

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΜΣ: “ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ & ΔΙΚΤΥΑ”

Διπλωματική Εργασία με Τίτλο:
“THz Wireless Access”

Επιβλέπουσα: Καθηγήτρια Αγγελική Αλεξίου



Φοιτητής: Παπασπύρου Βασίλειος
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: ΜΨΕ2008

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα ‘THz Wireless Access’ πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο Π.Μ.Σ. “Ψηφιακές Επικοινωνίες & Δίκτυα” του τμήματος Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου του Πειραιά. Για την ολοκλήρωσή της θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με βοήθησαν και με στήριξαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Αρχικά, θα ήθελα να ξεκινήσω με την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κυρία Αγγελική Αλεξίου, απευθύνοντάς της τις θερμότερες ευχαριστίες για την καθοδήγηση, τις συμβουλές, την υποστήριξη και την άμεση ανταπόκριση που μου παρείχε στις δυσκολίες που προέκυπταν, συμβάλλοντας τα μέγιστα στην επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας μου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση, υπομονή και υποστήριξη που έδειξε καθ’ όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου. Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου, οι οποίοι στάθηκαν επίσης δίπλα μου κατά τη διάρκεια αυτής της διαδρομής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το θέμα της παρούσας εργασίας είναι το THz Wireless Access. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία γενική ανασκόπηση των THz επικοινωνιών συμπεριλαμβάνοντας μία ιστορική αναδρομή, την αναφορά των αναγκών για την χρησιμοποίηση της THz band, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, καθώς και τεχνολογίες των συσκευών. Στο δεύτερο κεφάλαιο εξηγείται η τεχνολογία MIMO, καθώς και η χρησιμοποίησή της στις THz επικοινωνίες, ενώ παρουσιάζονται και κάποιες από τις σημαντικότερες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η τεχνική NOMA, η προοπτική συνδυασμού της με την τεχνολογία MIMO και παρουσιάζονται εξισώσεις. Επιπλέον γίνεται αναφορά στο τι μπορεί να προσφέρει το NOMA στις THz επικοινωνίες. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται το System Model της εργασίας και γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων με σχολιασμό. Στο πέμπτο κεφάλαιο καταγράφονται μερικά συμπεράσματα, καθώς και πιθανές μελλοντικές έρευνες πάνω στο πεδίο μελέτης.

ABSTRACT

The subject of this paper is THz Wireless Access. In the first chapter there is a general review of THz communications including a historical review, the reference of the needs for the use of the THz band, advantages and disadvantages, as well as device technologies. In the second chapter, MIMO technology is explained, as well as its use in THz communications, while some of the most important equations used for this technology are also presented. In the third chapter the NOMA technique is analyzed, the perspective of its combination with MIMO technology and equations are presented. In addition, reference is made to what NOMA can offer in THz communications. In the fourth chapter, the System Model of the thesis is described and the results are presented with commentary. In the fifth chapter, some conclusions are recorded, as well as possible future research on the field of study.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ - ΠΙΝΑΚΩΝ.....	8

Κεφάλαιο 1

THz Communications.....	10
1.1 Ιστορική αναδρομή και ανάγκες.....	10
1.2 Χαρακτηριστικά της ζώνης THz.....	12
1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των THz επικοινωνιών.....	13
1.4 Τεχνολογίες των συσκευών για THz επικοινωνίες.....	16

Κεφάλαιο 2

Η τεχνική MIMO.....	18
2.1 Γενικά για το MIMO.....	18
2.2 Σημαντικές εξισώσεις για την τεχνολογία MIMO.....	19
2.3 Το MIMO στις THz επικοινωνίες.....	21
2.3.1 Channel model του MIMO στις THz επικοινωνίες.....	23
2.3.2 Capacity analysis του MIMO στις THz επικοινωνίες.....	24

Κεφάλαιο 3

Η τεχνική NOMA.....	26
3.1 Γενικά για NOMA.....	26
3.2 Σημαντικές εξισώσεις για την τεχνολογία NOMA.....	28
3.3 Η χρήση NOMA σε THz συστήματα και ο συνδυασμός με MIMO συστήματα.....	30
3.4 Τι μπορεί να προσφέρει το NOMA;.....	36

Κεφάλαιο 4

Αξιολόγηση της επίδοσης.....	37
4.1 Υλοποίηση MIMO - NOMA	37
4.2 Υλοποίηση NOMA με RIS.....	49

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα.....	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	60

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ - ΠΙΝΑΚΩΝ

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1.1 - THz technology in the electromagnetic spectrum.....	11
Σχήμα 2.1 - Simplified MIMO channel in THz communication.....	22
Σχήμα 3.1 - Spectrum sharing for OFDMA and NOMA for two users....	27
Σχήμα 3.2 - Successive Interference Cancellation.....	28
Σχήμα 3.3 - NOMA systems with types of beamforming.....	32
Σχήμα 3.4 - NOMA-MIMO system.....	34
Σχήμα 4.1 - MIMO-NOMA System Model.....	38
Σχήμα 4.2 - Sum rate comparison.....	43
Σχήμα 4.3 - Achievable rate of User 1.....	44
Σχήμα 4.4 - Achievable rate of User 2.....	44
Σχήμα 4.5 - Probability of Outage of User 1.....	46
Σχήμα 4.6 - Probability of Outage of User 2.....	47
Σχήμα 4.7 - Capacity of NOMA vs OMA.....	48
Σχήμα 4.8 - NOMA system with RIS.....	49
Σχήμα 4.9 - OP with respect to SNR (with $m=2$).....	55
Σχήμα 4.10 - OP with respect to SNR (with $m=1$).....	56
Σχήμα 4.11 - OP with respect to Power Allocation.....	57

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1 - THz NOMA challenges and mitigation strategies.....	31
Πίνακας 2 - Symbols and values used for first Matlab simulation.....	42
Πίνακας 3 - Symbols and values used for second Matlab simulation.....	54

1ο Κεφάλαιο

Thz Communications

1.1 Ιστορική αναδρομή και ανάγκες

Από τα πρώτα χρόνια των ασύρματων επικοινωνιών, υπάρχει ένας αριθμός χαρακτηριστικών, των οποίων οι ανάγκες για βελτίωση συνεχώς αυξάνονται όπως είναι η χωρητικότητα, η ταχύτητα και το latency. Παρά το γεγονός ότι μέχρι τα 5G wireless systems υπάρχει τρομακτική εξέλιξη στις απαιτήσεις των ανωτέρω χαρακτηριστικών, οι στόχοι που έχουν τεθεί για την επόμενη γενιά, προϋποθέτουν περαιτέρω βελτίωση. Είναι κοινώς αποδεκτό ότι τα THz Bands, τα οποία κυμαίνονται από 0.1 έως 10 THz θα διαδραματίσουν κομβικό ρόλο και θα αποτελέσουν βασική τεχνολογία στην υποστήριξη των ασύρματων επικοινωνιών τα επερχόμενα χρόνια για τα ασύρματα συστήματα πέραν του 5G.

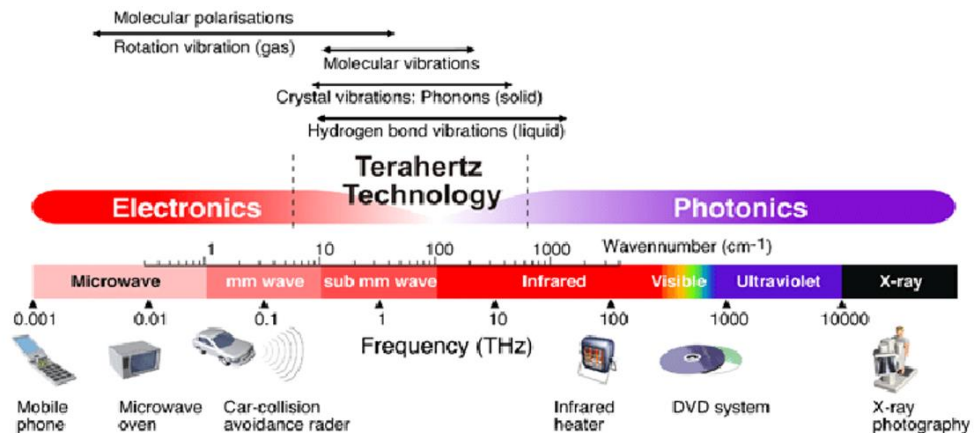
Τα ασύρματα συστήματα πέραν του 5G, στοχεύουν στο να φτάσουν σε σημείο να παρέχουν εξαιρετικές επιδόσεις, όχι μόνο αυξάνοντας τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, αλλά υποστηρίζοντας και ένα μεγάλο φάσμα νέων εφαρμογών που θα συνδυάζει τους αυξημένους ρυθμούς με αξιοπιστία, ευελιξία μηδενικό χρόνο απόκρισης και τεχνητή νοημοσύνη. Η εικονική παρουσία, η 3D εκτύπωση και η έξυπνη μετακίνηση είναι κάποιες από τις προκλήσεις για την επιστημονική κοινότητα, όμως οι μέχρι τώρα θεμελιώδεις περιορισμοί απόδοσης που έχουν τεθεί για το 5G ειδικά όσον αφορά στο εύρος ζώνης, δε βοηθούν στην πραγματοποίησή τους. Για να ξεπεραστούν τα ανωτέρω εμπόδια στα σύρματα συστήματα πέραν του 5G, αρκεί να επικυρώσει και να εκμεταλλευτεί τους πόρους και τις τεχνολογίες που έχουν εξερευνηθεί μόνο σε χαμηλό βαθμό έως τώρα.

Οι ασύρματες Terahertz επικοινωνίες είναι μία από αυτές τις τεχνολογίες. Μερικά παραδείγματα στα οποία θα είναι κομβική η συμβολή τους θα είναι τα εξής. Πρώτον, στο μέλλον, οι χρήστες σε αγροτικές ή απομακρυσμένες περιοχές, στις οποίες είναι δύσκολη η πρόσβαση, θα πρέπει να συνδέονται με υψηλούς ρυθμούς δεδομένων έως και 10 Gbit/s ανά χρήστη. Αυτό είναι είτε ανέφικτο είτε πολύ δαπανηρό όταν χρησιμοποιούνται αποκλειστικά λύσεις οπτικών ινών. Η μετάδοση Terahertz ως ασύρματη backhaul επέκταση των οπτικών ινών θα είναι ένα σημαντικό δομικό στοιχείο για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης και θα εγγυηθεί υψηλής ταχύτητας πρόσβαση στο Διαδίκτυο παντού πέρα από το 5G. Δεύτερον, ο αυξανόμενος αριθμός χρηστών κινητής και σταθερής τηλεφωνίας στον ιδιωτικό τομέα καθώς και στη βιομηχανία και στον τομέα των υπηρεσιών θα απαιτήσει εκατοντάδες Gbit/s στην

επικοινωνία προς ή μεταξύ πύργων κινητής τηλεφωνίας (backhaul), αλλά και μεταξύ πύργων κινητής τηλεφωνίας και απομακρυσμένων κεφαλών ραδιοφώνου (fronthaul).

Επιπλέον, οι THz επικοινωνίες αναμένεται να επιτρέπουν την απρόσκοπτη διασύνδεση μεταξύ ενσύρματων δικτύων εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας, όπως για παράδειγμα συνδέσεις οπτικών ινών και προσωπικών ασύρματων συσκευών, όπως φορητούς υπολογιστές και συσκευές τύπου tablet, επιτυγχάνοντας πλήρη διαφάνεια και σύγκλιση ρυθμού μεταξύ ασύρματων και ενσύρματων συνδέσεων. Αυτό θα διευκολύνει τη χρήση εφαρμογών έντασης εύρους ζώνης μεταξύ στατικών και κινητών χρηστών, κυρίως σε σενάρια εσωτερικού χώρου και τοπικής πρόσβασης. Κάποιες συγκεκριμένες εφαρμογές είναι η τηλεδιάσκεψη με ολογράμματα υψηλής ευκρίνειας (γραφείο εικονικής πραγματικότητας) ή η ασύρματη διανομή δεδομένων εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας σε κέντρα δεδομένων.

Τέλος, η πλήρης υιοθέτηση της ψηφιακής δικτύωσης στη βιομηχανία, το εμπόριο και τις δημόσιες υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου κυκλοφορίας και της αυτόνομης οδήγησης, των υπηρεσιών απομακρυσμένης παρακολούθησης της υγείας, της εφοδιαστικής αλυσίδας, των διαδικασιών φύλαξης και ασφάλειας, αυτοματισμού μεγάλων χώρων παραγωγής και γραμμών παραγωγής, θέτουν αυστηρές απαιτήσεις για πρόσβαση κατηγορίας Tbps προς τέρψη και των περιορισμών γρήγορης απόκρισης. Σε όλα τα παραπάνω σενάρια, το ασύρματο THz είναι μια ελκυστική τεχνολογία που συμπληρώνει τις λιγότερο ευέλικτες και πιο δαπανηρές συνδέσεις οπτικών ινών και τις ασύρματες τεχνολογίες χαμηλότερου ρυθμού δεδομένων (Visible Light Communication, mmWave, WiFi).



Σχήμα 1.1 – THz technology in the electromagnetic spectrum

1.2 Χαρακτηριστικά της ζώνης THz

Η τεχνολογία THz, συμπληρώνει το κενό που υπήρχε ανάμεσα στο radio και το optical εύρος συχνοτήτων. Λόγω του γεγονότος ότι είναι διαθέσιμο ένα πολύ μεγάλο εύρος ζώνης, αν αξιοποιηθεί σωστά, υπάρχουν μεγάλες δυνατότητες για σημαντική άνοδο στην απόδοση της ασύρματης χωρητικότητας, καθώς και υψηλής ανάλυσης περιβαλλοντική ανίχνευση. Ωστόσο, ένα ασύρματο σύστημα, λειτουργώντας σε τόσο υψηλές συχνότητες υποφέρει από αβέβαιο και δυναμικό κανάλι. Ουσιαστικά, αυτοί οι περιορισμοί καναλιών οδηγούν σε αναξιόπιστες, διακοπτόμενες συνδέσεις ως αποτέλεσμα μιας εγγενώς μικρής εμβέλειας επικοινωνίας και μιας υψηλής ευαισθησίας σε απόφραξη και μοριακή απορρόφηση. Κατά συνέπεια, τέτοια εμπόδια θα μπορούσαν να διαταράξουν την υπόσχεση των THz bands για επικοινωνίες υψηλού ρυθμού και δυνατότητες υψηλής ανάλυσης ανίχνευσης.

Ας δούμε τώρα κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά που θα έχουν τα THz Wireless Systems. Αρχικά, η ζώνη THz έχει την ιδιότητα του quasi-opticality, κάτι που με λίγα λόγια σημαίνει ότι προσφέρει ταυτόχρονα υψηλού βαθμού επικοινωνία, αλλά και υψηλής ανάλυσης ικανότητα αίσθησης. Επιπλέον, κάποια άρθρα αναδεικνύουν τη σημασία της ανάπτυξης αρχιτεκτονικών δικτύων, προσαρμοσμένων στα THz, με σκοπό να αναδειχθούν όλα τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει η συγκεκριμένη ζώνη. Ένα τρίτο χαρακτηριστικό είναι ότι πρόκειται να έχουμε συνύπαρξη ή ακόμα και συνεργασία των νέων THz τεχνολογιών με τις ήδη υπάρχουσες ασύρματες τεχνολογίες χαμηλότερης ζώνης συχνοτήτων, γεγονός που θα προσφέρει περαιτέρω πλεονεκτήματα. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνεπικουρούν στη δημιουργία ενός τέταρτου χαρακτηριστικού, εκείνου της αρμονικής δημιουργίας υψηλού ρυθμού επικοινωνιών, ταυτόχρονα με υψηλής ανάλυσης ανίχνευση. Ακόμα, μελέτες έχουν γίνει και πάνω στις δυσκολίες που προκύπτουν από τα THz κανάλια, ώστε να βρεθούν και τεχνικές για πρόβλεψη πλήρους πληροφορίας της κατάστασης του καναλιού. Σημαντικό χαρακτηριστικό είναι και οι τεχνικές πρόσβασης που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς οι μέχρι τώρα γνωστές και συμβατές με τις προηγούμενες γενιές τεχνικές, δεν έχουν ελεύθερο το πεδίο να χρησιμοποιηθούν λόγω hardware περιορισμών και της μοναδικής φύσης διάδοσης στο THz περιβάλλον. OAM (Orbital Angular Momentum) και NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) είναι δύο από τις τεχνικές πρόσβασης που μελετώνται. Στη συγκεκριμένη εργασία θα ασχοληθούμε ιδιαίτερα με την NOMA τεχνική. Τέλος, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό που θα έχουν οι THz τεχνολογίες και η επιστημονική κοινότητα εργάζεται πάνω σε αυτήν, είναι η βελτιστοποίηση των πραγματικού χρόνου δικτύων, καθώς είναι υψίστης σημασίας στα σενάρια χρήσης του 6G.

1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των THz επικοινωνιών

Η ζώνη THz βασίζει τις δυνατότητές της ως μία από τις βασικές ασύρματες τεχνολογίες για την ικανοποίηση των μελλοντικών απαιτήσεων για ασύρματα συστήματα 6G, χάρη στα τέσσερα πλεονεκτήματά της: 1) συνεχόμενο εύρος ζώνης από δεκάδες και έως εκατοντάδες GHz, 2) διάρκεια συμβόλων σε επίπεδο picosecond, 3) ενσωμάτωση χιλιάδων κεραιών μήκους κάτω του χιλιοστού, 4) ευκολία συνύπαρξης με άλλο ρυθμισμένο και τυποποιημένο φάσμα.

Το βασικό πλεονέκτημα των επικοινωνιών σε THz bands σε σύγκριση με άλλες ζώνες συχνοτήτων είναι η διαθεσιμότητα άφθονου εύρους ζώνης. Ωστόσο, η μετάβαση προς υψηλότερες συχνότητες τείνει να περιορίζεται φυσικά από ένα μικρότερο εύρος επικοινωνίας και μια συμπεριφορά διακοπτόμενης (on/off) σύνδεσης. Στις συχνότητες THz, αυτά τα φαινόμενα προέρχονται κυρίως από τρία βασικά χαρακτηριστικά. Πρώτον, τις υψηλές απώλειες διαδρομής και ανάκλασης, δεύτερον, τη σποραδική διαθεσιμότητα συνδέσεων LoS και, τρίτον τη μοριακή απορρόφηση. Οι απώλειες στο διαδρομής και ανάκλασης παρατηρούνται φυσικά κατά τη μετάβαση προς υψηλότερες φέρουσες συχνότητες. Στην πραγματικότητα, αυτές οι απώλειες είναι παρόμοιες με αυτές που εμφανίζονται στις συχνότητες mmWave, αλλά είναι πιο έντονες στις συχνότητες THz. Ωστόσο, η μοριακή απορρόφηση και οι περιορισμένοι στενοί σύνδεσμοι LoS έχουν βασικές ιδιότητες που είναι ιδιόμορφες στη ζώνη THz. Αυτά τα μοναδικά χαρακτηριστικά THz θα συζητηθούν στη συνέχεια.

Οι συνδέσεις επικοινωνίας THz είναι κατά κύριο λόγο LoS. Στην πραγματικότητα, η μετάβαση προς υψηλότερες συχνότητες διευρύνει το χάσμα ισχύος μεταξύ των στοιχείων LoS και των στοιχείων NLoS. Ειδικότερα, σε σύγκριση με τη ζεύξη LoS, η ισχύς της ανακλώμενης διαδρομής πρώτης τάξης και δεύτερης τάξης μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό. Επιπλέον, αφενός οι υψηλές απώλειες εξασθένησης απαιτούν εστίαση της ισχύος του συνδέσμου μέσα σε μια πολύ στενή δέσμη, αφετέρου, το μικρό αποτύπωμα των κεραιών THz επιτρέπει στους πομποδέκτες να «ακονίζουν» τις δέσμες τους και να επιτυγχάνουν κέρδη διαμόρφωσης δέσμης. Έτσι, οι εξαιρετικά στενές ζεύξεις LoS δέσμης, δηλαδή οι pencil beam LoS links, θα μπορούσαν να μετριάσουν τις απώλειες εξασθένησης, να εξοπλίσουν το THz με δυνατότητες μετριάσμού φυσικών παρεμβολών και να ανοίξουν το δρόμο για την υπέρβαση του μικρού εύρους επικοινωνίας. Ωστόσο, η χρήση narrow beams οδηγεί σε νέες προκλήσεις που σχετίζονται με το beam tracking, το beam alignment και τη διαχείριση της κινητικότητας. Στην πραγματικότητα, τα pencil beams μπορούν εύκολα να διαταραχθούν από μπλοκαρίσματα, ξαφνικό βαθύ fade ή ελαφρύ beam misalignment μετά από οποιαδήποτε αλλαγή στην κατεύθυνση του χρήστη. Οι τύποι μπλοκαρίσματος που προκύπτουν σε συστήματα THz είναι τρεις: Στατικές (κτίρια, δέντρα, κ.λπ.), δυναμικές (γειτονικοί χρήστες) και το αυτομπλοκάρισμα. Τα στατικά μπλοκαρίσματα είναι ντετερμινιστικά και μπορούν εύλογα να μοντελοποιηθούν, γενικά, και να παραμεληθούν για δίκτυα THz εσωτερικού χώρου. Ωστόσο, η πρόβλεψη των δυναμικών μπλοκαρισμάτων και του αυτομπλοκαρίσματος εξαρτάται από την ανθρώπινη συμπεριφορά η οποία ποικίλλει

ανάλογα με τον τύπο του περιβάλλοντος. Ήδη υπάρχουσες λύσεις για τον περιορισμό των μπλοκαρισμάτων στα mmWaves δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, γιατί στα THz χρειάζεται μεγαλύτερη ακρίβεια. Η εγγύηση μιας βιώσιμης σύνδεσης LoS THz είναι στενά συνυφασμένη με τις διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με την κινητικότητα και το εύρος κίνησης των χρηστών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για μελλοντικές εφαρμογές όπως η ολογραφία, οι οποίες απαιτούν συνεχώς σταθερές συνδέσεις THz. Για να μετριαστεί η φύση μικρής εμβέλειας των συνδέσεων επικοινωνίας THz που προκαλείται από το αναπόφευκτο φαινόμενο μοριακής απορρόφησης και την υψηλή απώλεια διαδρομής, το THz θα μπορούσε να αναπτυχθεί πυκνά. Ωστόσο, δεδομένης της ευαισθησίας του beam alignment, μια πυκνή ανάπτυξη θα μπορούσε τελικά να δημιουργήσει αυξημένες παρεμβολές LoS καθώς και σημαντικά handovers.

Όπως προαναφέρθηκε, στις συχνότητες THz, οι απώλειες διαδρομής και ανάκλασης συνοδεύονται από ένα ακόμη φυσικό φαινόμενο επιζήμιο για τις επικοινωνίες, τη λεγόμενη μοριακή απορρόφηση. Αυτό το φαινόμενο όχι μόνο θα υποβαθμίσει τη λαμβανόμενη ισχύ, αλλά μπορεί επίσης να εντείνει τον θόρυβο. Έτσι, εισάγει θόρυβο μοριακής απορρόφησης επιπλέον του θερμικού θορύβου που παρατηρείται σε ζώνες χαμηλότερης συχνότητας. Στην πραγματικότητα, το φαινόμενο της μοριακής απορρόφησης παρατηρείται σε όλες τις συχνότητες, ωστόσο, έχει έντονο αποτέλεσμα μόνο στις συχνότητες THz, γι' αυτό και συχνά παραμελούνταν για χαμηλότερες συχνότητες. Στην πραγματικότητα, σε σύγκριση με το THz, η ζώνη συχνοτήτων mmWave παρουσιάζει πλουσιότερες πολλαπλές διαδρομές, έχει συνδέσεις NLoS με υψηλότερη ισχύ και απαιτεί ευρύτερα LoS beams. Έτσι, η εκτέλεση beam alignment και διαχείρισης κινητικότητας σε ζώνες mmWave είναι φυσικά λιγότερο περίπλοκη από ό,τι στις συχνότητες THz. Επιπλέον, η μοριακή απορρόφηση προκύπτει από τη διαφορά στην ενέργεια μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης ενεργειακής κατάστασης που βιώνουν τα μόρια του φυσικού μέσου όταν μεταδίδονται. Στη ζώνη THz, η μοριακή απορρόφηση είναι κυρίως ένα υποπροϊόν του νερού και των ατμών οξυγόνου στον αέρα. Έτσι, οι αλλαγές στις μετεωρολογικές συνθήκες θα οδηγήσουν σε δραστικές επιπτώσεις στη σύνθεση του αέρα και στη μοριακή απορρόφηση. Αυτό, με τη σειρά του, καθιστά τις επικοινωνίες THz πιο κατάλληλες για σενάρια εσωτερικού χώρου λόγω του χαμηλότερου ποσοστού υδρατμών. Παρόλο που η μοριακή απορρόφηση αυξάνεται με τη συχνότητα, αυτή η αύξηση δεν είναι ούτε ομαλή ούτε μονότονη. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν ορισμένες περιοχές όπου παρατηρείται μια πτώση στη γραμμή βάσης της μοριακής απορρόφησης σε ορισμένες φέρουσες συχνότητες. Ως εκ τούτου, συγκεκριμένα παράθυρα θα μπορούσαν να στοχευθούν για να επωφεληθούν από τον χαμηλότερο συντελεστή απορρόφησής τους. Ωστόσο, η σύσταση του αέρα αλλάζει ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες. Στην πραγματικότητα, δεδομένου ότι η μοριακή απορρόφηση THz συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τους υδρατμούς του αέρα, διαφορετικά επίπεδα υγρασίας αέρα θα συμβάλλουν σε διαφορετικά επίπεδα μοριακής απορρόφησης. Έτσι, αυτά τα παράθυρα μπορεί να είναι δυνητικά αναξιόπιστα δεδομένης της μεταβλητότητάς τους με βάση τη σύνθεση του αέρα. Στο εξής, η στόχευση αυτών των παραθύρων συχνότητας έχει πιο πολύ νόημα σε ελεγχόμενα και εσωτερικά περιβάλλοντα. Εξάλλου, η βασική γραμμή μοριακής απορρόφησης αυξάνεται με το carrier frequency. Στη συνέχεια, σε υψηλότερες συχνότητες,

μπορεί να αξιοποιηθεί άφθονο εύρος ζώνης. Εντωμεταξύ, η μοριακή απορρόφηση και το μεγάλο εύρος ζώνης THz είναι δύο αντίθετες δυνάμεις. Το πρώτο θέτει σε κίνδυνο την απόδοση με την πρόκληση περισσότερων απωλειών και θορύβου, ενώ το δεύτερο βελτιώνει την απόδοση ενισχύοντας τη χωρητικότητα του συστήματος. Από την οπτική γωνία της επικοινωνίας, η μοριακή απορρόφηση έχει μια μη μονοτονική επιζήμια επίδραση στις ζεύξεις THz. Ειδικότερα, προσθέτει ένα περιθώριο θορύβου, περιορίζει το εύρος επικοινωνίας και περιπλέκει τις ευκαιρίες σε εξωτερικούς χώρους. Ωστόσο, το φαινόμενο της μοριακής απορρόφησης παρέχει πολλά κέρδη στον αισθητήριο μηχανισμό THz.

Ως το κλειδί για την κατανόηση του φάσματος THz και τον καθορισμό των θεμελιωδών αρχών για τις επικοινωνίες και τη δικτύωση, η μοντελοποίηση και ο χαρακτηρισμός καναλιών THz έχουν τραβήξει την προσοχή τα τελευταία χρόνια. Σημαντικό είναι να γνωρίζουμε ποιες είναι οι βασικές ιδιότητες της διάδοσης. Έχουμε την απώλεια διασποράς, την ατμοσφαιρική απώλεια, τη διάχυτη σκέδαση και κατοπτρική ανάκλαση, την περιθλαση, τη σκέδαση, την επιρροή του καιρού, καθώς και φαινόμενα σπινθηρισμού. Οι προσεγγίσεις μοντελοποίησης καναλιών THz είναι ντετερμινιστικές, στατιστικές ή υβριδικές.

Η ντετερμινιστική μοντελοποίηση καναλιών εξαρτάται από τη γεωμετρία της τοποθεσίας και συχνά επιτυγχάνεται μέσω τεχνικών ανίχνευσης ακτίνων (RT) που είναι ικανές να χειρίζονται δομές συγκεκριμένης τοποθεσίας. Ωστόσο, η εφαρμογή RT σε κάθε διαδρομή καναλιού αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος. Ως λύση, η RT από σημείο σε σημείο μπορεί πρώτα να χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή των απωλειών μεταξύ εικονικών σημείων στον πομπό και τον δέκτη και το μοντέλο που προκύπτει μπορεί στη συνέχεια να αντιστοιχιστεί σε άλλα ΑΕ (Advanced Encryption), μειώνοντας την υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Η στατιστική μοντελοποίηση βασίζεται είτε σε μήτρα είτε σε κεραία αναφοράς. Σε ένα μοντέλο που βασίζεται σε μήτρα, κάθε ανεξάρτητο υποκανάλι αντιπροσωπεύεται από μια σύνθετη μεταβλητή Gauss. Τα μοντέλα που βασίζονται σε κεραία αναφοράς υποθέτουν στατιστική διάδοση μιας εισόδου και μιας εξόδου για δύο κεραίες αναφοράς με διανύσματα διεύθυνσης συστοιχίας τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη.

Τέλος, η μοντελοποίηση υβριδικού καναλιού συνδυάζει τα πλεονεκτήματα τόσο των ντετερμινιστικών όσο και των στατιστικών προσεγγίσεων, επιτρέποντας τη λήψη κυρίαρχων μονοπατιών μεμονωμένα με την ντετερμινιστική μέθοδο, ενώ άλλες διαδρομές μπορούν να δημιουργηθούν στατιστικά. Η τελευταία προσέγγιση καταγράφει χωροχρονικές ιδιότητες ενώ επιτρέπει την ομαλή χρονική εξέλιξη και αποφεύγοντας την ασυνέχεια του καναλιού. Τα μοντέλα καναλιών THz θα πρέπει περαιτέρω να λάβουν υπόψη τις προκλήσεις που προκαλούνται από τις σχετικά μεγάλες διαστάσεις των τεράστιων συστοιχιών κεραιών. Ειδικότερα, οι μη σταθερότητες προκύπτουν όταν πολλές περιοχές του πίνακα οπτικοποιούν διαφορετικές διαδρομές διάδοσης. Επιπλέον, με μεγάλες διαστάσεις συστοιχιών, είναι δύσκολο να εκπληρωθεί η υπόθεση επιπέδου-κύματος, ειδικά με μη πλασματικές συστοιχίες. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη προσεγγίσεις μοντελοποίησης καναλιών με σφαιρικό μέτωπο κύματος.

1.4 Τεχνολογίες των συσκευών για THz επικοινωνίες

Ως τελευταίο κομμάτι της ανασκόπησης, χρήσιμο είναι να γίνει μία αναφορά στις τεχνολογίες των συσκευών που χρησιμοποιούνται ή πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στις επικοινωνίες THz.

Αρχικά οι εξελίξεις στους Terahertz transceivers, έγκεινται αφενός στη βελτίωση των ηλεκτρονικών τεχνολογιών όπως CMOS πυριτίου, BiCMOS πυριτίου-γερμανίου, HEMT (High Electron Mobility Transistor), HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) και της τεχνολογίας διόδων Schottky, οι οποίες έχουν προχωρήσει πάρα πολύ και μπορούν να βρεθούν στη βάση πηγών, ενισχυτών και μικτών, έχοντας την ικανότητα να λειτουργούν σε συχνότητες κοντά στο 1 THz. Αφετέρου, οι φωτονικές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των οπτικών down-conversion συστημάτων που βασίζονται σε φωτομίξερ ή φωτοαγωγίμες κεραίες, UTC (Uni-Traveling Carrier) photodiodes και QCLs (Quantum Cascade Lasers), έχουν επίσης παρουσιαστεί ως δυνητικοί ενεργοποιητές πρακτικών THz συστημάτων επικοινωνίας. Παρότι η ισχύς των οπτικών συστημάτων είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή των ηλεκτρονικών συστημάτων, η πολύ υψηλή ταχύτητα με την οποία μπορούν να διαμορφωθούν και να επεξεργαστούν τα φωτονικά σήματα είναι προς όφελός τους. Επιπλέον, είναι δυνατοί και υβριδικοί συνδυασμοί, στους οποίους ο πομπός και ο δέκτης βασίζονται σε ηλεκτρονικές και φωτονικές τεχνολογίες, αντίστοιχα. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα στην ετερογενή ολοκλήρωση των ηλεκτρονικών και φωτονικών τεχνολογιών είναι μια πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε αυτήν την προσέγγιση. Σε κάτι διαφορετικό από τις προαναφερθείσες ηλεκτρονικές ή φωτονικές τεχνολογίες, η πρόσφατη υιοθέτηση νανοϋλικών άνοιξε μια νέα πόρτα για την ανάπτυξη νέων πλασμονικών συσκευών για επικοινωνίες THz. Ένα παράδειγμα είναι και η χρησιμοποίηση του γραφενίου. Αυτές οι συσκευές είναι εγγενώς μικρές, λειτουργούν αποτελεσματικά σε συχνότητες THz και μπορούν να υποστηρίξουν πολύ μεγάλα bandwidths επικοινωνίας. Αν και βρίσκεται ακόμη σε προγενέστερο στάδιο, αυτή η τεχνολογία μπορεί να αυξήσει δραστικά την απόδοση των συστημάτων επικοινωνιών THz χάρη στην έλλειψη απώλειας ενέργειας μέσω αρμονικών.

Φυσικά, πολύ σημαντικές είναι και οι κεραίες και συστοιχίες THz. Η χαμηλή ισχύς μετάδοσης των πομποδεκτών THz υπαγορεύει ουσιαστικά τη χρήση κατευθυντικών κεραιών. Αρκετά παραδοσιακά σχέδια κεραιών, συμπεριλαμβανομένων των διαγώνιων horn κεραιών, των κεραιών ανακλαστήρα Cassegrain και των lens κεραιών διατίθενται στο εμπόριο σε συχνότητες κάτω από 1 THz. Το μικρό μήκος κύματος των σημάτων THz επιτρέπει σε αυτές τις κεραίες να είναι πολύ μικρές. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει επίσης πιο καινοτόμους σχεδιασμούς, συμπεριλαμβανομένων κεραιών πολλαπλών ανακλαστήρων και κεραιών ενσωματωμένων σε φακούς, όλα σε πολύ μικρά ίχνη. Επιπλέον, όπως και στην περίπτωση των πομποδεκτών THz, μπορούν να χρησιμοποιηθούν νέα νανοϋλικά για το σχεδιασμό νέων τύπων κεραιών. Όπως και με τον σχεδιασμό των transceivers, το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για την

παραγωγή πλασματικών νανοκεραίων που ακτινοβολούν σήματα THz. Οι νανο-κεραίες αξιοποιούν τις ιδιότητες διάδοσης των κυμάτων SPP (Surface Plasmon Polariton), δηλαδή περιορισμένων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εμφανίζονται στη διεπαφή ενός μετάλλου και ενός διηλεκτρικού, στο γραφένιο, για αποτελεσματική ακτινοβολία σε συχνότητες THz. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεταλλικές κεραίες, είναι δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες, γεγονός που τους επιτρέπει να ενσωματωθούν σχεδόν σε οτιδήποτε και, επιπλέον, η απόκριση συχνότητάς τους μπορεί να ρυθμιστεί ηλεκτρονικά.

Εκτός από τη χρήση των συστοιχιών κεραιών στη μετάδοση και τη λήψη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces), δηλαδή επαναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες για τον έλεγχο της διάδοσης κυμάτων THz, την προσαρμογή της απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, την ανάκλαση, την πόλωση και την μετατόπιση φάσης, την ευθυγράμμιση και την εστίαση, μεταξύ άλλων. Η τεχνολογία των THz RIS μπορεί να ξεπεράσει αποτελεσματικά τη διακοπή των εμποδίων κατευθύνοντας τα κύματα σε εντελώς προσαρμοσμένες κατευθύνσεις. Εκτός από τον μετριασμό του προβλήματος μπλοκαρίσματος LoS, το RIS μπορεί να βελτιώσει την κάλυψη λειτουργώντας ως ρελέ, καθώς και την ασφάλεια σε συστήματα THz, κατευθύνοντας συνδέσεις ώστε να ξεπεράσουν τους υποκλοπείς.

2ο Κεφάλαιο

Η τεχνική MIMO

Μετά την επιτυχή ανάπτυξη των mmWave επικοινωνιών σε ασύρματα συστήματα πέμπτης γενιάς (5G), η ζώνη terahertz-(THz) διερευνάται ως ένας ενεργοποιητής που υποστηρίζει μεγαλύτερα εύρη ζώνης μεταξύ 0.1 και 10 THz σε 6G αλλά και πέρα από αυτό. Ωστόσο, εκτός από το κενό στις τεχνολογίες συσκευών THz, θα πρέπει πρώτα να ξεπεραστούν αρκετές προκλήσεις επεξεργασίας σήματος THz. Η διάδοση του σήματος THz έχει ως αποτέλεσμα στενές δέσμες, υψηλές απώλειες διαδρομής, χαμηλή περίθλαση, υψηλή σκέδαση, υψηλή ευαισθησία σε μπλοκαρίσματα και σημαντικές διαφορές μεταξύ των κερδών διαδρομής οπτικής επαφής (LoS) και μη γραμμής όρασης (NLoS). Ενεργοποιητές υποδομής όπως η τεχνολογία Multiple Input – Multiple Output (MIMO) μπορούν να μετριάσουν τέτοια προβλήματα συσκευάζοντας πολλές κεραιές σε συστοιχίες μικροσκοπικών αποτυπωμάτων στον πομπό και στον δέκτη, βελτιώνοντας τα κέρδη διαμόρφωσης δέσμης και πολυπλεξίας.

2.1 Γενικά για το MIMO

Το MIMO μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρεις κύριες κατηγορίες: το precoding, το Spatial Multiplexing (SM) και το diversity coding.

Το precoding είναι το beamforming πολλαπλών ρευμάτων, στον στενότερο ορισμό. Σε γενικότερους όρους, θεωρείται ότι είναι όλο το spatial multiplexing που συμβαίνει στον πομπό. Στο beamforming μονής ροής, το ίδιο σήμα εκπέμπεται από κάθε μια από τις κεραιές εκπομπής με κατάλληλη φάση και βάρος κέρδους έτσι ώστε η ισχύς του σήματος να μεγιστοποιείται στην είσοδο του δέκτη. Τα πλεονεκτήματα του beamforming είναι η αύξηση του κέρδους του λαμβανόμενου σήματος – κάνοντας τα σήματα που εκπέμπονται από διαφορετικές κεραιές να αθροίζονται εποικοδομητικά – και η μείωση του φαινομένου της εξασθένισης πολλαπλών διαδρομών. Στο line-of-sight propagation, το beamforming έχει ως αποτέλεσμα ένα καλά καθορισμένο μοτίβο κατεύθυνσης. Ωστόσο, τα conventional beams δεν είναι καλή αναλογία στα κυψελωτά δίκτυα, τα οποία χαρακτηρίζονται κυρίως από multipath propagation. Όταν ο δέκτης έχει πολλαπλές κεραιές, το beamforming εκπομπής δεν μπορεί να μεγιστοποιήσει ταυτόχρονα το επίπεδο σήματος σε όλες τις κεραιές λήψης και το precoding με πολλαπλές ροές είναι συχνά ωφέλιμο. Να σημειώσουμε ότι το precoding απαιτεί γνώση του Channel State Information (CSI) στον πομπό και στον δέκτη.

Το spatial multiplexing απαιτεί διαμόρφωση κεραίας MIMO. Στο spatial multiplexing, ένα σήμα υψηλής ταχύτητας χωρίζεται σε πολλαπλές ροές χαμηλότερου ρυθμού και κάθε ροή μεταδίδεται από διαφορετική κεραία εκπομπής στο ίδιο κανάλι συχνότητας. Εάν αυτά τα σήματα φτάσουν στη διάταξη κεραίας του δέκτη με επαρκώς διαφορετικά spatial signatures και ο δέκτης έχει ακριβές CSI, μπορεί να διαχωρίσει αυτές τις ροές σε (σχεδόν) παράλληλα κανάλια. Το spatial multiplexing είναι μια πολύ ισχυρή τεχνική για την αύξηση του capacity του καναλιού σε υψηλότερα Signal to Noise Ratio (SNR). Ο μέγιστος αριθμός χωρικών ροών περιορίζεται από τον μικρότερο από τον αριθμό των κεραιών στον πομπό ή τον δέκτη. Το spatial multiplexing μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς CSI στον πομπό, αλλά μπορεί να συνδυαστεί με precoding εάν είναι διαθέσιμο το CSI. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ταυτόχρονη μετάδοση σε πολλαπλούς δέκτες, γνωστή ως space-division multiple access ή multi-user MIMO, στην οποία περίπτωση απαιτείται CSI στον πομπό. Ο προγραμματισμός των δεκτών με διαφορετικά spatial signatures επιτρέπει καλό διαχωρισμό.

Οι τεχνικές diversity coding χρησιμοποιούνται όταν δεν υπάρχει γνώση καναλιού στον πομπό. Στις μεθόδους diversity, μεταδίδεται ένα μόνο ρεύμα (σε αντίθεση με τις πολλαπλές ροές στο spatial multiplexing), αλλά το σήμα κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας τεχνικές που ονομάζονται space-time coding. Το σήμα εκπέμπεται από κάθε μια από τις κεραιές εκπομπής με πλήρη ή σχεδόν ορθογώνια κωδικοποίηση. Το diversity coding εκμεταλλεύεται το ανεξάρτητη εξασθένιση στις συνδέσεις πολλαπλών κεραιών για να βελτιώσει το diversity του σήματος. Επειδή δεν υπάρχει γνώση καναλιών, δεν υπάρχει beamforming ή κέρδος πίνακα από το diversity coding. Το diversity coding μπορεί να συνδυαστεί με spatial multiplexing όταν κάποια γνώση καναλιού είναι διαθέσιμη στον δέκτη.

2.2 Σημαντικές εξισώσεις για την τεχνολογία MIMO

Παρακάτω θα δούμε κάποια από τα βασικά στοιχεία, καθώς και μερικές από τις σημαντικότερες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται κατά την ανάπτυξη των συστημάτων MIMO.

Αρχικά, ο αριθμός των κεραιών στα άκρα εκπομπής και λήψης ενός συστήματος MIMO αναπαρίσταται συχνά ως "M" και "N", αντίστοιχα, όπου το M αντιπροσωπεύει τον αριθμό των κεραιών στο άκρο εκπομπής και το N αντιπροσωπεύει τον αριθμό των κεραιών στο άκρο λήψης. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση MIMO είναι το σύστημα "2x2 MIMO", όπου χρησιμοποιούνται δύο κεραιές τόσο στο άκρο εκπομπής όσο και στο άκρο λήψης. Σε ένα σύστημα MIMO 2x2, η μήτρα καναλιού H μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \mathbf{h}_2]$$

όπου τα \mathbf{h}_1 και \mathbf{h}_2 αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές καναλιού μεταξύ της πρώτης και δεύτερης κεραίας εκπομπής και της πρώτης και δεύτερης κεραίας λήψης, αντίστοιχα.

MIMO Channel Model: Στα συστήματα MIMO, χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραίες και στο άκρο εκπομπής και λήψης και η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω πολλαπλών χωρικών καναλιών. Ο πίνακας καναλιών MIMO \mathbf{H} αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ των μεταδιδόμενων και λαμβανόμενων σημάτων και μπορεί να μοντελοποιηθεί ως τυχαίος πίνακας με στοιχεία που προέρχονται από κάποια κατανομή πιθανοτήτων.

Channel Capacity: Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων που μπορεί να μεταδοθεί μέσω ενός ασύρματου καναλιού δίνεται από τον τύπο χωρητικότητας καναλιού:

$C = B \log_2 (1 + \text{SNR})$, όπου B είναι το εύρος ζώνης, SNR είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο και ο λογάριθμος είναι προς τη βάση 2.

Η χωρητικότητα ενός καναλιού MIMO με κεραίες εκπομπής N_t και κεραίες λήψης N_r μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$C = \min(N_t, N_r) \log_2 (\det(\mathbf{I} + \text{SNR}/N_t \mathbf{H} \mathbf{H}^*)),$$

όπου \mathbf{I} είναι η μήτρα ταυτότητας, \mathbf{H} είναι η μήτρα καναλιού MIMO και SNR είναι η αναλογία σήματος προς θόρυβο. Η χωρητικότητα ενός καναλιού MIMO εξαρτάται από τις μοναδικές τιμές του πίνακα καναλιών MIMO και την αναλογία σήματος προς θόρυβο.

Singular Value Decomposition (SVD): Η αποσύνθεση της μοναδικής τιμής του πίνακα \mathbf{H} του καναλιού MIMO δίνεται από το $\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^*$, όπου τα \mathbf{U} και \mathbf{V} είναι μοναδιαίες μήτρες και το $\mathbf{\Sigma}$ είναι ένας διαγώνιος πίνακας με μοναδικές τιμές $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{\min(N_t, N_r)}$, που αντιπροσωπεύει τον πραγματικό αριθμό των χωρικών καναλιών στο σύστημα MIMO. Οι μοναδικές τιμές του $\mathbf{\Sigma}$ καθορίζουν τη χωρητικότητα του καναλιού MIMO.

Eigenvalue Decomposition: Η αποσύνθεση ιδιοτιμών ενός πίνακα καναλιού MIMO \mathbf{H} δίνεται από το $\mathbf{H} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^*$, όπου \mathbf{V} είναι ένας ενιαίος πίνακας και $\mathbf{\Lambda}$ είναι ένας διαγώνιος πίνακας. Οι ιδιοτιμές του $\mathbf{\Lambda}$ αντιπροσωπεύουν τις μοναδικές τιμές του καναλιού MIMO.

MIMO Detection Techniques: Για να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα ενός καναλιού MIMO, πρέπει να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικές τεχνικές ανίχνευσης στον δέκτη. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν την ανίχνευση μέγιστης πιθανότητας (ML), την ανίχνευση μηδενικής επιβολής (ZF) και την ανίχνευση ελάχιστου μέσου τετραγώνου σφάλματος (MMSE). Αυτές οι τεχνικές ανίχνευσης λειτουργούν με την εκμετάλλευση της δομής του πίνακα καναλιών MIMO και των λαμβανόμενων σημάτων για την εκτίμηση των μεταδιδόμενων συμβόλων.

Error Correction Coding: Για την καταπολέμηση των επιπτώσεων του θορύβου και της εξασθένησης στα συστήματα MIMO, χρησιμοποιείται κωδικοποίηση διόρθωσης σφαλμάτων. Η κωδικοποίηση διόρθωσης σφαλμάτων περιλαμβάνει την προσθήκη πλεονασμού στα μεταδιδόμενα σήματα για να μπορέσει ο δέκτης να διορθώσει τα σφάλματα. Οι δημοφιλείς κωδικοί διόρθωσης σφαλμάτων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα MIMO περιλαμβάνουν τους κωδικούς Turbo και τους κωδικούς ελέγχου ισότητας χαμηλής πυκνότητας (LDPC).

2.3 MIMO στις THz επικοινωνίες

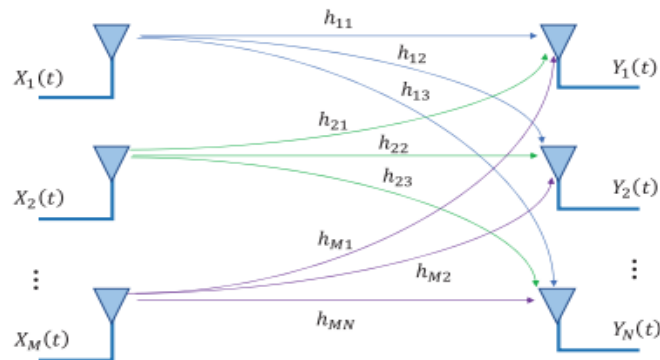
Το Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) είναι μια τεχνολογία σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές τόσο στο άκρο εκπομπής όσο και στη λήψη ενός συστήματος επικοινωνίας για τη βελτίωση της απόδοσης και της χωρητικότητας του συστήματος.

Η τεχνολογία MIMO μπορεί να θεωρηθεί ως γενίκευση των συστημάτων επικοινωνίας Single-Input Single-Output (SISO), όπου η επικοινωνία εκτελείται μεταξύ μιας μόνο κεραιάς στο άκρο εκπομπής και μιας μόνο κεραιάς στο άκρο λήψης. Στα συστήματα MIMO, χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραιές τόσο στο άκρο εκπομπής όσο και στο άκρο λήψης, γεγονός που οδηγεί σε πολλαπλά παράλληλα κανάλια επικοινωνίας, γνωστά ως χωρικά ρεύματα.

Η χρήση πολλαπλών κεραιών σε συστήματα MIMO παρέχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- Αυξημένη φασματική απόδοση: Το MIMO επιτρέπει τη χρήση πολλαπλών παράλληλων καναλιών επικοινωνίας, με αποτέλεσμα αυξημένη φασματική απόδοση, δηλαδή την ποσότητα δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν σε ένα δεδομένο εύρος ζώνης.
- Βελτιωμένη ισχύς και ποιότητα σήματος: Το MIMO μπορεί να βελτιώσει την ισχύ και την ποιότητα του σήματος του συστήματος επικοινωνίας χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές για τη μετάδοση σημάτων και τη λήψη των μεταδιδόμενων σημάτων από διαφορετικές κατευθύνσεις.
- Ενισχυμένη ανθεκτικότητα στις παρεμβολές: Το MIMO μπορεί να βελτιώσει την ανθεκτικότητα του συστήματος επικοινωνίας στις παρεμβολές χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές για τη μετάδοση σημάτων και τη λήψη σημάτων από διαφορετικές κατευθύνσεις.
- Αυξημένη χωρητικότητα: Το MIMO αυξάνει τη χωρητικότητα του συστήματος επικοινωνίας επιτρέποντας τη μετάδοση και τη λήψη πολλαπλών ροών δεδομένων ταυτόχρονα.

Το εύρος ζώνης της ζώνης terahertz είναι πολύ μεγάλο, κάτι το οποίο υποστηρίζει τον ρυθμό μετάδοσης terabit ανά δευτερόλεπτο και η ίδια η ζώνη terahertz έχει επιλεκτικότητα συχνότητας. Στις νανοεπικοινωνίες, λόγω των περιορισμών της ενέργειας των νανosuσκευών και άλλων παραγόντων, η απόσταση μεταξύ του άκρου αποστολής και του άκρου λήψης είναι σχετικά κοντινή, αλλά η απόσταση της κεραιάς είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση μεταξύ του άκρου αποστολής και του τέλους λήψης. Στη μετάδοση σε μικρή απόσταση, η αντιπαρεμβολή της terahertz band είναι πολύ καλή. Το απλοποιημένο μοντέλο καναλιού MIMO στο κανάλι terahertz εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα και περιγράφεται στην επόμενη υποενότητα.



Σχήμα 2.1 – Simplified MIMO channel in THz communication

2.3.1 Channel model του MIMO στις THz επικοινωνίες

Επειδή το μήκος κύματος της ζώνης terahertz είναι πολύ μικρό όταν οι νανο-κόμβοι επικοινωνούν στη ζώνη terahertz, ένας μεγάλος αριθμός μη συνδεδεμένων κεραιών μπορεί να αναπτυχθεί σε περιορισμένο χώρο για να σχηματίσει μια μεγάλη συστοιχία κεραιών που παρέχει ευκολία για την υλοποίηση του MIMO. Προς το παρόν, οι περισσότερες έρευνες στα κανάλια terahertz αφορούν την απόκτηση ενέργειας και την ανάλυση χωρητικότητας πληροφοριών, ενώ υπάρχουν λίγες μελέτες για πολλαπλές εισόδους και πολλαπλές εξόδους (MIMO) στη ζώνη terahertz. Εξαιτίας αυτού, αυτή η εργασία προτείνει ένα μοντέλο MIMO κατάλληλο για τη ζώνη συχνοτήτων terahertz και αναλύει το μοντέλο καναλιού με χωρητικότητα διέλευσης ως μετρική.

Το εύρος ζώνης της ζώνης terahertz είναι πολύ μεγάλο, κάτι το οποίο υποστηρίζει τον ρυθμό μετάδοσης terabit ανά δευτερόλεπτο και η ίδια η ζώνη terahertz έχει επιλεκτικότητα συχνότητας. Στις νανοεπικοινωνίες, λόγω των περιορισμών της ενέργειας των νανοσυσκευών και άλλων παραγόντων, η απόσταση μεταξύ του άκρου αποστολής και του άκρου λήψης είναι σχετικά κοντινή, αλλά η απόσταση της κεραίας είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση μεταξύ του άκρου αποστολής και του τέλους λήψης. Στη μετάδοση σε μικρή απόσταση, η αντιπαρεμβολή της terahertz band είναι πολύ καλή. Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών, το κανάλι MIMO του διαμορφώνεται ως εξής. Το απλοποιημένο μοντέλο καναλιού MIMO στο κανάλι terahertz εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα.

Όπως φαίνεται στο Figure 1, έστω ότι υπάρχουν M κεραιές στο άκρο εκπομπής και N κεραιές στο άκρο λήψης. Τα σήματα που μεταδίδονται στη διάταξη κεραίας μπορούν να εκφραστούν ως

$$x(t) = [x_1(t)x_2(t)\dots x_M(t)]^T$$

μεταξύ αυτών, το σύμβολο $[\cdot]^T$ αντιπροσωπεύει τη μετάθεση του πίνακα και το $x_j(t)$ είναι το σήμα της j ης θύρας της κεραίας στο άκρο εκπομπής.

Ομοίως, τα σήματα στη διάταξη κεραίας στο άκρο λήψης είναι

$$y(t) = [y_1(t)y_2(t)\dots y_N(t)]^T$$

Μεταξύ αυτών, το $y_i(t)$ είναι το σήμα της i ης θύρας της κεραίας στο άκρο λήψης. Στη μετάδοση σήματος, υπάρχει η επίδραση των παραγόντων θορύβου που μπορεί να εκφραστεί ως

$$w(t) = [w_1(t)w_2(t)\dots w_N(t)]^T$$

Μεταξύ αυτών, το $w_k(t)$ είναι το σήμα θορύβου στο κανάλι. Εξάλλου, η στιγμική κέρδους του καναλιού A_n στο n ιοστό μονοπάτι είναι

$$A_n = \begin{bmatrix} a_{11}[n] & a_{12}[n] & \dots & a_{1M}[n] \\ a_{21}[n] & a_{22}[n] & \dots & a_{2M}[n] \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{N1}[n] & a_{N2}[n] & \dots & a_{NM}[n] \end{bmatrix}$$

Μεταξύ αυτών, το $a_{ij}[n]$ αντιπροσωπεύει τον συντελεστή καναλιού της j ης κεραίας στο άκρο αποστολής και το i ης κεραίας στο άκρο λήψης στο n ιοστό μονοπάτι, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί με την ακόλουθη παράσταση

$$a_{ij} = \sqrt{P_j} B_{vij}$$

Μεταξύ αυτών, το P_j είναι η μέση ισχύς του σήματος στον πομπό $x_j(t)$. Το B είναι ένας σύνθετος πίνακας του $i \times j$. Το v_{ij} είναι το βάρος του καναλιού από την j η κεραία στο άκρο αποστολής έως την κεραία i η κεραία στο άκρο λήψης. Είναι μια σύνθετη Gaussian τυχαία μεταβλητή, όπου $E\{|v_{ij}|^2\} = 1$, και η μέση τιμή είναι 0. Ορίζουμε το συνολικό αριθμό MIMO διαδρομών καναλιού σε επικοινωνία terahertz στο L και η καθυστέρηση στο σ . Συνοψίζοντας, η σχέση σήματος μεταξύ του διακριτοποιημένου δέκτη και του πομπού μπορεί να εκφραστεί ως

$$y(t) = \sum_{n=1}^L A_n x(t - \sigma) + w(t)$$

2.3.2 Capacity analysis του MIMO στις THz επικοινωνίες

Για να ποσοτικοποιηθούν οι δυνατότητες του MIMO channel model στη ζώνη terahertz, χρησιμοποιείται ως μέτρηση απόδοσης η χωρητικότητα του καναλιού. Στην ανάλυση, η ζώνη συχνοτήτων terahertz θεωρείται ως ένα ενιαίο παράθυρο μετάδοσης με πλάτος 10 THz. Μέσω του πρωτοκόλλου terahertz ελέγχου πρόσβασης καναλιού μετάδοσης, οι πληροφορίες κατάστασης καναλιού (CSI) μπορούν να ληφθούν στο άκρο λήψης, αλλά δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι το άκρο του πομπού γνωρίζει επίσης τις πληροφορίες καναλιού.

Η ζώνη συχνοτήτων των terahertz είναι εξαιρετικά επιλεκτική ως προς τη συχνότητα και ταυτόχρονα, ο θόρυβος της μοριακής απορρόφησης είναι μη λευκός. Επομένως, κατά τον υπολογισμό της χωρητικότητας των καναλιών MIMO σε επικοινωνία THz, η συνολική χωρητικότητα λαμβάνεται διαιρώντας το συνολικό εύρος ζώνης σε πολλαπλές στενές υποζώνες και υπολογίζοντας τις χωρητικότητες τους. Η ζώνη συχνοτήτων χωρίζεται σε n υποκανάλια και το εύρος ζώνης κάθε υποκαναλιού είναι Df . Η χωρητικότητα διέλευσης του καναλιού εκφράζεται ως

$$C = \Delta_f \sum^n \ln \left(I_n + \frac{\xi}{M} A_n A_n^T \right)$$

Όταν το πλάτος της υποζώνης είναι αρκετά μικρό, κάθε υποκανάλι μπορεί να θεωρηθεί ως μη επιλεκτικό επίπεδο κανάλι, και η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου μπορεί να θεωρηθεί τοπικά επίπεδη αυτή τη στιγμή, τότε η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της χωρητικότητας του καναλιού. Όπου ξ είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) του καναλιού και η τιμή του μπορεί να εκφραστεί ως

$$\xi = \frac{S}{WP}$$

όπου S είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος στο άκρο εκπομπής. W είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου. Το P αντιπροσωπεύει την απώλεια διαδρομής μετάδοσης του καναλιού. Στη ζώνη συχνοτήτων terahertz, η συνολική απώλεια διαδρομής και η επίδραση του θορύβου καθορίζονται κυρίως από τη συχνότητα, την απόσταση μετάδοσης και τη σύνθεση του μοριακού μέσου. Ο θόρυβος περιλαμβάνει κυρίως ηλεκτρονικό θόρυβο του συστήματος, θόρυβο κεραίας, θόρυβο μοριακής απορρόφησης και άλλους πρόσθετους θορύβους. Δεδομένου ότι η επίδραση του ηλεκτρονικού θορύβου και του θορύβου της κεραίας στο παρόν περιβάλλον είναι πολύ χαμηλή, η κύρια εστίαση είναι στον θόρυβο μοριακής απορρόφησης. Σύμφωνα με μελέτη η φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου W μπορεί να εκφραστεί ως

$$W = kB \int T_0 \left(1 - e^{-k(f)d} \right) df$$

Μεταξύ αυτών, το T_0 είναι η θερμοκρασία αναφοράς. Το d είναι η απόσταση μετάδοσης. Το $k(f)$ είναι συντελεστής απορρόφησης του μέσου. Το k είναι η σταθερά Boltzmann. Η απώλεια διαδρομής αποτελείται κυρίως από απώλεια μετάδοσης P_{spread} και εξασθένιση μοριακής απορρόφησης P_{abs} , και η τιμή του P μπορεί να ληφθεί με την ακόλουθη έκφραση

$$P = P_{\text{spread}} + P_{\text{abs}} = 20 \log(4\pi fd/c) + k(f)d 10 \log e$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

3ο Κεφάλαιο

Η τεχνική NOMA

3.1 Γενικά για NOMA

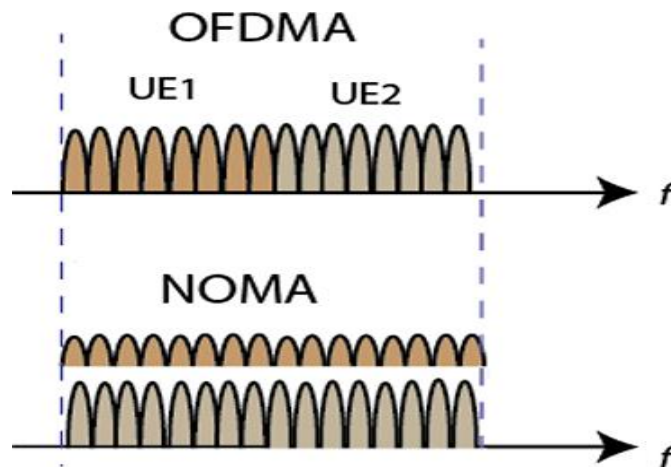
Η θεμελιώδης ιδέα του NOMA διευκολύνει την υποστήριξη πολλών χρηστών στον τομέα ισχύος. Σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές multiple access (MA), το NOMA χρησιμοποιεί μια νέα διάσταση για την εκτέλεση multiplexing σε έναν από τους κλασικούς τομείς χρόνου/συχνότητας. Με άλλα λόγια, το NOMA μπορεί να θεωρηθεί ως μια «πρόσθετη» τεχνική, η οποία έχει την πολλά υποσχόμενη δυνατότητα να διευκολύνει την αρμονική ενσωμάτωση με τις υπάρχουσες legacy λύσεις. Σε αυτή την ενότητα, εισάγεται η βασική έννοια του NOMA, παρουσιάζοντας τις σχετικές βασικές τεχνολογίες και συνοψίζονται τα κύρια πλεονεκτήματά του. Επίσης γίνεται διάκριση με της τεχνική OMA.

Οι βασικές αρχές των τεχνικών NOMA βασίζονται στην χρήση του Superposition Coding (SC) στον πομπό και των τεχνικών Sequential Interference Cancellation (SIC) στο δέκτη.

Superposition Coding: Προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Cover ήδη από το 1972, η κομψή ιδέα του SC θεωρείται ως ένα από τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία των σχημάτων κωδικοποίησης που σχεδιάστηκαν για την επίτευξη της χωρητικότητας ενός βαθμωτού Gaussian Broadcast Channel. Πιο συγκεκριμένα, αποδείχθηκε θεωρητικά ότι το SC είναι ικανό να προσεγγίσει τις ικανότητες τόσο του Gaussian BC όσο και του γενικού BC, όπως ορίζεται από την εργασία του Bergmans που δημοσιεύτηκε ήδη από το 1973 και από τον Gallager. Η θεμελιώδης ιδέα του SC είναι ότι είναι σε θέση να κωδικοποιεί ένα μήνυμα για έναν χρήστη που σχετίζεται με κακές συνθήκες καναλιού με χαμηλότερο ρυθμό και στη συνέχεια να υπερθέτει το σήμα ενός χρήστη που έχει καλύτερες συνθήκες καναλιού σε αυτό. Εμπνευσμένοι από τις στέρεες βάσεις που τέθηκαν από τη σκοπιά της θεωρίας πληροφοριών, οι ερευνητές παρακινήθηκαν να εφαρμόσουν το SC σε διαφορετικά κανάλια, όπως κανάλια παρεμβολής, κανάλια αναμετάδοσης, κανάλια MA και κανάλια υποκλοπής. Ενώ οι προαναφερθείσες συνεισφορές παρακινούν ισχυρά τη χρήση του SC από θεωρητική άποψη, απαιτήθηκε περαιτέρω έρευνα για την εξέλιξη αυτής της τεχνικής από τη θεωρία στην πράξη. Συγκεκριμένα, η Vanka σχεδίασε μια πειραματική πλατφόρμα χρησιμοποιώντας ένα σύστημα Software-Defined Radio (SDR) για τη διερεύνηση της απόδοσης του SC. Προσδιορίστηκε το σύνολο των επιτεύξιμων ζευγών ρυθμού κάτω από έναν συγκεκριμένο περιορισμό σφάλματος πακέτου.

Successive Interference Cancellation: Έχει αξιοποιηθεί ευρέως ότι το capacity του δικτύου μπορεί να βελτιωθεί ουσιαστικά με τη βοήθεια αποτελεσματικής διαχείρισης παρεμβολών, επομένως το SIC θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνική IC στα ασύρματα δίκτυα. Με την επίκληση της ακόλουθης διαδικασίας, επιτρέπεται στο χρήστη που έχει το ισχυρότερο σήμα να εντοπιστεί πρώτος, ο οποίος έχει ως εκ τούτου το λιγότερο επηρεασμένο από παρεμβολές σήμα. Στη συνέχεια, ο ισχυρότερος χρήστης επανακωδικοποιεί και αναδιαμορφώνει το σήμα του, το οποίο στη συνέχεια αφαιρείται από το σύνθετο σήμα. Την ίδια διαδικασία ακολουθεί το δεύτερο ισχυρότερο σήμα, το οποίο μάλιστα έχει γίνει το ισχυρότερο σήμα. Όταν εντοπιστούν όλα τα σήματα εκτός από ένα, ο πιο αδύναμος χρήστης αποκωδικοποιεί τις πληροφορίες του χωρίς να υποφέρει από καμία απολύτως παρεμβολή.

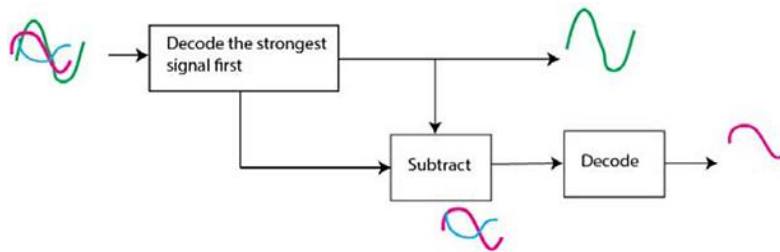
Για να κατανοήσουμε περισσότερο τη λειτουργία του NOMA, ας δούμε ένα παράδειγμα. Θεωρούμε το orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) ως σχήμα διαμόρφωσης και το NOMA ως σχήμα multiple access. Στα συμβατικά δίκτυα 4G, ως φυσική επέκταση του OFDM, χρησιμοποιείται orthogonal frequency division multiple access (OFDMA), όπου οι πληροφορίες για κάθε χρήστη εκχωρούνται σε ένα υποσύνολο subcarriers. Στο NOMA, από την άλλη πλευρά, όλοι οι subcarriers μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κάθε χρήστη. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την κοινή χρήση φάσματος για τις περιπτώσεις OFDMA και NOMA για δύο χρήστες. Η ιδέα ισχύει τόσο για τη uplink όσο και για downlink μετάδοση.



Σχήμα 3.1 – Spectrum sharing for OFDMA and NOMA for two users

To superposition coding στον πομπό και το successive interference cancellation (SIC) στον δέκτη καθιστούν δυνατή τη χρήση του ίδιου φάσματος για όλους τους χρήστες. Στη θέση του πομπού, όλα τα επιμέρους σήματα πληροφοριών υπερτίθενται σε μία μόνο κυματομορφή, ενώ στον δέκτη, το SIC αποκωδικοποιεί τα σήματα ένα προς ένα μέχρι να βρει το επιθυμητό σήμα. Το Σχήμα 2 απεικονίζει την έννοια. Στην εικόνα, τα τρία σήματα πληροφοριών που υποδεικνύονται με διαφορετικά χρώματα τοποθετούνται στον πομπό. Το λαμβανόμενο σήμα

στον δέκτη SIC περιλαμβάνει και τα τρία αυτά σήματα. Το πρώτο σήμα που αποκωδικοποιεί το SIC είναι το ισχυρότερο, ενώ τα άλλα λογίζονται ως interference. Το πρώτο αποκωδικοποιημένο σήμα αφαιρείται στη συνέχεια από το λαμβανόμενο σήμα και εάν η αποκωδικοποίηση είναι τέλεια, λαμβάνεται με ακρίβεια η κυματομορφή με τα υπόλοιπα σήματα. Το SIC επαναλαμβάνει τη διαδικασία μέχρι να βρει το επιθυμητό σήμα.



Σχήμα 3.2 – Successive Interference Cancellation

Η επιτυχία του SIC εξαρτάται από το τέλει cancellation των σημάτων στα βήματα της επανάληψης. Ο πομπός θα πρέπει να μοιράζει με ακρίβεια την ισχύ μεταξύ των κυματομορφών πληροφοριών χρήστη και να τις υπερθέτει. Η μεθοδολογία για τον διαχωρισμό ισχύος διαφέρει για κανάλια ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης.

3.2 Σημαντικές Εξισώσεις για την τεχνολογία NOMA

Το NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) είναι μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης στην ασύρματη επικοινωνία που χρησιμοποιεί superposition coding και Sequential Interference Cancellation για να επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται τους ίδιους πόρους συχνότητας ταυτόχρονα. Υπάρχουν πολλές μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το σύστημα NOMA και την απόδοσή του. Μερικές από τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι:

Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR): Αυτή η εξίσωση περιγράφει τον λόγο της επιθυμητής ισχύος σήματος προς το άθροισμα της ισχύος παρεμβολής και θορύβου.

$$\text{SINR} = (\text{Signal Power}) / (\text{Interference Power} + \text{Noise Power})$$

Power Allocation: Αυτή η εξίσωση περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο η συνολική διαθέσιμη ισχύς κατανέμεται μεταξύ πολλών χρηστών στο NOMA.

Power Allocation = Total Power / Number of Users

Sequential Interference Cancellation (SIC): Αυτή η εξίσωση περιγράφει πώς ακυρώνεται η παρεμβολή από έναν χρήστη για την αποκωδικοποίηση του σήματος ενός άλλου χρήστη.

$SIC = (\text{User 1 Signal}) - (\text{User 2 Interference})$

Channel Capacity: Αυτή η εξίσωση περιγράφει τη μέγιστη ταχύτητα δεδομένων που μπορεί να μεταδοθεί σε ένα κανάλι.

$\text{Channel Capacity} = \text{Bandwidth} * \log_2 (1 + \text{SINR})$

Επιπλέον, υπάρχουν αρκετές προηγμένες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της απόδοσης των συστημάτων NOMA, μερικές από τις οποίες είναι:

Ergodic Capacity: Αυτή η εξίσωση περιγράφει τη μέση χωρητικότητα σε όλες τις πιθανές πραγματοποιήσεις των fading channels.

$\text{Ergodic Capacity} = E[\log_2 (1 + \text{SINR})]$

Outage Probability: Αυτή η εξίσωση περιγράφει την πιθανότητα το ληφθέν SINR να είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο.

$\text{Outage Probability} = \Pr(\text{SINR} < \text{threshold})$

Bit Error Rate (BER): Αυτή η εξίσωση περιγράφει την πιθανότητα να συμβεί ένα σφάλμα στη μετάδοση των bit.

$\text{BER} = \Pr (\text{Bit Error})$

Channel Gain: Αυτή η εξίσωση περιγράφει το κέρδος ενός καναλιού ως προς την αναλογία ισχύος μεταξύ του μεταδιδόμενου σήματος και του λαμβανόμενου σήματος.

$\text{Channel Gain} = (\text{Received signal power}) / (\text{Transmitted signal power})$

Symbol Error Rate (SER): Αυτή η εξίσωση περιγράφει την πιθανότητα να συμβεί σφάλμα στη μετάδοση συμβόλων.

$$\text{SER} = \text{Pr}(\text{Symbol Error})$$

3.3 Η χρήση NOMA στα THz συστήματα και ο συνδυασμός με τύπους MIMO

Σε ό, τι αφορά στο multiple access και συγκεκριμένα στο NOMA στα THz συστήματα, λόγω του μικρού μήκους κύματος των THz, η Super massive multiple-input multiple-output (SM-MIMO) γίνεται απαραίτητο συστατικό για τις επικοινωνίες THz για την εκμετάλλευση της χωρικής ποικιλομορφίας. Γενικά, εάν ο αριθμός των χρηστών με ανεξάρτητα κανάλια είναι πολύ μικρότερος από τον αριθμό των κεραιών, το NOMA δεν είναι πιο αποτελεσματική τεχνική πολλαπλής πρόσβασης από τις παραδοσιακές λύσεις για συστήματα multi-user MIMO (MU-MIMO). Ωστόσο, τα κανάλια χαμηλής κατάταξης των χρηστών THz συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό λόγω της περιορισμένης διασποράς μετάδοσης. Ως εκ τούτου, το NOMA γίνεται μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης σε δίκτυα που υποστηρίζονται από THz.

Για τις επικοινωνίες THz, το NOMA στοχεύει να ομαδοποιήσει όλους τους χρήστες υψηλής συσχέτισης σε ένα σύμπλεγμα NOMA και να τους εκχωρήσει διαφορετικά επίπεδα ισχύος εκπομπής για αποκωδικοποίηση σύμφωνα με το υβριδικό SIC (Successive Interference Cancellation). Μετά από αυτό, κάθε σύμπλεγμα NOMA θα έχει ένα beam και διαφορετικά συμπλέγματα NOMA θα εξυπηρετούνται με τεχνικές MU-MIMO. Δεδομένου ότι η LoS σύνδεση είναι ο πιο σημαντικός τρόπος μετάδοσης στις επικοινωνίες THz, η ομαδοποίηση των χρηστών που βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή σε ένα σύμπλεγμα καθίσταται δυνατή. Αυτός ο σχεδιασμός ομαδοποίησης χρήστη έχει χαμηλή πολυπλοκότητα, καθώς το μόνο που αρκεί είναι το πλήρες CSI ενός χρήστη αναφοράς, δηλαδή το cluster head, σε κάθε σύμπλεγμα NOMA.

Οι τεχνικές ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (OMA) χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και την ικανοποίηση των απαιτούμενων απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Τα συστήματα OMA εξυπηρετούν πολλούς χρήστες χρησιμοποιώντας ορθογώνιους πόρους χρόνου, συχνότητας ή κώδικα για να αποτρέψουν την ενδοκυτταρική παρεμβολή μεταξύ των χρηστών. Ωστόσο, μια τέτοια ορθογωνιότητα περιορίζει τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται ταυτόχρονα από τον ίδιο σταθμό βάσης (BS). Για το λόγο αυτό, έχουν προταθεί τεχνικές μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA), έτσι ώστε να βελτιωθεί η φασματική απόδοση, διακρίνοντας τους χρήστες στον τομέα ισχύος. Στο NOMA, επιτρέπεται σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται τους ίδιους πόρους κωδικού χρόνου-συχνότητας και οι παρεμβολές μετριάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας σήματος.

Αν και η έλλειψη του φάσματος δεν είναι το κύριο μέλημα στη ζώνη THz, υπάρχουν πολλά κίνητρα για να χρησιμοποιηθεί το THz-NOMA. Όπως προαναφέρθηκε, λόγω περιορισμών υλικού, η ζώνη THz δεν έχει ακόμη αξιοποιηθεί πλήρως, και ως εκ τούτου η αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων bandwidth παραμένει ζωτικής σημασίας. Η υψηλότερη φασματική απόδοση διατηρεί υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, χρησιμοποιώντας λιγότερους δαπανηρούς πόρους THz. Ακόμα, η ποικιλομορφία στον τομέα ισχύος θα μπορούσε να βοηθήσει τους χρήστες NOMA να ξεπεράσουν τα εξαιρετικά συσχετισμένα κανάλια THz των χρηστών. Επιπλέον, το THz-NOMA μπορεί να βελτιώσει τη δικαιοσύνη των χρηστών, γεφυρώνοντας τη μεγάλη διαφορά ισχύος μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων των χρηστών σε διαφορετικές αποστάσεις από το BS μέσω κατάλληλων σχημάτων κατανομής ισχύος.

Το NOMA της ζώνης THz αποτελεί μία πρόκληση λόγω των στενών ευρών δέσμης THz, των υψηλών διαστάσεων κακής κατάστασης (συσχετισμένων) καναλιών THz και της πολυπλοκότητας επεξεργασίας (κυρίως στην ανίχνευση) υπό τους περιορισμούς των Tbps. Οι κύριες προκλήσεις και οι πιθανές λύσεις τους περιγράφονται λεπτομερώς στον Πίνακα 1. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε το μοντέλο συστήματος THz-NOMA και τα ζητήματα που εγείρονται σε επίπεδο συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης δέσμης (beamforming), της ομαδοποίησης χρηστών (user clustering), της κατανομής φάσματος και ισχύος (spectrum and power allocation) και τη χρήση της στοχαστικής γεωμετρίας ως εργαλείου ανάλυσης απόδοσης. Κατόπιν, θα δούμε και ζητήματα σε επίπεδο συνδέσμου για την εκτίμηση καναλιού (channel estimation) και τον εντοπισμό δεδομένων (data detection).

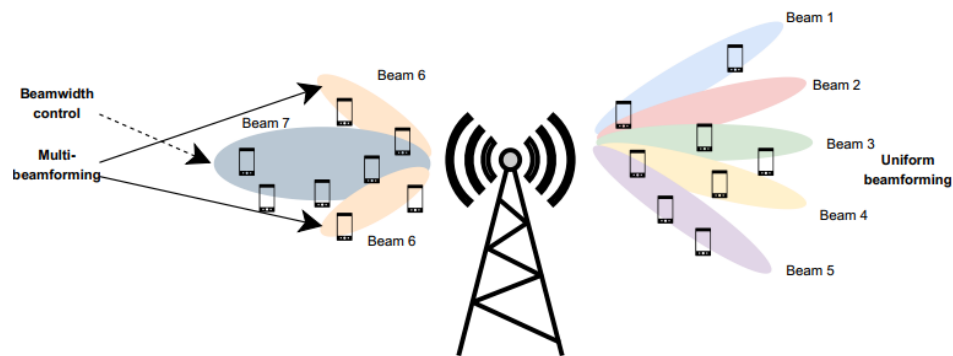
Challenge	Example	Mitigation strategies / opportunities
Narrow THz beamwidths	For a 25 dBi sub-array gain, the azimuth and elevation angular spreads do not exceed 11.42° [2]	Beamwidth control - multi-beamforming
User fairness	A user at 5 m distance from the transmitter experiences 14 dB more path loss than another user at 1 m (according to the free space model)	Proper user clustering and power and spectrum allocation
High-dimensional channels	It is typical to transmit 64 data streams over 64 SAs at both the transmitter and the receiver, with 16 antenna elements per SA to achieve a channel gain of 0.0163 for a user at 5 m	Computationally efficient system-level and link-level signal processing algorithms
Low-rank channels	Channels in the true THz range are of rank ~ 1	Leveraging sparsity in the spatial domain to reduce the complexity of baseband algorithms (fast channel updates; exploiting the spherical wave model)
High channel correlation across users	Users at distances of 1 m and 5 m from the transmitter and 20° elevation and angular spreads have channels with a correlation coefficient of 0.97	Reducing baseband complexity by eliminating redundant computations across users
Terabit per second (Tbps) detection	At existing circuit clock speeds, ~ 1000 bits need to be processed per clock cycle to achieve a Tbps [4]	Computationally efficient SIC data detectors and decoders

Πίνακας 1 – THz NOMA challenges and mitigation strategies

Αν και οι αρχιτεκτονικές MIMO χρησιμοποιούνται σε χαμηλότερες συχνότητες για τη βελτίωση των κερδών διαμόρφωσης δέσμης και πολυπλεξίας, η χρήση τους σε συστήματα THz

είναι πιο κρίσιμη για την αντιστάθμιση του σοβαρού path loss. Τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης σε ένα σύστημα THz χρησιμοποιούν μεγάλο αριθμό κεραιών, συνήθως οργανωμένων σε μια αρχιτεκτονική συστοιχίας-υπο-συστοιχίας (Array-of-subarray / AoSA). Κάθε υποσυστοιχία (SA) μεταδίδει ένα σύμβολο πληροφοριών και η πολυπλεξία είναι ενεργοποιημένη σε διαφορετικά SA. Χάρη στα μικροσκοπικά μήκη κύματος των THz κυμάτων, τέτοιοι σχεδιασμοί πολλαπλών κεραιών μπορούν να πραγματοποιηθούν σε μικρά αποτυπώματα συσκευής.

Το πρώτο βήμα του THz-NOMA είναι η ομαδοποίηση των χρηστών σε ομάδες που μοιράζονται πόρους επικοινωνίας, κάτι που είναι πολύ δύσκολο δεδομένου του στενού πλάτους που έχουν οι δέσμες των THz. Κάθε συστάδα χρηστών εξυπηρετείται τυπικά από μια δέσμη THz σε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης δέσμης (BDMA), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Ωστόσο, μόνο ένας μικρός αριθμός χρηστών μπορεί να εξυπηρετηθεί σε μια μεμονωμένη ομάδα NOMA, επειδή οι παρεμβολές χρήστη υποβαθμίζουν σοβαρά την ποιότητα των αποκωδικοποιημένων σημάτων και προκαλούν μια καθυστέρηση στη διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (SIC), η οποία δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Εναλλακτικά, ένας τρόπος να αποφευχθεί αυτό είναι να χωριστούν οι χρήστες ανά δέσμη περαιτέρω σε υποσυστάδες (ομάδες), όπου οι πόροι ορθογώνιων ομάδων αποφεύγουν τις παρεμβολές μεταξύ των ομάδων. Πιο συγκεκριμένα δηλαδή, να χρησιμοποιείται OMA μεταξύ ομάδων και NOMA εντός της κάθε ομάδας.



Σχήμα 3.3 – NOMA systems with types of beamforming

Το δεύτερο βήμα του NOMA είναι η κατανομή ισχύος. Για την απλότητα της απεικόνισης, θεωρούμε ομάδες NOMA δύο χρηστών που εξυπηρετούνται από ένα BS μέσω των ίδιων πόρων κώδικα χρόνου-συχρότητας. Η κωδικοποίηση υπέρθεσης συνδυάζει τα σήματα των χρηστών πριν από τη μετάδοση, εκχωρώντας υψηλότερο επίπεδο ισχύος στον χρήστη με χειρότερες συνθήκες καναλιού. Επειδή τα κανάλια THz είναι κατά κύριο λόγο LoS και υπόκεινται σε σοβαρή

απώλεια διαδρομής, η απόσταση μεταξύ των χρηστών και του BS υπαγορεύει σε μεγάλο βαθμό την κατάσταση του καναλιού.

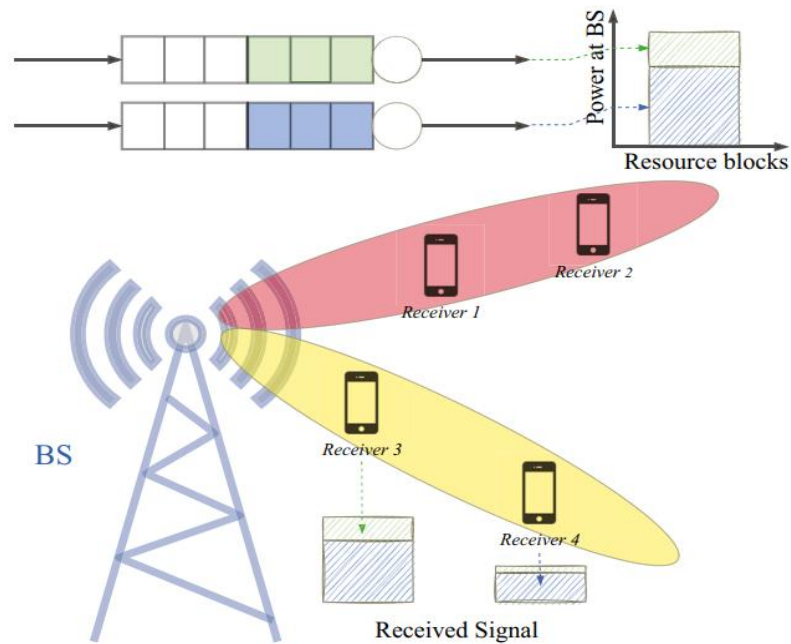
Το τρίτο βήμα του NOMA είναι η διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (SIC) στην πλευρά του δέκτη. Δεδομένου ότι στον ασθενή χρήστη, δηλαδή σε εκείνο με τις χειρότερες συνθήκες καναλιού, ανατίθεται μεγαλύτερη ισχύς, η συνιστώσα του στο λαμβανόμενο σήμα είναι πιο σημαντική. Μπορεί, δηλαδή, να αποκωδικοποιήσει απευθείας το σήμα του, αντιμετωπίζοντας το σήμα του άλλου χρήστη ως θόρυβο. Ο ισχυρός χρήστης, από την άλλη πλευρά, πρώτα αποκωδικοποιεί το σήμα του αδύναμου χρήστη, αντιμετωπίζοντας το δικό του σήμα ως θόρυβο και στη συνέχεια εφαρμόζει το SIC για να αφαιρέσει το σήμα παρεμβολής και να αποκωδικοποιήσει το δικό του σήμα.

Τα οφέλη του THz-NOMA μπορούν να πραγματοποιηθούν πλήρως μόνο μετά από βελτιστοποιήσεις και αποτελεσματική επεξεργασία σήματος τόσο σε επίπεδο συστήματος όσο και σε επίπεδο ζεύξης.

Καθώς τα συστήματα 6G αναμένεται να υποστηρίξουν εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων για πολλούς χρήστες και συσκευές, τα σχήματα ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (OMA), τα οποία ήταν ο βασικός άξονας των προηγούμενων γενεών ασύρματων συστημάτων, ενδέχεται να μην είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν την αυξανόμενη ζήτηση, με αποτέλεσμα ανεπιθύμητους περιορισμούς στη βελτίωση της φασματικής απόδοσης. Η μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που μπορεί να λύσει αποτελεσματικά αυτό το πρόβλημα. Με το κόστος της αυξημένης πολυπλοκότητας του δέκτη, το NOMA επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους χρόνου/συχνότητας, διαχωρίζοντάς τους σε τομείς ισχύος ή κώδικα. Η πιο κοινή μορφή είναι το powerdomain NOMA, το οποίο πολυπλέκει τους χρήστες υπερθέτοντάς τους στην πλευρά του πομπού χρησιμοποιώντας διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Στην πλευρά του δέκτη, η διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (SIC) χρησιμοποιείται για την ανάκτηση των μεταδόσεων των διαφορετικών χρηστών. Το NOMA παρουσιάζει τόσο βελτιωμένο throughput, όσο και δίκαιο δικαιοσύνη σε σύγκριση με το OMA και αναμένεται να διαδραματίσει βασικό ρόλο στα συστήματα 6G.

Η ενοποίηση των τεχνολογιών NOMA και MIMO έχει επισημανθεί ως μια ισχυρή προσέγγιση για την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης και καλύτερων ασύρματων υπηρεσιών όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Σε αντίθεση με το SISO-NOMA, όπου το επίκεντρο είναι η βελτιστοποίηση της κατανομής ισχύος μεταξύ των χρηστών, το MIMO-NOMA παρέχει επιπλέον βαθμούς ελευθερίας μέσω του beamforming στον χωρικό τομέα. Τα προβλήματα beamforming και SIC συνδέονται στα MIMO-NOMA setups, καθώς ο σχεδιασμός του beamformer έχει άμεσο αντίκτυπο τόσο στην ισχύ του σήματος όσο και στην ισχύ παρεμβολής των διαφορετικών χρηστών. Δεδομένου ότι η απόδοση SIC του MIMO-NOMA εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη

σειρά αποκωδικοποίησης των χρηστών, πρέπει να σχεδιαστεί από κοινού με το beamformer, γεγονός που ανοίγει το δρόμο σε μια νέα κατηγορία προβλημάτων κοινής βελτιστοποίησης.



Σχήμα 3.4 – NOMA-MIMO system

Σε μία εργασία διερευνάται ένα σύστημα MIMO-NOMA μονού cluster, όπου οι συγγραφείς στοχεύουν να βελτιστοποιήσουν το power allocation και το beamforming προκειμένου να μεγιστοποιήσουν το άθροισμα των χρηστών μιας κεραιάς για ένα δεδομένο SIC order. Η βελτιστοποίηση λαμβάνει υπόψη τόσο έναν συνολικό περιορισμό ισχύος μετάδοσης όσο και έναν πρόσθετο περιορισμό για την προστασία των αδύναμων χρηστών. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι non-concave και επιλύεται μέσω μιας διαδοχικής προσέγγισης κυρτής βελτιστοποίησης που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση-μεγιστοποίηση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το MIMO-NOMA μπορεί να είναι ανώτερο από το παραδοσιακό ZeroForcing (ZF) beamforming όταν ο αριθμός των χρηστών είναι σημαντικά υψηλότερος από τον αριθμό των κεραιών εκπομπής στο BS. Σε μία άλλη εργασία εξετάζεται ένα σύστημα downlink MIMO-NOMA δύο χρηστών, όπου το ergodic capacity μεγιστοποιείται για μια δεδομένη σειρά αποκωδικοποίησης με βάση το στατιστικό CSI και τη βελτιστοποίηση του πίνακα συνδιακύμανσης μετάδοσης.

Στα παραπάνω σενάρια, όλοι οι χρήστες ομαδοποιούνται στο ίδιο cluster και ως εκ τούτου κάθε χρήστης παρεμβαίνει σε όλους τους άλλους χρήστες του δικτύου. Μπορεί να είναι

απαγορευτικά πολύπλοκη η βελτιστοποίηση τόσο του beamformer όσο και της σειράς αποκωδικοποίησης σε τέτοιες περιπτώσεις, ειδικά όταν ο αριθμός των χρηστών είναι μεγάλος. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, προτείνεται το MIMO-NOMA πολλαπλών cluster, όπου κάθε cluster αποτελείται από πολλούς χρήστες που μοιράζονται τον ίδιο beamformer. Αυτό επιτρέπει την ομαδοποίηση χρηστών με παρόμοια χωρικά χαρακτηριστικά στο ίδιο cluster για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ cluster. Επιπλέον, αρκεί η εκτέλεση SIC μόνο για χρήστες εντός του ίδιου cluster, γεγονός που μειώνει την πολυπλοκότητα της αποκωδικοποίησης.

Οι προηγούμενες εργασίες διερευνούν τον συνδυασμό του NOMA με το συμβατικό MIMO. Καθώς το massive MIMO αναμένεται να διαδραματίσει ηγετικό ρόλο στα συστήματα 6G, το massive MIMO-NOMA θεωρείται ελκυστικό ερευνητικό πεδίο, δεδομένου του μεγάλου αριθμού χωρικών βαθμών ελευθερίας που διατίθενται στο BS. Το massive MIMO έχει παραδοσιακά επικεντρωθεί σε υποφορτισμένα συστήματα όπου ο αριθμός των χρηστών είναι μικρότερος από τον αριθμό των κεραιών BS. Ως εκ τούτου, οι χωρικοί βαθμοί ελευθερίας που παρέχονται από το massive MIMO μπορεί να μην είναι αρκετοί για τον αποτελεσματικό χειρισμό υπερφορτωμένων συστημάτων με υπερβολικό αριθμό χρηστών. Η πολυπλεξία τομέα ισχύος που ενεργοποιείται από το NOMA μπορεί να διευκολύνει την εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών.

Η εφαρμογή του NOMA στις ζώνες mmWave και THz είναι ένας άλλος τρόπος για να συνδυαστούν οι υψηλοί ρυθμούς δεδομένων με αυξημένη συνδεσιμότητα. Ο αριθμός των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν σε τόσο υψηλές συχνότητες περιορίζεται από τον αριθμό των διαθέσιμων αλυσίδων ραδιοσυχνότητας. Το NOMA μπορεί να επιλύσει αυτόν τον περιορισμό αυξάνοντας τον αριθμό των χρηστών μέσω της πολυπλεξίας τομέα ισχύος.

Ο συνδυασμός των τεχνολογιών RIS και NOMA θεωρείται επίσης ελκυστική επιλογή, καθώς η προσεκτική ανάπτυξη και επιλογή των συντελεστών ανάκλασης των RIS μπορεί να αυξήσει την ανισότητα των καναλιών μεταξύ των χρηστών, γεγονός που θα οδηγούσε σε υψηλότερα κέρδη NOMA. Επιπλέον, αυτή η ενοποίηση μπορεί να βοηθήσει στην ικανοποίηση των περιορισμών QoS των χρηστών, καθώς οι περιορισμοί QoS δεν είναι απαραίτητα της ίδιας σειράς με τη σειρά αποκωδικοποίησης, η οποία υπαγορεύεται από τις συνθήκες του καναλιού. Η δυνατότητα τροποποίησης των καναλιών μέσω του RIS μπορεί να βοηθήσει στην ικανοποίηση των περιορισμών.

Είναι προφανές από τις παραπάνω εργασίες ότι το NOMA θα παίξει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των συστημάτων 6G λόγω της ελκυστικής φασματικής του απόδοσης. Επιπλέον, το NOMA μπορεί να συνδυαστεί αποτελεσματικά με άλλες αναδυόμενες τεχνολογίες όπως το massive MIMO, η επικοινωνία mmWave και το RIS. Ωστόσο, πρέπει να αντιμετωπιστούν σημαντικές προκλήσεις. Ενώ τα περισσότερα έργα προϋποθέτουν τέλεια γνώση καναλιών, η ακριβής εκτίμηση καναλιών απαιτεί σημαντικό training overhead, η οποία μπορεί να έχει μη αμελητέο αντίκτυπο στη φασματική απόδοση. Επιπλέον, ενώ τα περισσότερα έργα θεωρούν τέλει SIC, το error propagation παραμένει σημαντικός παράγοντας στο πρακτικό SIC για

συστήματα NOMA. Τέλος, ο αποτελεσματικός σχεδιασμός των σχημάτων διαμόρφωσης και ανίχνευσης για το NOMA παραμένει ένα ανοιχτό πρόβλημα αφού τα περισσότερα έργα βασίζουν την ανάλυσή τους στην ιδανική σηματοδότηση Gauss.

3.4 Τι μπορεί να προσφέρει το NOMA;

Οι λόγοι για τους οποίους το (NOMA) θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για μελλοντικές επικοινωνίες ζώνης THz είναι οι εξής:

Υψηλό Spectral Efficiency: Το NOMA μπορεί να χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης και να υποστηρίξει πολλούς χρήστες σε ένα μόνο μπλοκ πόρων, οδηγώντας σε υψηλό spectral efficiency.

Υψηλό User Density: Η ζώνη THz έχει μεγάλο διαθέσιμο εύρος ζώνης και το NOMA μπορεί να υποστηρίξει πολλούς χρήστες σε αυτήν τη ζώνη, επιτρέποντας υψηλό user density.

Interference Management: Το NOMA χρησιμοποιεί την έννοια του power domain multiplexing, όπου διαφορετικοί χρήστες πολυπλέκονται στον τομέα ισχύος. Αυτό οδηγεί σε καλύτερο interference management και βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τα συμβατικά σχήματα orthogonal multiple access (OMA).

Reduced Latency: Το NOMA μπορεί να υποστηρίξει low latency επικοινωνία στη ζώνη THz λόγω του υψηλού εύρους ζώνης και της αποτελεσματικής χρήσης των πόρων.

Energy Efficiency: Το NOMA μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας για τη μετάδοση δεδομένων στη ζώνη THz, καθώς επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων με χαμηλότερη ισχύ.

Συνολικά, το NOMA μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τις προκλήσεις που σχετίζονται με την επικοινωνία της ζώνης THz και μπορεί να παρέχει αποτελεσματική και αξιόπιστη επικοινωνία για μελλοντικές εφαρμογές ζώνης THz, ωστόσο είναι ακόμα πολύ νωρίς και υπάρχει δρόμος ακόμη ώστε να μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι είναι η ιδανική τεχνική για χρήση σε συστήματα THz.

4ο Κεφάλαιο

Αξιολόγηση της επίδοσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρακολουθήσουμε δύο διαφορετικά παραδείγματα δικτύων, ένα MIMO-NOMA και ένα NOMA με χρήση RIS, τα οποία και θα μελετήσουμε σε αντιπαραβολή με τα αντίστοιχα OMA δίκτυα ώστε να δούμε πώς αποδίδουν σε σύγκριση με εκείνα.

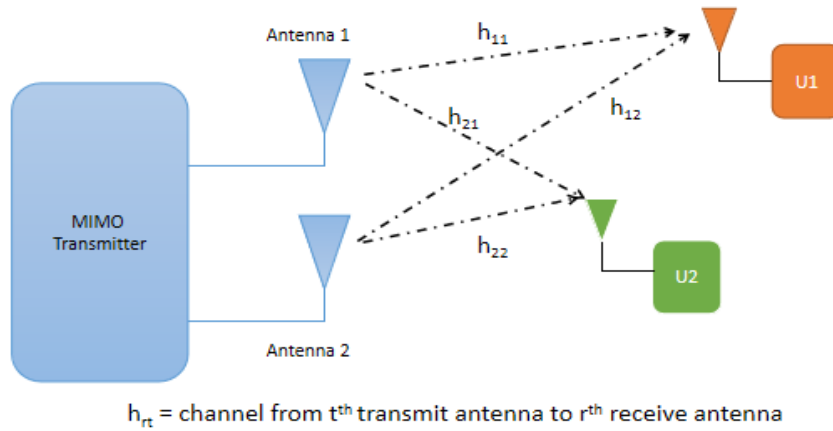
4.1 Υλοποίηση MIMO - NOMA

System Model

Αρχικά ας θεωρήσουμε ένα σύστημα 2x1 downlink MIMO, με δύο users, U_1 και U_2 με αποστάσεις d_1 και d_2 αντίστοιχα από τον MIMO πομπό. Υποθέτουμε ότι $d_1 > d_2$ και ως εκ τούτου ο U_1 είναι ο weak user, ενώ ο U_2 είναι ο strong user.

Όπως προαναφέρθηκε, το MIMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για spatial multiplexing (αύξηση επιτεύξιμου ρυθμού) είτε για diversity gain (μείωση BER). Εδώ, χρησιμοποιούμε το MIMO για την επίτευξη diversity gain. Επομένως, και οι δύο κεραιές εκπομπής 1 και 2 μεταδίδουν την ίδια πληροφορία.

Έστω ότι x_1 και x_2 η πληροφορία που κατευθύνεται αντίστοιχα στον U_1 και U_2 . Επιπλέον ας συμβολίσουμε με h_{rt} το Nakagami-m fading channel ανάμεσα στην t^{th} κεραιά εκπομπής και στον r^{th} δέκτη. Στο σχήμα



Σχήμα 4.1 – MIMO-NOMA System Model

Signal Model

Transmit Signal

Το σήμα που μεταδίδεται και από τις δύο κεραίες εκπομπής δίνεται από τη σχέση:

$$x = \sqrt{P} (\sqrt{\alpha_1} x_1 + \sqrt{\alpha_2} x_2) \quad (1)$$

Όπου α_1 και α_2 είναι τα NOMA power allocation coefficients.

Received Signals

Από τη στιγμή που το x εκπέμπεται ταυτόχρονα από τις δύο κεραίες εκπομπής, το σήμα λήψης στον U_1 υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$y_1 = xh_{11} + xh_{12} + n_1 = x(h_{11} + h_{12}) + n_1 \quad (2)$$

Ομοίως και το σήμα λήψης στον U_2 :

$$y_2 = xh_{21} + xh_{22} + n_2 = x(h_{21} + h_{22}) + n_2 \quad (3)$$

Εδώ τα n_1 και n_2 είναι AWGN noise samples με μέσο μηδέν και διακύμανση σ^2

Decoding στον U_1

Ο U_1 πρέπει να κάνει decoding το x_1 από το y_1 . Από τη στιγμή που ο U_1 είναι ο weak user, το x_1 έχει μεγαλύτερο power allocation. Δηλαδή $a_1 > a_2$. Επομένως, μπορεί να κάνει decoding το x_1 από το y_1 , αντιμετωπίζοντάς το ως interference.

Αν αντικαταστήσουμε στην (2) το x από την (1), έχουμε:

$$y_1 = \sqrt{P} (\sqrt{\alpha_1} x_1 + \sqrt{\alpha_2} x_2) (h_{11} + h_{12}) + n_1 \quad (4)$$

και επεκτείνοντας:

$$y_1 = \underbrace{\sqrt{P} \sqrt{\alpha_1} x_1 (h_{11} + h_{12})}_{\text{desired}} + \underbrace{\sqrt{P} \sqrt{\alpha_2} x_2 (h_{11} + h_{12})}_{\text{interference}} + n_1 \quad (5)$$

Πλέον μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση του SINR για τον U_1 με decoding του x_1 ως εξής:

$$\gamma_1 = \frac{P\alpha_1|h_{11} + h_{12}|^2}{P\alpha_2|h_{11} + h_{12}|^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

Ως εκ τούτου το achievable rate στον U_1 δίνεται από τον τύπο:

$$R_1 = \log_2 (1 + \gamma_1) \quad (7)$$

Decoding στον U_2

Ο U_2 πρέπει να κάνει decoding το x_2 από το y_2 . Αφού, όπως είπαμε, ο U_2 είναι ο strong user, το σήμα του, x_2 έχει μικρότερο power allocation. Οπότε στο y_2 η δύναμη του όρου x_1 θα κυριαρχεί. Έτσι ο U_2 θα εκτελέσει πρώτα απευθείας decoding στο y_2 για να λάβει το x_1 . Στη συνέχεια, πραγματοποιείται SIC έτσι ώστε να αφαιρεθεί το x_1 . Κατόπιν, το γίνεται decoding στο x_2 .

Πιο συγκεκριμένα, αν αντικαταστήσουμε στην (3) το x από την (1) έχουμε:

$$y_2 = \underbrace{\sqrt{P} \sqrt{\alpha_1} x_1 (h_{21} + h_{22})}_{\text{undesired \& dominating}} + \underbrace{\sqrt{P} \sqrt{\alpha_2} x_2 (h_{21} + h_{22})}_{\text{desired}} + n_2 \quad (8)$$

Το SINR στον U_1 για απευθείας decoding του x_1 είναι:

$$\gamma_{12} = \frac{P\alpha_1|h_{21} + h_{22}|^2}{P\alpha_2|h_{21} + h_{22}|^2 + \sigma^2} \quad (9)$$

Μετά από το SIC, ο πρώτος όρος της (8) θα αφαιρεθεί και το εναπομείναν σήμα θα είναι:

$$y'_2 = \underbrace{\sqrt{P} \sqrt{\alpha_2} x_2 (h_{21} + h_{22})}_{\text{desired}} + n_2 \quad (10)$$

Τώρα το SNR για τον U_2 ώστε να κάνει decoding στο δικό του σήμα δίνεται από την εξίσωση:

$$\gamma_2 = \frac{P\alpha_2|h_{21} + h_{22}|^2}{\sigma^2} \quad (11)$$

Τέλος, τα achievable rates για τον U_2 για το decoding του x_1 και του x_2 είναι:

$$R_{12} = \log_2 (1 + \gamma_{12}) \quad (12)$$

$$R_2 = \log_2 (1 + \gamma_2) \quad (13)$$

Ας δούμε τώρα ένα MIMO-OMA δίκτυο για να κάνουμε σύγκριση με το παραπάνω. Το σενάριο θα είναι να χωρίσουμε τη μετάδοσή μας σε δύο ίσα time slots. Στο πρώτο time slot, και οι δύο κεραιές εκπέμπουν στο U_1 , ενώ στο δεύτερο time slot, και οι δύο κεραιές εκπέμπουν στο U_2 .

Το σήμα που εκπέμπεται από τις δύο κεραιές στο time slot 1 προς τον U_1 είναι Px_1 . Το σήμα που λαμβάνεται από τον U_1 είναι:

$$y_{1,oma} = \sqrt{P} x_1 (h_{11} + h_{12}) + n_1 \quad (14)$$

Ομοίως, το σήμα που εκπέμπεται από τις δύο κεραιές στο time slot 2 προς τον U_2 είναι Px_2 . Το σήμα που λαμβάνεται από τον U_2 είναι:

$$y_{2,oma} = \sqrt{P} x_2 (h_{21} + h_{22}) + n_2 \quad (15)$$

Τα SNR στον U_1 και στον U_2 είναι τα εξής:

$$\gamma_{1,oma} = \frac{P|h_{11} + h_{12}|^2}{\sigma^2} \quad (16)$$

$$\gamma_{2,oma} = \frac{P|h_{21} + h_{22}|^2}{\sigma^2} \quad (17)$$

Ως εκ τούτου, τα achievable rates του MIMO-OMA για τους U_1 και U_2 είναι:

$$R_{1,oma} = \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{1,oma}) \quad (18)$$

$$R_{2,oma} = \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{2,oma}) \quad (19)$$

Ο παράγοντας $\frac{1}{2}$ στις εξισώσεις (18) και (19) οφείλεται στο γεγονός ότι μόνο το μισό του time slot χρησιμοποιείται για επικοινωνία μεταξύ των δύο, σε αντίθεση με την περίπτωση MIMO-NOMA, κατά την οποία χρησιμοποιείται ολόκληρο το time slot για ταυτόχρονη μετάδοση στους δύο users.

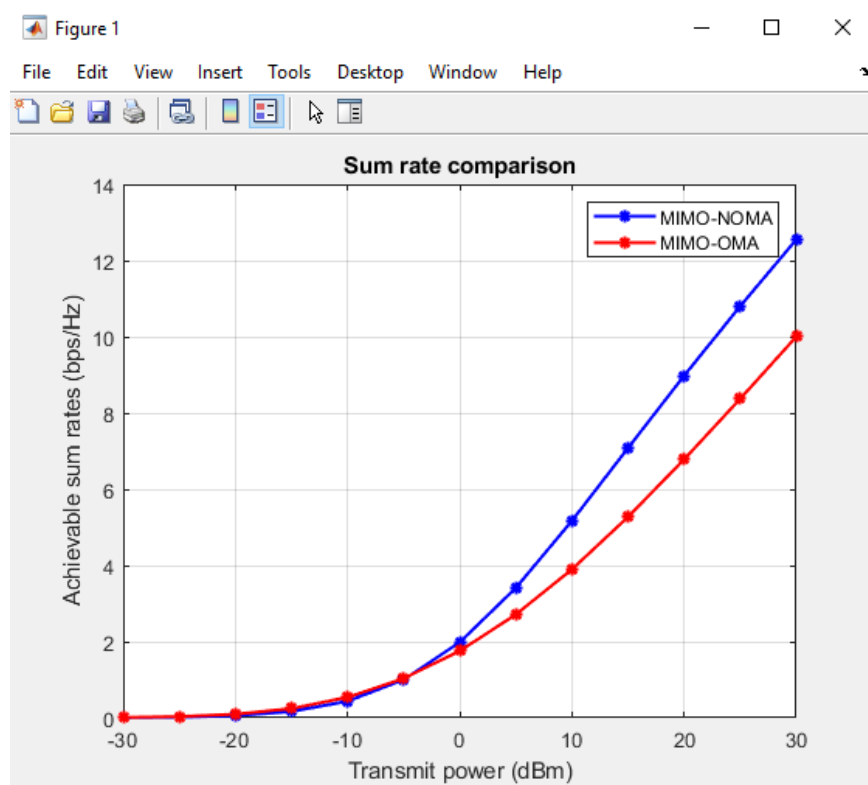
Ας δούμε τώρα κάποια figures που αποτυπώνουν την απόδοση των δύο ανωτέρω τύπων δικτύου, όπως προέκυψαν από Monte-Carlo simulations στο Matlab. Για τις μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που φαίνονται στον πίνακα 2

Symbol	Meaning	Value
d_1	Distance between transmitter and U_1	50m
d_2	Distance between transmitter and U_2	20m
η	Path loss exponent	4
a_1	Power allocation coefficient of U_1	0.75
a_2	Power allocation coefficient of U_2	0.25
m	Shape parameter for Nakagami-m fading	3
BW	Bandwidth	0.8 THz

Πίνακας 2 – Symbols and values used for first Matlab simulation

Sum rates

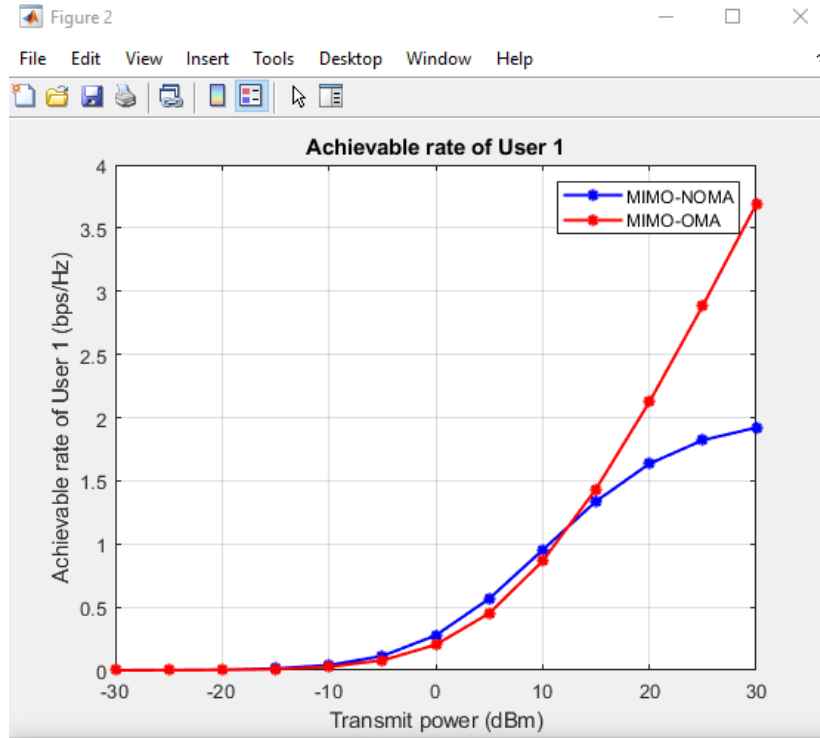
Το achievable sum rate για την περίπτωση MIMO-NOMA υπολογίζεται από το $R_1 + R_2$, ενώ για την περίπτωση MIMO-OMA υπολογίζεται από το $R_{1,oma} + R_{2,oma}$.



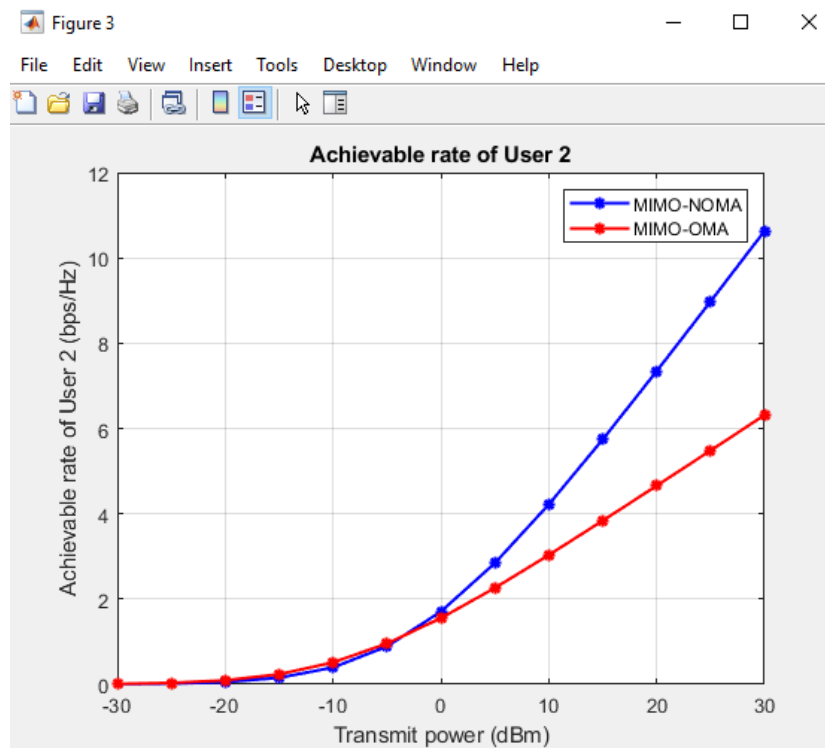
Σχήμα 4.2 – Sum rate comparison

Είναι σαφές από το figure 1 ότι το MIMO-NOMA παρέχει μεγαλύτερο sum rate από το MIMO-OMA, λόγω του γεγονότος ότι και οι δύο χρήστες εξυπηρετούνται ταυτόχρονα με τον ίδιο πόρο συχνότητας.

Τα επόμενα 2 figures (2,3) δείχνουν τα individual achievable rates.



Σχήμα 4.3 – Achievable rate of User 1



Σχήμα 4.4 - Achievable rate of User 2

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο weak user (U_1) υποφέρει από saturation στο achievable rate μετά από ισχύ εκπομπής 10 dBm. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό θέμα που παρατηρούμε σε όλα τα δίκτυα NOMA. Η παρεμβολή που αντιμετωπίζει ο weak user μεταφράζεται σε saturation του achievable rate του. Αυτό το saturation του achievable rate δεν θα είναι πρόβλημα εάν ο απαιτούμενος ρυθμός δεδομένων του weak user είναι μικρότερος από το όριο του saturation. Αυτό το πρόβλημα δεν υπάρχει στο OMA, επειδή ο weak user δεν υποφέρει από interference λόγω ταυτόχρονων μεταδόσεων.

Outage probabilities

Στη συνέχεια, ας δούμε τα figures που δείχνουν τη σύγκριση του Outage των users για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις των δικτύων που αναλύουμε. Εφόσον χρησιμοποιούμε σταθερή κατανομή ισχύος, είναι πολύ σημαντικό να επιλέγουμε σωστά τους ρυθμούς-στόχους και τους συντελεστές κατανομής ισχύος. Οπότε ας επιλέξουμε το target rate για τον weak user (U_1) να είναι $R_1^* = 1\text{bps/Hz}$ και εκείνο του strong user (U_2) να είναι $R_2^* = 3\text{bps/Hz}$

MIMO-NOMA

Ο weak user (U_1) έχει outage αν το achievable rate του, δηλαδή το R_1 , είναι μικρότερο από το target rate του, δηλαδή το R_1^* . Η εξίσωση που αποτυπώνει την προηγούμενη πρόταση είναι η εξής:

$$P_{noma}^1 = Pr(R_1 < R_1^*) \quad (16)$$

Ο strong user (U_2) πρέπει να κάνει decoding σωστά και στο μήνυμα του U_1 και στο δικό του μήνυμα. Δηλαδή τα target rates του U_1 και του U_2 πρέπει να πληρούνται από τον strong user (U_2). Εάν το target rate του U_1 δεν επιτευχθεί ή αν το target rate του U_1 επιτευχθεί, αλλά δεν επιτευχθεί αυτό του U_2 , τότε ο U_2 θα έχει outage.

$$P_{noma}^2 = Pr(R_{12} < R_1^*) + Pr(R_{12} > R_1^*, R_2 < R_2^*) \quad (17)$$

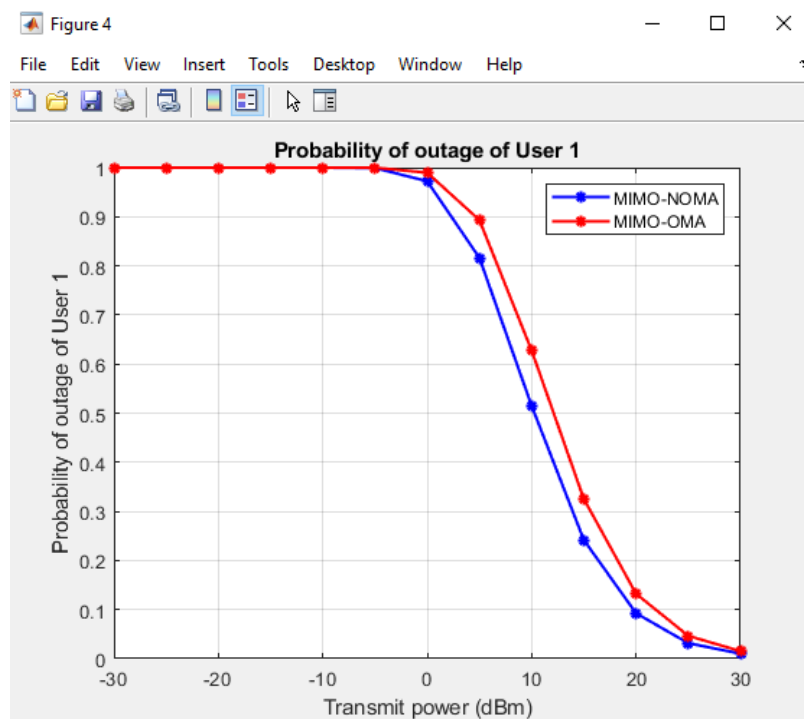
MIMO-OMA

Για την περίπτωση MIMO-OMA τα πράγματα σε ό, τι αφορά στο outage είναι πιο απλά. Οι εξισώσεις είναι οι παρακάτω:

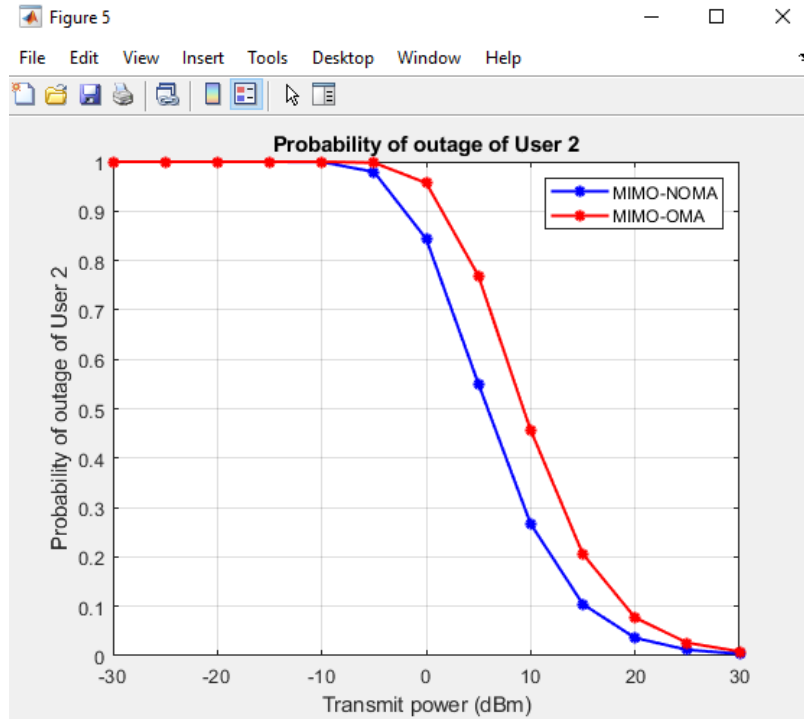
$$P_{oma}^1 = Pr(R_{1,oma} < R_1^*) \quad (18)$$

$$P_{oma}^2 = Pr(R_{2,oma} < R_2^*) \quad (19)$$

Τα figures που προκύπτουν είναι τα εξής:



Σχήμα 4.5 – Probability of Outage of User 1

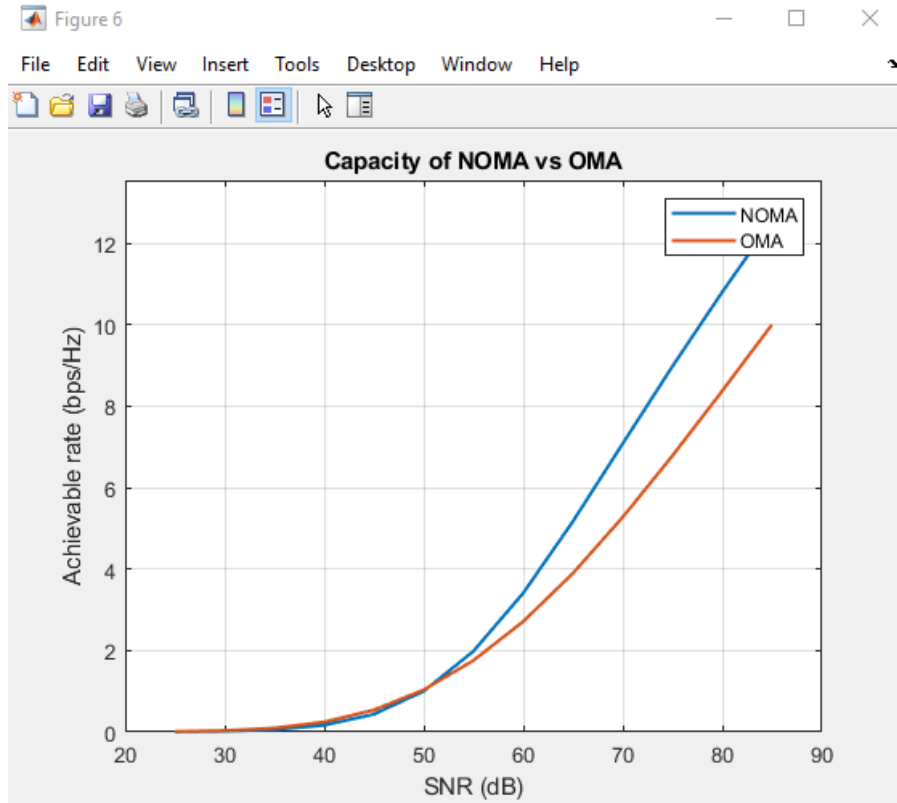


Σχήμα 4.6 - Probability of Outage of User 2

Η προφανής παρατήρηση είναι φυσικά ότι το MIMO-NOMA δίκτυο πετυχαίνει μικρότερο outage από το MIMO-OMA και για τους δύο users, όπως άλλωστε ήταν και αναμενόμενο.

Capacity

Το παρακάτω figure προσφέρει μία απεικόνιση του Capacity του MIMO-NOMA δικτύου που χρησιμοποιήσαμε, σε αντιπαραβολή με εκείνο του MIMO-OMA.



Σχήμα 4.7 – Capacity of NOMA vs OMA

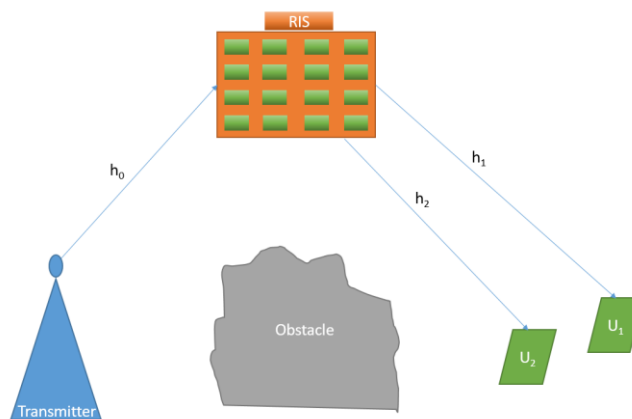
Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι σε χαμηλό SNR, το MIMO-OMA αποδίδει ελαφρώς καλύτερα από το MIMO-NOMA. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι NOMA users υποφέρουν από interference (λόγω ταυτόχρονης μετάδοσης), ενώ οι OMA users δεν αντιμετωπίζουν τέτοια interferences. Σε υψηλό SNR, ωστόσο, το NOMA υπερτερεί του OMA προσφέροντας υψηλό capacity.

Επιπλέον, το NOMA το επιτυγχάνει χρησιμοποιώντας ελάχιστους πόρους. Σε αυτό το παράδειγμα, στην περίπτωση OMA απαιτούνται 2 time slots για να ολοκληρωθεί η μετάδοση. Εάν η διάρκεια του ενός (1) time slot είναι 1 ms, απαιτούνται 2 ms για να ολοκληρωθεί η μετάδοση. Το NOMA, από την άλλη πλευρά, ολοκληρώνει τη μετάδοση σε ένα (1) μόνο time slot (δηλαδή σε 1 ms). Αυτό μειώνει σημαντικά το latency, γεγονός που καταδεικνύει τη χρησιμότητα του NOMA στις μελλοντικές τεχνολογίες επικοινωνίας.

4.2 Υλοποίηση NOMA με RIS

RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces)

Τα RIS είναι προγραμματιζόμενες δομές επιφάνειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (EM), αλλάζοντας τις ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες της επιφάνειας. Αυτές οι επιφάνειες μπορούν να τοποθετηθούν στρατηγικά στο ραδιοφωνικό κανάλι μεταξύ του πομπού και του δέκτη, έτσι ώστε να ελέγξουν τον τρόπο με τον οποίο το σήμα ανακλάται από μια επιφάνεια στη διαδρομή διάδοσής του. Οι RIS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κατευθύνουν τα σήματα στον δέκτη με αποτέλεσμα καλύτερη λήψη ή ποιότητα σύνδεσης. Μπορούμε να δούμε μία πολύ απλουστευμένη απεικόνιση στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.8 – NOMA system with RIS

Στα συμβατικά wireless συστήματα, το ραδιοφωνικό κανάλι θεωρείται ως μια ανεξέλεγκτη οντότητα που συνήθως παραμορφώνει τα μεταδιδόμενα σήματα. Τα μεταδιδόμενα σήματα συνήθως αλληλεπιδρούν με ένα ευρύ φάσμα επιφανειών στη διαδρομή διάδοσής τους και αντανακλώνται σε τυχαίες κατευθύνσεις με αποτέλεσμα τυχαίες παρεμβολές, οι οποίες ενδέχεται να είναι είτε εποικοδομητικές, είτε καταστροφικές. Το RIS παρέχει έναν τρόπο ελέγχου των επιφανειών που βρίσκονται στα ραδιοφωνικά κανάλια κατευθύνοντάς τα προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, έχοντας ως στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ενεργειακής απόδοσης των ασύρματων συστημάτων. Αυτό μπορεί να αυξήσει την εμβέλεια ενός ασύρματου συστήματος και να κατευθύνει σήματα σε δυσπρόσιτα σημεία.

Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση ενός RIS για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών των σημάτων (π.χ. ανάκλαση,

διάθλαση, απορρόφηση, εστίαση και πόλωση). Συγκεκριμένα είναι οι συμβατικές συστοιχίες κεραιών και τα metasurfaces.

Συστοιχίες κεραιών: Η πιο απλή εφαρμογή του RIS περιλαμβάνει ηλεκτρικά συντονιζόμενες συστοιχίες ανακλαστικών κεραιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δυναμική προσαρμογή των μοτίβων ακτινοβολίας τους. Ως εκ τούτου, στο πλαίσιο του RIS, οι συστοιχίες κεραιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ανακλαστικές δομές. Συγκεκριμένα, ένας μεγάλος αριθμός χαμηλού κόστους και παθητικών στοιχείων κεραιάς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως RIS, τα οποία λειτουργούν ως ανακλαστήρες χωρίς την ανάγκη RF αλυσίδων όπως στα συμβατικά συστήματα MIMO που χρησιμοποιούν κεραιές πολλαπλής εκπομπής και πολλαπλής λήψης.

Metasurfaces: Τα metasurfaces είναι ηλεκτρικά λεπτές και πυκνές δισδιάστατες συστοιχίες δομικών στοιχείων που διαθέτουν επιθυμητές ιδιότητες που παρέχονται από τα συστατικά τους στοιχεία. Τα στοιχεία ονομάζονται meta-cells, unit-cells ή meta-atoms και το μέγεθός τους είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος του σήματος. Εκτός από τον έλεγχο της διάδοσης EM, τα metasurfaces μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση πολύπλοκων λειτουργιών όπως η διαμόρφωση δεδομένων και οι μαθηματικές πράξεις και έχει αποδειχθεί ότι είναι επίσης ικανές να αποθηκεύουν παλμούς EM για σύντομες χρονικές περιόδους.

Πώς, όμως, λειτουργούν τα RIS; Τα RIS απορροφούν πρώτα ένα σήμα που κατευθύνεται προς αυτά, το οποίο στη συνέχεια επεξεργάζεται από έναν microcontroller και στη συνέχεια αναπαράγεται ξανά και μεταδίδεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση χρησιμοποιώντας συστοιχίες κεραιών και metasurfaces. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται εμπόδια που υπάρχουν στη “διαδρομή” ανάμεσα στο BS και τους Users. Η εκτροπή των σημάτων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να συντομεύσει τη διαδρομή που ακολουθούν τα σήματα για να φτάσουν στον δέκτη, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του συστήματος δικτύου.

Καθώς οι ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για 5G και 6G πηγαίνουν στις περιοχές mmWave και THz, τη δεύτερη από τις οποίες μελετούμε, θα αυξηθεί η ανάγκη για αναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (RIS). Αυτό συμβαίνει επειδή τα σήματα σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων δεν μπορούν να διαδοθούν πολύ μακριά ή να διεισδύσουν σε τοίχους όπως τα sub-6 GHz σήματα που χρησιμοποιούνται από τις περισσότερες τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας σήμερα (3G/4G/sub-6GHz 5G). Τέτοια σήματα υψηλής συχνότητας θα πρέπει να κατευθύνονται τεχνητά χρησιμοποιώντας RIS για να φτάσουν στο εσωτερικό των κτιρίων και άλλων κατασκευών. Τα σήματα μπορεί επίσης να χρειαστεί να διαμορφωθούν σύμφωνα με έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο στη μέση διάδοση, κάτι το οποίο μπορεί επίσης να γίνει με τη χρήση RIS.

System Model

Αρχικά θεωρούμε ένα σύστημα downlink MIMO με ένα base station, το οποίο σε αυτό το παράδειγμα επικοινωνεί με 2 Users, μέσω Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) τα οποία αναφέρθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, αλλά θα εξηγήσουμε αναλυτικότερα παρακάτω. Θεωρούμε επίσης ότι το BS και οι Users έχουν μία απλή κεραία, ενώ μπορεί να επιτευχθεί τέλει CSI. Δεν υπάρχει LoS link ανάμεσα στο BS και τους users, ωστόσο υπάρχει LoS link τόσο μεταξύ BS και RIS, όσο και μεταξύ RIS και Users.

Signal Model

Transmit Signal

Το σήμα που μεταδίδεται από τον BS δίνεται από τη σχέση:

$$x = \sqrt{a_1 P_{BS}} s_1 + \sqrt{a_2 P_{BS}} s_2 \quad (1)$$

όπου τα s_1 και s_2 προορίζονται για τους Users 1 και 2 αντίστοιχα, P_{BS} είναι το power transmit του BS, ενώ a_1 και a_2 είναι τα power allocation coefficients.

Received Signals

Τα σήματα που λαμβάνονται αντίστοιχα στους Users 1 και 2, μπορούν να υπολογιστούν από τις σχέσεις:

$$r_1 = A_1 x + n_1 \quad (2)$$

και

$$r_2 = A_2 x + n_2 \quad (3)$$

αντίστοιχα, όπου τα n_1 και n_2 είναι ανεξάρτητοι AWGNs των Users 1 και 2 και ακολουθούν zero mean complex Gaussian κατανομές με διακύμανση N_0 .

Επιπλέον τα A_1 και A_2 υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$A_1 = h_0 h_1 \quad (4)$$

και

$$A_2 = h_0 h_2 \quad (5)$$

όπου h_0 , h_1 , h_2 είναι τα fading coefficients των BS-RIS, RIS-User1, RIS-User2 αντίστοιχα. Θεωρούμε επίσης ότι όλα τα παραπάνω fading coefficients παρουσιάζουν Nakagami-m fading και είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Αν χρησιμοποιήσουμε την (1) στις (2) και (3), τελικά προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις που υπολογίζουν τα received signals στους Users:

$$r_1 = A_1 \left(\sqrt{a_1 P_{BS}} s_1 + \sqrt{a_2 P_{BS}} s_2 \right) + n_1 \quad (6)$$

και

$$r_2 = A_2 \left(\sqrt{a_1 P_{BS}} s_1 + \sqrt{a_2 P_{BS}} s_2 \right) + n_2 \quad (7)$$

Decoding στον User1

Λόγω του γεγονότος ότι σύμφωνα με την αρχή του NOMA ισχύει ότι $\alpha_1 > \alpha_2$, εύκολα αντιλαμβανόμαστε ότι ο User 1 κάνει απευθείας decoding στο s_1 , αντιμετωπίζοντας το interference που προκύπτει από το s_2 ως noise. Ως εκ τούτου, το SINR μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\gamma_1 = \frac{|A_1|^2 a_1 \rho}{|A_1|^2 a_2 \rho + 1} \quad (8)$$

όπου ρ είναι το transmit SNR, το οποίο εκφράζεται ως:

$$\rho = \frac{P_{BS}}{N_0} \quad (9)$$

Decoding στον User2

Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, έτσι και εδώ ο User2 πρώτα κάνει decoding στο s_1 και κατόπιν, εκτελεί SIC ώστε να κάνει decoding και στο s_2 . Ως εκ τούτου, το SINR για το decoding του s_1 στον User2 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\gamma_{21} = \frac{|A_2|^2 a_1 \rho}{|A_2|^2 a_2 \rho + 1} \quad (10)$$

ενώ μετά το SIC, το SNR για το decoding του s_2 στον User2 δίδεται από τη σχέση:

$$\gamma_{22} = |A_2|^2 a_2 \rho \quad (11)$$

Επειδή η σύγκριση με το OMA δίκτυο θα γίνει και σε συνάρτηση με το Outage Probability, όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, πρέπει να σημειώσουμε ότι outage συντελείται όταν το στιγμιαίο SINR πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο threshold. Στην περίπτωση του NOMA δικτύου, αυτό υπολογίζεται ως εξής:

$$u_1 = 2^{R_1} - 1 \quad (13)$$

και

$$u_2 = 2^{R_2} - 1 \quad (14)$$

αντίστοιχα για τους User1 και User2.

Στο παράδειγμά μας θεωρούμε σταθερά target data rates $R_1 = 1,8$ bps/Hz και $R_2 = 2,4$ bps/Hz.

Το δίκτυο OMA που χρησιμοποιούμε ως αντιπαραβολή, έχει τις ίδιες παραμέτρους με το δίκτυο NOMA, όμως πρέπει να σημειώσουμε ότι τα SINR thresholds για επιτυχημένο decoding δίνονται από τη σχέση:

$$u_i^o = 2^{2R_i} - 1, \quad i \in \{1, 2\}.$$

Παρακάτω θα δούμε τα figures που προέκυψαν μετά από Monte-Carlo simulations στο Matlab, όπου φαίνεται η σύγκριση των δικτύων OMA και NOMA σε ένα διαφορετικού τύπου παράδειγμα.

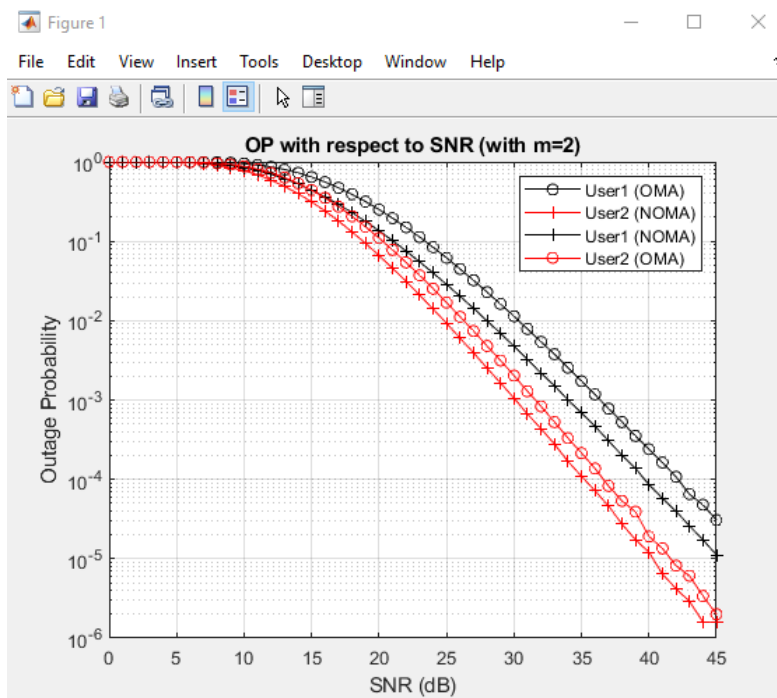
Symbol	Meaning	Value
R_1	Target data rate for U_1	1.8 bps/Hz
R_2	Target data rate for U_2	2.4 bps/Hz
a_1	Power allocation coefficient of U_1	0.75
a_2	Power allocation coefficient of U_2	0.25
m	Shape parameter for Nakagami-m fading	1 and 2
ρ	Transmit SNR (only for the P.A. figure)	40dB
f	Frequency	0.3 THz
d	Size of each element of the RIS	0.25 mm ²

Πίνακας 3 – Symbols and values used for second Matlab simulation

Outage probability σε συνάρτηση με το SNR

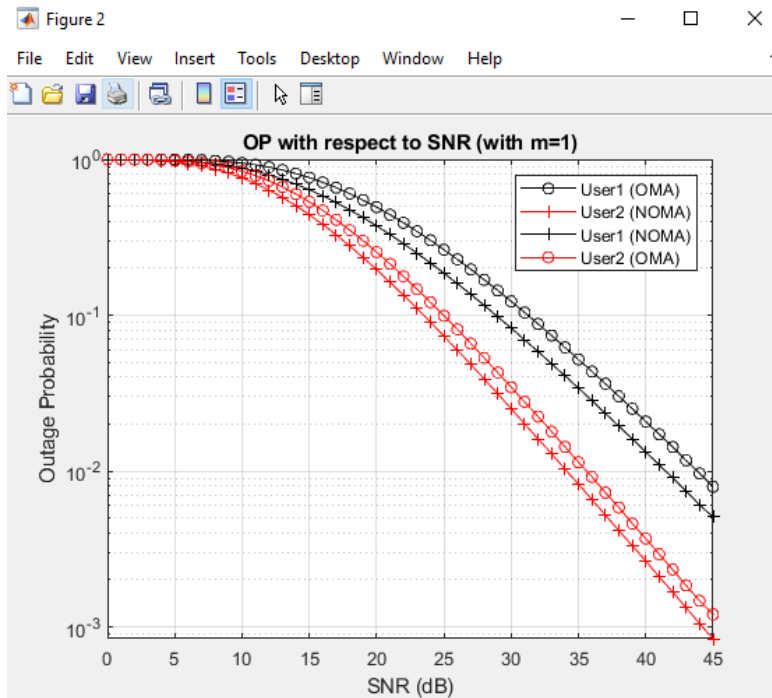
Εδώ θα δούμε κάποια figures που θα συγκρίνουν το outage performance των δύο δικτύων χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικό, αλλά κοινό για τα δύο δίκτυα set fading parameter (m_0, m_1, m_2)

1^η περίπτωση $(m_0, m_1, m_2) = (2, 2, 2)$



Σχήμα 4.9 – OP with respect to SNR (with m=2)

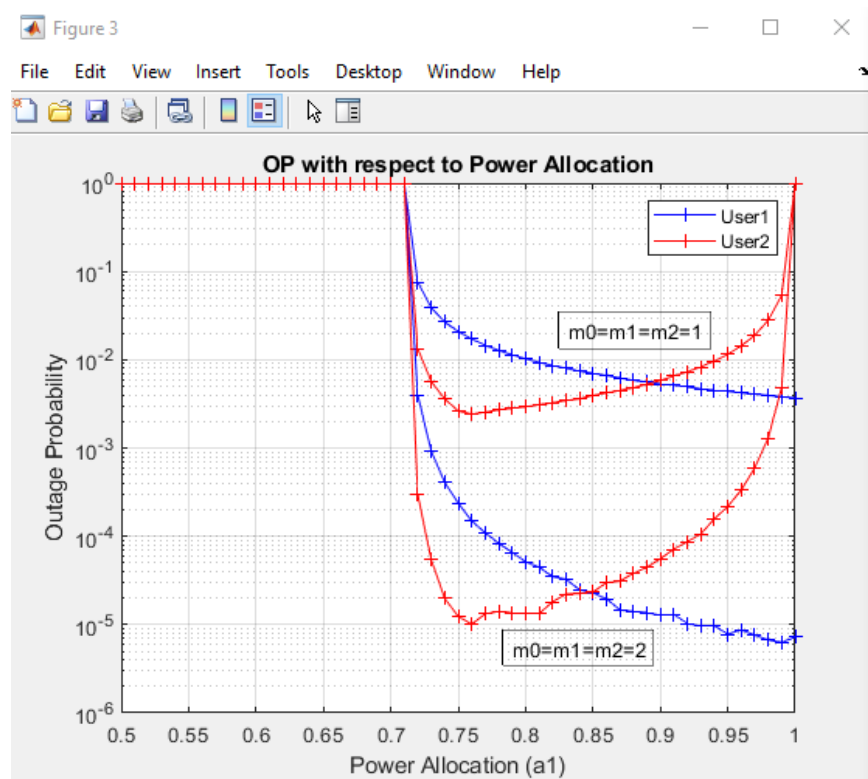
2^η περίπτωση $(m_0, m_1, m_2) = (1, 1, 1)$



Σχήμα 4.10 – OP with respect to SNR (with m=1)

Στα δύο παραπάνω figures παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το SNR τόσο μειώνεται το Outage Probability, τόσο στο NOMA όσο και στο OMA δίκτυο. Αυτό βλέπουμε ότι ισχύει και με τους δύο διαφορετικούς fading parameters που έχουν επιλεγεί για το παράδειγμα. Μία ακόμα παρατήρηση που προκύπτει, είναι ότι το NOMA παρέχει καλύτερο Outage Performance για οποιοδήποτε SNR και για τους δύο χρήστες του παραδείγματος. Επιπλέον καταλαβαίνουμε από την κλίμακα των δύο σχημάτων, ότι όσο αυξάνεται ο fading parameter τόσο περισσότερο επικρατεί το NOMA, καθώς η ποιότητα του καναλιού.

Outage probability σε συνάρτηση με το Power allocation



Σχήμα 4.11 – OP with respect to Power Allocation

Στο παραπάνω figure έχουμε την απεικόνιση του outage probability των δύο Users στο NOMA δίκτυο σε συνάρτηση με το power allocation για σταθερό transmit SNR = 40dB. Οι δύο διαφορετικές απεικονίσεις έχουν να κάνουν με τον fading parameter. Μπορούμε να παρατηρήσουμε αρχικά ότι όσο το power allocation του User1 (a_1) είναι στο range 0.5-0.71 δεν ικανοποιείται η συνθήκη που θέλουμε ώστε να μην υπάρχει outage, οπότε το outage probability είναι ίσο με 1. Η δεύτερη παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι όσο το m αυξάνεται, τόσο καλύτερο είναι το outage performance και για τους δύο Users. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι από το στο range 0.71-0.72 του a_1 έχουμε απότομη μείωση του outage probability και για τους δύο Users. Από εκεί και πέρα, όμως, διαχωρίζεται η κατάστασή τους. Ο μεν User1 συνεχίζει να βελτιώνεται με μικρότερη ταχύτητα βέβαια, ο δε User2, αφού φτάσει ένα pick στο outage performance σχετικά γρήγορα, στη συνέχεια αυτό μειώνεται συνεχώς, κάτι το οποίο είναι φυσικό επακόλουθο του γεγονότος ότι μειώνεται το δικό του power allocation (a_2). Η αρχική του συμπεριφορά μπορεί να φαίνεται παράταιρη, όμως είναι απολύτως φυσιολογική, αν σκεφτεί κανείς ότι πρέπει πρώτα να κάνει decoding στο σήμα του User1 και μετά το δικό του. Επομένως με την αύξηση του a_1 αυξάνονται οι πιθανότητες να επιτευχθεί η παραπάνω πρόταση.

5ο Κεφάλαιο

Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Ως συμπέρασμα, θα μπορούσαμε να αντλήσουμε το γεγονός ότι στις THz επικοινωνίες, το NOMA είναι μία πολλά υποσχόμενη multiple access τεχνική, που όπως είδαμε έχει τη δυνατότητα να αυξήσει το achievable rate των χρηστών, να βελτιώσει σημαντικά το capacity, καθώς και να ελαττώσει το outage probability.

Στην πρώτη υλοποίηση παρατηρήσαμε ότι η χρήση NOMA σε συνδυασμό με MIMO, βοηθάει σε όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά της απόδοσης του δικτύου και απεικονίσαμε τα αποτελέσματα που αποδεικνύουν την υπεροχή του NOMA σε σύγκριση με τις τεχνικές OMA που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα.

Ακόμα, στη δεύτερη υλοποίηση είδαμε ότι σημαντικό ρόλο μπορούν να επιτελέσουν και τα RIS σε συνδυασμό με το NOMA στα THz communications, ως μία πρόσθετη λύση σε δυσκολίες που έχουν να κάνουν με την έλλειψη LoS ζεύξεων. Τα RIS, μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην ποιότητα μετάδοσης των σημάτων λόγω του tunability και του programmability που υπόκεινται, κάνοντάς τα ευέλικτα και πολύ πλούσια σε δυνατότητες.

Επιπλέον, η τεχνολογία NOMA μπορεί να υποστηρίξει το massive connectivity, γεγονός που είναι πολύ σημαντικό για το 5G, πόσω μάλλον για το επερχόμενο 6G δίκτυο. Επιτρέποντας πολλαπλούς χρήστες να χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους καναλιών, το NOMA μειώνει το overhead και βελτιώνει την αποδοτικότητα του δικτύου. Ωστόσο, αντιμετωπίζει επίσης αρκετές προκλήσεις, όπως η πολυπλοκότητα, το channel estimation, το interference management και το power allocation που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Λόγω του γεγονότος ότι το κανάλι THz είναι πολύ ευαίσθητο σε περιβαλλοντικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες, μπορεί να προκληθεί σημαντικό attenuation και dispersion στο σήμα. Η χρησιμοποίηση του THz band με τη βοήθεια και του NOMA είναι ακόμα σε αρχικά ερευνητικά στάδια και δεν ξέρουμε ακόμα με βεβαιότητα αν επιτευχθεί στο κοντινό μέλλον.

Η έρευνα θα συνεχιστεί πάνω στην αντιμετώπιση των παραγόντων που αναφέραμε και στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη βελτίωση του channel estimation, για να μπορούμε να μιλούμε για implementation του NOMA σε THz communication στην πραγματικότητα. Επίσης, δεδομένο θα πρέπει να θεωρείται ότι θα συνεχίσουν να γίνονται έρευνες για να βρεθούν τεχνοτροπίες βελτιστοποίησης των RIS, ώστε πλέον να πάμε και στο επόμενο επίπεδο ελέγχου της μετάδοσης σήματος σε τόσο υψηλά επίπεδα συχνοτήτων.

Τέλος, να αναφέρουμε ότι η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να έχει προσφέρει το λιθαράκι της στο γνωστικό πεδίο των THz communications και πιο συγκεκριμένα στη χρήση της Non Orthogonal Multiple Access τεχνικής όταν αυτή συνδυάζεται με άμεσες τεχνικές MIMO, είτε έμμεσες, όπως μπορεί να θεωρηθεί η χρήση RIS που έλαβε χώρο κατά τη δεύτερη υλοποίηση. Η έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο, ωστόσο υπάρχει αισιοδοξία ότι στα τεράστιας έκτασης αχαρτογράφητα νερά του, υπάρχουν απαντήσεις που θα φέρουν το 6G πολύ πιο κοντά στην πραγματική υλοποίησή του και κατά συνέπεια, στην καθημερινότητά μας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Ian F. Akyildiz, Life Fellow, IEEE, Chong Han, Member, IEEE, Zhifeng Hu, Shuai Nie, Member, IEEE, and Josep M. Jornet, Senior Member, IEEE – “Terahertz Band Communication: An Old Problem Revisited and Research Directions for the Next Decade (Invited Paper)”
2. Shahid Bashir, Mohammed H. Alsharif, Imran Khan, Mahmoud A. Albreem, Aduwati Sali, Borhanuddin Mohd Ali and Wonjong Noh – “MIMO-Terahertz in 6G Nano-Communications: Channel Modeling and Analysis”
3. Zhi Chen, Xinying Ma, Bo Zhang, Yaxin Zhang, Zhongqian Niu, Ningyuan Kuang, Wenjie Chen, Lingxiang Li, Shaoqian Li – “A Survey on Terahertz Communications”
4. Theodore S. Rappaport, Yunchou Xing, Ojas Kanhere, Shihao Ju, Arjuna Madanayake, Soumyajit Mandal, Ahmed Alkhateeb, Georgios C. Trichopoulos (Invited Paper) – “Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond”
5. Xianbin Yu, Ying Chen, Michael Galili, Toshio Morioka, Peter Uhd Jepsen, and Leif K. Oxenløwe – “The Prospects of Ultra-Broadband THz Wireless Communications”
6. Hadeel Elayan, Osama Amin , Raed M. Shubair , and Mohamed-Slim Alouini – “Terahertz Communication: The Opportunities of Wireless Technology Beyond 5G”
7. Kaushik Sengupta – “Integrated Circuits for Terahertz Communication beyond 100 GHz: Are We There Yet ?”
8. Chong Han and Yi Chen – “Propagation Modeling for Wireless Communications in the Terahertz Band”
9. M. Mahdi Azari, Member, IEEE, Sourabh Solanki, Member, IEEE, Symeon Chatzinotas, Senior Member, IEEE, Mehdi Bennis, Fellow, IEEE – “THz-Empowered UAVs in 6G: Opportunities, Challenges, and Trade-Offs”
10. Hadi Sardeddeen, Nasir Saeed, Tareq Y. Al-Naffouri, and Mohamed-Slim Alouini – “Next Generation Terahertz Communications: A Rendezvous of Sensing, Imaging, and Localization”

11. Kazi Mohammed Saidul Huq, Sherif Adeshina Busari, Jonathan Rodriguez, Valerio Frascolla, Wael Bazzi, and Douglas C. Sicker – “Terahertz-Enabled Wireless System for Beyond-5G Ultra-Fast Networks: A Brief Survey”
12. Chong Han, Member, IEEE, Yongzhi Wu, Student Member, IEEE, Zhi Chen, Member, IEEE, and Xudong Wang, Fellow, IEEE – “Terahertz Communications (TeraCom): Challenges and Impact on 6G Wireless Systems”
13. Alice Faisal, Hadi Srieddeen, Hayssam Dahrouj, Tareq Y. Al-Naffouri, and Mohamed-Slim Alouini – “ULTRAMASSIVE MIMO SYSTEMS AT TERAHERTZ BANDS – Prospects and Challenges”
14. John F. O’Hara, Sabit Ekin, Wooyeol Choi and Ickhyun Song – “A Perspective on Terahertz Next-Generation Wireless Communications”
15. Christina Chaccour, Student Member, IEEE, Mehdi Naderi Soorki, Walid Saad, Fellow, IEEE, Mehdi Bennis, Fellow, IEEE, Petar Popovski, Fellow, IEEE, and Merouane Debbah, Fellow, IEEE – “Seven Defining Features of Terahertz (THz) Wireless Systems: A Fellowship of Communication and Sensing”
16. Lorenzo Mucchi, Shahriar Shahabuddin, Mahmoud A. M. Albreem, Saeed Abdallah, Stefano Caputo, Erdal Panayirci, Markku Juntti – “Signal Processing Techniques for 6G”
17. Oguz Ulgen, Serhat Erkucuk, Tuncer Baykas – “Non-Orthogonal Multiple Access for Terahertz Communication Networks”
18. <https://silvustechnologies.com/why-silvus/technology/introduction-to-mimo/>
19. Sadeq Bani Melhem, Student Member, IEEE and Hina Tabassum, Senior Member, IEEE – “User Pairing and Outage Analysis in Multi-Carrier NOMA-THz Networks”
20. Yuanwei Liu, Member, IEEE, Zhijin Qin, Member, IEEE, Maged ElKashlan, Member, IEEE, Zhiguo Ding, Senior Member, IEEE, Arumugam Nallanathan, Fellow, IEEE, and Lajos Hanzo, Fellow, IEEE – “Non-Orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond”
21. Ahmed Magbool, Student Member, IEEE, Hadi Srieddeen, Member, IEEE, Nour Kouzayha, Member, IEEE, Mohamed-Slim Alouini, Fellow, IEEE, and Tareq Y. Al-Naffouri, Senior Member, IEEE – “Terahertz-Band Non-Orthogonal Multiple Access: System- and Link-Level Considerations”

22. Yuanwei Liu, Senior Member, IEEE, Shuowen Zhang, Member, IEEE, Xidong Mu, Graduate Student Member, IEEE, Zhiguo Ding, Fellow, IEEE, Robert Schober, Fellow, IEEE, Naofal Al-Dhahir, Fellow, IEEE, Ekram Hossain, Fellow, IEEE and Xuemin Shen Fellow, IEEE – “Evolution of NOMA Toward Next Generation Multiple Access (NGMA) for 6G”
23. <https://ecewireless.blogspot.com/2020/11/mimo-noma.html?lr=1>
24. Hadeel Elayan (Student Member, IEEE), Osama Amin (Senior Member, IEEE), Basem Shihada (Senior Member, IEEE), Raed M. Shubair (Senior Member, IEEE), Mohamed-Slim Alouini (Fellow, IEEE) – “Terahertz Band: The Last Piece of RF Spectrum Puzzle for Communication Systems”
25. Hadi Sareddeen, Member, IEEE, Mohamed-Slim Alouini, Fellow, IEEE, and Tareq Y. Al-Naffouri, Senior Member, IEEE – “An Overview of Signal Processing Techniques for Terahertz Communications”
26. Zhiguo Ding, Member, IEEE, Fumiyuki Adachi, Fellow, IEEE, and H. Vincent Poor, Fellow, IEEE – “The Application of MIMO to Non-Orthogonal Multiple Access”
27. <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>
28. Kursat Tekbıyık, Student Member, IEEE, Ali Rıza Ekti, Member, IEEE, Gunes Karabulut Kurt, Senior Member, IEEE, Ali Gorcin, Senior Member, IEEE, Halim Yanikomeroglu, Fellow, IEEE – “A Holistic Investigation on Terahertz Propagation and Channel Modeling Toward Vertical Heterogeneous Networks”
29. Yuanwei Liu, Wenqiang Yi, Zhiguo Ding, Xiao Liu, Octavia Dobre, and Naofal Al-Dhahir – “Application of NOMA in 6G Networks: Future Vision and Research Opportunities for Next Generation Multiple Access”
30. Athanasios P. Chrysologou, Alexandros-Apostolos A. Boulogeorgos, Nestor D. Chatzidiamantis, and Angeliki Alexiou – “Outage Analysis of Holographic Surface Assisted Downlink Terahertz NOMA”