

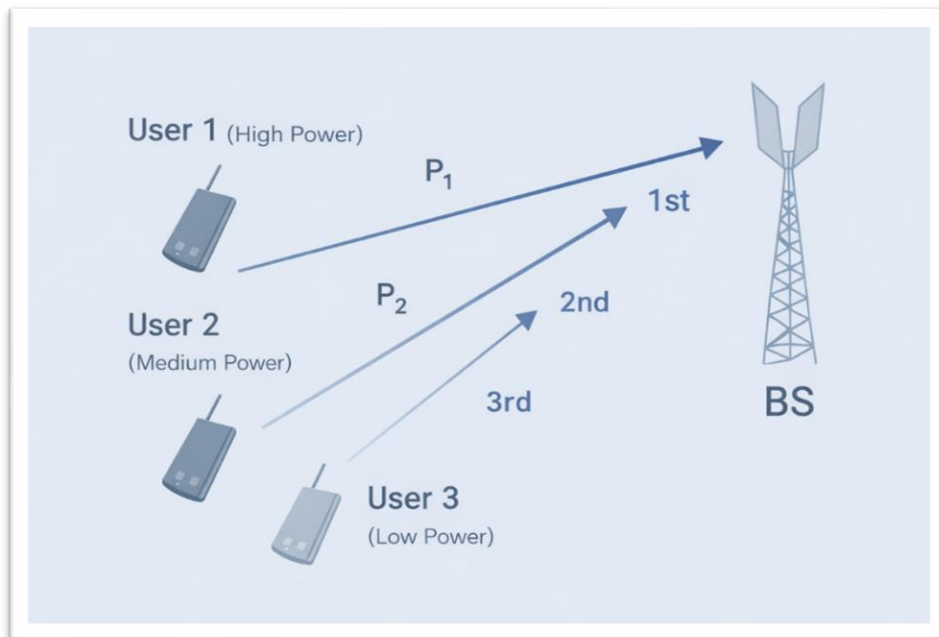


ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κριτήρια σειράς ανίχνευσης χρηστών σε συστήματα μη
ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης»



Του φοιτητή
Μαραγκού Φίλιππου
Αρ. Μητρώου: 518226.

Επιβλέπων
Αθανάσιος Ιωσηφίδης
Καθηγητής

Ημερομηνία 23/01/2026

Τίτλος Δ.Ε.: «Κριτήρια σειράς ανίχνευσης χρηστών σε συστήματα μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης»

Κωδικός Δ.Ε.: 25192

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Μαραγκός Φίλιππος
Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Αθανάσιος Ιωσηφίδης
Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 20/03/2025
Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 23/01/2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία φοιτητή Μαραγκού Φίλιππου που την εκπόνησε/αν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Ο λόγος που επέλεξα αυτή την πτυχιακή εργασία ήταν για να μελετήσω σε βάθος τα συστήματα OMA και NOMA καθώς και όλες τις παραλλαγές τους με σκοπό να έχω καλύτερη κατανόηση τους και να μπορέσω να ενταχθώ σε κάποια ερευνητική ομάδα για να εξελίξουμε παραπάνω τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών. Επίσης, θα ήθελα να βελτιώσω τις ικανότητές μου πάνω στον προγραμματισμό και τη συνεργασία με άτομα που έχουν σχέση με το αντικείμενο, αποσκοπώντας στο να αναπτύξω καλύτερη εμπειρία στον εργασιακό και στον πανεπιστημιακό χώρο.

Περίληψη

Η τεχνολογία της μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA) αποτελεί μία από τις πλέον υποσχόμενες καινοτομίες στη σύγχρονη ασύρματη επικοινωνία, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων μέσω υπέρθεσης σημάτων στον τομέα της ισχύος. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές ορθογωνικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης (OMA), όπου οι διαθέσιμοι πόροι κατανέμονται αποκλειστικά ανά χρήστη, η NOMA αξιοποιεί τις διαφορές στις συνθήκες καναλιού και στα επίπεδα ισχύος, επιτυγχάνοντας σημαντική βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας και της συνολικής χωρητικότητας του συστήματος.

Κεντρικό ζήτημα στη λειτουργία των συστημάτων NOMA αποτελεί ο καθορισμός της σειράς ανάχνευσης των χρηστών, δηλαδή της ακολουθίας με την οποία τα σήματα αποκωδικοποιούνται στον δέκτη μέσω της τεχνικής διαδοχικής απαλοιφής παρεμβολών (Successive Interference Cancellation – SIC). Η επιλογή της κατάλληλης σειράς ανάχνευσης επηρεάζει καθοριστικά την απόδοση του συστήματος, καθώς συνδέεται άμεσα με τον βαθμό παρεμβολής μεταξύ των χρηστών, την πιθανότητα σφάλματος (BER και PER), την αξιοπιστία της μετάδοσης και τη διασφάλιση δίκαιης κατανομής των πόρων.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάζονται και αναλύονται διάφορα κριτήρια καθορισμού της σειράς ανάχνευσης, όπως το επίπεδο ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, η ποιότητα του καναλιού, η απόσταση του χρήστη από τον σταθμό βάσης και οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Μέσω εκτεταμένων προσομοιώσεων σε περιβάλλον MATLAB και συγκριτικής ανάλυσης με συστήματα OMA, αξιολογείται η επίδραση παραμέτρων όπως ο λόγος ισχύος, το SNR, ο ρυθμός μετάδοσης και η εισαγωγή τεχνικών κωδικοποίησης (π.χ. LDPC) στη συνολική απόδοση του συστήματος.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η κατάλληλη επιλογή της σειράς ανάχνευσης μπορεί να μειώσει σημαντικά τον ρυθμό σφαλμάτων και να βελτιώσει την ενεργειακή και φασματική αποδοτικότητα, διατηρώντας παράλληλα ικανοποιητικό επίπεδο δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών. Συνολικά, η εργασία αναδεικνύει τη NOMA ως βασικό υποψήφιο μηχανισμό για τα μελλοντικά δίκτυα 5G και 6G, συμβάλλοντας στην κατανόηση και τη βελτιστοποίηση των τεχνικών ανάχνευσης χρηστών σε σύγχρονα ασύρματα συστήματα.

«Κριτήρια σειράς ανίχνευσης χρηστών σε συστήματα μη
ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης»

(User detection order criteria in non-orthogonal multiple access
systems)

«Φίλιππος Μαραγκός»

(Philippos Maragos)

Abstract

Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) technology is one of the most promising innovations in modern wireless communication, as it allows the simultaneous service of many users in the same frequency spectrum by superimposing signals in the power domain. In contrast to traditional orthogonal multiple access (OMA) techniques, where the available resources are allocated exclusively per user, NOMA exploits differences in channel conditions and power levels, achieving a significant improvement in spectral efficiency and overall system capacity.

A central issue in the operation of NOMA systems is the determination of the user detection order, i.e. the sequence in which the signals are decoded at the receiver through the technique of successive interference cancellation (SIC). The selection of the appropriate detection sequence has a decisive impact on the system performance, as it is directly linked to the degree of interference between users, the error probability (BER and PER), the reliability of the transmission and ensuring fair resource allocation.

In the context of this work, various criteria for determining the detection sequence are examined and analyzed, such as the power level of the received signal, the channel quality, the user's distance from the base station and the quality of service (QoS) requirements. Through extensive simulations in a MATLAB environment and comparative analysis with OMA systems, the effect of parameters such as power ratio, SNR, transmission rate and the introduction of coding techniques (e.g. LDPC) on the overall system performance is evaluated.

The results demonstrate that the appropriate selection of the detection sequence can significantly reduce the error rate and improve energy and spectral efficiency, while maintaining a satisfactory level of fairness between users. Overall, the work highlights NOMA as a key candidate mechanism for future 5G and 6G networks, contributing to the understanding and optimization of user detection techniques in modern wireless systems.

Ευχαριστίες

Για τη σύνταξη και την ανάπτυξη αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, Αθανάσιο Ιωσηφίδη, που βοήθησε σημαντικά με την επίλυση αποριών που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου για την υποστήριξη που έλαβα από αυτούς καθώς και την αδελφή μου που βοήθησε στην εποπτεία και τη βελτίωσή της εργασίας αυτής. Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Βασίλη Βάσσιο, ο οποίος μου παρείχε υλικό εκμάθησης για το περιβάλλον πάνω στο οποίο ανέπτυξα την προσομοίωση της εργασίας μου .

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract	v
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Εικόνων	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Συντομογραφίες.....	xii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	13
1.1 Στόχοι της πτυχιακής εργασίας	13
1.2 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν.....	2
1.3 Βασικά συμπεράσματα.....	2
1.4 Οργάνωση πτυχιακής εργασίας.....	3
1.5 Επίλογος.....	3
Κεφάλαιο 2ο: Ιστορική Αναδρομή της Εξέλιξης των Τηλεπικοινωνιών.....	4
2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Αρχικά στάδια επικοινωνίας και η εξέλιξή της.....	4
2.3 Κώδικας Morse (1830–1844).....	4
2.4 Το τηλέφωνο και η γενίκευση της φωνητικής επικοινωνίας (1876)	5
2.4.1 Πώς λειτουργούσε;	5
2.5 Η ασύρματη εποχή: ραδιόφωνο, τηλεόραση και δορυφόροι (1895–1960).....	6
2.6 Η ψηφιοποίηση και η θεωρία της πληροφορίας (Shannon, 1948)	7
2.6.1 Ορολογία που εισήχθη.....	7
2.6.2 Εφαρμογές.....	7
2.7 Τρανζίστορ και η εποχή των ημιαγωγών	7
2.7.1 Τρανζίστορ	8
2.7.2 Η εποχή των ημιαγωγών.....	8
2.8 Πολλαπλή πρόσβαση, πολυπλεξία και τα όρια του φάσματος.....	9
2.9 Η εμφάνιση και η εξέλιξη του OFDM (1960s–2000s).....	9
2.10 Η άνοδος του Διαδικτύου και των ψηφιακών δικτύων	9
2.11 Η δημιουργία και εξάπλωση της ιδέας NOMA (2000s–σήμερα)	10
2.12 Σύγχρονα πρότυπα και συνδυασμοί OFDM και NOMA	10

2.13	Επιπτώσεις, κοινωνικές και οικονομικές διαστάσεις	11
Κεφάλαιο 3ο:	NOMA συστήματα	11
3.1	Τί είναι το NOMA.....	11
3.2	Τι παρέχει το NOMA σύστημα	12
3.2.1	Ο ρόλος της NOMA στο 5G και 6G.....	13
3.2.2	Χαρακτηριστικά του NOMA συστήματος	13
3.2.3	Δομή του NOMA συστήματος	14
3.3	Παραλλαγές και Τεχνολογίες Υλοποίησης	16
3.3.1	Συνεργατικό NOMA σύστημα	16
3.3.2	MIMO-NOMA συστήματα	17
3.3.3	Κατάταξη Χρηστών.....	18
3.3.4	Υβριδική Πολλαπλή Πρόσβαση.....	19
3.4	Εφαρμογές και Αναδυόμενες Κατευθύνσεις.....	20
3.4.1	NOMA σε Δίκτυα 5G και 6G.....	20
3.4.2	Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και Επικοινωνία Τύπου Μηχανής.....	20
3.4.3	Οχηματικές και Δορυφορικές Επικοινωνίες.....	22
3.4.4	Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου.....	22
3.4.5	Τεχνητή Νοημοσύνη και Βαθιά Μάθηση στο NOMA.....	22
3.5	Απόδοση του NOMA	22
3.5.1	Δικαιοσύνη και Ομαδοποίηση Χρηστών.....	23
3.5.2	Ενεργειακή Απόδοση.....	23
3.5.3	Ασφάλεια και Απόρρητο	23
3.5.4	Τυποποίηση και Πρακτική Εφαρμογή.....	24
Κεφάλαιο 4ο:	Συστήματα OFDM και η ενσωμάτωσή τους με NOMA.....	24
4.1	Εισαγωγή.....	24
4.2	Τί είναι το OFDM.....	24
4.3	Θετικά χαρακτηριστικά του OFDM.....	25
4.4	Αρνητικά χαρακτηριστικά του OFDM	26
4.5	Τι τεχνικές χρησιμοποιεί το OFDM- FFT/IFFT.....	27
4.5.1	Cyclic Prefix.....	28
4.5.2	Κώδικες	30
4.5.3	Clipping, Filtering, Tone Reservation, Active Noise Extension	30
4.6	Εφαρμογές του OFDM σε σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών	31
4.7	Μελλοντικές προοπτικές και εξελίξεις στο OFDM	31
4.8	Επίλογος.....	31

Κεφάλαιο 5ο:	Ανάλυση του συστήματος.....	33
5.1	Χωρητικότητα καναλιού (Shannon).....	36
5.2	RISP	37
Κεφάλαιο 6ο:	Ανάλυση Κώδικα-Διάγραμμα Ροής.....	39
6.1	Βασικός κώδικας	39
6.2	Διάγραμμα Ροής.....	39
6.2.1	Πρώτη εκδοχή του κώδικα: basic model	41
6.3	Βελτιωμένη εκδοχή του κώδικα.....	48
6.4	Τρίτη εκδοχή του κώδικα: Bitrate addition	49
6.5	Τέταρτη εκδοχή του κώδικα : Packet Error Rate	51
6.6	Εισαγωγή του LDPC	52
Κεφάλαιο 7ο:	Θεωρητική ανάλυση και αποτελέσματα	63
7.1	Θεωρητικό BER	63
7.2	Επίδραση του λόγου ισχύος	64
7.3	Εισαγωγή του ρυθμού πληροφορίας/Bitrate	65
7.3.1	Συσχέτιση BER και PER	67
7.4	Εισαγωγή του LDPC και των LLR's.....	67
7.5	Αποτελέσματα τελικού κώδικα	68
Κεφάλαιο 8ο:	Συμπεράσματα της έρευνας	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		72

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 Τηλέγραφος και Κώδικας Morse [27]	5
Εικόνα 2.2 Σκίτσο αναπαράστασης του πρώτου τηλεφώνου [28]	6
Εικόνα 2.3 Διάφοροι τύποι τρανζίστορ [26]	8
Εικόνα 3.1 Αναπαράσταση ενός NOMA συστήματος και ο διαμοιρασμός των πόρων του [24]	12
Εικόνα 3.2 Μοντέλο Επικοινωνίας NOMA με Χρήση Τεχνικής SIC για Αποκωδικοποίηση Σήματος Χρηστών [25]	16
Εικόνα 3.3 Μπλοκ διάγραμμα ενός MIMO-NOMA συστήματος ασύρματων επικοινωνιών.....	17
Εικόνα 3.4 Νοοτροπία της υβριδικής πολλαπλής πρόσβασης	20
Εικόνα 3.5 Σύστημα NOMA	21
Εικόνα 4.1 Απεικόνιση ενός OFDM	25
Εικόνα 4.2 Κλασικό FDM με Guard Bands και OFDM χωρίς Guard Bands	26
Εικόνα 4.3 Block Διάγραμμα Συστήματος OFDM.....	28
Εικόνα 4.4 Απεικόνιση συμβόλων OFDM με εισαγωγή κυκλικού προθέματος (cyclic prefix) και χρονικό διάστημα προστασίας (guard interval), που εξασφαλίζουν την ορθογωνιότητα των υποφερουσών και την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ συμβόλων.	29
Εικόνα 6.1 Διάγραμμα ροής κώδικα	40
Εικόνα 7.1 Σύγκριση BER σε σχέση με το SNR του ισχυρού χρήστη (4-4 & 16-16 QAM).....	63
Εικόνα 7.2 Σύγκριση BER σε σχέση με το SNR του ισχυρού χρήστη 4&16 QAM και 16&4 QAM...	64
Εικόνα 7.3 BER vs SNR με την εισαγωγή του λόγου ισχύος	65
Εικόνα 7.4 BER vs SNR με εισαγωγή Bitrate.....	65
Εικόνα 7.5 BER vs SNR με εισαγωγή Bitrate για 4&16 QAM και 16&4 QAM.....	66
Εικόνα 7.6 Εισαγωγή του Packet Error Rate.....	66
Εικόνα 7.7 PER και χρήση BER	67
Εικόνα 7.8 Σύγκριση ASP, ISP και RISP χαμηλό και μεσαίο throughput.....	68
Εικόνα 7.9 Σύγκριση ASP, ISP και RISP υψηλό throughput	69
Εικόνα 7.10 Σύγκριση του OMA και του NOMA σε χαμηλές τιμές του α	69
Εικόνα 7.11 Σύγκριση του OMA και του NOMA σε πιο υψηλότερες τιμές του α	70

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Σύγκριση NOMA και OMA	14
Πίνακας 2 Σύγκριση OFDM με άλλες τεχνικές πολυπλεξίας	26
Πίνακας 3 Σύνοψη Clipping/Filtering/TR/ANE	30
Πίνακας 4 Σύγκριση ISP και ISP για δύο χρήστες [11]	38

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
IoT	Internet of Things
OMA	Orthogonal Multiple Access
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
SIC	Successive Interference Cancellation
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications
QoS	Quality of Service
3GPP	3 rd Generation Partnership Project
NR	New Radio
CSI	Channel State Information
D2D	Device to Device
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	massive Machine-Type Communications
XR	Extended Reality
ML	Machine Learning
DL	Deep Learning
BER	Bits Error Rate
PER	Packet Error Rate
SNR	Signal-Noise Ratio
PAPR	Peak to Average Ratio
FFT	Fast Fourier transform
IFFT	Inverse fast Fourier transform
NB-IoT	Narrowband-IoT

SINR	Signal to Interference Noise Ratio
ISP	Instantaneous Signal Power
ASP	Average Signal Power
RISP	Relative Instantaneous Signal Power

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για πιο γρήγορες, πιο αξιόπιστες και πιο «έξυπνες» επικοινωνίες έχει γίνει ιδιαίτερα έντονη, καθώς οι χρήστες, οι συσκευές και οι εφαρμογές αυξάνονται με ραγδαίο ρυθμό. Από τα πρώτα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας μέχρι και τις σύγχρονες υλοποιήσεις 5G και πλέον με το βλέμμα στραμμένο προς το 6G, η τεχνολογία προσπαθεί συνεχώς να βρει τρόπους να εκμεταλλευτεί καλύτερα το διαθέσιμο φάσμα και να προσφέρει υπηρεσίες που να καλύπτουν τις ολοένα και πιο αυστηρές απαιτήσεις. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, τεχνικές όπως η Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση (NOMA) και η χρήση OFDMA έχουν τραβήξει το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας αλλά και της βιομηχανίας. Ο λόγος είναι απλός: υπόσχονται καλύτερη αξιοποίηση πόρων, παρέχουν τη δυνατότητα να εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα και βελτιώνουν στη συνολική εμπειρία των δικτύων. Παράλληλα, όμως, φέρνουν μαζί τους και νέες προκλήσεις, όπως θέματα πολυπλοκότητας, ενεργειακής απόδοσης και ασφάλειας.

1.1 Στόχοι της πτυχιακής εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει συνταχθεί για να μελετήσει την αποστολή δεδομένων με τη χρήση της τεχνικής του OFDMA για τον ισάξιο διαμοιρασμό των πόρων σε πολλαπλούς χρήστες σε συνδυασμό με τη διαδοχική ακύρωση παρεμβολής, με αποτέλεσμα να επαληθεύσει την καταλληλότητα της χρήσης τους στην ανάπτυξη των νέων δικτύων τηλεπικοινωνίας καθώς και να βοηθήσει στην περαιτέρω κατανόηση των τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης. Η Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση (NOMA) αντιπροσωπεύει μια παραδειγματική τεχνική στην τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης, προσφέροντας σημαντικά οφέλη στη φασματική απόδοση, τη συνδεσιμότητα και τη δικαιοσύνη σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές OMA. Οι δυνατότητές της έχουν αναγνωριστεί τόσο στον ακαδημαϊκό χώρο όσο και στη βιομηχανία, με εφαρμογές που αναπτύσσονται στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), στις επικοινωνίες οχημάτων, στα δορυφορικά δίκτυα, στην ασφάλεια φυσικού επιπέδου και στην έξυπνη διαχείριση πόρων. Ωστόσο, παραμένουν αρκετά προβλήματα, όπως η πολυπλοκότητα του SIC, η δίκαιη αντιμετώπιση σε διαφορετικά δίκτυα, οι συμβιβασμοί ενεργειακής απόδοσης και τα τρωτά σημεία ασφαλείας. Αυτά τα ζητήματα πρέπει να αντιμετωπιστούν μέσω καινοτόμων αλγορίθμων, έξυπνων στρατηγικών βελτιστοποίησης και προσεγγίσεων σχεδιασμού σε πολλαπλά επίπεδα, προτού το NOMA μπορέσει να γίνει μια κοινότυπη λύση για τα δίκτυα επόμενης γενιάς. Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι να βασιστεί στο υπάρχον σύνολο εργασιών εστιάζοντας στο πλαίσιο βελτιστοποίησης και καλύτερης προσέγγισης αυτών των συστημάτων και τεχνικών.

Αντιμετωπίζοντας τα εντοπισμένα κενά, η παρούσα εργασία στοχεύει να παρέχει νέες γνώσεις σχετικά με το σχεδιασμό και την ανάπτυξη αξιόπιστων και ασφαλών συστημάτων NOMA.

1.2 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη αυτής της εργασίας είναι τα εξής:

- Google Scholar, για την εύρεση πηγών άντλησης πληροφοριών υπό μορφής ερευνητικών άρθρων, επιστημονικών περιοδικών κ.α.
- Χρήση των διαφανειών παράδοσης διδασκαλίας από τον υπεύθυνο καθηγητή καθώς και των συνεργαζομένων στα σχετικά αντικείμενα συναδέλφων.
- Χρήση του περιβάλλοντος της Matlab, για την ανάπτυξη του κώδικα της προσομοίωσης που πραγματοποιήσα.
- Οδηγός χρήσης λογισμικού του περιβάλλοντος της Matlab.
- Συγγράμματα σχετικά με το αντικείμενο που κλήθηκε να εκπονήσω την πτυχιακή μου εργασία, τα οποία προέρχονται από την βιβλιοθήκη του Ιδρύματος.
- Βάση δεδομένων της IEEE για περαιτέρω αναζήτηση συγγραμμάτων και ερευνών για το αντικείμενο της εργασίας.

1.3 Βασικά συμπεράσματα

Από την ανάλυση και τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής, γίνεται σαφές ότι η Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση (NOMA) αποτελεί μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνικές για τη μετάβαση σε δίκτυα πέμπτης και έκτης γενιάς. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους Ορθογώνιας Πολλαπλής Πρόσβασης (OMA), η NOMA αξιοποιεί τον τομέα της ισχύος για να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα περισσότερους χρήστες στον ίδιο πόρο συχνότητας και χρόνου, κάτι που οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας και της συνολικής συνδεσιμότητας. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ένα περιβάλλον όπου η αύξηση των συσκευών, των εφαρμογών IoT και των υπηρεσιών χαμηλής καθυστέρησης δημιουργούν ολοένα και πιο απαιτητικές συνθήκες για τα δίκτυα. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση και τη βιβλιογραφική ανασκόπηση επιβεβαιώνουν ότι η NOMA μπορεί να συμβάλει αποφασιστικά στη βελτίωση των βασικών δεικτών επίδοσης των δικτύων, όπως είναι η ικανότητα εξυπηρέτησης μεγάλου αριθμού χρηστών, η αποδοτική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και η καλύτερη ισορροπία μεταξύ χρηστών με διαφορετικές συνθήκες καναλιού. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα αυτά συνοδεύονται και από ορισμένα σοβαρά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν, όπως η αυξημένη πολυπλοκότητα της διαδικασίας διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολής (SIC), οι συμβιβασμοί στην κατανάλωση ενέργειας, καθώς και τα πιθανά κενά σε θέματα ασφάλειας. Η εργασία ανέδειξε ότι για την πραγματική και μαζική υιοθέτηση της NOMA απαιτείται περαιτέρω έρευνα σε επίπεδο αλγορίθμων, βελτιστοποίησης πόρων και υβριδικών λύσεων που να συνδυάζουν NOMA με άλλες τεχνολογίες όπως τα συστήματα πολλαπλών κεραιών (MIMO), οι τεχνικές μηχανικής μάθησης και οι ευέλικτες διαμορφώσεις καναλιού. Επιπλέον, η εφαρμογή της σε εξειδικευμένα σενάρια, όπως οι επικοινωνίες οχημάτων, τα δορυφορικά δίκτυα και οι έξυπνες πόλεις, αναδεικνύει νέες ερευνητικές προοπτικές αλλά και προκλήσεις που σχετίζονται με την κλιμάκωση και την αξιοπιστία. Συνολικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η NOMA δεν αποτελεί απλώς μία ακόμα τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, αλλά μια βασική υποδομή που μπορεί να καθορίσει τη μορφή των μελλοντικών ασύρματων δικτύων. Η παρούσα εργασία καταδεικνύει τόσο τα οφέλη όσο και τα ανοιχτά ζητήματα γύρω από την τεχνολογία αυτή και επιχειρεί να δώσει ένα βήμα παραπέρα στην κατανόηση του πώς μπορούν να σχεδιαστούν ασφαλή, αξιόπιστα και αποδοτικά συστήματα για την κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων αναγκών επικοινωνίας.

1.4 Οργάνωση πτυχιακής εργασίας

Το παρόν κείμενο πραγματεύεται τη μελέτη και ανάλυση σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων με έμφαση στις τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης NOMA και OFDM. Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι στόχοι της πτυχιακής εργασίας, τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα βασικά συμπεράσματα και η συνολική της οργάνωση. Στη συνέχεια, γίνεται μια εκτενής ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών, από τα πρώτα στάδια επικοινωνίας έως τα σύγχρονα ψηφιακά δίκτυα, αναδεικνύοντας σημαντικά ορόσημα, όπως ο κώδικας Morse, το τηλέφωνο, η ψηφιοποίηση, το OFDM και η εμφάνιση της τεχνολογίας NOMA. Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των συστημάτων NOMA, των χαρακτηριστικών, των παραλλαγών, των εφαρμογών τους στα δίκτυα 5G και 6G και της απόδοσής τους, καθώς και των συστημάτων OFDM και της ενσωμάτωσής τους με το NOMA. Στα επόμενα κεφάλαια πραγματοποιείται ανάλυση του συστήματος, θεωρητική προσέγγιση βασικών εννοιών όπως η χωρητικότητα καναλιού, καθώς και λεπτομερής ανάλυση του κώδικα και των διαγραμμάτων ροής. Τέλος, παρουσιάζονται τα θεωρητικά αποτελέσματα, η αξιολόγηση της απόδοσης μέσω δεικτών όπως BER και PER, η εισαγωγή τεχνικών κωδικοποίησης LDPC, καθώς και τα τελικά συμπεράσματα της μελέτης, συνοδευόμενα από την ανάλογη βιβλιογραφία που ανατρέξαμε για την σύνθεση της πτυχιακής εργασίας.

1.5 Επίλογος

Η συνεχής αύξηση της κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας που τροφοδοτείται από τη σημαντική αύξηση των έξυπνων συσκευών, των εφαρμογών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και των αναδυόμενων βιομηχανιών, έχει αυξήσει τις απαιτήσεις στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας. Οι παραδοσιακές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, όπως η πολλαπλή πρόσβαση με χρονική διαίρεση (TDMA), πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (FDMA) και η ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (OFDMA), έχουν θέσει καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη των ασυρμάτων συστημάτων έως και τα συστήματα 4G. Ωστόσο, αυτά τα ορθογώνια συστήματα δεν καλύπτουν τις αυστηρές απαιτήσεις των συστημάτων πέμπτης γενιάς (5G) και πέραν αυτών, όσον αφορά τη φασματική απόδοση, την τεράστια συνδεσιμότητα και την πλέον απαιτούμενη χαμηλή καθυστέρηση. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, η μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA) έχει αναδειχθεί ως την βασική τεχνολογία αντιμετώπισης. Σε αντίθεση με τις συμβατικές ορθογώνιες μεθόδους που κατανέμουν τους διακριτούς πόρους στους χρήστες, η NOMA επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να μοιράζονται τους ίδιους πόρους χρόνου-συχνότητας, αξιοποιώντας τον τομέα ισχύος. Αυτή η αρχή επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων, με τους δέκτες να χρησιμοποιούν τη διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (SIC) για τον διαχωρισμό των υπερτιθέμενων σημάτων. Αξιοποιώντας τις διαφορές στις συνθήκες των καναλιών-χρηστών, το NOMA μπορεί να εξυπηρετήσει μεγαλύτερο αριθμό χρηστών εντός ενός δεδομένου εύρους ζώνης, βελτιώνοντας έτσι τη φασματική απόδοση. Επιπλέον το NOMA ευθυγραμμίζεται πλήρως με τους γενικούς στόχους των δικτύων 5G και 6G συμπεριλαμβανομένης της βελτιωμένης κινητής ευρυζωνικής σύνδεση (eMBB), των μαζικών επικοινωνιών τύπου μηχανής (mMTC) και των εξαιρετικά αξιόπιστων επικοινωνιών χαμηλής καθυστέρησης (URLLC).

Κεφάλαιο 2ο: Ιστορική Αναδρομή της Εξέλιξης των Τηλεπικοινωνιών

2.1 Εισαγωγή

Η ανάγκη για επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις υπήρξε κινητήριος δύναμη για τεχνολογικές καινοτομίες από την αρχαιότητα έως σήμερα. Η πορεία των τηλεπικοινωνιών περιλαμβάνει πολλά στάδια, μερικά από τα οποία είναι οι οπτικές και ακουστικές μέθοδοι των αρχαίων πολιτισμών, η ηλεκτρική εποχή του 19ου αιώνα, η ασύρματη μετάβαση μέσω ραδιοκυμάτων, η ψηφιακή και πληροφοριακή επανάσταση του 20ού αιώνα και στη σύγχρονη εποχή, η επικοινωνία υλοποιείται μέσω των ψηφιακών, πολυπλεξικών ασύρματων συστημάτων υψηλής απόδοσης, όπως το OFDM και το NOMA.

2.2 Αρχικά στάδια επικοινωνίας και η εξέλιξή της

Η επικοινωνία εξ αποστάσεως άρχισε με απλούς για τη σημερινή εποχή τρόπους, με τη χρήση του καπνού από φωτιές, με τη χρήση σηματοφόρων, τυμπάνων και με άλλα οπτικά-ακουστικά συστήματα. Αυτές οι μέθοδοι, αν και περιορισμένες στο εύρος και στην αξιοπιστία, αποτελούν τα πρώτα βήματα στην ιστορία της μετάδοσης πληροφορίας. Σταδιακά εμφανίστηκαν πιο σύνθετα συστήματα όπως οι οπτικοί τηλεγράφοι (semaphore lines) στην Ευρώπη του 18ου αιώνα, που αποτελούσαν δίκτυα πυλώνων με κινούμενους βραχίονες για τη μετάδοση κωδικοποιημένων μηνυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις με ταχύτητα πολύ μεγαλύτερη από τα παλιά οπτικοακουστικά σήματα.

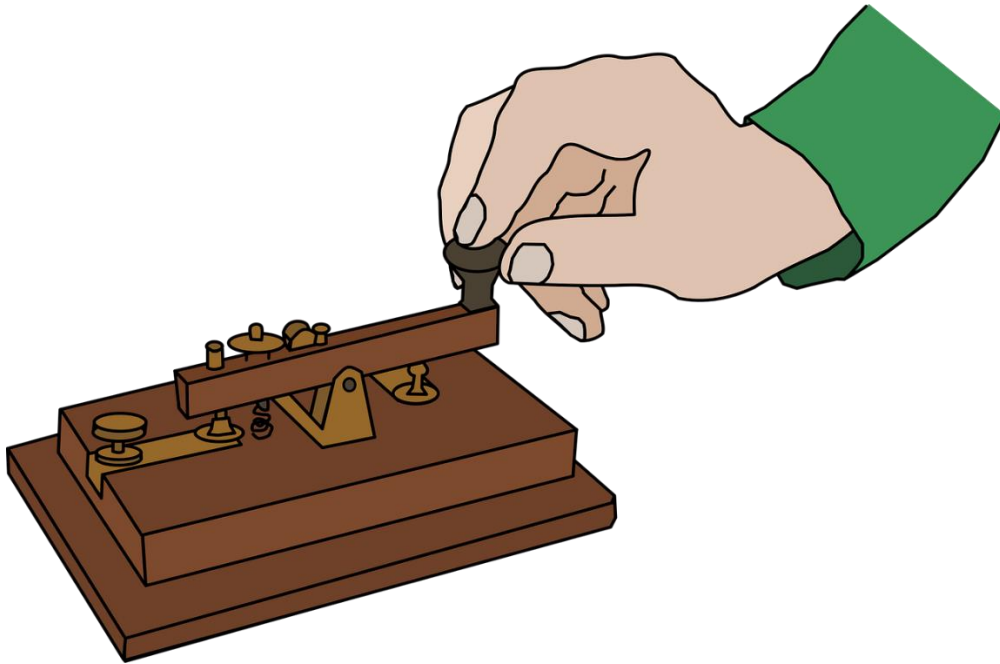
2.3 Κώδικας Morse (1830–1844)

Ο Κώδικας Μορς (Morse code) είναι ένα από τα πρώτα συστήματα κωδικοποίησης της ανθρώπινης γλώσσας για μετάδοση μέσω ηλεκτρικών σημάτων — και έχει μια πολύ ενδιαφέρουσα ιστορία. Ο Samuel Finley Breese Morse (1791–1872), Αμερικανός εφευρέτης και ζωγράφος, ανέπτυξε τον κώδικα τη δεκαετία του 1830, μαζί με τον Alfred Vail, ενώ εργάζεται πάνω στον τηλεγράφο — μια συσκευή που μετέδιδε μηνύματα μέσω ηλεκτρικών παλμών πάνω σε καλώδια. Η πρώτη επιτυχής αποστολή μηνύματος μέσω τηλεγράφου έγινε το 1844 από την Ουάσινγκτον στο Βαλτιμόρη, με το διάσημο μήνυμα: “What hath God wrought” (“Τι έπραξε ο Θεός”). Ο Morse και ο Vail συνειδητοποίησαν ότι για να λειτουργήσει ο τηλεγράφος, έπρεπε να βρουν έναν τρόπο να κωδικοποιούν γράμματα και αριθμούς με σύντομα και μακρά σήματα (τελείες και παύλες, ή “dots and dashes”).

Οι τελείες (·) αντιπροσώπευαν σύντομα ηλεκτρικά σήματα. Οι παύλες (–) αντιπροσώπευαν μακρύτερα σήματα.

Ο Alfred Vail είχε την ιδέα να αντιστοιχίσει τις πιο σύντομες ακολουθίες στα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα γράμματα της αγγλικής γλώσσας (π.χ. το “E” → · και το “T” → –). Αυτό έκανε τον κώδικα πολύ αποδοτικό, ιδίως για ταχυδακτυλογράφους τηλεγράφου. Αργότερα, αναπτύχθηκε μια διεθνής εκδοχή (International Morse Code, 1851), καθώς οι πρώτες εκδόσεις είχαν μικρές διαφορές μεταξύ χωρών. Η διεθνής μορφή είναι αυτή που χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα σε:

- Ραδιοεπικοινωνίες (ιδίως σε ναυτικό και αεροπορία),
- Ραδιοερασιτέχνες (HAM radio),
- Καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (π.χ. SOS = ··· — ···).



Εικόνα 2.1 Τηλέγραφος και Κώδικας Morse [27]

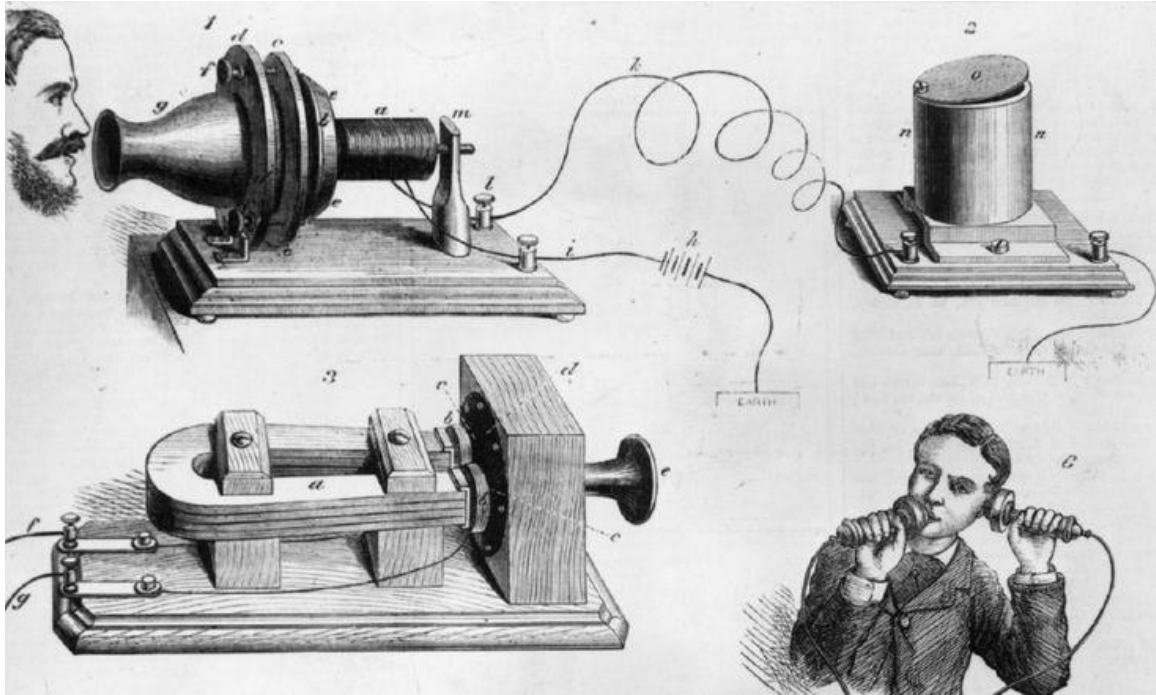
Η παραπάνω εικόνα δείχνει ένα χειροκίνητο κλειδί τηλέγραφου (Morse key), το κλασικό όργανο που χρησιμοποιούσαν οι τηλεγραφετές για να στέλνουν μηνύματα σε κώδικα Μορς. Μια ανθρώπινη παλάμη πατάει τον μοχλό του μηχανισμού, ο οποίος είναι στερεωμένος πάνω σε ξύλινη βάση. Με το πάτημα και το άφημα του πλήκτρου παράγονται τα σύντομα και μακρά ηλεκτρικά σήματα (τελείες και παύλες) που μεταδίδεται μέσω τηλεγραφικών γραμμών. Ολόκληρη η συσκευή έχει ένα παραδοσιακό, μηχανικό σχέδιο με μεταλλικά εξαρτήματα και ρυθμιστικές βίδες, αντιπροσωπεύοντας τον τρόπο με τον οποίο γινόταν η επικοινωνία πριν από την εμφάνιση των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών.

2.4 Το τηλέφωνο και η γενίκευση της φωνητικής επικοινωνίας (1876)

Η εφεύρεση του τηλεφώνου αποδίδεται στον Alexander Graham Bell το 1876, ο οποίος κατάφερε να μετατρέψει ηχητικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα και να τα ανασυνθέσει στην άλλη άκρη της γραμμής. Η διάδοση του τηλεφώνου άλλαξε τον τρόπο επιχειρηματικής και προσωπικής επικοινωνίας, και οδήγησε στην ανάπτυξη δικτύων μεταγωγής (switching) και τηλεφωνικών εταιρειών.

2.4.1 Πώς λειτουργούσε;

Η βασική ιδέα του Bell ήταν ότι οι δονήσεις της φωνής μπορούσαν να μετατραπούν σε ηλεκτρικά σήματα χρησιμοποιώντας ένα διάφραγμα (ένα είδος μικροφώνου), τα σήματα του οποίου θα είχαν την ικανότητα να ταξιδεύουν μέσω ενός σύρματος και στο τέλος του σύρματος αυτού θα υπήρχε ένα άλλο αντίστοιχο διάφραγμα το οποίο θα αναπαρήγαγε τον ήχο. Αυτό αποτέλεσε τη βάση όλων των μελλοντικών τηλεφωνικών συστημάτων.



Εικόνα 2.2 Σκίτσο αναπαράστασης του πρώτου τηλεφώνου [28]

Στην παραπάνω παρουσιάζεται ένα ιστορικό, τεχνικό σκίτσο από τα πρώτα πειραματικά συστήματα τηλεφώνου του 19ου αιώνα. Στο σχέδιο φαίνονται διάφορα μηχανικά και ηλεκτρομαγνητικά εξαρτήματα μιας πρώιμης τηλεφωνικής συσκευής – όπως διάφραγμα, ηλεκτρομαγνήτες, πηνία και ηχητικοί χωνιάδες – τα οποία χρησιμοποιούνταν για τη μετατροπή του ήχου σε ηλεκτρικό σήμα και το αντίστροφο. Δεξιά στο κάτω μέρος απεικονίζεται ένας άντρας που κρατάει στα χέρια του μια πρώιμη τηλεφωνική συσκευή και τη χρησιμοποιεί για να μιλήσει και να ακούσει. Στο αριστερό μέρος φαίνεται επίσης ένα πρόσωπο που μιλάει σε έναν μεγάλο χωνί-μικρόφωνο. Το σκίτσο συνολικά αποτυπώνει την πρώιμη τεχνολογία του τηλεφώνου, με τις συσκευές να έχουν ξύλινη βάση, μεταλλικούς μηχανισμούς και καλώδια που συνδέουν τα μέρη μεταξύ τους. Πρόκειται για μια χαρακτηριστική απεικόνιση των πρώτων προσπαθειών μεταφοράς της ανθρώπινης φωνής μέσω ηλεκτρικών κυμάτων.

2.5 Η ασύρματη εποχή: ραδιόφωνο, τηλεόραση και δορυφόροι (1895–1960)

Ο Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894) ήταν Γερμανός φυσικός. Εργάστηκε πάνω στις θεωρίες του James Clerk Maxwell, ο οποίος είχε προβλέψει μαθηματικά ότι το φως και ο ηλεκτρισμός είναι μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στο διάστημα μεταξύ 1886 και 1888, ο Hertz παρήγαγε και ανίχνευσε ραδιοκύματα στο εργαστήριό του, δημιουργώντας έναν πομπό (μια απλή σπινθηριστή διάταξη) που έστελνε ηλεκτρικούς παλμούς στον αέρα και έναν δέκτη (με ένα μεταλλικό δαχτυλίδι και ένα μικρό κενό σπινθήρα) που ανίχνευσε τα κύματα αυτά. Έτσι απέδειξε πειραματικά ότι οι εξισώσεις του Maxwell ήταν σωστές — τα ραδιοκύματα υπήρχαν και μπορούσαν να ταξιδεύουν μέσα στον αέρα χωρίς καλώδιο. Σημαντικό γεγονός έλαβε χώρα το 1901 όπου ο Marconi πραγματοποίησε την πρώτη δια-ατλαντική ραδιομετάδοση, αποδεικνύοντας τη δυνατότητα παγκόσμιας ασύρματης σύνδεσης. Κατά τον 20ό αιώνα, η ραδιοφωνία (πρώτες ραδιοφωνικές εκπομπές 1920s), η τηλεόραση (πρώτες τηλεοπτικές μεταδόσεις τη δεκαετία του 1920–30) και οι δορυφορικές επικοινωνίες (από τη δεκαετία του 1960 και μετά) επέτρεψαν τη μετάδοση φωνής, ήχου και εικόνας σε μαζική κλίμακα. Η εργασία των Hertz και Marconi οδήγησε στην εφεύρεση του ραδιοφώνου, της τηλεόρασης και όλων των

ασύρματων τεχνολογιών (Wi-Fi, Bluetooth, κινητά) και άνοιξε τον δρόμο για παγκόσμια επικοινωνία χωρίς καλώδια.

2.6 Η ψηφιοποίηση και η θεωρία της πληροφορίας (Shannon, 1948)

Ο Claude Elwood Shannon (1916–2001) ήταν Αμερικανός μαθηματικός, ηλεκτρολόγος μηχανικός και κρυπτογράφος και θεωρείται «πατέρας της θεωρίας της πληροφορίας», καθώς έθεσε τα μαθηματικά θεμέλια της ψηφιακής επικοινωνίας. Το 1948, δημοσίευσε στο περιοδικό Bell System Technical Journal το ιστορικό άρθρο: “A Mathematical Theory of Communication”, στο οποίο ο Shannon διατύπωσε για πρώτη φορά ένα ενιαίο μαθηματικό μοντέλο επικοινωνίας, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε είδους σύστημα μετάδοσης πληροφορίας (από τηλέφωνο και ραδιόφωνο μέχρι υπολογιστές και δίκτυα δεδομένων).

2.6.1 Ορολογία που εισήχθη

Μέσα στο παραπάνω ιστορικό άρθρο που δημοσίευσε ο Shannon, διατύπωσε και μερικούς ορολογίες που χρησιμοποιούμε μέχρι και σήμερα. Μερικοί από αυτούς είναι το Bit, η εντροπία πληροφορίας και η χωρητικότητα του καναλιού.

- Bit

Το Bit αποτελεί τη βασική μονάδα πληροφορίας, η οποία μπορεί να έχει μόνο δύο καταστάσεις, είτε 0 είτε 1. Με αυτόν τον τρόπο κάθε πληροφορία μπορεί να εκφραστεί ψηφιακά, ανεξάρτητα από τη μορφή της (ήχος, κείμενο, εικόνα) .

- Εντροπία πληροφορίας

Η εντροπία μετράει το ποσό της αβεβαιότητας ή της πληροφορίας που περιέχει ένα μήνυμα. Όσο πιο απρόβλεπτο είναι ένα μήνυμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η εντροπία του. Παρέχει τα θεμέλια για συμπίεση δεδομένων, αφού ο Shannon έδειξε πόσο μπορεί θεωρητικά να συμπίεστεί ένα σήμα χωρίς απώλειες.

- Χωρητικότητα του καναλιού

Πρόκειται για το μέγιστο ρυθμό με τον οποίο μπορούμε να μεταδώσουμε πληροφορία μέσω ενός καναλιού με παρουσία θορύβου. Είναι το θεωρητικό όριο ταχύτητας επικοινωνίας ενός συστήματος (π.χ. γραμμή τηλεφώνου, δίκτυο, Wi-Fi).

2.6.2 Εφαρμογές

Η θεωρία του Shannon έδωσε τα μαθηματικά εργαλεία για τη κωδικοποίηση και τη συμπίεση σημάτων και τη διόρθωση σφαλμάτων (error correction). Επίσης οδήγησε σε πρακτικές τεχνικές όπως οι κώδικες Turbo, LDPC, Hamming και Reed-Solomon, επιπλέον αλγόριθμους συμπίεσης όπως το ZIP, MP3 και JPEG. Τέλος, θεμελίωσε τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή εποχή, κάνοντας δυνατή την ψηφιακή τηλεφωνία, το Ίντερνετ, τα κινητά δίκτυα και γενικά τη σύγχρονη πληροφορική.

2.7 Τρανζίστορ και η εποχή των ημιαγωγών

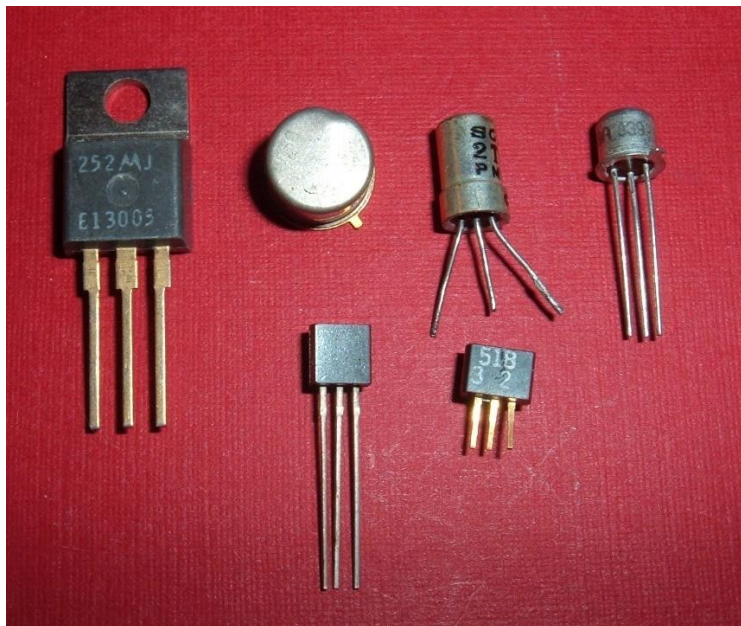
Η δημιουργία των τρανζίστορ και η έναρξη της εποχής των ημιαγωγών αποτελούν ίσως το πιο σημαντικό ορόσημο στην ιστορία της τεχνολογίας μετά τον ηλεκτρισμό. Από αυτά ξεκίνησε η ψηφιακή εποχή, οι υπολογιστές, τα κινητά, το Ίντερνετ, τα μικροκυκλώματα και ουσιαστικά όλος ο σύγχρονος κόσμος. Πριν τη δημιουργία του τρανζίστορ το 1947, όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές χρησιμοποιούσαν λυχνίες κενού, οι οποίες ήταν μεγάλες σε όγκο, ήταν ευαίσθητες, είχαν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας

το οποίο συνεπάγεται από μεγάλη εκπομπή θερμότητας και τελικά χαλούσαν πολύ εύκολα. Έτσι οι επιστήμονες αναζητούσαν κάτι πιο μικρό, οικονομικό και ταυτοχρόνως ανθεκτικό, το οποίο βρέθηκε στους ημιαγωγούς. Το 1947 ο John Bardeen, ο Walter Brattain και ο William Shockley ανακάλυψαν το τρανζίστορ.

2.7.1 Τρανζίστορ

Το τρανζίστορ είναι μια διάταξη ημιαγωγού στερεάς κατάστασης με τρεις ή περισσότερους ακροδέκτες που χρησιμοποιείται στην ηλεκτρονική για την ενίσχυση, τη σταθεροποίηση τάσης, τη λειτουργία ως διακόπτης και άλλες εφαρμογές. Βασικά, λειτουργεί σαν ένας ελεγχόμενος διακόπτης που μπορεί να ρυθμίζει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της τάσης που του εφαρμόζεται. Είναι κατασκευασμένο από ημιαγωγικά υλικά όπως το πυρίτιο ή και το γερμάνιο. Αποτελείται από τρεις περιοχές ημιαγωγών, οι οποίες μπορούν να είναι τύπου P και N, δημιουργώντας δομές όπως PNP ή NPN και λειτουργεί όπως ένας ελεγχόμενος διακόπτης, όπου ένα σήμα ελέγχου (στη βάση) ρυθμίζει τη ροή του ρεύματος μεταξύ των άλλων δύο ακροδεκτών. Χρησιμοποιείται για ενίσχυση σήματος αυξάνοντας την ισχύ ενός ηλεκτρικού σήματος. Ακόμη έχει λειτουργία ως διακόπτης όπου μπορεί να ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί τη ροή ρεύματος, σαν ένα ηλεκτρονικό κλειδί. Επιπλέον, λειτουργεί ως σταθεροποιητής τάσης διατηρώντας μια σταθερή τάση σε ένα κύκλωμα και τέλος διαμορφώνει τη συχνότητα σε κυκλώματα που παράγουν ή επεξεργάζονται σήματα διαφορετικών συχνοτήτων.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται διαφορετικοί τύποι τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα.



Εικόνα 2.3 Διάφοροι τύποι τρανζίστορ [26]

2.7.2 Η εποχή των ημιαγωγών

Η εφεύρεση του τρανζίστορ το 1947 σηματοδότησε την απαρχή της εποχής των ημιαγωγών, μιας τεχνολογικής επανάστασης που άλλαξε ριζικά την ηλεκτρονική και την επικοινωνία. Τα ημιαγωγικά υλικά, όπως το γερμάνιο και αργότερα το πυρίτιο, επέτρεψαν την κατασκευή εξαρτημάτων πολύ μικρότερων, αποδοτικότερων και πιο οικονομικών σε σχέση με τις παλαιότερες λυχνίες κενού. Η δυνατότητα των ημιαγωγών να λειτουργούν ως ενισχυτές, διακόπτες και λογικά στοιχεία έκανε δυνατή

τη δημιουργία μικρών, αξιόπιστων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων με μικρή κατανάλωση ενέργειας και υψηλή ταχύτητα. Αυτή η πρόοδος οδήγησε στα τέλη της δεκαετίας του 1950 στην ανάπτυξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ICs) από τους Jack Kilby και Robert Noyce, τα οποία ενσωμάτωσαν πολλά τρανζίστορ σε ένα μόνο τσιπ. Τα ICs αποτέλεσαν το θεμέλιο για τους πρώτους μικροεπεξεργαστές και τις σύγχρονες υπολογιστικές συσκευές, ανοίγοντας τον δρόμο για την περαιτέρω σμίκρυνση και εξέλιξη των ηλεκτρονικών συστημάτων. Έτσι, η εποχή των ημιαγωγών καθόρισε ολόκληρη τη σύγχρονη ψηφιακή τεχνολογία, από τους υπολογιστές και τα κινητά τηλέφωνα μέχρι το Διαδίκτυο και την τεχνητή νοημοσύνη.

2.8 Πολλαπλή πρόσβαση, πολυπλεξία και τα όρια του φάσματος

Οι τηλεπικοινωνίες βασίζονται στη δυνατότητα πολλών χρηστών να μοιράζονται τα ίδια φυσικά μέσα μετάδοσης (π.χ. φάσμα συχνοτήτων, οπτική ίνα). Επειδή τα μέσα αυτά είναι περιορισμένα, η κοινή τους χρήση απαιτεί προηγμένες τεχνικές που εξασφαλίζουν ότι τα δεδομένα των χρηστών δεν θα παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Έτσι αναπτύχθηκαν οι τεχνικές πολυπλεξίας (multiplexing), που χωρίζουν τον διαθέσιμο πόρο σε μικρότερα τμήματα, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση ανεξάρτητων ροών πληροφορίας. Παραδείγματα είναι η πολυπλεξία κατά συχνότητα (FDM), κατά χρόνο (TDM) και κατά κώδικα (CDM), που αποτέλεσαν θεμέλιο για τις τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας από τα πρώτα δίκτυα μέχρι τα 3G. Παράλληλα αναπτύχθηκαν και τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης (multiple access), οι οποίες επιτρέπουν σε πολλούς χρήστες να χρησιμοποιούν έναν κοινό πόρο με τρόπο οργανωμένο και αποδοτικό. Ωστόσο, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι περιορισμένο και περιζήτητο, ιδιαίτερα με την έκρηξη των ασύρματων συσκευών. Γι' αυτό η αποτελεσματική του αξιοποίηση αποτελεί κεντρικό ζήτημα στις τηλεπικοινωνίες. Η συνεχής εξέλιξη των μεθόδων πολυπλεξίας και πρόσβασης έχει οδηγήσει σε σύγχρονες τεχνικές, όπως η OFDM και η NOMA, που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση παρεμβολών και στη μέγιστη φασματική απόδοση.

2.9 Η εμφάνιση και η εξέλιξη του OFDM (1960s–2000s)

Η τεχνολογία OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα βήματα στην εξέλιξη των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών, καθώς επέτρεψε τη μετάδοση δεδομένων με υψηλή αξιοπιστία σε περιβάλλοντα με έντονη πολυδιαδρομική διάδοση. Η βασική της αρχή στηρίζεται στον διαχωρισμό του διαθέσιμου φάσματος σε μεγάλο αριθμό ορθογώνιων υποφερουσών, οι οποίες μπορούν να μεταφέρουν παράλληλες ροές δεδομένων χωρίς να προκαλούν μεταξύ τους παρεμβολές. Έτσι, το OFDM καθιερώθηκε ως η κυρίαρχη τεχνική σε συστήματα Wi-Fi, LTE, DVB και πολλά σύγχρονα ασύρματα πρότυπα, χάρη στην υψηλή φασματική του αποδοτικότητα και την ανθεκτικότητά του σε παρεμβολές και εξασθένιση σήματος. Ιστορικά, η τεχνολογία αυτή θεμελιώθηκε από σημαντικές δημοσιεύσεις που αφορούσαν την πολυπλεξία κατά συχνότητα και την εφαρμογή του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT/FFT) σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Οι ερευνητικές αυτές εργασίες καθόρισαν τις μαθηματικές βάσεις της ορθογωνικότητας, της διαχείρισης εύρους ζώνης και της αποτελεσματικής χρήσης του φάσματος. Στο πλαίσιο αυτό, οι παρακάτω παραπομπές σχετίζονται με τις θεμελιώδεις μελέτες που συνέβαλαν στη διαμόρφωση της τεχνολογίας OFDM:

2.10 Η άνοδος του Διαδικτύου και των ψηφιακών δικτύων

Η μετάβαση από τα αναλογικά συστήματα επικοινωνίας στα ψηφιακά αποτελεί κομβικό σημείο στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών. Η δημιουργία του ARPANET στα τέλη της δεκαετίας του 1960 από την DARPA υπήρξε η πρώτη πρακτική υλοποίηση ενός δικτύου μεταγωγής πακέτων, μιας επαναστατικής

ιδέας που επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων σε μικρά, ανεξάρτητα πακέτα αντί συνεχών ροών. Στη δεκαετία του 1970, η επιτυχής διασύνδεση πολλαπλών κόμβων του ARPANET έδειξε ότι ήταν εφικτή η δημιουργία ενός δικτύου ικανού να παραμένει λειτουργικό ακόμη και σε περίπτωση αστοχίας τμημάτων του. Κατά τη δεκαετία του 1980 και του 1990, η υιοθέτηση των πρωτοκόλλων TCP/IP ως καθολικό πρότυπο δικτύωσης έφερε πραγματική ενοποίηση μεταξύ διαφορετικών υπολογιστικών και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Τα πρωτόκολλα αυτά εξασφάλισαν αξιόπιστη, δρομολογήσιμη και επεκτάσιμη ανταλλαγή δεδομένων, ανοίγοντας τον δρόμο για τη δημιουργία του σύγχρονου Παγκόσμιου Ιστού (World Wide Web) το 1991 από τον Tim Berners-Lee. Η σύγκλιση τεχνολογιών – τηλεφωνίας, υπολογιστών και δικτύων δεδομένων– καθόρισε μια νέα εποχή στις τηλεπικοινωνίες. Οι αυξανόμενες ανάγκες για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, πολυπλοκότερες υπηρεσίες και παγκόσμια συνδεσιμότητα προκάλεσαν συνεχή πίεση για βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας και ανάπτυξη πιο εξελιγμένων τεχνικών μετάδοσης. Αυτή η απαίτηση αποτελεί μία από τις κινητήριες δυνάμεις για την εμφάνιση προχωρημένων τεχνολογιών όπως η OFDM, τα ευρυζωνικά δίκτυα και, πιο πρόσφατα, τα συστήματα NOMA.

2.11 Η δημιουργία και εξάπλωση της ιδέας NOMA (2000s–σήμερα)

Με την εκρηκτική αύξηση των ασύρματων συσκευών και την άνοδο του Internet of Things (IoT), οι τηλεπικοινωνιακές υποδομές βρέθηκαν αντιμέτωπες με την ανάγκη υποστήριξης τεράστιου αριθμού ταυτόχρονων συνδέσεων. Η απαίτηση αυτή, σε συνδυασμό με τη σταθερή πίεση για βελτιστοποίηση της φασματικής αποδοτικότητας, ανέδειξε τα όρια των παραδοσιακών ορθογώνιων σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης όπως το OFDMA, όπου κάθε χρήστης κατέχει αυστηρά διαχωρισμένο χρόνο ή συχνότητα. Σε αυτό το πλαίσιο, από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 άρχισαν να προτείνονται μη-ορθογώνια σχήματα, οδηγώντας τελικά στη συστηματική διαμόρφωση της έννοιας του Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA). Η βασική του καινοτομία είναι ότι επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται ταυτόχρονα τον ίδιο χρόνο–συχνοτικό πόρο, διαχωρίζοντας τις ροές δεδομένων είτε βάσει της ισχύος είτε βάσει κώδικα. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα δεν «σπαταλά» πόρους σε χρήστες με διαφορετικές συνθήκες καναλιού, αλλά αξιοποιεί τις διαφορές αυτές για βελτίωση της συνολικής απόδοσης. Κατά την τελευταία δεκαετία, παγκόσμια ερευνητική προσπάθεια, διαμόρφωσε το θεωρητικό υπόβαθρο και τις πρακτικές προσεγγίσεις του NOMA, παρουσιάζοντας παραλλαγές όπως το power-domain NOMA και το code-domain NOMA, καθώς και τις βασικές προκλήσεις που πρέπει να επιλυθούν, όπως η αυξημένη πολυπλοκότητα δέκτη, η δίκαιη κατανομή ισχύος και η αποτελεσματική διαχείριση παρεμβολών.

2.12 Σύγχρονα πρότυπα και συνδυασμοί OFDM και NOMA

Στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα, το OFDM παραμένει η κυρίαρχη τεχνολογία στο φυσικό επίπεδο, καθώς προσφέρει υψηλή ανθεκτικότητα στην πολυδιαδρομική διάδοση και σημαντική φασματική αποδοτικότητα. Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων, αποτελεί τη βάση για πρότυπα όπως LTE, 5G NR, Wi-Fi και DVB. Στο πλαίσιο των μελλοντικών δικτύων, η ερευνητική κοινότητα έχει επικεντρωθεί στον συνδυασμό OFDM με τεχνικές NOMA, ώστε να αυξηθεί περαιτέρω η χωρητικότητα και η δυνατότητα ταυτόχρονης εξυπηρέτησης χρηστών. Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση είναι το Power-Domain NOMA πάνω σε OFDM (Power Domain NOMA και OFDM), όπου πολλοί χρήστες μοιράζονται την ίδια υποφέρουσα ή ομάδα υποφερουσών, αλλά με διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Επιπλέον, έχουν προταθεί και υλοποιηθεί συνδυασμοί NOMA με τεχνολογίες MIMO, ώστε να αξιοποιηθούν τόσο ο χωρικός διαχωρισμός των χρηστών όσο και η μη-ορθογωνιότητα στον χώρο ισχύος ή κώδικα. Οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν θεωρητικά να προσφέρουν σημαντικά οφέλη σε σενάρια υπερπύκνων δικτύων, massive

IoT και ultra-reliable low-latency επικοινωνιών. Ωστόσο, η πρακτική ενσωμάτωση NOMA σε πλαίσια βασισμένα σε OFDM συνοδεύεται από τεχνικές προκλήσεις. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η ακριβής κατανομή ισχύος μεταξύ χρηστών, η ανάγκη για συγχρονισμό μεταξύ σημάτων διαφορετικής ισχύος και η αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου SIC, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας. Παρά τα εμπόδια, οι σύγχρονες έρευνες δείχνουν ότι οι υβριδικές λύσεις OFDM και NOMA αποτελούν βασικό υποψήφιο μηχανισμό για τα μελλοντικά δίκτυα 6G.

2.13 Επιπτώσεις, κοινωνικές και οικονομικές διαστάσεις

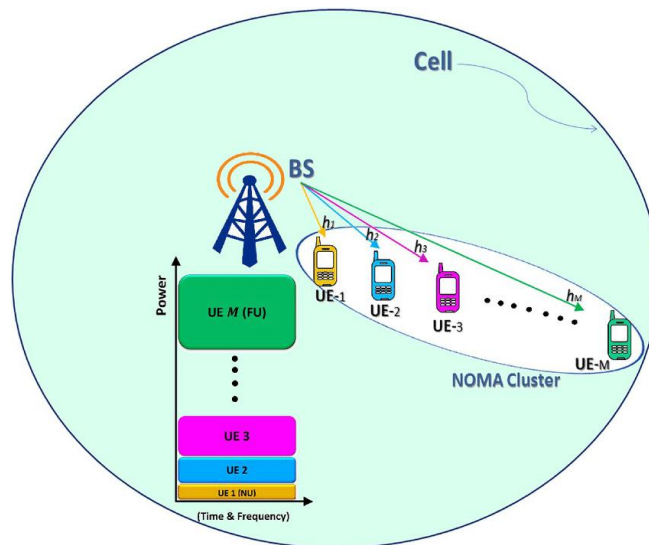
Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών και η μετάβαση από τα πρώτα ενσύρματα δίκτυα στην εποχή του Διαδικτύου, των κινητών επικοινωνιών και των ευρυζωνικών υπηρεσιών έχουν επιφέρει βαθύτατες κοινωνικές και οικονομικές μεταβολές. Σε οικονομικό επίπεδο, οι τηλεπικοινωνίες αποτέλεσαν κινητήρια δύναμη για την παγκοσμιοποίηση, επιτρέποντας στις επιχειρήσεις να λειτουργούν σε διεθνή κλίμακα, να συντονίζουν εφοδιαστικές αλυσίδες και να παρέχουν υπηρεσίες ανεξαρτήτως γεωγραφικών ορίων. Η ψηφιακή συνδεσιμότητα δημιούργησε νέες αγορές, θέσεις εργασίας και ολόκληρους κλάδους, όπως το ηλεκτρονικό εμπόριο, η τηλεργασία και η ψηφιακή οικονομία. Σε κοινωνικό επίπεδο, η ευρεία διάδοση κινητών συσκευών και διαδικτυακών πλατφορμών άλλαξε ριζικά τον τρόπο που οι άνθρωποι επικοινωνούν, ενημερώνονται και εκπαιδεύονται. Η πρόσβαση σε πληροφορίες έγινε άμεση και παγκόσμια, ενώ η χρήση κοινωνικών δικτύων διαμόρφωσε νέες μορφές κοινωνικής αλληλεπίδρασης και συμμετοχής. Παράλληλα, η εκπαίδευση επωφεληθήκε από την εξ αποστάσεως μάθηση και τα ψηφιακά εργαλεία, ανοίγοντας νέους δρόμους για διά βίου μάθηση. Ωστόσο, η ψηφιακή εποχή έφερε και σημαντικές προκλήσεις. Η ασφάλεια των δεδομένων, η προστασία του προσωπικού απορρήτου και η ψηφιακή ανισότητα μεταξύ περιοχών και κοινωνικών ομάδων αποτελούν κρίσιμα ζητήματα. Η μη ισότιμη πρόσβαση στην τεχνολογία ενισχύει κοινωνικές ανισότητες, ενώ η εξάρτηση από ψηφιακές υπηρεσίες καθιστά την κοινωνία πιο ευάλωτη σε κυβερνοαπειλές. Παρά τα εμπόδια, οι τηλεπικοινωνίες συνεχίζουν να αποτελούν θεμέλιο για την οικονομική ανάπτυξη και τη διαμόρφωση σύγχρονων κοινωνιών.

Κεφάλαιο 3ο: NOMA συστήματα

3.1 Τί είναι το NOMA

Η θεμελιώδης ιδέα του NOMA οφείλεται στη μη ορθογώνια κατανομή πόρων στους πολλαπλούς χρήστες εντός της ίδιας χρονικής-συχνοτικής σχισμής. Σε αντίθεση με τα άλλα OMA, όπου οι πόροι κατανέμονται ορθογώνια, το NOMA χρησιμοποιεί πολυπλεξία πεδίου ισχύος για να επιτύχει ταυτόχρονη μετάδοση σημάτων. Από την άλλη πλευρά του πομπού, τα σήματα που προορίζονται για διαφορετικούς χρήστες υπερτίθενται στον τομέα ισχύος, με τα επίπεδα ισχύος να κατανέμονται με βάση τις συνθήκες καναλιού των χρηστών. Συνήθως, οι χρήστες με κέρδη χαμηλότερης ισχύος καναλιού λαμβάνουν υψηλότερη ισχύ μετάδοσης, ενώ οι χρήστες με υψηλότερα κέρδη ισχύος λαμβάνουν χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης. Από την πλευρά του δέκτη, χρησιμοποιείται η τεχνική της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (SIC) για τον διαχωρισμό των σημάτων. Οι ισχυρότεροι χρήστες πρώτα αποκωδικοποιούν το σήμα που προορίζεται για τους ασθενέστερους χρήστες. Έπειτα, το αφαιρούν από το λαμβανόμενο σύνθετο σήμα και στη συνέχεια αποκωδικοποιούν τα δικά τους δεδομένα. Αυτή η διαδικασία διασφαλίζει ότι οι ασθενέστεροι χρήστες μπορούν να επιτύχουν αποδεκτή ποιότητα σήματος, ενώ οι ισχυρότεροι χρήστες αξιοποιούν τις ανώτερες συνθήκες του καναλιού τους για να

υποστηρίζουν το φορτίο αποκωδικοποίησης [1], [2]. Η ιδιαιτερότητα του NOMA σε σύγκριση με τα κλασικά OMA σχήματα είναι ότι δεν περιορίζεται σε μια αυστηρή κατανομή πόρων, αλλά αντιθέτως εκμεταλλεύεται την άνιση κατανομή ισχύος για να προσφέρει περισσότερη ευελιξία. Παρόλο που αυτή η επιλογή δημιουργεί μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην πλευρά του δέκτη, παρέχει αυξημένα οφέλη στη φασματική απόδοση και επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών, ακόμα και σε συνθήκες έντονου φόρτου. Η θεμελιώδης φιλοσοφία του NOMA είναι ότι το σήμα δεν χρειάζεται να κάνει υποχωρήσεις στην παραχώρηση των πόρων που είναι διαθέσιμοι (χρόνος, συχνότητα με αυστηρά ορθογώνιο τρόπο), αλλά μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά, βελτιστοποιώντας τη χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Αυτό καθιστά το NOMA μια επαναστατική τεχνική που αντιμετωπίζει τις προκλήσεις της αυξανόμενης ζήτησης δεδομένων στα δίκτυα νέας γενιάς 5G, 5G-advanced και μελλοντικά 6G.



Εικόνα 3.1 Αναπαράσταση ενός NOMA συστήματος και ο διαμοιρασμός των πόρων του [24]

Στην παραπάνω εικόνα, αναπαριστάται ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας NOMA (μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση), όπου BS, είναι ο βασικός σταθμός, ο οποίος είναι ένας πύργος με κύματα που συμβολίζουν την επικοινωνία και προέρχονται από αυτόν. Η περιοχή που είναι καλυμμένη με πράσινο χρώμα αναπαριστά την κυψέλη, τη βασική περιοχή κάλυψης του σήματος και είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία με τους χρήστες μέσα σε αυτό το εύρος. Ο όρος Noma Cluster (σύμπλεγμα NOMA) υποδεικνύει την ομαδοποίηση των χρηστών που εξυπηρετούνται από τους ίδιους πόρους του φάσματος αλλά με διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Ως UE θεωρούνται οι πολλαπλές συσκευές-χρήστες και UE2, UE3 είναι οι άλλοι χρήστες. Στο διάγραμμα ισχύος σε σχέση με το χρόνο και τη συχνότητα που συμπεριλαμβάνεται, φαίνεται πως είναι διαμοιρασμένοι οι διαθέσιμοι πόροι στους παραπάνω χρήστες, κάνοντας αισθητή την ολική αξιοποίησή τους από τους χρήστες χωρίς κάποια διαφοροποίηση πέρα από τα διαφορετικά επίπεδα ισχύος του κάθε χρήστη. Στην ουσία, το διάγραμμα παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο ένας σταθμός βάσης (BS) επικοινωνεί με πολλαπλούς χρήστες εντός μιας κυψέλης, χρησιμοποιώντας NOMA για να επιτρέψει σε αυτούς τους χρήστες να μεταδίδουν και να λαμβάνουν δεδομένα στην ίδια ζώνη συχνοτήτων αλλά με διαφορετικά επίπεδα ισχύος, χρονικές θυρίδες και κατανομές συχνοτήτων.

3.2 Τι παρέχει το NOMA σύστημα

Το NOMA σύστημα παρέχει ένα κλιμακωτό πλαίσιο, το οποίο μπορεί να εξυπηρετήσει ποικίλες απαιτήσεις υπηρεσιών, διασφαλίζοντας πάντα τη δίκαιη κατανομή των πόρων. Πρόσφατες μελέτες

έχουν τονίσει την ανωτερότητα του NOMA έναντι του OMA σε σενάρια που αφορούν ετερογενείς απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και πυκνές αναπτύξεις χρηστών, καθιστώντας το μια συναρπαστική επιλογή για ασύρματα συστήματα επόμενης γενιάς [1], [3]. Ένα ακόμη πλεονέκτημα που παρέχει το NOMA είναι η δυνατότητα αξιοποίησης της ήδη υπάρχουσας υποδομής χωρίς την ανάγκη μερικής ή ακόμη και πλήρους αντικατάστασης των τεχνολογιών OMA. Στην πράξη μπορεί να συνυπάρχει με τα ήδη υπάρχοντα πρότυπα, επεκτείνοντας τις δυνατότητές τους σε καταστάσεις με μεγάλη πυκνότητα χρηστών. Αυτό το χαρακτηριστικό το καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικό για τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας, καθώς η μετάβαση από τα δίκτυα παλαιότερης γενιάς στο 5G και το 6G απαιτεί αναβαθμίσεις που πρέπει να παραμείνουν συμβατές με τα ήδη εγκατεστημένα δίκτυα. Επιπλέον η ευελιξία του NOMA επιτρέπει την υποστήριξη ενός ευρέος φάσματος εφαρμογών, από διαδραστικές υπηρεσίες πολυμέσων μέχρι και εφαρμογές που αποτελούν σημαντικό παράγοντα στην ασφάλεια, αποδεικνύοντας ότι η τεχνολογία δεν περιορίζεται μόνο στη θεωρία, αλλά έχει και άμεση εμπορική αξία.

3.2.1 Ο ρόλος της NOMA στο 5G και 6G

Πέρα από τη θεωρητική απήχηση, η επιστημονική κοινότητα έχει αναγνωρίσει τις δυνατότητες του NOMA. Το έργο συνεργασίας τρίτης γενιάς (3GPP) έχει εξετάσει διάφορες παραλλαγές του NOMA στις συζητήσεις του για το Νέο Ραδιόφωνο 5G (NR) και η εν συνεχεία έρευνα συνεχίζει να αξιολογεί τον ρόλο του στις προσπάθειες τυποποίησης 6G [4]. Αυτή η συνεχόμενη αναγνώριση, τονίζει τη σημασία της NOMA όχι μόνο ως θεωρητικής κατασκευής, αλλά και ως πρακτικής λύσης έτοιμης για ανάπτυξη σε πραγματικό κόσμο. Συνοψίζοντας, το υπόβαθρο και το κίνητρο για την NOMA πηγάζουν από την ανάγκη της OMA βάσει των αυξανόμενων απαιτήσεων συνδεσιμότητας. Αξιοποιώντας αποτελεσματικά τους πόρους του φάσματος και επιτρέποντας την μαζική συνδεσιμότητα, η NOMA αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που έχει προσελκύσει σημαντικά όλο τον ακαδημαϊκό αλλά και τον βιομηχανικό χώρο τα τελευταία χρόνια. Η συνεισφορά του NOMA στο οικοσύστημα του 5G και 6G είναι ιδιαίτερα κρίσιμη επειδή παρέχει λύσεις σε προβλήματα που αφορούν τόσο τη χωρητικότητα όσο και την ποιότητα εμπειρίας. Στα δίκτυα 5G, η NOMA επιτρέπει την εξυπηρέτηση ταυτόχρονων χρηστών με διαφορετικά επίπεδα απαιτήσεων QoS, ενώ στο 6G αναμένεται να λειτουργήσει όπως το metaverse και οι ολογραμιακές επικοινωνίες (Holographic type communications). Η χρήση του NOMA στο πλαίσιο της μαζικής συνδεσιμότητας θα διευκολύνει την υλοποίηση εκατοντάδων συνδέσεων με μικρή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία. Επομένως, το NOMA δεν αποτελεί μόνο μια εξελικτική βελτίωση, αλλά μια τεχνολογική τομή με μακροχρόνιες επιπτώσεις στη βιομηχανία.

3.2.2 Χαρακτηριστικά του NOMA συστήματος

Ένα από τα πιο ελκυστικά χαρακτηριστικά του συστήματος NOMA είναι η ικανότητα του να ενισχύει ταυτόχρονα τη φασματική απόδοση και να βελτιώνει την αμεροληψία των χρηστών. Σε αντίθεση με το OMA, το οποίο μπορεί να αποκλείει ορισμένους χρήστες σε κακές συνθήκες καναλιού λόγω περιορισμένων πόρων, το NOMA εξασφαλίζει ότι όλοι οι χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα. Αυτό είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο σε σενάρια όπου ένας τεράστιος αριθμός συσκευών ανταγωνίζεται για περιορισμένους πόρους φάσματος, όπως στο IoT και στα δίκτυα αισθητήρων [3], [5]. Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό του NOMA είναι η ικανότητά του να προσαρμόζεται σε διαφορετικές κατηγορίες υπηρεσιών, από υψηλό ρυθμό δεδομένων έως και εφαρμογές σημαντικά χαμηλής καθυστέρησης. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά σχήματα, όπου κάθε χρήστης απαιτεί αποκλειστικούς πόρους, το NOMA επιτρέπει την ταυτόχρονη ικανοποίηση διαφόρων αναγκών, από την

ζωντανής μετάδοσης βίντεο (live streaming) υψηλής ανάλυσης μέχρι και την αποστολή απλών σημάτων αισθητήρων. Η δυνατότητα αυτή το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές όπου η ετερογένεια χρηστών είναι έντονη, όπως τα δίκτυα ενέργειας ή τα συστήματα υγειονομικής παρακολούθησης. Με αυτόν τον τρόπο, το NOMA δεν αποτελεί ένα εργαλείο βελτίωσης της φασματικής αποδοτικότητας, αλλά και μια τεχνολογία που ενισχύει τη δίκαιη πρόσβαση και την ποικιλομορφία των υπηρεσιών.

Πίνακας 1 Σύγκριση NOMA και OMA

	Θετικά Χαρακτηριστικά	Αρνητικά Χαρακτηριστικά
Χαρακτηριστικό	NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)	OMA (Orthogonal Multiple Access)
Φασματική Αποδοτικότητα	Πολύ υψηλή- πολλοί χρήστες μοιράζονται ταυτόχρονα το ίδιο εύρος ζώνης	Χαμηλότερη- κάθε χρήστης καταλαμβάνει ξεχωριστό κανάλι
Εξυπηρέτηση Χρηστών	Υποστηρίζει massive connectivity (IoT, 5G/6G)	Περιορισμένος αριθμός χρηστών ανά συχνότητα
Πολυπλοκότητα Δέκτη	Υψηλή- Απαιτεί SIC	Απλή υλοποίηση, χαμηλές απαιτήσεις
Δικαιοσύνη (Fairness)	Δυνατότητα καλύτερης εξυπηρέτησης χρηστών με χαμηλό SNR	Μπορεί να αδικεί χρήστες με χαμηλό SNR
Αντοχή σε παρεμβολές	Ευαίσθητη σε λάθη κατά την ακύρωση παρεμβολής	Πιο σταθερό, λιγότερα λάθη ακύρωσης
Εφαρμογές	5G, 6G, IoT, Massive MIMO	3G, LTE, Κλασσικά Δίκτυα

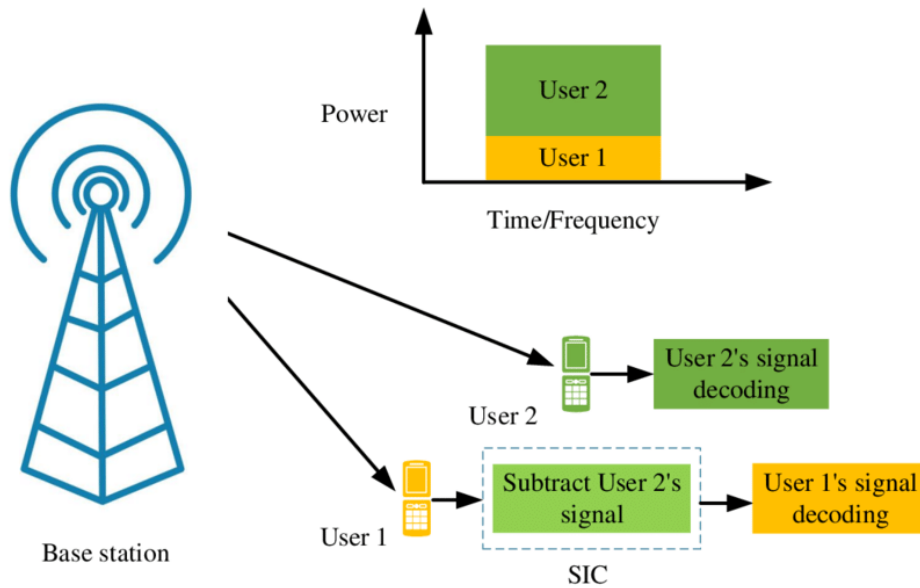
Όπως φαίνεται στον πρώτο πίνακα, η **OMA** (Orthogonal Multiple Access) κατανέμει τους πόρους σε διακριτές ορθογώνιες διαστάσεις (χρόνο, συχνότητα ή κώδικες). Αυτό έχει το πλεονέκτημα της **απλότητας υλοποίησης** και της **χαμηλής πολυπλοκότητας στον δέκτη**, καθιστώντας την ιδανική για παλαιότερα συστήματα (π.χ. GSM, UMTS). Ωστόσο, το μειονέκτημα της είναι ότι δεν αξιοποιεί πλήρως το φάσμα, με αποτέλεσμα **περιορισμένη φασματική αποδοτικότητα** και δυσκολία στην υποστήριξη μαζικής συνδεσιμότητας [1], [5], [7]. Η **NOMA** (Non-Orthogonal Multiple Access), αντίθετα, επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται το ίδιο εύρος συχνοτήτων και χρόνο, μέσω **υπέρθεσης σημάτων και κατανομής ισχύος**. Αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε **υψηλότερη φασματική αποδοτικότητα, δίκαιη κατανομή πόρων και υποστήριξη μαζικών συνδέσεων**, γεγονός που την καθιστά θεμελιώδη τεχνολογία για τα δίκτυα 5G και 6G [2],[4],[7]. Ωστόσο, η χρήση τεχνικών όπως το **Successive Interference Cancellation (SIC)** αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα και εισάγει κινδύνους λαθών στην αποκωδικοποίηση [7],[8], [9].

3.2.3 Δομή του NOMA συστήματος

Από την άποψη της βελτιστοποίησης, ο σχεδιασμός στρατηγικών κατανομής ισχύος είναι κεντρικός για την απόδοση του NOMA συστήματος. Τόσο η σταθερή κατανομή ισχύος όσο και η δυναμική κατανομή ισχύος έχουν διερευνηθεί στη βιβλιογραφία. Ενώ η σταθερή κατανομή ισχύος παρέχει απλότητα, συχνά αποτυγχάνει να αξιοποιήσει πλήρως τη χωρητικότητα του συστήματος. Αντίθετα, τα δυναμικά σχήματα βελτιστοποιούν την κατανομή ισχύος σύμφωνα με τις πληροφορίες κατάστασης καναλιού (CSI) και τις απαιτήσεις των χρηστών, οδηγώντας σε ανώτερη απόδοση όσον αφορά την απόδοση και τη δικαιοσύνη

[1], [2]. Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας είναι η σύζευξη και η ομαδοποίηση χρηστών. Δεδομένου ότι το NOMA βασίζεται σε διαφορές στις συνθήκες καναλιού για να επιτύχει κέρδη, η κατάλληλη ομαδοποίηση των χρηστών είναι απαραίτητη. Η σύζευξη χρηστών με σημαντικές ανισότητες καναλιού διασφαλίζει αποτελεσματική απόδοση SIC και μεγιστοποιεί τη φασματική απόδοση. Από την άλλη πλευρά, η μη βέλτιστη σύζευξη μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα παρεμβολών και δικαιοσύνης [8], [9]. Μαθηματικά, η περιοχή χωρητικότητας του NOMA έχει αποδειχθεί ότι κυριαρχεί αυστηρά σε αυτήν του OMA υπό ιδανικές συνθήκες, παρέχοντας θεωρητική δικαιολόγηση για την ανάπτυξή του σε σύγχρονα συστήματα [1]. Αυτά τα κέρδη, ωστόσο, επιτυγχάνονται κάνοντας ως υπόθεση ότι έχουμε ένα τέλειο SIC και του ακριβούς CSI, κάτι που δεν μπορεί πάντα να ισχύει στην πράξη. Έτσι, οι βασικές αρχές του NOMA θέτουν τις βάσεις για τη συνεχή έρευνα σε ισχυρές στρατηγικές σχεδιασμού που εξισορροπούν την απόδοση, τη δικαιοσύνη και την πολυπλοκότητα.

Η εικόνα 3.2 απεικονίζει ένα σύστημα επικοινωνίας που χρησιμοποιεί NOMA (Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση), εστιάζοντας στον τρόπο εφαρμογής της τεχνικής Ακύρωσης Παρεμβολών Σήματος (SIC) για την αποκωδικοποίηση σημάτων από πολλαπλούς χρήστες. Το γράφημα πάνω δεξιά δείχνει ένα διάγραμμα Χρόνου/Συχνότητας έναντι Ισχύος. Στον Χρήστη 1 έχει εκχωρηθεί χαμηλότερο επίπεδο ισχύος (πράσινο μπλοκ), ενώ στον Χρήστη 2 έχει εκχωρηθεί υψηλότερο επίπεδο ισχύος (πορτοκαλί μπλοκ). Αυτή η οπτική αναπαράσταση υποδεικνύει ότι στους χρήστες έχουν εκχωρηθεί διαφορετικά επίπεδα ισχύος στο ίδιο μπλοκ πόρων χρόνου/συχνότητας, το οποίο αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του NOMA. Τα βέλη προέρχονται από τον σταθμό βάσης προς τον Χρήστη 1 και τον Χρήστη 2, που αντιπροσωπεύουν τα ασύρματα σήματα που μεταδίδονται στους χρήστες. Ο Χρήστης 1 και ο Χρήστης 2 απεικονίζουν κινητές συσκευές, οι οποίες λαμβάνουν αυτά τα σήματα. Ο δεύτερος χρήστης ξεκινά αποκωδικοποιώντας το σήμα, το οποίο είναι το δικό του. Ο πρώτος χρήστης αποκωδικοποιεί πρώτα το σήμα του δεύτερου χρήστη χρησιμοποιώντας SIC (Ακύρωση Παρεμβολής Σήματος). Αυτή είναι μια τεχνική όπου ο πρώτος χρήστης, αφού λάβει και τα δύο σήματα, ακυρώνει το σήμα του Χρήστη 2 για να ανακτήσει το δικό του σήμα. Μετά την αφαίρεση του σήματος του Χρήστη 2, ο Χρήστης 1 μπορεί να αποκωδικοποιήσει με επιτυχία το δικό του σήμα. Υπάρχει μια ενότητα με ετικέτα για το SIC, που δείχνει ότι ο πρώτος χρήστης εκτελεί την αφαίρεση σήματος από το σήμα του δεύτερου χρήστη για να του επιτρέψει να αποκωδικοποιήσει αποτελεσματικά το δικό του σήμα.



Εικόνα 3.2 Μοντέλο Επικοινωνίας NOMA με Χρήση Τεχνικής SIC για Αποκωδικοποίηση Σήματος Χρηστών [25]

Το διάγραμμα δείχνει πώς το NOMA, σε συνδυασμό με το SIC, επιτρέπει στους χρήστες να μοιράζονται τους ίδιους πόρους χρόνου και συχνότητας αλλά σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική αξιοποίηση του φάσματος διαχωρίζοντας τα σήματα των χρηστών στο άκρο του δέκτη. Ο πρώτος χρήστης χρησιμοποιεί την τεχνική SIC για να ακυρώσει το σήμα υψηλότερης ισχύος του δεύτερου χρήστη και να ανακτήσει το δικό του σήμα χαμηλότερης ισχύος.

3.3 Παραλλαγές και Τεχνολογίες Υλοποίησης

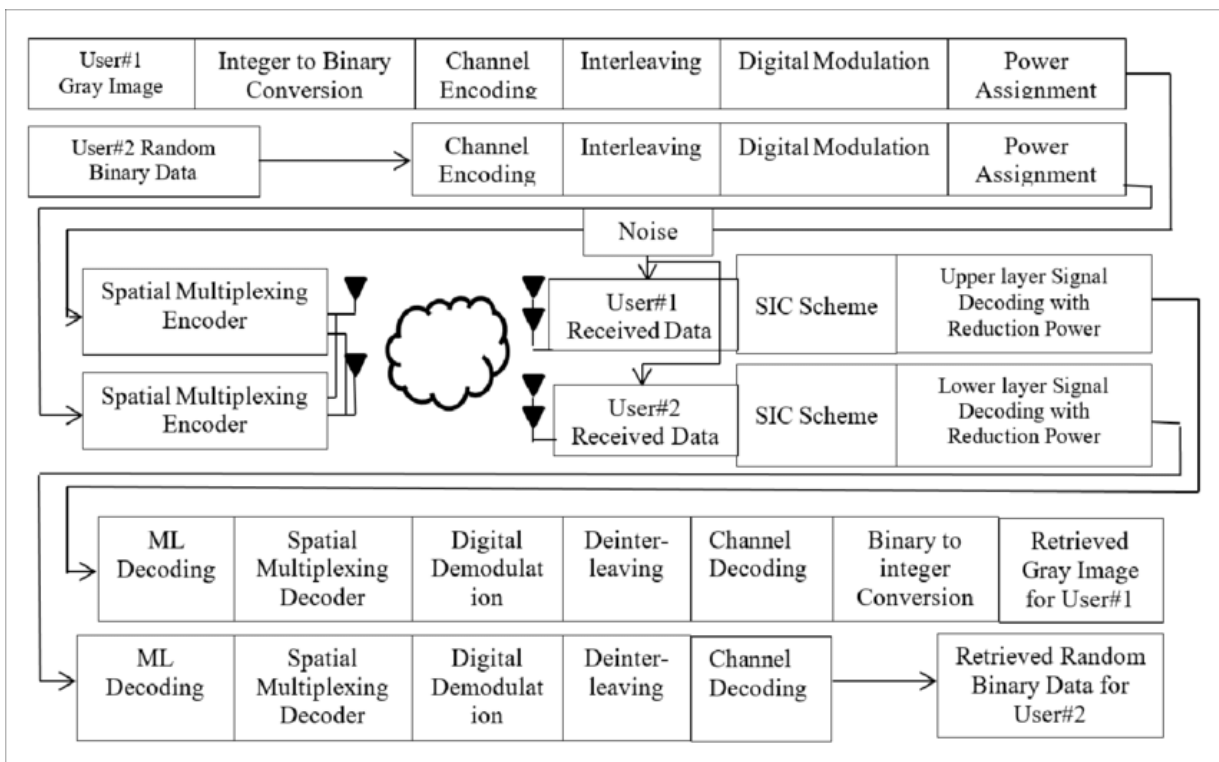
Ενώ η βασική αρχή του NOMA κινείται γύρω από την πολυπλεξία σε επίπεδο ισχύος, έχουν προταθεί διάφορες επεκτάσεις και τεχνολογίες ενεργοποίησης για να μελετηθεί η εφαρμογή του και να αντιμετωπιστούν οι πρακτικές προκλήσεις.

3.3.1 Συνεργατικό NOMA σύστημα

Η συνεργατική NOMA δεν είναι μόνο ένα θεωρητικό σχήμα, αλλά μια πρακτική επιλογή που ενισχύει την ανθεκτικότητα του συστήματος. Η δυνατότητα των χρηστών να λειτουργούν ως αναμεταδότες δημιουργεί ένα αποκεντρωμένο περιβάλλον επικοινωνίας που μειώνει την εξάρτηση από την κεντρική υποδομή. Με αυτήν τη ρύθμιση, οι ισχυρότεροι χρήστες μπορούν να λειτουργήσουν ως αναμεταδότες για τους ασθενέστερους χρήστες, βελτιώνοντας έτσι την αξιοπιστία και την κάλυψη. Η συνεργατική NOMA όχι μόνο μετριάξει το βάρος αποκωδικοποίησης στους ασθενέστερους χρήστες, αλλά και ενισχύει τη συνολική απόδοση του συστήματος. Μελέτες έχουν δείξει ότι η συνεργατική αναμετάδοση βελτιώνει σημαντικά την απόδοση σε σενάρια με συνθήκες μη ισορροπημένου καναλιού [10]. Επιπλέον, η συνεργατική NOMA μπορεί να ενσωματωθεί απρόσκοπτα με δίκτυα με υποβοήθηση αναμετάδοσης και επικοινωνίες συσκευής προς συσκευή (D2D), καθιστώντας την μια ελκυστική επιλογή για πιθανές αναπτύξεις [10], [8], [5].

3.3.2 MIMO-NOMA συστήματα

Μια άλλη σημαντική επέκταση είναι η ενσωμάτωση του NOMA συστήματος με συστήματα πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (MIMO). Το MIMO-NOMA σύστημα αξιοποιεί χωρικούς βαθμούς ελευθερίας παράλληλα με την πολυπλεξία στον τομέα ισχύος, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών τόσο στον τομέα ισχύος όσο και στον χωρικό τομέα [7]. Οι προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος, όπως η διαμόρφωση δέσμης και η προκωδικοποίηση, είναι κρίσιμες για το MIMO-NOMA, καθώς επιτρέπουν την καλύτερη διαχείριση των παρεμβάλοντων σημάτων και την κατανομή πόρων. Η έρευνα έχει επισημάνει ότι το MIMO-NOMA μπορεί να ξεπεράσει σημαντικά τα παραδοσιακά συστήματα MIMO-OMA όσον αφορά τη χωρητικότητα και τη συνδεσιμότητα, ειδικά όταν συνδυάζεται με μαζικές αρχιτεκτονικές MIMO [7], [2]. Η υλοποίηση του MIMO-NOMA δεν είναι απαλλαγμένη από τις διάφορες προκλήσεις που το στοχεύουν, καθώς απαιτεί ακριβείς εκτιμήσεις καναλιού και πολύπλοκους αλγορίθμους διαχείρισης παρεμβολών. Παρόλα αυτά, ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνολογιών ανοίγει νέους δρόμους για την επίτευξη υψηλότερης χωρητικότητας και βελτιωμένης κάλυψης σε πυκνά περιβάλλοντα. Η δυναμική αντιστοίχιση χρηστών σε χωρικές δέσμες και η ενσωμάτωση τεχνικών, όπως η προσαρμοστική δέσμη, επιτρέπει την αποτελεσματική αξιοποίηση του φάσματος σε καταστάσεις όπου οι χρήστες παρουσιάζουν έντονες διαφοροποιήσεις στην ποιότητα του καναλιού. Κατά συνέπεια, το MIMO-NOMA θεωρείται μία από τις πιο πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες για δίκτυα 6G, όπου η ζήτηση για μαζική συνδεσιμότητα και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης θα είναι πιο αναγκαία από ποτέ.



Εικόνα 3.3 Μπλοκ διάγραμμα ενός MIMO-NOMA συστήματος ασύρματων επικοινωνιών [12]

Το διάγραμμα της εικόνας 3.3 περιγράφει ένα σύστημα επικοινωνίας με χωρική πολυπλεξία και ακύρωση παρεμβολών σήματος (SIC). Παρουσιάζει τη διαδικασία κωδικοποίησης, μετάδοσης και αποκωδικοποίησης δεδομένων για δύο χρήστες χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές όπως ψηφιακή διαμόρφωση, εκχώρηση ισχύος και SIC, ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- Προετοιμασία δεδομένων χρήστη: Ο χρήστης 1 στέλνει μια γκρι εικόνα, η οποία μετατρέπεται από ακέραιο σε δυαδικό, ακολουθούμενη από κωδικοποίηση καναλιού και διασύνδεση. Τα δεδομένα στη συνέχεια διαμορφώνονται ψηφιακά και η ισχύς εκχωρείται για μετάδοση. Ο χρήστης #2 δημιουργεί τυχαία δυαδικά δεδομένα, τα οποία επίσης υφίστανται κωδικοποίηση καναλιού, διασύνδεση, ψηφιακή διαμόρφωση και εκχώρηση ισχύος.
- Μετάδοση δεδομένων: Τα κωδικοποιημένα και διαμορφωμένα σήματα και για τους δύο χρήστες αποστέλλονται μέσω κωδικοποιητών χωρικής πολυπλεξίας. Αυτοί οι κωδικοποιητές επιτρέπουν την ταυτόχρονη αποστολή πολλαπλών ροών δεδομένων μέσω του ίδιου καναλιού αλλά σε διαφορετικές χωρικές ροές (χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές). Τα σήματα στη συνέχεια ταξιδεύουν μέσω του καναλιού, που αντιμετωπίζουν παρεμβολές θορύβου.
- Λήψη Σήματος: Τα ληφθέντα σήματα για τον Χρήστη 1 και τον Χρήστη 2 υποβάλλονται σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας Σχήματα SIC. Το σήμα ανώτερου επιπέδου (υψηλότερης ισχύος) αποκωδικοποιείται πρώτα για τον Χρήστη 1 και στη συνέχεια το σήμα κατώτερου επιπέδου (χαμηλότερης ισχύος) για τον Χρήστη 2, χρησιμοποιώντας μια τεχνική μείωσης ισχύος. Η μέθοδος SIC επιτρέπει σε κάθε χρήστη να αποκωδικοποιήσει το σήμα του αφαιρώντας πρώτα το σήμα του άλλου χρήστη.
- Αποκωδικοποίηση Σήματος: Και οι δύο χρήστες χρησιμοποιούν Αποκωδικοποίηση ML (Αποκωδικοποίηση Μέγιστης Πιθανότητας) για την ανακατασκευή των μεταδιδόμενων δεδομένων. Τα σήματα υφίστανται Αποκωδικοποίηση Χωρικής Πολυπλεξίας και Ψηφιακή Αποδιαμόρφωση. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η διαδικασία Αποδιεπαφής. Το αποκωδικοποιημένο σήμα στη συνέχεια διέρχεται από Αποκωδικοποίηση Καναλιού και μετατρέπεται ξανά από Δυαδική σε Ακέραια μορφή. 5. Ανάκτηση Δεδομένων: Ο Χρήστης #1 ανακτά την αρχική Γκρι Εικόνα. Ο Χρήστης #2 ανακτά τα Τυχαία Δυαδικά Δεδομένα του.

Η τεχνολογία MIMO-NOMA συνδυάζει την τεχνική NOMA με την τεχνολογία MIMO για αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος. Στην εικόνα:

- **Πομπός:** Διαθέτει πολλαπλές κεραιές για ταυτόχρονη μετάδοση σε πολλούς χρήστες.
- **Χρήστες:** Λαμβάνουν τα σήματα μέσω διαφορετικών διαδρομών και εκτελούν αποκωδικοποίηση με τεχνικές όπως η SIC (Successive Interference Cancellation).

Αυτή η συνδυασμένη προσέγγιση επιτρέπει την αποδοτική χρήση του φάσματος και την υποστήριξη πολλών χρηστών.

3.3.3 Κατάταξη Χρηστών

Η κατάταξη των χρηστών σε συστήματα NOMA είναι μια διαδικασία που επηρεάζει άμεσα τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα του συστήματος. Η απόδοση των συστημάτων NOMA συνδέεται στενά με τη στρατηγική κατάταξης χρηστών που χρησιμοποιείται κατά την κατανομή ισχύος και τις λειτουργίες SIC. Πρόσφατες εργασίες έχουν διερευνήσει κριτήρια κατάταξης πέρα από το απλό κέρδος καναλιού, ενσωματώνοντας παράγοντες όπως η στιγμιαία ισχύς σήματος (ISP) και οι απαιτήσεις ρυθμού δεδομένων [8], [9]. Αυτά τα κριτήρια επιτρέπουν πιο ευέλικτη και δίκαιη αντιστοίχιση χρηστών, οδηγώντας σε βελτιωμένη απόδοση διακοπών. Εάν η κατάταξη δεν πραγματοποιηθεί σωστά, μπορεί να προκύψουν ανισότητες που αυξάνουν τις πιθανότητες διακοπής της υπηρεσίας. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί νέοι αλγόριθμοι που λαμβάνουν υπόψη παραμέτρους όπως η μεταβλητότητα του καναλιού. Αυτοί οι αλγόριθμοι επιτρέπουν την πιο δίκαιη και αποτελεσματική αντιστοίχιση χρηστών, μειώνοντας το ενδεχόμενο συμφόρησης. Η ανάλυση διακοπών δεν είναι απλώς ένα θεωρητικό εργαλείο, αλλά ένα κρίσιμο κομμάτι για τη διασφάλιση αξιόπιστων τηλεπικοινωνιών. Τα αναλυτικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η κατάταξη χρηστών επηρεάζει σημαντικά την πιθανότητα διακοπών και

τη δικαιοσύνη στην κατανομή των καθυστερήσεων, καθιστώντας την βασικό στοιχείο στην πρακτική ανάπτυξη του NOMA [8].

3.3.4 Υβριδική Πολλαπλή Πρόσβαση

Η NOMA έχει επίσης διερευνηθεί σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, σχηματίζοντας υβριδικά σχήματα πρόσβασης. Η ιδέα της υβριδικής πρόσβασης αποτελεί μια πρακτική λύση για δίκτυα που πρέπει να λειτουργούν υπό διαφορετικές συνθήκες. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός της NOMA με την OMA μπορεί να προσφέρει μια ανταλλαγή μεταξύ απλότητας και απόδοσης, προσαρμοσμένη δυναμικά στις συνθήκες του δικτύου. Ομοίως, η NOMA μπορεί να ενσωματωθεί με επικοινωνία χιλιοστομετρικού κύματος (mmWave), αναδιαμορφώσιμες ευφυείς επιφάνειες (RIS) και γνωστικά δίκτυα ραδιοσυχνοτήτων για την περαιτέρω ενίσχυση της φασματικής απόδοσης και κάλυψης [5]. Αυτές οι υβριδικές και εκτεταμένες προσεγγίσεις αναμένεται να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση του ρόλου της NOMA στις αρχιτεκτονικές 6G

Στην παρακάτω εικόνα, αποτυπώνεται η λογική της Υβριδικής Πολλαπλής Πρόσβασης και ο τρόπος που συνδυάζει διαφορετικές τεχνικές πρόσβασης για βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

Υπολογισμός πραγματικής απόδοσης: Λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες του καναλιού και ο όγκος δεδομένων των χρηστών.

- **Επιλογή προτύπου πρόσβασης:** Επιλέγεται το κατάλληλο πρότυπο (π.χ. NOMA, OMA) που μεγιστοποιεί την απόδοση του συστήματος.

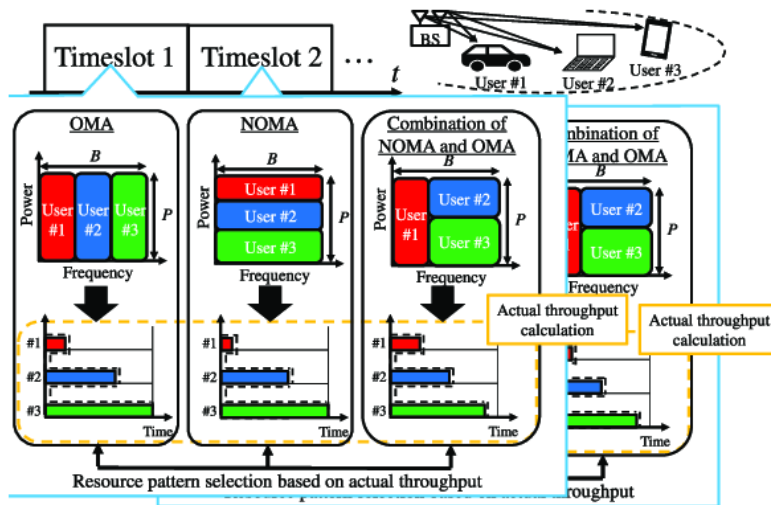
Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ευέλικτη και αποδοτική διαχείριση των πόρων του δικτύου.

Παρακάτω φαίνεται πως λειτουργεί η Υβριδική πολλαπλή πρόσβαση OMA-NOMA [20]:

- **Χρονοθυρίδες και Συχνότητα:** Το διάγραμμα χωρίζεται σε χρονικές θυρίδες (Χρονική Θυρίδα 1, Χρονική Θυρίδα 2, κ.λπ.), καθεμία από τις οποίες αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη περίοδο κατά την οποία οι πόροι επικοινωνίας (χρόνος και συχνότητα) κατανέμονται στους χρήστες. Κάθε χρονική θυρίδα επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε πόρους είτε στο πεδίο συχνότητας είτε στο πεδίο χρόνου, ανάλογα με το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται.
- **OMA (Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση):** Στο πρώτο μέρος του διαγράμματος (Χρονική Θυρίδα 1), χρησιμοποιείται το σχήμα OMA, όπου οι πόροι κατανέμονται ορθογώνια μεταξύ του Χρήστη 1 και του Χρήστη 2. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάθεση σε κάθε χρήστη μιας ξεχωριστής ζώνης συχνότητας (που εμφανίζεται από ξεχωριστά μπλοκ με την ένδειξη Χρήστης 1 και Χρήστης 2). Η ισχύς για κάθε χρήστη κατανέμεται ξεχωριστά, με τον καθένα να έχει αποκλειστική πρόσβαση σε διαφορετικές ζώνες συχνότητας.
- **NOMA (Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση):** Το επόμενο μέρος του διαγράμματος (Χρονική Θυρίδα 2) δείχνει το σχήμα NOMA, όπου ο Χρήστης 1 και ο Χρήστης 2 μοιράζονται τον ίδιο πόρο συχνότητας αλλά διαχωρίζονται από διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Η κατανομή ισχύος μεταξύ των χρηστών απεικονίζεται με τον Χρήστη 1 να έχει υψηλότερη ισχύ και τον Χρήστη 2 χαμηλότερη ισχύ. Το σύστημα αξιοποιεί τη διαφοροποίηση ισχύος για να διαχωρίσει τα σήματα των χρηστών, παρόλο που βρίσκονται στην ίδια ζώνη συχνοτήτων.
- **Συνδυασμός NOMA και OMA:** Το τρίτο μέρος του διαγράμματος δείχνει ένα υβριδικό σχήμα που συνδυάζει το NOMA και το OMA. Σε αυτό το υβριδικό μοντέλο, ο Χρήστης 1 και ο Χρήστης 2 μοιράζονται την ίδια συχνότητα, χρησιμοποιώντας το NOMA για τον διαχωρισμό ισχύος, ενώ ο Χρήστης 3 χρησιμοποιεί διαφορετική ζώνη συχνοτήτων μέσω του OMA. Αυτή η υβριδική προσέγγιση στοχεύει στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος χρησιμοποιώντας

αποτελεσματικά τόσο την ορθογωνιότητα χρόνου/συχνότητας (OMA) όσο και την πολυπλεξία τομέα ισχύος (NOMA).

- Υπολογισμός Απόδοσης: Στο κάτω μέρος, κάθε σχήμα περιλαμβάνει έναν υπολογισμό πραγματικής απόδοσης. Η απόδοση είναι ένα μέτρο του ρυθμού δεδομένων που μπορούν να πετύχουν οι χρήστες σε κάθε σχήμα πρόσβασης. Η επιλογή μοτίβου πόρων προσαρμόζεται δυναμικά με βάση αυτούς τους υπολογισμούς απόδοσης για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων. Επιλογή Μοτίβου Πόρων: Το σύστημα προσαρμόζει την κατανομή των πόρων με βάση την υπολογισμένη απόδοση, διασφαλίζοντας ότι επιλέγεται το πιο αποτελεσματικό μοτίβο (OMA, NOMA ή υβριδικό) για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης.



Εικόνα 3.4 Νοοτροπία της υβριδικής πολλαπλής πρόσβασης [6]

3.4 Εφαρμογές και Αναδυόμενες Κατευθύνσεις

Η ευελιξία του NOMA το καθιστά κατάλληλο για ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών στο 5G και σε σενάρια που απαιτούν μαζική συνδεσιμότητα, χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία.

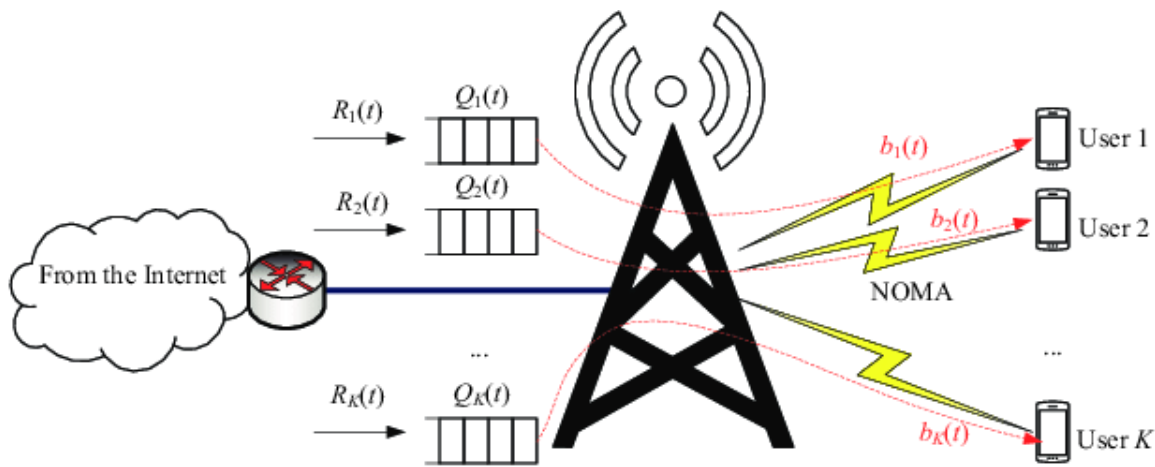
3.4.1 NOMA σε Δίκτυα 5G και 6G

Το NOMA έχει αναγνωριστεί ως ισχυρός υποψήφιος για την ενίσχυση της χωρητικότητας των δικτύων 5G, ιδιαίτερα στην αντιμετώπιση των απαιτήσεων των eMBB, mMTC και URLLC. Υποστηρίζοντας ταυτόχρονες συνδέσεις με ποικίλες απαιτήσεις QoS, το NOMA κάνει πιο εύκολη τη χρήση του φάσματος σε ετερογενή δίκτυα. Καθώς η έρευνα μεταβαίνει προς το 6G, το NOMA αναμένεται να διαδραματίσει ακόμη σημαντικότερο ρόλο στην ενεργοποίηση πρωτόγνωρων εφαρμογών όπως η εκτεταμένη πραγματικότητα (XR), το απτικό διαδίκτυο και οι μαζικές βιομηχανικές αναπτύξεις IoT [3], [4].

3.4.2 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και Επικοινωνία Τύπου Μηχανής

Το παράδειγμα του IoT προβλέπει δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές που μεταδίδουν μικρά πακέτα δεδομένων με σποραδική δραστηριότητα. Οι συμβατικές μέθοδοι OMA δεν είναι σε θέση να φιλοξενήσουν μια τέτοια μαζική συνδεσιμότητα λόγω της άκαμπτης κατανομής πόρων. Αντιθέτως, το NOMA επιτρέπει σε πολλαπλές συσκευές IoT να μοιράζονται πόρους φάσματος ταυτόχρονα,

βελτιώνοντας δραματικά την πυκνότητα συνδεσιμότητας και την ενεργειακή απόδοση [5]. Επιπλέον, η πολυπλεξία τομέα ισχύος επιτρέπει την ευέλικτη διαφοροποίηση υπηρεσιών, η οποία είναι απαραίτητη σε οικοσυστήματα IoT όπου οι συσκευές παρουσιάζουν διαφορετικές απαιτήσεις QoS. Η χρήση του NOMA στο IoT ξεπερνά την απλή βελτίωση της φασματικής απόδοσης. Σε έξυπνες πόλεις μεγάλης κλίμακας, υπάρχουν χιλιάδες αισθητήρες, οι οποίοι παρακολουθούν συνεχώς δεδομένα περιβάλλοντος, μετακίνησης και υποδομών. Το NOMA παρέχει έναν ευέλικτο μηχανισμό για την αποδοτική μετάδοση αυτών των δεδομένων χωρίς να απαιτείται κάποιος αυστηρός συγχρονισμός ή κάποια πολύπλοκη διαχείριση καναλιού. Επιπλέον, η ενσωμάτωση του NOMA με τεχνολογίες χαμηλής ισχύος, όπως το NB-IoT και το LoRa, μπορεί να ενισχύσει την αυτονομία των συσκευών αυτών, μειώνοντας την κατανάλωση της ενέργειας που απαιτούν για τη λειτουργία τους. Έτσι, το NOMA δεν λειτουργεί μόνο ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, αλλά και ως βασικό εργαλείο υποστήριξης της μαζικής υλοποίησης του οράματος του IoT.



Εικόνα 3.5 Σύστημα NOMA [3]

Αυτό το διάγραμμα απεικονίζει ένα σύστημα NOMA (Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση), όπου πολλοί χρήστες μοιράζονται τους ίδιους πόρους αλλά διαχωρίζονται από επίπεδα ισχύος [7]. Ακολουθεί μια λεπτομερής ανάλυση του τι συμβαίνει στην εικόνα:

Πηγή και Μετάδοση Διαδικτύου: Η εικόνα ξεκινά με δεδομένα που προέρχονται από το Διαδίκτυο, τα οποία εμφανίζονται στην αριστερή πλευρά. Αυτά τα δεδομένα υποβάλλονται σε επεξεργασία και μεταδίδονται μέσω του συστήματος.

Επεξεργασία Δεδομένων: Τα δεδομένα χωρίζονται σε $R(t)$ και $Q(t)$, τα οποία πιθανόν αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς τύπους ροών δεδομένων, πιθανώς σχετιζόμενα με το κανάλι ή το φορτίο δεδομένων για μετάδοση. Αυτές οι ροές δεδομένων προωθούνται στη συνέχεια μέσω του συστήματος για μετάδοση στους χρήστες.

Βασικός Σταθμός: Ο βασικός σταθμός (BS) εμφανίζεται ως πύργος επικοινωνίας με σήματα που εκπέμπονται προς τους χρήστες. Ο πύργος είναι υπεύθυνος για τη μετάδοση των δεδομένων σε πολλούς χρήστες στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, κάτι που αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του NOMA.

Μετάδοση σε Χρήστες: Τα δεδομένα μεταδίδονται στον Χρήστη 1, τον Χρήστη 2, ... και τον Χρήστη K. Κάθε χρήστης λαμβάνει το σήμα του σε διαφορετικό επίπεδο ισχύος, που υποδεικνύεται από τα διακριτά σύμβολα ισχύος ($b_1(t)$, $b_2(t)$, ..., $b_k(t)$) για κάθε χρήστη. Ο Χρήστης 1 λαμβάνει το σήμα $b_1(t)$, ο Χρήστης 2 λαμβάνει $b_2(t)$ και ούτω καθεξής. Αυτό είναι χαρακτηριστικό του NOMA, όπου οι χρήστες

πολυπλέκονται με βάση τα επίπεδα ισχύος και όχι με βάση τις ορθογώνιες χρονικές ή συχνοτικές θυρίδες (όπως στο παραδοσιακό OMA).

Λήψη Σήματος: Κάθε χρήστης λαμβάνει το αντίστοιχο σήμα του και η μετάδοση έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε οι χρήστες με διαφορετικά επίπεδα ισχύος να μπορούν να αποκωδικοποιούν τα σήματα τους χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως το SIC (Signal Interference Cancellation). **Κατανομή Ισχύος:** Το διάγραμμα δείχνει ότι σε διαφορετικούς χρήστες έχουν κατανεμηθεί διαφορετικά επίπεδα ισχύος (π.χ., $b_1(t)$, $b_2(t)$ κ.λπ.), γεγονός που τους επιτρέπει να μοιράζονται το ίδιο φάσμα αλλά σε διαφορετικές εντάσεις. Οι χρήστες με υψηλότερα επίπεδα ισχύος μπορούν να αποκωδικοποιήσουν τα σήματα χρηστών με χαμηλότερη ισχύ, επιτρέποντας την ταυτόχρονη λήψη δεδομένων στο ίδιο κανάλι συχνότητας.

3.4.3 Οχηματικές και Δορυφορικές Επικοινωνίες

Τα συστήματα επικοινωνιών οχημάτων απαιτούν συνδέσεις χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής αξιοπιστίας για την υποστήριξη εφαρμογών κρίσιμων για την ασφάλεια, όπως η αποφυγή συγκρούσεων και η αυτόνομη οδήγηση. Το NOMA έχει διερευνηθεί ως μέσο βελτίωσης της αξιοποίησης του φάσματος και της αξιοπιστίας των συνδέσεων σε δίκτυα οχημάτων [5]. Ομοίως, τα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών, τα οποία εξυπηρετούν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές με περιορισμένο φάσμα, μπορούν να επωφεληθούν από τις ιδιότητες ενίσχυσης χωρητικότητας του NOMA, υποστηρίζοντας έτσι τους παγκόσμιους στόχους συνδεσιμότητας του 6G.

3.4.4 Ασφάλεια Φυσικού Επιπέδου

Καθώς τα ασύρματα δίκτυα γίνονται ολοένα και πιο πυκνά, η διασφάλιση της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας στο φυσικό επίπεδο έχει γίνει ένα ζήτημα υψηλής σημασίας. Το NOMA εισάγει πρωτοφανείς προκλήσεις λόγω της υπέρθεσης πολλαπλών σημάτων, τα οποία μπορεί να είναι ευάλωτα σε επιθέσεις υποκλοπής και παρεμβολών. Ταυτόχρονα, το NOMA παρέχει νέες ευκαιρίες για την ενίσχυση της ασφάλειας αξιοποιώντας τη συνεργασία των χρηστών, τη μορφοποίηση δέσμης και την παραγωγή τεχνητού θορύβου [7]. Η έρευνα έχει δείξει ότι τα σωστά σχεδιασμένα συνεργατικά σχήματα NOMA μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ικανότητα μυστικότητας σε σύγκριση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις OMA.

3.4.5 Τεχνητή Νοημοσύνη και Βαθιά Μάθηση στο NOMA

Οι πρόσφατες εξελίξεις στη μηχανική μάθηση (ML) και τη βαθιά μάθηση (DL) έχουν ανοίξει νέους δρόμους για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων NOMA. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις που βασίζονται στη βελτιστοποίηση για την κατανομή ισχύος, τη σύζευξη χρηστών και τη διαχείριση παρεμβολών συχνά υποφέρουν από την υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα και τα προβλήματα κλιμάκωσης. Τα μοντέλα βαθιάς μάθησης έχουν δείξει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα στην παροχή γρήγορων, σχεδόν άμεσων λύσεων για την κατανομή πόρων και την εκτίμηση καναλιών σε συστήματα NOMA [12]. Αυτές οι έξυπνες προσεγγίσεις μπορούν να προσαρμοστούν σε δυναμικά περιβάλλοντα, καθιστώντας τις ιδιαίτερα χρήσιμες για εφαρμογές 6G σε πραγματικό χρόνο.

3.5 Απόδοση του NOMA

Η απόδοση του NOMA εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες που σχετίζονται με τη σχεδίαση του συστήματος και τις τεχνικές υλοποίησης. Ένα από τα βασικά κριτήρια είναι η αποτελεσματικότητα της Διαδοχικής Ακύρωσης Παρεμβολών (SIC), η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του

τελικού σήματος. Στην ιδανική περίπτωση, η SIC πραγματοποιείται χωρίς απώλειες, με αποτέλεσμα την πλήρη απομάκρυνση των ανεπιθύμητων συνιστωσών. Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες, η διαδικασία αυτή είναι επιρρεπής σε σφάλματα, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη φασματική απόδοση. Επίσης, η αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα που συνοδεύει τη χρήση του NOMA, ειδικά σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας, επιβάλλει την ανάπτυξη αποδοτικών αλγορίθμων για την εξισορρόπηση απόδοσης και κατανάλωσης πόρων. Συνεπώς, η μελέτη της απόδοσης του NOMA δεν περιορίζεται μόνο στη θεωρητική χωρητικότητα, αλλά περιλαμβάνει και παραμέτρους πρακτικής υλοποίησης, όπως η πολυπλοκότητα, η ενεργειακή κατανάλωση και η ανθεκτικότητα σε παρεμβολές [5], [10].

3.5.1 Δικαιοσύνη και Ομαδοποίηση Χρηστών

Η έννοια της δικαιοσύνης (fairness) αποτελεί κεντρικό ζήτημα στα δίκτυα NOMA. Επειδή η κατανομή ισχύος βασίζεται στις συνθήκες του καναλιού, οι χρήστες με χαμηλής ποιότητας κανάλια συνήθως λαμβάνουν περισσότερη ισχύ, γεγονός που μπορεί να μειώσει την απόδοση για τους ισχυρότερους χρήστες. Η πρόκληση, λοιπόν, είναι η επίτευξη της ισορροπίας που θα διασφαλίζει ότι κανείς δεν αποκλείεται, ενώ παράλληλα η συνολική απόδοση του συστήματος παραμένει υψηλή. Για τον σκοπό αυτό, έχουν προταθεί εξελιγμένοι αλγόριθμοι ομαδοποίησης χρηστών, οι οποίοι συνδυάζουν τις πληροφορίες καναλιού με κριτήρια προτεραιότητας και ποιότητας υπηρεσίας. Η ορθή σύζευξη χρηστών που παρουσιάζουν σημαντική διαφορά σε όρους κέρδους καναλιού συμβάλλει στην αποτελεσματική εφαρμογή του SIC, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τον κίνδυνο παρεμβολών. Έτσι, η έρευνα στην ομαδοποίηση χρηστών δεν στοχεύει μόνο στη βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας, αλλά και στη διατήρηση μιας δίκαιης κατανομής πόρων σε περιβάλλοντα με ετερογενείς απαιτήσεις [10], [11].

3.5.2 Ενεργειακή Απόδοση

Η ενεργειακή απόδοση είναι ένας κρίσιμος παράγοντας στη λειτουργία των συστημάτων NOMA, ιδίως όταν αυτά εφαρμόζονται σε εφαρμογές όπως το IoT, όπου οι συσκευές λειτουργούν με περιορισμένες ενεργειακές δυνατότητες. Αν και το NOMA αυξάνει την αποτελεσματική χρήση του φάσματος, η υλοποίησή του συνεπάγεται μεγαλύτερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, κυρίως λόγω της διαδικασίας SIC και των δυναμικών στρατηγικών κατανομής πόρων. Αυτή η επιπρόσθετη πολυπλοκότητα μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, κάτι που δεν είναι πάντα συμβατό με τις ανάγκες συσκευών χαμηλής κατανάλωσης. Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη αλγορίθμων ενεργειακά αποδοτικής κατανομής ισχύος αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς έρευνας. Επιπλέον, προτείνονται υβριδικές προσεγγίσεις που συνδυάζουν το NOMA με τεχνολογίες χαμηλής ισχύος, ώστε να επιτυγχάνεται ένας βέλτιστος συμβιβασμός ανάμεσα στην απόδοση και στην κατανάλωση ενέργειας [5], [8].

3.5.3 Ασφάλεια και Απόρρητο

Η ενεργειακή απόδοση είναι ένας κρίσιμος παράγοντας στη λειτουργία των συστημάτων NOMA, ιδίως όταν αυτά εφαρμόζονται σε εφαρμογές όπως το IoT, όπου οι συσκευές λειτουργούν με περιορισμένες ενεργειακές δυνατότητες. Αν και το NOMA αυξάνει την αποτελεσματική χρήση του φάσματος, η υλοποίησή του συνεπάγεται μεγαλύτερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, κυρίως λόγω της διαδικασίας SIC και των δυναμικών στρατηγικών κατανομής πόρων. Αυτή η επιπρόσθετη πολυπλοκότητα μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, κάτι που δεν είναι πάντα συμβατό με τις ανάγκες συσκευών χαμηλής κατανάλωσης. Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη αλγορίθμων ενεργειακά αποδοτικής κατανομής ισχύος αποτελεί έναν από τους

σημαντικότερους τομείς έρευνας. Επιπλέον, προτείνονται υβριδικές προσεγγίσεις που συνδυάζουν το NOMA με τεχνολογίες χαμηλής ισχύος, ώστε να επιτυγχάνεται ένας βέλτιστος συμβιβασμός ανάμεσα στην απόδοση και στην κατανάλωση ενέργειας [3].

3.5.4 Τυποποίηση και Πρακτική Εφαρμογή

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα του NOMA, η ενσωμάτωσή του σε εμπορικά πρότυπα, όπως αυτά που αναπτύσσει ο οργανισμός 3GPP, παραμένει περιορισμένη. Η κύρια αιτία είναι οι προκλήσεις που σχετίζονται με την πολυπλοκότητα του δέκτη και τη δυσκολία επίτευξης τέλει SIC. Επιπλέον, οι υφιστάμενες τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης, όπως το OFDMA, είναι ήδη καλά εδραιωμένες και παρέχουν αποδεκτές αποδόσεις σε πραγματικά δίκτυα. Παρόλα αυτά, η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων σε συνδεσιμότητα και φασματική απόδοση καθιστούν το NOMA μια λύση που δύσκολα μπορεί να αγνοηθεί στο μέλλον. Για τον λόγο αυτό, οι τρέχουσες προσπάθειες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη απλουστευμένων αλγορίθμων SIC και στην εναρμόνιση του NOMA με άλλες τεχνικές, ώστε να επιτευχθεί σταδιακή ενσωμάτωση σε συστήματα 5G-Advanced και μελλοντικά 6G. Η πρακτική εφαρμογή του NOMA δεν είναι, λοιπόν, απλώς θέμα τεχνικής αρτιότητας, αλλά και θέμα στρατηγικής τυποποίησης και βιομηχανικής αποδοχής [7].

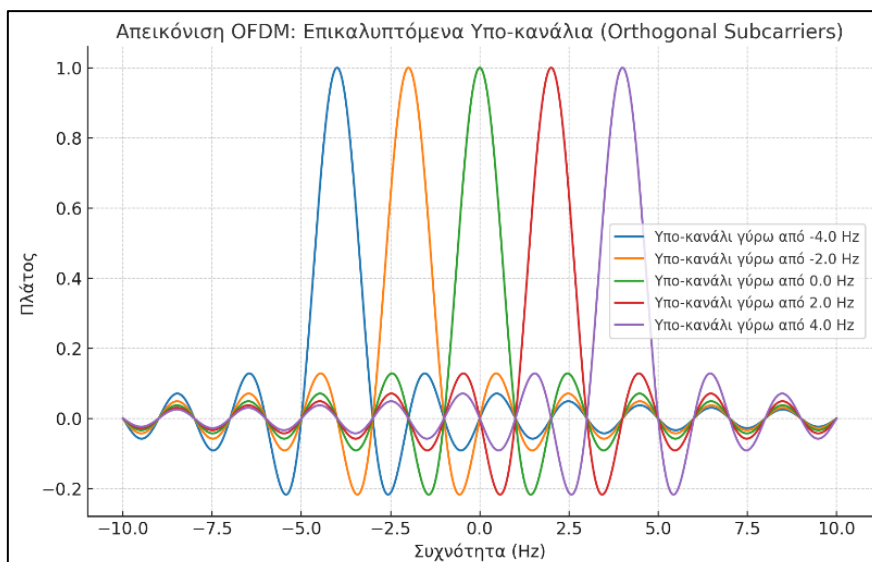
Κεφάλαιο 4ο: Συστήματα OFDM και η ενσωμάτωσή τους με NOMA

4.1 Εισαγωγή

Στο παρακάτω κεφάλαιο θα δούμε τί είναι η τεχνική OFDM και θα μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά της και θα αναλύσουμε τις μεθόδους που χρησιμοποιεί για την υλοποίησή της.

4.2 Τί είναι το OFDM

Το OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) είναι μια τεχνική διαμόρφωσης και πολυπλεξίας και αποτελεί μία από τις πιο καθοριστικές τεχνολογίες στον τομέα των σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιών. Πρόκειται για μία τεχνική διαμόρφωσης και πολυπλεξίας, η οποία έχει βρει εφαρμογή σε πληθώρα προτύπων. Χρησιμοποιείται σε δίκτυα όπως το Wi-Fi (πρωτόκολλα 802.11a/g/n/ac), το DVB-T (ψηφιακή τηλεόραση), το 4G και το 5G και φαίνεται πως είναι το επίκεντρο μελέτης για την υλοποίηση και την ανάπτυξη των επερχόμενων δικτύων 5G-advanced και 6G. Η συμβολή της είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς παρέχει υψηλή αποδοτικότητα στη χρήση του διαθέσιμου φάσματος, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη μετάδοση μεγάλων όγκων δεδομένων με σταθερό και αξιόπιστο τρόπο. Η βασική της αρχή στηρίζεται στο γεγονός ότι το συνολικό σήμα χωρίζεται σε πολλά μικρότερα υπο-κανάλια (subcarriers), τα οποία μεταδίδονται ταυτόχρονα σε πολλές διαφορετικές συχνότητες. Αυτά τα υπο-κανάλια είναι ορθογώνια μεταξύ τους, ώστε να μην παρεμβάλλονται ακόμα και αν τα φάσματά τους καλύπτονται. Αυτό επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να στέλνουν ταυτόχρονα πληροφορία σήματος χωρίς να παρεμβάλλεται ο ένας πάνω στον άλλο και προσαρμόζοντας καταλλήλως τους διαθέσιμους πόρους του συστήματος [13].

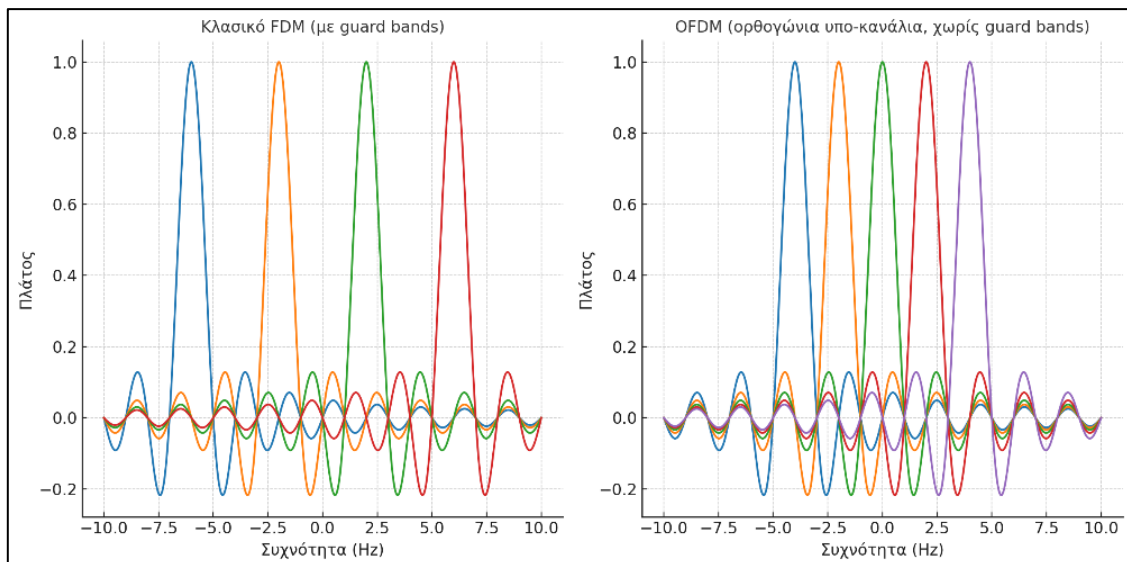


Εικόνα 4.1 Απεικόνιση ενός OFDM

Στην παραπάνω εικόνα, φαίνεται η απεικόνιση του OFDM που δείχνει τη διάσπαση του αρχικού σήματος σε πολλά υποφέροντα, τα οποία μεταδίδονται με τρόπο ορθογωνικό. Μέσα από την εικόνα γίνεται εμφανές πώς αξιοποιείται καλύτερα το φάσμα σε σχέση με κλασσικές τεχνικές πολυπλεξίας, επιτρέποντας τη μετάδοση δεδομένων με μικρότερες πιθανότητες παρεμβολής.

4.3 Θετικά χαρακτηριστικά του OFDM

Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά της OFDM είναι ότι έχει υψηλή φασματική απόδοση σε σχέση με το κλασσικό FDM (Frequency Division Multiplexing) που χρησιμοποιούσαμε. Στο κλασσικό FDM κάθε κανάλι (subcarrier) τοποθετείται σε ξεχωριστή συχνότητα και αυτό γίνεται για να μην περιπλέκονται τα σήματα μεταξύ τους. Τα συχνοτικά κενά, τα οποία δημιουργούμε για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα, ονομάζονται Guard Bands και έχουν ως αποτέλεσμα να χωρίζουν επιτυχώς τα κανάλια μεταξύ τους, όμως καταλαμβάνουν μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης, ρίχνοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητα του συστήματος. Στο OFDM τα υπο-κανάλια τοποθετούνται πολύ πιο κοντά το ένα με το άλλο, χωρίς να καλύπτουν το ένα το άλλο μέσα στο φάσμα των συχνοτήτων, αξιοποιώντας την ιδιότητα της ορθογωνιότητας. Έτσι, η χρήση των Guard Bands είναι πλέον περιττή και μπορούμε να αξιοποιήσουμε το εύρος ζώνης που καταλάμβανουν [14].



Εικόνα 4.2 Κλασικό FDM με Guard Bands και OFDM χωρίς Guard Bands

Στην εικόνα αυτή γίνεται σύγκριση του κλασικού FDM με το OFDM. Στην πρώτη περίπτωση, παρατηρούμε τη χρήση του Guard Band που αφήνουν αναξιοποίητο μέρος του φάσματος, ενώ στη δεύτερη τα υποφέροντα είναι τοποθετημένα πυκνά, χωρίς επικαλύψεις που να δημιουργούν προβλήματα. Αυτή η σύγκριση αποδεικνύει το βασικό πλεονέκτημα του OFDM, δηλαδή την εκμετάλλευση κάθε διαθέσιμης συχνοτικής περιοχής για τη μετάδοση της πληροφορίας.

4.4 Αρνητικά χαρακτηριστικά του OFDM

Παρόλου που το OFDM έχει επικρατήσει ως η πιο διαδεδομένη τεχνική πολυπλεξίας, έχει κάποια χαρακτηριστικά, τα οποία δυσκολεύουν στη σχεδίαση συστημάτων και η υλοποίησή τους γίνεται απαιτητική. Μερικά από αυτά είναι ότι είναι αρκετά ευαίσθητο στο κομμάτι του συγχρονισμού του χρόνου (timing offset) και του συγχρονισμού συχνότητας CFO (Carrier Frequency Offset) [16]. Αυτά οδηγούν σε καταστροφή της ορθογωνιότητας των φερόντων του καναλιού και δημιουργεί το φαινόμενο της Παρεμβολής μεταξύ Φερουσών ICI (Inter Carrier Interference), πράγμα το οποίο ωθεί τις υποφέρουσες να μπλέκονται μεταξύ τους έχοντας ως αποτέλεσμα να ελαττώνεται η σηματοθορυβική σχέση τους (SNR) και να αυξάνεται έτσι ο ρυθμός σφαλμάτων Bit, δηλαδή ο αυξάνεται το ποσοστό των εσφαλμένων Bit που στάλθηκαν σε σχέση με το συνολικό αριθμό των απεσταλμένων Bit. Ακόμη, το OFDM είναι ευαίσθητο σε κανάλια με μεγάλη διασπορά Doppler. Αυτό, σημαίνει ότι σε προκαλούνται πολλές μεταβολές με γρήγορο ρυθμό αλλάζοντας μέσα στο κανάλι κάποιο σύμβολο, έχοντας ως αποτέλεσμα να χαθεί πληροφορία και να χαθεί η ορθογωνιότητα του συστήματος. Τέλος, ένα ακόμη πρόβλημα είναι το υψηλό Peak-to-Average Power Ratio (PAPR), δηλαδή η παρουσία μεγάλων κορυφών ισχύος στο σήμα, οι οποίες απαιτούν από τον ενισχυτή ισχύος να λειτουργεί με αυξημένο back-off, οδηγώντας σε χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση.

Πίνακας 2 Σύγκριση OFDM με άλλες τεχνικές πολυπλεξίας

Χαρακτηριστικό	OFDM	FDMA, TDMA, CDMA
Αντοχή σε πολυδιαδρομικά κανάλια	Πολύ υψηλή ορθογωνιότητα υποφερόντων & CP	Χαμηλή έως μέτρια [ανάλογα με την τεχνική]

Φασματική απόδοση	Υψηλή	Χαμηλότερη λόγω των Guard Bands
Υλοποίηση	Απλή	TDMA/FDMA ευκολότερες, CDMA πιο πολύπλοκη
PAPR	Υψηλό	Συνήθως χαμηλό
Ανοχή σε Doppler Spread	Χαμηλή	CDMA πιο ανθεκτικό σε κινητικότητα
Υποστήριξη MIMO	Ιδανικό	Περιορισμένη έως ανύπαρκτη
Εφαρμογές	Wi-Fi, DVB-T/T2, LTE, 4G, 5G, 6G	GSM

Όπως φαίνεται στον πίνακα 2, η τεχνική **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) διαφοροποιείται σαφώς από τις παραδοσιακές μεθόδους **FDMA**, **TDMA** και **CDMA**. Ενώ οι κλασικές τεχνικές βασίζονται σε μη επικαλυπτόμενες ζώνες (χρονικές ή συχνοτικές), το OFDM αξιοποιεί πλήρως το φάσμα μέσω **ορθογώνιων υποφερόντων**, επιτυγχάνοντας **υψηλή φασματική αποδοτικότητα** [12], [15], [16]. Επιπλέον, η χρήση **Cyclic Prefix (CP)** του δίνει μεγάλη ανθεκτικότητα σε πολυδιαδρομικά φαινόμενα, καθιστώντας το κατάλληλο για αστικά περιβάλλοντα και εφαρμογές όπως **Wi-Fi**, **LTE**, **DVB-T/T2** και **5G** [13], [23]. Από την άλλη πλευρά, το OFDM αντιμετωπίζει σοβαρό πρόβλημα **υψηλού Peak-to-Average Power Ratio (PAPR)**, το οποίο απαιτεί πολύπλοκες τεχνικές μείωσης (π.χ. clipping, filtering, tone reservation) [17], [13]. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε **φαινόμενα Doppler**, γεγονός που επηρεάζει την απόδοσή του σε εφαρμογές υψηλής κινητικότητας (π.χ. δίκτυα τρένων υψηλής ταχύτητας) [12], [14]. Παρά τις προκλήσεις αυτές, το OFDM παραμένει η πιο αξιόπιστη και διαδεδομένη τεχνολογία πολυπλεξίας, ειδικά όταν συνδυάζεται με **MIMO** και **Massive MIMO** [4], [7].

4.5 Τι τεχνικές χρησιμοποιεί το OFDM- FFT/IFFT

Το OFDM χρησιμοποιεί πολλές τεχνικές που όταν συνεργαστούν μαζί προσφέρουν μεγάλη απόδοση στο σύστημά και η μετάδοση εντός των καναλιών είναι πιο ανθεκτική στα πολυδιαδρομικά κανάλια. Βασική τεχνική για τη δημιουργία των υποφερουσών στον πομπό είναι η χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (IFFT) και για την ανάκτηση των συμβόλων στην πλευρά του δέκτη γίνεται η χρήση του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αποδοτική αντιμετώπιση των πολυδιαδρομικών καναλιών, μειώνοντας τις πιθανότητες εμφάνισης παρεμβολών και βελτιώνοντας τη σταθερότητα της μετάδοσης. Σε συνδυασμό με το Κυκλικό Πρόθεμα (Cyclic Prefix) ή την κωδικοποίηση του καναλιού, το OFDM καταφέρνει να ανταπεξέρχεται στις προκλήσεις που παρουσιάζονται σε πραγματικά δίκτυα.

Η εικόνα 4.3 απεικονίζει τη βασική αρχιτεκτονική ενός συστήματος OFDM [18], το οποίο περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. **Μετατροπή Δεδομένων σε Σύμβολα (Symbol Mapping):**
 - Τα δεδομένα εισόδου μετατρέπονται σε σύμβολα χρησιμοποιώντας μια μέθοδο διαμόρφωσης, όπως QPSK ή 16-QAM.
2. **Διαμόρφωση με IFFT (Inverse Fast Fourier Transform):**

- Η IFFT εφαρμόζεται σε μια ομάδα συμβόλων για να δημιουργήσει τα υπο-σήματα (subcarriers) στον χρόνο.
- Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλών σημάτων σε διαφορετικές συχνότητες.

3. Προσθήκη Κυκλικού Προθέματος (Cyclic Prefix):

- Προστίθεται ένα αντίγραφο του τελευταίου τμήματος του OFDM συμβόλου στην αρχή του.
- Αυτό βοηθά στην αποφυγή διασυμβολικής παρεμβολής (ISI) λόγω πολυδιαδρομής.

4. Μετάδοση μέσω Καναλιού:

- Το σήμα μεταδίδεται μέσω του ασύρματου καναλιού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει καθυστερήσεις και φθίνουσα απόκριση.

5. Αφαίρεση Κυκλικού Προθέματος:

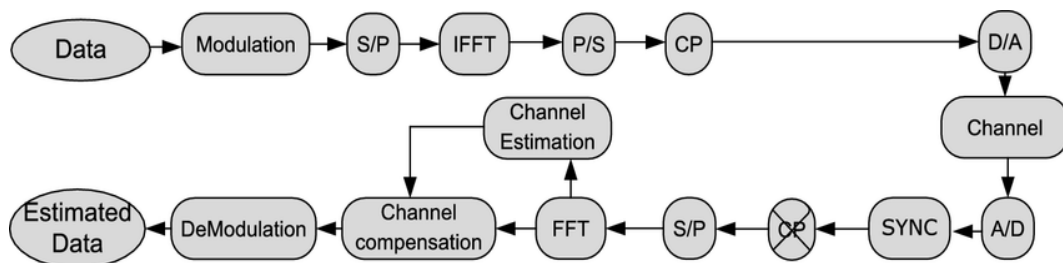
- Στον δέκτη, το κυκλικό πρόθεμα αφαιρείται για να ανακτηθεί το αρχικό OFDM σύμβολο.

6. Ανάλυση με FFT (Fast Fourier Transform):

- Η FFT εφαρμόζεται για να αναλύσει το σήμα στον συχνό τομέα και να ανακτήσει τα δεδομένα.

7. Ανασυγκρότηση Δεδομένων (Demapping & Decoding):

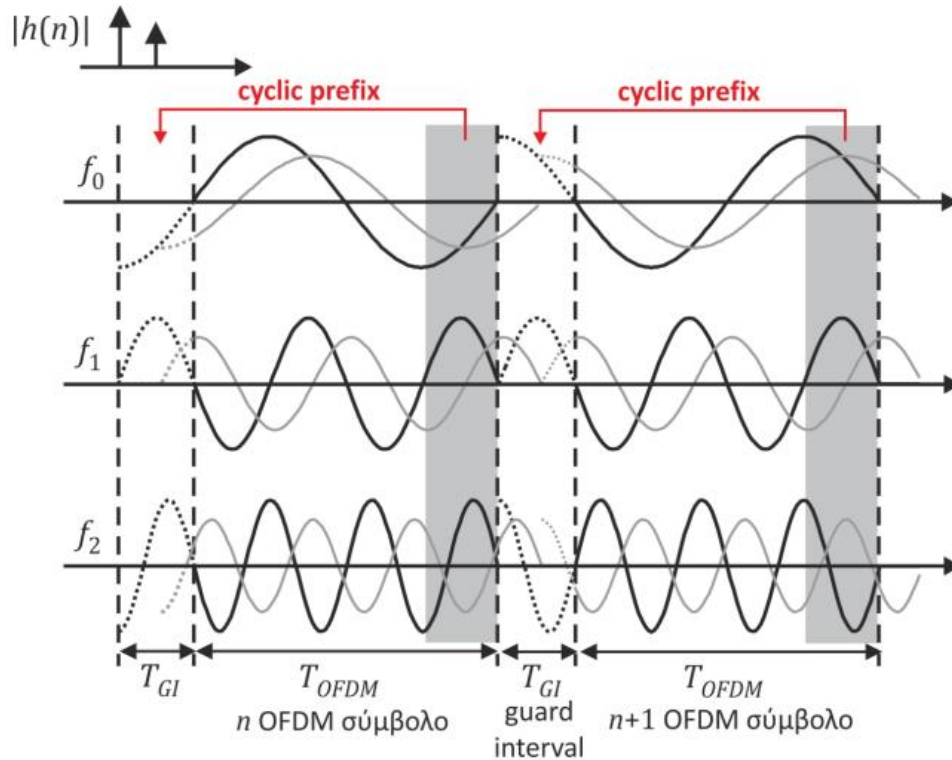
- Τα ανακτηθέντα σύμβολα μετατρέπονται πίσω σε δυαδικά δεδομένα.



Εικόνα 4.3 Block Διάγραμμα Συστήματος OFDM

4.5.1 Cyclic Prefix

Το Κυκλικό Πρόθεμα (Cyclic Prefix) είναι μια τεχνική που προσδίδει στο OFDM ανθεκτικότητα έναντι της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI). Η λογική του βασίζεται στην προσθήκη ενός αντιγράφου από το τελευταίο τμήμα κάθε συμβόλου στην αρχή του. Έτσι, το σήμα αποκτά μία "προστατευτική ζώνη", η οποία απορροφά την παρεμβολή που προκαλείται από τις καθυστερήσεις στα πολυδιαδρομικά κανάλια. Με αυτόν τον τρόπο, η μετάδοση σταθεροποιείται και διατηρείται η ορθογωνιότητα των υποφερόντων. Ωστόσο, το τίμημα αυτής της τεχνικής είναι η μείωση της καθαρής φασματικής απόδοσης, αφού το CP δεν μεταφέρει νέα πληροφορία. Ωστόσο, η βοήθειά του στη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος το καθιστά αναπόσπαστο κομμάτι της υλοποίησης του OFDM [14].



Εικόνα 4.4 Απεικόνιση συμβόλων OFDM με εισαγωγή κυκλικού προθέματος (cyclic prefix) και χρονικό διάστημα προστασίας (guard interval), που εξασφαλίζουν την ορθογωνιότητα των υποφερουσών και την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ συμβόλων.

Προσθήκη CP:

- Το τελευταίο τμήμα του OFDM συμβόλου επαναλαμβάνεται στην αρχή του.
- Δημιουργείται μια “προστατευτική ζώνη” που απορροφά τις καθυστερήσεις από πολυδιαδρομικά κανάλια.

Οφέλη του CP:

- **Αποφυγή διασυμβολικής παρεμβολής (ISI):** Το CP διασφαλίζει ότι οι παρεμβολές από προηγούμενα σύμβολα δεν επηρεάζουν τα τρέχοντα.
- **Διατήρηση ορθογωνιότητας υποφερόντων:** Η ορθογωνιότητα μεταξύ subcarriers δεν χάνεται, επιτρέποντας την σωστή αποκωδικοποίηση με FFT.
- **Απλοποίηση ισοστάθμισης καναλιού:** Με το CP, η επίδραση του καναλιού γίνεται κυρίως μια γραμμική μετατόπιση φάσης, που είναι εύκολη στην επεξεργασία.

Μειονέκτημα του CP:

- **Μείωση καθαρής φασματικής απόδοσης:** Το CP δεν μεταφέρει νέα πληροφορία, άρα το καθαρό throughput μειώνεται ελαφρά.

4.5.2 Κώδικες

Για να περιοριστούν τα σφάλματα μετάδοσης, το OFDM αξιοποιεί εξελιγμένες τεχνικές κωδικοποίησης, όπως οι κώδικες Turbo και LDPC (Low Density Parity Check). Οι κώδικες αυτοί παρέχουν ισχυρή προστασία έναντι των σφαλμάτων, μειώνοντας το BER ακόμη και σε περιβάλλοντα με έντονο θόρυβο ή παρεμβολές. Παράλληλα, το OFDM υποστηρίζει κατανομή ισχύος σε κάθε υποφέρον (Power Allocation), εξασφαλίζοντας βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Σε πολλές περιπτώσεις, συνδυάζεται με συστήματα MIMO ή και με τεχνικές NOMA, με στόχο τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου και την καλύτερη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνικών καθιστά το OFDM εξαιρετικά ευέλικτο και προσαρμόσιμο σε διάφορα περιβάλλοντα δικτύωσης [18],[22].

4.5.3 Clipping, Filtering, Tone Reservation, Active Noise Extension

Ολοκληρώνοντας, ενσωματώνουν ως μέσο ελάττωσης της καταναλισκόμενης μέσης ισχύς (PAPR) τεχνικές όπως το Clipping, Filtering, το Tone Reservation και το Active Noise Extension [12]

4.5.3.1 Clipping

Το Clipping, κόβει τα σημεία του σήματος, τα οποία ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο όριο (threshold). Δηλαδή, αν η τιμή του σήματος περνάει αυτό το ορισμένο μέγιστο όριο, <<κόβεται>> στο όριο αυτό. Στο Filtering, το οποίο συμβαίνει αμέσως μετά το Clipping, εφαρμόζεται φίλτρο που μειώνει την παρεμβολή εκτός ζώνης (Out of Band Radiation) που δημιουργείται από το Clipping [12],[15].

4.5.3.2 Tone Reservation

Το Tone Reservation (TR) είναι μια μέθοδος παρεμβατικού τύπου, η οποία ελαττώνει το PAPR στο OFDM. Αντί να κόβει τις κορυφές, κρατάει μερικούς υποφορείς (tones) ελεύθερους, χωρίς δεδομένα, και τους αξιοποιεί για να αντισταθμίσει τις κορυφές αυτές. Υπολογίζοντας κατάλληλα τα σύμβολα σε αυτούς τους υποφορείς μειώνει αναλόγως τα τις κορυφές αυτές. Αυτή η μέθοδος δεν επηρεάζει τα δεδομένα όμως, έχει μια μικρή αύξηση στο BER και έχουμε μια μικρή απώλεια χώρου επειδή αυτοί οι υποφορείς δεν μεταφέρουν πληροφορία [15].

4.5.3.3 Active Noise Extension

Το Active Noise Extension είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται συνήθως για να βελτιώσει την ανοχή του θορύβου στο σύστημα να βελτιώσει ελαφρώς το PAPR. Λειτουργεί εκμεταλλεύοντας τις υποδοχές του σήματος που είναι <<ανενεργές>> ή έχουν χαμηλή ενέργεια για να ενισχύσει τα σημεία όπου υπάρχει θόρυβος ή κορυφές στις τιμές. Το σήμα χωρίζεται σε τμήματα (frames) και αναλύονται οι περιοχές με χαμηλότερη τιμή ισχύος, όπου προστίθενται ορισμένα τμήματα, τα οποία τοποθετούνται σε κρίσιμες συχνοτικές περιοχές όπου ο θόρυβος έχει μεγάλη επίδραση. Αυτό βελτιώνει την ποιότητα του σήματος χωρίς να εισάγει πολύ μεγάλες παραμορφώσεις σε αυτό αλλά απαιτεί συγκεκριμένο φυσικό εξοπλισμό με μεγάλες δυνατότητες για την υλοποίησή του [15].

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις βασικές τεχνικές μείωσης του PAPR. Μέσα από αυτή τη σύγκριση γίνεται εμφανές ότι καθεμία τεχνική από αυτές έχει πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα έναντι των άλλων δύο. Το Clipping είναι απλό αλλά εισάγει παραμορφώσεις, το Tone Reservation είναι πιο καθαρό αλλά μειώνει τη χωρητικότητα, ενώ το Active Noise Extension παρέχει καλύτερη αντοχή στο θόρυβο έχοντας βέβαια μεγαλύτερο κόστος υλοποίησης.

Πίνακας 3 Σύνοψη Clipping/Filtering/TR/ANE

Μέθοδος	PAPR Μείωση	Distortion	Απώλεια Χωρητικότητας
Clipping & Filtering	Υψηλή	Υψηλή	Όχι
Tone Reservation	Μέτρια	Πολύ χαμηλή	Ναι (reserved tones)
Active Noise Extension	Μέτρια-Υψηλή	Χαμηλή	Όχι

4.6 Εφαρμογές του OFDM σε σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών

Η τεχνολογία OFDM έχει βρει πολλές εφαρμογές σε πληθώρα συστημάτων επικοινωνιών, καθιστώντας την έναν από τους βασικούς πυλώνες των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Στα ασύρματα δίκτυα Wi-Fi (IEEE 802.11), το OFDM χρησιμοποιείται για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων σε περιβάλλοντα με υψηλές παρεμβολές, όπως αστικά κέντρα ή βιομηχανικούς χώρους. Παράλληλα, η τεχνική αυτή είναι αναπόσπαστο στοιχείο της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης (DVB-T/T2), η οποία εξασφαλίζει ομαλή μετάδοση σήματος ακόμη και σε περιοχές με ανακλάσεις και μεγάλες απώλειες λόγω του φυσικού περιβάλλοντος. Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4G και 5G, το OFDM αξιοποιείται για την επίτευξη μεγάλων ταχυτήτων και χαμηλών καθυστερήσεων, παρέχοντας τη βάση για τις υπηρεσίες όπως το streaming υψηλής ποιότητας, βιντεοκλήσεις και εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας. Η ευελιξία και η ανθεκτικότητά του το κάνουν ιδανικό για μελλοντικές τεχνολογίες όπως το 6G, το οποίο έχει βασική προϋπόθεση τις υψηλές ταχύτητες και τη μεγάλη συνδεσιμότητα.

4.7 Μελλοντικές προοπτικές και εξελίξεις στο OFDM

Παρόλο που το OFDM έχει ήδη καθιερωθεί ως η κυρίαρχη τεχνολογία πολυπλεξίας, η έρευνα στον τομέα συνεχίζεται με στόχο την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσής του. Ένα σημαντικό πεδίο μελέτης είναι η μείωση του PAPR με νέες υβριδικές τεχνικές, οι οποίες συνδυάζουν τις μεθόδους Clipping και Tone Reservation με τη χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Παράλληλα, η ενσωμάτωση του OFDM με τεχνολογίες MIMO και Massive MIMO ανοίγει το δρόμο για ακόμη υψηλότερες ταχύτητες και καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος. Στο πλαίσιο των δικτύων 6G, γίνεται έρευνα για παραλλαγές του OFDM, όπως το Filter Bank Multi-Carrier (FBMC) και το Universal Filtered Multicarrier (UFMC), τα οποία στοχεύουν σε καλύτερη ανθεκτικότητα απέναντι στις παρεμβολές και σε χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος. Οι εξελίξεις αυτές δείχνουν ότι το OFDM στη σημερινή του μορφή καθώς και οι παραλλαγές του, θα συνεχίσουν να αποτελούν το θεμέλιο για τις επικοινωνίες του μέλλοντος.

4.8 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάστηκε η τεχνική OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), η οποία έχει καθιερωθεί ως μια από τις βασικές τεχνολογίες στις σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίες. Η αρχή λειτουργίας της, όπου το σήμα διασπάται σε πολλές ορθογώνιες υποφέρουσες, επιτρέπει την αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος, περιορίζει τις παρεμβολές μεταξύ φερουσών και εξασφαλίζει αξιόπιστη μετάδοση σε συνθήκες πολυδιαδρομής. Στο κεφάλαιο αναλύθηκαν τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και οι εφαρμογές της τεχνικής, όπως η αξιοποίησή της σε δίκτυα Wi-Fi, DVB-T/T2, 4G και 5G, αλλά και η σημασία της για τα μελλοντικά δίκτυα 6G, προσφέροντας υψηλές ταχύτητες, χαμηλές καθυστερήσεις και μεγάλη συνδεσιμότητα. Παράλληλα, παρουσιάστηκαν οι προκλήσεις που συνοδεύουν την εφαρμογή του OFDM, όπως η ευαισθησία στον συγχρονισμό, η παρεμβολή μεταξύ φερουσών (ICI), η διασπορά Doppler και το υψηλό PAPR, καθώς και οι βασικές τεχνικές αντιμετώπισής τους, όπως οι μετασχηματισμοί FFT/IFFT, το Cyclic Prefix, οι κώδικες Turbo/LDPC και οι μέθοδοι μείωσης του PAPR (Clipping, Filtering, Tone Reservation, Active Noise Extension). Επιπλέον, αναδείχθηκε η δυνατότητα του OFDM να συνδυάζεται με τεχνολογίες MIMO, Massive MIMO και NOMA, αυξάνοντας την απόδοση και τη χωρητικότητα των δικτύων. Τονίστηκε

Κεφάλαιο 4

επίσης η σημασία των παραλλαγών του για τα δίκτυα 6G, όπως τα FBMC και UFMC, τα οποία προσφέρουν καλύτερη ανθεκτικότητα στις παρεμβολές και μειώνουν την κατανάλωση ισχύος. Συνολικά, η τεχνολογία OFDM και οι συνεχώς εξελισσόμενες παραλλαγές της αναδεικνύονται ως θεμέλια για τα σύγχρονα και μελλοντικά ασύρματα δίκτυα, ενώ η έρευνα συνεχίζεται για τη βελτίωση της απόδοσης και την αντιμετώπιση των υφιστάμενων προκλήσεων.

Κεφάλαιο 5ο: Ανάλυση του συστήματος

Το υπό μελέτη σύστημα βασίζεται στην τεχνολογία Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), η οποία αποτελεί βασικό υποψήφιο για τα δίκτυα επόμενης γενιάς (5G/6G). Η NOMA επιτρέπει ταυτόχρονη μετάδοση πολλών χρηστών στην ίδια συχνότητα, αυξάνοντας τη φασματική αποδοτικότητα και επιτυγχάνοντας μαζική συνδεσιμότητα. Η βασική ιδέα στη NOMA είναι η υπέρθεση σημάτων (Superposition Coding) στον πομπό και η διαδοχική ακύρωση παρεμβολής (SIC) στον δέκτη. Η μετάδοση για δύο χρήστες δίνεται από:

$$x = \sqrt{P_1} * x_1 + \sqrt{P_2} * x_2, \quad P = P_1 + P_2 \quad (1)$$

Όπου P είναι η συνολική ισχύς εκπομπής, s_1, s_2 είναι τα σήματα των χρηστών και a_1, a_2 είναι οι συντελεστές κατανομής ισχύος με $a_1 + a_2 = 1$

Αυτή η εξίσωση δείχνει πως τα σήματα πολλαπλών χρηστών <<υπερτίθενται>> στον πομπό στην περίπτωση NOMA. Κατά τη λήψη, το σήμα παραμορφώνεται από το κανάλι και προστίθεται θόρυβος AWGN [19]. Η λήψη εκφράζεται ως:

$$y = h * x + n \quad (2)$$

όπου h είναι το κέρδος του καναλιού και n είναι θόρυβος τύπου AWGN

Το συνολικό σήμα που λαμβάνει ο δέκτης μετά από το κανάλι Rayleigh και πρόσθεση θορύβου είναι:

$$y[n] = \sum_{i=1}^2 \sqrt{P_i} (h_i * x_i)[n] + w[n] \quad (3)$$

Η SNR (Signal-to-Noise Ratio) είναι κρίσιμο μέτρο για την ποιότητα σήματος:

Τύπος:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} \quad (4)$$

Η σηματοθορυβική σχέση (Signal-to-Noise Ratio, SNR) εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στην ισχύ του χρήσιμου σήματος P_s και την ισχύ του θορύβου P_n . Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του SNR, τόσο πιο «καθαρό» είναι το σήμα και τόσο μικρότερη η πιθανότητα εμφάνισης λαθών κατά τη μετάδοση. Το SNR αποτελεί θεμελιώδη μέτρο για την αξιολόγηση της ποιότητας επικοινωνιακών συστημάτων, ειδικά σε περιβάλλοντα με έντονες παρεμβολές [16], [18]

Για την περίπτωση δύο χρηστών έχουμε την παρακάτω τροποποίηση για τον πρώτο χρήστη:

$$SNR_1 = \frac{P_1}{N_0}, \text{ για τον πρώτο χρήστη}$$

και για τον δεύτερο χρήστη με λόγο ισχύος a έχουμε:

$$SNR_2 = \frac{P_2}{N_0} = a * SNR_1, \text{ για } P_2 = a * P_1$$

Η τεχνική SIC επιτρέπει στον ισχυρό χρήστη να αφαιρέσει την παρεμβολή του ασθενούς χρήστη: Ο ισχυρός χρήστης πρώτα αποκωδικοποιεί το σήμα του ασθενούς χρήστη:

$$\hat{s}_2 = \text{Decode}(y) \quad (5)$$

Μετά αφαιρεί το ανακατασκευασμένο σήμα:

$$y' = y - \sqrt{a_2 P} \hat{s}_2 \quad (6)$$

Και τελικά ανακτά το δικό του σήμα:

$$\hat{s}_1 = \text{Decode}(y') \quad (7)$$

Αυτή η ακολουθία δείχνει τη διαδικασία πραγμάτωσης της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολής.

Αν $P_1 > P_2$:

1. Ανίχνευση του User1:

$$\hat{S}_1[k] = \frac{Y[k]}{H_1[k]\sqrt{P_1}} \quad (8)$$

2. Ανακατασκευή & ακύρωση σήματος:

$$Y'[k] = Y[k] - H_1[k]\sqrt{P_1}\hat{S}_1[k] \quad (9)$$

3. Ανίχνευση User 2:

$$\hat{S}_2[k] = \frac{Y'[k]}{H_2[k]\sqrt{P_2}} \quad (10)$$

Αντίστοιχα, αν $P_1 < P_2$: οι ρόλοι αντιστρέφονται.

Σε **OMA** (Orthogonal Multiple Access):

$$R_k^{\text{OMA}} = \frac{1}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_k |h_k|^2}{N_0} \right)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των χρηστών και N_0 είναι ο θόρυβος. Δείχνει ότι σε OMA κάθε χρήστης καταλαμβάνει διαφορετικό κομμάτι του εύρους ζώνης.

Σε **NOMA** (Non-Orthogonal Multiple Access), ο ρυθμός μετάδοσης για τον ισχυρό χρήστη (που κάνει SIC):

$$R_1^{\text{NOMA}} = \log_2 \left(1 + \frac{a_1 P |h_1|^2}{N_0} \right) \quad (11)$$

Για τον ασθενή χρήστη (που δέχεται παρεμβολή):

$$R_2^{\text{NOMA}} = \log_2 \left(1 + \frac{a_2 P |h_2|^2}{a_1 P |h_2|^2 + N_0} \right) \quad (12)$$

Για διαμόρφωση **BPSK**, ο ρυθμός σφαλμάτων είναι:

$$\text{BER} \cong Q(\sqrt{2\text{SNR}}) \text{ για BPSK} \quad (13)$$

Ο ρυθμός σφαλμάτων bit (Bit Error Rate, BER) περιγράφει την πιθανότητα να μεταδοθεί λανθασμένα ένα bit πληροφορίας. Η παραπάνω σχέση αφορά το σενάριο απλής διαμόρφωσης BPSK, όπου η πιθανότητα λάθους εξαρτάται από το SNR μέσω της συνάρτησης Q . Ουσιαστικά, όσο αυξάνει το SNR, μειώνεται εκθετικά το BER, γεγονός που αποδεικνύει πόσο κρίσιμη είναι η ενίσχυση της ποιότητας σήματος σε σύγχρονα δίκτυα [17], [18]. Η Q -function ορίζεται ως η πιθανότητα ένα **τυχαίο κανονικό Gaussian δείγμα** με μέση τιμή 0 και διασπορά 1 να είναι μεγαλύτερο από μια τιμή x :

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Η διαμόρφωση MPSK αποτελεί τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης φάσης, όπου η πληροφορία μεταφέρεται μέσω διακριτών μεταβολών της φάσης του φέροντος σήματος, ενώ το πλάτος και η ενέργεια παραμένουν σταθερά για όλα τα σύμβολα. Κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε μία μοναδική φάση, ισαπέχουσα στον κύκλο των 2π ακτινίων, επιτρέποντας τη μετάδοση $\log_2 M$ bits ανά σύμβολο. Ειδικές περιπτώσεις της MPSK είναι η BPSK ($M = 2$) και η QPSK ($M = 4$), οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της απλότητας και της καλής αντοχής τους στον θόρυβο. Ο γενικός τύπος που χρησιμοποιείται είναι ο εξής:

$$s_i(t) = g(t) \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M}(i-1)\right), i = 1, \dots, M, 0 \leq t \leq T_s$$

Για QPSK:

$$s_i(t) = g(t) \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi}{4}(i-1)\right), i = 1, \dots, 4 \quad (14)$$

Κάθε σύμβολο μεταφέρει 2 bits πληροφορίας και όλα τα σύμβολα έχουν την ίδια ενέργεια.

Και για 16 QAM:

$$s_i(t) = g(t)[I_i \cos(2\pi f_c t) - Q_i \sin(2\pi f_c t)] \quad (15)$$

όπου:

- I_i, Q_i είναι οι συνιστώσες πλάτους του αστερισμού (τυπικά τιμές από το σύνολο $\{\pm 1, \pm 3\}$, κατάλληλα κανονικοποιημένες),
- κάθε σύμβολο της 16QAM μεταφέρει $\log_2 16 = 4$ bits.

Σε αντίθεση με την QPSK, στη 16QAM τα σύμβολα δεν έχουν όλα την ίδια ενέργεια, γεγονός που αυξάνει τη φασματική αποδοτικότητα αλλά καθιστά το σύστημα πιο ευαίσθητο στον θόρυβο, όπως αναφέρεται και στο υλικό του αρχείου για τις QAM διαμορφώσεις

Το Packet Error Rate (PER) συνδέεται με το BER μέσω της πιθανότητας να έχει έστω και ένα λάθος bit μέσα σε ένα πακέτο μήκους L bit:

Τύπος:

$$PER = 1 - (1 - BER)^L \quad (16)$$

Το PER εκφράζει το ποσοστό των πακέτων δεδομένων που λαμβάνονται με σφάλμα. Σε αντίθεση με το BER, που μετρά την πιθανότητα σφάλματος ανά bit, το PER εστιάζει στο σύνολο ενός πακέτου, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει από λίγα μέχρι χιλιάδες bit. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος L του πακέτου, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το πακέτο να περιέχει τουλάχιστον ένα λανθασμένο bit, άρα μεγαλώνει και το PER.

Για μικρές τιμές BER, το PER προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$PER \cong L * BER$$

Το PER χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση πρακτικών επικοινωνιακών συστημάτων, όπου η παράδοση ολόκληρων πακέτων δεδομένων (και όχι μεμονωμένων bit) είναι η κρίσιμη μετρική, όπως στα Wi-Fi, LTE/5G και στα πρωτόκολλα δικτύων. Έτσι, ενώ το BER δίνει μια θεωρητική εικόνα της

ποιότητας σήματος, το PER αποτυπώνει πιο ρεαλιστικά την εμπειρία του χρήστη, αφού ακόμη και ένα σφάλμα σε bit μπορεί να καταστήσει άχρηστο ένα ολόκληρο πακέτο [16], [17].

Το OFDM χρησιμοποιεί τον **IFFT** για να μετατρέψει τα υποφέροντα στο χρονοσειριακό σήμα:

Τύπος:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad \text{ή αλλιώς } x_i[n] = \sqrt{P_i} * \text{IFFT}\{s_i[k]\} \quad (17)$$

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει τη διαδικασία δημιουργίας του OFDM σήματος μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (IFFT). Κάθε υποφέροντας X_k τοποθετείται σε διαφορετική συχνότητα και μέσω της IFFT προκύπτει το χρονοσειράς σήμα x_n που μεταδίδεται. Αντίστοιχα, στον δέκτη χρησιμοποιείται ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) για την ανάκτηση των αρχικών συμβόλων. Η χρήση FFT/IFFT καθιστά το OFDM ιδιαίτερα αποδοτικό υπολογιστικά και επιτρέπει την εκμετάλλευση της ορθογωνιότητας των υποφερόντων [13], [14].

Το **Cyclic Prefix** αποφεύγει τη διασυμβολική παρεμβολή. Το Cyclic Prefix δημιουργείται αντιγράφοντας τα τελευταία L δείγματα του OFDM συμβόλου στην αρχή του. Το σύμβολο με CP, $x_{CP}[n]$ δίνεται από:

$$x_{CP}[n] \begin{cases} x[N - L + n], n = 0, 1, \dots, L - 1 \\ x[n - L], n = L, L + 1, \dots, N + L - 1 \end{cases}$$

Στον παραπάνω τύπο L είναι το μήκος του CP σε δείγματα και $x[n - L]$ είναι τα κανονικά δείγματα του OFDM συμβόλου που ακολουθούν. Με αυτόν τον τρόπο, το σύμβολο διατηρείται κυκλικό και η διασυμβολική παρεμβολή (ISI) απορροφάται από το CP.

5.1 Χωρητικότητα καναλιού (Shannon)

Ο τύπος αυτός, γνωστός και ως θεωρία χωρητικότητας καναλιού του Shannon, περιγράφει τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων C που μπορεί να υποστηρίξει ένα κανάλι με εύρος ζώνης B και σηματοθοροβική σχέση SNR.

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (18)$$

Αποτελεί θεμέλιο λίθο της θεωρίας επικοινωνιών, αφού δείχνει ότι η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί είτε με αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης είτε με βελτίωση του SNR. Στην πράξη, ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί το ανώτατο όριο επίδοσης συστημάτων όπως το OFDM σε κινητά και ασύρματα δίκτυα [20].

Η PAPR μετρά την απότομη αύξηση ισχύος στο OFDM:

$$\text{PAPR} = \frac{\max|x(t)|^2}{E[|x(t)|^2]}$$

Το $\max|x(t)|^2$ εκφράζει τη μέγιστη ισχύ και το $E[|x(t)|^2]$ εκφράζει τη στιγμιαία ισχύ

Ο λόγος μέγιστης προς μέση ισχύ (PAPR) είναι ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα του OFDM. Ο τύπος εκφράζει τη σχέση μεταξύ της μέγιστης στιγμιαίας ισχύος του σήματος και της μέσης ισχύος του. Ένα υψηλό PAPR σημαίνει ότι το σήμα παρουσιάζει πολύ έντονες κορυφές, οι οποίες οδηγούν σε μη γραμμικές παραμορφώσεις στους ενισχυτές ισχύος. Αυτός είναι και ο λόγος που έχουν αναπτυχθεί τεχνικές όπως το Clipping, το Tone Reservation και το Active Noise Extension για να περιορίσουν αυτό το φαινόμενο [12], [15]

5.2 RISIP

Στα συστήματα OFDM και NOMA, οι όροι ISP (Instantaneous Signal Power), ASP (Average Signal Power) και RISIP (Relative Instantaneous Signal Power) σχετίζονται με τον τρόπο κατανομής της ισχύος και της πληροφορίας στους χρήστες και στις υποφέρουσες. Ο όρος ISP αναφέρεται στη στιγμιαία ισχύ του σήματος. Εκφράζει την ισχύ που έχει το εκπεμπόμενο ή λαμβανόμενο σήμα σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ή για ένα συγκεκριμένο σύμβολο.

- Στο OFDM, η ISP παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις λόγω της υπέρθεσης πολλών υποφερουσών, γεγονός που οδηγεί σε υψηλό PAPR.
- Στο NOMA, η ISP επηρεάζεται επιπλέον από την υπέρθεση σημάτων πολλών χρηστών στην ίδια χρονική-συχνотική πηγή.

Η ASP είναι η μέση ισχύς του σήματος και προκύπτει ως ο χρονικός μέσος όρος της στιγμιαίας ισχύος.

- Στα OFDM συστήματα, η ASP χρησιμοποιείται για την κανονικοποίηση του σήματος και τη σύγκριση διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης.
- Στο NOMA, η ASP αποτελεί βασικό μέγεθος για την κατανομή ισχύος μεταξύ χρηστών (power allocation), ώστε να εξασφαλίζεται σωστή λειτουργία του SIC.

Η RISIP (Σχετική Στιγμιαία Ισχύς Σήματος) ορίζεται ως ο λόγος της στιγμιαίας ισχύος προς τη μέση ισχύ και αποτελεί ουσιαστικά μέτρο των διακυμάνσεων ισχύος του σήματος.:

$$RISIP = \frac{ISP}{ASP} \quad (19)$$

- Στο **OFDM**, η RISIP χρησιμοποιείται για τη μελέτη του **PAPR**, καθώς μεγάλες τιμές RISIP υποδηλώνουν αιχμές ισχύος.
- Στο **NOMA**, η RISIP επηρεάζεται τόσο από την OFDM δομή όσο και από την υπέρθεση χρηστών, επηρεάζοντας την απόδοση των ενισχυτών ισχύος και την αξιοπιστία του συστήματος.

Η ισχύς κάθε subcarrier καθορίζει τη μετάδοση και βελτιστοποιεί την απόδοση σε καθένα από αυτά για καλύτερη ποιότητα σύνδεσης. Στην περίπτωση που αποκωδικοποιείται πρώτα ο 1^{ος} χρήστης με βάση τον 2^ο χρήστη και τον θόρυβο που υπολείπεται έχουμε ότι σε υψηλές τιμές του SINR,

$$SINR \Rightarrow \varphi_1 = \frac{ISP_1}{ISP_2}, \varphi_2 = \frac{ISP_2}{ISP_1} \quad (19)$$

Επομένως, αν ο 1^{ος} χρήστης δεν μπορεί να αποκωδικοποιηθεί πρώτος σε υψηλό SNR, τότε και ο 2^{ος} δεν μπορεί να αποκωδικοποιηθεί σε υψηλό SNR.

Άρα, ξέρουμε ότι $\frac{\varphi_1}{\tau_1} > \frac{\varphi_2}{\tau_2}$ δεδομένου ότι $\frac{\varphi_1}{\tau_1} < 1$ τότε το $\frac{\varphi_2}{\tau_2} < 1$.

Η ισχύς αυτή υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$RISIP_i = \frac{ISP_i}{\sqrt{\tau_i}} \quad (20)$$

Στην σχέση αυτή, ως ISP ορίζεται η στιγμιαία ισχύς σε κάθε subcarrier και ως τ_i ορίζεται ως ο ρυθμός μετάδοσης και έχει τιμή ίση με:

$$\tau_i = 2^{\widehat{R}_i} - 1 \quad (27)$$

Πίνακας 4 Σύγκριση ISP και RISP για δύο χρήστες [11]

Περίπτώσεις	ISP	RISP
Περίπτωση NO.1 $\varphi_1 > \tau_1, \varphi_2 < \tau_2, ISP_1 < ISP_2$	×	✓
Περίπτωση NO.2 $\varphi_1 > \tau_1, \varphi_2 < \tau_2, ISP_1 > ISP_2$	✓	✓
Περίπτωση NO.3 $\varphi_1 < \tau_1, \varphi_2 < \tau_2, ISP_1 < ISP_2$	✓	✓
Περίπτωση NO.4 $\varphi_1 < \tau_1, \varphi_2 < \tau_2, ISP_1 > ISP_2$	×	✓
Περίπτωση NO.5 $\varphi_1 > \tau_1, \varphi_2 > \tau_2, ISP_1 < ISP_2$	✓	✓
Περίπτωση NO.6 $\varphi_1 > \tau_1, \varphi_2 > \tau_2, ISP_1 > ISP_2$	✓	✓
Περίπτωση NO.7 $\varphi_1 < \tau_1, \varphi_2 > \tau_2, ISP_1 < ISP_2$	×	×
Περίπτωση NO.8 $\varphi_1 < \tau_1, \varphi_2 > \tau_2, ISP_1 > ISP_2$	×	×

Στον παραπάνω πίνακα, παρέχεται μία σύγκριση μεταξύ του κριτηρίου ISP και του κριτηρίου RISP. υψηλό SNR. Στον πίνακα αυτό η "✓" σημαίνει ότι και οι δύο χρήστες μπορούν να αποφύγουν τη διακοπή, ενώ το "X" σημαίνει ότι και οι δύο χρήστες δεν μπορούν να αποφύγουν τη διακοπή. Για παράδειγμα στην 1η περίπτωση, η πρώτη αποκωδικοποίηση του χρήστη 1 μπορεί να αποφύγει τη διακοπή και για τους δύο χρήστες, ενώ η πρώτη αποκωδικοποίηση του χρήστη 2 θα οδηγήσει στη διακοπή και για τους 2 χρήστες [9].

Κεφάλαιο 6ο: Ανάλυση Κώδικα-Διάγραμμα Ροής

6.1 Βασικός κώδικας

Σε αυτήν την ενότητα αναλύεται ο κώδικας που αναπτύξαμε και αφορά την προσομοίωση ενός συστήματος Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), η οποία είναι μια τεχνική διαμόρφωσης και πολυπλεξίας, για δύο χρήστες, οι οποίοι επικοινωνούν μέσω QAM (Quadrature Amplitude Modulation) κωδικοποίησης. Σκοπός του κώδικα είναι η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος μέσω της πιθανότητα να μεταδοθεί λανθασμένα ένα bit πληροφορίας, δηλαδή μέσω του BER, σε συνάρτηση με την σηματοθορυβική σχέση του σήματος (SNR). Ο πρώτος χρήστης χρησιμοποιεί 4-QAM και ο δεύτερος χρήστης 16-QAM. Το σύστημα προσομοιώνει μια κατανομή Rayleigh, προσθέτει Gaussian θόρυβο και αξιολογεί την επίδραση της συνολικής παρεμβολής και των διαταραχών μέσω της τεχνικής της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολής (SIC). Ο κώδικας εκτελεί προσομοιώσεις για διαφορετικές τιμές του SNR και συγκρίνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την θεωρητική εκτίμηση του BER για το σύστημα. Στην ανάλυση που ακολουθεί, παρέχεται μια βήμα-βήμα εξήγηση του κώδικα, εντοπίζοντας πιθανά προβλήματα και περιοχές για βελτίωση, καθώς και τις δυνατότητες που προσφέρει το σύστημα για περαιτέρω βελτιστοποίηση και προσαρμογή.

6.2 Διάγραμμα Ροής

Στην εικόνα 6.1 βλέπουμε τη ροή του κώδικα, η οποία έχει τα εξής στάδια:

Το πρώτο στάδιο αφορά την αρχικοποίηση των παραμέτρων των μεταβλητών του συστήματός μας. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι εξής: N, M1, M2, CP, ισχύς, SNR. Στο δεύτερο στάδιο του υλοποιείται ο βρόγχος για τη σηματοθορυβική σχέση από 0dB έως 50dB με βήμα αύξησης 5dB. Σε αυτό τον βρόγχο και για κάθε SNR εντός των ορίων που έχουμε ορίσει, θέτουμε τους μετρητές των λαθών στο μηδέν και εκκινούμε τον εμφωλευμένο βρόγχο που τρέχει με σκοπό τα συλλέξει τα απαιτούμενα λάθη για να ελέγξουμε την ευστάθεια του συστήματός μας. Τα βήματα που ακολουθεί ο εμφωλευμένος βρόγχος είναι τα εξής:

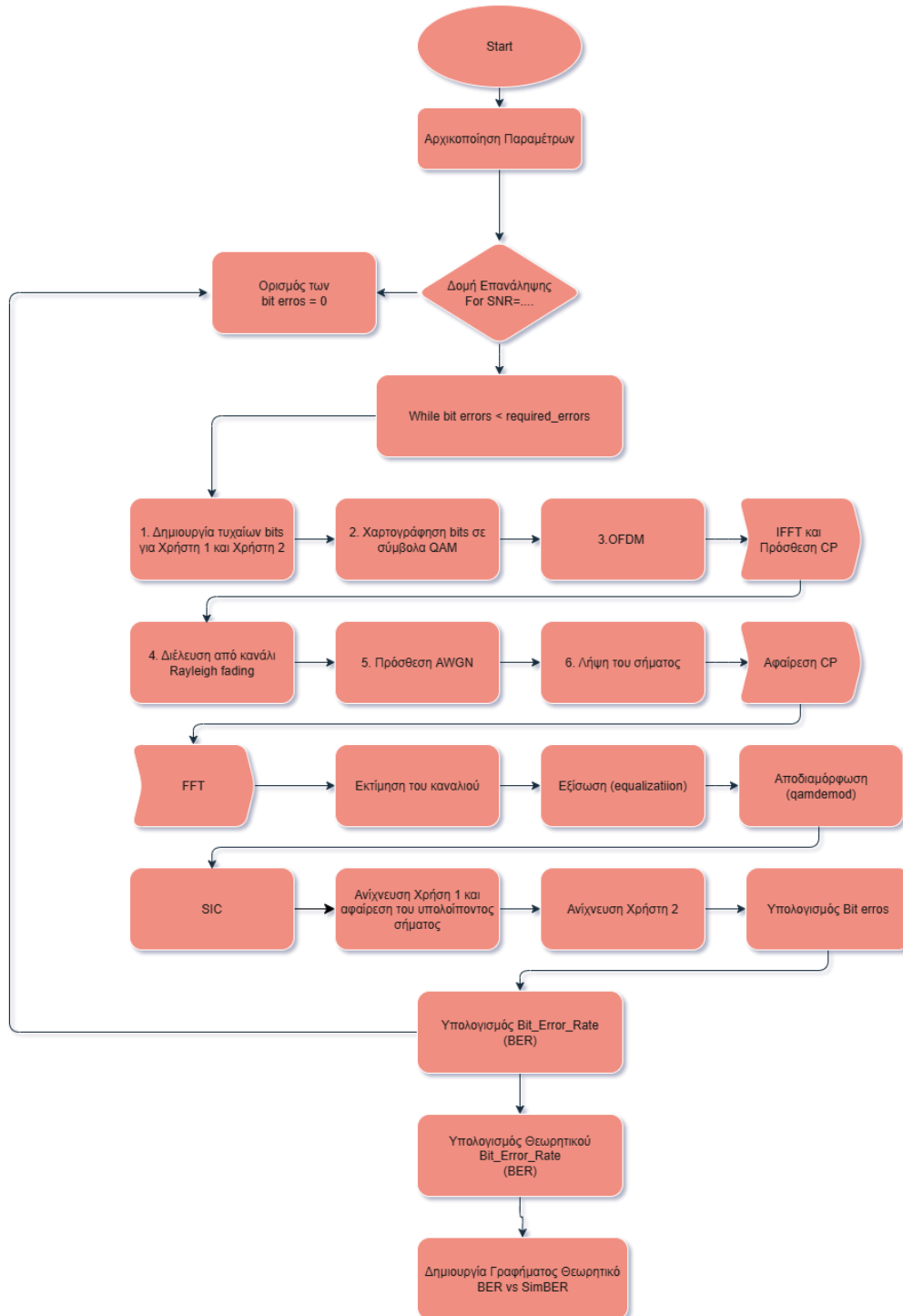
1. Δημιουργία τυχαίων bits για κάθε χρήστη.
2. Χαρτογράφηση bits σε σύμβολα QAM (4 ή 16-QAM για user1, 4 ή 16-QAM για user2 έπειτα από δική μας επιλογή).
3. OFDM Modulation (IFFT + CP).
4. Διέλευση από κανάλι Rayleigh fading.
5. Πρόσθεση AWGN θορύβου.
6. Λήψη:
 - Αφαίρεση CP.
 - FFT.
 - Εκτίμηση καναλιού (H1, H2).
 - Εξίσωση (equalization).
 - Αποδιαμόρφωση QAM (Demod).
7. SIC (Successive Interference Cancellation):
 - Ανίχνευση χρήστη 1 → αφαίρεση σήματος → Ανίχνευση χρήστη 2.

8. Υπολογισμός Bit Errors.

- Υπολογισμός BER για το SNR.

2. Υπολογισμός θεωρητικού BER (για 16-QAM).

Γράφημα: Θεωρητικό BER vs Προσομοίωση.



Εικόνα 6.1 Διάγραμμα ροής κώδικα

6.2.1 Πρώτη εκδοχή του κώδικα: basic model

Στις γραμμές του κώδικα 7 έως 9 ορίζουμε τα εξής:

```
N = 256;% Number of subcarriers
Nused = 256; % Active subcarriers
Nempty = N-Nused; % Subcarriers not used
```

- N, ο αριθμός των υποκαναλιών
- Nused, αριθμός των ενεργών υποκαναλιών
- Nempty, υπολογισμός των υποκαναλιών που δεν χρησιμοποιούνται (σε αυτήν την περίπτωση είναι μηδέν)

Στις γραμμές του κώδικα 10 έως 13 ορίζουμε τα εξής:

```
M1 = 16;
k1 = log2(M1);
M2 = 4;
k2 = log2(M2);
```

- M1, η τάξη του QAM για τον πρώτο χρήστη~ 4QAM
- M2, η τάξη του QAM για τον δεύτερο χρήστη~ 16QAM
- k1, ο αριθμός bits ανά σύμβολο για τον πρώτο χρήστη
- k2, ο αριθμός bits ανά σύμβολο για τον δεύτερο χρήστη

Στις γραμμές του κώδικα 14 έως 23 έχουμε τις παραμέτρους που αφορούν την σταθεροποίηση του συστήματος και ορίζουμε τα εξής:

```
k_QAM1 = 1/sqrt(2*(M1-1)/3);
k_QAM2 = 1/sqrt(2*(M2-1)/3);
Pr1 = 1;
% Pr2 = 0.1;
alpha = 0.1;
Pr2 = alpha*Pr1;
SNRdB1 = 0:5:40;
SNRdB2 = SNRdB1 + 10*log10(alpha);
CP = 32;
```

- k_QAM1, είναι το στοιχείο κανονικοποίησης της ισχύος για τα σύμβολα QAM του πρώτου χρήστη
- k_QAM2, είναι το στοιχείο κανονικοποίησης της ισχύος για τα σύμβολα QAM του δεύτερου χρήστη
- Pr1, είναι η ικανότητα μετάδοσης για τον πρώτο χρήστη, μετράται σε Watts
- Pr2, είναι η ικανότητα μετάδοσης για τον δεύτερο χρήστη, ο οποίος εξαρτάται από τον παράγοντα alpha (στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 10% του πρώτου χρήστη), μετράται σε Watts
- SNRdB1, είναι το εύρος της τιμής της σηματοθορυβικής σχέσης του πρώτου χρήστη.

Κεφάλαιο 6

- SNRdB2, είναι το εύρος της τιμής της σηματοθορυβικής σχέσης του δεύτερου χρήστη.
- CP, είναι η τιμή του κυκλικού προθέματος που προσθέτουμε για την αποφυγή της διασυμβολικής παρεμβολής

Στις γραμμές 24 έως 31 δημιουργούμε πίνακες για την αποθήκευση των αριθμών των σφαλμάτων, των bits που έχουν προσομοιωθεί και των υπολογισμένων BER για κάθε χρήστη.

```
bit_errors_user1 = zeros(1,length(SNRdB1));
bit_errors_user2 = zeros(1,length(SNRdB1));
Num_of_bits_user1 = zeros(1,length(SNRdB1));
simBER_user1= zeros(1,length(SNRdB1));
Num_of_bits_user2 = zeros(1,length(SNRdB2));
simBER_user2= zeros(1,length(SNRdB2));
```

- bit_errors_user1, είναι η μεταβλητή μετρητής των λανθασμένων bits μετά την ανίχνευση με βάση τη σηματοθορυβική σχέση για τον πρώτο χρήστη
- bit_errors_user2, είναι η μεταβλητή μετρητής των λανθασμένων bits μετά την ανίχνευση με βάση τη σηματοθορυβική σχέση για τον δεύτερο χρήστη
- Num_of_bits_user1, ο αριθμός των bits του πρώτου χρήστη
- Num_of_bits_user2, ο αριθμός των bits του δεύτερου χρήστη
- simBer_user1, υπολογισμός της πιθανότητας λάθους BER για τον πρώτο χρήστη με βάση το SNR1
- simBer_user2, υπολογισμός της πιθανότητας λάθους BER για τον δεύτερο χρήστη με βάση το SNR2

Αφού έχουμε ορίσει τις μεταβλητές για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης μας, μπορούμε πλέον να περάσουμε στο κομμάτι του βασικού κώδικά μας. Στις παρακάτω γραμμές, 36 έως 161 έχουμε δύο βρόγχους επανάληψης οι οποίοι έχουν ως εξής:

```
%% Main Program %%
for jj=1:length(SNRdB1)
SNR_user1 = 10^(SNRdB1(jj)/10); %calculation of symbol SNR (Es/No)
required_errors = 1000; % Number of bit errors required to provide an "acceptable"
BER
```

Στη γραμμή 36, ξεκινάει ο πρώτος βρόγχος για κάθε τιμή του SNR του χρήστη 1. Υπολογίζεται το SNR σε διανυσματική μορφή, το οποίο είναι αναγκαίο για τις διαδικασίες υπολογισμού του θορύβου. Στις γραμμές 41 έως 48 ξεκινάει η εμφωλευμένη επανάληψη, η οποία είναι απαραίτητη για τη δημιουργία πληροφοριών bits για τον πρώτο χρήστη και υπολογίζεται ο αριθμός των bits που μεταδίδονται με τη χρήση της μεταβλητής Num_of_bits_user1.

```
while bit_errors_user1(jj) < required_errors
Num_of_bits_user1(jj) = Num_of_bits_user1(jj)+Nused*k1;
info_bits_user1= randi([0 1],Nused*k1,1);
Num_of_bits_user2(jj) = Num_of_bits_user2(jj)+Nused*k2;
info_bits_user2 = randi([0 1],Nused*k2,1);
```

Η **While** είναι μία από τις βασικές εντολές επανάληψης και δομείται από την κλήση της, και ακολουθείται από μία συνθήκη. Για όλο το διάστημα που η συνθήκη θα είναι αληθής, η επανάληψη θα συνεχίζεται και θα σταματήσει όταν η συνθήκη θα είναι πλέον ψευδής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτό θα γίνει όταν ο αριθμός των λαθών για τον πρώτο χρήστη ταυτιστεί με τον αριθμό των απαιτούμενων λαθών που θέλουμε να συγκεντρώσουμε για να δείξουμε ότι το σύστημά μας θα είναι σταθερό.

Στις γραμμές 52 έως 58 έχουμε τα εξής:

```
info_symbols_user1 = qammod(info_bits_user1,M1,'InputType','bit');
info_symbols_QAM_user1 = k_QAM1*info_symbols_user1.';
A1 = info_symbols_QAM_user1;
info_symbols_user2 = qammod(info_bits_user2,M2,'InputType','bit');
info_symbols_QAM_user2 = k_QAM2*info_symbols_user2.';
A2 = info_symbols_QAM_user2;
```

- `Info_symbols_user1`, χαρτογραφεί τα δεδομένα σε σύμβολα QAM
- `Info_symbols_QAM_user1`, χρησιμοποιώντας τον τύπο 4-QAM και τα κανονικοποιεί με τον παράγοντα `k_QAM1`.
- `Info_bits_user2`, χαρτογραφεί τα δεδομένα σε σύμβολα QAM
- `Info_symbols_QAM_user2`, χρησιμοποιώντας τον τύπο 16-QAM και τα κανονικοποιεί με τον παράγοντα `k_QAM1`.
- `A1`, ο πίνακας που καταχωρούμε τις τιμές για τον πρώτο χρήστη
- `A2`, ο πίνακας που καταχωρούμε τις τιμές για τον δεύτερο χρήστη

Στις γραμμές του κώδικα 60 έως 66 ορίζουμε τα εξής:

```
ofdm_symbol_user1 = sqrt(N)*ifft(A1);
tx_ofdm_cp_1=[ofdm_symbol_user1(N-CP+1:N),ofdm_symbol_user1];
ofdm_symbol_user2 = sqrt(N)*ifft(A2);
tx_ofdm_cp_2=[ofdm_symbol_user2(N-CP+1:N),ofdm_symbol_user2];
```

- `Ofdm_symbol_user1`, είναι η μεταβλητή με την οποία κανονικοποιούμε την ισχύ ως προς τη μονάδα για τον πρώτο χρήστη
- `Ofdm_symbol_user2`, είναι η μεταβλητή με την οποία κανονικοποιούμε την ισχύ ως προς τη μονάδα για τον δεύτερο χρήστη
- `Tx_ofdm_cp_1`, είναι η μεταβλητή στην οποία προσθέτουμε στο κανονικοποιημένο σήμα το κυκλικό πρόθεμα για την αποφυγή της διασυμβολικής παρεμβολής για το σήμα του πρώτου χρήστη
- `Tx_ofdm_cp_2`, είναι η μεταβλητή στην οποία προσθέτουμε στο κανονικοποιημένο σήμα το κυκλικό πρόθεμα για την αποφυγή της διασυμβολικής παρεμβολής για το σήμα του δεύτερου χρήστη

Στις γραμμές 67 έως 85 έχουμε τη δημιουργία Rayleigh καναλιού για δύο χρήστες. Ο κώδικας δημιουργεί κανάλια πολλαπλών διαδρομών (multipath channels) με Rayleigh fading, δηλαδή τυχαίες διακυμάνσεις που μοντελοποιούνται με μιγαδικές Gaussian κατανομές.

```

h1=zeros;
p=0.2;
delays = [0,5,10,20,30];
%for del=1:length(delays)
%h1(delays(del)+1)=sqrt(p)*(randn(1,1)+1i*randn(1,1))/sqrt(2);
%end
h1 = (randn(1,1)+1i*randn(1,1))/sqrt(2);

```

- **h1**, αρχικοποίηση του πρώτου καναλιού και ορισμός του ίσο με μηδέν
- **h2**, αρχικοποίηση του δεύτερου καναλιού και ορισμός του ίσο με μηδέν
- **p=0.2** σημαίνει ότι υπάρχουν 5 διαδρομές με ίση ισχύ ώστε η συνολική ισχύς να είναι 1

Το κανάλι h1 γεμίζει με μιγαδικούς αριθμούς Gaussian κατανομής για κάθε διαδρομή, σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία (delays). Η καθυστέρηση εφαρμόζεται ως index offset. Αντί για πολλαπλές διαδρομές, χρησιμοποιείται μία διαδρομή με Rayleigh fading (complex Gaussian με μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία διακύμανση) [γραμμή 76].

Στις γραμμές 78 έως 84 έχουμε την ίδια διαδικασία για τον δεύτερο χρήστη.

```

% user 2
h2=zeros;
%p=0.2;
%delays = [0,5,10,20,30];
%for del=1:length(delays)
%h2(delays(del)+1)=sqrt(p)*(randn(1,1)+1i*randn(1,1))/sqrt(2);
%end
h2 = (randn(1,1)+1i*randn(1,1))/sqrt(2);
%h = (randn(1,1)+1i*randn(1,1))/sqrt(2);

```

Ο κώδικας ετοιμάζεται να δημιουργήσει Rayleigh κανάλια πολλαπλών διαδρομών, αλλά τελικά χρησιμοποιεί απλά μοντέλα με μία διαδρομή (flat fading) για δύο χρήστες (h1, h2). Στις παρακάτω γραμμές του κώδικα, 87 έως 94 το πρόγραμμα ασχολείται με την έξοδο του καναλιού για δύο χρήστες, υπολογίζοντας τα σήματα που λαμβάνονται μετά την συνέλιξη με το κανάλι του καθενός και την προσθήκη τους στην τελική ληφθείσα έξοδο.

```

rx1 = conv(h1,tx_ofdm_cp_1);
% user 2
rx2 = conv(h2,tx_ofdm_cp_2);
rx = (Pr1/N)*rx1 + (Pr2/N)*rx2;

```

- **tx_ofdm_cp_1**, είναι το σήμα του χρήστη 1 που μεταδίδεται μέσω του καναλιού.
- **conv()**, εκτελεί τη συνέλιξη του σήματος μετάδοσης με το κανάλι του χρήστη 1, παράγοντας το ληφθέν σήμα rx1 με βάση το h1 & το tx_ofdm_cp_1
- **tx_ofdm_cp_2**, είναι το σήμα του χρήστη 2 που μεταδίδεται μέσω του καναλιού.

- **conv()**, εκτελεί τη συνέλιξη του σήματος μετάδοσης με το κανάλι του χρήστη 2, παράγοντας το ληφθέν σήμα rx2 με βάση το h2 & το tx_ofdm_cp_2
- **rx**, είναι η συνολική ληφθείσα έξοδος, η οποία προκύπτει από την υπέρθεση των σημάτων των δύο χρηστών
- **Pr1**, είναι η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται από τον χρήστη 1
- **Pr2**, είναι η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται από τον χρήστη 2
- **N** είναι ο αριθμός δειγμάτων. Η εξίσωση προσθέτει τα σήματα rx1 και rx2 αφού τα σταθμίσει με τις ισχύεις τους. Η συνολική ληφθείσα έξοδος προκύπτει από τον συνδυασμό των σημάτων των δύο χρηστών.

Στο παρακάτω τμήμα του κώδικα, γραμμές 96 έως 108, έχουμε τρεις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα:

```
noise = (randn(1,length(rx))+ 1i*randn(1,length(rx)))/sqrt(2);
rx_noise = rx;% + noise/sqrt(SNR_user1);
rx_wCP = rx_noise(CP+1:CP+N);
Y_fft = fft(rx_wCP,N)/sqrt(N);
Y_used = Y_fft;
```

1^η εργασία (Γραμμές 96-99):

- **noise**, μέσω της randn(1,length(rx)): δημιουργεί τυχαίους αριθμούς Gaussian (κανονικοί αριθμοί με μέση τιμή 0 και διακύμανση 1) για το θόρυβο και μέσω της 1i*randn(1,length(rx)) δημιουργεί το φανταστικό μέρος του θορύβου, οπότε έχουμε συνολικό μιγαδικό θόρυβο. Ο θόρυβος κανονικοποιείται με $\sqrt{2}$ για να έχει διακύμανση 1.
- **Rx_noise**, προστίθεται ο θόρυβος στο ληφθέν σήμα rx. Ο θόρυβος κανονικοποιείται ανάλογα με την αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR) του χρήστη 1.

2^η εργασία (Γραμμές 101-103):

- Η διαδικασία αυτή αφαιρεί το κυκλικό πρόθεμα (CP) από το ληφθέν σήμα rx_noise.
- **CP**, είναι το μέγεθος του κυκλικού προθέματος.
- Το CP+1:CP+N επιλέγει τα N δεδομένα του σήματος μετά την αφαίρεση του CP.

3^η εργασία (Γραμμές 104-108):

- **fft(rx_wCP, N)**, εκτελεί τον Fast Fourier Transform (FFT) του σήματος χωρίς το κυκλικό πρόθεμα (CP) για να μετατραπεί το σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας.
- \sqrt{N} , κανονικοποιεί το αποτέλεσμα του FFT για να διατηρηθεί η συνολική ισχύς του σήματος.
- **Y_used**, το αποτέλεσμα του FFT χρησιμοποιείται ως το τελικό σήμα που έχει υποστεί αποδιαμόρφωση (ή το "χρησιμοποιούμενο" σήμα για περαιτέρω επεξεργασία).

Στο τμήμα του κώδικα 110 έως 132 πραγματοποιείται το εξής:

```
H1 = fft(h1,N);
Y1 = Y_used./H1;
z1 = Y1/k_QAM1/(Pr1/N);
info_bitsQAM_hat_1 = qamdemod(z1,M1,'OutputType','bit');
```

```

info_bits_hat_1 = reshape(info_bitsQAM_hat_1,log2(M1)*Nused,1);
Detected_QAM_user1 = qammod(info_bits_hat_1,M1,"gray",true);
Cancelled_Signal_1 = Detected_QAM_user1.*H1 ;
Y_Cancel_1 = Y_used -Cancelled_Signal_1 ;

```

Γίνεται εκτίμηση της συχνότητας του καναλιού (Channel Frequency Response):

- **h1** είναι το κανάλι του χρήστη 1.
- **fft(h1,N)**: Εκτελεί τον Fast Fourier Transform (FFT) στο κανάλι για να εκτιμήσει την απόκριση του καναλιού στη συχνότητα. Η εκτίμηση της απόκρισης του καναλιού θα χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση του ληφθέντος σήματος και θα εκχωρηθεί στη μεταβλητή H1 για επεξεργασία σε επόμενο κομμάτι
- Αποκατάσταση του σήματος χρήστη 1 (One-tap Equalization):
- **Y_used** είναι το ληφθέν σήμα, μετά την αποδιαμόρφωση (FFT).
- Η **Y1** είναι το αποκατεστημένο σήμα για το χρήστη 1. Εφαρμόζεται η διόρθωση του καναλιού (equalization) διαιρώντας το ληφθέν σήμα με την εκτίμηση της απόκρισης του καναλιού H1.
- Εντοπισμός του σήματος χρήστη 1 (Detection):
- **z1**: Το αποκατεστημένο σήμα Y1 κλιμακώνεται από το k_QAM1, που πιθανώς είναι ένας παράγοντας κανονικοποίησης για το σήμα QAM του χρήστη 1.
- Η **qammod(z1, M1, 'OutputType', 'bit')** εφαρμόζει την QAM διαμόρφωση στα δεδομένα, όπου M1 είναι η τάξη της διαμόρφωσης QAM (π.χ. 4-QAM, 16-QAM κ.λπ.).
- Τα **info_bits_hat_1** είναι τα δεδομένα του χρήστη 1 μετά την αποδιαμόρφωση, αναπαριστώντας τα σε μορφή bit.
- Ακύρωση του σήματος χρήστη 1 από το συνολικό σήμα (Cancellation of User 1 Signal):
- Το **Detected_QAM_user1** είναι το διαμορφωμένο σήμα QAM του χρήστη 1, το οποίο αναδημιουργείται από τα αποδιαμορφωμένα δεδομένα **info_bits_hat_1**.
- Το **Cancelled_Signal_1** είναι το σήμα του χρήστη 1 που ακυρώνεται από το συνολικό σήμα **Y_used**, πολλαπλασιάζοντας το **Detected_QAM_user1** με την απόκριση του καναλιού **H1** (ανασύροντας το σήμα του χρήστη 1).
- Η **Y_Cancel1** είναι το υπόλοιπο σήμα, το οποίο περιλαμβάνει το σήμα του χρήστη 2 αφού το σήμα του χρήστη 1 ακυρωθεί.

Στο τμήμα του κώδικα 133 έως 153 έχουμε την εκτίμηση του καναλιού του δεύτερου χρήστη :

```

H2 = fft(h2,N);
Y2 = Y_used./H2;
z2 = Y2/k_QAM2/(Pr2/N);
info_bitsQAM_hat_2 = qamdemod(z2,M2,'OutputType','bit');
info_bits_hat_2 = reshape(info_bitsQAM_hat_2,log2(M2)*Nused,1);
Detected_QAM_user2 = qammod(info_bits_hat_2,M2,"gray",true);
Cancelled_Signal_2 = Detected_QAM_user2.*H2;
Y_Cancel_2 = Y_used -Cancelled_Signal_2;
Y_noise = Y_Cancel_2;

```

- Υπολογίζει την απόκριση συχνότητας του καναλιού για τον user 2 με FFT.

- Διαιρεί το λαμβανόμενο σήμα με την απόκριση του καναλιού ώστε να αντισταθμίσει τις επιδράσεις του.
- Κανονικοποιεί το σήμα σε σχέση με τη διαμόρφωση (QAM) και την ισχύ.
- Αποδιαμορφώνει το σήμα QAM σε bits.
- Αναδιατάσσει τα bits σε ένα διάνυσμα.
- Επαναδιαμορφώνει τα bits σε QAM σήμα (ανακατασκευή).
- Πολλαπλασιάζει με την απόκριση καναλιού για να πάρει την εκτιμώμενη εκπομπή.
- Αφαιρεί αυτό το σήμα από το λαμβανόμενο σήμα (Successive Interference Cancellation - SIC).
- Το σήμα που απομένει θεωρείται θόρυβος (και πιθανόν χρησιμεύει για τον επόμενο χρήστη).

Σε αυτό το τμήμα, γραμμές 154 έως 161, βλέπουμε το τελευταίο κομμάτι του κώδικα, όπου γίνεται ο υπολογισμός του Bit Error Rate (BER).:

```
berrors = size(find(info_bits_hat_1+info_bits_hat_2),1);
bit_errors(jj) = bit_errors(jj)+ berrors;
fprintf('SNR=%2dErrors=%4dBits=%5dBER=%e\n',SNRdB(jj),bit_errors(jj),Num_of_bits_u
ser1(jj), bit_errors(jj)/Num_of_bits_user1(jj));
end
simBER_user1(jj) = bit_errors(jj)/Num_of_bits_user1(jj);
end
```

- Εδώ συγκρίνει τα εκτιμώμενα bits με τα πραγματικά.
- Η find(...) βρίσκει τα λάθη (θέσεις όπου τα bits διαφέρουν).
- Η size(...,1) μετράει πόσα λάθη βρέθηκαν.
- Μαζεύει τα λάθη σε κάθε βήμα της προσομοίωσης για το συγκεκριμένο SNR.

Μεσω της fprintf δείχνει στην οθόνη κλείνοντας την εμφωλευμένη επανάληψη :

- Το SNR (σε dB)
- Τον αριθμό λαθών
- Τον συνολικό αριθμό bits που ελέγχθηκαν
- Το BER (Bit Error Rate)

Υπολογίζεται το BER της προσομοίωσης και το αποθηκεύει σε πίνακα για τον χρήστη 1 και ολοκληρώνεται και η αρχική επανάληψη της while.

Στο τελευταίο κομμάτι του προγράμματος, γραμμές 162 έως 182 έχουμε τον θεωρητικό υπολογισμό της πιθανότητας σφάλματος

```
% Theoretical BER approximation for MQAM %%
a_m = 4*(sqrt(M)-1)/(sqrt(M));
b_m = 3/(M-1);
gs_dB = 0:1:40;
gs = 10.^(.1*gs_dB);
theoryBER = a_m/(2*k)*(1-sqrt(0.5*b_m*gs./(1+0.5*b_m*gs)));
```

- Υπολογίζει τη θεωρητική καμπύλη σφάλματος για M-QAM.
- Η παράμετρος M είναι το μέγεθος αστερισμού (π.χ. M=16 για 16-QAM).

- Η $k = \log_2(M)$ είναι ο αριθμός bits ανά σύμβολο.

Για τη σχεδίαση των καμπυλών δημιουργούμε το αντίστοιχο figure, το οποίο έχει ως εξής:

```
BER figure
figure
semilogy(gs_dB,theoryBER,'k-','LineWidth',2);
hold on
semilogy(SNRdB,simBER,'ro','MarkerFaceColor','r');
axis([0 40 10^-5 1])
grid on
legend('theory','simulation');
xlabel('E_b/N_0, dB')
ylabel('Bit Error Rate')
title('Bit error probability curve for 16-QAM')
hold off
```

- Χρησιμοποιεί λογαριθμική κλίμακα για τον άξονα y (BER).
- Η μαύρη γραμμή είναι το θεωρητικό BER.
- Τα κόκκινα σημεία είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.
- Θέτει τα όρια για να δείχνει BER από 10^{-5} έως 1.
- Προσθέτει τίτλους, ετικέτες και πλέγμα.
- Εμφανίζει το γράφημα θεωρίας vs προσομοίωσης.

Το αποτέλεσμα θα είναι το γνωστό BER curve για 16-QAM, όπου η θεωρητική καμπύλη (μαύρη) και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (κόκκινα σημεία) θα πρέπει να ταιριάζουν αρκετά, ειδικά σε υψηλό SNR.

6.3 Βελτιωμένη εκδοχή του κώδικα

Στη δεύτερη μορφή του κώδικά μας έχουμε μερικές τροποποιήσεις, οι οποίες είναι οι εξής:

Για να δείξουμε τη διαφορά της ισχύος μεταξύ των δύο χρηστών, επιλέγουμε να δημιουργήσουμε μία μεταβλητή, η οποία μεταβάλλεται δυναμικά σε σχέση με τον πρώτου χρήστη με όνομα Power_Ratio. Ανάλογα με τη τιμή που θα δώσουμε στον πρώτο χρήστη θα μεταβληθεί και ο δεύτερος χρήστης βάσει της σχέσης που έχουμε ορίσει μεταξύ τους, στην περίπτωσή μας στο δεκαπλάσιο.

Στην αρχή είχαμε αυτή τη μορφή:

```
Pr1 = 1;
alpha = 0.1;
Pr2 = alpha*Pr1;
```

Και στη συνέχεια έγινε ως εξής:

```
Power_Ratio =20;
alpha = 10^(-.1*Power_Ratio);
```

Αυξήσαμε τον αριθμό των απαιτούμενων σφαλμάτων που πρέπει να ανιχνευθούν από χίλια σε είκοσι χιλιάδες,για να δείξουμε ότι τα αποτελέσματά μας είναι έγκυρα και όχι τυχαία.

Στην αρχή είχαμε αυτή τη μορφή:

```
for jj=1:length(SNRdB1)
SNR_user1 = 10^(SNRdB1(jj)/10); %calculation of symbol SNR (Es/No)
required_errors = 1000; % Number of bit errors required to provide an "acceptable"
BER
```

Και στη συνέχεια έγινε ως εξής:

```
for jj=1:length(SNRdB1)
SNR_user1 = 10^(SNRdB1(jj)/10); %calculation of symbol SNR (Es/No)
required_errors = 20000; % Number of bit errors required to provide an "acceptable"
BER
```

Πλέον έχουμε ορίσει συγκεκριμένες καθυστερήσεις με σκοπό να αποφευχθεί η διασυμβολική παρεμβολή.

Στην αρχή είχαμε αυτή τη μορφή:

```
h1=zeros;
h1 = (randn(1,1)+1i*randn(1,1))/sqrt(2);
h2=zeros;
h2 = (randn(1,1)+1i*randn(1,1))/sqrt(2);
Και στη συνέχεια έγινε ως εξής:
p = 0.2;
delays = [0,5,10,15,20];
delays = 0;
h1 = zeros(1, max(delays)+1);
h2 = zeros(1, max(delays)+1);
for del = 1:length(delays)
h1(delays(del)+1) = sqrt(p)*(randn+1i*randn)/sqrt(2);
h2(delays(del)+1) = sqrt(p)*(randn+1i*randn)/sqrt(2);
end
```

Η δομή επανάληψης που έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε, πλέον τίθεται σε διαδικασία όχι μόνο για όσα λάθη ανιχνευθούν συνολικά αλλά για όσα λάθη βρεθούν για κάθε χρήστη ξεχωριστά και συνολικά μέχρι την απαιτούμενη τιμή που ορίσαμε.

Στην αρχή είχαμε αυτή τη μορφή:

```
berrors = size(find(info_bits_hat_1+info_bits_hat_2),1);
bit_errors(jj) = bit_errors(jj)+ berrors;
Και στη συνέχεια έγινε ως εξής:
bit_errors_user1(jj)=bit_errors_user1(jj)+sum(info_bits_hat1~=info_bits_user1);
bit_errors_user2(jj)=bit_errors_user2(jj)+sum(info_bits_hat2~=info_bits_user2);
```

6.4 Τρίτη εκδοχή του κώδικα: Bitrate addition

Στη τρίτη εκδοχή του κώδικά μας προσθέσαμε ως βοηθητικό μέσο για την καλύτερη λήψη αποτελεσμάτων τον ρυθμό πληροφορίας bitrate, ο οποίος βοηθά στο να γίνει καλύτερα αντιληπτή η ισχύς του δεύτερου χρήστη έναντι του πρώτου. Κατά αυτόν τον τρόπο επηρεάζουμε την ποιότητα της αποδιαμόρφωσης και της ακύρωσης καθώς και το μετρούμενο BER[18]. Έτσι, η προσθήκη του bitrate εδώ αλλάζει ποιος χρήστης αποκωδικοποιείται πρώτος και πόσο σοβαρό είναι το σφάλμα ακύρωσης και έτσι μπορούμε να λάβουμε την ισχύ ανά bit ως μέτρο σύγκρισης πλέον για το κριτήριο αναγνώρισης χρηστών [21]. Κατά την οποία, R_{s1} και R_{s2} ορίζονται οι ρυθμοί των συμβόλων και bitrate_1 και bitrate_2 είναι οι ρυθμοί πληροφορίας για το κάθε κανάλι χρήστη.

```
Rs1=1;
bitrate1=Rs1*k1;
Rs2=1;
Bitrate2=Rs2*k2;
```

Πέρα από αυτό, έχουμε ορίξει δύο νέες μεταβλητές, τις `power_user` και `stronger_user` οι οποίες ελέγχουν μέσα στη δομή επανάληψης κάθε φορά ποιός από τους δύο χρήστες είναι πιο ισχυρός στατικά με κριτήριο την μέση ισχύς κάθε υποφέροντος και τις κατατάσει ανάλογα στις μεταβλητές που δημιουργεί παρακάτω με ονόματα `info_bits_hat1a` και `info_bits_hat2a`.

```
power_user1 = (abs(H1).^2 * (Pr1 / N))/sqrt(bitrate1);
power_user2 = (abs(H2).^2 * (Pr2 / N))/sqrt(bitrate2);
stronger_user = zeros(1, N);

for sc = 1:N
if power_user1(sc) > power_user2(sc)
Y1(sc) = Y(sc) ./ H1(sc);
z1(sc) = Y1(sc) / k_QAM1 / sqrt(Pr1/N); % Detection
info_bits_hat1(sc,:) = qamdemod(z1(sc), M1, 'OutputType', 'bit');
recreated1(sc) = sqrt(Pr1/N) * k_QAM1 * qammod(info_bits_hat1(sc,:).', M1,
'InputType', 'bit').';
cancel1(sc) = recreated1(sc) .* H1(sc);
Y_cancel(sc) = Y(sc) - cancel1(sc);
Y2(sc) = Y_cancel(sc) ./ H2(sc); % One-tap equalization %
z2(sc) = Y2(sc) / k_QAM2 / sqrt(Pr2/N); % Detection
info_bits_hat2(sc,:) = qamdemod(z2(sc), M2, 'OutputType', 'bit');
else
Y2(sc) = Y(sc) ./ H2(sc); % One-tap equalization %
z2(sc) = Y2(sc) / k_QAM2 / sqrt(Pr2/N); % Detection
info_bits_hat2(sc,:) = qamdemod(z2(sc), M2, 'OutputType', 'bit');
recreated2(sc) = sqrt(Pr2/N) * k_QAM2 * qammod(info_bits_hat2(sc,:).', M2,
'InputType', 'bit').';
cancel2(sc) = recreated2(sc) .* H2(sc);
Y_cancel(sc) = Y(sc) - cancel2(sc);
Y1(sc) = Y_cancel(sc) ./ H1(sc);
z1(sc) = Y1(sc) / k_QAM1 / sqrt(Pr1/N); % Detection
info_bits_hat1(sc,:) = qamdemod(z1(sc), M1, 'OutputType', 'bit');
end
end
info_bits_hat1a = reshape(info_bits_hat1.', log2(M1)*Nused, 1);
info_bits_hat2a = reshape(info_bits_hat2.', log2(M2)*Nused, 1);
```

Αυτή η αλλαγή μας έδωσε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα στις προσομοιώσεις μας και έκανε το σύστημα πιο σταθερό. Όμως, λόγω της σύγκρισης κάθε υποφέροντος είχαμε το πρόβλημα ότι το πρόγραμμα της προσομοίωσης ήταν πάρα πολύ αργό και δεν μπορούμε να επεξεργαστούμε τα δεδομένα που θέλαμε με μεγάλη ευκολία και έτσι προχωρήσαμε στην επόμενη εκδοχή αυτού.

6.5 Τέταρτη εκδοχή του κώδικα : Packet Error Rate

Για αυτήν την εκδοχή έχουμε κάνει αρκετές αλλαγές και στις μεταβλητές του προγράμματος καθώς και στον τρόπο σκέψης μας για την καλύτερη προσέγγισή του αποτελέσματος που θέλουμε. Οι αλλαγές αυτές είναι :

`N = 512;`

- Περισσότεροι υποφορείς → πιο «λεπτή» ανάλυση της συχνότητας (περισσότερα σημεία FFT).
- Αυξάνει την πολυπλοκότητα και το μέγεθος πακέτου (περισσότερα bits ανά OFDM symbol), αλλά σε αυτή την υλοποίηση ο τρόπος λειτουργίας παραμένει ίδιος απλώς με περισσότερα στοιχεία. `Nused = N;`

```
bitrate1=4;
bitrate2=2;
```

Αντικαταστήσαμε το per-subcarrier for `sc=1:N` με κομμάτια (groups) μέσω `xxx1 = find(power_user1 >= power_user2)` και `xxx2 = find(...)`, δηλαδή έχουμε πιο ομαδοποιημένη SIC (πιο γρήγορη και καθαρότερη λογική). Η προσθήκη του Packet Error Rate μας δίνει μέτρο «πακέτου» (αν ολόκληρο το μπλοκ των `Nused·k` bits έχει λάθος → packet error), το οποίο είναι πολύ χρήσιμο για πραγματικά συστήματα μετάδοσης. Η SIC κατά τμήματα (`xxx1 / xxx2`) είναι σημαντική γιατί προσδίδει μεγαλύτερη απόδοση. Αντί να κάνουμε αποκοδικοποίηση, διαμόρφωση και ακύρωση σήματος σε κάθε υποφέρον ξεχωριστά μέσα στο βρόγχο επανάληψης, βρίσκουμε τα σημεία στα οποία ο χρήστης 1 είναι «ισχυρότερος» και τρέχουμε τις πράξεις μαζικά οδηγώντας σε γρηγορότερα και πιο καθαρά αποτελέσματα.

```
xxx1 = find(power_user1 >= power_user2);
xxx2 = find(power_user1 < power_user2);
YA = Y(xxx1);
H1A = H1(xxx1);
H2A = H2(xxx1);
if ~isempty(YA)
    Y1A = YA ./ H1A;
    z1A = Y1A / k_QAM1 / sqrt(Pr1/N);
    info_bits_hat1A = qamdemod(z1A, M1, 'OutputType', 'bit');
    recreated1A = sqrt(Pr1/N) * k_QAM1 * qammod(info_bits_hat1A, M1, 'InputType', 'bit').';
    cancel1A = recreated1A.' .* H1A;
    Y_cancelA = YA - cancel1A;
```

```

Y2A = Y_cancelA ./ H2A; % One-tap equalization %
z2A = Y2A / k_QAM2 / sqrt(Pr2/N); % Detection
info_bits_hat2A = qamdemod(z2A, M2, 'OutputType', 'bit');
info_bits_hat1(xxx1,:) = info_bits_hat1A.';
info_bits_hat2(xxx1,:) = info_bits_hat2A.';
end
YB = Y(xxx2);
H1B = H1(xxx2);
H2B = H2(xxx2);
if ~isempty(YB)
    Y2B = YB ./ H2B; % One-tap equalization %
    z2B = Y2B / k_QAM2 / sqrt(Pr2/N); % Detection
    info_bits_hat2B = qamdemod(z2B, M2, 'OutputType', 'bit');
    recreated2B = sqrt(Pr2/N) * k_QAM2 * qammod(info_bits_hat2B, M2, 'InputType',
'bit').';
    cancel2B = recreated2B.' .* H2B;
    Y_cancelB = YB - cancel2B;
    Y1B = Y_cancelB ./ H1B;
    z1B = Y1B / k_QAM1 / sqrt(Pr1/N); % Detection
    info_bits_hat1B = qamdemod(z1B, M1, 'OutputType', 'bit');
    info_bits_hat1(xxx2,:) = info_bits_hat1B.';
    info_bits_hat2(xxx2,:) = info_bits_hat2B.';
end
info_bits_hat1a = reshape(info_bits_hat1.', log2(M1)*Nused, 1);
info_bits_hat2a = reshape(info_bits_hat2.', log2(M2)*Nused, 1);
if sum(info_bits_hat1a ~= info_bits_user1)>0
    packet_errors1(jj) = packet_errors1(jj) + 1;
end
if sum(info_bits_hat2a ~= info_bits_user2)>0
    packet_errors2(jj) = packet_errors2(jj) + 1;
end
end

```

6.6 Εισαγωγή του LDPC

Για την περαιτέρω βελτίωση των αποτελεσμάτων κινηθήκαμε στην αξιοποίηση του LDPC κώδικα, ο οποίος βέβαια χρειάστηκε μία ιδιαίτερη αντιμετώπιση στον ήδη υπάρχων κώδικά μας καθώς δεν

λειτουργεί απλώς με την προσθήκη του μέσα σε αυτόν επειδή καλεί μία συνάρτηση με όνομα `generateConfigLDPC`, για να τρέξει τις εντολές του το οποίο έχει ως εξής [22]:

```
function [cfgLDPCEnc,decodercfg] = generateConfigLDPC(rate,varargin)
defaultCodewordLen = 648;
defaultStandard = 'wlan';
defaultDecoderAlgo = 'bp';
expectedStandards = {'wlan'};
expectedDecoderAlgos = {'bp','layered-bp','norm-min-sum','offset-min-sum'};
parsVar = inputParser;
errorMsgRate = 'Value must be positive and less than 1';
validateRate= @(x) assert((x > 0) && (x <= 1),errorMsgRate);
addRequired(parsVar,'rate',validateRate);
errorMsgCWL = 'Value must be positive and less than 1';
validateCW= @(x) assert((x > 0),errorMsgCWL);
addOptional(parsVar,'codewordLen',defaultCodewordLen,validateCW);
addParameter(parsVar,'standard',defaultStandard,@(x)
any(validatestring(x,expectedStandards)));
addParameter(parsVar,'decoderAlgo',defaultDecoderAlgo,@(x)
any(validatestring(x,expectedDecoderAlgos)));
parse(parsVar,rate,varargin{:});
```

Μέχρι εδώ η συνάρτηση αρχικοποιεί τις μεταβλητές που θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσει τόσο στον κωδικοποιητή όσο και στον αποκωδικοποιητή. Λαμβάνει ως είσοδο τον ρυθμό κώδικα (`rate`), το μήκος της κωδικολέξης το πρότυπο στον οποίο καλείται να κληθεί και τον αλγόριθμο κωδικοποίησης. Παρακάτω ελέγχει αν οι τιμές είναι έγκυρες και στην περίπτωση που δεν είναι εμφανίζει ανάλογη ειδοποίηση με το σχετικό σφάλμα.

```
% ----- "WLAN"-----
if strcmpi(parsVar.Results.standard,'wlan')==1
    % Checking supported metrics
    % Check supported code-rate
    if rate~= 1/2 && rate~= 2/3 && rate~= 3/4 && rate~= 5/6
        error('Unsupported Code-Rate');
    end
    % Check supported codeword block length
    wlanCodewordLens = [648,1296,1944];
    if ismember(parsVar.Results.codewordLen,wlanCodewordLens)==0
        error('Unsupported Codeword Block Length for WLAN standard');
    else
```

```

n = parsVar.Results.codewordLen;
end
% Checking the codeword length condition.
switch n
case 648
    blockSize = 27; % Variabel "Z" is used to denote in the standard

```

Εφόσον βεβαιωθεί ότι όλα είναι σωστά τότε επιλέγει από τους παρακάτω πίνακες του LDPC την περίπτωση που έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε. Κάθε πίνακας είναι διαφορετικός για κάθε μήκος κωδικολέξης και για κάθε code rate

```

% Checking the codeword-rate condition.
switch rate
case 1/2
    P = [ 0 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 0 -1 -1 0 1 0 -1 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 -1 -1
22 0 -1 -1 17 -1 0 0 12 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 -1 -1
6 -1 0 -1 10 -1 -1 -1 24 -1 0 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -1 -1
-1 -1 -1 -1
2 -1 -1 0 20 -1 -1 -1 25 0 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -1
-1 -1 -1 -1
23 -1 -1 -1 3 -1 -1 -1 0 -1 9 11 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -
1 -1 -1 -1 -1
24 -1 23 1 17 -1 3 -1 10 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 -
1 -1 -1 -1 -1
25 -1 -1 -1 8 -1 -1 -1 7 18 -1 -1 0 -1 -1 -1 -1 -1 0 0
-1 -1 -1 -1
13 24 -1 -1 0 -1 8 -1 6 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0
0 -1 -1 -1
7 20 -1 16 22 10 -1 -1 23 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1
0 0 -1 -1
11 -1 -1 -1 19 -1 -1 -1 13 -1 3 17 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 0 0 -1
25 -1 8 -1 23 18 -1 14 9 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 0 0
3 -1 -1 -1 16 -1 -1 2 25 5 -1 -1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -
-1 -1 -1 0
];
case 2/3
    P = [ 25 26 14 -1 20 -1 2 -1 4 -1 -1 8 -1 16 -1 18 1 0 -1
-1 -1 -1 -1 -1
10 9 15 11 -1 0 -1 1 -1 -1 18 -1 8 -1 10 -1 -1 0 0 -
1 -1 -1 -1 -1
16 2 20 26 21 -1 6 -1 1 26 -1 7 -1 -1 -1 -1 -1 0 0
-1 -1 -1 -1

```

```

0 -1 -1 -1          10 13  5  0 -1  3 -1  7 -1 -1 26 -1 -1 13 -1 16 -1 -1 -1  0
1  0  0 -1 -1      23 14 24 -1 12 -1 19 -1 17 -1 -1 -1 20 -1 21 -1  0 -1 -1 -
-1  0  0 -1        6 22  9 20 -1 25 -1 17 -1  8 -1 14 -1 18 -1 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 -1  0  0      14 23 21 11 20 -1 24 -1 18 -1 19 -1 -1 -1 -1 22 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 -1  0      17 11 11 20 -1 21 -1 26 -1  3 -1 -1 18 -1 26 -1  1 -1 -1 -
];
case 3/4
    P = [16 17 22 24  9  3 14 -1  4  2  7 -1 26 -1  2 -1 21 -1  1
0 -1 -1 -1 -1      25 12 12  3  3 26  6 21 -1 15 22 -1 15 -1  4 -1 -1 16 -1  0
0 -1 -1 -1        25 18 26 16 22 23  9 -1  0 -1  4 -1  4 -1  8 23 11 -1 -1 -
1  0  0 -1 -1      9  7  0  1 17 -1 -1  7  3 -1  3 23 -1 16 -1 -1 21 -1  0 -1
-1  0  0 -1        24  5 26  7  1 -1 -1 15 24 15 -1  8 -1 13 -1 13 -1 11 -1 -
1 -1 -1  0  0      2  2 19 14 24  1 15 19 -1 21 -1  2 -1 24 -1  3 -1  2  1 -1
-1 -1 -1  0
];
case 5/6
    P = [17 13  8 21  9  3 18 12 10  0  4 15 19  2  5 10 26 19 13
13  1  0 -1 -1      3 12 11 14 11 25  5 18  0  9  2 26 26 10 24  7 14 20  4  2
-1  0  0 -1        22 16  4  3 10 21 12  5 21 14 19  5 -1  8  5 18 11  5  5 15
0 -1  0  0          7  7 14 14  4 16 16 24 24 10  1  7 15  6 10 26  8 18 21 14
1 -1 -1  0
];
end
case 1296
    blockSize = 54; % Variabel "Z" is used to denote in the standard
switch rate
    case 1/2
        P = [40 -1 -1 -1 22 -1 49 23 43 -1 -1 -1  1  0 -1 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 -1 -1      50  1 -1 -1 48 35 -1 -1 13 -1 30 -1 -1  0  0 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 -1 -1

```

Κεφάλαιο 6

```

1 -1 -1 -1 -1      39 50 -1 -1  4 -1  2 -1 -1 -1 -1 49 -1 -1  0  0 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 -1 -1      33 -1 -1 38 37 -1 -1  4  1 -1 -1 -1 -1 -1 -1  0  0 -1 -1 -
1 -1 -1 -1 -1      45 -1 -1 -1  0 22 -1 -1 20 42 -1 -1 -1 -1 -1 -1  0  0 -1 -
1 -1 -1 -1 -1      51 -1 -1 48 35 -1 -1 -1 44 -1 18 -1 -1 -1 -1 -1  0  0 -
1 -1 -1 -1 -1      47 11 -1 -1 -1 17 -1 -1 51 -1 -1 -1  0 -1 -1 -1 -1 -1  0  0
-1 -1 -1 -1
0 -1 -1 -1
1  0  0 -1 -1      33 -1 -1 34 24 -1 -1 -1 23 -1 -1 46 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -
-1  0  0 -1
1 -1 -1  0  0      1 -1 27 -1  1 -1 -1 -1 38 -1 44 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -
-1 18 -1 -1 23 -1 -1  8  0 35 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 -1  0  0      49 -1 17 -1 30 -1 -1 -1 34 -1 -1 19  1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 -1  0
];
case 2/3
P = [39 31 22 43 -1 40  4 -1 11 -1 -1 50 -1 -1 -1  6  1  0 -1 -
1 -1 -1 -1 -1      25 52 41  2  6 -1 14 -1 34 -1 -1 -1 24 -1 37 -1 -1  0  0 -
1 -1 -1 -1 -1      43 31 29  0 21 -1 28 -1 -1  2 -1 -1  7 -1 17 -1 -1 -1  0  0
-1 -1 -1 -1
0 -1 -1 -1      20 33 48 -1  4 13 -1 26 -1 -1 22 -1 -1 46 42 -1 -1 -1 -1  0
1  0  0 -1 -1      45  7 18 51 12 25 -1 -1 -1 50 -1 -1  5 -1 -1 -1  0 -1 -1 -
1 -1  0  0 -1      35 40 32 16  5 -1 -1 18 -1 -1 43 51 -1 32 -1 -1 -1 -1 -1 -
-1 -1  0  0      9 24 13 22 28 -1 -1 37 -1 -1 25 -1 -1 52 -1 13 -1 -1 -1 -1
1 -1 -1 -1  0      32 22  4 21 16 -1 -1 -1 27 28 -1 38 -1 -1 -1  8  1 -1 -1 -
];
case 3/4
P = [39 40 51 41  3 29  8 36 -1 14 -1  6 -1 33 -1 11 -1  4  1
0 -1 -1 -1 -1      48 21 47  9 48 35 51 -1 38 -1 28 -1 34 -1 50 -1 50 -1 -1  0
0 -1 -1 -1
1  0  0 -1 -1      30 39 28 42 50 39  5 17 -1  6 -1 18 -1 20 -1 15 -1 40 -1 -

```

```

1 -1 0 0 -1          29 0 1 43 36 30 47 -1 49 -1 47 -1 3 -1 35 -1 34 -1 0 -
-1 -1 0 0          1 32 11 23 10 44 12 7 -1 48 -1 4 -1 9 -1 17 -1 16 -1 -1
1 -1 -1 -1 0        13 7 15 47 23 16 47 -1 43 -1 29 -1 52 -1 2 -1 53 -1 1 -
];
case 5/6
P = [48 29 37 52 2 16 6 14 53 31 34 5 18 42 53 31 45 -1 46
52 1 0 -1 -1
1 -1 0 0 -1
0 -1 0 0
1 -1 -1 0
];
end
case 1944
blockSize = 81; % Variabel "Z" is used to denote in the standard
switch rate
case 1/2
P = [57 -1 -1 -1 50 -1 11 -1 50 -1 79 -1 1 0 -1 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 -1 -1
-1 -1 -1 -1
30 -1 -1 -1 24 37 -1 -1 56 14 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -1 -
62 53 -1 -1 53 -1 -1 3 35 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -1 -
40 -1 -1 20 66 -1 -1 22 28 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 -1 -
0 -1 -1 -1 8 -1 42 -1 50 -1 -1 8 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 -1
69 79 79 -1 -1 -1 56 -1 52 -1 -1 -1 0 -1 -1 -1 -1 -1 0 0
65 -1 -1 -1 38 57 -1 -1 72 -1 27 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0
1 0 0 -1 -1
-1 45 -1 70 0 -1 -1 -1 77 9 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -
2 56 -1 57 35 -1 -1 -1 -1 -1 12 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1
24 -1 61 -1 60 -1 -1 27 51 -1 -1 16 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 -1 0

```

```

];
case 2/3
    P = [61 75 4 63 56 -1 -1 -1 -1 -1 -1 8 -1 2 17 25 1 0 -1 -
1 -1 -1 -1 -1
        56 74 77 20 -1 -1 -1 64 24 4 67 -1 7 -1 -1 -1 -1 0 0 -
1 -1 -1 -1 -1
        28 21 68 10 7 14 65 -1 -1 -1 23 -1 -1 -1 75 -1 -1 -1 0 0
-1 -1 -1 -1
        48 38 43 78 76 -1 -1 -1 -1 5 36 -1 15 72 -1 -1 -1 -1 -1 0
0 -1 -1 -1
        40 2 53 25 -1 52 62 -1 20 -1 -1 44 -1 -1 -1 -1 0 -1 -1 -
1 0 0 -1 -1
        69 23 64 10 22 -1 21 -1 -1 -1 -1 -1 68 23 29 -1 -1 -1 -1 -
1 -1 0 0 -1
        12 0 68 20 55 61 -1 40 -1 -1 -1 52 -1 -1 -1 44 -1 -1 -1 -
1 -1 -1 0 0
        58 8 34 64 78 -1 -1 11 78 24 -1 -1 -1 -1 -1 58 1 -1 -1 -
1 -1 -1 -1 0
];
case 3/4
    P = [48 29 28 39 9 61 -1 -1 -1 63 45 80 -1 -1 -1 37 32 22 1
0 -1 -1 -1 -1
        4 49 42 48 11 30 -1 -1 -1 49 17 41 37 15 -1 54 -1 -1 -1 0
0 -1 -1 -1
        35 76 78 51 37 35 21 -1 17 64 -1 -1 -1 59 7 -1 -1 32 -1 -
1 0 0 -1 -1
        9 65 44 9 54 56 73 34 42 -1 -1 -1 35 -1 -1 -1 46 39 0 -1
-1 0 0 -1
        3 62 7 80 68 26 -1 80 55 -1 36 -1 26 -1 9 -1 72 -1 -1 -1
-1 -1 0 0
        26 75 33 21 69 59 3 38 -1 -1 -1 35 -1 62 36 26 -1 -1 1 -
1 -1 -1 -1 0
];
case 5/6
    P = [13 48 80 66 4 74 7 30 76 52 37 60 -1 49 73 31 74 73 23 -
1 1 0 -1 -1
        69 63 74 56 64 77 57 65 6 16 51 -1 64 -1 68 9 48 62 54 27
-1 0 0 -1
        51 15 0 80 24 25 42 54 44 71 71 9 67 35 -1 58 -1 29 -1 53
0 -1 0 0
        16 29 36 41 44 56 59 37 50 24 -1 65 4 65 52 -1 4 -1 73 52
1 -1 -1 0
];
end
end

```

Στο τελευταίο κομμάτι δημιουργεί τον πίνακα ελέγχου ισοτιμίας, ο οποίος αποτελεί τη μαθηματική βάση του LDPC κώδικα διότι παράγει τις δομές για τον κωδικοποιητή και τον αποκωδικοποιητή και τα επιστρέφει πίσω στον χρήστη.

```
pcmatrix = ldpcQuasiCyclicMatrix(blockSize,P);
cfgLDPCenc = ldpcEncoderConfig(pcmatrix);
decodercfg = ldpcDecoderConfig(pcmatrix,parsVar.Results.decoderAlgo);
end
```

Οπότε εμείς μέσα στον κώδικά μας έχουμε τις παρακάτω αλλαγές. Στις παραμετροποιήσεις του συστήματος έχουμε για τον πρώτο χρήστη

```
coderate1 = 1/2;
n1 = 1944;
numofcodewords1 = floor(N/(n1/k1));
bitrate1=Rs1*k1*coderate1;
[LDPCenc1,LDPCdec1] = generateConfigLDPC(coderate1,n1,'decoderAlgo',decodAlg);
Ninfo1 = LDPCenc1.NumInformationBits;
```

Και για τον δεύτερο χρήστη:

```
coderate2 = 1/2;
n2 = 1944;
numofcodewords2 = floor(N/(n2/k2));
bitrate2=Rs2*k2*coderate2;
[LDPCenc2,LDPCdec2] = generateConfigLDPC(coderate2,n2,'decoderAlgo',decodAlg);
Ninfo2 = LDPCenc2.NumInformationBits;
```

Έπειτα, μέσα στις δομές επανάληψης για τον πρώτο χρήστη

```
% LDPC coding of User 1
LDPCcodedbits1 = [];
for xx =1:numofcodewords1
    inputbits = info_bits_user1((xx-1)*Ninfo1+1:xx*Ninfo1);
    LDPCy = ldpcEncode(inputbits,LDPCenc1);
    LDPCcodedbits1 = [LDPCcodedbits1;LDPCy];
end
```

και για τον δεύτερο χρήστη

```
% LDPC coding of User 2
LDPCcodedbits2 = [];
for xx =1:numofcodewords2
    inputbits = info_bits_user2((xx-1)*Ninfo2+1:xx*Ninfo2);
```

```

LDPCy = ldpcEncode(inputbits,LDPCenc2);
LDPCcodedbits2 = [LDPCcodedbits2;LDPCy];

end

```

Τέλος, δημιουργεί στον παρακάτω κομμάτι τα απαραίτητα LLR's και ανασυνθέτει το τελικό σήμα.

```

if power_user1 >= power_user2
    info_bits_hat1 = [];
    for xx = 1:numofcodewords1
        Y1 = Y((xx-1)*Nused/numofcodewords1+1:xx*Nused/numofcodewords1)./H1((xx-1)*Nused/numofcodewords1+1:xx*Nused/numofcodewords1);

        z1 = Y1/k_QAM1/sqrt(Pr1);

        % bitsllr1 =
qamdemod(z1.',M1,'OutputType','llr','UnitAveragePower',true,'NoiseVariance',1/(N*SNR_linear));

        bitsllr1 =
qamdemod(z1.',M1,'OutputType','approxllr','NoiseVariance',(1/SNR_linear+Pr2)/abs(H1(1,1))^2);

        % bitsllr1 =
qamdemod(z1.',M1,'OutputType','approxllr','NoiseVariance',1/(SNR_linear));

        ib_hat1 = ldpcDecode(bitsllr1,LDPCdec1,maxnumiter);

        if sum(info_bits_user1((xx-1)*Ninfo1+1:xx*Ninfo1)~=ib_hat1)
            packet_errors1(jj) = packet_errors1(jj) + 1;
        end

        info_bits_hat1 = [info_bits_hat1;ib_hat1];
        recodedbits1 = ldpcEncode(ib_hat1,LDPCenc1);
        recreated1 = sqrt(Pr1) * k_QAM1 * qammod(recodedbits1 , M1, 'InputType','bit').';

        cancel1 = recreated1 .* H1((xx-1)*Nused/numofcodewords1+1:xx*Nused/numofcodewords1);

        Y_cancel((xx-1)*Nused/numofcodewords1+1:xx*Nused/numofcodewords1) = Y((xx-1)*Nused/numofcodewords1+1:xx*Nused/numofcodewords1)-cancel1;

    end

    info_bits_hat2 = [];
    for xx = 1:numofcodewords2
        Y2 = Y_cancel((xx-1)*Nused/numofcodewords2+1:xx*Nused/numofcodewords2)./H2((xx-1)*Nused/numofcodewords2+1:xx*Nused/numofcodewords2);

        z2 = Y2/k_QAM2/sqrt(Pr2);
    end
end

```

```

%                                bitsllr1                                =
qamdemod(z1.',M1,'OutputType','llr','UnitAveragePower',true,'NoiseVariance',1/(SNR_
_linear));

%                                bitsllr2                                =
qamdemod(z2.',M2,'OutputType','approxllr','NoiseVariance',1/(alpha*SNR_linear)/abs
(H2(1,1))^2);

ib_hat2 = ldpcDecode(bitsllr2,LDPCdec2,maxnumiter);
if sum(info_bits_user2((xx-1)*Ninfo2+1:xx*Ninfo2)~=ib_hat2)
    packet_errors2(jj) = packet_errors2(jj) + 1;
end
info_bits_hat2 = [info_bits_hat2;ib_hat2];
end
end
if power_user2 > power_user1
    zzzz = zzzz+1;
    info_bits_hat2 = [];
    for xx = 1:numofcodewords2
        Y2 = Y((xx-1)*Nused/numofcodewords2+1:xx*Nused/numofcodewords2)./H1((xx-
1)*Nused/numofcodewords2+1:xx*Nused/numofcodewords2);
        z2 = Y2/k_QAM2/sqrt(Pr2);

%                                bitsllr1                                =
qamdemod(z1.',M1,'OutputType','llr','UnitAveragePower',true,'NoiseVariance',1/(N*S
NR_linear));

%                                bitsllr2                                =
qamdemod(z2.',M2,'OutputType','approxllr','NoiseVariance',(1/(alpha*SNR_linear)+Pr
1)/abs(H2(1,1))^2);

%                                bitsllr1                                =
qamdemod(z1.',M1,'OutputType','approxllr','NoiseVariance',1/(SNR_linear));

ib_hat2 = ldpcDecode(bitsllr2,LDPCdec2,maxnumiter);
if sum(info_bits_user2((xx-1)*Ninfo2+1:xx*Ninfo2)~=ib_hat2)
    packet_errors2(jj) = packet_errors2(jj) + 1;
end
info_bits_hat2 = [info_bits_hat2;ib_hat2];
recodedbits2 = ldpcEncode(ib_hat2,LDPCenc2);
recreated2 = sqrt(Pr2) * k_QAM2 * qammod(recodedbits2 , M2, 'InputType',
'bit').';

cancel2 = recreated2 .* H2((xx-
1)*Nused/numofcodewords2+1:xx*Nused/numofcodewords2);

```

```

        Y_cancel((xx-1)*Nused/numofcodewords2+1:xx*Nused/numofcodewords2) = Y((xx-
1)*Nused/numofcodewords2+1:xx*Nused/numofcodewords2)-cancel2;

    end

    info_bits_hat1 = [];

    for xx = 1:numofcodewords1

        Y1 = Y_cancel((xx-
1)*Nused/numofcodewords1+1:xx*Nused/numofcodewords1)./H1((xx-
1)*Nused/numofcodewords1+1:xx*Nused/numofcodewords1);

        z1 = Y1/k_QAM1/sqrt(Pr1);

        % bitsllr1 =
qamdemod(z1.',M1,'OutputType','llr','UnitAveragePower',true,'NoiseVariance',1/(SNR
_linear));

        bitsllr1 =
qamdemod(z1.',M1,'OutputType','approxllr','NoiseVariance',1/(SNR_linear+Pr2)/abs(H
1(1,1))^2);

        ib_hat1 = ldpcDecode(bitsllr1,LDPCdec1,maxnumiter);

        if sum(info_bits_user1((xx-1)*Ninfo1+1:xx*Ninfo1)~=ib_hat1)
            packet_errors1(jj) = packet_errors1(jj) + 1;
        end

        info_bits_hat1 = [info_bits_hat1;ib_hat1];

    end

end
end

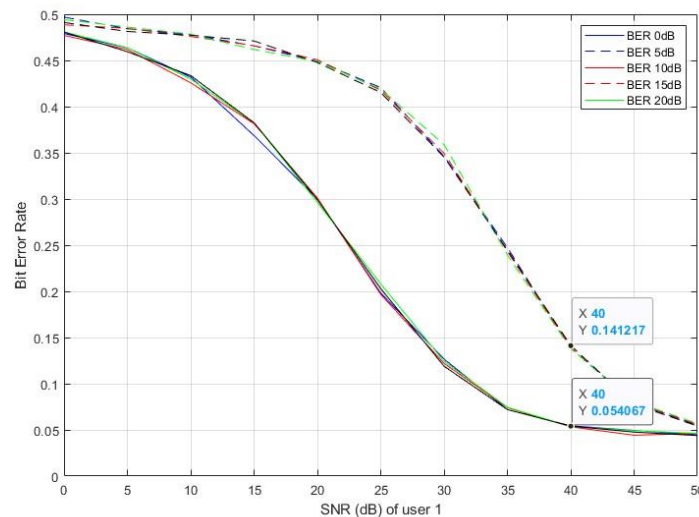
```

Κεφάλαιο 7ο: Θεωρητική ανάλυση και αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που αφορούν τη σειρά ανίχνευσης χρηστών σε σύστημα μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης με χρήση κωδικοποίησης LDPC και διαμόρφωσης QPSK. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με βάση τον ρυθμό σφαλμάτων bit (BER) σε συνάρτηση με το SNR, για διαφορετικές εκδοχές της διαδικασίας ανίχνευσης και ακύρωσης παρεμβολών.

7.1 Θεωρητικό BER

Παρακάτω θα δούμε τα αποτελέσματα της πρώτης και της βελτιωμένης μορφής του κώδικά μας για τις περιπτώσεις και θα τα συγκρίνουμε μεταξύ τους. Η πρώτη με τη δεύτερη μορφή του κώδικα παράγαν τα ίδια αποτελέσματα με διαφορές πολύ μικρές για να κάνουμε τον διαχωρισμό των δύο αυτών.

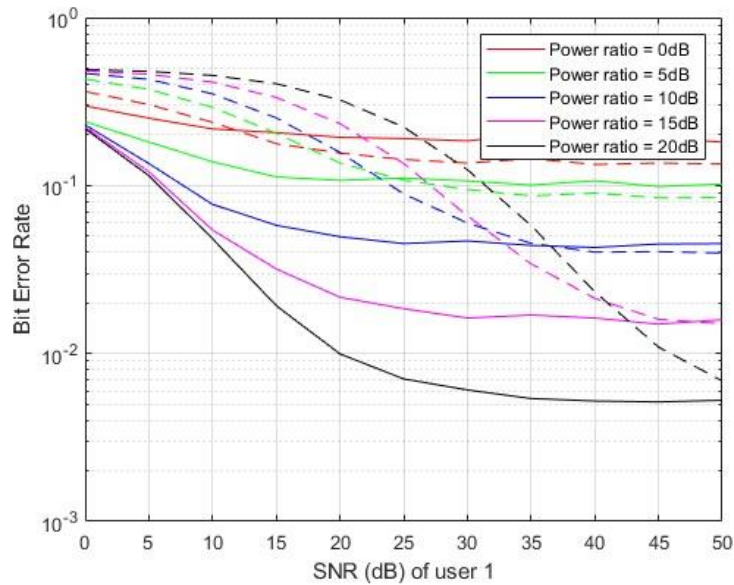


Εικόνα 7.1 Σύγκριση BER σε σχέση με το SNR του ισχυρού χρήστη (4-4 & 16-16 QAM)

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε τις περιπτώσεις όπου και οι δύο χρήστες χρησιμοποιούν διαμόρφωση 4 Qam ή 16 Qam, ο διαχωρισμός είναι πολύ δύσκολος σε όλο το μήκος του SNR λόγω παρεμβολών χωρίς να βλέπουμε κάποια βελτίωση, το οποίο σημαίνει ότι ο διαχωρισμός των δύο χρηστών γίνεται με τυχαίο τρόπο και χωρίς κάποια βεβαιότητα. Τα αποτελέσματα και των δύο περιπτώσεων είναι τόσο κοντά μεταξύ τους σε αυτές τις δύο περιπτώσεις που δεν χρειάζεται να δείξουμε την ομοιότητα των δύο. Συνοψίζοντας, λοιπόν για τις παραπάνω έχουμε τα εξής:

1. Όσο αυξάνεται το SNR του ισχυρού χρήστη, το BER μειώνεται γενικά.
2. Για χαμηλό SNR (0–5 dB) το BER παραμένει υψηλό, κοντά στο 0.5, δηλαδή σχεδόν τυχαία ανίχνευση.
3. Για υψηλότερα SNR (15–20 dB) παρατηρείται απότομη βελτίωση της απόδοσης, ειδικά μετά τα ~25–30 dB.
4. Υπάρχει σαφής διαχωρισμός απόδοσης ανάλογα με το SNR, κάτι που είναι τυπικό σε συστήματα πολλαπλών χρηστών (π.χ. NOMA).

Παρακάτω μελετάμε τις περιπτώσεις όπου οι δύο χρήστες χρησιμοποιούν διαφορετικό τύπο διαμόρφωσης ανά ζεύγη.



Εικόνα 7.2 Σύγκριση BER σε σχέση με το SNR του ισχυρού χρήστη 4&16 QAM και 16&4 QAM

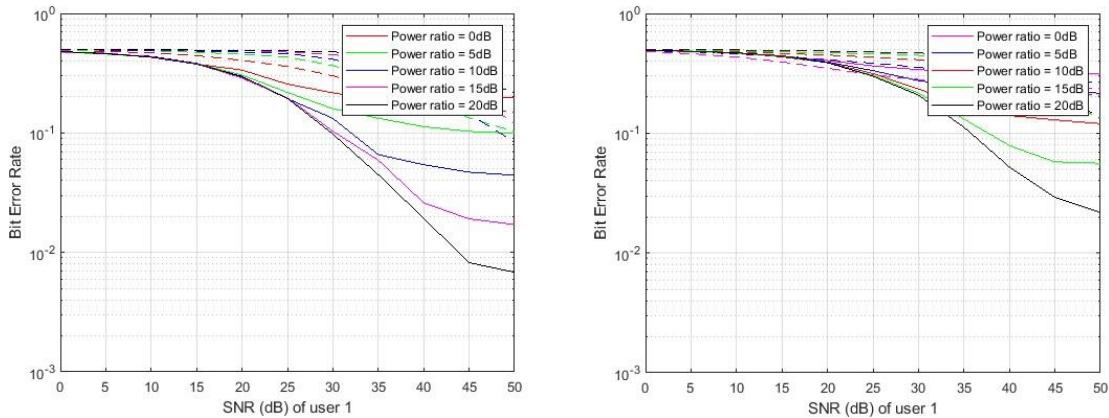
Σε αυτές τις περιπτώσεις όπου οι χρήστες χρησιμοποιούν κάποιο συνδυασμό διαμόρφωσης (4-16 ή 16-4 QAM) η αποκωδικοποίηση γίνεται ευκολότερα και είναι πιο αισθητή.

Συνοψίζοντας, λοιπόν για τα παραπάνω έχουμε τα εξής:

1. Όσο αυξάνεται το SNR του ισχυρού χρήστη, το BER μειώνεται γενικά.
2. Για χαμηλό SNR (0–5 dB) το BER παραμένει υψηλό, κοντά στο 0.5, δηλαδή σχεδόν τυχαία ανίχνευση.
3. Για SNR ενδιάμεσης ζώνης μελέτης (15–20dB) παρατηρείται σημαντική βελτίωση της απόδοσης, με περιοχή εντονότερης πτώσης μετά τα ~25–35 dB.
4. Οι καμπύλες με μεγαλύτερο SNR “πέφτουν” πιο γρήγορα, δείχνοντας καλύτερη αξιοπιστία για το σύστημά μας.

7.2 Επίδραση του λόγου ισχύος

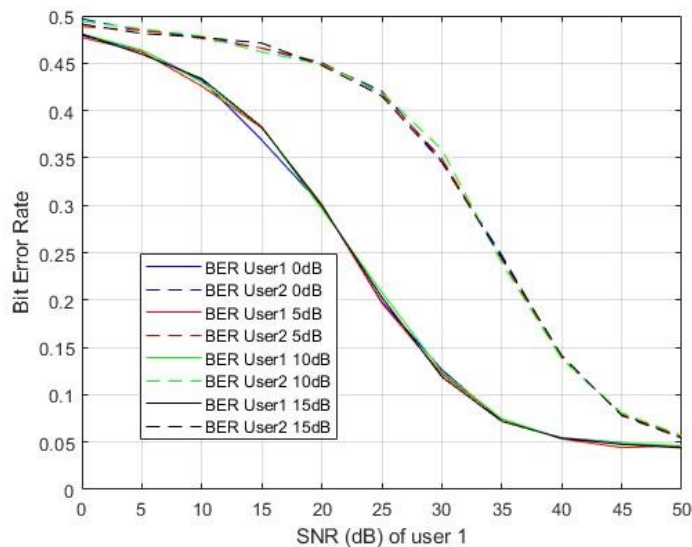
Στην δεύτερη εκδοχή παρατηρείται αποκατάσταση της θεωρητικά αναμενόμενης συμπεριφοράς του συστήματος, με τον ισχυρό χρήστη να επιτυγχάνει σαφώς χαμηλότερο ρυθμό σφαλμάτων σε σύγκριση με τον ασθενή χρήστη. Η ομαλή μείωση του BER με την αύξηση του SNR για αμφοτέρους τους χρήστες υποδηλώνει ορθό καθορισμό της σειράς ανίχνευσης και αποτελεσματική ακύρωση της παρεμβολής. Η συγκεκριμένη εκδοχή μπορεί να θεωρηθεί ως η πλέον αποδοτική, καθώς εξασφαλίζει σταθερή και προβλέψιμη απόδοση στο πλαίσιο του εξεταζόμενου συστήματος NOMA. Στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε και αναλύουμε τις περιπτώσεις όπου έχει επιλεγθεί διαφορετική διαμόρφωση για τους δύο χρήστες μας. Στην πρώτη υποπερίπτωση έχει επιλεγθεί για τον ισχυρό χρήστη η 4 QAM ενώ για τον ασθενή χρήστη η 16 QAM και στη δεύτερη υποπερίπτωση μελετάται ο πρώτος χρήστης α χρησιμοποιεί 16 QAM και ο δεύτερος 4 QAM.



Εικόνα 7.3 BER vs SNR με την εισαγωγή του λόγου ισχύος

7.3 Εισαγωγή του ρυθμού πληροφορίας/Bitrate

Όπως προαναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο της μελέτης μας, προσθέσαμε ως κριτήριο για την βελτίωση του συστήματός μας τον ρυθμό πληροφορίας με τον οποίο στέλνουμε την πληροφορία μας στον δέκτη. Στην τρίτη εκδοχή παρατηρείται ότι ο ισχυρός χρήστης εμφανίζει χαμηλότερο BER σε όλο το εύρος των τιμών SNR, γεγονός που είναι σύμφωνο με τη θεωρητική λειτουργία των συστημάτων NOMA, όμως συνεχίζει να ξεκινά από υψηλές τιμές του BER της κλίμακας το 0.5 πράγμα που δεν μας ωφελεί ιδιαίτερα για τις παρακάτω περιπτώσεις. Η απόδοση αυτή οφείλεται τόσο στην ευνοϊκότερη κατανομή ισχύος όσο και στην αποτελεσματική εφαρμογή της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών, η οποία επιτρέπει την αξιόπιστη ανίχνευση των συμβόλων πριν την αποκωδικοποίηση. Ο ασθενής χρήστης παρουσιάζει υψηλότερο ρυθμό σφαλμάτων, ο οποίος μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του SNR, χωρίς ωστόσο να υπερτερεί της επίδοσης του ισχυρού χρήστη. Εδώ καλείται να βοηθήσει η χρήση του ρυθμού πληροφορίας για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων στη προσομοίωση.

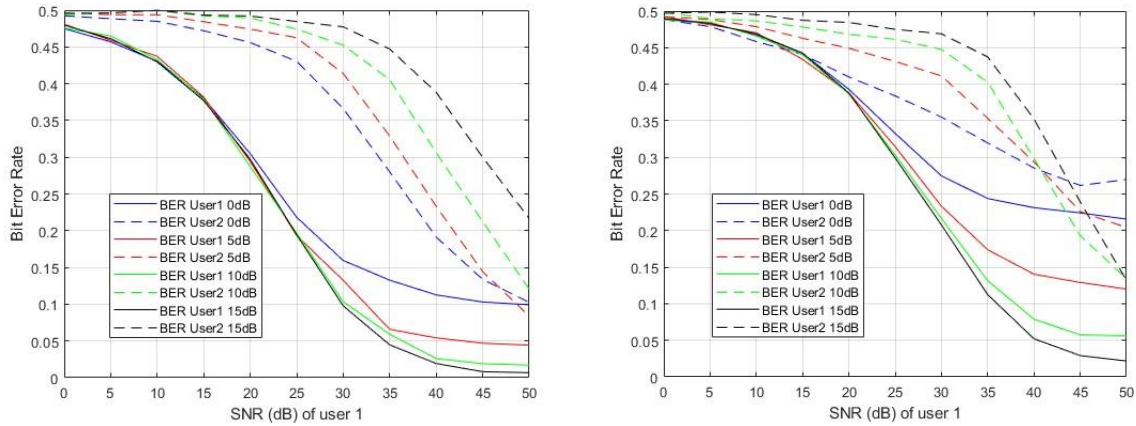


Εικόνα 7.4 BER vs SNR με εισαγωγή Bitrate

Τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν τις περιπτώσεις όπου έχει επιλεχθεί όμοια διαμόρφωση για τον ισχυρό και τον αδύναμο χρήστη και μελετάμε πλέον μόνο τις περιοχές του SNR που δείχνουν να πλησιάζουν περισσότερο μία φυσική προσομοίωση σε πραγματικό περιβάλλον. Στα παρακάτω σχήματα

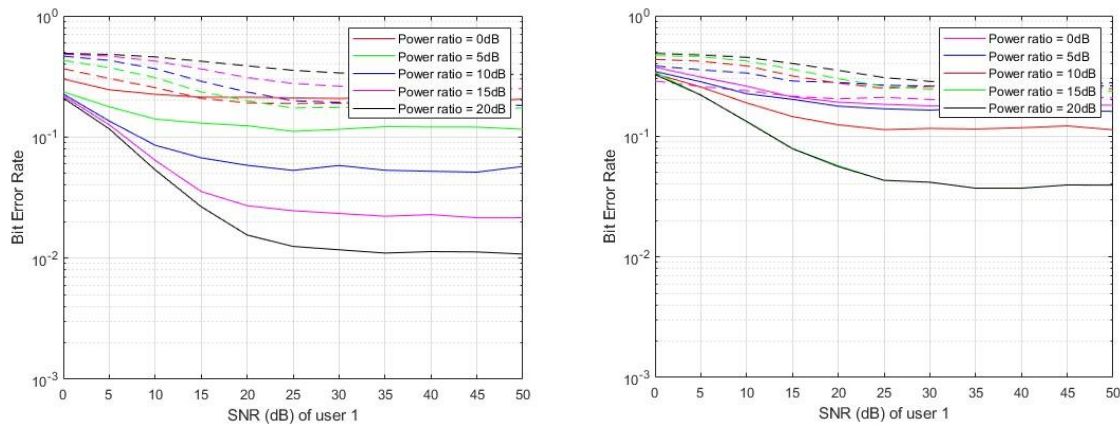
Κεφάλαιο 7

βλέπουμε και αναλύουμε τις περιπτώσεις όπου έχει επιλεγθεί διαφορετική διαμόρφωση για τους δύο χρήστες μας. Στην πρώτη υποπερίπτωση έχει επιλεγθεί για τον ισχυρό χρήστη η 4 Qam ενώ για τον ασθενή χρήστη η 16 Qam και στη δεύτερη υποπερίπτωση μελετάται ο πρώτος χρήστης α χρησιμοποιεί 16 Qam και ο δεύτερος 4 Qam.



Εικόνα 7.5 BER vs SNR με εισαγωγή Bitrate για 4&16 QAM και 16&4 QAM

Στις εικόνες 7.5 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του PER ως συνάρτηση του SNR του ισχυρού χρήστη, για διαφορετικές τιμές λόγου ισχύος (0–20 dB). Οι συνεχείς και διακεκομμένες καμπύλες αντιστοιχούν στους δύο χρήστες του συστήματος με τις ενιαίες γραμμές να αναπαριστούν τον πρώτο χρήστη και οι διακεκομμένες γραμμές τον δεύτερο χρήστη.



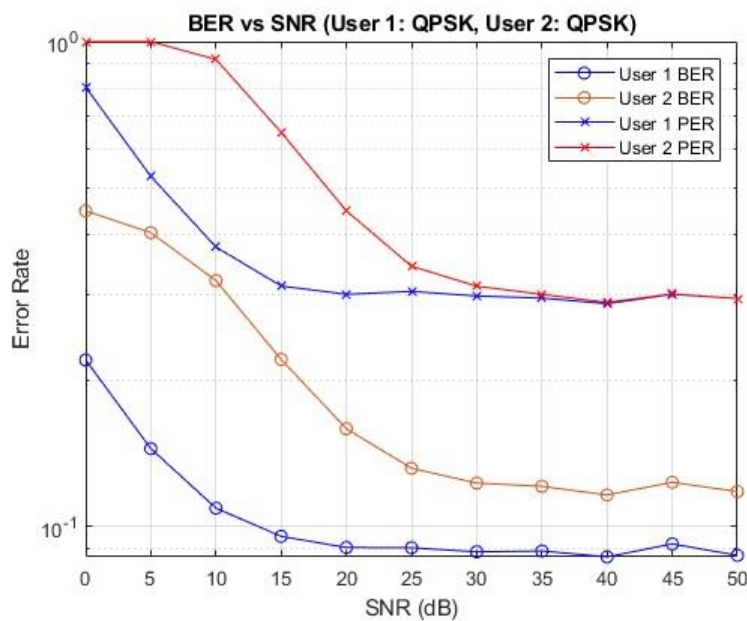
Εικόνα 7.6 Εισαγωγή του Packet Error Rate

Από τα αποτελέσματα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Για τις χαμηλές τιμές SNR από 0 έως 10 dB το PER παραμένει υψηλό για όλες τις τιμές λόγου ισχύος, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα περισσότερα πακέτα περιέχουν σφάλματα. Στην περιοχή αυτή, η επίδραση του θορύβου είναι κυρίαρχη και η αύξηση της ισχύος δεν επαρκεί για αξιόπιστη μετάδοση. Για τις μεσαίες τιμές του SNR από 10 έως 25dB, παρατηρείται σταδιακή μείωση του PER, με τις καμπύλες που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερους λόγους ισχύος να εμφανίζουν ταχύτερη βελτίωση. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η διαφοροποίηση ισχύος βελτιώνει σημαντικά την πιθανότητα επιτυχούς λήψης πακέτων. Για τις υψηλές τιμές SNR μεγαλύτερες από 30 dB, το PER μειώνεται αισθητά και σταθεροποιείται σε χαμηλά επίπεδα. Για λόγο ισχύος ίσο με 15 και 20dB, το PER φτάνει σε τιμές της τάξης του 10^{-2} ή χαμηλότερα, υποδεικνύοντας σχεδόν αξιόπιστη μετάδοση πακέτων. Όσον αφορά την σύγκριση χρηστών, όπως και στην ανάλυση του BER,

ο ισχυρός χρήστης εμφανίζει σαφώς καλύτερη απόδοση σε σχέση με τον ασθενή, ιδιαίτερα για υψηλούς λόγους ισχύος. Η διαδοχική ακύρωση παρεμβολής (SIC) συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση του PER του ισχυρού χρήστη.

7.3.1 Σύσχεση BER και PER

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα BER και PER, Μικρές βελτιώσεις στο BER οδηγούν σε δυσανάλογα μεγαλύτερη μείωση του PER, λόγω της εκθετικής σχέσης μεταξύ τους. Το PER αποτελεί αυστηρότερο κριτήριο αξιολόγησης, καθώς ακόμη και χαμηλό BER μπορεί να αντιστοιχεί σε μη αμελητέο PER για μεγάλα μήκη πακέτων. Τα παρακάτω αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η χρήση του PER είναι απαραίτητη για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της απόδοσης συστημάτων NOMA, ειδικά σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου και μετάδοσης πακέτων.



Εικόνα 7.7 PER και χρήση BER

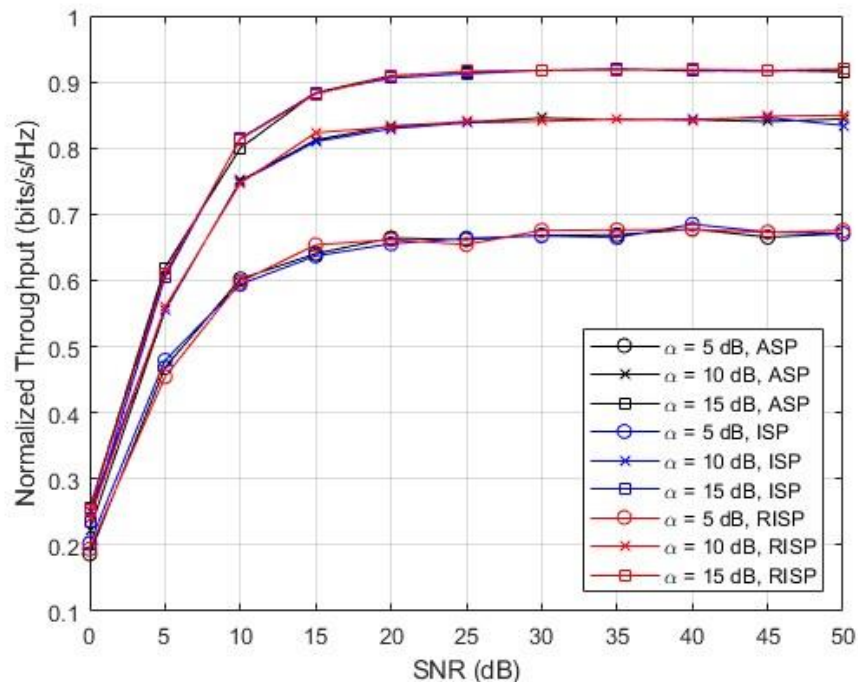
7.4 Εισαγωγή του LDPC και των LLR's

Η χρήση κωδίκων LDPC (Low-Density Parity-Check) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτίωση της αξιοπιστίας της επικοινωνίας, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με έντονη παρεμβολή, όπως τα συστήματα μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης. Η επαναληπτική αποκωδικοποίηση που βασίζεται σε αραιούς πίνακες ελέγχου ισοτιμίας επιτρέπει την αποτελεσματική διόρθωση σφαλμάτων και συμβάλλει στη μείωση του BER, όπως αποδεικνύεται από τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα. Επιπλέον, η απόδοση των LDPC κωδίκων συνδέεται άμεσα με τη σειρά ανίχνευσης χρηστών, καθώς η ποιότητα των λαμβανόμενων σημάτων επηρεάζεται από την επιτυχία της διαδικασίας ακύρωσης παρεμβολών. Η διαδικασία αποκωδικοποίησης των LDPC βασίζεται στη χρήση των Log-Likelihood Ratios (LLRs), τα οποία παρέχουν μαλακή πληροφορία σχετικά με την πιθανότητα κάθε μεταδιδόμενου bit. Στα συστήματα NOMA, τα LLRs επηρεάζονται σημαντικά από την υπολειπόμενη παρεμβολή και τη σειρά ανίχνευσης χρηστών, καθώς λανθασμένες εκτιμήσεις κατά τα πρώτα στάδια της SIC μπορούν να οδηγήσουν σε λιγότερο αξιόπιστες πιθανοτικές μετρικές. Η ακρίβεια των LLRs επηρεάζει άμεσα τη σύγκλιση της επαναληπτικής αποκωδικοποίησης και, κατ' επέκταση, τη συνολική απόδοση του συστήματος, γεγονός που επιβεβαιώνει τη στενή αλληλεξάρτηση μεταξύ ανίχνευσης, κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης σε συστήματα μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης.

Για όλους αυτούς τους παραπάνω λόγους αποφασίσαμε ότι πρέπει να συμπεριλάβουμε στην μελέτη μας τη χρήση του κώδικα LDPC και των LLR. Τα αποτελέσματα που λάβαμε από τη χρήση αυτών προβάλλονται στις παρακάτω εικόνες.

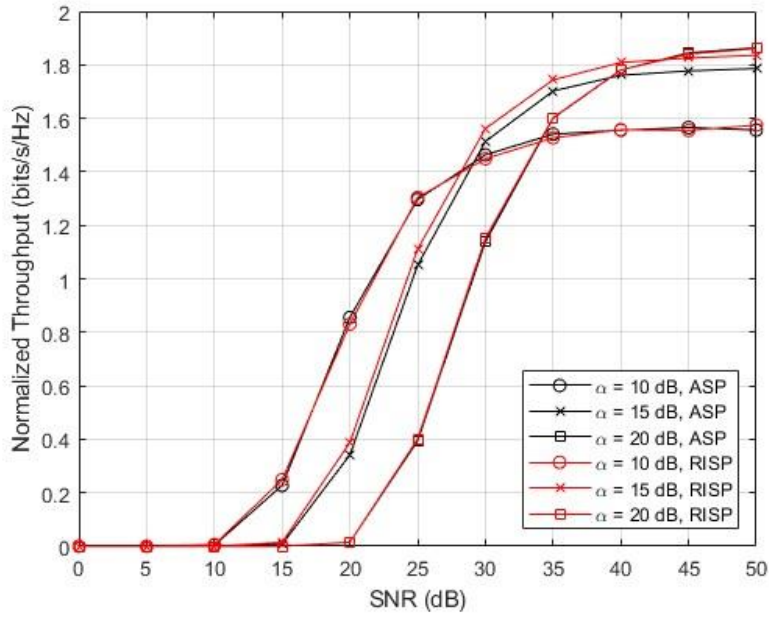
7.5 Αποτελέσματα τελικού κώδικα

Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα από τις συγκρίσεις των παραπάνω μεθόδων. Στην εικόνα 7.8 βλέπουμε τη σύγκριση της ρυθμαπόδοσης (bits/s/Hz) ως προς ASP (Average Signal Power) ISP (Instantaneous Signal Power) RISP (Relative Instantaneous Signal Power) και για διαφορετικές τιμές του συντελεστή α . Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι όλες οι καμπύλες αυξάνονται γρήγορα σε χαμηλά SNR και στη συνέχεια επέρχεται κορεσμός. Τα αποτελέσματα των τεχνικών ASP, ISP και RISP σχεδόν εφάπτονται μεταξύ τους. Επιπλέον, μεγαλύτερο α σημαίνει υψηλότερο throughput, ειδικά σε μεσαία–υψηλά SNR και η ISP παρουσιάζει ενδιάμεση απόδοση, ενώ η ASP είναι η πιο περιορισμένη.



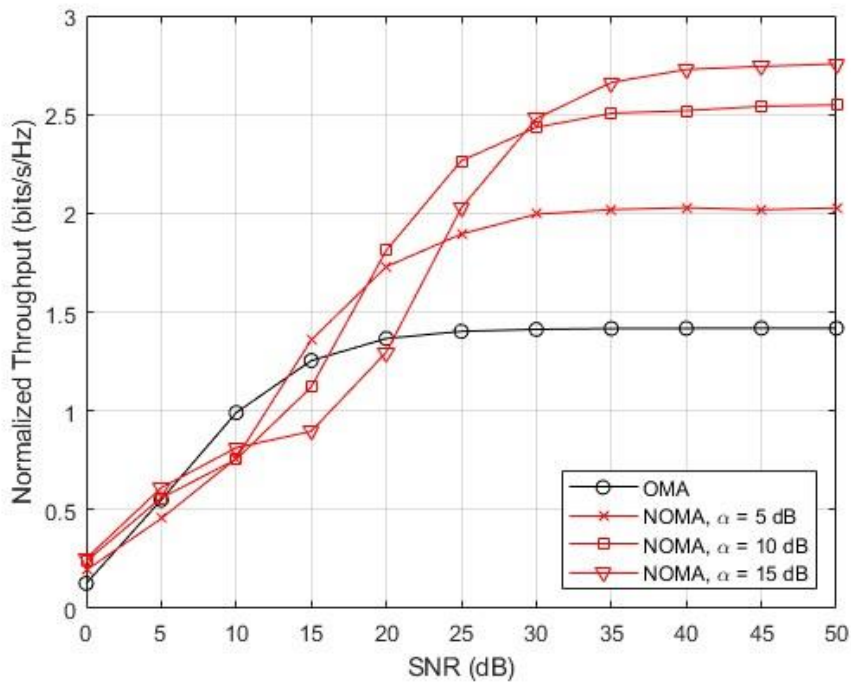
Εικόνα 7.8 Σύγκριση ASP, ISP και RISP χαμηλό και μεσαίο throughput

Στην εικόνα 7.9 μελετούμε το ίδιο πράγμα με βασική διαφορά ότι μελετάμε μεγαλύτερη συνολική χωρητικότητα. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι στις περιπτώσεις όπου το α είναι 10 και 20dB συμπεριφέρονται ακριβώς το ίδιο χωρίς κάποιο ουσιαστικό κέρδος. Η μόνη περίπτωση που αυτό διαφέρει είναι για το α να είναι 15dB αλλά ακόμη και σε αυτή την περίπτωση το κέρδος είναι πάρα πολύ μικρό για να σημειωθεί κάποια ουσιαστική βελτίωση.



Εικόνα 7.9 Σύγκριση ASP, ISP και RISP υψηλό throughput

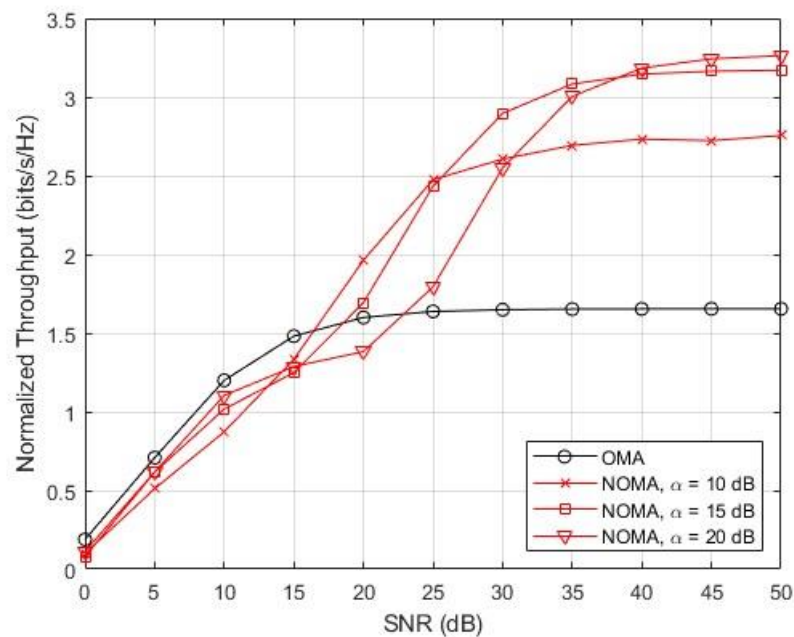
Στην εικόνα 7.10 φαίνεται η σύγκριση του OMA με το NOMA ως προς το SNR και παρατηρείται ότι στο OMA ο κορεσμός γίνεται νωρίς έχοντας χαμηλότερο μέγιστο throughput δείχνοντας ότι το NOMA υπερέχει ξεκάθαρα, ιδιαιτέρως σε υψηλά SNR. Όσο αυξάνεται το α , τόσο περισσότερο μεγαλώνει το πλεονέκτημα του NOMA, διπλασιάζοντας σχεδόν την απόδοση του OMA. Επομένως, η μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση εκμεταλλεύεται καλύτερα τους πόρους φάσματος.



Εικόνα 7.10 Σύγκριση του OMA και του NOMA σε χαμηλές τιμές του α

Στην εικόνα 7.11 παρατηρούμε πιο έντονα τη διαφορά της απόδοσης του NOMA έναντι του OMA σε μεγαλύτερες τιμές α που εμφανίζουν εντονότερη κλιμάκωση της απόδοσης, το κέρδος του

NOMA αυξάνεται με την αύξηση του SNR και το OMA παραμένει περιορισμένο. Άρα, ο συνδυασμός του NOMA και της υψηλής ανάκλασης ισχύος μεγιστοποιεί το throughput.



Εικόνα 7.11 Σύγκριση του OMA και του NOMA σε πιο υψηλότερες τιμές του α

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η κανονικοποιημένη ρυθμαπόδοση αυξάνεται μονοτονικά με το SNR, παρουσιάζοντας κορεσμό σε υψηλές τιμές. Μεταξύ των τεχνικών επιφανειακής επεξεργασίας, η RISIP επιτυγχάνει συστηματικά ανώτερη απόδοση σε σύγκριση με τις ASP και ISP, λόγω της δυναμικής προσαρμογής των ανακλαστικών στοιχείων στο κανάλι. Το πλεονέκτημα αυτό γίνεται εντονότερο για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή α και σε σενάρια αυξημένων απαιτήσεων χωρητικότητας.

Παράλληλα, η σύγκριση μεταξύ OMA και NOMA αποδεικνύει τη σαφή υπεροχή της μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης, ιδιαίτερα σε μεσαία και υψηλά SNR, όπου το NOMA αξιοποιεί αποτελεσματικότερα το φάσμα και τους πόρους ισχύος. Ο συνδυασμός NOMA με RISIP οδηγεί στα υψηλότερα επίπεδα throughput, καθιστώντας το συγκεκριμένο σχήμα ιδιαίτερα ελκυστικό για μελλοντικά ασύρματα δίκτυα υψηλής απόδοσης.

Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα της έρευνας

Συνολική Αποτίμηση Αποτελεσμάτων και Τελικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετήθηκαν τα κριτήρια σειράς ανίχνευσης χρηστών σε συστήματα μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (NOMA) και η επίδρασή τους στη συνολική απόδοση του συστήματος. Η μελέτη βασίστηκε τόσο σε θεωρητική ανάλυση όσο και σε προσομοιώσεις, με στόχο την κατανόηση του ρόλου της σειράς ανίχνευσης στη διαδικασία διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (SIC) και την αξιολόγηση διαφορετικών κριτηρίων για την κατάταξη των χρηστών. Επιπρόσθετα εξετάστηκε η βελτίωση που παρουσιάζει η NOMA σε σχέση με την κλασική ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση (OMA) με τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που εφαρμόζονται στα συστήματα IEEE 802.11ax.

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η τεχνολογία NOMA παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις ορθογωνικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών στον ίδιο χρόνο και εύρος ζώνης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος και αυξημένη συνολική χωρητικότητα του συστήματος, ιδιαίτερα σε σενάρια με αυξημένο αριθμό χρηστών. Ιδιαίτερη σημασία έχει η σωστή επιλογή της σειράς ανίχνευσης των χρηστών. Επιπλέον, οι συνθήκες καναλιού μπορούν να βελτιώσουν αισθητά την απόδοση του συστήματος, μειώνοντας τα επίπεδα σφαλμάτων (BER και PER) και περιορίζοντας τις επιπτώσεις της παρεμβολής. Αντίθετα, μη κατάλληλη σειρά ανίχνευσης οδηγεί σε υποβάθμιση της απόδοσης, κυρίως για τους χρήστες με ασθενέστερο σήμα.

Κατά την ανάπτυξη του κώδικά μας, παρατηρήσαμε ότι αλλάζοντας τον ρυθμό μετάδοσης μέσω της επιλεγμένης διαμόρφωσης στα κανάλια των χρηστών η επιτυχία του διαχωρισμού των δύο χρηστών γίνεται με ευκολότερο τρόπο, επιτυγχάνοντας ποσοστά λάθους που επιβεβαιώνουν το θεωρητικό υπόβαθρο, όμως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα πραγματικό σύστημα. Έτσι, για να φερούμε το σύστημα μας σε συνθήκες πιο κοντά στην πραγματικότητα στρέψαμε την προσοχή μας σε πιο αυστηρά κριτήρια αξιολόγησης του συστήματος, όπως η χρήση του Packet Error Rate και αργότερα του κώδικα LDPC και τα εντάξαμε σε επιλεγμένες συνθήκες ώστε να έχουμε βέλτιστη αναγνώριση των χρηστών κατά την αποκωδικοποίηση του σήματός τους.

Η ενσωμάτωση τεχνικών καναλικής κωδικοποίησης, όπως οι κώδικες LDPC και η χρήση LLRs, ανέδειξε τη δυνατότητα περαιτέρω βελτίωσης της αξιοπιστίας του συστήματος, ιδιαίτερα σε χαμηλές και μεσαίες τιμές SNR. Τα τελικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι ο αναπτυχθείς κώδικας αποτελεί ένα ευέλικτο και επεκτάσιμο εργαλείο προσομοίωσης για τη μελέτη συστημάτων NOMA, ικανό να υποστηρίξει μελλοντική έρευνα σε πιο σύνθετα σενάρια και να συμβάλλει στην κατανόηση των συμβιβασμών μεταξύ απόδοσης, πολυπλοκότητας και δικαιοσύνης στους χρήστες. Τέλος, συγκρίναμε τα δεδομένα που παράξαμε με αντίστοιχα που έχουν δημιουργηθεί με τη χρήση συστήματος OMA έναντι NOMA και παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχουν ιδιαίτερα κέρδη μεταξύ τους. Βέβαια, είναι άξιο να σημειωθεί ότι έχουμε μια διαφοροποίηση στην περίπτωση όπου οι δύο χρήστες έχουν 15dB διαφορά μεταξύ τους κατά την οποία δείχνει ότι τα συστήματα NOMA υπερτερούν των συστημάτων OMA.

Συνολικά, η NOMA αναδεικνύεται ως μια ιδιαίτερα υποσχόμενη τεχνική για τα δίκτυα 5G και 6G, υπό την προϋπόθεση ότι γίνεται σωστή επιλογή της σειράς ανίχνευσης και των παραμέτρων του

συστήματος. Η παρούσα εργασία συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας της NOMA και μπορεί να αποτελέσει βάση για μελλοντική έρευνα σε πιο αποδοτικούς και ευέλικτους αλγορίθμους ανίχνευσης χρηστών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Z. Chen, Z. Ding, X. Dai, and R. Zhang, ‘An Optimization Perspective of the Superiority of NOMA Compared to Conventional OMA’, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 19, pp. 5191–5202, Oct. 2017, doi: 10.1109/TSP.2017.2725223.
- [2] O. Maraqa, A. S. Rajasekaran, S. Al-Ahmadi, H. Yanikomeroglu, and S. M. Sait, ‘A Survey of Rate-optimal Power Domain NOMA with Enabling Technologies of Future Wireless Networks’, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 22, no. 4, pp. 2192–2235, 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.3013514.
- [3] Z. Wu, K. Lu, C. Jiang, and X. Shao, ‘Comprehensive Study and Comparison on 5G NOMA Schemes’, *IEEE Access*, vol. 6, pp. 18511–18519, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2817221.
- [4] A. Benjebbour, A. Li, K. Saito, Y. Saito, Y. Kishiyama, and T. Nakamura, ‘NOMA: From concept to standardization’, in *2015 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Tokyo, Japan: IEEE, Oct. 2015, pp. 18–23. doi: 10.1109/CSCN.2015.7390414.
- [5] B. Makki, K. Chitti, A. Behravan, and M.-S. Alouini, ‘A Survey of NOMA: Current Status and Open Research Challenges’, *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 179–189, 2020, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.2969899.
- [6] Y. Huang, C. Zhang, J. Wang, Y. Jing, L. Yang, and X. You, ‘Signal Processing for MIMO-NOMA: Present and Future Challenges’, Feb. 02, 2018, *arXiv*: arXiv:1802.00754. doi: 10.48550/arXiv.1802.00754.
- [7] A. Ahmed, Z. Elsaraf, F. A. Khan, and Q. Z. Ahmed, ‘Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access for Beyond 5G Networks’, *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 990–999, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3075081.
- [8] Z. Chen, X. Wei, C. Zhao, and Y. Sun, ‘Outage Analysis of NOMA Systems With User Ranking Based on ISP and Data Rate Requirement’, *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 13, no. 1, pp. 138–142, Jan. 2024, doi: 10.1109/LWC.2023.3323544.
- [9] Z. Chen, Z. Fang, Z. Duan, M. Ou, and X. Bi, ‘A Note on the RISP Criterion for NOMA Systems’, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 29, no. 2, pp. 294–298, Feb. 2025, doi: 10.1109/LCOMM.2024.3513939.
- [10] M. Ghous, A. K. Hassan, Z. H. Abbas, G. Abbas, A. Hussien, and T. Baker, ‘Cooperative Power-Domain NOMA Systems: An Overview’, *Sensors*, vol. 22, no. 24, p. 9652, Dec. 2022, doi: 10.3390/s22249652.
- [11] N. Sasaki, S. Saito, H. Suganuma, and F. Maehara, ‘Flexible and efficient resource allocation method based on the number of transmit antennas in hybrid multiple access scheme using NOMA and OMA’, *IEICE Commun. Express*, pp. 1–4, 2025, doi: 10.23919/comex.2024XBL0203.
- [12] G. Gui, H. Huang, Y. Song, and H. Sari, ‘Deep Learning for an Effective Nonorthogonal Multiple Access Scheme’, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 8440–8450, Sep. 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2848294.
- [13] S. Afrasiabi-Gorgani, ‘An Introduction to OFDM-OQAM’, Jul. 27, 2017, *arXiv*: arXiv:1707.08934. doi: 10.48550/arXiv.1707.08934.
- [14] ‘Προσομοίωση συστημάτων OFDM σε ασύρματα κανάλια επικοινωνίας’.
- [15] C. D. Parekha and J. M. Patel, ‘Overview on synchronization in OFDM systems’, in *2016 International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA) (Spring)*, Dehradun, India: IEEE, Apr. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICACCA.2016.7578862.
- [16] J. Du and S. Signell, ‘Classic OFDM Systems and Pulse Shaping OFDM/OQAM Systems’, *Inf. Commun. Technol.*, 2007.
- [17] R. Gustafsson, ‘Combating Intersymbol Interference and Cochannel Interference in Wireless Communication Systems’.

- [18] J. Ababneh *et al.*, ‘Enhanced nonlinear equalization for OFDM systems in IoT-based intelligent transportation using CGLS algorithms’, *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2025, no. 1, p. 61, Aug. 2025, doi: 10.1186/s13638-025-02492-7.
- [19] ‘Performance Assessment of MIMO-NOMA System with Simultaneously Different Data Transmission for the Next Generation Wireless Communications’.
- [20] ‘Shannon_1948_Mathematical_2’.
- [21] N. Zhang, J. Wang, G. Kang, and Y. Liu, ‘Uplink Nonorthogonal Multiple Access in 5G Systems’, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 3, pp. 458–461, Mar. 2016, doi: 10.1109/LCOMM.2016.2521374.

Internet Site

- [22] ‘ldpcdecode[1]’, Available:
https://www.mathworks.com/help/comm/ref/ldpcdecode.html?searchHighlight=LDPC+decode&_tid=srchtitle_support_results_1_LDPC+decode.

Βιβλία

- [23] Κωττής Γ. Παναγιώτης, Αράπογλου Παντελής-Δανιήλ, ISBN13 9789604182688

Εικόνες

- [24] Αναπαράσταση ενός NOMA συστήματος και ο διαμοιρασμός των πόρων του, Available:
https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-NOMA-system-concept_fig1_351485934
- [25] Μοντέλο Επικοινωνίας NOMA με Χρήση Τεχνικής SIC για Αποκωδικοποίηση Σήματος Χρηστών, Available:
https://www.researchgate.net/figure/Downlink-NOMA-system-with-two-users_fig1_339831293
- [26] Διάφοροι τύποι τρανζίστορ, Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/Τρανζίστορ>
- [27] Τηλέγραφος και Κωδικας Morse, Available: <https://pixlr.com/gr/image-generator/AI/>
- [28] Σκίτσο αναπαράστασης του πρώτου τηλεφώνου, Available: <https://pixlr.com/gr/image-generator/AI/>