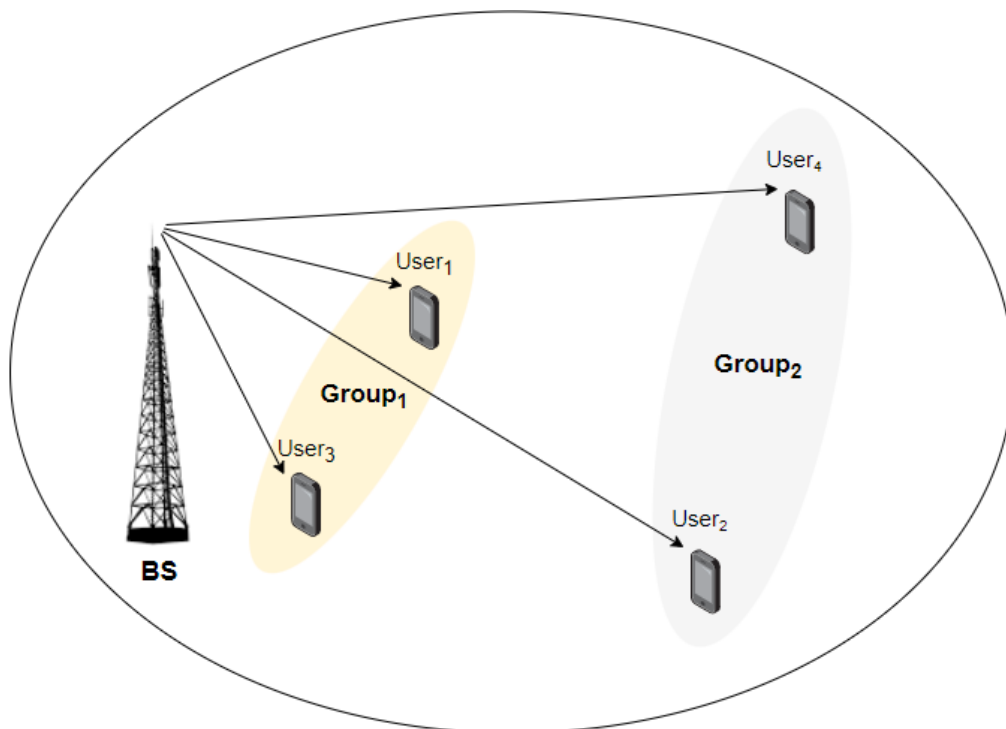




ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τεχνικές πρόσβασης NOMA για ασύρματες επικοινωνίες



Μεταπτυχιακός Φοιτητής : Μπακογιάννης Δημήτριος, AM DCOM - 012

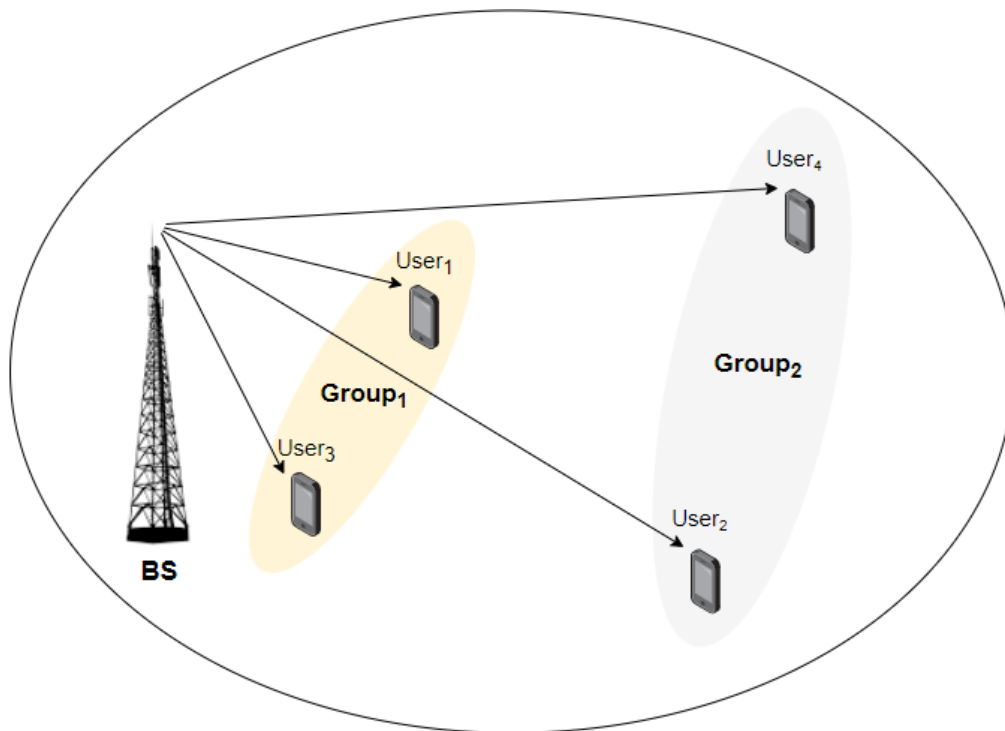
Επιβλέπων Καθηγητής : Καραμπέτσος Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2022



MSc Thesis

NOMA techniques for wireless communications



Student : Bakogiannis Dimitrios, Registration Number DCOM - 012
MSc Thesis Supervisor : Karabetsos Sotirios, Associate Professor

ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER 2022

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Καραμπέτσος Σωτήριος	Ζέρβας Ευάγγελος	Κουλούρας Γρηγόριος
Αναπληρωτής Καθηγητής	Καθηγητής	Αναπληρωτής Καθηγητής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μπακογιάννης Δημήτριος του Ελευθερίου, με αριθμό μητρώου DCOM-012 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Τέλος, βεβαιώνω ότι η εργασία αυτή δεν έχει κατατεθεί στο πλαίσιο των απαιτήσεων για τη λήψη άλλου τίτλου σπουδών ή επαγγελματικής πιστοποίησης πλην του παρόντος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Μπακογιάννης Δημήτριος

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και ΜΠΑΚΟΓΙΑΝΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ,
Σεπτέμβριος, 2022**

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος μέλους ΔΕΠ, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τόσο την μελέτη και παρουσίαση των κυριότερων μη ορθογωνικών τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης (NOMA – Non Orthogonal Multiple Access), όσο και την αξιολόγηση της επίδοσης μέσω προσομοίωσης και απαρτίζεται από τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κατηγορίες των ορθογωνικών τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης (OMA – Orthogonal Multiple Access) καθώς και η συνοπτική θεωρία της κάθε μίας από αυτές της τεχνικές. Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας αυτής παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες των τεχνικών NOMA, όπως επίσης η επεξήγηση και η ανάλυση κάποιων βασικών χαρακτηριστικών τους. Επιπλέον γίνεται σύγκριση μεταξύ των τεχνικών OMA και NOMA με σκοπό την παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των οικογενειών αυτών. Στο κεφάλαιο τρία, πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού Matlab η υλοποίηση ενός σεναρίου χρήσης με την PD-NOMA προσομοίωσης, με σκοπό την εξέταση των επιδόσεων μιας τεχνικής από τις υποκατηγορίες των τεχνικών NOMA όπως επίσης γίνεται και σχολιασμός των αποτελεσμάτων αυτών. Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο, αναφέρονται τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει όπως επίσης γίνεται σχολιασμός και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: OMA, TDMA, OFDMA, NOMA, Superposition Coding, SIC, PD-NOMA, CD-NOMA

ABSTRACT

Current thesis contains the study and presentation of the main Non Orthogonal Multiple Access (NOMA) techniques, as well as the evaluation of performance through simulation, and consists of four chapters. In the first chapter, the categories of the Orthogonal Multiple Access (OMA) techniques, are presented, and also the summary theory of each of these techniques. In the second chapter of this thesis, the basic categories of the NOMA techniques are being presented, and also the illustration and analysis of some of their basic characteristics. Furthermore, there is a comparison between the OMA and NOMA techniques, in order to demonstrate the advantages and disadvantages of both families. In chapter three, the implementation of a realistic scenario with PD-NOMA is carried out, using the Matlab software, with the purpose of examining the performance of a technique from the subcategories of NOMA techniques as well as commenting on these results. In the fourth and final chapter, there is a reference on the results that have occurred and commentary and suggestions for future research are made.

KEYWORDS: OMA, TDMA, OFDMA, NOMA, Superposition Coding, SIC, PD-NOMA, CD-NOMA

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας σηματοδοτείται και το τέλος των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του συγκεκριμένου προγράμματος που συνέβαλλαν με τις εξειδικευμένες γνώσεις τους στο να αποκτήσω τα κατάλληλα εφόδια για να πορευτώ και να εξελιχτώ στην αγορά εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου κ. Καραμπέτσο Σωτήριο για την άριστη και πολυετή συνεργασία μας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ-ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ-ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

AWGN – Additive White Gaussian Noise
BER – Bit Error Rate
BS – Base Station
BW – Bandwidth
CD – Code Domain
C-NOMA – Cooperative Non Orthogonal Multiple Access
DL – Downlink
FDMA – Frequency Division Multiple Access
FPA – Fixed Power Allocation
FSPA – Full Search Power Allocation
FTPA – Fractional Transmit Power Allocation
FWA – Fixed Wireless Access
IFFT – Inverse Fourier Transform
ISI – Intersymbol Interference
LDS – Low Density Spreading
MIMO – Multiple Input Multiple Output
MLE – Maximum Likelihood Estimation
MPA – Message Passing Algorithm
MUD – Multiuser Detection
NOMA – Non Orthogonal Multiple Access
OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMA – Orthogonal Multiple Access
PA – Power Allocation
PD – Power Domain
QAM – Quadrature Amplitude Modulation
QPSK – Quadrature Phase Modulation
SC – Superposition Coding
SCMA – Sparse Code Multiple Access
SIC – Successive Interference Cancelation
TDMA – Time Division Multiple Access
UL – Uplink

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ:	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ορθογωνικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης	14
1.1 FDMA	16
1.2 TDMA	17
1.3 CDMA	18
1.4 OFDMA	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μη ορθογωνικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης	24
2.1 Power Domain NOMA	25
2.1.1 Superposition Coding.....	28
2.1.2 Successive Interference Cancellation.....	29
2.1.3 Μέθοδοι καταμερισμού ισχύος και ομαδοποίησης χρηστών.....	31
2.2 CD-NOMA	33
2.2.1 Low-Density Spreading CDMA	34
2.2.2 Sparse Code Multiple Access	34
2.3 NOMA vs OMA	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Διάταξη Προσομοίωσης – Αριθμητικά Αποτελέσματα.....	38
3.1 Σύστημα PD-NOMA με FPA	40
3.2 Κώδικας προσομοίωσης.....	41
3.3 Αποτελέσματα.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συμπεράσματα – Μελλοντική Έρευνα	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ	55
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΑΤΛΑΒ.....	57

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Κατανομή χρηστών σε σύστημα FDMA	16
Εικόνα 2. Κατανομή χρηστών σε σύστημα TDMA.....	17
Εικόνα 3. Κατανομή χρηστών σε σύστημα CDMA.....	18
Εικόνα 4. Διάχυση φάσματος	19
Εικόνα 5. OFDMA vs FDMA	20
Εικόνα 6. Ομαδοποίηση και απονομή εισόδων IFFT σε χρήστες συστήματος OFDMA.....	21
Εικόνα 7. Ρυθμός μετάδοσης 2 χρηστών σε σύστημα OMA.....	23
Εικόνα 8. PD-NOMA	25
Εικόνα 9. Παράδειγμα 2 τερματικών συσκευών και ενός σταθμού βάσης.....	26
Εικόνα 10. Τεχνική superposition coding [5]	28
Εικόνα 11. α)Αστερισμός κοντινού χρήστη β)Αστερισμός μακρινού χρήστη	29
Εικόνα 12. α)Λαμβανόμενος αστερισμός μακρινού χρήστη χωρίς την επίρεια καναλιού β)Λαμβανόμενος αστερισμός κοντινού χρήστη χωρίς την επίρεια καναλιού.....	30
Εικόνα 13. Τεχνική FPA.....	33
Εικόνα 14. Απεικόνιση LDS-CDMA, 6 χρήστες και 4 chips.....	34
Εικόνα 15. SCMA κωδικοποίηση και πολυπλεξία [10]	35
Εικόνα 16. Σύγκριση ρυθμών μετάδοσης 2 χρηστών μεταξύ συστημάτων OMA και NOMA [11]	36
Εικόνα 17. Σχεδιάγραμμα σεναρίου υλοποίησης	39
Εικόνα 18. Κώδικας αρχικοποίησης συστήματος.....	41
Εικόνα 19. Κώδικας δημιουργίας πληροφορίας και QPSK συμβόλων για τους 2 χρήστες	42
Εικόνα 20. Δημιουργία καναλιών Rayleigh για τους χρήστες	42
Εικόνα 21. Superposition coding για τον κοντινό και μακρινό χρήστη.....	42
Εικόνα 22. α) Αστερισμός κοντινού χρήστη β) Αστερισμός μακρινού χρήστη γ) Τελικός εκπεμπόμενος αστερισμός.....	43
Εικόνα 23. Διέλευση σήματος μέσα από τα κανάλια των 2 χρηστών	44
Εικόνα 24. α) Εκπεμπόμενος αστερισμός στα 36dBm β) Λαμβανόμενος αστερισμός κοντινού χρήστη με ισχύ εκπομπής 36dBm γ) Λαμβανόμενος αστερισμός μακρινού χρήστη με ισχύ εκπομπής 36dBm δ)Εκπεμπόμενος αστερισμός στα 40dBm ε) Λαμβανόμενος αστερισμός κοντινού χρήστη με ισχύ εκπομπής 40dBm στ) Λαμβανόμενος αστερισμός μακρινού χρήστη με ισχύ εκπομπής 40dBm	44
Εικόνα 25. Αποκωδικοποίηση πληροφορίας μακρινού χρήστη	45
Εικόνα 26. Αποκωδικοποίηση πληροφορίας κοντινού χρήστη	45
Εικόνα 27. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης	46
Εικόνα 28. Διάγραμμα BER και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.1 και 0.9	46

Εικόνα 29. Διάγραμμα BER και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.2 και 0.8	47
Εικόνα 30. Διάγραμμα BER και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.3 και 0.7	47
Εικόνα 31. Διάγραμμα BER και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.4 και 0.6	48
Εικόνα 32. Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.4 και 0.6.....	48
Εικόνα 33. Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.3 και 0.7.....	49
Εικόνα 34. Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.2 και 0.8.....	49
Εικόνα 35. Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.1 και 0.9.....	50
Εικόνα 36. Σύγκριση NOMA και OMA	52

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Συντελεστές ισχύος χρηστών.....	40
Πίνακας 2. Σχέση συντελεστών ισχύος χρηστών.....	51

Στις μέρες μας, οι αυξημένες ανάγκες των χρηστών για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και ποιότητας υπηρεσιών, σε συνδυασμό με τον ολοένα και αυξανόμενο όγκο τερματικών συσκευών που χρειάζονται πρόσβαση στο δίκτυο, έχουν οδηγήσει στην ανάγκη έρευνας και υλοποίησης έξυπνων και αποδοτικών μεθόδων, προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι απαιτήσεις αυτές.

Ανά τα χρόνια, η επιστημονική κοινότητα έχει προσφέρει στον τομέα των ευρυζωνικών επικοινωνιών λύσεις, οι οποίες έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των ασύρματων δικτύων καθώς επίσης διαμόρφωσαν και τον κόσμο των τηλεπικοινωνιών όπως τον ξέρουμε σήμερα.

Είναι ξεκάθαρο ότι από τα μέσα της δεκαετίας του '80 όπου δημιουργήθηκε το πρώτης γενιάς (1st Generation – 1G) αναλογικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας μέχρι και σήμερα, έχουν γίνει τεράστια άλματα στις παροχές των δικτύων αυτών. Αδιαμφισβήτητο παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι τα δίκτυα πρώτης γενιάς ήταν αναλογικά, δηλαδή υποστήριζαν μόνο υπηρεσίες φωνής με την χρήση διαμόρφωσης συχνότητας και παρείχαν ταχύτητες στα κανάλια ελέγχου ίση με 10kbps. Εν αντιθέσει, τα σημερινά δίκτυα 5ης γενιάς (5th Generation – 5G) παρέχουν μια γκάμα υπηρεσιών πέρα από της υπηρεσίες φωνής, οι οποίες έχουν απαίτηση για χαμηλή καθυστέρηση, μαζική συνδεσιμότητα καθώς επίσης και για ρυθμούς δεδομένων που πλέον αγγίζουν το 1Gbps [1].

Επίσης πέρα από την μελέτη των τεχνικών NOMA σε βιβλιογραφικό επίπεδο, στόχος της εργασίας είναι και η μελέτη του τρόπου προσομοίωσης και των σεναρίων υλοποίησης μέσω ανάπτυξης κώδικα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ορθογωνικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης

Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης χρησιμοποιούνται όποτε υπάρχει ανάγκη για έναν αριθμό ανεξαρτήτων μεταξύ τους χρηστών, να μοιραστεί κοινούς πόρους του δικτύου εξυπηρέτησης όπου ανήκουν. Οι περισσότερες από τις τεχνικές αυτές στηρίζονται στην διαίρεση των πόρων του διαύλου επικοινωνίας σε ένα πλήθος ανεξάρτητων υποκαναλιών επικοινωνίας, όπου το κάθε ένα αντιστοιχεί και σε έναν χρήστη. Ο ρόλος των τεχνικών αυτών είναι στο να συντονίσουν τις εκπομπές των χρηστών έτσι ώστε να αποφευχθεί κάποια σύγκρουση (collision). Οι συγκρούσεις προκύπτουν όταν δύο ή περισσότεροι χρήστες εκπέμπουν τις πληροφορίες τους στο μέσο και τουλάχιστον 1bit εκπεμπόμενης πληροφορίας του ενός χρήστη, επικαλύπτει κάποιο από τα εκπεμπόμενα bits του άλλου. Σε μια τέτοια περίπτωση η εκπομπή του ενός χρήστη έχει παρεμβληθεί από την εκπομπή κάποιου άλλου, κάτι που την κάνει αναξιοποίητη με αποτέλεσμα να απαιτείται η επανεκπομπή της. Με γνώμονα το παραπάνω συμβάν, μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης θα πρέπει να είναι σε θέση να μπορεί να χειριστεί πολλούς χρήστες χωρίς αυτοί να παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Επιπλέον θα πρέπει να αξιοποιεί τους πόρους του ραδιοδιαύλου όσο το δυνατόν καλύτερα γίνεται έτσι ώστε να είναι αποδοτική [2].

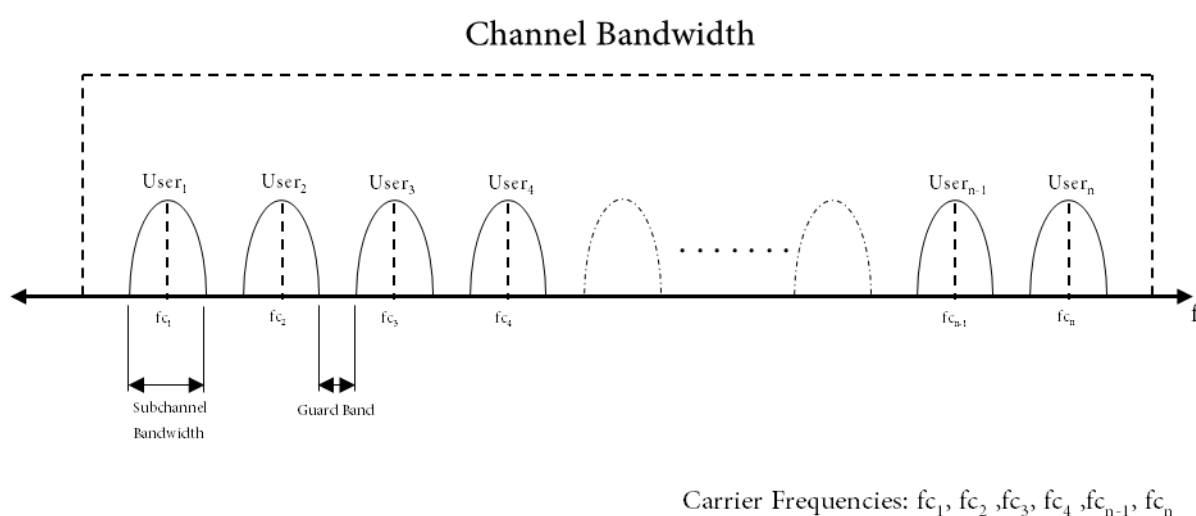
Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο θα πρέπει τα διαφορετικά υποκανάλια ή αλλιώς φυσικά κανάλια, διότι μέσα από αυτά θα γίνεται η μετάδοση της πληροφορίας του κάθε χρήστη, να μην επικαλύπτονται μεταξύ τους. Έτσι οι πόροι του ραδιοδιαύλου χωρίζονται σε συχνοτικά κανάλια, χρονοσχισμές (timeslots) και σε μοναδικούς κώδικες-κλειδιά με δεδομένες ιδιότητες. Η τέτοιου είδους διαμέριση των πόρων αυτών, οδηγεί σε ορθογώνια μη επικαλυπτόμενα φυσικά κανάλια, κάτι που είναι βασική προϋπόθεση για τον διαχωρισμό των χρηστών σε έναν δέκτη. Η προϋπόθεση αυτή ορίζει ότι τα σήματα που εκπέμπονται απαιτείται να είναι ορθογώνια μεταξύ τους δηλαδή η εταιροσυσχέτισή τους η οποία δείχνει το μέτρο του κατά πόσο αυτά μοιάζουν, να είναι ίση με το μηδέν. Η ορθογωνιότητα αυτή όπως θα δειχθεί και παρακάτω επιτυγχάνεται με την χρήση βασικών αρχών και ιδιοτήτων των σημάτων [3].

Έτσι πολλοί χρήστες μπορούν να μοιραστούν έναν κοινό ραδιοδιαύλο, έχοντας ο καθένας κατοχυρώσει είτε ένα πλήθος συγκεκριμένων συχνοτήτων, ή ένα μέρος του χρόνου είτε μια συγκεκριμένη κωδικοποίηση. Κάθε μία από αυτές της αναφορές προσδιορίζει και μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης η οποία χρησιμοποιούταν κατά κόρον στις γενιές των ασύρματων επικοινωνιακών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα η κατοχύρωση συχνοτήτων από τους χρήστες από ένα διαθέσιμο φάσμα, αποτελεί την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που ονομάζεται FDMA (Frequency Division Multiple Access) και χρησιμοποιήθηκε ως βασική τεχνική για τα δίκτυα 2G. Από την άλλη, στην ίδια γενιά δικτύων χρησιμοποιήθηκε και η τεχνική που απονέμει όλο το διαθέσιμο

φάσμα του ραδιοδίαυλου στον κάθε χρήστη αλλά του επιτρέπει να το χρησιμοποιήσει μόνο σε συγκεκριμένα timeslots. Αυτή η τεχνική ονομάζεται TDMA (Time Division Multiple Access). Στα 3G δίκτυα χρησιμοποιήθηκε η τεχνική CDMA (Code Division Multiple Access) στην οποία όλοι οι χρήστες εκπέμπουν στο ίδιο φάσμα και στον ίδιο χρόνο αλλά ο κάθε ένας από αυτούς εκπέμπει με διαφορετικό κώδικα. Τέλος, στα δίκτυα 4ης γενιάς η επαναστατική τεχνική που χρησιμοποιείται είναι μια μετεξέλιξη της FDMA η οποία ονομάζεται OFDMA (Orthogonal Division Multiple Access) και αυτό που την κάνει ξεχωριστή είναι ότι μπορεί να εξαλείψει το πρόβλημα των διασυμβολικών παρεμβολών γνωστό και ως ISI (Inter-Symbol Interference).

1.1 FDMA

Στην τεχνική πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access - FDMA) το διαθέσιμο φάσμα του ραδιοδιαύλου χωρίζεται σε επιμέρους ίσες συχνοτικές περιοχές ή αλλιώς υποκανάλια. Κάθε τέτοιο υποκανάλι χαρακτηρίζεται από την κεντρική φέρουσα συχνότητά του και το μέγεθός του είναι σταθερό και αμετάβλητο. Σε κάθε χρήστη του ραδιοδιαύλου, απονέμεται και μία μοναδική φέρουσα συχνότητα στην οποία μπορεί να εκπέμψει μόνο αυτός χωρίς βέβαια να το φάσμα του υποκαναλιού να υπερβληθεί. Με σκοπό την αποφυγή των παρεμβολών μεταξύ των χρηστών, η ορθογωνιότητα των σημάτων εξασφαλίζεται με την εισαγωγή μιας κενή συχνοτικής περιοχής μεταξύ των υποκαναλιών η οποία ονομάζεται διάστημα φύλαξης (guard band). Ο δέκτης μπορεί να ξεχωρίσει τους χρήστες, με την χρήση υψηλής ακρίβειας ζωνοπερατών φίλτρων που κεντράρονται στην εκάστοτε φέρουσα συχνότητα.



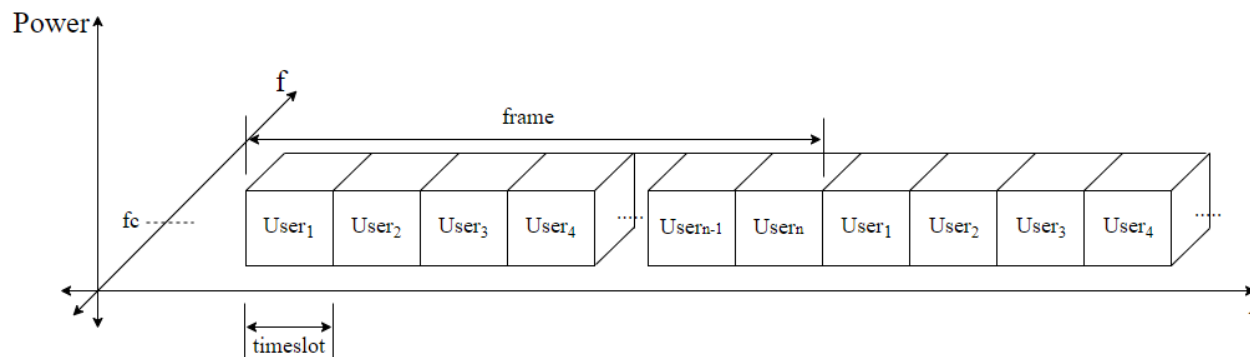
Εικόνα 1. Κατανομή χρηστών σε σύστημα FDMA

Αξίζει να σημειωθεί ότι για να μπορούν να εισέρθουν στο δίκτυο περισσότεροι χρήστες θα χρειαστεί η μείωση του μεγέθους των διαστημάτων φύλαξης. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε πιο επιλεκτικά ζωνοπερατά φίλτρα στον δέκτη κάτι που είναι δύσκολο υλοποιήσιμο και εκτός αυτού κοστοβόρο. Πέρα από το γεγονός αυτό η FDMA παρουσιάζει σοβαρό μειονέκτημα στην φασματική απόδοση. Όπως προειπώθηκε ο κάθε χρήστης δεσμεύει ένα από τα διαθέσιμα κανάλια και το χρησιμοποιεί αποκλειστικά γι' αυτόν. Το μειονέκτημα εδώ βρίσκεται στις περιπτώσεις όπου ο συγκεκριμένος χρήστης δεν διαθέτει δεδομένα προς μετάδοση. Ακόμα όμως και σε αυτήν την περίπτωση το κανάλι παραμένει δεσμευμένο από αυτόν παρόλο που δεν το χρησιμοποιεί και αυτό το γεγονός χαρακτηρίζει την τεχνική ως μικρής φασματικής απόδοσης. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής όμως είναι μεταφοράς της πολυπλοκότητας της επεξεργασίας του σήματος στον δέκτη – Σταθμό Βάσης, που έχει σαν αποτέλεσμα την απλοποίηση των φορητών τερματικών συσκευών και κατά

συνέπεια την μείωση του κόστους τους και την αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας τους. Επιπλέον με την χρήση αυτής της τεχνικής όλοι οι χρήστες μπορούν να εκπέμπουν ταυτόχρονα και ασύγχρονα, χωρίς να απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ τους, κάτι που για την τεχνική TDMA είναι βασική προϋπόθεση, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

1.2 TDMA

Η τεχνική πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access - TDMA), δίνει την δυνατότητα σε όλους τους χρήστες να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα αλλά σε διαφορετικούς χρόνους. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος χωρίζεται σε ένα πλήθος από timeslots τα οποία απαρτίζουν ένα πλαίσιο (frame). Το πλήθος των timeslots του frame πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετεί το δίκτυο. Τα timeslots είναι διαδοχικά χρονικά διαστήματα συγκεκριμένης χρονικής διάρκειας και αυτά επαναλαμβάνονται στον χρόνο, ειδικότερα μετά από τόσο χρόνο όσο είναι και το μήκος του frame. Έτσι σε όλους τους χρήστες απονέμεται τουλάχιστον ένα timeslot. Ο κάθε χρήστης είναι υποχρεωμένος να εκπέμπει μόνο στα timeslots που του ανήκουν, κάτι που απαιτεί τέλειο συγχρονισμό μεταξύ των χρηστών έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχόν παρεμβολές μεταξύ τους. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ότι όλοι οι χρήστες μοιράζονται την ίδια συχνότητα αλλά σε διαφορετικούς χρόνους. Ο οριζόντιος άξονας που αντιπροσωπεύει τον χρόνο έχει χωριστεί σε timeslots ίδιας διάρκειας τα οποία αποτελούν ένα frame όπου επαναλαμβάνεται συνεχώς στον χρόνο.



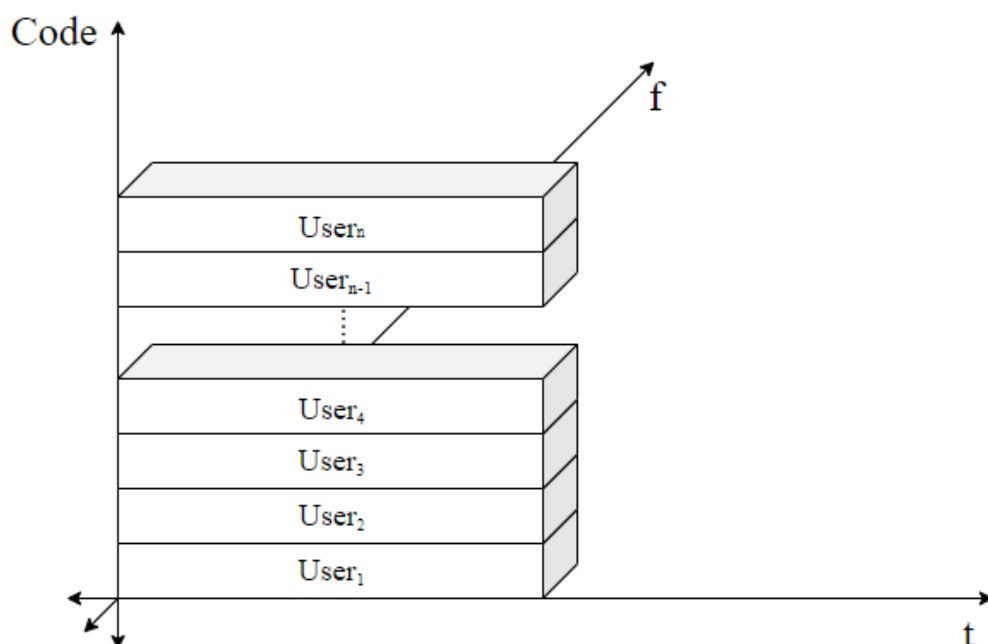
Εικόνα 2. Κατανομή χρηστών σε σύστημα TDMA

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτή την τεχνική, η ορθογωνιότητα μεταξύ των χρηστών επηρεάζεται λόγω του φαινομένου της διασυμβολικής παρεμβολής που προκαλεί ένα σήμα από ένα timeslot σε επόμενα timeslots. Όπως και στην FDMA, αντίστοιχα κι εδώ, εάν ένας χρήστης που έχει δεσμεύσει κάποια timeslots δεν διαθέτει πληροφορία προς εκπομπή, αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλους χρήστες άμεσα κι έτσι δεν πραγματοποιείται βέλτιστη χρήση του χρόνου. Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι ότι καθίστανται φασματικά πιο αποδοτική διότι όλοι οι χρήστες

μοιράζονται μια και μοναδική συχνότητα καθώς επίσης και ότι δεν απαιτούνται επιλεκτικά φίλτρα στον δέκτη έτσι ώστε να υπάρξει διαχωρισμός μεταξύ των χρηστών.

1.3 CDMA

Με την τεχνική πολυπλεξίας διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA) στον κάθε χρήστη απονέμεται ένας κώδικας διασποράς με την ιδιότητα ότι οι κώδικες αυτοί των χρηστών είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους. Πρακτικά, ο κάθε χρήστης διαμορφώνει το στενής ζώνης σήμα πληροφορίας του με ένα ευρείας ζώνης σήμα διασποράς που προκύπτει από τον κώδικά του, με αποτέλεσμα να εκπέμπει ταυτόχρονα και στην ίδια συχνότητα με τους υπόλοιπους χρήστες [2].

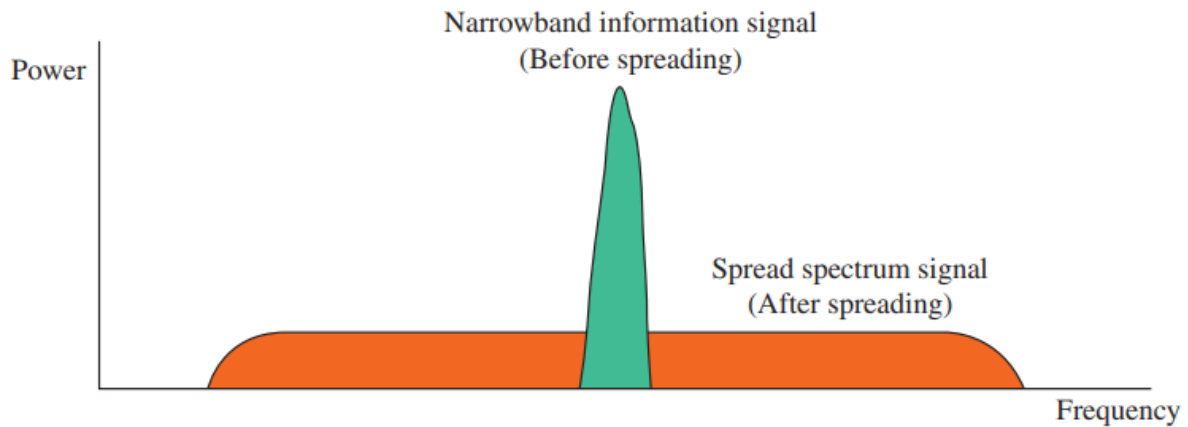


Εικόνα 3. Κατανομή χρηστών σε σύστημα CDMA

Η τεχνική αυτή δεν απαιτεί συγχρονισμό όπως η TDMA και είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στις παρεμβολές. Αυτό συμβαίνει διότι οι κώδικες που έχουν επιλεχτεί, έχουν την ιδιότητα πέρα από χαμηλή εταιροσυσχέτιση, να παρουσιάζουν και χαμηλή αυτοσυσχέτιση, δηλαδή με τον εαυτό του μετατοπισμένο κατά κάποιες θέσεις. Έτσι αυτή δεν επηρεάζεται από το φαινόμενο του ISI. Η CDMA δεν χρειάζεται guard bands ή timeslots κάτι που την κάνει φασματικά πιο αποδοτική από τις τεχνικές FDMA και TDMA, ακόμα και αν κάποιος χρήστης δεν διαθέτει διαθέσιμη πληροφορία προς εκπομπή. Από την άλλη τα συστήματα που χρησιμοποιούν CDMA είναι ενδογενώς πιο πολύπλοκα και επιπλέον καθώς ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται στο δίκτυο, η ποιότητα το υπηρεσιών πέφτει.

Η CDMA όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, «απλώνει» το στενό φάσμα πληροφορίας του κάθε χρήστη σε ένα μεγαλύτερο ευρύ φάσμα συχνοτήτων βάση ενός κώδικα. Έτσι,

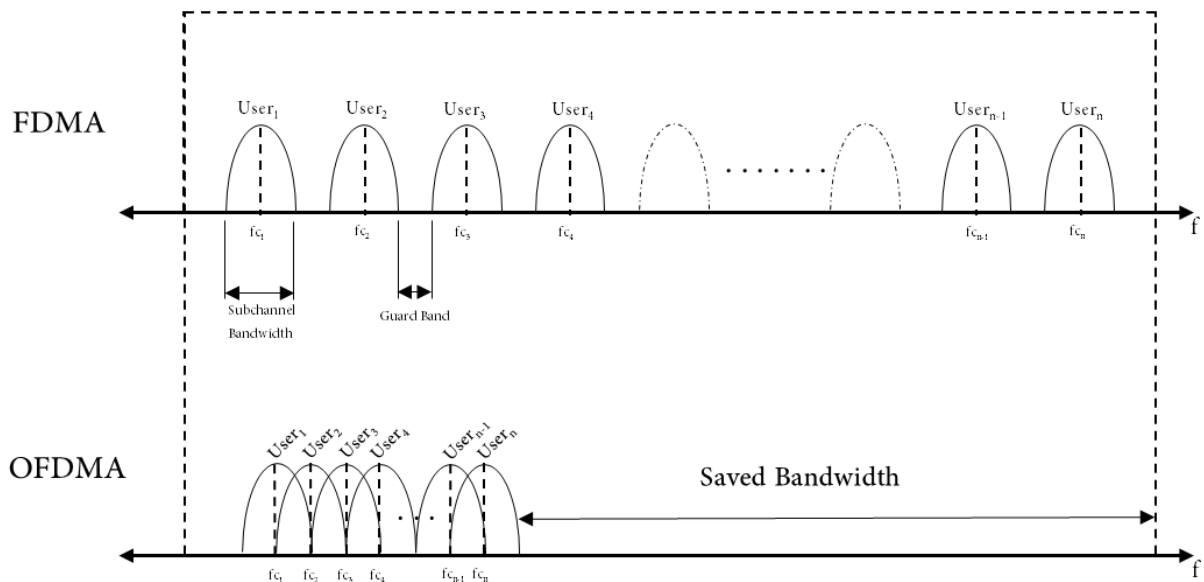
η φασματική πυκνότητα ισχύος μοιράζεται σε ένα ευρύτερο συχνοτικό φάσμα με αποτέλεσμα το σήμα στο κανάλι να μοιάζει με θόρυβο. Το άπλωμα αυτό μπορεί να γίνει με τις τεχνικές ευρέος φάσματος (Spread Spectrum Techniques) οι οποίες είναι η Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) και η Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS).



Εικόνα 4. Διάχυση φάσματος

1.4 OFDMA

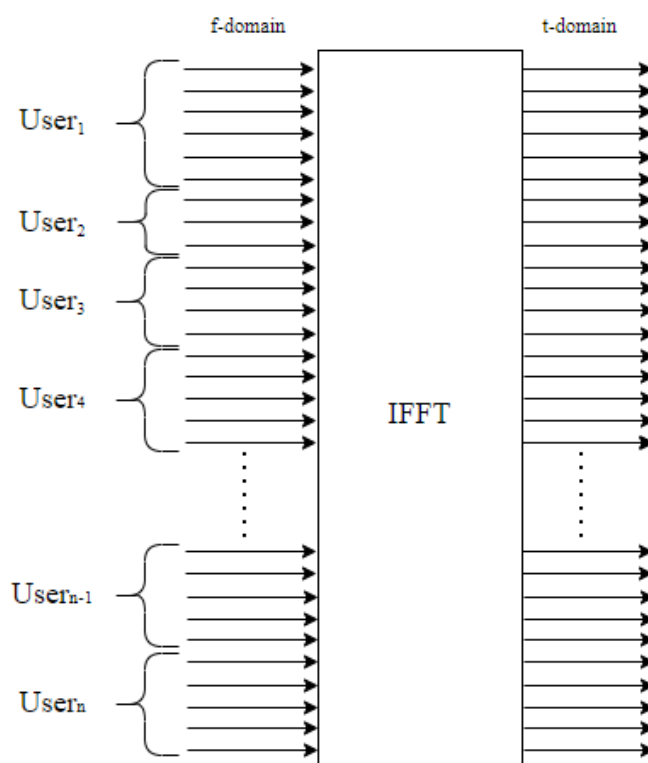
Η πιο διαδεδομένη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι η OFDMA. Η τεχνική αυτή στηρίζεται στην διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) όπου ένα πλήθος από υποφέροντα, επιλεγμένα κατάλληλα με τέτοιο τρόπο ώστε να πληρείται το κριτήριο της ορθογωνιότητας, διαμορφώνεται από απορροές πληροφορίας και εκπέμπεται στο μέσο. Στην OFDMA το πλήθος των υποφερόντων χωρίζεται σε ομάδες – groups, όπου στον κάθε χρήστη απονέμεται και από ένα. Η διαφορά με την OFDM είναι ακριβώς αυτός ο διαχωρισμός γιατί αντίθετα σε αυτήν την τεχνική, όλα τα υποφέροντα απονέμονται σε έναν χρήστη.



Εικόνα 5. OFDMA vs FDMA

Έτσι ο κάθε χρήστης διαμορφώνει με την πληροφορία του τα υποφέροντα όπου του ανήκουν χρησιμοποιώντας OFDM (και συνεπακόλουθα ένα μερίδιο του διαθέσιμου φάσματος) και στο τέλος αυτά αθροίζονται και εκπέμπονται με τις εκπομπές άλλων χρηστών που ακολουθούν την ίδια τεχνική.

Η διαμόρφωση OFDM γίνεται με την χρήση του αλγορίθμου IFFT όπου διαθέτει τόσες εισόδους όσο είναι και το μήκος του. Είναι ξεκάθαρο ότι στην OFDMA, στον κάθε χρήστη δίδεται ένα πλήθος μοναδικών υποφερόντων που αντικατοπτρίζει και ένα πλήθος από τις εισόδους ενός κοινού IFFT που μοιράζονται οι χρήστες μεταξύ τους. Δεν είναι απαραίτητο ότι ο κάθε χρήστης θα λάβει ισάριθμο πλήθος υποφερόντων με τους υπόλοιπους χρήστες και αυτό είναι κάτι που κρίνεται από το σύστημα που είναι υπεύθυνο για την διαδικασία απονομής των υποφερόντων, όπως επίσης και από τις απαιτήσεις που έχει η υπηρεσία που εκτελεί ο κάθε χρήστης.



Εικόνα 6. Ομαδοποίηση και απονομή εισόδων IFFT σε χρήστες συστήματος OFDMA

Η OFDMA υπερτερεί έναντι της FDMA, διότι κάνει καλύτερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Αυτή η βελτιστοποίηση στη χρήση του διαθέσιμου φάσματος επιτυγχάνεται χάρη την αφαίρεση των διαστημάτων φύλαξης και επιπλέον βάση της επικάλυψης που γίνεται στα υποκανάλια και το φάσμα τους όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5. Αυτά τα δύο είναι που κάνουν την OFDMA πιο αποδοτική σε σχέση με τις άλλες τεχνικές και επιπλέον το γεγονός ότι είναι ανθεκτική στη διασυμβολική παρεμβολή.

Όπως είναι αντιληπτό, σε αυτές τις τεχνικές πρόσβασης αν οι πόροι του ραδιοδιαύλου δεν διαμοιραστούν με ισάριθμο και δίκαιο τρόπο, οι χρήστες βιώνουν διαφορετική αντιμετώπιση. Για παράδειγμα αν στα συστήματα FDMA και OFDMA σε κάποιον χρήστη απονεμηθεί μεγαλύτερο μέρος του συνολικού διαθέσιμου φάσματος από ότι στους υπόλοιπους, αυτός ο χρήστης είναι «ευνοημένος» και η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων του είναι μεγαλύτερη από ότι των υπολοίπων. Έτσι και για τα συστήματα TDMA και CDMA, δεν υπάρχει εξισορρόπηση στις ταχύτητες δεδομένων των χρηστών εάν σε κάποιον χρήστη μοιραστούν περισσότερα timeslots ή απονεμηθούν παραπάνω από έναν κώδικες αντίστοιχα, με αποτέλεσμα κάποιοι να αδικηθούν ενώ κάποιοι άλλοι να ευνοηθούν.

Η παραπάνω έκφραση μπορεί να αποτυπωθεί γραφικά σε ένα γράφημα το οποίο ενεπλέκονται δύο χρήστες. Πιο συγκεκριμένα, οι οριζόντιοι άξονες της Εικόνας 7 έχουν αντιστοιχηθεί με τις ταχύτητες δεδομένων των δύο χρηστών, όπου με R_1 συμβολίζεται ο ρυθμός δεδομένων του πρώτου χρήστη, ενώ με R_2 ο ρυθμός δεδομένων του δεύτερου.

Έστω ότι οι δύο αυτοί χρήστες απαρτίζουν ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών και υπάγονται σε έναν κοινό σταθμό βάσης (Base Station – BS). Εξετάζοντας την ανερχόμενη ζεύξη (UpLink – UL) εάν στον πρώτο χρήστη απονεμηθούν όλοι οι διαθέσιμοι πόροι και συνεπακόλουθα ο δεύτερος χρήστης να μην εκπέμπει καθόλου, η ταχύτητα δεδομένων του πρώτου χρήστη μπορεί να φτάσει μέχρι την εξής τιμή:

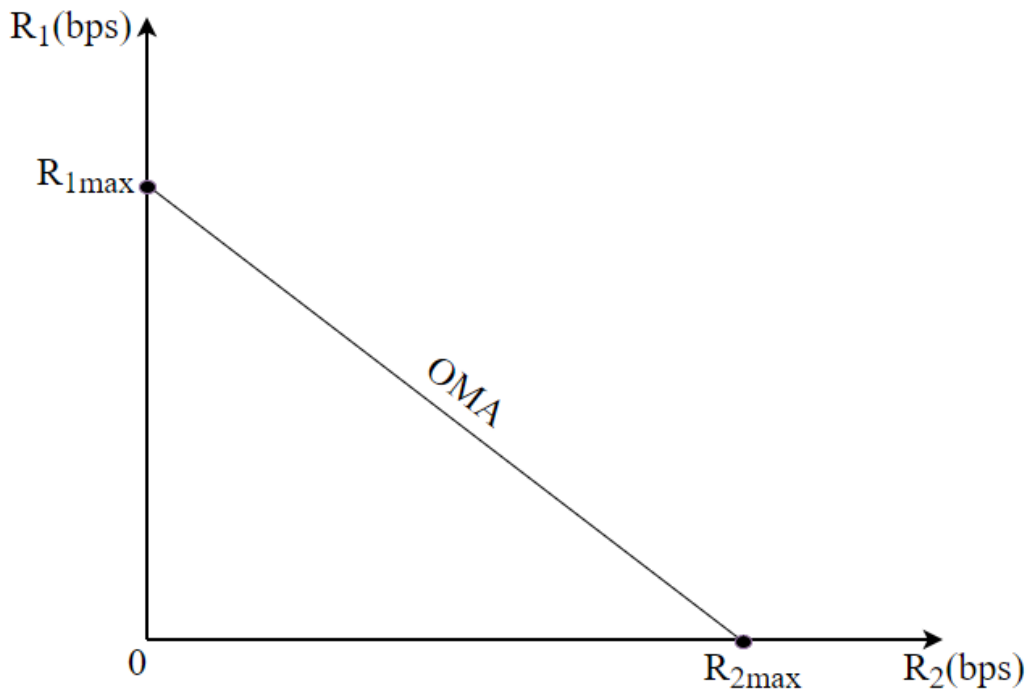
$$R_{1\max} \leq \alpha \cdot BW \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0} \right) \quad (1)$$

Όπου με α συμβολίζεται το ποσοστό των διαθέσιμων πόρων που απονέμεται στον πρώτο χρήστη που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ίσο με 1, με BW το εύρος ζώνης του καναλιού, με P η εκπεμπόμενη ισχύς και με N_0 η μέση ισχύς του θορύβου. Ο παραπάνω τύπος προκύπτει από το θεώρημα του Shannon-Hartley και εκφράζει τη μέγιστη πιθανή ταχύτητα δεδομένων για τον συγκεκριμένο χρήστη.

Σε μια αντίστοιχη περίπτωση για τον δεύτερο χρήστη, ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων δεν θα μπορούσε να ξεπεράσει την εξής τιμή:

$$R_{2\max} \leq (1 - \alpha) \cdot BW \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0} \right) \quad (2)$$

Ο παράγοντας 1- α στην συγκεκριμένη περίπτωση, δείχνει ότι οι δύο χρήστες μοιράζονται τους διαθέσιμους πόρους και άρα οι ταχύτητες δεδομένων τους είναι αλληλένδετες. Ο κάθε χρήστης μπορεί να επιτύχει την μέγιστη ταχύτητά του έχοντας κατοχυρώσει αποκλειστικά για αυτόν όλους τους πόρους του συστήματος. Έτσι ο άλλος χρήστης δεν έχει πόρους διαθέσιμους ώστε να μεταδώσει την πληροφορία του κάτι που οδηγεί στο παρακάτω διάγραμμα. Για να επιτύχει ο συγκεκριμένος χρήστης αυτήν την μέγιστη ταχύτητα, η τιμή του α θα πρέπει να είναι ίση με 0.



Εικόνα 7. Ρυθμός μετάδοσης 2 χρηστών σε σύστημα OMA

Το συγκεκριμένο γράφημα δείχνει την σχέση που υπάρχει στους ρυθμούς δεδομένων των δύο χρηστών, μέσω της διαγώνιας ευθείας που ενώνει τους δύο αυτούς άξονες. Είναι αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός δεδομένων του ενός χρήστη, σαν αποτέλεσμα μειώνεται ο ρυθμός δεδομένων του άλλου.

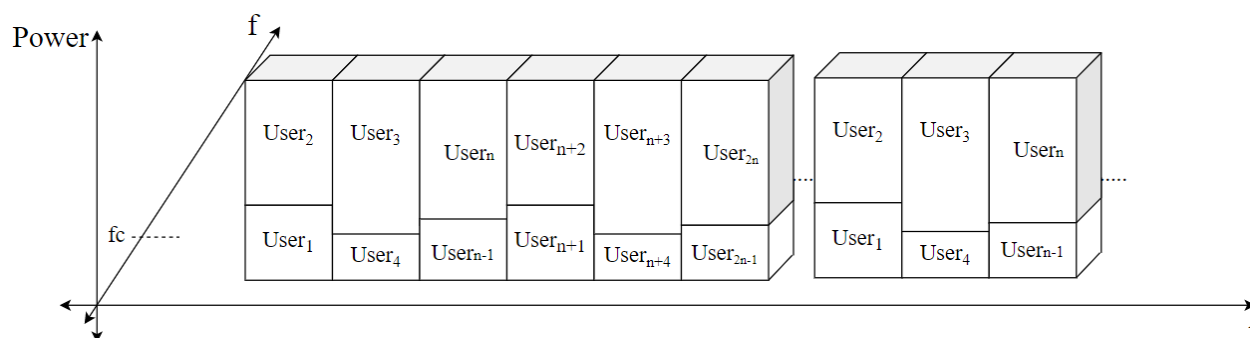
Μια πολλά υποσχόμενη οικογένεια νέων τεχνικών πρόσβασης, έρχεται να βελτιώσει την παραπάνω εικόνα που έχουν προκαθορίσει οι ορθογωνικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal Multiple Access – OMA Techniques). Στις τεχνικές OMA, δεν υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ των χρηστών λόγω της ορθογωνιότητας που υπάρχει μεταξύ των πόρων που διαθέτει ο κάθε χρήστης. Από την άλλη λόγω του περιορισμένου πλήθους αυτών των πόρων οι τεχνικές αυτές δεν μπορούν να εξυπηρετήσουν πολλούς χρήστες κάτι που παρουσιάζεται ως ανάγκη για τα νέας γενιάς δίκτυα δεδομένων. Έτσι, σκοπός αυτής της οικογένειας είναι μέσα από καινοτόμες τεχνικές, να μειώσει όσο το δυνατόν γίνεται την εξάρτηση των ρυθμών δεδομένων μεταξύ των χρηστών, αυξάνοντας την συνολική χωρητικότητα του καναλιού και συνεπακόλουθα αυξάνοντας και τους ρυθμούς δεδομένων. Οι τεχνικές αυτές είναι γνωστές ως μη ορθογωνικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης ή αλλιώς Non Orthogonal Multiple Access (NOMA) Techniques.

Μη ορθογωνικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης

Οι τεχνικές NOMA παρουσιάζονται ως υποψήφιες τεχνικές για την υιοθέτησή τους από τα υπό ανάπτυξη δίκτυα 5G και μετά. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην κοινή χρήση των μπλοκ πόρων (resource block) του δικτύου (συχνότητα, χρόνος, κώδικας) από τους χρήστες, κάτι που βελτιώνει την φασματική απόδοση, αυξάνει τον αριθμό των χρηστών και βελτιώνει το φαινόμενο της «δίκαιης/άδικης» κατανομής των πόρων σε σχέση με τις τεχνικές OMA [4]. Στις τεχνικές αυτές το κριτήριο της ορθογωνιότητας μεταξύ των χρηστών δεν ισχύει σε αντίθεση με τις τεχνικές OMA και στην ουσία αφού οι χρήστες μοιράζονται τα ίδια resource blocks, παρεμβάλουν ο ένας τον άλλον. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το προηγούμενο κεφάλαιο και θα εξηγηθεί στη συνέχεια πως οι τεχνικές αυτές παρόλο που προκαλούν παρεμβολές στους χρήστες, αυτοί μπορούν να τις ξεπερνάνε και επιπλέον να της εκμεταλλεύονται αυξάνοντας τις ταχύτητές τους. Οι τεχνικές NOMA διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες οι οποίες ανήκουν στο πεδίο της ισχύος (Power Domain - PD) και στο πεδίο του κώδικα (Code Domain - CD). Για να λειτουργήσουν καλά οι τεχνικές αυτές, οι χρήστες συνήθως χωρίζονται σε groups τα οποία αποτελούνται συνήθως από δύο και ακόμα πιο σπάνια από παραπάνω χρήστες οι οποίοι μοιράζονται τους ίδιους πόρους του δικτύου. Παρακάτω, στην ανάλυση των κατηγοριών, θα εξεταστεί ένα σχήμα 2 χρηστών ανά group με σκοπό την απλοποίηση κάποιων πράξεων.

2.1 Power Domain NOMA

Σε αυτή την κατηγορία των τεχνικών NOMA, κάθε ζευγάρι χρηστών μοιράζεται τα ίδια resource blocks. Είναι φανερό ότι η χωρητικότητα του συστήματος έχει αυξηθεί, με αποτέλεσμα να μπορούν να εξυπηρετηθούν παραπάνω χρήστες σε σχέση με της αντίστοιχες OMA τεχνικές. Πέρα από την αύξηση του όγκου των χρηστών, λόγω της πιο αποδοτικής χρήσης των ραδιοπόρων, θα μπορούσε απλά να αυξηθεί, κατά ένα μεγάλο ποσοστό, ο ρυθμός δεδομένων του κάθε χρήστη.

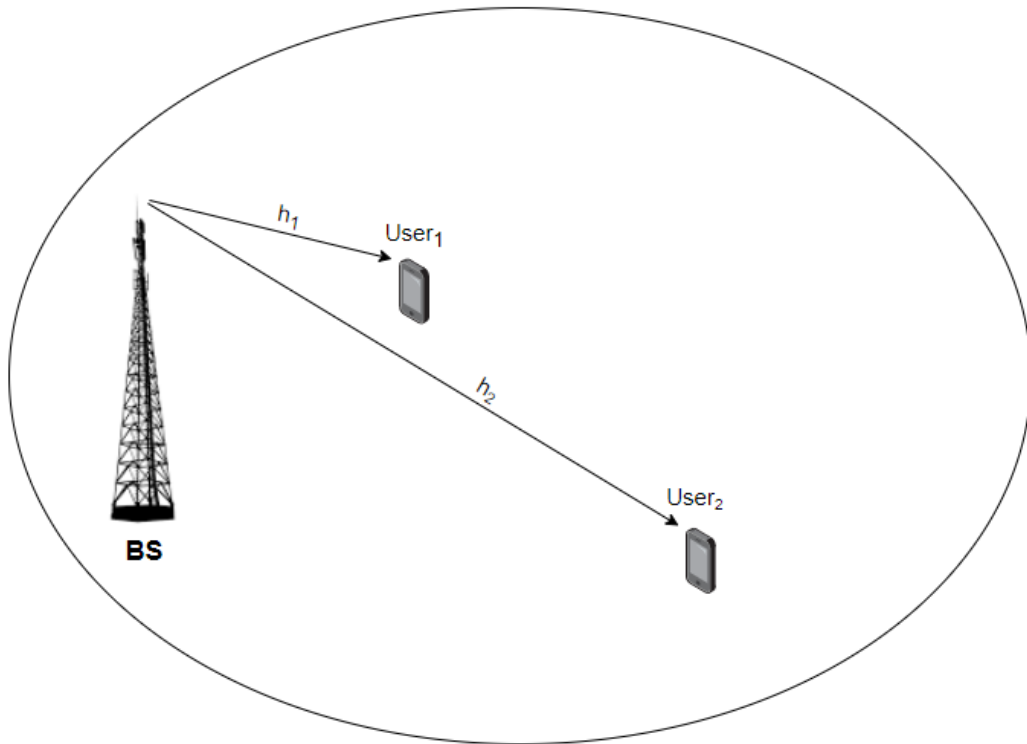


Εικόνα 8. PD-NOMA

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η μόνη διαφορά με την τεχνική TDMA είναι ότι κάθε timeslot δεν χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο από έναν χρήστη αλλά από ένα group χρηστών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το κάθε group χρηστών που χρησιμοποιεί από ένα timeslot, αποτελείται από δύο χρήστες, κάτι που δημιουργεί παρεμβολή μεταξύ αυτών λόγω της μη ύπαρξης ορθογωνιότητας μεταξύ τους. Αυτό που ξεχωρίζει τους δύο χρήστες είναι η απονομή διαφορετικής ισχύος στον κάθε ένα, κάτι που κάτι που θα αναλυθεί στην συνέχεια.

Με σκοπό την επεξήγηση του τρόπου διαχώρισης των χρηστών αυτών, θα δοθεί ένα πραγματικό παράδειγμα και θα συστηθούν κάποιες σημαντικές καινούριες έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση της όλης διαδικασίας.

Έστω ότι σε ένα BS, βρίσκονται δύο χρήστες οι οποίοι απέχουν σημαντικά διαφορετική απόσταση μεταξύ τους και εξετάζεται η περίπτωση της κατερχόμενης ζεύξης (DownLink – DL). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο πρώτος χρήστης είναι ο κοντινός (near user) και ο δεύτερος ο μακρινός (far user). Αυτό, σαν αποτέλεσμα έχει ότι το μέτρο του κέρδους καναλιού του πρώτου χρήστη να είναι μεγαλύτερο από του δεύτερου, δηλαδή $|h_1| > |h_2|$. Προϋπόθεση της όλης διαδικασίας είναι ότι στους χρήστες και στο BS είναι γνωστό το h_1 και h_2 καθώς και οι ισχύς των δύο αυτών χρηστών.



Εικόνα 9. Παράδειγμα 2 τερματικών συσκευών και ενός σταθμού βάσης

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, στον κάθε χρήστη εκπέμπεται ταυτόχρονα πληροφορία με διαφορετικό ποσοστό ισχύος. Έτσι στον κάθε χρήστη απονέμετε και ένας διαφορετικός συντελεστής ισχύος. Πιο συγκεκριμένα στον πρώτο χρήστη απονέμεται ο συντελεστής ισχύος α_1 και στον δεύτερο ο συντελεστής α_2 . Ισχύει ότι το άθροισμα των δύο αυτών συντελεστών είναι:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (3)$$

Έτσι το BS εκπέμπει το σήμα πληροφορίας x_1 του πρώτου χρήστη και το σήμα πληροφορίας x_2 του δεύτερου χρήστη ταυτόχρονα, με ισχύ εκπομπής P , με αποτέλεσμα να προκύπτει η εξίσωση 4 που περιγράφει το εκπεμπόμενο σήμα x_{TX} :

$$x_{TX} = \sqrt{P} \cdot (\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2) \quad (4)$$

Ορίζοντας για ευκολία τις ποσότητες $P_1 = \sqrt{P \cdot a_1}$ και $P_2 = \sqrt{P \cdot a_2}$, παρατηρείται ότι από τη στιγμή που το BS στέλνει ταυτόχρονα στο ίδιο resource block τα σήματα πληροφορίας για τους δύο χρήστες, αυτά αθροίζονται με αποτέλεσμα ο δεύτερος χρήστης λαμβάνει το σήμα y_2 που έχει την εξής μορφή:

$$y_2 = h_2 (P_1x_1 + P_2x_2) + n_2 \quad (5)$$

Όπου n_2 , είναι ο θόρυβος που προστίθεται στο λαμβανόμενο σήμα του δεύτερου χρήστη κατά τη μετάδοση και h_2 είναι η απόκριση του καναλιού του συγκεκριμένου χρήστη. Το άθροισμα των σημάτων $P_1x_1 + P_2x_2$ προκύπτει από μία τεχνική η οποία ονομάζεται Superposition Coding και θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

Εύκολα η παραπάνω εξίσωση μπορεί να αναπτυχθεί, και να καταλήξει στην εξίσωση 6 ως:

$$y_2 = h_2P_2x_2 + h_2P_1x_1 + n_2 \quad (6)$$

Εδώ, παρατηρούνται τρεις όροι. Επειδή ο δεύτερος χρήστης έχει χειρότερο κανάλι από τον πρώτο θα πρέπει να του αποδοθεί μεγαλύτερο ποσοστό ισχύος. Έτσι κάνοντας τις παραδοχές ότι $P_1 < P_2$ και $|h_2| < |h_1|$, είναι αντιληπτό ότι ο όρος $h_2P_1x_1$ είναι πολύ μικρός και συνεπακόλουθα είναι συγκρίσιμος με τον θόρυβο. Τελικά το σήμα που είχε ληφθεί από τον δεύτερο χρήστη, μπορεί να απεικονιστεί και ως:

$$y_2 = h_2P_2x_2 + n \quad (7)$$

Όπου $n = h_2P_1x_1 + n_2$.

Έτσι ο δεύτερος χρήστης εφαρμόζοντας τις γνωστές τεχνικές εκτίμησης σημάτων μπορεί να αποκωδικοποιήσει και να λάβει την πληροφορία που του έχει αποσταλεί.

Αντίθετα, το σήμα y_1 που θα λάβει ο πρώτος χρήστης έχει την παρακάτω μορφή:

$$y_1 = h_1P_1x_1 + h_1P_2x_2 + n_1 \quad (8)$$

Εδώ, λόγω των προηγουμένων παραδοχών που έγιναν ο όρος $h_1P_2x_2$ είναι ένας σημαντικός όρος και δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ως θόρυβος στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

Μια πιθανή λύση θα ήταν η σωστή εκτίμηση του σήματος πληροφορίας x_2 , έτσι ώστε στη συνέχεια να αφαιρεθεί από το λαμβανόμενο σήμα με σκοπό ο πρώτος χρήστης να λάβει την ωφέλιμη πληροφορία. Πιο συγκεκριμένα, από μια σωστή εκτίμηση του σήματος x_2 θα προέκυπτε το σήμα \hat{x}_2 το οποίο θα οδηγούσε σε:

$$\begin{aligned} y_1 &= h_1P_1x_1 + h_1P_2x_2 + n_1 - h_1P_2\hat{x}_2 \rightarrow \\ y_1 &= h_1P_1x_1 + n_1 \quad (9) \end{aligned}$$

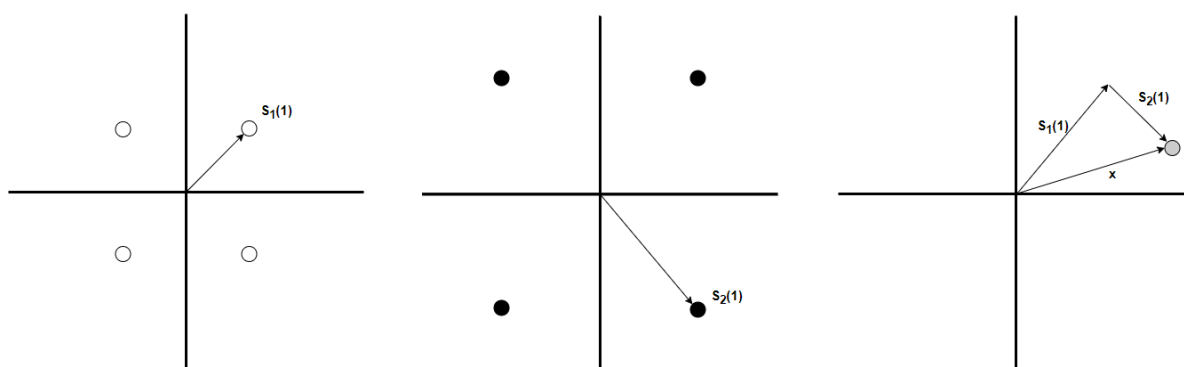
Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω της τεχνικής Successive Interference Cancellation (SIC) [4] και απαιτείται ακριβείς εκτίμηση του σήματος πληροφορίας του

μακρινού χρήστη, έτσι ώστε να γίνει η αποκωδικοποίηση της ωφέλιμης πληροφορίας. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι απαραίτητη για την λειτουργία της PD-NOMA.

2.1.1 Superposition Coding

Μια από τις βασικές τεχνικές που έχει εισάγει η PD-NOMA είναι η τεχνική κωδικοποίησης υπέρθεσης (Superposition Coding - SC). Η συγκεκριμένη τεχνική λαμβάνει μέρος στην μεριά του πομπού και για προηγούμενο παράδειγμα, συγκεκριμένα στο BS. Για να μπορεί να επιτευχθεί η τεχνική SC θα πρέπει στους χρήστες του κάθε group να απονεμηθεί ένας συντελεστής ισχύος.

Πιο συγκεκριμένα η απονομή ισχύος μπορεί να γίνει μέσω πολλών κριτηρίων και τεχνικών, μερικά εκ των οποίων θα παρουσιαστούν σε επόμενη υποενότητα. Συνήθως στον κοντινό χρήστη, ο οποίος διαθέτει και το καλύτερο κανάλι απονέμεται και το μικρότερο ποσοστό ισχύος. Επομένως εφόσον έχει απονεμηθεί στους χρήστες του εκάστοτε group, ένας συντελεστής ισχύος, βάση αυτού διαμορφώνεται και ο εκάστοτε αστερισμός του καθενός. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται αρχικά οι QPSK αστερισμοί δύο χρηστών ενός group, εκ των οποίων επιλέγεται για τον πρώτο χρήστη να αποσταλεί το σύμβολο $S_1(1)$ και για τον δεύτερο το σύμβολο $S_2(1)$. Από την εικόνα είναι αντιληπτό ότι ο πρώτος χρήστης είναι ο μακρινός ενώ ο δεύτερος είναι ο κοντινός. Τελικά στον αέρα μεταδίδεται το σύμβολο $x(1)$ το οποίο είναι το διανυσματικό άθροισμα των συμβόλων $S_1(1)$ και $S_2(1)$.



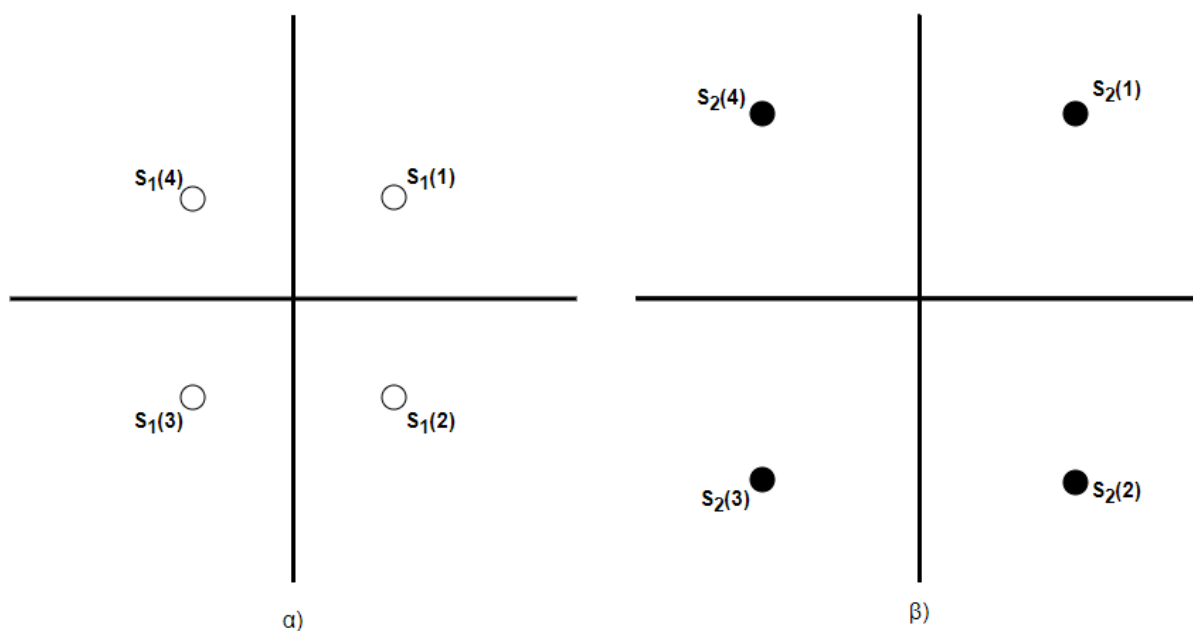
Εικόνα 10. Τεχνική superposition coding [5]

Συνοψίζοντας, εάν οι συντελεστές ισχύος των δύο χρηστών είναι α_1 και α_2 ισχύει ότι $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. Επιπλέον βάση των συντελεστών αυτών διαμοιράζεται η συνολική ισχύς P στους χρήστες. Έτσι το πλάτος του αστερισμού του κάθε χρήστη διαμορφώνεται με έναν παράγοντα όπου στην προκυμμένη περίπτωση είναι $\sqrt{P\alpha_1}$ για τον πρώτο και $\sqrt{P\alpha_2}$ για τον δεύτερο. Τελικά κάθε σύμβολο $x(n)$ που θα εκπέμπεται θα είναι της μορφής:

$$x(n) = \sqrt{Pa_1}S_1(n) + \sqrt{Pa_2}S_2(n) \quad (10)$$

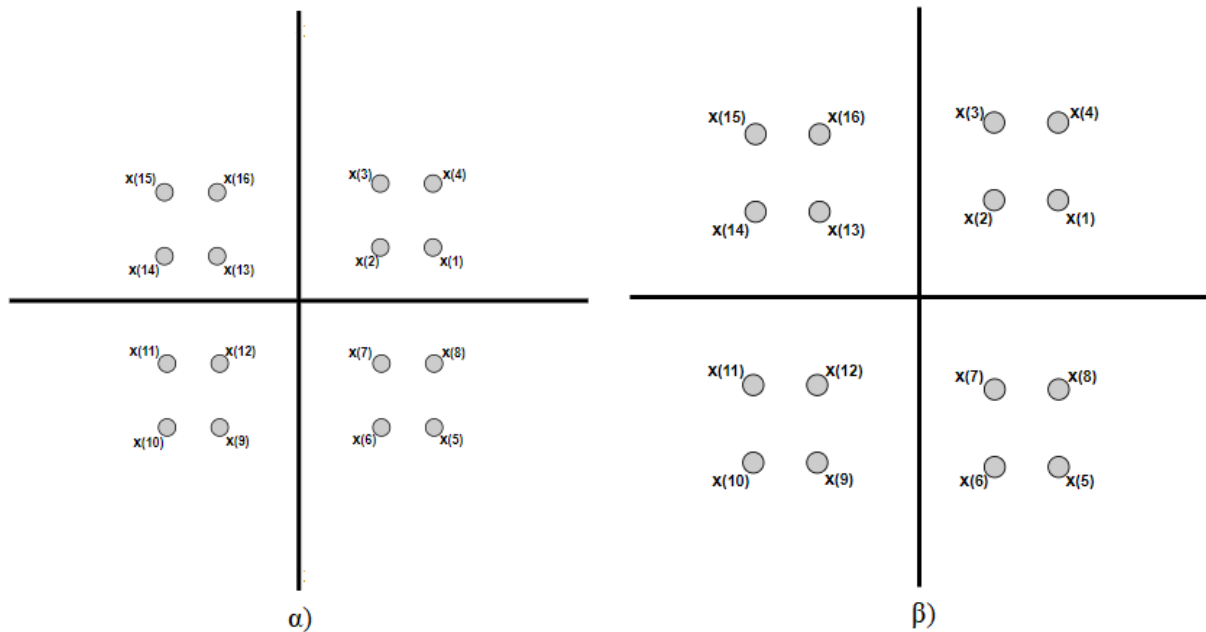
2.1.2 Successive Interference Cancellation

Η διαδοχική ακύρωση παρεμβολών γνωστή και ως Successive Interference Cancellation (SIC), είναι η σημαντικότερη τεχνική που χρησιμοποιείται στη PD-NOMA με σκοπό των διαχωρισμό της πληροφορίας των χρηστών. Στον μακρινό χρήστη, δηλαδή στον χρήστη με το χειρότερο κανάλι, απονέμεται το μεγαλύτερο ποσοστό ισχύς. Βλέποντας το παράδειγμα της προηγούμενης υποενότητας, στην εικόνα 11 φαίνεται ο αστερισμός S_1 του μακρινού χρήστη και S_2 του κοντινού.



Εικόνα 11. α)Αστερισμός κοντινού χρήστη β)Αστερισμός μακρινού χρήστη

Με την χρήση της τεχνικής SC, παρακάτω φαίνονται οι αστερισμοί που ο κάθε χρήστης λαμβάνει και από τους οποίους καλείται να αποφανθεί κάθε φορά για το σωστό σύμβολο που του έχει αποσταλεί. Για λόγους απλοποίησης σε αυτές τις θέσεις των συμβόλων δεν έχει προστεθεί ο θόρυβος. Οι αστερισμοί στην Εικόνα 12 είναι αποτέλεσμα όλων των πιθανών διανυσματικών αθροισμάτων που μπορούν να προκύψουν μεταξύ



Εικόνα 12. α)Λαμβανόμενος αστερισμός μακρινού χρήστη χωρίς την επίρεια καναλιού β)Λαμβανόμενος αστερισμός κοντινού χρήστη χωρίς την επίρεια καναλιού

Αποτυπώνοντας γραφικά αυτό που είχε ειπωθεί στην υπο-ενότητα 2.1, είναι φανερό ότι για τον μακρινό χρήστη, οποιοδήποτε σύμβολο και να λάβει από τον παραπάνω αστερισμό, μπορεί εύκολα να αποφανθεί βάση των συνηθισμένων τεχνικών εκτίμησης σήματος, για το πιο σύμβολο από τον δικό του αρχικό αστερισμό του έχει σταλεί. Για παράδειγμα εάν λάβει κάποιο σύμβολο από την ομάδα $x(1), x(2), x(3), x(4)$ καταλαβαίνει ότι του έχει αποσταλεί το σύμβολο $S_1(1)$, ομοίως και για τις υπόλοιπες ομάδες που στο συγκεκριμένο παράδειγμα έτυχε να ανήκουν σε ξεχωριστά τεταρτημόρια.

Αντίθετα η δυσκολία όπως είχε προαναφερθεί βρίσκεται στον κοντινό χρήστη. Εάν για παράδειγμα ο κοντινός χρήστης λάβει το σύμβολο $x(3)$, εφαρμόζοντας π.χ. το κριτήριο MLE, θα αποφανθεί εσφαλμένα ότι του έχει αποσταλεί το σύμβολο $S_2(4)$. Έτσι ο δεύτερος χρήστης (κοντινός), θα πρέπει πρώτα να αποκωδικοποιήσει το σύμβολο του πρώτου χρήστη κι έπειτα να το αφαιρέσει από το λαμβανόμενο σήμα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αφού το σύμβολο $x(3)$ ανήκει στο 1ο τεταρτημόριο, ο χρήστης μπορεί να καταλάβει εύκολα βάση των κοινών τεχνικών εκτίμησης σήματος ότι στον πρώτο χρήστη έχει αποσταλεί το σύμβολο $S_1(1)$. Γνωρίζοντας αυτό, πλέον το μόνο που χρειάζεται είναι να αφαιρεθεί το συγκεκριμένο σύμβολο από το λαμβανόμενο σήμα, πολλαπλασιασμένο με τον γνωστό παράγοντα $\sqrt{P_{a_1}}$ έτσι ώστε ο χρήστης να καταλήξει στο σωστό σύμβολο που του έχει αποσταλεί εφαρμόζοντας τις γνωστές τεχνικές εκτίμησης σήματος. Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί την τεχνική SIC.

2.1.3 Μέθοδοι καταμερισμού ισχύος και ομαδοποίησης χρηστών

Λόγω της φύσης της εκπομπής και της λήψης στην PD-NOMA, οι δύο παράγοντες που έχουν το συνολικό αντίκτυπο στην συνολική επίδοση του συστήματος είναι ο καταμοιρασμός της ισχύος στους χρήστες (Power Allocation - PA) και ο διαχωρισμός των χρηστών σε user groups (User Pairing). Ο συντελεστής ισχύος που θα απονεμηθεί σε κάθε χρήστη δεν επηρεάζει μόνο τον δικό του ρυθμό μετάδοσης αλλά και του άλλου χρήστη λόγω της φύσης των τεχνικών SC και SIC.

Οι δύο γενικές κατηγορίες των PA τεχνικών είναι οι στατικές και οι δυναμικές. Στις στατικές PA μεθόδους στον κάθε χρήστη απονέμεται ένα ποσοστό ισχύος με την μορφή κάποιου συντελεστή όπως είχε αναφερθεί σε προηγούμενη υποενότητα. Από την άλλη μεριά, στις δυναμικές PA μεθόδους, ο συντελεστής ισχύος του κάθε χρήστη διαφοροποιείται σύμφωνα με την διαφορά των τιμών SINR των χρηστών.

Ομοίως, και η επιλογή των χρηστών στα user groups δεν πρέπει να είναι σταθερή λόγω της κινητικότητας που παρουσιάζουν οι χρήστες και συνεπακόλουθα λόγω των διαφορετικών συνθηκών που έχει το κανάλι τους κάθε φορά. Πέρα από το γεγονός ότι είναι επιθυμητό οι χρήστες των user groups να έχουν αρκετά μεγάλες διαφορές στις συνθήκες των καναλιών τους, πρέπει να ληφθεί υπόψιν επίσης το πως μπορεί να αυξηθεί η συνολική χωρητικότητα του συστήματος και πως θα γίνει η ομαδοποίηση των χρηστών με έναν αποδοτικό αλλά όχι πολύπλοκο τρόπο. Μία εξίσου σημαντική συνθήκη που πρέπει να συμπεριληφθεί, είναι ότι οι ρυθμοί δεδομένων των χρηστών κατά τη χρήση των NOMA τεχνικών, πρέπει να είναι μεγαλύτεροι από τους ρυθμούς δεδομένων που θα είχαν αν χρησιμοποιούσαν μόνο κάποια από τις γνωστές OMA τεχνικές.

Βάση των παραπάνω, οι τεχνικές user pairing και power allocation δεν είναι προκαθορισμένες από κάποιο standard και συνήθως υλοποιούνται αποκλειστικά για κάθε εφαρμογή. Πολλοί ερευνητές ασχολούνται με τα δύο αυτά θέματα στα οποία υπάρχει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον [9].

Μια διαδεδομένη δυναμική PA τεχνική βασίζεται στο ότι ο χρήστης με το «χειρότερο» κανάλι θα έχει το ίδιο data rate με αυτό τον OMA τεχνικών. Το κέρδος στην τεχνική αυτή, παρουσιάζεται μόνο στον χρήστη με τις καλύτερες συνθήκες καναλιού. Για να επιτευχθεί αυτό ο διαμοιρασμός των συντελεστών ισχύων γίνεται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις [10] :

$$a_1 = \frac{\sqrt{1 + SINR_F} - 1}{SINR_F} \quad (11)$$
$$a_2 = 1 - a_1$$

Όπου $SINR_F$, είναι η τιμή του $SINR$ του χρήστη με το χειρότερο κανάλι (far user).

- **Full Search Power Allocation (FSPA)**

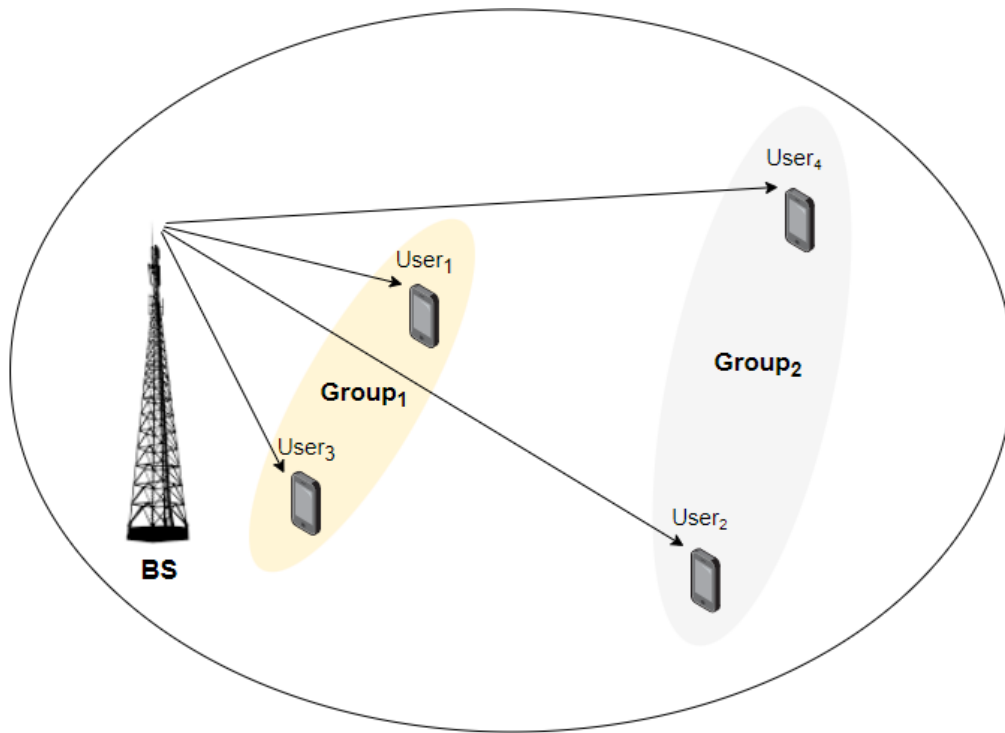
Η τεχνική αυτή ουσιαστικά βασίζεται στην αναζήτηση ζευγών χρηστών και στην απονομή πιθανών συντελεστών ισχύος στον κάθε χρήστη έτσι ώστε να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση με την NOMA. Κάθε πιθανός συντελεστής ισχύος λαμβάνεται υπόψιν για τον κάθε χρήστη με αποτέλεσμα η τεχνική αυτή με την ύπαρξη πολλών χρηστών, να παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα και να μην είναι λειτουργική. Επιπλέον, η τεχνική αυτή δεν αναγνωρίζει group χρηστών και ότι σε αυτά θα πρέπει να ανήκουν με μεγάλη πιθανότητα χρήστες όπου τα κανάλια τους έχουν σημαντική διαφορά [6]. Έτσι η ανάγκη απλοποίησης της πολυπλοκότητας οδήγησε στις επόμενες τεχνικές.

- **Fractional Transmit Power Allocation (FTPA)**

Με σκοπό την μείωση της πολυπλοκότητας, η συγκεκριμένη τεχνική είναι παρόμοια με την τεχνική Fractional Power Control για το UL κανάλι στο LTE. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι ότι στους χρήστες απονέμεται ένας σταθερός συντελεστής ισχύος και επιπρόσθετα δίδεται και ένας συντελεστής εξασθένισης. Αυτός ο συντελεστής είναι μεταβλητός και κάθε φορά με την χρήση προσομοιώσεων σε υπολογιστή αλλάζει, έτσι ώστε να αντισταθμιστούν πιθανές αλλαγές στην απόκριση του καναλιού [7].

- **Pre-defined user grouping and per-group fixed power allocation (FPA)**

Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται στον διαχωρισμό των χρηστών σε groups κι έπειτα την απονομή συντελεστών ισχύος στο κάθε ένα από αυτά. Πιο συγκεκριμένα οι χρήστες χωρίζονται σε groups σύμφωνα με το κέρδος των καναλιών τους. Βάση αυτών των προκαθορισμένων groups, οι χρήστες που ανήκουν σε κάθε ένα από αυτά έχουν κοινό συντελεστή ισχύος. Έτσι το τελικό ζευγάρι χρηστών που θα μοιράζονται το ίδιο resource block, θα είναι ένας συνδυασμός χρηστών από διαφορετικά groups. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δραματική μείωση των σημάτων ελέγχου που χρειάζεται η NOMA στη DL κατεύθυνση και συνεπακόλουθα της πολυπλοκότητας του συνολικού συστήματος. Για παράδειγμα δεν είναι απαραίτητο σε μικρά χρονικά διαστήματα να ανακοινώνονται στους χρήστες οι συντελεστές ισχύος τους επειδή αυτοί είναι σταθεροί για μια εύλογη χρονική περίοδο. Παρακάτω στην Εικόνα 13, φαίνεται ο διαχωρισμός των χρηστών σε groups στα οποία απονέμεται και ένας σταθερός συντελεστής ισχύος που είναι κοινός σε όλους τους χρήστες που ανήκουν σε αυτό το group.



Εικόνα 13. Τεχνική FPA

Έτσι οι χρήστες που θα μοιράζονται το ίδιο resource block πρέπει να ανήκουν σε διαφορετικά groups και εδώ για παράδειγμα, αυτό μπορεί να γίνει μεταξύ των χρηστών 1 και 4 αλλά όχι μεταξύ των χρηστών 4 και 2.

2.2 CD-NOMA

Έως ώρας η NOMA εξετάζόταν στις αρχές λειτουργίας και τις εφαρμογές της μόνο στο πεδίο της ισχύος. Παρόλο που πρόσφατη βιβλιογραφία εστιάζει στην PD-NOMA και την προτείνει ως πιθανή τεχνική πολλαπλής πρόσβασης για τα μελλοντικά δίκτυα 5ης γενιάς, υπάρχει άλλη μία εκδοχή της που μελετάται στον τομέα του κώδικα και είναι γνωστή ως Code-Domain NOMA (CD-NOMA).

Η CD-NOMA χρησιμοποιεί κώδικες διασποράς (spreading codes) με σκοπό την διάχυση των δεδομένων. Η τεχνική αυτή είναι όμοια με την τεχνική CDMA πολλαπλών φερόντων (Multi Carrier CDMA – MC-CDMA), στην οποία πολλαπλοί χρήστες που διαθέτουν διαφορετικούς κώδικες, πολυπλέκονται πάνω στα ίδια resource blocks. Επιπλέον μπορεί να προσεγγιστεί και ως ένα σχήμα βασισμένο σε μια σειρά κωδικών (codebook), το οποίο σχηματίζεται από αυτές τις ακολουθίες διασποράς που είναι γνωστές και στον πομπό αλλά και στον δέκτη.

Αντίθετα με την PD πολυπλεξία, στην CD πολυπλεξία μπορεί να επιτευχθεί κέρδος διάχυσης (spreading gain) και κέρδος μορφοποίησης (shaping gain) ως αντάλλαγμα την χρήση επιπλέον φάσματος. Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται μερικές από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές CD-NOMA.

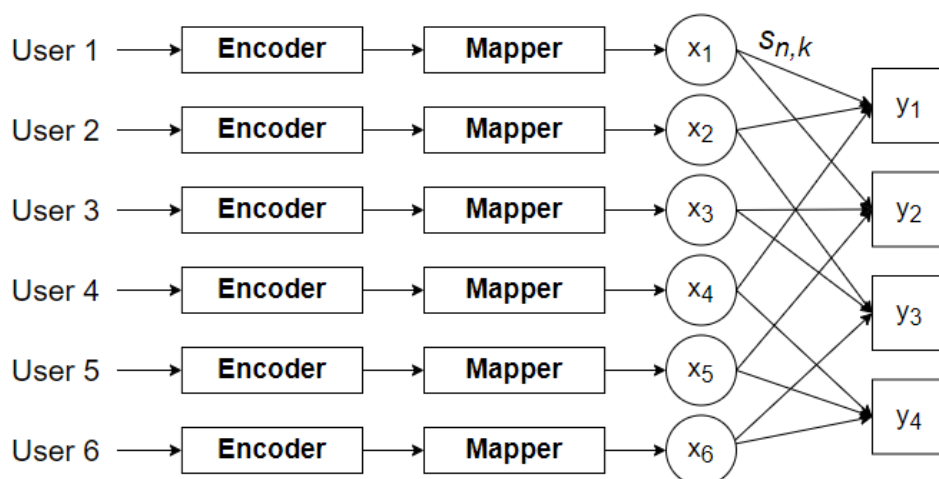
2.2.1 Low-Density Spreading CDMA

Η βασική ιδέα της τεχνικής LDS-CDMA είναι η χρήση αραιών κωδικών διασποράς (σε αντίθεση με την παραδοσιακή CDMA που χρησιμοποιεί πυκνούς κώδικες) με σκοπό την μείωση της παρεμβολής του κάθε chip. Έτσι με την χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής, βελτιώνεται η απόδοση του συνολικού συστήματος αφού οι παρεμβολές μεταξύ των χρηστών είναι αρκετά μικρές, με την προϋπόθεση όμως ότι έχει γίνει σωστή επιλογή των spreading codes.

Στην μεριά του πομπού κάθε χρήστη ενός πλήθους K , κωδικοποιεί τα δεδομένα του και παράγει ένα σύμβολο x_k από έναν αστερισμό. Έπειτα το σύμβολο αυτό αντιστοιχίζεται με ένα μοναδικό spreading sequence s_k και εκπέμπεται. Το σήμα που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια του chip n είναι το εξής:

$$y_n = \sum_{k=1}^K g_{n,k} s_{n,k} x_k + w_n \quad (12)$$

όπου $s_{n,k}$ είναι το n -οστό στοιχείο του spreading sequence s_k , $g_{n,k}$ το κέρδος του καναλιού του χρήστη k κατά την εκπομπή του chip n και w_n ένας μιγαδικός συντελεστής θορύβου. Με αυτή την τεχνική κάθε χρήστης απλώνει τα δεδομένα του σε ένα μικρό πλήθος chips τα οποία είναι λιγότερα από το πλήθος των χρηστών.



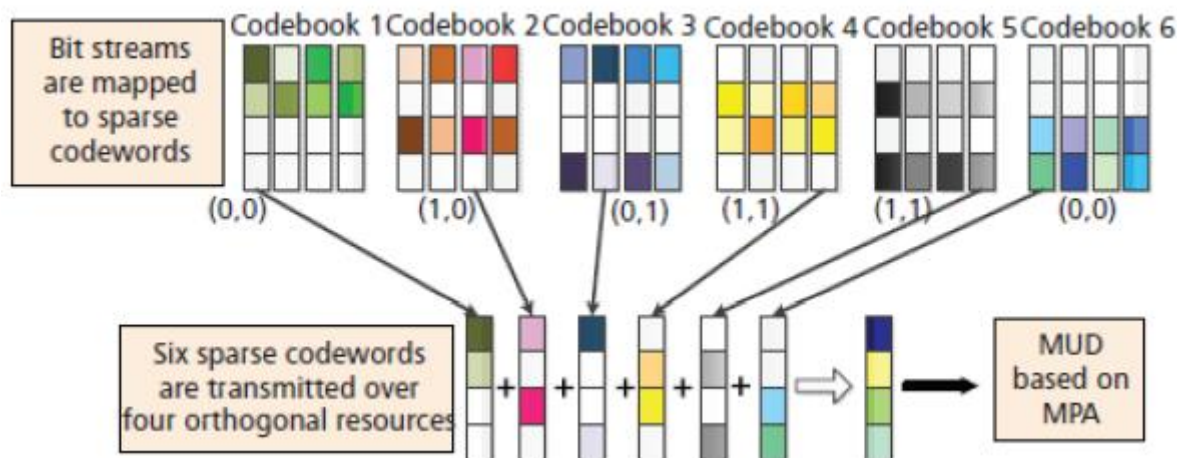
Εικόνα 14. Απεικόνιση LDS-CDMA, 6 χρήστες και 4 chips

Στην μεριά του ο δέκτης, χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο MPA (Message Passing Algorithm) έτσι ώστε να επιτευχθεί η ανίχνευση των πολλαπλών χρηστών (MultiUser Detection – MUD). [8]

2.2.2 Sparse Code Multiple Access

Η τεχνική SCMA είναι μια βελτιωμένη εκδοχή της LDS-CDMA. Η SCMA αντιστοιχίζει μια σειρά από bits (bitstream), σε διαφορετικές αραιές κωδικές λέξεις (sparse codewords)

με την χρήση ενός πλήθους κωδικών (codebook) που είναι αποκλειστικοί για τον κάθε χρήστη. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το παράδειγμα 6 χρηστών.



Εικόνα 15. SCMA κωδικοποίηση και πολυπλεξία [10]

Σε κάθε codebook περιέχονται 2 σειρές μηδενικών οι οποίες είναι απαραίτητες για τον διαχωρισμό μεταξύ των χρηστών στον δέκτη. Κάθε χρήστης κωδικοποιεί τα δεδομένα του βάσει του δικού του codebook. Έτσι κάθε φορά επιλέγεται από κάθε χρήστη ένα codeword το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση κωδικοποιεί 2 bits, και τα codewords όλων των χρηστών πολυπλέκονται και εκπέμπονται σε resource blocks (π.χ. OFDM υποφέροντα). Στον δέκτη, ακολουθείται η ίδια τεχνική όπως και στην LDS-CDMA.

2.3 NOMA vs OMA

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι τεχνικές OMA είναι η παντελής έλλειψη παρεμβολών μεταξύ των χρηστών λόγω των κριτηρίων που εφαρμόζονται (π.χ. ορθογωνιότητα) για την επιλογή των πόρων που απονέμονται στον κάθε χρήστη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απλοποίηση των δεκτών και συνεπακόλουθα το μειωμένο κόστος τους. Στον αντίποδα όμως, επειδή η χωρητικότητα σε χρήστες των συστημάτων που χρησιμοποιούν τις τεχνικές OMA εξαρτάται άμεσα από το πλήθος των πόρων, η εύρεση αυτών μπορεί να είναι πολύ δαπανηρή έως και αδύνατη. Ακόμα τα συστήματα που χρησιμοποιούν αυτές τις τεχνικές δεν έχουν απαίτηση σε μεγάλη κατανάλωση ισχύος.

Όμως με τις απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής, η ανάγκη για τη πλήρη βελτιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων πόρων των ραδιοδιαύλων, οδήγησε στις τεχνικές NOMA, οι οποίες δείχνουν να είναι φασματικά πιο αποδοτικές, να παρουσιάζουν μεγαλύτερη χωρητικότητα καναλιού και να εξυπηρετούν ακόμα μεγαλύτερο αριθμό χρηστών σε σύγκριση με τις υπάρχουσες OMA τεχνολογίες.

Όπως είχε ειπωθεί και στο πρώτο κεφάλαιο ο ρυθμός δεδομένων δύο χρηστών που μοιράζονται τους πόρους ενός καναλιού δίνεται από τις εξισώσεις (2) και (3):

$$R_{1\max} \leq \alpha \cdot BW \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0} \right)$$

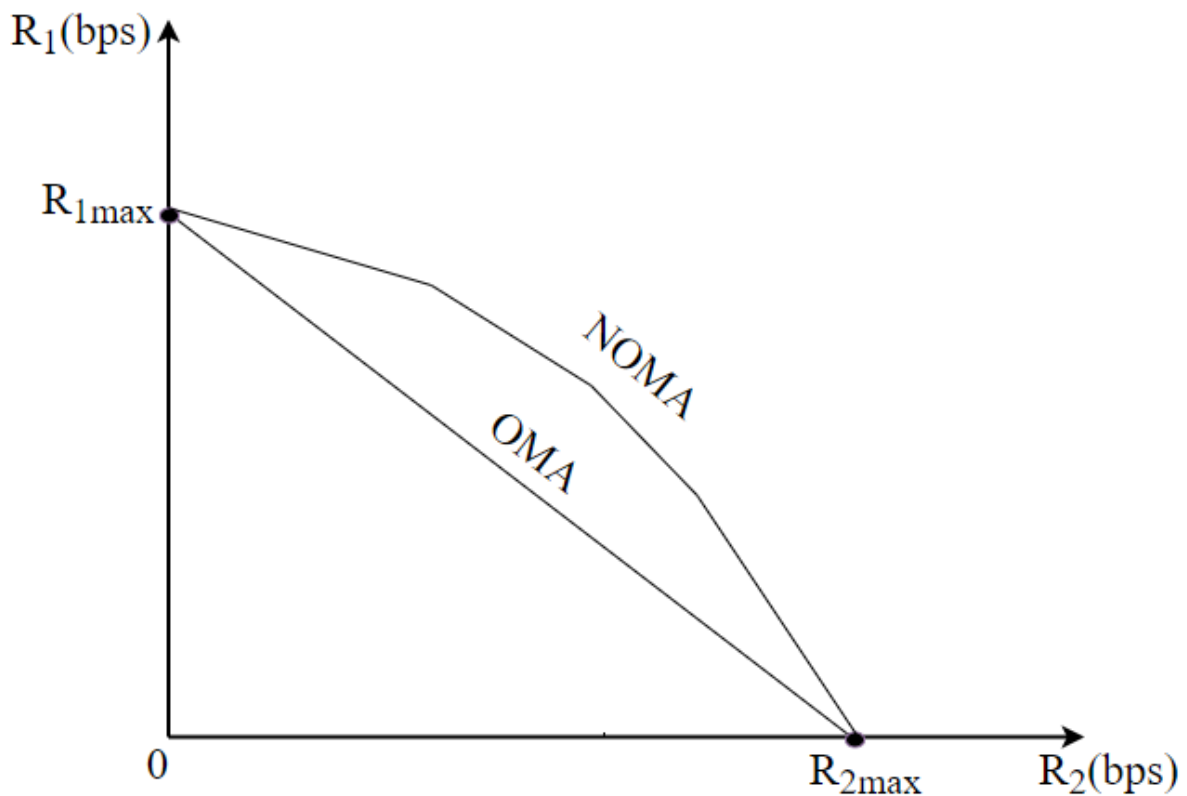
$$R_{2\max} \leq (1-\alpha) \cdot BW \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0} \right)$$

Αντίθετα η PD-NOMA, δεν παρουσιάζει εξάρτηση στην διαφορά της ταχύτητας δεδομένων των χρηστών σύμφωνα με τα resource blocks αλλά σύμφωνα με την ισχύ που απονέμεται στον κάθε χρήστη όπως φαίνεται παρακάτω [5]:

$$R_1 = BW \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_1}{P_2 + N_0} \right) \quad (13)$$

$$R_2 = BW \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_2}{P_1 + N_0} \right) \quad (14)$$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η σύνδεση μεταξύ των ρυθμών δεδομένων των δύο χρηστών με την χρήση των τεχνικών NOMA στο πεδίο της ισχύος.



Εικόνα 16. Σύγκριση ρυθμών μετάδοσης 2 χρηστών μεταξύ συστημάτων OMA και NOMA [11]

Το κέρδος που παρουσιάζουν οι τεχνικές αυτές, βασίζεται στην διαφορά που υπάρχει μεταξύ των συντελεστών που απονέμονται στους χρήστες. Όσο η διαφορά αυτή

μεγαλώνει, η NOMA γίνεται όλο και πιο αποδοτική σε σχέση με τις τεχνικές OMA. Παρόλα αυτά, εάν στις τεχνικές NOMA απονεμηθούν όλοι οι πόροι σε έναν χρήστη (πχ. συντελεστής ισχύος του ενός χρήστη $\alpha_i = 1$ και των υπολοίπων $\alpha = 1 - \alpha_i$), η επίδοσή τους ταυτίζεται με αυτή των τεχνικών OMA.

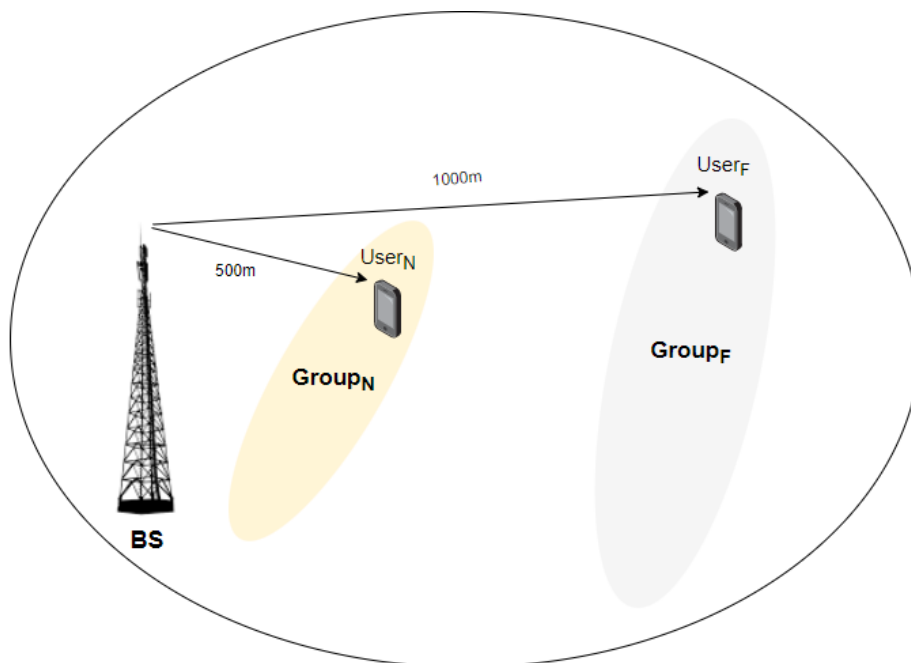
Καταλήγοντας, οι τεχνικές NOMA είναι μία προτεινόμενη λύση για τις ανάγκες που παρουσιάζουν τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι η φασματική απόδοση, η οποία επιτυγχάνεται πολυπλέκοντας πολλούς χρήστες στα ίδια resource blocks. Αυτό τις κάνει ιδανικές διότι με την χρήση τους επιτυγχάνεται αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού και συνεπακόλουθα εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών ή αύξηση των ρυθμών δεδομένων τους χωρίς την χρήση επιπλέον φάσματος.

Από την άλλη, οι συγκεκριμένες τεχνικές παρουσιάζουν μεγάλη πολυπλοκότητα στην μεριά του δέκτη καθώς επίσης και αυξημένη κατανάλωση υπολογιστικής ισχύος. Επιπλέον, στις PD-NOMA, επειδή η πληροφορία της απόκρισης του καναλιού πρέπει να είναι γνωστή και στις δύο μεριές (πομπό, δέκτη) σε περίπτωση αλλαγής της, το γεγονός αυξάνει την κίνηση των σημάτων πληροφορίας. Έτσι λόγω αυτού, η PD-NOMA χάνει το μεγάλο της πλεονέκτημα σε περιπτώσεις που οι χρήστες παρουσιάζουν υψηλή κινητικότητα.

Διάταξη Προσομοίωσης – Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται το σενάριο και η διάταξη προσομοίωσης με σκοπό την εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων για την επιβεβαίωση και κατανόηση της θεωρίας για την περίπτωση της PD-NOMA. Ειδικότερα, με την βοήθεια του λογισμικού Matlab, θα μελετηθεί η πολυπλεξία δύο χρηστών στην κατερχόμενη (DL) ζεύξη με την χρήση της τεχνικής PD-NOMA. Η απονομή της ισχύος στους χρήστες θα γίνει μέσω της τεχνικής FPA όπου ουσιαστικά, οι χρήστες αυτοί ανήκουν σε διαφορετικά groups ισχύος, όπου το καθένα από αυτά διαθέτει έναν σταθερό συντελεστή ισχύος. Έτσι ο σταθμός βάσης με την διαδικασία που θα δειχθεί και θα αναπτυχθεί αναλυτικά παρακάτω, θα καταφέρει κάθε φορά χρησιμοποιώντας το ίδιο resource block να στέλνει την πληροφορία που αντιστοιχεί στον κάθε χρήστη. Επιπλέον θα πραγματοποιηθεί αριθμητική αξιολόγηση της τεχνικής αυτής με τον υπολογισμό και την απεικόνιση σε διαγράμματα διάφορων ποσοτικών κριτηρίων (figure of merit), όπως του Bit Error Rate – BER σε σχέση με την ισχύ εκπομπής, καθώς επίσης και του ρυθμού δεδομένων του κάθε χρήστη αλλά και αθροιστικά. Τέλος, θα μελετηθεί η απόδοση του συνολικού συστήματος για τις περιπτώσεις όπου η διαφορά των συντελεστών ισχύων μεταξύ των χρηστών αυξάνεται και μειώνεται αντίστοιχα.

Στο σενάριο που απεικονίζεται στο σχήμα 17 παρουσιάζεται ένας σταθμός βάσης μαζί με δύο χρήστες οι οποίοι απέχουν διαφορετικές αποστάσεις από αυτόν και συνεπακόλουθα ανήκουν σε διαφορετικά Power Groups. Η απόσταση των χρηστών από τον σταθμό βάσης υποθέτουμε ότι υποδηλώνει έμμεσα την ποιότητα του καναλιού η οποία χειροτερεύει καθώς η απόσταση αυτή αυξάνει. Συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο χρήστες όπου απέχουν από τον σταθμό βάσης 500m και 1000m. Οι δύο αυτοί χρήστες ανήκουν σε διαφορετικά user groups και ο κοντινός χρήστης συμβολίζεται ως $user_N$ ενώ αυτός που απέχει 1000m από τον σταθμό βάσης ως $user_F$. Εφόσον οι δύο τους δεν ανήκουν στο ίδιο group μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο resource block ώστε να λάβουν την πληροφορία τους. Το μοναδικό χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει την πληροφορία τους είναι ο συντελεστής ισχύος που απονέμεται στον καθέναν. Έτσι το σήμα της πληροφορίας του $user_N$ θα διαμορφωθεί με έναν συντελεστή a_N ενώ του $user_F$ με έναν συντελεστή a_F .



Εικόνα 17. Σχεδιάγραμμα σεναρίου υλοποίησης

Η ψηφιακή διαμόρφωση που χρησιμοποιείται για τον κάθε χρήστη είναι 4-QAM ή αλλιώς QPSK. Επιπλέον το εύρος ζώνης καναλιού που έχει επιλεγεί είναι 1MHz. Το σενάριο υλοποίησης προσομοιώνει μέσω του κώδικα που αναπτύχθηκε την επίδοση της PD-NOMA για διάφορες τιμές της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος του σταθμού βάσης και συνεπακόλουθα για διαφορετικές τιμές των συντελεστών ισχύος που διαθέτουν οι χρήστες.

3.1 Σύστημα PD-NOMA με FPA

Ο αλγόριθμος της προσομοίωσης που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Matlab χωρίζεται σε τρία βασικά στάδια. Τα τρία στάδια αυτά περιέχουν όλες τις διαδικασίες που απαιτούνται από μεριάς του σταθμού βάσης και των χρηστών, για να επιτευχθεί η ζεύξη έτσι ώστε να γίνει εκπομπή, μετάδοση και λήψη της πληροφορίας. Επειδή το περιβάλλον του Matlab εκτελεί σειριακά τις εντολές του, έτσι και εδώ, οι διαδικασίες που θα ακολουθηθούν έχουν μια νοητή σειριακή διασύνδεση μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα η δομή του προγράμματος και συνεπακόλουθα των βασικών διαδικασιών είναι η παρακάτω:

1. Προετοιμασία σημάτων πληροφορίας των δύο χρηστών
2. Superposition coding
3. Διέλευση εκπεμπόμενου σήματος από το κανάλι του $user_N$
4. Διέλευση εκπεμπόμενου σήματος από το κανάλι του $user_F$
5. Αντιστάθμιση καναλιών
6. Αποκωδικοποίηση σήματος του $user_F$
7. SIC για τον $user_N$
8. Αποκωδικοποίηση σήματος του $user_N$

Οι διαδικασίες 1 και 2 ανήκουν στο πρώτο στάδιο του κώδικα που αφορά την εκπομπή του σήματος που περιέχει την πληροφορία, οι διαδικασίες 3 και 4 αφορούν το δεύτερο στάδιο που είναι η μετάδοσή της και οι διαδικασίες 5-8 αφορούν την λήψη της πληροφορίας.

Στον κάθε χρήστη θα μεταδοθούν 1000000 bits ωφέλιμης πληροφορίας χρησιμοποιώντας 4-QAM το οποίο θα είναι διαμορφωμένο ξεχωριστά με έναν συντελεστή ισχύος που έχει απονεμηθεί στον κάθε χρήστη. Πιο συγκεκριμένα οι συντελεστές αυτοί θα παίρνουν τις παρακάτω τιμές:

a_F	0.9	0.8	0.7	0.6
a_N	0.1	0.2	0.3	0.4

Πίνακας 1. Συντελεστές ισχύος χρηστών

Επιπλέον ο σταθμός βάσης θα εκπέμπει με ισχύ κάθε φορά από 0dBm έως 40dBm με βήμα 1dBm. Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται για τους δύο χρήστες έχουν μοντελοποιηθεί ως κανάλια Rayleigh, των οποίων οι συντελεστές προκύπτουν από την άθροιση 2 τυχαίων μεταβλητών με μέση τιμή 0 και διασπορά $\sigma^2 = 1$. Επίσης η εξασθένιση που εισάγει το κάθε κανάλι στο εκπεμπόμενο σήμα, εξαρτάται καθαρά και μόνο από την απόσταση που απέχει ο κάθε ένας χρήστης από τον σταθμό βάσης,

υψωμένη σε μια δύναμη που δηλώνει την εξασθένιση του κύματος λόγω της διάδοσης σε τέτοιου είδους κανάλια και εδώ έχει επιλεχθεί να είναι ίση με $4 \left(\sim \frac{1}{r^4} \right)$.

3.2 Κώδικας προσομοίωσης

Το πρώτο στάδιο όπως συμβαίνει σε κάθε πρόγραμμα είναι το στάδιο των αρχικοποιήσεων. Εδώ αρχικοποιούνται σχεδόν όλες οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα από τον αλγόριθμο του συστήματος.

Αρχικά δηλώνονται οι αποστάσεις των χρηστών από τον σταθμό βάσης, το εκθετικό της εξασθένισης του σήματος καθώς επίσης και το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επιπλέον δηλώνεται η τάξη της QAM που θα χρησιμοποιηθεί, ο αριθμός των bits ανά σύμβολο και επίσης ο αριθμός των εκπεμπόμενων bits και συμβόλων. Ακόμα, ορίζεται ένα διάνυσμα γραμμή το οποίο περιέχει τις τιμές της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος και άλλο ένα που εκφράζει τις ίδιες τιμές σε Watt. Η τιμή της πυκνότητας του επιπέδου του λευκού θορύβου σε Watt είναι απαραίτητη για την προσομοίωση και υπολογίζεται ως το γινόμενο της θερμοκρασίας του χώρου, της σταθεράς του Boltzmann και του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

```

%% Initialize PD-NOMA's system requirements
d1 = 500; d2 = 1000; %Distance between each user and Base Station
BW=1e6;           %Bandwidth (Hz)
r = 4;           %Path loss exponent

RNum=4;           %Repetition Number
M = 4;           %QAM order
s = log2(M);     %bits/symbol
Bits = 1e6;      %Number of transmitted bits
N = Bits/s;      %Number of transmitted symbols

ptx = [0:40];    %Tx Power (dbm)
Ptx = db2pow(ptx)/1000; %Tx power (W)

k=1.38*1e-23;    %Boltzmann constant
T=300;          %Temperature (K)
No=k*T*BW;      %Noisefloor (W)

```

Εικόνα 18. Κώδικας αρχικοποίησης συστήματος

Στη συνέχεια σειρά έχει η δημιουργία 1εκ. τυχαίων bits δηλαδή τιμές 0 και 1 για τον κάθε έναν χρήστη ξεχωριστά. Μετά, αυτά τα bits χωρίζονται σε 2 στήλες όσες είναι και το πλήθος των bits που περιγράφονται από κάθε QAM σύμβολο. Έπειτα, η κάθε γραμμή μετατρέπεται σε έναν ακέραιο αριθμό στο δεκαδικό σύστημα, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο στάδιο το οποίο είναι η δημιουργία των QAM συμβόλων.

Έτσι, στη συνέχεια τα δυαδικά bits διαμορφώνονται τελικά σε QAM σύμβολα, με κωδικοποίηση Gray και μέση ισχύς ίση με $1W$.

```
%% Data Generation
bin_tx_data_1 = randi([0,1],Bits,1);
bin_tx_data_2 = randi([0,1],Bits,1);

data_1=reshape(bin_tx_data_1,[N,s]);
data_2=reshape(bin_tx_data_2,[N,s]);

dec_data_1=bi2de(data_1);
dec_data_2=bi2de(data_2);

QamsIn_1 =qammod(dec_data_1 ,M, 'gray', 'UnitAveragePower',true);
QamsIn_2 =qammod(dec_data_2,M, 'gray', 'UnitAveragePower',true);
```

Εικόνα 19. Κώδικας δημιουργίας πληροφορίας και QPSK συμβόλων για τους 2 χρήστες

Στο επόμενο στάδιο σειρά έχει η δημιουργία των συντελεστών των καναλιών καθώς επίσης και η δημιουργία των συντελεστών του θορύβου για το κάθε κανάλι.

```
%% Generate channel coefficient for both users
h1 = (sqrt(d1^-r) * (randn(1,N)+li*randn(1,N))/sqrt(2))';
h2 = (sqrt(d2^-r) * (randn(1,N)+li*randn(1,N))/sqrt(2))';

%% Noise creation for both users
n1 = sqrt(No) * (randn(N,1) + li*randn(N,1))/sqrt(2);
n2 = sqrt(No) * (randn(N,1) + li*randn(N,1))/sqrt(2);
```

Εικόνα 20. Δημιουργία καναλιών Rayleigh για τους χρήστες

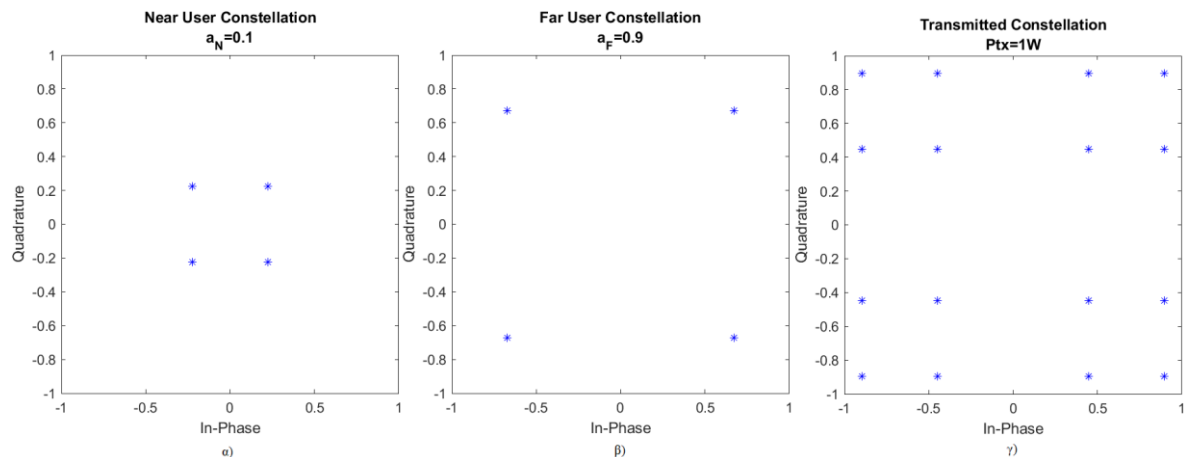
Μετάπειτα, με την χρήση μιας διπλής συνάρτησης for(), εξομοιώνονται οι διαδικασίες που θα αναφερθούν παρακάτω, για διάφορες τιμές των συντελεστών ισχύος των χρηστών, καθώς επίσης και για διαφορετικές τιμές εκπεμπόμενης ισχύος από τον σταθμό βάσης.

```
for(m=1:RNum)
an=0.1*m;      %Near User Power Coefficients [0.1 0.2 0.3 0.4]
af=1-an;      %Far User Power Coefficients  [0.9 0.8 0.7 0.6]

for(i=1:length(Ptx))
%% Superposition Coding
tx_sig=sqrt(an*Ptx(i))*QamsIn_1+sqrt(af*Ptx(i))*QamsIn_2;
```

Εικόνα 21. Superposition coding για τον κοντινό και μακρινό χρήστη

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εντολή, πραγματοποιείται η διαδικασία του Superposition Coding. Η διαδικασία αυτή αποτελείται από το άθροισμα της πληροφορίας των δύο χρηστών διαμορφωμένη κατά τον συντελεστή που ανήκει στον κάθε χρήστη. Συγκεκριμένα, για τις ανάγκες της επίδειξης, θα γίνει υπόθεση ότι οι συντελεστές a_N και a_F ισούνται με 0.1 και 0.9 αντίστοιχα. Επίσης εάν ο σταθμός βάσης εκπέμψει με συνολική ισχύς 1W, οι αστερισμοί των χρηστών καθώς και ο τελικός εκπεμπόμενος αστερισμός φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 22. α) Αστερισμός κοντινού χρήστη β) Αστερισμός μακρινού χρήστη γ) Τελικός εκπεμπόμενος αστερισμός

Όπως είναι αντιληπτό ο εκπεμπόμενος αστερισμός αποτελείται από 16 σύμβολα και αυτός προκύπτει από τον συνδυασμό των αστερισμών των δύο χρηστών. Πιο συγκεκριμένα όπως είχε αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, ο εκπεμπόμενος αστερισμός μετά τη διαδικασία δηλαδή του superposition coding, είναι προϊόν του αστερισμού του κοντινού χρήστη, κεντραρισμένο σε κάθε σύμβολο του αστερισμού του μακρινού χρήστη.

Έτσι σειρά έχει η διέλευση του εκπεμπόμενου αστερισμού από τα δύο διαφορετικά κανάλια των χρηστών με σκοπό το σήμα να φτάσει ταυτόχρονα σε αυτούς. Έπειτα, λόγω των φαινομένων της διάδοσης που εισάγει η διέλευση ενός σήματος από το τηλεπικοινωνιακό μέσο (εξασθένιση, αλλαγή μέτρου και φάσης), είναι απαραίτητο αυτά τα φαινόμενα να αντισταθμιστούν στον δέκτη. Έτσι, γνωρίζοντας την απόκριση του καναλιού κάθε φορά μέσω των διαδομένων τεχνικών εκτίμησης που για λόγους ευκολίας έχουν παραλειφθεί, στο συγκεκριμένο παράδειγμα η αντιστάθμιση του καναλιού γίνεται με τον πολλαπλασιασμό του σήματος με την αντίστροφη τιμή του καναλιού κάθε φορά.

%% Passing Signal Through Channels

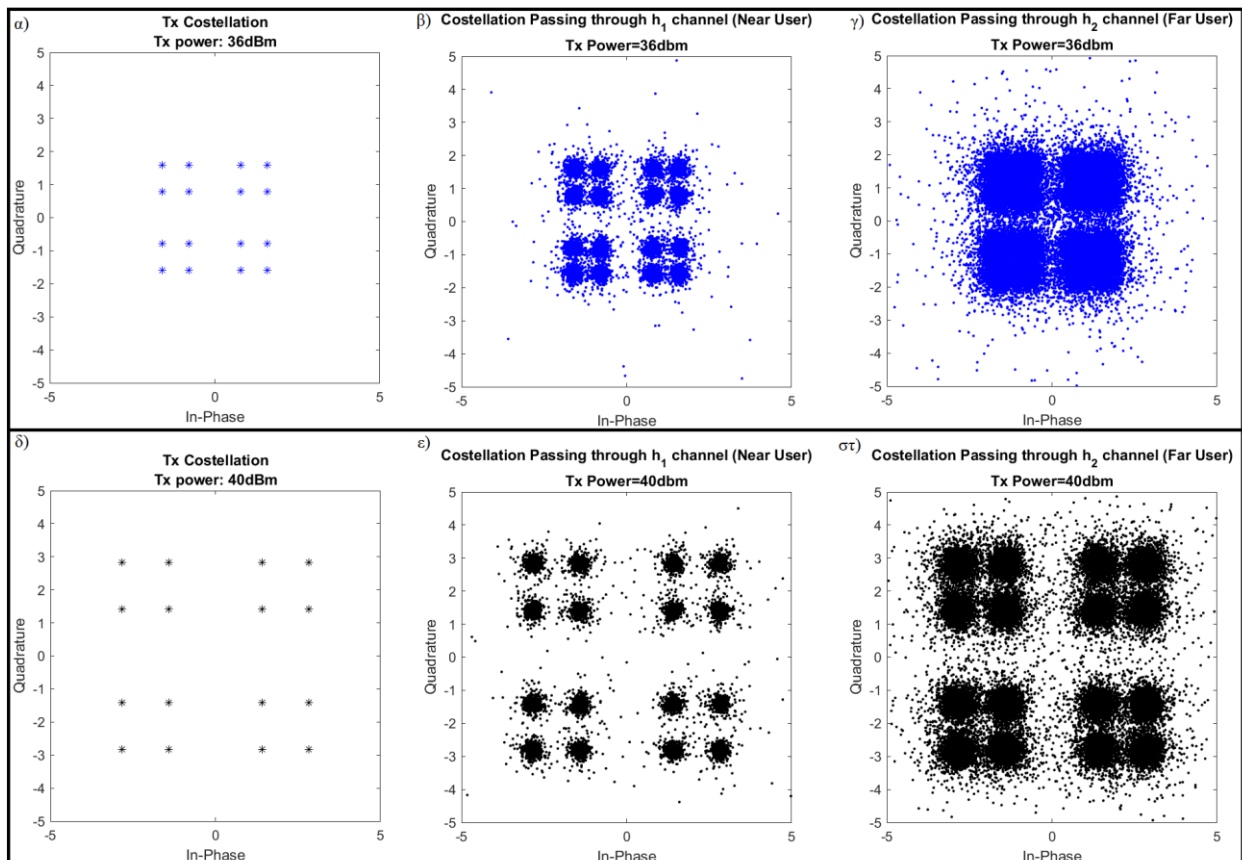
```
y1=h1.*tx_sig+n1;  
y2=h2.*tx_sig+n2;
```

%% Channels Equalization

```
y1_est=y1./h1;  
y2_est=y2./h2;
```

Εικόνα 23. Διέλευση σήματος μέσα από τα κανάλια των 2 χρηστών

Η παρακάτω εικόνα αποτελείται από 6 αστερισμούς οι οποίοι έχουν ταξινομηθεί σε 2 γραμμές και 3 στήλες. Η κάθε γραμμή αντιπροσωπεύει την συνολική εκπεμπόμενη ισχύ από το BS που στην προκυμμένη περίπτωση είναι 36dBm και 40dBm. Η πρώτη στήλη δείχνει τους αστερισμούς που εκπέμπονται σύμφωνα με αυτές τις ισχύεις ενώ η δεύτερη και τρίτη στήλη δείχνει τους αστερισμούς που λαμβάνουν οι 2 χρήστες μετά την αντιστάθμιση του καναλιού.



Εικόνα 24. α) Εκπεμπόμενος αστερισμός στα 36dBm β) Λαμβανόμενος αστερισμός κοντινού χρήστη με ισχύ εκπομπής 36dBm γ) Λαμβανόμενος αστερισμός μακρινού χρήστη με ισχύ εκπομπής 36dBm δ) Εκπεμπόμενος αστερισμός στα 40dBm ε) Λαμβανόμενος αστερισμός κοντινού χρήστη με ισχύ εκπομπής 40dBm στ) Λαμβανόμενος αστερισμός μακρινού χρήστη με ισχύ εκπομπής 40dBm

Σειρά έχει η αποκωδικοποίηση της πληροφορίας στον κάθε χρήστη. Για τον μακρινό χρήστη τα πράγματα είναι απλά, το μόνο που χρειάζεται είναι να γίνει απευθείας

αποκωδικοποίηση χωρίς κάποια επιπρόσθετη διαδικασία. Έτσι αφού γίνει η αποδιαμόρφωση κατά QAM, γίνεται η αντίστροφη διαδικασία από ότι έγινε στον πομπό, δηλαδή ο αριθμός στο δεκαδικό σύστημα που προκύπτει από την αποδιαμόρφωση, μετατρέπεται σε δυαδικό και κάθε ψηφίο του διαχωρίζεται και εισάγεται σε διαφορετική στήλη. Αφού ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία οι στήλες αυτές ενώνονται σε ένα ενιαίο διάνυσμα και συγκρίνονται με το διάνυσμα των bits του είχε σταλεί σε αυτόν τον χρήστη. Από την σύγκριση αυτή, καταγράφεται το BER.

```
%% Far user Decode
rx_dec_data_2=qamdemod(y2_est/sqrt(af*Ptx(i)),M,'gray'); %Decode Far User's Symbol
rx_data_2 = de2bi(rx_dec_data_2,s);
bin_rx_data_2=rx_data_2(:);
[~,ber2(m,i)] = biterr(bin_tx_data_2,bin_rx_data_2);
```

Εικόνα 25. Αποκωδικοποίηση πληροφορίας μακρινού χρήστη

Από την άλλη, στον κοντινό χρήστη τα πράγματα είναι λίγο πιο πολύπλοκα. Αρχικά αποκωδικοποιείται το σύμβολο που έχει σταλεί στον μακρινό χρήστη. Έπειτα, αυτό διαμορφώνεται ξανά κατά QAM, αλλά με τον συντελεστή ισχύος που έχει απονεμηθεί στον μακρινό χρήστη. Έτσι, ο κοντινός χρήστης το μόνο που έχει να κάνει είναι να αφαιρέσει από το σύμβολο που έχει λάβει, το σύμβολο που έχει υπολογίσει έτσι ώστε να ολοκληρώσει την διαδικασία SIC. Στη συνέχεια το μόνο που έχει να κάνει είναι να ακολουθήσει την διαδικασία της αποκωδικοποίησης όπως είχε γίνει αντίστοιχα και στον μακρινό χρήστη. Όπως και πριν έτσι κι εδώ, μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του BER με την σύγκριση των απεσταλμένων και λαμβανόμενων bits του κοντινού χρήστη.

```
%% SIC for near user
data2_SIC=qamdemod(y1_est/sqrt(af*Ptx(i)),M,'gray');
data2_SIC=sqrt(af*Ptx(i))*qammod(data2_SIC,M,'UnitAveragePower',true);
rx_dec_data_1=y1_est-data2_SIC;

%% Near user Decode
rx_dec_data_1=qamdemod(rx_dec_data_1/sqrt(an*Ptx(i)),M,'gray'); %Decode Near User's Symbol
rx_data_1 = de2bi(rx_dec_data_1,s);
bin_rx_data_1=rx_data_1(:);
[~,ber1(m,i)] = biterr(bin_tx_data_1,bin_rx_data_1);
end
end
```

Εικόνα 26. Αποκωδικοποίηση πληροφορίας κοντινού χρήστη

Κάνοντας την σύμβαση ότι στο συγκεκριμένο σενάριο το throughput είναι ίσο με το data rate, ο υπολογισμός του throughput του κάθε χρήστη βασίζεται στις εξισώσεις (13), (14), οι οποίες υλοποιούνται στον παρακάτω κώδικα και επιπλέον υπολογίζεται και το συνολικό data rate του συστήματος ως άθροισμα αυτών.

%% Throughput Calculation

```
Sn_NOMA=Ptx.*an.*abs(hn).^2;
Sf_NOMA=Ptx.*af.*abs(hf).^2;

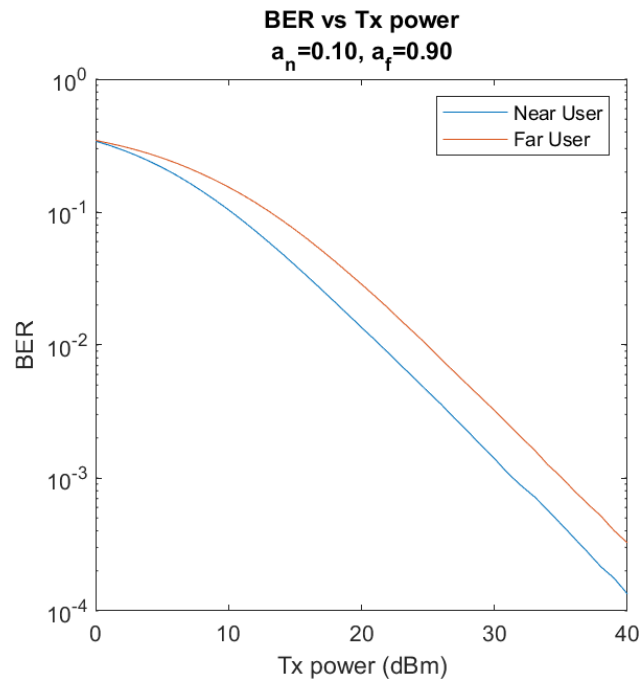
NIn=Ptx*af.*abs(hn).^2+No;           %Noise and Interference for user_n
NIf=Ptx*an.*abs(hf).^2+No;           %Noise and Interference for user_f

R1_NOMA=mean(BW*log2(1+Sn_NOMA./NIn)); %Near User Throughput
R2_NOMA=mean(BW*log2(1+Sf_NOMA./NIf)); %Far User Throughput
R12_NOMA=R1_NOMA+R2_NOMA;             %Total Throughput
```

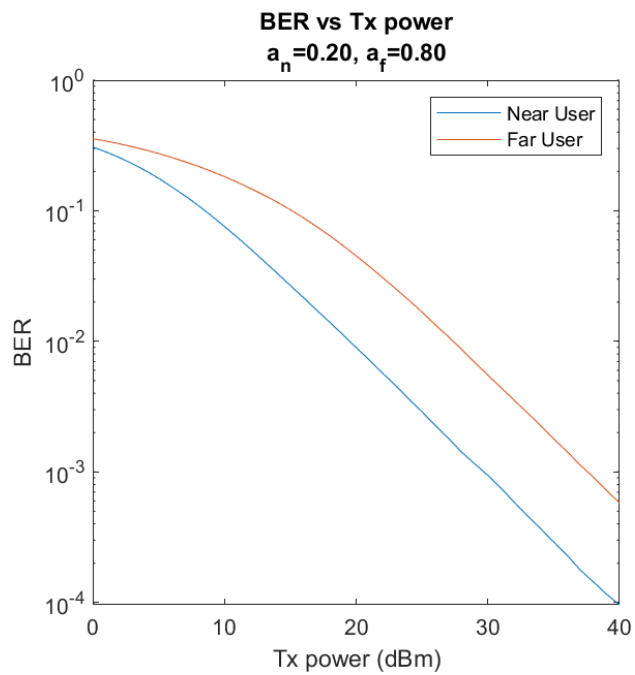
Εικόνα 27. Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης

3.3 Αποτελέσματα

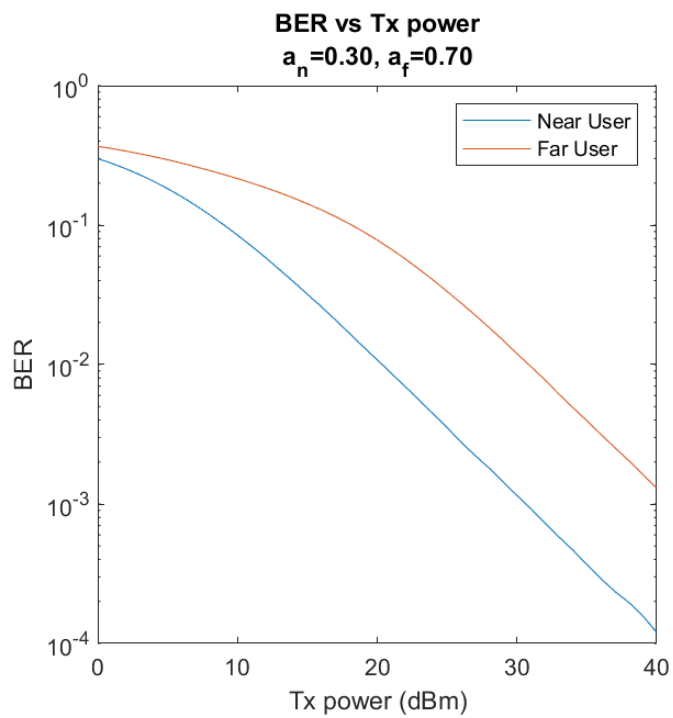
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, παρουσιάζονται στις Εικόνες 28 έως 36. Στις Εικόνες 28-31 παρουσιάζονται τα διαγράμματα του BER εν συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος από το BS, για διάφορες τιμές των συντελεστών που απονεμήθηκαν στους χρήστες.



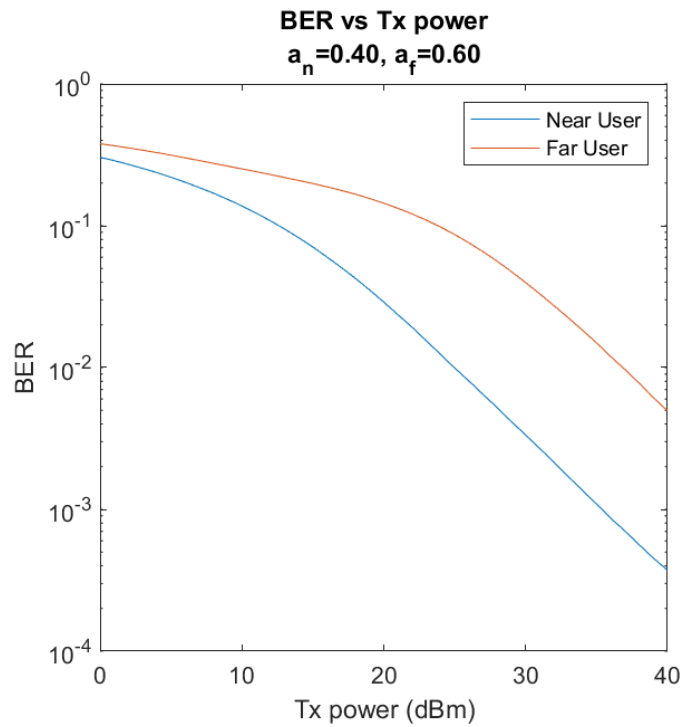
Εικόνα 28. Διάγραμμα BER και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.1 και 0.9



Εικόνα 29. Διάγραμμα BER και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.2 και 0.8

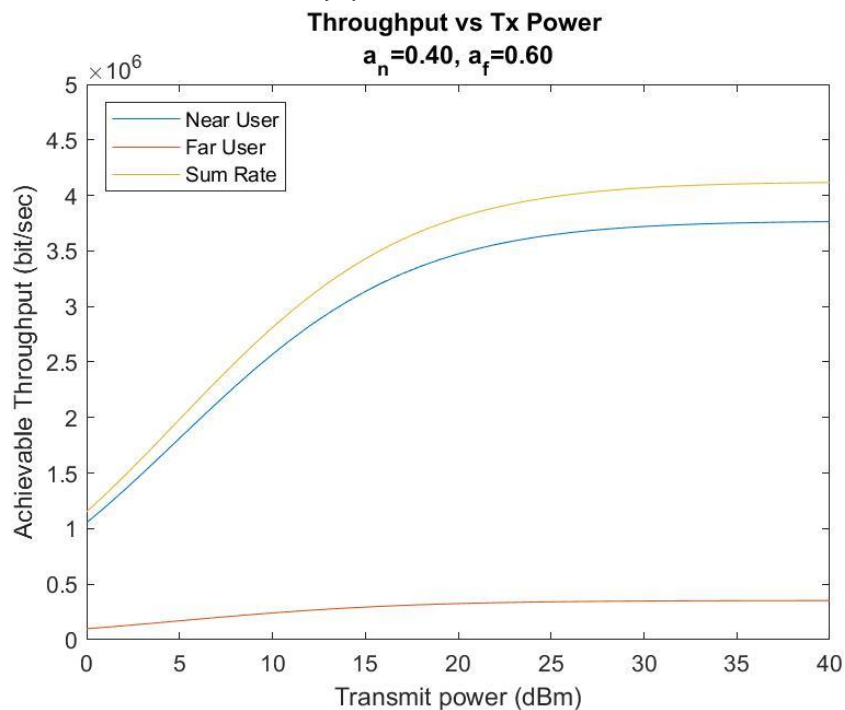


Εικόνα 30. Διάγραμμα BER και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.3 και 0.7

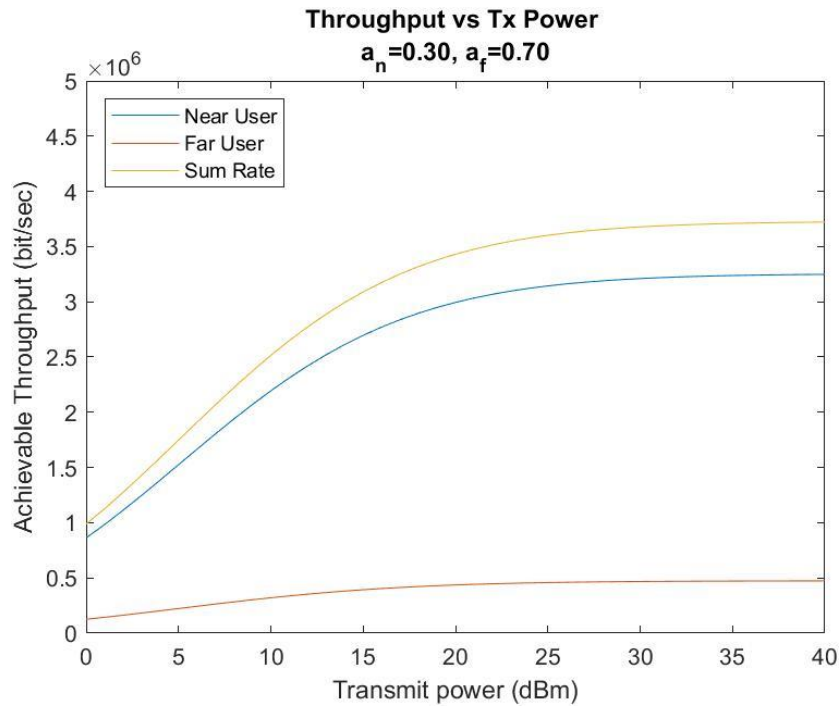


Εικόνα 31. Διάγραμμα BER και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.4 και 0.6

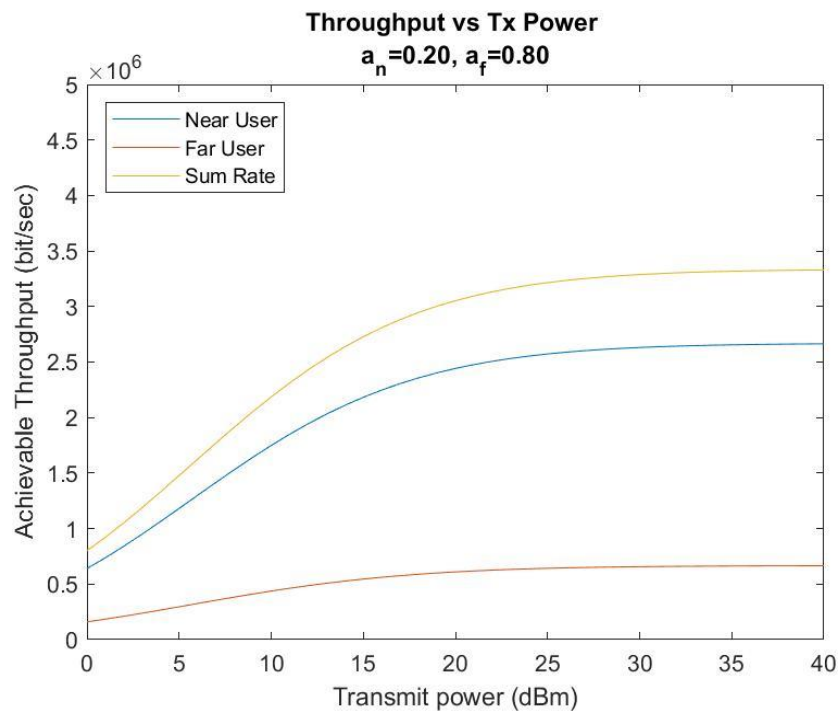
Επιπλέον, για την καλύτερη κατανόηση της επίδοσης του συστήματος παρουσιάζονται επίσης και τα διαγράμματα του throughput των δύο χρηστών εν συναρτήσει των διαφόρων τιμών της ισχύος που εκπέμπεται από τον σταθμό βάσης, για τις ίδιες με πριν τιμές των συντελεστών ισχύος των χρηστών.



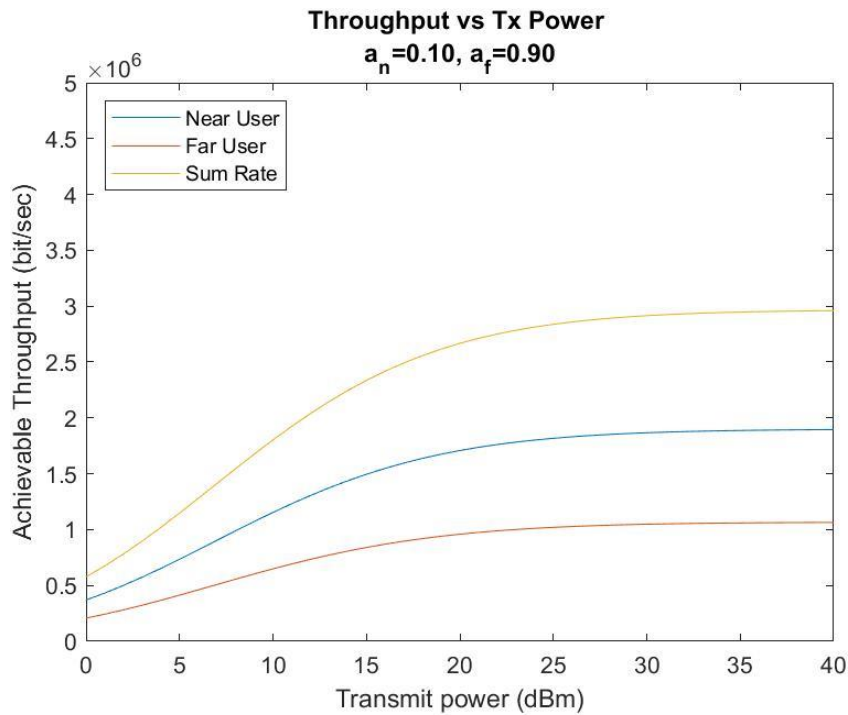
Εικόνα 32. Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.4 και 0.6



Εικόνα 33. Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.3 και 0.7



Εικόνα 34. Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.2 και 0.8



Εικόνα 35. Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης και εκπεμπόμενης ισχύος, για συντελεστές ισχύος χρηστών 0.1 και 0.9

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την λειτουργικότητα της PD-NOMA και κάτω υπό ποιες συνθήκες αυτή, παρουσιάζει τα μεγαλύτερα οφέλη της.

Αρχικά, από τα διαγράμματα BER, παρατηρείται ότι παρόλο που στον κοντινό χρήστη απονέμεται το λιγότερο ποσοστό ενέργειας κάθε φορά, αυτός συγκριτικά με τον μακρινό χρήστη έχει τις καλύτερες επιδόσεις ως προς των αριθμών λαθών που παρουσιάζει η ζεύξη του. Αυτό συμβαίνει διότι ο χρήστης αυτός διαθέτει αρκετά καλύτερο κανάλι σε σχέση με τον μακρινό χρήστη γι' αυτό και δεν χρειάζεται κάθε φορά περισσότερη ισχύ. Τα πράγματα όμως για τον μακρινό χρήστη είναι διαφορετικά. Ο μακρινός χρήστης λόγω της κακής ποιότητας του καναλιού του, καθιστά απαραίτητη την χρήση επιπλέον ισχύος έτσι ώστε η ζεύξη του να είναι περισσότερο εύρωστη. Έτσι κοιτώντας τις Εικόνες 28-31, παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό ισχύος του κοντινού χρήστη αυτός δεν παρουσιάζει σημαντική βελτίωση στον αριθμό των λαθών. Αντίθετα, στον μακρινό χρήστη αυτή η μείωση που βιώνει στο ποσοστό ισχύος του, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του BER διότι το σήμα που φτάνει σε αυτόν πλέον είναι πιο επιρρεπείς στον θόρυβο κι έτσι ο χρήστης αυτός αποφαίνεται λανθασμένα για τα λαμβανόμενα σύμβολα του. Οπότε εδώ είναι αντιληπτό γιατί πάντα στην τεχνική PD-NOMA στον χρήστη με το χειρότερο κανάλι πρέπει να απονέμεται πάντα το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος.

Από την άλλη τα διαγράμματα του throughput μαρτυρούν μια άλλη πραγματικότητα. Πριν παρατηρήθηκε ότι ο κοντινός χρήστης, δηλαδή αυτός με το καλύτερο κανάλι, παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές του BER σε σχέση με τον μακρινό. Δεν ισχύει το ίδιο και για τις τιμές του throughput όμως. Κοιτώντας αντίστροφα τις Εικόνες 35-32,

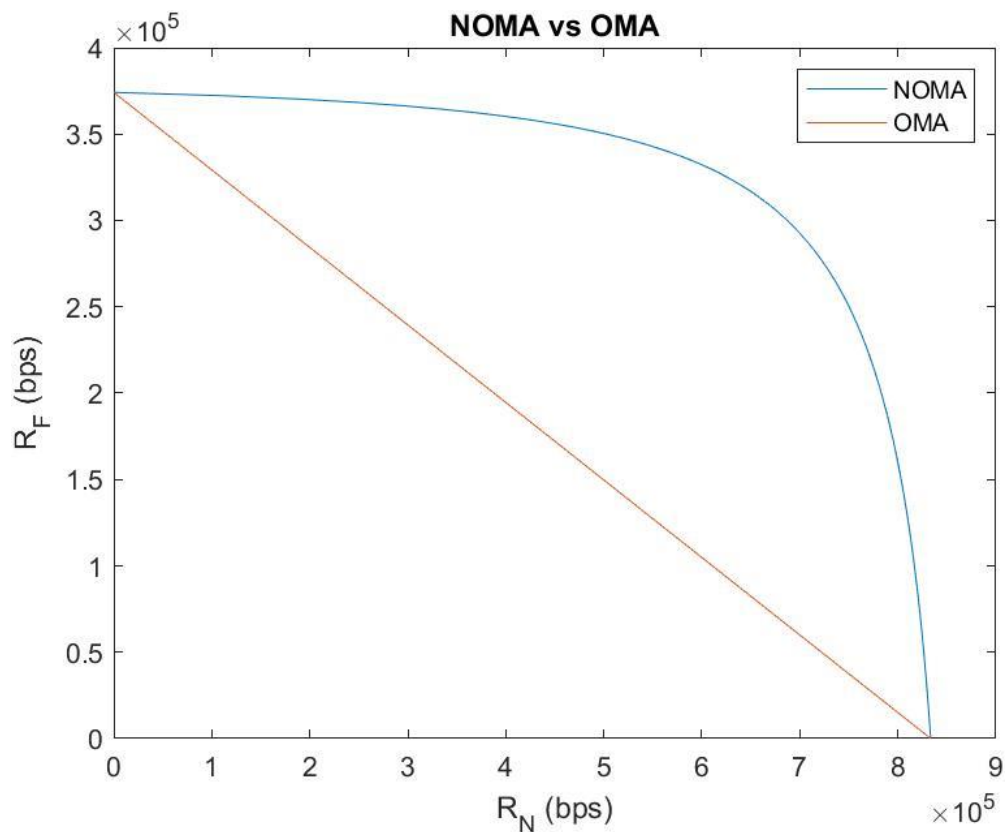
παρατηρείται ότι ο συντελεστής ισχύος που απονέμεται στον κοντινό χρήστη επηρεάζει άμεσα και το throughput του. Έτσι καθώς αυτός αυξάνεται, ο χρήστης παρουσιάζει όλο και μεγαλύτερες τιμές στο throughput του. Όμως αυτό, δεν ισχύει μόνο στον κοντινό χρήστη. Άμεση εξάρτηση στις τιμές του throughput του βιώνει και ο μακρινός χρήστης σύμφωνα με το ποσοστό ισχύος που του έχει απονεμηθεί. Κοιτώντας τα διαγράμματα 32-35, είναι αντιληπτό ότι ο χρήστης αυτός βιώνει το μεγαλύτερο throughput, όταν του έχει απονεμηθεί ο μεγαλύτερος συντελεστής ισχύος δηλαδή 0.9 στο συγκεκριμένο παράδειγμα. Πέρα από το throughput των δύο χρηστών μεμονωμένα, σημαντική ένδειξη είναι και το αθροιστικό. Εάν ολοκληρωθεί η καμπύλη “Sum Rate” του κάθε γραφήματος προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

a_F	0.6	0.7	0.8	0.9
a_N	0.4	0.3	0.2	0.1
$a_F - a_N$	0.2	0.4	0.6	0.8
Q	69.8	73.2	81.8	100.4

Πίνακας 2. Σχέση συντελεστών ισχύος χρηστών

Η γραμμή Q που έχει προστεθεί, δηλώνει την τιμή του εμβαδού της καμπύλης “Sum Rate”, ενώ επιπλέον προστέθηκε και η γραμμή που δείχνει την διαφορά μεταξύ των συντελεστών ισχύος των χρηστών. Μια σημαντική παρατήρηση εδώ είναι ότι το σύστημα αθροιστικά παρουσιάζει βελτίωση καθώς η διαφορά των συντελεστών αυτή μεγαλώνει. Πιο συγκεκριμένα εάν δούμε και τις δύο παραπάνω ομάδες των γραφημάτων, παρατηρούμε ότι η τεχνική αυτή παρουσιάζει την μεγαλύτερη απόδοσή της, δηλαδή χαμηλές τιμές BER για τους δύο χρήστες και μέγιστο αθροιστικό throughput, όταν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών ισχύος. Αυτό όμως σηματοδοτεί ότι η έννοια της δικαιοσύνης (fairness) χάνεται. Κοιτάζοντας την Εικόνα 35 που δείχνει την περίπτωση όπου το αθροιστικό throughput λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές, είναι αντιληπτό ότι ο κοντινός χρήστης βιώνει το μικρότερο throughput από όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ενώ ο μακρινός το μεγαλύτερο. Αυτό είναι κάτι που απασχολεί την ερευνητική κοινότητα και μελετώνται εκδοχές τις PD-NOMA που μειώνουν αυτό το φαινόμενο χωρίς όμως να χαθούν τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνική αυτή [7][9].

Από την άλλη, στην Εικόνα 36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο παράδειγμα της σύγκρισης μεταξύ της NOMA κι μιας οποιαδήποτε OMA τεχνικής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση για να δημιουργηθεί η καμπύλη της NOMA, καταγράφηκαν οι ρυθμοί δεδομένων των δύο χρηστών για συντελεστές ισχύος $[0,1]$ με βήμα 0.01 κάθε φορά.



Εικόνα 36. Σύγκριση NOMA και OMA

Βάση της Εικόνας 36 είναι φανερά τα οφέλη των NOMA τεχνικών στους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων των δύο χρηστών έναντι των αντίστοιχων OMA τεχνικών. Επιπλέον βάση αυτών των αποτελεσμάτων επαληθεύεται και το θεωρητικό κομμάτι που είχε περιγραφεί αναλυτικά στην υποενότητα 2.3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συμπεράσματα – Μελλοντική Έρευνα

Οι κλασικές τεχνικές OMA είχαν και έχουν καθιερωθεί στον κόσμο των τηλεπικοινωνιών, ως λύσεις σε προβλήματα που αφορούν την πολυπλεξία και την πρόσβαση των χρηστών στον ασύρματο δίαυλο επικοινωνίας. Επειδή οι ανάγκες για εξυπηρέτηση όλων και περισσότερων χρηστών αυξάνονται παράλληλα με τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών για καλύτερες υπηρεσίες, οι κλασικές μέθοδοι OMA έχουν φτάσει στο μέγιστο κατώφλι των δυνατοτήτων τους.

Μία νέα οικογένεια τεχνικών ήρθε για να δώσει λύσεις σε αυτά τα προβλήματα και να αξιοποιήσει ακόμα πιο βέλτιστα τους διαθέσιμους ραδιοπόρους. Επιπρόσθετα, στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύχθηκε κώδικας με σκοπό την υλοποίηση σεναρίου ζεύξης με PD-NOMA ώστε να επιβεβαιωθούν αριθμητικά τα στοιχεία της θεωρίας. Οι τεχνικές αυτές παρουσιάζουν πρόσφορο έδαφος για μελέτη και βελτίωση των δυνατοτήτων τους. Ήδη ένα μεγάλο μέρος της ερευνητικής κοινότητας του κλάδου ασχολείται με το να ξεπεραστούν τα προβλήματα που παρουσιάζουν οι τεχνικές αυτές, αναδεικνύοντας ταυτόχρονα τα μεγάλα οφέλη τους.

Στην PD-NOMA ως μεγάλα προβλήματα προς διερεύνηση παρουσιάζονται η βέλτιστη κατανομή των συντελεστών ισχύος στους χρήστες του δικτύου καθώς επίσης και η έννοια του fairness μεταξύ των χρηστών. Μεγάλα προβλήματα στην τεχνική αυτή επίσης καθίστανται όταν οι χρήστες έχουν μεταξύ τους μικρές διαφορές στα κέρδη των καναλιών τους και επιπλέον όταν αυξάνεται το πλήθος των χρηστών που πολυπλέκονται πάνω σε κοινά resource blocks [12]. Για την αποφυγή των προβλημάτων αυτών έχουν συστηθεί υβριδικά μοντέλα NOMA και OMA με σκοπό την βελτίωση του capacity του συστήματος. Ουσιαστικά τα μοντέλα αυτά κάνουν εναλλαγές μεταξύ των τεχνικών NOMA σε OMA και αντίστροφα έτσι ώστε κάθε φορά να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία όλου του συστήματος.

Μία άλλη τεχνική που έχει προταθεί και μελετάται είναι η Cooperative NOMA (C-NOMA). Η τεχνική αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι επειδή ο κοντινός χρήστης γνωρίζει πάντα την πληροφορία του μακρινού λόγω του ότι κάθε φορά εκτελεί SIC, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεσος κόμβος ή επαγωγικός, με σκοπό να εκπέμψει στον μακρινό χρήστη την πληροφορία που του προορίζεται. Έτσι, επιτυγχάνεται η δημιουργία δύο ζεύξεων για τον μακρινό χρήστη, ο οποίος λαμβάνει το σήμα πληροφορίας του από δύο διαφορετικές οδούς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κέρδους διάταξης (diversity gain) χωρίς την ύπαρξη MIMO (Multiple Input Multiple Output) συστημάτων. Επιπλέον ο συνδυασμός MIMO-NOMA και beamforming, μελετάται με σκοπό την περαιτέρω ενίσχυση της λίστας των δυνατοτήτων των τεχνικών αυτών [13].

Βάση του ότι η τεχνική PD-NOMA είναι επιρρεπείς στην κινητικότητα των χρηστών, για μελλοντική διερεύνηση θα μπορούσε να εξεταστεί το σενάριο χρήσης αυτής σε υποδομές FWA (Fixed Wireless Access). Οι υποδομές αυτές έχουν τραβήξει αρκετά το ενδιαφέρον της βιομηχανίας και της ακαδημαϊκής κοινότητας και ουσιαστικά επικεντρώνονται στην ασύρματη κάλυψη, περιοχών που είναι πολύ κοστοβόρο να φτιαχτούν υποδομές οπτικής ίνας και γενικά άλλες ενσύρματες εναλλακτικές υποδομές ώστε οι περιοχές αυτές να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο. Η τεχνική αυτή θα μπορούσε να φανεί αρκετά χρήσιμη για τέτοιου είδους υποδομές και γενικά για υποδομές όπου θα υπήρχε απαίτηση για μαζική συνδεσιμότητα, όπως για παράδειγμα σε υπαίθριες περιοχές που γίνεται χρήση IoT τεχνολογιών σε μεγάλη κλίμακα ή και σε τέτοιου είδους περιοχές όπου απαιτείται πρόσβαση νοικοκυριών και επιχειρήσεων στο διαδίκτυο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

- [1] C. Beard. a. W. Stallings, *Wireless Communication Networks and Systems*, Harlow: Pearson Education (στα Ελληνικά), 2016, pp. 526-533.
- [2] O. Ibe, *Fundamentals of Data Communication Networks*, Willey, 2017, pp. 91-103
- [3] Α. Κανατάς, Φ. Κωνσταντίνου και Γ. Πάντως, *ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ*, Αθήνα, Παπασωτηρίου εκδόσεις, 2013, pp. 280-281.
- [4] W. Shin, M. Vaezi, B. Lee, D. J. Love, J. Lee and H. V. Poor, "Non-Orthogonal Multiple Access in Multi-Cell Networks: Theory, Performance, and Practical Challenges," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 10, pp. 176-183, Oct. 2017.
- [5] S.M. Riazul Islam, Nurilla Avazov, Octavia A. Dobre, and Kyung-Sup Kwak, "Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges," [Online]. Available: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1609/1609.06261.pdf> , (accessed Sept. 1, 2022).
- [6] A. Benjebbovu, A. Li, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Harada and T. Nakamura, "System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements," *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2013, pp. 66-70.
- [7] W. Bai, T. Yao, H. Zhang and V. C. M. Leung, "Research on Channel Power Allocation of Fog Wireless Access Network Based on NOMA," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 32867-32873, 2019.
- [8] K. Lu, Z. Wu and X. Shao, "A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G," *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2017, pp. 1-5.
- [9] J. Guo, X. Wang, J. Yang, J. Zheng and B. Zhao, "User Pairing and Power Allocation for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access," *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOMW.2016.7849074.
- [10] I. Petropoulos, "Evaluation of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Mobile Networks," Technical University of Denmark, 2019, pp. 19-21.
- [11] A. Andrawes, R. Nordin, and N. F. Abdullah, "Energy-Efficient Downlink for Non-Orthogonal Multiple Access with SWIPT under Constrained Throughput," *Energies*, vol. 13, no. 1, p. 107, Dec. 2019, doi: 10.3390/en13010107.
- [12] H. Suganuma, H. Suenaga and F. Maehara, "Hybrid Multiple Access Using Simultaneously NOMA and OMA," *2019 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, 2019, pp. 1-2.

[13] Z. Ding, F. Adachi and H. V. Poor, "Performance of MIMO-NOMA Downlink Transmissions," *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2015.7417060.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB

```
close all
clear all

%% Initialize PD-NOMA's system requirements
dn = 500; df = 1000; %Distance between each user and Base Station
BW=1e6;                %Bandwidth (Hz)
r = 4;                %Path loss exponent

RNum=4;                %Repetition Number
M = 4;                %QAM order
s = log2(M);          %bits/symbol
Bits = 1e5;           %Number of transmitted bits
N = Bits/s;           %Number of transmitted symbols

ptx = [0:40];         %Tx Power (dbm)
Ptx = db2pow(ptx)/1000; %Tx power (W)

k=1.38*1e-23;         %Boltzmann constant
T=300;                %Temperature (K)
No=k*T*BW;            %Noisefloor (W)
%% Data Generation
bin_tx_data_1 = randi([0,1],Bits,1);
bin_tx_data_2 = randi([0,1],Bits,1);

data_1=reshape(bin_tx_data_1,[N,s]);
data_2=reshape(bin_tx_data_2,[N,s]);

dec_data_1=bi2de(data_1);
dec_data_2=bi2de(data_2);

QamsIn_1 =qammod(dec_data_1 ,M,'gray','UnitAveragePower',true);
QamsIn_2 =qammod(dec_data_2,M,'gray','UnitAveragePower',true);

%%

x_t=zeros(N,2);
x1_t=zeros(N,2);
x2_t=zeros(N,2);
y1_sv=zeros(N,2);
y2_sv=zeros(N,2);

ber1=zeros(RNum,length(Ptx));
ber2=zeros(RNum,length(Ptx));

R1_OMA=zeros(RNum,length(Ptx));
R2_OMA=zeros(RNum,length(Ptx));
R1_NOMA=zeros(RNum,length(Ptx));
R2_NOMA=zeros(RNum,length(Ptx));

%% Generate channel coefficient for both users
hn = (sqrt(dn^-r)*(randn(1,N)+1i*randn(1,N))/sqrt(2))';
hf = (sqrt(df^-r)*(randn(1,N)+1i*randn(1,N))/sqrt(2))';
```

```

%% Noise creation for both users
n1 = sqrt(No)*(randn(N,1) + 1i*randn(N,1))/sqrt(2);
n2 = sqrt(No)*(randn(N,1) + 1i*randn(N,1))/sqrt(2);

%%
v=1;

for (m=1:RNum)
    an=0.1*m;          %Near User Power Coefficients [0.1 0.2 0.3 0.4]
    af=1-an;          %Far User Power Coefficients [0.9 0.8 0.7 0.6]

    for (i=1:length(Ptx))

        %% Superposition Coding
        tx_sig=sqrt(an*Ptx(i))*QamsIn_1+sqrt(af*Ptx(i))*QamsIn_2;

        %%
        %% Passing Signal Through Channels
        y1=hn.*tx_sig+n1;
        y2=hf.*tx_sig+n2;

        %% Channels Equalization
        y1_est=y1./hn;
        y2_est=y2./hf;

        %%
        %%Proeretika
        y1_noise=y1-n1;
        y2_noise=y2-n2;

        if(m==1 && (i==36 || i==length(Ptx)))
            x_t(:,v)=tx_sig;
            x1_t(:,v)=y1;
            x2_t(:,v)=y2;
            y1_sv(:,v)=y1_est;
            y2_sv(:,v)=y2_est;
            v=v+1;

            scatterplot(y1_est)
            str=sprintf('Tx Power: %ddBm\nNear Users Received
Contellation',ptx(i));
            title(str)
            axis([-5 5 -5 5])
            scatterplot(y2_est)
            str=sprintf('Tx Power: %ddBm\nFar Users Received
Contellation',ptx(i));
            title(str)
            axis([-5 5 -5 5])
        end

        %% Far user Decode
        rx_dec_data_2=qamdemod(y2_est/sqrt(af*Ptx(i)),M,'gray'); %Decode
Far User's Symbol
        rx_data_2 = de2bi(rx_dec_data_2,s);
        bin_rx_data_2=rx_data_2(:);

```

```

[~,ber2(m,i)] = biterr(bin_tx_data_2,bin_rx_data_2);

%% SIC for near user
data2_SIC=qamdemod(y1_est/sqrt(af*Ptx(i)),M,'gray');

data2_SIC=sqrt(af*Ptx(i))*qammod(data2_SIC,M,'UnitAveragePower',true);
rx_dec_data_1=y1_est-data2_SIC;

%% Near user Decode
rx_dec_data_1=qamdemod(rx_dec_data_1/sqrt(an*Ptx(i)),M,'gray');
%Decode Near User's Symbol
rx_data_1 = de2bi(rx_dec_data_1,s);
bin_rx_data_1=rx_data_1(:);
[~,ber1(m,i)] = biterr(bin_tx_data_1,bin_rx_data_1);

    end
end

for(m=1:4)
an=0.1*m; %Near User
af=1-an;%Far User

figure(m)
semilogy(ptx,ber1(m,:))
hold on
semilogy(ptx,ber2(m,:))
str=sprintf('Near User');
str1=sprintf('Far User');
legend(str,str1)
str=sprintf('BER vs Tx power\ na_n=%0.2f, a_f=%0.2f',an,af);
title(str)
xlabel('Tx power (dBm)')
ylabel('BER')
hold off
end

for(m=1:4)

an=0.1*m; %Near User
af=1-an; %Far User

%% Throughput Calculation

Sn_NOMA=Ptx.*an.*abs(hn).^2;
Sf_NOMA=Ptx.*af.*abs(hf).^2;

NIn=Ptx*af.*abs(hn).^2+No; %Noise and Interference for user_n
NIif=Ptx*an.*abs(hf).^2+No; %Noise and Interference for user_f

R1_NOMA=mean(BW*log2(1+Sn_NOMA./NIn)); %Near User Throughput
R2_NOMA=mean(BW*log2(1+Sf_NOMA./NIif)); %Far User Throughput
R12_NOMA=R1_NOMA+R2_NOMA; %Total Throughput

%% Plots

```

```

figure(m+4)
plot(ptx,R1_NOMA);
hold on
plot(ptx,R2_NOMA);
hold on
plot(ptx,R12_NOMA);
xlabel('Transmit power (dBm)')
ylabel('Achievable Throughput (bit/sec)')
legend('Near User','Far User','Sum Rate','Location','northwest')
str=sprintf('Throughput vs Tx Power \na_n=%0.2f, a_f=%0.2f', an,af);
axis([0 40 0 5*10^6 ])
title(str)
hold off
%Integrate the sum of capacities
Q(m) = trapz(ptx,R12_NOMA)

end

Q/BW

scatterplot(x_t(:,1),1,0,'b*')
str=sprintf('Tx Costellation\nTx power: 36dBm');
title(str)
axis([-5 5 -5 5])

scatterplot(x_t(:,2),1,0,'k*')
str=sprintf('Tx Costellation\nTx power: 40dBm');
title(str)
axis([-5 5 -5 5])

scatterplot(y1_sv(:,1),1,0,'b.')
str=sprintf('Costellation Passing through h_1 channel (Near User)\nTx Power=36dbm');
title(str)
axis([-5 5 -5 5])

scatterplot(y2_sv(:,1),1,0,'b.')
str=sprintf('Costellation Passing through h_2 channel (Far User)\nTx Power=36dbm');
title(str)
axis([-5 5 -5 5])

scatterplot(y1_sv(:,2),1,0,'k.')
str=sprintf('Costellation Passing through h_1 channel (Near User)\nTx Power=40dbm');
title(str)
axis([-5 5 -5 5])

scatterplot(y2_sv(:,2),1,0,'k.')
str=sprintf('Costellation Passing through h_2 channel (Far User)\nTx Power=40dbm');
title(str)
axis([-5 5 -5 5])
%% PD-NOMA vs OMA
an=0:0.01:1;
af=1-an;
Sn_NOMA=(Ptx(5).*an).*abs(hn).^2;

```

```

Sf_NOMA=(Ptx(5).*af).*abs(hf).^2;
NIn=No+(Ptx(5).*af).*abs(hn).^2;
NIIf=No+(Ptx(5).*an).*abs(hf).^2;
Rn_NOMA=mean(BW*log2(1+Sn_NOMA./NIn));
Rf_NOMA=mean(BW*log2(1+Sf_NOMA./NIIf));

plot(Rn_NOMA,Rf_NOMA)
hold on
OMA=Rf_NOMA(1):-Rf_NOMA(1)/100:0;
xax=0:Rn_NOMA(end)/100:Rn_NOMA(end);
plot(xax,OMA)
title('NOMA vs OMA')
legend('NOMA','OMA');
xlabel('R_N (bps)')
ylabel('R_F (bps)')

```