



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
& ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΞΑΜΗΝΟΥ**

*ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ*

**ΔΙΚΤΥΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ &  
ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ**

---

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ “ΜΙΜΟ”  
ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5G**

---

**ΑΝΔΡΕΑΣ ΠΕΡΠΥΡΑΚΗΣ**

**A.M 6338**

*ΔΙΔΑΣΚΩΝ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΜΠΟΥΡΑΣ*

**ΠΑΤΡΑ 2018**



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

---

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....</b>	<b>I</b>
<b>ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....</b>	<b>V</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>7</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ–ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΙΜΟ .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 Η ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΙΜΟ .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΙΜΟ .....</b>	<b>8</b>
<b>1.4 ΕΠΙΔΩΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>9</b>
<b>1.4.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>10</b>
<b>1.5 ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....</b>	<b>10</b>
<b>1.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΙΜΟ .....</b>	<b>11</b>
<b>1.7 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΙΜΟ.....</b>	<b>12</b>

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ II: ΠΩΣ ΔΟΥΛΕΥΕΙ ΤΟ ΜΙΜΟ</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 FDD ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2 TDD ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3 UPLINK ΚΑΙ DOWNLINK ΜΕΤΑΔΟΣΗ</b> .....	<b>14</b>
<b>2.4 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ</b> .....	<b>15</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ III: ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΜΙΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1 ΜΟΛΥΝΣΕΙΣ ΠΛΟΗΓΩΝ</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2 ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>16</b>
<b>3.3 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΥΛΙΚΟΥ</b> .....	<b>17</b>
<b>3.4 ΚΑΙΝΟΥΡΙΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ</b> .....	<b>17</b>
<b>3.5 ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΕΡΑΙΩΝ</b> .....	<b>17</b>
<b>3.6 ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΔΙΚΤΥΑ</b> .....	<b>18</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV: ΜΙΜΟ 5G ΔΙΚΤΥΑ</b> .....	<b>19</b>
<b>4.1 ΓΙΑΤΙ ΜΙΜΟ ΚΑΙ 5G</b> .....	<b>19</b>
<b>4.2 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5G</b> .....	<b>19</b>
<b>4.3 ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ</b> .....	<b>20</b>
<b>4.4 ΟΙ ΤΡΕΙΣ ΤΥΠΟΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΓΙΑ 5G</b> .....	<b>20</b>

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ V: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....22**

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....23**



# ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

---

MIMO => Χρησιμοποιείται μαζί με τον όρο «σύστημα» για την δήλωση των Συστημάτων Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων (Massive Input Massive Output)

Uplink => άνω σύνδεσμος

Downlink => κάτω σύνδεσμος

TDD => Time Division Duplexing

FDD => Frequency Division Duplexing

CSI => Channel State Information





# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

## Περιγραφή και Μορφοποίηση της Εργασίας

Η παρούσα εργασία, με τίτλο «Η τεχνολογία MIMO στα δίκτυα 5G», έχει ως στόχο την ανάλυση, την κατανόηση αλλά και την ιστορική αναδρομή στα συστήματα τεχνολογίας Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων, των σύγχρονων δικτύων «5G», καθώς και την συνύπαρξη των δύο αυτών, δηλαδή την ανάλυση της τεχνολογίας MIMO (Multiple Input Multiple Output) στα δίκτυα 5G.

Προκειμένου να γίνει πιο εύκολα κατανοητή και να υπάρχει διακριτός χώρος κάθε θεματολογίας, η εργασία χωρίζεται σε τρεις θεματικές ενότητες (κεφάλαια), όπως και παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο I, το οποίο πραγματεύεται το ζήτημα της ανάλυσης της Τεχνολογίας Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων (Τεχνολογίας MIMO) και των δυνατοτήτων που προκύπτουν από την χρήση της, στο Κεφάλαιο II, το οποίο πραγματεύεται το θέμα των δικτύων 5G και τις νέες δυνατότητες που αυτό προσφέρει σε σχέση με τους προκατόχους του και τέλος στο Κεφάλαιο III το οποίο θα δίνει μια πιο αναλυτική εικόνα για την χρήση των δύο αυτών στα νέα σύγχρονα δίκτυα υψηλής τεχνολογίας.

Έπειτα από τα παραπάνω, περιέχεται και η σχετική βιβλιογραφία που μελετήθηκε, όπως βιβλία, δημοσιεύσεις, αναφορές ή πρότυπα, καθώς και urls που παραπέμπουν σε πηγές φωτογραφιών ή έγγραφου υλικού τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί και αναπτυχθεί κατά την εξέλιξη και διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

# *ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ (ΜΙΜΟ)*

---

---

## **1.1 Η Ιστορία των Συστημάτων ΜΙΜΟ**

Κατά την δεκαετία του '90, ξεκίνησε η μελέτη των συστημάτων Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων «ΜΙΜΟ», όπως θα αναφερόμαστε σε αυτά. Τα συστήματα ΜΙΜΟ χρησιμοποιούν διατάξεις πολυάριθμων κεραιών τόσο κατά την εκπομπή όσο και κατά την λήψη των σημάτων. Στόχος αυτής της ενέργειας είναι η εξασφάλιση μεγαλύτερης αξιοπιστίας και ταχύτητας στα συστήματα επικοινωνίας.

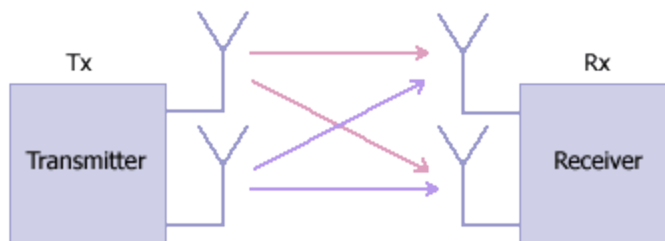
## **1.2 Η Φιλοσοφία των Συστημάτων ΜΙΜΟ**

Η είσοδος των συστημάτων ΜΙΜΟ στην τεχνολογική καθημερινότητα, εξέφρασε μια μεγάλη αλλαγή στην φιλοσοφία σχεδίασης των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το φαινόμενο της πολυόδευσης. Ο ουσιαστικός στόχος της ασύρματης επικοινωνίας ήταν η αντιμετώπιση των διαλείψεων με στόχο την επίτευξη της μέγιστης χωρητικότητας ενός καναλιού. Το φαινόμενο της πολυόδευσης του σήματος, ουσιαστικά αντιστοιχεί σε διαφορετικά κανάλια μετάδοσης της πληροφορίας, επομένως ο στόχος πλέον είναι η χρήση της πολυόδευσης του σήματος για την επίτευξη μεγαλύτερης συνολικής χωρητικότητας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης των συστημάτων ΜΙΜΟ.

## **1.3 Η λειτουργία των Συστημάτων ΜΙΜΟ**

Η βασική ιδέα των συστημάτων ΜΙΜΟ είναι σχεδόν η ίδια με αυτή των τεχνικών απόκλισης. Τα συστήματα ΜΙΜΟ μεταδίδουν διαφορετικό σήμα από κάθε κεραιά εκπομπής, ούτως ώστε από την διάταξη των κεραιών λήψης να λαμβάνεται μία υπέρθεση όλων των εκπεμπόμενων σημάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το ίδιο σήμα

να λαμβάνεται πολλές φορές σε διαφορετικές θέσεις, με σχεδόν μηδενική πιθανότητα όλα τα ληφθέντα αντίγραφα του αρχικού σήματος να έχουν υποστεί διάλειαση (βλ. εικόνα 1.1)



Εικόνα 1.1 Transmitter & Receiver Function[1]

Με την μέθοδο αυτή, ουσιαστικά το τελικό αποτέλεσμα αποτελεί μια ζεύξη, κατά την οποία το λαμβανόμενο σήμα έχει μεγαλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Τα συστήματα MIMO, όχι μόνο βελτιώνουν την επικοινωνία, όπως οι τεχνικές απόκλισης, αλλά αυξάνουν σε σημαντικό βαθμό και την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων, μέσω της τεχνικής της χωρικής πολυπλεξίας (Spatial Multiplexing). Η τεχνική αυτή, ορίζει την διάνοιξη πολλών παράλληλων και διακριτών καναλιών, μεταξύ των δύο άκρων της τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης, πράγμα το οποίο μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την χρήση πολλών κεραιών εκατέρωθεν της επικοινωνίας. Έτσι δημιουργούνται ανεξάρτητα μονοπάτια επικοινωνίας, τα οποία μεταφέρουν διαφορετικά δεδομένα.

## 1.4 Επίδοση Ασύρματων Συστημάτων

Κύριο μέλημα και στόχος της ανάπτυξης και εφαρμογής των MIMO συστημάτων, είναι εν τέλει, η βελτίωση των επιδόσεων των ασύρματων συστημάτων. Χαρακτηριστικό μέγεθος μέτρησης της επίδοσης των ασύρματων συστημάτων είναι, μεταξύ άλλων, η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων που είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την χωρητικότητα του εκάστοτε καναλιού. Με την απαίτηση για ολοένα μεγαλύτερες ταχύτητες, εδώ και δεκαετίες, μελετώνται συστήματα τα οποία διαθέτουν πολλές κεραιές στην εκπομπή και στη λήψη και με αυτό τον τρόπο υπόσχονται αυξημένη χωρητικότητα του καναλιού. η πλειονότητα των εργασιών μελετούν την μεγιστοποίηση της χωρητικότητας σε θεωρητικό επίπεδο με υποθετικά σενάρια λειτουργίας. Γεννάται λοιπόν το ερώτημα κατά πόσο οι μεγάλες θεωρητικές

προβλέψεις για την χωρητικότητα είναι εφικτές σε πραγματικά σενάρια όπου η γνώση του καναλιού δεν είναι τέλεια, ο πομπός είναι δύσκολο να έχει γνώση του καναλιού κτλ.

#### **1.4.1 Παράγοντες Υπολογισμού Χωρητικότητας των Συστημάτων**

Όπως είναι γνωστό, η χωρητικότητα των συστημάτων MIMO εξαρτάται καθοριστικά από τις στατιστικές ιδιότητες του καναλιού και την συσχέτιση που παρουσιάζουν τα ξεχωριστά κανάλια μεταξύ των κεραιών. Η οποιαδήποτε πληροφόρηση για το κανάλι, επιτρέπει στον πομπό να εφαρμόζει τεχνικές που μεγαλώνουν την λαμβανόμενη ισχύ στο δέκτη και συνεπώς βελτιστοποιεί την χωρητικότητα. Όμως η υπόθεση της πλήρους γνώσης της κατάστασης του καναλιού είναι αδύνατη στην πράξη. Στην πραγματικότητα, ο πομπός μπορεί να έχει μερική πληροφόρηση του καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να γνωρίζει σε βάθος χρόνου, τη συσχέτιση των καναλιών κάθε κεραίας (channel covariance) και μία εκτίμηση του μέσης τιμής του καναλιού (mean channel). Στην περίπτωση που το κανάλι δεν παρουσιάζει διαλείψεις, η χωρητικότητα δίνεται από τον ορισμό του Shannon. Όταν όμως το κανάλι είναι χρονικά μεταβαλλόμενο, υπάρχουν πολλοί ορισμοί για την χωρητικότητα του, ανάλογα με το είδος της πληροφορίας για το κανάλι που διατίθεται στο σύστημα. Για παράδειγμα:

Έστω ένα σύστημα MIMO με  $M$  κεραιές εκπομπής και  $N$  κεραιές λήψης, το κανάλι μπορεί να αναπαρασταθεί από έναν  $N \cdot M$  πίνακα  $\mathbf{H}$ . Τότε το λαμβανόμενο  $N \cdot 1$  διάνυσμα  $\mathbf{y}$  κατά τη διάρκεια ενός οποιουδήποτε τυχαίου συμβόλου γράφεται σαν σήμα βασικής ζώνης ως:  $\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n}$ , όπου  $\mathbf{s}$  το εκπεμπόμενο  $M \cdot 1$  διάνυσμα και  $\mathbf{n}$  το  $N \cdot 1$  διάνυσμα του προσθετικού λευκού κυκλικά συμμετρικού μιγαδικού θορύβου ο οποίος έχει την ιδιότητα  $E(\mathbf{n}\mathbf{n}^H) = N_0 \mathbf{I}_N$ .

### **1.5 Εξοικονόμηση Ενέργειας**

Για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι όπως: σύνθετες τεχνικές στο φυσικό στρώμα, όπως πολλαπλής εισόδου -πολλαπλής εξόδου (MIMO) και Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM), cognitive radio, κωδικοποίηση δικτύου, συνεργατική επικοινωνία, νέες αρχιτεκτονικές δικτύου, όπως τα ετερογενή δίκτυα, οι κατανεμημένες κεραιές, cellulars multi-hop,

συστήματα διαχείρισης ράδιο πόρων και δικτύου, διάφοροι cross layer αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, δυναμική εξοικονόμησης ενέργειας και πολλές άλλες.

## **1.6 Πλεονεκτήματα Συστημάτων MIMO**

Τα συστήματα MIMO, έχουν πλήθος πλεονεκτημάτων. Ενδεικτικά πλεονεκτήματα είναι:

Ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια πολλαπλών κεραιών και της τεχνικής SM (Spatial Multiplexing). Αυτό βοηθά στην επίτευξη υψηλότερης δυναμικότητας downlink και uplink.

Βοηθούν στο να επιτευχθεί μείωση του BER (Bit Error Rate) λόγω της εφαρμογής προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος στα λαμβανόμενα σύμβολα δεδομένων από πολλαπλές κεραιές.

Οι τεχνικές όπως η κωδικοποίηση αποκλεισμού χρόνου διαστήματος (STBC) και η BF (Beamforming) όταν χρησιμοποιούνται σε συστήματα MIMO συμβάλλουν στην επίτευξη επέκτασης της κάλυψης των στοιχείων.

Τα συστήματα βασισμένα στην MIMO τεχνολογία, ελαχιστοποιούν τα φαινόμενα εξασθένισης που παρατηρούνται από τις πληροφορίες που μετακινούνται από την μετάδοση προς τη λήξη. Αυτό οφείλεται σε διάφορες τεχνικές διαφορετικότητας όπως ο χρόνος, η συχνότητα και ο χώρος.

Υπάρχει χαμηλότερη επιδεκτικότητα στη χρήση από μη εξουσιοδοτημένα άτομα λόγω πολλαπλών κεραιών και αλγορίθμων.

Τα συστήματα με MIMO προσφέρουν υψηλή QoS (Quality of Service) με αυξημένη φασματική απόδοση και ρυθμούς δεδομένων.

Η ευρεία κάλυψη που υποστηρίζεται από το σύστημα MIMO βοηθά στην υποστήριξη μεγάλου αριθμού συνδρομητών ανά κελί.

Το σύστημα βασισμένο σε MIMO υιοθετείται ευρέως στα τελευταία ασύρματα πρότυπα, WLAN, WiMAX, LTE, LTE-Advanced κλπ.

## 1.7 Μειονεκτήματα Συστημάτων MIMO

Παρά το μεγάλο πλήθος των πλεονεκτημάτων, τα συστήματα MIMO δεν παύουν να έχουν και αρκετά μειονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι τα εξής:

- Οι απαιτήσεις πόρων και η πολυπλοκότητα του υλικού είναι υψηλότερες σε σύγκριση με το σύστημα που βασίζεται σε κεραία κεραίας. Κάθε κεραία απαιτεί μεμονωμένες μονάδες RF για επεξεργασία ραδιοφωνικών σημάτων. Επιπλέον, απαιτείται προηγμένο τσιπ DSP για την εκτέλεση προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας μαθηματικών σημάτων.
- Οι πόροι υλικού αυξάνουν τις απαιτήσεις ισχύος. Η μπαταρία διοχετεύεται πιο γρήγορα χάρη στην επεξεργασία σύνθετων και υπολογιστικών εντατικών αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος. Αυτό μειώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών που βασίζονται σε MIMO.
- Τα συστήματα βασισμένα στο MIMO κοστίζουν υψηλότερα σε σύγκριση με το σύστημα με βάση μία κεραία, λόγω της αυξημένης ζήτησης υλικού και προηγμένων λογισμικών.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ: ΠΩΣ ΔΟΥΛΕΥΕΙ ΤΟ ΜΙΜΟ

---

---

## 2.1 FDD Συστήματα

Στα κοινά συστήματα ΜΙΜΟ, χρησιμοποιούνται multi-user precoding στο downlink (κάτω σύνδεσμος) και ανίχνευση στο uplink (άνω σύνδεσμος), τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω αναλυτικότερα. Οι πόροι του χρόνου και της συχνότητας που απαιτούνται για την εκτίμηση του καναλιού σε ένα ΜΙΜΟ σύστημα είναι ανάλογοι του πλήθους των κεραιών στον πομπό και ανεξάρτητοι του πλήθους των κεραιών στον δέκτη.

Στα FDD συστήματα, ή αλλιώς Frequency Division Duplexing συστήματα, το uplink και το downlink χρησιμοποιούν διαφορετικό φάσμα συχνότητας, ούτως ώστε το CSI (Channel State Information) που αντιστοιχεί στο uplink να είναι διαφορετικό από αυτό της βάσης, αφήνοντας έτσι όλους τους χρήστες να στείλουν διαφορετικές ακολουθίες πλοηγών. Στην συνέχεια, ο σταθμός βάσης θα πρέπει να κάνει εκτίμηση των καναλιών σύμφωνα με τα σήματα πλοηγών που λήφθηκαν. Ο χρόνος που χρειάζεται για την μετάδοση των πλοηγών για τον άνω σύνδεσμο δεν σχετίζεται με τον αριθμό των κεραιών στο σταθμό βάσης. Η διαδικασία απαιτεί αριθμό χρήσεων τουλάχιστον ίσο με τον αριθμό των χρηστών.

Προκειμένου να αποκτηθεί το Channel State Information για το κανάλι κάτω συνδέσμου στα συστήματα FDD, είναι απαραίτητη μια διαδικασία που έχει δύο επίπεδα. Για αρχή ο σταθμός βάσης προϋποθέτει το CSI για να κωδικοποιήσει τους πλοηγούς, πριν αυτοί μεταδοθούν στους χρήστες. Έπειτα μεταδίδει τους πλοηγούς αυτούς προς όλους τους χρήστες και εν συνεχεία οι χρήστες ανατροφοδοτούν το εκτιμώμενο CSI για τα κανάλια του κάτω συνδέσμου. Ο χρόνος ο οποίος χρειάζεται για την μετάδοση οι πλοηγοί αυτοί, είναι ανάλογος με το πλήθος των κεραιών στην βάση.

Όμως, όσο ο αριθμός των κεραιών μεγαλώνει η εκτίμηση του downlink καναλιού για τα παραπάνω συστήματα γίνεται ανέφικτη μέσω αυτής της μεθόδου.

## 2.2 TDD Συστήματα

Η στρατηγική, που σύμφωνα την οποία υπολογίζεται το κανάλι για TDD (Time Division Duplexing), χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα που δημιουργήθηκε από την αντίστοιχη στρατηγική για τα FDD συστήματα. Στα TDD συστήματα, οι uplink και downlink μεταδόσεις χρησιμοποιούν τα ίδια φάσματα συχνότητας αλλά όχι τις ίδιες χρονοθυρίδες.

Το Channel State Information μπορεί να υπολογιστεί με τους κάτωθι τρόπους: Όσον αφορά την uplink μετάδοση, ο σταθμός βάσης έχει ανάγκη το CSI για να ανιχνεύει τα σήματα που μεταδίδουν οι χρήστες. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται στον σταθμό βάσης. Η τεχνική αυτή κατά την οποία κατακτάται το CSI λέγεται uplink training. Αναλυτικότερα, οι χρήστες αποστέλλουν κάποιες ακολουθίες πλοηγών στον σταθμό βάσης μέσω της uplink μετάδοσης. Ο σταθμός βάσης υπολογίζει μία εκτίμηση των καναλιών σύμφωνα με τα σήματα που έλαβε. Μετέπειτα, χρησιμοποιεί το CSI που εκτιμήθηκε για να ανακαλύψει τα Uplink δεδομένα και για να κατασκευάσει στενούς δεσμούς για την downlink μετάδοση δεδομένων.

Για την downlink μετάδοση, ο σταθμός βάσης χρειάζεται το CSI προκειμένου να κωδικοποιήσει τα μεταδιδόμενα σήματα, ενώ ο κάθε χρήστης χρειάζεται την ισχύουσα απολαβή καναλιού για να καταφέρει να ανακαλύψει τα σήματα αυτά που μεταδίδονται και για τα οποία ενδιαφέρεται. Οι πληροφορίες του CSI μπορούν να αποκτηθούν μέσα από την μέθοδο του downlink training. Αντίθετα με τα DFF συστήματα, εδώ δεν είναι αναγκαίο να βρούμε το μέτρο του CSI, αλλά μπορούμε να πάρουμε αυτό που υπολογίστηκε στο σταθμό βάσης στην uplink μετάδοση προκειμένου να κωδικοποιήσουμε τα σήματα. Έτσι, προκειμένου να γίνει κατανοητή η ισχύουσα απολαβή του καναλιού, ο σταθμός βάσης μπορεί να κατασκευάσει δέσμες πλοηγών και ο χρήστης είναι σε θέση να υπολογίσει την ισχύουσα απολαβή καναλιού σύμφωνα με τα σήματα πλοηγών που λήφθηκαν.

## 2.3 Uplink και Downlink Μετάδοση

Στην uplink μετάδοση, οι χρήστες κάνουν μετάδοση των δεδομένων τους στο σταθμό βάσης με όμοιους πόρους χρόνου – συχνότητας. Τότε, ο σταθμός βάσης κάνει



χρήση των εκτιμήσεων των καναλιών και μαζί με τις τεχνικές για linear combining ανιχνεύει τα μεταδιδόμενα σήματα από τους χρήστες.

Αντίστοιχα, στην downlink μετάδοση, από τον σταθμό βάση μεταδίδονται σήματα σε κάθε χρήστη με τον ίδιο πόρο χρόνου συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα, ο σταθμός βάσης κάνει χρήση των εκτιμήσεων καναλιών που έχει κάνει και λαμβάνει υπόψιν του τα σύμβολα που προορίζονται για τους χρήστες, προκειμένου να κατασκευάσει κωδικοποιημένα σήματα που εν συνεχεία καταλήγουν στις κεραιές.

## **2.4 Ανίχνευση σήματος και γραμμικοί ανιχνευτές**

Κατά την ανίχνευση σήματος, οι γραμμικοί ανιχνευτές σήματος, αποτελούν τους επικρατέστερους για τα massive MIMO συστήματα, αφού έχουν χαμηλή πολυπλοκότητα. Αναλυτικότερα, για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή απόδοση, η τεχνική που προτιμάται είναι η «Τεχνική Ανίχνευσης Likelihood (ML)», η οποία μπορεί να αποκτήσει χρήση στον σταθμό βάσης για να ανακαλύψει το σύνολο των σημάτων από τους χρήστες. Η πολυπλοκότητα της ML είναι πολύ μεγάλη, έτσι ο σταθμός βάσης μπορεί να κάνει χρήση συστημάτων γραμμικής ανίχνευσης, ούτως ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα της αποκωδικοποίησης. Ωστόσο, αυτού του είδους τα συστήματα δεν έχουν πολύ μεγάλη αξιοπιστία ανίχνευσης σε σχέση με αυτή των συστημάτων που κάνουν χρήση της τεχνικής ML. Στις περιπτώσεις όμως που αυξάνεται σημαντικά το πλήθος των κεραιών στον σταθμό βάσης τότε τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν κατά πολύ.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ: ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

## ΣΤΑ ΜΙΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

---

---

### 3.1 Μολύνσεις Πλοηγών

Σύμφωνα με σχετικά ερευνητικά άρθρα, ιδανικά στο κάθε τερματικό ενός massive MIMO συστήματος, έχει ανατεθεί μία ακολουθία πλοηγού. Παρ' όλα αυτά, το άνω όριο του μεγαλύτερου αριθμού ακολουθιών πλοηγών που μπορεί να υπάρξει είναι εξαρτώμενο από την διάρκεια του διαστήματος συνοχής προς την καθυστέρηση του καναλιού. Αυτό πάει να πει πως είναι αρκετά πιθανό αυτός ο αριθμός να εξαντληθεί σε συστήματα μεγάλου πλήθους κελιών. Η απόρροια της επαναχρησιμοποίησης των πλοηγών από το ένα κελί στο άλλο καλείται «μόλυνση πλοηγών». Αναλυτικότερα, όταν ο σταθμός βάσης συσχετίσει το σήμα που έλαβε από τον πλοηγό με την ακολουθία πλοηγού, η οποία είναι συνδεδεμένη με ένα συγκεκριμένο τερματικό, ουσιαστικά αποκτάει μία εκτίμηση καναλιού η οποία έχει προκύψει «μολυσμένη» από τον συνδυασμό των καναλιών με τα τερματικά, τα οποία έχουν την ίδια ακριβώς ακολουθία πλοηγού. Αυτό έχει ως απόρροια η δέσμη που κατασκευάζει ο σταθμός της βάσης τόσο στο downlink όσο και το uplink για να επικοινωνούν με το τερματικό, σύμφωνα με τον «μολυσμένο» υπολογισμό καναλιού, να οδηγείται στην παρεμβολή μεταξύ των τερματικών που έχουν την ίδια ακολουθία πλοηγού. Αυτή η παρεμβολή, μεγαλώνει όσο μεγαλώνει και ο αριθμός των τερματικών που κυμαίνονται στην ίδια συχνότητα.

Η πραγματικότητα της μόλυνσης πλοηγού, αποτελεί μεγάλο ανασταλτικό παράγοντα, καθώς οδηγεί σε πολύ μεγάλη μείωση στην απόδοση του συστήματος όταν ο αριθμός των κεραιών αυξάνει ασύστολα.

### 3.2 Διάδοση Κυμάτων

Η κύρια αιτία για την οποία το MIMO είναι επικρατέστερο σε σχέση με άλλες τεχνικές, είναι η εικασία, πως όσο το πλήθος των κεραιών μεγαλώνει, τα μεμονωμένα κανάλια χρηστών είναι χωρικά μη συσχετιζόμενα και τα διανύσματα καναλιών τους

ασυμπτωτικά, γίνονται ανά ζεύγη ορθογώνια κάτω από ιδανικές συνθήκες μετάδοσης. Τα διανύσματα καναλιών με μεγάλο συσχετισμό δεν έχουν την δυνατότητα να γίνουν ορθογώνια, μεγαλώνοντας έτσι το πλήθος των κεραιών. Το παραπάνω καθιστά τον σχεδιασμό από τους χρήστες πολύ σημαντικό παράγοντα των MIMO συστημάτων, αντίθετα με άλλα συστήματα, που η χρήση πιο περίπλοκων αλγορίθμων για την επεξεργασία του σήματος είναι ικανοί να ξεχωρίσουν χωρικά τους συσχετισμένους χρήστες. Οι έρευνες δείχνουν ότι ένα μεγάλο ποσοστό του θεωρητικού κέρδους απόδοσης των μεγάλων πινάκων κεραιών είναι δυνατό να υφίσταται στην πράξη.

### **3.3 Αστοχίες Υλικού**

Σύμφωνα με όσα έχουμε δει ως εδώ, το MIMO βασίζεται στην ύπαρξη μεγάλου πλήθους κεραιών για τον εκμηδενισμό του θορύβου, τόσο της εξασθένισης όσο και της παρεμβολής. Επιπλέον, το MIMO επιβάλλεται να υλοποιηθεί με χαμηλού κόστους υλικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, συχνά να μεγαλώνει τις ατέλειες του συστήματος και να οδηγείται σε λάθη στην εκτίμηση του καναλιού και σε μειωρητικότητα, παρ' όλο που μπορεί να επιτευχθεί μεγάλο array gain αυξάνοντας το πλήθος των κεραιών στον σταθμό βάσης.

### **3.4 Καινούριες απαιτήσεις**

Είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθεί εξ αρχής ένα εντελώς νέο ασύρματο standard. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει η δυνατότητα να γίνει εφαρμογή της τεχνολογίας MIMO οι οποίες δεν προαπαιτούν την προς τα πίσω συμβατότητα. Λόγου χάρη, σε επαρχιακές περιοχές ένας πίνακας κεραιών μπορεί να εξυπηρετήσει τα πχ 500 σπίτια της περιοχής προσφέροντας έως και 24Mbps ταχύτητες, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένο εξοπλισμό μόνο για αυτή την εφαρμογή. Εναλλακτικά ένας τεράστιος πίνακας μπορεί να διαθέσει την πίσω ζεύξη για τους σταθμούς βάσης από τους οποίους εξυπηρετούνται τα μικρά κελιά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

### **3.5 Πίνακες Κεραιών**

Υπάρχει πλήθος ζητημάτων που έχουν να κάνουν με τους πίνακες κεραιών και είναι συσχετιζόμενοι με τα MIMO συστήματα. Ένα από αυτά σχετίζεται με την διαμόρφωση και την κατανομή πινάκων. Επιπλέον, ένα άλλο πρόβλημα αφορά την αμοιβαία σύζευξη ανάμεσα σε στοιχεία κεραιών. Το παραπάνω μπορεί να παραληφθεί

μόνο όταν οι κεραιές είναι ξεκάθαρα χωρισμένες η μία από την άλλη. Στα MIMO συστήματα το συχνότερο φαινόμενο είναι οι κεραιές να έχουν έναν συμπαγή σχηματισμό, άρα δεν γίνεται να αγνοηθεί το φαινόμενο της σύζευξης. Τέλος τόσο για τα υλικά όσο και για τα υπολογιστικά κόστη, πρέπει επίσης να βρεθεί μια ικανοποιητική λύση, λόγω των πολύ μεγάλων πινάκων κεραιών. Ένας τρόπος που προτείνεται είναι μια «Ηλεκτρομαγνητική Κατοπτρική Κεραία», ενσωματωμένη σε ένα μεγάλο πίνακα κεραιών. Η προτεινόμενη κεραία αυτού του τύπου, μπορεί να προσφέρει την δυνατότητα τόσο του χωρικού διαχωρισμού πολλαπλών διαδρομών όσο και της ενεργειακής εστίασης, οι οποίες είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ούτως ώστε να βελτιώσουν την απόδοση του MIMO συστήματος και να μειώσουν το κόστος υλοποίησης και την πολυπλοκότητα. Γενικά τα θέματα που έχουν να κάνουν με τον σχεδιασμό των πινάκων κεραιών είναι μείζονος σημασίας για τα MIMO συστήματα.

### **3.6 Ετερογενή Δίκτυα**

Η χρήση του MIMO στα ασύρματα δίκτυα δίνει την ικανότητα να επιτευχθεί σημαντική ανάπτυξη στην χωρητικότητα και στην ενεργειακή απόδοση. Στα ετερογενή δίκτυα, χρησιμοποιούνται μικρά κελιά χαμηλού κόστους τα οποία είναι ευέλικτα στην ανάπτυξή τους, με στόχο να παρέχουν πυκνή κάλυψη. Έτσι η χρήση του MIMO σε συντονισμό με τα ετερογενή δίκτυα με στόχο την βελτίωση της διαχείρισης των παρεμβολών και την ενεργειακή απόδοση, αποτελεί μία σημαντική ερευνητική πορεία.

Η διαχείριση των παρεμβολών ανάμεσα στα συνυπάρχοντα MIMO συστήματα και των μικρών κελιών αποτελεί ένα αξιοσημείωτο θέμα. Είναι μείζονος σημασίας ένας σταθμός βάσης μακροκελιών να είναι ικανός να επικοινωνεί με τους δικούς του χρήστες, δίχως παρεμβολές από τους άλλους χρήστες μικρών κελιών. Ο σταθμός βάσης των μακροκελιών υπολογίζει το null-space στα μικρά κελιά, κατά την διάρκεια της downlink μετάδοσης και έπειτα προβάλλει τα δεδομένα της downlink μετάδοσης στο null-space των μικρών κελιών δημιουργώντας έτσι μετάδοση δίχως παρεμβολές.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV: MIMO

## 5G ΔΙΚΤΥΑ

---

---

### 4.1 Γιατί MIMO και 5G

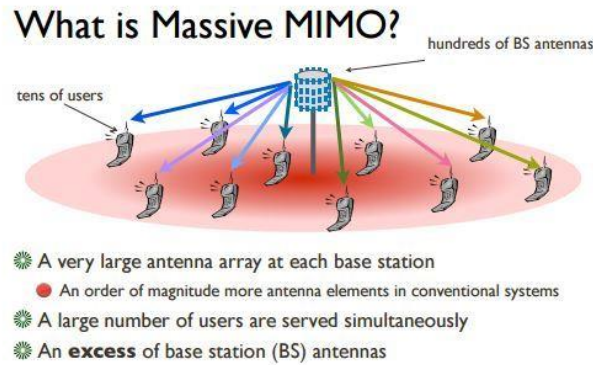
Ο κύριος λόγος για την χρήση τεχνολογίας MIMO στα δίκτυα τεχνολογίας 5G, είναι ότι «δεν υπάρχει άλλη επιλογή». Είναι πολύ πιθανό ότι θα χρησιμοποιήσουμε σήμα πολύ υψηλής συχνότητας (mm Wave) στο 5G. Η υψηλή συχνότητα σημαίνει ότι το μέγεθος της μίας κεραίας θα είναι πολύ μικρό και το άνοιγμα (η περιοχή για λήψη ενέργειας) θα είναι πολύ μικρό. Για να ξεπεραστεί αυτό το μικρό άνοιγμα στην πλευρά του παραλήπτη σε υψηλή συχνότητα, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα μεγάλο αριθμό κεραιών μετάδοσης.

Αυτός θα είναι ο κύριος λόγος, αλλά αφότου υιοθετήσαμε την τεχνολογία MIMO, μπορούμε να απολαύσουμε κάποια από τα πολλά πλεονεκτήματα που προέρχονται από τη χρήση μιας μεγάλης κεραίας συστοιχίας.

### 4.2 Η Σημασία για τα Δίκτυα 5G

Μέχρι το 2020, η Cisco προβλέπει ότι 5,5 δισεκατομμύρια άνθρωποι θα έχουν κινητά τηλέφωνα. Μόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο, δεκάδες εκατομμύρια αυτών των χρηστών κινητής τηλεφωνίας θα καταναλώσουν το καθένα 20 GB δεδομένων ανά μήνα και θα χρησιμοποιούν περισσότερες από 25 διαφορετικές έξυπνες συσκευές στις καθημερινές τους συνήθειες. Ο παράγοντας σε εφαρμογές όπως το βίντεο 4K, τα οχήματα χωρίς οδηγό, τα έξυπνα εργοστάσια και η ευρυζωνική πρόσβαση επεκτείνονται στα πιο αγροτικά μέρη της Γης και δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι τα σημερινά ασύρματα δίκτυα δεν μπορούν να χειριστούν το "υπερσυνδεδεμένο μέλλον", λέει η National Instruments.

### 4.3 Το Μέλλον



Εικόνα 4.3.1 What is Massive MIMO [2]

Η επόμενη γενιά ασύρματων δικτύων δεδομένων ή 5G πρέπει να αντιμετωπίζει όχι μόνο τους μελλοντικούς περιορισμούς της χωρητικότητας αλλά και τις υφιστάμενες προκλήσεις - όπως την αξιοπιστία του δικτύου, την κάλυψη, την ενεργειακή απόδοση και την καθυστέρηση - με τα σημερινά συστήματα επικοινωνίας. Το MIMO, προσφέρει σημαντικά κέρδη στις ασύρματες ταχύτητες δεδομένων και την αξιοπιστία των συνδέσμων. Επιτρέπει την κατανάλωση δεδομένων από περισσότερους χρήστες σε μια πυκνή περιοχή χωρίς να καταναλώνει πλέον ραδιοφάσμα ή να προκαλεί παρεμβολές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα λιγότερες μειωμένες κλήσεις, σημαντική μείωση των νεκρών ζωνών και καλύτερη ποιότητα μετάδοσης δεδομένων, χωρίς να διαχέεται το αδύνατο ραδιοφάσμα.

### 4.4 Οι τρεις τύποι δυναμικού για 5G

Το MIMO είναι μία από τις πιο πολυσυζητημένες τεχνολογίες όταν πρόκειται για τη δημιουργία της επόμενης γενιάς προτύπων δικτύου. Υπάρχουν όμως κάποιες ερωτήσεις σχετικά με την εφαρμογή που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για το 5G. Υπάρχουν τρία διαφορετικά σχήματα του MIMO που πρέπει να ληφθούν υπόψη, τα οποία έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, σύμφωνα με τον Δρα. Robert Heath, καθηγητή στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου του Texas στο Austin:

- Συνεταιριστικό MIMO  
Η συνεργασία θα χρησιμοποιηθεί με κάποια μορφή, πιο ισχυρή με καλύτερη υποδομή, πρέπει να προσέξουμε τα γενικά έξοδα στο σχεδιασμό του συστήματος
- Μαζική MIMO  
Μερικές δυνατότητες για ρυθμούς συστήματος, χρειάζονται μεγάλες συστοιχίες σταθμών βάσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με συνεργασία
- mmWave MIMO  
Μεγάλο δυναμικό για μέγιστα ποσοστά, περισσότερες προκλήσεις υλικού, απαιτεί περισσότερο φάσμα, πιο ριζοσπαστικό δυναμικό σχεδιασμού συστήματος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ V: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Το 5G αποτελεί μία συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία νέας γενιάς η οποία προβλέπεται να προσφέρει τεράστιες ταχύτητες και μεγάλη χωρητικότητα. Αυτό στην πράξη σημαίνει ότι, όπου και να βρίσκεται ο χρήστης δεν θα υπάρξει ελάττωση της ταχύτητας με την οποία περιηγείται σε διαδικτυακούς ιστότοπους και επιπλέον θα υποστηρίζεται η παράλληλη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών ταυτοχρόνως. Μετά από πλήθος μελετών και πειραμάτων, οι ερευνητές έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα, πως το MIMO αποτελεί την πλέον κατάλληλη τεχνολογία του αύριο ώστε να επιτευχθούν οι απαραίτητες βάσεις για του μελλοντικό 5G. Αντίθετα με άλλες τεχνικές όπως, για παράδειγμα, το FDMA και το TDMA οι οποίες παρέχουν ελαττωμένη συχνότητα και χώρο, το Beam Division Multiple Access, είναι η μέθοδος που θα βοηθήσει το MIMO να αυξήσει την χωρητικότητά του. Η μέθοδος υπολογισμού του καναλιού στα MIMO συστήματα, αποτελεί μία ακόμη πρόκληση η οποία όταν επιτευχθεί, τότε θα επιτραπεί στα συστήματα να παρέχουν πολύ χαμηλό bit-error-rate. Κάνοντας χρήση του MIMO, η χωρητικότητα μεγαλώνει και η απόδοση αυξάνεται σημαντικά. Κλείνοντας, η τεχνολογία MIMO, αποτελεί ένα είδος τεχνολογίας με πολύ χαμηλό κόστος πράγμα το οποίο την κάνει ακόμα περισσότερο προσιτή. Οι ειδικοί βρίσκονται όλο και πιο κοντά στο να ξεπεράσουν τα προβλήματα και τις δυσλειτουργίες που εμπεριέχει το MIMO και τα οποία αναφέραμε πρότινος, άρα βρισκόμαστε μπροστά σε ένα σπουδαίο μέλλον όσον αφορά τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες.



# BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] <https://xpertsvision.wordpress.com/2015/11/24/ber-analysis-of-rayleigh-fading-channels-in-mimo-systems-using-qam-bpsk-and-qpsk-modulation-schemes>  
<https://enterpriseiotinsights.com/20160805/5g/massive-mimo-5g-tag31-tag99>
- [2] <https://2.bp.blogspot.com/-ayUb98kFBfI/Wgwc0pDbFBI/AAAAAAAAAzBE/O-yYDL8soAkqUwF6JLmQB56cQApCZm-6QCLcBGAs/s1600/globe%2Bmassive%2Bmimo.jpg>
- [3] Πτυχιακή Εργασία Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα Επόμενης Γενιάς  
Ηλιόπουλος Κ. Γιώργος
- [4] 5G: The Convergence of Wireless Communications, Rau 'l Cha 'vez-Santiago • Michał Szydełko • Adrian Kliks • Fotis Foukalas • Yoram Haddad • Keith E. Nolan • Mark Y. Kelly • Moshe T. Masonta • Ilanko Balasingham
- [5] Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile, GSMA Intelligence
- [6] Emerging Technologies and Research Challenges for 5G Wireless Networks, Woon Hau Chin, Zhong Fan, and Russell Haines
- [7] 5G Ultra-Dense Cellular networks, Xiaohu Ge, Song Tu, GuoqianG Mao, ChenG-XianG WanG, and Tao han
- [8] The 5G Channel Code Contenders, Robert G. Maunder
- [9] Waveform contenders for 5G – suitability for short packet and low latency transmissions, Frank Schaich, Thorsten Wild, Yejian Chen