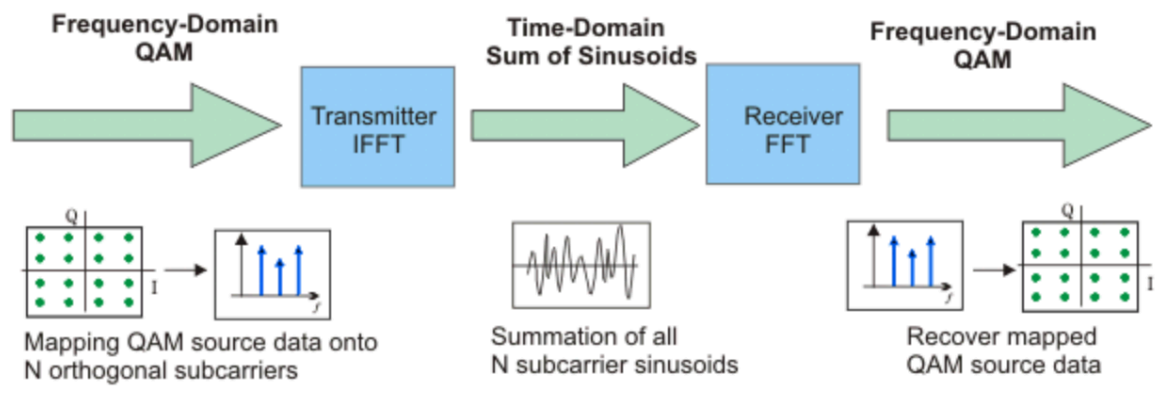
Η ροή δεδομένων εισέρχεται σε διαμορφωτή MQAM που παράγει τη ροή συμβόλων $X[0], X[1], \dots, X[N-1]$. Η ροή αυτή διέρχεται από μετατροπέα σειριακού προς παράλληλο (Σ/Π) που δίνει ως έξοδο το σύνολο των N συμβόλων MQAM $X[0], X[1], \dots, X[N-1]$ που θα μεταδοθούν παράλληλα. Τα σύμβολα αυτά είναι τα σύμβολα που μεταδίδονται μέσω των αντίστοιχων υπο-φερόντων και αποτελούν τις διακριτές φασματικές συνιστώσες της εξόδου του διαμορφωτή OFDM $s(t)$. Προκειμένου να προκύψει η έξοδος $s(t)$, αυτές οι φασματικές συνιστώσες μετατρέπονται σε χρονικά δείγματα εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό iFFT, οπότε παράγεται η μήκους N ακολουθία $x[n] = x[0], \dots, x[N-1]$. Το πολυδιαυλικό σήμα αποτελείται από γραμμικά διαμορφωμένους υποδιαύλους και το δεξιό σκέλος αντιστοιχεί σε δείγματα διακριτού χρόνου ενός συνόλου συμβόλων MQAM $X[i]$, έναστο των οποίων είναι διαμορφωμένο στο υπο-φέρον $\exp \frac{j2\pi it}{T_N}$, $i = 0 \dots N-1$. Στη συνέχεια, προσαρτάται το κυκλικό πρόθεμα και τα χρονικά δείγματα που προκύπτουν επανέρχονται σε σειριακή μορφή μέσω μετατροπέα Π/Σ , διέρχονται από ένα μετατροπέα D/A και υφίστανται άνω μετατροπή συχνότητας (upconversion) κατά τη συχνότητα f_c . Στο δέκτη πραγματοποιείται η αντίστροφη διαδικασία [14].

3.2.2 Παραγωγή των φερουσών με τη χρήση του iFFT

Στην πράξη, τα συστήματα OFDM υλοποιούνται χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) και γρήγορου αντιστρόφου μετασχηματισμού Fourier (iFFT) που είναι μαθηματικά ισοδύναμες εκδόσεις των DFT και IDFT, αλλά πολύ πιο εύκολα εφαρμόσιμες. Ένα σύστημα OFDM αντιμετωπίζει τα σύμβολα πηγής (π.χ., τα σύμβολα QPSK ή QAM που θα ήταν παρόντα σε ένα μονοδιαυλικό σύστημα), στον πομπό σαν να βρίσκονται στο πεδίο της συχνότητας. Αυτά τα σύμβολα χρησιμοποιούνται ως είσοδοι σε ένα iFFT που φέρνει το σήμα στο πεδίο του χρόνου. Το iFFT δέχεται N σύμβολα την φορά, όπου N είναι ο αριθμός των υπο-φερόντων στο σύστημα. Κάθε ένα από αυτά τα σύμβολα εισόδου N έχει περίοδο T δευτερολέπτων. Τονίζεται πως οι συναρτήσεις βάσης για ένα iFFT είναι N ορθογώνια ημιτονοειδή. Αυτά τα ημιτονοειδή έχουν το καθένα διαφορετική συχνότητα. Κάθε ένα από τα σύμβολα εισόδου δρα ως ένα μιγαδικό βάρος για την αντίστοιχη ημιτονοειδή συνάρτηση βάσης. Δεδομένου ότι τα σύμβολα εισόδου είναι μιγαδικοί αριθμοί, η τιμή τους καθορίζει τόσο το πλάτος όσο και τη φάση του ημιτονοειδούς για το υπο-φέρον.

Η έξοδος του iFFT είναι το άθροισμα όλων των N ημιτονοειδών. Έτσι, το μπλοκ του iFFT παρέχει έναν απλό τρόπο για τη διαμόρφωση δεδομένων σε N ορθογώνια υπο-φέροντα. Τα δείγματα εξόδου από το iFFT αποτελούν ένα σύμβολο OFDM. Το μήκος του συμβόλου OFDM είναι NT όπου T είναι η περίοδος του συμβόλου εισόδου που αναφέρεται παραπάνω.

Μετά από κάποια επιπλέον επεξεργασία, το σήμα που προκύπτει από το iFFT (που βρίσκεται στο πεδίο του χρόνου) μεταδίδεται μέσω του καναλιού. Στον δέκτη, ένα μπλοκ FFT χρησιμοποιείται για την επεξεργασία του λαμβανόμενου σήματος και το φέρνει στο πεδίο της συχνότητας. Στην ιδανική περίπτωση, η έξοδος του FFT θα είναι τα αρχικά σύμβολα που στέλνουμε στον iFFT του πομπού. Όταν αναπαρίσταται στο μιγαδικό επίπεδο, τα δείγματα εξόδου του FFT θα σχηματίσουν έναν αστερισμό, πχ 16 QAM. Εντούτοις, δεν υπάρχει η έννοια του αστερισμού για το σήμα στο πεδίο του χρόνου. Όταν αναπαρίσταται στο μιγαδικό επίπεδο, το σήμα στο πεδίο του χρόνου σχηματίζει ένα διάγραμμα διασποράς χωρίς κάποιο κανονικό σχήμα. Επομένως, κάθε επεξεργασία στον δέκτη που χρησιμοποιεί την έννοια ενός αστερισμού πρέπει να συμβαίνει στο πεδίο της συχνότητας. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η εναλλαγή μεταξύ του πεδίου της συχνότητας και του χρόνου σε ένα σύστημα OFDM.



Σχήμα 15: Σχηματικό διάγραμμα ενός OFDM συστήματος. [23]

3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διαμόρφωσης OFDM

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, οι εφαρμογές του OFDM, κυρίως σε συστήματα ψηφιακής επικοινωνίας, όπως η ψηφιακή μετάδοση ήχου (DAB), η ψηφιακή μετάδοση βίντεο (DVB) και η ψηφιακή μετάδοση από κινητό (DMB), έχουν επισημάνει ορισμένα από τα σημαντικά και βασικά πλεονεκτήματα του OFDM.

Αυτά τα πλεονεκτήματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Δεδομένου ότι οι παρεμβολές στενής ζώνης πλήττουν μόνο ένα μικρό μέρος των υπο-φερόντων, το OFDM θεωρείται στιβαρό έναντι της μονοδιαυλικής διαμόρφωσης.
- Για την αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής που συνδέεται με τη μετάδοση του σήματος σε πολλαπλές διαδρομές και άρα τη λήψη πολλών αντιγράφων του αρχικού σήματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, το OFDM είναι η καλύτερη και πιο αποτελεσματική μέθοδος.
- Η χρήση OFDM οδηγεί στη απαλοιφή της ανάγκης ύπαρξης υψηλής πολυπλοκότητας δέκτη.
- Το OFDM έχει υψηλή αντοχή κατά της επιλεκτικής εξασθένησης και των παρεμβολών.

Μερικά από τα μειονεκτήματα του OFDM είναι:

- Ευαισθησία στη μετατόπιση συχνότητας και στο θόρυβο φάσης.
- Έχει υψηλό δείκτη Peak to Average Power Ratio (PAPR).

Τα συστήματα OFDM είναι πολύ ευαίσθητα στη μετατόπιση συχνότητας επειδή μπορεί να προκαλέσει την παρεμβολή μεταξύ φορέων (ICI). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αναντιστοιχία συχνότητας στον ταλαντωτή πομπού και δέκτη. Δεδομένου ότι τα ασύρματα συστήματα OFDM είναι πολύ ευαίσθητα στο CFO, μπορεί να υποβαθμιστεί σοβαρά η απόδοση των ασύρματων συστημάτων OFDM. Ως εκ τούτου, έχει αναγνωριστεί ως ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα στα ασύρματα συστήματα OFDM. Από την άλλη πλευρά, το OFDM αποτελείται από πολλαπλά αθροισμένα ημιτονοειδή, τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν ένα τεράστιο Peak to Average Power Ratio (PAPR). Το High PAPR έχει χαρακτηριστεί ως το άλλο μειονέκτημα της διαμόρφωσης OFDM. Στα συστήματα RF, το μεγαλύτερο πρόβλημα έγκειται στους ενισχυτές ισχύος (PA) στο άκρο του πομπού, όπου το κέρδος του ενισχυτή θα κορεστεί σε υψηλή ισχύ εισόδου. Το υψηλό PAPR δεν είναι ασήμαντο ζήτημα για τα συστήματα OFDM επειδή μειώνει την απόδοση του ενισχυτή ισχύος (PA). Η χαμηλή απόδοση του ενισχυτή ισχύος είναι ένα πρόβλημα, ειδικά σε μικρές φορητές συσκευές στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink).

Εν ολίγοις, δύο σημαντικά ζητήματα για τις προκλήσεις OFDM είναι:

- Μετατόπιση συχνότητας φορέα (CFO)
- Υψηλό PAPR.

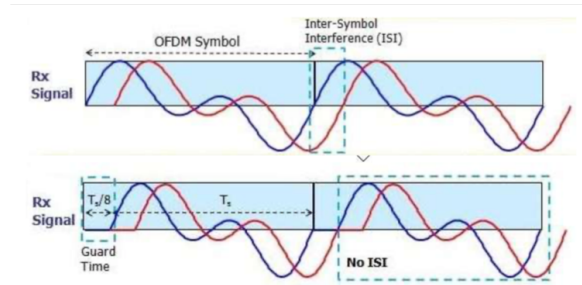
3.3.1 Διασυμβολική παρεμβολή και παρεμβολή μεταξύ φορέων

Ένα σημαντικό πρόβλημα στα περισσότερα ασύρματα συστήματα είναι ο αέρας. Σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών, όπως είναι και ο αέρας, το μεταδιδόμενο σήμα αντανακλά σε πολλά αντικείμενα. Ως αποτέλεσμα, πολλαπλές καθυστερημένες εκδόσεις του μεταδιδόμενου σήματος φτάνουν στον δέκτη. Οι πολλαπλές εκδόσεις του σήματος παρεμβάλουν μεταξύ τους και προκαλούν παραμόρφωση του λαμβανόμενου σήματος. Πολλά ενσύρματα συστήματα έχουν επίσης ένα παρόμοιο πρόβλημα όπου οι ανακλάσεις οφείλονται σε εσφαλμένη αντιστάθμιση στη γραμμή μετάδοσης.

Ένα κανάλι πολλαπλών διαδρομών θα προκαλέσει δύο προβλήματα για ένα σύστημα OFDM. Το πρώτο πρόβλημα είναι η διασυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference – ISI). Αυτό το ζήτημα παρουσιάζεται όταν το λαμβανόμενο OFDM σύμβολο παραμορφώνεται από το προηγούμενο μεταδιδόμενο σύμβολο. Το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με την διασυμβολική παρεμβολή που εμφανίζεται σε ένα σύστημα μονοδιαυλικής διαμόρφωσης. Ωστόσο, σε τέτοια συστήματα, η παρεμβολή οφείλεται συνήθως σε πολλά από τα προηγούμενα σύμβολα αντί μόνο στο ακριβώς προηγούμενο. Η περίοδος συμβόλων σε συστήματα μονοδιαυλικής διαμόρφωσης είναι συνήθως πολύ μικρότερη από το χρονικό διάστημα του καναλιού, με την τυπική περίοδο των OFDM συμβόλων να είναι πολύ μεγαλύτερη από το χρονικό διάστημα του καναλιού.

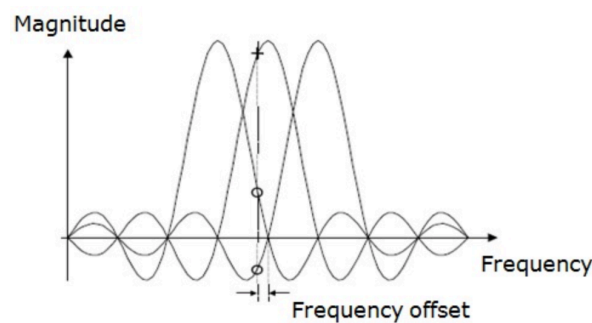
Ας υποθέσουμε ότι το μήκος του καναλιού έχει μήκος L_c δείγματα. Αντί για έναν μοναδικό φορέα με ρυθμό δεδομένων R συμβόλων/ δευτερόλεπτο, ένα σύστημα OFDM έχει υπο-φέροντα, καθένα με ρυθμό δεδομένων $\frac{R}{N}$ συμβόλων/δευτερόλεπτο. Επειδή ο ρυθμός δεδομένων μειώνεται κατά έναν συντελεστή N , η περίοδος του OFDM συμβόλου αυξάνεται κατά έναν συντελεστή N . Επιλέγοντας μια κατάλληλη τιμή για το N , το μήκος του OFDM συμβόλου γίνεται μεγαλύτερο από το χρονικό διάστημα του καναλιού. Λόγω αυτής της σύνθεσης, το αποτέλεσμα της διασυμβολικής παρεμβολής είναι η παραμόρφωση των πρώτων δειγμάτων L_c του λαμβανόμενου OFDM συμβόλου. Ένα παράδειγμα αυτού του φαινομένου φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

Παρατηρώντας ότι παραμορφώνονται μόνο τα πρώτα δείγματα του συμβόλου, μπορεί κανείς να το αντιμετωπίσει με τη χρήση προθέματος για να αφαιρέσει την επίδραση της παρεμβολής. Το πρόθεμα αυτό θα μπορούσε να είναι ένα τμήμα μηδενικών δειγμάτων που θα μεταδίδονται μπροστά από κάθε σύμβολο OFDM. Επειδή δεν περιέχει χρήσιμες πληροφορίες, αυτό το πρόθεμα θα απορρίπτεται στον δέκτη. Εάν το μήκος του έχει επιλεγεί σωστά έτσι ώστε να είναι μεγαλύτερο από το χρονικό διάστημα του καναλιού, το ίδιο το OFDM σύμβολο δεν θα παραμορφωθεί. Έτσι, με την απόρριψη του προθέματος, η επίδραση της διασυμβολικής παρεμβολής απορρίπτεται επίσης.



Σχήμα 16: Εμφάνιση του φαινομένου της διασυμβολικής παρεμβολής και εξάλειψη του με την προσθήκη guardband [24].

Ωστόσο, κάθε σύμβολο OFDM πάσχει από παρεμβολές μεταξύ φορέων (ICI) όπως εξηγείται παρακάτω όταν προστίθεται διάστημα προστασίας. Το κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix) εξαλείφει την παρεμβολή αυτή. Τα μειονεκτήματα τόσο της μεθόδου cyclic prefix όσο και του guardband είναι η μείωση του ρυθμού μετάδοσης του συστήματος λόγω της προσθήκης περιττής πληροφορίας. Η διαφορά μεταξύ cyclic prefix και guardband είναι ότι στη προσθήκη κυκλικού προθέματος το τελευταίο μέρος της χρήσιμης πληροφορίας επισυνάπτεται στην αρχή ενώ στη προσθήκη μπάντας ελέγχου προστίθενται αχρησιμοποίητα δείγματα (συνήθως μηδενικά) στο μεταξύ.



Σχήμα 17: Εμφάνιση του φαινομένου της παρεμβολής μεταξύ φορέων λόγω της μετατόπισης συχνότητας [24].

Όπως γνωρίζουμε, οι OFDM φορείς είναι πυκνά τοποθετημένοι, όπου η κορυφή του ενός υποφέροντος είναι στον μηδενισμό των άλλων. Αυτό αναφέρεται ως ορθογωνικότητα. Με άλλα λόγια, προκειμένου το OFDM να είναι μια αποτελεσματική διαμόρφωση, τα υπο-φέροντα θα πρέπει να είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Η παρεμβολή μεταξύ φορέων (ICI) προκαλείται όταν τα υπο-φέροντα χάνουν την ορθογωνικότητα τους. Το ICI οφείλεται σε δύο λόγους:

- Όταν η καθυστέρηση εξάπλωσης του καναλιού υπερβαίνει το διάστημα του κυκλικού προθέματος.
- Στην μετατόπιση συχνότητας που λαμβάνει χώρα στον δέκτη.

Η παρεμβολή μεταξύ φορέων (ICI) μειώνεται ή μπορεί να μετριάσει με την εκτίμηση της μετατόπισης συχνότητας και τη διόρθωση του subcarrier spacing.

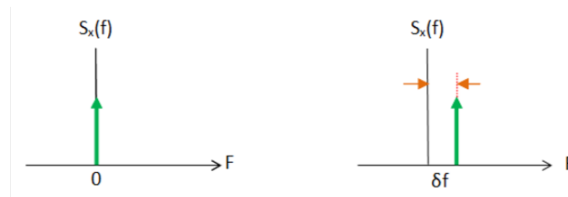
3.3.2 Μετατόπιση συχνότητας του φορέα (CFO)

Τα συστήματα OFDM είναι ευαίσθητα στα σφάλματα συγχρονισμού συχνότητας με τη μορφή μετατόπισης συχνότητα του φορέα (CFO). Το CFO μπορεί να οδηγήσει σε παρεμβολή μεταξύ φορέων (ICI). Επομένως, το CFO παίζει βασικό ρόλο στο συγχρονισμό συχνότητας. Βασικά για να υπάρχει καλή απόδοση του OFDM, το CFO πρέπει να εκτιμάται και να αντισταθμίζεται.

Η έλλειψη συγχρονισμού του σήματος του τοπικού ταλαντωτή (L.OSC) προκαλεί την μετατόπιση συχνότητας του φορέα (CFO) που μπορεί να δημιουργήσει τα ακόλουθα προβλήματα:

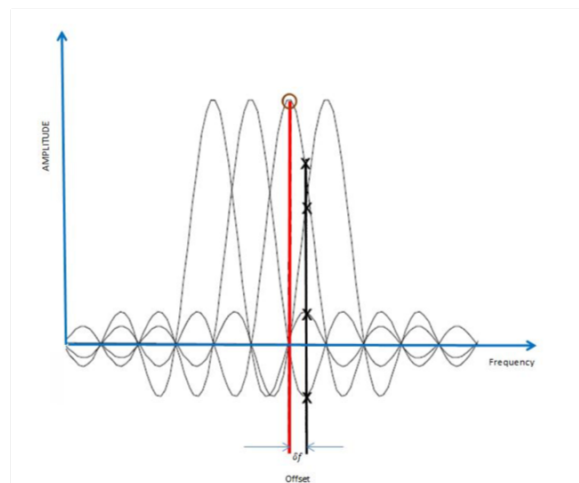
- Συχνότητα που δεν ταιριάζει στον πομπό και τον δέκτη.
- Παρεμβολές μεταξύ φορέων (ICI).
- Doppler Effect (DE).

Όταν συμβαίνει αυτό το φαινόμενο, προκαλεί μετατόπιση του σήματος του δέκτη σε συχνότητα (δf). Αυτό φαίνεται στο σχήμα 18. Εάν το σφάλμα συχνότητας είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του subcarrier spacing δf , τότε οι λαμβανόμενοι δευτερεύοντες τομείς συχνότητας μετατοπίζονται κατά $\delta f x I$.



Σχήμα 18: Απεικόνιση της μετατόπισης συχνότητας

Από την άλλη πλευρά, όπως γνωρίζουμε, τα υπο-φέροντα δειγματοληπτούν στην κορυφή τους και αυτό μπορεί να συμβεί μόνο αν δεν υπάρχει μετατόπιση συχνότητας. Ωστόσο, εάν υπάρχει μετατόπιση συχνότητας, η δειγματοληψία θα γίνει στο σημείο μετατόπισης που δεν είναι το σημείο κορυφής. Αυτό προκαλεί μείωση του πλάτους των αναμενόμενων υπο-φερόντων, η οποία μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παρεμβολής μεταξύ φορέων (ICI) από τα γειτονικά υπο-φέροντα. Το Σχήμα 19 δείχνει την επίδραση της μετατόπισης συχνότητας φορέα (CFO). Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι παρόλο που τα σφάλματα συχνότητας προκύπτουν συνήθως από αναντιστοιχία μεταξύ των συχνοτήτων αναφοράς του πομπού και του δέκτη, αυτή η διαφορά μπορεί να αποφευχθεί λόγω της ανοχής που έχουν τα ηλεκτρονικά στοιχεία.



Σχήμα 19: Μετατόπισης συχνότητας (δf)

Τα συστήματα OFDM είναι πολύ ευαίσθητα στην μετατόπιση συχνότητας φορέα (CFO) και στο χρονισμό. Επομένως, πριν από την αποδιαμόρφωση των σημάτων OFDM στην πλευρά του δέκτη, ο δέκτης πρέπει να συγχρονιστεί με το χρονικό πλαίσιο και με τη συχνότητα φορέα που έχει μεταδοθεί.

Προκειμένου να βοηθηθεί ο συγχρονισμός, τα σήματα που μεταδίδονται έχουν τις παραμέτρους αναφοράς που χρησιμοποιούνται στον δέκτη για συγχρονισμό. Ωστόσο, για να συγχρονιστεί ο δέκτης με τον πομπό, πρέπει να γνωρίζει δύο σημαντικούς παράγοντες:

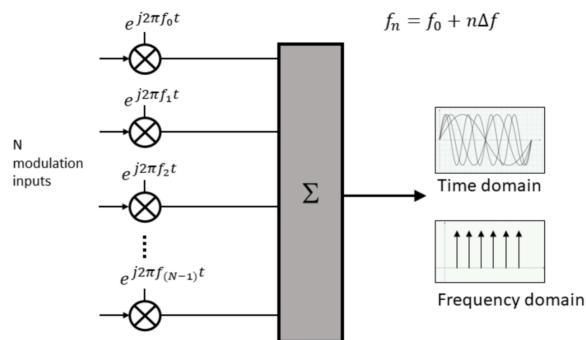
- Πριν από τη διαδικασία FFT, που θα πρέπει να ξεκινήσει η δειγματοληψία του εισερχόμενου συμβόλου OFDM.
- Πώς να εκτιμήσει και να διορθώσει οποιαδήποτε μετατόπιση συχνότητας φορέα (CFO).

Αφού εκτιμηθούν τα όρια συμβόλων στο δέκτη και ανιχνευθεί εάν το σύμβολο υπάρχει, το επόμενο βήμα είναι να εκτιμηθεί η μετατόπιση συχνότητας [25].

3.3.3 Υλοποίηση συστήματος OFDM

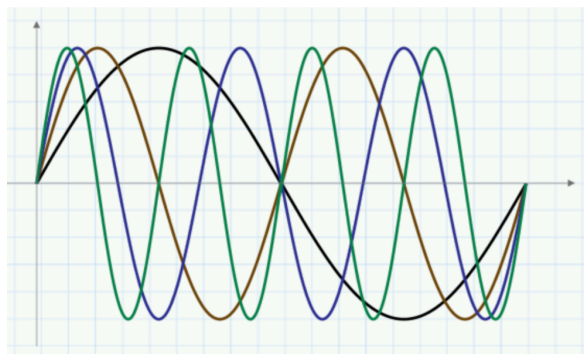
Ανακεφαλαιώνοντας, η βασική ιδέα του OFDM είναι πως τα περιορισμένα ορθογώνια σήματα μπορούν να συνδυαστούν με επικάλυψη, αποφεύγοντας παράλληλα τις παρεμβολές μεταξύ καναλιών. Χρησιμοποιώντας τη διαμόρφωση OFDM, μπορούμε να δημιουργήσουμε μια σειρά από υπο-φέροντα (subcarriers) που όλα συνεργάζονται για τη μετάδοση πληροφοριών σε ένα εύρος συχνότητας.

Αυτά τα υπο-φέροντα πρέπει να είναι ορθογώνιες συναρτήσεις. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται πώς μπορούν να συνδυαστούν υπο-φέροντα για να σχηματίσουν μια σειρά παράλληλων σημάτων. Κάθε ένα από τα υπο-φέροντα διαμορφώνεται κατά QAM. Αυτά τα διαμορφωμένα υπο-φέροντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη ανεξάρτητων σημάτων βασικής ζώνης αλλά συνήθως συνδυάζονται για να παρέχουν τη μέγιστη απόδοση δεδομένων για μία ροή δεδομένων.



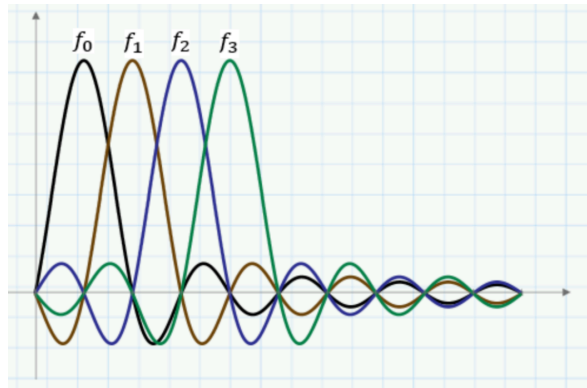
Σχήμα 20: Ένας διαμορφωτής OFDM αθροίζει σήματα διαφορετικών συχνοτήτων

Το Σχήμα 21 δείχνει τέσσερα μη διαμορφωμένα υπο-φέροντα στο πεδίο του χρόνου. Το μαύρο ίχνος είναι f_0 και τα υπόλοιπα ίχνη είναι υψηλότερων συχνοτήτων υπο-φέροντα, σε απόσταση πολλαπλάσια του Δf .



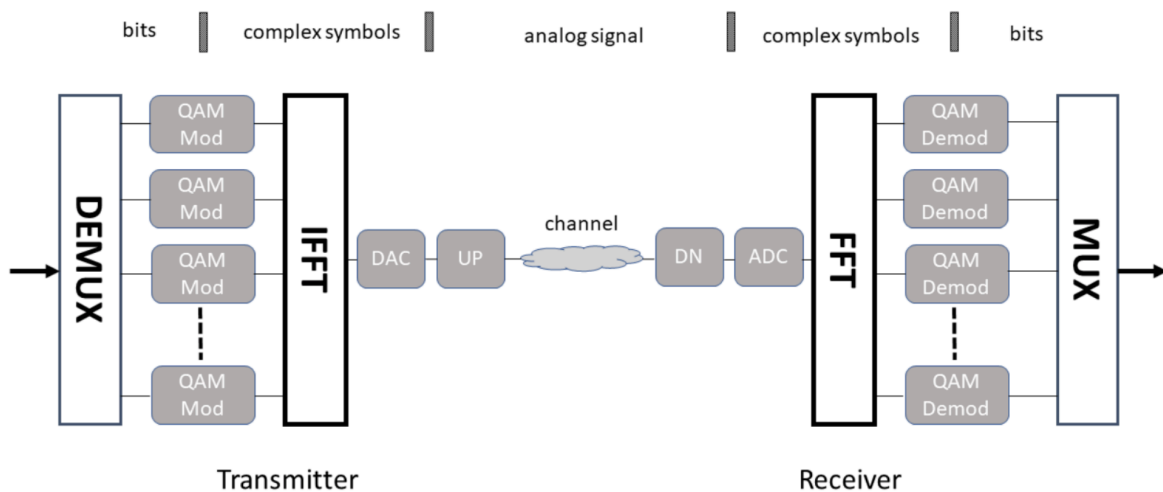
Σχήμα 21: Αυτό το σήμα OFDM περιέχει τέσσερις φορείς που απέχουν μεταξύ τους με Δf που αντιστοιχεί στα f_0, f_1, f_2, f_3

Το Σχήμα 22 απεικονίζει αυτά τα ίδια υπο-φέροντα στο πεδίο της συχνότητας, με κάποιο εύρος ζώνης διαμόρφωσης για να δειχθεί η αλληλεπικάλυψη μεταξύ των υπο-φερόντων, τα οποία είναι ορθογώνια μεταξύ τους και θα εμφανίζουν ελάχιστη παρεμβολή, επιτρέποντας την αποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης.



Σχήμα 22: Αναπαράσταση στο πεδίο της συχνότητας ενός σήματος OFDM τεσσάρων φορέων

Τέλος, παρακάτω φαίνεται η βασική διάταξη ενός πλήρους συστήματος OFDM που αποτελείται από έναν πομπό και έναν δέκτη. Η ροή δεδομένων εισέρχεται στο σύστημα στα αριστερά του διαγράμματος. Ως συνήθως, αυτό αποπολυπλέκεται (DEMUX) σε μικρότερα τμήματα δυαδικών ψηφίων που τροφοδοτούνται στους μεμονωμένους διαμορφωτές QAM για καθένα από τα N υπο-φέροντα.

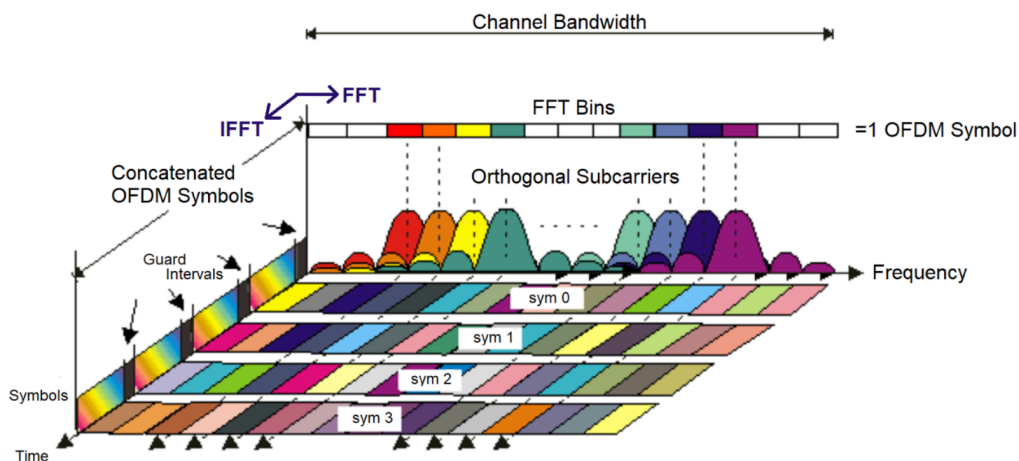


Σχήμα 23: Ένα πλήρες σύστημα OFDM περιλαμβάνει πομπό (αριστερά) και δέκτη (δεξιά)

Το σήμα OFDM που προκύπτει είναι σε ψηφιακή μορφή και με την χρήση του ψηφιακού σε αναλογικό μετατροπέα (DAC), μετατρέπεται σε αναλογικό σήμα. Αυτό το σήμα βασικής ζώνης συνήθως υφίσταται άνω μετατροπή (UP) σε υψηλότερη συχνότητα πριν μεταδοθεί στο οπτικό μέσο και έπειτα στον αέρα.

Τα κύρια στοιχεία εδώ είναι 1) ο συνδυασμός πολλών υπο-φερόντων διαμορφωμένων κατά QAM για τη δημιουργία ενός συστήματος ευρείας ζώνης και 2) η χρήση των FFT και iFFT για αποτελεσματική μετατροπή αυτών των υπο-φερόντων σε ένα μόνο σήμα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια σειρά διαμόρφωσης QAM, ξεκινώντας με BPSK (ένα bit ανά σύμβολο) έως 256QAM (8 bit ανά σύμβολο). Ο συνδυασμός αυτού με τη χρήση πολλών υπο-φερόντων (ίσως και 8192) οδηγεί σε πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων.

Το Σχήμα 24 δείχνει το πεδίο του χρόνου και της συχνότητας ενός σήματος OFDM. Ο οριζόντιος άξονας είναι η συχνότητα, ο κάθετος άξονας είναι το πλάτος και ο τρίτος άξονας είναι ο χρόνος. Κάθε σύμβολο που φαίνεται στο σχήμα είναι ένα σετ OFDM υπο-φερόντων που μεταδίδονται.



Σχήμα 24: Προβολή στο πεδίο χρόνου / συχνότητας ενός σήματος OFDM

3.3.4 Εφαρμογές της παραπάνω τεχνολογίας

Το πρότυπο ασύρματου LAN, IEEE 802.11a, ήταν ένα από τα πρώτα πρότυπα που χρησιμοποίησε το OFDM. Αυτό το πρότυπο χρησιμοποιεί 64 υπο-φέροντα με subcarrier spacing ίσο με 312 kHz, τα οποία μπορούν να διαμορφωθούν με πολλές διαφορετικές παραλλαγές QAM και PSK: Binary Phase Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16QAM ή 64QAM.

Τα ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούν OFDM για την επίτευξη χρήσης καναλιών υψηλού εύρους ζώνης. Οι υφιστάμενες τεχνολογίες του 4G (LTE) χρησιμοποιούν OFDM για την καθοδική ζεύξη (σταθμός βάσης προς κινητή συσκευή), με subcarrier spacing ίσο με 15 kHz. Η διαμόρφωση των υπο-φερόντων μπορεί να είναι QPSK, 16QAM ή 64QAM.

Το πρότυπο 5G New Radio (NR) χρησιμοποιεί OFDM τόσο στην ανοδική όσο και στην καθοδική ζεύξη. Η προδιαγραφή NR έχει σχεδιαστεί με υψηλό βαθμό ευελιξίας για την κάλυψη ενός ποικίλου συνόλου εφαρμογών. Το subcarrier spacing μπορεί να ποικίλει (15 kHz, 30 kHz, 60 kHz, 120 kHz, 240 kHz, 480 kHz) με έως και 8192 υπο-φέροντα. Η διαμόρφωση των υπο-φερόντων μπορεί να είναι QPSK, 16QAM, 64QAM ή 256QAM [26].

Κεφάλαιο 4

Πειραματική Αξιολόγηση

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μελέτη και υλοποίηση της διάταξης του πομπού OFDM που συζητήθηκε παραπάνω, σε επίπεδο προσομοίωσης σε περιβάλλον MATLAB με τη βοήθεια της χρήσης του αναπτυξιακού περιβάλλοντος Xilinx Vivado Design Tools με SDK. Η προσομοίωση αυτή χωρίζεται σε τρία βασικά στάδια. Αρχικά εκτελείται ένα πρόγραμμα σε γλώσσα C που είναι υπεύθυνο για την QAM κωδικοποίηση αλλά και την σωστή αντιστοίχιση των σημάτων έτσι ώστε να είναι έτοιμα για την εισαγωγή τους στο επόμενο βήμα, έπειτα με την βοήθεια του Vivado εκτελείται ο iFFT μετασχηματισμός και τέλος μέσω MATLAB παρατηρούνται τα αποτελέσματα που αφορούν την μετάδοση του σήματος αφού έχει περάσει το στάδιο της μετατροπής του από ψηφιακό σε αναλογικό.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν 4 παραδείγματα OFDM συμβόλων με διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, subcarrier spacing, αλλά και pilots, σύμφωνα με τα πρότυπα του 5G NR. Να σημειωθεί πως η παραπάνω σχεδίαση αφορά αποκλειστικά το Downlink (καθοδική ζεύξη).

4.1 Περιγραφή Παραδειγμάτων OFDM Συμβόλων - Κώδικα C

Αρχικά δημιουργήθηκε ένα τμήμα κώδικα, σε γλώσσα C, το οποίο δέχεται ως είσοδο τα δεδομένα σε δυαδική μορφή τα οποία τυγχάνουν επεξεργασίας σύμφωνα με το σύστημα διαμόρφωσης που έχει επιλεγεί (16 QAM), εισάγονται τα pilots ανάλογα με την κάθε περίπτωση καθώς και επιπλέον μηδενικοί subcarriers έτσι ώστε να συμπληρωθεί ο αριθμός των υπο-φερόντων επιτρέποντας τους να εισαχθούν στον iFFT, το μήκος του οποίου καθορίζεται από την κάθε περίπτωση όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Τα pilots εισάγονται με επαναλαμβανόμενη προσπέλαση των 16 QAM από το 0 ($-3 + 3 * i$) μέχρι και το 15 ($1 - 1 * i$) και με συχνότητα που ορίζεται από τον παρακάτω πίνακα.

Να σημειωθεί πως στις δύο πρώτες περιπτώσεις προστίθονται επιπλέον μηδενικοί subcarriers λόγω περιορισμών που συναντήσαμε στην πειραματική διαδικασία, όσον αφορά την ελάχιστη συχνότητα του DAC (Μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό) που υπολογίζεται πως είναι της τάξης των 62.5 MHz.

#	Band Size	SCS (kHz)	Channel Bandwidth (MHz)	GuardBand (kHz)	Pilots	NFFT Size
1	2.010 - 2.025 MHz BW=15 MHz	15	5	242,5	1/4 qam symbols	8192
2	27.500 - 28.350 MHz BW= 850 MHz	60	50	1210	1/80 qam symbols (10 pilots)	2048
3	59.500 - 60.700 MHz BW= 1.200 MHz	120	400	9500	1/100 qam symbols	4096
4	59.500 - 60.700 MHz BW= 1.200 MHz	120	400	9500	1/8 qam symbols	4096

Πίνακας 1: Προσδιορισμός των Χαρακτηριστικών των Παραδειγμάτων OFDM συμβόλων

Το σύνολο των υπο-φερόντων της κάθε ζώνης συχνοτήτων εισάγεται στο iFFT με μία συγκεκριμένη δομή.

Στον κάθε υποδιάυλο συγκεντρώνονται όλοι οι μηδενικοί subcarrier στο κέντρο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η ύπαρξη κάποιας λειτουργίας fftshift στο εσωτερικό του FFT block στο Vivado, οπότε και στην έξοδο, με την παραπάνω διαδικασία, οι μηδενικοί subcarriers εμφανίζονται στα άκρα του OFDM συμβόλου. Έπειτα, πάνω και κάτω από αυτούς (1ο και 2ο μισό του καναλιού) εισάγονται τα subcarriers δεδομένων και τα pilots. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζεται η αναλυτική διάταξη των παραδειγμάτων. Παρατηρείται πως λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς του DAC καθώς και του iFFT, το σύνολο των subcarriers του πρώτου παραδείγματος ανέρχεται σε 8192, εκ των οποίων οι 7860 είναι μηδενικοί. Αυτό οφείλεται στους περιορισμούς που εισάγονται στα FPGA, τα οποία όπως αναφέρθηκε και παραπάνω εμφανίζουν ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας στον DAC ίση με 62.5 Mhz.

Channels	Info	Start	Stop	Type	Number	
CHANNEL #1	FIRST HALF		0	PILOT	1	
		1	4	QAM	4	
			5	PILOT	1	
		6	9	QAM	4	
		*	*	*	*	
		161	164	QAM	4	
			165	PILOT	1	
	ZEROS	166	8025	ZEROS	7860	
	SECOND HALF			8026	PILOT	1
		8027	8030	QAM	4	
			8031	PILOT	1	
		8032	8035	QAM	4	
		*	*	*	*	
8187		8190	QAM	4		
		8191	PILOT	1		
CHANNEL #2	-	8192	16383		8192	
CHANNEL #3	-	16384	24575		8192	

Πίνακας 2: Αναλυτική Περιγραφή των subcarrier του πρώτου παραδείγματος

Channels	Info	Start	Stop	Type	Number	
CHANNEL #1	FIRST HALF		0	PILOT	1	
		1	80	QAM	80	
			81	PILOT	1	
		82	161	QAM	80	
		*	*	*	*	
			405	PILOT	1	
		406	415	QAM	10	
	ZEROS	416	1631	ZEROS	1216	
	SECOND HALF			1632	PILOT	1
		1633	1712	QAM	80	
			1713	PILOT	1	
		1714	1793	QAM	80	
		*	*	*	*	
		2037	PILOT	1		
2038		2047	QAM	10		
CHANNEL #2	-	2048	4095		2048	
*	*	*	*	*	*	
CHANNEL #17	-	32768	34815		2048	

Πίνακας 3: Αναλυτική Περιγραφή των subcarrier του δεύτερου παραδείγματος

Channels	Info	Start	Stop	Type	Number	
CHANNEL #1	FIRST HALF		0	PILOT	1	
		1	8	QAM	8	
			9	PILOT	1	
		10	17	QAM	8	
		*	*	*	*	
		1657	1664	QAM	8	
			1665	PILOT	1	
	ZEROS	1666	2429	ZEROS	764	
	SECOND HALF			2430	PILOT	1
		2431	2438	QAM	8	
			2439	PILOT	1	
		2440	2447	QAM	8	
		*	*	*	*	
		4087	4094	QAM	8	
		4095	PILOT	1		
CHANNEL #2	-	4096	8191		4096	
CHANNEL #3	-	8192	12287		4096	

Πίνακας 4: Αναλυτική Περιγραφή των subcarrier του τρίτου παραδείγματος

Channels	Info	Start	Stop	Type	Number	
CHANNEL #1	FIRST HALF		0	PILOT	1	
		1	100	QAM	100	
			101	PILOT	1	
		102	201	QAM	100	
		*	*	*	*	
			1616	PILOT	1	
		1617	1665	QAM	49	
	ZEROS	1666	2429	ZEROS	764	
	SECOND HALF			2430	PILOT	1
		2431	2530	QAM	100	
			2531	PILOT	1	
		2532	2631	QAM	100	
		*	*	*	*	
			4046	PILOT	1	
4047		4095	QAM	49		
CHANNEL #2	-	4096	8191		4096	
CHANNEL #3	-	8192	12287		4096	

Πίνακας 5: Αναλυτική Περιγραφή των subcarrier του τέταρτου παραδείγματος

4.1.1 Υλοποίηση Συστήματος Διαμόρφωσης 16 QAM

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω επιτυγχάνεται η αναπαράσταση της κάθε τετράδας δυαδικών αριθμών στους κατάλληλους αστερισμούς του 16QAM με κωδικοποίηση Gray. Σημειώνεται πως οι αστερισμοί του constellation map είναι κανονικοποιημένοι ως προς την ισχύ του QAM σήματος. Τέλος, ως έξοδο του κώδικα αυτού χαρακτηρίζεται ο εκάστοτε πίνακας που φαίνεται παραπάνω, με την μετατροπή των αριθμών από fixed point σε Q15 (Q1.15) μορφή.

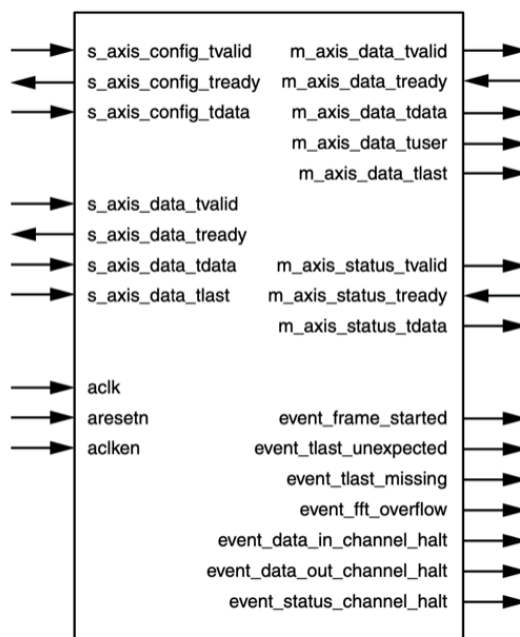
Γενικά ένας αριθμός σε $Q_{m.n}$ μορφή διαθέτει m bits για την αναπαράσταση του ακεραίου και n

bits για την αναπαράσταση του δεκαδικού μέρους τους. Για την μετατροπή αυτή αρκεί ο πολλαπλασιασμός του αριθμού με 32768 και έπειτα η στρογγυλοποίηση του αποτελέσματος στο κοντινότερο ακέραιο. Με αυτή την διαδικασία το σήμα εισόδου έχει προετοιμαστεί καταλλήλως για την εισαγωγή του στο επόμενο τμήμα της αλυσίδας, το οποίο είναι το iFFT block.

Οπότε, το κομμάτι αυτό, που υλοποιήθηκε μέσω μιας συνάρτησης σε γλώσσα C, καλύπτει τα δύο πρώτα στάδια της αλυσίδας του OFDM πομπού. Δηλαδή αφορά την κωδικοποίηση των δυαδικών σημάτων μέσω QAM και την κατάλληλη διαμόρφωση τους ώστε να εισαχθούν απευθείας στο iFFT block του Vivado.

4.2 Υλοποίηση FFT ip core

Έπειτα μέσω του περιβάλλοντος Vivado χρησιμοποιήθηκε το iFFT ip core το οποίο και διαμορφώθηκε κατάλληλα έτσι ώστε αναλόγως με το σήμα που έρχεται σαν είσοδο, να ρυθμίζονται αυτόματα το μέγεθος του FFT (`s_axis_config_tdata(3:0)`) και το κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix) (`s_axis_config_tdata(19:8)`). Εισάγοντας στο `s_axis_config_tdata(24)` bit τον λογικό αριθμό 1 εξασφαλίζεται η εφαρμογή του αντιστρόφου μετασχηματισμού Fourier (iFFT) που απαιτείται σε αυτό το στάδιο της αλυσίδας.



Σχήμα 25: Σχηματική περιγραφή του FFT ip core όπως χρησιμοποιείται στο Vivado

Πρέπει να σημειωθεί, πως το core δέχεται τα δεδομένα στην είσοδο του ως δυαδικούς αριθμούς μήκους 16 bits, οι οποίοι και εισάγονται με τον εξής τρόπο, το πραγματικό μέρος στο `s_axis_data_tdata(15:0)` και το φανταστικό μέρος στο `s_axis_data_tdata(31:16)`. Έπειτα το σήμα εξόδου περιέχει στο κομμάτι `m_axis_data_tdata(28:0)` το πραγματικό μέρος και στο `m_axis_data_tdata(60 downto 32)` το φανταστικό, οπότε και στην έξοδο λαμβάνουμε αριθμούς μήκους 32 bits.

Παρακάτω εμφανίζεται η προσομοίωση του iFFT core για το δεύτερο παράδειγμα. Εύκολα διακρίνεται πως ως είσοδος ορίζονται 17 διαφορετικά OFDM σύμβολα με τις σωστές προδιαγραφές που αναλυθήκαν παραπάνω. Η έξοδος που εμφανίζεται αφορά στην ουσία την έξοδο του iFFT core, η οποία και αποθηκεύεται για να αποσταλεί στο επόμενο και τελευταίο στάδιο της αλυσίδας. Το κομμάτι αυτό αφορά την μετατροπή από ψηφιακή σε αναλογική μορφή.



Σχήμα 26: Αποτελέσματα προσομοίωσης (testbench) στο Xilinx Vivado

4.3 Υλοποίηση DAC

Στον μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα επιτελείται η διαδικασία της δημιουργίας ενός σήματος που είναι στην ουσία το ανοδικά δειγματοληπτημένο σήμα που παίρνουμε από την έξοδο του iFFT block, και έπειτα λαμβάνει χώρα η μετάδοση του στις επιθυμητές για εμάς συχνότητες. Στο περιβάλλον του MATLAB προσπαθήσαμε να προσομοιάσουμε ακριβώς αυτή την λειτουργία.

Στο κομμάτι του κώδικα που ακολουθεί παρακάτω, επιτελείται αυτή η μετατροπή (ανόρθωση) της συχνότητας του σήματος (F) στην ενδιάμεση συχνότητα (Intermediate Frequency, IF). Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή resample η οποία και επαναδειγματοληπτει την ακολουθία εισόδου, IQ_{in} , σε $\frac{upsamp}{1}$ φορές τον αρχικό ρυθμό δείγματος, όπου το upsample ορίζεται στην ακριβώς προηγούμενη εντολή. Το upsample έχει οριστεί έτσι ώστε να ικανοποιεί το κριτήριο Nyquist, όπου η συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από το συνολικό bandwidth του κάθε παραδείγματος.

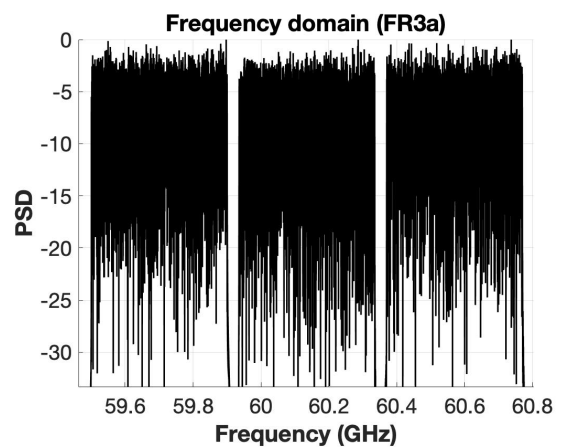
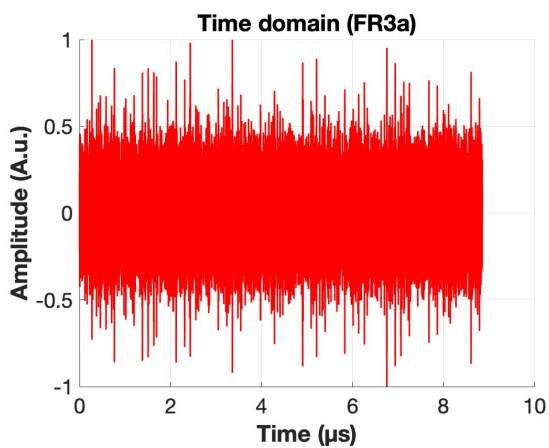
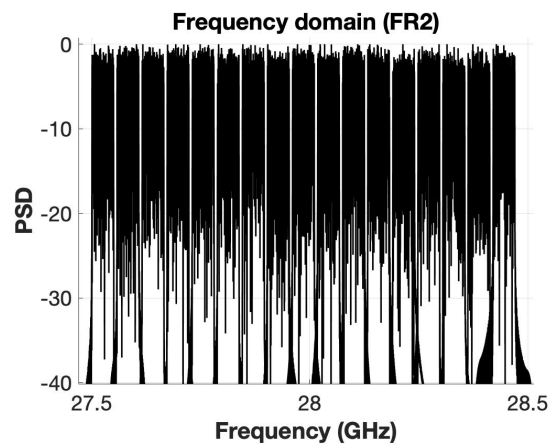
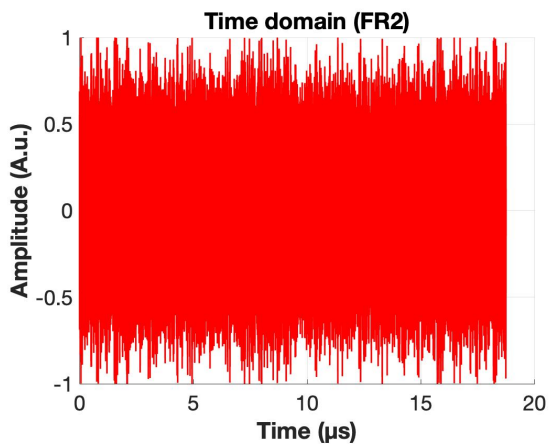
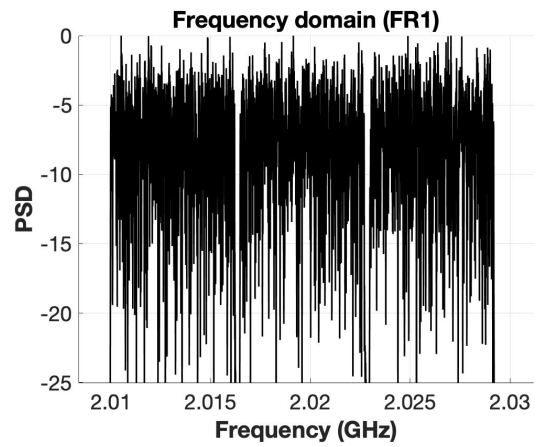
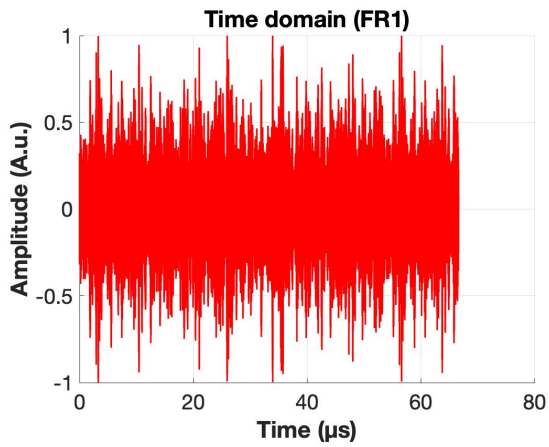
```

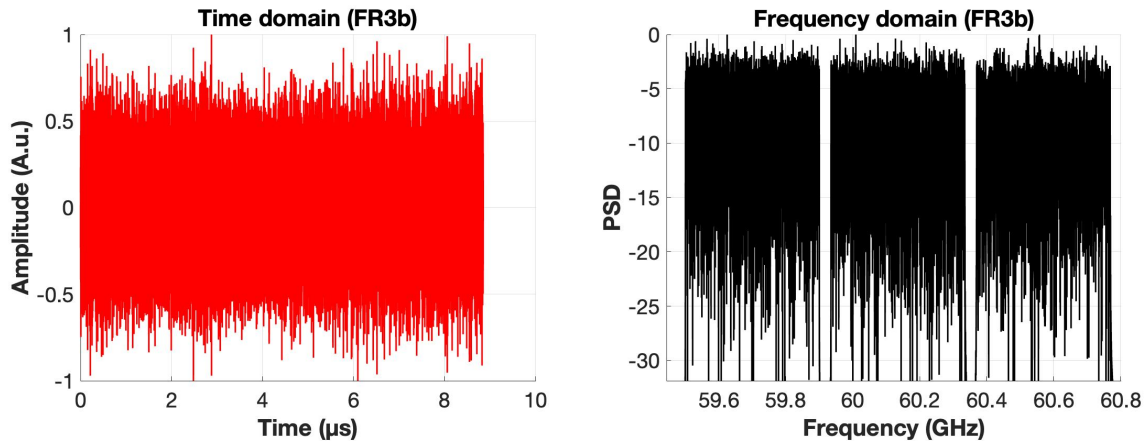
F=0.49152;
IF_default = 0.5;
IF = IF_default;
upsamp = ceil(4*(IF/F));
Sig1 = resample(IQin, upsamp, 1);
Fs = upsamp *F;
t = (1/Fs)*(0:length(Sig1)-1);
Sig = real(Sig1.*exp(1i*(2*pi*IF.*t)));

```


4.4 Αποτελέσματα

Έτσι τελικώς έχουμε τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις που αφορούν το κάθε παράδειγμα τόσο στο πεδίο του χρόνου (time domain), όσο και σ' αυτό της συχνότητας (frequency domain).





Σχήμα 28: Αποτελέσματα της υλοποίησης του DAC στο MATLAB (για το κάθε παράδειγμα)

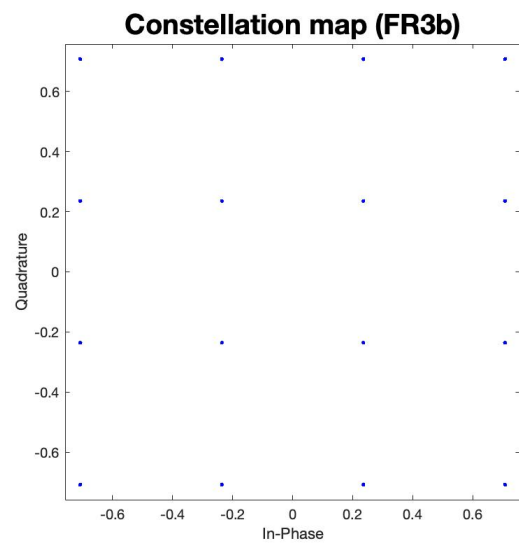
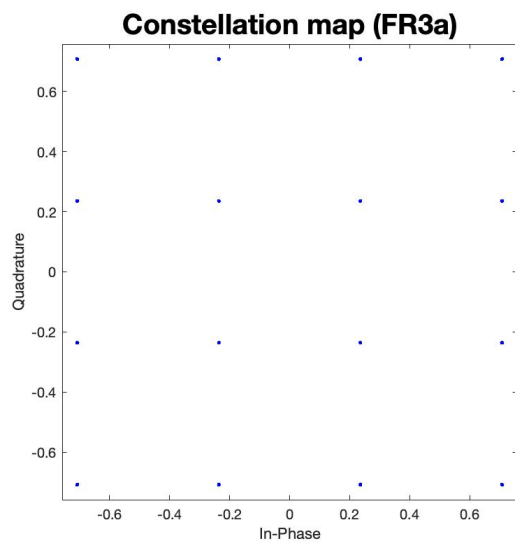
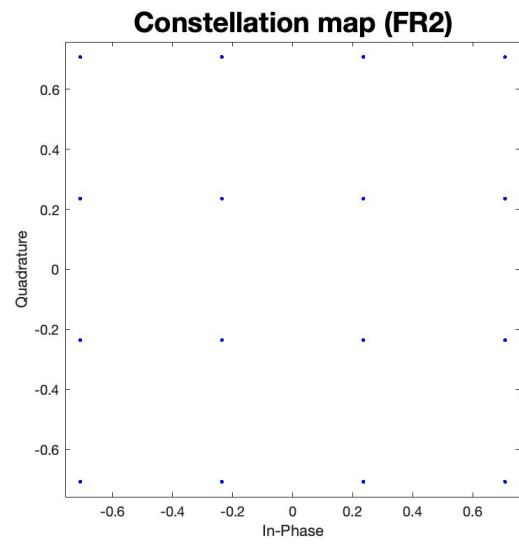
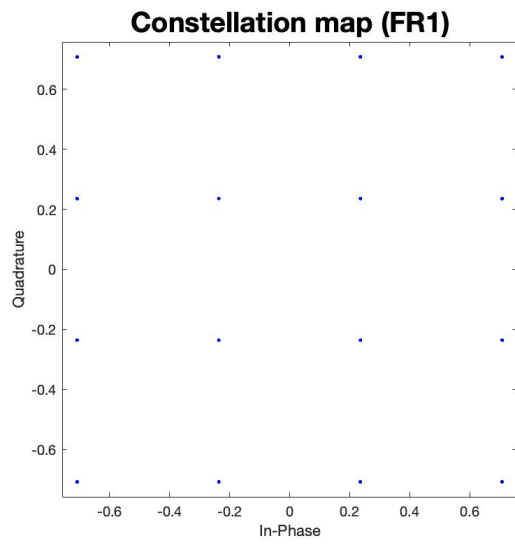
Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται όλες οι διαφορετικές τιμές των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παραπάνω προσομοίωση καθώς και το πλήθος των διττών (bits) που περιέχεται στο κάθε OFDM σύμβολο.

Παράδειγμα	IF (Intermediate Frequency) (GHz)	Fs (Sampling Frequency) (GHz)	Number of binary inputs per OFDM symbol	Cyclic prefix (%)
FR1	0.5	2.1504	1056	25
FR2	0.5	5.7754	3280	12.5
FR3a	0.5	5.8982	11840	6.25
FR3b	0.5	5.8982	13192	6.25

Πίνακας 6: Προσδιορισμός διαφόρων χαρακτηριστικών προσομοίωσης

Παρατηρείται πως στο 2ο παράδειγμα, όπως και σε όλα τα άλλα αντιστοίχως, διακρίνονται τα 17 OFDM σύμβολα με το επιθυμητό Bandwidth (50 MHz) τα οποία τελικά αξιοποιούν μέγεθος μπάνας ίσο με το δοσμένο (27.500 - 28.350 MHz). Τα guardbands που χρησιμοποιούνται, τα οποία διασφαλίζουν την αποφυγή παρεμβολών, είναι τα ελάχιστα δυνατά σύμφωνα με το πρότυπο 3GPP.

Τέλος για να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της χρήσης του πομπού, δημιουργήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB μία προσομοίωση της λειτουργίας ενός δέκτη. Παρακάτω παρατείνονται τα διαγράμματα αστερισμού για το κάθε παράδειγμα και επιβεβαιώνεται η σωστή χρήση του πομπού. Να σημειωθεί πως για την αξιολόγηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το πλάτος διανυσματικού σφάλματος (Error Vector Magnitude - EVM) και πιο συγκεκριμένα η RMS τιμή του που ήταν, σε κάθε παράδειγμα, της τάξης του 1%.



Σχήμα 29: Constellation Map του κάθε παραδείγματος

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

5.1 Σύνοψη συμπερασμάτων προσομοίωσης

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, υλοποιήσαμε μία προσομοίωση ενός OFDM πομπού, όπου τα διάφορα στάδια του υλοποιήθηκαν με διαφορετικές τεχνικές. Πιο συγκεκριμένα, τα δύο πρώτα στάδια, δηλαδή αυτά που αφορούν την καταμέριση της ροής δεδομένων (bitstream) σε τετράδες δυαδικών στοιχείων και την αντιστοίχηση τους στους κατάλληλους αστερισμούς σύμφωνα με την διαμόρφωση 16QAM, υλοποιήθηκαν με την βοήθεια ενός προγράμματος που αναπτύχθηκε σε γλώσσα C. Κατ' αυτήν την διαδικασία, το πρόγραμμα αυτό είχε ως είσοδο μια ροή δεδομένων (bitstream) και έπειτα από τις διαδικασίες που αναλύθηκαν παραπάνω δημιουργήθηκε ένας μονοδιάστατος πίνακας, μεγέθους ανάλογου του παραδείγματος, που το κάθε του κελί αναπαριστά την πληροφορία του κάθε υπο-φέροντος (είτε αυτό αφορά πληροφορία είτε αυτό αφορά μηδενικό στοιχείο). Πρέπει να σημειωθεί πως η μορφή των αριθμών μετατρέπεται σε $Q15(Q_{1.15})$ format.

Έπειτα, ο πίνακας αυτός εισάγεται στη προσομοίωση του αναπτυξιακού περιβάλλοντος Xilinx Vivado Design Tools, όπου με τις κατάλληλες μετατροπές του κώδικα του iFFT core έχουμε ως έξοδο το αποτέλεσμα του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier. Οι μετατροπές αυτές αφορούσαν την επιλογή των κατάλληλων χαρακτηριστικών του block, όπως το μέγεθος του iFFT, την διάρκεια του κυκλικού προθέματος καθώς και την μορφή της εξαγόμενης πληροφορίας. Άρα έχει ήδη προσομοιαστεί η αλυσίδα του OFDM πομπού μέχρι το σημείο πριν τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (DAC).

Ο μετατροπέας καθώς και το upconversion που θα χρειαστεί για να διαμορφωθεί το αναλογικό σήμα στις κατάλληλες, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που αναλύθηκαν παραπάνω, συχνότητες υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον του MATLAB. Εισάγωντας τα απαραίτητα στοιχεία, όπως ο πίνακας που εξήχθη από το Vivado, το συνολικό bandwidth του κάθε OFDM συμβόλου (συμπεριλαμβανομένου του guardband), τον αριθμό των καναλιών του κάθε παραδείγματος και την επιθυμητή ενδιάμεση συχνότητα (IF), δημιουργούνται τελικά οι επιθυμητές κυματομορφές για το κάθε παράδειγμα τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί πως υπάρχει ένας σημαντικός περιορισμός που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και αφορά την ενδιάμεση συχνότητα (IF) η οποία δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2 GHz, έτσι ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο Nyquist ($DAC_out_max = 4GSa/s$).

Εν κατακλείδι, μέσω της προσομοίωσης αυτής, έχουμε έναν πλήρως λειτουργικό OFDM πομπό ο οποίος συμμορφώνεται πλήρως στις τεχνικές προδιαγραφές που έχει εισάγει το πρότυπο 5G NR.

5.2 Μελλοντική Εργασία

Λόγω των περιορισμών που εισήχθησαν για την αντιμετώπιση της πανδημίας την άνοιξη του 2020, δεν κατέστη δυνατή η χρήση ενός FPGA συστήματος, που ήταν και ο αρχικός σχεδιασμός για το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής. Οπότε, ένα επόμενο βήμα προς της εξέλιξη αυτής της διπλωματικής, θα ήταν η δημιουργία ενός απλού σχηματικού στο Vivado που θα περιέχει το iFFT μπλοκ που αναλύθηκε παραπάνω, και ο προγραμματισμός του ενσωματώνοντας το κομμάτι του κώδικα που έχει αναπτυχθεί. Με τον τρόπο αυτό θα είχαμε έναν OFDM πομπό που με την εναλλαγή

μιας μεταβλητής θα μετέδιδε την πληροφορία των τεσσάρων παραπάνω παραδειγμάτων.

Πέρα από αυτό, το έργο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορεί να επεκταθεί και στις εξής ακόλουθες ενδεικτικές κατευθύνσεις:

- Την βελτιστοποίηση της πολυπλοκότητας του κώδικα έτσι ώστε να έχουμε γρηγορότερους υπολογισμούς που θα επιτρέπουν την αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης του σήματος.
- Την ανάπτυξη, με παρόμοια λογική, ενός OFDM δέκτη. Η μονή προσθήκη που θα απαιτούνταν θα ήταν αυτή ενός αλγορίθμου απόφασης για την σωστή αντιστοίχιση στον αστερισμό της 16QAM διαμόρφωσης (π.χ hard decision algorithm, Likelihood-ratio algorithm κ.α).
- Η σύνδεση του πομπού αυτού με τα πιο πίσω επίπεδα, μιας και τα RFSoc είναι συμβατά με τα πρωτόκολλα Ethernet και CPRI / eCPRI, έτσι ώστε να μεταδίδει σε πραγματικό χρόνο, πραγματικά δεδομένα και όχι τυχαίες ακολουθίες όπως συμβαίνει σε αυτή την εφαρμογή.

Βιβλιογραφία

- [1] Wikipedia contributors, *5G* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, [Online; accessed 24-February-2020], 2020. [Online]. Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/5G>.
- [2] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Elsevier Science, 2018, isbn: 9780128143247. [Online]. Available: <https://books.google.gr/books?id=C5poDwAAQBAJ>.
- [3] S. Ahmadi, “Chapter 1 - 5G Network Architecture,” in *5G NR*, S. Ahmadi, Ed., Academic Press, 2019, pp. 1–194, isbn: 978-0-08-102267-2. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102267-2.00001-4>. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081022672000014>.
- [4] X. Lin, J. Li, R. Baldemair, J. T. Cheng, S. Parkvall, D. C. Larsson, H. Koorapaty, M. Frenne, S. Falahati, A. Grovlen, and K. Werner, “5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 30–37, 2019.
- [5] P. Jonsson, S. Carson, J.S. Sethi, M. Arvedson, R. Svenningsson, P. Lindberg, K. Ohman, and P. Hedlund, “Ericsson Mobility Report,” en, p. 26, Nov. 2017. [Online]. Available: https://www.key4biz.it/wp-content/uploads/2017/11/Ericsson-Mobility-Report_Nov-2017_con-Focus-Wester-Europe.pdf.
- [6] M. F. Hossain, A. U. Mahin, T. Debnath, F. B. Mosharrof, and K. Z. Islam, “Recent research in cloud radio access network (C-RAN) for 5G cellular systems - A survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 139, pp. 31–48, 2019, issn: 1084-8045. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.04.019>. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804519301432>.
- [7] *Radio access network*, en, Page Version ID: 949482466, Apr. 2020. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Radio_access_network&oldid=949482466 (visited on 06/10/2020).
- [8] A. Checko, H. L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. S. Berger, and L. Dittmann, “Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, 2015.
- [9] M. F. Hossain, A. Mahin, T. Debnath, F. Mosharrof, and K. Islam, “Recent Research in Cloud Radio Access Network (C-RAN) for 5G Cellular Systems - A Survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 139, Apr. 2019. doi: [10.1016/j.jnca.2019.04.019](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.04.019).
- [10] “Common Public Radio Interface,” *Interface Specification*, vol. V6.0, 2013.
- [11] “Open Base Station Architecture Initiative,” *BTS System Reference Document*, vol. V2.0, 2006.
- [12] Wikipedia contributors, *Διαμόρφωση σήματος* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, [Online; accessed 6-February-2020], 2020. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%94%CE%B9%CE%B1%CE%BC%CF%8C%CF%81%CF%86%CF%89%CF%83%CE%B7_%CF%83%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82.
- [13] X. N. K. Παναγιώτης Γ. Κωπτής, *Δορυφορικές Επικοινωνίες*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2016, isbn: 9789604183791.

- [14] Π.-Δ. Μ. Α. Παναγιώτης Γ. Κωπτής, *Ασύρματες Επικοινωνίες*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2017, isbn: 9789604182688.
- [15] A. Delmède, C. Browning, A. Farhang, N. Marchetti, L. E. Doyle, R. D. Koilpillai, L. P. Barry, and D. Venkitesh, “Performance analysis of analog IF over fiber fronthaul link with 4G and 5G coexistence,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 3, pp. 174–182, 2018.
- [16] Sinisa Krajnovic, *ConTEL 2017*, en-US, Library Catalog: www.contel.hr. [Online]. Available: <http://www.contel.hr/2017/keynote-speakers/sinisa-krajnovic/> (visited on 06/10/2020).
- [17] R. Agrawal, A. Bedekar, T. Kolding, and V. Ram, “Cloud RAN challenges and solutions,” en, *Annals of Telecommunications*, vol. 72, no. 7-8, pp. 387–400, Aug. 2017, issn: 0003-4347, 1958-9395. doi: 10.1007/s12243-017-0584-5. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s12243-017-0584-5> (visited on 06/10/2020).
- [18] V. Chamola, S. Patra, N. Kumar, and M. Guizani, “FPGA for 5G: Re-configurable Hardware for Next Generation Communication,” *IEEE Wireless Communications*, pp. 1–8, 2020.
- [19] J. Dang, L. Wu, and Z. Zhang, “OFDM Systems for Optical Communication with Intensity Modulation and Direct Detection,” en, in *Optical Fiber and Wireless Communications*, R. Roka, Ed., InTech, Jun. 2017, isbn: 978-953-51-3275-2 978-953-51-3276-9. doi: 10.5772/intechopen.68199. [Online]. Available: <http://www.intechopen.com/books/optical-fiber-and-wireless-communications/ofdm-systems-for-optical-communication-with-intensity-modulation-and-direct-detection> (visited on 06/24/2020).
- [20] S. Ahmadi, “Xilinx Solutions and Enablers for Next-Generation Wireless Systems,” en, p. 32, 2016.
- [21] Ν. Μήτρου, *Ψηφιακές Επικοινωνίες: Συνοπτική θεωρία και εργαστήριο*. 2015, isbn: 9789606032998.
- [22] *Using OFDM signals in wireless communication*, en. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/discovery/ofdm.html>.
- [23] *Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN*, en. [Online]. Available: http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/webHelp/Subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm_basicprinciplesoverview.html.
- [24] *ISI vs ICI | difference between ISI and ICI*, en. [Online]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/ISI-vs-ICI.html>.
- [25] S. Mohseni, *Study the Carrier Frequency Offset (CFO) for Wireless OFDM*. Electronic Theses and Dissertations. 438, 2013.
- [26] *The basics of 5G's modulation, OFDM*, en. [Online]. Available: <https://www.5gtechnologyworld.com/the-basics-of-5gs-modulation-ofdm/> (visited on 04/16/2020).