

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λουπασάκης Εμμανουήλ

Επιβλέπων : Επίκουρος καθηγητής Σκούτας Δημήτριος

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Καθηγητής Σκιάνης Χαράλαμπος, Επίκουρος καθηγητής
Μαλιάτσος Κωνσταντίνος

Σάμος, [2024]

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

Πρόλογος και ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών (ΠΠΣ) του τμήματος Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων, της πολυτεχνικής σχολής, του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω συγκεκριμένα, τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, επίκουρο καθηγητή, Σκούτα Δημήτριο για τη συνεχή υποστήριξη που παρείχε, την άψογη συνεργασία, την επικοινωνία και την εποικοδομητική καθοδήγηση στην περάτωση της συγκεκριμένης εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον φίλο μου Τσίπη Λευτέρη για την πολύτιμη βοήθεια, την καθοδήγηση και την ενθάρρυνση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Ακόμη, δε θα μπορούσα να παραλείψω, την ευγνωμοσύνη μου, στην οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξη και τη συμπαράσταση που μου παρείχαν μέχρι την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

© [2024]

του

Λουπασάκη Εμμανουήλ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

Υπεύθυνη Δήλωση Πρωτοτυπίας Διπλωματικής Εργασίας

Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και δηλώνω ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω αναφέρει τις πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη προπτυχιακή διπλωματική εργασία.

Λουπασάκης Εμμανουήλ

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Εξέλιξη των Κυψελωτών δικτύων: Από το 1G έως το 5G	2
1.2	Απαιτήσεις για τα δίκτυα 6 ^{ης} Γενιάς	12
1.3	Ανερχόμενες Τεχνολογίες Επικοινωνίας 6G	15
1.3.1	<i>Terahertz Communications</i>	15
1.3.2	<i>Millimeter Wave (mmWave)</i>	15
1.3.3	<i>Visible Light Communications (VLC)</i>	15
1.3.4	<i>Optical Wireless Communications (OWC)</i>	15
1.3.5	<i>Dynamic Spectrum Management</i>	16
1.3.6	<i>Intelligent Reflecting Surfaces (IRS)</i>	16
1.3.7	<i>Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)</i>	16
1.3.8	<i>Large-Scale Satellite Constellation</i>	16
1.3.9	<i>Digital Twin</i>	17
1.4	Δομή της διπλωματικής	18
2	Μη Ορθογωνική τεχνική πολλαπλής πρόσβασης NOMA.....	19
2.1	Τεχνική NOMA στο πεδίο της Ισχύος (Power Domain NOMA)	19
2.2	Τεχνική Superposition Coding.....	22
2.3	Τεχνική Successive Interference Cancellation.....	26
2.4	Μέθοδοι Διαχείρισης Ισχύος και Ομαδοποίησης Χρηστών	27
2.4.1	<i>Ομαδοποίηση Χρηστών</i>	27
2.4.2	<i>Μέθοδοι Διαχείρισης Ισχύος</i>	29
2.5	Σύγκριση NOMA με OMA τεχνικές.....	30
3	Συστήματα Multiple Input Multiple Output (MIMO)	32
3.1	Εισαγωγή στα συστήματα MIMO.....	32
3.2	Τεχνική Receive Diversity	32
3.3	Τεχνική Transmit Diversity	33
3.4	Τεχνική Spatial Multiplexing.....	34
3.5	Τεχνική Beam Forming.....	35
4	Εφαρμογές της Τεχνολογίας MIMO-NOMA στα Δίκτυα κινητών επικοινωνιών: Τάσεις και Προοπτικές Κατευθύνσεις	37
5	Προσομοίωση Συστήματος MIMO – NOMA.....	40
6	Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων	52

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

Βιβλιογραφία	53
---------------------------	-----------

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1 Αρχιτεκτονική δικτύου 1G. Πηγή: [4]	3
Σχήμα 2 Αρχιτεκτονική δικτύου 2G. Πηγή: [4]	4
Σχήμα 3 Αρχιτεκτονική δικτύου 3G. Πηγή: [4]	5
Σχήμα 4 OFDM σήμα για LTE συστήματα. Πηγή: [4]	7
Σχήμα 5 Αρχιτεκτονική δικτύου 4G. Πηγή: [4]	8
Σχήμα 6 Αρχιτεκτονική δικτύου 5G. Πηγή: [4]	9
Σχήμα 7 IMT-2020 σενάρια χρήσης. Πηγή: [4]	11
Σχήμα 8 Εφαρμογή τεχνικής NOMA σε σενάριο κατερχόμενης ζεύξης. Πηγή: [13]	20
Σχήμα 9 Εφαρμογή τεχνικής NOMA σε σενάριο ανερχόμενης ζεύξης. Πηγή: [13]	22
Σχήμα 10 Γραφική απεικόνιση των x_1 και x_2	23
Σχήμα 11 Ψηφιακή διαμόρφωση σημάτων	24
Σχήμα 12 Κλιμάκωση δεδομένων	25
Σχήμα 13 Τελικό υπερτιθέμενο κωδικοποιημένο σήμα	26
Σχήμα 14 Near-far pairing (N-F)	27
Σχήμα 15 Near-near, far-far pairing (N-N, F-F)	28
Σχήμα 16 MIMO receive diversity [17]	33
Σχήμα 17 MIMO transmit diversity [17]	34
Σχήμα 18 MIMO Spatial Multiplexing [2]	35
Σχήμα 19 MIMO Beam Forming [2]	36
Σχήμα 20 System Model	41
Σχήμα 21 Επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων για διάφορες τιμές εύρους ζώνης και αριθμό κεραιών πομπού $A = 4$	44
Σχήμα 22 Φασματική απόδοση συστήματος για διάφορες τιμές εύρους ζώνης και αριθμό κεραιών πομπού $A = 4$	45
Σχήμα 23 Επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων για διάφορες τιμές ισχύς εκπομπής και αριθμό κεραιών πομπού $A = 4$	46
Σχήμα 24 Φασματική απόδοση συστήματος για διάφορες τιμές ισχύς εκπομπής και αριθμό κεραιών πομπού $A = 4$	47
Σχήμα 25 Επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων για διάφορες τιμές εύρους ζώνης και αριθμό κεραιών πομπού $A = 8$	48
Σχήμα 26 Φασματική απόδοση συστήματος για διάφορες τιμές εύρους ζώνης και αριθμό κεραιών πομπού $A = 8$	49
Σχήμα 27 Επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων για διάφορες τιμές ισχύς εκπομπής και αριθμό κεραιών πομπού $A = 8$	50
Σχήμα 28 Φασματική απόδοση συστήματος για διάφορες τιμές ισχύς εκπομπής και αριθμό κεραιών πομπού $A = 8$	51

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1 Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης σε διάφορες γενιές δικτύων.	11
Πίνακας 2 Συγκριτικός πίνακας των τεχνολογιών	12
Πίνακας 3: Παράμετροι συστήματος.....	43

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

Ακρωνύμια

1G	First generation
2G	Second generation
3G	Third generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Fourth generation
5G	Fifth generation
5GC	5G core
6G	Sixth Generation
ACK	Acknowledgement
AMC	Adaptive modulation and coding
AWGN	Additive white Gaussian noise
B5G	Beyond 5G
CDMA	Code division multiple access
CN	Core network
CNR	Channel-to-noise ratio
CoMP	Coordinated multipoint
CP-OFDM	Cyclic prefix OFDM
CQI	Channel quality indicator
C-RAN	Cloud radio access network
CS	Cyclic suffix
DL	Downlink
EE	Energy efficiency
eMBB	Enhanced mobile broadband
eMTC	Enhanced machine type communications
eNB	Enhanced NodeB
FD	Full-duplex
FDD	Frequency division duplex
FDMA	Frequency division multiple access
FFT	Fast Fourier transform
HD	Half-duplex
HetNet	Heterogeneous network
HSPA	High speed packet access
ICI	Inter-cell interference

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

IoT	Internet of Things
ITU	International telecommunications union
LOS	Line-of-sight
LTE	Long term evolution
LTE-A	LTE advanced
MA	Multiple access
MIMO	Multiple-input and multiple-output
MU	Mobile user
NB	NodeB
NLOS	Non-line-of-sight
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
OFDMA	Orthogonal frequency division multiple access
OMA	Orthogonal multiple access
PHY	Physical layer
QoS	Quality of service
RAN	Radio access network
RB	Resource block
RE	Resource element
RRH	Remote radio head
SC	Superposition coding
SIC	Successive interference cancellation
SINR	Signal-to-interference-plus-noise ratio
SISO	Single-input and single-output
SNR	Signal-to-noise ratio
TDD	Time division duplex
TDMA	Time division multiple access
UL	Uplink
UMTS	Universal mobile telephone system
ZF	Zero-forcing

Περίληψη

Τα σημερινά ασύρματα δίκτυα κατανέμουν τους πόρους τους χρησιμοποιώντας την αρχή της ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (orthogonal multiple access OMA). Ωστόσο, καθώς ο αριθμός των χρηστών συνεχώς αυξάνεται, οι προσεγγίσεις που βασίζονται στην τεχνική OMA ενδέχεται να μην ικανοποιούν τις αυξανόμενες απαιτήσεις, όπως η εξαιρετικά υψηλή φασματική απόδοση, η πολύ χαμηλή καθυστέρηση και η μαζική συνδεσιμότητα συσκευών [1]. Σε αυτό το πλαίσιο, η αρχή της μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (non-orthogonal multiple access NOMA) αναδεικνύεται ως μια πολλά υποσχόμενη λύση, προσφέροντας τη δυνατότητα βελτίωσης της φασματικής απόδοσης, επιτρέποντας ταυτόχρονα ένα ορισμένο βαθμό παρεμβολών πολλαπλής πρόσβασης στους δέκτες. Επιπρόσθετα, η τεχνολογία multiple-input multiple-output (MIMO), από την άλλη πλευρά, ενισχύει την απόδοση του δικτύου μέσω της χρήσης πολλαπλών κεραιών τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Αυτή η τεχνολογία προσφέρει σημαντική βελτίωση στην ποιότητα του σήματος και της γενικής απόδοσης του συστήματος, επιτρέποντας την παράλληλη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων μέσω της ίδιας συχνότητας. Η συνδυασμένη εφαρμογή της τεχνικής NOMA με την τεχνολογία MIMO προσφέρει ισχυρές δυνατότητες ενίσχυσης της φασματικής αποδοτικότητας και της συνολικής απόδοσης του δικτύου. Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης NOMA, βελτιώνει τη χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος, ενώ η MIMO ενισχύει την ικανότητα μεταφοράς δεδομένων και τη μείωση της καθυστέρησης. Μαζί, αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν τη διαχείριση περισσότερων χρηστών και την επίτευξη καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας, ακόμη και σε συνθήκες έντονου φορτίου και υψηλής πυκνότητας χρηστών. Σε αυτή την διπλωματική εργασία, αναλύουμε την αλληλεπίδραση των τεχνολογιών NOMA και MIMO, παρουσιάζοντας τις βελτιώσεις που προσφέρουν στην απόδοση των ασύρματων δικτύων και συγκρίνουμε τις επιδόσεις τους με εκείνες των παραδοσιακών προσεγγίσεων OMA [2].

Λέξεις Κλειδιά: non-orthogonal-multiple-access (NOMA), orthogonal-multiple-access (OMA), multiple-input multiple-output (MIMO)

Abstract

Today's wireless networks allocate resources using the principle of Orthogonal Multiple Access (OMA). However, as the number of users increases, OMA-based approaches may struggle to meet the rising demands for ultra-high spectral efficiency, very low latency, and massive device connectivity [1]. In this context, the principle of Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) emerges as a promising solution, offering the potential to improve spectral efficiency while tolerating a certain level of multiple access interference at the receivers. Additionally, Multiple Input Multiple Output (MIMO) technology enhances network performance by using multiple antennas at both the transmitter and receiver. This technology significantly improves signal quality and overall system performance by enabling multiple data streams to be transmitted in parallel over the same frequency. The combined application of NOMA with MIMO presents powerful opportunities to enhance spectral efficiency and overall network performance. More specifically, NOMA optimizes the use of available radio spectrum, while MIMO increases data throughput and reduces latency. Together, these technologies enable the management of more users and achieve better quality of service, even under heavy load and high user density. This thesis analyzes the interaction between NOMA and MIMO technologies, highlighting the improvements they bring to wireless network performance and comparing their performance with traditional OMA approaches [2].

Keywords: non-orthogonal-multiple-access (NOMA), orthogonal-multiple-access (OMA), multiple-input multiple-output (MIMO)

1

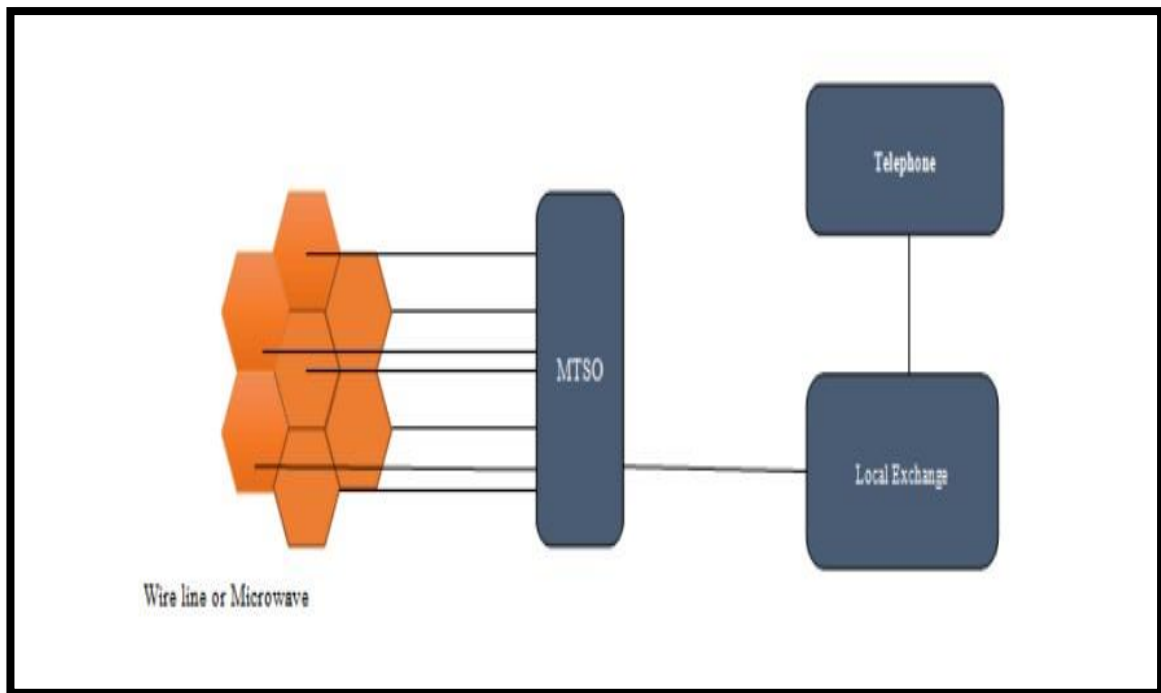
Εισαγωγή

Η τεχνική non-orthogonal multiple access (NOMA), ως η πιο πρόσφατη τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης, θεωρείται βασικό συστατικό των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 6G. Ο συνδυασμός της τεχνικής NOMA με την multiple-input and multiple-output (MIMO) έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του φάσματος και να παρέχει καλύτερες ασύρματες υπηρεσίες σε περισσότερους χρήστες. Συγκεκριμένα, ο συνδυασμός των τεχνολογιών NOMA και MIMO αποτελεί μια από τις πιο καινοτόμες προσεγγίσεις στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 6G, με στόχο την ενίσχυση της αποδοτικότητας του φάσματος και τη βελτίωση της ποιότητας των ασύρματων υπηρεσιών [1]. Το NOMA επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών στην ίδια συχνότητα, διαφοροποιώντας τους με βάση τη ισχύ του σήματος, ενώ το MIMO αξιοποιεί τις πολλαπλές κεραίες για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος μέσω της ταυτόχρονης μετάδοσης πολλαπλών ροών δεδομένων. Ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνολογιών, γνωστός ως MIMO-NOMA, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η αυξημένη φασματική αποδοτικότητα και η δυνατότητα εξυπηρέτησης περισσότερων χρηστών με καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Ωστόσο, η υλοποίηση του MIMO-NOMA συνοδεύεται από μια σειρά τεχνικών προκλήσεων, όπως η διαμόρφωση της δέσμης σήματος, η ομαδοποίηση των χρηστών και η κατανομή ισχύος, καθώς και η διασφάλιση της σταθερότητας της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (SIC). Παρά τις δυσκολίες, η ερευνητική κοινότητα δείχνει ότι η τεχνολογία MIMO-NOMA έχει τη δυνατότητα να ενσωματωθεί αποτελεσματικά με άλλες τεχνολογίες, όπως το millimetre wave (mmWave), προσφέροντας έτσι νέες δυνατότητες για τη μελλοντική ανάπτυξη των δικτύων 5G και πέρα αυτών [3].

1.1 Εξέλιξη των Κυψελωτών δικτύων: Από το 1G έως το 5G

Η έλευση των κυψελωτών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων πρώτης γενιάς (1G) σηματοδότησε μια ριζική αλλαγή στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, χαρίζοντας στους χρήστες την δυνατότητα να πραγματοποιούν και να λαμβάνουν φωνητικές κλήσεις εν κινήσει. Αναφορικά με την αρχιτεκτονική των κυψελωτών δικτύων πρώτης γενιάς, αυτά οργανώνονταν σε μικρές γεωγραφικές περιοχές, γνωστές ως κυψέλες, καθεμία με τον δικό της σταθμό βάσης για τη διαχείριση της επικοινωνίας. Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε σε αυτά τα δίκτυα, ήταν η αναλογική διαμόρφωση συχνότητας (FM) και το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων ήταν χωρισμένο σε μπάντες ή κανάλια (channels) των 30 kHz. Κάθε μεμονωμένος χρήστης καταλάμβανε ολόκληρο το κανάλι κατά τη διάρκεια της κλήσης του, διασφαλίζοντας αποκλειστική χρήση της συχνότητας για αδιάλειπτη και σταθερή επικοινωνία, αλλά περιορίζοντας σημαντικά τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου και την εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών ταυτόχρονα. Προκειμένου να υποστηριχθεί μια ευρεία περιοχή κάλυψης, είχε προταθεί η τεχνική επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, όπου τα ίδια κανάλια συχνότητας επιτρεπόταν να επαναχρησιμοποιηθούν από άλλους χρήστες ταυτόχρονα, αρκεί η μεταξύ τους απόσταση να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να οι παρεμβολές να παραμένανε σε χαμηλά επίπεδα [4].

Μια τυπική αρχιτεκτονική κυψελοειδούς δικτύου πρώτης γενιάς 1G απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Όπως παρατηρείτε, κάθε κελί συμβολίζεται ως εξάγωνο, καθώς η κάλυψη του κάθε σταθμού δεν ήταν ομοιόμορφη λόγω της τοπολογίας. Το γραφείο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (mobile telephone switching office (MTSO) συνδέεται με τους σταθμούς βάσης και το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής (public switched telephone network (PSTN)). Αναφορικά με το MTSO ήταν υπεύθυνο για λειτουργίες όπως, δρομολόγηση κλήσεων, εγγραφή χρηστών στο δίκτυο, αυθεντικοποίηση χρηστών κ.λπ. Όσον αφορά το PSTN ήταν το δίκτυο που διασύνδεε τα κυψελωτά δίκτυα με το παραδοσιακό σταθερό τηλεφωνικό σύστημα. Τέλος να σημειωθεί ότι το κυψελωτό δίκτυο πρώτης γενιάς ήταν ένα δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος και χρησιμοποιούσε αδειοδοτημένο φάσμα για την παροχή των φωνητικών υπηρεσιών [5].



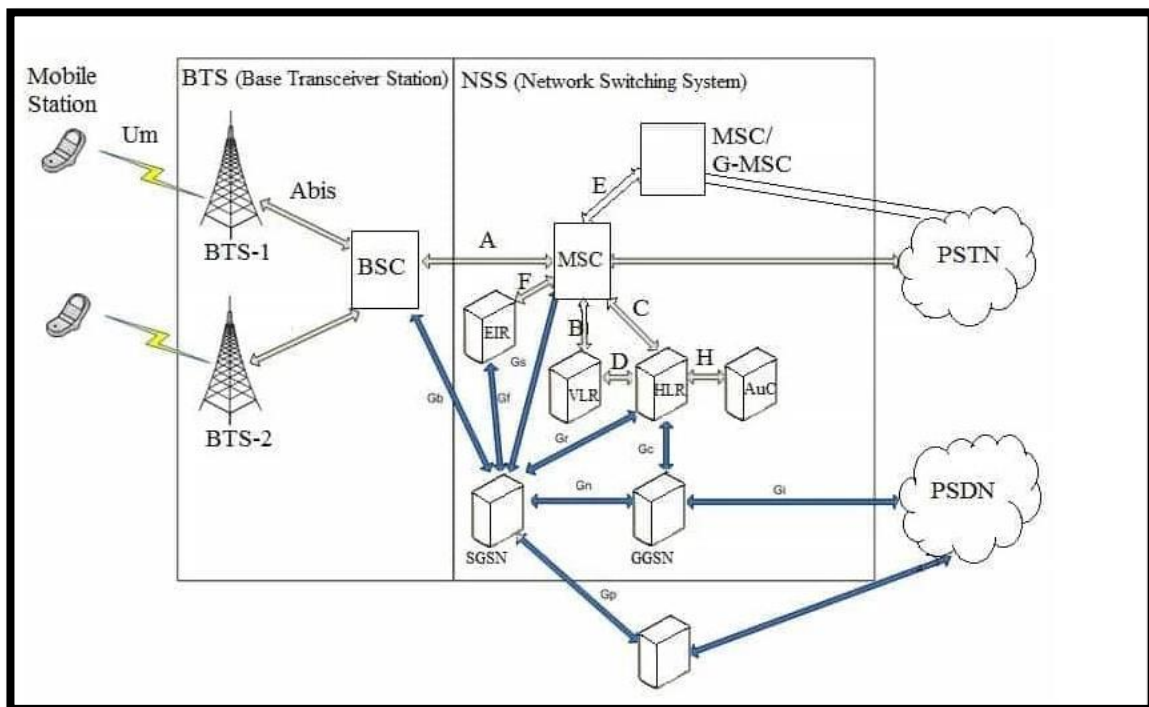
Σχήμα 1 Αρχιτεκτονική δικτύου 1G. Πηγή: [4]

Τα κυψελωτά δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G) δημιουργήθηκαν με σκοπό να επεκτείνουν τη διαθέσιμη χωρητικότητα και να προσφέρουν ολοκληρωμένες υπηρεσίες δεδομένων. Αυτή η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τεχνολογία έφερε πολλές βελτιώσεις και αλλαγές στον τομέα της κινητής τηλεφωνίας. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των 2G συστημάτων ήταν η χρήση ψηφιακής διαμόρφωσης, η οποία επέτρεψε την καλύτερη ποιότητα φωνής και ταυτόχρονα την παροχή αξιόπιστης φωνητικής επικοινωνίας. Επιπλέον, τα 2G συστήματα υποστήριζαν την ανταλλαγή δεδομένων μέσω των υπηρεσιών σύντομων μηνυμάτων (SMS). Αυτή η νέα δυνατότητα έδωσε στους χρήστες τη δυνατότητα να στέλνουν και να λαμβάνουν σύντομα γραπτά μηνύματα. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των 2G συστημάτων ήταν η ενσωμάτωση της κρυπτογράφησης για την ασφάλεια των επικοινωνιών. Αυτή η δυνατότητα πρόσφερε μεγαλύτερη προστασία των προσωπικών δεδομένων των χρηστών και συνέβαλε στην αύξηση της εμπιστοσύνης στις κινητές επικοινωνίες. Από τεχνολογικής μεριάς, τα 2G συστήματα εισήγαγαν επίσης την αλλαγή από την τεχνολογία FDMA (διαίρεση συχνότητας) στην τεχνολογία TDMA (διαίρεση χρόνου). Το TDMA διαιρούσε τον χρόνο σε χρονοθυρίδες, επιτρέποντας σε πολλαπλούς χρήστες να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι συχνότητας.

Το μπλοκ διάγραμμα αρχιτεκτονικής του δικτύου δεύτερης γενιάς απεικονίζεται στο Σχήμα 2. Όπως παρατηρείτε, αποτελείται από διάφορα σημαντικά στοιχεία όπως είναι οι επίγειοι σταθμοί βάσης αποτελούμενοι από δύο κύρια μέρη: τον σταθμό βάσης (Base transceiver stations BTS) και

τον ελεγκτή σταθμού βάσης (Base station controller BSC). Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο του δικτύου είναι το υποσύστημα λειτουργίας και υποστήριξης (Operation and support subsystem OSS) το οποίο είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και την παρακολούθηση του συνολικού δικτύου. Βασικό στοιχείο της υποδομής είναι επίσης το Mobile Switching Centre (MSC), το οποίο εκτελεί λειτουργίες όπως εγγραφή χρηστών, έλεγχο ταυτότητας καθώς και έναρξη και δρομολόγηση κλήσεων.

Το υποσύστημα Home Location Register (HLR) είναι μια βάση δεδομένων με πληροφορίες συνδρομητών, ενώ το υποσύστημα Gateway Mobile Switching Center (GMSC) λαμβάνει πληροφορίες συνδρομητών από το HLR για τη δρομολόγηση κλήσεων στο κατάλληλο MSC. Τέλος, το υποσύστημα Serving GPRS support node (SGSN) είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση πακέτων δεδομένων και τη διαχείριση κινητικότητας.

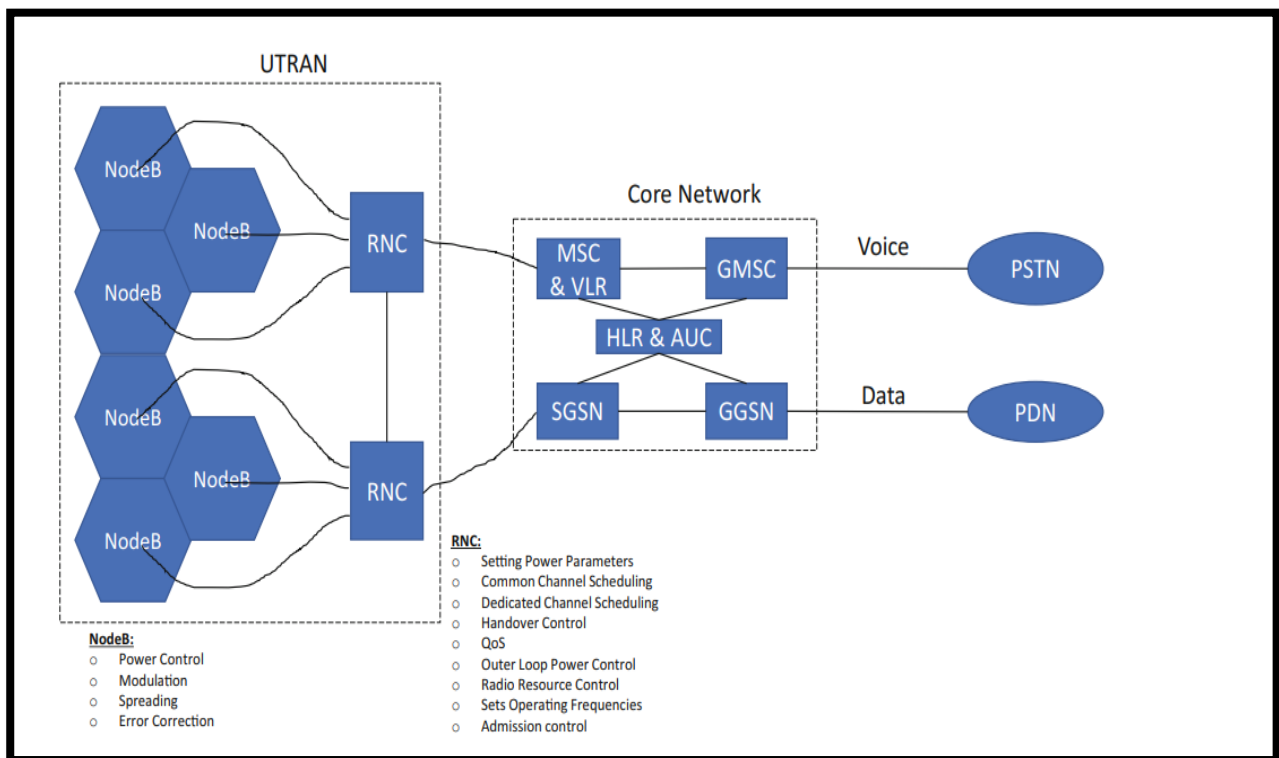


Σχήμα 2 Αρχιτεκτονική δικτύου 2G. Πηγή: [4]

Τα κυψελωτά δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) αναπτύχθηκαν με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας των χρηστών και την αντιμετώπιση της αυξανόμενης ανάγκης για μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων. Αυτή η τεχνολογία έφερε επανάσταση επιτρέποντας στους χρήστες να σερφάρουν στο διαδίκτυο και να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, εισάγοντας για πρώτη φορά τις εφαρμογές βίντεο στις κινητές συσκευές. Επίσης θα πρέπει να τονιστεί ότι στα 3G δίκτυα, υποστηρίζονταν τόσο οι υπηρεσίες Circuit Switched (CS) όσο και οι υπηρεσίες Packet Switched (PS), διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο την πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης στα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς εξελίχθηκε από την αποκλειστική χρήση TDMA στην υιοθέτηση CDMA (Code Division Multiple Access) ως κυρίαρχου πρωτοκόλλου. Στο CDMA, πολλοί χρήστες μπορούν να εκπέμπουν ταυτόχρονα σε ολόκληρο το εύρος ζώνης, χρησιμοποιώντας μοναδικούς κώδικες για να διαχωρίζονται τα σήματά τους. Για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και τον έλεγχο των παρεμβολών, στο σύστημα CDMA υιοθετήθηκε ένας μηχανισμός ελέγχου ισχύος με διπλό στόχο: πρώτον, τη βελτίωση της απόδοσης σε περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά τις προκλήσεις που προκύπτουν από τα πολλαπλά μονοπάτια ασύρματης μετάδοσης και δεύτερον, τον έλεγχο των παρεμβολών από πολλούς χρήστες, περιορίζοντας τις παρεμβολές που προκαλούνται από την ταυτόχρονη μετάδοση και διασφαλίζοντας την ποιότητα της σύνδεσης [4].

Η αρχιτεκτονική δικτύου 3G WCDMA φαίνεται στο Σχήμα 3 και περιλαμβάνει σημαντικές αλλαγές σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές. Συγκεκριμένα, το NodeB αντικαθιστά τις λειτουργίες του BTS, ενώ ο ελεγκτής ραδιοφωνικού δικτύου (RNC - Radio Network Controller) αντικαθιστά τις λειτουργίες του BSC. Το επίγειο δίκτυο ραδιοπρόσβασης UMTS (UTRAN - UMTS Terrestrial Radio Access Network) αποτελείται από ομάδες NodeB και RNC, εξασφαλίζοντας βελτιωμένη απόδοση και μεγαλύτερη χωρητικότητα για την παροχή υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς [6].



Σχήμα 3 Αρχιτεκτονική δικτύου 3G. Πηγή: [4]

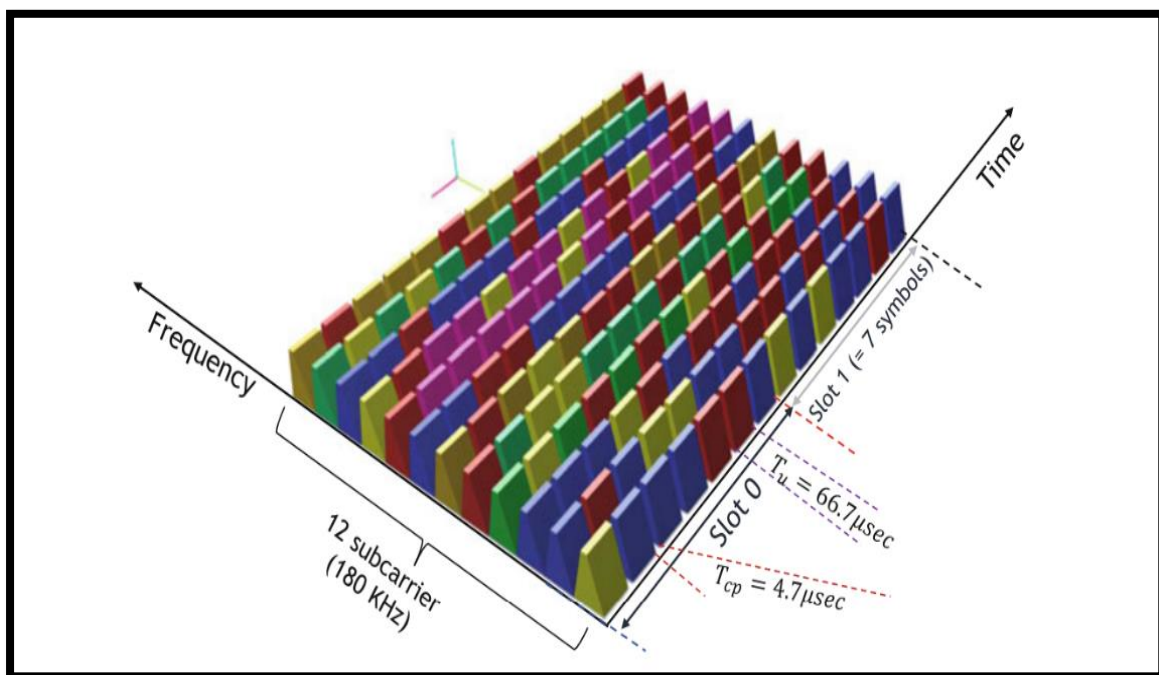
Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι τα πρότυπα κινητής τηλεφωνίας 3G που αναπτύχθηκαν παγκοσμίως περιλαμβάνουν τα WCDMA και CDMA2000, τα οποία διαφέρουν ελάχιστα στις τεχνικές τους προδιαγραφές:

- **WCDMA (ονομάζεται επίσης UMTS):**
 - Ψηφιακή διαμόρφωση: QPSK, 16-QAM, 64-QAM
 - FDD/TDD
 - Εύρος ζώνης καναλιού: 5 MHz
 - Διάρκεια frame: 10 ms
 - Ρυθμοί δεδομένων έως 1 Mbps
 - Καθορίζεται από τον οργανισμό προτύπων 3GPP
- **CDMA2000:**
 - Ψηφιακή διαμόρφωση: QPSK, 16-QAM, 64-QAM
 - FDD
 - Εύρος ζώνης καναλιού: $1,25 \text{ MHz} \times 3$
 - Διάρκεια frame: 10 ms
 - Ρυθμοί δεδομένων έως 1 Mbps
 - Καθορίζεται από τον οργανισμό προτύπων 3GPP

Η έλευση των κυψελωτών δικτύων τέταρτης γενιάς (4G) σηματοδότησε μια ριζική μεταμόρφωση στον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούμε με το διαδίκτυο. Με ταχύτητες που φτάνουν έως και 1 Gbps, η ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας, η λήψη και αποστολή μεγάλων αρχείων, καθώς και η χρήση εφαρμογών υψηλού εύρους ζώνης, έγιναν πλέον πραγματικότητα, βελτιώνοντας σημαντικά την εμπειρία χρήστη και διευκολύνοντας την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών και υπηρεσιών.

Σε αυτό το στάδιο της εξέλιξης των κυψελοειδών συστημάτων, η βιομηχανία κατέληξε σε ένα ενιαίο πρότυπο, το Long Term Evolution (LTE). Το σύστημα LTE βασίζεται στην τεχνολογία Orthogonal frequency-division multiple access (OFDMA), όπου το χρονικό διάστημα μετάδοσης (TTI) μειώθηκε από 2 ms (όπως στο σύστημα 3G) σε 1 ms. Αυτή η μείωση του TTI βελτίωσε την απόδοση, επιτρέποντας ταχύτερη αντίδραση στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του καναλιού και τη χρήση πιο αποδοτικών αλγορίθμων προγραμματισμού. Επιπλέον, οι επιλογές εύρους ζώνης επεκτάθηκαν σε 1.4, 3.5, 10, 15 και 20 MHz, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία [4].

Όσον αφορά την OFDMA τεχνολογία, οι χρήστες πολυπλέκονται τόσο στον τομέα συχνότητας όσο και στον τομέα του χρόνου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4 Σχήμα 5. Η μονάδα εκχώρησης στα LTE συστήματα είναι τα λεγόμενα μπλοκ φυσικών πόρων (physical resource block (PRB)). Ένα PRB αποτελείται από 12 sub-carriers με 7 σύμβολα OFDM, συνολικά 84 σύμβολα διαμόρφωσης. Η ελάχιστη κατανομή PRBs σε έναν μεμονωμένο χρήστη κατά τη διάρκεια ενός υποπλαισίου (1 ms) είναι 2 PRB. Με αυτόν τον τρόπο, ένας χρήστης θα λάβει συνολικά 168 σύμβολα διαμόρφωσης. Ωστόσο, δεν χρησιμοποιούνται και τα 168 σύμβολα για τη μετάδοση ωφέλιμης πληροφορίας, κάποια από αυτά χρησιμοποιούνται για συγχρονισμό ή ως πιλοτικά σύμβολα για την εκτίμηση καναλιών. Επίσης, κάθε PRB περιέχει 12 sub-carriers, άρα έχει εύρος ζώνης $12 \times 15 \text{ kHz} = 180 \text{ kHz}$. Στο παράδειγμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 4 λαμβάνεται υπόψη η ψηφιακή διαμόρφωση QPSK, όπου συνολικά υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά σύμβολα, αντιπροσωπευόμενα από τέσσερα διαφορετικά χρώματα. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο πόρου (resource element, RE) και μεταφέρει δύο bits [7].



Σχήμα 4 OFDM σήμα για LTE συστήματα. Πηγή: [4]

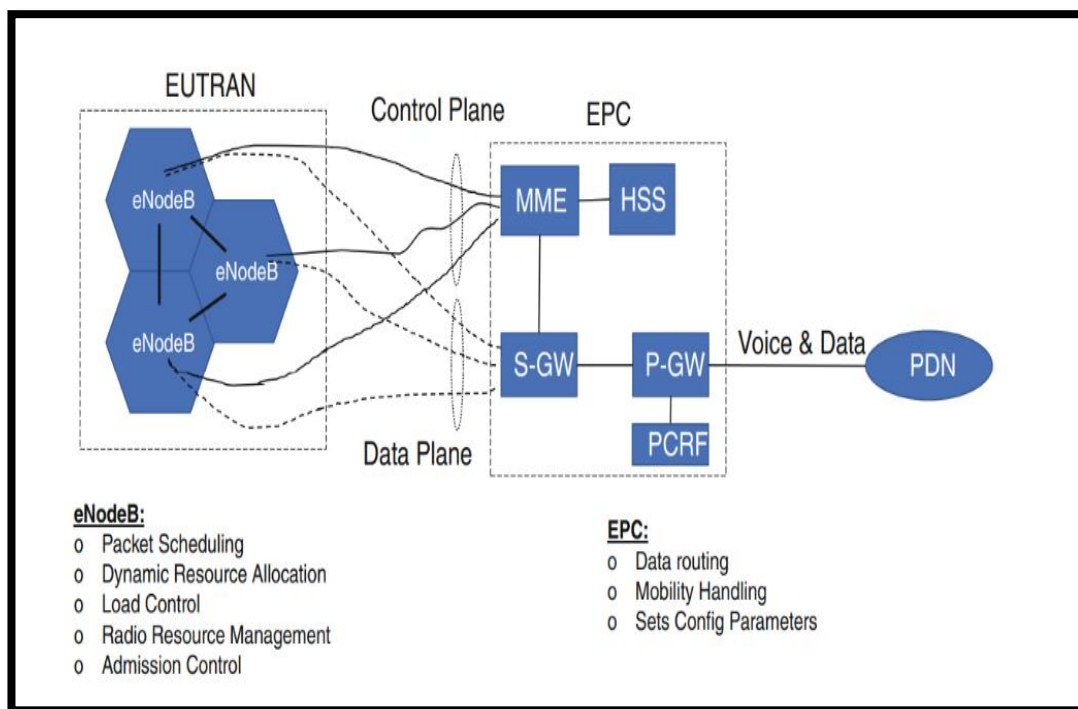
Αναφορικά με την αρχιτεκτονική των 4G δικτύων (Σχήμα 5), τα LTE-Advanced συστήματα υιοθετούν μια ενιαία προσέγγιση, απλοποιώντας την ανάπτυξη και τη λειτουργία σε σύγκριση με προηγούμενες γενιές κινητής τηλεφωνίας. Ο πυρήνας του συστήματος βασίζεται σε δύο κύρια στοιχεία:

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

Evolved Packet Core (EPC): Το EPC διαχειρίζεται την επικοινωνία δεδομένων και φωνής, διασφαλίζοντας αξιόπιστη και αποτελεσματική μεταφορά πληροφοριών από άκρο σε ακρό.

Evolved NodeB (eNodeB): Η αναβαθμισμένη έκδοση του NodeB, αναλαμβάνει την επικοινωνία με τα κινητά τερματικά, (τα οποία στην βιβλιογραφία αναφέρονται ως User equipment (UE)) και τη διαχείριση της πρόσβασης στο δίκτυο.

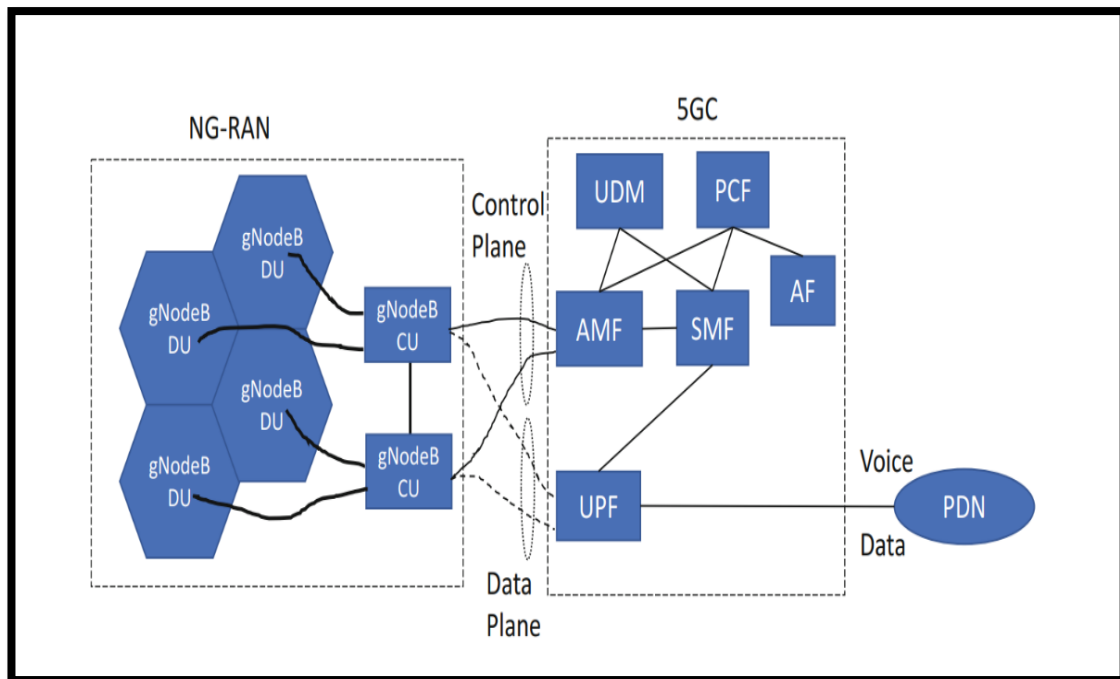
Αυτά τα δύο στοιχεία, αποτελούν το EUTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network), το δίκτυο ραδιο-πρόσβασης των LTE-Advanced συστημάτων. Επίσης η σύνδεση μεταξύ του EUTRAN και του EPC χρησιμοποιεί διαφορετικά σήματα για τον έλεγχο και για τη μεταφορά δεδομένων. Αυτό επιτρέπει να αναβαθμίζεται και να αναπτύσσεται το δίκτυο πιο εύκολα και αποτελεσματικά.



Σχήμα 5 Αρχιτεκτονική δικτύου 4G. Πηγή: [4]

Το Σχήμα 6 απεικονίζει το μπλοκ διάγραμμα της αρχιτεκτονικής των 5G δικτύων. Σε σύγκριση με το 4G, το 5G υιοθετεί μια ριζικά διαφορετική δομή, με στόχο την ευελιξία, την επεκτασιμότητα και την υποστήριξη ενός ευρέος φάσματος υπηρεσιών. Όπως παρατηρείτε από το παρακάτω σχήμα, το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης επόμενης γενιάς (next-generation radio access network NG-RAN) αποτελείται από κατανεμημένες μονάδες (distributed unit DU) και μια κεντρική μονάδα (centralized unit CU). Επίσης ο επίγειος σταθμός βάσης gNodeB αντικατέστησε τον επίγειο σταθμό βάσης 5^{ης} γενιάς eNodeB [4].

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών



Σχήμα 6 Αρχιτεκτονική δικτύου 5G. Πηγή: [4]

Συνοπτικά τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν τον πυρήνα του 5G (5GC) είναι τα εξής [8]:

- **Λειτουργία Διαχείρισης Πρόσβασης και Κινητικότητας (Access and mobility management function AMF):** Υπεύθυνη για την κρυπτογράφηση, τη διαχείριση της κινητικότητας, τον έλεγχο ταυτότητας και την εξουσιοδότηση χρηστών.
- **Λειτουργία Διαχείρισης Περιόδου Σύνδεσης (Session management function (SMF):** Ασχολείται με την εκχώρηση και διαχείριση των διευθύνσεων IP στους χρήστες, την επιλογή και τον έλεγχο των λειτουργιών στο επίπεδο χρηστών, και τέλος τη διαχείριση της περιαγωγής.
- **Ενοποιημένη Διαχείριση Δεδομένων (Unified data management UDM):** Διαχειρίζεται τις συνδρομές, τα δεδομένα των χρηστών, καθώς και την Κινητικότητα των χρηστών.
- **Λειτουργία Ελέγχου Πολιτικής (Policy control function PCF):** Καθορίζει και εφαρμόζει κανόνες πολιτικής για τις λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου.
- **Λειτουργία Επιπέδου Χρήστη (User plane function UPF):** Διαχειρίζεται το εξωτερικό σημείο διασύνδεσης στο δίκτυο δεδομένων και την ποιότητα υπηρεσίας (QoS) στο επίπεδο χρηστών.

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

- **Λειτουργία Εφαρμογής (Application function AF):** Αλληλεπιδρά με το πλαίσιο πολιτικής για τον έλεγχο και την εφαρμογή πολιτικών.

Τα δίκτυα 5G οφείλουν να υπερβούν αισθητά τις δυνατότητες και την απόδοση των 4G δικτύων καθώς απλές βελτιώσεις δεν αρκούν για να δικαιολογήσουν τις σημαντικές επενδύσεις που απαιτούνται από τους παρόχους για την ανάπτυξη υπηρεσιών 5G. Οι κρίσιμοι παράγοντες που οδηγούν στο 5G είναι ακόλουθοι:

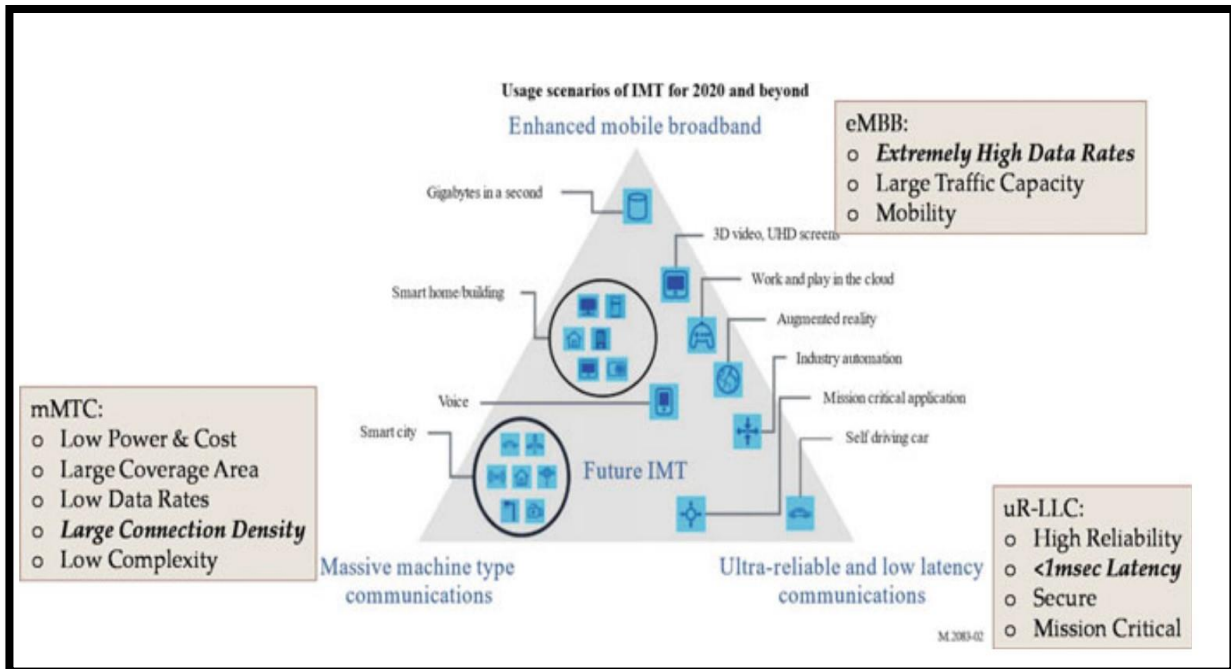
- **Αυξημένες Ταχύτητες Δεδομένων:** Οι χρήστες απαιτούν ταχύτερη λήψη και αποστολή δεδομένων, όπως streaming υψηλής ευκρίνειας και λήψη μεγάλων αρχείων.
- **Αυξημένη Χωρητικότητα Συστήματος:** Πρέπει να υποστηριχθεί ένας τεράστιος αριθμός συσκευών που συνδέονται ταυτόχρονα στο δίκτυο.
- **Τεράστιος Αριθμός Συνδέσεων:** Το 5G θα φέρει online δισεκατομμύρια συσκευές, δημιουργώντας το "Διαδίκτυο των Πραγμάτων" (IoT).
- **Ετερογενές Φάσμα Υπηρεσιών:** Το 5G θα υποστηρίξει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από απλές επικοινωνίες φωνής έως σύνθετες υπηρεσίες IoT.
- **Ευέλικτες Αναπτύξεις Εύρους Ζώνης:**
- **Ευελιξία Δικτύου:** Το δίκτυο 5G πρέπει να προσαρμόζεται στις εκάστοτε ανάγκες, προσφέροντας διαφορετικά επίπεδα ταχύτητας και χωρητικότητας. Επίσης οφείλει να είναι εύκολα αναβαθμιζόμενο και προσαρμόσιμο σε νέες τεχνολογικές απαιτήσεις.
- **Ενεργειακή Απόδοση δικτύου:** Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι απαραίτητη για βιώσιμη ανάπτυξη.

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union ITU) όρισε τις βασικές κατηγορίες υπηρεσιών 5G με ένα τρίγωνο όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 7. Κάθε γωνία του τριγώνου αντιπροσωπεύει μια ξεχωριστή κατηγορία με μοναδικά χαρακτηριστικά και εφαρμογές:

- **Enhanced mobile broadband (eMBB):** Προσφέρει ταχύτερες ταχύτητες, χαμηλότερο χρόνο απόκρισης και αυξημένη χωρητικότητα δικτύου για βελτιωμένη εμπειρία, streaming και online παιχνίδια.
- **Massive machine to machine communication (mMTC):** Εστιάζει στη σύνδεση δισεκατομμυρίων συσκευών μεταξύ τους, δημιουργώντας το "Διαδίκτυο των Πραγμάτων" (IoT). Αυτό θα οδηγήσει σε βελτιωμένη αποδοτικότητα σε διάφορους τομείς και θα δημιουργήσει νέες εφαρμογές.

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

- **Ultra-reliable low-latency communications (URLLC)**: Παρέχει εξαιρετικά αξιόπιστες και άμεσες συνδέσεις για εφαρμογές κρίσιμου χρόνου, όπως η χειρουργική εξ αποστάσεως και η αυτόνομη οδήγηση.



Σχήμα 7 IMT-2020 σενάρια χρήσης. Πηγή: [4]

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης που έχουν χρησιμοποιηθεί από την 1η έως και την 5η γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας (1G έως 5G). Ο πίνακας αποτυπώνει τις διάφορες μεθόδους που επιτρέπουν την ταυτόχρονη πρόσβαση πολλαπλών χρηστών στο δίκτυο, καθώς και την εξέλιξη αυτών των τεχνικών μέσα στον χρόνο. Τέλος στο Πίνακα 2 παρουσιάζεται μια σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών.

Πίνακας 1 Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης σε διάφορες γενιές δικτύων.

Γενιά Δικτύων	Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης	τεχνικές αμφιδρόμησης	Φυσικοί Ραδιοπόροι
1G	FDMA	FDD	Συχνότητα
2G	TDMA	FDD	Χρόνος
3G	CDMA	FDD/TDD	Χρόνος/Κώδικες
4G	OFDMA	FDD/TDD	Χρόνος/ Συχνότητα
5G	OFDMA	FDD/TDD	Χρόνος/ Συχνότητα

Πίνακας 2 Συγκριτικός πίνακας των τεχνολογιών

Technology	1G	2G	3G	4G	5G
Ημερομηνία έναρξης	1981	1991	2001	2010	2020
Ρυθμός δεδομένων	2Kbps	10 Kbps	384 Mbps	100 Mbps	≥ 1 Gbps
Τεχνολογία	Analog	Digital	CDMA 2000,	Wi-Max, Wi-Fi, LTE	WWWW
Δίκτυο κορμού	PSTN	PSTN	Packet N/W	Internet	Internet

1.2 Απαιτήσεις για τα δίκτυα 6^{ης} Γενιάς

Για την αποτελεσματική υποστήριξη των περιπτώσεων χρήσης και εφαρμογών που θα φέρουν ανατρεπτικές αλλαγές μετά το 2030, το σύστημα 6G θα πρέπει να προσφέρει εξαιρετική χωρητικότητα, αξιοπιστία, αποδοτικότητα και άλλα κρίσιμα χαρακτηριστικά. Όπως συμβαίνει με τις ελάχιστες απαιτήσεις του IMT-2020, οι οποίες καθορίζονται στο [9], ένα σύνολο ποσοτικών και ποιοτικών Δεικτών Απόδοσης (KPI) θα χρησιμοποιηθούν για να αποτυπωθούν οι τεχνικές προδιαγραφές του 6G. Τα περισσότερα από τα KPIs που εφαρμόζονται για την αξιολόγηση του 5G παραμένουν σχετικά όμοια και για το 6G, ωστόσο έχουν εισαχθεί και νέοι δείκτες για την αξιολόγηση των τεχνολογικών καινοτομιών του 6G.

Αξιοπιστία: Η αξιοπιστία αφορά την ικανότητα μετάδοσης ενός συγκεκριμένου όγκου κίνησης μέσα σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, με υψηλή πιθανότητα επιτυχίας. Αυτή η απαίτηση ορίζεται για την αξιολόγηση σε σενάρια χρήσης URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication). Στα δίκτυα 5G, η ελάχιστη απαίτηση για την αξιοπιστία μετριέται με πιθανότητα επιτυχίας $1-10^{-5}$ κατά τη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων 32 byte σε 1 ms, λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα του καναλιού στα άκρα της κάλυψης, σε αστικά μακροοικονομικά περιβάλλοντα ανάπτυξης. Στα συστήματα 6^{ης} γενιάς αναμένεται βελτίωση της αξιοπιστίας κατά τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους, δηλαδή $1 - 10^{-7}$ ή 99,99999%.

Εύρος ζώνης: Το εύρος ζώνης αναφέρεται στο μέγιστο συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος. Αυτό μπορεί να υποστηρίζεται είτε από έναν είτε από πολλαπλούς φορείς ραδιοσυχνοτήτων. Στο 5G, η απαίτηση για το εύρος ζώνης είναι τουλάχιστον 100 MHz, ενώ το 6G θα υποστηρίζει έως και

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

1 GHz για λειτουργία σε ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων ή ακόμα μεγαλύτερο εύρος σε επικοινωνίες τεχνολογιών THz (Terahertz) ή OWC (Optical Wireless Communication).

Ακρίβεια εντοπισμού θέσης: Η ακρίβεια εντοπισμού θέσης στο 5G είναι καλύτερη από 10 μέτρα. Ωστόσο, η υψηλότερη ακρίβεια τοποθέτησης έχει ισχυρή ζήτηση σε πολλές κάθετες και βιομηχανικές εφαρμογές, ειδικά σε εσωτερικούς χώρους όπου τα δορυφορικά συστήματα δεν παρέχουν επαρκή κάλυψη. Με την αξιοποίηση των ραδιοσυχνοτήτων THz, οι οποίες έχουν τεράστιες δυνατότητες για ακριβή εντοπισμό θέσης, η τεχνολογία 6G αναμένεται να προσφέρει ακρίβεια εντοπισμού σε επίπεδο εκατοστών (cm)

Κάλυψη: Η κάλυψη εστιάζει κυρίως στην ποιότητα του σήματος που λαμβάνεται εντός της περιοχής ενός μεμονωμένου σταθμού βάσης. Η απώλεια ζεύξης, που ορίζεται ως η συνολική απώλεια διάδοσης στη σύνδεση μεταξύ ενός τερματικού και ενός σταθμού βάσης (περιλαμβάνει τα κέρδη κεραίας, την απώλεια διάδοσης και τη σκίαση), χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της περιοχής που εξυπηρετείται από έναν σταθμό βάσης. Στα δίκτυα 6G, η έννοια της κάλυψης θα επεκταθεί σημαντικά, καθώς η κάλυψη θα είναι παγκόσμια και πανταχού παρούσα, μεταβαίνοντας από τα δισδιάστατα (2D) επίγεια δίκτυα σε τρισδιάστατα (3D) ολοκληρωμένα συστήματα που περιλαμβάνουν επίγεια, δορυφορικά και εναέρια δίκτυα.

Επικαιρότητας: Η έννοια της επικαιρότητας αναφέρεται σε μια νέα χρονική απαίτηση για τα μελλοντικά συστήματα επικοινωνίας. Αντί να επικεντρώνεται απλώς στην καθυστέρηση της παράδοσης δεδομένων, δίνει έμφαση στη φρεσκάδα των πληροφοριών που φτάνουν στον προορισμό τους. Τυπικές μετρήσεις της επικαιρότητας περιλαμβάνουν την «ηλικία της πληροφορίας» (AoI), καθώς και νεότερες παραλλαγές όπως η «ηλικία εργασίας» (AoT) και ο «συγχρονισμός ηλικίας» (AoS). Σε αντίθεση με την παραδοσιακή μέτρηση καθυστέρησης, η οποία μετρά απλώς τον χρόνο που χρειάζονται όλα τα πακέτα δεδομένων για να παραδοθούν, η επικαιρότητα δίνει προτεραιότητα στα πιο πρόσφατα δεδομένα, αγνοώντας τα παλιά.

Ασφάλεια: Η ασφάλεια και το απόρρητο είναι κρίσιμα στοιχεία για την αξιολόγηση της ασφάλειας ενός δικτύου, καθώς πρέπει να προστατεύονται η υποδομή, οι συσκευές, τα δεδομένα και τα περιουσιακά στοιχεία. Οι κύριες λειτουργίες ασφάλειας στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας περιλαμβάνουν:

- **Εμπιστευτικότητα:** Αποτρέπει την έκθεση ευαίσθητων πληροφοριών σε μη εξουσιοδοτημένα άτομα.
- **Ακεραιότητα:** Εξασφαλίζει ότι οι πληροφορίες δεν τροποποιούνται παράνομα.

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

- **Έλεγχος ταυτότητας:** Διασφαλίζει ότι τα μέρη που επικοινωνούν είναι πραγματικά αυτά που ισχυρίζονται.

Το απόρρητο, παράλληλα, αποτελεί όλο και μεγαλύτερη προτεραιότητα λόγω των ανησυχιών και των νόμων περί προστασίας δεδομένων, όπως ο Γενικός Κανονισμός για την Προστασία Δεδομένων (GDPR) στην Ευρώπη.

Κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες: Οι κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες είναι κρίσιμος παράγοντας για τη μέτρηση της οικονομικής προσιτότητας των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, επηρεάζοντας άμεσα την εμπορική επιτυχία ενός συστήματος κινητής. Οι δαπάνες των παρόχων κινητής τηλεφωνίας διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- **Κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX):** Το κόστος κατασκευής και ανάπτυξης των υποδομών επικοινωνίας.
- **Λειτουργικές δαπάνες (OPEX):** Τα κόστη για τη συντήρηση και τη λειτουργία των δικτύων.

Λόγω της πυκνότητας των σύγχρονων δικτύων, οι πάροχοι κινητής αντιμετωπίζουν σημαντικές πιέσεις λόγω υψηλού CAPEX. Παράλληλα, η επίλυση προβλημάτων, όπως αστοχίες συστημάτων, επιθέσεις στον κυβερνοχώρο και υποβάθμιση της απόδοσης, εξακολουθεί να απαιτεί χειροκίνητες παρεμβάσεις. Οι πάροχοι αναγκάζονται να διατηρούν μεγάλες επιχειρησιακές ομάδες με εξειδικευμένους διαχειριστές δικτύων, αυξάνοντας το OPEX, το οποίο σήμερα είναι τριπλάσιο από το CAPEX και συνεχίζει να αυξάνεται. Κατά τον σχεδιασμό του 6G, η μείωση των δαπανών θα είναι ένας βασικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη.

1.3 Ανερχόμενες Τεχνολογίες Επικοινωνίας 6G

1.3.1 Terahertz Communications

Οι επικοινωνίες THz αναφέρονται στη χρήση της περιοχής συχνοτήτων μεταξύ 0,1 και 10 THz [10]. Αυτές οι επικοινωνίες υπόσχονται εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων, όπως η εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα (VR/AR) και η 3D βίντεο-ροή. Επίσης, η τεχνολογία THz επιτρέπει την επικοινωνία σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα συσκευών, μειώνοντας την ανάγκη για επιπλέον σταθμούς βάσης.

1.3.2 Millimeter Wave (mmWave)

Οι κύματα χιλιοστού (mmWave) επικοινωνίες εκτείνονται σε συχνότητες από 30 GHz έως 300 GHz και είναι σε θέση να προσφέρουν πολύ υψηλές ταχύτητες δεδομένων και χαμηλές καθυστερήσεις [11]. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων σε μικρές αποστάσεις με μεγάλη ταχύτητα και μπορεί να υποστηρίξει εφαρμογές όπως η ροή πολυμέσων 4K καθώς και εφαρμογές που αφορούν τις έξυπνες πόλεις. Ωστόσο, οι mmWave συχνότητες έχουν περιορισμένη εμβέλεια και μεγαλύτερη ευαισθησία σε εμποδία, απαιτώντας πυκνότερο δίκτυο σταθμών βάσης.

1.3.3 Visible Light Communications (VLC)

Οι επικοινωνίες ορατού φωτός χρησιμοποιούν το ορατό φάσμα για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφοριών μέσω λαμπτήρων LED, καθιστώντας την ιδανική για εσωτερικούς χώρους όπου οι ραδιοσυχνότητες μπορεί να μην είναι εφικτές ή αποτελεσματικές [12]. Οι VLC προσφέρουν υψηλή χωρητικότητα και ασφάλεια, καθώς το φως δεν μπορεί να περάσει μέσα από τοίχους, περιορίζοντας την παρεμβολή.

1.3.4 Optical Wireless Communications (OWC)

Οι οπτικές ασύρματες επικοινωνίες χρησιμοποιούν το φως για τη μετάδοση δεδομένων χωρίς καλώδια. Αυτό περιλαμβάνει τεχνολογίες όπως οι οπτικές ίνες και οι VLC, οι οποίες παρέχουν υψηλές ταχύτητες και ευρεία φάση κάλυψης [13]. Οι OWC είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε περιοχές όπου οι παραδοσιακές ραδιοσυχνότητες δεν είναι πρακτικές ή αποτελεσματικές, όπως σε υπόγειες ή απομονωμένες τοποθεσίες.

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

1.3.5 *Dynamic Spectrum Management*

Η δυναμική διαχείριση φάσματος αναφέρεται στη δυνατότητα ευέλικτης κατανομής των διαθέσιμων συχνοτήτων ανάλογα με την ζήτηση και τις συνθήκες του δικτύου. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της χρήσης του φάσματος, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές και μεγιστοποιώντας την απόδοση. Ο στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι οι διαθέσιμες συχνότητες χρησιμοποιούνται αποδοτικά, προσαρμόζοντας τη χρήση τους στις πραγματικές ανάγκες του δικτύου.

1.3.6 *Intelligent Reflecting Surfaces (IRS)*

Οι έξυπνες ανακλαστικές επιφάνειες είναι τεχνολογίες που επιτρέπουν την ανακατεύθυνση και την ενίσχυση των ραδιοκυμάτων μέσω ελεγχόμενων ανακλαστικών επιφανειών [14]. Αυτές οι επιφάνειες μπορούν να βελτιώσουν την κάλυψη και την ποιότητα του σήματος, μειώνοντας την ανάγκη για πρόσθετους σταθμούς βάσης. Με την κατάλληλη τοποθέτηση και διαχείριση, οι IRS μπορούν να βελτιώσουν τη χωρητικότητα του δικτύου και να ελαχιστοποιήσουν τις παρεμβολές.

1.3.7 *Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)*

Το Massive MIMO αναφέρεται στη χρήση μεγάλου αριθμού πομποδεκτών σε σταθμούς βάσης για τη βελτίωση της χωρητικότητας και της αποδοτικότητας του δικτύου [15]. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών, βελτιώνοντας τη σήμανση και ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές. Με την εκμετάλλευση του φαινομένου της πολυπλεξίας, το Massive MIMO συμβάλλει στη συνολική απόδοση του δικτύου, ιδίως σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα χρηστών.

1.3.8 *Large-Scale Satellite Constellation*

Οι μεγάλες διαστημικές οντότητες δορυφόρων αποτελούν μια καινοτόμο τεχνολογία που έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει σημαντικά την επικοινωνία και την παρατήρηση του πλανήτη μας. Αυτές οι οντότητες περιλαμβάνουν δεκάδες ή και εκατοντάδες δορυφόρους που συνεργάζονται για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας, παρατήρησης και άλλων λειτουργιών σε παγκόσμια κλίμακα. Χρησιμοποιώντας διάφορες τροχιές—όπως γεωστατικές (GEO), ημι-γεωστατικές (MEO) και χαμηλής τροχιάς (LEO)—οι δορυφόροι είναι ικανοί να παρέχουν εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και μεγάλη χωρητικότητα, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις των σύγχρονων επικοινωνιών και των εφαρμογών Internet of Things (IoT).

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

Οι δορυφορικές επικοινωνίες προσφέρουν επίσης παγκόσμια κάλυψη, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για περιοχές με περιορισμένες ή ανύπαρκτες υποδομές, όπως αγροτικές ή απομακρυσμένες τοποθεσίες. Επιπλέον, η ευελιξία αυτής της τεχνολογίας επιτρέπει την προσθήκη νέων δορυφόρων για την αναβάθμιση ή την αντικατάσταση παλαιότερων, εξασφαλίζοντας ότι το δίκτυο παραμένει σύγχρονο και αποτελεσματικό. Με αυτόν τον τρόπο, οι μεγάλες διαστημικές ομάδες δορυφόρων αναδεικνύονται ως ένα κρίσιμο βήμα προς την κατεύθυνση της ενίσχυσης της παγκόσμιας σύνδεσης και της αποτελεσματικής διαχείρισης των πόρων του πλανήτη.

1.3.9 Digital Twin

Το Digital Twin αποτελεί μια επαναστατική τεχνολογία που έχει αρχίσει να μεταμορφώνει τον τρόπο που διαχειριζόμαστε και παρακολουθούμε φυσικά αντικείμενα, συστήματα και διαδικασίες. Πρόκειται για μια ψηφιακή αναπαράσταση ενός πραγματικού αντικειμένου που συνδυάζει δεδομένα από αισθητήρες και άλλες πηγές για να αναπαραστή με ακρίβεια την κατάσταση και τη συμπεριφορά του. Με την ικανότητα ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, τα Digital Twins επιτρέπουν την παρακολούθηση και τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων, προσφέροντας τη δυνατότητα προσομοίωσης διαφορετικών σεναρίων και εκτίμησης της συμπεριφοράς του αντικειμένου υπό διάφορες συνθήκες. Επίσης θα πρέπει να τονιστεί ότι το Digital Twin είναι σε θέση να προσφέρει αναλυτικά στοιχεία που οδηγούν σε καλύτερες στρατηγικές αποφάσεις και μειώνουν τα λειτουργικά κόστη, αυξάνοντας ταυτόχρονα την απόδοση και την ασφάλεια. Με την ενσωμάτωσή του σε σύγχρονες τεχνολογίες, όπως το IoT και η τεχνητή νοημοσύνη, η δυνατότητα του Digital Twin να εξελίσσεται και να προσαρμόζεται στις συνεχώς μεταβαλλόμενες ανάγκες των επιχειρήσεων καθιστά αυτή την τεχνολογία αναγκαία για το μέλλον της βιομηχανίας και των υπηρεσιών.

1.4 Δομή της διπλωματικής

Το δεύτερο κεφάλαιο περιγράφει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης NOMA. Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η τεχνολογία Multiple-Input Multiple-Output (MIMO). Το τέταρτο κεφάλαιο εξετάζει τις εφαρμογές της τεχνολογίας MIMO-NOMA στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, αναλύοντας τις τάσεις και τις προοπτικές κατευθύνσεις. Στο πέμπτο κεφάλαιο, συνοψίζεται η προτεινόμενη τεχνική και ο ανεπτυγμένος προσομοιωτής. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο αποτυπώνονται τα συμπεράσματα της τεχνικής λύσης και παρουσιάζονται οι μελλοντικές προοπτικές του χώρου.

2

Μη Ορθογωνική τεχνική πολλαπλής πρόσβασης NOMA

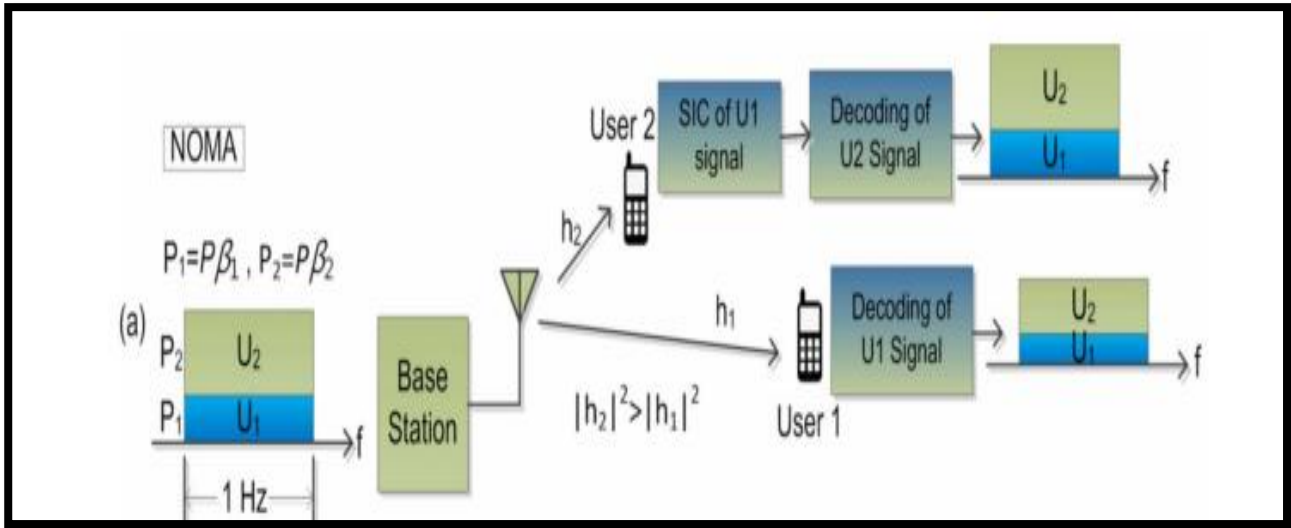
Η τεχνική NOMA αναδύεται ως υποψήφια λύση πολλαπλής πρόσβασης για τα δίκτυα 6^{ης} και μετέπειτα γενιάς. Σε σύγκριση με τις κλασσικές τεχνικές ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (orthogonal multiple access OMA), η τεχνική NOMA αξιοποιεί τα ευδιάκριτα κέρδη καναλιών των χρηστών για την πολυπλεξία διαφορετικών σημάτων σε ένα ενιαίο μπλοκ πόρων (χρόνος, συχνότητα, κώδικας) στον τομέα ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη φασματική απόδοση, καλύτερη απόδοση στα άκρα των κυψελωτών δικτύων, αυξημένη αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση [16]. Ο ευέλικτος συνδυασμός της τεχνικής NOMA με υπάρχουσες και αναδυόμενες τεχνολογίες όπως ετερογενή δίκτυα (Heterogeneous network HetNets), συστήματα πολλαπλής εισόδους πολλαπλής εξόδου (multiple-input-multiple-output MIMO), συνεργατικά επικοινωνιακά συστήματα (cooperative communication systems), τεχνικές ταυτόχρονης ασύρματης μεταφοράς πληροφορίας και ισχύος (Simultaneous wireless information and power transfer schemes SWIPT), συστήματα επικοινωνιών ορατού φωτός (Visible Light Communication VLC), αναδιαρθρώσιμες ευφυής επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces RIS), μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (unmanned aerial vehicle UAV), υποβρύχιες επικοινωνίες κ.λπ, αναμένεται να προκαλέσουν περαιτέρω βελτιώσεις στην απόδοση των δικτύων 5ης και μετέπειτα γενιάς [17].

2.1 Τεχνική NOMA στο πεδίο της Ισχύος (Power Domain NOMA)

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται μια επισκόπηση της τεχνικής NOMA στο πεδίο της ισχύος σε συστήματα κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης. Συγκεκριμένα στα συστήματα κατερχόμενης ζεύξης, ο σταθμός βάσης μεταδίδει δεδομένα προς τους χρήστες, ενώ στα συστήματα ανοδικής ζεύξης, οι χρήστες στέλνουν δεδομένα προς τον σταθμό βάσης.

Κατερχόμενη ζεύξη: Σε ένα δικτύου NOMA κατερχόμενης ζεύξης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8 ο σταθμός βάσης μεταδίδει ένα συνδυασμένο σήμα σε όλους τους χρήστες. Το συνδυασμένο αυτό

σήμα αποτελεί υπέρθεση των επιθυμητών σημάτων των χρηστών, με διαφορετικούς συντελεστές ισχύος να κατανέμονται στα επιμέρους σήματα. Αντιθέτως κάθε χρήστης, εφαρμόζει διαδοχικά την τεχνική SIC (Successive Interference Cancellation), με σκοπό την ανάκτηση του σήματος του. Η αλγοριθμική διαδικασία SIC βασίζεται στην αφαίρεση των παρεμβολών από τα σήματα των άλλων χρηστών, έως ότου απομείνει τελικά μόνο το επιθυμητό του σήμα [18].



Σχήμα 8 Εφαρμογή τεχνικής NOMA σε σενάριο κατερχόμενης ζεύξης. Πηγή: [19]

Το συνδυασμένο σήμα που εκπέμπει ο σταθμός βάσης προς τους χρήστες μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$S = \sum_{i=1}^N \sqrt{\beta_i P_s} x_i, \quad (1)$$

όπου x_i είναι το σήμα πληροφορίας του χρήστη i , P_s , είναι η ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης και β_i , είναι ο συντελεστής κατανομής ισχύος (power allocation factor) για κάθε χρήστη. Για την αποστολή του S , ο σταθμός βάσης ταξινομεί τους N χρήστες με βάση τις συνθήκες καναλιού ως εξής: $|h_1|^2 \leq |h_2|^2 \leq |h_N|^2$. Έχοντας αυτή την πληροφορία αναθέτει τους συντελεστές κατανομής ισχύος με τέτοιο τρόπο ώστε να πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις: $\beta_1 \geq \beta_2 \geq \dots \geq \beta_N$ και $\sum_{i=1}^N \beta_i = 1$. Το ληφθέν σήμα στον i -οστό χρήστη μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$y_i = h_i S + n_i \quad (2)$$

όπου n_i είναι ο γκαουσιανός προσθετικός λευκός θόρυβος (additive white Gaussian noise – AWGN) με τυπική απόκλιση σ . Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (2), ο λόγος σήματος προς τις

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

παρεμβολές συν τον θόρυβο (signal-to-interference-plus-noise ratio SINR) για τον χρήστη l , υπολογίζεται ως εξής:

$$SINR_l^{NOMA} = \frac{\beta_l \gamma |h_l|^2}{\gamma |h_l|^2 \sum_{i=1}^{l-1} \beta_i + 1}, \quad (3)$$

όπου $\gamma = P_s/\sigma^2$, είναι ο σηματοθορυβικός λόγος (signal-to-noise ratio) SNR. Με βάση την εξίσωση (3), ο επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων (achievable data rate) του l -οστού χρήστη στην κατερχόμενη ζεύξη σε ένα σύστημα NOMA μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη εξίσωση

$$R_l^{NOMA} = \log_2(1 + SINR_l^{NOMA}) \quad (4)$$

Ανερχόμενη ζεύξη: Σε ένα δίκτυο NOMA ανερχόμενης ζεύξης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 9, ο σταθμός βάσης λαμβάνει τα εκπεμπόμενα σήματα από τους χρήστες. Στη συνέχεια, η τεχνική SIC (Successive Interference Cancellation) εφαρμόζεται (στον σταθμό βάσης) για τον διαχωρισμό και τον εντοπισμό των σημάτων από τους διαφορετικούς χρήστες. Υπό την υπόθεση ότι τα κανάλια κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης είναι όμοια, και ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για την ανάθεση συντελεστών κατανομής ισχύος στους χρήστες, το λαμβανόμενο σήμα στο σταθμός βάσης μπορεί να εκφραστεί ως [18]:

$$r = \sum_{i=1}^N h_i \sqrt{\beta_i P x_i} + n, \quad (5)$$

όπου P είναι η μέγιστη ισχύς μετάδοσης που υποτίθεται ότι είναι κοινή για όλους τους χρήστες, και n είναι ο γκαουσιανός προσθετικός λευκός θόρυβος με τυπική απόκλιση σ . Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (5) καθώς της τεχνικής SIC ο λόγος SINR στην ανερχόμενη ζεύξη για το σήμα του χρήστη l , όπου $l \neq 1$ υπολογίζεται ως εξής:

$$SINR_l^{U-NOMA} = \frac{\beta_l \gamma |h_l|^2}{\gamma \sum_{i=1}^{l-1} \beta_i |h_i|^2 + 1}. \quad (6)$$

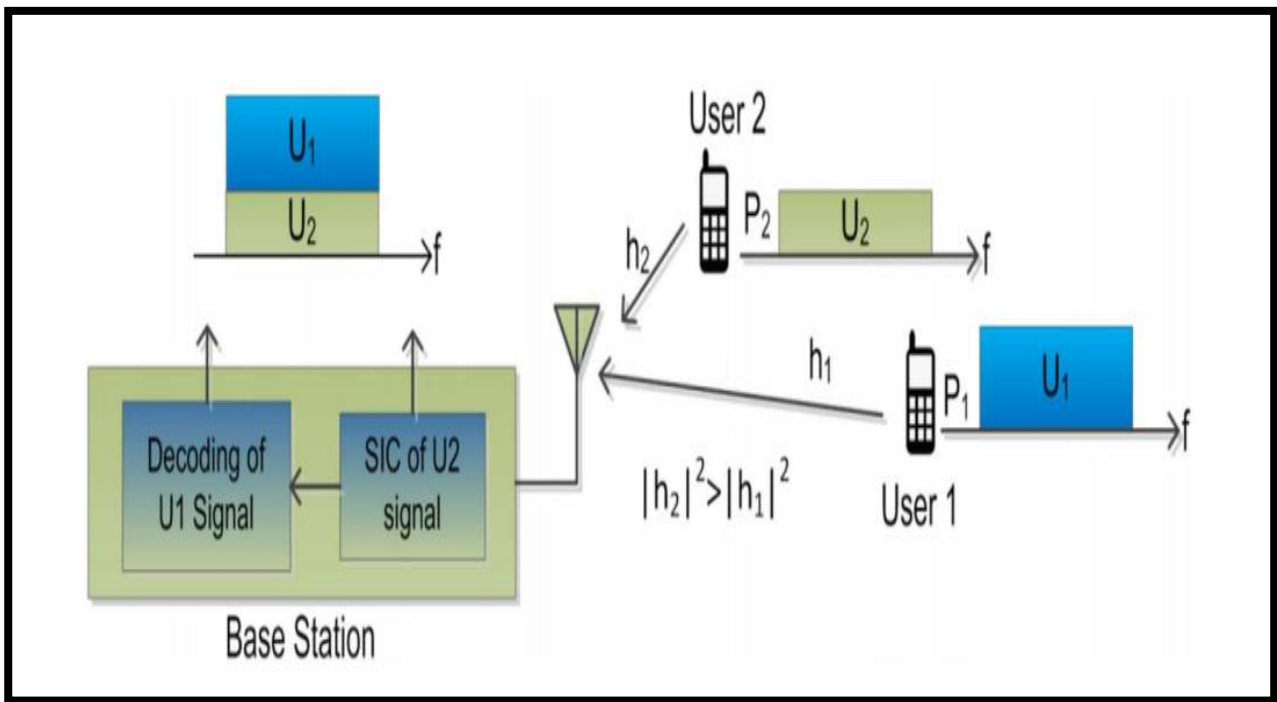
Για τον χρήστη $l=1$ υπολογίζεται ως εξής:

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

$$SINR_1^{U-NOMA} = \beta_1 \gamma |h_1|^2 \quad (7)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (6) και (7), ο επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων του συστήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{sum}^{U-NOMA} = \sum_{i=1}^N \log_2(1 + SINR_i^{U-NOMA}). \quad (8)$$

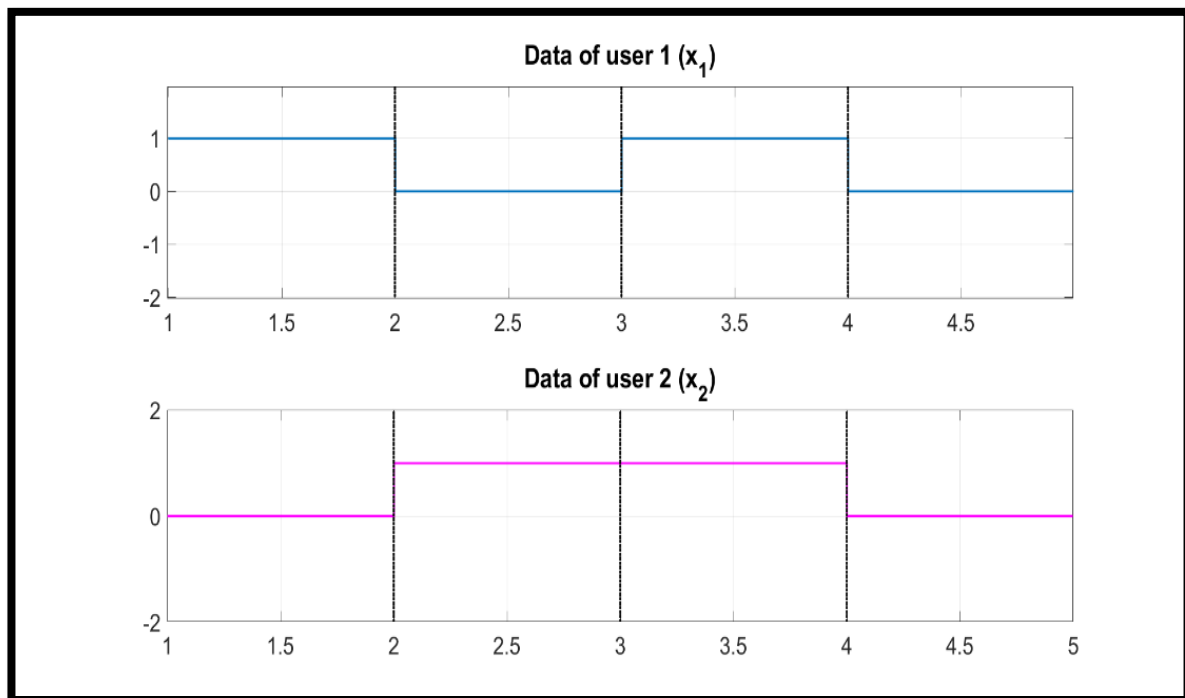


Σχήμα 9 Εφαρμογή τεχνικής NOMA σε σενάριο ανερχόμενης ζεύξης. Πηγή: [19]

2.2 Τεχνική Superposition Coding

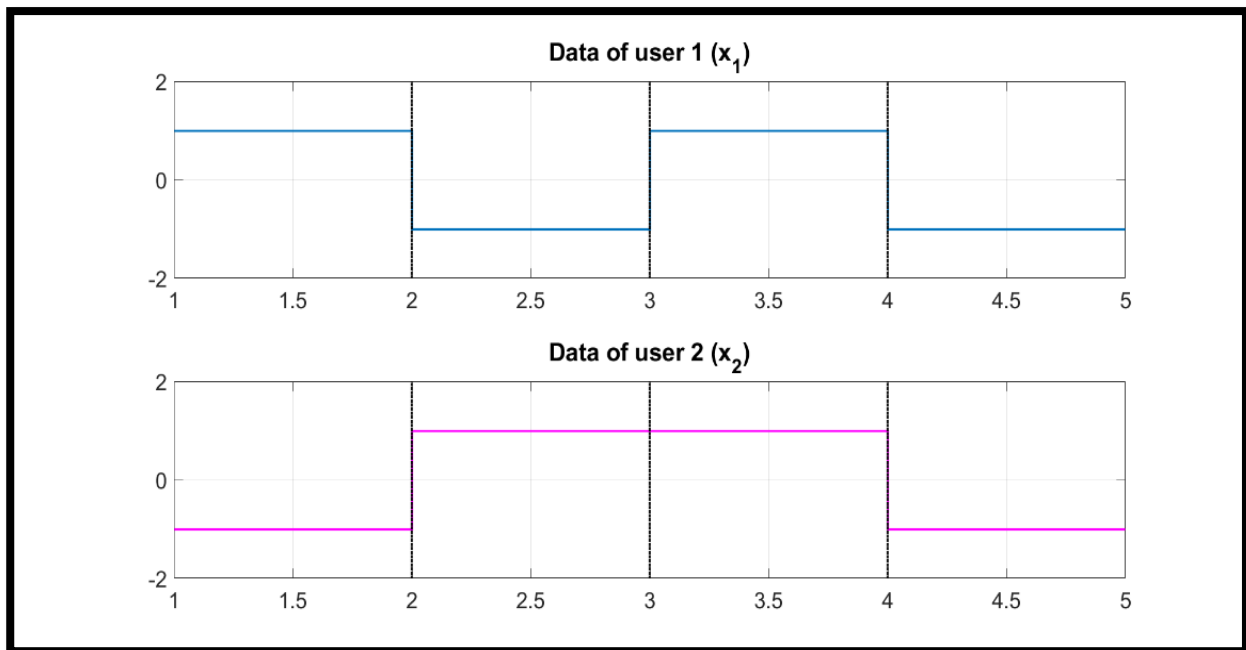
Η υπερτιθέμενη κωδικοποίηση (superposition coding), αποτελεί θεμελιώδη τεχνολογία της NOMA. Εφαρμόζεται στον πομπό και επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων από πολλούς χρήστες στο ίδιο κανάλι. Για την κατανόηση της τεχνικής θα δοθεί ένα απλό σενάριο χρήσης με δύο χρήστες, τον πρώτο χρήστη με όνομα user_1 και τον δεύτερο χρήστη με όνομα user_2. Ας υποθέσουμε ότι τα δεδομένα του user_1 συμβολίζονται με x_1 , ενώ τα δεδομένα του user_2 με x_2 . Επιπρόσθετα, υποθέτουμε ότι $x_1 = 1010$ και $x_2 = 0110$ όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών



Σχήμα 10 Γραφική απεικόνιση των x_1 και x_2 .

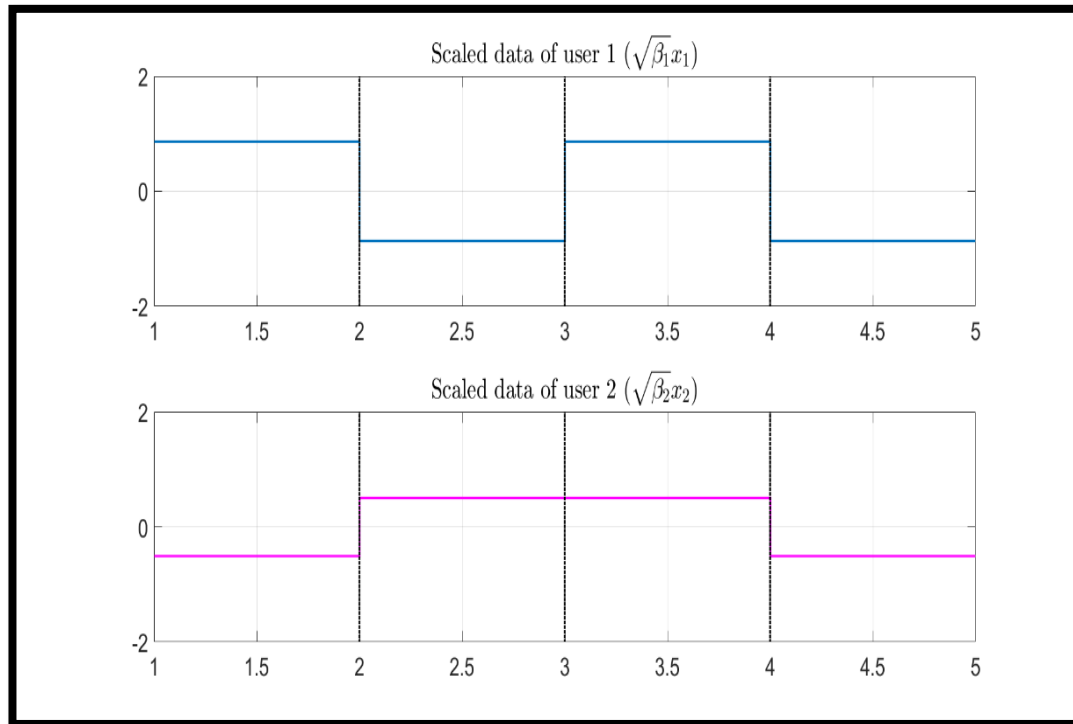
Στην συνέχεια τα δυο σήματα θα πρέπει διαμορφωθούν πριν από τη μετάδοση τους. Για να απλοποιήσουμε τη διαδικασία, χρησιμοποιούμε την ψηφιακή διαμόρφωση BPSK (Binary Phase Shift Keying). Συγκεκριμένα, η BPSK αντιστοιχίζει τα 0 σε -1 και τα 1 σε +1. Μετά τη διαμόρφωση BPSK, το x_1 αντιστοιχίζεται σε +1 -1 +1 -1 και το x_2 αντιστοιχίζεται σε -1 +1 +1 -1, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 11 Ψηφιακή διαμόρφωση σημάτων

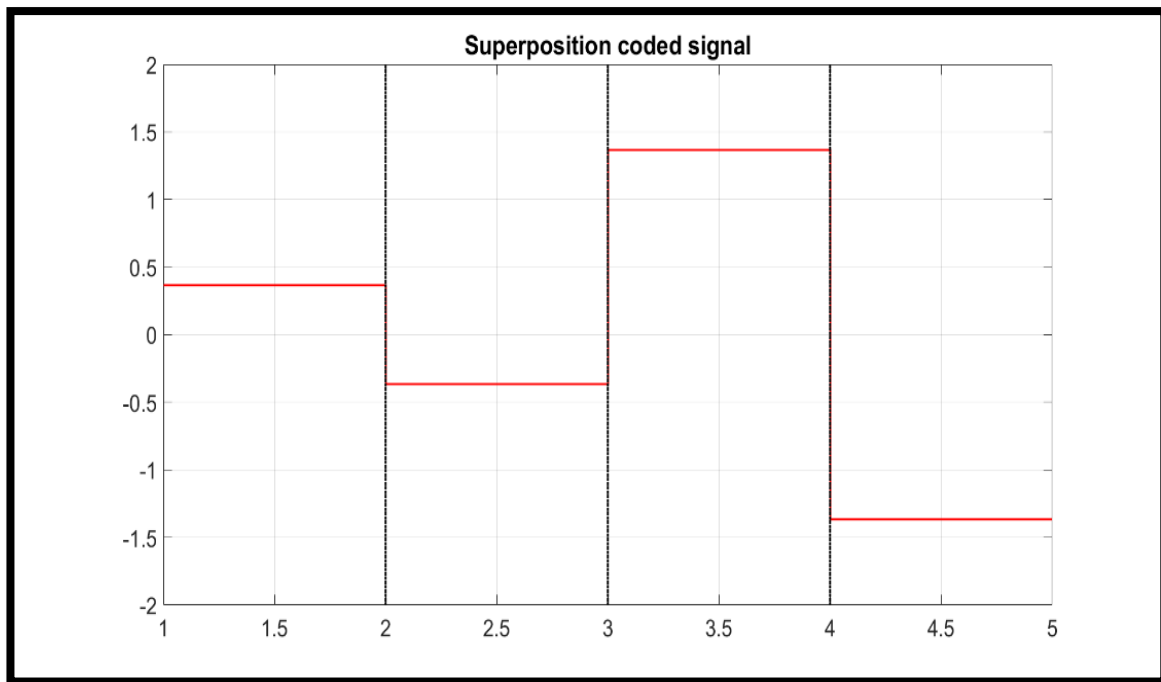
Το επόμενο βήμα αφορά την κλιμάκωση των δύο σημάτων. Ουσιαστικά τα δύο σήματα θα πολλαπλασιαστούν με διαφορετικούς συντελεστές ισχύος πριν την ένωση τους. Συγκεκριμένα το σήμα του user_1 θα πολλαπλασιαστεί με $\beta_1 = 0,75$ και του user_2 με $\beta_2 = 0,25$ αντίστοιχα. Ένας κανόνας που πρέπει να τηρηθεί είναι ότι το άθροισμα των β_1 και β_2 πρέπει να είναι ίσο με 1. Συγκεκριμένα, το πλάτος του x_1 πολλαπλασιάζεται με $\sqrt{\beta_1} = 0,866$ και το πλάτος του x_2 πολλαπλασιάζεται με $\sqrt{\beta_2} = 0,5$. Συνεπώς, μετά τον πολλαπλασιασμό, οι κλιμακωτές εκδόσεις των δεδομένων απεικονίζονται στο Σχήμα 12.

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών



Σχήμα 12 Κλιμάκωση δεδομένων

Τέλος, εφαρμόζουμε την πρόσθεση των δύο κλιμακωτών σημάτων για την ανάπτυξη του υπερτιθέμενου σήματος S (Σχήμα 13). Συνεπώς, με αυτόν τον τρόπο η τεχνική υπερτιθέμενου σήματος στη τεχνική Non-Orthogonal Multiple Access επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση σημάτων από πολλούς χρήστες στο ίδιο φάσμα, βελτιώνοντας την απόδοση και την αποδοτικότητα του δικτύου.



Σχήμα 13 Τελικό υπερτιθέμενο κωδικοποιημένο σήμα

2.3 Τεχνική *Successive Interference Cancellation*

Η μέθοδος διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC) είναι μια σημαντική λειτουργία της τεχνολογίας NOMA και εφαρμόζεται στον δέκτη. Ουσιαστικά, αποτελεί έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, μέσω του οποίου ο δέκτης αποκωδικοποιεί διαδοχικά τα σήματα των χρηστών με την χαμηλότερη ποιότητα καναλιού, μέχρι να αποκωδικοποιήσει το δικό του σήμα. Για παράδειγμα αν έχουμε ένα NOMA σύστημα με δύο χρήστες, τότε η μέθοδος SIC αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- **Βήμα 1:** Αρχικά, ο δέκτης αποκωδικοποιεί απευθείας το συνδυασμένο σήμα S προκειμένου να λάβει το σήμα που έχει πολλαπλασιαστεί με τον μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος. Για παράδειγμα, εάν το β_1 είναι μεγαλύτερο από το β_2 ($\beta_1 > \beta_2$), τότε η άμεση αποκωδικοποίηση του S θα δώσει το x_1 .
- **Βήμα 2:** Το σήμα που αποκωδικοποιήθηκε στο προηγούμενο βήμα πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο συντελεστή ισχύος και αφαιρείται από το αρχικό σήμα S . Για παράδειγμα, εάν το x_1 αποκωδικοποιήθηκε στο προηγούμενο βήμα, τότε αφαιρείται το $\sqrt{\beta_1}x_1$ από το S ως εξής: $\hat{x}_2 = S - \sqrt{\beta_1}x_1$.

- **Βήμα 3:** Το σήμα $\widehat{x}_2$ που λήφθηκε στο προηγούμενο βήμα αποδιαμορφώνεται προκειμένου να ληφθεί το σήμα x_2 του δεύτερου χρήστη.

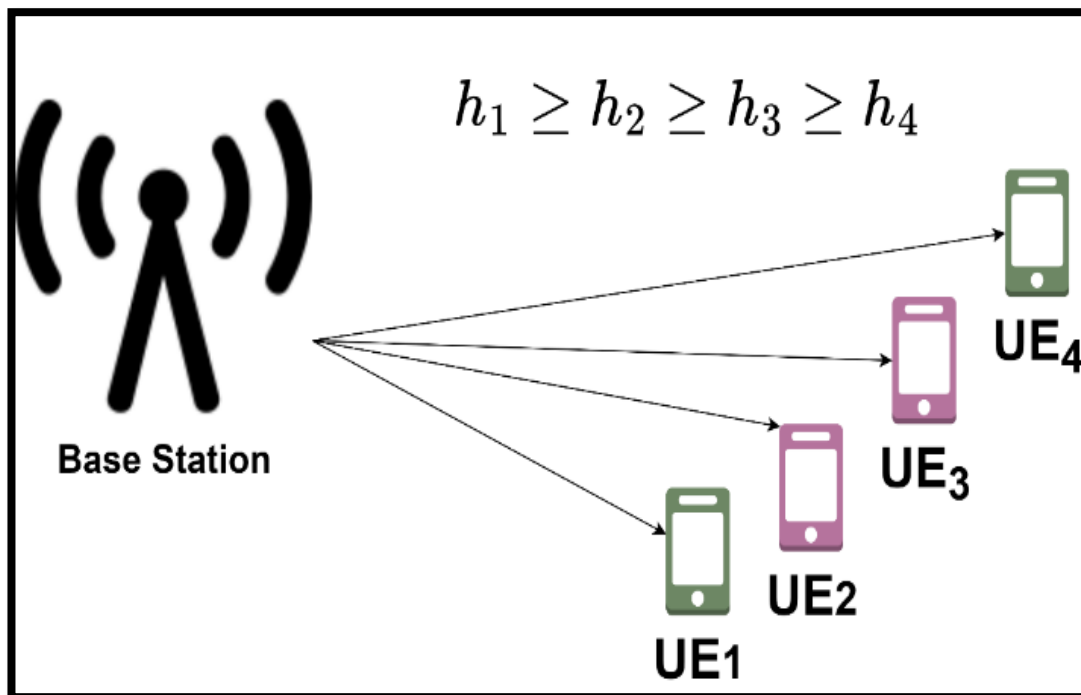
2.4 Μέθοδοι Διαχείρισης Ισχύος και Ομαδοποίησης Χρηστών

2.4.1 Ομαδοποίηση Χρηστών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην τεχνική NOMA, οι χρήστες εξυπηρετούνται ταυτόχρονα στο ίδιο κανάλι. Συνήθως όμως σε επίπεδο δικτύου, το ενεργό εύρος ζώνης B χωρίζεται σε $\frac{B}{2N}$ κανάλια, και τοποθετούνται δυο χρήστες ανά κανάλι. Με αυτόν τον τρόπο οι χρήστες εξυπηρετούνται σε ομάδες των δυο, σε αντίθεση με όλες οι τεχνικές OMA όπου αποδίδουν το κανάλι σε έναν χρήστη. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν δυο τρόποι ομαδοποίησης χρηστών:

- (i) Near-far pairing (N-F)
- (ii) Near-near, far-far pairing (N-N, F-F)

Near-far pairing (N-F): Στην N-F τεχνική ομαδοποίησης χρηστών, όλοι χρήστες ταξινομούνται σε φθίνουσα κατάταξη με βάση την ποιότητα καναλιού τους όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 14 Near-far pairing (N-F)

Συγκεκριμένα, ο χρήστης με το μεγαλύτερο κέρδος καναλιού (UE₁) ομαδοποιείται με τον χρήστη που έχει το χαμηλότερο κέρδος καναλιού (UE₄). Έπειτα ο δεύτερος χρήστης με το με μεγαλύτερο

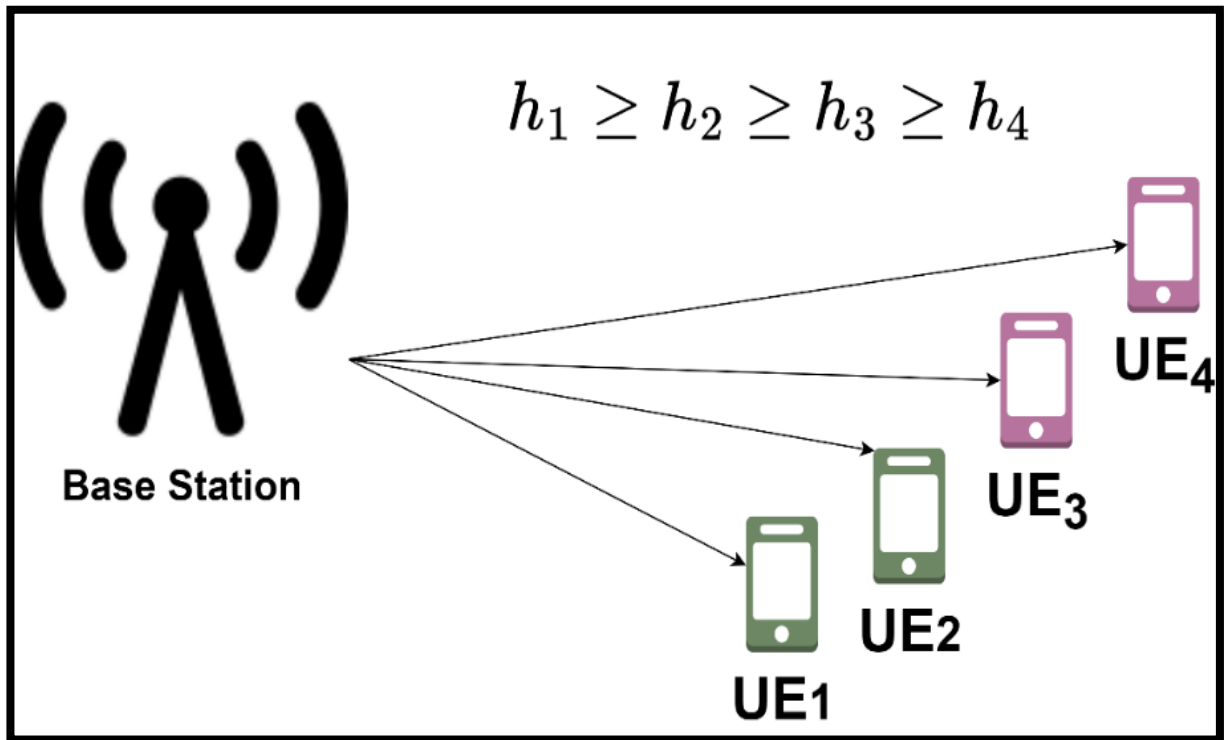
κέρδος καναλιού (UE₂) με τον δεύτερο χρήστη με το χαμηλότερο κέρδος καναλιού (UE₃), Κ.Ο.Κ. Συνεπώς σε αυτή την περίπτωση σε κάθε κανάλι τοποθετείτε ένας ισχυρός χρήστης S και ένας μη ισχυρός χρήστης W . Με αυτόν τρόπο η εξίσωση (3) για τον χρήστη W απλοποιείται ως εξής:

$$SINR_W^{NOMA} = \frac{\beta_w \gamma |h_w|^2}{\gamma \beta_s |h_w|^2 + 1} \quad (9)$$

όπου $\beta_w > \beta_s$. Για τον ισχυρό χρήστη S η εξίσωση (3) απλοποιείται ως εξής:

$$SINR_S^{NOMA} = \beta_s \gamma |h_s|^2 \quad (10)$$

Near-near, far-far pairing (N-N-F-F): Ο δεύτερος τρόπος ομαδοποίησης χρηστών είναι μέσω της τεχνικής N-N-F-F. Συγκεκριμένα στην N-N-F-F τεχνική, όλοι χρήστες ταξινομούνται σε φθίνουσα κατάταξη με βάση την ποιότητα καναλιού τους όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 15. Στην συνέχεια ο χρήστης με το μεγαλύτερο κέρδος καναλιού (UE₁) ομαδοποιείται με τον αμέσως επόμενο χρήστη (UE₂). Ακολουθώντας αυτή την στρατηγική αμέσως επόμενος χρήστης (UE₃) θα αντιστοιχιστεί με τον (UE₃) Κ.Ο.Κ



Σχήμα 15 Near-near, far-far pairing (N-N, F-F)

2.4.2 Μέθοδοι Διαχείρισης Ισχύος

Η κατανομή ισχύος (power allocation) στην τεχνική NOMA είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του δικτύου. Συγκεκριμένα, ο παράγοντας κατανομής ισχύος (power allocation factor) αφορά στον τρόπο με τον οποίο η διαθέσιμη ισχύς ενός συστήματος διατίθεται στους διάφορους χρήστες ή συσκευές σε ένα δίκτυο NOMA. Συνήθως, αυτός ο παράγοντας, μπορεί να ρυθμιστεί είτε στατικά, είτε δυναμικά ανάλογα με τις συνθήκες και τις απαιτήσεις του δικτύου. Στην πρώτη περίπτωση, συνήθως εκχωρούνται χαμηλές τιμές στους χρήστες με καλή ποιότητα καναλιού και υψηλές στους χρήστες με κακή ποιότητα καναλιού. Για παράδειγμα αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα δίκτυο NOMA με δυο χρήστες, όπου ο χρήστης A έχει καλύτερες συνθήκες καναλιού από τον χρήστη B, με $h_A \gg h_B$ τότε σε αυτό το ζευγάρι χρηστών θα ανατεθούν οι παράγοντες κατανομής ισχύος έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι εξής συνθήκες: i) $\beta_B \gg \beta_A$ και ii) $\beta_B + \beta_A = 1$. Τυπικές τιμές συνήθως είναι 0.3 με 0.7 και 0.2 με 0.8 για τον χρήστη A και τον χρήστη B αντίστοιχα. Στην δεύτερη περίπτωση ο τρόπος με τον οποίο μοιράζεται η ισχύς στους χρήστες είναι δυναμικά. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι και τεχνικές δυναμικής κατανομής ισχύος, με σκοπό την επίτευξη ενός συγκεκριμένου στόχου. Μπορεί αυτός ο στόχος να είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του δικτύου, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, και άλλα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εστιάζουμε σε ένα σχήμα κατανομής ισχύος με στόχο ο επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων σε ένα δίκτυο NOMA να είναι πάντα μεγαλύτερος από τον επιτεύξιμο ρυθμό δεδομένων σε ένα δίκτυο OMA. Για παράδειγμα αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα δίκτυο με δυο χρήστες, όπου ο χρήστης A έχει καλύτερες συνθήκες καναλιού από τον χρήστη B, με $h_A \gg h_B$ τότε οι επιτεύξιμοι ρυθμοί δεδομένων που επιτυγχάνουν οι δύο χρήστες είναι R_A^{NOMA} και R_B^{NOMA} όταν πρόκειται για NOMA δίκτυο και R_A^{OMA} και R_B^{OMA} όταν πρόκειται για OMA δίκτυο. Επομένως για επιτύχουμε τον στόχο που θέσαμε θα πρέπει να λύσουμε το ακόλουθο πρόβλημα μεγιστοποίησης:

$$\max_{\beta_A} R_A^{NOMA} + R_B^{NOMA} \quad (11)$$

$$\text{s. t } R_A^{NOMA} \geq R_A^{OMA},$$

$$R_B^{NOMA} \geq R_B^{OMA},$$

$$0 \leq \beta_A \leq 1.$$

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

Στο σημείο αυτό να διευκρινιστεί ότι ο περιορισμός που ισχύει πάντα στην τεχνική NOMA είναι $\beta_A + \beta_B = 1$. Την λύση στο παραπάνω πρόβλημα έχουν δώσει οι συγγραφείς της εργασίας [16]. Συγκεκριμένα ο βέλτιστος παράγοντας κατανομής ισχύος για τον χρήστη A είναι:

$$\beta_A = \frac{\sqrt{1 + h_B P} - 1}{h_B P} \quad (12)$$

όπου P , είναι η ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης.

2.5 Σύγκριση NOMA με OMA τεχνικές

Οι τεχνικές ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal Multiple Access OMA) δύνανται να επιτύχουν ικανοποιητική απόδοση συστήματος, λόγω της δυνατότητας αντιμετώπισης των παρεμβολών μεταξύ των χρηστών. Παρόλα αυτά, οι τεχνικές OMA, υστερούν στην αντιμετώπιση προκλήσεων που προκύπτουν από τις αυξανόμενες απαιτήσεις των 5G δικτύων και υστέρων γενεών. Συμφωνά με τις εκτιμήσεις της διεθνή επιτροπής κινητών τηλεπικοινωνιών (IMT), το B5G θα πρέπει να μπορεί να εξυπηρετήσει τρία βασικά σενάρια:

- **Εμπλουτισμένη κινητή ευρυζωνικότητα (enhanced mobile broadband eMBB)**: Αφορά την δυνατότητα παροχής υψηλών ταχυτήτων λήψης και αποστολής δεδομένων για κινητές συσκευές, επιτρέποντας απρόσκοπτη περιήγηση στο διαδίκτυο, μετάδοση βίντεο υψηλής ανάλυσης και άλλες απαιτητικές εφαρμογές.
- **Υπηρεσίες μαζικής επικοινωνίας μεταξύ μηχανών (massive machine type communications - mMTC)**: Εστιάζει στην αλληλεπίδραση και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ μεγάλου αριθμού συσκευών, όπως αισθητήρες, έξυπνες συσκευές και αυτοματοποιημένα συστήματα.
- **Εξαιρετικά αξιόπιστων επικοινωνιών μικρής καθυστέρησης (ultra-reliable and low latency communications - URLLC)**: Απαιτείται για εφαρμογές που απαιτούν άψογη λειτουργία σε πραγματικό χρόνο, όπως η τηλεχειρουργική, η αυτοοδηγούμενη οδήγηση και η εικονική πραγματικότητα.

Αναφορικά με τα σενάρια URLLC, οι βασικές απαιτήσεις περιλαμβάνουν ελάχιστη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο τουλάχιστον 0,5 ms και αξιόπιστη επικοινωνία άνω του 99,9% [20]. Χρησιμοποιώντας το σχήμα NOMA, ο αριθμός των συνδέσεων μπορεί να αυξηθεί κατά 5 φορές για εφαρμογές mMTC και 9 φορές για εφαρμογές URLLC, συγκριτικά με την τεχνική OMA.

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

Επιπλέον, σύμφωνα με το [20], η τεχνική NOMA βελτιώνει κατά 30% την φασματική αποδόση για την κατερχόμενη ζεύξη και 100% για την ανερχόμενη ζεύξη σε σενάρια eMBB συγκριτικά με την τεχνική OMA.

Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων, η τεχνική NOMA έχει αναγνωριστεί ως υποψήφια τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης, καθώς διαθέτει τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να ξεπεράσει τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η τεχνική OMA και να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των μελλοντικών συστημάτων κινητής επικοινωνίας [21] [22]. Η υπεροχή της τεχνικής NOMA έναντι της OMA μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

1. **Αυξημένη χωρητικότητα**: Η τεχνική NOMA επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων σε πολλούς χρήστες μέσω κοινών διαύλων αυξάνοντας σημαντικά τον αριθμό των συνδέσεων που μπορούν να υποστηριχθούν από το δίκτυο.
2. **Μειωμένη καθυστέρηση**: Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με ορθογώνια διαίρεση χρόνου (TDMA), η οποία υιοθετείται από το OMA, φέρει εγγενή καθυστέρηση, καθώς οι χρήστες μοιράζονται τον διαθέσιμο χρόνο μετάδοσης. Αντιθέτως, η τεχνική NOMA επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων, μειώνοντας δραματικά την καθυστέρηση.
3. **Αυξημένη φασματική απόδοση**: Το NOMA αξιοποιεί πιο αποτελεσματικά το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της αποδοτικότητας του δικτύου.

3

Συστήματα Multiple Input Multiple Output (MIMO)

3.1 Εισαγωγή στα συστήματα MIMO

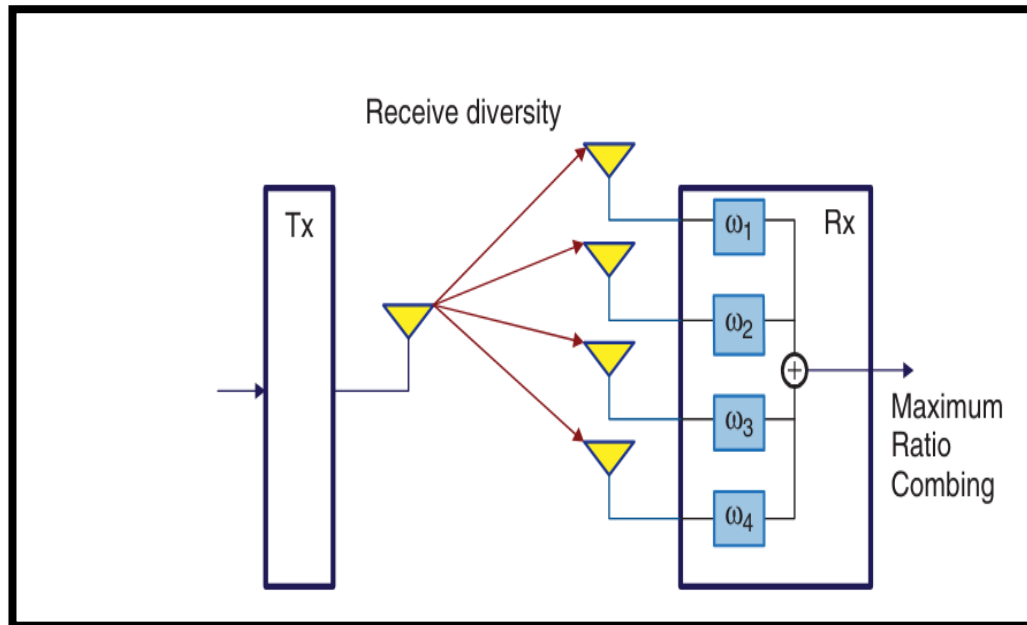
Τα 5G δίκτυα έχουν φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι επικοινωνούν μεταξύ τους, προσφέροντας ασύγκριτες ταχύτητες και υψηλή αξιοπιστία. Μια από τις βασικές τεχνολογίες που ευθύνεται για αυτήν την πρόοδο είναι η τεχνολογία πολλαπλής εισόδου, πολλαπλή εξόδου (multiple-input and multiple-output MIMO). Συγκεκριμένα, η τεχνολογία MIMO αποτελεί βασικό πυλώνα των σύγχρονων 5G δικτύων καθώς πολλαπλές κεραιές τόσο στην κεραιά εκπομπής, όσο και στη συσκευή, συνεργάζονται για να αυξήσουν δραματικά την χωρητικότητα, την ταχύτητα και την αξιοπιστία του δικτύου. Αναφορικά στα 5G συστήματα, το OFDM σχήμα μετάδοσης δημιουργεί το resource grid, τοποθετεί μέσα σε αυτά τα OFDM σύμβολα και στο τέλος γίνεται η μετάδοση. Στα 5G-MIMO-OFDM συστήματα αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις κεραιές. Οι αλγόριθμοι MIMO που χρησιμοποιούνται στα επίγεια κυψελωτά δίκτυα μπορούν να διαχωριστούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες: receive diversity, transmit diversity, beamforming, και spatial multiplexing. Όλες αυτές οι τεχνικές περιγράφονται στις επόμενες υπο-ενότητες.

3.2 Τεχνική Receive Diversity

Μία από τις απλούστερες και πιο διαδεδομένες παραμετροποιήσεις MIMO επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση πολλαπλών κεραιών στην πλευρά του δέκτη, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 16. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται διαφοροποίηση λήψης (Receive diversity). Σε αυτή την τεχνική, ο πιο διαδεδομένος και αποτελεσματικός αλγόριθμος είναι ο Maximum-Ratio Combining (MRC). Η βασική αρχή λειτουργίας του MRC βασίζεται στην επιλογή και αξιοποίηση των ισχυρότερων σημάτων που λαμβάνονται από τις πολλαπλές κεραιές του δέκτη. Στο σημείο αυτό διευκρινίζεται ότι αυτός ο αλγόριθμος υλοποιείται επίσης σε συστήματα SISO (Single Input Single Output) όπου αναπτύσσεται μόνο μία κεραιά στην πλευρά του δέκτη. Εκτός από τον αλγόριθμο MRC εξίσου γνωστός είναι και ο αλγόριθμος Selection Combining (SC) [23]. Στον αλγόριθμο SC, μόνο το

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

λαμβανόμενο σήμα με το υψηλότερο SNR χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του μεταδιδόμενου σήματος.



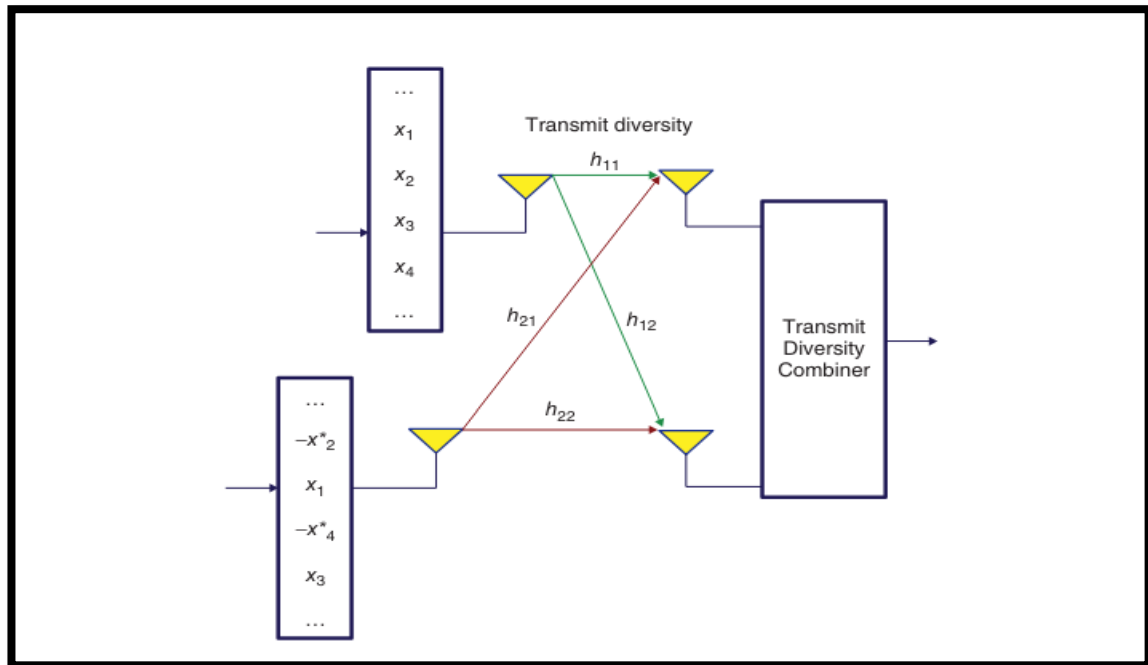
Σχήμα 16 MIMO receive diversity [23]

3.3 Τεχνική Transmit Diversity

Η τεχνολογία Transmit Diversity αξιοποιεί πολλαπλές κεραίες στην πλευρά του πομπού για να ενισχύσει την αξιοπιστία της ασύρματης επικοινωνίας (Σχήμα 17). Επιτυγχάνει αυτό τον στόχο με την εκπομπή αντιγράφων του ίδιου σήματος από διαφορετικές κεραίες, αυξάνοντας τις πιθανότητες επιτυχούς λήψης από τον δέκτη. Αυτή η μέθοδος MIMO, γνωστή και ως Κωδικοποίηση Μπλοκ Χώρου-Χρόνου (Space-Time Block Coding STBC), χαρτογραφεί τα ψηφιακά σύμβολα σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα και σε διαφορετικές κεραίες εκπομπής. Με αυτόν τον τρόπο, η STBC εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα της πολυκεραϊκής διάταξης, βελτιώνοντας την ποιότητα του σήματος και μειώνοντας τα σφάλματα λήψης. Αντίθετα η τεχνική Space-Frequency Block Coding (SFBC) αποτελεί μια τεχνική στενά συνδεδεμένη με την STBC, η οποία επιλέχθηκε ως τεχνική διαφοροποίησης μετάδοσης στο πρότυπο LTE. Η βασική διαφορά τους έγκειται στο ότι η κωδικοποίηση στο SFBC λαμβάνει χώρα στους τομείς χώρου (κεραία) και συχνότητας, ενώ η τεχνική STBC λαμβάνει χώρα στους τομείς χώρου (κεραία) και χρόνου. Τέλος, η εφαρμογή του Transmit Diversity στο 5G συμβάλλει επίσης στην καλύτερη κάλυψη δικτύου για την υποστήριξη νέων εφαρμογών όπως η αυτόνομη οδήγηση, το Internet of Things (IoT) και οι έξυπνες πόλεις.

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

Συνολικά, το Transmit Diversity αποτελεί ένα από τα βασικά εργαλεία που βοηθούν το 5G να εκπληρώσει τις υψηλές προσδοκίες που έχουν τεθεί για αυτή την τεχνολογία.



Σχήμα 17 MIMO transmit diversity [23]

3.4 Τεχνική *Spatial Multiplexing*

Η Spatial Multiplexing (SM), γνωστή και ως Space-Division Multiplexing (SDM), αποτελεί μια βασική τεχνική πολλαπλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων (MIMO) που αξιοποιεί πολλαπλές κεραιές σε πομπό και δέκτη για ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη πολλαπλών ροών δεδομένων.

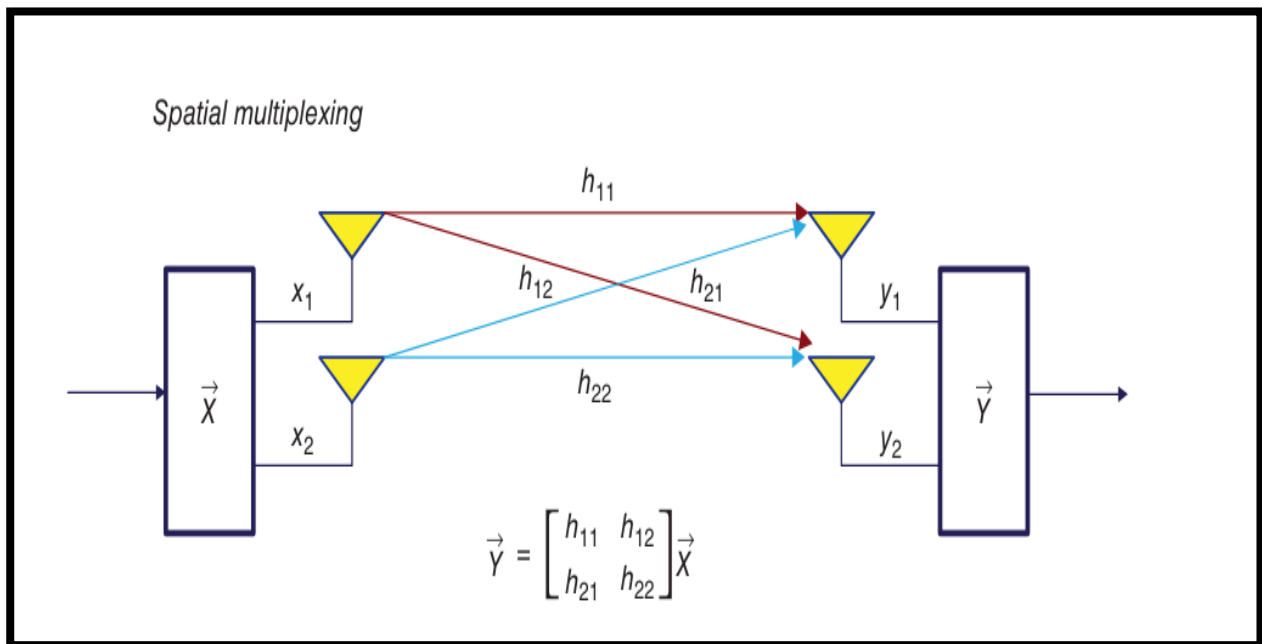
Στόχος της SM Στόχος της είναι:

- **Αύξηση ρυθμού δεδομένων:** Η SM επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων, αυξάνοντας τον ρυθμό δεδομένων που μπορεί να μεταδοθεί μέσω ενός καναλιού.
- **Βελτίωση αποδοτικότητας εύρους ζώνης:** Εκμεταλλευόμενη τον ίδιο sub-carrier η χωρική πολυπλεξία αυξάνει σημαντικά την αποδοτικότητα χρήσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης.
- **Ανθεκτικότητα σε θόρυβο και παρεμβολές:** Η χωρική πολυπλεξία μπορεί να μειώσει τις επιπτώσεις του θορύβου και των παρεμβολών, βελτιώνοντας την ποιότητα της επικοινωνίας.

Το Σχήμα 18 απεικονίζει τη λειτουργία της χωρικής πολυπλεξίας σε ένα σύστημα MIMO 2x2 κεραιών. Η μαθηματική περιγραφή της τεχνικής Spatial Multiplexing είναι η ακόλουθη:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Η εξίσωση 13 στο Σχήμα 18 απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο τα μεταδιδόμενα σύμβολα (s_1, s_2) επηρεάζονται από το κανάλι επικοινωνίας (H) και τον θόρυβο AWGN (n_1, n) καταλήγοντας στα λαμβανόμενα σήματα (r_1, r_2). Η ανάλυση αυτής της εξίσωσης είναι απαραίτητη για την κατανόηση της λειτουργίας της χωρικής πολυπλεξίας και για τον υπολογισμό των μετρικών απόδοσης του συστήματος MIMO.



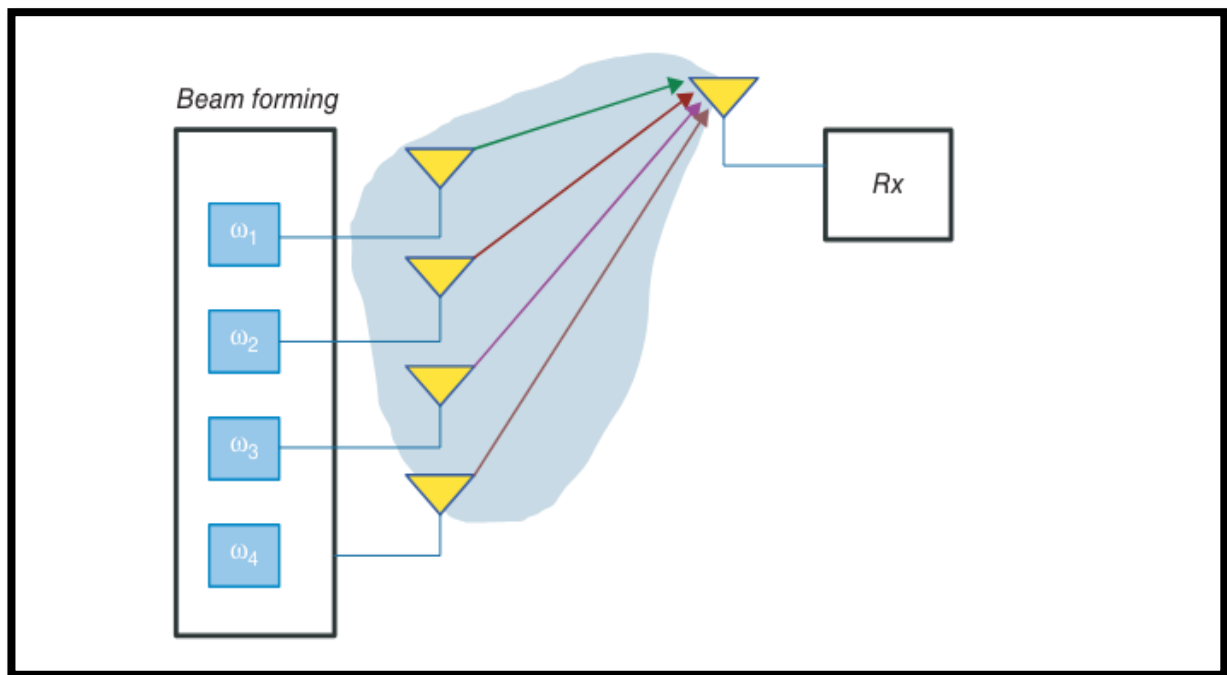
Σχήμα 18 MIMO Spatial Multiplexing [2]

3.5 Τεχνική Beam Forming

Η Τεχνική διαμόρφωση δέσμης (Beam Forming BF) αποτελεί μια πολύ σημαντική τεχνολογία στο 5G, η οποία αξιοποιεί πολλαπλές κεραίες εκπομπής για να κατευθύνει με ακρίβεια το σήμα προς το κινητό τερματικό όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 19. Για την κατανόηση της λειτουργίας της τεχνικής BF θα μπορούσε κανείς να την παρομοιάσει με μια δέσμη φωτός από προβολέα που εστιάζει σε ένα σημείο. Με παρόμοιο τρόπο, το 5G διαμορφώνει δέσμες ραδιοκυμάτων που στοχεύουν απευθείας στο κινητό τερματικό, μεγιστοποιώντας την ισχύ του σήματος λήψης. Αυτό το πλεονέκτημα ισχύος μεταφράζεται σε σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση ενός 5G δικτύου. Συγκεκριμένα ένα σύστημα 5G μέσω της διαμόρφωσης δέσμης μπορεί να προσφέρει ταχύτητες δεδομένων έως και 20 φορές μεγαλύτερες από το 4G.

Από τεχνικής φύσεως, η BF τεχνική βασίζεται στην αρχή της παρεμβολής κυμάτων, όπου η συνδυασμένη ισχύς του τελικού σήματος από πολλαπλές κεραιές μπορεί να ενισχυθεί ή να εξασθενήσει σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Τα στάδια της τεχνικής BF είναι τα ακόλουθα:

- **Εκτίμηση Καναλιού:** Η συσκευή 5G λαμβάνει σήματα αναφοράς από το δίκτυο για να εκτιμήσει το κανάλι και στείλει το λεγόμενο CQI report πίσω στον σταθμό βάσης (για κάθε κεραιά).
- **Υπολογισμός Βαρών:** Χρησιμοποιώντας αλγόριθμους βελτιστοποίησης, υπολογίζονται τα βάρη για κάθε κεραιά.
- **Διαμόρφωση Σήματος:** Το σήμα δεδομένων πολλαπλασιάζεται με τα αντίστοιχα βάρη της κάθε κεραιάς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας δέσμης (beam) που εστιάζει στο κινητό τερματικό.
- **Εκπομπή Σήματος:** Οι κεραιές εκπέμπουν ταυτόχρονα το διαμορφωμένο σήμα με την διαφορά ότι η κάθε κεραιά θα εκπέμπει το σήμα ισοσταθμισμένο με την τιμή του βάρους που της έχει ανατεθεί.



Σχήμα 19 MIMO Beam Forming [2]

4

Εφαρμογές της Τεχνολογίας MIMO-NOMA στα Δίκτυα κινητών επικοινωνιών: Τάσεις και Προοπτικές Κατευθύνσεις

Η τεχνολογία MIMO αυξάνει σημαντικά τη χωρητικότητα και μειώνει την πιθανότητα αποκοπής στα ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών [24]. Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει την απόδοση της τεχνολογίας NOMA σε δίκτυα MIMO και έχουν δείξει την υπεροχή της τεχνολογίας MIMO-NOMA έναντι της MIMO-OMA όσον αφορά τον συνολικό ρυθμό μετάδοσης [25]. Στην εργασία [26], οι ερευνητές παρουσιάζουν τη μαθηματική εξίσωση που προσδιορίζει τον εργοδικό συνολικό ρυθμό δεδομένων για ένα σύστημα MIMO-NOMA δύο χρηστών, λαμβάνοντας υπόψη κανάλια Rayleigh. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένας αλγόριθμος κατανομής ισχύος με χαμηλή πολυπλοκότητα, ο οποίος μεγιστοποιεί τον εργοδικό συνολικό ρυθμό δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για μερική πληροφόρηση καναλιού και ορισμένους περιορισμούς στην συνολική ισχύ μετάδοσης και στον ελάχιστο ρυθμό δεδομένων για τον χρήστη με κακή κατάσταση καναλιού. Σε αντίθεση με την προηγούμενη μελέτη, η εργασία που παρουσιάζεται στο [27], εστιάζει στην αξιολόγηση της απόδοσης ενός συστήματος MIMO-NOMA με πολλούς χρήστες ομαδοποιημένους σε ένα σύμπλεγμα (cluster). Η μελέτη πραγματοποιεί μια λεπτομερή σύγκριση του συστήματος MIMO-NOMA με το αντίστοιχο MIMO-OMA, αποδεικνύοντας την ανωτερότητα του NOMA σε ό,τι αφορά το κανάλι και την χωρητικότητα του συστήματος. Ποιο συγκεκριμένα, προτείνεται ένα σύστημα αποδοχής και εξυπηρέτησης χρηστών που στοχεύει να μεγιστοποιήσει τον αριθμό χρηστών εξυπηρέτησης ανά σύμπλεγμα λαμβάνοντας υπόψη τα ατομικά SINR thresholds. Αποδεικνύεται λοιπόν ότι η βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται όταν τα SINR thresholds όλων των χρηστών είναι ίσα μεταξύ τους, ωστόσο το σύστημα παραμένει αποδοτικό και σε περιπτώσεις με

διαφορετικά thresholds. Το πλεονέκτημα του συστήματος έγκειται στην χαμηλή του πολυπλοκότητα, η οποία είναι γραμμικά ανάλογη με τον αριθμό χρηστών ανά σύμπλεγμα.

Η επιλογή κεραίας (antenna selection) είναι μια σημαντική τεχνική που χρησιμοποιείται σε συστήματα MIMO για την αποφυγή των αρνητικών επιπτώσεων που προκύπτουν από τη χρήση πολλαπλών κεραιών ταυτόχρονα. Αυτές οι επιπτώσεις περιλαμβάνουν την πολυπλοκότητα του υλικού, την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και το υψηλό κόστος. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα της διαφοροποίησης που παρέχονται από τα συστήματα MIMO διατηρούνται. Αξίζει επομένως να σημειωθεί ότι η τεχνική antenna selection, έρχεται να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις. Αντί να χρησιμοποιούνται όλες οι διαθέσιμες κεραίες ταυτόχρονα, επιλέγεται ένας υποσύνολο κεραιών που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε χρονική στιγμή. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την πολυπλοκότητα του συστήματος, καθώς απαιτούνται λιγότεροι πομποδέκτες και φίλτρα. Επίσης, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, αφού λιγότερες κεραίες σημαίνουν λιγότερες ενεργές συσκευές. Τέλος, το κόστος μειώνεται λόγω της μειωμένης απαίτησης για υλικά [28]. Ωστόσο, ελάχιστες εργασίες έχουν διερευνήσει το πρόβλημα της επιλογής κεραίας σε συστήματα MIMO-NOMA. Στην εργασία [29], οι συγγραφείς εξετάζουν την απόδοση του sum-throughput σε MISO-NOMA σύστημα, χρησιμοποιώντας την τεχνική επιλογής κεραίας εκπομπής στον σταθμό βάσης. Σε αυτό το πλαίσιο, ο σταθμός βάσης και οι δέκτες είναι εξοπλισμένοι με πολλαπλή και μονή κεραία, αντίστοιχα. Στην τεχνική TAS-OMA, επιλέγεται η κεραία που προσφέρει το υψηλότερο SINR, αντίθετα, στο προτεινόμενο σχήμα TAS-NOMA επιλέγεται η κεραία που μεγιστοποιεί το sum-throughput. Στην ερευνητική εργασία [30], οι ερευνητές αναλύουν την μεγιστοποίηση του sum-throughput σε ένα σύστημα MINO-NOMA, αποτελούμενο από έναν σταθμό βάσης και δύο χρήστες. Η ανάλυση στηρίζεται σε δύο αλγορίθμους όπου σκοπός είναι η επιλογή της κατάλληλης κεραίας για την αύξησή του sum-throughput. Με βάση τα αποτελέσματα, το στιγμιαίο κέρδος καναλιού για τον χρήστη με κακή κατάσταση καναλιού βελτιώνεται από τον αλγόριθμο max-min-max, ενώ ο αλγόριθμος max-max-max ενισχύει την ποιότητα καναλιού του χρήστη με καλή κατάσταση. Τέλος, επιβεβαιώνεται ότι το user fairness (δικαιοσύνη) μεταξύ των χρηστών επιτυγχάνεται με τον αλγόριθμο max-min-max, ενώ το μέγιστο sum-throughput ρ επιτυγχάνεται με τον αλγόριθμο max-max-max.

Η τεχνική διαμόρφωση δέσμης πολλαπλής εκπομπής (Multicast beamforming) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε σχήματα MIMO, καθώς προσφέρει καλύτερη φασματική απόδοση σε σενάρια με πολλούς χρήστες. Μια προσέγγιση βασίζεται σε μια ενιαία δέσμη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από όλους τους χρήστες· επομένως όλοι οι χρήστες λαμβάνουν αυτό το κοινό σήμα

[31]. Μια άλλη προσέγγιση είναι η χρήση πολλαπλών δεσμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από πολλές ομάδες χρηστών. Ουσιαστικά, κάθε ομάδα χρηστών λαμβάνει ένα διαφορετικό σήμα [32]. Επίσης ελάχιστες ερευνητικές εργασίες έχουν μελετήσει τη διαμόρφωση δέσμης σε συστήματα MIMO-NOMA [33–35]. Στην ερευνητική εργασία [33], προτείνεται η διαμόρφωση δέσμης πολλαπλών χρηστών σε ένα σύστημα MIMO-NOMA κατερχόμενης ζεύξης. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι ένα ζευγάρι χρηστών με διαφορετικές ποιότητες καναλιών μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας την ίδια δέσμη έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνολική χωρητικότητα και συνολικός ρυθμός δεδομένων του συστήματος. Αντίθετα, στην ερευνητική εργασία [34], διερευνάται η απόδοση της διαμόρφωσης δέσμης σε ένα σύστημα MISO-NOMA κατερχόμενης ζεύξης. Συγκεκριμένα, σε αυτή την εργασία, η δέσμη χρησιμοποιείται για να εξυπηρετεί πολλούς χρήστες (και όχι δυο) ανά ομάδα χρηστών με τη χρήση superposition coding.

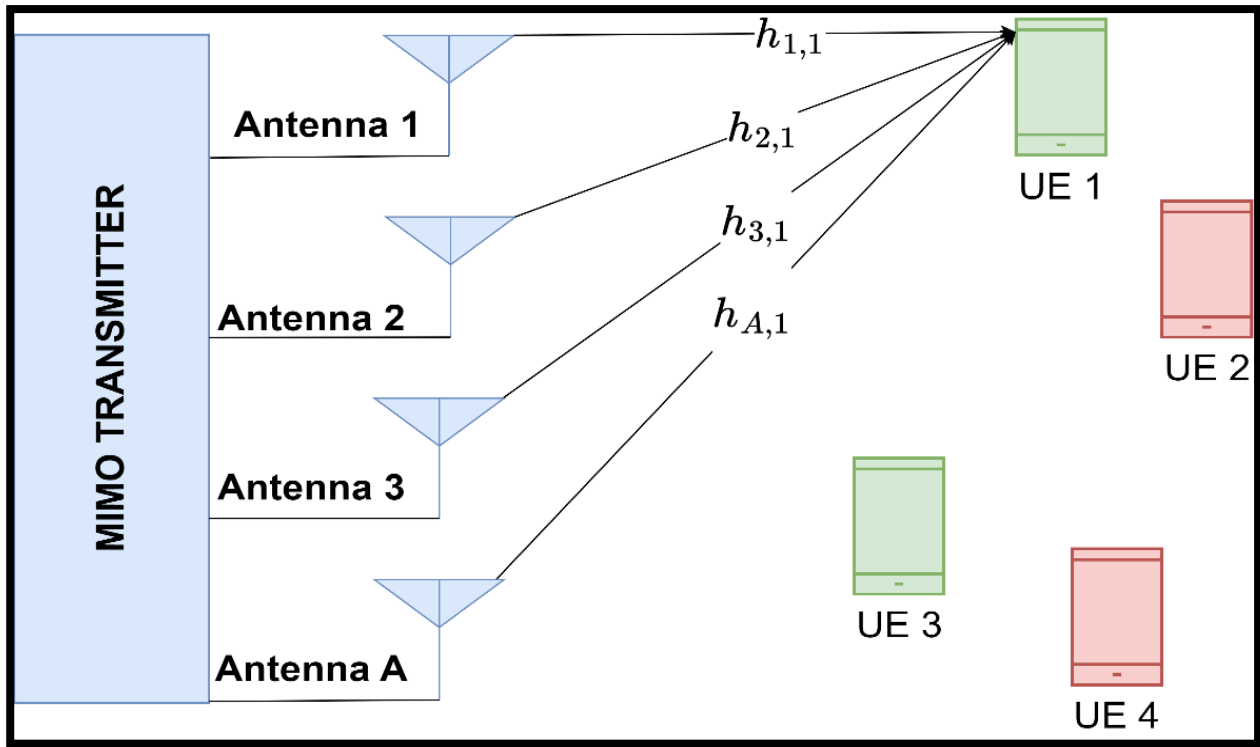
Στην ερευνητική εργασία [35], πραγματοποιείται τυχαία διαμόρφωση δέσμης στον σταθμό βάσης ενός δικτύου MIMO-NOMA κατερχόμενης ζεύξης. Στο προτεινόμενο σύστημα, κάθε δέσμη χρησιμοποιείται από όλους τους χρήστες εντός ομάδας (cluster) και όλες οι δέσμες έχουν παρόμοια κατανομή ισχύος. Επιπλέον, προτείνεται η χρήση ενός χωρικού φίλτρου για τη μείωση των παρεμβολών μεταξύ των ομάδων χρηστών και δεσμών. Τέλος, η έννοια της επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (Fractional frequency reuse) προτείνεται ως μέσο για τη βελτίωση της κατανομής ισχύος μεταξύ πολλαπλών δεσμών. Η τεχνολογία Massive MIMO έχει γίνει ελκυστική λύση για την αύξηση της χωρητικότητας δικτύου και της φασματικής απόδοσης. Το antenna diversity που προσφέρεται μέσω αυτής της τεχνολογίας, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος υλοποίησης, την καθιστά ιδανική για εφαρμογές 5G και πέραν αυτών. Επίσης λόγω των παραπάνω, πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει την απόδοση του NOMA σε Massive MIMO συστήματα. Για παράδειγμα, στην ερευνητική εργασία [60], οι ερευνητές εξέτασαν ένα Massive MIMO-NOMA σύστημα, όπου ο αριθμός των κεραιών εκπομπής στον σταθμό βάσης ήταν αρκετά φορές μεγαλύτερος από τον αριθμό των χρηστών. Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος, λήφθηκαν υπόψιν μετρικές απόδοσης όπως η πιθανότητα αποκοπής. Επίσης, στην ερευνητική εργασία [61], προτείνει ένα σχήμα βασισμένο στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης παρεμβολής και στην επαναληπτική εκτίμηση, με σκοπό την αντιμετώπιση του προβλήματος αξιοπιστίας σε ένα Massive-MIMO-NOMA σύστημα πολλών χρηστών με ατελές CSI.

5

Προσομοίωση Συστήματος

MIMO – NOMA

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε τον προσομοιωτή ενός MIMO-NOMA συστήματος τον οποίο αναπτύξαμε στην γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Συγκεκριμένα μελετήσαμε ένα σύστημα MIMO κατερχόμενης ζεύξης αποτελούμενο από N χρήστες και έναν σταθμό βάσης (Σχήμα 20). Ο σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με A κεραιές ενώ οι χρήστες (δέκτες) με μια. Επίσης οι χρήστες είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι εντός της κυκλικής περιοχής κάλυψης του σταθμού βάσης με ακτίνα R . Λαμβάνοντας υπόψιν της αρχής της τεχνολογίας NOMA, οι χρήστες ομαδοποιούνται σε ζεύγη χρηστών. Συγκεκριμένα κάθε ζεύγος αποτελείτε από έναν ισχυρό χρήστη UE_s και έναν αδύναμο χρήστη UE_w . Από εδώ και στο εξής, οι δείκτες s, w , αναφέρονται στο ισχυρό και αδύναμο χρήστη αντίστοιχα. Συνεπώς συνολικά θα έχουμε $K = \frac{N}{2}$ ζεύγη χρηστών. Με βάση αυτά που αναφέραμε στο κεφάλαιο 4, το MIMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για χωρική πολυπλεξία είτε για κέρδος διαφοροποίησης. Εδώ, στην δικιά μας περίπτωση χρησιμοποιούμε το MIMO για την επίτευξη κέρδους διαφοροποίησης. Επομένως, όλες οι κεραιές εκπομπής μεταδίδουν τα ίδια σήματα για κάθε ζεύγος χρηστών.



Σχήμα 20 System Model

Συνεπώς το εκπεμπόμενο σήμα από όλες τις κεραίες για κάθε ζεύγος χρηστών δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$S_k = \sqrt{P_t}(\sqrt{\beta_s}x_s + \sqrt{\beta_w}x_w) \quad (14)$$

Όπου P_t είναι ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης, x_s είναι το σήμα του ισχυρού χρήστη UE_s , x_w είναι το σήμα του αδύναμου χρήστη UE_w , β_s είναι ο συντελεστής κατανομής ισχύος (power allocation factor) του ισχυρού χρήστη UE_s και β_w είναι ο συντελεστής κατανομής ισχύος (power allocation factor) του αδύναμου χρήστη UE_w . Το λαμβανόμενο σήμα του ισχυρού χρήστη UE_s και του αδύναμου χρήστη UE_w του ζεύγους $k \in K$, θα δίνεται από τους εξής τύπους :

$$Y_s = S_k \sum_{j=1}^A h_{s,j} + n_s \quad (15)$$

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

$$Y_w = S_k \sum_{j=1}^A h_{w,j} + n_w \quad (16)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις εξισώσεις (15) και (16) καθώς και ότι ο ισχυρός χρήστης κάθε ζεύγους $k \in K$ μπορεί να εφαρμόσει την τεχνική SIC, το SINR του ισχυρού χρήστη UE_s και του αδύναμου χρήστη UE_w του ζεύγους $k \in K$, δίνονται από τις εξής εξισώσεις:

$$SINR_s^{MIMO-NOMA} = \beta_s \gamma \|h_s\|^2 \quad (17)$$

$$SINR_w^{MIMO-NOMA} = \frac{\beta_w \gamma \|h_w\|^2}{\gamma \beta_s \|h_w\|^2 + 1}. \quad (18)$$

Όπου $\|h_s\|^2 = \sum_{j=1}^A |h_{s,j}|^2 d_s^{-\alpha}$ και $\|h_w\|^2 = \sum_{j=1}^A |h_{w,j}|^2 d_w^{-\alpha}$. Οι μεταβλητές d_s και d_w δηλώνουν την απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και του χρήστη UE_s και UE_w κάθε ζεύγους. Επίσης η μεταβλητή α είναι το path loss exponent. Για αστικές περιοχές το α συνήθως είναι ίσο με 4. Συνεπώς λαμβάνοντας υπόψιν τις εξισώσεις (17) και (18) οι επιτεύξιμοι ρυθμοί δεδομένων για τον ισχυρό χρήστη και τον αδύναμο χρήστη για κάθε ζεύγος $k \in K$ δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$R_s^{MIMO-NOMA} = \frac{B}{K} \log_2(1 + SINR_s^{MIMO-NOMA}) \quad (19)$$

$$R_w^{MIMO-NOMA} = \frac{B}{K} \log_2(1 + SINR_w^{MIMO-NOMA}) \quad (20)$$

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

Όπου B , είναι το εύρος ζώνης του συστήματος. Αντιθέτως ο επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων που μπορεί να λάβει ένας χρήστης i μέσω τη τεχνικής MIMO-OMA δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

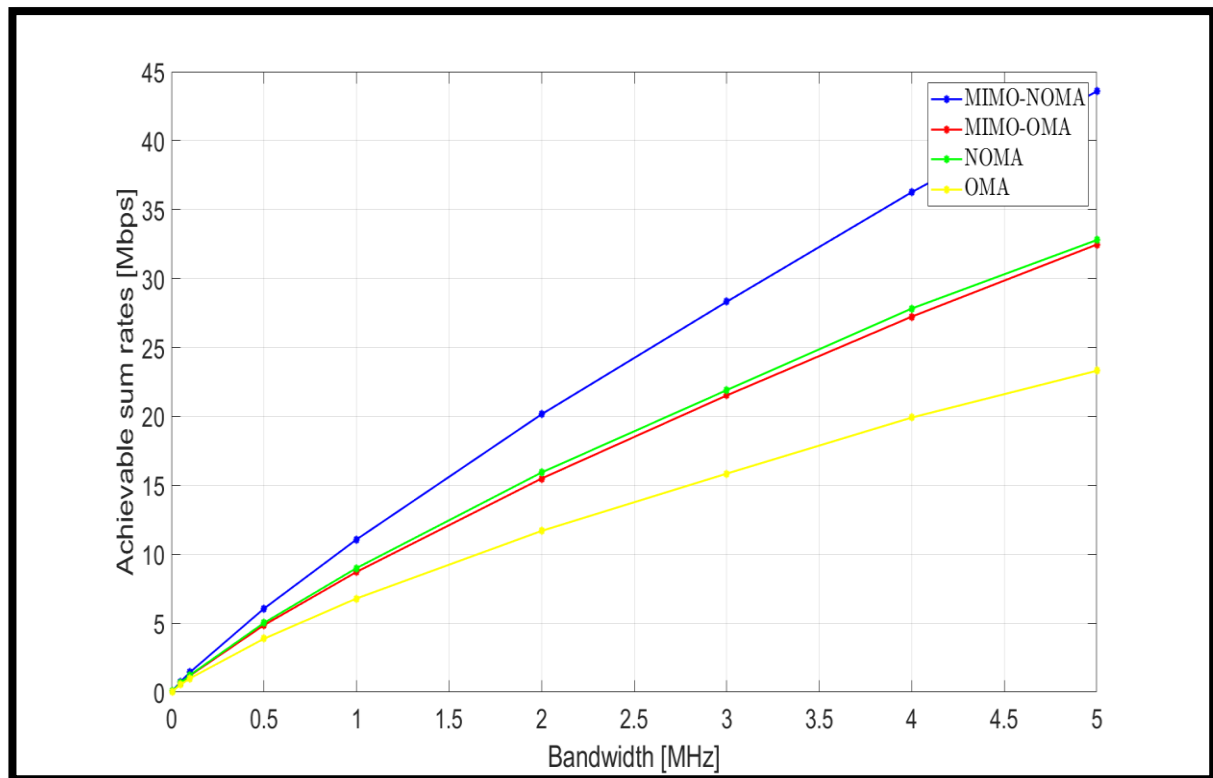
$$R_i^{MIMO-OMA} = \frac{B}{N} \log_2(1 + SINR_i^{MIMO-OMA}) \quad (21)$$

Όπου $SINR_i^{MIMO-OMA} = \gamma \|h_i\|^2$. Οι παράμετροι του συστήματος που αναπτύξαμε στο Matlab παρέχονται στον Πίνακα 3. Αναφορικά με τις μεθόδους σύγκρισης, χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικές MIMO-OMA, NOMA και OMA έναντι της προτεινόμενης MIMO-NOMA τεχνικής. Οι δείκτες απόδοσης (key performance indicators(KPIs) που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την διπλωματική εργασία είναι ο συνολικός ρυθμός δεδομένων και η φασματική απόδοση του συστήματος.

Πίνακας 3: Παράμετροι συστήματος

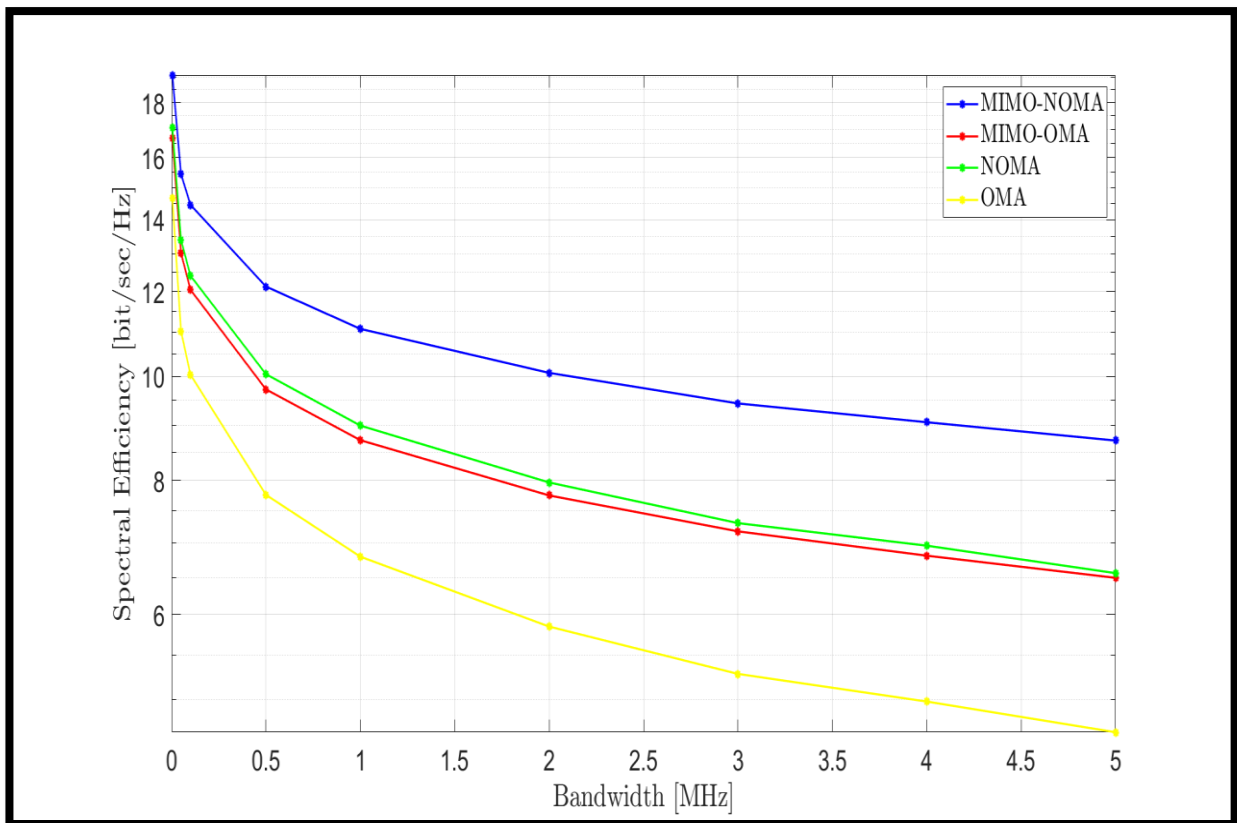
Παράμετροι συστήματος	Τιμή
Πλήθος χρηστών του συστήματος N	40
Πλήθος επαναλήψεων προσομοίωσης	100000
Ακτίνα περιοχής προσομοίωσης R	1000 m
path loss exponent α	4
Μέγιστη Ισχύς εκπομπής P_t	45 dBm
Φασματική πυκνότητα ισχύος N_0	-175 dBm

Στο Σχήμα 21 απεικονίζεται ο αθροιστικός επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων μέσω των τεχνικών MIMO-NOMA, MIMO-OMA, NOMA και OMA για διάφορες τιμές του εύρους ζώνης B και αριθμό κεραιών στον πομπό $A = 4$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η προτεινόμενη τεχνική MIMO-NOMA ξεπερνάει όλες τις άλλες τεχνικές για όλες τις τιμές εύρους ζώνης B . Αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνική MIMO-NOMA για $B = 5$ MHz επιτυγχάνει διπλάσιο ρυθμό δεδομένων συγκριτικά με την τεχνική OMA. Τέλος λόγω της βέλτιστης κατανομής ισχύος η τεχνική NOMA επιτυγχάνει καλύτερο ρυθμό δεδομένων από τις τεχνικές MIMO-OMA και OMA.



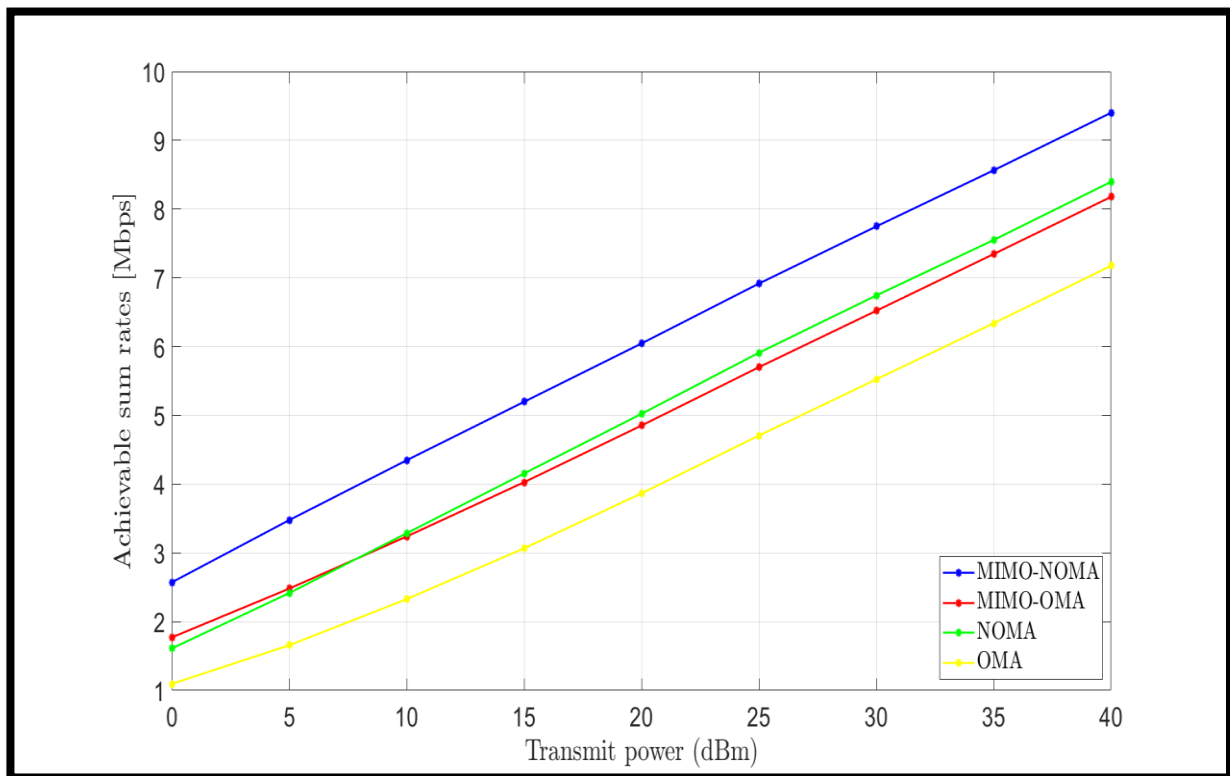
Σχήμα 21 Επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων για διάφορες τιμές εύρους ζώνης και αριθμό κεραιών πομπού $A = 4$.

Στο Σχήμα 22 απεικονίζεται η φασματική απόδοση του συστήματος μέσω των τεχνικών MIMO-NOMA, MIMO-OMA, NOMA και OMA για διάφορες τιμές του εύρους ζώνης B και αριθμό κεραιών στον πομπό $A = 4$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η προτεινόμενη τεχνική MIMO-NOMA ξεπερνάει όλες τις άλλες τεχνικές για όλες τις τιμές εύρους ζώνης B . Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της βέλτιστης κατανομής ισχύος η τεχνική NOMA επιτυγχάνει καλύτερο ρυθμό δεδομένων από τις τεχνικές MIMO-OMA και OMA.



Σχήμα 22 Φασματική απόδοση συστήματος για διάφορες τιμές εύρους ζώνης και αριθμό κεραιών πομπού $A = 4$.

Στο Σχήμα 23, απεικονίζεται ο αθροιστικός επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων μέσω των τεχνικών MIMO-NOMA, MIMO-OMA, NOMA και OMA για διάφορες τιμές ισχύος εκπομπής P_t , $B = 0.5$ MHz και αριθμό κεραιών στον πομπό $A = 4$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η προτεινόμενη τεχνική MIMO-NOMA ξεπερνάει όλες τις άλλες τεχνικές για όλες τις τιμές ισχύος εκπομπής P_t . Αξίζει να σημειωθεί ότι, λόγω της βέλτιστης κατανομής ισχύος, η τεχνική NOMA επιτυγχάνει υψηλότερο ρυθμό δεδομένων σε σύγκριση με τις τεχνικές MIMO-OMA και OMA όταν η ισχύς εκπομπής είναι $P_t \geq 10$ dBm. Ωστόσο, για τιμές ισχύος εκπομπής $P_t < 10$ dBm, η τεχνική MIMO-OMA υπερτερεί της NOMA. Αυτό συμβαίνει επειδή, σε χαμηλά επίπεδα ισχύος, το SINR των αδύναμων χρηστών στην NOMA πέφτει σημαντικά, ενώ η MIMO-OMA, εκμεταλλευόμενη τα πλεονεκτήματα του transit diversity, καταφέρνει να υπερνικήσει αυτή την αδυναμία.

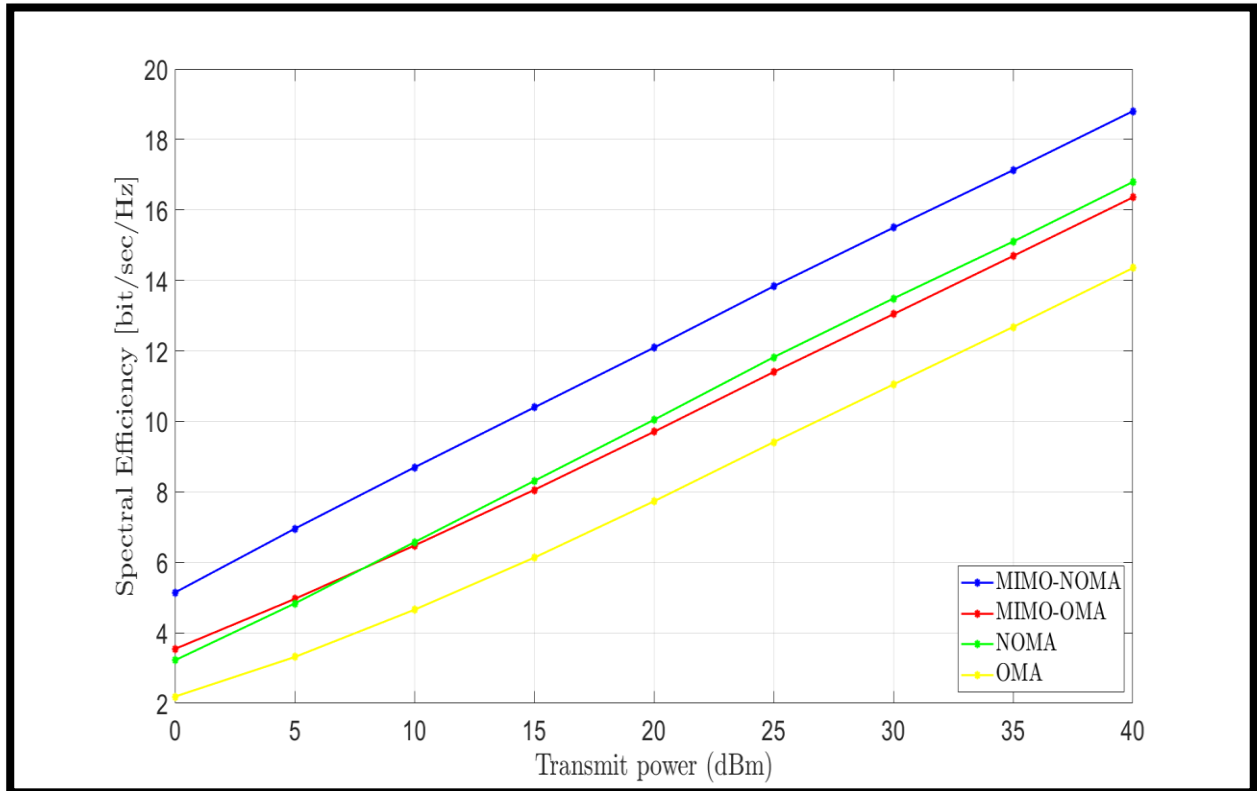


Σχήμα 23 Επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων για διάφορες τιμές ισχύος εκπομπής και αριθμό κεραιών πομπού $A = 4$.

Στο Σχήμα 24, απεικονίζεται η φασματική απόδοση του συστήματος μέσω των τεχνικών MIMO-NOMA, MIMO-OMA, NOMA και OMA για διάφορες τιμές ισχύος εκπομπής P_t , $B = 0.5$ MHz και αριθμό κεραιών στον πομπό $A = 4$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η προτεινόμενη τεχνική MIMO-NOMA ξεπερνάει όλες τις άλλες τεχνικές για όλες τις τιμές ισχύος εκπομπής P_t . Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της βέλτιστης κατανομής ισχύος η τεχνική NOMA επιτυγχάνει καλύτερο ρυθμό δεδομένων από τις τεχνικές MIMO-OMA και OMA. Όμοια με το Σχήμα 23, η τεχνική NOMA επιτυγχάνει υψηλότερη φασματική απόδοση σε σύγκριση με τις τεχνικές MIMO-OMA και OMA όταν η ισχύς εκπομπής είναι $P_t \geq 10$ dBm. Ωστόσο, για τιμές ισχύος εκπομπής $P_t < 10$ dBm, η τεχνική MIMO-OMA υπερτερεί της NOMA. Αυτό συμβαίνει επειδή, σε χαμηλά επίπεδα ισχύος, το SINR των αδύναμων χρηστών στην NOMA πέφτει σημαντικά, ενώ η MIMO-OMA, εκμεταλλευόμενη τα πλεονεκτήματα του transmit diversity, καταφέρνει να υπερνικήσει αυτή την αδυναμία. Συγκεκριμένα, όταν χρησιμοποιούνται μόνο 4 κεραιές στον πομπό, το σύστημα MIMO-OMA δεν εκμεταλλεύεται πλήρως τα πλεονεκτήματα του transmit diversity. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η NOMA, με την έξυπνη κατανομή ισχύος, μπορεί να διαχειριστεί καλύτερα τους χρήστες και να επιτύχει υψηλότερο ρυθμό δεδομένων, ιδιαίτερα όταν οι συνθήκες

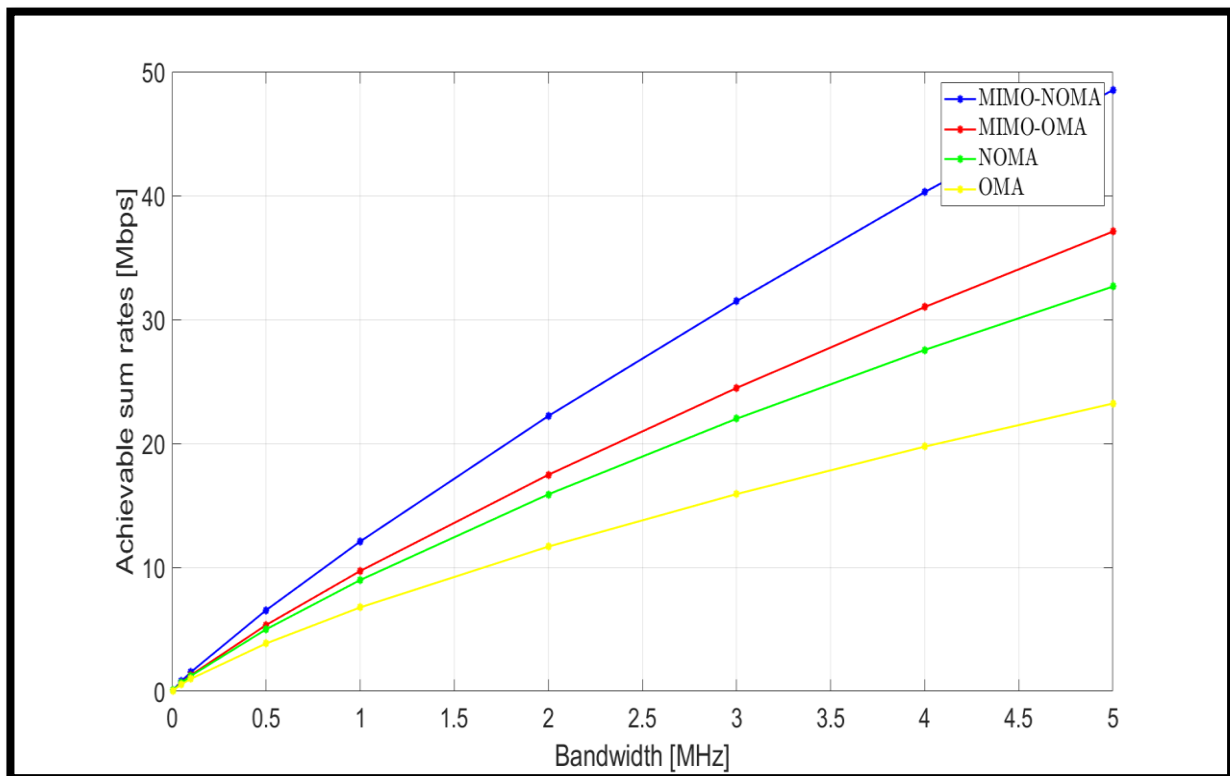
Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών

καναλιού ευνοούν την πολυπλεξία ισχύος. Έτσι, σε αυτή τη διαμόρφωση, η NOMA παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα.



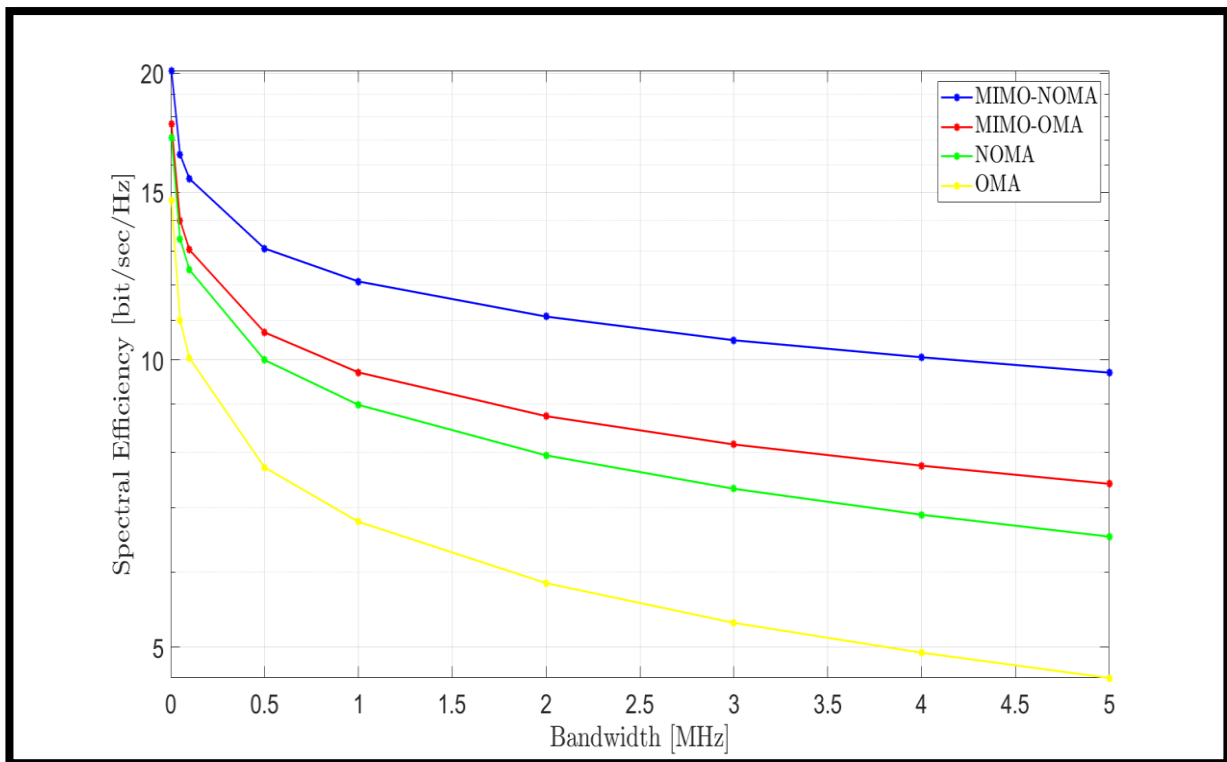
Σχήμα 24 Φασματική απόδοση συστήματος για διάφορες τιμές ισχύς εκπομπής και αριθμό κεραιών πομπού $A = 4$.

Στο Σχήμα 25 απεικονίζεται ο αθροιστικός επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων μέσω των τεχνικών MIMO-NOMA, MIMO-OMA, NOMA και OMA για διάφορες τιμές του εύρους ζώνης B και αριθμό κεραιών στον πομπό $A = 8$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η προτεινόμενη τεχνική MIMO-NOMA ξεπερνάει όλες τις άλλες τεχνικές για όλες τις τιμές εύρους ζώνης B . Αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνική MIMO-NOMA για $B = 5$ MHz επιτυγχάνει διπλάσιο ρυθμό δεδομένων συγκριτικά με την τεχνική OMA. Σε σύγκριση με το Σχήμα 21, στο Σχήμα 25 χρησιμοποιείται διπλάσιος αριθμός κεραιών στον πομπό, γεγονός που επιτρέπει στο σύστημα να αξιοποιήσει το transmit diversity. Αυτό οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της ποιότητας της σύνδεσης των χρηστών, καθώς οι πολλαπλές κεραίες ενισχύουν την αντοχή του σήματος στις παρεμβολές και τον θόρυβο. Ως αποτέλεσμα, η MIMO-OMA υπερέχει της NOMA, προσφέροντας καλύτερη συνολική απόδοση.



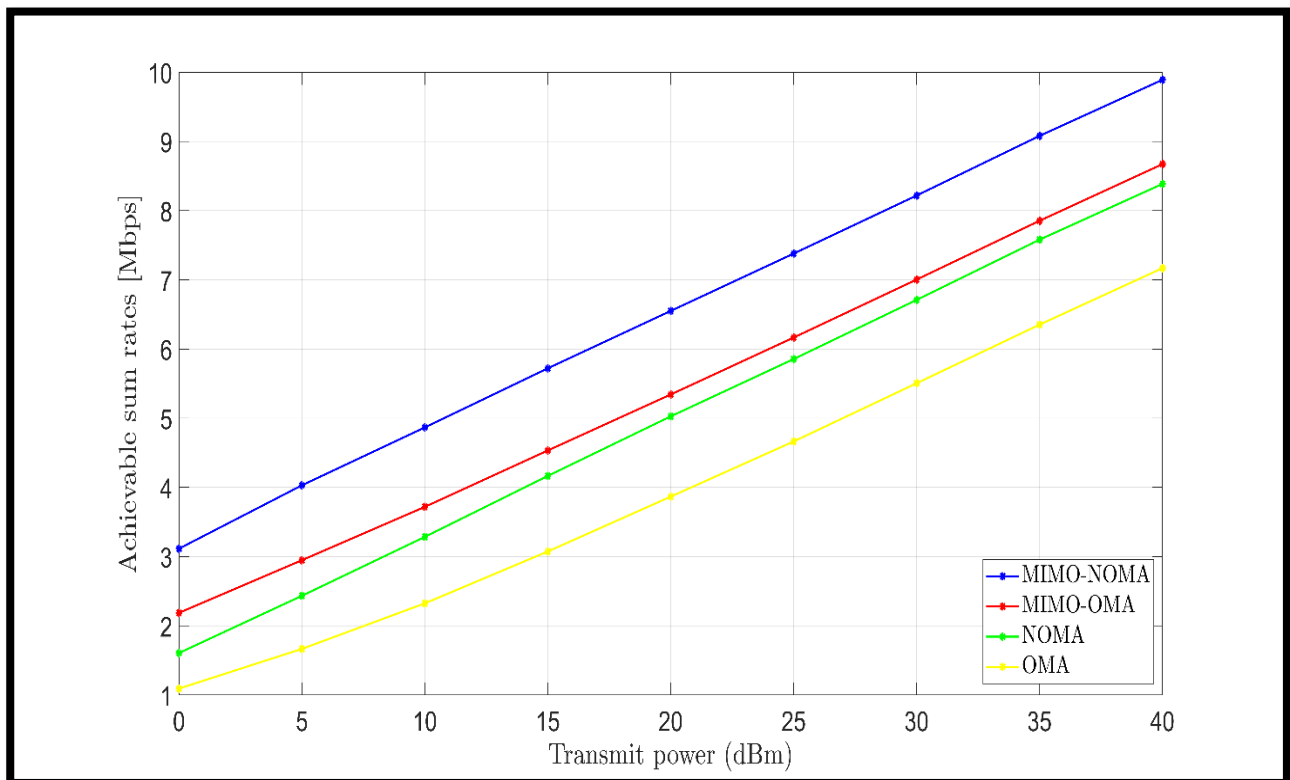
Σχήμα 25 Επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων για διάφορες τιμές εύρους ζώνης και αριθμό κεραιών πομπού $A = 8$.

Στο Σχήμα 26 απεικονίζεται η φασματική απόδοση του συστήματος μέσω των τεχνικών MIMO-NOMA, MIMO-OMA, NOMA και OMA για διάφορες τιμές του εύρους ζώνης B και αριθμό κεραιών στον πομπό $A = 8$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η προτεινόμενη τεχνική MIMO-NOMA ξεπερνάει όλες τις άλλες τεχνικές για όλες τις τιμές εύρους ζώνης B . Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε αυτό το σενάριο, η τεχνική MIMO-OMA υπερτερεί της NOMA. Αυτό συμβαίνει επειδή η MIMO-OMA εκμεταλλεύεται καλύτερα τις 8 κεραίες του πομπού μέσω του transmit diversity, βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα του σήματος. Αντίθετα, η NOMA, η οποία χρησιμοποιεί μία κεραία στον πομπό, δεν μπορεί να επωφεληθεί από το diversity που προσφέρουν οι πολλαπλές κεραίες, περιορίζοντας έτσι τη φασματική απόδοσή της. Ως αποτέλεσμα, η MIMO-OMA παρουσιάζει καλύτερη φασματική απόδοση σε σύγκριση με την NOMA, ειδικά όταν ο αριθμός των κεραιών στον πομπό αυξάνεται.



Σχήμα 26 Φασματική απόδοση συστήματος για διάφορες τιμές εύρους ζώνης και αριθμό κεραίων πομπού $A = 8$

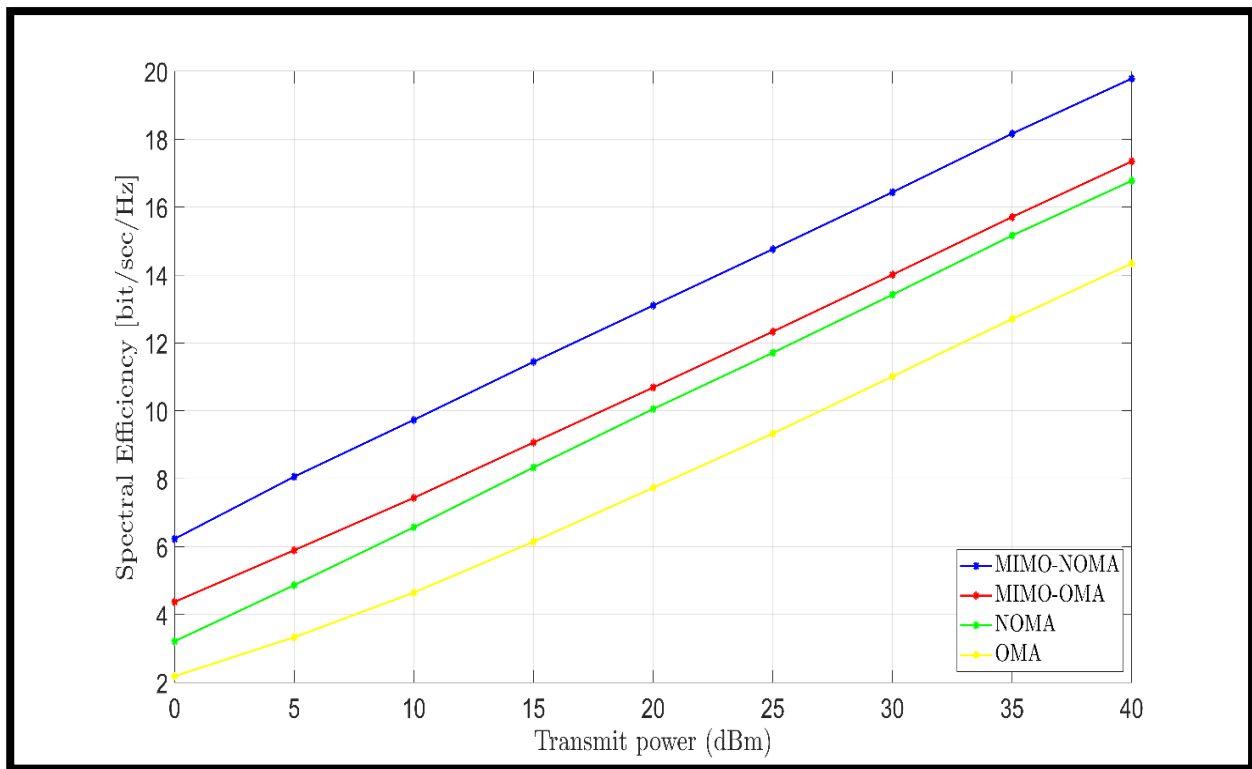
Στο Σχήμα 27, απεικονίζεται ο αθροιστικός επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων μέσω των τεχνικών MIMO-NOMA, MIMO-OMA, NOMA και OMA για διάφορες τιμές ισχύος εκπομπής P_t , $B = 0.5$ MHz και αριθμό κεραίων στον πομπό $A = 8$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η προτεινόμενη τεχνική MIMO-NOMA ξεπερνάει όλες τις άλλες τεχνικές για όλες τις τιμές ισχύος εκπομπής P_t . Η ανωτερότητα των τεχνικών MIMO-NOMA και MIMO-OMA σε σχέση με τις NOMA και OMA οφείλεται κυρίως στην εκμετάλλευση των πολλαπλών κεραίων στον πομπό. Οι τεχνικές MIMO-NOMA και MIMO-OMA αξιοποιούν το transmit diversity που προσφέρουν οι 8 κεραίες, γεγονός που οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα σήματος και υψηλότερη απόδοση. Ειδικά η MIMO-NOMA συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της πολυπλεξίας χρηστών μέσω της τεχνικής NOMA με την αυξημένη χωρητικότητα και αξιοπιστία που προσφέρει το MIMO, μεγιστοποιώντας έτσι τον αθροιστικό ρυθμό δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, η MIMO-OMA επίσης αποδίδει καλύτερα από την NOMA και OMA, καθώς η χρήση πολλαπλών κεραίων επιτρέπει την αποστολή διαφορετικών ροών δεδομένων ταυτόχρονα, κάτι που οι NOMA και OMA, με μόνο μία κεραία στον πομπό, δεν μπορούν να επιτύχουν στο ίδιο βαθμό.



Σχήμα 27 Επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων για διάφορες τιμές ισχύς εκπομπής και αριθμό κεραιών πομπού $A = 8$

Τέλος, στο Σχήμα 28, απεικονίζεται η φασματική απόδοση του συστήματος μέσω των τεχνικών MIMO-NOMA, MIMO-OMA, NOMA και OMA για διάφορες τιμές ισχύος εκπομπής P_t , $B = 0.5$ MHz και αριθμό κεραιών στον πομπό $A = 8$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η προτεινόμενη τεχνική MIMO-NOMA ξεπερνάει όλες τις άλλες τεχνικές για όλες τις τιμές ισχύος εκπομπής P_t . Η υπεροχή της MIMO-NOMA στη φασματική απόδοση οφείλεται στο συνδυασμό των πλεονεκτημάτων του MIMO και της NOMA. Το MIMO επιτρέπει την εκμετάλλευση των 8 κεραιών στον πομπό για καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος, ενώ η NOMA προσφέρει δυνατότητα ταυτόχρονης εξυπηρέτησης ζεύγη χρηστών στο ίδιο κανάλι. Αυτός ο συνδυασμός μεγιστοποιεί τη φασματική αποδοτικότητα του συστήματος, προσφέροντας ανώτερη απόδοση ανεξαρτήτως της ισχύος εκπομπής. Επιπλέον, η MIMO-OMA αποδίδει καλύτερα από τις NOMA και OMA, καθώς οι πολλαπλές κεραίες επιτρέπουν τη βελτίωση της ποιότητας σήματος μέσω του transmit diversity, αυξάνοντας τη φασματική αποδοτικότητα.

Διπλωματική εργασία: Μελέτη τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) σε συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για δίκτυα πέμπτης και μετέπειτα γενεών



Σχήμα 28 Φασματική απόδοση συστήματος για διάφορες τιμές ισχύς εκπομπής και αριθμό κεραιών πομπού $A = 8$

6

Συμπεράσματα

Αποτελεσμάτων

Η προτεινόμενη τεχνική MIMO-NOMA αποδεικνύεται ανώτερη σε σύγκριση με άλλες τεχνικές, όπως οι MIMO-OMA, NOMA και OMA, καθώς υπερέχει συστηματικά σε όλες τις αναλύσεις και για όλες τις τιμές ισχύος εκπομπής και εύρους ζώνης. Ο συνδυασμός της τεχνολογίας MIMO με NOMA επιτρέπει την καλύτερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερη φασματική απόδοση και αθροιστικό ρυθμό δεδομένων. Παράλληλα, η MIMO-OMA παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις NOMA και OMA, ιδίως σε συστήματα με αυξημένο αριθμό κεραιών στον πομπό. Η αξιοποίηση του transmit diversity μέσω των πολλαπλών κεραιών προσφέρει βελτιωμένη αντοχή σε θόρυβο και παρεμβολές, βελτιώνοντας έτσι τη φασματική αποδοτικότητα και τη συνολική απόδοση του συστήματος. Ωστόσο, οι τεχνικές NOMA και OMA, αν και παρέχουν οφέλη σε συστήματα με περιορισμένο αριθμό κεραιών, δεν μπορούν να ανταγωνιστούν τις τεχνικές MIMO όταν ο αριθμός των κεραιών αυξάνεται. Η έλλειψη εκμετάλλευσης του transmit diversity περιορίζει τη δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης, ιδιαίτερα σε υψηλότερες τιμές ισχύος εκπομπής και εύρους ζώνης.

Για μελλοντική εργασία, θα ήταν ενδιαφέρον να εξεταστεί η χρήση της τεχνικής Rate-Splitting Multiple Access (RSMA) ως μια πιθανή βελτίωση ή εναλλακτική λύση στις τεχνικές MIMO-NOMA και MIMO-OMA. Η RSMA είναι μια προηγμένη τεχνική που επιτρέπει τον καταμερισμό της πληροφορίας σε πολλαπλά ρεύματα με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης, τα οποία στη συνέχεια συνδυάζονται στους δέκτες. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει ευελιξία στη διαχείριση της παρεμβολής μεταξύ των χρηστών και μπορεί να προσφέρει καλύτερη απόδοση σε περιβάλλοντα με έντονες παρεμβολές ή ποικιλία στις συνθήκες καναλιού.

Βιβλιογραφία

1. Huang, Y.; Zhang, C.; Wang, J.; Jing, Y.; Yang, L.; You, X. Signal Processing for MIMO-NOMA: Present and Future Challenges. *IEEE Wireless Commun.* **2018**, *25*, 32–38, doi:10.1109/MWC.2018.1700108.
2. Liu, Y.; Pan, G.; Zhang, H.; Song, M. On the Capacity Comparison Between MIMO-NOMA and MIMO-OMA. *IEEE Access* **2016**, *4*, 2123–2129, doi:10.1109/ACCESS.2016.2563462.
3. Khazali, A.; Bozorgchenani, A.; Tarchi, D.; Shayesteh, M.G.; Kalbkhani, H. Joint Task Assignment, Power Allocation and Node Grouping for Cooperative Computing in NOMA-mmWave Mobile Edge Computing. *IEEE Access* **2023**, *11*, 93664–93678, doi:10.1109/ACCESS.2023.3309628.
4. *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*; Vaezi, M., Ding, Z., Poor, H.V., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2019; ISBN 978-3-319-92089-4.
5. Tamrakar, B.; Singh, K.; Brijaria, G.; Singh, M.; Kashyap, M.; Gupta, M.; Sharma, S. A Comparison of 1G to 6G Network in Association with Radio over Fiber Systems. In Proceedings of the 2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM); IEEE: Bhopal, India, May 17 2023; pp. 1–6.
6. Prasad, R.; Ojanpera, T. An Overview of CDMA Evolution toward Wideband CDMA. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* **1998**, *1*, 2–29, doi:10.1109/COMST.1998.5340404.
7. Yin, H.; Alamouti, S. OFDMA: A Broadband Wireless Access Technology. In Proceedings of the 2006 IEEE Sarnoff Symposium; IEEE: Princeton, NJ, March 2006; pp. 1–4.
8. Gupta, A.; Jha, R.K. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. *IEEE Access* **2015**, *3*, 1206–1232, doi:10.1109/ACCESS.2015.2461602.
9. Henry, S.; Alshaily, A.; Sousa, E.S. 5G Is Real: Evaluating the Compliance of the 3GPP 5G New Radio System With the ITU IMT-2020 Requirements. *IEEE Access* **2020**, *8*, 42828–42840, doi:10.1109/ACCESS.2020.2977406.
10. Kleine-Ostmann, T.; Nagatsuma, T. A Review on Terahertz Communications Research. *J Infrared Milli Terahz Waves* **2011**, *32*, 143–171, doi:10.1007/s10762-010-9758-1.
11. Niu, Y.; Li, Y.; Jin, D.; Su, L.; Vasilakos, A.V. A Survey of Millimeter Wave Communications (mmWave) for 5G: Opportunities and Challenges. *Wireless Netw* **2015**, *21*, 2657–2676, doi:10.1007/s11276-015-0942-z.

12. Ndjiongue, A.R.; Ferreira, H.C.; Ngatched, T.M.N. Visible Light Communications (VLC) Technology. In *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*; Webster, J.G., Ed.; Wiley, 2015; pp. 1–15 ISBN 978-0-471-34608-1.
13. Uysal, M.; Nouri, H. Optical Wireless Communications — An Emerging Technology. In *Proceedings of the 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*; IEEE: Graz, Austria, July 2014; pp. 1–7.
14. Wu, Q.; Zhang, S.; Zheng, B.; You, C.; Zhang, R. Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: A Tutorial. *IEEE Trans. Commun.* **2021**, *69*, 3313–3351, doi:10.1109/TCOMM.2021.3051897.
15. Marzetta, T.L. Massive MIMO: An Introduction. *Bell Labs Tech. J.* **2015**, *20*, 11–22, doi:10.15325/BLTJ.2015.2407793.
16. Tsiipi, L.; Karavolos, M.; Bithas, P.S.; Vouyioukas, D. Machine Learning-Based Methods for Enhancement of UAV-NOMA and D2D Cooperative Networks. *Sensors* **2023**, *23*, 3014, doi:10.3390/s23063014.
17. Tsiipi, L.; Tatsis, V.I.; Skoutas, D.N.; Vouyioukas, D.; Skianis, C. A Machine Learning UAV Deployment Approach for Emergency Cellular Networks. In *Proceedings of the ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications*; IEEE: Rome, Italy, May 28 2023; pp. 5683–5688.
18. Aldababsa, M.; Toka, M.; Gökçeli, S.; Kurt, G.K.; Kucur, O. A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond. *Wireless Communications and Mobile Computing* **2018**, *2018*, 9713450, doi:10.1155/2018/9713450.
19. Islam, S.M.R.; Avazov, N.; Dobre, O.A.; Kwak, K. Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* **2017**, *19*, 721–742, doi:10.1109/COMST.2016.2621116.
20. Amjad, M.; Musavian, L. Performance Analysis of NOMA for Ultra-Reliable and Low-Latency Communications. In *Proceedings of the 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*; IEEE: Abu Dhabi, United Arab Emirates, December 2018; pp. 1–5.
21. Saito, Y.; Kishiyama, Y.; Benjebbour, A.; Nakamura, T.; Li, A.; Higuchi, K. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access. In *Proceedings of the 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*; IEEE: Dresden, Germany, June 2013; pp. 1–5.

22. Ding, Z.; Liu, Y.; Choi, J.; Sun, Q.; El Kashlan, M.; Chih-Lin, I.; Poor, H.V. Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks. *IEEE Commun. Mag.* **2017**, *55*, 185–191, doi:10.1109/MCOM.2017.1500657CM.
23. Zarrinkoub, H. *Understanding LTE with MATLAB: From Mathematical Foundation to Simulation, Performance Evaluation and Implementation*; John Wiley & Sons, Inc: Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2014; ISBN 978-1-118-44345-3.
24. Araújo, D.C.; Maksymuk, T.; Almeida, A.L.F.; Maciel, T.; Mota, J.C.M.; Jo, M. Massive MIMO: Survey and Future Research Topics. *IET Communications* **2016**, *10*, 1938–1946, doi:10.1049/iet-com.2015.1091.
25. Alberto, R.; Monteiro, F.A. Downlink MIMO-NOMA With and Without CSI: A Short Survey and Comparison. In Proceedings of the 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP); IEEE: Porto, Portugal, July 20 2020; pp. 1–6.
26. Sun, Q.; Han, S.; I, C.-L.; Pan, Z. On the Ergodic Capacity of MIMO NOMA Systems. *IEEE Wireless Commun. Lett.* **2015**, *4*, 405–408, doi:10.1109/LWC.2015.2426709.
27. Zeng, M.; Yadav, A.; Dobre, O.A.; Tsiropoulos, G.I.; Poor, H.V. Capacity Comparison Between MIMO-NOMA and MIMO-OMA With Multiple Users in a Cluster. *IEEE J. Select. Areas Commun.* **2017**, *35*, 2413–2424, doi:10.1109/JSAC.2017.2725879.
28. Molisch, A.F.; Win, M.Z. MIMO Systems with Antenna Selection. *IEEE Microwave* **2004**, *5*, 46–56, doi:10.1109/MMW.2004.1284943.
29. Shrestha, A.P.; Tao Han; Zhiquan Bai; Kim, J.M.; Kwak, K.S. Performance of Transmit Antenna Selection in Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Systems. In Proceedings of the 2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN); IEEE: Vienna, Austria, July 2016; pp. 1031–1034.
30. Yu, Y.; Chen, H.; Li, Y.; Ding, Z.; Vucetic, B. Antenna Selection for MIMO-NOMA Networks. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC); IEEE: Paris, France, May 2017; pp. 1–6.
31. Sidiropoulos, N.D.; Davidson, T.N.; Zhi-Quan Luo Transmit Beamforming for Physical-Layer Multicasting. *IEEE Trans. Signal Process.* **2006**, *54*, 2239–2251, doi:10.1109/TSP.2006.872578.

32. Stamm, O.; Latscha, U.; Janecek, P.; Campana, A. Development of a Special Electrode for Continuous Subcutaneous pH Measurement in the Infant Scalp. *Am J Obstet Gynecol* **1976**, *124*, 193–195, doi:10.1016/s0002-9378(16)33297-5.
33. Kimy, B.; Lim, S.; Kim, H.; Suh, S.; Kwun, J.; Choi, S.; Lee, C.; Lee, S.; Hong, D. Non-Orthogonal Multiple Access in a Downlink Multiuser Beamforming System. In Proceedings of the MILCOM 2013 - 2013 IEEE Military Communications Conference; IEEE: San Diego, CA, USA, November 2013; pp. 1278–1283.
34. Choi, J. Minimum Power Multicast Beamforming With Superposition Coding for Multiresolution Broadcast and Application to NOMA Systems. *IEEE Trans. Commun.* **2015**, *63*, 791–800, doi:10.1109/TCOMM.2015.2394393.
35. Hayashi, Y.; Kishiyama, Y.; Higuchi, K. Investigations on Power Allocation among Beams in Non-Orthogonal Access with Random Beamforming and Intra-Beam SIC for Cellular MIMO Downlink. In Proceedings of the 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall); IEEE: Las Vegas, NV, USA, September 2013; pp. 1–5.