



ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΜΣ: ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΙΚΕΣ NOMA (NON ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS)

Χριστόφορος Χατζηκωνσταντίνου

ΜΨΕ 1708

Επιβλέπων:

Αθανάσιος Κανάτας

Καθηγητής

Πίνακας περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ	5
1.1.Οι νέες προκλήσεις της σύγχρονης εποχής των πληροφοριών από τα 1G στα 4G συστήματα	5
1.2 Δίκτυα 5ης Γενιάς	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ (Non Orthogonal Multiple Access - NOMA)	13
2.1. Η έννοια της πολυπλεξίας ως βασικό μοντέλο λειτουργίας της NOMA	13
2.2. Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου NOMA	19
2.3. Διαθέσιμες τεχνικές μέσω της NOMA: Πολυπλεξία Τομέα ισχύος (Power Domain – PD) και Πολυπλεξία Τομέα κώδικα (Code Domain – CD)	24
2.4. Μοντέλο NOMA στη Ζεύξη Ανόδου (uplink)	27
2.5. Μοντέλο NOMA στη Ζεύξη Καθόδου (downlink)	31
2.6. Συγκριτικό πλαίσιο τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης NOMA και OMA	33
2.7. Συγκριτικό πλαίσιο τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης NOMA και ODFMA	39
2.8. NOMA και προτυποποίηση 3GPP	44
2.9. Μέθοδοι και τεχνικές μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης: υπάρχοντα συστήματα	45
Κανάλι 2×2 MIMO	46
Zero forcing equalizer for 2×2 MIMO channel	46
Zero Forcing with Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)	48
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΙΛΟΓΟΣ	61
Πίνακας Σχημάτων	63
Πίνακας Γραφημάτων	63
Βιβλιογραφία	65

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Λόγω της μεγάλης συνδεσιμότητας και των αυξανόμενων απαιτήσεων διαφόρων υπηρεσιών και εφαρμογών δεδομένων, η πλήρης υλοποίηση των ασύρματων συστημάτων 5ης γενιάς (5G) απαιτεί πιο αποτελεσματικές τεχνικές ραδιοεπικοινωνίας. Από αυτή την άποψη, η μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA) έχει αποκτήσει πρόσφατα όλο και μεγαλύτερη προσοχή τόσο από τον ακαδημαϊκό χώρο όσο και από τη βιομηχανία. Σε σύγκριση με ορθογώνιες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης (OMA), η NOMA είναι ανώτερη από την άποψη της φασματικής απόδοσης και είναι επομένως κατάλληλο για δίκτυα 5G.

Θεωρητικά, τα συστήματα με βάση την τεχνική OMA δεν αντιμετωπίζουν παρεμβολές μεταξύ χρηστών εξαιτίας της ορθογώνια κατανομή πόρων. Ωστόσο, καθώς ο αριθμός των ορθογώνιων πόρων είναι περιορισμένος, τα συστήματα OMA δεν μπορούν να εξυπηρετήσουν μεγάλο αριθμό χρηστών, όπως επιβάλλει η 5G. Σε αντίθεση με την τεχνική OMA, η μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA) επιτρέπει την εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών μέσω της χρήσης του ίδιου μπλοκ πόρων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιχειρείται μια επισκόπηση των αρχών και των εφαρμογών της NOMA. Συγκεκριμένα, θα εξεταστούν τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου NOMA, και οι διαθέσιμες τεχνικές μέσω της NOMA δηλαδή η πολυπλεξία τομέα ισχύος (Power Domain – PD) και η πολυπλεξία τομέα κώδικα (Code Domain – CD). Επιπλέον θα αναλυθεί το μοντέλο NOMA στη ζεύξη ανόδου (uplink) και στη ζεύξη καθόδου (downlink) ενώ θα επιχειρηθεί η σκιαγράφηση ενός συγκριτικού πλαισίου

της NOMA με άλλες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης όπως η OMA και η ODFMA. Στο καταληκτικό τμήμα της εργασίας θα αναλυθούν τα υπάρχοντα συστήματα όσον αφορά τις μεθόδους και τεχνικές μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης όπως το κανάλι 2×2 MIMO.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

1.1.Οι νέες προκλήσεις της σύγχρονης εποχής των πληροφοριών από τα 1G στα 4G συστήματα

Είναι γεγονός ότι τις τελευταίες δεκαετίες, οι τεχνολογικές εξελίξεις οι οποίες έχουν σημειωθεί σε ποικίλους τομείς της καθημερινότητας και της ανθρώπινης δραστηριότητας είναι ραγδαίες. Στην σύγχρονη εποχή των πληροφοριών, οι κινητές επικοινωνίες μας επέτρεψαν να χρησιμοποιήσουμε φορητούς προσωπικούς υπολογιστές συνδεδεμένους στο Διαδίκτυο χωρίς «ενσύρματο» LAN. Με απλά λόγια, αν το διαδίκτυο μας έδινε τη δυνατότητα πρόσβασης σε οποιαδήποτε διεύθυνση ιστού σε έναν επιτραπέζιο υπολογιστή, τα κινητά τηλέφωνα μας έδωσαν την πρόσβαση ανά πάσα στιγμή και από οπουδήποτε. Αυτή η δυνατότητα, που προέρχεται από τη σύγχρονη τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία, είναι καθοριστική σήμερα (Ding et al., 2017).

Τα ασύρματα δίκτυα και η τεχνολογία των κυψελοειδών δικτύων¹ τα οποία αποτελούν προϊόντα των αυξημένων απαιτήσεων της αγοράς κινητής τηλεφωνίας, για ποιοτική επικοινωνία και τα οποία δημιουργήθηκαν, προκειμένου να καλύψουν τις ελλείψεις που παρουσίαζαν τα παραδοσιακά συστήματα εξαιτίας της φύσης και των αρχών λειτουργίας τους, ανατρέχουν

¹ Η κύρια ιδέα στην οποία βασίστηκε η κατασκευή των κυψελοειδών δικτύων αναπτύχθηκε στην έννοια της κυψέλης, δηλαδή στην τμηματοποίηση της γεωγραφικής περιοχής που πρόκειται να καλυφθεί ηλεκτρομαγνητικά σε μικρές ζώνες, όπου υπάρχει η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των ίδιων συχνοτήτων.

ήδη πίσω στη δεκαετία του 1940. Ήταν τότε που ξεκίνησε η εμπορική κινητή τηλεφωνία όταν το 1947 στις ΗΠΑ, έγιναν οι πρώτες προσπάθειες επινόησης κυψελοειδών δικτύων (Bell Labs) ή ακόμα και στις αρχές της δεκαετίας του 1910 όταν δοκιμάστηκε για πρώτη φορά η ραδιοφωνική μετάδοση (Tudzarov et al., 2011).

Οι κινητές επικοινωνίες αποτελούν έναν τεχνολογικό κλάδο, ο οποίος εξελίσσεται διαρκώς με αυξανόμενο ρυθμό. Μέσα από την εξέταση των τεχνολογιών Εξετάζοντας τις τεχνολογίες των αυτοματοποιημένων δικτύων κινητής επικοινωνίας από το 1G έως το 4G, είναι προφανές ότι έχουν επιτευχθεί σημαντικές καινοτομίες αλλά και βελτιστοποιήσεις. Η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως διατυπώθηκε το 1857 από τον Clark Maxwell αποτέλεσε την βάση για την εφεύρεση της ραδιοφωνικής μετάδοσης τον 20ο αιώνα.

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από τη φωτεινή πηγή και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Ο Maxwell απέδειξε ότι, όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο ταλαντώνεται, παράγει ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το οποίο συναπαρτίζεται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό κύμα, ένα πεδίο δηλαδή με δύο χαρακτηριστικά, την ένταση ϵ του ηλεκτρικού πεδίου και την ένταση του μαγνητικού πεδίου, των οποίων τα διανύσματα είναι κάθετα μεταξύ τους και μεταβάλλονται από θέση σε θέση και από στιγμή σε στιγμή (Aryaputra and Bhuvaneshwari, 2011).

Αν και η θεωρία του Maxwell αποτέλεσε την βάση για τις περαιτέρω τεχνολογικές εξελίξεις, ωστόσο, οι πρώτοι προάγγελοι της έλευσης των κινητών συσκευών όπως είναι σήμερα γνωστές, εμφανίστηκαν περί τα τέλη της δεκαετίας του 1940 στις ΗΠΑ και του 1950 αντίστοιχα, στην Ευρώπη. Τα κινητά αυτά πρώτα τηλέφωνα, είχαν ιδιαίτερος περιορισμένη δυνατότητα

κινητικότητας, ενώ παράλληλα ως συσκευές είχαν αρκετό βάρος αλλά και υψηλό κόστος. Έτσι, μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980, οι κινητές αυτές συσκευές ήταν εξαιρετικά ογκώδης και κυρίως εγκατεστημένες σε αυτοκίνητα (Nascimento et al., 2013).

Η πρώτη γενιά των κινητών επικοινωνιών (1G) εμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Ειδικότερα εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία στην περίοδο από το 1979 έως το 1984 και έγινε το πρώτο εθνικό δίκτυο 1ης γενιάς κινητής τηλεφωνίας. Στη συνέχεια ακολούθησαν οι Σκανδιναβικές Χώρες οι οποίες ανέπτυξαν το δικό τους δίκτυο 1ης γενιάς (1G) το λεγόμενο NMT (Nordic Mobile Telephone) που άρχισε να χρησιμοποιείται το 1981, ενώ και άλλες χώρες ξεκίνησαν να θέτουν σε λειτουργία τα πρώτα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Τα συστήματα 1G, χρησιμοποίησαν μια ποικιλία τεχνικών όπως το Σύστημα Προηγμένου Κινητού Τηλεφώνου (Advanced Mobile Phone System – AMPS), τα Επικοινωνιακά Συστήματα Πλήρους Πρόσβασης (Total Access Communication Systems – TACS) και το Σκανδιναβικό Κινητό Τηλέφωνο (Nordic Mobile Telephone – NMT). Καθώς, οι διάφορες χώρες δημιουργούσαν η κάθε μια το δικό τους πρότυπο κινητής επικοινωνίας, ήταν προφανές ότι προκειμένου να υπάρξει ολοκληρωμένη επικοινωνία ήταν απαραίτητη η ενοποίηση των διεθνών αγορών προκειμένου η χρήση των κινητών τηλεφώνων να μην περιορίζεται σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές (Pachauri et al., 2012).

Επρόκειτο πάντως, για αναλογικά κυψελοειδή συστήματα (cellular network) τηλεφωνίας τα οποία χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά και μόνο για την υπηρεσία φωνής, και ήταν συσκευές οι οποίες ήταν λιγότερο ογκώδεις από τις πρώτες συσκευές των κινητών τηλεφώνων καθώς και πιο οικονομικές. Είναι χαρακτηριστικό ότι με την εμφάνιση των συσκευών 1G,

η παγκόσμια αγορά κινητών τηλεφώνων σημείωσε αύξηση της τάξης του 30% έως 50% ετησίως ενώ ο αριθμός των συνδρομητών έως και το 1990 είχε αυξηθεί στο δυσθεώρητο ύψος των περίπου είκοσι εκατομμυρίων χρηστών (Churi et al., 2012).

Στις αρχές του 1990, παρουσιάστηκε η 2η γενιά κινητής τηλεφωνίας (2G). Ειδικότερα, το 1991, τέθηκε σε λειτουργία στη Φινλανδία, για πρώτη φορά, το πρώτο δίκτυο GSM (Global System for Mobile communications) ενώ η ψηφιακή μετάδοση σήματος, παίρνει τη θέση της παραδοσιακής αναλογικής μετάδοσης. Το δίκτυο GSM θέσπισε ενιαία πρότυπα επικοινωνίας στην κινητή τηλεφωνία, με αποτέλεσμα να αντιμετωπίσει με τον τρόπο αυτό το πρόβλημα του κατακερματισμού των προτύπων και αγορών, και να ανοίξει το δρόμο αφενός για την δυνατότητα διεθνών κλήσεων αφετέρου δε για την ευρεία εξάπλωση των εν λόγω συσκευών.

Καθώς το σύστημα βασιζόταν στην ψηφιακή λειτουργία, διευκόλυνε την εξυπηρέτηση πολύ μεγαλύτερου όγκου συνδρομητών, καθώς και βελτιστοποιημένη συγκριτικά με το προηγούμενο πρότυπο, ποιότητα υπηρεσιών, αλλά και συμβατότητα με άλλα συστήματα. Η γενιά κινητής τηλεφωνία 2G, με την έλευσή της, κόμισε έναν νέο, καινοτόμο τρόπο επικοινωνίας, που δεν είναι άλλη παρά τα γραπτά μηνύματα SMS (Short Message Service), ο οποίος έγινε ευρέως αποδεκτός από το σύνολο των χρηστών καθώς διευκόλυνε σημαντικά την καθημερινή τους επικοινωνία (Ott and Shilpa, 2013).

Η κινητή τηλεφωνία 2G, βασίστηκε στην χρήση της τεχνολογίας GSM (Global System for Mobile Communications), στα πλαίσια της οποίας χρησιμοποιούνται ψηφιακά συστήματα διαμόρφωσης, μεταξύ των οποίων η τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access - TDMA). Αν και το δίκτυο 2G, είχε σημαντικές

διαφοροποιήσεις και βελτιώσεις από την πρώτη γενιά, ωστόσο, η εξυπηρέτηση δεδομένων που προσέφερε ήταν αρκετά περιορισμένη. (Ott and Shilpa, 2013).

Η τρίτη γενιά (3G) αποτέλεσε μια προσπάθεια μεταφοράς δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες, δεδομένου ότι τέθηκε εμφιασμένα πλέον για ανάπτυξη νέων προηγμένων υπηρεσιών και πρόσβασης στο διαδίκτυο, λόγω της ραγδαίας αύξησης του επιπέδου χρήσης του κινητού τηλεφώνου στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Έτσι στην αυγή του 21ου αιώνα η σχετική τεχνολογία εξελίχθηκε κι άλλο, ώστε να εμφανιστεί η 3η γενιά (3G) κινητής τηλεφωνίας. Οι νέες δυνατότητες της 3G γενιάς συσκευών και δικτύων ήταν μεταξύ άλλων συσκευές οι οποίες διέθεταν πιο πολλές και πιο αναβαθμισμένες λειτουργίες, μεταφορά πακέτων δεδομένων, πολυμέσα, προηγμένη συνδεσιμότητα, πρόσβαση στο διαδίκτυο, αποστολή και λήψη e-mail. (Ott and Shilpa, 2013).

Η Τρίτη γενιά (3G) συνοψίζεται στην προσπάθεια δημιουργίας ενός διεθνούς προτύπου για κινητά 3G, η οποία προσπάθεια είναι υπό την εποπτεία και έλεγχο της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecom Union - ITU), και υπό την αιγίδα του προγράμματος IMT-2000. Τα συστήματα τρίτης γενιάς (3G) υπόσχονται ταχύτερες υπηρεσίες επικοινωνιών με υπηρεσίες βασισμένες στο πρωτόκολλο Διαδικτύου (Internet Protocol – IP), συμπεριλαμβανομένης της φωνής, του fax και του Internet, οποτεδήποτε και οπουδήποτε με απρόσκοπτη παγκόσμια περιαγωγή. Το διεθνές πρότυπο IMT-2000 της ITU για το 3G έχει ανοίξει το δρόμο για την παροχή καινοτόμων εφαρμογών και υπηρεσιών (π.χ. ψυχαγωγία πολυμέσων, και υπηρεσίες που βασίζονται σε τοποθεσίες, μεταξύ άλλων). Τα πρώτα δίκτυα 3G αναπτύχθηκαν στην Κορέα και την Ιαπωνία το 2000 και το 2001. (Ott and Shilpa, 2013).

Εκτός από την ταχύτητα μετάδοσης, σημειώθηκε βελτίωση και στην ποιότητα των υπηρεσιών (Quality of Services – QoS). Ειδικότερα τα συστήματα 3G προσφέρουν τη δυνατότητα χρήσης εφαρμογών ήχου, γραφικών και βίντεο έτσι ώστε ένας χρήστης να μπορεί για παράδειγμα να παρακολουθεί βίντεο ενώ παράλληλα να συμμετάσχει και στην πραγματοποίηση μιας βίντεο-κλήσης.

Σήμερα, η επικρατούσα γενιά είναι αυτή του 4G. Το 4G είναι η τέταρτη γενιά της τεχνολογίας ευρυζωνικού κυψελοειδούς δικτύου, που διαδέχθηκε την 3G. Ένα σύστημα 4G πρέπει να παρέχει δυνατότητες που καθορίζονται από την ITU στο IMT Advanced. Οι δυνητικές και τρέχουσες εφαρμογές περιλαμβάνουν την τροποποιημένη πρόσβαση στο κινητό ιστό, την τηλεφωνία IP, τις υπηρεσίες τυχερών παιχνιδιών, την κινητή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, την τηλεδιάσκεψη και την τρισδιάστατη τηλεόραση. Στα συστήματα 4G, οι ρυθμοί μετάδοσης είναι πλέον πάρα πολύ υψηλοί ενώ επίσης η βελτίωση στην ποιότητα των υπηρεσιών (Quality of Services – QoS) είναι πλέον αλματώδης. Τα 4G συστήματα συμπεριλαμβάνουν μια ποικιλία τύπων ευρυζωνικής πρόσβασης (broadband) και όχι αποκλειστικά και μόνο κυψελοειδή τηλεφωνικά συστήματα. (Reshma et al., 2013).

1.2 Δίκτυα 5ης Γενιάς

Από την σύντομη ιστορική επισκόπηση που επιχειρήθηκε είναι προφανές ότι κάθε επιμέρους γενιά κινητής τηλεφωνίας δημιουργήθηκε στη βάση της ανάγκης να ικανοποιήσει μια επιπλέον ανάγκη σε σχέση με τον προκάτοχό της. Έτσι η μετάβαση από τη γενιά 2G στη γενιά 3G επέτρεψε στους χρήστες να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω των κινητών συσκευών τους. Αλλά και στη συνέχεια η μετάβαση στα συστήματα 4G

προσέφερε στους χρήστες μεγαλύτερες ταχύτητες δεδομένων καθώς και μειωμένα ποσοστά λαθών.

Σήμερα, είναι αναγκαίο να καλυφθούν νέες απαιτήσεις στην κινητή τηλεφωνία, οι απαιτήσεις δηλαδή της νέας γενιάς, αυτής των 5G δικτύων. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας βρίσκονται ενώπιον μιας νέας τεχνολογικής πρόκλησης την οποία καλούνται να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά και που δεν είναι παρά η συνεχόμενα ραγδαία αύξηση των χρηστών που επιθυμούν να συνδεθούν μέσω των υπηρεσιών που προσφέρουν τα 5G δίκτυα όπως επίσης και η ανάπτυξη του διαδικτύου οντοτήτων (Internet of Things - IoT) και του κινητού διαδικτύου (mobile Internet). (Yu et al., 2011).

Η 5η γενιά ασύρματης δικτύωσης έχει ως στόχο να εξασφαλίσει αποτελεσματικές λύσεις σε ένα σύνολο προβλημάτων όπως την μεγαλύτερη αποδοτικότητα του φάσματος, λόγω της αύξησης του όγκου δεδομένων, την μαζική συνδεσιμότητα συσκευών λόγω της ανάπτυξης του διαδικτύου οντοτήτων (Internet of Things - IoT), καθώς και τη μικρότερη καθυστέρηση. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί η χρήση του μοντέλου της μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA), το οποίο αποτελεί μια καινοτόμα τεχνολογία στα ασύρματα δίκτυα 5ης γενιάς, εξαιτίας της προηγμένης αποδοτικότητας φάσματος την οποία παρέχει συγκριτικά με τα μοντέλα ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (Sapana and Pratar, 2012) και το οποίο θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια

Η αυξανόμενη ζήτηση του κινητού Διαδικτύου και του διαδικτύου οντοτήτων (Internet of Things - IoT), θέτει δύσκολες απαιτήσεις για ασύρματες επικοινωνίες 5G, όπως υψηλή φασματική απόδοση και η μαζική συνδεσιμότητα. Στη συνέχεια της εργασίας, θα συζητηθεί μια ελπιδοφόρα τεχνολογία, η μη ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση (NOMA), η οποία μπορεί να αντιμετωπίσει μερικές από αυτές τις προκλήσεις για το 5G. Διαφορετικά

από τις συμβατικές τεχνολογίες ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης, η NOMA μπορεί να φιλοξενήσει πολύ περισσότερους χρήστες μέσω μη ορθογωνικής κατανομής πόρων (Sapana and Pratar, 2012).

Ειδικότερα θα αναλυθεί ο διαχωρισμός των υφιστάμενων βασικών συστημάτων NOMA στις βασικές τους κατηγορίες, οι αρχές τα βασικά χαρακτηριστικά τους και τα πλεονεκτήματα / μειονεκτήματα και η ολοκληρωμένη σύγκριση αυτών των λύσεων από την άποψη της φασματικής απόδοσης, της απόδοσης του συστήματος, της πολυπλοκότητας του δέκτη κ.ο.κ. Επιπλέον, επισημαίνονται οι προκλήσεις, οι ευκαιρίες και οι μελλοντικές τάσεις της έρευνας για το σχεδιασμό της NOMA για να δοθεί κάποια εικόνα για τις πιθανές μελλοντικές εργασίες για τους ερευνητές στον τομέα αυτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ (Non Orthogonal Multiple Access - NOMA)

2.1. Η έννοια της πολυπλεξίας ως βασικό μοντέλο λειτουργίας της NOMA

Μέσα από μια μακρά μεταβατική περίοδο εξέλιξης, από τα αναλογικά τηλέφωνα φθάσαμε στις υπηρεσίες του Διαδικτύου, συμπεριλαμβανομένης της φωνής και του μηνύματος. Κάθε γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας, αντιμετωπίζει την πρόκληση να ανταποκριθεί επιτυχώς και να ικανοποιήσει περισσότερες ανάγκες συγκριτικά με την προηγούμενη γενιά. Σήμερα είναι αναγκαία η κάλυψη των απαιτήσεων των δικτύων νέας γενιάς 5G.

Ειδικότερα μια σημαντική πρόκληση σε τεχνολογικό επίπεδο την οποία καλούνται να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα κινητής επικοινωνίας, είναι η πρόκληση της τεράστιας αύξησης των χρηστών, οι οποίοι προσβλέπουν στην σύνδεση μέσω των δικτύων 5G δίκτυα. Η ραγδαία εξάπλωση και τεχνολογική εξέλιξη των smartphones όπως και του Internet of Things (IoT), θέτουν σημαντικές προκλήσεις αναφορικά με την ύπαρξη εφαρμογών υψηλού ρυθμού δεδομένων, όπου σύμφωνα με τις βιομηχανίες για τα 5G δίκτυα ο ρυθμός μετάδοσης πρέπει να είναι στα 10-20 Gbps ενώ σε επίπεδο χρήστη πρέπει να είναι 1 Gbps.

Η κύρια πρόκληση που αντιμετωπίζει το κινητό δίκτυο 5ης γενιάς (5G) είναι η υψηλότερη φασματική απόδοση και η μαζική συνδεσιμότητα, δηλαδή η απόδοση του φάσματος είναι 3 φορές πάνω από το δίκτυο 4G και η πυκνότητα σύνδεσης είναι ένα εκατομμύριο συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Αυτές οι απαιτήσεις είναι δύσκολο να ικανοποιηθούν με τα

συστήματα ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (OMA- Orthogonal Multiple Access). Λόγω των τεράστιων αναγκών συνδεσιμότητας και των αυξανόμενων απαιτήσεων διαφόρων υπηρεσιών και εφαρμογών, η πλήρης υλοποίηση των ασύρματων συστημάτων 5ης γενιάς (5G) απαιτεί πιο αποτελεσματικές τεχνικές ραδιοεπικοινωνίας.

Δηλαδή η απαίτηση στην πλειοψηφία των επικοινωνιών δεδομένων που υπάρχουν σήμερα είναι, να μπορούν περισσότεροι του ενός χρήστες να μοιράζονται ένα κοινό κανάλι επικοινωνίας το οποίο αποτελεί ένα πόρο του συστήματος. Προκειμένου όμως να μπορούν οι χρήστες να μοιράζονται έναν κοινόχρηστο πόρο με έναν αποδοτικό τρόπο είναι απαραίτητη η παρεμβολή ενός πρωτοκόλλου πρόσβασης, το οποίο να ορίζει πότε και πώς θα πραγματοποιείται η κοινή χρήση ενώ παράλληλα να καθορίζει και τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα αναγνωρίζει τα μηνύματα που λαμβάνονται από διαφορετικούς χρήστες. Αυτή η διαδικασία καταμερισμού του καναλιού σε πολλούς χρήστες είναι γνωστή με το όνομα πολυπλεξία (multiplexing).

Η πολυπλεξία στο πεδίο των δικτύων υπολογιστών και στις τηλεπικοινωνίες επιτρέπει με λίγα λόγια, σε ψηφιακά δεδομένα ή αναλογικά σήματα που προέρχονται από διαφορετικές πηγές, να διέλθουν μέσα από το ίδιο φυσικό μέσο. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται ο διαμοιρασμός ενός πόρου ο οποίος είναι σπάνιος, σε πολλούς χρήστες. Επιτρέπει δηλαδή η πολυπλεξία την παράλληλη μετάδοση δεδομένων από διαφορετικές πηγές χωρίς αλληλοπαρεμβολές.

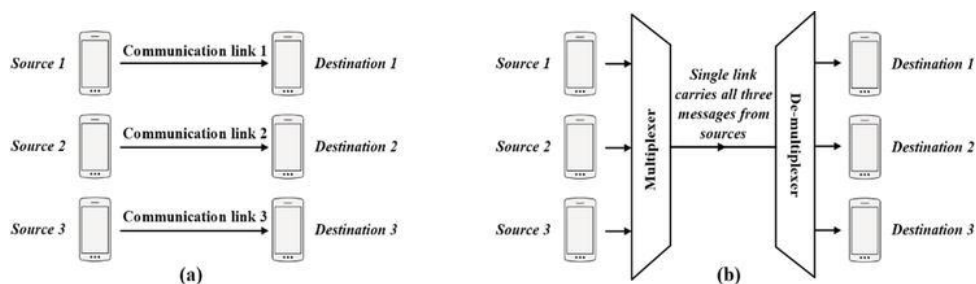
Ειδικότερα, μέσω της χρήσης της τεχνικής της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC) κατανέμονται

διαφορετικά επίπεδα ισχύος (power levels) σε διαφορετικούς χρήστες, με κριτήριο τις συνθήκες των καναλιών τους, και απώτερο σκοπό την βέλτιστη απόδοση του συστήματος.

Η ανάγκη της πολυπλεξίας προέκυψε καθώς με τις μεγάλες προόδους των τεχνολογιών επικοινωνίας, το παράδειγμα επικοινωνίας μετατοπίστηκε ευρέως από ασύρματα συστήματα από σημείο σε σημείο, σε πολλαπλούς χρήστες για να υποστηρίξει όλο και μεγαλύτερο αριθμό κινητών συσκευών. Ο πολλαπλασιασμός των κινητών συσκευών έχει επιβάλει έναν περίπλοκο μηχανισμό για την εξυπηρέτηση πολλών χρηστών μέσω ενός κοινόχρηστου μέσου επικοινωνίας. Το πιο σημαντικό δομικό στοιχείο αυτού του μηχανισμού είναι η προσέγγιση πολυπλεξίας. Η πολυπλεξία λοιπόν ως μέθοδος, στοχεύει στο συνδυασμό πολλών σημάτων σε ένα σήμα έτσι ώστε κάθε χρήστης να είναι σε θέση να εξάγει τα επιθυμητά δεδομένα κατά τη λήψη του πολυπλεγμένου σήματος.

Το σχήμα 1 δείχνει ένα σύστημα επικοινωνίας με τρεις πηγές και τους αντίστοιχους προορισμούς σε επίπεδο συστήματος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1 (α), το σύστημα χωρίς πολυπλεξία απαιτεί τρεις διαφορετικές συνδέσεις επικοινωνίας, καθεμία από τις οποίες φέρει αποκλειστικά το σήμα μίας πηγής προς τον προορισμό της. Ένα τέτοιο σύστημα είναι αναποτελεσματικό επειδή απαιτεί τριπλάσιες φορές περισσότερους πόρους επικοινωνίας σε σχέση με το ίδιο σύστημα με πολυπλέκτη / απο-πολυπλέκτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 (β). Με τη βοήθεια της πολυπλεξίας, τα σήματα όλων των πηγών θα τοποθετηθούν σε ένα σήμα και θα αποσταλούν μέσω ενός διαθέσιμου συνδέσμου επικοινωνίας. Η επιτυχής μετάδοση μέσω του ενιαίου συνδέσμου διατηρεί πολύτιμους πόρους και μειώνει το κόστος επικοινωνίας. Επιπλέον, η εξυπηρέτηση πολλών χρηστών μέσω ενός καναλιού έχει ως αποτέλεσμα μαζική την σύνδεση, η οποία ανοίγει το δρόμο για την τρέχουσα και την επόμενη γενιά ασύρματων δικτύων που

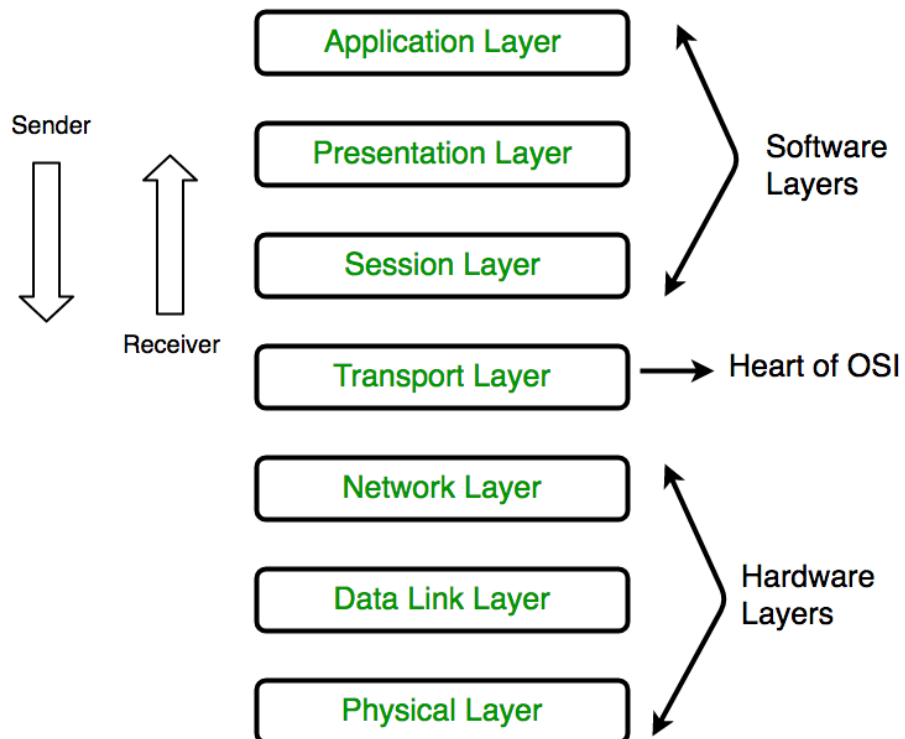
σχεδιάζονται για πολυσύχναστες αστικές περιοχές. Στη σημερινή επικοινωνία, η πολυπλεξία έχει εισχωρήσει σε πολλές εφαρμογές επικοινωνίας, από ψηφιακή μετάδοση έως δίκτυα Wi-Fi.



Σχήμα 1 Σύστημα επικοινωνίας που περιλαμβάνει τρεις πηγές και προορισμούς: α) χωρίς πολυπλεξία και β) με πολυπλεξία.

Πηγή: Gu, Saad et al., 2015

Οι ανωτέρω δυο διεργασίες (πολυπλεξία/αποπολυπλεξία) πραγματοποιούνται στο επίπεδο του μοντέλου Ανοικτής Διασύνδεσης Συστημάτων, ή μοντέλου αναφοράς OSI (reference model) το οποίο αποτελεί μια αφηρημένη περιγραφή για τη σχεδίαση τηλεπικοινωνιακών και δικτυακών πρωτοκόλλων. Το OSI (Open Systems Interconnection) το οποίο αναπτύχθηκε από το ISO - «Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης», το έτος 1984 αποτελεί μια αρχιτεκτονική 7 επιπέδων με κάθε επίπεδο, να έχει συγκεκριμένες λειτουργίες. Όλα αυτά τα 7 επίπεδα συνεργάζονται για τη μετάδοση των δεδομένων από τον ένα χρήστη στον άλλο, στο άλλο σε όλο τον κόσμο (σχήμα 2).



Σχήμα 2 Μοντέλο Ανοικτής Διασύνδεσης Συστημάτων, (Open Systems Interconnection) ή μοντέλο αναφοράς OSI (reference model)

Πηγή: Zimmermann et al., 2010

Υπάρχουν τεσσάρων βασικών ειδών πολυπλεξίες

- TDM (Time Division Multiple Access): Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου.

Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (time-division-multiplexing) είναι τεχνολογία ψηφιακής μετάδοσης σημάτων, αφορά την ψηφιακή μετάδοση και συνίσταται στη διάθεση, σε κάθε ένα από τα αρχικά αναλογικά σήματα πληροφορίας, μιας ιδιαίτερης «χρονοθυρίδας» που χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία του. Ο χρόνος διαιρείται δηλαδή σε χρονοθυρίδες (timeslots)

και η μεταφορά των σημάτων γίνεται κυκλικά. Αν θέλουμε να στείλουμε αναλογικά σήματα με την πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου, κάνουμε δειγματοληψία των σημάτων και αποστέλλουμε κυκλικά τα δείγματα (δεν χρησιμοποιείται συχνά αυτή η μέθοδος). Με αυτόν το τρόπο δεδομένα διαφορετικών πηγών πολυπλέκονται χρονικά και μεταδίδονται στην ίδια γραμμή (μέσο μετάδοσης).

- FDM (Frequency Division Multiple Access): Πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας.

Η πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (frequency-domain-multiplexing FDM) είναι τεχνολογία για την μετάδοση αναλογικών σημάτων. Αφορά δηλαδή την αναλογική μετάδοση και συνίσταται στην εκχώρηση, σε κάθε ένα από τα μεταδιδόμενα σήματα, μιας ιδιαίτερης ζώνης συχνοτήτων (μέσω της διαμόρφωσης διαφορετικού φέροντος από κάθε αναλογικό σήμα). Το εύρος ζώνης του επικοινωνιακού καναλιού διαιρείται σε ζώνες συχνοτήτων που ονομάζονται κανάλια. Η μετάδοση των σημάτων γίνεται ταυτόχρονα στα κανάλια που έχουν καθοριστεί.

- CDMA (Code Division Multiple Access): Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα

Στο CDMA ορίζεται σε κάθε κόμβο ένας διαφορετικός κώδικας. Οι κώδικες είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους ενώ κάθε κόμβος χρησιμοποιεί το δικό του μοναδικό κώδικα για να κωδικοποιήσει τα bits των δεδομένων που στέλνει. Στο μοντέλο αυτό, οι πολλαπλοί κόμβοι σε κάθε κανάλι μπορούν να εκπέμπουν ταυτόχρονα και οι αντίστοιχοι προς αυτούς δέκτες λαμβάνουν σωστά τα κωδικοποιημένα bits δεδομένων ενός πομπού, θεωρώντας ότι ο δέκτης γνωρίζει τον κώδικα του πομπού, παρά τις παρεμβαλλόμενες μεταδόσεις άλλων κόμβων.

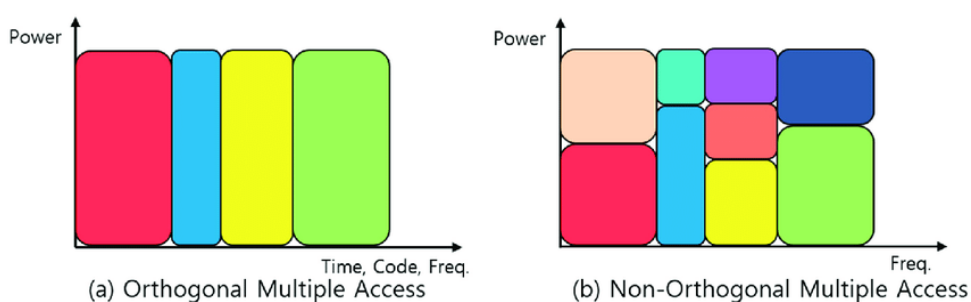
Η μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA) η οποία θα αναλυθεί ακολούθως, έχει αποκτήσει πρόσφατα όλο και μεγαλύτερη προσοχή τόσο από τον ακαδημαϊκό χώρο όσο και από τη βιομηχανία. Ειδικότερα, σε σύγκριση με τις τεχνικές ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (OMA), η τεχνική NOMA είναι ανώτερη από άποψη της φασματικής απόδοσης και είναι κατάλληλο για το δίκτυο 5G. Επομένως, η μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA) έχει προταθεί ως ένα πολλά υποσχόμενο μοντέλο για να αντιμετωπίσει ορισμένες από τις προκλήσεις για το 5G.

Για την προαγωγή της χωρητικότητας λοιπόν του συστήματος, κρίσιμο ρόλο διαδραματίζει η σχεδίαση της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης. Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης διακρίνονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες: (α) την Ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση (Orthogonal Multiple Access - OMA) και (β) την μη Ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση (Non Orthogonal Multiple Access - NOMA).

2.2. Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου NOMA

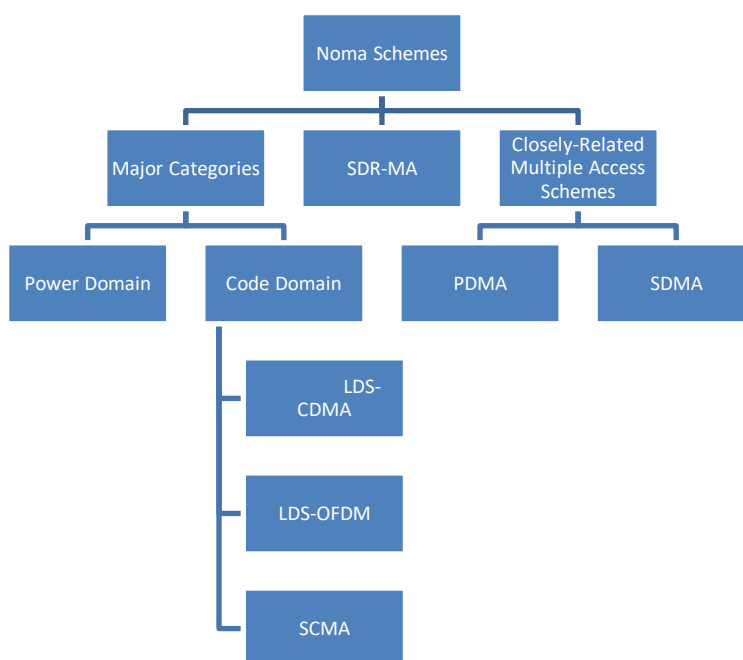
Το μοντέλο μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) αποτελεί μια μεθοδολογία για τον σχεδιασμό τεχνικών ράδιο-πρόσβασης για τα 5G δίκτυα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για να ικανοποιήσει τόσο τις ανάγκες των χρηστών όσο και τις ανάγκες του δικτύου σε διάφορες τεχνολογίες των 5G δικτύων. Ειδικότερα αποτελεί μια από τις υποσχόμενες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης για την ενίσχυση της απόδοσης του συστήματος στα 5G δίκτυα. Η NOMA προσφέρει ένα σύνολο σημαντικών πλεονεκτημάτων σε ένα δίκτυο, όπως για παράδειγμα, η αύξηση της φασματικής απόδοσης.

Ειδικότερα, το μοντέλο μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) επιτρέπει στους διάφορους χρήστες να μεταδίδουν στον ίδιο χρόνο ή συχνότητα μέσω της πολυπλεξίας στο πεδίο της ισχύος ή μέσω της πολυπλεξίας με τη χρήση κώδικα. Το βασικότερο χαρακτηριστικό του μοντέλου NOMA είναι ότι εκτελεί διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC) στους χρήστες, όταν αναφερόμαστε στη ζεύξη καθόδου (downlink) ή στο σταθμό βάσης, όταν αναφερόμαστε στη ζεύξη ανόδου (uplink). Στην τεχνολογία OMA κάθε χρήστης καταλαμβάνει έναν πόρο αποκλειστικά, ενώ στη NOMA τον ίδιο πόρο τον χρησιμοποιούν πολλοί χρήστες ταυτόχρονα. Στο σχήμα 3, απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ της ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (OMA) και της μη ορθογωνίας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA). Ο πόρος που διατίθεται σε διαφορετικούς χρήστες, έχει διαφορετικό χρώμα: (α) Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση. (β) Μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση.



Σχήμα 3 Διαφορά μεταξύ της ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (OMA) και της μη ορθογωνίας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA)

Κατά την αποκωδικοποίηση του σήματος από τους χρήστες (ή το BS) με τη χρήση του SIC μηχανισμού, κάθε σήμα που προορίζεται για έναν συγκεκριμένο χρήστη (ή μεταδίδεται προς το BS από ένα συγκεκριμένο χρήστη) αποκωδικοποιείται χωρίς να υπεισέρχονται οι παρεμβολές (interferences) των χρηστών με καλύτερη ποιότητα καναλιού μετάδοσης (channel gain), όταν αναφερόμαστε στη ζεύξη καθόδου ή με χειρότερη ποιότητα καναλιού μετάδοσης, όταν αναφερόμαστε στη ζεύξη ανόδου. Υπάρχουν διαφορετικές λύσεις NOMA, οι οποίες μπορούν κατά κύριο λόγο να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Το επόμενο σχήμα 4 παρουσιάζει μια απλή ταξινόμηση των υφιστάμενων τεχνικών NOMA



Σχήμα 4 Ταξινόμηση των υφιστάμενων τεχνικών NOMA

Πηγή: Dai et al., 2015 (δημιουργία σχήματος από γράφοντα)

Όπως και τα βασικά συστήματα—πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA - code division multiple access), η μέθοδος NOMA μοιράζεται το σύνολο των διαθέσιμων πόρων (χρόνος / συχνότητα).

Ωστόσο η τεχνική NOMA χρησιμοποιεί ειδικές—αλληλουχίες εξάπλωσης που είναι είτε αραιές ακολουθίες είτε μη-ορθογώνιες αλληλουχίες αλληλοσυσχέτισης χαμηλού συντελεστή συσχέτισης. Διαίρεται επίσης σε μερικές διαφορετικές κατηγορίες, όπως (α) low-density spreading CDMA (LDS-CDMA) (Hoshyar et al., 2008, Razavi et al., 2011) (β) low-density spreading-based OFDM (LDS-OFDM) (Al-Imari et al., 2014, Imran et al., 2012) και (γ) sparse code multiple access (Nikorour and Baligh, 2013). Η χρήση ακολουθιών διασποράς χαμηλής πυκνότητας βοηθά το LDS-CDMA να περιορίσει τον αντίκτυπο της παρεμβολής σε κάθε τσιπ των βασικών συστημάτων CDMA.

Το LDS-OFDM μπορεί να θεωρηθεί ως μια συγχώνευση των LDS-CDMA και OFDM, όπου τα σύμβολα πληροφοριών διαχέονται πρώτα σε ακολουθίες διασποράς χαμηλής πυκνότητας και τα προκύπτοντα τσιπ μεταδίδονται έπειτα σε ένα σετ υποφορέων (Hanzo et al., 2003).

Η SCMA είναι μια πρόσφατη τεχνική NOMA τομέα κώδικα βασισμένη σε LDS-CDMA. Σε αντίθεση με την τεχνική LDS-CDMA, τα δυαδικά ψηφία πληροφοριών μπορούν να χαρτογραφηθούν απευθείας σε διαφορετικές αραιές λέξεις κώδικα επειδή τόσο η χαρτογράφηση δυαδικών ψηφίων όσο και η εξάπλωση δυαδικών ψηφίων συνδυάζονται.

Σε σύγκριση με το LDS-CDMA, η SCMA παρέχει τεχνική λήψης χαμηλής πολυπλοκότητας και προσφέρει βελτιωμένες επιδόσεις. Υπάρχουν ορισμένες άλλες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, οι οποίες επίσης σχετίζονται στενά με την τεχνική NOMA, συμπεριλαμβανομένης της πολλαπλής πρόσβαση διαίρεσης πόλωσης (Polarisation Division Multiple Access, PDMA) και της πολλαπλή πρόσβασης διαίρεσης χώρου (Space Division Multiple Access, SDMA).

Το σύστημα Πολυπλεξίας Πόλωσης - PDMA εξυπηρετεί κλήσεις με διαφορετική πόλωση και μπορεί να υλοποιηθεί σε διάφορους τομείς. Στην πλευρά του πομπού, το PDMA μεγιστοποιεί πρώτα την διαφορικότητα και ελαχιστοποιεί τις αλληλεπικαλύψεις μεταξύ των πολλαπλών χρηστών για να σχεδιάσει μη ορθογώνια μοτίβα. Η πολυπλεξία εκτελείται έπειτα είτε στον τομέα ισχύος (Power Domain – PD) είτε στον τομέα κώδικα (Code Domain – CD) ή με συνδυασμό αυτών.

Οι αρχές λειτουργίας της πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χώρου (SDMA), εμπνέονται από τις βασικές αρχές των συστημάτων CDMA (Nikorour et al., 2014). Αντί να χρησιμοποιεί ειδικές ακολουθίες διάδοσης με βάση το χρώμα, η SDMA διακρίνει τους διάφορους χρήστες χρησιμοποιώντας αποκρίσεις του καναλιού CIRs (Channel Impulse Response). Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τις περιπτώσεις όπου ο αριθμός των χρηστών ανερχόμενης ζεύξης είναι σημαντικά υψηλότερος από τον αριθμό των αντίστοιχων κεραιών λήψης στο BS.

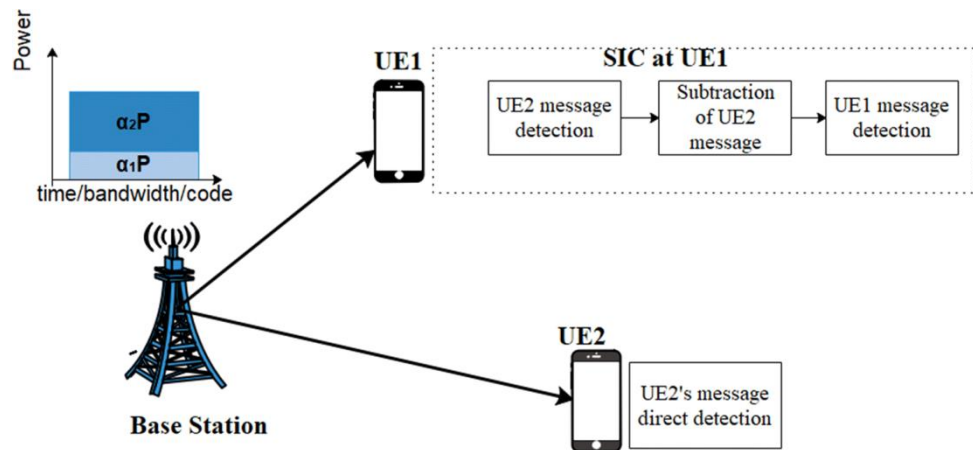
Η (SDR-MA) επιτρέπει τη συνύπαρξη διαφόρων μορφών τεχνικών NOMA. Αυτή η τεχνική παρέχει μια ευέλικτη διαμόρφωση των συμμετεχόντων σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης με σκοπό την υποστήριξη ετερογενών υπηρεσιών και εφαρμογών στο 5G.

2.3. Διαθέσιμες τεχνικές μέσω της NOMA: Πολυπλεξία Τομέα ισχύος (Power Domain – PD) και Πολυπλεξία Τομέα κώδικα (Code Domain – CD).

Οι διαθέσιμες τεχνικές μέσω της NOMA μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κύριες κατηγορίες την πολυπλεξία Τομέα ισχύος (Power Domain – PD) και την Πολυπλεξία Τομέα Κώδικα (Code Domain-CD). Η πολυπλεξία Τομέα ισχύος (Power Domain – PD) εκμεταλλεύεται την περίπτωση χρηστών, που έχουν διαφορετικά επίπεδα λαμβανόμενης ισχύος, είτε μέσω ελέγχου της ισχύος είτε φυσικά στο δίκτυο, προκειμένου να διαχωριστούν οι χρήστες. Η χρήση της ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (PD-NOMA) γίνεται με διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (SIC) προκειμένου να ακυρωθούν τα σήματα υψηλότερης ισχύος, τα οποία αποκωδικοποιούνται πρώτα, πριν αποκωδικοποιηθούν οι άλλοι χρήστες. Το επόμενο σχήμα 5 απεικονίζει το διάγραμμα λειτουργίας της PD-NOMA στην περίπτωση δυο χρηστών.

Ειδικότερα, η τεχνική SIC Διαδοχική Ακύρωση Παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC), εκτελείται πρώτα στον χρήστη με το υψηλό SINR και μετά στον χρήστη με το χαμηλότερο SINR. Έτσι πριν εφαρμοστεί η τεχνική SIC, υπάρχει μια ταξινόμηση στους χρήστες ανάλογα με το πόσο ισχυρό είναι το σήμα τους. Στην συνέχεια εφόσον αποκωδικοποιείται το σήμα του πρώτου χρήστη, αφαιρείται από το συνολικό σήμα πριν γίνει η αποκωδικοποίηση του σήματος του χρήστη 2. Όταν εφαρμόζεται η SIC ένα από τα σήματα χρηστών αντιμετωπίζει το άλλο σήμα σαν παρεμβολή. Έτσι, το άλλο σήμα μπορεί να ανιχνευτεί ευκολότερα καθώς το πρώτο σήμα έχει ήδη αφαιρεθεί. Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι ο τομέας Power-NOMA (PD-NOMA) διαθέτει χαρακτηριστικά που μπορούν να

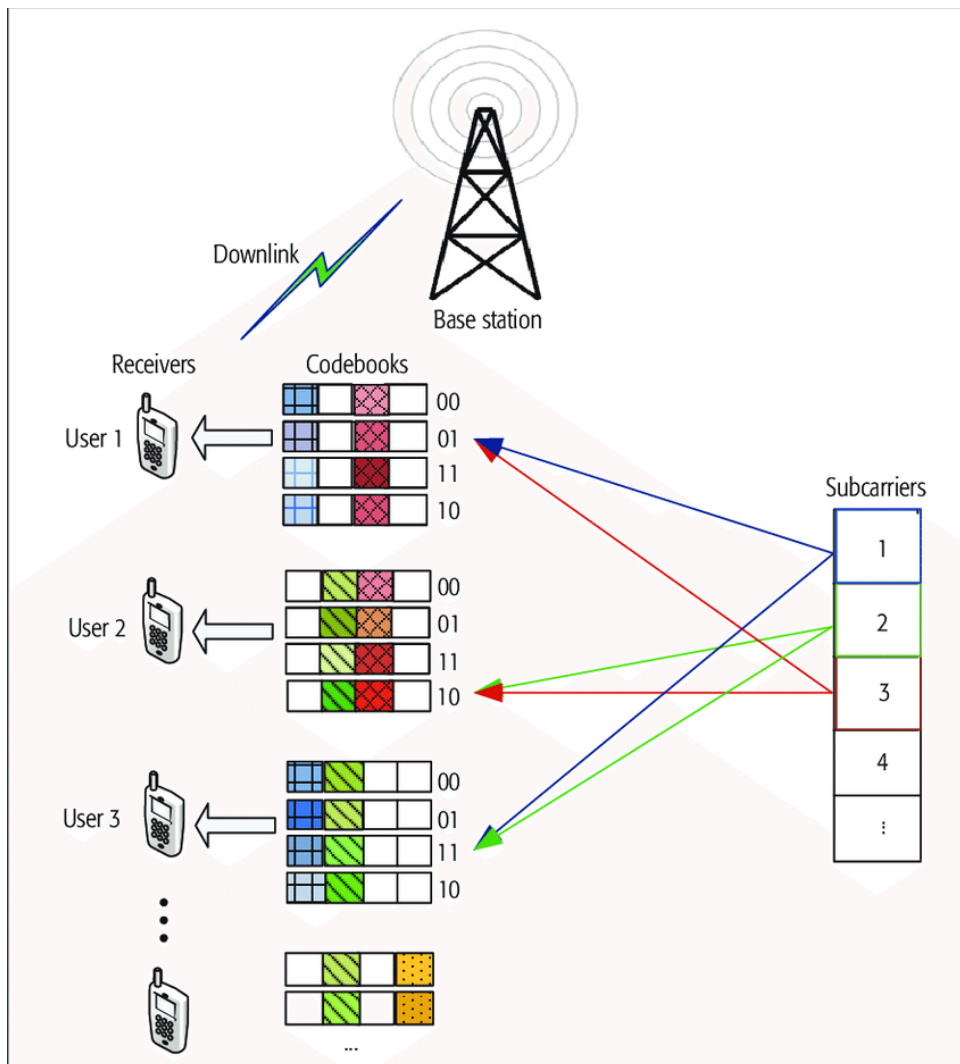
προσφέρουν ευκαιρίες βελτιωμένης απόδοσης και καλύτερη φασματική χρήση για συνεργατικά δίκτυα downlink.



Σχήμα 5 Διάγραμμα λειτουργίας της PD-NOMA στην περίπτωση δυο χρηστών

Πηγή: Dai et al., 2015

Η πολυπλεξία Τομέα κώδικα (Code Domain – CD) είναι παρόμοια με την CDMA και την CDMA πολλαπλών φορέων (Multi Carrier CDMA - MC-CDMA), στην οποία διαφορετικοί χρήστες έχουν διαφορετικούς κώδικες, και οι οποίοι πολυπλέκονται πάνω στους ίδιους πόρους (χρόνου/ συχνότητας).



Σχήμα 6 Διάγραμμα λειτουργίας της CD-NOMA

Πηγή: Dai et al., 2015

Η τεχνική NOMA μέσω της CD πολυπλεξίας διακρίνεται αντίστοιχα σε (α) Διασπορά χαμηλής πυκνότητας (Low-Density Spreading) CDMA (β) Διασπορά χαμηλής πυκνότητας (Low-Density Spreading) OFDM (γ) Πολλαπλή Πρόσβαση Αραιού Κώδικα (Sparse Code Multiple Access -

SCMA) και (δ) Κοινόχρηστη Πρόσβαση Πολλαπλών Χρηστών (Multi-User Shared Access – MUSA).

Η Διασπορά χαμηλής πυκνότητας (Low-Density Spreading) CDMA χρησιμοποιεί αραιές αντί πυκνές ακολουθίες διασποράς στα συμβατικά CDMA, με σκοπό την μείωση της παρεμβολής σε κάθε παλμό. Έτσι η απόδοση του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί, μέσω της αξιοποίησης των ακολουθιών LDS του CDMA. Μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού των ακολουθιών διασποράς, μειώνονται οι παρεμβολές μεταξύ των πολλαπλών χρηστών και έτσι μπορούν να εξυπηρετηθούν περισσότεροι χρήστες από πριν.

Η Διάδοση χαμηλής πυκνότητας (Low-Density Spreading) OFDM αποτελεί έναν συνδυασμό της LDS-CDMA και της OFDM. Στην Διάδοση LDS-OFDM, τα μεταδιδόμενα σύμβολα αντιστοιχίζονται καταρχάς σε ακολουθίες LDS ενώ ακολούθως μεταδίδονται με διαφορετικούς OFDM υποφορείς. Τα σύμβολα, μπορεί να είναι πολλαπλάσια από τον αριθμό των υποφορέων πράγμα που σημαίνει ότι επιτρέπεται η υπερφόρτωση για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης. Σε πρακτικό επίπεδο, η LDS-OFDM μπορεί να θεωρηθεί ως μια βελτιωμένη μορφή της MC-CDMA αντικαθιστώντας τις πυκνές ακολουθίες διασποράς με αραιές (LDS).

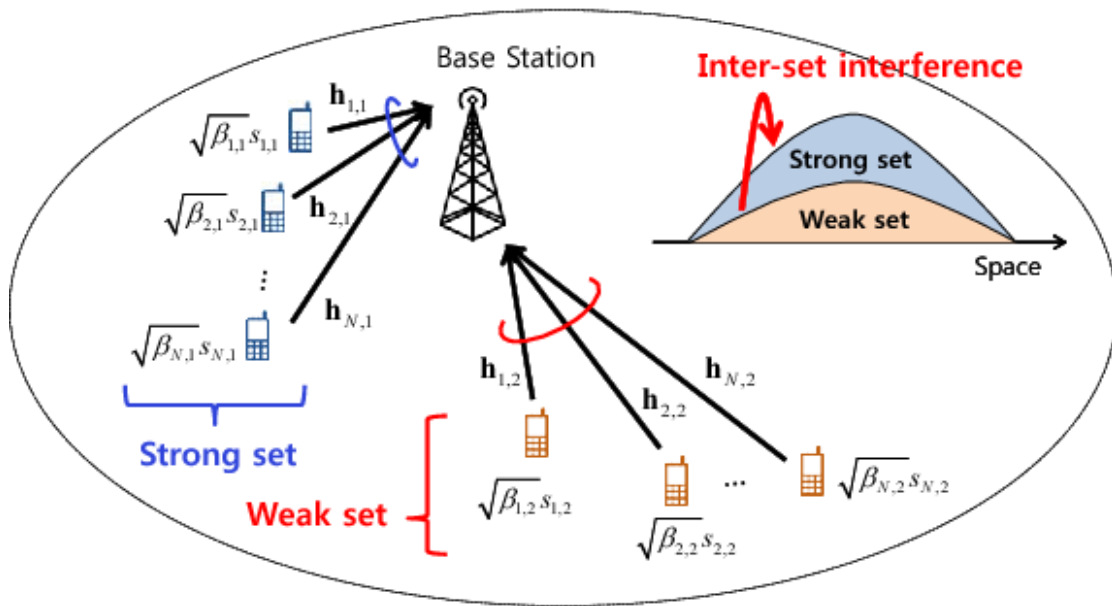
2.4. Μοντέλο NOMA στη Ζεύξη Ανόδου (uplink)

Ως ζεύξη ανόδου (uplink) σε ένα ασύρματο δίκτυο, ορίζεται η από το κινητό τερματικό προς το σταθμό βάσης (Base Station - BS). Σε αυτή την περίπτωση, ο μηχανισμός διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC) λαμβάνει χώρα στο σταθμό βάσης,

αρμοδιότητα του οποίου σταθμού, είναι η αποκωδικοποίηση των σημάτων που μεταδίδονται από τους χρήστες οι οποίοι έχουν μονή κεραία μετάδοσης.

Ο χρήστης που διαθέτει καλύτερο ασύρματο κανάλι, δεν σημαίνει ωστόσο ότι διαθέτει και μεγαλύτερη ισχύ σήματος. Η αλήθεια είναι ότι στον ισχυρό χρήστη, παραχωρείται χαμηλότερη ισχύς εκπομπής συγκριτικά με τον ασθενή χρήστη, ο οποίος διαθέτει πιο ισχυρό σήμα. Συνεπώς οι ισχυροί χρήστες δέχονται ισχυρές παρεμβολές από τους ασθενείς χρήστες ενώ αντίθετα, οι ασθενείς χρήστες επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με τους ισχυρούς χρήστες καθώς βρίσκονται συνήθως πιο κοντά στον σταθμό βάσης.

Στη συνέχεια μέσω ενός παραδείγματος, θα επιχειρηθεί με βάση τα όσα εκτέθηκαν παραπάνω, η ανάλυση της λειτουργίας του μοντέλου NOMA στη ζεύξη ανόδου. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 7, αν υποθεθεί ότι υπάρχει ένας σταθμός βάσης με N κεραίες λήψεως και $2N$ χρήστες οι οποίοι κατανομούνται σε δύο ομάδες, η καθεμία εκ των οποίων περιλαμβάνει N χρήστες. Η μια εκ των ομάδων είναι η “ισχυρή” ομάδα, εξ-αιτίας της καλής ποιότητας καναλιού μετάδοσης των χρηστών ενώ η άλλη ομάδα είναι η “αδύναμη”, λόγω της κακής ποιότητας καναλιού μετάδοσης των χρηστών. (Σχήμα 7).



Σχήμα 7 Μοντέλο ζεύξης ανόδου - Uplink NOMA

Πηγή: Beomju et al., 2015

Στη συνέχεια, ορίζουμε ως $H1=[h_{1,1}...h_{N,1}]$ τον πίνακα των κερδών καναλιού των χρηστών της “ισχυρής” ομάδας και ως $H2 = [h_{1,2}...h_{N,2}]$ τον πίνακα κερδών καναλιού των χρηστών της “αδύναμης” ομάδας. Επίσης με $h_{n,1}$ και $h_{m,2}$ δηλώνουμε τους $N \times 1$ πίνακες των καναλιών του n -ιστού και m -ιστού χρήστη στην “ισχυρή” και “αδύναμη” ομάδα αντιστοίχως.

Το ληφθέν σήμα στο σταθμό βάσης για όλους τους χρήστες, ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{y} = (\mathbf{H1} * \mathbf{x1} + \mathbf{H2} * \mathbf{x2}) + \mathbf{n} \quad (2.1)$$

όπου $x_1 = [\sqrt{a_{1,1}}s_{1,1} \dots \sqrt{a_{N,1}}s_{N,1}]^T$ και $x_2 = [\sqrt{a_{1,2}}s_{1,2} \dots \sqrt{a_{N,2}}s_{N,2}]^T$ είναι οι πίνακες των εκπεμπόμενων σημάτων των δύο ομάδων. Ως $s_{n,1}$ και $s_{m,2}$ ορίζουμε τα σήματα και ως $a_{n,1}$ και $a_{m,2}$ τους συντελεστές ελέγχου ισχύος του n-ιστού και m-ιστού χρήστη της “ισχυρής” και “αδύναμης” ομάδας αντίστοιχα. Άρα, ο σηματοθορυβικός λόγος SINR για τις δύο ομάδες των χρηστών, για τον τυχαίο χρήστη n, ορίζεται ως εξής:

Για την “ισχυρή” ομάδα ισχύει:

$$SINR_{n,1} = \frac{a_{n,1} * P_{n,1}}{\sum_{i \neq n} a_{i,2} * P_{i,2} + \sigma^2}$$

όπου το P είναι η μεταδιδόμενη ισχύς και το σ αντικατοπτρίζει το λευκό θόρυβο. Από αυτόν τον τύπο, λοιπόν, συμπεραίνουμε ότι οι χρήστες με την καλύτερη ποιότητα καναλιού ακούν το θόρυβο όλων των χρηστών με χειρότερη ποιότητα καναλιού από αυτούς. Το φαινόμενο αυτό και ο συγκεκριμένος τύπος παρεμβολών ονομάζεται inter-set interference, δηλαδή παρεμβολές μεταξύ των 2 ομάδων.

Για την “αδύναμη” ομάδα ισχύει:

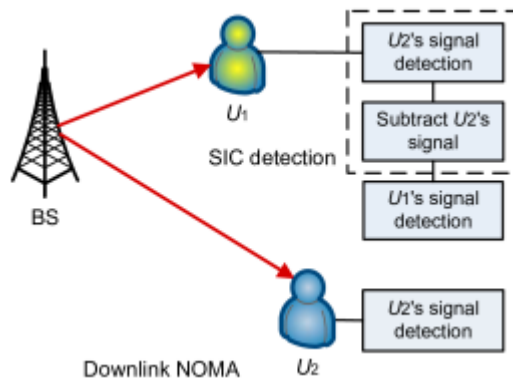
$$SINR_{n,2} = \frac{a_{n,2} * P_{n,2}}{\sigma^2}$$

δηλαδή οι χρήστες με τη χειρότερη ποιότητα καναλιού, δεν ακούν καθόλου θόρυβο, παρά μόνο το λευκό.

2.5. Μοντέλο NOMA στη Ζεύξη Καθόδου (downlink)

Αντίστοιχα ως ζεύξη καθόδου (downlink) σε ένα ασύρματο δίκτυο, ορίζεται η κατεύθυνση από το σταθμό βάσης προς το κινητό τερματικό. Σε αυτή την περίπτωση, ο μηχανισμός διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC) πραγματοποιείται ξεχωριστά σε κάθε επιμέρους τερματικό, το οποίο λαμβάνει σήμα από το σταθμό βάσης. Στο μοντέλο αυτό, πρώτα αποκωδικοποιείται ο χρήστης που διαθέτει την χειρότερη ποιότητα καναλιού συγκριτικά με τους άλλους χρήστες και άρα, δέχεται το θόρυβο από όλους τους χρήστες οι οποίοι διαθέτουν κανάλια καλύτερης ποιότητας συγκριτικά με το δικό του.

Ειδικότερα, είναι αρχικά γνωστό ότι, το NOMA επιτρέπει την υπέρθεση των σημάτων των μηνυμάτων των χρηστών σε μια ομάδα NOMA. Τα επιθυμητά σήματα στη συνέχεια εντοπίζονται και αποκωδικοποιούνται στον δέκτη. Έτσι, ο σταθμός βάσης μεταδίδει το σύνθετο σήμα $x = \sum_{i=1}^U \sqrt{p_i} x_i$, όπου το x_i είναι το σήμα μηνύματος του χρήστη i , p_i , αναπαριστά την ισχύ που έχει δεσμευτεί για τον χρήστη i , και το U συμβολίζει τον συνολικό αριθμό χρηστών που ανήκουν στην ομάδα NOMA. Εν προκειμένω στο υπό ανάλυση παράδειγμα έχουμε δυο χρήστες U_1 και U_2 . Η ισχύς που δεσμεύεται σε έναν χρήστη, εξαρτάται από την ισχύ των υπολοίπων χρηστών εξαιτίας του περιορισμού συνολικής ισχύος του σταθμού, $P_t = \sum_{i=1}^U p_i$, όπου P_t είναι η συνολική ισχύς που διαθέτει ο σταθμός βάσης BS. Στη συνέχεια, το λαμβανόμενο σήμα κατά τον i -οστό χρήστη, δίνεται από $y = h_i x + w_i$, όπου h_i αναπαριστά το κέρδος καναλιού ανάμεσα στον σταθμό βάσης και τον χρήστη i , και w_i συμβολίζει τον Γκαουσιανό θόρυβο στον δέκτη. Το σχήμα 8 απεικονίζει το μοντέλο NOMA στη Ζεύξη Καθόδου με σταθμό βάσης και δυο χρήστες.



Σχήμα 8 Το μοντέλο NOMA στη ζεύξη καθόδου, με σταθμό βάσης και δύο χρήστες

Πηγή: Chen et al., 2018

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, σε μια ζεύξη καθόδου, δύο χρήστες (οι U_1 και U_2) επικοινωνούν με τον σταθμό μέσω της τεχνικής NOMA. Στον δεύτερο χρήστη (U_2) δεσμεύεται περισσότερη ισχύς καθώς βρίσκεται πιο μακριά από τον σταθμό BS, σε σχέση με τον άλλο χρήστη, και λιγότερη ισχύς στον πρώτο χρήστη (U_1) ο οποίος βρίσκεται πιο κοντά στον σταθμό. Στο δίκτυο, όλοι οι χρήστες θα λάβουν το ίδιο σήμα το οποίο περιέχει την πληροφορία αυτών. Κάθε χρήστης αποκωδικοποιεί πρώτα το δυνατότερο σήμα, και στη συνέχεια αφαιρεί το αποκωδικοποιημένο σήμα από το λαμβανόμενο σήμα. Ο μηχανισμός SIC στον δέκτη επαναλαμβάνει την αφαίρεση έως ότου να εντοπίσει το δικό του σήμα. Δηλαδή, ο χρήστης που βρίσκεται πιο κοντά στον σταθμό, έχει τη δυνατότητα να ακυρώσει τα

σήματα των απομακρυσμένων χρηστών, εφόσον αυτά τα σήματα αποτελούν το περισσότερο μέρος του λαμβανόμενου σήματος, και άρα να αποκωδικοποιήσει πρώτα το δικό του σήμα. Στη περίπτωση των δύο χρηστών, υποθέτοντας ότι

$$\frac{|h_1|^2}{N_{0,1}} > \frac{|h_2|^2}{N_{0,2}}$$

ο χρήστης U2 δεν θα εκτελέσει ακύρωση παρεμβολών αφού έρχεται πρώτος στη σειρά αποκωδικοποίησης, αλλά θα αποκωδικοποιήσει πρώτα το x_2 και θα αφαιρέσει το περιεχόμενο του από το λαμβανόμενο σήμα y_1 . Έτσι, ο ρυθμός απόδοσης του χρήστη UE-I, R_1 , μπορεί να αναπαρασταθεί ως ακολούθως:

$$R_1 = \log_2 \left(1 + \frac{P_1 * |h_1|^2}{N_{0,1}} \right)$$

$$R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{P_2 * |h_2|^2}{P_1 * |h_2|^2 + N_{0,2}} \right)$$

2.6. Συγκριτικό πλαίσιο τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης NOMA και OMA

Το NOMA και το OMA είναι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης οι οποίες προέκυψαν από τα νέα δεδομένα και ειδικότερα από το γεγονός ότι η νέα τεχνολογική γενιά των ασύρματων δικτύων (5G) αναμένεται να υποστηρίξει έναν ακόμη μεγαλύτερο αριθμό συνδέσεων διαφορετικών απαιτήσεων (throughput, latency) παρέχοντας υπηρεσίες σε δίκτυα εκατονταπλάσιας σχεδόν πυκνότητας συγκριτικά με την προγενέστερη γενιά

4G. Προκειμένου λοιπόν να ικανοποιηθούν οι εν λόγω νέες απαιτήσεις και ανάγκες, υιοθετήθηκαν νέες τεχνολογίες την τελευταία δεκαετία από τα 5G κυψελωτά δίκτυα. Έτσι η μη-ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA), έχει την ικανότητα να ανταποκριθεί καλύτερα στις προκλήσεις αυτές σε σχέση με την προγενέστερη κλασσική ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση (OMA).

Ειδικότερα, η τεχνική NOMA μπορεί να συνδυαστεί και με άλλες τεχνολογίες, υφιστάμενες ήδη ή νέες, όπως για παράδειγμα την τεχνολογία, των πολλαπλών κεραιοστοιχείων (MIMO), των πολλαπλών κεραιοστοιχείων μεγάλης κλίμακας (massive MIMO), αλλά και με νέου τύπου επικοινωνίες μεταξύ των οποίων τις mm wave/cognitive/cooperative/visible light, κλπ., με κύριο στόχο την αύξηση του αριθμού των χρηστών, αλλά και την βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων εν γένει. Προκειμένου να ανιχνευθούν οι διαφορές μεταξύ της τεχνικής NOMA και OMA, θα πρέπει αρχικά να αναλυθεί το πλαίσιο λειτουργίας του πρωτοκόλλου OMA.

Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα σήμερα, χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο ορθογώνιες τεχνικές πρόσβασης. Ως ορθογώνιες τεχνικές ορίζονται οι τεχνικές εκείνες, οι οποίες έχουν την δυνατότητα απονομής σε κάθε επιμέρους χρήση και σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή μία συγκεκριμένη συχνότητα καθώς και έναν συγκεκριμένο κώδικα. Αυτό ειδικότερα σημαίνει ότι δεν είναι δυνατό, δύο χρήστες να επικοινωνούν την ίδια χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας και την ίδια συχνότητα και τον ίδιο κώδικα (Proakis and Saleh, 2014). Συνεπώς στα συστήματα των ορθογώνιων τεχνικών, ως πόροι του συστήματος θεωρούνται, ο χρόνος, το φάσμα και η κωδικοποίηση. Οι τεχνικές του πρωτοκόλλου OMA, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

Καθορισμένης πρόσβασης (Fixed Access), όπως οι τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβαση Χρόνου (TDMA, Time Division Multiple Access) και Πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (FDMA, Frequency Division Multiple Access).

Στην TDMA, κάθε ζεύξη έχει στη διάθεσή της όλο το φάσμα συχνοτήτων (B) του επαναλήπτη για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια (χρονοθυρίδα, timeslot) σε τακτά χρονικά διαστήματα με περίοδο T_f (περίοδος πλαισίου). Η διαδικασία αυτή απαιτεί μετάδοση κατά ριπές (burst mode transmission). Αν ο χρόνος είναι ίδιος για όλες τις ζεύξεις, τότε ο σταθμός μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα $n = T_f$ ζεύξεις. Η ταυτότητα της κάθε ζεύξης προσδιορίζεται από τη θέση της αντίστοιχης χρονοθυρίδας μέσα στο πλαίσιο T_f . Όλοι οι τύποι τη TDMA απαιτούν συγχρονισμό των επίγειων σταθμών του δορυφορικού δικτύου.

Αντίστοιχα στην τεχνική FDMA κάθε ζεύξη απαιτεί μια υποζώνη συχνοτήτων από το συνολικό φάσμα. Αν υποθετικά το εύρος ζώνης του τελευταίου είναι B και το εύρος ζώνης που απαιτεί κάθε ζεύξη είναι b , τότε μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα $n = B/b$ ζεύξεις

Τυχαίας πρόσβασης (Random Access) και ειδικότερα (α) καθαρά τυχαίας πρόσβασης, όπως Aloha (β) Ρυθμισμένης τυχαίας πρόσβασης, όπως Polling και (γ) Υβριδικές (Reservation-based)

Διευρυμένου φάσματος CDMA. Στις τεχνικές αυτές, το κανάλι επικοινωνίας διαχωρίζεται με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η διανομή των πόρων μεταξύ των συνδρομητών και έτσι να υλοποιείται η ταυτόχρονη επικοινωνία.

Μια βασική διαφορά μεταξύ των δυο τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης είναι η κατανομή των πόρων. Ειδικότερα, τα πρωτόκολλα OMA

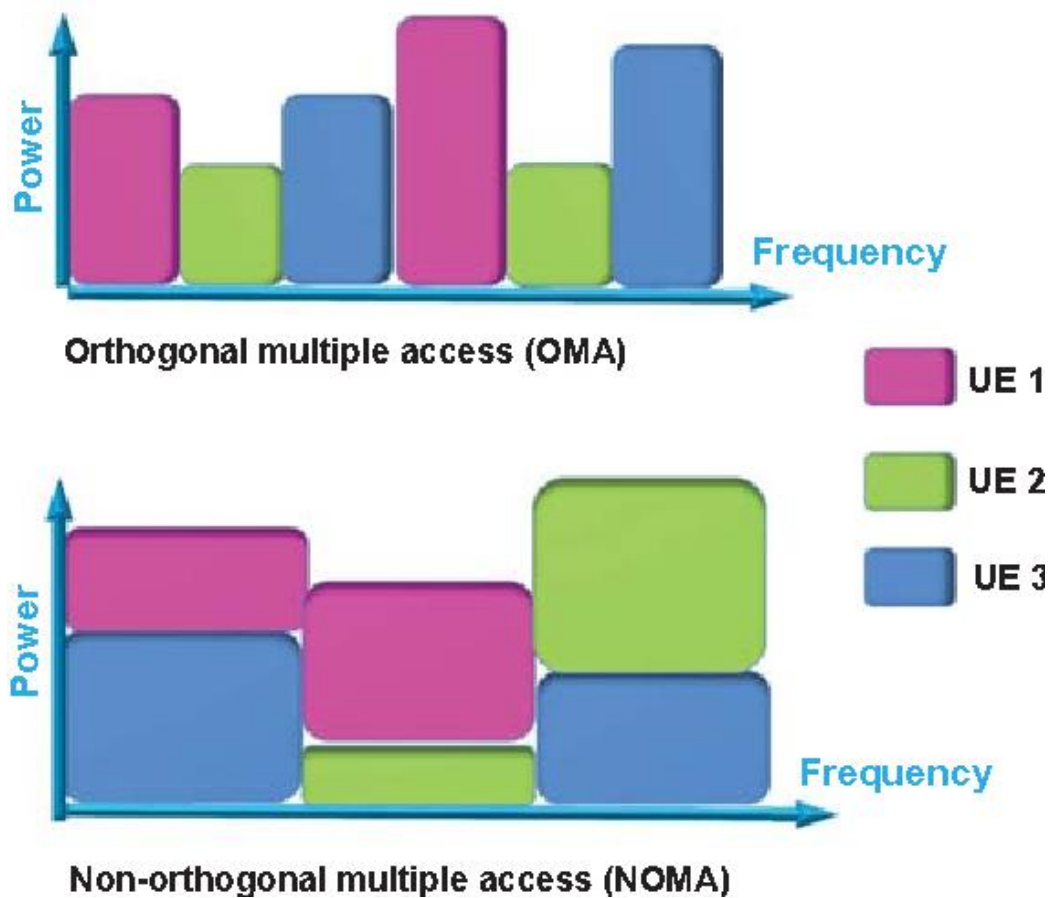
κατανέμουν τους πόρους (χρόνου/ συχνότητας) αποκλειστικά για κάθε έναν χρήστη. Σε θεωρητικό επίπεδο, δεν υφίσταται παρεμβολή μεταξύ των χρηστών του δικτύου, με αποτέλεσμα ο δέκτης να μπορεί να ανιχνεύσει εύκολα την ταυτότητα του πακέτου του κάθε επιμέρους χρήστη του συστήματος.

Ωστόσο το σύστημα θέτει περιορισμούς στους χρήστες, δεδομένου ότι η δυνατότητα πρόσβασης εξαρτάται από διαθέσιμους κατά περίπτωση πόρους. Αντιθέτως τα δίκτυα NOMA είναι σε θέση να διαθέσουν τον ίδιο πόρο (χρόνου/ συχνότητας) σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα στον τομέα ισχύος (Power Domain – PD).

Καθώς υπάρχει διάθεση του ίδιου πόρου σε πολλούς χρήστες, το πρωτόκολλο NOMA, εκμεταλλεύεται τα χαρακτηριστικά του καναλιού, το οποίο επιτρέπει στους χρήστες οι οποίοι έχουν σημαντική διαφορά κέρδους καναλιού να μοιράζονται τον ίδιο πόρο. Υπ αυτή την έννοια στο πρωτόκολλο NOMA, δεν τίθενται περιορισμοί σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν.

Σε σύγκριση με το πρωτόκολλο OMA, η μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση NOMA, ανοίγει τον ορίζοντα για μια νέα γωνία σκέψης. Ειδικότερα, με τη χαλάρωση του περιορισμού της ορθογώνιας κατανομής πόρων, ο συνολικός αριθμός χρηστών που εξυπηρετούνται καθώς και η συνολική χωρητικότητα του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά σε ένα δίκτυο NOMA σε σύγκριση με το αυτό του δικτύου OMA, ειδικά όταν εφαρμόζονται προηγμένοι αλγόριθμοι ανίχνευσης πολλαπλών χρηστών. Επιπλέον, λόγω της μη ορθογώνιας φύσης, η απαίτηση ακριβούς ανατροφοδότησης καναλιών και ο προγραμματισμός πολυπλεξίας πολλαπλών χρηστών μειώνεται ή και αφαιρείται σε μερικές περιπτώσεις.

Μια βασική διαφορά μεταξύ των δυο τεχνικών OMA και NOMA, είναι η κατανομή των πόρων. Ειδικότερα στο μοντέλο OMA οι πόροι (χρόνου/ συχνότητας) κατανέμονται αποκλειστικά για κάθε έναν χρήστη όπως όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 9.



Σχήμα 9 Κατανομή πόρων στα συστήματα OMA και NOMA

Πηγή: Chen et al., 2018

Αντίθετα τα πρωτόκολλα NOMA διαθέτουν τον ίδιο πόρο (χρόνου/ συχνότητας) σε πολλούς χρήστες στην PD, το οποίο βλέπουμε όπως φαίνεται

στο παραπάνω σχήμα. Δηλαδή μέσω της διάθεσης του ίδιου πόρου, το πρωτόκολλο NOMA, εκμεταλλεύεται τα χαρακτηριστικά του καναλιού, και με αυτό τον τρόπο, επιτρέπει στους χρήστες να μοιράζονται τον ίδιο πόρο.

Εν προκειμένω, δεν υφίσταται κάποιος περιορισμός, σχετικά με τον αριθμό των χρηστών οι οποίοι θα υποστηριχθούν.

Κάποια επίσης χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τα πρωτόκολλα NOMA από τα πρωτόκολλα OMA είναι τα ακόλουθα:

1. Βελτιωμένη φασματική απόδοση, όπου στην άνω ζεύξη, η NOMA πετυχαίνει το όριο της χωρητικότητας, ενώ η OMA όχι ενώ στην κάτω ζεύξη, η NOMA είναι βέλτιστη, ενώ η OMA είναι μη βέλτιστη εάν ο δέκτης γνωρίζει μόνο το channel state information (CSI)

2. Μαζική συνδεσιμότητα. Καθώς το πρωτόκολλο NOMA δεν χρησιμοποιεί ορθογωνική κατανομή των πόρων καταδεικνύει ότι ο αριθμός των χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει δεν περιορίζεται στο πλήθος των διαθέσιμων πόρων. Η βέλτιστη κατανομή πόρων επιτυγχάνεται μέσω της κοινόχρηστης πρόσβασης πολλαπλών χρηστών κι έτσι υποστηρίζονται περισσότεροι χρήστες σε σχέση με την OMA.

3. Χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης και χαμηλό κόστος σηματοδότησης. Σε αντίθεση με την OMA, στην NOMA, δεν απαιτείται δυναμικός χρονοπρογραμματισμός, κι έτσι δεν υπάρχει καθυστέρηση στη μετάδοση.

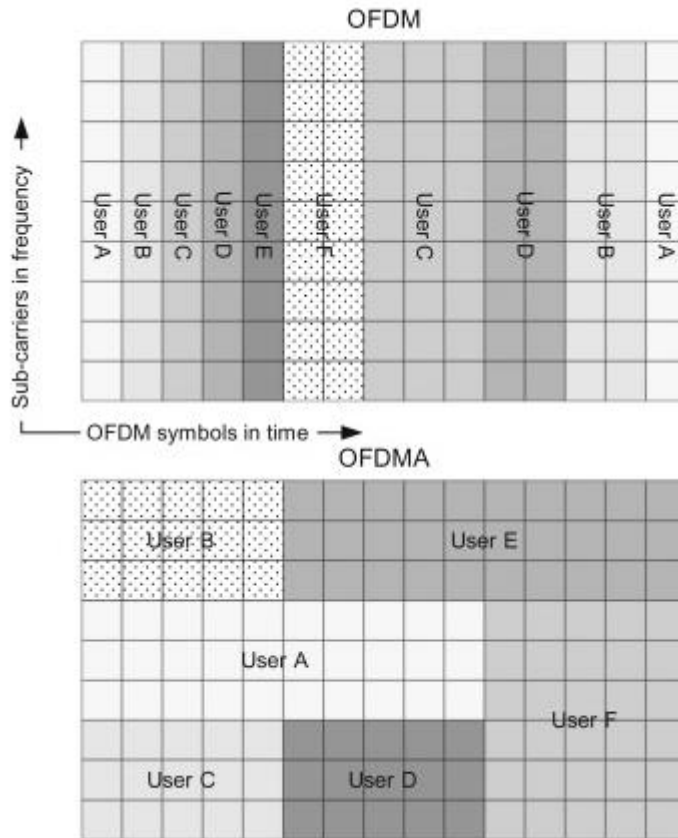
2.7. Συγκριτικό πλαίσιο τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης NOMA και OFDMA

Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) είναι παρόμοια με την OFDM (Orthogonal Frequency division Multiplexing – Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας),² με την διαφορά ότι αντί να διατίθενται όλες οι διαθέσιμες υποφέρουσες, ο σταθμός βάσης διαθέτει ένα υποσύνολο σε κάθε χρήστη, προκειμένου να μπορεί ταυτόχρονα να υποστηρίξει πολλαπλές μεταδόσεις. Ειδικότερα, Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) είναι μια τεχνική μετάδοσης η οποία διευκολύνει την επαρκή και αξιόπιστη μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων ψηφιακών δεδομένων σε ένα κανάλι επικοινωνίας μέσω ραδιοκυμάτων.

Η διαφορά μεταξύ OFDM και OFDMA απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα. Όπως και στην τεχνική OFDM, η τεχνική OFDMA χρησιμοποιεί πολλαπλά στενά διαχωρισμένους υπο-φορείς, ωστόσο οι εν λόγω υπο-φορείς διακρίνονται περαιτέρω σε ομάδες υπο-φορέων όπου κάθε ομάδα ονομάζεται resource block (μπλοκ πόρων). Η ομαδοποίηση των υπο-μεταφορέων σε ομάδες ομάδων πόρων αναφέρεται ως δευτερεύουσα καναλοποίηση. Οι υπο-φορείς που σχηματίζουν ένα μπλοκ πόρων δεν χρειάζεται να είναι φυσικά παρακείμενοι. Στην ζεύξη καθόδου ένα μπλοκ πόρων μπορεί να διατεθεί σε

² Στο σύστημα OFDM τα φάσματα των υποφερουσών επικαλύπτονται και ταυτόχρονα να είναι δυνατός ο διαχωρισμός τους από τον δέκτη. Έτσι είναι δυνατή η καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης(φάσματος), αφού στο ίδιο εύρος υπάρχει δυνατότητα να στείλουμε δύο σήματα την ίδια χρονική στιγμή που απέχουν ελάχιστα μεταξύ τους στον άξονα της συχνότητας με μηδενικές παρεμβολές εξοικονομώντας έτσι πολύτιμο φάσμα. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει οι υποφέρουσες να είναι μαθηματικά ορθογώνιες.

διαφορετικούς χρήστες. Στην ζεύξη ανόδου αντίστοιχα, ένας χρήστης μπορεί να αντιστοιχιστεί σε ένα ή περισσότερα μπλοκ πόρων (σχήμα 10).



Σχήμα 10 Συγκριτική παρουσίαση μοντέλου OFDM και OFDMA

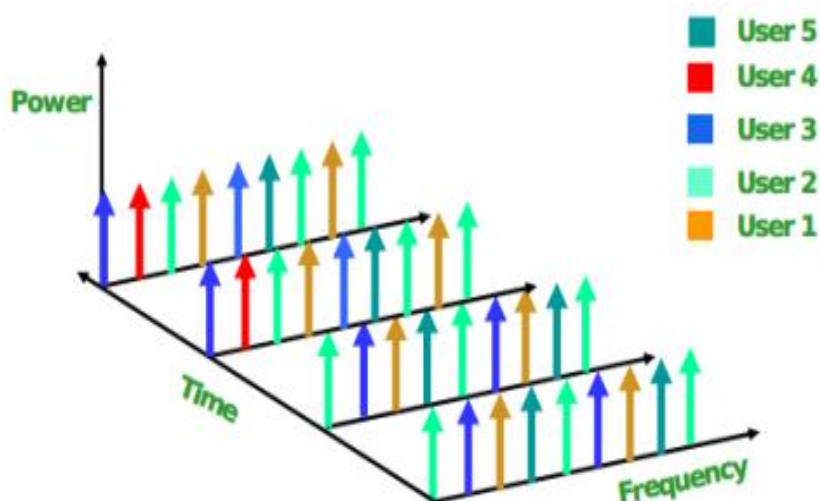
Πηγή: Hujun & Siavash, 2006

Μέσω της τεχνικής OFDM τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω ενός αριθμού καναλιών μεγάλου σε αριθμό αλλά μικρού εύρους ζώνης. Τα κανάλια αυτά, χωρίζονται σε διαστήματα συχνότητας και με τον τρόπο αυτό δημιουργούν το φάσμα του μεταδιδόμενου σήματος. Η συχνοτική απόσταση των φερουσών είναι επιλεγμένη με τρόπο, ώστε οι φέρουσες να είναι μεταξύ τους ορθογωνικές, κι έτσι να μην υπάρχει παρεμβολή του περιεχομένου της μιας φέρουσας πάνω στην άλλη παρόλη τη συχνοτική επικάλυψη της μιας φέρουσας με την άλλη. Γενικά το σύνολο των διαθέσιμων υποκαναλιών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της OFDM, ενώ το ποιο υποσύνολο εκχωρείται σε κάθε χρήστη εξαρτάται από την OFDMA. Δηλαδή στο σύστημα OFDM αν και τα φάσματα των υπο-φερουσών επικαλύπτονται αυτό δεν προκαλεί το φαινόμενο inter-carrier interference. Παράλληλα, καθώς υπάρχει χαμηλό υπολογιστικό κόστος στο δέκτη για τον διαχωρισμό των χρηστών διευκολύνει την μετάδοση σε υψηλούς ρυθμούς.

Ενώ η τεχνολογία OFDM δεν αποτελεί σχήμα πολλαπλής πρόσβασης άλλα κατά κύριο λόγο τεχνική διαμόρφωσης, δηλαδή δημιουργεί ανεξάρτητες ροές δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από πολλούς χρήστες, αντίθετα στην OFDMA οι χρήστες μοιράζονται εκτός από υπό-φέροντα (subcarriers) και χρονοθυρίδες (timeslot).

Στην τεχνική πρόσβασης OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), τα υποκανάλια εξακολουθούν να είναι ορθογώνια μεταξύ τους και στενού εύρους ζώνης, με τη διαφορά ότι αντί να αποδίδονται όλα σε ένα χρήστη, η OFDMA αποφασίζει ποιο υποσύνολο αυτών θα δοθεί στον κάθε χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι στην OFDMA οι χρήστες εξακολουθούν εκπέμπουν σήμα OFDM, αρκεί να διαθέτουν όμως μεγάλο πλήθος υποκαναλιών προκειμένου η διάρκεια συμβόλου να ξεπερνάει την χρονική διασπορά του διαύλου. Στην τεχνική OFDMA ο διαμοιρασμός των διαθέσιμων πόρων του συστήματος για τη μεγιστοποίηση της

διεκπεραιωτικής ικανότητας (throughput) βασίζεται στις συνθήκες του καναλιού. Στο παρακάτω σχήμα 11 δίνεται ένα παράδειγμα κατανομής πόρων μέσω της τεχνικής OFDMA.



Σχήμα 11 Κατανομή πόρων μέσω της τεχνικής OFDMA

Πηγή: Hujun & Siavash, 2007

Δύο κύριες αρχές μέσω των οποίων καθίσταται δυνατή η υψηλή απόδοση στην τεχνική OFDMA είναι (α) η διαφορικότητα πολλών χρηστών (multiuser diversity) και (β) η προσαρμόσιμη διαμόρφωση (adaptive modulation).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνικής OFDMA είναι ότι συνδυάζει με έναν αποτελεσματικό τρόπο τα πλεονεκτήματα άλλων

τεχνικών. Αποτελεί δηλαδή ουσιαστικά μια υβριδική μορφή η οποία προέρχεται από την ένωση των τεχνικών FDMA και TDMA. Δηλαδή στους χρήστες ανατίθενται, με δυναμικό τρόπο, υπο-φέροντα (subcarriers) (FDMA) σε διαφορετικές χρονοσχισμές (time-slots) (TDMA).

Ένα ακόμη πλεονέκτημα της τεχνικής OFDMA είναι ότι βασίζεται στην τεχνολογία OFDM. Παράλληλα, είναι μια ευέλικτη τεχνική, με αποτέλεσμα να μπορεί να εξυπηρετήσει μεγάλο αριθμό χρηστών, με μεγάλο εύρος εφαρμογών, ρυθμών μετάδοσης και απαιτήσεων ποιότητας. Τέλος στα θετικά της στοιχεία σε σχέση με την τεχνική OFDM συγκαταλέγεται η προοπτική μείωσης της μεταδιδόμενη ισχύος καθώς και η μειωμένη εμφάνιση του προβλήματος (Peak-to-Average Ratio, PAR). Το PAR στην OFDM είναι ο μεγάλος λόγος κορυφής – προς – μέση τιμή ισχύος στο μεταδιδόμενο σήμα.

Το πρόβλημα PAR αναλύεται ως εξής: Κάθε μεταδιδόμενο σήμα περιέχει K παράλληλα υποσήματα καθένα από τα οποία έχει μια δυναμική περιοχή τιμών. Αν τύχει πολλά υποσήματα ταυτόχρονα να έχουν μεγάλες τιμές και οι υποφέρουσές τους να είναι συμφασικές τότε η στιγμιαία τιμή του συνολικού μεταδιδόμενου σήματος μπορεί να γίνει πολύ μεγάλη και στην περίπτωση αυτή ο ενισχυτής του πομπού λειτουργεί πέρα από την περιοχή κόρου, όπου εμφανίζει μη γραμμική συμπεριφορά. Για να το αντιμετωπίσουμε αυτό, πρέπει να μειώσουμε την ισχύ εκπομπής, γεγονός που επηρεάζει το λαμβανόμενο SNR και την πιθανότητα σφάλματος στο δέκτη.

2.8. NOMA και προτυποποίηση 3GPPE

Το 2018 αποτέλεσε σημαντική στην εξέλιξη των δικτύων 5ης γενιάς καθώς ολοκληρώθηκε σε μεγάλο βαθμό η έκδοση 15 της προτυποποίησης του 3GPP3. Το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) είναι μια συνεργασία ανάμεσα σε διεθνείς οργανισμούς που εξάγουν τα πρότυπα και ορίζουν τις τεχνικές προδιαγραφές για τα συστήματα Κινητής Τηλεφωνίας 3ης γενιάς.

Το Generation Partnership Project (3GPP) ενοποίησε τους οργανισμούς τυποποίησης στον τομέα των τηλεπικοινωνιών ARIB και TTC (Ιαπωνία), ETSI (Ευρώπη), T1 (ANSI) των Ηνωμένων Πολιτειών και ΤΤΑ (Κορέα) παρέχοντας στα μέλη τους ένα σταθερό περιβάλλον και τις προδιαγραφές που ορίζουν οι τεχνολογίες 3GPP. Η δουλειά όλων αυτών των οργανισμών ανακοινώνεται από το International Telecommunication Union (ITU) που συντονίζει τις διαδικασίες τυποποίησης.

Οι τρεις ομάδες τεχνικών προδιαγραφών (TSG) στο 3GPP είναι:

Δίκτυα πρόσβασης ραδιοσυχνοτήτων (RAN),

Υπηρεσίες & Συστήματα Ασφαλείας (SA),

Η μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA) αναγνωρίστηκε πρόσφατα ως πολλά υποσχόμενη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης (MA-multiple access) για τη σημαντική βελτίωση της φασματικής απόδοσης των δικτύων κινητής επικοινωνίας (Saito et al., 2013, Choi, 2013, Ding et al., 2014, Choi, 2014).

Για παράδειγμα, η μετάδοση multiuser superposition transmission (MUST), μια downlink έκδοση της NOMA, προτάθηκε για την ένταξη της στα δίκτυα 3rd generation partnership project long-term evolution advanced (3GPP-LTE-A). Ειδικότερα, στην συνάντηση του 3GPP τον Μάιο του 2015, προτάθηκε να περιληφθεί στο 3GPP Long Term Evolution Advanced (LTE-A) καθώς η NOMA αναγνωρίστηκε ως μια πρωτοποριακή τεχνολογία για ασύρματα δίκτυα 5G τόσο από το χώρο της βιομηχανίας όσο και από τον ακαδημαϊκό χώρο. Τελικά στην συνάντηση της 3GPP του Δεκεμβρίου του 2015, η τεχνική NOMA, περιλήφθηκε στο 3GPP. Επιπλέον, η χρήση του NOMA έχει επίσης θεωρηθεί ως βασικό συστατικό της 5ης γενιάς (5G) κινητών (FUTURE Mobile Communication Forum 5G SIG, 2014, Dai et al., 2015).

2.9. Μέθοδοι και τεχνικές μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης: υπάρχοντα συστήματα

Στο παράδειγμα του Krishna Sankar et al. (2008), όπου θα δούμε και πιο αναλυτικά, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα με Zero Forcing Successive Interference Cancellation with optimal ordering με την υπόθεση ότι το κανάλι υπόκειται σε επίπεδες διαλήψεις σύμφωνα με την κατανομή Rayleigh με κωδικοποίηση BPSK σε ένα σύστημα με δύο πομπούς και δύο δέκτες.

Κανάλι 2×2 MIMO

Θεωρώντας 2 μεταδότες και 2 δέκτες έχουμε:

1. Μία ακολουθία μετάδοσης, για παράδειγμα $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$
2. Θεωρώντας κανονική μετάδοση τότε το x_1 αποστέλλεται την πρώτη χρονική στιγμή, το x_2 τη δεύτερη χρονική στιγμή, x_3 την τρίτη κ.ο.κ.
3. Εφόσον έχουμε δύο μεταδότες, ομαδοποιούμε τα σύμβολα σε ομάδες των δύο. Στην πρώτη χρονική ομάδα (timeslot) ανήκουν τα x_1, x_2 από τον πρώτο και το δεύτερο μεταδότη αντίστοιχα, στη δεύτερη τα x_3, x_4 από τον πρώτο και το δεύτερο μεταδότη αντίστοιχα, στην τρίτη τα x_5, x_6 από τον πρώτο και το δεύτερο μεταδότη αντίστοιχα κτλ.
4. Εφόσον ομαδοποιούμε τα σύμβολα σε ομάδες των 2 τότε χρειαζόμαστε $n/2$ χρονικές ομάδες για να ολοκληρώσουμε την μετάδοση (όπου το μήκος της ακολουθίας μετάδοσης).

Zero forcing equalizer for 2×2 MIMO channel

Στην πρώτη χρονική μονάδα το σήμα στην πρώτη κεραία δέκτη είναι,

$$y_1 = h_{1,1}x_1 + h_{1,2}x_2 + n_1 = [h_{1,1} \ h_{1,2}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + n_1$$

και στην δεύτερη,

$$y_2 = h_{2,1}x_1 + h_{2,2}x_2 + n_2 = [h_{2,1} \ h_{2,2}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + n_2$$

όπου :

y_1, y_2 είναι η πληροφορία που δέχεται η πρώτη και δεύτερη κεραία αντίστοιχα

$h_{1,1}$ είναι το κανάλι από την πρώτη κεραία πομπό στην πρώτη κεραία δέκτη

$h_{1,2}$ είναι το κανάλι από τη δεύτερη κεραία πομπό στην πρώτη κεραία δέκτη

$h_{2,1}$ είναι το κανάλι από την πρώτη κεραία πομπό στη δεύτερη κεραία δέκτη

$h_{2,2}$ είναι το κανάλι από τη δεύτερη κεραία πομπό στη δεύτερη κεραία δέκτη

x_1, x_2 είναι η μεταδιδόμενη πληροφορία

n_1, n_2 είναι ο θόρυβος στην πρώτη και δεύτερη κεραία δέκτη

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να γραφούν με πίνακες,

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}$$

Για τον υπολογισμό του \mathbf{x} με τη μέθοδο **ZeroForcing (ZF) lineardetector** πρέπει να ισχύει $\mathbf{W}\mathbf{H} = \mathbf{I}$ με

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^H$$

Χρησιμοποιώντας την **ZeroForcing (ZF)**, ο δέκτης μπορεί να εκτιμήσει τα x_1, x_2 σύμφωνα με,

$$\begin{bmatrix} \widehat{x}_1 \\ \widehat{x}_2 \end{bmatrix} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

Zero Forcing with Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)

Παίρνοντας κάποια από την πληροφορία, για παράδειγμα το \widehat{x}_2 και αφαιρώντας την επίδρασή του στον δέκτη y_1 και y_2 έχουμε,

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - h_{1,2} \widehat{x}_2 \\ y_2 - h_{2,2} \widehat{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{2,1} x_1 + n_1 \\ h_{2,2} x_1 + n_2 \end{bmatrix} \dot{\eta}$$

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} \\ h_{2,1} \end{bmatrix} x_1 + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \dot{\eta}$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{h} x_1 + \mathbf{n}$$

Η εξισορροπημένη τιμή είναι,

$$\widehat{x}_1 = \frac{\mathbf{h}^H \mathbf{r}}{\mathbf{h}^H \mathbf{h}}$$

Η δομή του κώδικα για 2x2 είναι,

(a) Δημιουργία τυχαίας δομής από +1 and -1.

(b) Ομαδοποίηση σε ζευγάρια και αποστολή των ζευγαριών αυτών σε μία χρονική στιγμή.

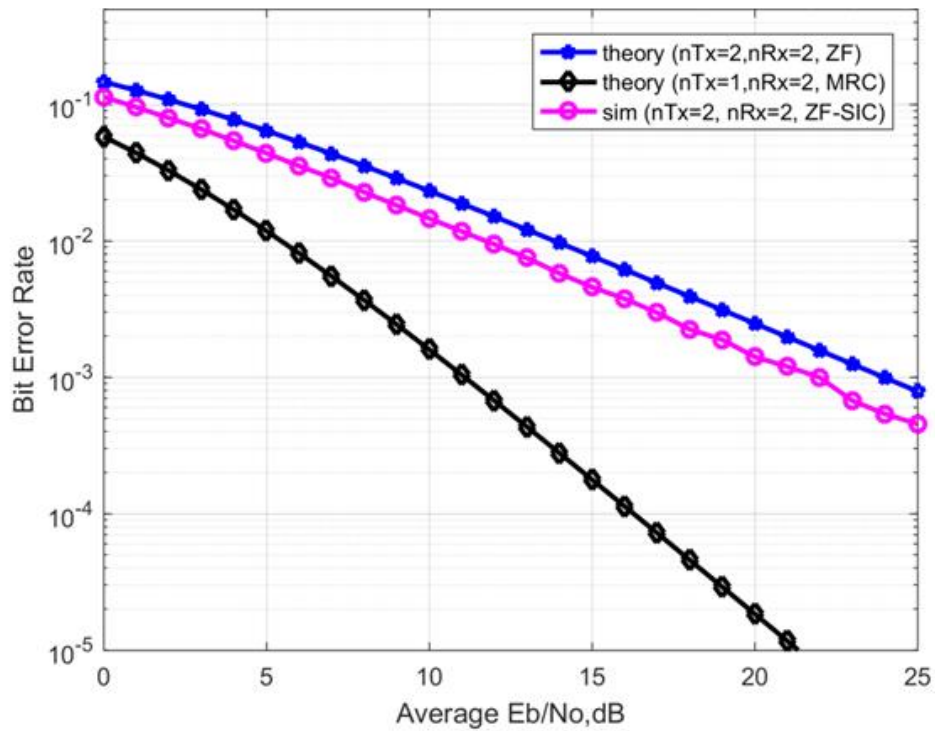
(c) Πολλαπλασιασμός με τα κανάλια και προσθήκη λευκού Gaussianθορύβου.

(d) Εξισορρόπηση των δεδομένων.

(e) Αποκωδικοποίηση και υπολογισμός σφαλμάτων

f) Επανάληψη για πολλαπλές τιμές του $\frac{E_b}{N}$ και δημιουργία των γραφημάτων και των θεωρητικών αποτελεσμάτων.

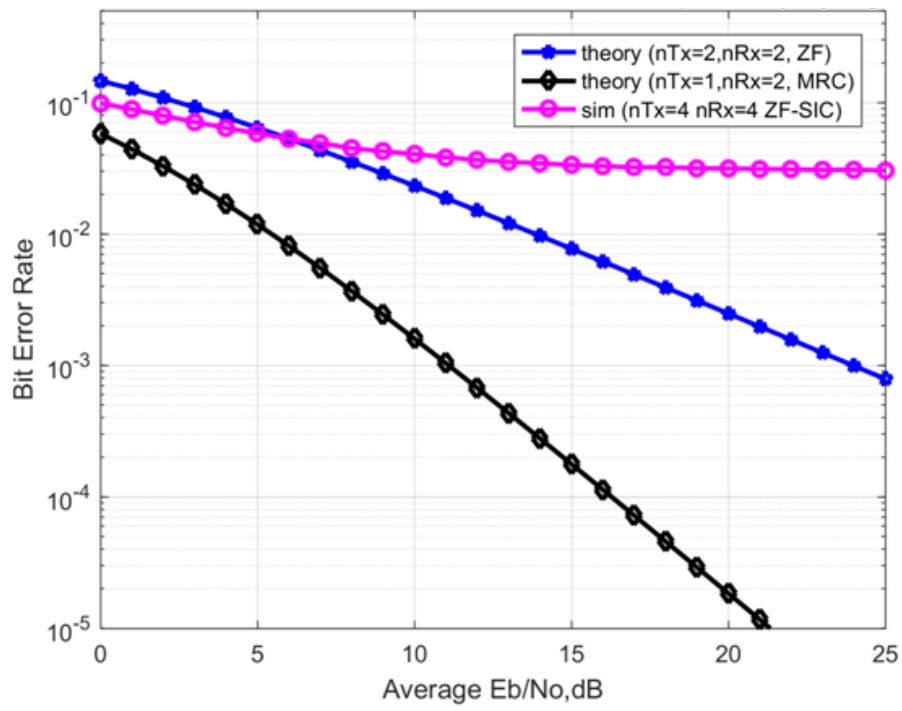
Τα αποτελέσματα από την χρησιμοποίηση του κώδικα ως έχει φαίνονται στο παρακάτω γράφημα 1



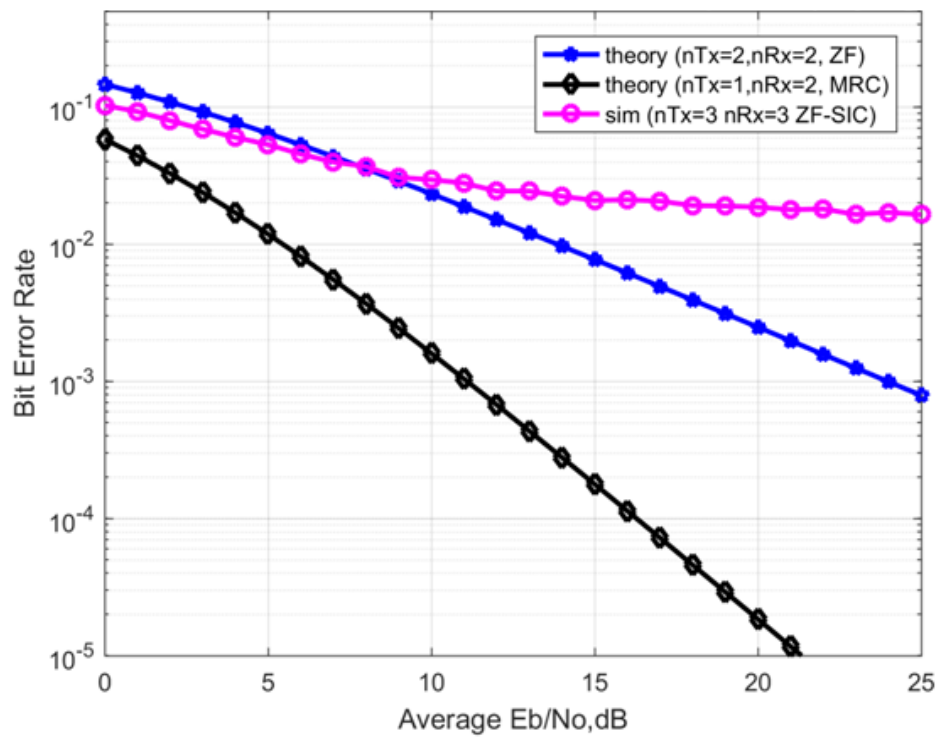
Γράφημα 1 Αποτελέσματα από την χρησιμοποίηση του κώδικα ZeroForcing (ZF)

Γενίκευση σε περιπτώσεις μεγαλύτερες από 2x2

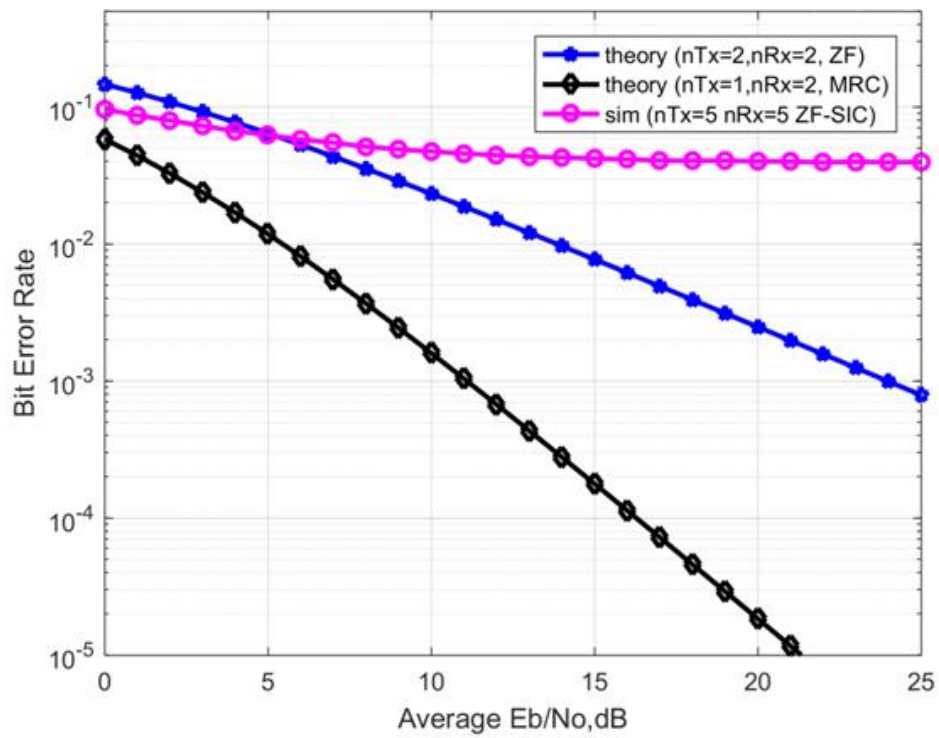
Ο κώδικας μεταβλήθηκε έτσι ώστε να μπορεί να χειρίζεται πίνακες 3x3, 4x4 κ.ο.κ. Ο κώδικας αποστέλλεται ξεχωριστά με το όνομα `nomu_squared.m`. Στην συνέχεια ακολουθούν αποτελέσματα για 3x3, 4x4, 5x5.



Γράφημα 2 Εφαρμογή κώδικα σε πίνακα 3Χ3

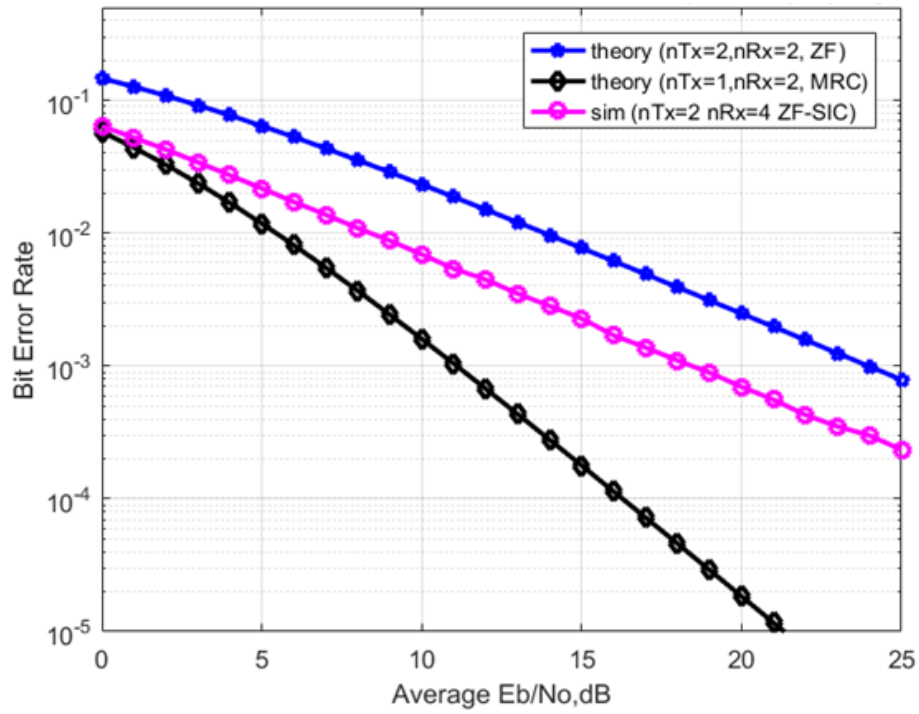


Γράφημα 3 Εφαρμογή κώδικα σε πίνακα 4Χ4

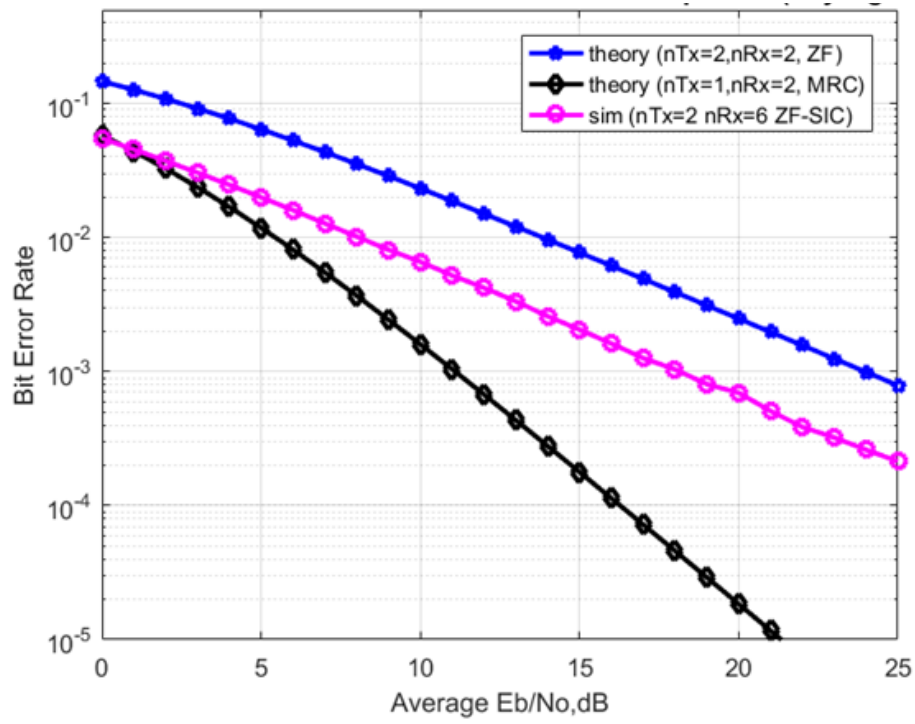


Γράφημα 4 Εφαρμογή κώδικα σε πίνακα 5X5

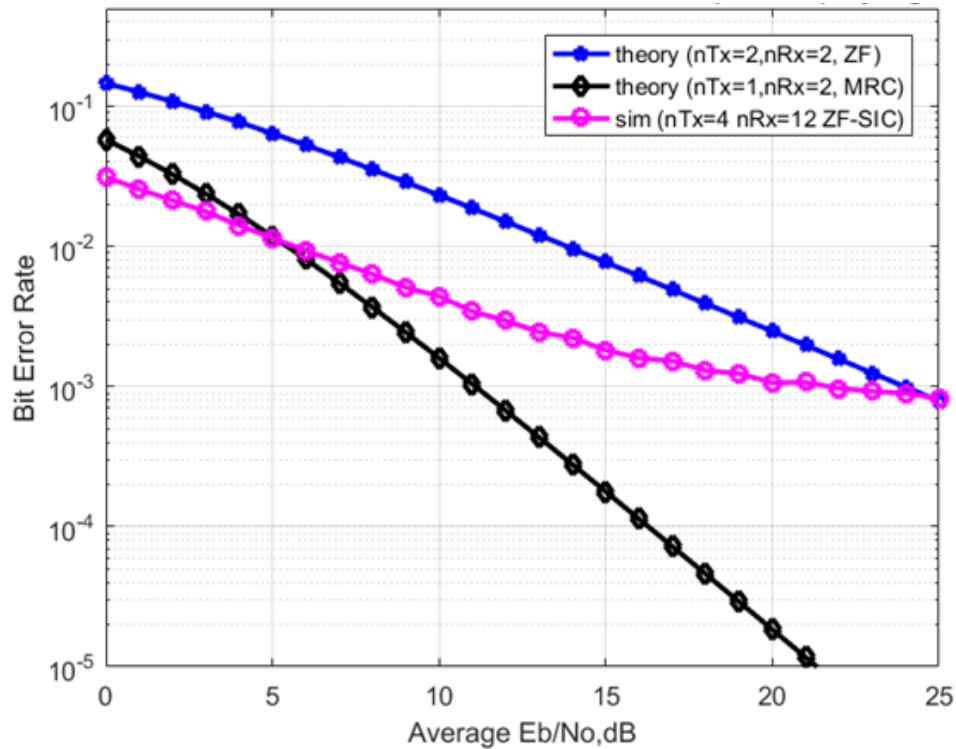
Καθώς και μη τετραγωνικά συστήματα όπου (2x4, 2x6, 4x12)



Γράφημα 5 Εφαρμογή κώδικα σε μη τετραγωνικό σύστημα 2x4



Γράφημα 6 Εφαρμογή κώδικα σε μη τετραγωνικό σύστημα 2Χ6



Γράφημα 7 Εφαρμογή κώδικα σε μη τετραγωνικό σύστημα 4X12

Λόγω της ολοένα αυξανόμενης ανάγκης για αποδοτικότερη χρήση της φασματικής περιοχής, υψηλότερες ταχύτητες επικοινωνίας όσο και υποστήριξη περισσότερων χρηστών, έχουν προταθεί από την βιβλιογραφία ποικίλες μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούν τεχνικές μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA), όπως επίσης και χλιοστομετρικά (mmWave) συστήματα επικοινωνιών³ και οπτικά συστήματα ανοικτού χώρου (Free Space Optics (FSO)).

³ Η ζώνη συχνοτήτων του χλιοστομετρικού μήκους κύματος (millimeter wave – mmWave) αναφέρεται στη φασματική περιοχή από 3 έως 300 GHz. Υπάρχει τεράστιο απόθεμα φάσματος στη συγκεκριμένη συχνοτική περιοχή, πολλές

Στην συνέχεια αναλύονται ακροθιγώς κάποια από τα συστήματα που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία:

Για παράδειγμα οι Benjebbour and Higuhi (2015) σε μια έρευνά τους αναφορικά με τις τεχνικές μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης παρουσιάζουν μια εκδοχή με διαδοχική ακύρωση παρεμβολών που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικές ραδιοεπικοινωνίες. Ειδικότερα κάνουν λόγο για την ιδιαίτερη σημασία της αποδοτικότητας ενός δικτύου και στην δίκαιη κατανομή πόρων και αποδόσεων, μεταξύ των χρηστών. Μετά από ένα σύνολο προσομοιώσεων που διενέργησαν στα πλαίσια της έρευνά τους, καταλήγουν στα οφέλη, της χρήσης τεχνικών μετάδοσης με χρήση μη-ορθογώνιας πολυπλεξίας (NOMA) και τεχνικών με χρήση ορθογώνιας πολυπλεξίας (OMA).

Οι Davis et. al (2012) σε μια αντίστοιχη έρευνα, προέβησαν στην συγκριτική ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των ραδιοεπικοινωνιών και των οπτικών επικοινωνιών, μέσα από την κατηγοριοποίηση τεχνολογικών ασύρματων οπτικών επικοινωνιών. Παράλληλα αναλύουν και υβριδικά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν αφενός ραδιοεπικοινωνίες (radio frequency (RF)) αφετέρου δε και οπτικές ασύρματες επικοινωνίες (optical wireless (OW)). Επίσης οι ερευνητές αναφέρονται και σε συστήματα επικοινωνιών εσωτερικού χώρου ορατού φωτός (Visible Light Communications – VLC) όσο και σε συστήματα εξωτερικού χώρου (π.χ. επικοινωνίες μεταξύ κοντινών κτιρίων).

υποζώνες του οποίου παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά αναφορικά με την ασύρματη διάδοση, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

Οι Moser et al. (2018), σε μια πρόσφατη έρευνά τους, παρουσίασαν τα άνω και κάτω όρια της χωρητικότητας των συστημάτων οπτικών επικοινωνιών ανοικτού χώρου, εξ' αιτίας της παρεμβολής λευκού γκαουσιανού προσθετικού θορύβου (AWGN). Οι ερευνητές υπολογίζουν επίσης και τους περιορισμούς ισχύος οι οποίοι επιβάλλονται στην είσοδο προκειμένου να διασφαλιστεί η διάρκεια της μπαταρίας, αλλά και για λόγους ασφάλειας.

Οι Al-Ebraheemy et. al (2017, σε μια επίσης πρόσφατη έρευνά τους, μελέτησαν επίσης τα όρια της χωρητικότητας μιας τεχνικής Γκαουσιακού τυπου IMDD (Intensity Modulation - Direct Detection) οπτικού καναλιού πολλαπλής πρόσβασης για χρήση σε εσωτερικούς χώρους.

Οι Jamali et al. (2018) στην δική τους έρευνα, μελέτησαν τεχνικές μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης για υβριδικά δίκτυα οπισθοζεύξεων (backhauling) δικτύων πέμπτης γενιάς (5G) τα οποία χρησιμοποιούν ασύρματα οπτικά συστήματα ανοικτού χώρου. Προτείνουν δε τη χρήση τεχνικών NOMA για τα υβριδικά δίκτυα οπισθοζεύξεων, στα οποία και οι δύο περιφερειακοί σταθμοί βάσης εκπέμπουν στον ίδιο χρόνο, στην ίδια συχνότητα και χρησιμοποιείται ο ίδιος οπτικός ανιχνευτής του κεντρικού σταθμού. Καταλήγουν δε στο συμπέρασμα ότι η τεχνική NOMA που προτείνουν, αποδείχθηκε ότι υπερτερεί έναντι κάθε ορθογώνιου συστήματος μετάδοσης.

Οι Diamantoulakis et al. (2018) μελετούν ένα σύστημα επικοινωνιών άνω ζεύξης που χρησιμοποιεί μη ορθογώνιες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης με σκοπό την ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Στη μελέτη αυτή τονίζεται και πάλι η υπεροχή των μη ορθογώνιων τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης (NOMA) έναντι των ορθογώνιων τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης (OMA).

Οι Pappi et al. (2018) στη δική τους έρευνα, ανέλυσαν αναλύουν την Πιθανότητα Διακοπής Ζεύξης (outage) σε οπτικά συστήματα άνω ζεύξης υψηλής ταχύτητας με χρήση NOMA, τα οποία χρησιμοποιούνται σε υβριδικά δίκτυα οπισθοζεύξεων. Καταλήγουν δε στο συμπέρασμα ότι η έρευνά τους αυτή, αποτελεί, το πρώτο βήμα για την ενσωμάτωση του Power Domain NOMA σε υβριδικά δίκτυα οπισθοζεύξεων τα οποία χρησιμοποιούν οπτικά συστήματα ανοικτού χώρου υψηλής ταχύτητας.

Οι Ding et al. (2018) στην δική τους έρευνα, εξέτασαν το επίπεδο απόδοσης της κάτω ζεύξης με χρήση NOMA σε ένα πολυκυψελωτό χιλιοστομετρικό δίκτυο (multicell mmwave network). Με βάση την έρευνά του, η οποία στηρίχθηκε σε κανάλια διαλείψεων τα οποία ακολουθούν κατανομή Nakagami⁴ κατέληξαν και πάλι στην υπεροχή των μη ορθογώνιων τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης συγκριτικά με τις αντίστοιχες ορθογώνιες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης για ένα πολυκυψελωτό χιλιοστομετρικό δίκτυο.

Οι Trinh et al. (2015) σε μια αντίστοιχη δική τους έρευνα, πρότειναν μία αρχιτεκτονική δικτύου η οποία συνδυάζει τα χιλιοστομετρικά κύματα με οπτικά συστήματα ελεύθερου χώρου για χρήση στα υβριδικά δίκτυα οπισθοζεύξεων πέμπτης γενιάς. Μέσα από ένα σύνολο προσομοιώσεων οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι οι αναταράξεις στην

⁴ Οι διαλείψεις αποτελούν στιγμιαία εκτροπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας προς άλλες κατευθύνσεις ή οφείλονται στη συμβολή κυμάτων που φθάνουν στο δέκτη δια διαφορετικών δρόμων(πολλαπλές οδεύσεις) ή στη συμβολή μεταξύ του κατευθείαν και του ανακλώμενου κύματος. Οφείλονται δε σε μεταβολές των ατμοσφαιρικών συνθηκών κατά μήκος της ζεύξης. Οι διαλείψεις αυξάνουν συνήθως αυξανόμενης της συχνότητας ή αυξανόμενης της αποστάσεως της ζεύξεως. Η κατανομή Nakagami είναι ένα γενικό στατιστικό μοντέλο, για την αναπαράσταση των καναλιών με διαλείψεις γιατί μπορεί να υπολογίσει πλάτη σημάτων που υπόκεινται σε πολύ ισχυρότερες διαλείψεις σε σχέση με άλλες κατανομές όπως η κατανομή Rayleigh

ατμόσφαιρα, αποτελούν τον βασικό παράγοντα, ο οποίος περιορίζει σημαντικά την απόδοση αυτών των συστημάτων.

Τέλος οι Hartley and Bloom (2015) στην δική τους έρευνα μία τεχνική ανάλυση αναφορικά με την υλοποίηση του δικτύου του «τελευταίου μιλίου» (last-mile) κάνοντας χρήση υβριδικών οπτικών συστημάτων και συστημάτων ραδιοφάσματος. Οι ερευνητές παρουσίασαν ειδικότερα, πραγματικές τιμές των παραμέτρων των καναλιών και την αρχιτεκτονική ενός συστήματος που είναι υλοποιήσιμο. στην πράξη

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν οι βασικές αρχές της μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (Non Orthogonal Multiple Access - NOMA) και παράλληλα συζητήθηκε πως η εν λόγω τεχνική αποτελεί σήμερα μια αναγκαιότητα αιχμής, για τα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς. Η εργασία ανέπτυξε καταρχάς, μερικά βασικά στοιχεία των δύο ευρέων κατηγοριών NOMA: τομέα ισχύος και τομέα κώδικα, σε downlink και uplink περιβάλλοντα. Στο πλαίσιο αυτό, αναλύθηκαν οι διάφορες τεχνικές NOMA, η οποία αποτελεί βασική αρχή για τον σχεδιασμό τεχνικών ράδιο-πρόσβασης για τα 5G δίκτυα. Σε αντίθεση με την OMA, στην οποία τα σήματα των διαφορετικών χρηστών είναι ορθογώνια μεταξύ τους και επιτρέπεται σε έναν “ιδανικό” δέκτη να διαχωρίσει εξ ολοκλήρου τα ανεπιθύμητα σήματα από το επιθυμητό σήμα χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές, κύριος σκοπός της NOMA είναι να αντιμετωπίσει τα διάφορα προβλήματα που δεν επιλύονται με τις τεχνικές OMA.

Ειδικότερα η τεχνική NOMA επιτρέπει το κανάλι μιας συχνότητας να χρησιμοποιείται την ίδια στιγμή από πολλούς χρήστες στο ίδιο κελί προσφέροντας ένα σύνολο πλεονεκτημάτων όπως βελτιωμένη φασματική αποδοτικότητα, υψηλότερη ρυθμό-απόδοση μεταξύ κελιών, αποδοτικότερο κανάλι ανατροφοδότησης, χαμηλή καθυστέρηση.

Η OMA υπήρξε πράγματι μια προηγμένη επιλογή για την επίτευξη καλής απόδοσης αναφορικά με τις αποδόσεις σε επίπεδο συστήματος.

Ωστόσο, λόγω των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων, των δικτύων 5G προέκυψε η ανάγκη περαιτέρω ενίσχυσης της απόδοσης του συστήματος. Μέσω των τεχνικών SC στον πομπό και SIC στον δέκτη, NOMA επιτυγχάνει υψηλότερες φασματικές αποδόσεις. Παράλληλα, με την εξέλιξη των ασύρματων δικτύων σε 5G και με δεδομένο ότι το δίκτυο πέμπτης γενιάς θα είναι εξαιρετικά πυκνό, τίθενται νέες προκλήσεις αναφορικά με την ενεργειακή απόδοση καθώς λόγω της πυκνότητας του δικτύου και την αντίστοιχη αύξηση των κόμβων, αναμένεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας πάνω από ένα αποδεκτό επίπεδο. Η NOMA μπορεί να προσαρμόσει κατά περίπτωση την μετάδοση των δεδομένων, με βάση την κίνηση των δεδομένων του δικτύου και την κατάσταση καναλιού (Channel State Information - CSI), των χρηστών. Υπό αυτή την έννοια η χρήση της NOMA, εκτός από την βελτίωση της απόδοσης του φάσματος, συμβάλλει και στην σημαντική ενεργειακή απόδοση.

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1 Σύστημα επικοινωνίας που περιλαμβάνει τρεις πηγές και προορισμούς: α) χωρίς πολυπλεξία και β) με πολυπλεξία.	16
Σχήμα 2 Μοντέλο Ανοικτής Διασύνδεσης Συστημάτων, (Open Systems Interconnection) ή μοντέλο αναφοράς OSI (reference model).....	17
Σχήμα 3 Διαφορά μεταξύ της ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (OMA) και της μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA).....	20
Σχήμα 4 Ταξινόμηση των υφιστάμενων τεχνικών NOMA.....	21
Σχήμα 5 Διάγραμμα λειτουργίας της PD-NOMA στην περίπτωση δυο χρηστών	25
Σχήμα 6 Διάγραμμα λειτουργίας της CD-NOMA.....	26
Σχήμα 7 Μοντέλο ζεύξης ανόδου - Uplink NOMA.....	29
Σχήμα 8 Το μοντέλο NOMA στη ζεύξη καθόδου, με σταθμό βάσης και δύο χρήστες.....	32
Σχήμα 9 Κατανομή πόρων στα συστήματα OMA και NOMA.....	37
Σχήμα 10 Συγκριτική παρουσίαση μοντέλου OFDM και OFDMA.....	40
Σχήμα 11 Κατανομή πόρων μέσω της τεχνικής OFDMA.....	42

Πίνακας Γραφημάτων

Γράφημα 1 Αποτελέσματα από την χρησιμοποίηση του κώδικα ZeroForcing (ZF)	50
Γράφημα 2 Εφαρμογή κώδικα σε πίνακα 3X3	51
Γράφημα 5 Εφαρμογή κώδικα σε πίνακα 4X4	52
Γράφημα 6 Εφαρμογή κώδικα σε πίνακα 5X5.....	53

Γράφημα 5 Εφαρμογή κώδικα σε μη τετραγωνικό σύστημα 2Χ4	54
Γράφημα 6 Εφαρμογή κώδικα σε μη τετραγωνικό σύστημα 2Χ6.....	55
Γράφημα 7 Εφαρμογή κώδικα σε μη τετραγωνικό σύστημα 4Χ12.....	56

Βιβλιογραφία

Al-Ebraheemy O. M. S., Chaaban A., T. Y. Al-Nacouri, and M.-S. Alouini, Capacity bounds for the gaussian IM-DD optical multiple-access channel, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 3328-3340, May 2017.

Al-Imari M., P. Xiao, M. A. Imran, and R. Tafazolli, "Uplink nonorthogonal multiple access for 5G wireless networks," in *Proc. Int. Symposium on Wireless Commun. Syst. (ISWCS)*, Aug. 2014, pp. 781–785.

Aryaputra Aman, Bhuvaneshwari.N, "5G- The Future of Mobile Network", in the proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2011, Vol II, WCECS 2011, October 19-21, 2011.

Benjebbour A. and Higuchi K., Non-orthogonal multiple access (NOMA) with successive interference cancellation for future radio access, *IEICE Transactions on Communications*, vol. E98-B, no. 3, pp. 403-414, March 2015.

Beomju Kim, Wonsuk Chung, Sungmook Lim, Sangwook Suh, Jonghyung Kwun, Sooyong Choi, Daesik Hong Uplink NOMA with Multi-Antenna, *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring) 2015*

Chen L. Lv, J., Q. Ni, Z. Ding, and H. Jiang, "Cognitive Non-Orthogonal Multiple Access with Cooperative Relaying: A New Wireless Frontier for 5G Spectrum Sharing," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 4, pp. 188–195, 2018.

Choi J., “Non-orthogonal multiple access in downlink coordinated two-point systems,” *IEEE Commun. Letters*, vol. 18, no. 2, pp. 313–316, Feb. 2014.

Choi J., “On multiple access using H-ARQ with SIC techniques for wireless ad hoc networks,” *Wireless Personal Commun.*, vol. 69, pp. 187–212, 2013.

Churi Jay R, Sudhish T Surendran, Shreyas Ajay Tigdi and Sanket Yewale. “Evolution of Networks (2G-5G)”, in the IJCA Proceedings on International Conference on Advances in Communication and Computing Technologies 2012 ICACACT(3):pp8-13,2012.

Dai L. and B. Wang and Y. Yuan and S. Han and C. I and Z. Wang, “Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends,” *IEEE Commun. Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 74–81, Sept. 2015.

Dai L., B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C. I I, and Z. Wang, “Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 74–81, Sep. 2015.

Davis C. C., Borah D. K., A. C. Boucouvalas, S. Hranilovi , and K. Yiannopoulos, A review of communication-oriented optical wireless systems, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, December 2012.

Ding Z., Liu Y., Choi J., H. V. Poor, “Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 185–191, Feb. 2017.

Ding Z., Sun Y., and X. Dai, On the performance of downlink NOMA in multicell mmwave networks, *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 11, pp. 2366-2369, September 2018.

Ding Z., Z. Yang, P. Fan, and H. V. Poor, "On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users," *IEEE Signal Process. Letters*, vol. 21, no. 12, pp. 1501–1505, Dec. 2014.

Gu Y., W. Saad, M. Bennis, M. Debbah and Z. Han, "Matching Theory for Future Wireless Networks: Fundamentals and Applications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 5, pp. 52–59, May 2015.

Hanzo L., M. Munster , B. J. Choi, and T. Keller, *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting*, The US: IEEE Press, 2003.

Hartley W. S. and Bloom S. The last-mile solution: Hybrid FSO radio, AirFiber, Inc., May 2002.

Hoshyar R., F. P. Wathan, and R. Tafazolli, "Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 4, pp. 1616–1626, Apr. 2008.

Hujun Yin and Siavash Alamouti (August 2007). "OFDMA: A Broadband Wireless Access Technology". *IEEE Sarnoff Symposium*, 2006.

Imran M. A., M. Al-Imari, and R. Tafazolli, "Low density spreading for next generation multicarrier cellular systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Future Commun. Networks (ICFCN)*, Apr. 2012, pp. 52–57.

Jamali V. M. Najaf,, P. D. Diamantoulakis, G. K. Karagiannidis, and R. S. Hober, Non-orthogonal multiple access for FSO backhauling, in 2018

IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).
IEEE, April 2018.

Moser S. M., A. Lapidoth, and M. A. Wigger, On the capacity of free-space optical intensity channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 55, no. 10, pp. 4449-4461, October 2018.

Nascimento, Andrea, et al. "A characterization of mobility management in user-centric networks", *Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking*. Springer Berlin Heidelberg, pg.314-325, 2013.

Nikopour H. and H. Baligh, "Sparse code multiple access," in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, Sep. 2013, pp. 332–336. 38

Nikopour H., E. Yi, A. Bayesteh, K. Au, M. Hawryluck, H. Baligh, and J. Ma, "SCMA for downlink multiple access of 5G wireless networks," in *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM)*, Dec. 2014, pp. 1–5.

Ott David , Shilpa Talwar ,Intel Labs,University Research Office, "Exploring Next Generation Wireless (5G): Transforming the user Experience", 2013.

Pachauri Akhilesh Kumar , Ompal Singh , "5G Technology–Redefining wireless Communication in upcoming years", *International Journal of Computer Science and Management Research* Vol 1 Issue 1 Aug 2012.

Pappi K. N., Diamantoulakis P. D., Z. Ding, and G. K. Karagiannidis, *Wireless-powered communications with non-orthogonal multiple access*,

IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no. 12, pp. 8422-8436, September 2018.

Razavi R., R. Hoshyar, M. A. Imran, and Y. Wang, “Information theoretic analysis of LDS scheme,” IEEE Commun. Lett., vol. 15, no. 8, pp. 798–800, Jun. 2011.

Reshma S. Sapakal, Sonali S. Kadam, “5G Mobile Technology”, 1323 International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 2, Issue 2, pg.568, 2013.

Saito Y., Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, “Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access,” in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, Dresden, Germany, Jun. 2013.

Sapana Singh, Pratap Singh,” Key Concepts and Network Architecture for 5G Mobile Technology, International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET), Volume 1 Issue 5 pp 165-170, 2012.

Trinh P. V., Pham A. T., V. V. Mai, N. T. Dang, and C.-T. Truong, Hybrid freespace optics/millimeter-wave architecture for 5G cellular backhaul networks, in 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), June 2015

Tudzarov Aleksandar , Toni Janevski “Functional Architecture for 5G Mobile Networks”, International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 32, 2011.

White Paper, “Rethink Mobile Communications for 2020+,” FuTURE Mobile Communication Forum 5G SIG, Nov. 2014. <http://www.futureforum.org/dl/141106/whitepaper.zip>.

Yu, F. R., Wong, V. W. S., Song, J.-H., Leung, V. C. M. and Chan, H. C. B. (2011),” Next generation mobility management: an introduction.” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, pg.446–458,2011 .

Zimmermann Hubert, “OSI Reference model-An ISO model Architecture for OSI”, in *IEEE transaction on Communications*, Vol. Com-28, No.4, April 2012