



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**& ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΞΑΜΗΝΟΥ**

*ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ*

**<ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ>**

---

---

*<MU-MIMO>*

---

---

**<ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΜΑΝΕΣΗΣ>**

**A.M <1054366>**

*ΔΙΔΑΣΚΩΝ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΜΠΟΥΡΑΣ*

**ΠΑΤΡΑ 2020**



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

---

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	<b>I</b>
<b>ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ</b> .....	<b>3</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: &lt;ΕΙΣΑΓΩΓΗ&gt;</b> .....	<b>5</b>
<i>1.1&lt;ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΜΙΜΟ&gt;</i> .....	<b>5</b>
<i>1.2&lt; ΜΙΜΟ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΔΙΚΤΥΑ &gt;</i> .....	<b>8</b>
1.2.1<ΜΙΜΟ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ 4G>.....	9
1.2.2<ΜΙΜΟ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ WI-FI> .....	9
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: &lt;ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΙΜΟ&gt;</b> .....	<b>11</b>
<i>2.1&lt; MASSIVE ΜΙΜΟ &gt;</i> .....	<b>11</b>
<i>2.2&lt;SU-MIMO&gt;</i> .....	<b>12</b>
<i>2.3&lt;MU-MIMO&gt;</i> .....	<b>13</b>
<i>2.4&lt;ΑΛΛΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ&gt;</i> .....	<b>14</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: &lt;ΜU-MΙΜΟ&gt;</b> .....	<b>16</b>
<i>3.1&lt;ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ&gt;</i> .....	<b>16</b>

<b>3.2&lt;ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ&gt;</b> .....	<b>17</b>
<b>3.3&lt;ΣΥΓΚΡΙΣΗ SU-MIMO VS MU-MIMO &gt;</b> .....	<b>20</b>
<b>3.4&lt;ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ&gt;</b> .....	<b>22</b>
<b>3.5&lt;ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ&gt;</b> .....	<b>22</b>
<b>3.6&lt;ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ&gt;</b> .....	<b>24</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: &lt;Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ MU-MIMO&gt;</b> .....	<b>25</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>26</b>

# ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

---

- BD: Block Diagonalization
- BS: Base Station
- CDMA: Code Division Multiple Access
- CSI: Channel State Information
- DPC: Dirty Paper Coding
- FDD: Frequency Division Duplex
- HSPA: High Speed Packet Access
- ISI: Intersymbol Interference
- LAN: Local Area Network
- LTE: Long Term Evolution
- Mbps: Mega Bit Per Second
- MIMO: Multiple Input Multiple Output
- MISO: Multiple Input Single Output
- MMSE -SIC: Minimum Mean Squared Error- Soft Interference Cancellation
- MUI: Multi User Interference
- MU-MIMO: Multiple User Multiple Input Multiple Output
- MU-MIMO BC : Multiple User Multiple Input Multiple Output Broadcast Channel
- MU-MIMO MAC: Multiple User Multiple Input Multiple Output Multiple Access Channel
- OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- OPUS: Orthogonality Probing based User Selection

- SIMO: Single Input Multiple Output
- SISO: Single Input Single Output
- SU-MIMO: Single User Multiple Input Multiple Output
- TDD: Time Division Duplex
- TDMA: Time Division Multiple Access
- WI-FI: Wireless Fidelity

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: <ΕΙΣΑΓΩΓΗ>

---

## 1.1<ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΜΙΜΟ>

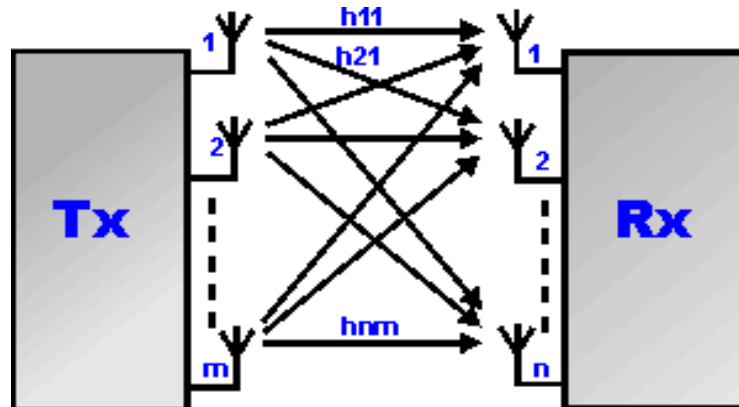
Το MIMO (Multiple Input Multiple Output) είναι η σημαντικότερη ασύρματη τεχνολογία, καθώς με την αύξηση των χρηστών αναζητούνται τεχνικές αποτελεσματικότερης εκμετάλλευσης του διαθέσιμου εύρου ζώνης. Μια τέτοια τεχνική είναι το MIMO. Αποτελεί ένα κανάλι επικοινωνίας, το λεγόμενο multipath, που χρησιμοποιεί πολλές κεραιές ανάμεσα σε έναν πομπό και έναν δέκτη, έτσι ώστε να μεταφέρεται πληθώρα σημάτων μέσα από ξεχωριστές διαδρομές για κάθε κεραία. Η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας ξεκίνησε τη δεκαετία του 1990 και πλέον έχει εξελιχθεί σε τέτοιο βαθμό που αποτελεί βασικό κομμάτι στο τομέα των τηλεπικοινωνιών. Η χρησιμότητα του MIMO γίνεται πιο φανερή στα δίκτυα LTE και στα μεταγενέστερα καθώς και στο δίκτυο WI-FI. Όμως χρειάστηκαν νέα επίπεδα επεξεργασίας για να μπορούν να είναι αξιοποιήσιμα τα χαρακτηριστικά αυτά [1],[2].

Ουσιαστικά η τεχνολογία MIMO βελτιώνει την χωρητικότητα, την ταχύτητα και την εμβέλεια του δικτύου που εφαρμόζεται. Μπορεί να πετύχει υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, χωρίς να είναι απαραίτητα το μεγαλύτερο εύρος ζώνης και η ισχύς. Παρ' όλα αυτά ακόμα υπάρχουν τρόποι ένα κανάλι να επηρεαστεί και να υποβαθμιστεί η ποιότητα του σήματος του. Για το λόγο αυτό υπάρχει η «ποικιλομορφία», η οποία περιορίζει την πιθανότητα σφάλματος. Κάποιες από τις ποικιλομορφίες είναι η χρονική ποικιλομορφία (Time Diversity), η ποικιλομορφία συχνότητας (Frequency Diversity) και η χωρική ποικιλομορφία (Spatial Diversity) [1],[2].

Πιο συγκεκριμένα το Time Diversity επιτρέπει σε ένα σήμα να μεταδοθεί σε διαφορετικούς χρόνους και με διαφορετική κωδικοποίηση καναλιού. Το Frequency Diversity δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές συχνότητες και τέλος το Spatial Diversity χρησιμοποιείται ως βάση για τη τεχνολογία MIMO, καθώς χρησιμοποιεί κεραιές σε διάφορες τοποθεσίες για να εκμεταλλευτεί όλες τις διαδρομές που μπορεί να ακολουθήσει ένα σήμα. Μια ακόμη βασική μορφή του MIMO πέρα από τη Χωρική Ποικιλομορφία, είναι η Χωρική Πολυπλεξία (Spatial

Multiplexing), στην οποία ένα σήμα που έχει ψηλό ρυθμό, χωρίζεται σε ροές με χαμηλότερο ρυθμό και μεταφέρεται από διαφορετικές κεραιές. Αποτελεί κύρια μέθοδο για την αύξηση της χωρητικότητας, αλλά και για την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων σε πολλαπλούς δέκτες [1],[2].

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας MIMO σε σχέση με τη τεχνολογία SISO είναι πολλαπλά. Όπως προαναφέρθηκε βελτιώνεται η ταχύτητα μετάδοσης ροών δεδομένων, καθώς όμως και η ποιότητα των μεταφερόμενων δεδομένων. Επιπλέον εξαλείφεται ένα φαινόμενο που είναι αρκετά συνηθισμένο στη μετάδοση ροών δεδομένων, που είναι το ξεθώριασμα, ή η απώλεια του μεταφερόμενου δεδομένου. Επίσης η τεχνολογία MIMO έχει θετική επίδραση και στον Ραδιοφωνικό τομέα, καθώς του επιτρέπει να έχει πιο ισχυρό σήμα. Τέλος η θετική επίδραση του MIMO αυξάνεται ακόμη περισσότερο σε αστικά περιβάλλοντα, γιατί παρέχονται πολλές διαδρομές ανάκλασης και επιλύεται το πρόβλημα της υποβάθμισης του σήματος μεταξύ μεμονομένων κεραιών [11].



Εικόνα 1. Περιγραφή του συστήματος MIMO [1]

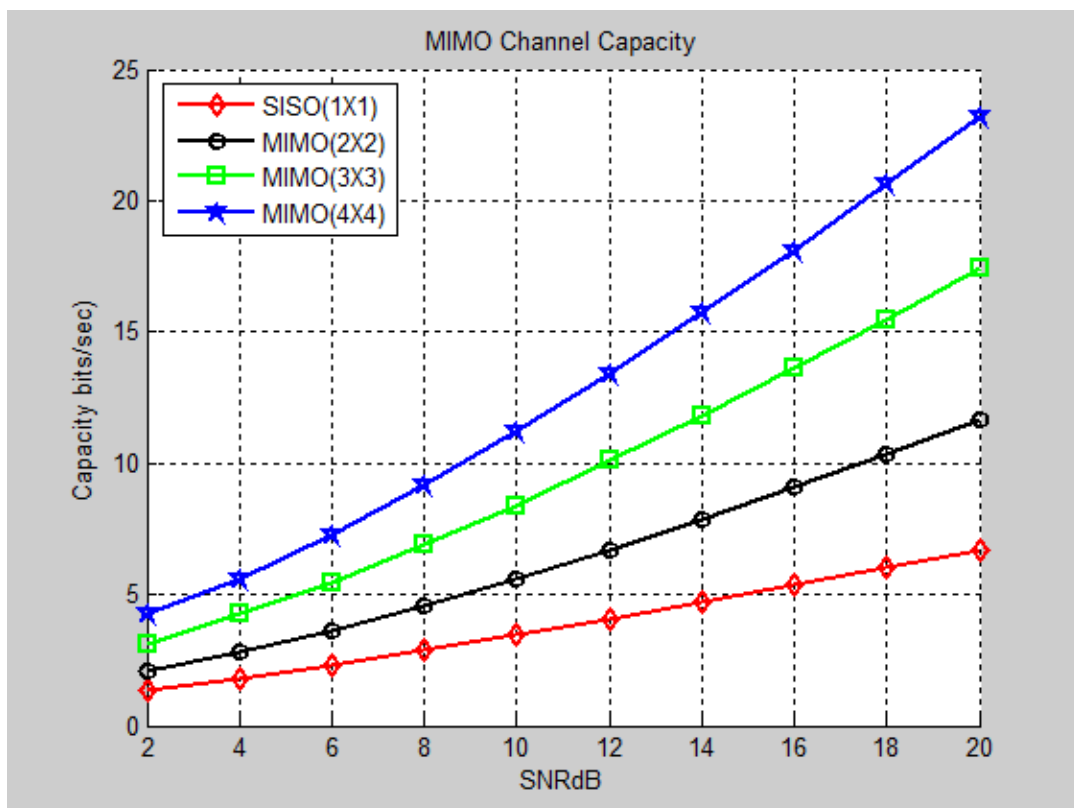


### Συνηθισμένες Διαμορφώσεις MIMO

Όπως έχουμε προαναφέρει τα συστήματα MIMO χρησιμοποιούν πολλές κεραιές για την αποστολή και τη λήψη δεδομένων. Την ποσότητα των κεραιών αυτών την καθορίζει ο κατασκευαστής 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

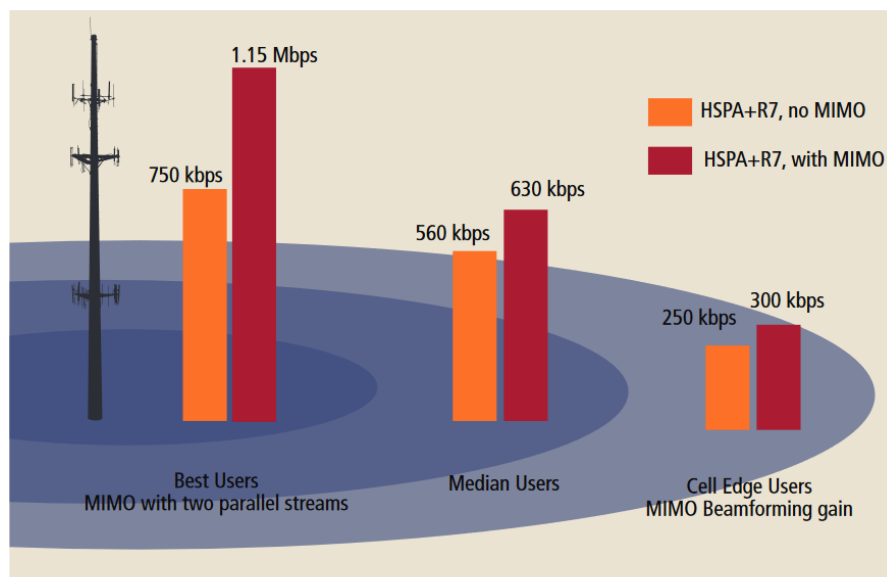
Πρέπει να σημειωθεί ότι η ποσότητα των κεραιών δείχνει το πόσες μεταδόσεις ροών δεδομένων μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα. Όμως μελέτες έχουν δείξει ότι ο μεγαλύτερος αριθμός κεραιών, δεν ισούται πάντα με καλύτερη απόδοση[11].



Εικόνα 2. Αναλογία capacity/SNRdb για τις διαμορφώσεις MIMO[34]

## 1.2< MIMO ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΔΙΚΤΥΑ >

Όπως έχει προαναφερθεί η τεχνολογία MIMO που πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1990, έφερε επανάσταση στον τρόπο μετάδοσης σημάτων στις τηλεπικοινωνίες. Οι τηλεφωνικοί πάροχοι με την αύξηση των χρηστών έψαχναν τρόπο να αυξήσουν τη χωρητικότητα του δικτύου με τρόπο αποδοτικό. Έτσι δεν άργησε να έρθει η τεχνολογία αυτή στα δίκτυα HSPA και στα μεταγενέστερα. Το MIMO έπαιξε πρωταρχικό ρόλο στην εξέλιξη του δικτύου HSPA, αφού από ταχύτητες 28Mbps στην έκδοση 7 του HSPA+, κατάφερε να φτάσει τα 168Mbps στην έκδοση 10 το HSPA+. Επιπλέον εκτός της αυξημένης ταχύτητας οι χρήστες απολάμβαναν βελτιωμένη εμπειρία χρήσης, καθαρότερες κλήσεις, χωρίς θόρυβο δηλαδή, αλλά και αυξημένη κάλυψη δικτύου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η διαφορά στην ταχύτητα που δημιούργησε η είσοδος της τεχνολογίας MIMO στο δίκτυο 3G [3].



Source: Qualcomm Simulation. NGMN D1 500m ISD with 10 users per cell. MMSE Equalizer. Shows data throughput for the median, 10% best and the 5% worst (cell edge) users.

**Εικόνα 3. Πίνακας ταχυτήτων με/χωρίς MIMO[3]**

### **1.2.1<MIMO ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ 4G>**

Μετά την επιτυχία της τεχνολογίας MIMO στο δίκτυο 3G δεν υπήρχε αμφιβολία ότι θα χρησιμοποιηθεί και στο δίκτυο 4G. Οι τρόποι με τους οποίους εφαρμόστηκε η τεχνολογία κεραιάς MIMO στο 4G είναι πολλοί. Ένας από αυτούς είναι το Transmit Diversity, με το οποίο χρησιμοποιούνται 2 ή 4 κεραιές, στην περίπτωση του LTE, για τη μετάδοση της ίδιας πληροφορίας. Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιεί κωδικοποίηση Space Block Frequency Code για τις πληροφορίες και παρέχει βελτίωση στην απόδοση και στην ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων. Επίσης χρησιμοποιούνται τα Open loop Spatial Multiplexing και το Closed Loop Spatial Multiplexing, τα οποία ασχολούνται με τη μεταφορά και τον διαχωρισμό των ροών δεδομένων. Μια ακόμη σημαντική λειτουργία που χρησιμοποιείται στα MIMO σε δίκτυα 4G είναι το Beamforming. Αποτελεί την πιο περίπλοκη διαδικασία και στόχος είναι να μειώσει τις παρεμβολές και να αυξήσει τη χωρητικότητα του δικτύου. Τέλος χρησιμοποιείται η τεχνολογία mu MIMO με την οποία ένα σύστημα στοχεύει διαφορετικές ροές δεδομένων σε διαφορετικούς χρήστες [4].

### **1.2.2<MIMO ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ WI-FI>**

Η τεχνολογία MIMO στα δίκτυα WI-FI εντάχθηκε το 2009 με την έκδοση 802.11n. Στις προηγούμενες εκδόσεις χρησιμοποιούνταν η τεχνολογία DSSS και η τεχνολογία OFDM. Η είσοδος της τεχνολογίας MIMO αύξησε την φασματική απόδοση, αλλά και την αξιοπιστία στα δίκτυα WI-FI. Με τις τεχνικές «Spatial Multiplexing» και «Spatial Diversity» μπορούσαν να μεταφερθούν ταυτόχρονα περισσότερες ροές και αυξήθηκε η αξιοπιστία. Τα πρότυπα 802.11n/ac μπορούν και υποστηρίζουν και υβριδικές λειτουργίες. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διαφορές που υπάρχουν στις εκδόσεις του 802.11 [5].

# The IEEE 802.11 Standards Family

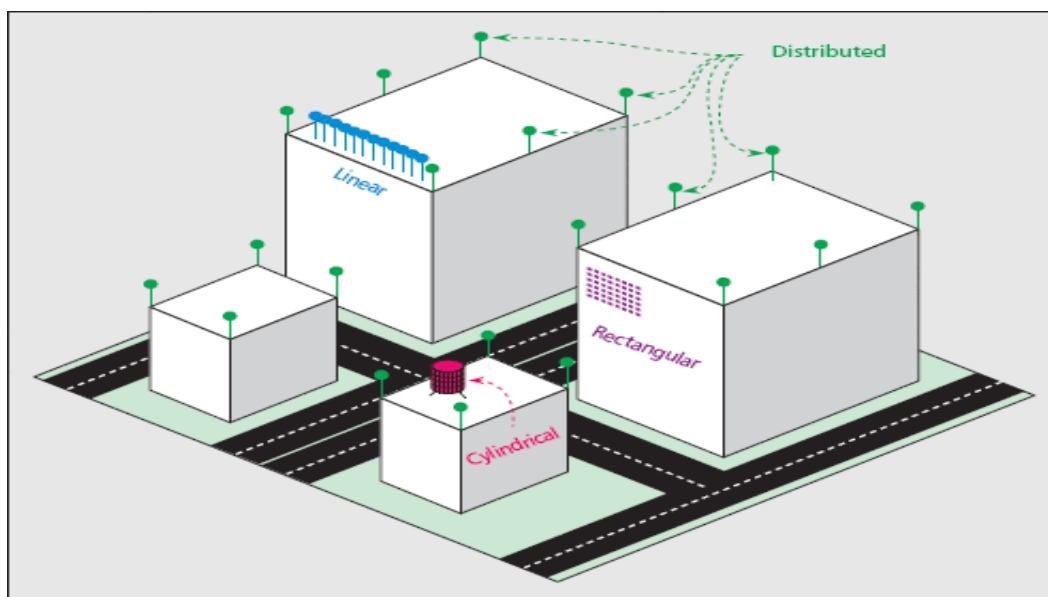
Standard	Year Ratified	Frequency Band	Modulation	Channel Bandwidth	Max. Data Rate
802.11b	1999	2.4 GHz	DSSS	22MHz	11 Mbps
802.11a	1999	5 GHz	OFDM	20 MHz	54 Mbps
802.11g	2003	2.4 GHz	OFDM	20 MHz	54 Mbps
802.11n	2009	2.4/5 GHz	MIMO-OFDM	20,40 MHz	600 Mbps
802.11ac	2013	5 GHz	MIMO-OFDM	20, 40, 80, 160 MHz	6.93 Gbps

**Εικόνα 4. Πίνακας διαφόρων προτύπων Wi-Fi [27]**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: <ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ MIMO>

## 2.1< MASSIVE MIMO >

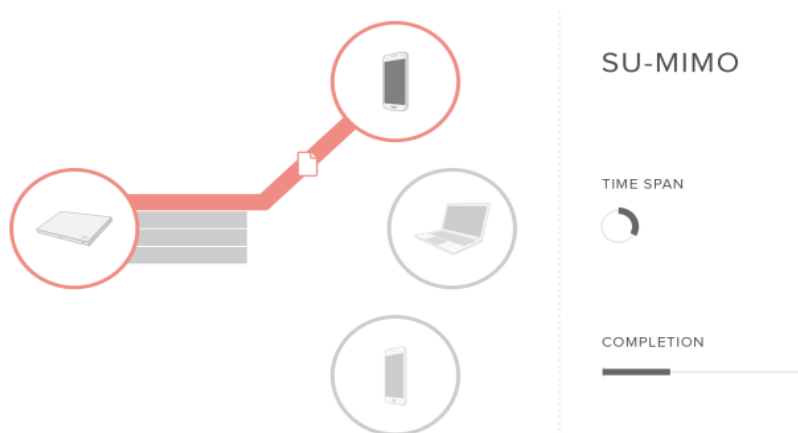
Το massive MIMO είναι μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία που εξελίσσει το MIMO. Το κύριο προτέρημα του massive MIMO είναι να αποκομίσουμε όλα τα οφέλη του απλού MIMO, αλλά σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό. Αποτελεί τον θεμέλιο λίθο για την ανάπτυξη ευρυζωνικών δικτύων που θα είναι ενεργειακά αποδοτικά, θα εκμεταλλεύονται πλήρως το φασματικό εύρος και θα είναι ασφαλή. Είναι δηλαδή η τεχνολογία που θα επιτρέψει την εφαρμογή του IoT. Το massive MIMO βασίζεται και αυτό στην τεχνολογία Spatial Multiplexity, η οποία με τη σειρά της βασίζεται στη λειτουργία TDD και στην αμοιβαιότητα των καναλιών Uplink και Downlink, δηλαδή εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα αλλά διαχωρίζονται χρονικά. Δεν είναι ξεκάθαρο αν μπορεί να λειτουργήσει και σε FDD, καθώς είναι ακόμα σε επίπεδο μελέτης, αλλά αν βρισκόταν η λύση το massive MIMO θα γινόταν κατά πολύ ταχύτερο. Στην εικόνα φαίνεται μια πιθανή διαμόρφωση και ανάπτυξη κεραιών για ένα σταθμό βάσης MIMO [6],[7].



Εικόνα 5. Πιθανή Διαμόρφωση κεραιών Massive MIMO για ένα BS.[28]

## 2.2<SU-MIMO>

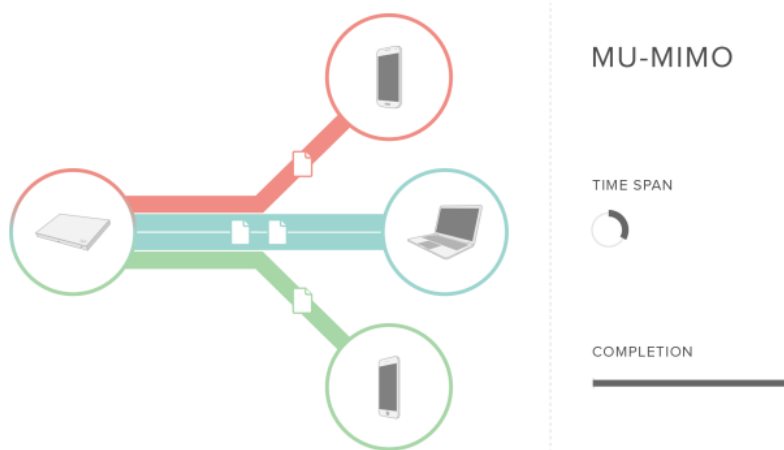
Το SU-MIMO είναι μια τεχνολογία που εμφανίστηκε προαιρετικά το 2007 με το πρότυπο 802.11n, όπου βοήθησε πολύ στην αύξηση της ταχύτητας στη μεταφορά δεδομένων μέσω WI-FI. Ουσιαστικά αυτή τη τεχνολογία επιτρέπει την αποστολή και λήψη πολλών ροών δεδομένων μεταξύ όμως μόνο μιας συσκευής κάθε φορά. Επίσης αυτή η τεχνολογία απαιτεί την ύπαρξη πολλών κεραιών, με βασικό μειονέκτημα την αύξηση του μεγέθους, του βάρους και του κόστους μια συσκευής WIFI. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι ότι η επεξεργασία απαιτεί περισσότερους πόρους. Η τεχνολογία MU-MIMO που είναι το κύριο της θέμα της εργασίας μας, αποτελεί το επόμενο βήμα στη τεχνολογία MIMO και έρχεται να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά της ήδη υπάρχουσας τεχνολογίας [8],[9].



Εικόνα 6. SU-MIMO [29]

### 2.3<MU-MIMO>

Το MU-MIMO εμφανίστηκε στο wave 2 του 802.11ac και βελτιώνει τις δυνατότητες του MIMO. Η ουσιαστική διαφορά του με το SU-MIMO είναι ότι επιτρέπει την αποστολή και λήψη πολλών ροών δεδομένων μεταξύ πολλών συσκευών, αντί για μια. Αποτελεί το μέλλον στην τεχνολογία MIMO και έχει θετικό αντίκτυπο στο δίκτυο, με ελάχιστες διαφοροποιήσεις. Δημιουργεί ένα αποτελεσματικότερο δίκτυο στο οποίο ο χρήστης μπορεί να έχει μεγάλο όφελος. Το MU-MIMO αποτελεί το κύριο θέμα της εργασίας γι' αυτό το λόγο και αναπτυχθεί αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο [9],[10].



**Εικόνα 7. MU-MIMO [29]**

## 2.4<ΑΛΛΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ>

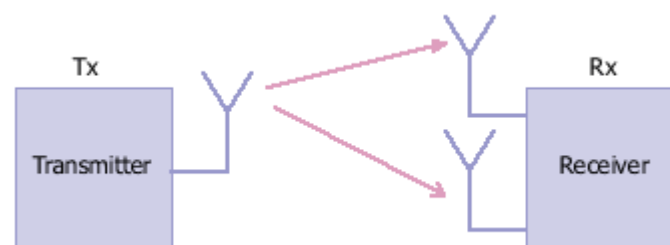
Υπάρχουν διάφοροι τύποι κεραιών και διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας. Μερικά από αυτά είναι τα παρακάτω:

- **SISO:** Ο πομπός και ο δέκτης σε ένα σύστημα έχουν από μια και μόνο κεραία. Αποτελεί ένα πολύ απλό σύστημα που δεν απαιτεί επεξεργασία και είναι σαφώς απλότερο από το MIMO. Επιπλέον το SISO χρησιμοποιείται από την ίδρυση του ραδιοφώνου, καθώς και σε ασύρματες τεχνολογίες που χρησιμοποιούμε ακόμα και σήμερα, όπως το Bluetooth [1],[25].



Εικόνα 8. SISO [25]

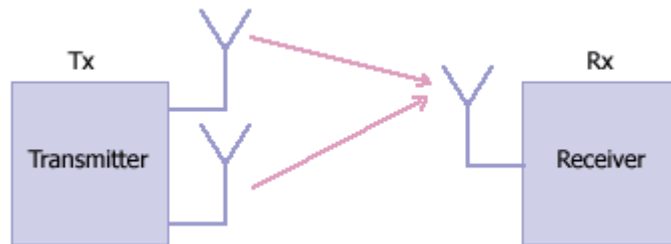
- **SIMO:** Ο πομπός έχει μια κεραία και ο δέκτης έχει πολλές κεραιές. Υπάρχουν δυο τύποι SIMO βασισμένοι στο μέγεθος, στο κόστος και την εξάντληση της μπαταρίας. Ο πρώτος τύπος είναι το Switched Diversity SIMO όπου αναζητά την κεραία που εκπέμπει ισχυρότερο σήμα και μεταπηδά από κάποια με ασθενέστερο και ο δεύτερος τύπος είναι το Maximum Ratio Combining SIMO, ο οποίος παίρνει τα σήματα από τις δυο κεραιές και τα συνενώνει, φτιάχνοντας ένα συνολικό [1].



Εικόνα 9. SIMO [25]



- MISO: Ο πομπός έχει πολλές κεραιές και δέκτης έχει μόνο μια. Αυτό το σύστημα έχει ένα προτέρημα, το οποίο είναι ότι η κωδικοποίηση μεταφέρεται από τον δέκτη στον πομπό, κάτι το οποίο έχει θετική επίδραση στο κόστος, στο μέγεθος και στη ζωή της μπαταρίας. Όταν ένα σύστημα έχει πολλές κεραιές, όπως το MISO, αλλά και το SIMO, αυτές τοποθετούνται σε ένα σταθμό βάσης BS [1],[26].

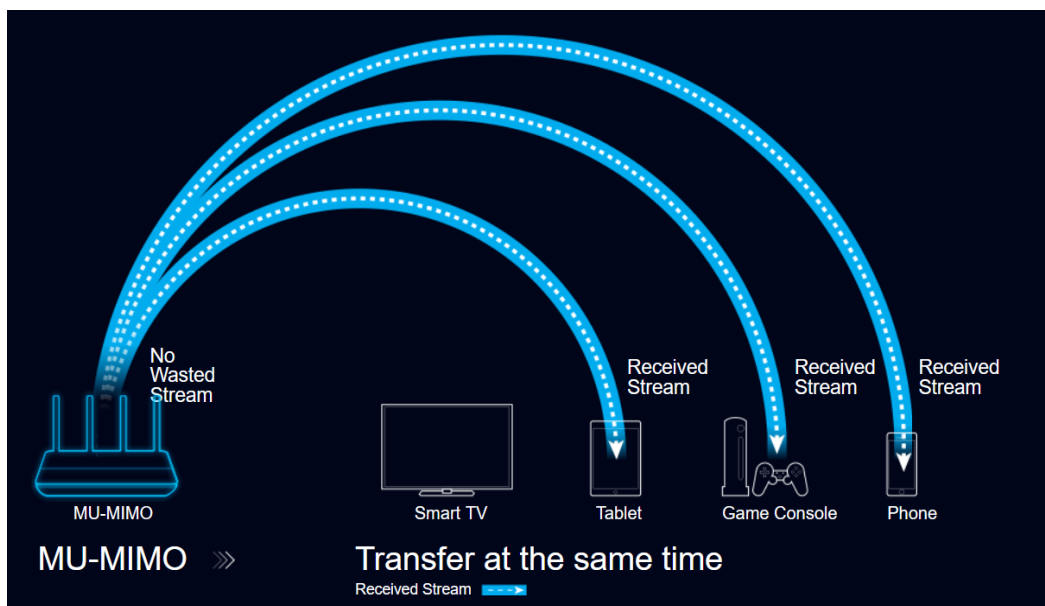


**Εικόνα 10. MISO [26]**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: <MU-MIMO>

## 3.1<ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ>

Το mu-MIMO που είναι και το κύριο θέμα της εργασίας αυτής αποτελεί μια τεχνολογία αιχμής που τώρα αναπτύσσεται. Όπως έχει προαναφερθεί είναι μια τεχνολογία κεραίας πολλαπλών εισόδων, εξόδων και χρηστών και προσφέρει πολλαπλά οφέλη. Το mu-MIMO αποτελεί μια συνένωση δυο καναλιών su-MIMO, ενός καναλιού downlink, το ονομαζόμενο mu-MIMO BC και ενός καναλιού uplink, γνωστό και ως mu-MIMO MAC. Οι κεραίες που απαρτίζονται από την τεχνολογία mu-MIMO διατίθεται σε τρεις διαμορφώσεις (2x2, 3x3, 4x4), οπότε μπορούν να στέλνουν δεδομένα έως και σε 4 κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Με την έλευση του Wi-Fi 6 (802.11ax), το mu-MIMO άρχισε να υποστηρίζει συνδέσεις uplink σε πολύ υψηλότερο επίπεδο και επιπλέον διαμορφώσεις 8x8. Το πρότυπο 802.11ax έχει σχεδιαστεί για πυκνά αστικά περιβάλλοντα, όπως αεροδρόμια, σιδηροδρομικοί σταθμοί, στάδια κ.α. Μέχρι και τώρα το mu-MIMO χρησιμοποιείται μόνο στην ζώνη Wi-Fi των 5Ghz [12],[14],[33].

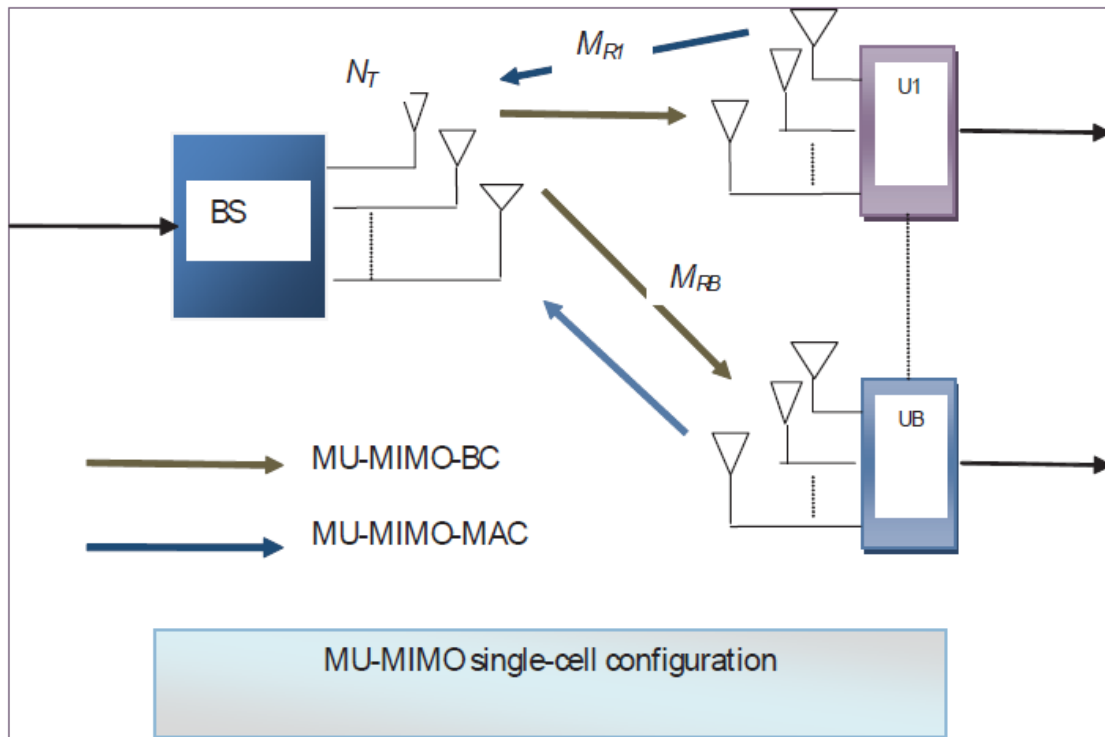


Εικόνα 11. Πολλαπλές ροές MU-MIMO[30]

Το  $\mu$ -MIMO όμως δε βρίσκει εφαρμογή μόνο στο Wi-Fi, αλλά και στα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών. Για την ακρίβεια οι τεχνικές MIMO αποτελούν αναπόσπαστα μέρη του προτύπου LTE. Πιο συγκεκριμένα το Release 8 του LTE εισήγαγε την τεχνολογία su-MIMO. Στο Release 9 του LTE χρησιμοποιήθηκαν νέοι τρόποι μετάδοσης με τη χρήση εικονικής κεραίας. Η πλήρως προσαρμοσμένη λειτουργία του su-MIMO και  $\mu$ -MIMO έγινε διαθέσιμη με το Release 10. Υποστηρίζονται πλέον διαμορφώσεις MIMO 8x8 και έχει καθοριστεί μια νέα λειτουργία μετάδοσης για να περιλαμβάνει τις τεχνολογίες su/ $\mu$ -MIMO. Ένα ενδιαφέρον γεγονός που παρατηρήθηκε είναι ότι με το  $\mu$ -MIMO υπάρχει ανώτερη απόδοση των κυψελών σε σχέση με το su-MIMO [24].

### **3.2<ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ>**

Η διαμόρφωση ενός συστήματος  $\mu$ -MIMO μπορεί να περιλαμβάνει έναν κεντρικό κόμβο, ή αλλιώς σταθμό βάσης (BS), ο οποίος είναι εξοπλισμένος με εκπομπές κεραιών  $N_t$ , που εκπέμπουν ταυτόχρονα σε  $B$  αριθμό χρηστών στο κανάλι  $\mu$ -MIMO BC. Στο κανάλι  $\mu$ -MIMO MAC μπορεί να λαμβάνει δεδομένα επίσης από πολλαπλούς χρήστες. Την βέλτιστη δομή δέκτη για το κανάλι  $\mu$ -MIMO MAC αποτελεί το MMSE-SIC, ανεξάρτητα από το πόσο πολύπλοκη είναι η εφαρμογή. Για το κανάλι  $\mu$ -MIMO BC για τη μείωση των παρεμβολών πολλαπλών χρηστών (MUI), είναι αναγκαία το DPC ή κωδικοποίηση. Το MMSE-SIC καθώς και το DPC αφορούν και τα δυο γραμμικές τεχνικές, οι οποίες προτιμούνται, λόγω της απλότητας τους, σε σχέση με τις μη γραμμικές τεχνικές, οι οποίες έχουν ερευνηθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια [33].



**Εικόνα 12. Διάγραμμα μιας διαμόρφωσης mu-MIMO.**

Οι γραμμικές τεχνικές κωδικοποίησης, λοιπόν, που χρησιμοποιούνται στο mu-MIMO χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, σε μεθόδους που διατυπώνουν τη συνάρτηση αντικειμενικής σχεδίασης τόσο για τον κωδικοποιητή όσο και για αποκωδικοποιητή ανεξάρτητα και σε μεθόδους που σχεδιάζουν από κοινού τόσο οι πίνακες κωδικοποίησης όσο και αποκωδικοποίησης στη θέση του πομπού. Παρ' όλο που επιτυγχάνεται καλή απόδοση και αρμονικότερος σχεδιασμός σε σχέση με τις ανεξάρτητες μεθόδους, η υπερφόρτωση του καναλιού downlink και η πολυπλοκότητα αποτελούν σημαντικά προβλήματα της μεθόδου αυτής [33].

Ένας τομέας που έχει πραγματοποιηθεί τεράστια έρευνα είναι αυτός την αύξησης της χωρητικότητας των συστημάτων CDMA, μέσω εξειδικευμένης επεξεργασίας των σημάτων. Οι περισσότερες από τις έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην αύξηση χωρητικότητας για τον χρήστη και όχι στην αύξηση της χωρητικότητας χρηστών του συστήματος, που αποτελεί και τον σημαντικότερο στόχο του QoS. Επειδή λοιπόν το MIMO με τις γνωστές τεχνικές του δε μπορεί να αυξήσει τον μέγιστο αριθμό των υποστηριζόμενων χρηστών, αναπτύσσεται ένα νέο σύστημα, το οποίο είναι το MIMO-CDMA. Σε αυτό το νέο σύστημα, το οποίο βασίζεται στην κατάτμηση των χρηστών, κάθε χρηστής είτε αντιστοιχίζεται σε μια κεραία μετάδοσης

ανεξάρτητα από τη γνώση του καναλιού (στατικό), είτε βασίζεται σε bit επιλογής της κεραίας (δυναμικό). Οι δυο προαναφερόμενες τεχνικές δεν έχουν μεγάλη πολυπλοκότητα και απαιτούν μόνο μικρές αλλαγές στα πρότυπα CDMA [35].

Επιπλέον μια ακόμη τεχνολογία που χρησιμοποιείται στο mu-MIMO είναι το OFDM. Η τεχνολογία αυτή χωρίζει ένα ραδιοφωνικό κανάλι σε μεγάλο αριθμό υπο-καναλιών σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, πετυχαίνοντας με αυτό τον τρόπο πιο αξιόπιστη επικοινωνία σε υψηλές ταχύτητες. Ενώ το MIMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τεχνολογίες όπως το CDMA και το TDMA, έχει αποδειχθεί ότι ο συνδυασμός MIMO-OFDM είναι ο πιο αποδοτικός σε υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Ο συνδυασμός MIMO-OFDM αποτελεί θεμέλιο λίθο στις ευρυζωνικές ασύρματες επικοινωνίες 4G και 5G, καθώς και στα ασύρματα δίκτυα LAN καθώς επιτυγχάνει υψηλή φασματική απόδοση και παρέχει υψηλότερη χωρητικότητα. Επίσης το OFDM εξαλείφει ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια των ευρυζωνικών επικοινωνιών, τις παρεμβολές ISI, οι οποίες αυξάνονται με τους ψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Το ISI εμφανίζεται όταν η αλληλεπικάλυψη μεταξύ διαδοχικών συμβόλων είναι μεγάλη σε σύγκριση με τη διάρκεια των συμβόλων. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του OFDM είναι οι γρήγοροι μετασχηματισμοί Fourier (FFTs), οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απλοποίηση της εφαρμογής. Τέλος τα FFT επιτρέπουν στο OFDM να κάνει αποτελεσματικότερη χρήση του εύρους ζώνης.[36]

### 3.3 < ΣΥΓΚΡΙΣΗ su-MIMO vs mu-MIMO >

Οι τεχνολογίες su-MIMO και mu-MIMO έχουν δημιουργηθεί αμφότερες για την καλύτερη διαχείριση του φόρτου σε ένα υπερφορτωμένο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, με το su-MIMO μια μόνο συσκευή μπορεί να λαμβάνει πολλές ροές δεδομένων. Αντίθετα με το mu-MIMO μπορούν πολλές συσκευές ταυτόχρονα να λαμβάνουν διαφορετικές ροές δεδομένων.

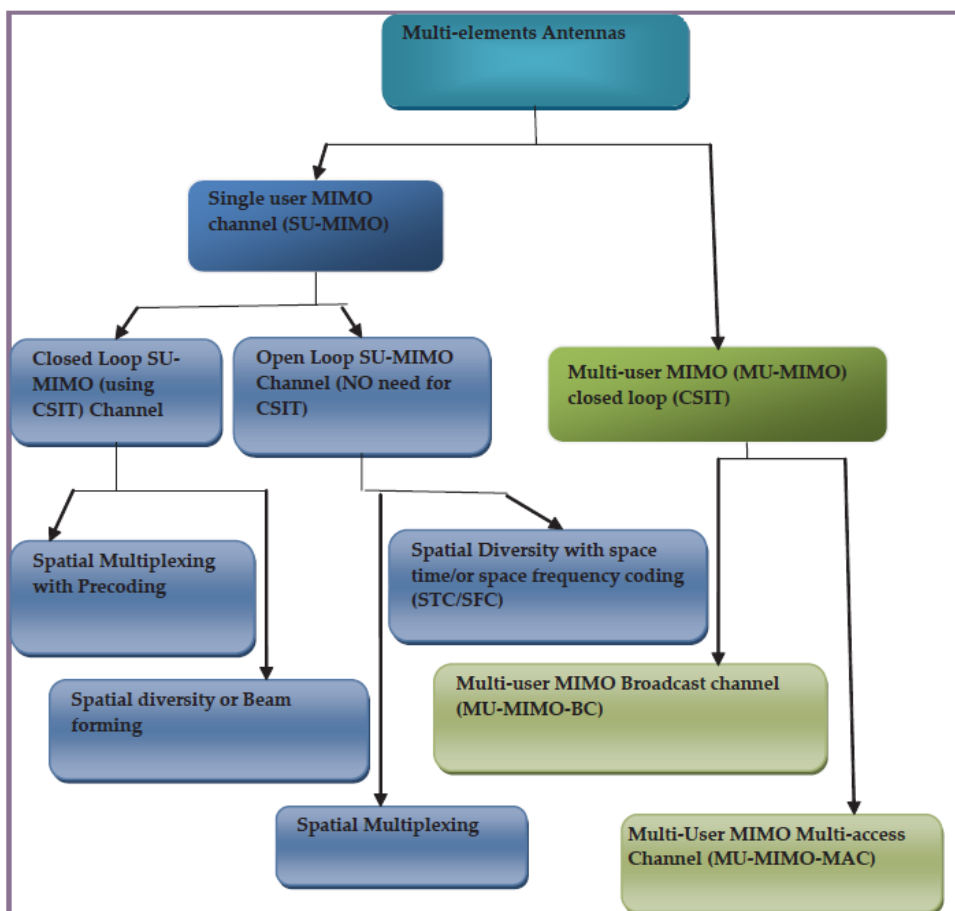
Πέρα από αυτό το βασικό χαρακτηριστικό που αναφέρθηκε, υπάρχουν και άλλες διαφορές μεταξύ των δυο τεχνολογιών. Η πολυπλεξία είναι μια από αυτές τις διαφορές, αφού στο su-MIMO, το κέρδος είναι περιορισμένο λόγω του ελάχιστου αριθμού κεραιών. Αντίθετα στο mu-MIMO το κέρδος από την πολυπλεξία είναι μεγαλύτερο με τον αριθμό κεραιών, όταν υπάρχουν αρκετοί χρήστες σε κάθε κελί της κεραιάς. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του su-MIMO είναι ότι δεν έχει καθόλου παρεμβολές, σε σχέση με το mu-MIMO που επηρεάζεται από παρεμβολές ανάμεσα στις ροές. Τέλος η τεχνολογία mu-MIMO απαιτεί την χρήση ενός πρωτοκόλλου με πληροφορίες κατάστασης του καναλιού, το λεγόμενο CSI, κάτι το οποίο δεν είναι απαραίτητο στο su-MIMO [19].

Feature	MU-MIMO	SU-MIMO
Main Aspect	The cell communicates with multiple users	The cell communicates with single user
Purpose	MIMO capacity gain	Data rate increasing for single user
Advantage	Multiplexing gain	No interference
CSI	Perfect CSI is required	No CSI
Throughput	Higher throughput at high SNR	Higher throughput at low SNR

SU: Single User  
MU: Multiple user

Εικόνα 13. Διαφορές SU-MIMO με MU-MIMO[31]

Επιπλέον να σημειωθεί ότι το  $\mu$ -MIMO αποτελεί μια αποκλειστικά κλειστού βρόγχου (closed loop) μετάδοση, η οποία απαιτεί πληροφορίες CSI, για κάθε μετάδοση που συμβαίνει. Αντίθετα το  $\text{su-MIMO}$  μπορεί να πραγματοποιήσει μετάδοση και σε κλειστό βρόγχο (closed loop) αλλά και σε ανοιχτό (open loop). Στην κλειστού βρόγχου μετάδοση του  $\text{su-MIMO}$  απαιτούνται πληροφορίες CSI, όπως ακριβώς και στο  $\mu$ -MIMO, ενώ στην ανοιχτού βρόγχου δεν απαιτούνται τέτοιου είδους πληροφορίες. Στην εικόνα φαίνονται ακριβώς οι διαφορές που έχουν οι δυο αυτές διαμορφώσεις.



**Εικόνα 14. Διαμορφώσεις Open/Closed Loop[33]**

### **3.4<ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ>**

Είναι σαφές ότι η τεχνολογία mu-MIMO φέρει μαζί της πολλά πλεονεκτήματα. Το πιο προφανές, που έχει ήδη αναφερθεί, είναι οι αυτές οι πολλαπλές ροές δεδομένων μεταφέρονται και λαμβάνονται από πολλές συσκευές ταυτόχρονα, αυξάνοντας έτσι την απόδοση του δικτύου. Ένα ακόμη από τα οφέλη της τεχνολογίας αυτής είναι η εξοικονόμηση κόστους, βάρους και μεγέθους των συσκευών που το υποστηρίζουν, καθώς το router είναι αυτό που αναλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της επεξεργασίας σημάτων MIMO. Πέρα από την αύξηση της ταχύτητας του δικτύου που είναι αναμενόμενη, το mu-MIMO αυξάνει και τη χωρητικότητα των δικτύων που εφαρμόζεται, αφού η γρήγορη εξυπηρέτηση επιτρέπει την αύξηση των συσκευών που μπορούν να εξυπηρετηθούν. Η διαφορά θα ήταν παραπάνω από εμφανής αν εφαρμοστεί σε κάποιο δημόσιο Wi-Fi Hotspot, όπου η υπάρχει μεγάλη πυκνότητα από χρήστες σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Παρ' όλο όμως που το mu-MIMO έχει δημιουργηθεί για να βελτιώσει το επίπεδο των υπηρεσιών, υπάρχουν και αρκετά μειονεκτήματα, σε κάποια από τα οποία έχει βρεθεί όμως λύση. Αυτά θα μελετήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο [13].

### **3.5<ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ>**

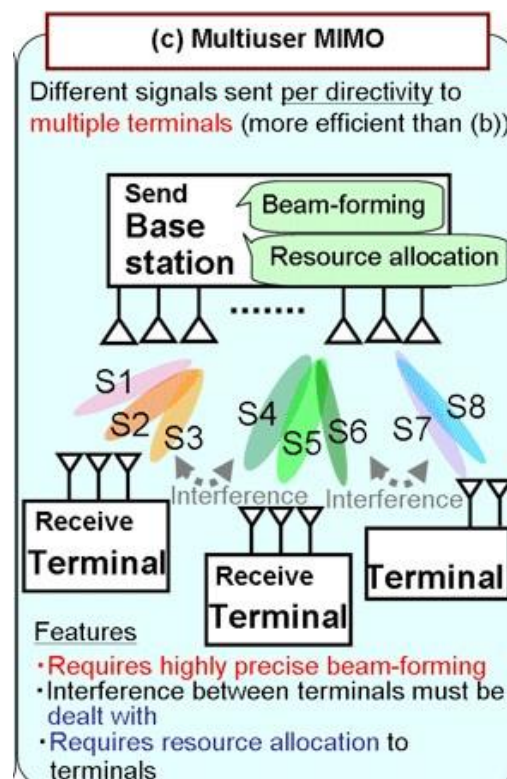
Όπως κάθε νέα τεχνολογία έτσι και το mu-MIMO, έχει ορισμένα προβλήματα. Το βασικότερο είναι ότι για να υποστηριχθεί, πρέπει να είναι συμβατές όλες οι συσκευές που το αξιοποιούν, ο δρομολογητής δηλαδή και η συσκευή λήψης. Αυτό αυξάνει αυτόματα το κόστος, καθώς υποχρεώνει όσους επιθυμούν να επωφεληθούν από τη νέα αυτή τεχνολογία, να προβούν σε αγορά του νέου αυτού εξοπλισμού. Όμως ακόμα και να θέλει κάποιος να προβεί σε αυτές τις αγορές είναι ακόμη λίγες οι επιλογές που έχει, αφού δεν έχουν κυκλοφορήσει πολλές συσκευές που να υποστηρίζουν mu-MIMO [16].

Επιπλέον ένα σημαντικό ζήτημα που προκύπτει είναι ότι το mu-MIMO μπορεί να ξεχωρίσει μέχρι 4 ροές. Αυτό σημαίνει ότι εάν συνδεθεί μια πέμπτη συσκευή θα μοιραστεί κάποια ροή με μια άλλη συσκευή, με τον ίδιο τρόπο που το κάνει το su-MIMO. Αυτό το πρόβλημα, βέβαια, λύνεται με την έλευση του πρότυπου 802.11ax στο Wi-Fi, το οποίο επιτρέπει μέχρι 8 διαφορετικές ροές. Η εμπορική διάθεση του 802.11ax έχει ξεκινήσει, αλλά μέχρι στιγμής μόνο σε high end συσκευές [16].



Ένα ακόμη πρόβλημα που έχει το mu-MIMO, είναι ότι τα σήματα εκπομπής είναι κατευθυντικά, με αποτέλεσμα χρήστες που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, σε κάποιο κλειστό χώρο να μοιράζονται ουσιαστικά την ίδια ροή, καθιστώντας την τεχνολογία μη αξιοποιήσιμη, αφού λειτουργεί σαν su-MIMO.[16] Επίσης κάτι πολύ σημαντικό είναι ότι το mu-MIMO λειτουργεί καλύτερα σε σταθερές συσκευές, αφού όταν μια συσκευή βρίσκεται σε κίνηση χάνονται τα πλεονεκτήματα και υπάρχει και η περίπτωση να περιοριστεί η συσκευή σε su-MIMO, από τον δρομολογητή [17].

Όπως αναφέρεται και στη φωτογραφία παρακάτω, ένα μειονέκτημα του mu-MIMO είναι ότι υπάρχει πιθανότητα παρεμβολών ανάμεσα στις ροές, για το οποίο έχουν βρεθεί κάποιο αλγόριθμοι επίλυσης του προβλήματος, αλλά και η ανάγκη για πολύ ακριβή σχηματισμό δέσμης (beamforming). Το beamforming γίνεται δημοφιλές με την έλευση του προτύπου 802.11ax (Wi-Fi 6) και το mu-MIMO το χρησιμοποιεί για να εξασφαλίσει ότι υπάρχει στοχευμένη επικοινωνία ανάμεσα σε δρομολογητή και πελάτη. Τέλος η ποιότητα του καναλιού ποικίλει λόγω του επιλεκτικού καναλιού σήματος και της εξασθένισης σήματος μικρής κλίμακας, ενώ και οι κατανομές πόρων αλλάζουν γρήγορα, λόγω των υψηλών διακυμάνσεων [18].



**Εικόνα 15. Πληροφορίες για το MU-MIMO[32]**

### **3.6<ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ>**

Τα συστήματα mu-MIMO έχουν ορισμένες τεχνολογίες και υπηρεσίες, οι οποίες είναι και αυτές που τα κάνουν να διαφέρουν τόσο. Η βασικότερη τεχνολογία που φέρει μαζί του το mu-MIMO είναι το Beamforming. Το Beamforming ουσιαστικά είναι η στόχευση των σημάτων ανάμεσα σε ένα Access Point και έναν συγκεκριμένο client, με στόχο την καλύτερη εξυπηρέτηση του client. Με το Beamforming επιτυγχάνεται ακριβέστερη αποστολή σημάτων, αλλά αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πύκνωση των δεδομένων στα κύματα αέρα. Στη τεχνολογία su-MIMO το Beamforming χρησιμοποιείται για την βελτίωση της ισχύος του σήματος και για την αύξηση την ταχύτητας σε έναν πελάτη. Στο mu-MIMO χρησιμοποιείται για να κατευθύνει την ενέργεια σε έναν μόνο πελάτη και να την απομακρύνει από τους υπόλοιπους [21].

Επιπρόσθετα μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται στο mu-MIMO για την αντιμετώπιση των παρεμβολών ανάμεσα στις ροές είναι το Block Diagonalization (BD). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για τέτοιου είδους προλήματα και η λειτουργία του, ουσιαστικά, είναι να επιλέγει ο σταθμός βάσης το υποσύνολο των χρηστών που μεγιστοποιεί την απόδοση του συστήματος, καθώς ο κάθε σταθμός βάσης δε μπορεί να υποστηρίξει όλους τους χρήστες. Μετά από έρευνες και μελέτες που έχουν γίνει, τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος του συστήματος είναι αυτός που έχει τη βέλτιστη λειτουργία [22].

Σε ένα δίκτυο mu-MIMO, όπως προαναφέρθηκε, ο σταθμός βάσης επιλέγει το υποσύνολο των χρηστών. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για το μηχανισμό επιλογής των χρηστών είναι η OPUS. Έχουν διεξαχθεί μελέτες οι οποίες έδειξαν ότι η επιλογή χρηστών για την μεγιστοποίηση της χωρητικότητας απαιτεί πληροφορίες για τη κατάσταση καναλιού (CSI), οι οποίες μπορούν να κατακλυσουν χρήσιμα δεδομένα σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας. Ο μηχανισμός OPUS, λοιπόν, απαιτεί για  $N$  χρήστες έως  $N$  φορές γύρους ανατροφοδότησης CSI. Σε κάθε γύρο χρησιμοποιείται ένας νέος μηχανισμός ανίχνευσης, που αξιολογεί την ορθογωνικότητα ενός χρήστη σε σχέση με τους υπόλοιπους και βρίσκει τον πιο αποδοτικό για ανατροφοδότηση του CSI. Τα πειράματα με το OPUS έδειξαν ότι ξεπερνά τα παραδοσιακά σχήματα επιλογής χρηστών, τόσο σε απόδοση, όσο και στη δικαιότερη κατανομή [23].

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: <Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ MU-MIMO >*

---

---

Το mu-MIMO εξακολουθεί να είναι μια αναδυόμενη ακόμα τεχνολογία, η οποία δεν είναι διαθέσιμη στο ευρύ κοινό. Όπότε ο κύριος στόχος των εταιριών που ασχολούνται με την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας, όπως η Qualcomm και η Linksys, είναι να καθιερώσουν το mu-MIMO στο εμπορικό κοινό και να αποτελέσει το νέο στάνταρ. Αυτό δε θα αργήσει να συμβεί, καθώς ήδη έχουν αρχίσει και εισάγουν το mu-MIMO σε μεγάλη ποικιλία νέων συσκευών. Επιπλέον το mu-MIMO σε συνδυασμό με το πρότυπο 802.11ad, γνωστό και ως WiGig, αποτελούν τις δυο τεχνολογίες που θα μας οδηγήσουν στην καθιέρωση του 5G και θα μας συνοδεύουν και στην εξέλιξη αυτού. Εντελώς αναφορικά να σημειωθεί ότι το πρότυπο 802.11ad (WiGig) αναπτύσσεται από τις μεγαλύτερες εταιρίες στον κόσμο, όπως Intel, Qualcomm και Samsung, αποτελεί το Wifi του μέλλοντος και θα εκμπέμπει στη ζώνη των 60Ghz [20].

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] <https://www.edgefx.in/multiple-input-and-multiple-output-mimo-wireless-communications/>
- [2] <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/what-is-mimo-multiple-input-multiple-output-wireless-technology.php>
- [3] <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2012/03/umtsmimofinal.pdf>
- [4] <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/mimo.php7>
- [5] [https://web.stanford.edu/~apaulraj/workshop70/pdf/MIMO\\_WiFi\\_Nabar.pdf](https://web.stanford.edu/~apaulraj/workshop70/pdf/MIMO_WiFi_Nabar.pdf)
- [6] <https://ieeexplore.ieee.org/document/7402270?denied=>
- [7] <https://ieeexplore.ieee.org/document/6736761?denied=>
- [8] <https://www.lairdconnect.com/support/faqs/whats-difference-between-su-mimo-and-mu-mimo>
- [9] <http://techgenix.com/mu-mimo-vs-su-mimo-wi-fi/>
- [10] <https://blogs.umass.edu/Techbytes/2017/01/19/su-mimo-vs-mu-mimo/>
- [11] <https://www.rfmw.com/data/swa-mimo-basics.pdf>
- [12] <https://www.everythingrf.com/community/what-is-mu-mimo>
- [13] <http://techgenix.com/mu-mimo-vs-su-mimo-wi-fi/>
- [14] <https://www.networkworld.com/article/3250268/what-is-mu-mimo-and-why-you-need-it-in-your-wireless-routers.html>
- [15] <https://www.linksys.com/us/r/resource-center/what-is-mu-mimo/>

- [16] <https://www.howtogeek.com/242793/what-is-mu-mimo-and-do-i-need-it-on-my-router/>
- [17] <https://www.pcworld.com/article/2928725/how-mu-mimo-wi-fi-works.html>
- [18] Zeydan, Engin, Omer Dedeoglu, and Yekta Turk. "Experimental Evaluations of TDD-Based Massive MIMO Deployment for Mobile Network Operators." *IEEE Access* 8 (2020): 33202-33214.
- [19] <https://moniem-tech.com/questions/what-is-the-difference-between-su-mimo-and-mu-mimo/>
- [20] <https://moorinsightsstrategy.com/the-near-future-of-wifi-and-why-mu-mimo-and-wigig-matter/>
- [21] [https://documentation.meraki.com/MR/WiFi\\_Basics\\_and\\_Best\\_Practices/Meraki\\_MR\\_SU-MIMO%2C\\_MU-MIMO%2C\\_and\\_Beamforming](https://documentation.meraki.com/MR/WiFi_Basics_and_Best_Practices/Meraki_MR_SU-MIMO%2C_MU-MIMO%2C_and_Beamforming)
- [22] <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6152073>
- [23] <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6848008>
- [24] Duplicy, J., Badic, B., Balraj, R., Ghaffar, R., Horváth, P., Kaltenberger, F., ... & Vivier, G. (2011). Mu-mimo in lte systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011, 1-13.
- [25] <http://www.conniq.com/WiMAX/mimo-01.htm>
- [26] <http://www.conniq.com/WiMAX/mimo-02.htm>
- [27] [https://web.stanford.edu/~apaulraj/workshop70/pdf/MIMO\\_WiFi\\_Nabar.pdf](https://web.stanford.edu/~apaulraj/workshop70/pdf/MIMO_WiFi_Nabar.pdf)
- [28] [https://www.researchgate.net/figure/Some-possible-antenna-configurations-and-deployment-scenarios-for-a-massive-MIMO-base\\_fig2\\_236274573](https://www.researchgate.net/figure/Some-possible-antenna-configurations-and-deployment-scenarios-for-a-massive-MIMO-base_fig2_236274573)
- [29] [https://documentation.meraki.com/MR/WiFi\\_Basics\\_and\\_Best\\_Practices/Meraki\\_MR\\_SU-MIMO%2C\\_MU-MIMO%2C\\_and\\_Beamforming](https://documentation.meraki.com/MR/WiFi_Basics_and_Best_Practices/Meraki_MR_SU-MIMO%2C_MU-MIMO%2C_and_Beamforming)
- [30] <https://www.tp-link.com/us/MU-MIMO/>
- [31] <https://moniem-tech.com/questions/what-is-the-difference-between-su-mimo-and-mu-mimo/>

[32] <https://blog.3g4g.co.uk/search/label/MIMO?updated-max=2012-06-18T12:00:00%2B01:00&max-results=20&start=16&by-date=false&m=0>

[33] Saeid, Elsadig, Varun Jeoti, and Brahim B. Samir. "On MU-MIMO precoding techniques for WiMAX." *Selected Topics in WiMAX* (2013).

[34] <https://halberdbastion.com/resources/wireless/mimo>

[35] W. Choi, J. G. Andrews and R. W. Heath, "Multiuser Antenna Partitioning for Cellular MIMO-CDMA Systems," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 5, pp. 2448-2456, Sept. 2007, doi: 10.1109/TVT.2007.898396.

[36] <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO-OFDM>