



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**ΔΠΜΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ
ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**"Σύντομη ανάλυση της τεχνολογίας Massive MIMO στα συστήματα κινητών επικοινωνιών
5G"**

Ευάγγελος Γ. Στρομπούλας

Επιβλέπων: Dr Βαρζάκας Παναγιώτης, Μέλος ΔΕΠ, Καθηγητής 1^{ης} βαθμίδας

2022

Πρόλογος

Το θέμα της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση της τεχνολογίας Massive MIMO στα συστήματα κινητών επικοινωνιών 5G. Για την πληρέστερη περιγραφή αυτών, στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται μια σύντομη ανάλυση της δομής των συστημάτων κινητών επικοινωνιών 5G όπου γίνεται αναφορά στην αρχιτεκτονική και στα χαρακτηριστικά των δικτύων καθώς και στις εφαρμογές της τεχνολογίας 5G. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση των κεραιών MIMO όπου περιλαμβάνεται η λειτουργία και οι τεχνικές της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην ανάλυση, στα χαρακτηριστικά και στις κατηγορίες της τεχνολογίας Massive MIMO. Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται αναφορά στην εφαρμογή και στη χρήση της τεχνολογίας Massive MIMO στα συστήματα κινητών επικοινωνιών 5G καθώς και στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εφαρμογής αυτής. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική αναφορά στις σύγχρονες εξελίξεις της συγκεκριμένης τεχνολογίας.



Εικόνα 1: Κεραία 5G

Περιεχόμενα

1. Κεφάλαιο 1

Σύντομη ανάλυση της δομής των συστημάτων κινητών επικοινωνιών 5G.

1.1 Δίκτυα 5ης γενιάς (5G).....	6
1.2 Αρχιτεκτονική 5G.....	7
1.3 Χαρακτηριστικά 5G.....	8
1.4 Εφαρμογές της τεχνολογίας 5G.....	10

2. Κεφάλαιο 2

Γενικά χαρακτηριστικά των κεραιών MIMO.

2.1 Ιστορική αναδρομή.....	14
2.2 Ορισμός MIMO	14
2.3 Λειτουργία MIMO.....	17
2.4 Τεχνικές MIMO.....	18
2.4.1 Eigen-Beamforming.....	18
2.4.2 Space-Time Coding.....	19
2.4.3 Spatial Multiplexing.....	20
2.5 Μοντέλο συστήματος MIMO.....	20
2.6 Χωρητικότητα συστημάτων MIMO.....	22
2.7 Διαμορφώσεις MIMO.....	23
2.8 Τεχνολογία Massive MIMO.....	24

3. Κεφάλαιο 3

Ανάλυση και χαρακτηριστικά της τεχνολογίας Massive MIMO.

3.1 Massive MIMO.....	28
3.2 Η λειτουργία των Συστημάτων MIMO.....	29

3.3 Βασική ιδέα.....	30
3.4 Κατηγορίες Massive MIMO.....	31
3.4.1 SU-MIMO.....	31
3.4.2 MU-MIMO.....	31
3.4.3 Άλλοι τύποι.....	32
3.5 Προκλήσεις.....	33

4. Κεφάλαιο 4

Εφαρμογή της τεχνολογίας Massive MIMO στα συστήματα κινητών επικοινωνιών 5G.

4.1 Η εφαρμογή MIMO σε δίκτυα 5G.....	36
4.2 Χρήση του MIMO στο 5G.....	37
4.3 Πλεονεκτήματα massive MIMO.....	38
4.4 Μειονεκτήματα massive MIMO.....	40

5. Κεφάλαιο 5

Σύγχρονες εξελίξεις.

5.1 Η τεχνολογία MIMO και 5G στο μέλλον.....	42
5.2 Αναδυόμενες τεχνολογίες στα ασύρματα δίκτυα 5G και MIMO.....	43
5.3 Μελλοντικές επεκτάσεις.....	45

Συμπεράσματα.....	46
-------------------	----

Επίλογος.....	48
---------------	----

Αναφορές.....	49
---------------	----

URLs.....	50
-----------	----

Κεφάλαιο 1

Σύντομη ανάλυση της δομής των συστημάτων κινητών επικοινωνιών 5G.

1.1 Δίκτυα 5ης γενιάς (5G)

Ως σύστημα Τηλεπικοινωνίας περιγράφεται ένα σύστημα με το οποίο γίνεται δυνατή η μετάδοση πληροφοριών από ένα σημείο σε κάποιο άλλο που απέχει κάποια απόσταση από το πρώτο. Με την έννοια αυτή της επικοινωνίας από μακριά είναι και ο ορισμός του όρου Τηλεπικοινωνία. Η εμφάνιση τέτοιων συστημάτων ξεκίνησε από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2ης γενιάς όπου άρχισε και η προσπάθεια δημιουργίας ενός ενιαίου παγκόσμιου δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Η προσπάθεια αυτή ήταν το GSM, το οποίο εξελίχθηκε με τα χρόνια στα 5G δίκτυα όπου σε κάθε γενιά δικτύων υπήρχαν περισσότερα του ενός διαφορετικά δίκτυα που θεωρούνταν δίκτυα αυτής της γενιάς. Ένας από τους κύριους στόχους της 5ης γενιάς δικτύων κινητής τηλεφωνίας ήταν η δημιουργία ενός ενιαίου παγκόσμιου δικτύου το οποίο να ενοποιεί όλες τις υπάρχουσες τεχνολογίες δικτύωσης. Ένα τέτοιο δίκτυο το οποίο θα αποτελείται από πολλές διαφορετικές τεχνολογίες δικτύωσης θα χαρακτηρίζεται ως Ετερογενές Δίκτυο.

Στις βελτιωμένες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων ανήκουν και τα ασύρματα συστήματα 5ης γενιάς. Στις πρωτογενείς τεχνολογίες περιλαμβάνονται οι ζώνες χιλιοστομετρικών κυμάτων (26, 28, 38 και 60 GHz) οι οποίες προσφέρουν απόδοση έως και 20 gigabits ανά δευτερόλεπτο. Το massive MIMO προσφέρει απόδοση έως και δέκα φορές γρηγορότερη στο δίκτυο από τα 4G [4], [11].



Εικόνα 2: 5G

1.2 Αρχιτεκτονική 5G

Η αρχιτεκτονική του 5G είναι πολύ προηγμένη. Τα στοιχεία του δικτύου και τα διάφορα χαρακτηριστικά αναβαθμίζονται συνεχώς για να προσφέρουν μια βέλτιστη κατάσταση στην άμεση και γρήγορη επικοινωνία. Ομοίως, οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να εφαρμόσουν την προηγμένη τεχνολογία για να υιοθετήσουν εύκολα τις υπηρεσίες. Τα διάφορα σημαντικά χαρακτηριστικά όπως η ικανότητα συσκευών να αναγνωρίζουν τη γεωγραφική τους θέση καθώς και τον καιρό, περιλαμβάνονται στη δυνατότητα αναβάθμισης η οποία βασίζεται σε γνωστική τεχνολογία ραδιοεπικοινωνιών. Το μοντέλο συστήματος του 5G είναι εξ' ολοκλήρου βασισμένο σε IP σχεδιασμένο για ασύρματα και κινητά δίκτυα.

Κάθε μία από τις τεχνολογίες θεωρείται ως σύνδεσμος IP για τον εξωτερικό κόσμο του διαδικτύου. Ένα κύριο τερματικό χρήστη και μια σειρά από ανεξάρτητες και αυτόνομες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης αποτελούν αυτό το σύστημα. Τεχνολογίες όπως το 5G Mastercore είναι σημείο σύγκλισης και για τις άλλες τεχνολογίες οι οποίες έχουν τη δική τους επίδραση σε ένα ασύρματο δίκτυο. Ο σχεδιασμός του διευκολύνει το Mastercore να λειτουργεί σε παράλληλη λειτουργία συμπεριλαμβανόμενης της λειτουργίας δικτύου 5G. Ένα θαυμάσιο χαρακτηριστικό αυτής της τεχνολογίας είναι το WCSM (Word Combination Service Mode). Επιπρόσθετα, μπορούν εύκολα νέες υπηρεσίες να προστεθούν μέσω παράλληλης υπηρεσίας πολλαπλών τρόπων.

Οι εφαρμογές αυτές μπορεί να είναι η μετάδοση φωνής και η πρόσβαση στο Διαδίκτυο με ταχύτητες αρκετών Gbps μέχρι και την απευθείας επικοινωνία μεταξύ των χρηστών (Device to Device - D2D) και την επικοινωνία ενός οχήματος είτε με άλλο όχημα (Vehicle to Vehicle - V2V) είτε με κάποια υποδομή του δικτύου (Vehicle to Infrastructure - V2I). Με τη χρήση κάποιων εφεδρικών τοπολογιών δικτύου (Relay), τη χρήση μικρών κυψελών υψηλής πυκνότητας (Hyperdense small cells) καθώς και τη χρήση τοπικών Wi-Fi δικτύων για την κάλυψη συγκεκριμένων περιοχών (Wi-Fi offloading) μπορεί να βελτιωθεί η κάλυψη, η χωρητικότητα και η ενεργειακή απόδοση που μπορεί να έχει ένα τέτοιο δίκτυο. Το cloud computing αφορά τη χρήση απομακρυσμένων πόρων για την εκτέλεση διαφόρων εφαρμογών και προγραμμάτων που μπορούν να εφαρμοσθούν και να χρησιμοποιηθούν από όλους τους συνδεδεμένους χρήστες και στη συνέχεια θα μπορούν να σχηματίσουν ένα εικονικό δίκτυο κοινόχρηστων πόρων.

Τα 5G δίκτυα θα είναι ετερογενή δίκτυα τα οποία όμως δεν θα έχουν κάποια πλήρως καθορισμένη και συγκεκριμένη αρχιτεκτονική όπως αυτή που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες γενιές δικτύων αλλά συνδυασμός όλων των παραπάνω. Ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής όπως το πλήθος των χρηστών, η μορφολογία του εδάφους και τα προϋπάρχοντα δίκτυα στην οποία περιοχή θα υλοποιηθεί κάθε 5G δίκτυο το οποίο θα σχεδιάζει το δίκτυο αυτό με μια μοναδική αρχιτεκτονική [3], [12], [13].

1.3 Χαρακτηριστικά 5G

Τα 5G δίκτυα θα προσφέρουν μεγάλα ποσοστά δεδομένων τα οποία θα μπορούν να φτάσουν έως και τα 10 Gbps. Η τεχνολογία 5G θα επιτρέπει σε συσκευές που ταξιδεύουν έως και 500ρη να παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο όπως για παράδειγμα, συσκευές που χρησιμοποιούνται από επιβάτες που ταξιδεύουν με οχήματα ή και τρένα τα οποία κινούνται πολύ γρήγορα, θα παραμένουν συνδεδεμένες εν κινήσει. Ακόμη, ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών θα είναι τριπλάσιος όπως 1M σε ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο και το οποίο θα αποτελεί ένα ακόμη δυνατό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας αυτής.

Οι χρήστες σε περιοχές υπερκατανάλωσης όπως μεγάλες πόλεις, αεροδρόμια αλλά και σε χρήσεις σε ώρες αιχμής, θα έχουν τη δυνατότητα να βιώσουν τις γρήγορες ταχύτητες και τη χαμηλή καθυστέρηση των 5G ταχυτήτων. Επίσης, το gaming θα είναι εντυπωσιακό λόγω της εικονικής πραγματικότητας που προσφέρει. Έτσι, με όλους τους παραπάνω τρόπους, τα 5G δίκτυα επεκτείνουν τις ευρυζωνικές ασύρματες υπηρεσίες πέρα από το κινητό διαδίκτυο IoT και σε κρίσιμα τμήματα επικοινωνιών.

Τα δίκτυα 5G χαρακτηρίζονται από τέσσερα βασικά γνωρίσματα: α) συνεχής και αδιάκοπη συνδεσιμότητα, β) υψηλές ταχύτητες μετάδοσης και μεγάλος όγκος δεδομένων, γ) ελαχιστοποίηση του κόστους και της ενέργειας και δ) ελάχιστο χρόνο καθυστέρησης.

Επιπλέον, βασικά χαρακτηριστικά της 5G τεχνολογίας αποτελούν τα παρακάτω:

- πιο ελκυστικό και αποτελεσματικό λόγω προηγμένων διεπαφών χρέωσης
- παροχή εργαλείων εποπτείας του συνδρομητή για γρήγορη δράση
- υψηλή ανάλυση στο χρήστη κινητού τηλεφώνου και αμφίδρομη μεγάλου εύρους ζώνης διαμόρφωση
- μεγαλύτερη ακρίβεια στις στατιστικές κυκλοφορίας
- παροχή μεγάλης μετάδοσης των δεδομένων σε Gigabit
- μέσω της απομακρυσμένης διαχείρισης που προσφέρεται, ο χρήστης θα έχει την καλύτερη και γρηγορότερη λύση
- υποστήριξη εικονικού ιδιωτικού δικτύου
- παροχή απομακρυσμένης διάγνωσης
- παροχή έως και 25 Mbps ταχύτητα σύνδεσης
- αποφυγή σφαλμάτων με τις υψηλής ποιότητας υπηρεσίες με βάση την πολιτική
- η ταχύτητα upload και download θα αγγίζει την κορυφή.

Συνοψίζοντας, με την τεχνολογία 5G οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα θα είναι ακριβώς οι ίδιες συσκευές. Ο χρήστης θα διευκολύνεται από αυτές σε αρκετές λειτουργίες όπως στα παιχνίδια, στα βίντεο, στη μουσική, στις φωτογραφίες και στις συσκευές εγγραφής - αναπαραγωγής. Τα ποσοστά της κλήσης δε θα είναι διαφορετικά από περιοχή σε περιοχή. Δεν είναι πολύ μακριά η εποχή όπου τα παγκόσμια κινητά τηλέφωνα θα τα βλέπουμε σε όλο τον κόσμο δηλαδή ένας χρήστης θα μπορεί να μετακινηθεί οπουδήποτε στον κόσμο έχοντας μόνο το 5G δίκτυο κινητής τηλεφωνίας [4], [5].

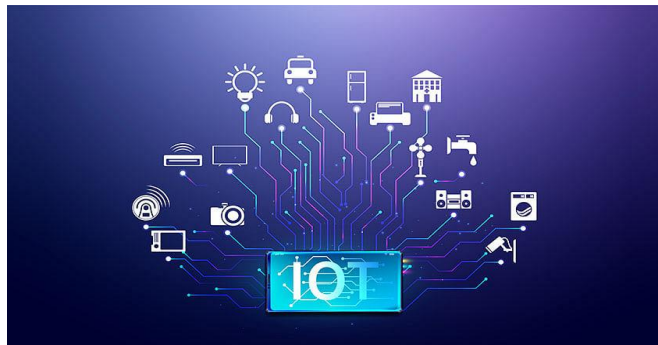


Εικόνα 3: Δίκτυο 5G

1.4 Εφαρμογές της τεχνολογίας 5G

Τα δίκτυα 5ης γενιάς θα χαρακτηρίζονται από ταχύτατη απόκριση και από πολύ υψηλές ταχύτητες πράγμα που καθιστούν τα δίκτυα αυτά πολύ ελπιδοφόρα για το μέλλον καθώς αναμένεται να εφαρμοστούν σε πολλούς τομείς. Μερικοί από αυτούς τους τομείς είναι οι εξής:

1. Internet of Things: Το Internet of Things θα συνδέσει όλα τα αντικείμενα, εφαρμογές και συσκευές στο Internet. Οι εφαρμογές IoT θα συγκεντρώνουν τεράστιο όγκο δεδομένων από εκατομμύρια συσκευές και αισθητήρες και θα απαιτεί ένα αποτελεσματικό δίκτυο για τη συλλογή, επεξεργασία, διαβίβαση, έλεγχο και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 4: IoT

2. Smart Home: Με τη νέα τεχνολογία 5G δημιουργείται η δυνατότητα ελέγχου όλων των οικιακών συσκευών ακόμα και αν ο χρήστης βρίσκεται πολύ μακριά από το σπίτι του. Πέρα από τις έξυπνες τηλεοράσεις με συνδεσιμότητα στο δίκτυο, άλλες έξυπνες ηλεκτρικές συσκευές έρχονται να περιορίσουν τις συμβατές συσκευές δίνοντας μια πρώτη εικόνα από την εξέλιξη του 21ου αιώνα.

3. Smart Cities: Οι έξυπνες εφαρμογές της πόλης, όπως η ενεργειακή διαχείριση, η διαχείριση της κυκλοφορίας, η άμεση ενημέρωση καιρού, ο έξυπνος φωτισμός δρόμων, η διαχείριση των υδάτινων πόρων έρχονται να δώσουν λύσεις στους κατοίκους των μεγάλων πόλεων.

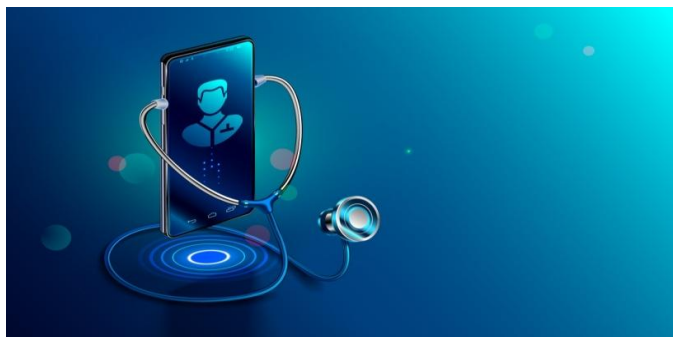
4. Smart Farming: Η τεχνολογία του 5G θα χρησιμοποιηθεί στο μέλλον και για την έξυπνη γεωργία. Χρησιμοποιώντας έξυπνους RFID αισθητήρες και GPS, οι αγρότες θα μπορούν να εντοπίσουν τη θέση των ζώων και να τα διαχειριστούν εύκολα από μακριά. Οι έξυπνοι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο πρόσβασης και διαχείριση ενέργειας ακόμη και για έλεγχο άρδευσης.



Εικόνα 5: Smart farming

5. Drones: Οι συσκευές drones λόγω των πολλαπλών λειτουργιών τους όπως ψυχαγωγία, λήψη βίντεο ακόμη και παροχή βοήθειας σε απομακρυσμένες περιοχές, γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλείς. Το δίκτυο 5G παρέχει υποστήριξη με υψηλής ταχύτητας ασύρματη σύνδεση στο διαδίκτυο για τις λειτουργίες των drones.

6. Υγεία: Η τεχνολογία του 5G θα υποστηρίξει τις ιατρικές διαδικασίες με αξιόπιστο ασύρματο δίκτυο συνδεδεμένο σε μια άλλη πλευρά του πλανήτη ώστε να βοηθούν στη χειρουργική από απόσταση και στην παροχή υγειονομικής περίθαλψης σε ανθρώπους σε απομακρυσμένες περιοχές. Τα άτομα με χρόνιες παθήσεις θα επωφεληθούν από την παρακολούθησή τους σε πραγματικό χρόνο. Ακόμη, θα ενισχύσει τη βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης με έξυπνες ιατρικές συσκευές και τεχνολογίες ιατρικής απεικόνισης υψηλής ευκρίνειας. Τα wearables (έξυπνες ιατρικές συσκευές) θα παρακολουθούν συνεχώς την κατάσταση του ασθενούς και θα προειδοποιούν σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης με αποτέλεσμα τα νοσοκομεία να λαμβάνουν τις ειδοποιήσεις για την άμεση θεραπεία του ασθενή [5], [11].



Εικόνα 6: Smart health

Κεφάλαιο 2

Γενικά χαρακτηριστικά των κεραιών MIMO.

2.1 Ιστορική αναδρομή

Στη δεκαετία του 1970, το MIMO εντοπίζεται συχνά στα ερευνητικά έγγραφα σχετικά με τα πολυκαναλικά συστήματα ψηφιακής μετάδοσης και τις παρεμβολές μεταξύ ζευγαριών συρμάτων σε δέσμη καλωδίων. Ορισμένες από τις μαθηματικές τεχνικές αντιμετώπισης των αμοιβαίων παρεμβολών αποδείχθηκαν χρήσιμες για την ανάπτυξη του MIMO αν και αυτά δεν αποτελούν παραδείγματα εκμετάλλευσης πολλαπλής διάδοσης για την αποστολή πολλαπλών ροών πληροφοριών. Στα μέσα της δεκαετίας του 1980, ο Jack Salz στο Bell Laboratories διερεύνησε συστήματα πολλαπλών χρηστών που λειτουργούν πάνω σε αμοιβαία εγκάρσια συζευγμένα γραμμικά δίκτυα όπως η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου και διπλής πόλωσης ραδιοσυστημάτων. Με αυτές τις μεθόδους, βελτιώθηκε η απόδοση των κυψελοειδών ραδιοφωνικών δικτύων στις αρχές της δεκαετίας του 1990 με την επαναφορά της συχνότητας.

Η πολλαπλή πρόσβαση διαχωρισμού χώρου (SDMA) χρησιμοποιεί κατευθυντικές ή έξυπνες κεραιές για επικοινωνία στην ίδια συχνότητα με χρήστες σε διαφορετικές θέσεις εντός της εμβέλειας του ίδιου σταθμού βάσης. Το 1991 προτάθηκε ένα σύστημα SDMA από τους Richard Roy και Björn Ottersten, ερευνητές στο ArrayComm, όπου το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τους περιγράφει μια μέθοδο αύξησης της χωρητικότητας χρησιμοποιώντας μια σειρά από κεραιές λήψης στο σταθμό βάσης σε πλήθος απομακρυσμένων χρηστών [15].

2.2 Ορισμός MIMO

Οι σταθμοί βάσης 4G διαθέτουν δώδεκα θύρες για κεραιές, οκτώ για πομπούς και τέσσερις για δέκτες, που χειρίζονται όλη την κυψελοειδή κίνηση. Οι σταθμοί βάσης 5G μπορούν να υποστηρίξουν περίπου εκατό θύρες με αποτέλεσμα σε μία μόνο συστοιχία να χωρέσουν πολλές περισσότερες κεραιές. Αυτό σημαίνει ότι ένας σταθμός βάσης θα μπορούσε να στέλνει και να λαμβάνει σήματα από πολλούς περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα αυξάνοντας την χωρητικότητα των mobile networks. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται MIMO.

Τα αρχικά MIMO προέρχονται από τους όρους multiple-input και multiple-output. Το MIMO περιγράφει ασύρματα συστήματα για να στέλνουν και να λαμβάνουν περισσότερα δεδομένα ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερους πομπούς και δέκτες.

Με την ενσωμάτωση δεκάδων κεραιών σε μια μόνο συστοιχία, η τεχνολογία massive MIMO εξελίσσει αυτή την ιδέα ακόμη περισσότερο. Υπάρχουν πολλά είδη σχηματισμού της διάταξης για συστήματα massive MIMO με τις πιο διαδεδομένες που χρησιμοποιούνται ευρύτατα να είναι η γραμμική, η σφαιρική, η κυλινδρική, η τετράγωνη και η κατανεμημένη διάταξη.

Μια μέθοδος για τον πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας ενός ραδιοζεύκτη χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές μετάδοσης και λήψης στο ραδιόφωνο για την εκμετάλλευση της πολλαπλής διάδοσης είναι αυτή του MIMO. Το MIMO έχει γίνει ουσιαστικό στοιχείο των προτύπων ασύρματης επικοινωνίας, όπως του IEEE 802.11n (Wi-Fi), IEEE 802.11ac (Wi-Fi), HSPA + (3G), WiMAX (4G) και Long Term Evolution (4G LTE). Κάποια στιγμή, στον ασύρματο, ο όρος MIMO αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό και στο δέκτη. Το MIMO διαφέρει από τις τεχνικές έξυπνης κεραιάς που αναπτύσσονται για την ενίσχυση της απόδοσης ενός σήματος δεδομένων όπως είναι η μορφοποίηση δέσμης και η ποικιλομορφία. Στη σύγχρονη χρήση αναφέρεται σε μια πρακτική τεχνική για την αποστολή και τη λήψη περισσότερων του ενός σημάτων δεδομένων ταυτόχρονα μέσω του ίδιου ραδιοφωνικού καναλιού.

Για την εφαρμογή του MIMO, πρέπει ο σταθμός (κινητή συσκευή) ή το σημείο πρόσβασης (AP) να υποστηρίζει το MIMO καθώς και για βέλτιστη απόδοση και εμβέλεια θα πρέπει τόσο ο σταθμός όσο και το σημείο πρόσβασης να υποστηρίζουν και αυτά το MIMO. Η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιεί ένα φυσικό φαινόμενο ραδιοκυμάτων που ονομάζεται multipath.

Με πολλές διαδρομές, οι μεταδιδόμενες πληροφορίες αναπηδούν από οροφές και άλλα αντικείμενα φτάνοντας στην κεραιά λήψης πολλές φορές σε διαφορετικές γωνίες και ελαφρώς διαφορετικούς χρόνους. Παλαιότερα, η πολλαπλή διαδρομή προκάλεσε παρεμβολές και επιβράδυνε τα ασύρματα σήματα. Η τεχνολογία MIMO αυξάνει την απόδοση και την εμβέλεια καθώς χρησιμοποιεί έξυπνους πολλαπλούς πομπούς και δέκτες με πρόσθετη χωρική διάσταση.

Το MIMO επιτρέπει στις κεραιές να συνδυάζουν ροές δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές διαδρομές και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές με την αύξηση της ισχύος λήψης του σήματος. Οι έξυπνες κεραιές χρησιμοποιούν τεχνολογία χωρικής διαφοροποίησης η οποία τεχνολογία τοποθετεί τις κεραιές με καλή χρήση. Οι κεραιές μπορούν να προσθέσουν ποικιλία δέκτη και να αυξήσουν την εμβέλεια όταν ξεπερνούν τις χωρικές ροές.

Συνήθως, περισσότερες κεραιές σημαίνουν και υψηλότερες ταχύτητες. Για παράδειγμα, ένας ασύρματος προσαρμογέας με τρεις κεραιές μπορεί να έχει ταχύτητα 600 Mbps σε σχέση με έναν προσαρμογέα με δύο κεραιές όπου έχει ταχύτητα 300 Mbps. Για να επιτύχει την υψηλότερη δυνατή ταχύτητα θα πρέπει ο δρομολογητής να κάνει χρήση πολλαπλών κεραιών και να υποστηρίζει πλήρως όλα τα χαρακτηριστικά του 802.11n.

Οποιοδήποτε σύστημα που υλοποιείται με πολύθυρες κεραιές (multiport antenna - MPA) αναφέρεται με τον όρο σύστημα πολλαπλών κεραιών (multiantenna system). Κάθε θύρα του συστήματος μπορεί να αναφέρεται σε φυσικά διαχωρισμένες κεραιές, κεραιές με διαφορετική πόλωση, διακριτές κεραιές με διαφορετικό διάγραμμα ακτινοβολίας είτε ακόμη και σε έναν συνδυασμό των παραπάνω περιπτώσεων.

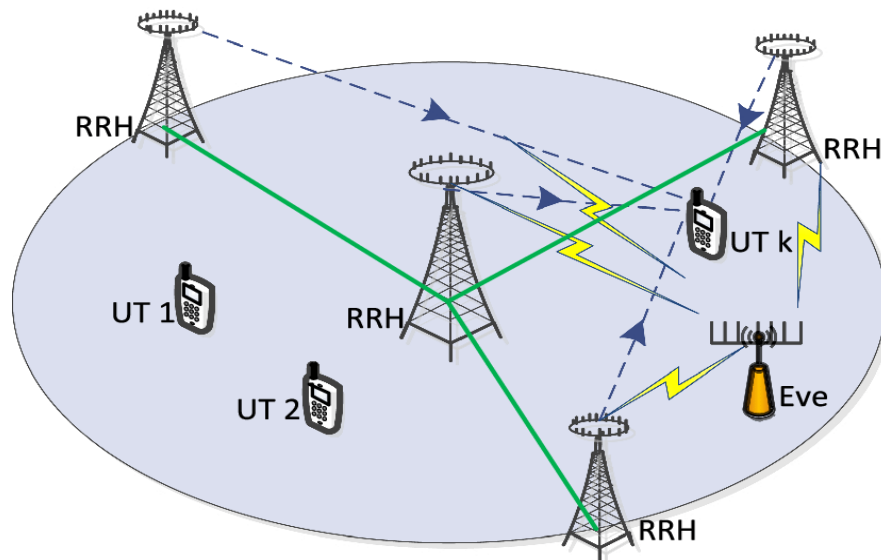
Ως εκ τούτου, ορίζονται τρεις κύριες κατηγορίες πολύθυρων κεραιών:

- κεραιές πολλαπλών ρυθμών (multimode antenna - MMA).
- κεραιές πολλαπλών στοιχείων (multielement antenna - MEA)
- κεραιές πολλαπλής πόλωσης (multipolarized antenna - MPOA)

Επίσης, τα MIMO συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τις τεχνικές που χρησιμοποιούν όπως είναι η χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing) και ο διαφορισμός κωδικοποίησης (diversity coding).

Κατά τη χωρική πολυπλεξία, εκπέμπεται από διαφορετικές κεραιές στην ίδια συχνότητα ένα σήμα υψηλού ρυθμού όπου διαιρείται σε περισσότερα σήματα χαμηλότερου ρυθμού. Στη συνέχεια, τα σήματα φτάνουν στο δέκτη σε παράλληλα κανάλια. Το multiplexing είναι μια αξιόλογη τεχνική που μπορεί να προσφέρει μεγάλη αύξηση της χωρητικότητας. Ο μέγιστος αριθμός των παράλληλων καναλιών περιορίζεται από μικρότερο πλήθος κεραιών, του πομπού ή του δέκτη. Με την συγκεκριμένη τεχνική, ο πομπός συνδέεται με κάποιου είδους ανάδραση δηλαδή έχει πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού (channel state information – CSI). Όταν ο πομπός δεν έχει κάποια πληροφορία για την κατάσταση του καναλιού, χρησιμοποιείται ο διαφορισμός κωδικοποίησης.

Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική, εκπέμπεται το ίδιο σήμα από κάθε κεραία το οποίο όμως κωδικοποιείται σύμφωνα με τεχνικές που ονομάζονται κώδικες χώρου-χρόνου (spacetime code). Το πλεονέκτημα είναι ότι κάνει πιο αξιόπιστο το σύστημα διασφαλίζοντας τη μειωμένη πιθανότητα σφάλματος [6], [15].



Εικόνα 7: MIMO

2.3 Η λειτουργία MIMO

Η λειτουργία του MIMO μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- **Precoding:** είναι η πολυμορφική διαμόρφωση δέσμης. Θεωρείται όλη η χωρική επεξεργασία που συμβαίνει στον πομπό. Στη διαμόρφωση δέσμης (μονής ροής), το ίδιο σήμα εκπέμπεται από κάθε μία από τις κεραίες εκπομπής με την κατάλληλη φάση αυξάνοντας τη στάθμη ώστε η ισχύς σήματος να μεγιστοποιείται στην είσοδο του δέκτη. Τα οφέλη της μορφοποίησης ακτινών είναι η αύξηση του κέρδους του λαμβανόμενου σήματος και η μείωση του φαινομένου εξασθένισης πολλαπλών διαδρομών.

- Χωρική πολυπλεξία: απαιτεί διαμόρφωση κεραίας MIMO. Ένα σήμα υψηλού ρυθμού διαιρείται σε πολλαπλά ρεύματα χαμηλού ρυθμού και κάθε ρεύμα μεταδίδεται από μια διαφορετική κεραία εκπομπής στο ίδιο κανάλι συχνότητας. Η χωρική πολυπλεξία είναι μια πολύ ισχυρή τεχνική για την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού σε υψηλότερες αναλογίες σήματος προς τον θόρυβο (SNR). Η χωρική πολυπλεξία μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς CSI στον πομπό αλλά μπορεί να συνδυαστεί με precoding εάν είναι διαθέσιμο το CSI. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ταυτόχρονη μετάδοση σε πολλαπλούς δέκτες γνωστή ως πολλαπλή πρόσβαση διαχωρισμού χώρου, οπότε στην περίπτωση αυτή απαιτείται CSI στον πομπό.
- Τεχνικές κωδικοποίησης πολυμορφίας: χρησιμοποιούνται όταν δεν υπάρχει γνώση καναλιού στον πομπό. Μεταδίδεται ένα μόνο ρεύμα αλλά το σήμα κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας τεχνική που ονομάζεται κωδικοποίηση διαστήματος χρόνου. Το σήμα εκπέμπεται από κάθε μία από τις κεραίες μετάδοσης με πλήρη ή σχεδόν ορθογώνια κωδικοποίηση. Εφόσον δεν υπάρχει γνώση του καναλιού, δεν υπάρχει και σχηματισμός δέσμης ή κέρδος συστοιχιών από την κωδικοποίηση της ποικιλίας. Όταν είναι διαθέσιμη κάποια γνώση καναλιού στον πομπό, η κωδικοποίηση της πολυμορφίας μπορεί να συνδυαστεί με τη χωρική πολυπλεξία [15].

2.4 Τεχνικές MIMO

2.4.1 Eigen-Beamforming

Το Eigen-Beamforming μπορεί να πραγματοποιηθεί στην πλευρά μετάδοσης αλλά και στην πλευρά λήψης ενός συνδέσμου. Η κλασική Beamforming είναι σαν να χρησιμοποιεί μια κεραία υψηλής απόδοσης η οποία δε χρειάζεται να επαναπροσανατολιστεί για να δείχνει προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Ωστόσο, επιτυγχάνει το ίδιο κέρδος αλλά δεν είναι ευαίσθητη στα στοιχεία σκέδασης κοντά στην κεραία ή στον προσανατολισμό της κεραίας.

Το MIMO Eigen-beamforming, μετατρέπει τα σήματα από όλες τις κεραίες στο ψηφιακό τομέα. Επομένως, το Eigen-Beamforming μπορεί να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα για καθέναν από τους υποφορείς ενός συστήματος ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM).

Ειδικότερα, ένας Eigen beamformer στα συστήματα MIMO που λαμβάνει ένα σήμα σε κατάσταση μη ορατότητας με πολλαπλές αντανakλάσεις μπορεί να αποτελέσει ένα αποτελεσματικό πρότυπο κεραίας πράγμα το οποίο θα αυξάνει το κέρδος σε πολλαπλές κατευθύνσεις που αντιστοιχούν στις μεμονωμένες αντανakλάσεις. Έτσι, χρησιμοποιώντας την ψηφιακή επεξεργασία σήματος, τα συστήματα MIMO έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζονται σε ένα πακέτο τα συγκεκριμένα μοτίβα [15], [25].

2.4.2 Space-Time Coding

Η Space-Time Coding (χωροχρονική κωδικοποίηση) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετάδοση μέσω πολλαπλών κεραιών και να επιτύχει κέρδη καθώς και να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας πολλαπλή λήψη διαφορετικών κεραιών. Η κωδικοποίηση διαστημικού χρόνου σημαίνει τη λήψη των δεδομένων τα οποία θα μεταδίδονται από μία και μόνο κεραία καθώς και την εφαρμογή μιας τεχνικής κωδικοποίησης επεξεργασίας σήματος προκειμένου να μεταδοθεί μια μεταβληθείσα έκδοση του ίδιου περιεχομένου πληροφοριών σε επιπλέον κεραιές. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να ενισχύσει το δέκτη να διαχωρίσει τα δεδομένα από το θόρυβο του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, ένα όχημα το οποίο διαθέτει ραδιόφωνο μπορεί να έχει τέσσερις κεραιές ενώ μια μικρή φορητή μονάδα μπορεί να έχει δύο ή και μία μόνο κεραία. Εάν αυτή η συσκευή μεταδίδει σε μία κεραία τότε το ραδιόφωνο μπορεί να χρησιμοποιήσει τη διαμόρφωση δέσμης για βελτίωση της λήψης ή τη διαφορετικότητα του δέκτη.

Η κωδικοποίηση χρόνου και χώρου δίνει τη δυνατότητα στο όχημα να μεταδίδει και στις τέσσερις κεραιές και να επιτύχει παρόμοιο κέρδος όταν η φορητή συσκευή περιορίζεται σε μία μόνο κεραία λήψης. Έτσι, η σύνδεση γίνεται περισσότερο χρήσιμη για αμφίδρομη επικοινωνία [15], [25].

2.4.3 Spatial Multiplexing

Η Spatial Multiplexing (χωρική πολυπλεξία) είναι η MIMO τεχνική η οποία μεταδίδει πολλαπλές μοναδικές ροές πληροφορίας από διαφορετικές κεραίες οι οποίες λειτουργούν με ίδια κεντρική συχνότητα. Ένας δέκτης που χρησιμοποιεί κεραίες όσες και ο αριθμός των ρευμάτων που μεταδίδονται μπορεί να αυξήσει την ποσότητα των δεδομένων που ρέουν αποκωδικοποιώντας τα ξεχωριστά.

Για παράδειγμα, ένα σύστημα 4×4 MIMO μπορεί να επιτύχει τέσσερα ρεύματα και έτσι να μεταδώσει τέσσερα φορές περισσότερα δεδομένα από ένα οποιοδήποτε άλλο σύστημα μέσω του ίδιου εύρους ζώνης καναλιού. Πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η αύξηση της φασματικής απόδοσης χωρίς να μειώνεται η ευρωστία του συνδέσμου. Μπορεί για παράδειγμα να επιτευχθεί σχεδόν 4 bits/sec/Hz με 16-QAM με αρκετά ισχυρό ρυθμό κωδικοποίησης χρησιμοποιώντας δύο ροές. Χωρίς την τεχνική MIMO, ένα σύστημα θα χρειαζόταν 64-QAM και λιγότερο ρυθμό κωδικοποίησης για να επιτύχει παρόμοια απόδοση μέσα στο ίδιο κανάλι. Αποτέλεσμα αυτού είναι να περιορίζεται σημαντικά το εύρος του ή να απαιτεί πολύ μεγαλύτερη ισχύ μετάδοσης.

Τέλος, οι τεχνικές αυτές είτε χρησιμοποιούνται μεμονωμένα είτε με διάφορους συνδυασμούς παρέχουν οφέλη όπως: χαμηλότερη απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης, μεγαλύτερη απόδοση, μεγαλύτερη θωράκιση και μεγαλύτερη εμβέλεια [15], [25].

2.5 Μοντέλο συστήματος MIMO

Έστω σύστημα MIMO με M κεραίες στον πομπό και K κεραίες στο δέκτη. Ο διάυλος κάθε κεραίας δέκτη με κάθε κεραία του πομπού θα έχει κρουστική απόκριση $h_{mk}(\tau; t)$, όπου τ το πεδίο της καθυστέρησης και t ο χρόνος. Συνεπώς, ο πίνακας $H(\tau; t)$ που χαρακτηρίζει το τυχαίο χρονομεταβλητό διάυλο έχει την εξής μορφή:

$$H(\tau; t) = \begin{bmatrix} h_{11}(\tau; t) & h_{12}(\tau; t) & \dots & h_{1M}(\tau; t) \\ h_{21}(\tau; t) & h_{22}(\tau; t) & \dots & h_{2M}(\tau; t) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{K1}(\tau; t) & h_{K2}(\tau; t) & \dots & h_{KM}(\tau; t) \end{bmatrix}$$

Εάν το εκπεμπόμενο σύμβολο από την m-οστή κεραία πομπού είναι $s_m(t)$ τότε στην k-οστή κεραία δέκτη, το λαμβανόμενο $r_k(t)$ θα ήταν της μορφής:

$$r_k(t) = \sum_{m=1}^M \int_{-\infty}^{+\infty} h_{m,k}(\tau; t) s_m(t - \tau) d\tau = \sum_{m=1}^M h_{m,k}(\tau; t) * s_m(\tau) \quad (1)$$

όπου * συμβολίζεται η διαδικασία της συνέλιξης.

Για μη συχνοεπιλεκτικά κανάλια όπου η κρουστική απόκριση του καναλιού μεταβάλλεται πολύ αργά σε σχέση με ένα χρονικό διάστημα $0 < t < T$, ο χρόνος συνοχής δηλαδή το χρονικό διάστημα όπου το κανάλι θεωρείται σχεδόν σταθερό για την μετάδοση ενός frame:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{K1} & h_{K2} & \dots & h_{KM} \end{bmatrix}$$

Στην περίπτωση αυτή, το διάνυσμα του λαμβανόμενου σήματος \mathbf{r} έχει την εξής μορφή:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} \quad (2)$$

όπου το λαμβανόμενο \mathbf{r} είναι διάστασης $K \times 1$, το εκπεμπόμενο \mathbf{s} είναι διάστασης $M \times 1$ και ο πίνακας του καναλιού \mathbf{H} είναι $K \times M$.

Έστω \mathbf{n} το διάνυσμα λευκού προσθετικού Γκαουσιανού θορύβου με μηδενική μέση τιμή το οποίο έχει διάσταση ίση με το λαμβανόμενο δηλαδή $K \times 1$. Τότε, το μοντέλο συστήματος για μη συχνοεπιλεκτικό διάυλο θα έχει την εξής μορφή [7], [10]:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (3).$$

2.6 Χωρητικότητα συστημάτων MIMO

Έστω σαν μοντέλο συστήματος η $\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$ και διάυλο $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M,K}$ γνωστό στο δέκτη και τον πομπό. Τα κανάλια του διαύλου είναι Γκαουσιανά οπότε μετασχηματίζοντας γραμμικά τον \mathbf{H} με τη σύνθεση ενός πίνακα περιστροφής, ενός πίνακα πλάτους και ακόμη ενός πίνακα μιας περιστροφής, γίνεται να υπολογιστεί η χωρητικότητα από τα διανύσματα παράλληλων και ανεξάρτητων καναλιών που προκύπτουν.

Οπότε ο \mathbf{H} μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^* \quad (4)$$

όπου οι πίνακες $\mathbf{U} \in \mathbb{C}^{K,K}$, $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{M,M}$ είναι ορθομοναδιαίοι με τις στήλες και τις γραμμές τους να αποτελούν ορθοκανονική βάση στους χώρους \mathbb{C}^K , \mathbb{C}^M και $\mathbf{\Lambda} \in \mathbb{R}^{M,K}$. Επιπλέον, περιέχονται διατεταγμένες κατά φθίνουσα σειρά με τις ιδιόμορφες τιμές του πίνακα \mathbf{H} , όπου το πλήθος τους είναι ίσο με $\min(M,K)$. Συνεπώς, η $\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$ με τους παρακάτω μετασχηματισμούς:

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{U}^*\mathbf{r} \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{V}^*\mathbf{s} \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{U}^*\mathbf{n} \quad (7)$$

μπορεί να ξαναγραφτεί ως:

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{\Lambda}\hat{\mathbf{s}} + \hat{\mathbf{n}} \quad (8)$$

Η ενέργεια παραμένει σταθερή καθώς οι πίνακες \mathbf{U} και \mathbf{V} είναι απλοί πίνακες περιστροφής, οπότε $\|\hat{\mathbf{s}}\|^2 = \|\mathbf{s}\|^2$, $\|\hat{\mathbf{r}}\|^2 = \|\mathbf{r}\|^2$ και ο μετασχηματισμένος θόρυβος $\hat{\mathbf{n}}$ ακολουθεί την ίδια κατανομή με τον \mathbf{n} λόγω του κεντρικού οριακού θεωρήματος.

Ο πίνακας $\mathbf{\Lambda}$ είναι διαγώνιος δηλαδή κάθε σήμα εξόδου συνδέεται με ένα και μόνο σήμα εισόδου. Η τάξη του πίνακα $\mathbf{\Lambda}$ αλλά και του \mathbf{H} είναι το πολύ ίση και ορίζεται σαν $R_H \geq \min(M, K)$. Η ενέργεια διατηρείται και κάθε σήμα έχει μια ισοδύναμη αναπαράσταση σε κάθε υποκανάλι. Η αναπαράσταση αυτή μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\hat{r}_i = \lambda_i \hat{s}_i + \hat{n}_i \quad i = 1, 2, \dots, R_H \quad (9)$$

Χρησιμοποιώντας όλα τα παραπάνω, μπορεί να υπολογιστεί η χωρητικότητα του διαύλου MIMO σαν το άθροισμα των χωρητικότητων των επιμέρους παράλληλων υποκαναλιών:

$$C = B \sum_{i=1}^{R_H} \log \left(1 + \frac{\lambda_i^2 P_i}{\sigma_n^2} \right) \quad \text{bits \sec\Hz} \quad (10)$$

όπου με σ_n συμβολίζεται η τυπική απόκλιση του θορύβου και P_i η ισχύς η οποία κατανέμεται σε κάθε υποδιάυλο. Οπότε, για υψηλό σηματοθορυβικό λόγο διαμοιράζεται ίση ισχύ σε κάθε κεραία ενώ για χαμηλό σηματοθορυβικό λόγο, όλη η ισχύς δίνεται στον υποδιάυλο με τη μεγαλύτερη ιδιοτιμή.

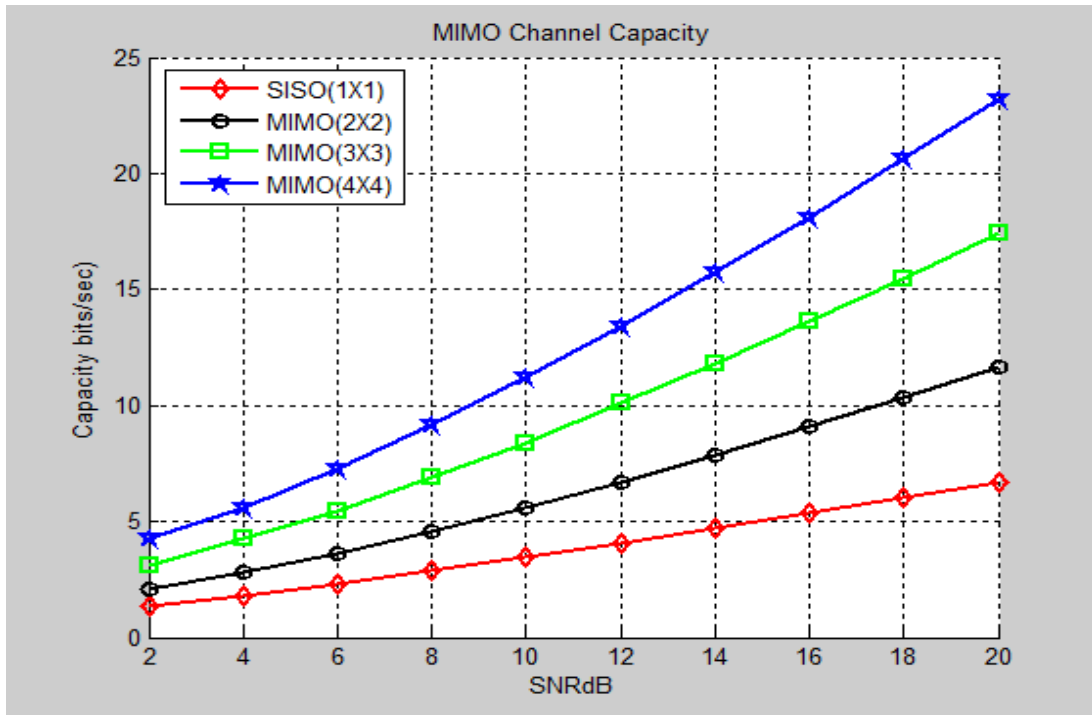
Παρατηρώντας τον τύπο της χωρητικότητας του διαύλου, προκύπτει ότι αυξάνεται η χωρητικότητά του συστήματος καθώς αυξάνεται και η τάξη του πίνακα R_H με αποτέλεσμα να προκύπτει το κέρδος της χωρικής πολυπλεξίας [7], [10].

2.7 Διαμορφώσεις MIMO

Τα συστήματα MIMO χρησιμοποιούν πολλές κεραιές για την αποστολή και τη λήψη δεδομένων. Η ποσότητα των κεραιών αυτών καθορίζεται από τον κατασκευαστή με στόχο τη βέλτιστη λειτουργικότητα. Οι διαμορφώσεις είναι οι παρακάτω:

- 2x2: Δύο κεραιές μετάδοσης, δύο κεραιές λήψης
- 3x3: Τρεις κεραιές μετάδοσης, τρεις κεραιές λήψης
- 4x4: Τέσσερις κεραιές μετάδοσης, τέσσερις κεραιές λήψης
- 8x8: Οκτώ κεραιές μετάδοσης, οκτώ κεραιές λήψης.

Η ποσότητα των κεραιών δείχνει το πόσες μεταδόσεις ροών δεδομένων μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα. Όμως, έχει αποδειχθεί ότι ο μεγαλύτερος αριθμός κεραιών δεν ισούται πάντα με καλύτερη απόδοση [21].



Εικόνα 8: Αναλογία Capacity / SNRdB για τις διαμορφώσεις MIMO

2.8 Τεχνολογία Massive MIMO

Από την τρέχουσα τεχνολογία MIMO αναβαθμίστηκε η εξελισσόμενη τεχνολογία massive MIMO χρησιμοποιώντας συστοιχίες κεραιάς που περιέχουν μερικές εκατοντάδες οι οποίες είναι ταυτόχρονα σε ένα χρόνο και εξυπηρετούν πολλές δεκάδες τερματικά χρηστών. Κύριος στόχος της τεχνολογίας massive MIMO είναι η εξαγωγή όλων των πλεονεκτημάτων του MIMO σε μεγαλύτερη κλίμακα. Γενικά, το massive MIMO είναι μια τεχνολογία δικτύων επόμενης γενιάς η οποία εξελίσσεται και είναι αποδοτική, ισχυρή, ασφαλής και φιλική προς το φως. Εξαρτάται από τη χωρική πολυπλεξία, η οποία και αυτή με τη σειρά της εξαρτάται περαιτέρω από το σταθμό βάσης να έχει πληροφορία για την κατάσταση του καναλιού στην ανερχόμενη αλλά και στην κατερχόμενη ζεύξη. Στην περίπτωση ανερχόμενης ζεύξης είναι εύκολη, όπως τα τερματικά στέλνουν πιλότους σε σχέση με την περίπτωση της κατερχόμενης ζεύξης που δεν είναι εύκολη.

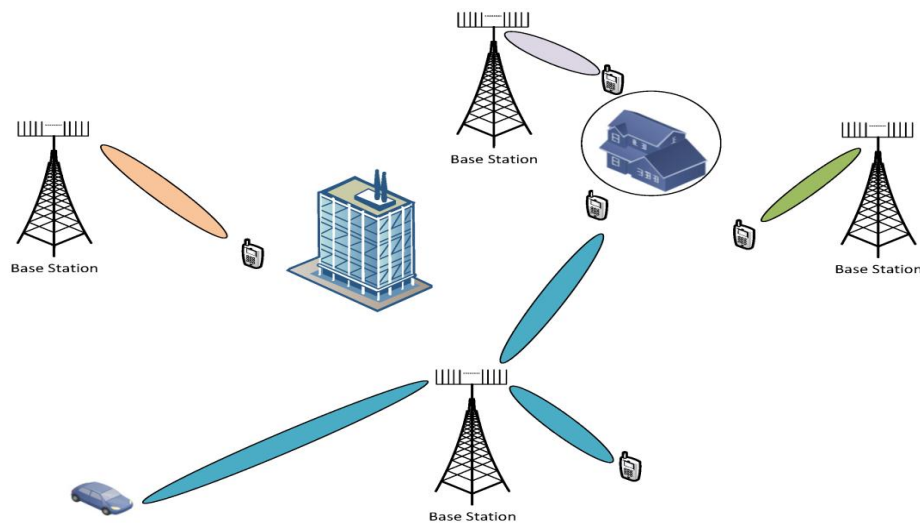
Με βάση τους πιλότους, εκτιμάται η απόκριση του καναλιού κάθε τερματικού. Στα συστήματα massive MIMO, το τερματικό υπολογίζει το κανάλι, ποσοτικοποιεί και ανατροφοδοτεί προς τον σταθμό βάσης στέλνοντας ο σταθμός βάσης τις κυματομορφές του πιλότου στους ακροδέκτες. Η διαδικασία αυτή δεν είναι βιώσιμη για συστήματα MIMO ειδικά σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας για τους εξής δύο λόγους που αναφέρονται παρακάτω:

Πρώτον, οι πιλότοι κατερχόμενης ζεύξης από τον σταθμό βάσης πρέπει να είναι ορθογώνιοι μεταξύ των κεραιών. Οπότε, η απαίτηση χρόνου και η υποδοχή της συχνότητας για τους χειριστές καθοδικής ζεύξης αυξάνονται με την αύξηση του αριθμού των κεραιών. Έτσι, τα massive συστήματα MIMO σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα MIMO, θα απαιτούσαν μεγάλο αριθμό παρόμοιων υποδοχών. Δεύτερον, ο αριθμός των σταθμισμένων εκτιμήσεων αυξάνεται για κάθε τερματικό καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κεραιών βάσης που με τη σειρά τους χρειάστηκαν εκατό φορές περισσότερους χρόνους ανοδικής ζεύξης για να ανατροφοδοτήσουν το κανάλι που ανταποκρίνεται στο σταθμό βάσης. Μία γενική λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι να δουλέψει ο τρόπος εκτύπωσης διπλής όψης με διαίρεση χρόνου (TDD).

Οι ιδιότητες του καναλιού και η αποδοτικότητα του massive MIMO συστήματος επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή της κεραίας. Η κάθε δομή έρχεται να εξυπηρετήσει διαφορετικές εφαρμογές. Η χρήση της γραμμικής κεραίας περιορίζεται σε ρεαλιστικά συστήματα διότι διαδίδει σήματα σε δύο διαστάσεις σε σχέση με τη σφαιρική, τη κυλινδρική και τη τετράγωνη όπου ακτινοβολούν σε 3 διαστάσεις και χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές πρακτικές εφαρμογές. Η κατανεμημένη κεραία χρησιμοποιείται κυρίως για βελτίωση της indoor επικοινωνίας.

Και ενώ το MIMO βρίσκεται ήδη σε μερικούς σταθμούς βάσης 4G από την άλλη πλευρά, το massive MIMO έχει δοκιμαστεί μόνο σε εργαστήρια και σε κάποιες δοκιμές πεδίου. Στις πρώτες δοκιμές έχει θέσει ένα νέα ρεκόρ για την αποδοτικότητα φάσματος η οποία αναπαριστά πόσα bits δεδομένων μπορούν να μεταδοθούν σε ένα ορισμένο αριθμό χρηστών ανά δευτερόλεπτο. Ωστόσο, το massive MIMO φαίνεται ελπιδοφόρο για το μέλλον του 5G. Από την άλλη, θα προκαλούνται περισσότερες παρεμβολές αν τα σήματα αυτά διασταυρώνονται με την εγκατάσταση τόσο μεγάλου αριθμού κεραιών για τη διαχείριση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης της κυψέλης. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει οι σταθμοί 5G να ενσωματώνουν το beamforming.

Το massive MIMO επιτρέπει υψηλής ανάλυσης beamforming και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε υψηλές συχνότητες όπου τα στοιχεία κεραιών μπορεί να είναι πολύ μικρά με αποτέλεσμα να αυξάνεται η χωρητικότητα και να βελτιώνεται ταυτόχρονα η ακτινοβολούμενη ενεργειακή απόδοση (radiated energy-efficiency). Επιπλέον, εάν είναι διαθέσιμες οι πληροφορίες κατάστασης του καναλιού, παρέχει μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθερίας το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί με τη χρήση του beamforming. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του massive MIMO είναι η ενεργειακή του απόδοση με αποτέλεσμα κάθε στοιχείο της κεραιάς αναμένεται να χρησιμοποιεί εξαιρετικά χαμηλή ισχύ [14].



Εικόνα 9: Massive MIMO

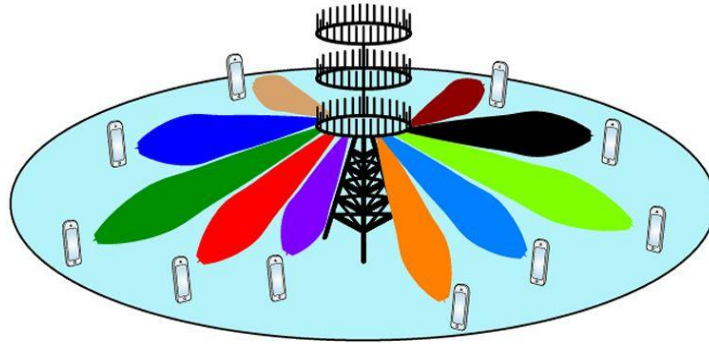
Κεφάλαιο 3

Ανάλυση και χαρακτηριστικά της τεχνολογίας Massive MIMO.

3.1 Massive MIMO

Μία γενική παρατήρηση στη μελέτη των δικτύων είναι ότι οι χρήστες του ασύρματου δικτύου έμεναν μόλις το 20% του χρόνου σε ανοιχτούς χώρους ενώ το 80% του χρόνου χρήσης σε εσωτερικούς χώρους. Στην παρούσα ασύρματη κυψελωτή αρχιτεκτονική, ένας εξωτερικός σταθμός που βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης βοηθάει στην επικοινωνία των χρηστών ανεξαρτήτως τοποθεσίας. Οπότε, το σήμα θα πρέπει να ταξιδεύει μέσα από τους τοίχους και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν απώλειες στην επικοινωνία μεταξύ των χρηστών του εσωτερικού χώρου με τον εξωτερικό σταθμό. Αυτό θα έχει ως κόστος τη μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της απόδοσης ενέργειας των ασύρματων δικτύων καθώς και τη μείωση της φασματικής απόδοσης.

Γεννήθηκε λοιπόν μία νέα τεχνική στην σχεδίαση του κυψελωτού δικτύου χωρίζοντας τις ρυθμίσεις για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους με σκοπό την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος με αποτέλεσμα οι απώλειες του σήματος λόγω των τοίχων των κτηρίων να μειωθούν σε ένα βαθμό. Αυτή η ιδέα θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια της τεχνολογίας massive MIMO η οποία θα βοηθήσει στο να πολλαπλασιαστεί η χωρητικότητα των ραδιοσυχνοτήτων χρησιμοποιώντας κεραιές μετάδοσης και λήψης σήματος ώστε να εκμεταλλευτούν τα πολλαπλά μονοπάτια. Οι κεραιές αυτές είναι διασκορπισμένες και στοιχισμένες γεωγραφικά. Με βάση την τεχνολογική καθημερινότητα και την εξέλιξη στη σχεδίαση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, όσον αφορά το φαινόμενο της πολυόδευσης έχει ως στόχο την επίτευξη της μέγιστης χωρητικότητας ενός καναλιού με την αντιμετώπιση των διαλείψεων. Το φαινόμενο της πολυόδευσης του σήματος αντιστοιχεί σε διαφορετικά κανάλια μετάδοσης της πληροφορίας. Επομένως, στόχος είναι η χρήση της πολυόδευσης του σήματος για την επίτευξη μεγαλύτερης συνολικής χωρητικότητας και αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης διαφόρων συστημάτων MIMO [9], [25].



Εικόνα 10: Τεχνολογία Massive MIMO

3.2 Βασική ιδέα

Τα συστήματα MIMO έχουν τραβήξει αρκετή προσοχή τα τελευταία χρόνια διότι οι τεχνικές που υιοθετούνται από ένα MIMO σύστημα προσφέρουν αυξημένη χωρητικότητα στο σύστημα αλλά και αξιοπιστία στη ζεύξη. Βασική ιδέα είναι η ταυτόχρονη επικοινωνία μεταξύ κεραιών πομπού και δέκτη με ανεξάρτητα streams πληροφορίας από κεραία πομπού σε κεραία δέκτη. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν αρκετά κέρδη από τη χρήση ενός MIMO συστήματος. Μερικά από αυτά είναι τα εξής:

- Κέρδος Συστοιχίας (power gain): προκύπτει από τον αριθμό των κεραιών λήψης και τον συνδυασμό πολλών διαφορετικών εκδόσεων του σήματος με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο σηματοθορυβικός λόγος.
- Κέρδος Χωρικού Διαχωρισμού (spatial diversity gain): οι συνιστώσες του σήματος μπορούν να θεωρηθούν ασυσχέτιστες και ανεξάρτητες λόγω των πολλών διαφορετικών ανεξάρτητων διαδρομών που ακολουθεί ένα σήμα μεταξύ των κεραιών του πομπού και του δέκτη. Σαν αποτέλεσμα καταφθάνουν στο δέκτη πολλά αντίγραφα του ίδιου σήματος σε διαφορετικές κεραιές τα οποία συνδυάζονται με τεχνικές. Βασική αρχή είναι η συμβολή και η δημιουργία μιας ενισχυμένης έκδοσης του αρχικού σήματος με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το κέρδος του χωρικού διαχωρισμού.

- Κέρδος Χωρικής Πολυπλεξίας (spatial multiplexing gain): με την εκπομπή διαφορετικών streams από κάθε κεραία αυξάνεται γραμμικά η χωρητικότητα του συστήματος χωρίς να αυξάνεται περαιτέρω η εκπεμπόμενη ισχύς του φάσματος.

Τα MIMO συστήματα με σκοπό να βελτιώσουν το σύστημα, εκμεταλλεύονται τον χώρο ως μια επιπλέον διάσταση. Αυτά τα κέρδη χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις και τη σχεδίαση του συστήματος. Δίνεται βάρος στη χωρική πολυπλεξία όταν το ζητούμενο είναι η αύξηση του ρυθμού αξιοποιώντας κατάλληλα τη δομή του πίνακα του διαύλου με αποτέλεσμα την απόκτηση ανεξάρτητων διαδρομών οι οποίες χρησιμοποιούνται για να σταλθούν ανεξάρτητες ροές δεδομένων. Με σκοπό να αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά τα αρνητικά φαινόμενα διάλειψης, χρησιμοποιείται ο χωρικός διαχωρισμός [9], [14].

3.3 Η λειτουργία των συστημάτων MIMO

Η βασική ιδέα των συστημάτων MIMO είναι σχεδόν η ίδια με αυτή των τεχνικών απόκλισης. Για να λαμβάνεται από τη διάταξη των κεραιών λήψης μία υπέρθεση όλων των εκπεμπόμενων σημάτων, τα συστήματα MIMO μεταδίδουν διαφορετικό σήμα από κάθε κεραία εκπομπής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να λαμβάνεται το ίδιο σήμα πολλές φορές σε διαφορετικές θέσεις με σχεδόν μηδενική πιθανότητα και όλα τα ληφθέντα αντίγραφα του αρχικού σήματος να έχουν υποστεί διάλειψη. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια ζεύξη όπου το λαμβανόμενο σήμα θα έχει μεγαλύτερο λόγο σήματος προς το θόρυβο. Τα συστήματα MIMO αυξάνουν σε σημαντικό βαθμό την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων μέσω της τεχνικής της χωρικής πολυπλεξίας (Spatial Multiplexing) πέρα από τη βελτίωση της επικοινωνίας όπως οι τεχνικές απόκλισης. Η τεχνική αυτή ορίζει και την διάνοιξη πολλών παράλληλων και διακριτών καναλιών μεταξύ των δύο άκρων της τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη χρήση πολλών κεραιών εκατέρωθεν της επικοινωνίας. Έτσι δημιουργούνται νέα ανεξάρτητα μονοπάτια επικοινωνίας τα οποία μεταφέρουν διαφορετικά δεδομένα [25].

3.4 Κατηγορίες massive MIMO

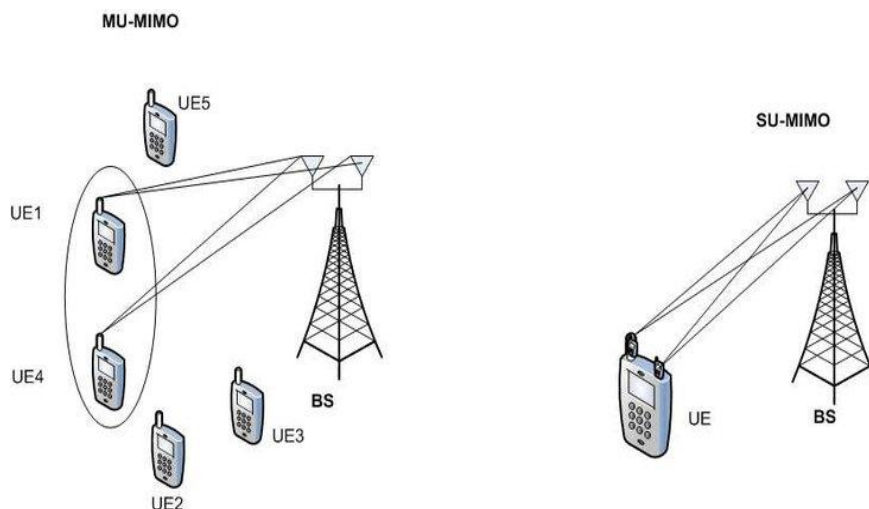
Το massive MIMO είναι μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία που εξελίσσει το MIMO με την αποκόμιση όλων των οφελών του απλού MIMO σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό. Αποτελεί θεμέλιο λίθο για την ανάπτυξη ευρυζωνικών δικτύων που θα εκμεταλλεύονται πλήρως το φασματικό εύρος και θα είναι ασφαλή καθώς και ενεργειακά αποδοτικά. Επιπλέον, βασίζεται και αυτό στην τεχνολογία Spatial Multiplexity η οποία βασίζεται στη λειτουργία TDD και στην αμοιβαιότητα των καναλιών Uplink και Downlink. Δηλαδή, εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα αλλά διαχωρίζονται χρονικά. Κάποιες από τις τεχνολογίες massive MIMO είναι οι εξής παρακάτω [16]:

3.4.1. SU-MIMO

Το SU-MIMO εμφανίστηκε προαιρετικά το 2007 με το πρότυπο 802.11n και βοήθησε στην αύξηση της ταχύτητας στη μεταφορά δεδομένων μέσω Wi-Fi. Κύρια χρήση της τεχνολογίας αυτής είναι να επιτρέπει την αποστολή και λήψη πολλών ροών δεδομένων μεταξύ όμως μόνο μιας συσκευής κάθε φορά. Επίσης, απαιτεί την ύπαρξη πολλών κεραιών με βασικό μειονέκτημα την αύξηση του μεγέθους, του βάρους και του κόστους μιας συσκευής Wi-Fi. Ακόμη, η επεξεργασία απαιτεί περισσότερους πόρους πράγμα το οποίο αποτελεί ένα ακόμη μειονέκτημα. Ωστόσο, η τεχνολογία MU-MIMO έρχεται να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά της ήδη υπάρχουσας τεχνολογίας [17], [18].

3.4.2 MU-MIMO

Το MU-MIMO εμφανίστηκε με το πρότυπο 802.11ac και βελτίωσε τις δυνατότητες του MIMO. Η αποστολή και λήψη πολλών ροών δεδομένων μεταξύ πολλών συσκευών αντί για μια είναι και η ουσιαστική διαφορά του με το SU-MIMO. Αποτελεί το μέλλον στην τεχνολογία MIMO διότι δημιουργεί ένα αποτελεσματικότερο δίκτυο στο οποίο ο χρήστης μπορεί να έχει μεγαλύτερο όφελος [18].



Εικόνα 11: SU-MIMO vs MU-MIMO

3.4.3 Άλλοι τύποι

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κεραιών και διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας. Μερικά από αυτά είναι τα παρακάτω:

- **SISO:** Ο πομπός και ο δέκτης σε ένα σύστημα έχουν από μια και μόνο κεραία. Είναι απλούστερο από το MIMO διότι αποτελείται από ένα πολύ απλό σύστημα που δεν απαιτεί επεξεργασία. Επιπλέον, χρησιμοποιείται από την ίδρυση του ραδιοφώνου καθώς και σε ασύρματες τεχνολογίες όπως το Bluetooth [20], [21].
- **SIMO:** Ο πομπός έχει μια κεραία και ο δέκτης έχει πολλές κεραίες. Υπάρχουν δυο τύποι SIMO ανάλογα με το μέγεθος, το κόστος και την εξάντληση της μπαταρίας. Ο πρώτος τύπος είναι το Switched Diversity SIMO όπου αναζητά την κεραία που εκπέμπει ισχυρότερο σήμα και ο δεύτερος είναι το Maximum Ratio Combining SIMO ο οποίος παίρνει τα σήματα από τις δυο κεραίες και τα συνενώνει δημιουργώντας ένα συνολικό σήμα [20].
- **MISO:** Ο πομπός έχει πολλές κεραίες και ο δέκτης έχει μόνο μια. Βασικό προτέρημα είναι ότι η κωδικοποίηση μεταφέρεται από το δέκτη στον πομπό το οποίο έχει θετική επίδραση στο κόστος, στο μέγεθος και στη ζωή της μπαταρίας [22].

3.5 Προκλήσεις

Υπάρχουν αρκετές ερευνητικές προκλήσεις που πρέπει να λυθούν πριν το massive MIMO ενσωματωθεί στα μελλοντικά συστήματα ασύρματων δικτύων. Η ανάπτυξη ενός συστήματος με εκατοντάδες ή χιλιάδες κεραίες και τερματικά δεν είναι ακριβώς plug-and-play διότι αυτό απαιτεί πιο προηγμένη ικανότητα επεξεργασίας στους κόμβους. Τα δεδομένα που μεταδίδονται από μία κεραία και τα δεδομένα που μεταδίδονται από μία άλλη θα πρέπει ο κάθε κόμβος να είναι σε θέση να τα προσδιορίσει διαφορετικά η απόδοση του δικτύου θα είναι περιορισμένη.

Για να εφαρμοστεί το massive MIMO πρέπει να αντιμετωπιστούν αρκετές μείζονες προκλήσεις όπως το pilot contamination (πυλωτική μετάδοση). Οι πυλωτικές μεταδόσεις ανάμεσα σε χρήστες της ίδιας κυψέλης μπορούν να γίνονται με χρήση ορθογώνιας σηματοδότησης και να επαναχρησιμοποιούνται από χρήστες άλλων κυψελών εξασφαλίζοντας καθαρότερα κανάλια και μη ανάλωση όλων των πόρων για τις πυλωτικές μεταδόσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την πρόκληση παρεμβολών μεταξύ των πυλωτικών μεταδόσεων ανάμεσα σε διαφορετικές κυψέλες και ως εκ τούτου υποβάθμιση της ποιότητας του καναλιού. Ωστόσο, εξετάζονται διάφοροι μέθοδοι για τη μείωση του ακόμα και την ολοκληρωτική εξάλειψή του μέσω της μείωσης της έντασης συντονισμού μεταξύ των σταθμών βάσης.

Μια ακόμα σοβαρή πρόκληση για την πραγματοποίηση του massive MIMO έχει να κάνει με την αρχιτεκτονική του. Απατούνται ριζικά διαφορετικές δομές σταθμών βάσης όπου θα έχουμε μια μυριάδα από μικροσκοπικές κεραίες τροφοδοτούμενες από ενισχυτές χαμηλής ισχύος αντί των λίγων και υψηλής ισχύος σε τροφοδοσία ενισχυτών για τις κεραίες. Το κόστος, η επεκτασιμότητα και οι συσχετίσεις κεραιών είναι μερικά από τα θέματα που πρέπει να διευθετηθούν καθώς και η ύπαρξη νέων καινοτόμων μορφών τοπολογιών.

Παράλληλα με τα αρχιτεκτονικά ζητήματα υπάρχουν και εκείνα που σχετίζονται με τα μοντέλα του καναλιού τα οποία απαιτούν εκτεταμένες μετρήσεις πεδίου. Οι σταθμοί βάσης που χρησιμοποιούν το massive MIMO θα πρέπει να συνυπάρχουν με τις μικρές κυψέλες του δικτύου. Μια απλή λύση πάνω σε αυτό είναι να διαχωριστούν οι εκπομπές στη συχνότητα. Ο μεγάλος αριθμός των κεραιών στα massive MIMO συστήματα μπορεί να προσφέρει την αποφυγή παρεμβολών με σχετική απλότητα και πολύ μικρή ποινή καθώς και την ευκαιρία του χωρικού μηδενισμού.

Όσο τα δίκτυα γίνονται πυκνά και η κίνηση όλο μεγαλύτερη τόσο ο αριθμός των ενεργών χρηστών ανά κυψέλη θα μειώνεται με αποτέλεσμα η τεχνολογία massive MIMO να περιορίζεται. Είναι μια νέα MIMO τεχνική που προτείνεται για την εφαρμογή χαμηλής πολυπλοκότητας στα συστήματα MIMO χωρίς όμως να υποβαθμίζεται η απόδοση του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα κωδικοποιείται μέρος των δεδομένων για να μεταδίδεται στη χωρική θέση κάθε κεραίας της συστοιχίας κεραιών αντί να γίνεται ταυτόχρονη μετάδοση από πολλαπλές ροές δεδομένων από τις διαθέσιμες κεραίες. Αυτό σε σχέση με τα ασύρματα συστήματα μονής κεραίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση του ρυθμού δεδομένων (χωρική πολυπλεξία). Άλλες κεραίες είναι σε αδράνεια ενώ μόνο μία κεραία εκπομπής είναι ενεργή ανά πάσα στιγμή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κέρδος από τη χρήση αυτή να μπορεί να μετριάσει τρία βασικά προβλήματα: τον συγχρονισμό μεταξύ των κεραιών, τις πολλαπλές RF αλυσίδες και τις διακαναλικές παρεμβολές [15], [24].



Εικόνα 12: Massive MIMO και 5G

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογή της τεχνολογίας Massive MIMO στα συστήματα κινητών επικοινωνιών 5G.

4.1 Η εφαρμογή MIMO σε δίκτυα 5G

Η έννοια MIMO από την ίδρυσή της εξελίχθηκε σε ένα από τα πιο δυνατά ερευνητικά θέματα στις ασύρματες επικοινωνίες καθώς και ένα κύριο αντικείμενο εργασίας στην τυποποίηση 5G. Δύο κύριοι λόγοι υπάρχουν αυτή τη στιγμή σε σχέση με το massive MIMO και το 5G: πρώτον, έχει αποδειχθεί ότι δεν μπορεί να αποδώσει τη φασματική απόδοση η συμβατική τεχνολογία που ζητούν οι εφαρμογές 5G και δεύτερον, έχει τεκμηριωθεί ότι τα εντυπωσιακά πρωτότυπα της πραγματικής ζωής έδειξαν ρεκόρ στη φασματική απόδοση, στην ισχυρή λειτουργία με κυκλώματα RF και στη βασική ζώνη χαμηλής πολυπλοκότητας.

Πράγματι, είναι ευρέως αναμενόμενο ότι το massive MIMO τέθηκε σε λειτουργία μόλις κατέφθασε το 5G και αποτελεί βασικό παράγοντα και βασικό συστατικό. Ένας από τους βασικούς ρόλους είναι να χειρίζεται την τεράστια αύξηση στη χρήση δεδομένων σε όλο τον κόσμο. Εταιρίες εκτιμούν ότι με τη χρήση του 5G θα υπάρξουν 5,5 δισεκατομμύρια χρήστες κινητής τηλεφωνίας σε όλο τον κόσμο οι οποίοι καταναλώνουν 20 GB δεδομένων ανά μήνα. Η massive ικανότητα του MIMO να εξυπηρετεί πολλούς χρήστες ταυτόχρονα με πολλαπλές συσκευές σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή καθιστά την τέλεια τεχνολογία για την αντιμετώπιση των αναγκών της εποχής 5G διατηρώντας γρήγορους ρυθμούς δεδομένων και συνεπή απόδοση στους χρήστες.

Και ενώ το massive MIMO είναι μια βασική τεχνολογία 5G, οι χρήστες δε θα μπορούν να αγοράσουν ένα έξυπνο τηλέφωνο MIMO αν και έχουν ήδη πραγματοποιηθεί δοκιμές με την τρέχουσα προηγμένη τεχνολογία δικτύου 4G LTE διότι θα ήταν άσκοπο χωρίς ένα εμπορικά διαθέσιμο massive δίκτυο εξοπλισμένο με MIMO στο οποίο θα λειτουργούσε. Ωστόσο, πολλά τηλέφωνα μπορούν να επωφεληθούν από το κανονικό MIMO σε τρέχοντα δίκτυα 4G LTE. Ακόμη και μεγάλα ή λιγότερο ικανά κινητά τηλέφωνα που δεν υποστηρίζουν MIMO, θα μπορούν να επωφεληθούν από το πιο σταθερό και ευαίσθητο περιβάλλον δικτύου που θα παράγει το Massive MIMO. Αντίθετα, ακόμη και σε δίκτυα MIMO 2x2, τα τηλέφωνα με υποστήριξη MIMO 4x4 θα είναι ταχύτερα. Με αυτόν τον τρόπο, η απόκτηση ενός έξυπνου τηλεφώνου που υποστηρίζει το MIMO θα έχει εξαιρετική συνδεσιμότητα δικτύου ανεξάρτητα από το περιβάλλον του δικτύου όταν φθάνουν [8], [14].

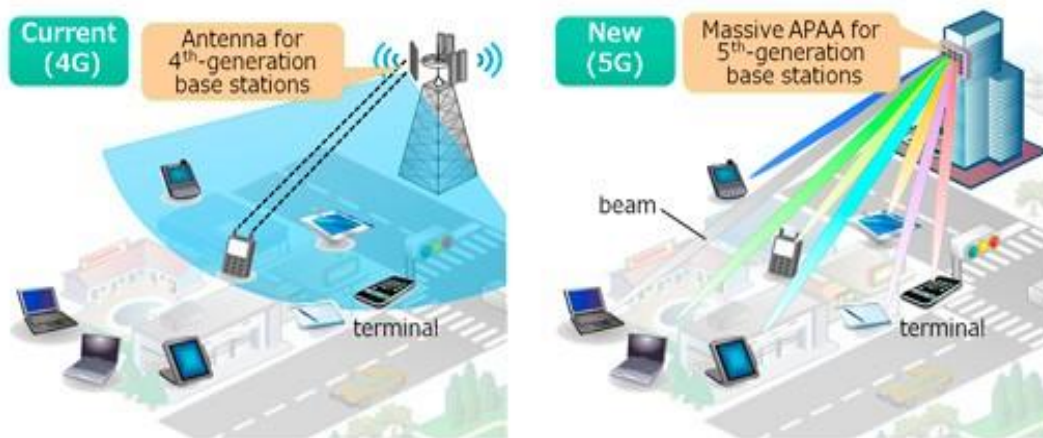
4.2 Χρήση του MIMO στο 5G

Η λειτουργία του 5G θα βασίζεται σε πολλές κεραιές οι οποίες θα είναι τοποθετημένες σε κάθε γεωγραφική περιοχή. Όμως, θα πρέπει να χρησιμοποιείται μεγαλύτερος αριθμός από κεραιές καθώς το σήμα που θα στέλνεται θα είναι της τάξης των mm. Αυτό συνεπάγεται τη μείωση της καθυστέρησης στο δίκτυο και το να μην κατασπαταλάται τόση ενέργεια. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι θα πρέπει να γίνει σύγκριση μεταξύ του 5G και των παλαιότερων δικτύων ώστε να είναι εμφανείς οι διαφορές τους, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Η συμβολή της τεχνολογίας MIMO σε μεγάλο βαθμό και τα παρακλάδια της θα βοηθήσουν στην αύξηση της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και της ταχύτητας των συνδέσεων. Υπάρχουν 3 είδη MIMO τα οποία θα μας απασχολήσουν στα 5G δίκτυα:

Πρώτο είδος είναι το **Cooperative MIMO**: ο πομπός και ο δέκτης έχουν πολλές κεραιές. Χρειάζονται πολλές point to point συνδέσεις μεταξύ ζευξεων αλλά και συνδέσεις με εικονικά σύνολα κεραιών. Οι κεραιές αυτές χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί το βέλτιστο κέρδος που μπορεί να προκύψει από το MIMO. Το μεγάλο κόστος συντήρησης και η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος αποτελούν μειονεκτήματα αυτού του σχήματος.

Ένα δεύτερο είδος MIMO είναι το **mmWave MIMO**: απαιτεί μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων, κύματα της τάξης του mm και ο σχεδιασμός του hardware που θα χρειαστεί θα είναι πιο δύσκολος.

Το τρίτο και σημαντικότερο είδος είναι το **Massive MIMO**: θα χρησιμοποιούνται πολύ μεγάλα σύνολα από κεραιές με ίδιο αριθμό από πομπούς και δέκτες. Από τις κεραιές αυτές θα εκπέμπονται 128 διαφορετικά ρεύματα δεδομένων και κάθε κεραιά θα στέλνει μοναδικό σήμα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να επιτευχθεί αν η συχνότητα που χρησιμοποιείται είναι μικρότερη των 6 GHz και τότε όλα τα ρεύματα δεδομένων θα στέλνονται προς όλους τους χρήστες και θα υπάρχει ταυτόχρονη μείωση της παρεμβολής μεταξύ σημάτων που θα μεταδίδονται σε διαφορετικούς χρήστες [8], [14].



Εικόνα 13: Massive MIMO σε 4G και 5G δίκτυα

4.3 Πλεονεκτήματα massive MIMO

Η massive MIMO τεχνολογία εξαρτάται από τα συνεκτικά σήματα φάσης από όλες τις κεραίες στο σταθμό βάσης. Ωστόσο, η σύνθετη επεξεργασία αυτών των σημάτων είναι απλή. Μερικά από τα θετικά έχουν ως εξής:

- Το massive MIMO βελτιώνει την αποδοτικότητα της ακτινοβολούμενης ενέργειας σε μεγέθη της τάξεως των 100 φορές και ταυτόχρονα μπορεί να αυξήσει τη χωρητικότητα τουλάχιστον 10 φορές γεγονός το οποίο οφείλεται στην τεχνική πολλαπλών χρήσεων που χρησιμοποιείται στα συστήματα massive MIMO. Η ενέργεια μπορεί να συγκεντρωθεί σε μικρές περιοχές του χώρου λόγω της αύξησης του αριθμού των κεραιών όσον αφορά τη βελτίωση της ενεργειακής ακτινοβολίας. Ο σταθμός βάσης δεν έχει κανένα ρόλο στην κορυφή μετά τη μετάδοση των σχηματικών σημάτων από τις κεραίες επιβεβαιώνοντας ότι όλα τα μέτωπα των κυμάτων που έχουν εκτοξευθεί από τις κεραίες πιθανώς θα προστεθούν εποικοδομητικά στις θέσεις των προορισμένων τερματικών. Ο μηδενικός εξαναγκασμός χρησιμοποιείται για την καταστολή της εναπομένουσας παρεμβολής μεταξύ των τερματικών αλλά και εις βάρος της αυξημένης μεταδιδόμενης ισχύος.

Η επιθυμία του μέγιστου συνδυασμού αναλογίας (MRC) είναι περισσότερο σχετιζόμενη με την μηδενική δύναμη (ZF), τα σήματα πολλαπλασιάζονται με τις αποκρίσεις των συζευγμένων καναλιών τους λόγω ότι εκτελείται σε διασκορπισμένη λειτουργία αυτόνομα σε κάθε κεραιά. Η αποτελεσματική χρήση του MRC με massive MIMO που περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό κεραιών σταθμών βάσης είναι οι αποκρίσεις του καναλιού που συνδέονται με διαφορετικά τερματικά και τείνουν να είναι σχεδόν οριζόντια.

- Το massive MIMO μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας φθηνά και χαμηλής ισχύος εξαρτήματα. Τα massive MIMO συστήματα επειδή έχουν μεγαλύτερη ισχύ εξόδου από την περιοχή των milliwatt, μπορούν να χρησιμοποιούν λιγότερους δαπανηρούς ενισχυτές σε σχέση με ακριβούς γραμμικούς ενισχυτές των 50 Watt και είναι πολύ καλύτεροι από τους τελευταίους οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε συμβατικά συστήματα. Καθώς θα χρησιμοποιείται μόνο μια μικρή κεραιά που τροφοδοτείται από ενισχυτές υψηλής ισχύος, θα έχει αναστρέψιμη πρόσκρουση το οποίο και θα είναι αντίθετο σε σχέση με τα συνηθισμένα σχήματα συστοιχιών.
- Το massive MIMO κάνει απλό το πολλαπλό στρώμα προσπέλασης. Με την άφιξη του δεν επαρκεί η ισχύς του καναλιού και ο προγραμματισμός της περιοχής συχνοτήτων. Το OFDM παρέχει κάθε φορέα σε ένα τεράστιο σύστημα MIMO με το ίδιο ακριβώς κέρδος καναλιού. Λόγω αυτού, μειώνοντας το μεγαλύτερο μέρος του σήματος ελέγχου φυσικής στρώσης που έχει οριστεί, κάθε τερματικό μπορεί να εφοδιαστεί με πλήρες εύρος ζώνης.
- Το massive MIMO επιτρέπει όταν το σήμα μεταδίδεται στον αέρα να υπάρχει σημαντική μείωση της καθυστέρησης. Στην ασύρματη επικοινωνία, η εξασθένιση είναι η κύρια αιτία της αστάθειας. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει ανάμεσα στη βάση και το τερματικό όταν το σήμα δηλαδή μεταδίδεται από τον σταθμό βάσης, ταξιδεύει διαμέσου διαφορετικών πολλαπλών διαδρομών λόγω του διασκορπισμού, της απόφραξης και της διάχυσης προτού φτάσει στο τερματικό.
- Με την προσθήκη πολλαπλών κεραιών εξυπηρετούνται μεγαλύτερες ποσότητες δεδομένων διότι επιφέρουν ένα μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας. Όμως, για να επιτύχουμε την αξιοπιστία, τη φασματική απόδοση και την ενεργειακή απόδοση των δικτύων χρήζει σημαντική βελτίωση. Η massive MIMO τεχνολογία κατάφερε να επιφέρει τεράστιες βελτιώσεις στη φασματική και ενεργειακή απόδοση χωρίς την ανάγκη για αύξηση σταθμών βάσης.

Με χρήση της massive MIMO τεχνολογίας επιτυγχάνεται η εξαφάνιση της γρήγορης εξασθένισης του σήματος και των επιπτώσεων θορύβου ενώ χρησιμοποιώντας μεθόδους απλής γραμμικής αποκωδικοποίησης και ανίχνευσης, οι παρεμβολές στα πλαίσια μιας κυψέλης μπορούν να μετριαστούν. Τα συστήματα εκπομπής και λήψης των δεδομένων είναι όλο ένα και λιγότερο πολύπλοκα λόγω φύσεως των καναλιών μεταξύ σταθμών βάσης και χρήσης της ίδιας πηγής σηματοδότησης από ένα πλήθος χρηστών. Όσο ο αριθμός των κεραιών μεγαλώνει τόσο η ορθογωνιότητα του σήματος αυξάνεται και τόσο πιο βέλτιστα λειτουργούν οι απλοί γραμμικοί πομποδέκτες και οι διαμορφωτές του σήματος ανά χρήστη [18], [23].

4.4 Μειονεκτήματα massive MIMO

Πέρα από τα πλεονεκτήματα, η τεχνολογία massive MIMO έχει και αρκετά μειονεκτήματα. Κάποια από αυτά είναι τα εξής:

- Οι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος δηλαδή η πολυπλοκότητα του λογισμικού είναι εξοντωτική για τους πόρους και την απόδοση του συστήματος.
- Η επιπλέον χρήση κεραιών δηλαδή η πολυπλοκότητα του υλικού επιβαρύνει αρνητικά με επιπρόσθετα RF chains την κεραία μιας και κάθε κεραία χρειάζεται μία αρκετά ισχυρή υπολογιστική μονάδα επεξεργασίας σήματος.
- Οι πόροι υλικού αυξάνουν τις απαιτήσεις ισχύος. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών μειώνεται καθώς διοχετεύεται πιο γρήγορα χάρη στην επεξεργασία σύνθετων και υπολογιστικών εντατικών αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος.
- Το κόστος των συστημάτων είναι υψηλότερο συγκριτικά με άλλα συστήματα με βάση μία κεραία [19], [23].

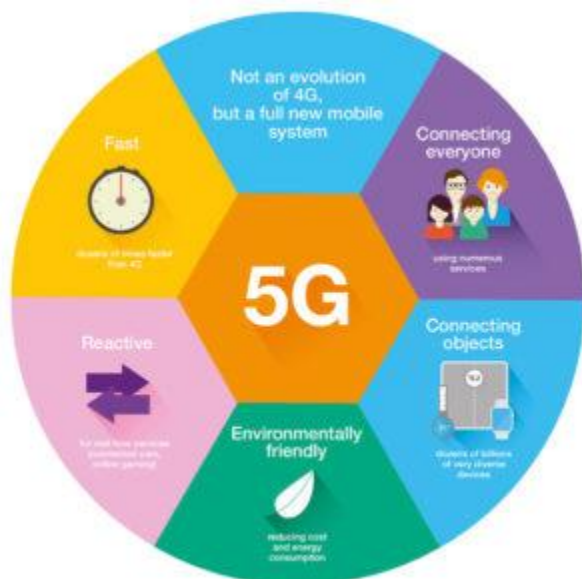
Κεφάλαιο 5

Σύγχρονες εξελίξεις.

5.1 Η τεχνολογία MIMO και 5G στο μέλλον

Μια από τις κυριότερες προσφορές του massive MIMO στο μέλλον είναι οι βελτιωμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες. Τα δίκτυα 5G αναμένεται να υποστηρίξουν μια μεγάλη ποικιλία ασύρματων υπηρεσιών σε τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, τα έξυπνα σπίτια και οι έξυπνες πόλεις καθώς και η έξυπνη γεωργία και πολλά άλλα. Επίσης, η massive MIMO τεχνολογία μπορεί να προσαρμοστεί για να υποστηρίξει έναν τεράστιο αριθμό συσκευών επικοινωνίας τύπου μαζικής μηχανής (MTC).

Η επόμενη γενιά ασύρματων δικτύων δεδομένων 5G πρέπει να αντιμετωπίζει τις υφιστάμενες προκλήσεις όπως την αξιοπιστία του δικτύου, την κάλυψη, την ενεργειακή απόδοση και την καθυστέρηση καθώς και τους μελλοντικούς περιορισμούς της χωρητικότητας. Το MIMO, προσφέρει σημαντικά κέρδη στις ασύρματες ταχύτητες δεδομένων και την αξιοπιστία των συνδέσμων. Επιπλέον, επιτρέπει χωρίς να προκαλεί παρεμβολές ή να καταναλώνει ραδιοφάσμα, την κατανάλωση δεδομένων από περισσότερους χρήστες σε πυκνές περιοχές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση των νεκρών ζωνών και καλύτερη ποιότητα μετάδοσης δεδομένων καθώς και λιγότερες μειωμένες κλήσεις χωρίς να διαχέεται το αδύνατο ραδιοφάσμα [8], [24].



Εικόνα 14: MIMO και 5G ΔΙΚΤΥΑ

5.2 Αναδυόμενες τεχνολογίες στα ασύρματα δίκτυα 5G και MIMO

Στο άμεσο μέλλον, ο όγκος της κινητής και ασύρματης κίνησης πρόκειται να αυξηθεί κατά ένα μεγάλο αριθμό πράγμα το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι περίπου 50 δισεκατομμύρια συσκευές θα υπάρχουν συνδεδεμένες στο δίκτυο με αποτέλεσμα όλοι οι χρήστες θα πρέπει να μοιράζονται δεδομένα παντού και πάντα. Ωστόσο, ορισμένες προκλήσεις θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με αυτή τη γρήγορη αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών. Η αύξηση της χωρητικότητας και η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, το κόστος και η χρήση του φάσματος καθώς και η καλύτερη δυνατότητα κλιμάκωσης για τον αυξανόμενο αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών είναι ορισμένα από τα χαρακτηριστικά που θα βοηθήσουν την κατάσταση αυτή.

Για να γίνει πραγματικότητα το όραμα του παγκόσμιου επικοινωνιακού κόσμου σε σχέση με το σημερινό δίκτυο, θα πρέπει το σύστημα να υποστηρίζει τα εξής:

- 10 έως 100 φορές αύξηση των δεδομένων των χρηστών
- 10 έως 100 φορές μεγαλύτερη αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών
- 1000 φορές μεγαλύτερη αύξηση στον όγκο δεδομένων ανά περιοχή
- 5 φορές μειωμένη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο
- 10 φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας σε συσκευές με χαμηλή κατανάλωση.

Για να δοθεί μια βάση η οποία θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις του δικτύου 5G και θα παρέχει εφαρμογές κατάλληλες στους χρήστες, θα πρέπει να μελετηθούν τα εξής:

- **Ραδιο-συνδέσεις:** περιλαμβάνουν τη διαχείριση ραδιοφωνικών πόρων και τη δημιουργία νέων κυματομορφών μετάδοσης.
- **Χρήση του φάσματος:** περιλαμβάνει τη λειτουργία σε νέα φάσματα καθώς και την εξέταση της εκτεταμένης ζώνης λειτουργίας του φάσματος.

- **Η διάσταση του δικτύου:** για την αποτελεσματική διαχείριση παρεμβολών σε πολύπλοκες διαφορετικές αναπτύξεις περιλαμβάνει την έκταση, τη διαχείριση της κυκλοφορίας και την κινητικότητα καθώς και την εξέταση της ζήτησης των καινοτόμων προσεγγίσεων.

- **Μεταδόσεις πολλαπλών κεραιών και κόμβων:** περιλαμβάνουν σχεδιασμό τεχνολογιών μετάδοσης και λήψης ενός μεγάλου όγκου κεραιών όπου αναπτύσσονται προηγμένα συστήματα συντονισμού μεταξύ των κόμβων τα οποία βασίζονται σε πολλαπλές διαμορφώσεις κεραιών.

Για να ολοκληρωθούν και να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί, υπάρχουν οι εξής λύσεις:

- **Device-to-Device (D2D) επικοινωνίες:** συσκευές οι οποίες αναφέρονται στην άμεση επικοινωνία μεταξύ συσκευών.

- **Massive Machine Communications (MMC):** μαζικές μηχανές επικοινωνίας οι οποίες θα αποτελέσουν τη βασική πλατφόρμα του Διαδικτύου με διάφορα πεδία εφαρμογής όπως ο ιατρικός τομέας, η δημόσια ασφάλεια και η αυτοκινητοβιομηχανία.

- **Τα εξαιρετικά αξιόπιστα δίκτυα (URN):** θα επιτρέψουν υψηλούς βαθμούς διαθεσιμότητας.

- **Τα εξαιρετικά πυκνά δίκτυα (UDN):** έχουν ως στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και της δυναμικότητας.

- **Τα μετακινούμενα δίκτυα (MN):** θα επεκτείνουν και θα ενισχύουν τη σύνδεση μεγάλων πληθυσμών με κοινές συσκευές επικοινωνίας [8], [15].



Εικόνα 15: 5G Wireless

5.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Οι αλλαγές στις τεχνολογίες που αφορούν νέους τύπους συσκευών και συστημάτων που εκτελούν θα είναι ραγδαίες τις επόμενες δεκαετίες. Οι νέες εφαρμογές θα έχουν ποικίλες απαιτήσεις όπως ρομπότ με ανθρώπινη μορφή, μικροσκοπικά τερματικά IoT, άμεση παράδοση και κίνηση δεδομένων και απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση καθώς και πλήρως αυτόνομα συστήματα μεταφοράς τα οποία θα παρέχουν ακόμη πιο στενή ενσωμάτωση της επικοινωνίας και της τεχνολογίας με την ανθρώπινη ζωή και θα είναι συνδεδεμένα και εξοπλισμένα με ευφυΐα. Ωστόσο, για να επιτευχθούν όλα αυτά, θα απαιτηθεί η ανάπτυξη μιας νέας αρχιτεκτονικής η οποία θα είναι ικανή να ικανοποιήσει τις νέες απαιτήσεις. Νέες ομάδες έχουν ξεκινήσει ήδη να προτείνουν δίκτυα της επόμενης γενιάς όπως το 6G.

Η πλήρως αυτόνομη οδήγηση, τα έξυπνα διαχειρισμένα δίκτυα ενέργειας, η δημιουργία και προβολή περιεχομένου σε πραγματικό χρόνο και οι ασύρματες ρομποτικές εγκαταστάσεις στη βιομηχανία είναι μερικές από τις καινοτομίες που προτείνει το Tactile Internet. Σκοπός είναι η μελέτη των μελλοντικών δικτύων περίπου κατά την περίοδο 2025-2035 η οποία στοχεύει να ασχοληθεί με το είδος της αρχιτεκτονικής δικτύου και τους μηχανισμούς που είναι κατάλληλοι για τέτοιου είδους καινοτόμα σενάρια.

Το μελλοντικό δίκτυο το οποίο θα πραγματοποιηθεί με τη διερεύνηση μηχανισμών επικοινωνίας που δεν περιορίζονται μόνο στις υπάρχουσες έννοιες από συγκεκριμένες τεχνολογίες θα ονομάζεται Network-2030 το οποίο θα βασιστεί σε ένα νέο επίπεδο δικτύου ή σε νέα αρχιτεκτονική δικτύου για τη μεταφορά πληροφοριών με τρόπο που θα εξελίξει και θα βελτιώσει τα υφιστάμενα δίκτυα ή αρκετά από τα υπάρχοντα. Η FG-NET-2030, θα διερευνήσει τη μελλοντική δομή του δικτύου, τις περιπτώσεις χρήσης και τις δυνατότητες στα δίκτυα για το 2030 καθώς και τις απαιτήσεις ως πλατφόρμα για τη μελέτη και την προώθηση διεθνών τεχνολογιών δικτύωσης [8], [24].

Συμπεράσματα

Οι τεράστιες ταχύτητες και η μεγάλη χωρητικότητα είναι δυο από τα βασικότερα χαρακτηριστικά που πρόκειται να προσφέρει η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας της νέας γενιάς 5G. Αυτό σημαίνει ότι θα υποστηρίζεται η παράλληλη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών ταυτοχρόνως όπου και να βρίσκονται και συγκεκριμένα δεν θα υπάρχει ελάττωση της ταχύτητας με την οποία περιηγείται ο κάθε χρήστης στο Διαδίκτυο. Οι ερευνητές μετά από μελέτες και πειράματα έχουν καταλήξει πως το MIMO αποτελεί την πλέον κατάλληλη τεχνολογία του αύριο ώστε να επιτευχθούν οι απαραίτητες βάσεις για το μέλλον του 5G. Η μέθοδος Beam Division Multiple Access (BDMA) είναι αυτή που θα βοηθήσει το MIMO να αυξήσει την χωρητικότητα του αντίθετα με άλλες τεχνικές όπως το TDMA και το FDMA τα οποία παρέχουν περιορισμένο χώρο και ελαττωμένη συχνότητα. Τα συστήματα θα παρέχουν πολύ χαμηλό bit-error-rate όταν επιτευχθεί η μέθοδος υπολογισμού του καναλιού στα MIMO συστήματα και έτσι κάνοντας χρήση του MIMO, η απόδοση θα αυξάνεται σημαντικά και η χωρητικότητα θα μεγαλώνει. Ωστόσο, οι ειδικοί βρίσκονται όλο και πιο κοντά στο να ξεπεραστούν τα προβλήματα και οι δυσλειτουργίες που εμπεριέχει το MIMO πράγμα το οποίο σημαίνει ότι βρισκόμαστε μπροστά σε ένα σπουδαίο μέλλον όσον αφορά τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες μίας και η MIMO αποτελεί ένα είδος τεχνολογίας με πολύ χαμηλό κόστος πράγμα που την κάνει ακόμα περισσότερο προσιτή.

Συνοψίζοντας, το massive MIMO μπορεί να προσφέρει βελτιωμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες στο μέλλον. Τα δίκτυα 5G αναμένεται να υποστηρίξουν μια μεγάλη ποικιλία ασύρματων υπηρεσιών σε διάφορους τομείς ξεκινώντας από τη διασκέδαση έως και την υγειονομική περίθαλψη, τα έξυπνα σπίτια καθώς και την αυτοκίνηση. Επιπλέον, η τεχνολογία massive MIMO μπορεί να προσαρμοστεί για να υποστηρίξει έναν τεράστιο αριθμό συσκευών επικοινωνίας τύπου massive μηχανής (Massive Machine - Type Communications).



Εικόνα 16: Το μέλλον του 5G, Massive MIMO

Επίλογος

Η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιείται σε πολλές τεχνολογίες εκ των οποίων βασική είναι το 4G δίκτυο, το 5G δίκτυο και έχουν τεθεί και οι βάσεις για την αξιοποίησή του και σε επόμενες γενιές. Σκοπός της εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας είναι η αύξηση της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος πέρα από την υψηλή ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές που αφορούν το χρόνο, το χώρο και τη συχνότητα. Επιπλέον, το MIMO εφαρμόζει αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος στα σύμβολα που λαμβάνει ο δέκτης από πολλές κεραιές καθώς συμβάλλει στην ελάττωση του BER. Η υψηλή ποιότητα υπηρεσιών που προσφέρεται είναι ένα ακόμη στοιχείο γιατί η φασματική απόκριση είναι μεγαλύτερη και μπορεί να εξυπηρετήσει μεγάλο αριθμό συνδρομητών μέσα σε μια γεωγραφική περιοχή. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται ακόμα και σε Wi-Fi συσκευές δηλαδή σε συσκευές που συμβαδίζουν με το πρότυπο 802.11n αλλά ακόμα και στο home networking standard ITU-T G.9963 δηλαδή σε τηλεπικοινωνίες που δεν είναι ασύρματες. Ωστόσο, υπάρχουν και δυσκολίες που αφορούν την υλοποίηση της τεχνολογίας αυτής. Η πρώτη και βασική είναι η ανάγκη για υλοποίηση hardware και software που θα την υποστηρίζουν και σίγουρα είναι πολύ απαιτητικά συγκριτικά με τα συστήματα μονής κεραιάς και αυτό συμβαίνει διότι εφαρμόζονται προηγμένοι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος που είναι πιο περίπλοκοι με αποτέλεσμα αυτό να οδηγεί σε κατανάλωση ενέργειας από το hardware. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι το κόστος και στην περίπτωση αυτή είναι αυξημένο λόγω των ιδιαίτερων απαιτήσεων.

Το 5G αποτελεί μια συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία η οποία μπορεί να προσφέρει μεγάλη χωρητικότητα και μεγάλες ταχύτητες με αποτέλεσμα ο κάθε χρήστης να έχει την ίδια ταχύτητα και να μην υπάρχει ελάττωσή της από όπου κι αν βρίσκεται. Επιπλέον, η τεχνολογία MIMO είναι χαμηλή σε κόστος και έτσι την κάνει πιο προσιτή. Ορισμένες βασικές αναδυόμενες τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ασύρματα δίκτυα 5G για να ικανοποιήσουν τις βασικές ανάγκες απόδοσης όπως για παράδειγμα το massive MIMO. Τέλος, παρατηρείται ότι πέρα από κάποια προβλήματα που θα πρέπει να επιλυθούν, το μόνο σίγουρο είναι ότι οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες έχουν μεγάλο μέλλον.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] R. N. Mitra and D. P. Agrawal, "5G Mobile Technology: A Survey," ICT Express, Vol.1, Issue.3, pp. 132-137, Dec 2015.
- [2] Κωνσταντίνου Φ. Κανάτας Α. Πάντος Γ, Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [3] Δημήτριος Β. Ζωγράφος. "Αρχιτεκτονικές και ασφάλεια δικτύων 5ης γενιάς". Μεταπτυχιακή Διατριβή, Αθήνα Νοέμβριος 2018.
- [4] The Institution of Engineering and Technology (2017). "5G Wireless Technologies". Angeliki Alexiou, IET Telecommunication Series 69.
- [5] Amy Nordrum, Kristen Clark (2017, January 27) "Everything you need to know about 5G". IEEE Spectrum magazine.
- [6] Δημήτριος Κ. Ντάικος. "Σχεδίαση και υλοποίηση κεραιών πολλαπλών εισόδων – εξόδων (MIMO) για συστήματα ασύρματων επικοινωνιών με χρήση της τεχνολογίας των μεταυλικών". Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη Δεκέμβριος 2013.
- [7] P. Viswanath and D. N. C. Tse, Sum capacity of the vector Gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality, IEEE Trans. Inf.Theory, vol. 49, no. 8, pp. 1912-1921, Aug. 2003.
- [8] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, February 2014.
- [9] Emil Björnson, Jakob Hoydis and Luca Sanguinetti (2017). "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency". Foundation and Trends in Signal Processing: Vol. 11, No. 3-4, pp 154–655.
- [10] V. Stankovic and M. Haardt, Generalized design of multiuser MIMO precoding matrices, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, pp. 953-961, Mar. 2008.

URLs

- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>
- [12] <http://estia.hua.gr/file/lib/default/data/17888/theFile>
- [13] www.tutorialspoint.com/5g/5g_architecture.htm
- [14] https://blogs.keysight.com/blogs/inds.entry.html/2020/02/19/what_is_5g_massivem-xcZq.html
- [15] <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>
- [16] <https://ieeexplore.ieee.org/document/7402270?denied>
- [17] <https://www.lairdconnect.com/support/faqs/whats-difference-between-su-mimo-and-mu-mimo>
- [18] <http://techgenix.com/mu-mimo-vs-su-mimo-wi-fi/>
- [19] <https://www.howtogeek.com/242793/what-is-mu-mimo-and-do-i-need-it-on-my-router/>
- [20] <https://www.edgefx.in/multiple-input-and-multiple-output-mimo-wireless-communications/>
- [21] <http://www.conniq.com/WiMAX/mimo-01.htm>
- [22] <http://www.conniq.com/WiMAX/mimo-02.htm>
- [23] <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and%20Disadvantages-of-MIMO.html>
- [24] [Massive MIMO for 5G - IEEE Future Networks](#)
- [25] <https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>