



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**

**Πολυτεχνική Σχολή**

**Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης  
της χωρητικότητας δικτύου με χρήση  
MIMO σε δίκτυα 5G**

**ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ**

**A.M. 1041258**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Παπαϊωάννου Εύη, επίκ. καθηγήτρια

Ιωάννης Γαροφαλάκης, Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ, 2022

## Contents

Κεφάλαιο 1 .....	6
Εισαγωγή.....	6
Σκοπός.....	12
Δομή .....	13
Κεφάλαιο 2 .....	14
1G(πρώτη γενιά δικτύων).....	15
2G (δεύτερη γενιά δικτύων) .....	15
3G (τρίτη γενιά δικτύων) .....	16
4G (τέταρτη γενιά δικτύων) .....	17
5G (Πέμπτη γενιά δικτύων) .....	20
Σύγκριση Γενεών.....	22
Δυνατότητες για τον χρήστη .....	24
Κεφάλαιο 3 .....	26
Τι είναι το MIMO.....	26
Η σημασία του MIMO .....	27
MIMO τρόπος λειτουργίας .....	28
Χωρητικότητα SISO, MISO, SIMO και MIMO Καναλιού .....	29
Εφαρμογές LTE της MIMO .....	32
MIMO massive systems και 5G.....	33
MIMO και beamforming.....	33
SU-MIMO εναντίον MU-MIMO .....	34
Πλεονεκτήματα της MIMO.....	34
Κεφάλαιο 4 Massive MIMO.....	36
Massive MIMO: A Multiuser MIMO Technology .....	36
Γραμμική Επεξεργασία Σήματος.....	38
Προγραμματισμός χρήστη χαμηλής πολυπλοκότητας .....	39
Μοντελοποίηση κατανάλωσης ενέργειας σε Massive MIMO.....	41
Massive MIMO .....	41
Uplink Μετάδοση.....	45
Μετάδοση Downlink.....	47

Οφέλη του Massive MIMO για δίκτυα 5G και πέρα .....	48
Προκλήσεις σε Massive MIMO.....	50
Pilot Contamination.....	51
Εκτίμηση καναλιού .....	53
Precoding.....	55
User Scheduling .....	56
Κεφάλαιο 5 Πρακτικό.....	58
Σύγκριση χωρητικότητας για SISO, MISO, SIMO και MIMO .....	58
Βελτίωση του SNR και τη χωρητικότητα της ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιώντας συστοιχίες κεραιών.....	61
Multipath.....	64
MIMO.....	66
Spatial Multiplexing .....	66
Precoding .....	67
Capacity Estimation on the Mathworks 5G NR CDL Model .....	74
Massive MIMO Hybrid Beamforming.....	76
Συμπεράσματα .....	81
Βιβλιογραφία .....	84
Παράτημα κώδικα.....	85

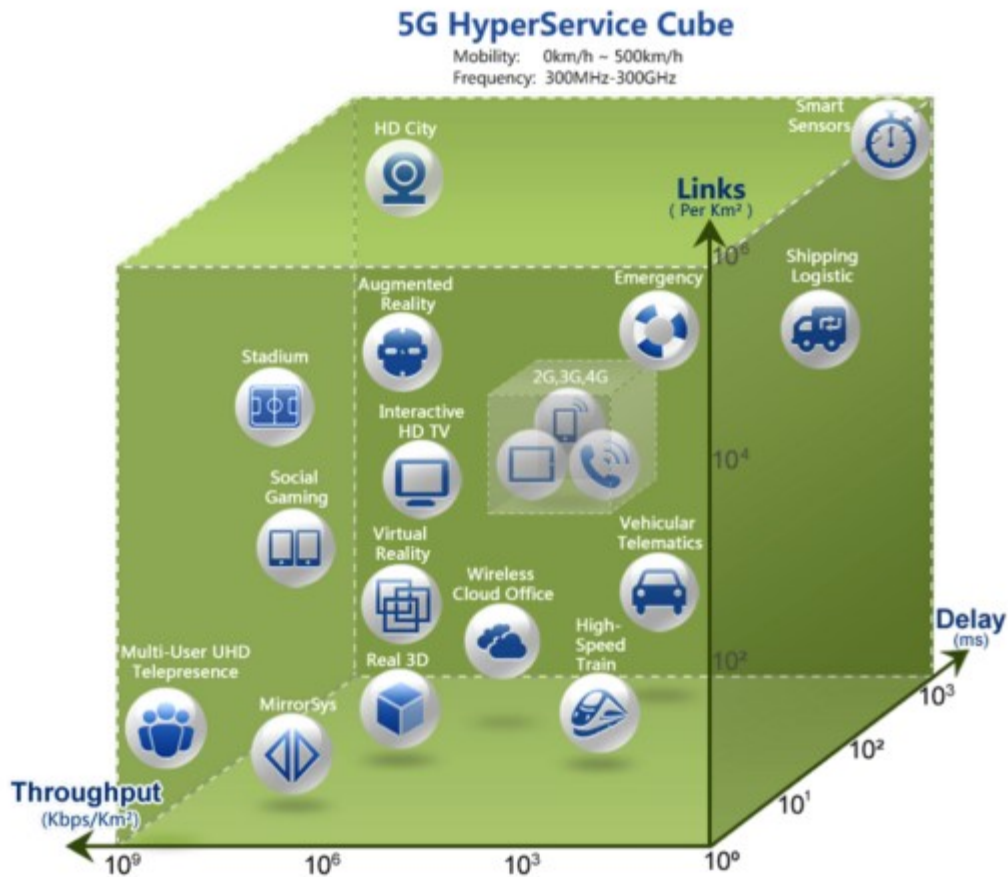
Εικόνα 1 Επισκόπηση των υπηρεσιών που αναμένονται σε μελλοντικά δίκτυα 5G.....	7
Εικόνα 2 Motorola πρώτο κινητό τηλέφωνο .....	14
Εικόνα 3 G roadmap .....	19
Εικόνα 4 internet Of Things.....	21
Εικόνα 5 G growth bandwidth .....	22
Εικόνα 6 G evolution .....	23
Εικόνα 7 5G & IoT .....	25
Εικόνα 8 MIMO channel .....	29
Εικόνα 9 Κανάλια SISO, SIMO, MISO, MIMO .....	29
Εικόνα 10 SISO vs SIMO vs MISO vs MIMO .....	32
Εικόνα 11 Massive MIMO .....	36
Εικόνα 12 Massive MIMO: μια τεχνολογία MIMO πολλαπλών χρηστών όπου οι $K$ UE μονής κεραίας εξυπηρετούνται από ένα BS με $M \gg K$ κεραίες.....	37
Εικόνα 13 Massive MIMO uplink and downlink. ....	43
Εικόνα 14 Μοτίβο δέσμης με διαφορετική διαμόρφωση κεραίας. (α) $4 \times 4$ MIMO (β) $16 \times 16$ MIMO (γ) $32 \times 32$ MIMO (δ) $64 \times 64$ MIMO.....	44
Εικόνα 15 MIMO vs MASSIVE MIMO .....	45
Εικόνα 16 Λειτουργία ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης Massive MIMO. (α) Uplink (β) Downlink .....	47
Εικόνα 17 Προκλήσεις massive mimo .....	50
Εικόνα 18 Pilot Contamination.....	52
Εικόνα 19 (a) Frequency Division Duplexing (FDD) and Time Division Duplexing (TDD) mode: Massive works best in TDD mode. (b) Typical pilot transmission and CSI feed back mechanism in FDD and TDD mode.....	54
Εικόνα 20 Προκωδικοποίηση σε ένα τεράστιο σύστημα MIMO με $M$ κεραίες στο σταθμό βάσης που επικοινωνούν με $N$ χρήστες.....	56
Εικόνα 21 User Scheduling.....	57
Εικόνα 22 SISO Vs MIMO.....	59
Εικόνα 23 SISO vs SIMO vs MISO vs MIMO .....	60
Εικόνα 24 Spatial Multiplexing παραμετροποίηση .....	67
Εικόνα 25 Παράδειγμα Precoding .....	68
Εικόνα 26 Channel measurement and reporting.....	68
Εικόνα 27 5G Node Composition.....	69
Εικόνα 28 MIMO 5G αποτελέσματα προσομοίωσης.....	74
Εικόνα 29 Capacity-Estimation-on-the-Mathworks-5G-NR-CDL-Model.....	76
Εικόνα 30 Massive MIMO Hybrid Beamforming.....	79
Εικόνα 31 Λήψη ενίσχυσης και ανάκτησης σήματος.....	80

Εξομίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

## Κεφάλαιο 1

### Εισαγωγή

Η βιομηχανία της τεχνολογίας πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ) συνδέει και διαχειρίζεται δισεκατομμύρια συσκευές σε όλο τον κόσμο. Επί του παρόντος, βρισκόμαστε στην εποχή της μετάβασης των δικτύων τέταρτης γενιάς (4G) και (4.5G), τα οποία αναφέρονται ως δίκτυα Long Term Evolution (LTE) και LTE-Advanced αντίστοιχα από τους φορείς τυποποίησης στα μελλοντικά δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπίσουν έως και 1000 φορές αύξηση στις τρέχουσες απαιτήσεις κίνησης και την υποστήριξη ενός ευρύ φάσματος υπηρεσιών. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια επισκόπηση των υπηρεσιών 5G που οραματίστηκε η Huawei Technologies Co. Ltd. [1]. Όπως είναι προφανές από την εικόνα 1, το Internet of Things (IoT), το οποίο υπόσχεται να συνδέει σχεδόν τα πάντα, αναμένεται να είναι αναπόσπαστο μέρος των δικτύων 5G. Μια σειρά από αναδυόμενα δίκτυα, όπως έξυπνες πόλεις, δίκτυα οχημάτων και κόμβοι επαυξημένης πραγματικότητας θα συνυπάρχουν και θα λειτουργούν ταυτόχρονα στο 5G. Όσον αφορά τις απαιτήσεις τεχνολογίας, τα δίκτυα 5G θα πρέπει να υποστηρίζουν καθυστερήσεις που κυμαίνονται από 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου (ms) σε λίγα δευτερόλεπτα, μέγιστοι ρυθμοί δεδομένων έως και 20 Giga bit ανά δευτερόλεπτο (Gbps), μέσοι ρυθμοί δεδομένων έως και 100 Mega bit ανά δευτερόλεπτο (Mbps), απρόσκοπτη συνδεσιμότητα για εκατομμύρια συσκευές IoT ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο και φορτία σήματος που κυμαίνονται από 1 % έως σχεδόν 100% [1]

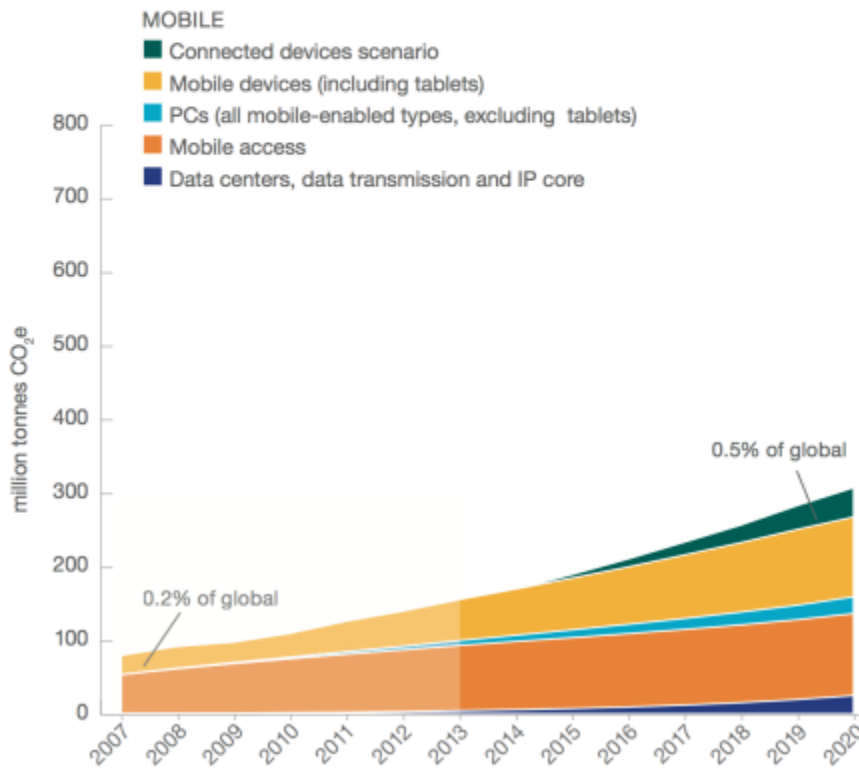


Εικόνα 1 Επισκόπηση των υπηρεσιών που αναμένονται σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Ενώ τα δίκτυα 5G σχεδιάζονται για να ανταποκρίνονται σε τέτοιες τεράστιες προσδοκίες υπηρεσιών, η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται, επειδή τα δίκτυα κινητής επικοινωνίας συμβάλλουν σε σημαντικό μερίδιο στο παγκόσμιο αποτύπωμα άνθρακα. Οι τάσεις [1] υποδηλώνουν ότι ο τομέας των κινητών ΤΠΕ θα εκπέμπει περισσότερους από 300 εκατομμύρια τόνους αερίων θερμοκηπίου ετησίως. Σύμφωνα με την εικόνα 2 η πλειονότητα αυτών των εκπομπών προέρχεται από κινητή πρόσβαση και κινητές συσκευές, δηλαδή από την τροφοδοσία των ασύρματων επικοινωνιών μεταξύ των σταθμών βάσης (BS) και του εξοπλισμού χρήστη (UEs). Ως εκ τούτου, για μια βιώσιμη εξέλιξη σε μελλοντικά δίκτυα 5G, είναι εξαιρετικά σημαντικό για τις μελλοντικές ασύρματες τεχνολογίες όχι μόνο να αντιμετωπίζουν την πολλαπλάσια αύξηση των προσδοκιών υπηρεσιών, αλλά και να λειτουργούν σε μειωμένα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας. Μια βασική παράμετρος σχεδιασμού από αυτή την άποψη είναι η ενεργειακή απόδοση bit-per-joule, που ορίζεται ως

MOBILE ICT **0.5%** OF GLOBAL GHG EMISSIONS IN 2020

Total GHG emissions from mobile ICT networks



## MIMO & Massive MIMO

Μια τυπική τεχνική για την αύξηση της απόδοσης σε ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας είναι η ανάπτυξη πολλαπλών κεραιών πομποδέκτη στους πομπούς και τους δέκτες. Όταν χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραιές στους πομπούς και τους δέκτες, μπορούν να επιτευχθούν κέρδη διεκπεραίωσης επειδή ο πομπός μπορεί να πολυπλέκει χωρικά παράλληλες ροές δεδομένων στον ίδιο πόρο χρονικής συχνότητας. Τέτοια συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) βρίσκονται υπό ενεργό ερευνητική έρευνα την τελευταία δεκαετία και χρησιμοποιούνται επί του παρόντος σε δίκτυα LTE και LTE-Advanced.



Συστήματα MIMO (MU-MIMO) πολλαπλών χρηστών [2], όπου ένα BS με πολλαπλές κεραιές μπορεί να χρησιμοποιήσει αλγόριθμους προγραμματισμού για την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χωρικά διαχωρισμένων UE στον ίδιο πόρο χρονικής συχνότητας, επειδή

- τα συστήματα MU-MIMO προσφέρουν πολλαπλές δυνατότητες πρόσβασης και μετάδοσης και
- κάθε UE σε ένα σύστημα MU-MIMO μπορεί να φιλοξενήσει μια ενιαία κεραία και εξακολουθεί να επιτυγχάνει παρόμοια κέρδη διεκπεραιώσεως όπως επιτυγχάνονται στα συστήματα MIMO από σημείο σε σημείο.

Στην πραγματικότητα, η απόδοση των συστημάτων MIMO από σημείο σε σημείο μπορεί να περιοριστεί από το φυσικό μέγεθος και τους περιορισμούς κόστους στις UE, επειδή οι UE είναι γενικά συσκευές χειρός χαμηλού κόστους και επομένως δεν μπορούν να φιλοξενήσουν πολλές κεραιές.

Παρά το γεγονός ότι είναι πρακτικά πιο σχετικά από τα συστήματα MIMO από σημείο σε σημείο, τα συστήματα MU-MIMO συνοδεύονται από σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος. Για παράδειγμα, το BS θα πρέπει να εφαρμόζει πολύπλοκες τεχνικές επεξεργασίας σήματος, όπως η διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (SIC) [3] στην ανερχόμενη ζεύξη και η κωδικοποίηση βρώμικου χαρτιού (DPC) [3] στην κάτω ζεύξη, έτσι ώστε να μετριάζονται οι παρεμβολές μεταξύ των UE. Αυτό είναι αναπόφευκτο επειδή πολλαπλοί UE μεταδίδουν ή λαμβάνουν πληροφορίες ταυτόχρονα στον ίδιο πόρο χρονικής συχνότητας και ως εκ τούτου υπόκεινται σε παρεμβολές μεταξύ τους. Επιπλέον, το BS θα πρέπει να χρησιμοποιεί σύνθετους αλγόριθμους προγραμματισμού, όπως τυχαία διαμόρφωση δέσμης [4] και ημι-ορθογώνια επιλογή χρήστη [4], έτσι ώστε να επιλέγει την ομάδα UE για επικοινωνία κατά τη διάρκεια κάθε διαστήματος συνοχής. Οι απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος αυτών των πολύπλοκων τεχνικών επεξεργασίας σήματος και σύνθετων τεχνικών προγραμματισμού χρηστών είναι γνωστό ότι αυξάνονται εκθετικά με το μέγεθος του συστήματος (για παράδειγμα, με τον αριθμό των κεραιών στο BS). Ως αποτέλεσμα, ακόμη και αν μπορούν να επιτευχθούν μεγάλα οφέλη διεκπεραιώσεως σε ένα σύστημα MU-MIMO αυξάνοντας τον αριθμό των κεραιών στο BS, ενδέχεται να μην υπάρχει μεγάλο όφελος στην κατανάλωση ενέργειας. Αυτός ο περιορισμός ώθησε τους ερευνητές να διερευνήσουν μεθόδους που μπορούν να εξαγάγουν μεγάλα κέρδη απόδοσης από συστήματα MU-MIMO σε μειωμένα επίπεδα δαπάνης ενέργειας.

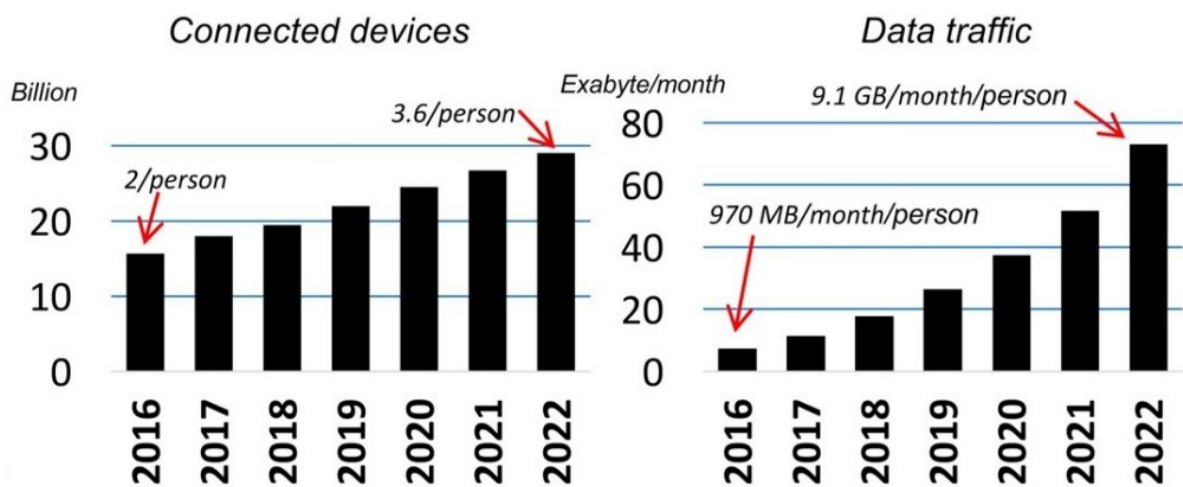
Από αυτή την άποψη, μια σημαντική συμβολή δόθηκε από τη Marzetta στο [4], όπου προτάθηκε η έννοια του massive MIMO. Εξ ορισμού, το massive MIMO είναι μια τεχνολογία MU-MIMO, όπου το BS είναι εξοπλισμένο με υπερβολικά μεγάλο αριθμό κεραιών σε σύγκριση με τον αριθμό των UE στο σύστημα. Η ανάπτυξη μεγάλου αριθμού κεραιών στο BS οδηγεί σε ένα ενδιαφέρον σενάριο διάδοσης, γνωστό ως ευνοϊκή διάδοση, όπου τα ασύρματα κανάλια γίνονται σχεδόν ντετερμινιστικά επειδή τα διανύσματα καναλιών BS-UE γίνονται σχεδόν ορθογώνια μεταξύ τους. Αυτό με τη σειρά του οφείλεται στο ότι τα αποτελέσματα της εξασθένησης μικρής κλίμακας τείνουν να εξαφανίζονται ασυμπτωτικά όταν ο αριθμός των κεραιών στο BS αυξάνεται απεριόριστα [4].

Η ευνοϊκή διάδοση επιτρέπει μερικές ενδιαφέρουσες σχεδιαστικές απλοποιήσεις. Πρώτον, τα μεγάλα κέρδη πολυπλεξίας μπορούν να εξαχθούν χρησιμοποιώντας απλές τεχνικές γραμμικής επεξεργασίας, όπως ο συνδυασμός μέγιστης αναλογίας (MRC) στην άνω ζεύξη και η προκωδικοποίηση μετάδοσης μέγιστου λόγου (MRT) στην κατερχόμενη ζεύξη. Δεύτερον, μπορούν επίσης να εξαχθούν μεγάλα κέρδη συστοιχίας, επιτρέποντας έτσι μια σημαντική μείωση της ισχύος μετάδοσης ραδιοσυχνοτήτων (RF) τόσο στην άνω όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη. Τέλος, αρκετές λειτουργίες στο BS, όπως ο προγραμματισμός χρήστη και ο έλεγχος ισχύος, μπορούν να εκτελεστούν στη μεγάλη κλίμακα χρόνου εξασθένησης, επειδή τα αποτελέσματα της μικρής κλίμακας εξασθένησης υπολογίζονται κατά μέσο όρο υπό ευνοϊκή διάδοση, χάρη στα σχεδόν ντετερμινιστικά διανύσματα καναλιού. Δεδομένου ότι το τεράστιο MIMO προσφέρει μεγάλα κέρδη διεκπεραίωσης, ενώ επιτρέπει επίσης μειώσεις στην ισχύ μετάδοσης και στην υπολογιστική ισχύ, μπορούν να επιτευχθούν πολλαπλά οφέλη στην κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα MU-MIMO.

Με την παγκοσμιοποίηση, τα σημερινά δίκτυα αντιμετωπίζουν υψηλές απαιτήσεις κίνησης και για να ικανοποιηθούν αυτές οι ανάγκες, τα κυψελωτά συστήματα αναπτύσσονται σε απόσταση λίγων εκατοντάδων μέτρων και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (LAN) τοποθετούνται σχεδόν παντού. Μαζί με την αυξημένη ευρυζωνική υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας, η εισαγωγή νέων εννοιών όπως το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) και η Επικοινωνία από μηχανή με μηχανή (M2M) συμβάλλουν επίσης στην αυξημένη ασύρματη κίνηση. Η παγκόσμια ανάπτυξη της υπηρεσίας κινητής τηλεφωνίας καλλιεργεί τρομερά τους χρήστες κινητών τηλεφώνων ώστε να χρησιμοποιούνται στα δεδομένα κινητής τηλεφωνίας στην καθημερινή τους ζωή. Οι υπηρεσίες όπως οι βιντεοκλήσεις, τα διαδικτυακά παιχνίδια, οι εφαρμογές κοινωνικών μέσων όπως το Facebook, το Twitter, το WhatsApp, έχουν αλλάξει άρδην τη ζωή μας με τις δυνατότητες της τρίτης γενιάς (3G), της τέταρτης γενιάς (4G) και της πέμπτης γενιάς (5G) δίκτυα, όπως χαμηλότερη καθυστέρηση και υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων [5,6]. Τα επόμενα

χρόνια αναμένεται ένας κόσμος συνδεδεμένος με κινητά τηλέφωνα, ο οποίος θα χαρακτηρίζεται κυρίως από ανάπτυξη χρηστών, συνδεσιμότητα, όγκο κίνησης δεδομένων και ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Τα επόμενα χρόνια, τεχνολογία όπως η επαυξημένη πραγματικότητα, η εικονική πραγματικότητα, το βίντεο εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας, το τρισδιάστατο βίντεο και λειτουργίες όπως το cloud για κινητά θα γίνουν δημοφιλείς για να εμπλουτίσουν την απόλυτη εμπειρία χρήστη. Από το 2017–2022, η κίνηση των smartphone αναμένεται να αυξηθεί κατά δέκα φορές και συνολικά, η κίνηση από κινητά θα αυξηθεί κατά οκτώ φορές [6]. Η παρακάτω εικόνα δείχνει την αύξηση της κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας και τον αριθμό συνδεδεμένων συσκευών από το 2017–2022 [6]. Μέχρι το τέλος του 2022, περισσότερο από το 90 τοις εκατό της κίνησης θα προέρχεται από κινητά τηλέφωνα. Αυτός ο κολοσσιαίος όγκος κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας είναι δύσκολο να διαχειριστεί με τις δυνατότητες των προηγούμενων συστημάτων ασύρματης παραγωγής.



Εικόνα 1 Παγκόσμια κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας και ανάπτυξη συνδεδεμένων συσκευών από το 2017 έως το 2022.

Το πρωταρχικό ζήτημα με τη συνεχιζόμενη ανάπτυξη του ασύρματου δικτύου είναι ότι εξαρτάται είτε από την αύξηση του εύρους ζώνης (φάσμα) είτε από την πυκνότητα των κυψελών για την επίτευξη της απαιτούμενης απόδοσης περιοχής. Αυτοί οι πόροι είναι σπάνιοι και φτάνουν στο σημείο κορεσμού τους μέσα σε λίγα χρόνια. Επίσης, η αύξηση του εύρους ζώνης ή η πυκνότητα των κελιών αυξάνει το κόστος του υλικού και αυξάνει την καθυστέρηση. Ο τρίτος παράγοντας, ο οποίος μπορεί να βελτιώσει την απόδοση της περιοχής, δηλαδή τη φασματική απόδοση, παρέμεινε ως επί το πλείστον

ανέγγιχτος και αμετάβλητος κατά τη διάρκεια αυτής της ταχείας ανάπτυξης και ανάπτυξης του ασύρματου δικτύου.

Μια αποτελεσματική τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης που μπορεί να αυξήσει την απόδοση της ασύρματης περιοχής χωρίς να αυξήσει το εύρος ζώνης ή να πυκνώσει την κυψέλη είναι απαραίτητη για την επίτευξη των συνεχών απαιτήσεων που αντιμετωπίζουν οι ασύρματοι φορείς.

Το Massive Multiple-Input Multiple-Output (massive MIMO) είναι η πιο συναρπαστική τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης για την παροχή των αναγκών του 5G. Το Massive MIMO είναι μια επέκταση της τεχνολογίας MIMO, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση εκατοντάδων, ακόμη και χιλιάδων κεραιών, συνδεδεμένων σε ένα σταθμό βάσης για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης και απόδοσης. Αυτή η τεχνολογία συνδυάζει κεραιές, ραδιόφωνα και φάσμα για να επιτρέψει μεγαλύτερη χωρητικότητα και ταχύτητα για το εισερχόμενο 5G. Η ικανότητα του massive MIMO να αυξάνει την απόδοση και τη φασματική απόδοση το έχει καταστήσει μια κρίσιμη τεχνολογία για τα αναδυόμενα ασύρματα πρότυπα [5,6].

Το massive MIMO λόγω του οφέλους που απορρέει από την πολυπλεξία και τις προσφερόμενες δυνατότητες διαμόρφωσης δέσμης μπορεί να ανιχνεύσει δεδομένα από ταυτόχρονη μετάδοση αισθητήρα με πολύ χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο και να παρέχει στους αισθητήρες υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων = και αξιόπιστη συνδεσιμότητα. Τα massive συστήματα MIMO θα διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο για να επιτρέψουν τη μετάδοση πληροφοριών που συλλέγονται μέσω έξυπνων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο σε κεντρικές τοποθεσίες παρακολούθησης για εφαρμογές έξυπνων αισθητήρων όπως αυτόνομο όχημα, απομακρυσμένη υγειονομική περίθαλψη, έξυπνα δίκτυα, έξυπνες κεραιές, έξυπνοι αυτοκινητόδρομοι, έξυπνο κτίριο και έξυπνη περιβαλλοντική παρακολούθηση.

## Σκοπός

Όλες οι ασύρματες συσκευές 5G σε μία κυψέλη επικοινωνούν με ραδιοκύματα με μια τοπική συστοιχία κεραιών και έναν αυτοματοποιημένο πομποδέκτη χαμηλής ισχύος, πάνω από τη συχνότητα καναλιών που εκχωρεί ο πομποδέκτης από μια κοινή βάση συχνοτήτων η οποία επαναχρησιμοποιείται σε γεωγραφικά διαχωρισμένες κυψέλες. Όπως και τα υπάρχοντα κινητά τηλέφωνα, όταν ένας χρήστης μεταβαίνει από μια κυψέλη σε μία άλλη, η κινητή συσκευή του μεταβαίνει χωρίς πρόβλημα στην κεραία της νέας κυψέλης.

Το massive MIMO επιτρέπει υψηλής ανάλυσης beamforming και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε υψηλές συχνότητες όπου τα στοιχεία κεραιών μπορεί να είναι πολύ μικρά. Το massive MIMO μπορεί να αυξήσει τη χωρητικότητα και ταυτόχρονα να βελτιωθεί η ακτινοβολούμενη ενεργειακή απόδοση (radiated energy-efficiency).

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να μελετήσει την ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία και να με τη χρήση του περιβάλλοντος Matlab να προσομοιώσει τη λειτουργία του MIMO και του Massive MIMO σχετικά με την αποδοτική χρήση της χωρητικότητας δικτύου και τη βελτίωση της απόδοσης ενός συστήματος πέμπτης γενιάς.

## Δομή

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας από το 1G έως το 5G. Παρουσιάζεται μία μικρή σύγκριση και παρουσιάζονται οι δυνατότητες που παρέχονται στο χρήστη.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το MIMO, ο τρόπος λειτουργίας του, τα κύρια χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματά του καθώς και διάφορες επεκτάσεις του όπως το massive MIMO, το MU-MIMO καθώς και εφαρμογές της MIMO στα δίκτυα LTE.

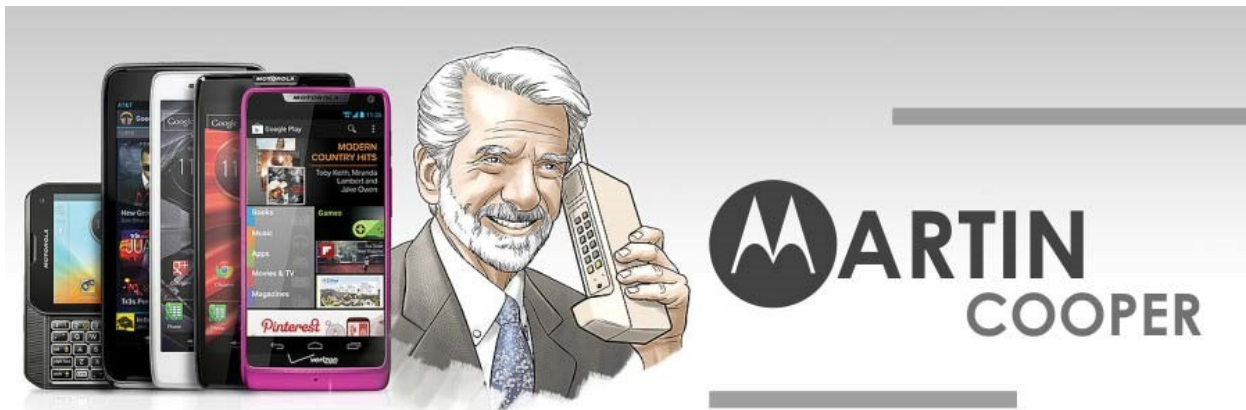
Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η επέκταση massive MIMO, τα χαρακτηριστικά της, ο τρόπος λειτουργίας τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη καθώς και τα οφέλη και οι προκλήσεις των συστημάτων massive MIMO.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα εφαρμογής της MIMO και του Massive MIMO στο περιβάλλον Matlab. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε ο τρόπος λειτουργίας του MIMO σε δίκτυα 5G, ο υπολογισμός της χωρητικότητας του δικτύου και η χρήση του massive MIMO σε συνδυασμό με Hybrid beamforming.

## Κεφάλαιο 2

Η επικοινωνία των ανθρώπων είναι μια από τις πιο βασικές προϋποθέσεις για την εξέλιξη της ανθρωπότητας και η συμβολή των τηλεπικοινωνιών είναι τεράστια και πολύ σημαντική. Η μεταφορά ήχου και δεδομένων έχει συμβάλει στην πρόοδο αλλά και στην πιο ποιοτική καθημερινότητα δισεκατομμυρίων ανθρώπων.

Οι προσπάθειες για την επίτευξη της κινητής τηλεφωνίας ξεκίνησαν αμέσως μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο από Σουηδούς, Φιλανδούς και Αμερικανούς. Όμως πολύ αργότερα και συγκεκριμένα στις 3 Απριλίου του 1973 παρουσιάστηκε από τον Μάρτιν Κούπερ, αντιπρόεδρο τότε της Motorola το πρώτο κινητό τηλέφωνο. Αποτέλεσε επανάσταση για την εποχή του και κόστιζε περί τα 4.000 δολάρια. [7]



Εικόνα 2 Motorola πρώτο κινητό τηλέφωνο

Το 1989 πάλι η Motorola [8] παρουσίασε το πρώτο κινητό τηλέφωνο που χωρούσε σε τσέπη. έκτοτε τα τηλέφωνα δεν σταμάτησαν να μικραίνουν. Τα τελευταία 40 χρόνια η εξέλιξη στην ασύρματη τεχνολογία επικοινωνίας και τις κινητές συσκευές είναι ραγδαία. Η αρχή έγινε περίπου το 1980 με την πρώτη γενιά δικτύων η οποία ήταν το εφαλτήριο για να έρθουν πολλές ακόμα γενιές με νέες τεχνολογίες και καινοτομίες μέχρι την σημερινή εποχή που έχουμε φτάσει στην πέμπτη γενιά δικτύων. Θα τα δούμε όλα λίγο πιο αναλυτικά παρακάτω.

## 1G(πρώτη γενιά δικτύων)

Η πρώτη γενιά δικτύων ξεκίνησε το 1979 στο Τόκιο τις Ιαπωνίας από την εταιρία NTT και μέσα στα επόμενα 5 χρόνια περιλάμβανε ολόκληρη την Ιαπωνία .Το 1981 το NTM χρησιμοποιήθηκε και στην Ευρώπη, τη Δανία, τη Σουηδία, τη Φιλανδία αλλά και τη Νορβηγία. Το NMT ήταν και το πρώτο τηλεφωνικό δίκτυο με διεθνή περιαγωγή. Το 1983 το πρώτο δίκτυο 1G ξεκίνησε στην Αμερική με τη Motorola να βγάζει ένα από τα πρώτα κινητά το DynaTAC. Στη συνέχεια ακολούθησαν και πολλές άλλες χώρες.

Η πρώτη γενιά δικτύων μετέδιδε μόνο φωνητικά σήματα με αναλογικό τρόπο. Τα φωνητικά αυτά δεδομένα μεταφέρονταν αναλογικά με συχνότητα 150 Mhz και πάνω σαν ραδιοκύματα. Αυτό προκαλούσε μεγάλο πρόβλημα στην κάλυψη αλλά και ποιότητα των κλήσεων αλλά και επίσης χρειαζόταν πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας για την μετάδοση των δεδομένων σε μακρινές αποστάσεις. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα πολλές κλήσεις να διακόπτονται. Σημαντικό ήταν επίσης ότι οι κλήσεις δεν προστατεύονται από καμία κρυπτογράφηση και ήταν πολύ εύκολο να υπάρξει υποκλοπή.

Τα κινητά τηλέφωνα καταλάμβαναν πάρα πολύ χώρο λόγω του μεγέθους τους και είχαν πολύ μεγάλες κεραιές για να μπορούν να στείλουν και να λάβουν τα δεδομένα. Η ποιότητα της φωνής ήταν κακή, δεν υπήρχε ασφάλεια στην επικοινωνία. Επιπλέον λόγω τις ενέργειας που κατανάλωναν για κάθε κλήση είχαν πολύ μικρή ζωή στην μπαταρία τους. Τέλος ένα άλλο σημαντικό τους μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν δίκτυα άλλων χωρών.

Το κόστος των κλήσεων ήταν πολύ υψηλό και οι χρήστες πολύ λίγοι, μια και αυτή ήταν μόνο η αρχή της επανάστασης της κινητής τηλεφωνίας. Για τον λόγο αυτό οι πάροχοι επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας ώστε να αυξηθούν οι συνδρομητές και έτσι να δημιουργηθούν σημαντικά έσοδα. [9]

## 2G (δεύτερη γενιά δικτύων)

Η πρώτη γενιά δικτύων κράτησε 10 περίπου χρόνια και παρά τα πάρα πολλά μειονεκτήματά της συγκέντρωσε ένα τεράστιο αριθμό χρηστών και έθεσε τις βάσεις για να έρθει η δεύτερη γενιά

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ τους είναι ότι η δεύτερη γενιά φέρνει τον ψηφιακό κόσμο των φωνητικών κλήσεων στις οποίες ανεβάζει και δραστικά την ποιότητα. Πρώτη χώρα που φέρετε να κάνει εμπορική χρήση είναι η Φιλανδία το 1991.

Το 2G βρήκε τεράστια απηγήσει από το απλό κοινό αλλά και τις επιχειρήσεις και ένας βασικός λόγος είναι ότι χάρη στην ψηφιακή επικοινωνία ο χρήστης πλέον μπορούσε να μετάδοση εκτός από ηχητικές κλήσεις και μηνύματα (SMS) αλλά και κυριότερα μπορούσε να μεταφέρει και εικόνες με την χρήση των (MMS). Επίσης το 2G χρησιμοποίησε και εντελώς νέες τεχνολογίες αλλά και πλατφόρμες δικτύου.

Το GSM (global systems for mobile communication) μας δίνει την δυνατότητα να μεταφέρουμε δεδομένα ταυτόχρονα με τη φωνητική επικοινωνία με ταχύτητα 30-35 kbps. Μπορεί για τη σημερινή εποχή να είναι ασήμαντες αυτές οι ταχύτητες αλλά για εκείνη την εποχή ήταν αρκετές ώστε να αυξηθεί ραγδαία δημοτικότητα του κινητού που συντέλεσε στην εξέλιξή του.

Το GPRS (general packet radio service ) θεωρείτε ως 2.5G. Χρησιμοποιεί παρόμοια τεχνολογία με το GSM αλλά προσφέρει υψηλότερες ταχύτητες κοντά στα 114 kbps

Το EDGE θεωρείτε ως 2.75G και είναι μια μεγάλη αναβάθμιση συγκριτικά με το GPRS διότι ανέβασε τις ταχύτητες από 170 σε 500 kbps. Το EDGE σε κάποιες περιοχές και από κάποιους παρόχους χρησιμοποιείτε ακόμα και σήμερα καθώς καλύπτει αρκετές βασικές ανάγκες των χρηστών.

Από τα πρώτα χρόνια του 2G μέχρι τα τελευταία παρατηρούμε ότι οι ταχύτητες μετάδοσης ανέβηκαν με μεγάλο ρυθμό. Αυτό δείχνει ότι οι επιχειρήσεις αμέσως κατάλαβαν τη δυναμική και την δημοτικότητα και επένδυσαν στην εξέλιξή του. Δεν ήταν όμως ακόμη δυνατή η μετάδοση εικόνων.

Το αποκορύφωμα της εποχής του 2G ήταν η δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων σε μια κινητή συσκευή. Έτσι ο μέγιστος αντίκτυπος στα έσοδα φαίνεται να προέρχεται από τα SMS τα οποία για κάποιους παρόχους πενταπλασιάστηκαν. [9]

### 3G (τρίτη γενιά δικτύων)

Η τρίτη γενιά δικτύων είναι μια εξέλιξη της δεύτερης γενιάς χρησιμοποιώντας τις νέες τεχνολογίες και κυρίως το EDGE. Κυκλοφόρησε από την NTT DoCoMo στην Ιαπωνία και είχε ως



Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

στόχο να υπάρχει τυποποίηση του πρωτοκόλλου δικτύου που χρησιμοποιούν οι προμηθευτές με σκοπό να μπορείς να έχεις πρόσβαση στα δεδομένα σου οπουδήποτε και αν βρίσκεσαι.

Η αύξηση της ταχύτητας σε σχέση με την παλαιότερη γενιά είναι εντυπωσιακή αφού πλέον έχουμε ταχύτητα έως 2mbps. Επίσης ένας άλλος τομέας που διαφοροποιεί τις 2 γενιές είναι η σημαντικά περισσότερες υπηρεσίες που μπορούν να σου προσφέρουν πλέον οι συσκευές. Για πρώτη φορά μπορούμε να πραγματοποιήσουμε τηλεδιασκέψεις και βίντεο κλήσεις χρησιμοποιώντας προγράμματα όπως το skype. Οι υψηλές αυτές ταχύτητες που εξασφάλισε το 3G επέτρεψε στις «έξυπνες συσκευές» (smartphone) να καταστήσουν την επικοινωνία τόσο γρήγορη ώστε να διευκολυνθεί σημαντικά η περιήγηση στον ιστό και η αποστολή και λήψη μεγάλων μηνυμάτων και κειμένων να είναι γρήγορη ενώ συγχρόνως η ασφάλεια ενισχύθηκε.

Η προηγμένη τεχνολογία EDGE μπόρεσε να προσφέρει αρκετές δυνατότητες ώστε να θεωρηθεί 3G. Αντίθετα, το CDMA2000 λειτούργησε με παρόμοιες βασικές έννοιες αλλά βελτιωμένες. Ήταν αυτό που επέτρεψε σε πολλά κανάλια να επικοινωνούν ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να βελτιωθεί η ταχύτητα και η συνδεσιμότητα [1].

Η κυκλοφορία του Blackberry το 2002 οφείλεται στα ισχυρά χαρακτηριστικά και τη συνδεσιμότητα που προσφέρει το 3G, ενώ το 2007 υποδεχόμαστε χάρη στο 3G την κυκλοφορία των iPhone. Οι πάροχοι την περίοδο αυτή εστίασαν στην αύξηση της βάσης των συνδρομητών τους. Από το 2002 έως το 2009, σημείωσαν αύξηση της τάξης του 4,1 δις. Ωστόσο, οι κατασκευαστές συσκευών ήταν αυτοί που εκτόξευσαν τα κέρδη τους, καθώς η ανάγκη των χρηστών για 3G συμβατή συσκευή τους εξανάγκασε σε αγορά «έξυπνης συσκευής». [9]

## 4G (τέταρτη γενιά δικτύων)

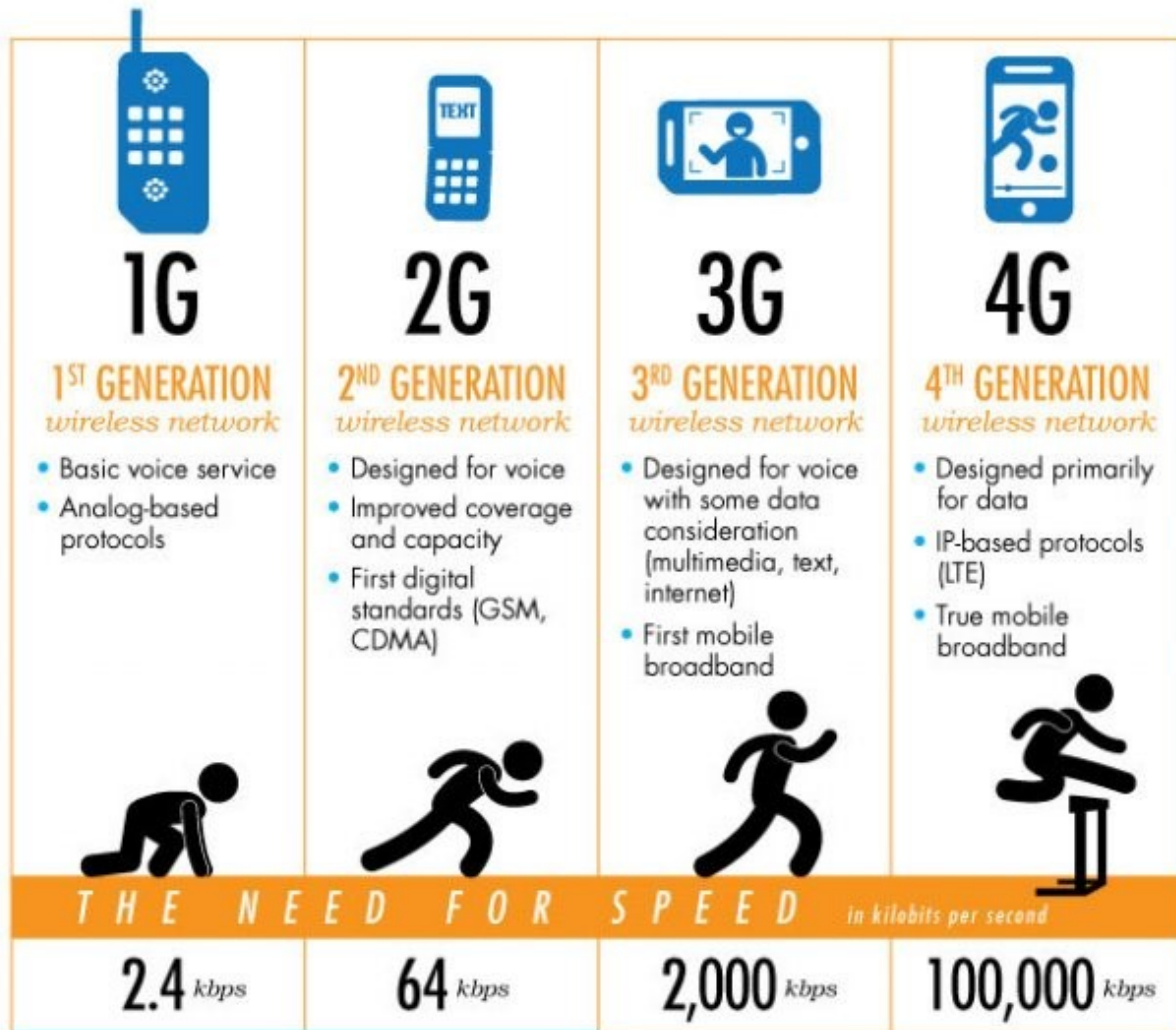
Το 4G (τέταρτη γενιά δικτύων) δεν βασίζεται σε νέες τεχνολογίες αλλά στο δίκτυο LTE (Long Term Evolution) το οποίο εγκαταστάθηκε για πρώτη φορά στον κόσμο στο Όσλο (Νορβηγία) και στη Στοκχόλμη (Σουηδία) το 2009. Το LTE αποτελεί εξέλιξη όχι τόσο στην τεχνολογία όσο στη διαδρομή που ακολουθείται για την επίτευξη ταχύτητας 4G και συγκεκριμένα λειτουργεί με το συνδυασμό καναλιών κι έτσι, αντί να συνδέεται στο κανάλι με το δυνατότερο σήμα, συνδυάζει πολλαπλά κανάλια

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

ταυτόχρονα για να δώσει μεγαλύτερες ταχύτητες συνολικά. Η αρχιτεκτονική του δικτύου 3G σχεδιάστηκε εκ νέου και απλοποιήθηκε ώστε οι ταχύτητες στο δίκτυο να αυξηθούν σημαντικά.

Τα 4G δίκτυα πρόσφεραν σε ολόκληρο τον κόσμο το βίντεο streaming υψηλής ποιότητας, την δυνατότητα της τηλεκπαίδευσης, της τηλεδιάσκεψης και τηλεργασίας, την άμεση πλοήγηση σε χάρτες, την ικανότητα του δικτύου να εντοπίζει τους συνδρομητές, τη γρήγορη πρόσβαση στον ιστό για κινητά (έως 1Gbps για σταθερούς χρήστες), την χρήση των cloud υπηρεσιών και πολλές άλλες δυνατότητες.

# EVOLUTION OF THE G



Εικόνα 3 G roadmap

## 5G (Πέμπτη γενιά δικτύων)

Από την πρώτη κιόλας γενιά ασυρμάτων δικτύων έγινε κατανοητό το ποσό σημαντική ήταν η ανάπτυξη του. Κάθε νέα γενιά πρόσθετε εκατομμύρια νέους χρήστες και ο λόγος ήταν ότι αύξανε τις υπηρεσίες που πρόσφερε στο χρήστη κάνοντας το κινητό αναγκαίο εξάρτημα για όλους τους ανθρώπους στον κόσμο.

Ο Kevin Ashton γεννημένος το 1968 στην Αγγλία, την περίοδο που εργαζόταν στην Procter & Gamble (P&G) το 1997 αποφάσισε να χρησιμοποιήσει ραδιοσυχνότητες RFID ώστε η διαχείριση της αλυσίδας εφοδιασμού της εταιρείας να γίνει πιο ανταγωνιστική. Αυτή η προσπάθεια τον οδήγησε στο MIT, όπου το 1999 με την ερευνητική του ομάδα χρηματοδοτούμενος από τη βιομηχανία δημιούργησε το Auto-ID Center με στόχο τη δημιουργία ενός παγκόσμιου πρότυπου συστήματος RFID. Είναι γνωστός για την επινόηση του όρου “Internet of Things” (IoT), "το Διαδίκτυο των πραγμάτων" για να περιγράψει ένα σύστημα όπου το Διαδίκτυο συνδέεται με τον φυσικό κόσμο μέσω πανταχού παρόντων αισθητήρων. [10]

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που ώθησε στην δημιουργία της πέμπτης γενιάς 5G, είναι το IoT. Το IoT έχει σκοπό να συνδέσει στο διαδίκτυο χιλιάδες διαφορετικές συσκευές που πλέον μπορούν να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες δισεκατομμυρίων χρηστών. Η πιο σημαντική τέτοια συσκευή είναι το κινητό τηλέφωνο που πλέον δεν είναι ένα απλό τηλέφωνο αλλά ένα IOT. Το κινητό πλέον εκτός από ένα σύστημα επικοινωνίας μέσω κλήσεων και μηνυμάτων είναι επίσης μια φωτογραφική μηχανή μια συσκευή GPS ,ένας τρόπος πληρωμής μέσω εφαρμογών όπως το google pay ,ένα μέσο ενημέρωσης αλλά και ψυχαγωγίας. Σαν να μην έφταναν όλα αυτά πλέον με το κινητό τηλέφωνο μπορείς να επικοινωνείς και με άλλες συσκευές μέλη του IOT όπως το air condition που έχεις στο σπίτι σου, την σκούπα σου ή το ψυγείο σου. Το IoT περιγράφει έναν κόσμο όπου οτιδήποτε μπορεί να συνδεθεί και να επικοινωνεί με έξυπνο τρόπο. Με άλλα λόγια, ο φυσικός κόσμος γίνεται ένα μεγάλο πληροφοριακό σύστημα. Όλα τα αντικείμενα που χρησιμοποιούμε καθημερινά είναι συνδεδεμένα στο Internet και είναι σε θέση να προσδιορίσουν τον εαυτό τους σε άλλες συσκευές. Ο όρος αυτός ταυτίζεται με τις ραδιοσυχνότητες (RFID) ως μέθοδο επικοινωνίας, αν και μπορεί επίσης να περιλαμβάνει άλλες τεχνολογίες αισθητήρων, ασύρματων τεχνολογιών ή των κωδικών QR. Ας φανταστούμε ένα κόσμο όπου τα αυτοκίνητα κινούνται αυτόνομα, οι εμπορικές παραδόσεις πραγματοποιούνται με drones, ο χειρουργός μπορεί να πραγματοποιήσει μία επέμβαση από απόσταση.



Εικόνα 4 internet Of Things

Υπάρχουν όμως προϋποθέσεις για να μπορέσουμε να πετύχουμε όλα αυτά. Οι βελτιωμένες ταχύτητες δεδομένων, η πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα, οι μικρότερες καθυστερήσεις, η μαζική συνδεσιμότητα συσκευών, ο περιορισμός του κόστους, είναι μερικές από αυτές και επιβάλλουν την ανάπτυξη του 5G που μοιάζει κάτι πάνω από μία γενιά, μοιάζει με τη χώρα των θαυμάτων.

Το 5G υπόσχεται νέες εμπειρίες γιατί φέρνει πολύ υψηλές ταχύτητες, πυκνότητα σύνδεσης, σχεδόν μηδενικές καθυστερήσεις και πολλές άλλες βελτιώσεις. Δίνει τη δυνατότητα να σύνδεσης πολλών συσκευών ταυτόχρονα. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα η όλη επεξεργασία να γίνεται στο cloud γεγονός που σημαίνει ότι οι συσκευές θα μικρύνουν μειώνοντας το κόστος κατασκευής και συντήρησης βελτιστοποιώντας το δίκτυο για τον τηλεπικοινωνιακό φορέα. [11][12]



[www.ired.gr/blog](http://www.ired.gr/blog)

Εικόνα 5 G growth bandwidth

## Σύγκριση Γενεών

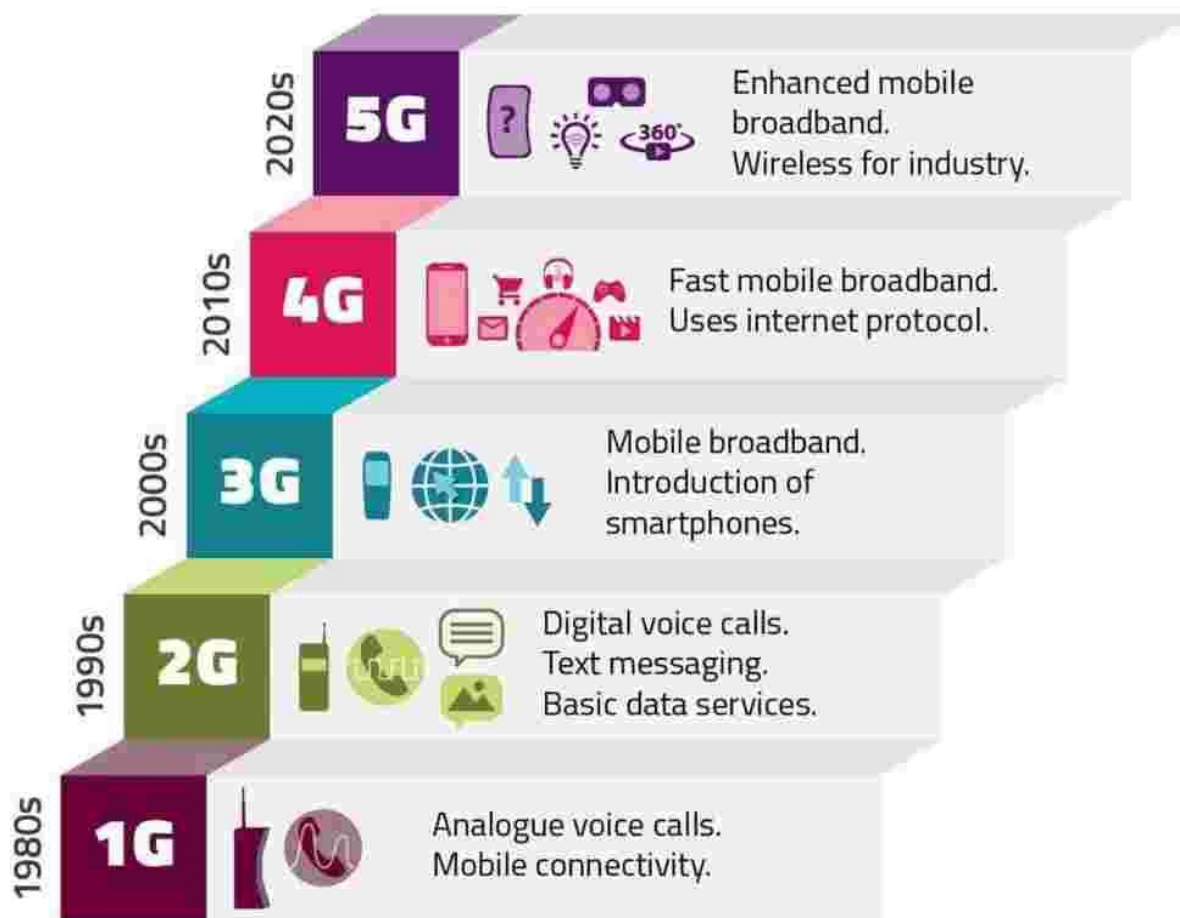
Η 5η γενιά δικτύων [12] είναι σημαντικά αναβαθμισμένη αν τη συγκρίνει κανείς με την προηγούμενη και η σύγκριση δεν έχει να κάνει μόνο με την ταχύτητα.

- Υποστηρίζει αποστολή δεδομένων που έχουν συγκεκριμένο μέγεθος σε συγκεκριμένη χρονική διάρκεια (connection density). Υποστηρίζονται ένα εκατομμύριο συσκευές που έχουν συνδεθεί ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ενώ στο δίκτυο 4ης γενιάς (4G) σε αντίστοιχη επιφάνεια υποστηρίζονται μόνο δύο χιλιάδες συσκευές.

- Νέα κατηγορία συσκευών θα κατασκευαστεί (M1 και NB-IoT) οι οποίες θα λειτουργούν με λιγότερη ενέργεια οπότε θα υποστηρίζονται μηχανές που λειτουργούν με χαμηλή ενέργεια ή και μπαταρίες. Έτσι το 5g δίκτυο θα μπορεί να καλύψει και τις ανάγκες της αγροτικής αγοράς.



- Με το 5G ο χρόνος μεταφοράς δεδομένων (latency ή gap time) εκμηδενίζεται δυνατότητα που θα έχει τεράστια επίδραση στην βιομηχανία της εικονικής πραγματικότητας. Οι καταναλωτές θα μπορούν να δοκιμάσουν οπτικά τα προϊόντα πριν να αγοράσουν ή να τοποθετήσουν τα έπιπλα στο σπίτι τους εικονικά πριν κάνουν τις αγορές τους.
- Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς απαιτούν χαμηλή ενέργεια όταν δεν βρίσκονται σε χρήση ενώ όταν κατεβάζουν ή αποστέλλουν δεδομένα όπως π.χ. υψηλής ευκρίνειας βίντεο απαιτούν υψηλότερα επίπεδα ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομούν ενέργεια.
- Επιπλέον τα 5G δίκτυα αποφεύγουν τη σπατάλη ενέργειας διότι χρησιμοποιούν συχνότητες μεταξύ 30 και 300GHz που είναι περισσότερο κατευθυνόμενες ενώ τα 4G δίκτυα συχνότητες 6GHz που δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα.
- Το 5G δίκτυο έναντι της προηγούμενης τεχνολογίας δικτύων έχει τη δυνατότητα να προσφέρει επιμήκυνση στη ζωή της μπαταρίας όταν συνδυαστεί με συσκευές κατάλληλης τεχνολογίας.



Εικόνα 6 G evolution

## Δυνατότητες για τον χρήστη

- Η **αυτόνομη οδήγηση** μπορεί να γίνει πραγματικότητα χάρη στη μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (latency). Εταιρείες όπως η Tesla, η Uber ή η Google δοκιμάζουν χρόνια τώρα οχήματα που θα κινούνται χωρίς οδηγό, όμως η κίνηση των οχημάτων απαιτεί ανάδραση σε πραγματικό χρόνο και αυτό μόνο με το 5G μπορεί να γίνει πραγματικότητα. Η ΕΕ με το πρόγραμμα «Europe 5G Corridors» που αφορά τη δημιουργία λωρίδων 5G στους αυτοκινητοδρόμους προετοιμάζεται για αυτή την εξέλιξη. Η Ελλάδα στην «Βίβλο Ψηφιακού Μετασχηματισμού 2020-2025» προβλέπει δημιουργία 5G λωρίδας στον αυτοκινητόδρομο Αθήνα - Θεσσαλονίκη – Εύζωνοι για αρχή.

- Η αλλαγές στην **ιατρική** με τη δυνατότητα απομακρυσμένης διάγνωσης σε πραγματικό χρόνο με τη μεταφορά απεικονιστικών και άλλων εξετάσεων σε εξειδικευμένο γιατρό που βρίσκεται ίσως και σε άλλη ήπειρο μπορεί με την ταχύτητα και την αξιοπιστία της σύνδεσης να καταστεί δυνατή. Ακόμη και εφαρμογές επεμβάσεων που θα γίνονται από απόσταση δοκιμάζονται.

- Στην **ψυχαγωγία** με τις εφαρμογές στο cloud gaming οι χρήστες μπορούν να παίζουν από το κινητό ή το tablet τους παιχνίδια που τρέχουν σε υπολογιστές που βρίσκονται χιλιόμετρα μακριά που στο παρελθόν θα απαιτούσαν υπολογιστές με μεγάλη ισχύ.

- Το **έξυπνο σπίτι** ή το **έξυπνο εργοστάσιο** ή η **έξυπνη πόλη** μπορούν να γίνουν πραγματικότητα με την ταυτόχρονη σύνδεση πολλών συσκευών που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση και χάρη στις υψηλές ταχύτητες δεδομένων, την πολύ μεγάλη χωρητικότητα, τις μηδενικές καθυστερήσεις, που προσφέρει η 5<sup>η</sup> γενιά δικτύων, είναι σε θέση να προσδιορίσουν τον εαυτό τους σε άλλες συσκευές δίνοντας στον χρήστη τη δυνατότητα να τις χρησιμοποιεί χωρίς τη φυσική του παρουσία.

Αυτές είναι κάποιες από τις αλλαγές που μπορεί φέρει στην καθημερινότητα μας το 5G. Κάποιες από αυτές ωστόσο μπορεί να μην γίνουν ποτέ πραγματικότητα ενώ άλλες που σήμερα ίσως δεν φανταζόμαστε να υλοποιηθούν στο μέλλον. [14]



Εξομίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G



Εικόνα 7 5G & IoT

### Κεφάλαιο 3

Η εκρηκτική ανάπτυξη των συστημάτων πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (MIMO) επέτρεψε την υψηλή ταχύτητα δεδομένων και μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Μερικές από τις τεχνολογίες που βασίζονται σε αυτά τα συστήματα είναι το IEEE 802.11, η τρίτη γενιά (3G), η τέταρτη γενιά (4G) και η εξέλιξη πέμπτη γενιά (5G). Οι πρόσφατες εξελίξεις στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας έχουν συμβάλει στη σχεδίαση σεναρίων πολλών χρηστών με επικοινωνία MIMO. Αυτά τα συστήματα επικοινωνίας αναφέρονται ως MIMO πολλαπλών χρηστών.

Τα κύρια ιστορικά γεγονότα που συνθέτουν τα συστήματα MIMO συνοψίζονται ως εξής:

- Το 1984, ο Jack Winters στα Bell Laboratories έγραψε μια πατέντα για ασύρματες επικοινωνίες χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές. Ο Jack Winters παρουσίασε μια μελέτη των θεμελιωδών ορίων στον ρυθμό δεδομένων των συστημάτων πολλαπλών κεραιών σε ένα περιβάλλον εξασθένισης Rayleigh.

- Το 1993, οι Arogyaswami Paulraj και Thomas Kailath πρότειναν την έννοια της χωρικής πολυπλεξίας χρησιμοποιώντας το MIMO.

- Η εργασία των Greg Raleigh και Gerard Joseph Foschini το 1996, οι οποίοι επινόησαν νέες προσεγγίσεις που περιλάμβαναν τεχνικές κωδικοποίησης χωροχρόνου. Αυτές οι προσεγγίσεις αποδείχθηκε ότι αυξάνουν τη φασματική απόδοση των συστημάτων MIMO.

- Το 1999, οι Thomas L. Marzetta και Bertrand M. Hochwald παρουσίασαν την έρευνα τους σχετικά με τον σύνδεσμο MIMO Rayleigh που εξασθενίζει λαμβάνοντας υπόψη πτυχές της θεωρίας πληροφοριών.

- Το πρώτο εμπορικό σύστημα MIMO αναπτύχθηκε το 2001 από την Iospan Wireless Inc.

- Από το 2006, αρκετές εταιρείες όπως η Broadcom και η Intel έχουν εισαγάγει μια νέα τεχνική επικοινωνίας που βασίζεται στην τεχνολογία MIMO για τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων ασύρματου τοπικού δικτύου (LAN).

#### Τι είναι το MIMO

Το MIMO (πολλαπλή είσοδος, πολλαπλή έξοδος) [15] είναι μια τεχνολογία κεραιάς για ασύρματες επικοινωνίες στην οποία χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραιές τόσο στην πηγή (πομπός) όσο

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

και στον προορισμό (δέκτη). Οι κεραιές σε κάθε άκρο του κυκλώματος επικοινωνιών συνδυάζονται για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων, τη βελτιστοποίηση της ταχύτητας δεδομένων και τη βελτίωση της χωρητικότητας των ραδιοεκπομπών, επιτρέποντας στα δεδομένα να ταξιδεύουν σε πολλές διαδρομές σήματος ταυτόχρονα.

Η δημιουργία πολλαπλών εκδόσεων του ίδιου σήματος παρέχει περισσότερες ευκαιρίες για τα δεδομένα να φτάσουν στην κεραία λήψης χωρίς να επηρεάζονται από το ξεθώριασμα, γεγονός που αυξάνει την αναλογία σήματος προς θόρυβο και το ποσοστό σφάλματος. Ενισχύοντας τη χωρητικότητα των συστημάτων ραδιοσυχνότητας (RF), το MIMO δημιουργεί μια πιο σταθερή σύνδεση και λιγότερη συμφόρηση.

## Η σημασία του MIMO

Το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) πρόσθεσε το MIMO με την έκδοση 8 του Mobile Broadband Standard. Η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιείται για δίκτυα Wi-Fi και τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς (4G) Long-Term Evolution (LTE) και πέμπτης γενιάς (5G) σε ένα ευρύ φάσμα αγορών όπως η παραγωγή τηλεοπτικών εκπομπών και η κυβέρνηση. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και υποστηρίζεται από όλα τα ασύρματα προϊόντα με 802.11n.

Το MIMO χρησιμοποιείται συχνά για επικοινωνίες υψηλού εύρους ζώνης όπου είναι σημαντικό να μην υπάρχουν παρεμβολές από συστήματα μικροκυμάτων ή ραδιοσυχνοτήτων. Για παράδειγμα, χρησιμοποιείται συχνά από τους πρώτους ανταποκριτές που δεν μπορούν πάντα να βασίζονται σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας κατά τη διάρκεια καταστροφής ή διακοπής ρεύματος ή όταν ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας είναι υπερφορτωμένο.

Το Wi-Fi 6 -- γνωστό και ως 802.11ax -- ανέβασε τον πήχη της ασύρματης συνδεσιμότητας εισάγοντας πολλές νέες τεχνολογίες που βοηθούν στην εξάλειψη των περιορισμών που σχετίζονται με την προσθήκη περισσότερων συσκευών Wi-Fi σε ένα δίκτυο. Το Wi-Fi 7 βρίσκεται επί του παρόντος σε ανάπτυξη με αναμενόμενη κυκλοφορία το 2024.

## MIMO τρόπος λειτουργίας

Υπάρχουν πολλές μορφές MIMO που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το SISO, μέσω του SIMO και του MISO μέχρι τα πλήρη συστήματα MIMO. Όλα αυτά μπορούν να προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση μέσω της πρόσθετης επεξεργασίας και του αριθμού των κεραιών που χρησιμοποιούνται. Κατά την επιλογή του, πρέπει να τηρούνται ισορροπίες απόδοσης σε σχέση με το κόστος, το μέγεθος, τη διαθέσιμη επεξεργασία και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Πολλαπλής εισόδου και πολλαπλής εξόδου ή MIMO είναι η τεχνική πολλαπλών κεραιών τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη για τη βελτίωση της απόδοσης της επικοινωνίας. Τα συστήματα MIMO μπορούν να θεωρηθούν ως επέκταση των λεγόμενων έξυπνων κεραιών, μιας δημοφιλής τεχνολογίας που χρησιμοποιεί συστοιχίες κεραιών για τη βελτίωση της ασύρματης μετάδοσης. Επιπλέον, μπορεί να προσφέρει τεράστια πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συστήματα μιας κεραιάς, τόσο όσον αφορά τη χωρητικότητα όσο και την απόδοση σφάλματος. Τα συστήματα MIMO, τα οποία χρησιμοποιούν κεραιές πολλαπλών στοιχείων για μετάδοση και λήψη σήματος, αναμένεται να διαδραματίσουν βασικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης των μελλοντικών συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Έχει αποδειχθεί ότι εάν το εξασθενημένο σήμα μεταξύ των ζευγών στοιχείων κεραιάς εκπομπής και λήψης είναι ανεξάρτητα και πανομοιότυπα κατανομημένα (i.i.d.), η χωρητικότητα των συστημάτων MIMO μπορεί να αυξηθεί γραμμικά με τον αριθμό των κεραιών. Η πολλαπλή έξοδος πολλαπλών εισόδων, ή MIMO, είναι μια ασύρματη τεχνολογία ή τεχνολογία RF που αναφέρεται και χρησιμοποιείται σε πολλές νέες τεχνολογίες όπως Wi-Fi, LTE. Η Long Term Evolution και πολλές άλλες ασύρματες τεχνολογίες χρησιμοποιούν τη νέα ασύρματη τεχνολογία MIMO για να παρέχουν αυξημένη χωρητικότητα ζεύξης και φασματική απόδοση σε συνδυασμό με βελτιωμένη αξιοπιστία ζεύξης χρησιμοποιώντας αυτά που προηγουμένως θεωρούνταν μονοπάτια παρεμβολής. Ένα σύστημα MIMO περιλαμβάνει  $N$  κεραιές μετάδοσης και  $M$  κεραιές λήψης παρουσιάζεται παρακάτω, το  $x$  είναι ένα διάνυσμα με  $N$  σύμβολα :

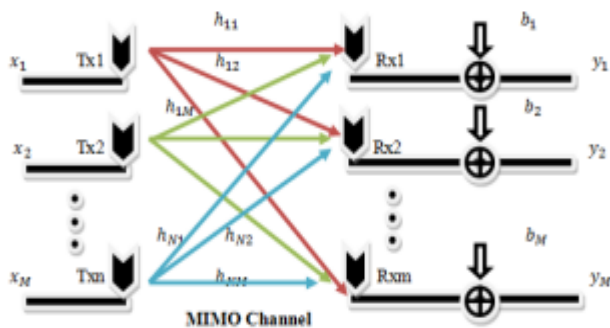
$$x = [x_1 \dots x_2 \dots x_N]^T$$

$H$  είναι η μήτρα καναλιού μεγέθους  $N \times M$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix}$$

Δηλαδή το κανάλι πολλαπλών κεραιών  $h_{nm}$  που αντιστοιχεί στο κανάλι μεταξύ της  $h_n$  κεραιά μετάδοσης και  $h_m$  κεραιά λήψης

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G



Εικόνα 8 MIMO channel

Θεωρούμε το διάνυσμα θορύβου  $\mathbf{b}$  του  $M$  λαμβάνει κεραιές έτσι ώστε:

$$\mathbf{b} = [x_1 \dots x_2 \dots x_N]^T$$

Τότε το λαμβανόμενο διάνυσμα  $\mathbf{y}$  εκφράζεται ως εξής:

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

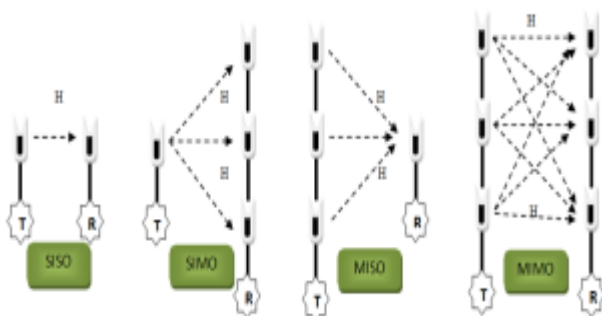
Γενικά θεωρείται ότι ο θόρυβος είναι αμελητέος και το μεταδιδόμενο σήμα εκφράζεται ως

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

Γνωρίζοντας το  $\mathbf{y}$  και το  $\mathbf{H}$ , η σχέση που επιτρέπει την ανακατασκευή  $\mathbf{x}$  είναι:

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{y}$$

### Χωρητικότητα SISO, MISO, SIMO και MIMO Καναλιού



Εικόνα 9 Κανάλια SISO, SIMO, MISO, MIMO

Όπως είναι γνωστό, η χωρητικότητα είναι ένα μέτρο απόδοσης για συστήματα ψηφιακών επικοινωνιών. Είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης για τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί αξιόπιστη

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

επικοινωνία. Εάν ο ρυθμός μετάδοσης γίνει μεγαλύτερος από τη χωρητικότητα, το σύστημα χαλάει και στο δέκτη εμφανίζονται σφάλματα αποκωδικοποίησης με μη αμελητέα πιθανότητα. Η χωρητικότητα είναι το κύριο εργαλείο για τον χαρακτηρισμό της απόδοσης των συστημάτων MIMO και επίσης χρησιμεύει στο πρακτικό σύστημα ως οδηγός για τον σωστό σχεδιασμό των μεταδιδόμενων σημάτων καθώς και για την επεξεργασία των λαμβανόμενων σημάτων. Στη συνέχεια θα συγκριθεί η χωρητικότητα των διαφόρων υπάρχοντων καναλιών (SISO, SIMO, MISO και MIMO) χωρίς να γνωρίζουμε την κατάσταση του καναλιού CSI. Η έννοια της χωρητικότητας καναλιού εισήχθη από τον Claude Shannon με μια έκφραση που είναι συχνά γνωστή ως ο τύπος του Shannon:

$$C = W \log_2 (1 + P/N) \text{ bits/second}$$

### **Χωρητικότητα καναλιού SISO**

Σύστημα SISO με κέρδος καναλιού  $h$ , SNR την αναλογία σήματος προς θόρυβο στην κεραία λήψης, χωρητικότητα χωρίς να γνωρίζουμε το CSI:

$$C = \log_2(1 + \text{SNR} |h|^2) \text{ Bit/s/Hz}$$

Ως εκ τούτου η θεωρητική ικανότητα θα είναι:

$$C_{\text{theo}} = E(c) = \log_2(1 + \text{SNR} \cdot E(|h|^2))$$

$$\text{ή } E(|h|^2) = 1$$

$$C_{\text{theo}} = \log_2(1 + \text{SNR})$$

Η χωρητικότητα αυξάνεται ως λογαριθμική συνάρτηση του  $(1+\text{SNR})$

### **Χωρητικότητα καναλιού SIMO**

Ένα κανάλι SIMO (Μία είσοδος, πολλαπλή έξοδος) είναι ένα σύστημα πολλαπλών κεραιών με κεραία εκπομπής και κεραιές  $M$  στη λήψη. Με  $h_i$  το σύνθετο κέρδος μεταξύ της κεραιάς εκπομπής και της  $i$ -οστής κεραιά λήψης, η χωρητικότητά της θα είναι:

$$C = \log_2(1 + \text{SNR} \sum_{i=1}^M |h_i|^2)$$

$$\text{Avec } \sum_{i=1}^M |h_i|^2 = M^2$$

$$C_{\text{theo}} = E(C) = \log_2 (1 + \text{SNR} \cdot M^2)$$

Ως εκ τούτου διαπιστώνεται ότι η χωρητικότητά του αυξάνεται με το λογάριθμο του  $(1 + \text{SNR} M^2)$ , πιο γρήγορα από ό,τι στην περίπτωση SISO.

### Χωρητικότητα καναλιού MIMO

Με το σύστημα MIMO χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, η προσθήκη πολλαπλών κεραιών στον πομπό σε συνδυασμό με προηγμένους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος στον πομπό και στον δέκτη δίνει απόδοση όσον αφορά τη χωρητικότητα και την ποικιλομορφία. Ένα κανάλι MIMO είναι μια ασύρματη σύνδεση μεταξύ  $N$  εκπομπών και  $M$  κεραιών λήψης. Αποτελείται από στοιχεία  $NM$  που αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές καναλιού MIMO. Οι πολλαπλές κεραιές εκπομπής και λήψης θα μπορούσαν να ανήκουν σε ένα μόντεμ ενός χρήστη ή θα μπορούσαν να διανεμηθούν μεταξύ διαφορετικών χρηστών. Για ένα κανάλι MIMO με  $N$  κεραιές εκπομπής και  $M$  κεραιές λήψης, η μορφή καναλιού  $H$  μεγέθους  $N \times M$  είναι η παρακάτω

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix}$$

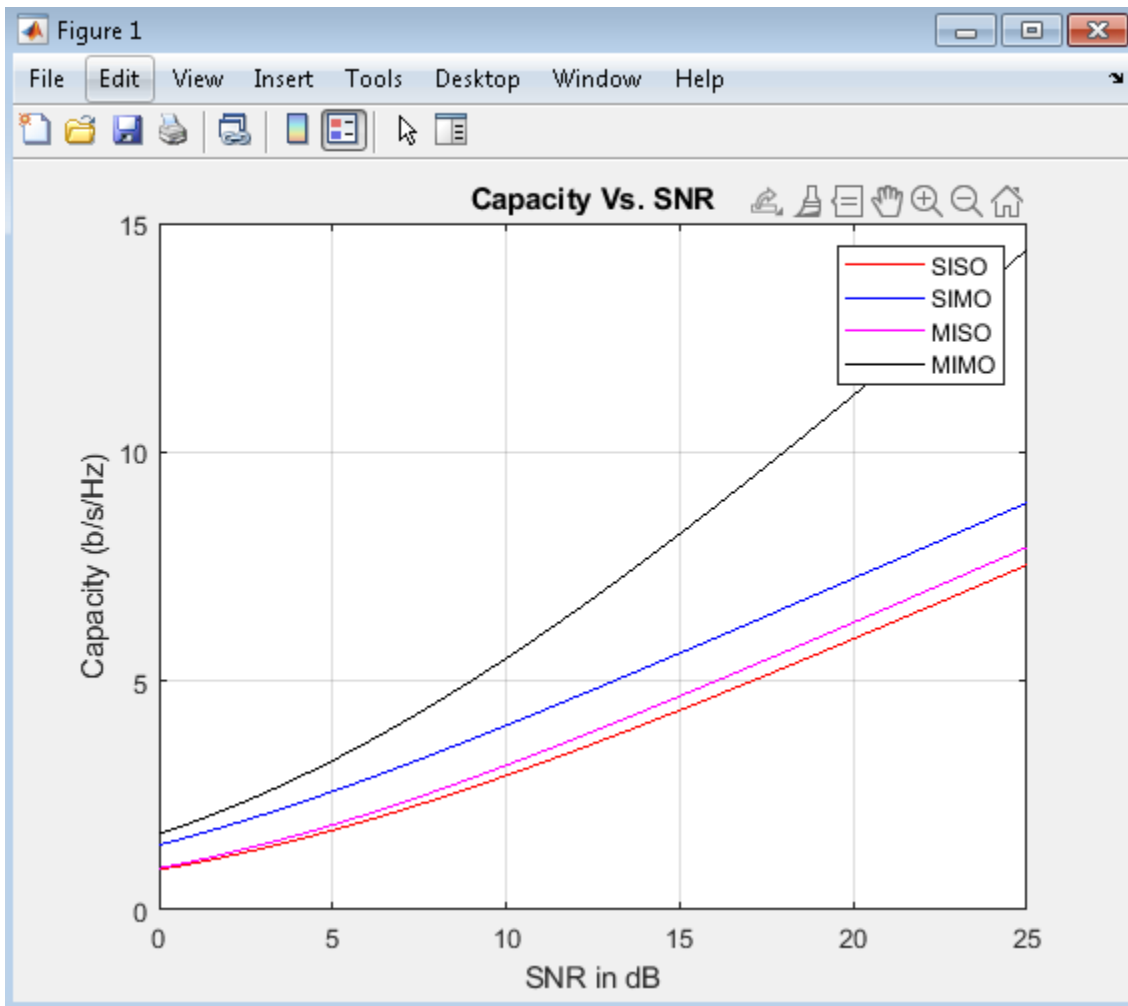
$h_{ij}$  είναι το σύνθετο κέρδος καναλιού μεταξύ της  $j^{\text{th}}$  κεραιάς μετάδοσης και της  $i^{\text{th}}$  κεραιά λήψης:

$$C = \log_2(\det [I_M + \frac{\text{SNR}}{N} HH^H])$$

Όπου οι αριθμοί των κεραιών  $N$  και  $M$  είναι σημαντικοί, η αναμενόμενη τιμή συνάρτησης χωρητικότητας για ένα κανάλι Rayleigh αυξάνεται αναλογικά προς το  $M$ .

$$E[C] \approx M \cdot \log_2(1 + \text{SNR})$$

Συμπερασματικά, η χωρητικότητα αυξάνεται πολύ πιο γρήγορα στα συστήματα MIMO από ότι στα SISO και SIMO χάρη στον μεγάλο αριθμό θήκης κεραιών. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η σύγκριση (ο κώδικας επισυνάπτεται). Από την παρακάτω εικόνα προκύπτει ότι το σύστημα MIMO υπερτερεί των άλλων τεχνικών.



Εικόνα 10 SISO vs SIMO vs MISO vs MIMO

## Εφαρμογές LTE της MIMO

Το MIMO είναι μια από τις πιο κοινές μορφές ασύρματης σύνδεσης και έπαιξε βασικό ρόλο στην ανάπτυξη του LTE και του προτύπου ασύρματης ευρυζωνικής τεχνολογίας Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX). Το LTE χρησιμοποιεί MIMO και ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) για να αυξήσει ταχύτητες έως και 100 megabits ανά δευτερόλεπτο (mbps) και πέρα. Αυτές οι τιμές είναι διπλάσιες από ό,τι προσφερόταν στο προηγούμενο 802.11a Wi-Fi. Το LTE χρησιμοποιεί το MIMO για διαφοροποίηση μετάδοσης, χωρική πολυπλεξία (για τη μετάδοση χωρικά διαχωρισμένων ανεξάρτητων καναλιών) και συστήματα ενός χρήστη και πολλαπλών χρηστών.



Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

Το MIMO σε LTE επιτρέπει την πιο αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων, ενώ παράλληλα αυξάνει τους ρυθμούς δεδομένων. Διαχωρίζει τα δεδομένα σε μεμονωμένες ροές πριν από τη μετάδοση. Κατά τη μετάδοση, τα δεδομένα και τα σήματα αναφοράς ταξιδεύουν μέσω του αέρα σε έναν δέκτη που θα είναι ήδη εξοικειωμένος με αυτά τα σήματα, κάτι που βοηθά τον δέκτη με την εκτίμηση του καναλιού.

## MIMO massive systems και 5G

Η MIMO συνεχίζει να αναβαθμίζεται και να αναπτύσσεται μέσω της χρήσης της σε τεράστιες νέες εφαρμογές, καθώς η βιομηχανία ασύρματης σύνδεσης εργάζεται για να φιλοξενήσει περισσότερες κεραιές, δίκτυα και συσκευές. Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτού είναι η ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G.

Αυτά τα συστήματα 5G MIMO [16] χρησιμοποιούν πολυάριθμες μικρές κεραιές για να ενισχύσουν το εύρος ζώνης στους χρήστες -- όχι μόνο τους ρυθμούς μετάδοσης όπως με την τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς (3G) και τέταρτης γενιάς (4G) -- και υποστηρίζουν περισσότερους χρήστες ανά κεραία. Σε αντίθεση με το 4G MIMO, το οποίο χρησιμοποιεί ένα σύστημα Frequency Division Duplex (FDD) για την υποστήριξη πολλαπλών συσκευών, το massive MIMO 5G χρησιμοποιεί μια διαφορετική ρύθμιση που ονομάζεται Time Division Duplex (TDD). Αυτό προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με το FDD (βλ. εικόνα παρακάτω).

## MIMO και beamforming

Το Beamforming [17] είναι μια τεχνική διαχείρισης ραδιοσυχνοτήτων που μεγιστοποιεί την ισχύ του σήματος στον δέκτη εστιάζοντας τα δεδομένα εκπομπής σε συγκεκριμένους χρήστες αντί για μια μεγάλη περιοχή. Με το 5G, η τρισδιάστατη (3D) διαμόρφωση δέσμης σχηματίζει και κατευθύνει κάθετες και οριζόντιες δέσμες στον χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο προσεγγίζονται συσκευές ακόμα και αν βρίσκονται στην κορυφή μιας πολυκατοικίας. Οι δέσμες αποτρέπουν παρεμβολές με άλλα ασύρματα σήματα και παραμένουν με τους χρήστες καθώς κινούνται σε μια δεδομένη περιοχή.

## SU-MIMO εναντίον MU-MIMO

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι MIMO [18] : ένας χρήστης (SU) και πολλαπλός χρήστης (MU). Στα συστήματα SU-MIMO, οι ροές δεδομένων μπορούν να αλληλεπιδρούν μόνο με μία συσκευή στο δίκτυο κάθε φορά. Επομένως, τα συστήματα MU-MIMO υπερτερούν του SU-MIMO.

Προκύπτουν προβλήματα με το SU-MIMO όταν πολλοί χρήστες προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο ταυτόχρονα. Εάν ένα άτομο ανεβάζει βίντεο και ένα άλλο πραγματοποιεί συνδιάσκεψη, η ποιότητα της ροής δεδομένων θα υποβαθμιστεί, προκαλώντας λανθάνουσα κατάσταση ή καθυστερήσεις στα ύψη. Στο άλλο άκρο του φάσματος, το MU-MIMO έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να μεταφέρει πολλαπλά σύνολα δεδομένων σε πολλές συσκευές ταυτόχρονα.

Υπάρχουν διάφορες πιθανές διαμορφώσεις για αυτά τα συστήματα MIMO, με τα 2x2, 4x4, 6x6 και 8x8 να είναι τα πιο κοινά. Τα συστήματα 5G χειρίζονται αυτές τις διαμορφώσεις για να επιτρέψουν εκτεταμένη χωρητικότητα δικτύου.

## Πλεονεκτήματα της MIMO

Στις διάφορες διαμορφώσεις του, το MIMO έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με τις προηγμένες τεχνολογίες κεραιών MISO και SIMO [15]:

- Το MIMO ενεργοποιεί ισχυρότερα σήματα. Αναπηδά και αντανακλά σήματα, έτσι ώστε μια συσκευή χρήστη να μην χρειάζεται να βρίσκεται σε καθαρή οπτική γωνία.
- Το βίντεο και άλλο περιεχόμενο μεγάλης κλίμακας μπορούν να ταξιδεύουν μέσω δικτύου σε μεγάλες ποσότητες. Αυτό το περιεχόμενο ταξιδεύει πιο γρήγορα επειδή το MIMO υποστηρίζει μεγαλύτερη απόδοση.
- Πολλές ροές δεδομένων βελτιώνουν την οπτική και ακουστική ποιότητα. Μειώνουν επίσης την πιθανότητα απώλειας πακέτων δεδομένων.

Το MIMO είναι ένα κύριο εργαλείο για την προώθηση όλων των πτυχών των ασύρματων επικοινωνιών. Διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην τεχνολογία 5G και επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο οι χρήστες αλληλεπιδρούν καθημερινά με αυτές τις τεχνολογίες. Αυτές οι επιρροές περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

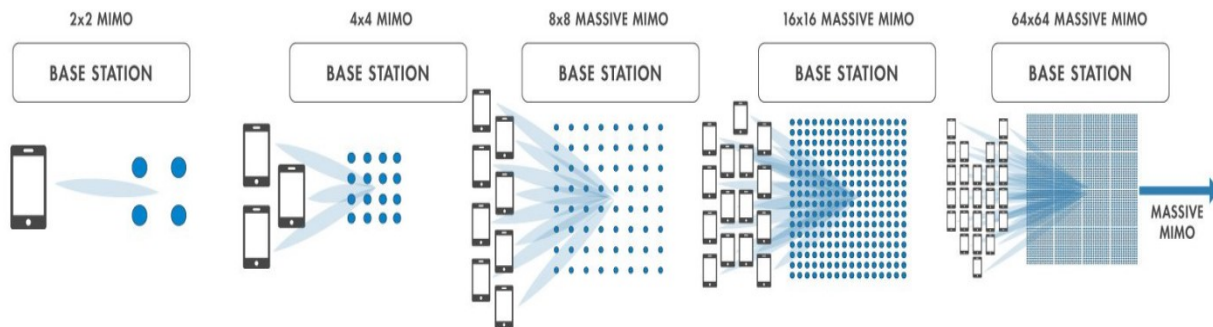
Υψηλές χωρητικότητες δικτύου. Τα δεδομένα ταξιδεύουν σε περισσότερους χρήστες μέσω της ανάπτυξης του νέου ραδιοφώνου 5G (5G NR). Το MU-MIMO και το 5G NR επιτρέπουν σε περισσότερους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε δεδομένα με τους ίδιους ρυθμούς συχνότητας και χρόνου.

Περισσότερη κάλυψη. Οι χρήστες μπορούν σύντομα να αναμένουν δεδομένα υψηλής ταχύτητας όπου κι αν βρίσκονται, ακόμη και στην άκρη των περιοχών εξυπηρέτησης. Χρησιμοποιώντας 3D beamforming, η κάλυψη προσαρμόζεται στην κίνηση και τη θέση του χρήστη.

Καλύτερη εμπειρία χρήστη (UX). Η παρακολούθηση βίντεο και η μεταφόρτωση περιεχομένου είναι ευκολότερη και ταχύτερη. Η τεράστια τεχνολογία MIMO και 5G μεταμορφώνουν το UX.

## Κεφάλαιο 4 Massive MIMO

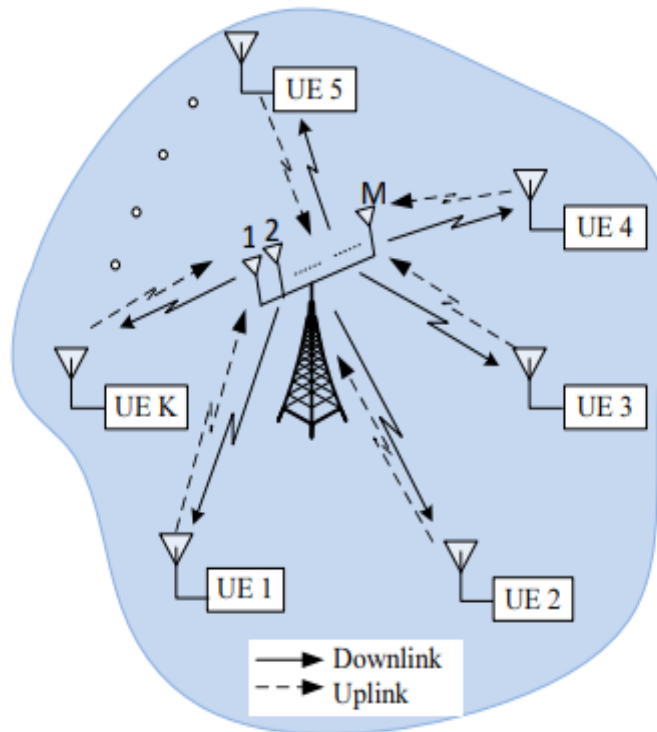
Η massive multiple in multiple out (MIMO) είναι ένας πολλά υποσχόμενος τεχνολογικός ενεργοποιητής για δίκτυα 5G, επειδή προσφέρει πολλαπλά οφέλη απόδοσης και ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με τα τρέχοντα δίκτυα LTE και LTE-Advanced. Το Massive MIMO (masive multiple-input multiple-output) είναι ένας τύπος τεχνολογίας ασύρματων επικοινωνιών στην οποία οι σταθμοί βάσης είναι εξοπλισμένοι με πολύ μεγάλο αριθμό στοιχείων κεραίας για τη βελτίωση της φασματικής και της ενεργειακής απόδοσης. Τα massive συστήματα MIMO έχουν συνήθως δεκάδες, εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες κεραίες σε μια ενιαία διάταξη κεραίων. Άλλες τεχνολογίες όπως η διαμόρφωση δέσμης και η χωρική πολυπλεξία δίνουν τη δυνατότητα στο massive MIMO να θεωρείται ως μία από τις βασικές τεχνολογίες για συστήματα NR 5G.



Εικόνα 11 Massive MIMO

### Massive MIMO: A Multiuser MIMO Technology

Το Massive MIMO [19] είναι μια τεχνολογία MIMO πολλαπλών χρηστών στην οποία οι εξοπλισμοί χρήστη μιας κεραίας  $K$  (UE) εξυπηρετούνται ταυτόχρονα στον ίδιο πόρο χρόνο-συχνότητας από έναν σταθμό βάσης (BS) εξοπλισμένο με σχετικά μεγάλο αριθμό  $M$  κεραίων, δηλ.  $M \gg K$  (βλέπε παρακάτω εικόνα). Γενικά, οι UE σε ένα massive σύστημα MIMO μπορούν να εξοπλιστούν με περισσότερες από μία κεραίες όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 12 Massive MIMO: μια τεχνολογία MIMO πολλαπλών χρηστών όπου οι K UE μονής κεραίας εξυπηρετούνται από ένα BS με M >> K κεραίες.

Η ανάπτυξη πολλών κεραιών στο BS (Base Station) οδηγεί σε ένα ενδιαφέρον σενάριο διάδοσης που ονομάζεται “ευνοϊκή διάδοση”, όπου το κανάλι γίνεται σχεδόν ντετερμινιστικό επειδή οι ραδιοζεύξεις μεταξύ του BS και του UE γίνονται σχεδόν ορθογώνιες μεταξύ τους [20]. Αυτό συμβαίνει επειδή τα αποτελέσματα της εξασθένισης μικρής κλίμακας τείνουν να εξαφανίζονται ασυμπτωτικά στο καθεστώς μεγάλου M. Σημαντικά οφέλη EE μπορούν να επιτευχθούν με ευνοϊκή διάδοση, επειδή μπορούν να πραγματοποιηθούν πολλαπλές τάξεις πολυπλεξίας και κερδών συστοιχίας. Για λόγους επεξήγησης, ας εξεταστούν οι μεταδόσεις άνω και κάτω ζεύξης σε μια τεράστια κυψέλη MIMO.

Οι ασυμπτωτικές χωρητικότητες Shannon στην άνω ζεύξη (CUL) και στην κατερχόμενη ζεύξη (CDL) για ένα κανάλι MIMO πολλαπλών χρηστών υπό ευνοϊκή διάδοση δίνονται από το [20]

$$C_{UL} = \sum_{k=1}^K \log_2 (1 + p_{u,k} M \beta_k )$$

όπου  $p_{u,k}$  και  $p_{d,k}$  είναι οι λόγοι σήματος ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης προς θόρυβο (SNR) για το  $k^{\text{th}}$  UE, το  $\beta_k$  αντιπροσωπεύει τον συντελεστή εξασθένησης μεγάλης κλίμακας για το  $k^{\text{th}}$  UE και  $\{a_k, k = 1, 2, \dots, K\}$ , είναι ένα διάνυσμα βελτιστοποίησης για τη λήψη  $C_{DL}$ . Για απλότητα, εάν αγνοηθεί η επίδραση του  $\beta_k$  και υποτεθεί ότι κάθε UE εκπέμπει με έναν μέσο λόγο σήματος προς θόρυβο  $p_u$ , η χωρητικότητα Shannon ανερχόμενης ζεύξης απλοποιείται σε

$$C_{UL} = K \log_2(1 + Mp_u)$$

Ένα παρόμοιο επιχείρημα μπορεί να γίνει και για τις μεταδόσεις κατερχόμενης ζεύξης. Η απλοποίηση που απεικονίζεται στην παραπάνω εξίσωση οδηγεί σε δύο σημαντικές παρατηρήσεις

- (i) Η απόδοση του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας το  $K$ , δηλ. πολυπλεξώνοντας παράλληλες ροές δεδομένων σε περισσότερους αριθμούς UE στον ίδιο πόρο χρόνου-συχνότητας, και
- (ii) Η ισχύς μετάδοσης ανά UE μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας το  $M$ , δηλαδή τον αριθμό των κεραιών BS, διατηρώντας παράλληλα την ίδια απόδοση ανά UE. Ως εκ τούτου αποδεικνύεται ότι επιτυγχάνονται οφέλη πολυπλεξίας  $O(K)$  και οφέλη πίνακα  $O(M)$  υπό ευνοϊκή διάδοση.

Ενώ τα μεγάλα οφέλη της συστοιχίας είναι μια απλή ευκαιρία για τη μείωση της ισχύος μετάδοσης UE, το τεράστιο MIMO διευκολύνει επίσης τη δραστική μείωση της ισχύος κυκλώματος που καταναλώνεται στο σύστημα. Όπως συζητήθηκε στη συνέχεια, αυτό συμβαίνει επειδή το BS μπορεί να εφαρμόσει

- (i) τεχνικές γραμμικής επεξεργασίας σήματος και
- (ii) αλγόριθμους προγραμματισμού χρηστών χαμηλής πολυπλοκότητας, και να επιτύχει σχεδόν βέλτιστη απόδοση απόδοσης.

### Γραμμική Επεξεργασία Σήματος

Στα συμβατικά συστήματα MIMO πολλαπλών χρηστών, οι βέλτιστες χωρητικότητες μπορούν να επιτευχθούν εάν το BS εφαρμόζει πολύπλοκες τεχνικές επεξεργασίας σήματος, όπως ανίχνευση πολλαπλών χρηστών μέγιστης πιθανότητας (ML) στην άνω ζεύξη και κωδικοποίηση (DPC) [20] στην κατερχόμενη ζεύξη. Με την ανίχνευση πολλαπλών χρηστών ML, το BS πρέπει να αναζητήσει όλα τα πιθανά διανύσματα μεταδιδόμενου σήματος και να επιλέξει το καλύτερο ως εξής

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_{\mathbf{s} \in \mathcal{S}^K} \|\mathbf{y}_{ul} - \sqrt{p_u} \mathbf{H} \mathbf{s}\|^2$$

όπου  $\mathcal{S}$  είναι το nite αλφάβητο του  $s_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ . Η παραπάνω εξίσωση είναι πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων (LS) με περιορισμό finite-alphabet. Το BS πρέπει να αναζητήσει τα διανύσματα  $|\mathcal{S}|^K$ , όπου  $|\mathcal{S}|$  υποδηλώνει την πληθώρα του συνόλου  $\mathcal{S}$ . Επομένως, η ML έχει μια πολυπλοκότητα που είναι εκθετική ως προς τον αριθμό των χρηστών.

Δυστυχώς, τέτοιες πολύπλοκες τεχνικές επεξεργασίας σήματος συνεπάγονται υπολογιστικά βάρη που αυξάνονται εκθετικά με το μέγεθος του συστήματος, για παράδειγμα με τον αριθμό των κεραιών BS  $M$ . Ως αποτέλεσμα, όταν τα  $M$  και  $K$  είναι μεγάλα, τέτοιες τεχνικές καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ισχύος κυκλώματος, καθιστώντας έτσι εξαιρετικά ακατάλληλο για τεράστιες λειτουργίες MIMO. Στην περίπτωση μεγάλου  $M$ , οι τεχνικές γραμμικής επεξεργασίας σήματος, όπως ο συνδυασμός μέγιστης αναλογίας (MRC) στην άνω ζεύξη και μετάδοση μέγιστου λόγου (MRT) στην κάτω ζεύξη, μπορούν να επιτύχουν σχεδόν βέλτιστη απόδοση απόδοσης.

#### Προγραμματισμός χρήση χαμηλής πολυπλοκότητας

Στα συμβατικά συστήματα MIMO πολλαπλών χρηστών [21], οι απλές τεχνικές γραμμικής προκωδικοποίησης, όπως η μετάδοση μέγιστης αναλογίας (MRT), δεν επιτυγχάνουν βέλτιστες χωρητικότητες στην κατερχόμενη ζεύξη. Για να μειώσουν το χάσμα απόδοσης, τα BS γενικά εφαρμόζουν ορισμένες μεθόδους προγραμματισμού χρηστών που εκμεταλλεύονται την ποικιλομορφία πολλών χρηστών στο σύστημα. Βασικά, το BS επιλέγει λίγους UE κατά τη διάρκεια κάθε διαστήματος μετάδοσης και τους προγραμματίζει για ταυτόχρονες μεταδόσεις. Δύο βασικές εργασίες για τον προγραμματισμό χρηστών είναι οι μέθοδοι τυχαίας διαμόρφωσης δέσμης (RBF) και ημιορθογωνίας επιλογής χρήστη (SUS). Στη μέθοδο RBF, το BS επιλέγει μια ομάδα UEs αντιστοιχίζοντάς τα σε ένα προκαθορισμένο σύνολο ορθογώνιων δεσμών που μεταδίδονται στην κατερχόμενη ζεύξη. Η αντιστοίχιση βασίζεται στην ανάδραση που παρέχεται από κάθε UE, όσον αφορά έναν δείκτη ποιότητας καναλιού (CQI), όπως ο λόγος σήματος προς παρεμβολές συν το λόγο θορύβου (SINR) και τον καλύτερο δείκτη δέσμης. Στη μέθοδο SUS, το BS αποκτά πληροφορίες κατάστασης πλήρους καναλιού

(CSI) από όλα τα υποψήφια UE και επιλέγει ένα υποσύνολο UE που έχουν σχεδόν ορθογώνια διανύσματα καναλιού.

Οι συμβατικές μέθοδοι προγραμματισμού χρηστών, όπως το RBF ή το SUS, ενδέχεται να μην είναι κατάλληλες για τα massive συστήματα MIMO για διάφορους λόγους:

- (i) τα κέρδη απόδοσης που βασίζονται στην ποικιλομορφία πολλών χρηστών μπορεί να μην είναι σημαντικά στο καθεστώς μεγάλου  $M$ , επειδή τα αποτελέσματα της εξασθένησης μικρής κλίμακας μειώνονται
- (ii) τέτοιες μέθοδοι είναι υπολογιστικά εντατικές και καταναλώνουν σημαντικά ποσά ισχύος κυκλώματος όταν το  $M$  είναι μεγάλο – Το SUS προκαλεί υπολογιστική πολυπλοκότητα  $O(M^3K)$  και
- (iii) Αυτού του τύπου οι μέθοδοι συχνά υποφέρουν από πρακτικούς περιορισμούς – σχήματα RBF δεν αποδίδουν καλά σε συστήματα με πεπερασμένο αριθμό UE και τα σχήματα SUS δεν μπορούν να κλιμακωθούν επειδή προκύπτει σημαντική επιβάρυνση κατά την απόκτηση πλήρους CSI από όλες τις υποψήφιες UE.

Ευτυχώς, στο καθεστώς μεγάλου  $M$ , πολύ απλά σχήματα προγραμματισμού χρηστών, όπως η τυχαία επιλογή ενός υποσυνόλου UEs, η επιλογή ενός υποσυνόλου UE με φθίνουσα σειρά των συντελεστών εξασθένησης μεγάλης κλίμακας ή η επιλογή UEs με κυκλικό τρόπο, είναι γνωστό ότι επιτυγχάνουν σχεδόν βέλτιστη απόδοση. Αυτό συμβαίνει επειδή τα διανύσματα καναλιού γίνονται σχεδόν ορθογώνια μεταξύ τους και τα αποτελέσματα της εξασθένησης μικρής κλίμακας μειώνονται στο καθεστώς μεγάλου  $M$ .

Δεδομένου ότι οι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος χαμηλής πολυπλοκότητας και προγραμματισμού χρηστών επιτυγχάνουν σχεδόν βέλτιστη απόδοση σε massive συστήματα MIMO, παρατηρείται ότι η κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος μειώνεται δραστικά σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα MIMO πολλαπλών χρηστών. Σημειώστε ότι αυτή η μείωση στην κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος είναι επιπλέον των μεγάλων κερδών συστοιχίας, που επιτρέπουν σημαντική μείωση στις ισχύς μετάδοσης UE. Κατά συνέπεια, επιτυγχάνοντας σχεδόν βέλτιστη απόδοση απόδοσης σε μειωμένα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας, τα τεράστια δίκτυα MIMO παρέχουν πολλαπλές παραγγελίες κερδών EE σε σχέση με τα τρέχοντα δίκτυα LTE.



## Μοντελοποίηση κατανάλωσης ενέργειας σε Massive MIMO

Το άθροισμα κατανάλωσης ενέργειας  $P$ , που συγκεντρώνεται στις μεταδόσεις άνω και κάτω ζεύξης σε ένα massive σύστημα MIMO, μπορεί να μοντελοποιηθεί ως [20]

$$P = P_{P_A} + P_C + P_{sys},$$

όπου το  $P_{P_A}$  αντιπροσωπεύει τη συνολική ισχύ ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης που καταναλώνεται από τους ενισχυτές ισχύος (PAs) στο BS και το UE, το  $P_C$  αντιπροσωπεύει τη συνολική ισχύ κυκλώματος άνω και κάτω ζεύξης που καταναλώνεται από διαφορετικά κυκλώματα επεξεργασίας αναλογικού και ψηφιακού σήματος στο BS και το UE, και το  $P_{sys}$  αναφέρεται στην υπόλοιπη κατανάλωση που εξαρτάται από το σύστημα στο  $P$ .

## Massive MIMO

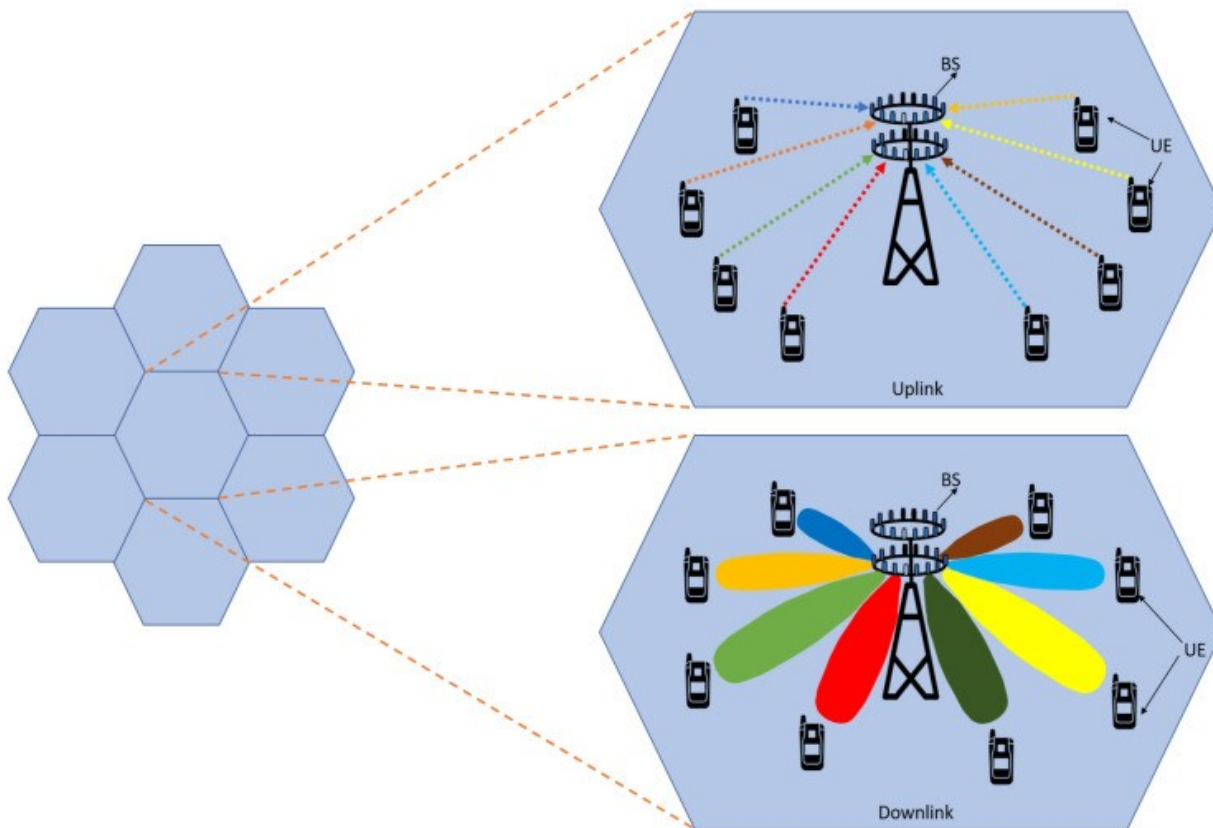
Τα συστήματα MIMO [20,21] αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των σημερινών ασύρματων συστημάτων και τα τελευταία χρόνια έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης και ενεργειακής απόδοσης. Πριν από την εισαγωγή του MIMO, χρησιμοποιούνταν ως επί το πλείστον συστήματα μίας εισόδου-μονής εξόδου, τα οποία είχαν πολύ χαμηλή απόδοση και δεν μπορούσαν να υποστηρίξουν μεγάλο αριθμό χρηστών με υψηλή αξιοπιστία. Για να ικανοποιηθεί αυτή η τεράστια ζήτηση χρηστών, διάφορες νέες τεχνολογίες MIMO όπως MIMO ενός χρήστη (SU-MIMO), MIMO πολλών χρηστών (MU-MIMO) και MIMO δικτύου αναπτύχθηκαν. Ωστόσο, αυτές οι νέες τεχνολογίες δεν είναι επίσης αρκετές για να καλύψουν τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις. Οι χρήστες ασύρματης σύνδεσης έχουν αυξηθεί εκθετικά τα τελευταία χρόνια και αυτοί οι χρήστες παράγουν τρισεκατομμύρια δεδομένα που πρέπει να χειρίζονται αποτελεσματικά με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Επιπλέον, υπάρχουν δισεκατομμύρια συσκευές IoT, με διάφορες εφαρμογές για έξυπνη υγειονομική περίθαλψη, έξυπνα σπίτια και έξυπνη ενέργεια, που συμβάλλουν στην κυκλοφορία δεδομένων. Προβλέπεται ότι θα υπάρχουν περίπου 50 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές μέχρι το τέλος του 2020. Οι τρέχουσες τεχνολογίες MIMO που σχετίζονται με το δίκτυο 4G/LTE δεν είναι σε

θέση να χειριστούν αυτήν την τεράστια εισροή στην κίνηση δεδομένων με μεγαλύτερη ταχύτητα και αξιοπιστία. Έτσι, το δίκτυο 5G εξετάζει τη μαζική τεχνολογία MIMO ως μια πιθανή τεχνολογία για να ξεπεράσει το πρόβλημα που δημιουργείται από τη μαζική κίνηση δεδομένων και τους χρήστες. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες σχετικά με τα τεράστια συστήματα MIMO και τα οφέλη τους.

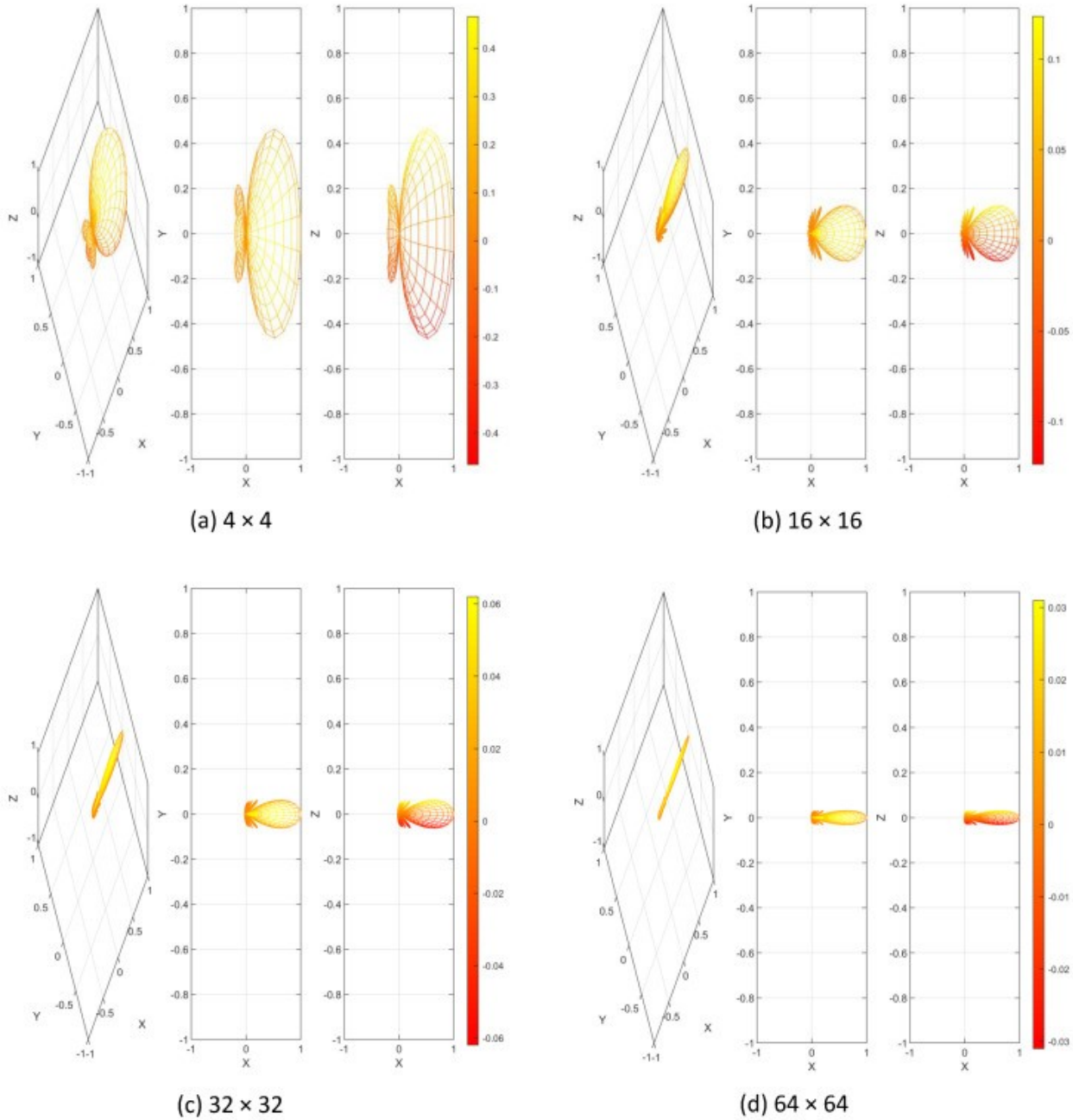
Το Massive MIMO [20,21] είναι η πιο σαγηνευτική τεχνολογία για το 5G και πέρα από την εποχή της ασύρματης πρόσβασης. Το massive MIMO είναι η πρόοδος των σύγχρονων συστημάτων MIMO που χρησιμοποιούνται στα τρέχοντα ασύρματα δίκτυα, τα οποία συγκεντρώνουν εκατοντάδες, ακόμη και χιλιάδες κεραιές στο σταθμό βάσης και εξυπηρετούν δεκάδες χρήστες ταυτόχρονα. Οι επιπλέον κεραιές που χρησιμοποιεί το massive MIMO θα βοηθήσουν στην εστίαση της ενέργειας σε μια μικρότερη περιοχή του χώρου για να παρέχουν καλύτερη φασματική απόδοση και απόδοση. Η μαζική κατερχόμενη ζεύξη MIMO και το σύστημα ανερχόμενης ζεύξης φαίνονται στο Σχήμα 9. Καθώς ο αριθμός των κεραιών αυξάνεται σε ένα τεράστιο σύστημα MIMO, οι ακτινοβολούμενες δέσμες στενεύουν και εστιάζονται χωρικά προς το χρήστη. Τα μοτίβα δέσμης για διαφορετικές διαμορφώσεις κεραιάς φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Αυτές οι χωρικά εστιασμένες δέσμες κεραιάς αυξάνουν την απόδοση για τον επιθυμητό χρήστη και μειώνουν την παρεμβολή στον γειτονικό χρήστη. Το τεράστιο MIMO προσφέρει ένα τεράστιο πλεονέκτημα σε σχέση με το παραδοσιακό σύστημα MIMO, το οποίο συνοψίζεται στον παρακάτω Πίνακα.

Εξομίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G



Εικόνα 13 Massive MIMO uplink and downlink.

Εξομίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G



Εικόνα 14 Μοτίβο δέσμης με διαφορετική διαμόρφωση κεραίας. (α)  $4 \times 4$  MIMO (β)  $16 \times 16$  MIMO (γ)  $32 \times 32$  MIMO (δ)  $64 \times 64$

MIMO

	<b>MIMO</b>	<b>Massive MIMO</b>
Number of Antenna	≤8	≥16
Pilot Contamination	Low	High
Throughput	Low	High
Antenna Coupling	Low	High
Bit Error Rate	High	Low
Noise Resistance	Low	High
Diversity/Capacity Gain	Low	High
Energy Efficiency	Low	High
Cost	Low	High
Complexity	Low	High
Scalability	Low	High
Link Stability	Low	High
Antenna Correlation	Low	High

Εικόνα 15 MIMO vs MASSIVE MIMO

### Uplink Μετάδοση

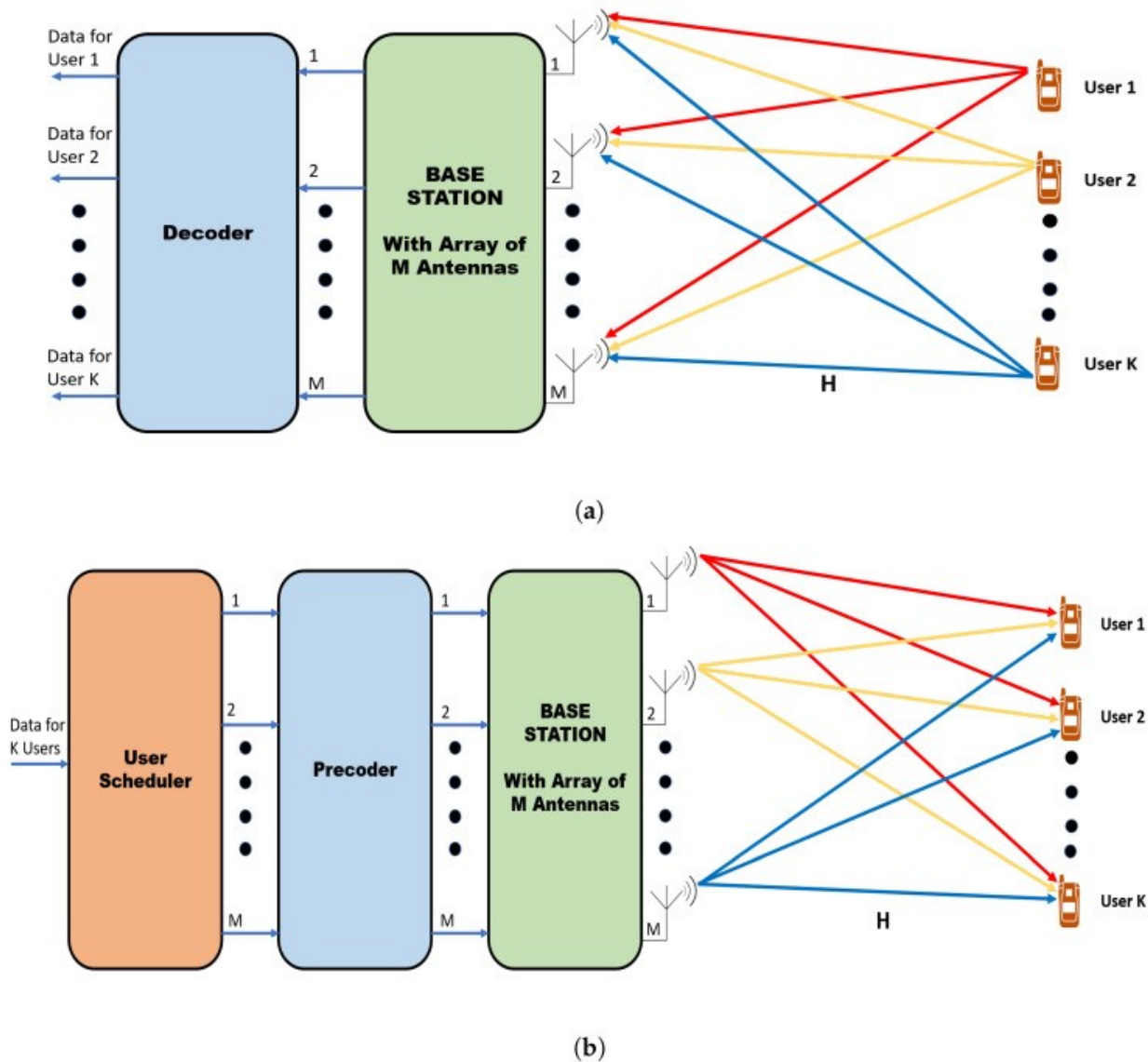
Το κανάλι ανερχόμενης ζεύξης χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων και του πιλοτικού σήματος από το τερματικό χρήστη στον σταθμό βάσης, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Θεωρείται ένα σύστημα ανερχόμενης ζεύξης massive MIMO [16] εξοπλισμένο με κεραίες  $M$  στο σταθμό βάσης και ταυτόχρονα επικοινωνεί με  $N$  ( $M \gg N$ ) χρήστες μιας κεραίας. Εάν το σήμα που εκπέμπεται από τον χρήστη ή το ντετερμινιστικό σήμα πιλότου για την εκτίμηση του καναλιού είναι  $x \in \mathbb{C}^N$ , το σήμα που λαμβάνεται στο σταθμό βάσης κατά τη διάρκεια της ανοδικής ζεύξης δίνεται ως:

$$y_k = h_k + n_{\text{uplink}}$$

όπου  $y \in \mathbb{C}^M$  είναι το σήμα που λαμβάνεται στο σταθμό βάσης,  $H$  είναι το διάνυσμα καναλιού μεταξύ του τερματικού χρήστη και του σταθμού βάσης και τα στοιχεία του  $H \in \mathbb{C}^{M \times N}$  είναι ανεξάρτητα και πανομοιότυπα κατανομημένα με μηδενική μέση και μοναδιαία διακύμανση, δηλαδή  $H \sim \delta N(0,1)$ . Ο πρόσθετος όρος  $n_{\text{uplink}} \in \mathbb{C}^M$  είναι η προσθήκη παρεμβολών από πολλές μεταδόσεις και ο θόρυβος του δέκτη. Η παρεμβολή που προστίθεται είναι ανεξάρτητη από το σήμα χρήστη  $x$ , αλλά μπορεί να εξαρτάται από το κανάλι  $H$ .

$$n_{\text{uplink}} = n_{\text{uplink-interference}} + n_{\text{noise}}$$

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G



Εικόνα 16 Λειτουργία ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης Massive MIMO. (α) Uplink (β) Downlink

## Μετάδοση Downlink

Το κανάλι κατερχόμενης ζεύξης [16] χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων ή την εκτίμηση του καναλιού μεταξύ χρήστη και σταθμού βάσης. Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί εκπαιδευτικούς πιλότους για να εκτιμήσει το κανάλι. Μια μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης με πολλά UE και ένα σταθμό βάσης φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Ας θεωρηθεί ένα τεράστιο σύστημα MIMO κατερχόμενης ζεύξης, όπου ο σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με  $M$  κεραιές και εξυπηρετεί  $N$

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

χρήστες που έχουν μία μόνο κεραία ταυτόχρονα. Ο σταθμός βάσης στέλνει ανεξάρτητες πληροφορίες σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Το σήμα που λαμβάνεται,  $y_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  στον  $k_{th}$  χρήστη είναι:

$$y_k = h_k x_k + n_{\text{downlink}}$$

όπου το  $h_k$  είναι ένα διάνυσμα καναλιού μεταξύ του  $k_{th}$  χρήστη και του σταθμού βάσης, του οποίου τα στοιχεία είναι ανεξάρτητα και πανομοιότυπα κατανεμημένα με μηδενικό μέσο όρο και μοναδιαία διακύμανση, δηλαδή  $h \in \delta N(0,1)$ .  $x_k \in \mathbb{C}^M$  είναι το σήμα που μεταδίδεται από το σταθμό βάσης για τον χρήστη  $k$  και,  $n_{\text{downlink}}$  είναι ο πρόσθετος θόρυβος που αποτελείται από τον θόρυβο του δέκτη  $n_{\text{noise}} \sim \delta N(0, \sigma^2 I)$  και την παρεμβολή κατά τη διάρκεια της κατερχόμενης ζεύξης-παρεμβολή που προκαλείται από την ταυτόχρονη μετάδοση σε άλλους χρήστες και δίνεται ως:

$$n_{\text{downlink}} = n_{\text{downlink-interference}} + n_{\text{noise}}$$

## Οφέλη του Massive MIMO για δίκτυα 5G και πέρα

Μερικά από τα οφέλη της τεράστιας τεχνολογίας MIMO είναι [16]:

**Φασματική απόδοση:** Το τεράστιο MIMO παρέχει υψηλότερη φασματική απόδοση, επιτρέποντας στη διάταξη κεραιών του να εστιάζει τις στενές δέσμες προς τον χρήστη. Μπορεί να επιτευχθεί φασματική απόδοση πάνω από δέκα φορές καλύτερη από το τρέχον σύστημα MIMO που χρησιμοποιείται για 4G/LTE.

**Ενεργειακή απόδοση:** Καθώς η διάταξη κεραιάς εστιάζει σε ένα μικρό συγκεκριμένο τμήμα, απαιτεί λιγότερη ακτινοβολούμενη ισχύ και μειώνει την απαίτηση ενέργειας σε τεράστια συστήματα MIMO.

**Υψηλός ρυθμός δεδομένων:** Το κέρδος συστοιχίας και η χωρική πολυπλεξία που παρέχονται από το τεράστιο MIMO αυξάνουν τον ρυθμό δεδομένων και τη χωρητικότητα των ασύρματων συστημάτων.

**Παρακολούθηση χρήστη:** Επειδή το τεράστιο MIMO χρησιμοποιεί στενές δέσμες σήματος προς τον χρήστη. Η παρακολούθηση των χρηστών γίνεται πιο αξιόπιστη και ακριβής.

**Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας:** Το τεράστιο MIMO είναι κατασκευασμένο με γραμμικούς ενισχυτές εξαιρετικά χαμηλότερης ισχύος, γεγονός που εξαλείφει τη χρήση ογκώδους ηλεκτρονικού εξοπλισμού στο σύστημα. Αυτή η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί σημαντικά.



Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

**Λιγότερο Fading:** Ένας μεγάλος αριθμός κεραιάς στον δέκτη κάνει το τεράστιο MIMO ανθεκτικό στο fading

**Χαμηλή καθυστέρηση:** Το τεράστιο MIMO μειώνει την καθυστέρηση στη διεπαφή αέρα

**Ανθεκτικότητα:** Τα συστήματα massive MIMO είναι ανθεκτικά έναντι ακούσιων παρεμβολών και εσωτερικών εμπλοκών. Επίσης, αυτά τα συστήματα είναι ανθεκτικά σε μία ή λίγες βλάβες κεραιάς λόγω μεγάλων κεραιών

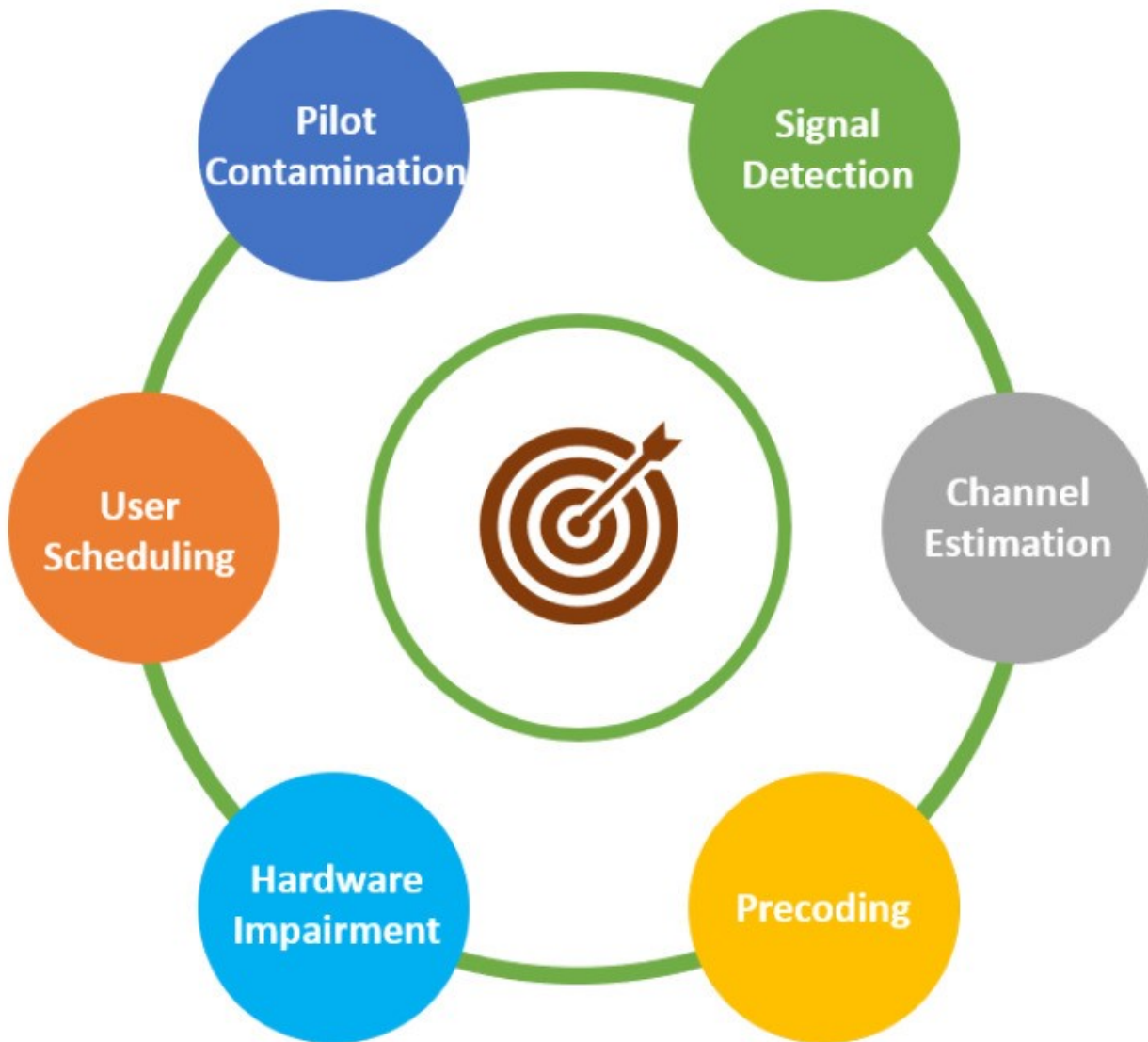
**Αξιοπιστία:** Ένας μεγάλος αριθμός κεραιών στο massive MIMO παρέχει μεγαλύτερη διαφοροποίηση, γεγονός που αυξάνει την αξιοπιστία της σύνδεσης

**Ενισχυμένη ασφάλεια:** Το massive MIMO παρέχει περισσότερη φυσική ασφάλεια λόγω των ορθογώνιων καναλιών κινητών σταθμών και των στενών ακτίνων

**Χαμηλή σύνθετη γραμμική επεξεργασία:** Ο μεγαλύτερος αριθμός κεραιών σταθμού βάσης καθιστά τους απλούς ανιχνευτές σήματος και τους προκωδικοποιητές βέλτιστους για το σύστημα.

## Προκλήσεις σε Massive MIMO

Η τεχνολογία massive MIMO είναι κάτι περισσότερο από μια απλή επέκταση της τεχνολογίας MIMO και για να εφαρμοστεί στη πλειοψηφία των περιπτώσεων, υπάρχουν ακόμα πολλά ζητήματα και προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Μερικές από τις θεμελιώδεις προκλήσεις σε τεράστια συστήματα MIMO φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



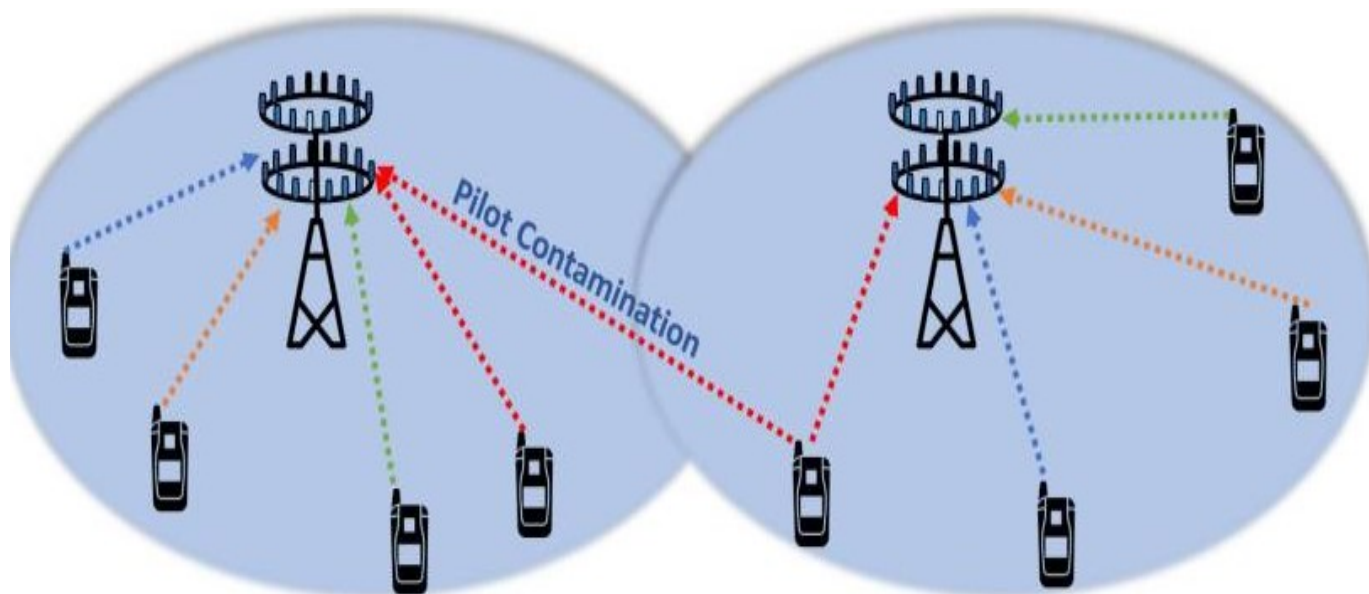
Εικόνα 17 Προκλήσεις massive mimo

### Pilot Contamination

Σε συστήματα massive MIMO, ο σταθμός βάσης χρειάζεται την απόκριση καναλιού του τερματικού χρήστη για να λάβει την εκτίμηση του καναλιού. Το κανάλι ανερχόμενης ζεύξης εκτιμάται από το σταθμό βάσης όταν το τερματικό του χρήστη στέλνει ορθογώνια πιλοτικά σήματα στο σταθμό βάσης [22]. Επιπλέον, με τη βοήθεια της ιδιότητας αμοιβαιότητας καναλιού του τεράστιου MIMO, ο σταθμός βάσης εκτιμά το κανάλι κατερχόμενης ζεύξης προς το τερματικό χρήστη. Εάν τα πιλοτικά σήματα στην αρχική κυψέλη και στα γειτονικά κελιά είναι ορθογώνια, ο σταθμός βάσης λαμβάνει την ακριβή εκτίμηση του καναλιού. Ωστόσο, ο αριθμός των ορθογώνιων πιλοτικών σημάτων σε δεδομένο εύρος ζώνης και περίοδο είναι περιορισμένος, γεγονός που αναγκάζει την επαναχρησιμοποίηση των ορθογώνιων πιλότων σε γειτονικές κυψέλες. Το ίδιο σύνολο ορθογώνιων πιλότων που χρησιμοποιείται σε γειτονικά κελιά θα παρεμβαίνει μεταξύ τους και ο σταθμός βάσης θα λάβει έναν γραμμικό συνδυασμό απόκρισης καναλιού από την αρχική κυψέλη και τα γειτονικά κελιά. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως πιλοτική μόλυνση και περιορίζει την επιτεύξιμη απόδοση, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Κατά τη διάρκεια της κατερχόμενης ζεύξης, ο σταθμός βάσης θα σχηματίσει δέσμη προς τον χρήστη στην αρχική του κυψέλη μαζί με τους ανεπιθύμητους χρήστες στα γειτονικά κελιά.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που έχουν σχεδιαστεί για τον μετριασμό της επίδρασης της μόλυνσης πιλότων σε τεράστια συστήματα MIMO. Οι πιλοτικές προσεγγίσεις εκτίμησης παρουσιάζονται στις μελετες. Αυτές οι πιλοτικές μέθοδοι εκτίμησης δείχνουν σημαντικό όφελος όταν χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός κεραιών στο σταθμό βάσης. Η προσέγγιση εκτίμησης με βάση τον υποχώρο για τον μετριασμό του φαινομένου του Pilot contamination μελετάται στην έρευνα [23] και θεωρείται ως μία από τις καλύτερες μεθόδους για την αύξηση της φασματικής απόδοσης επειδή αυτή η μέθοδος απαιτούσε λιγότερο αριθμό ορθογώνιων πιλότων.

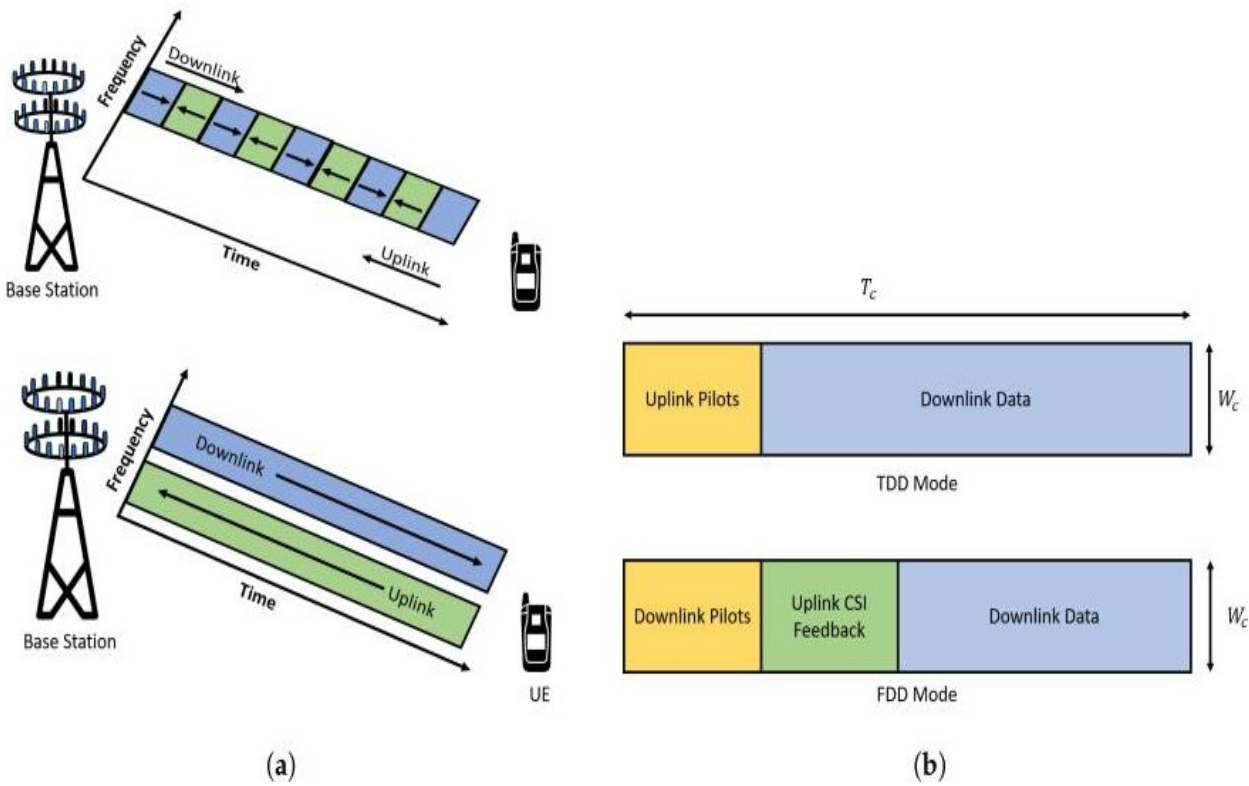
Εξομίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G



Εικόνα 18 Pilot Contamination

### Εκτίμηση καναλιού

Για την ανίχνευση και την αποκωδικοποίηση σήματος, το massive MIMO βασίζεται στις πληροφορίες κατάστασης καναλιού (CSI). Το CSI είναι η πληροφορία της κατάστασης της ζεύξης επικοινωνίας από τον πομπό προς τον δέκτη και αντιπροσωπεύει τη συνδυασμένη επίδραση της εξασθένησης, της διασποράς και ούτω καθεξής. Εάν το CSI είναι τέλειο, η απόδοση του massive MIMO αυξάνεται γραμμικά με τον αριθμό των κεραιών εκπομπής ή λήψης, όποιο είναι μικρότερο [24]. Για ένα σύστημα που χρησιμοποιεί Frequency Division Duplexing (FDD), το CSI πρέπει να εκτιμηθεί τόσο κατά τη διάρκεια της κατερχόμενης όσο και της ανοδικής ζεύξης. Κατά την ανερχόμενη ζεύξη, η εκτίμηση καναλιού γίνεται από τον σταθμό βάσης με τη βοήθεια ορθογώνιων πιλοτικών σημάτων που αποστέλλονται από το τερματικό χρήστη. Και κατά τη διάρκεια της κατερχόμενης ζεύξης, ο σταθμός βάσης στέλνει πιλοτικά σήματα προς τον χρήστη και ο χρήστης αναγνωρίζει με τις εκτιμώμενες πληροφορίες καναλιού για τη μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης. Για ένα massive σύστημα MIMO με πολλές κεραίες, η στρατηγική εκτίμησης καναλιών κατερχόμενης ζεύξης στο FDD γίνεται πολύ περίπλοκη και αδύνατη να εφαρμοστεί σε πραγματικές εφαρμογές. Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η λειτουργία FDD και Time Division Duplexing (TDD) στην ασύρματη επικοινωνία και η τυπική πιλοτική μετάδοση και τον μηχανισμό ανάδρασης CSI σε λειτουργία FDD και TDD.



Εικόνα 19 (a) Frequency Division Duplexing (FDD) and Time Division Duplexing (TDD) mode: Massive works best in TDD mode. (b)

Typical pilot transmission and CSI feed back mechanism in FDD and TDD mode.

Το TDD παρέχει τη λύση για το πρόβλημα κατά τη μετάδοση κατερχόμενη ζεύξης σε συστήματα FDD. Στο TDD, εκμεταλλευόμενος την ιδιότητα αμοιβαιότητας καναλιού, ο σταθμός βάσης μπορεί να εκτιμήσει το κανάλι κατερχόμενη ζεύξης με τη βοήθεια των πληροφοριών καναλιού κατά την ανερχόμενη ζεύξη. Κατά τη διάρκεια της ανοδικής ζεύξης, ο χρήστης θα στείλει τα ορθογώνια πιλοτικά σήματα προς το σταθμό βάσης και με βάση αυτά τα πιλοτικά σήματα, ο σταθμός βάσης θα εκτιμήσει το CSI στο τερματικό χρήστη [25]. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το εκτιμώμενο CSI, ο σταθμός βάσης θα μορφοποιήσει δεδομένα κατερχόμενη ζεύξης προς το τερματικό χρήστη. Δεδομένου ότι υπάρχει περιορισμένος αριθμός ορθογώνιων πιλότων που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν από τη μια κυψέλη στην άλλη, προκύπτει το πρόβλημα μόλυνσης πιλότου και αποτελεί σημαντική πρόκληση κατά τη μαζική εκτίμηση του καναλιού MIMO. Άλλες προκλήσεις είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα υλικού και υπολογισμού λόγω του μεγαλύτερου αριθμού κεραιών. Έτσι, ο αλγόριθμος

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

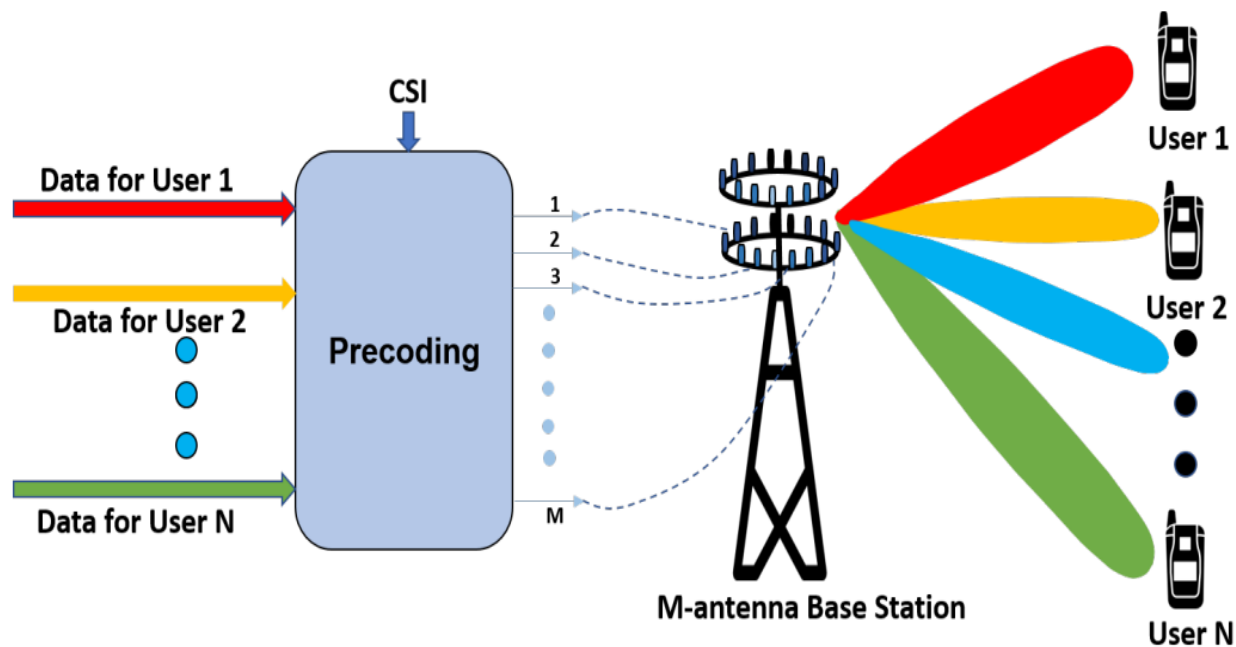
εκτίμησης καναλιών χαμηλής πολυπλοκότητας και χαμηλής επιβάρυνσης επιδρούν σημαντικά στην απόδοση των συστημάτων massive MIMO.

Παρόλο που το massive MIMO προβλέπεται να χρησιμοποιεί τη λειτουργία TDD, πραγματοποιούνται έρευνες για τη χρήση λειτουργιών FDD σε massive συστήματα MIMO.

## Precoding

Η προκωδικοποίηση είναι μια έννοια της διαμόρφωσης δέσμης που υποστηρίζει τη μετάδοση πολλαπλών ροών σε συστήματα πολλαπλών κεραιών. Η προκωδικοποίηση παίζει επιτακτικό ρόλο σε τεράστια συστήματα MIMO καθώς μπορεί να μετριάσει το αποτέλεσμα που δημιουργείται από την απώλεια διαδρομής και τις παρεμβολές και μεγιστοποιεί την απόδοση. Σε τεράστια συστήματα MIMO, ο σταθμός βάσης εκτιμά το CSI με τη βοήθεια πιλοτικών σημάτων ανερχόμενης ζεύξης ή ανάδρασης που αποστέλλονται από το τερματικό χρήστη. Το λαμβανόμενο CSI στο σταθμό βάσης δεν είναι ανεξέλεγκτο και δεν είναι τέλειο λόγω αρκετών περιβαλλοντικών παραγόντων στο ασύρματο κανάλι [26]. Αν και ο σταθμός βάσης δεν λαμβάνει τέλειο CSI, η απόδοση της κατερχόμενης ζεύξης του σταθμού βάσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εκτιμώμενη CSI.

Έτσι, ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί το εκτιμώμενο CSI και την τεχνική προκωδικοποίησης για να μειώσει τις παρεμβολές και να επιτύχει κέρδη στη φασματική απόδοση. Η απόδοση του μαζικού MIMO κάτω ζεύξης εξαρτάται από την ακριβή εκτίμηση του CSI και την τεχνική προκωδικοποίησης που χρησιμοποιείται. Αν και η τεχνική προκωδικοποίησης παρέχει τεράστια οφέλη σε τεράστια συστήματα MIMO, αυξάνει επίσης την υπολογιστική πολυπλοκότητα του συνολικού συστήματος προσθέτοντας επιπλέον υπολογισμούς. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα αυξάνεται μαζί με τον αριθμό των κεραιών. Έτσι, οι χαμηλού σύνθετου και αποδοτικοί προκωδικοποιητές είναι πιο πρακτικοί στη χρήση για τεράστια συστήματα MIMO. Η παρακάτω εικόνα δείχνει την προκωδικοποίηση σε massive συστήματα MIMO με σταθμό βάσης κεραιάς  $M$  και  $N$ -χρήστες.



Εικόνα 20 Προκωδικοποίηση σε ένα τεράστιο σύστημα MIMO με  $M$  κεραίες στο σταθμό βάσης που επικοινωνούν με  $N$  χρήστες

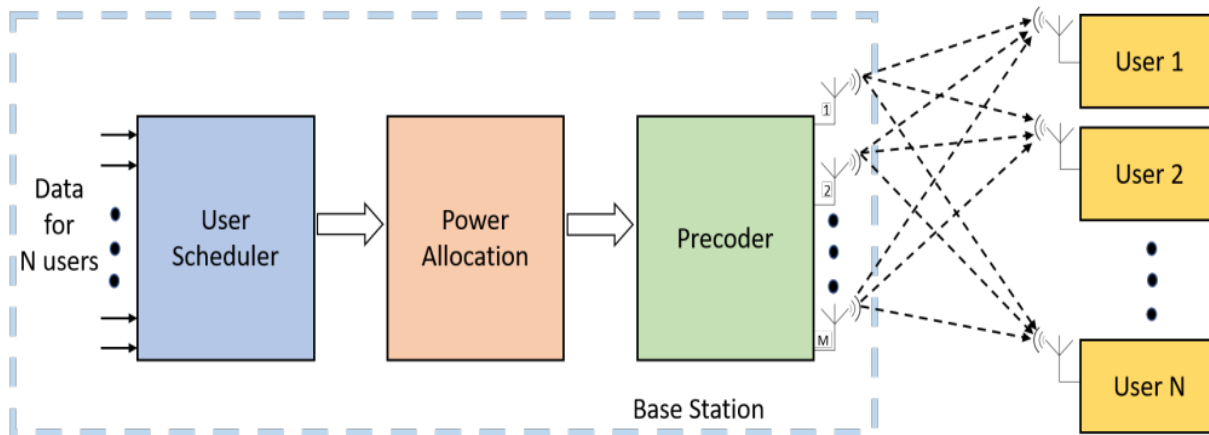
Πολλοί γραμμικοί και μη γραμμικοί προκωδικοποιητές έχουν προταθεί για massive συστήματα MIMO. Αν και οι μη γραμμικοί προκωδικοποιητές όπως η προκωδικοποίηση Dirty Paper (DPP), η Tomlinson Harashima precoding (TH) και η Vector Perturbation (VP) παρέχουν καλύτερη απόδοση, αυτές οι μέθοδοι έχουν πολύ υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα όταν έχουμε μεγάλο σύστημα κεραίας. Οι γραμμικοί προκωδικοποιητές όπως το Maximal Ratio Combining (MRC), Zero-Forcing (ZF), Regularized ZF (R-ZF), Water Filling (WF) και MMSE έχουν χαμηλότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα και μπορούν να επιτύχουν σχεδόν βέλτιστη απόδοση.

### User Scheduling

Το massive MIMO εξοπλισμένο με μεγάλο αριθμό κεραιών στο σταθμό βάσης μπορεί να επικοινωνεί με πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Η ταυτόχρονη επικοινωνία με πολλούς χρήστες δημιουργεί παρεμβολές πολλών χρηστών και υποβαθμίζει την απόδοση απόδοσης. Οι μέθοδοι προκωδικοποίησης εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια της κατερχόμενης ζεύξης για τη μείωση της επίδρασης της παρεμβολής πολλών χρηστών, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Δεδομένου ότι ο



αριθμός των κεραιών είναι περιορισμένος σε τεράστιο σταθμό βάσης MIMO, εάν ο αριθμός των χρηστών γίνει μεγαλύτερος από τον αριθμό των κεραιών, Το σχήμα προγραμματισμού χρήστη εφαρμόζεται πριν από την προκωδικοποίηση για να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση και απόδοση αθροίσματος.



Εικόνα 21 User Scheduling

Έχουν γίνει πολυάριθμες μελέτες τα τελευταία χρόνια για να βρεθεί ένας βέλτιστος αλγόριθμος προγραμματισμού για massive MIMO . Αρκετές γραμμικές μέθοδοι όπως οι ZF και MMSE παρέχουν σχεδόν βέλτιστη απόδοση απόδοσης και έχουν αποδεκτή υπολογιστική πολυπλοκότητα . Οι μη γραμμικές μέθοδοι όπως η κωδικοποίηση βρώμικου χαρτιού (DPC) και η μέγιστη πιθανότητα (ML) παρέχουν σχεδόν βέλτιστη απόδοση, αλλά έχουν υψηλότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα για μεγάλο αριθμό κεραιών. Έχουν προταθεί αρκετοί αλγόριθμοι προγραμματισμού χρηστών για τη βελτίωση της χωρητικότητας του αθροίσματος, αλλά η υπολογιστική πολυπλοκότητα δεν βελτιώθηκε για μεγάλο αριθμό κεραιών [27,28]. Ο αλγόριθμος Round-Robin (RR), Proportional Fair (PF) και Greedy αλγόριθμος εγγυώνται δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών. Ωστόσο, δεν παρέχουν βέλτιστη απόδοση απόδοσης για τεράστια συστήματα MIMO με μεγάλο αριθμό κεραιών. Ο προγραμματισμός πολλών χρηστών και οι μέθοδοι προγραμματισμού σύνδεσης χρηστών έχουν προταθεί πρόσφατα για την παροχή βέλτιστου προγραμματισμού σε ένα τεράστιο σύστημα κατερχόμενης ζεύξης MIMO.

## Κεφάλαιο 5 Αξιολόγηση

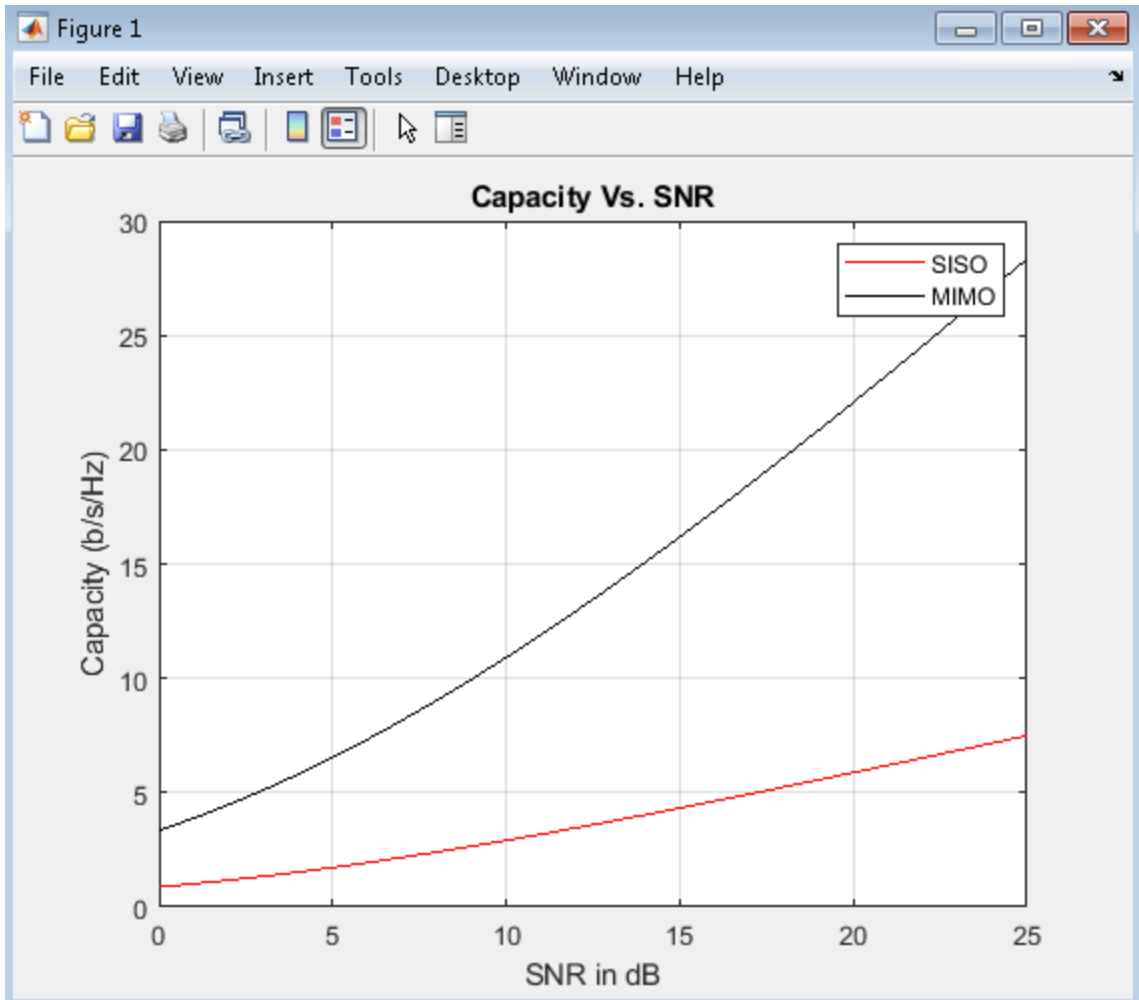
Σε αυτήν την ενότητα κάποια παραδείγματα στο περιβάλλον Matlab τα οποία αφορούν την τεχνική MIMO και Massive MIMO.

### Σύγκριση χωρητικότητας για SISO, MISO, SIMO και MIMO

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η χωρητικότητα των συστημάτων SISO και MIMO σε όρους SNR για αρκετές τιμές  $N$  και  $M$ . Στην περίπτωση SISO ( $N = 1$  και  $M = 1$ ) η χωρητικότητα κυμαίνεται από 1 έως 8 bps / Hz. Παραμένει χαμηλή και αυξάνεται αργά με το SNR, το οποίο δείχνει τους περιορισμούς των εκπομπών SISO.

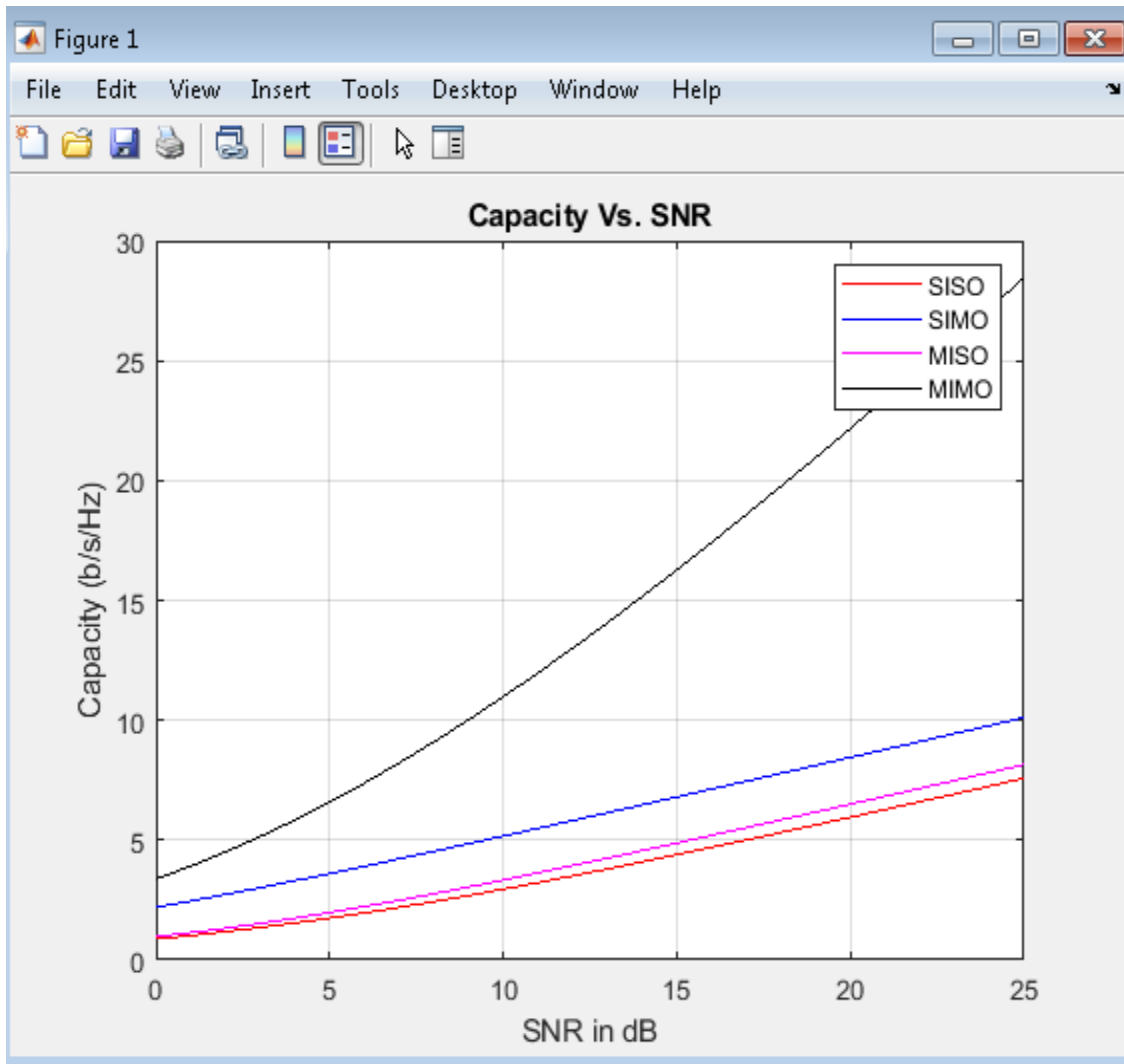
Παρά τις τρέχουσες τεχνικές για να αξιοποιήσετε στο έπακρο ένα κανάλι SISO, η χωρητικότητα του καναλιού SISO παραμένει περιορισμένη και ένα σύστημα πολλαπλών κεραιών, ακόμη και ανεπαρκώς αξιοποιημένο, έχει καλύτερη απόδοση. Με παραδείγματα MIMO ( $N=4$  και  $M=4$ ) η χωρητικότητα κυμαίνεται από 3 έως 28 bps/Hz (3 φορές μεγαλύτερη από το SISO). Αυξάνεται γρήγορα με το SNR, το οποίο απεικονίζει την απόδοση μιας επικοινωνίας MIMO.

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G



Εικόνα 22 SISO Vs MIMO

Για να απεικονιστεί η αύξηση της χωρητικότητας σύμφωνα με τον αριθμό κεραιών για όλα τα συστήματα εκτελείται προσομοίωση για 4x4 σύστημα κεραιών



Εικόνα 23 SISO vs SIMO vs MISO vs MIMO

Βάσει των παραπάνω εικόνων, παρατηρείται ότι η χωρητικότητα MIMO αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με τον αριθμό των κεραιών και είναι περίπου  $M$  φορές μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα SISO ( $M$  αριθμός κεραιών). Για το MISO, το κέρδος απόδοσης είναι αμελητέα όταν αυξάνεται ο αριθμός των κεραιών εκπομπής. Για το MISO, το κέρδος απόδοσης είναι αμελητέο όταν αυξάνεται ο αριθμός των κεραιών εκπομπής. Το σύστημα SIMO είναι πιο αποτελεσματικό από το σύστημα SISO και MISO που κυμαίνεται από 1 έως 3,4 bps / Hz.

Η χωρητικότητα παραμένει σε χαμηλά επίπεδα με την αύξηση του αριθμού των κεραιών, γεγονός που δείχνει τους περιορισμούς των εκπομπών SISO & MISO. Είναι συγκρίσιμες οι διακυμάνσεις της χωρητικότητας των συστημάτων SIMO και MIMO με βάση τον αριθμό των κεραιών για SNR 15dB. Η βελτιωμένη χωρητικότητα είναι πιο έντονη για υψηλό SNR. Για ένα σύστημα SIMO,

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

η χωρητικότητα ακολουθεί μια λογαριθμική τάση όταν αυξάνουμε τον αριθμό των κεραιών στη λήψη, ενώ το σύστημα MIMO αυξάνεται γραμμικά όταν αυξάνουμε τον αριθμό των κεραιών εκπομπής και λήψης. Το πλεονέκτημα (από άποψη χωρητικότητας) των συστημάτων MIMO οφείλεται κυρίως στην εκμετάλλευση πολλαπλών διαδρομών(multipath).

Πρώτον, επιτρέπουν στον δέκτη να διακρίνει τις διαφορετικές κεραίες εκπομπής και επομένως να μεταδίδει ταυτόχρονα πολλά σύμβολα. Στη συνέχεια, κάθε διαδρομή είναι ένα αντίγραφο του μεταδιδόμενου σήματος, και επομένως φέρει χρήσιμες πληροφορίες. Είναι προφανές ότι κάθε διαδρομή είναι ισοδύναμη με το άμεσο σήμα που εκπέμπεται από μια εικονική κεραία, η οποία ουσιαστικά αυξάνει τον αριθμό των κεραιών εκπομπής. Η αύξηση της χωρητικότητας συνοδεύεται με την αύξηση των κεραιών και των σχετικών ηλεκτρονικών τους, αλλά και λογισμικού με πολύ πιο σύνθετους δέκτες ζητώντας περισσότερο υπολογισμό ισχύος και συνεπώς αυξημένη κατανάλωση. Τέλος, η υποβάθμιση του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των κεραιών μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη χωρητικότητα.

Βελτίωση του SNR και τη χωρητικότητα της ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιώντας

συστοιχίες κεραιών

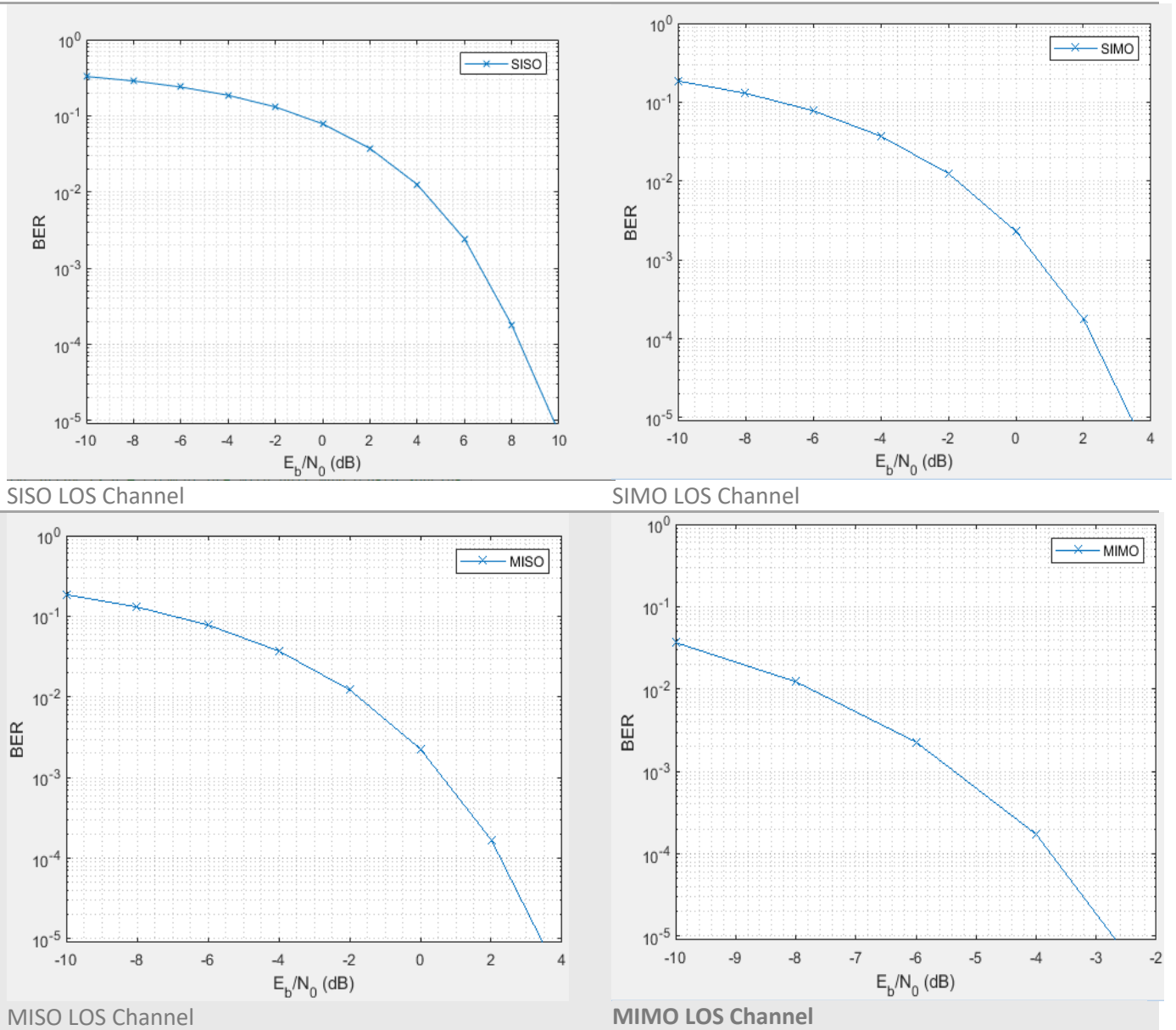
### **LOS – Line Of Sight**

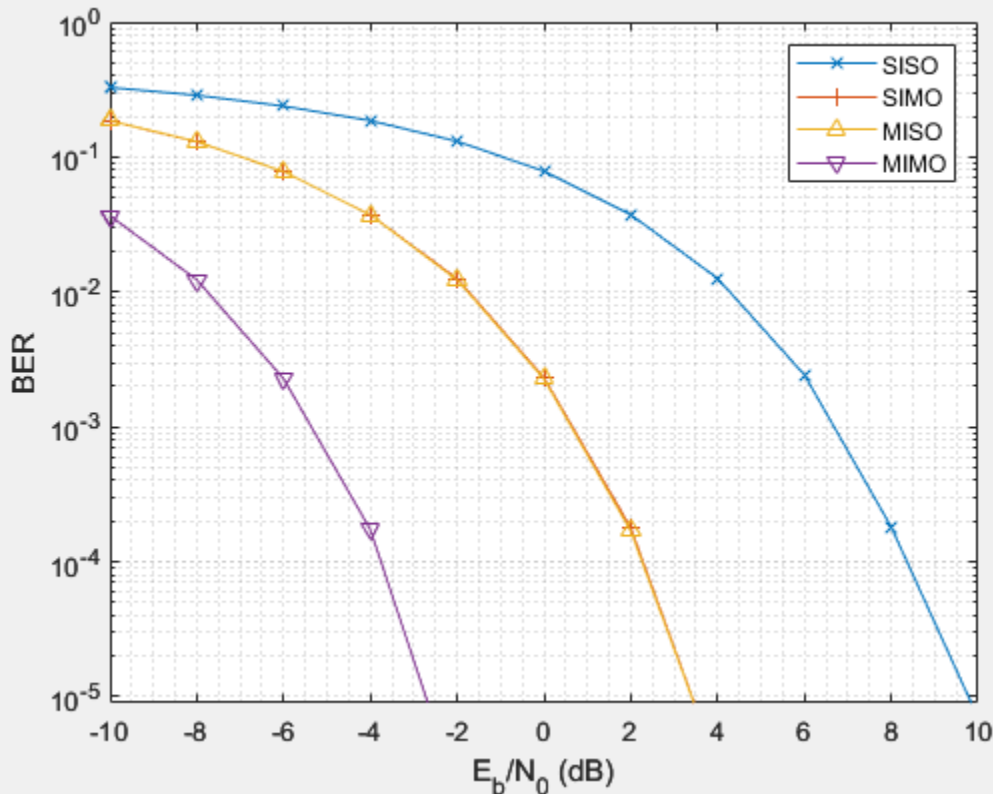
Ο στόχος ενός συστήματος ασύρματης επικοινωνίας είναι να εξυπηρετεί όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες με τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό δεδομένων, με συγκεκριμένες απαιτήσεις όπως το όριο ισχύος ακτινοβολίας και ο προϋπολογισμός λειτουργίας. Για να βελτιωθεί ο ρυθμός δεδομένων, το κλειδί είναι να βελτιωθεί ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR). Για να εξυπηρετηθούν περισσότεροι χρήστες, το κλειδί είναι η επαναχρησιμοποίηση των πόρων. Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν υιοθετηθεί πολυάριθμοι αλγόριθμοι για τη βελτίωση του SNR και την επαναχρησιμοποίηση των πόρων σε χώρους χρόνου, συχνότητας και κωδικοποίησης. Παρακάτω παρουσιάζεται πως η υιοθέτηση συστοιχιών κεραιών μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση του SNR και της χωρητικότητας μιας ασύρματης σύνδεσης.

Οι συστοιχίες κεραιών έχουν γίνει μέρος της τυπικής διαμόρφωσης στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας 5G. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες επειδή υπάρχουν πολλά στοιχεία σε μια συστοιχία κεραιών, τέτοια συστήματα ασύρματων επικοινωνιών αναφέρονται συχνά ως συστήματα πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (MIMO). Οι συστοιχίες κεραιών μπορούν να

## Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

βοηθήσουν στη βελτίωση του SNR διερευνώντας τον πλεονασμό στα πολλαπλά κανάλια εκπομπής και λήψης. Καθιστούν επίσης δυνατή την επαναχρησιμοποίηση των χωρικών πληροφοριών στο σύστημα για τη βελτίωση της κάλυψης.





Πίνακας 1 LOS comparison

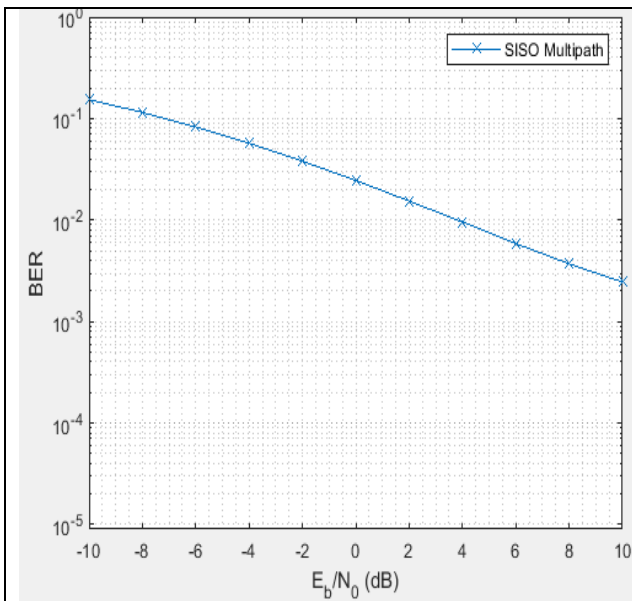
Επειδή ένα σύστημα SIMO παρέχει κέρδος από τη λαμβανόμενη συστοιχία και ένα σύστημα MISO παρέχει κέρδος από τη συστοιχία μετάδοσης. Όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα το κέρδος στα SIMO και MISO συστήματα είναι το ίδιο. Ένα LOS MISO επιτυγχάνει το καλύτερο SNR όταν ο πομπός έχει τη γνώση του δέκτη και κατευθύνει τη δέσμη προς αυτόν. Επιπλέον, για να γίνει μια δίκαιη σύγκριση με το σύστημα SISO, η συνολική ισχύς πομπού θεωρείται ότι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Με την επιλογή κατεύθυνσης (pre-steering), η απόδοση του MISO ταιριάζει με την απόδοση ενός συστήματος SIMO, κερδίζοντας 6 dB σε SNR. Μπορεί να μην είναι προφανές σε σύγκριση με την περίπτωση SIMO επειδή η συνολική ισχύς μετάδοσης δεν αυξάνεται. Ωστόσο, με την αντικατάσταση μιας μοναδικής ιστροπικής κεραίας με μια συστοιχία εκπομπής 4 στοιχείων, επιτυγχάνεται κέρδος 6 dB. Ένα σύστημα MIMO με διάδοση LOS μπορεί να επωφεληθεί τόσο από το κέρδος συστοιχίας μετάδοσης όσο και από τη λήψη. Θεωρείται ότι ένα σύστημα MIMO με μια συστοιχία μετάδοσης 4 στοιχείων και μια συστοιχία λήψης 4 στοιχείων. Για να επιτευχθεί το καλύτερο SNR, η συστοιχία εκπομπής και η συστοιχία λήψης πρέπει να κατευθύνονται η μία προς την άλλη. Όπως αναμενόταν, η καμπύλη BER δείχνει ότι τόσο ο πίνακας μετάδοσης όσο και ο πίνακας λήψης

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

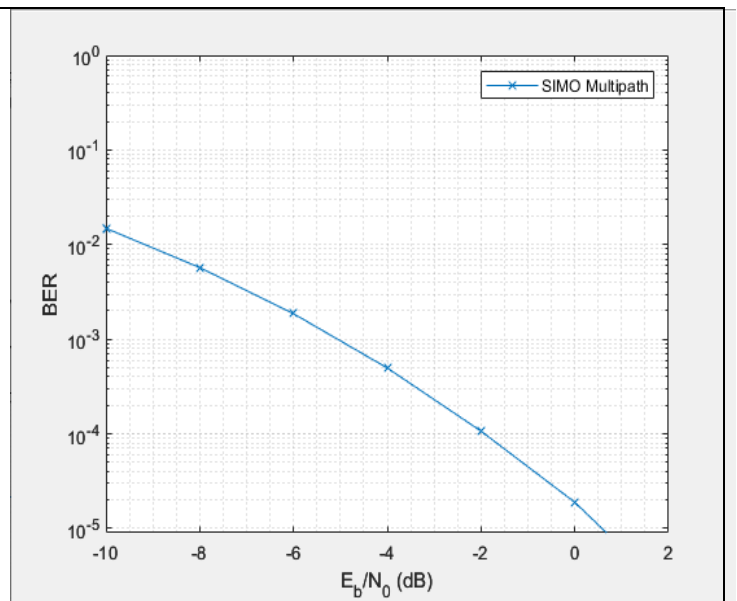
συνεισφέρουν ένα κέρδος διάταξης 6 dB, με αποτέλεσμα ένα συνολικό κέρδος 12 dB στην περίπτωση SISO.

### Multipath

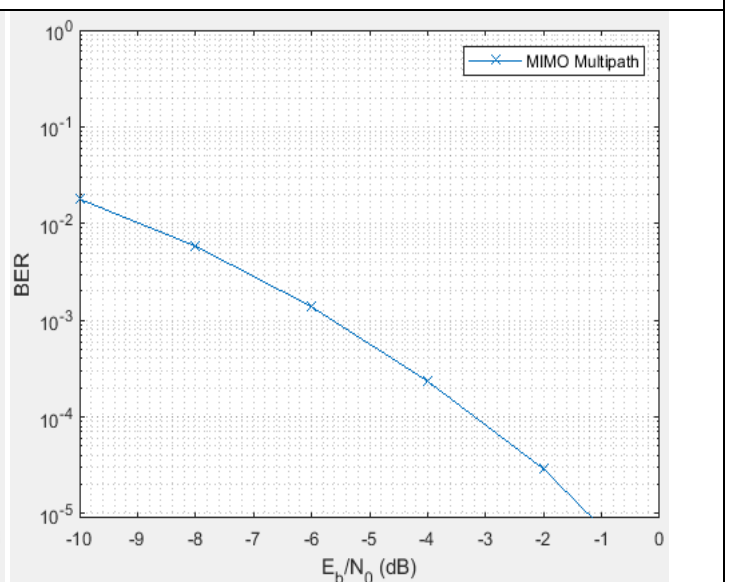
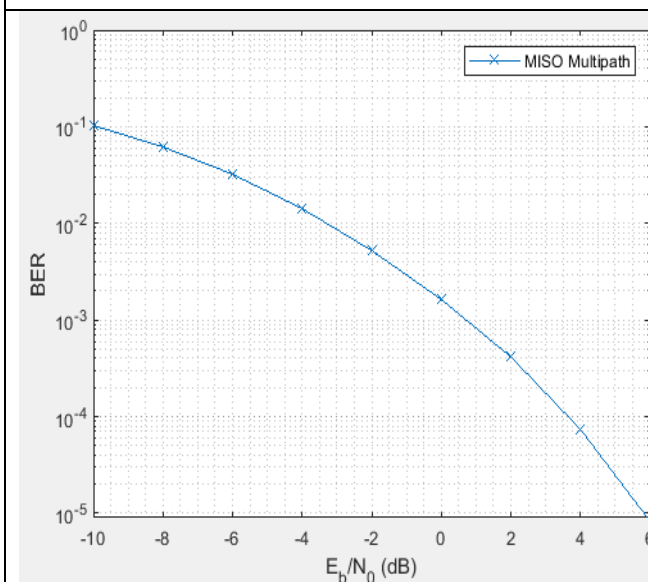
Όλα τα κανάλια στις προηγούμενες ενότητες είναι κανάλια οπτικής επαφής (LOS). Παρόλο που τέτοια κανάλια βρίσκονται σε ορισμένα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, γενικά οι ασύρματες επικοινωνίες πραγματοποιούνται σε περιβάλλοντα με εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών (multipath).



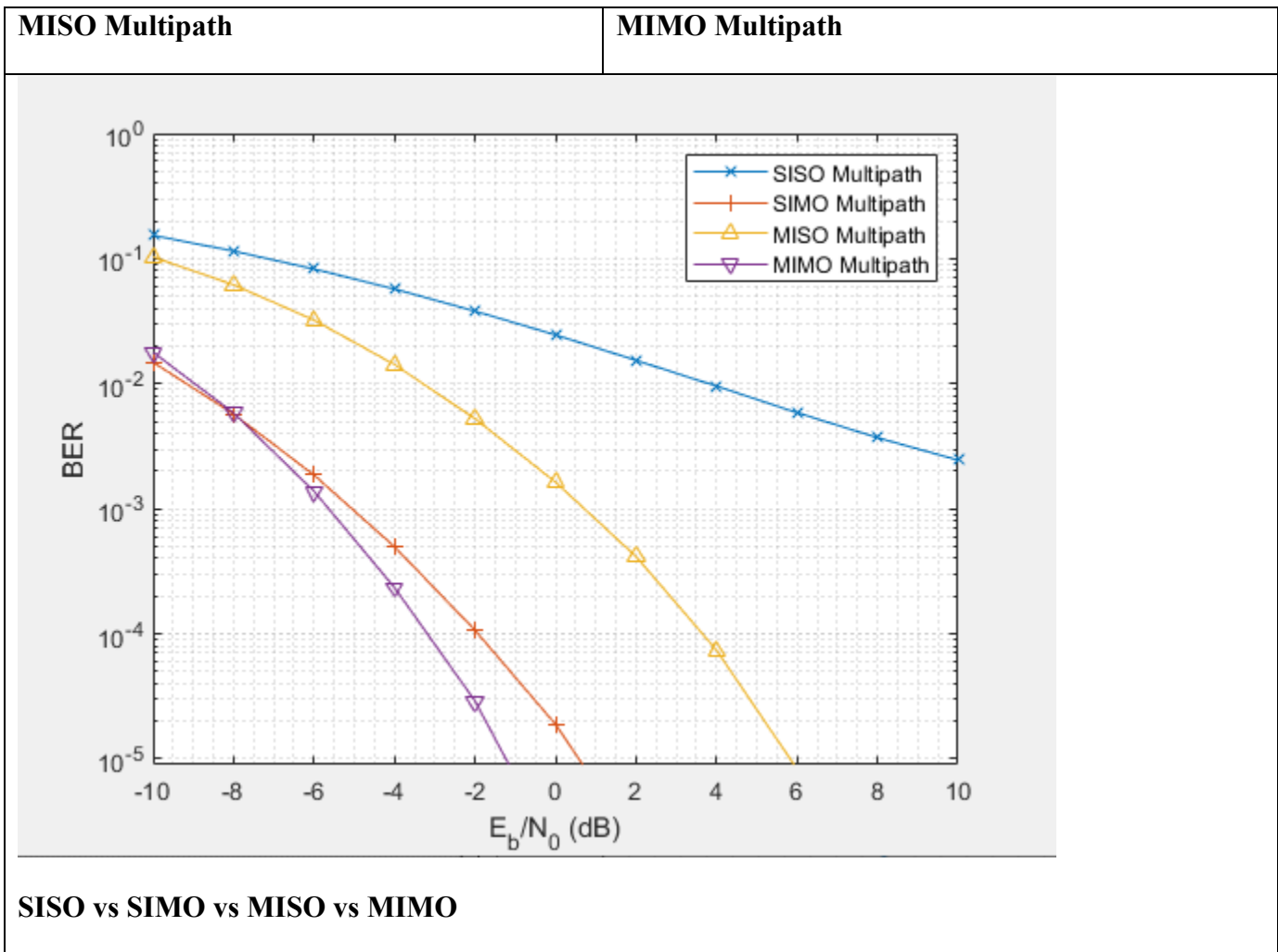
SISO Multipath



SIMO Multipath







Ας θεωρηθεί ότι υπάρχουν 10 τυχαία τοποθετημένα scatterers στο κανάλι, τότε θα υπάρχουν 10 διαδρομές από τον πομπό στον δέκτη, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Για απλότητα, θεωρείται ότι τα σήματα που ταξιδεύουν σε όλες τις διαδρομές φτάνουν εντός της ίδιας περιόδου συμβόλων. Για την προσομοίωση της καμπύλης BER, το κανάλι πρέπει να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου. Ας υποθεθεί ότι έχουμε 1000 καρέ και κάθε καρέ έχει 10000 bit. Η βασική καμπύλη BER πολλαπλών διαδρομών παρουσιάζεται στον παραπάνω πίνακα.

Κατά τη σύγκριση της καμπύλης BER από ένα κανάλι MIMO με την καμπύλη BER που λαμβάνεται από ένα σύστημα SIMO, παρατηρείται ότι στην περίπτωση πολλαπλών διαδρομών, το κέρδος διαφοροποίησης από ένα κανάλι MIMO δεν είναι απαραίτητα καλύτερο από το κέρδος διαφοροποίησης που παρέχεται από ένα κανάλι SIMO. Αυτό συμβαίνει επειδή για να επιτευχθεί το καλύτερο κέρδος

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

διαφοροποίησης, χρησιμοποιείται μόνο η κυρίαρχη λειτουργία σε ένα κανάλι MIMO, αλλά υπάρχουν και άλλες λειτουργίες στο κανάλι που δεν χρησιμοποιούνται.

Από την άλλη υπάρχουν εναλλακτικοί τρόποι αξιοποίησης του καναλιού. Για παράδειγμα μπορεί να γίνει χρήση της χωρικής πολυπλεξίας. Η ιδέα πίσω από τη χωρική πολυπλεξία είναι ότι ένα κανάλι πολλαπλών διαδρομών MIMO με πλούσιο περιβάλλον διασποράς μπορεί να στείλει πολλαπλές ροές δεδομένων ταυτόχρονα σε όλο το κανάλι. Για παράδειγμα, ο πίνακας καναλιών ενός καναλιού MIMO 4x4 είναι full rank λόγω των scatterers. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατή η αποστολή έως και 4 ροών δεδομένων ταυτόχρονα. Ο στόχος της χωρικής πολυπλεξίας είναι όχι μόνο η αύξηση του SNR αλλά και η αύξηση της απόδοσης πληροφοριών.

## MIMO

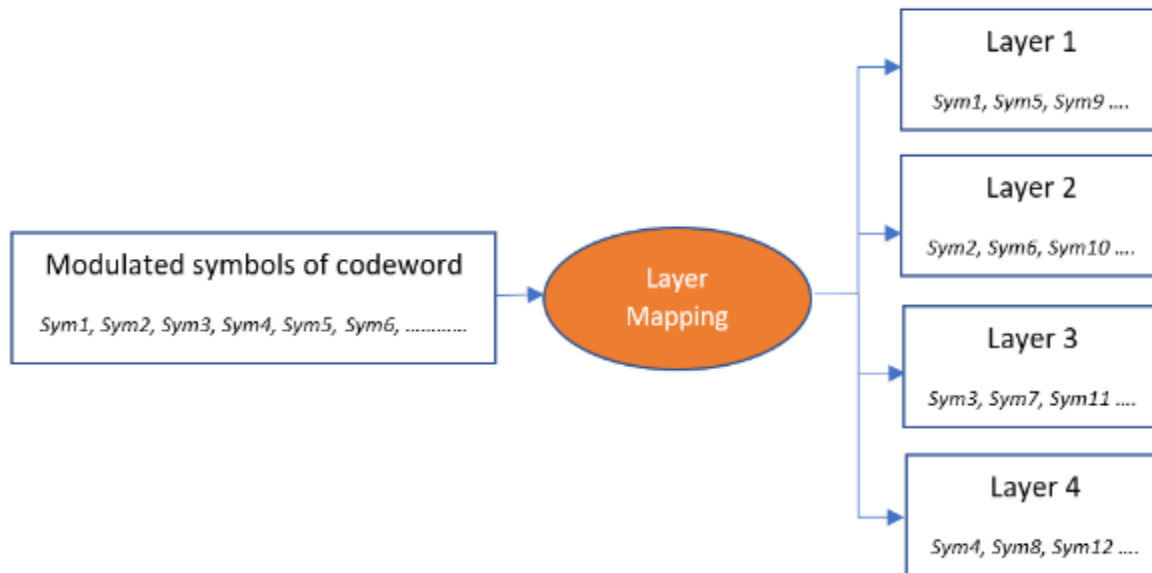
Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω οι βασικές πτυχές του MIMO [29] περιλαμβάνουν χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing), προκωδικοποίηση (precoding), μέτρηση καναλιών (channel measurement) και αναφορά.

### Spatial Multiplexing

Η χωρική πολυπλεξία χρησιμοποιεί το MIMO για την εκτέλεση πολλαπλών επιπέδων μετάδοσης. Ο ελάχιστος αριθμός κεραιών εκπομπής και λήψης περιορίζει τον αριθμό των επιπέδων (ή τη μέγιστη κατάταξη). Η διαδικασία αντιστοίχισης επιπέδων αντιστοιχίζει τα διαμορφωμένα σύμβολα της κωδικής λέξης σε διαφορετικά επίπεδα. Αντιστοιχίζει κάθε  $n_0$  σύμβολο της κωδικής λέξης στο νιοστό επίπεδο. Για παράδειγμα, αυτό το σχήμα δείχνει την αντιστοίχιση μιας κωδικής λέξης σε τέσσερα επίπεδα.

Επιπλέον, στην κατεύθυνση DL, η προδιαγραφή NR επιτρέπει επίσης δύο κωδικές λέξεις και έως το πολύ 8 επίπεδα μετάδοσης. Το παράδειγμα προς το παρόν υποστηρίζει μόνο μία κωδική λέξη για DL και UL.

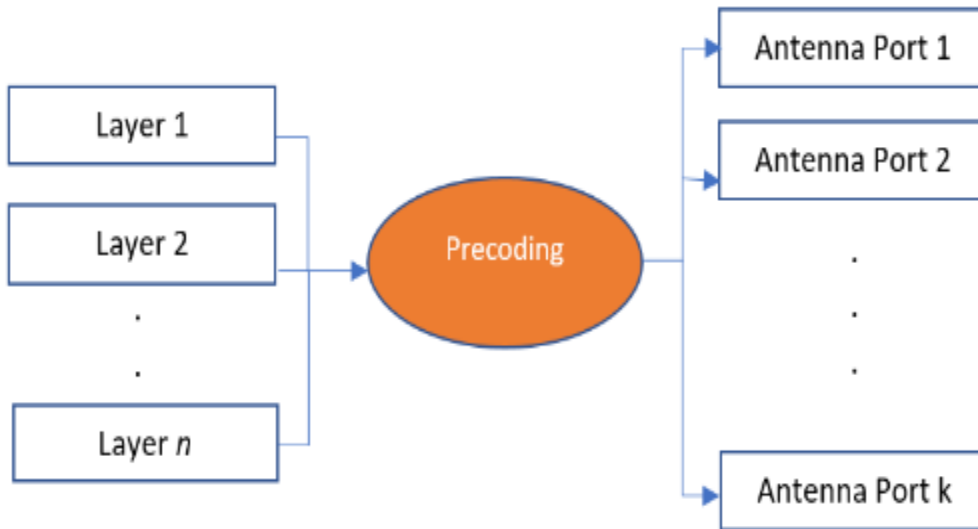
### Spatial multiplexing



Εικόνα 24 Spatial Multiplexing παραμετροποίηση

### Precoding

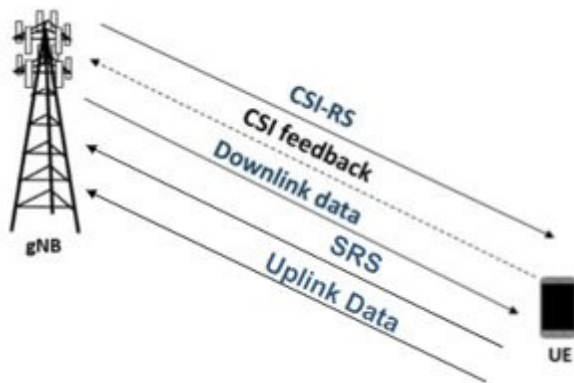
Η προκωδικοποίηση, η οποία ακολουθεί τη χαρτογράφηση του επιπέδου, αντιστοιχίζει τα επίπεδα μετάδοσης σε θύρες κεραίας. Η προκωδικοποίηση εφαρμόζει μια μήτρα προκωδικοποίησης στα επίπεδα μετάδοσης και εξάγει ροές δεδομένων στις θύρες της κεραίας. Η παραμετροποίηση του παραδείγματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 25 Παράδειγμα Precoding

### Channel measurement and reporting

Αποτελείται από μέτρηση και αναφορά καναλιού DL από τους UEs και μέτρηση καναλιού UL από gNB.



Εικόνα 26 Channel measurement and reporting

### Μέτρηση και αναφορά καναλιών DL

Η αναφορά CSI είναι η διαδικασία με την οποία ένας UE, για μεταδόσεις DL, συμβουλεύει έναν κατάλληλο αριθμό επιπέδων μετάδοσης (κατάταξη), PMI και τιμές CQI στο gNB. Το UE εκτιμά αυτές τις τιμές εκτελώντας μετρήσεις καναλιού στους διαμορφωμένους πόρους CSI-RS του. Ο προγραμματιστής gNB χρησιμοποιεί αυτή τη συμβουλή για να αποφασίσει τον αριθμό των επιπέδων

Εξομίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

μετάδοσης, τον πίνακα προκωδικοποίησης και το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS) για τα PUSCHs.

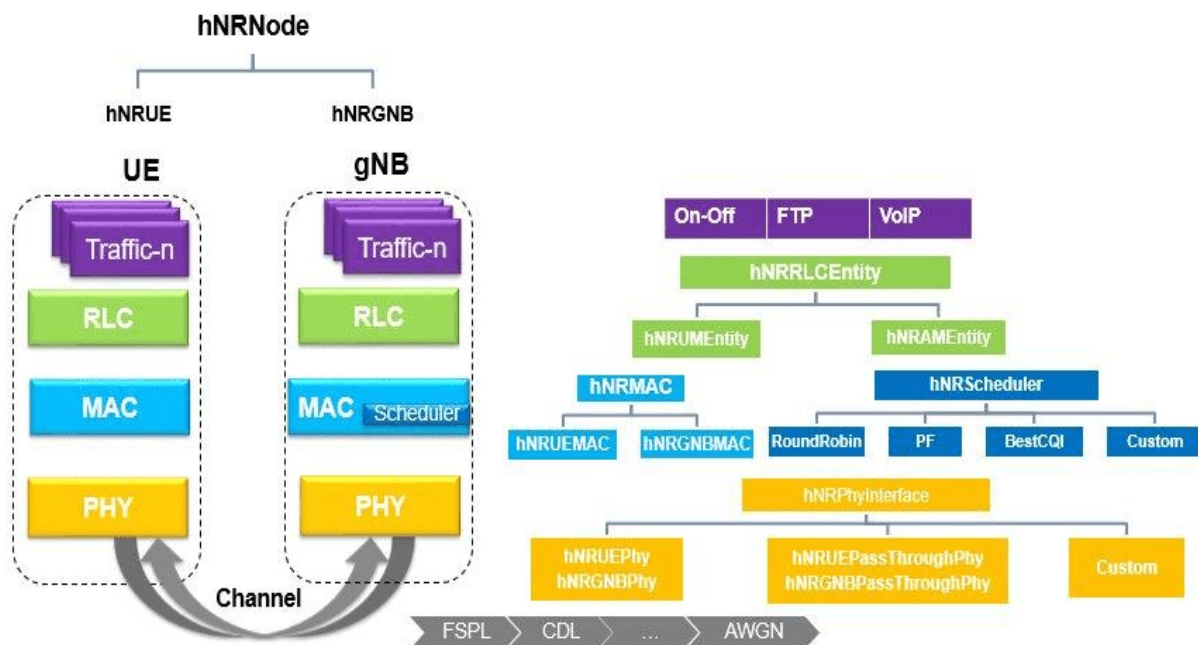
### Μέτρηση καναλιού UL

Το gNB χρησιμοποιεί SRS για να μετρήσει τα χαρακτηριστικά του καναλιού UL με τρόπο ανάλογο με τις μετρήσεις καναλιών DL που βασίζονται στο CSI-RS. Οι μετρήσεις του καναλιού UL χρησιμεύουν ως σημαντική είσοδος στον προγραμματιστή για να αποφασίσει τον αριθμό των επιπέδων μετάδοσης, τη μήτρα προκωδικοποίησης και το MCS για τα PUSCHs.

### NR Protocol Stack

Ένας κόμβος (gNB ή UE) είναι μια σύνθεση στρωμάτων στοίβας NR<sup>1</sup>.

## 5G Node Composition



Εικόνα 27 5G Node Composition

<sup>1</sup> <https://www.mathworks.com/help/5g/ug/nr-cell-performance-evaluation-with-physical-layer-integration.html>

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τα οποία παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες

- Εμφάνιση τιμών CQI για UE στο εύρος ζώνης PUSCH ή PDSCH.
- Εμφάνιση εκχώρησης πλέγματος πόρων σε UE: Το πλέγμα συχνότητας 2D δείχνει την κατανομή πόρων στους UE.
- Εμφάνιση γραφικών γραφημάτων μετρήσεων προγραμματισμού UL
- Εμφάνιση γραφικών γραφικών μετρήσεων προγραμματισμού DL
- Εμφάνιση ποσοστών σφαλμάτων μπλοκ DL και UL: Οι δύο υπογραφές που εμφανίζονται στην «Οπτικοποίηση Ποσοστό Σφάλματος Αποκλεισμού (BLER)» εμφανίζουν το ποσοστό σφάλματος μπλοκ (για κάθε UE) που παρατηρείται στις κατευθύνσεις άνω και κάτω ζεύξης, καθώς προχωρά η προσομοίωση. Η γραφική παράσταση ενημερώνεται για κάθε χρονοθυρίδα μέτρησης StepSize.

### **Αρχείο τιμών προσομοίωσης**

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση και τα αρχεία καταγραφής προσομοίωσης αποθηκεύονται σε αρχεία MAT για περαιτέρω ανάλυση και οπτικοποίηση. Οι παράμετροι προσομοίωσης αποθηκεύονται σε ένα αρχείο MAT με το όνομα αρχείου ως τιμή της παραμέτρου παραμέτρων διαμόρφωσης parametersLogFile. Τα αρχεία καταγραφής ανά χρονικό βήμα, τα αρχεία καταγραφής ανάθεσης προγραμματισμού και τα αρχεία καταγραφής BLER αποθηκεύονται στο αρχείο MAT simulationLogFile.

Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση, φορτώνεται τα αρχεία DLTimeStepLogs, ULTimeStepLogs SchedulingAssignmentLogs και RLCLlogs.

**Αρχεία χρονικών βημάτων:** Και τα δύο αρχεία καταγραφής βημάτων χρόνου DL και UL ακολουθούν την ίδια μορφή.

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

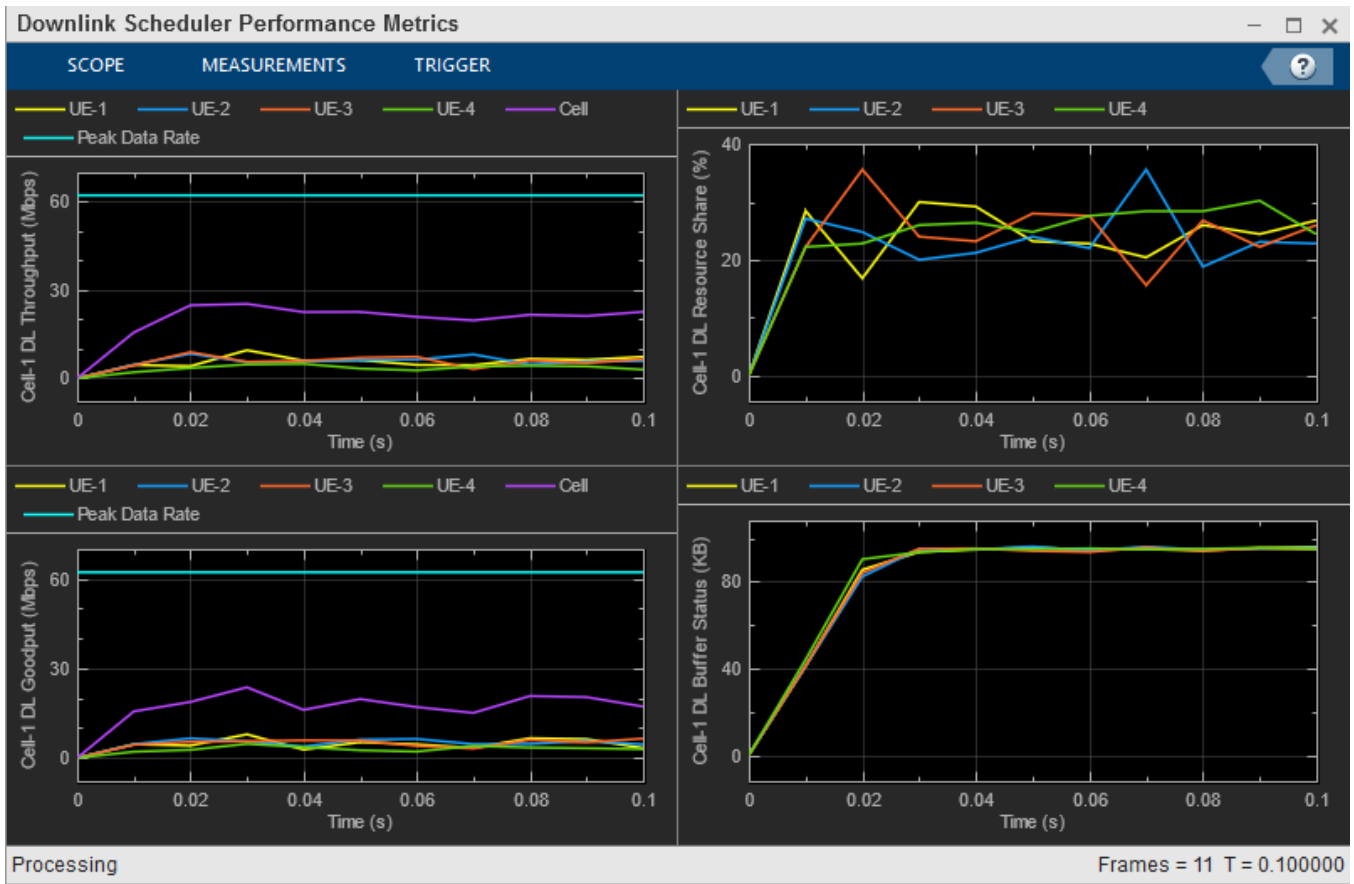
**Προγραμματισμός αρχείων καταγραφής εργασιών:** Οι πληροφορίες όλων των εργασιών προγραμματισμού και οι σχετικές πληροφορίες καταγράφονται σε αυτό το αρχείο.

**Αρχεία καταγραφής BLER:** Οι πληροφορίες σφαλμάτων αποκλεισμού που παρατηρούνται στις οδηγίες ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης καταγράφονται σε αυτό το αρχείο.

Κάθε σειρά του αρχείου καταγραφής αντιπροσωπεύει ένα slot. Η στήλη περιέχει το διάλυσμα πληροφοριών μήκους ίσο με τον αριθμό των UE.

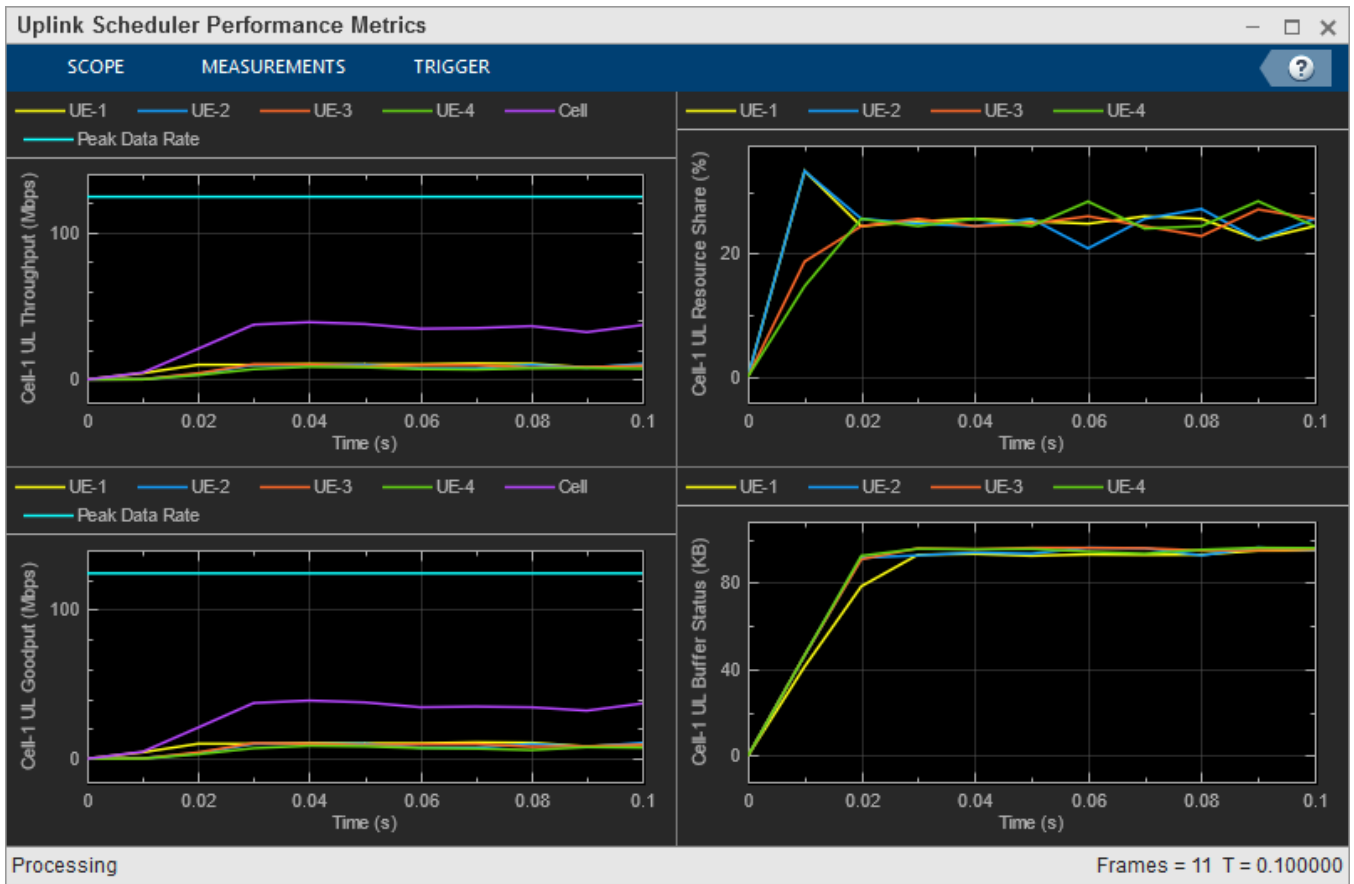
'Timestamp'	'Frame Number'	'Slot Number'	'Number of Erroneous Packets(DL)'	'Number of Packets(DL)'	'Number of Erroneous Packets(UL)'	'Number of Packets(UL)'
0	0	0	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]
1	0	1	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]
2	0	2	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]
3	0	3	[0;0;0;0]	[1;1;0;0]	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]
4	0	4	[0;0;1;1]	[0;0;1;1]	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]
5	0	5	[0;0;0;0]	[1;1;0;0]	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]
6	0	6	[0;0;0;0]	[1;1;0;0]	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]
7	0	7	[0;0;0;0]	[1;1;0;0]	[0;0;0;0]	[0;0;0;0]
8	0	8	[0;0;0;0]	[1;1;0;1]	[0;0;0;0]	[1;1;0;0]
9	0	9	[0;0;0;0]	[0;1;1;0]	[0;0;0;0]	[0;0;1;1]

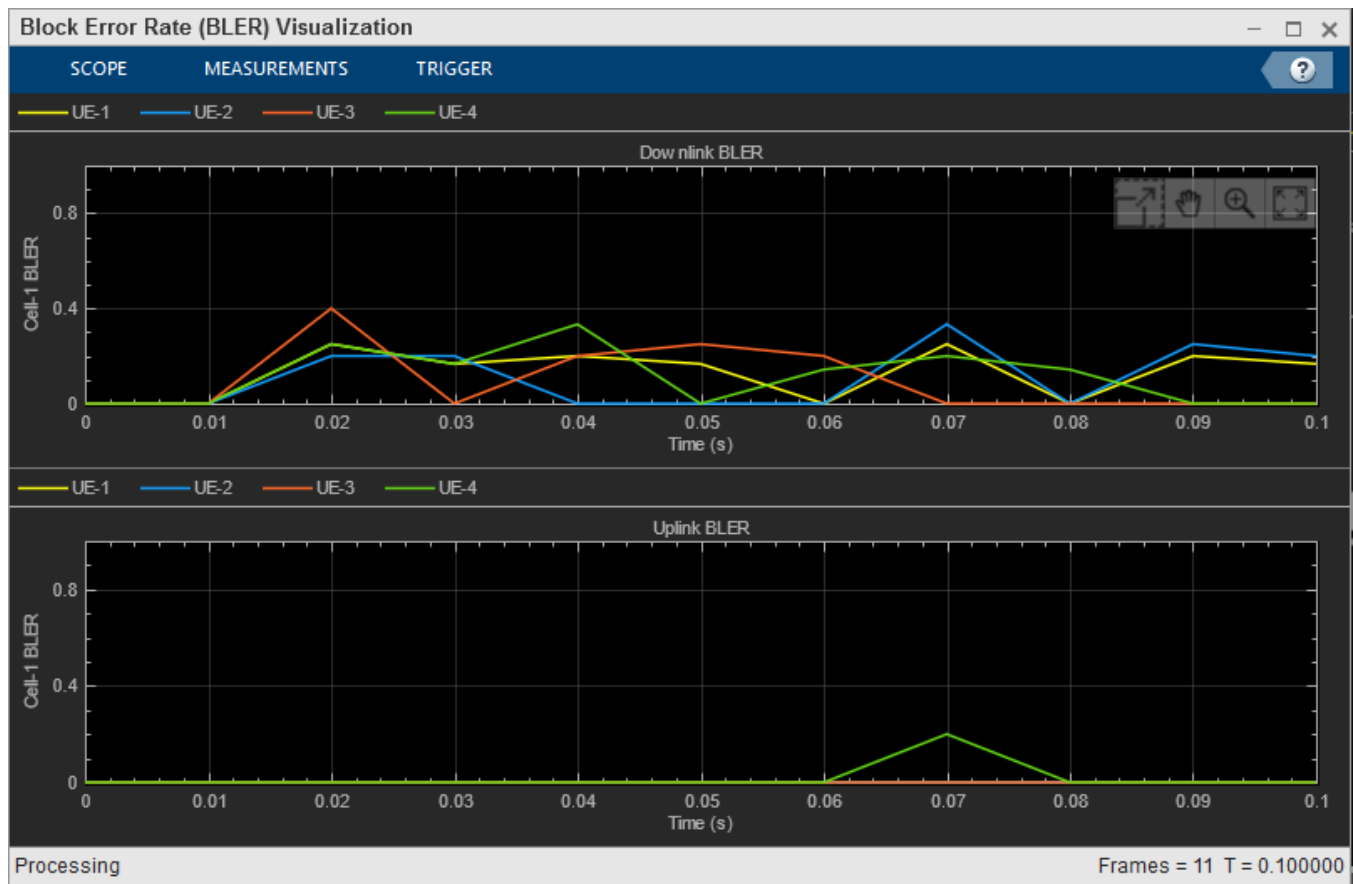
Εξομίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G





Εξομίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G





Εικόνα 28 MIMO 5G αποτελέσματα προσομοίωσης

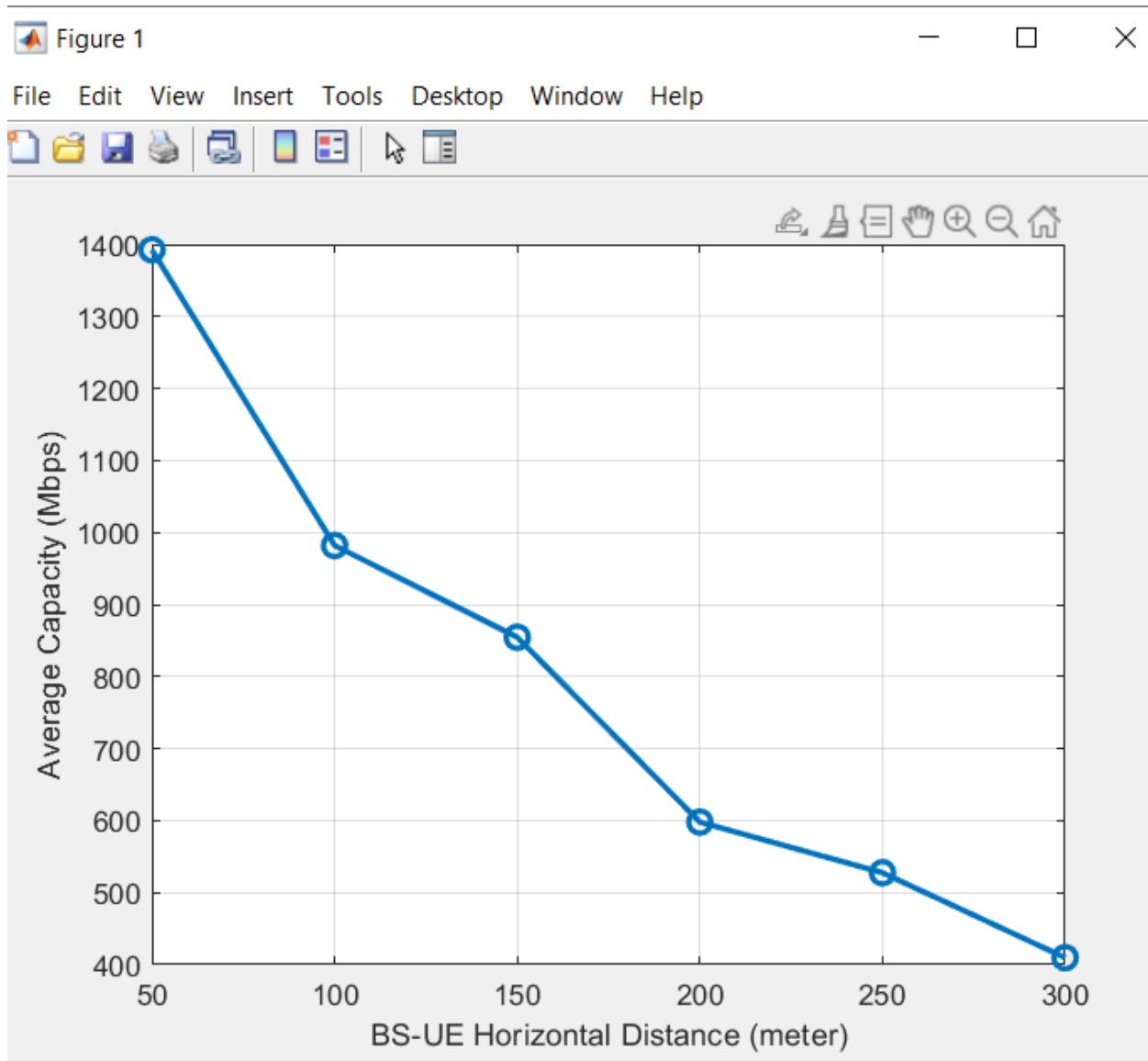
### Εκτίμηση χωρητικότητας στο Mathworks στο μοντέλο 5G NR CDL

Αυτή είναι μια σύντομη τεκμηρίωση σχετικά με την υλοποίηση του MATLAB [29] για την εκτίμηση της μέσης χωρητικότητας καναλιού χρησιμοποιώντας το μοντέλο καναλιών ομαδοποιημένης γραμμής καθυστέρησης (CDL) του Mathworks 5G New Radio (NR) που παρέχεται στην Εργαλειοθήκη 5G. Το nrCDLChannel System object™ υλοποιεί το μοντέλο CDL όπως ορίζεται στο 3GPP TR 38.901, στο οποίο τα μοντέλα CDL-A, CDL-B και CDL-C προορίζονται για συνδέσεις μη οπτικής επαφής (NLOS), ενώ το CDL-D και Τα μοντέλα CDL-E προορίζονται για συνδέσμους LOS. Σε αυτό το παράδειγμα, το μοντέλο CDL-A υλοποιείται υποθέτοντας NLOS συνδέσεις. Το αντικείμενο nrCDLChannel System™ μπορεί να δημιουργήσει συντελεστές καναλιού και να φιλτράρει το σήμα εισόδου IMO.

**Θεωρείται ότι**

- Το DS πολλαπλών διαδρομών είναι 200 ns στην προσομοίωση. Αυτή η τιμή λαμβάνεται από τα δεδομένα βαθμονόμησης του μοντέλου CDL 3GPP, λαμβάνοντας υπόψη το εύλογο εύρος της διάμεσης τιμής του DS. Η προεπιλεγμένη περίοδος συμβόλων στο μοντέλο CDL-A του Mathworks είναι 32,55 ns, η οποία είναι πολύ μικρότερη από το DS. Ως εκ τούτου, ο υβριδικός αλγόριθμος προκωδικοποίησης στενής ζώνης μπορεί να υιοθετηθεί για την εκτίμηση χωρητικότητα καναλιού.
- Το κέρδος κεραίας εκπομπής/λήψης είναι σταθερό για διαφορετικές φέρουσες συχνότητες.
- Ο υβριδικός αλγόριθμος προκωδικοποίησης υιοθετείται για την εκτίμηση της χωρητικότητας του καναλιού στις ζώνες συχνοτήτων mmWave. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, κάθε προκωδικοποιητής ραδιοσυχνοτήτων (RF) στον πομπό ή/και δέκτη επιλέγεται από τα αντίστοιχα διανύσματα απόκρισης συστοιχίας, κάτι που απαιτεί τη γραμμική ανεξαρτησία των διανυσμάτων από όλες τις διαδρομές. Επομένως, για μία γωνία αναχώρησης/αφίξεως, δύο κεραίες δεν μπορούν να διασταυρωθούν (στην ίδια θέση) ώστε να έχουν το ίδιο διάνυσμα απόκρισης.
- Μια μοναδική αλυσίδα RF χρησιμοποιείται για τη μετάδοση μιας ροής δεδομένων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται παρακάτω



Εικόνα 29 Capacity-Estimation-on-the-Mathworks-5G-NR-CDL-Model

### Massive MIMO Hybrid Beamforming

Αυτό το παράδειγμα δείχνει πώς χρησιμοποιείται η υβριδική διαμόρφωση δέσμης στο άκρο μετάδοσης ενός massive συστήματος επικοινωνιών MIMO[30] , χρησιμοποιώντας τεχνικές τόσο για συστήματα πολλαπλών χρηστών όσο και για συστήματα ενός χρήστη. Το παράδειγμα χρησιμοποιεί ήχο

πλήρους καναλιού για τον προσδιορισμό των πληροφοριών κατάστασης καναλιού στον πομπό. Διαχωρίζει την απαιτούμενη προκωδικοποίηση σε ψηφιακά βασικά στοιχεία και αναλογικά στοιχεία ραδιοσυχνοτήτων, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές για συστήματα πολλών χρηστών και συστημάτων ενός χρήστη. Οι απλοποιημένοι ψηφιακοί δέκτες ανακτούν τις πολλαπλές μεταδιδόμενες ροές δεδομένων για να τονίσουν τα κοινά στοιχεία αξίας για ένα σύστημα επικοινωνιών, συγκεκριμένα, EVM και BER.

Το παράδειγμα χρησιμοποιεί ένα μοντέλο χωρικού καναλιού που βασίζεται στη σκέδαση, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις χωρικές θέσεις εκπομπής/λήψης και τα μοτίβα της κεραίας. Ένα απλούστερο στατικό επίπεδο κανάλι MIMO προσφέρεται επίσης για σκοπούς επικύρωσης συνδέσμων. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για υψηλό ρυθμό δεδομένων και μεγαλύτερη χωρητικότητα χρήστη αυξάνει την ανάγκη για πιο αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Το MIMO πολλαπλών χρηστών (MU-MIMO) βελτιώνει την απόδοση του φάσματος επιτρέποντας σε έναν πομπό σταθμού βάσης (BS) να επικοινωνεί ταυτόχρονα με δέκτες πολλαπλών κινητών σταθμών (MS) χρησιμοποιώντας τους ίδιους πόρους χρόνου-συχνότητας. Το τεράστιο MIMO επιτρέπει στον αριθμό των στοιχείων κεραίας BS να είναι της τάξης των δεκάδων ή εκατοντάδων, αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των ροών δεδομένων σε ένα κελί σε μεγάλη τιμή.

Τα ασύρματα συστήματα επόμενης γενιάς, 5G, χρησιμοποιούν ζώνες κυμάτων χιλιοστών (mmWave) για να επωφεληθούν από το ευρύτερο εύρος ζώνης τους. Τα συστήματα 5G αναπτύσσουν επίσης συστοιχίες κεραιών μεγάλης κλίμακας για να μειώσουν τη σοβαρή απώλεια διάδοσης στη ζώνη mmWave. Σε σύγκριση με τα τρέχοντα ασύρματα συστήματα, το μήκος κύματος στη ζώνη mmWave είναι πολύ μικρότερο. Αν και αυτό επιτρέπει σε μια συστοιχία να περιέχει περισσότερα στοιχεία εντός της ίδιας φυσικής διάστασης, γίνεται πολύ πιο δαπανηρή η παροχή μιας μονάδας εκπομπής-λήψης (TR) ή μιας αλυσίδας RF για κάθε στοιχείο κεραίας. Οι υβριδικοί πομποδέκτες είναι μια πρακτική λύση καθώς χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό αναλογικών μορφοποιητών δέσμης στο RF και ψηφιακών μορφοποιητών δέσμης στους τομείς της ζώνης βάσης, με λιγότερες αλυσίδες RF από τον αριθμό των στοιχείων εκπομπής.

Σε ένα σύστημα χωρικής πολυπλεξίας με όλη την ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης, το σήμα διαμορφώνεται από ένα σύνολο βαρών προκωδικοποίησης, διαδίδεται μέσω του καναλιού και ανακτάται από ένα σύνολο συνδυασμένων βαρών. Αυτή η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί από το μαθηματικό τύπο  $Y = (X*F*H+N)*W$  όπου το

$X$  είναι ένας πίνακας  $N_s$  στήλης του οποίου οι στήλες είναι ροές δεδομένων,

το  $F$  είναι ένας πίνακας  $N_s \times N_t$  που αντιπροσωπεύει τα βάρη προκωδικοποίησης,

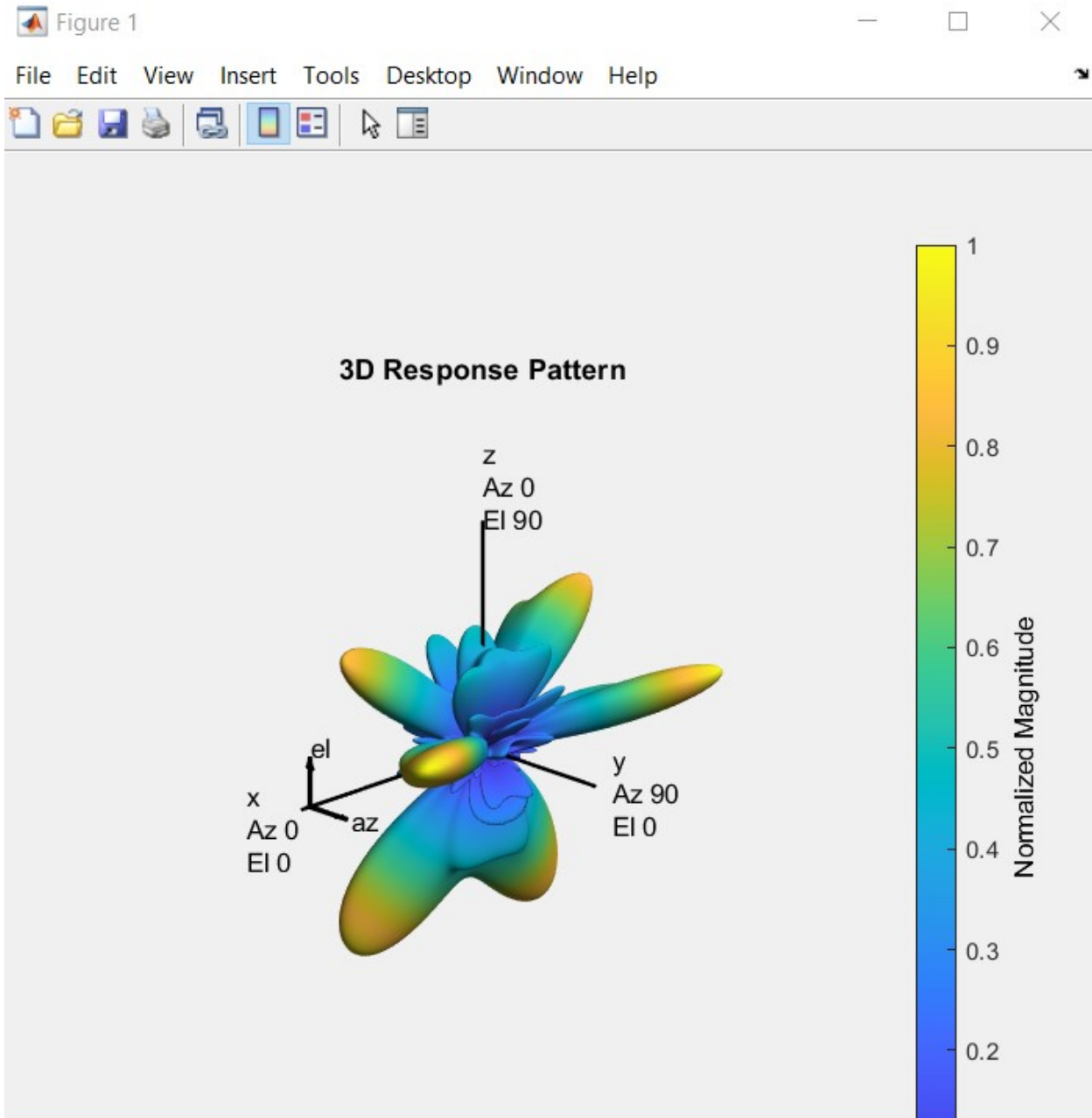
το  $W$  είναι ένα  $O$  πίνακας  $N_r \times N_s$  που αντιπροσωπεύει τα συνδυαστικά βάρη,

το  $N$  είναι ένας πίνακας στήλης  $N_r$  του οποίου οι στήλες είναι ο θόρυβος του δέκτη σε κάθε στοιχείο και

το  $Y$  είναι ένας πίνακας στήλης  $N_s$  του οποίου οι στήλες είναι ανακτημένες ροές δεδομένων. Δεδομένου ότι ο στόχος του συστήματος είναι να επιτύχει καλύτερη φασματική απόδοση, η απόκτηση της προκωδικοποίησης και ο συνδυασμός βαρών μπορεί να θεωρηθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης όπου η βέλτιστη προκωδικοποίηση και συνδυασμός βαρών καθιστούν το γινόμενο του  $F^*H^*W'$ , ένας διαγώνιος πίνακας έτσι ώστε κάθε ροή δεδομένων μπορεί να ανακτηθεί ανεξάρτητα.

Σε ένα υβριδικό σύστημα διαμόρφωσης δέσμης, η ροή του σήματος είναι παρόμοια. Τόσο τα βάρη προκωδικοποίησης όσο και τα βάρη συνδυασμού είναι συνδυασμοί ψηφιακών βαρών ζώνης βάσης και αναλογικών βαρών ζώνης RF. Τα ψηφιακά βάρη της ζώνης βάσης μετατρέπουν τις εισερχόμενες ροές δεδομένων σε σήματα εισόδου σε κάθε αλυσίδα RF και τα αναλογικά βάρη στη συνέχεια μετατρέπουν το σήμα σε κάθε αλυσίδα RF στο σήμα που ακτινοβολείται ή συλλέγεται σε κάθε στοιχείο κεραίας. Σημειώστε ότι τα αναλογικά βάρη μπορούν να περιέχουν μόνο μετατοπίσεις φάσης.

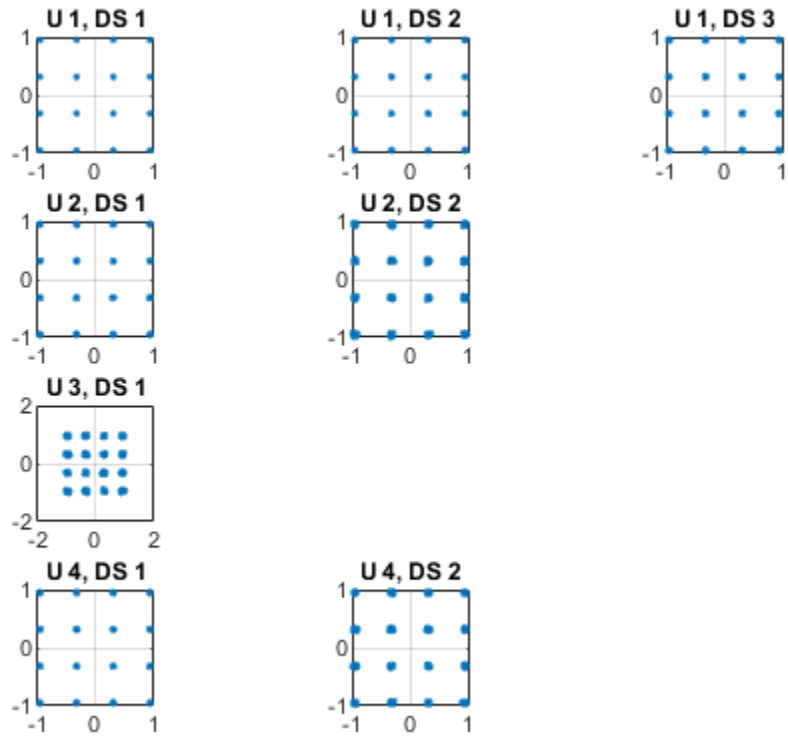
Το παρακάτω μοτίβο απόκρισης δείχνει ότι ακόμη και σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών, υπάρχει περιορισμένος αριθμός κυρίαρχων κατευθύνσεων.



Εικόνα 30 Massive MIMO Hybrid Beamforming

Στην παρακάτω εικόνα ο εμφανιζόμενος αστερισμός λήψης των ισορροπημένων συμβόλων προσφέρει μια ποιοτική αξιολόγηση της λήψης. Το πραγματικό ποσοστό σφάλματος bit προσφέρει τον ποσοτικό αριθμό συγκρίνοντας τα πραγματικά μεταδιδόμενα bit με τα λαμβανόμενα αποκωδικοποιημένα bit ανά χρήστη.

Εξομίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G



Εικόνα 31 Λήψη ενίσχυσης και ανάκτησης σήματος



## Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική επισκόπηση της λειτουργίας του MIMO και του Massive MIMO και με τη χρήση του περιβάλλοντος Matlab προσομοιώνεται η τεχνολογία MIMO και Massive MIMO σχετικά με την αποδοτική χρήση της χωρητικότητας δικτύου και τη βελτίωση της απόδοσης σε ένα σύστημα πέμπτης γενιάς.

Όπως τονίστηκε από την 3rd Generation Partnership Project (3GPP) η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιείται για δίκτυα Wi-Fi και τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς (4G) Long-Term Evolution (LTE) και πέμπτης γενιάς (5G). Τα βασικά πλεονεκτήματα του MIMO είναι ότι η τεχνολογία MIMO ενεργοποιεί ισχυρότερα και δεν απαιτείται καθαρό LOS για μια συσκευή χρήστη. Το περιεχόμενο μεγάλης κλίμακας (π.χ. αρχεία βίντεο) μπορούν να ταξιδεύουν μέσω δικτύου σε μεγάλες ποσότητες. Η πληθώρα των ροών δεδομένων βελτιώνουν την οπτική και ακουστική ποιότητα. Μειώνουν επίσης την πιθανότητα απώλειας πακέτων δεδομένων. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι MIMO :

- ένας χρήστης (SU) και
- πολλαπλός χρήστης (MU).

Στα συστήματα SU-MIMO, οι ροές δεδομένων μπορούν να αλληλεπιδρούν μόνο με μία συσκευή στο δίκτυο κάθε φορά. Επομένως, τα συστήματα MU-MIMO υπερτερούν του SU-MIMO. Σχετικά με την χωρητικότητα του δικτύου στο σύστημα MIMO χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, η προσθήκη πολλαπλών κεραιών στον πομπό σε συνδυασμό με προηγμένους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος στον πομπό και στον δέκτη ενισχύει την απόδοση όσον αφορά τη χωρητικότητα και την ποικιλομορφία. Το MU-MIMO έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να μεταφέρει πολλαπλά σύνολα δεδομένων σε πολλές συσκευές ταυτόχρονα. Υπάρχουν διάφορες πιθανές διαμορφώσεις για αυτά τα συστήματα MIMO, με τα 2x2, 4x4, 6x6 και 8x8 να είναι τα πιο κοινά. Τα συστήματα 5G χειρίζονται αυτές τις διαμορφώσεις για να επιτρέψουν εκτεταμένη χωρητικότητα δικτύου.

Η massive multiple in multiple out (massive MIMO) είναι τεχνολογία για δίκτυα 5G, η οποία προσφέρει πολλαπλά οφέλη απόδοσης χωρητικότητας και ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με τα τρέχοντα δίκτυα LTE και LTE-Advanced. Το Massive MIMO είναι ένας τύπος τεχνολογίας ασύρματων

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

επικοινωνιών στην οποία οι σταθμοί βάσης είναι εξοπλισμένοι με πολύ μεγάλο αριθμό στοιχείων κεραίας για τη βελτίωση της φασματικής και της ενεργειακής απόδοσης. Τα massive MIMO συστήματα έχουν συνήθως δεκάδες, εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες κεραίες σε μια ενιαία διάταξη κεραιών. Άλλες τεχνολογίες όπως η διαμόρφωση δέσμης και η χωρική πολυπλεξία δίνουν τη δυνατότητα στο massive MIMO να θεωρείται ως μία από τις βασικές τεχνολογίες για συστήματα NR 5G.

Μερικά από τα βασικά οφέλη της τεράστιας τεχνολογίας MIMO είναι [16]:

**Φασματική απόδοση:** Το massive MIMO παρέχει υψηλότερη φασματική απόδοση, επιτρέποντας στη διάταξη κεραιών του να εστιάζει τις στενές δέσμες προς τον χρήστη. Μπορεί να επιτευχθεί φασματική απόδοση πάνω από δέκα φορές καλύτερη από το τρέχον σύστημα MIMO που χρησιμοποιείται για 4G/LTE.

**Ενεργειακή απόδοση:** Καθώς η διάταξη κεραίας εστιάζει σε ένα μικρό συγκεκριμένο τμήμα, απαιτεί λιγότερη ακτινοβολούμενη ισχύ και μειώνει την απαίτηση ενέργειας σε τεράστια συστήματα MIMO.

**Υψηλός ρυθμός δεδομένων:** Το κέρδος συστοιχίας και η χωρική πολυπλεξία που παρέχονται από το massive MIMO αυξάνουν τον ρυθμό δεδομένων και τη χωρητικότητα των ασύρματων συστημάτων.

**Παρακολούθηση χρήστη:** Επειδή το massive MIMO χρησιμοποιεί στενές δέσμες σήματος προς τον χρήστη. Η παρακολούθηση των χρηστών γίνεται πιο αξιόπιστη και ακριβής.

**Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας:** Το massive MIMO είναι κατασκευασμένο με γραμμικούς ενισχυτές εξαιρετικά χαμηλότερης ισχύος, γεγονός που εξαλείφει τη χρήση ογκώδους ηλεκτρονικού εξοπλισμού στο σύστημα. Αυτή η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

**Λιγότερο Fading:** Ένας μεγάλος αριθμός κεραίας στον δέκτη κάνει το massive MIMO ανθεκτικό στο fading

**Χαμηλή καθυστέρηση:** Το massive MIMO μειώνει την καθυστέρηση στη διεπαφή αέρα

**Ανθεκτικότητα:** Τα συστήματα massive MIMO είναι ανθεκτικά έναντι ακούσιων παρεμβολών και εσωτερικών εμπλοκών. Επίσης, αυτά τα συστήματα είναι ανθεκτικά σε μία ή λίγες βλάβες κεραίας λόγω μεγάλων κεραιών

**Αξιοπιστία:** Ένας μεγάλος αριθμός κεραιών στο massive MIMO παρέχει μεγαλύτερη διαφοροποίηση, γεγονός που αυξάνει την αξιοπιστία της σύνδεσης

**Ενισχυμένη ασφάλεια:** Το massive MIMO παρέχει περισσότερη φυσική ασφάλεια λόγω των ορθογώνιων καναλιών κινητών σταθμών και των στενών ακτίνων

**Χαμηλή σύνθετη γραμμική επεξεργασία:** Ο μεγαλύτερος αριθμός κεραιών σταθμού βάσης καθιστά τους απλούς ανιχνευτές σήματος και τους προκωδικοποιητές βέλτιστους για το σύστημα. Ενώ οι μεγαλύτερες προκλήσεις για το μέλλον και την περαιτέρω βελτίωση του massive MIMO είναι Pilot Contamination, το Precoding (προκωδικοποίηση), η Εκτίμηση Καναλιού και προγραμματισμός αιτημάτων.

## Βιβλιογραφία

- [1] Niveditha, V., Usha, D., Rajakumar, P., Dwarakanath, B., & Magesh S. (2021). Emerging 5G IoT Smart System Based on Edge-to-Cloud Computing Platform. *International Journal Of E-Collaboration*, 17(4), 122-131. doi: 10.4018/ijec.2021100109
- [2] Duplicy, J., Badic, B., Balraj, R., Ghaffar, R., Horváth, P., & Kaltenberger, F. et al. (2011). MU-MIMO in LTE Systems. *EURASIP Journal On Wireless Communications And Networking*, 2011(1). doi: 10.1155/2011/496763
- [3] Aymen Askri. The uplink reception and downlink transmission in MU-MIMO for 5G. *Networking and Internet Architecture [cs.NI]*. Institut Polytechnique de Paris, 2021. English. ffNNT : 2021IPPAT006ff. fftel-03277330
- [4] Björnson, E., Larsson, E., & Marzetta, T. (2016). Massive MIMO: ten myths and one critical question. *IEEE Communications Magazine*, 54(2), 114-123. doi: 10.1109/mcom.2016.7402270
- [5] Larsson E.G., Tufvesson F., Edfors O., Marzetta T.L. Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems. *IEEE Commun. Mag.* 2014;52:186–195. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736761. [CrossRef] [Google Scholar]
- [6] Marzetta T.L. Massive MIMO: An Introduction. *Bell Labs Tech. J.* 2015;20:11–22. doi: 10.15325/BLTJ.2015.2407793
- [7] sansimera.gr, s. (2022). Η ιστορία της κινητής τηλεφωνίας. Retrieved 19 July 2022, from <https://www.sansimera.gr/articles/241>
- [8] Biography of Martin Cooper | Simply Knowledge. (2022). Retrieved 19 July 2022, from <http://simplyknowledge.com/popular/biography/martin-cooper>
- [9] 1G To 5G – rewind of the revolution. (2022). Retrieved 19 July 2022, from <https://www.subex.com/blog/a-rewind-of-the-evolution-from-1g-to-5g/>
- [10] Kevin Ashton - Wikipedia. (2022). Retrieved 19 July 2022, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Kevin\\_Ashton](https://en.wikipedia.org/wiki/Kevin_Ashton)

- [11] (2022). Retrieved 19 July 2022, from <http://www.myphone.gr/forum/showthread.php?t=372677>
- [12] 4G ή LTE; - Όλες οι πληροφορίες για τα πρωτόκολλα δικτύωσης - ired.gr. (2022). Retrieved 19 July 2022, from <https://www.ired.gr/blog/item/4919-4g-vs-lte-the-differences-explained.html>
- [13] Δίκτυο 5G: σε τι διαφέρει από το 4G; - AppGene- δημιουργία mobile εφαρμογών - κατασκευή eshop. (2022). Retrieved 19 July 2022, from <https://www.appgene.net/blog/diktio-5g-diafores-4g/>
- [14] Πώς θα αλλάξει την καθημερινότητά μας το 5G. (2022). Retrieved 19 July 2022, from <https://www.capital.gr/epixeiriseis/3502531/pos-tha-allaxei-tin-kathimerinotita-mas-to-5g>
- [15] Hamamreh, J. (2020). Multiple Input Multiple Output with Antenna Number Modulation and Adaptive Antenna Selection. RS Open Journal On Innovative Communication Technologies. doi: 10.21428/03d8ffbd.f172bd8a
- [16] Chataut, R., & Akl, R. (2020). Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction. Sensors, 20(10), 2753. doi: 10.3390/s20102753
- [17] antennas, B. (2022). Beamforming vs. MIMO antennas. Retrieved 19 July 2022, from <https://www.rfsworld.com/articles/white-papers/beamforming-vs-mimo-antennas>
- [18] Liu, L., Chen, R., Geirhofer, S., Sayana, K., Shi, Z., & Zhou, Y. (2012). Downlink MIMO in LTE-advanced: SU-MIMO vs. MU-MIMO. IEEE Communications Magazine, 50(2), 140-147. doi: 10.1109/mcom.2012.6146493
- [19] Khwandah, S., Cosmas, J., Lazaridis, P., Zaharis, Z., & Chochliouros, I. (2021). Massive MIMO Systems for 5G Communications. Wireless Personal Communications, 120(3), 2101-2115. doi: 10.1007/s11277-021-08550-9
- [20] Borges, D., Montezuma, P., Dinis, R., & Beko, M. (2021). Massive MIMO Techniques for 5G and Beyond—Opportunities and Challenges. Electronics, 10(14), 1667. doi: 10.3390/electronics10141667
- [21] Marques da Silva, M., Dinis, R., & Guerreiro, J. (2020). A Low Complexity Channel Estimation and Detection for Massive MIMO Using SC-FDE. Telecom, 1(1), 3-17. doi: 10.3390/telecom1010002
- [22] Marzetta T.L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. IEEE Trans. Wirel. Commun. 2010;9:3590–3600. doi: 10.1109/TWC.2010.092810.091092

- [23] Jose J., Ashikhmin A., Marzetta T., Vishwanath S. Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2011;10:2640–2651. doi: 10.1109/TWC.2011.060711.101155.
- [24] Moqbel M.A.M., Wangdong W., Ali A.Z. MIMO Channel Estimation Using the LS and MMSE Algorithm. *IOSR J. Electron. Commun. Eng.* 2017;12:13–22. doi: 10.9790/2834-1201021322
- [25] Lu L., Li G.Y., Swindlehurst A.L., Ashikhmin A., Zhang R. An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges. *IEEE J. Sel. Top. Signal Proc.* 2014;8:742–758. doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671
- [26] Fatema N., Hua G., Xiang Y., Peng D., Natgunanathan I. Massive MIMO Linear Precoding: A Survey. *IEEE Syst. J.* 2018;12:3920–3931. doi: 10.1109/JSYST.2017.2776401
- [27] Dimic G., Sidiropoulos N.D. On downlink beamforming with greedy user selection: Performance analysis and a simple new algorithm. *IEEE Trans. Signal Process.* 2005;53:3857–3868. doi: 10.1109/TSP.2005.855401
- [28] Huang S., Yin H., Wu J., Leung V.C.M. User selection for multi-user MIMO downlink with zero-forcing beamforming. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2012;62:3084–3097. doi: 10.1109/TVT.2013.2244105
- [29] (2022). Retrieved 19 July 2022, from <https://www.mathworks.com/help/5g/ug/nr-cell-performance-evaluation-with-mimo.html>
- [30] (2022). Retrieved 19 July 2022, from <https://www.mathworks.com/help/phased/ug/massive-mimo-hybrid-beamforming.html>

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

## Παράρτημα κώδικα

<https://www.mathworks.com/help/5g/ug/nr-cell-performance-evaluation-with-mimo.html>

<https://www.mathworks.com/help/phased/ug/massive-mimo-hybrid-beamforming.html>

<https://www.mathworks.com/help/phased/ug/improve-snr-and-capacity-of-wireless-communication-using-antenna-arrays.html>

[https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/70478-capacity-estimation-on-the-mathworks-5g-nr-cdl-model?s\\_tid=srchtitle\\_average%20capacity%20cdl\\_1](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/70478-capacity-estimation-on-the-mathworks-5g-nr-cdl-model?s_tid=srchtitle_average%20capacity%20cdl_1)

[https://www.mathworks.com/support/search.html/answers/246112-how-can-i-plot-the-channel-capacity-for-mimo-isiso-simo-and-miso.html?fq\[\]=asset\\_type\\_name:answer&fq\[\]=category:antenna/antenna-analysis&page=1](https://www.mathworks.com/support/search.html/answers/246112-how-can-i-plot-the-channel-capacity-for-mimo-isiso-simo-and-miso.html?fq[]=asset_type_name:answer&fq[]=category:antenna/antenna-analysis&page=1)

## Σύγκριση χωρητικότητας για SISO, MISO, SIMO και MIMO

```
clc;
close all;
clear all;
mT = 4;
mR = 4;
ITER = 1000;
SNRdB = [0:25];
SNR = 10.^(SNRdB/10);
C_SISO = zeros(1,length(SNR));
C_SIMO = zeros(1,length(SNR));
C_MISO = zeros(1,length(SNR));
C_MIMO = zeros(1,length(SNR));
for ite = 1:ITER
h_SISO = (randn +1i*randn)/sqrt(2);
h_SIMO = (randn(mR,1)+1i*randn(mR,1))/sqrt(2);
h_MISO = (randn(1,mT)+1i*randn(1,mT))/sqrt(2);
h_MIMO = (randn(mR,mT)+1i*randn(mR,mT))/sqrt(2);
for K = 1:length(SNR)
C_SISO(K) = C_SISO(K) + log2(1+ SNR(K)*norm(h_SISO)^2);
C_SIMO(K) = C_SIMO(K) + log2(1+ SNR(K)*norm(h_SIMO)^2);
C_MISO(K) = C_MISO(K) + log2(1+ SNR(K)*norm(h_MISO)^2/mT);
C_MIMO(K) = C_MIMO(K) + log2(abs(det(eye(mR)+SNR(K)*h_MIMO*h_MIMO'/mT)));
end
end
C_SISO = C_SISO/ITER;
C_SIMO = C_SIMO/ITER;
C_MISO = C_MISO/ITER;
```

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

```
C_MIMO = C_MIMO/ITER;
plot(SNRdB,C_SISO,'r',SNRdB,C_MIMO,'k')
legend('SISO','MIMO')
plot(SNRdB,C_SISO,'r',SNRdB,C_SIMO,'b',SNRdB,C_MISO,'m',SNRdB,C_MIMO,'k')
legend('SISO','SIMO','MISO','MIMO')
xlabel('SNR in dB')
ylabel('Capacity (b/s/Hz)')
title('Capacity Vs. SNR')
grid;
```

## Βελτίωση του SNR και τη χωρητικότητα της ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιώντας συστοιχίες κεραιών

```
c = 3e8;           % propagation speed
fc = 60e9;        % carrier frequency
lambda = c/fc;   % wavelength

rng(6466);

txcenter = [0;0;0];
rxcenter = [1500;500;0];

[~,txang] = rangeangle(rxcenter,txcenter);
[~,rxang] = rangeangle(txcenter,rxcenter);

txsipos = [0;0;0];
rxsopos = [0;0;0];

g = 1; % gain for the path
sisochan = scatteringchanmtx(txsipos,rxsopos,txang,rxang,g);

Nsamp = 1e6;
x = randi([0 1],Nsamp,1);

ebn0_param = -10:2:10;
Nsnr = numel(ebn0_param);

ber_siso = helperMIMOBER(sisochan,x,ebn0_param)/Nsamp;
helperBERPlot(ebn0_param,ber_siso);
legend('SISO')

rxarray = phased.ULA('NumElements',4,'ElementSpacing',lambda/2);
rxmopos = getElementPosition(rxarray)/lambda;

simochan = scatteringchanmtx(txsipos,rxmopos,txang,rxang,g);

rxarraystv = phased.SteeringVector('SensorArray',rxarray,...
    'PropagationSpeed',c);
wr = conj(rxarraystv(fc,rxang));
ber_simo = helperMIMOBER(simochan,x,ebn0_param,1,wr)/Nsamp;
helperBERPlot(ebn0_param,[ber_siso(:) ber_simo(:)]);
legend('SISO','SIMO')
```



```

helperBERPlot(ebn0_param,[ber_simo(:)]);
legend('SIMO')

txarray = phased.ULA('NumElements',4,'ElementSpacing',lambda/2);
txmipos = getElementPosition(txarray)/lambda;

misochan = scatteringchanmtx(txmipos,rxsopos,txang,rxang,g);

txarraystv = phased.SteeringVector('SensorArray',txarray,...
    'PropagationSpeed',c);
wt = txarraystv(fc,txang);
ber_miso = helperMIMOBBER(misochan,x,ebn0_param,wt,1)/Nsamp;
helperBERPlot(ebn0_param,[ber_siso(:) ber_simo(:) ber_miso(:)]);
legend('SISO','SIMO','MISO')

helperBERPlot(ebn0_param,[ ber_miso(:)]);
legend('MISO')

mimochan = scatteringchanmtx(txmipos,rxmopos,txang,rxang,g);

wt = txarraystv(fc,txang);
wr = conj(rxarraystv(fc,rxang));
ber_mimo = helperMIMOBBER(mimochan,x,ebn0_param,wt,wr)/Nsamp;
helperBERPlot(ebn0_param,[ber_siso(:) ber_simo(:) ber_miso(:) ber_mimo(:)]);
legend('SISO','SIMO','MISO','MIMO')

helperBERPlot(ebn0_param,[ ber_mimo(:)]);
legend('MIMO')

Nscat = 10;

[~,~,~,scatpos] = ...
    helperComputeRandomScatterer(txcenter,rxcenter,Nscat);
helperPlotSpatialMIMOScene(txsipos,rxsopos,...
    txcenter,rxcenter,scatpos);

Nframe = 1e3;
Nbitperframe = 1e4;
Nsamp = Nframe*Nbitperframe;

x = randi([0 1],Nbitperframe,1);

nerr = zeros(1,Nsnr);

for m = 1:Nframe
    sisompchan = scatteringchanmtx(txsipos,rxsopos,Nscat);
    wr = sisompchan'/norm(sisompchan);
    nerr = nerr+helperMIMOBBER(sisompchan,x,ebn0_param,1,wr);
end
ber_sisomp = nerr/Nsamp;
helperBERPlot(ebn0_param,[ber_siso(:) ber_sisomp(:)]);
legend('SISO LOS','SISO Multipath');

helperBERPlot(ebn0_param,[ber_sisomp(:)]);

```

Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

```
legend('SISO Multipath');

nerr = zeros(1,Nsnr);

for m = 1:Nframe
    simompchan = scatteringchanmtx(txsipos,rxmopos,Nscat);
    wr = simompchan'/norm(simompchan);
    nerr = nerr+helperMIMOBER(simompchan,x,ebn0_param,1,wr);
end
ber_simomp = nerr/Nsamp;
helperBERPlot(ebn0_param,[ber_sisomp(:) ber_simomp(:)]);
legend('SISO Multipath','SIMO Multipath');

helperBERPlot(ebn0_param,[ ber_simomp(:)]);
legend('SIMO Multipath');

nerr = zeros(1,Nsnr);

for m = 1:Nframe
    misompchan = scatteringchanmtx(txmipos,rxsopos,Nscat);
    wt = misompchan'/norm(misompchan);
    nerr = nerr+helperMIMOBER(misompchan,x,ebn0_param,wt,1);
end
ber_misomp = nerr/Nsamp;

helperBERPlot(ebn0_param,[ber_sisomp(:) ber_simomp(:) ber_misomp(:)]);
legend('SISO Multipath','SIMO Multipath','MISO Multipath');

helperBERPlot(ebn0_param,[ ber_misomp(:)]);
legend('MISO Multipath');

[txang,rxang,scatg,scatpos] = ...
    helperComputeRandomScatterer(txcenter,rxcenter,Nscat);
mimompchan = scatteringchanmtx(txmipos,rxmopos,txang,rxang,scatg);

helperPlotSpatialMIMOScene(txmipos,rxmopos,txcenter,rxcenter,scatpos);

nerr = zeros(1,Nsnr);

for m = 1:Nframe
    mimompchan = scatteringchanmtx(txmipos,rxmopos,Nscat);
    [u,s,v] = svd(mimompchan);
    wt = u(:,1)';
    wr = v(:,1);
    nerr = nerr+helperMIMOBER(mimompchan,x,ebn0_param,wt,wr);
end
ber_mimomp = nerr/Nsamp;

helperBERPlot(ebn0_param,[ber_sisomp(:) ber_simomp(:) ber_mimomp(:)]);
legend('SISO Multipath','SIMO Multipath','MIMO Multipath');

helperBERPlot(ebn0_param,[ber_sisomp(:) ber_simomp(:) ber_misomp(:) ber_mimomp(:)]);
legend('SISO Multipath','SIMO Multipath','MISO Multipath','MIMO Multipath');

helperBERPlot(ebn0_param,[ ber_mimomp(:)]);
```

```
legend('MIMO Multipath');
```

## Capacity-Estimation-on-5G-NR-CDL-Model

```
%% Simulation Parameters
```

```
clear variables; % Clear the workspace.
```

```
%%% Parameters for channel modelling
```

```
Fc = 30e9; % Carrier frequency in Hz  
WaveLength = physconst('LightSpeed')/Fc;
```

```
BS_height = 25; % BS antenna height (macro-cell scenario)  
UE_height = 1.5; % UE antenna height (outdoor UEs)
```

```
Dis2D = 50:50:300; % Horizontal BS-UE distance in meters  
Dis3D = sqrt((BS_height-UE_height)^2+Dis2D.^2); % Actual BS-UE distance
```

```
%%% Parameters for capacity calculation
```

```
BW = 0.005*Fc; % Bandwith in Hz  
TX_power_mmWave = 35; % Transmit power in dBm, for mmWave frequencies  
TX_power_Microwave = 49; % Transmit power in dBm, for microwave frequencies  
Noise_power = -174; % dBm/Hz  
Ns = 1; % Number of data streams  
ITER = 1000; % Number of random channel realizations
```

```
%% Additional Channel Modelling Features
```

```
% Shadow fading  
ShadowFadingFlag = 0; % 0 - not included, 1 - included
```

```
% Oxygen absorption  
OxygenAbsorptionFlag = 0; % 0 - not included, 1 - included
```

```
%% CDL-A Channel Model
```

```
CDL_A = nrCDLChannel;
```

```
CDL_A.DelayProfile = 'CDL-A';  
CDL_A.DelaySpread = 200*1e-9; % 200 ns  
CDL_A.CarrierFrequency = Fc;  
CDL_A.ChannelFiltering = false; % For extracting channel coefficients
```

```
CDL_A.TransmitAntennaArray.Size = [4 4 1 1 1]; % [M N P Mg Ng]  
CDL_A.TransmitAntennaArray.PolarizationAngles = [0,0]; % Default: [45 -45], applies  
when P = 2  
CDL_A.ReceiveAntennaArray.Size = [2 2 1 1 1]; % [M N P Mg Ng]  
CDL_A.ReceiveAntennaArray.PolarizationAngles = [0,0]; % Default: [0 90], applies  
when P = 2
```

## Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

```
%% Channel Parameters Extraction

cdlinfo = info(CDL_A);

%%% Antenna configurations

% BS
Nt = cdlinfo.NumTransmitAntennas;
SizeBS = CDL_A.TransmitAntennaArray.Size; % Struct
ElementSpacingBS = CDL_A.TransmitAntennaArray.ElementSpacing; % [0.5 0.5 1 1]
% Obtain antenna position vectors using Phased Array System Toolbox
ArrayBS =
phased.URA('Size',SizeBS(1:2),'ElementSpacing',ElementSpacingBS(1:2)*WaveLength);
ElePosBS = getElementPosition(ArrayBS); % 3 x (Nt/P), for one polarization only
ElePosBS = repelem(ElePosBS,1,SizeBS(3)); % 3 x Nt

% UE
Nr = cdlinfo.NumReceiveAntennas;
SizeUE = CDL_A.ReceiveAntennaArray.Size; % Struct
ElementSpacingUE = CDL_A.ReceiveAntennaArray.ElementSpacing; % [0.5 0.5 0.5 0.5]
% Obtain antenna position vectors using Phased Array System Toolbox
ArrayUE =
phased.URA('Size',SizeUE(1:2),'ElementSpacing',ElementSpacingUE(1:2)*WaveLength);
ElePosUE = getElementPosition(ArrayUE); % 3 x (Nr/P), for one polarization only
ElePosUE = repelem(ElePosUE,1,SizeUE(3)); % 3 x Nr

%%% Clustered angles (AOD, AOA, ZOD, ZOA)

NumCluster = length(cdlinfo.PathDelays); % N

% Cluster angles
ClusterAOD = cdlinfo.AnglesAoD; % 1 x N
ClusterAOA = cdlinfo.AnglesAoA;
ClusterZOD = cdlinfo.AnglesZoD;
ClusterZOA = cdlinfo.AnglesZoA;

% Subpath angles
RayOffset = [0.0447 0.1413 0.2492 0.3715 0.5129 0.6797 0.8844 1.1481 1.5195
2.1551];
RayOffset = [RayOffset;-RayOffset];
RayOffset = RayOffset(:);

NumSubPaths = length(RayOffset); % M

AngleSpreads = CDL_A.AngleSpreads;

C_ASD = AngleSpreads(1);
C_ASA = AngleSpreads(2);
C_ZSD = AngleSpreads(3);
C_ZSA = AngleSpreads(4);

% M x N
RayAOD = repmat(ClusterAOD,NumSubPaths,1)+C_ASD*repmat(RayOffset,1,NumCluster);
```

## Εξομίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

```
RayAOA = repmat(ClusterAOA,NumSubPaths,1)+C_ASA*repmat(RayOffset,1,NumCluster);
RayZOD = repmat(ClusterZOD,NumSubPaths,1)+C_ZSD*repmat(RayOffset,1,NumCluster);
RayZOA = repmat(ClusterZOA,NumSubPaths,1)+C_ZSA*repmat(RayOffset,1,NumCluster);

% Randomly couple the departure and arrival angles.
RayAOD = Coupling(RayAOD,NumSubPaths,NumCluster);
RayAOA = Coupling(RayAOA,NumSubPaths,NumCluster);
RayZOD = Coupling(RayZOD,NumSubPaths,NumCluster);
RayZOA = Coupling(RayZOA,NumSubPaths,NumCluster);

%%% Steering vectors of depature/arrival angles

[Ar,At] =
getSteeringVector(RayAOD(:),RayAOA(:),RayZOD(:),RayZOA(:),ElePosBS,ElePosUE,WaveLen
gth);

%% Capacity Estimation

% NLOS path loss model (optional model)
[PathLoss,ShaSTD] = getPathLossNLOS(Fc*1e-9,Dis3D); % dB, vector
if ShadowFadingFlag == 1
    PathLoss = PathLoss+normrnd(0,ShaSTD);
end

Capacity = zeros(length(Dis2D),ITER);

for d = 1:length(Dis2D)

    for i = 1:ITER

        % Extract channel coefficients.
        [PathGains,~] = CDL_A();
        PathGains = squeeze(mean(PathGains,1)); % Averaging over channel snapshots
        ChannelMatrix = permute(PathGains,[3,2,1]); % Nr x Nt x N

        % Apply path loss.
        ChannelMatrixPL = 1/sqrt(10^(PathLoss(d)/10))*ChannelMatrix;

        % Oxygen absorption feature
        if OxygenAbsorptionFlag == 1

            OxygenLoss = Oxygen_Absorption(Fc); % dB/km
            OxygenLoss = OxygenLoss*(Dis3D(d)/1000); % dB/m

            ChannelMatrixFinal = 1/sqrt(10^(OxygenLoss/10))*ChannelMatrixPL;
        else

            ChannelMatrixFinal = ChannelMatrixPL;

        end

        % Capacity calculation (assuming narrowband channels)
        NarrowbandChannels = sum(ChannelMatrixFinal,3);
```

## Εξομοίωση μηχανισμού αποδοτικής χρήσης της χωρητικότητας δικτύου με χρήση MIMO σε δίκτυα 5G

```
if floor(Fc*1e-9) < 30 % Microwave frequencies

    % MIMO multiplexing
    Capacity(d,i) =
MIMO_Multiplexing(NarrowbandChannels,Ns,Noise_power,BW,TX_power_Microwave); %
bits/s

else % Millimeter wave frequencies

    % Hybrid precoding
    Capacity(d,i) =
MIMO_HybridPrecoding(NarrowbandChannels,At,Ar,BW,TX_power_mmWave,Noise_power,Ns); %
bits/s

end

end

end

AveCapacity = mean(Capacity,2)*1e-6; % Mbps

%% Capacity Plot

figure();title('Average Channel Capacity on CDL-A Model');
plot(Dis2D,AveCapacity,'-o','LineWidth',2.0,'MarkerSize',8.0);
xlabel('BS-UE Horizontal Distance (meter)');
ylabel('Average Capacity (Mbps)');
grid on;
```