



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Δικτύων

*Αναλυτική λύση για την διαφορισιμότητα απολαβής
συστημάτων Massive MIMO παρουσία συσχετιζόμενων
καναλιών Rayleigh*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συντάκτρια

ΜΟΛΩΝΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

Επιβλέπων

ΑΓΓΕΛΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΡΤΑ 2022

Ευχαριστίες

Ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον εισηγητή και επιβλέποντα του θέματος και επιβλέπων της διπλωματικής εργασίας καθηγητή Κωνσταντίνο Αγγέλη.

Οι συζητήσεις μαζί του με βοήθησαν για την περάτωση της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το τμήμα Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων που μου έδωσε την δυνατότητα να παρακολουθήσω το συγκεκριμένο ΠΜΣ και έτσι να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου στον τομέα της Πληροφορικής και Δικτύων.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως θέμα την μελέτη και τη δημιουργία αναλυτικής λύσης για την διαφορισιμότητα απολαβής συστημάτων Massive MIMO παρουσία συσχετιζόμενων καναλιών Rayleigh. Η μελέτη εστιάζει στην τεχνολογία MIMO, τις λειτουργίες, τις μορφές και τους λόγους επιλογής του Massive MIMO. Επιπλέον, μελετώνται τα βασικά χαρακτηριστικά MIMO, αλλά και οι τεχνολογίες SISO, MISO και MIMO. Το υλοποιητικό σκέλος της εργασίας στηρίχτηκε στη μελέτη διαφορισιμότητας απολαβής πεπερασμένου SNR για συστήματα Massive MIMO. Παρουσιάστηκε η ακριβής μέθοδος για την εξαγωγή αναλυτικών εκφράσεων για το μέσο BER των συστημάτων MIMO MRC. Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση της μεταβλητής απόφασης στην έξοδο συνδυασμού που εξαρτάται μόνο από το κανάλι εξασθένισης του επιθυμητού χρήστη. Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται και ο κώδικας που υλοποιήθηκε.

Λέξεις – Κλειδιά: *Massive MIMO, Rayleigh diversity, diversity gain, Rayleigh channel.*

Abstract

The present thesis aims to study and create a detailed solution for the differentiation of Massive MIMO systems in the presence of associated Rayleigh channels. The study focuses on MIMO technology, the functions, forms, and reasons for choosing Massive MIMO. In addition, the basic features of MIMO are studied, as well as the SISO, MISO, and MIMO technologies. The implementation part of the work was based on the study of finite SNR differentiation for Massive MIMO systems. The exact method for extracting analytical expressions for the BER medium of MIMO MRC systems was presented. The method is based on the use of the variable decision at the combination output that depends only on the attenuation channel of the desired user. At the end of the thesis is listed the code that was implemented.

Keywords: *Massive MIMO, Rayleigh diversity, diversity gain, Rayleigh channel.*

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract.....	4
Πίνακας Εικόνων	6
Πίνακας Σχημάτων	7
1. Εισαγωγή.....	8
2. Τεχνολογία MIMO	10
2.1. Εισαγωγή.....	10
2.2. Λειτουργίες.....	11
2.3. Multiuser MIMO Cellular Systems	13
2.3.1. Εκτίμηση καναλιού.....	13
2.3.2. Μετάδοση δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης	14
2.3.3. Μετάδοση δεδομένων κατερχόμενης ζεύξης.....	14
2.4. Γιατί επιλέγεται το Massive MIMO	14
2.5. Μορφές.....	17
2.5.1. Multi-antenna types.....	17
2.5.2. Multi-user types.....	17
2.6. Προκλήσεις στο Massive MIMO	20
3. Βασικά χαρακτηριστικά MIMO.....	22
3.1. Προδιαγραφές και χαρακτηριστικά.....	22
3.2. Χαρακτηριστικά τεχνολογιών SISO, MISO και MIMO	23
3.2.1. Η περίπτωση Single Input Single Output (SISO).....	24
3.2.2. Η περίπτωση Multiple Input Single Output (MISO).....	24
3.2.3. Η περίπτωση Multiple Input Multiple Output (MIMO).....	24
3.3. Μαζική MIMO τεχνολογία	26
4. Υλοποίηση: Μελέτη διαφορισιμότητας απολαβής πεπερασμένου SNR για συστήματα Massive MIMO.....	28
5. Συμπεράσματα.....	41
Βιβλιογραφικές Αναφορές	43

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 - Ρυθμός αθροίσματος ανοδικής ζεύξης για διαφορετικούς γραμμικούς δέκτες και για τον βέλτιστο δέκτη.....	16
Εικόνα 2 - Παρουσίαση τεχνολογιών SISO, SIMO, MISO, MIMO	23
Εικόνα 3 - Είδη κερδών στις συστοιχίες πολλαπλών κεραιών: Κέρδη (α) Ποικιλομορφίας, (β) Διάταξης, (γ) Χωρικής πολυπλεξίας.....	25
Εικόνα 4 - Massive MIMO	26

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1 - Ένα MIMO σχήμα επικοινωνίας (χωρίς το θόρυβο x είναι το y , y είναι το z στον τύπο που έχουμε στο κείμενο στο πρώτο σχήμα, \hat{x} είναι το z και w το n στο δεύτερο).....	31-32
Σχήμα 2 - Ο ορισμός της diversity gain πρακτικά (η κλίση στο γράφημα της P_{out} για «άπειρο» (πολύ μεγάλο) SNR.....	34-35
Σχήμα 3 - Μοντέλο MIMO με χρήση MRC δείχνει τα αποτελέσματα ως προς το BER	38

1. Εισαγωγή

Στις ασύρματες επικοινωνίες, η πολλαπλή είσοδος και η πολλαπλή έξοδος (multiple-input and multiple-output - MIMO) είναι μια μέθοδος πολλαπλασιασμού της χωρητικότητας μιας ραδιοζεύξης χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες μετάδοσης και λήψης για την εκμετάλλευση της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Το MIMO έχει γίνει βασικό στοιχείο των προτύπων ασύρματης επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των IEEE 802.11n (Wi-Fi 4), IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5), HSPA+ (3G), WiMAX και Long-Term Evolution (LTE) (Chien & Björnson, 2017). Πιο πρόσφατα, έχει γίνει εφαρμογή του MIMO στην επικοινωνία μέσω γραμμής ισχύος για εγκαταστάσεις τριών συρμάτων ως μέρος του προτύπου ITU G.hn και της προδιαγραφής HomePlug AV2 (Feng, Liu, Wu, Zhang & Dang, 2020).

Κάποτε, ο όρος "MIMO" αναφερόταν στη χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό και στον δέκτη. Στη σύγχρονη χρήση, το "MIMO" αναφέρεται συγκεκριμένα σε μια πρακτική τεχνική με σκοπό την αποστολή και τη λήψη περισσότερων από ένα σημάτων δεδομένων ταυτόχρονα μέσω του ίδιου ραδιοφωνικού καναλιού με εκμετάλλευση της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών (Alqadami, Jamlos, Soh & Vandenbosch, 2015). Αν και το φαινόμενο «πολλαπλών διαδρομών» μπορεί να είναι ενδιαφέρον, είναι η χρήση της ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) για την κωδικοποίηση των καναλιών που είναι υπεύθυνη για την αύξηση της χωρητικότητας δεδομένων. Το MIMO διαφέρει θεμελιωδώς από τις τεχνικές έξυπνης κεραίας που αναπτύχθηκαν για τη βελτίωση της απόδοσης ενός μόνο σήματος δεδομένων, όπως η διαμόρφωση δέσμης και η ποικιλομορφία (Wang, Hong, Ge, Cheng, Zhang & Thompson, 2010).

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980, ο Jack Salz στα Bell Laboratories πήγε την έρευνα ένα βήμα παραπέρα, διερευνώντας συστήματα πολλαπλών χρηστών που λειτουργούν σε «αμοιβαία συζευγμένα γραμμικά δίκτυα με πρόσθετες πηγές θορύβου», όπως η πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου και τα διπλά πολωμένα ραδιοφωνικά συστήματα (Araújo, Maksymyuk, de Almeida, Maciel, Mota & Jo, 2016).

Έχουν δημιουργηθεί, στις αρχές της δεκαετίας του 1990, διάφορες μέθοδοι για τη βελτίωση της απόδοσης των κυψελοειδών δικτύων ραδιοφώνου και τη δυνατότητα πιο επιθετικής επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Η

πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου (Space-division multiple access - SDMA) χρησιμοποιεί κατευθυντικές ή έξυπνες κεραιές για να επικοινωνεί στην ίδια συχνότητα με χρήστες σε διαφορετικές τοποθεσίες εντός της εμβέλειας του ίδιου σταθμού βάσης (Vook, Ghosh & Thomas, 2014). Ένα σύστημα SDMA προτάθηκε από τους Richard Roy και Björn Ottersten, ερευνητές στο ArrayComm, το 1991. Το αμερικανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τους (αρ. 5515378 που εκδόθηκε το 1996) περιγράφει μια μέθοδο για την αύξηση της χωρητικότητας χρησιμοποιώντας "μια διάταξη κεραιών λήψης στο σταθμό βάσης" με "πληθώρα απομακρυσμένων χρηστών." (Chataut & Akl, 2020).

2. Τεχνολογία MIMO

2.1. Εισαγωγή

Η τεχνολογία MIMO έχει τυποποιηθεί για ασύρματα LAN, δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3G και δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4G και είναι πλέον σε ευρεία εμπορική χρήση. Ο Greg Rayleigh και ο V. K. Jones ίδρυσαν την Airgo Networks το 2001 για να αναπτύξουν chipset MIMO-OFDM για ασύρματα LAN. Το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) ανέπτυξε μια ομάδα εργασιών στα τέλη του 2003 στοχεύοντας στην δημιουργία ενός προτύπου ασύρματου LAN που παρέχει τουλάχιστον 100 Mbit/s ροή δεδομένων χρήστη (Ngo, 2015). Υπήρχαν δύο σημαντικές ανταγωνιστικές προτάσεις: Το TGn Sync υποστηρίχθηκε από εταιρείες όπως η Intel και η Philips και το WWiSE υποστηρίχτηκε από εταιρείες όπως η Airgo Networks, η Broadcom και η Texas Instruments. Και οι δύο ομάδες ήταν σύμφωνες ότι το πρότυπο 802.11n θα στηρίζεται στο MIMO-OFDM με επιλογές καναλιών 20 MHz και 40 MHz.

Το TGn Sync, το WWiSE και μια τρίτη πρόταση (MITMOT, που υποστηρίζεται από τη Motorola και Mitsubishi) συγχωνεύτηκαν για να δημιουργήσουν αυτό που ονομάστηκε Κοινή Πρόταση. Το 2004, η Airgo ήταν η πρώτη εταιρεία που έστειλε προϊόντα MIMO-OFDM. Η Qualcomm εξαγόρασε την Airgo Networks στα τέλη του 2006. Το τελικό πρότυπο 802.11n υποστήριξε ταχύτητες έως και 600 Mbit/s (χρησιμοποιώντας τέσσερις ταυτόχρονες ροές δεδομένων) και δημοσιεύτηκε στα τέλη του 2009 (Shikhantsov, Thielens, Vermeeren, Tanghe, Demeester, Martens & Joseph, 2019).

Οι Surendra Babu Mandava και Arogyaswami Paulraj ίδρυσαν την Beceem Communications το 2004 για να παράγουν chipset MIMO-OFDM για WiMAX. Η εταιρεία εξαγοράστηκε από την Broadcom το 2010. Το WiMAX αναπτύχθηκε ως εναλλακτική λύση στα πρότυπα κινητής τηλεφωνίας, βασίζεται στο πρότυπο 802.16e και χρησιμοποιεί το MIMO-OFDM για να παρέχει ταχύτητες έως και 138 Mbit/s. Το πιο προηγμένο πρότυπο 802,16m επιτρέπει ταχύτητες λήψης έως και 1 Gbit/s. Ένα εθνικό δίκτυο WiMAX δημιουργήθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες από την Clearwire, θυγατρική της Sprint-Nextel, με κάλυψη 130 εκατομμυρίων σημείων παρουσίας (PoP)

μέχρι τα μέσα του 2012 (Fodor, Rajatheva, Zirwas, Thiele, Kurras, Guo & De Carvalho, 2017). Στη συνέχεια, η Sprint ανακοίνωσε τα σχέδιά της να αναπτύξει το LTE (το πρότυπο κινητής τηλεφωνίας 4G) που καλύπτει 31 πόλεις έως τα μέσα του 2013 και να τερματίσει το δίκτυό της WiMAX έως τα τέλη του 2015 (Feng, Liu, Wu, Zhang & Dang, 2020).

Το πρώτο πρότυπο κινητής τηλεφωνίας 4G προτάθηκε από το NTT DoCoMo το 2004. Η μακροπρόθεσμη εξέλιξη (LTE) στηρίζεται στο MIMO-OFDM και εξακολουθεί να αναπτύσσεται από το 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Το LTE προσδιορίζει ταχύτητες κατερχόμενης ζεύξης έως 300 Mbit/s, ρυθμούς ανοδικής ζεύξης έως 75 Mbit/s και παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας, όπως χαμηλή καθυστέρηση. Το LTE Advanced προσθέτει υποστήριξη για picocells, femtocells και κανάλια πολλαπλών φορέων πλάτους έως 100 MHz. Το LTE έχει ενσωματώσει και τους χειριστές GSM/UMTS και CDMA (Feng, Liu, Wu, Zhang & Dang, 2020).

Οι πρώτες υπηρεσίες LTE τέθηκαν σε χρήση στο Οσλο και τη Στοκχόλμη από την TeliaSonera το 2009. Αυτήν τη στιγμή βρίσκονται σε λειτουργία περισσότερα από 360 δίκτυα LTE σε 123 χώρες με περίπου 373 εκατομμύρια συνδέσεις (συσκευές).

2.2. Λειτουργίες

Το MIMO μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρεις κύριες κατηγορίες: προκωδικοποίηση, χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing - SM) και κωδικοποίηση διαφοροποίησης.

Η προκωδικοποίηση διαμορφώνει τη δέσμη πολλών ροών, με την πιο στενή έννοια. Με άλλα λόγια, πιστεύεται ότι αποτελεί όλη τη χωρική επεξεργασία που συμβαίνει στον πομπό. Στη διαμόρφωση δέσμης (μονής ροής), το ίδιο σήμα μεταδίδεται από κάθε μια από τις κεραιές εκπομπής με ανάλογη φάση και βαρύτητα με σκοπό η ισχύς του σήματος να αυξάνεται στην είσοδο του δέκτη (Fodor, Rajatheva, Zirwas, Thiele, Kurras, Guo & De Carvalho, 2017). Τα προτερήματα της διαμόρφωσης δέσμης είναι η αύξηση του κέρδους του λαμβανόμενου σήματος – καθιστώντας τα σήματα που εκπέμπονται από διαφορετικές κεραιές να αθροίζονται εποικοδομητικά – και η μείωση του φαινομένου της εξασθένισης πολλαπλών διαδρομών.

Κατά τη διάδοση στη γραμμή οπτικής επαφής, η διαμόρφωση δέσμης έχει ως αποτέλεσμα ένα καλά καθορισμένο μοτίβο κατεύθυνσης.

Παρόλα αυτά, οι συμβατικές δέσμες δεν αποτελούν μια καλή αναλογία στα κυψελωτά δίκτυα, τα οποία χαρακτηρίζονται κυρίως από πολυοδική διάδοση. Όταν ο δέκτης διαθέτει πολλαπλές κεραίες, η διαμόρφωση δέσμης εκπομπής δεν είναι εφικτό να μεγιστοποιήσει παράλληλα το επίπεδο σήματος σε όλες τις κεραίες λήψης και η προκωδικοποίηση με πολλαπλές ροές είναι συχνά ωφέλιμη (Marzetta, Caire, Debbah, Chih-Lin & Mohammed, 2013).

Η χωρική πολυπλεξία απαιτεί διαμόρφωση κεραίας MIMO. Στη χωρική πολυπλεξία, ένα σήμα υψηλής ταχύτητας χωρίζεται σε πολλαπλές ροές χαμηλότερου ρυθμού και κάθε ροή μεταδίδεται από διαφορετική κεραία εκπομπής στο ίδιο κανάλι συχνότητας. Εάν αυτά τα σήματα φτάσουν στη διάταξη κεραίας του δέκτη με αρκετά διαφορετικές χωρικές υπογραφές και ο δέκτης έχει ακριβή CSI, έχει τη δυνατότητα διαχωρισμού αυτών των ροών σε (σχεδόν) παράλληλα κανάλια (Ngo, 2015). Η χωρική πολυπλεξία είναι μια πολύ ισχυρή τεχνική για την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού σε υψηλότερους λόγους σήματος προς θόρυβο (SNR).

Ο μέγιστος αριθμός χωρικών ροών είναι περιορισμένος από τον μικρότερο αριθμό των κεραίων στον πομπό ή τον δέκτη. Η χωρική πολυπλεξία μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς CSI στον πομπό, αλλά μπορεί να συνδυαστεί με προκωδικοποίηση αν είναι διαθέσιμο το CSI. Η χωρική πολυπλεξία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για ταυτόχρονη μετάδοση σε πολλούς δέκτες, γνωστή ως πολλαπλή πρόσβαση διάρρησης χώρου ή MIMO πολλαπλών χρηστών, οπότε απαιτείται CSI στον πομπό. Ο προγραμματισμός δεκτών με διαφορετικές χωρικές υπογραφές αφήνει περιθώρια για καλό διαχωρισμό (Fodor, Rajatheva, Zirwas, Thiele, Kurras, Guo & De Carvalho, 2017).

Οι τεχνικές κωδικοποίησης διαφορετικότητας χρησιμοποιούνται όταν δεν υπάρχει γνώση καναλιού στον πομπό. Στις μεθόδους διαφοροποίησης, μεταδίδεται μια μεμονωμένη ροή (σε αντίθεση με πολλαπλές ροές στη χωρική πολυπλεξία), αλλά το σήμα κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας τεχνικές που ονομάζονται κωδικοποίηση χωροχρόνου. Το σήμα εκπέμπεται από κάθε μια από τις κεραίες εκπομπής με πλήρη ή σχεδόν ορθογώνια κωδικοποίηση (Kaiser, Zheng & Dimitrov, 2009).

Η κωδικοποίηση διαφοροποίησης εκμεταλλεύεται το ανεξάρτητο ξεθώριασμα στις συνδέσεις πολλαπλών κεραιών για να βελτιώσει την ποικιλομορφία του σήματος. Επειδή δεν υπάρχει γνώση καναλιού, δεν υπάρχει διαμόρφωση δέσμης ή κέρδος πίνακα από την κωδικοποίηση διαφορετικότητας. Η κωδικοποίηση διαφοροποίησης έχει τη δυνατότητα συνδυασμού με χωρική πολυπλεξία όταν κάποια γνώση καναλιού είναι διαθέσιμη στον δέκτη.

2.3. Multiuser MIMO Cellular Systems

Στο Massive MIMO, η λειτουργία TDD είναι προτιμότερη. Κατά τη διάρκεια ενός διαστήματος συνοχής, υπάρχουν τρεις λειτουργίες:

- εκτίμηση καναλιού (συμπεριλαμβανομένης της εκπαίδευσης ανερχόμενης ζεύξης και της εκπαίδευσης κατερχόμενης ζεύξης)
- μετάδοση δεδομένων ανοδικής ζεύξης
- μετάδοση δεδομένων κατερχόμενης ζεύξης.

2.3.1. Εκτίμηση καναλιού

Το BS χρειάζεται CSI για να ανιχνεύσει τα σήματα που μεταδίδονται από τους χρήστες στην ανοδική ζεύξη και να προκωδικοποιήσει τα σήματα στην κατερχόμενη ζεύξη. Σε κάθε χρήστη εκχωρείται μια ορθογώνια πιλοτική ακολουθία και στέλνει αυτήν την πιλοτική ακολουθία στο BS.

Το BS γνωρίζει τις ακολουθίες πιλότων που μεταδίδονται από όλους τους χρήστες και στη συνέχεια εκτιμά τα κανάλια που βασίζονται στα λαμβανόμενα πιλοτικά σήματα. Επιπλέον, κάθε χρήστης μπορεί να χρειάζεται μερική γνώση του CSI για να ανιχνεύσει συνεκτικά τα σήματα που μεταδίδονται από το BS (Nimmagadda, 2020). Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να ληφθούν μέσω εκπαίδευσης κατερχόμενης ζεύξης ή κάποιου αλγόριθμου εκτίμησης τυφλών καναλιών. Εφόσον το BS χρησιμοποιεί τεχνικές γραμμικής προκωδικοποίησης για να διαμορφώσει δέσμη τα σήματα στους χρήστες, ο χρήστης χρειάζεται μόνο το ενεργό κέρδος καναλιού (που είναι μια βαθμωτή σταθερά) για να ανιχνεύσει τα

επιθυμητά σήματα. Επομένως, το BS μπορεί να αφιερώσει λίγο χρόνο για να διαμορφώσει πιλότους δέσμης στην κάτω ζεύξη για απόκτηση CSI στους χρήστες.

2.3.2. Μετάδοση δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης

Ένα μέρος του διαστήματος συνοχής χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων άνω ζεύξης. Στην uplink, όλοι οι χρήστες K μεταδίδουν τα δεδομένα τους στο BS στον ίδιο πόρο χρόνου-συχνότητας. Το BS χρησιμοποιεί τότε τις εκτιμήσεις καναλιών μαζί με τις τεχνικές γραμμικού συνδυασμού για να ανιχνεύσει σήματα που μεταδίδονται από όλους τους χρήστες.

2.3.3. Μετάδοση δεδομένων κατερχόμενης ζεύξης

Στην κατερχόμενη ζεύξη, το BS μεταδίδει σήματα σε όλους τους χρήστες K στον ίδιο πόρο χρόνου-συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα, το BS χρησιμοποιεί τις εκτιμήσεις καναλιών του σε συνδυασμό με τα σύμβολα που προορίζονται για τους χρήστες K για να δημιουργήσουν M προκωδικοποιημένα σήματα τα οποία στη συνέχεια τροφοδοτούνται σε M κεραίες (Pappa, Ramesh & Kumar, 2017).

2.4. Γιατί επιλέγεται το Massive MIMO

Η ζήτηση για ασύρματη απόδοση και αξιοπιστία επικοινωνίας καθώς και η πυκνότητα χρήστη θα αυξάνονται πάντα. Ο μελλοντικός ασύρματος συνδυασμός απαιτεί νέες τεχνολογίες στις οποίες πολλοί χρήστες μπορούν να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα με πολύ υψηλή απόδοση (Biglieri, Calderbank, Constantinides, Goldsmith, Paulraj & Poor, 2007). Το MIMO μπορεί να καλύψει αυτές τις απαιτήσεις. Ας εξετάσουμε τη μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης. Το ίδιο όρισμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης. Υπό τις συνθήκες ευνοϊκής διάδοσης (τα διανύσματα καναλιού μεταξύ των χρηστών και του BS είναι κατά ζεύγη

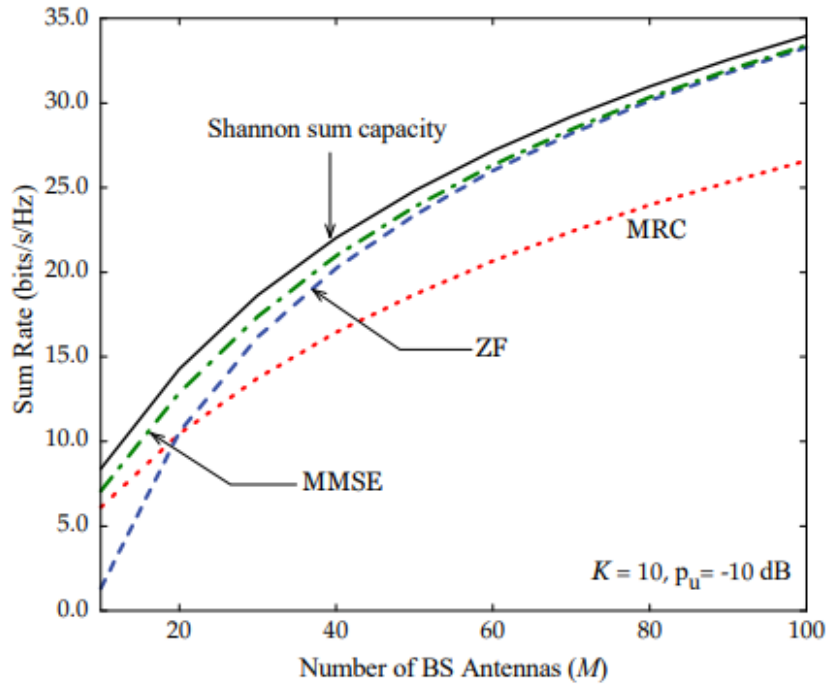
ορθογώνια), το άθροισμα της χωρητικότητας της μετάδοσης ανερχόμενης ζεύξης είναι:

$$C_{\text{sum}} = \log_2 \det(\mathbf{I}_K + p_u \mathbf{M} \mathbf{I}_K) = K \log_2(1 + M p_u).$$

Το K είναι το κέρδος πολυπλεξίας και το M αντιπροσωπεύει το κέρδος του πίνακα. Μπορούμε να αποκτήσουμε μια τεράστια φασματική απόδοση και ενεργειακή απόδοση όταν τα M και K είναι μεγάλα. Χωρίς καμία αύξηση της μεταδιδόμενης ισχύος ανά τερματικό, αυξάνοντας τα K και M , μπορούμε να εξυπηρετήσουμε ταυτόχρονα περισσότερους χρήστες στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Ταυτόχρονα αυξάνεται και η απόδοση ανά χρήστη.

Επιπλέον, διπλασιάζοντας τον αριθμό των κεραιών BS, μπορούμε να μειώσουμε την ισχύ εκπομπής κατά 3 dB, διατηρώντας παράλληλα την αρχική ποιότητα εξυπηρέτησης. Τα παραπάνω κέρδη (κέρδος πολυπλεξίας και κέρδος συστοιχίας) λαμβάνονται υπό τις συνθήκες ευνοϊκής διάδοσης και τη χρήση βέλτιστης επεξεργασίας στο BS (Prasad, Hossain & Bhargava, 2017). Ένα βασικό ερώτημα είναι: Θα εξακολουθήσουν να επιτυγχάνονται αυτά τα κέρδη με τη χρήση γραμμικής επεξεργασίας; Μια άλλη ερώτηση είναι: Γιατί να μην χρησιμοποιήσουμε το συμβατικό MIMO χαμηλών διαστάσεων από σημείο σε σημείο με περίπλοκα σχήματα επεξεργασίας αντί του Massive MIMO με απλά σχήματα γραμμικής επεξεργασίας;

Στο Massive MIMO, όταν ο αριθμός των κεραιών BS είναι μεγάλος, λόγω του νόμου των μεγάλων αριθμών, τα κανάλια γίνονται ευνοϊκά. Ως αποτέλεσμα, η γραμμική επεξεργασία είναι σχεδόν βέλτιστη. Το κέρδος πολυπλεξίας και το κέρδος πίνακα μπορούν να ληφθούν με απλή γραμμική επεξεργασία. Επίσης, αυξάνοντας τον αριθμό των κεραιών BS και τον αριθμό των χρηστών, μπορούμε πάντα να αυξήσουμε την απόδοση.



Εικόνα 1 - Ρυθμός αθροίσματος ανοδικής ζεύξης για διαφορετικούς γραμμικούς δέκτες και για τον βέλτιστο δέκτη

Στην παραπάνω εικόνα αποτυπώνεται ο ρυθμός αθροίσματος σε σχέση με τον αριθμό των κεραιών BS με βέλτιστους δέκτες (επιτυγχάνεται η αθροιστική χωρητικότητα) και γραμμικούς δέκτες, σε $K = 10$ και $p_u = -10$ dB. Μπορούμε να δούμε ότι, όταν το M είναι μεγάλο, ο ρυθμός αθροίσματος με γραμμική επεξεργασία είναι πολύ κοντά στην αθροιστική χωρητικότητα που προκύπτει με τη χρήση βέλτιστων δεκτών. Όταν $M = K = 10$, και με τον βέλτιστο δέκτη, ο μέγιστος ρυθμός αθροίσματος που μπορούμε να λάβουμε είναι 8,5 bit/s/Hz. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας μεγάλο M , ας πούμε $M = 50$, με απλούς δέκτες ZF, μπορούμε να λάβουμε ρυθμό αθροίσματος 24 bit/s/HZ.

2.5. Μορφές

2.5.1. Multi-antenna types

Η τεχνολογία MIMO πολλαπλών κεραιών (ή MIMO ενός χρήστη) έχει αναπτυχθεί και εφαρμοστεί σε ορισμένα πρότυπα, π.χ. προϊόντα 802.11n.

Τα SISO/SIMO/MISO είναι ειδικές περιπτώσεις MIMO (Marzetta, Caire, Debbah, Chih-Lin & Mohammed, 2013).

- Η μονή έξοδος πολλαπλών εισόδων (MISO) είναι μια ειδική περίπτωση όταν ο δέκτης διαθέτει μία μόνο κεραία.
- Μίας εισόδου πολλαπλής εξόδου (SIMO) είναι μια ειδική περίπτωση όταν ο πομπός έχει μία μόνο κεραία.
- Μίας εισόδου μονής εξόδου (SISO) είναι ένα συμβατικό ραδιοσύστημα όπου ούτε ο πομπός ούτε ο δέκτης έχουν πολλαπλές κεραίες.

Βασικές τεχνικές MIMO ενός χρήστη

- Bell Laboratories Layered Space-Time (BLAST), Gerard. J. Foschini (1996)
- Per Antenna Rate Control (PARC), Varanasi, Guess (1998), Chung, Huang, Lozano (2001)
- Selective Per Antenna Rate Control (SPARC), Ericsson (2004)

Η φυσική απόσταση της κεραίας έχει επιλεγεί να είναι μεγάλη, πολλαπλά μήκη κύματος στο σταθμό βάσης. Ο διαχωρισμός της κεραίας στον δέκτη είναι πολύ περιορισμένος στο χώρο στα ακουστικά, αν και οι προηγμένες τεχνικές σχεδίασης κεραίας και αλγορίθμων είναι υπό συζήτηση. Ανατρέξτε στο: MIMO πολλών χρηστών (Marzetta, 2015).

2.5.2. Multi-user types

Πρόσφατα, εμφανίστηκαν αποτελέσματα έρευνας για την τεχνολογία MIMO πολλών χρηστών. Ενώ το πλήρες MIMO πολλαπλών χρηστών (ή

MIMO δικτύου) μπορεί να έχει υψηλότερες δυνατότητες, πρακτικά, η έρευνα για την (μερική) τεχνολογία MIMO πολλών χρηστών (ή MIMO πολλών χρηστών και πολλών κεραιών) είναι πιο ενεργή.

- MIMO πολλών χρηστών (Multi-user MIMO - MU-MIMO)

Στα πρόσφατα πρότυπα 3GPP και WiMAX, το MU-MIMO αντιμετωπίζεται ως μία από τις υποψήφιες τεχνολογίες που μπορούν να υιοθετηθούν στις προδιαγραφές από διάφορες εταιρείες, συμπεριλαμβανομένων των Samsung, Intel, Qualcomm, Ericsson, TI, Huawei, Philips, Nokia και Freescale. Για αυτές και άλλες εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην αγορά υλικού κινητής τηλεφωνίας, το MU-MIMO είναι πιο προσιτό για κινητά τηλέφωνα χαμηλής πολυπλοκότητας με μικρό αριθμό κεραιών λήψης, ενώ η υψηλότερη απόδοση ανά χρήστη του SU-MIMO ενός χρήστη ταιριάζει καλύτερα σε πιο σύνθετα συσκευές χρήστη με περισσότερες κεραίες (Fodor, Rajatheva, Zirwas, Thiele, Kurras, Guo & De Carvalho, 2017).

Βελτιωμένο MIMO πολλαπλών χρηστών: 1) Χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές αποκωδικοποίησης, 2) Χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές προκωδικοποίησης.

Το SDMA αντιπροσωπεύει είτε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου είτε πολλαπλή πρόσβαση υπερδιαίρεσης όπου το super τονίζει ότι δεν χρησιμοποιείται ορθογώνια διαίρεση όπως η διαίρεση συχνότητας και χρόνου, αλλά χρησιμοποιούνται μη ορθογώνιες προσεγγίσεις όπως η κωδικοποίηση υπέρθεσης.

- Συνεργατικά MIMO (Cooperative MIMO - CO-MIMO)

Χρησιμοποιεί πολλούς γειτονικούς σταθμούς βάσης για από κοινού μετάδοση/λήψη δεδομένων προς/από χρήστες. Ως αποτέλεσμα, οι γειτονικοί σταθμοί βάσης δεν προκαλούν παρεμβολές μεταξύ κυψελών όπως στα συμβατικά συστήματα MIMO.

- Μακροποικιλότητα MIMO (Macrodiversity MIMO)

Μια μορφή σχήματος διαστημικής διαφοροποίησης που χρησιμοποιεί πολλαπλούς σταθμούς βάσης μετάδοσης ή λήψης για συνεκτική επικοινωνία με μεμονωμένους ή πολλαπλούς χρήστες, οι οποίοι είναι

πιθανώς κατανεμημένοι στην περιοχή κάλυψης, στον ίδιο πόρο χρόνου και συχνότητας.

Οι πομποί απέχουν πολύ μεταξύ τους σε αντίθεση με τα παραδοσιακά σχήματα MIMO μικροδιαφορετικότητας όπως το MIMO ενός χρήστη. Σε ένα σενάριο MIMO μακροποικιλομορφίας πολλών χρηστών, οι χρήστες μπορεί επίσης να απέχουν πολύ. Επομένως, κάθε συστατικό σύνδεσμο στον εικονικό σύνδεσμο MIMO έχει ξεχωριστό μέσο SNR συνδέσμου. Αυτή η διαφορά οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές μακροπρόθεσμες βλάβες του καναλιού, όπως η απώλεια διαδρομής και το ξεθώριασμα της σκιάς, που αντιμετωπίζονται από διαφορετικούς συνδέσμους (Kaiser, Zheng & Dimitrov, 2009).

Τα σχήματα της Μακροποικιλότητας MIMO θέτουν άνευ προηγουμένου θεωρητικές και πρακτικές προκλήσεις. Μεταξύ πολλών θεωρητικών προκλήσεων, ίσως η πιο θεμελιώδης πρόκληση είναι να κατανοήσουμε πώς οι διαφορετικοί μέσοι όροι σύνδεσης SNR επηρεάζουν τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος και την απόδοση του μεμονωμένου χρήστη σε περιβάλλοντα που ξεθωριάζουν.

- Δρομολόγηση MIMO

Δρομολόγηση ενός συμπλέγματος κατά ένα σύμπλεγμα σε κάθε άλμα, όπου ο αριθμός των κόμβων σε κάθε σύμπλεγμα είναι μεγαλύτερος ή ίσος με έναν. Η δρομολόγηση MIMO είναι διαφορετική από τη συμβατική (SISO) δρομολόγηση αφού τα συμβατικά πρωτόκολλα δρομολόγησης δρομολογούν κόμβο προς κόμβο σε κάθε αναπήδηση.

- Massive MIMO

Μια τεχνολογία όπου ο αριθμός των τερματικών είναι πολύ μικρότερος από τον αριθμό των κεραιών του σταθμού βάσης (κινητός σταθμός). Σε ένα πλούσιο περιβάλλον σκέδασης, τα πλήρη πλεονεκτήματα του massive συστήματος MIMO μπορούν να αξιοποιηθούν χρησιμοποιώντας απλές στρατηγικές διαμόρφωσης δέσμης όπως μετάδοση μέγιστης αναλογίας (MRT), μέγιστος συνδυασμός αναλογίας (MRC) ή μηδενικός εξαναγκασμός (ZF). Για να επιτύχετε αυτά τα πλεονεκτήματα του massive MIMO, το ακριβές CSI πρέπει να είναι τέλεια διαθέσιμο. Ωστόσο, στην πράξη, το κανάλι μεταξύ του πομπού και του δέκτη υπολογίζεται από ορθογώνιες

πυλοτικές ακολουθίες που περιορίζονται από το χρόνο συνοχής του καναλιού (Kim, Ji, Lee, Nam, Tzanidis & Zhang, 2014). Το πιο σημαντικό, σε μια εγκατάσταση πολλαπλών κυψελών, η επαναχρησιμοποίηση πυλοτικών ακολουθιών πολλών κυψελών συν-καναλιού θα δημιουργήσει πυλοτική μόλυνση. Όταν υπάρχει μόλυνση πυλότου, η απόδοση του massive MIMO υποβαθμίζεται αρκετά δραστικά.

Για να μετριάσουν την επίδραση της μόλυνσης από πυλότους, οι Tadilo E. Bogale και Long B. Le προτείνουν μια απλή πυλοτική ανάθεση και μέθοδο εκτίμησης καναλιών από περιορισμένες ακολουθίες εκπαίδευσης. Ωστόσο, το 2018, δημοσιεύθηκε έρευνα των Emil Björnson, Jakob Hoydis και Luca Sanguinetti, η οποία δείχνει ότι η μόλυνση πυλότου είναι επιλύσιμη και ότι η χωρητικότητα ενός καναλιού μπορεί πάντα να αυξηθεί, τόσο στη θεωρία όσο και στην πράξη, αυξάνοντας τον αριθμό των κεραιών.

2.6. Προκλήσεις στο Massive MIMO

Παρά τα τεράστια πλεονεκτήματα του Massive MIMO, πολλά ζητήματα πρέπει ακόμα να αντιμετωπιστούν. Οι κύριες προκλήσεις του Massive MIMO παρατίθενται ως εξής:

Τα πρακτικά κυψελωτά δίκτυα αποτελούνται από πολλές κυψέλες. Λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας του φάσματος συχνοτήτων, πολλές κυψέλες πρέπει να μοιράζονται τους ίδιους πόρους χρόνου-συχνότητας (Patil, Patil, Itraj & Bomble, 2017). Επομένως, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μαζικές ρυθμίσεις MIMO. Σε συστήματα πολλαπλών κυψελών, δεν μπορούμε να εκχωρήσουμε ορθογώνιες πυλοτικές ακολουθίες για όλους τους χρήστες σε όλα τα κελιά, λόγω του περιορισμού του διαστήματος συνοχής καναλιού.

Οι ορθογώνιες πυλοτικές ακολουθίες πρέπει να επαναχρησιμοποιούνται από κύτταρο σε κύτταρο. Επομένως, η εκτίμηση καναλιού που λαμβάνεται σε μια δεδομένη κυψέλη θα μολυνθεί από πυλότους που μεταδίδονται από χρήστες σε άλλες κυψέλες. Αυτή η ενέργεια, που ονομάζεται μόλυνση πυλότου, μειώνει την απόδοση του συστήματος. Η επίδραση της μόλυνσης του πυλότου είναι ο σημαντικός εγγενής περιορισμός του Massive MIMO.

Δεν εξαφανίζεται ακόμη και όταν ο αριθμός των κεραιών BS αυξάνεται χωρίς δέσμευση. Έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για τη μείωση αυτής της ενέργειας. Η εκτίμηση καναλιού με βάση την ιδιοτιμή αποσύνθεσης, η πιλοτική απολύμανση, καθώς και πιλοτικά σχήματα προκωδικοποίησης μόλυνσης προτείνονται σε πολλές έρευνες στη βιβλιογραφία. Υπό ορισμένες συνθήκες της συνδιακύμανσης του καναλιού, με τη χρήση ενός πιλοτικού σχήματος ανάθεσης με επίγνωση της συνδιακύμανσης μεταξύ των κυττάρων, η μόλυνση πιλότου μπορεί να μετριαστεί αποτελεσματικά.

Το massive MIMO λειτουργεί σε ευνοϊκά περιβάλλοντα διάδοσης. Ωστόσο, στην πράξη, μπορεί να υπάρχουν περιβάλλοντα διάδοσης όπου τα κανάλια δεν είναι ευνοϊκά. Για παράδειγμα, σε περιβάλλοντα διάδοσης όπου ο αριθμός των scatterers είναι μικρός σε σύγκριση με τον αριθμό των χρηστών ή τα κανάλια από διαφορετικούς χρήστες στο BS μοιράζονται κάποιους κοινούς scatterers, το κανάλι δεν είναι ευνοϊκό.

Μια δυνατότητα για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η διανομή των κεραιών BS σε μια μεγάλη περιοχή. Θα είναι πολύ αποτελεσματικό εάν το Massive MIMO μπορεί να αναπτυχθεί σε τρέχοντα συστήματα όπως το LTE. Ωστόσο, το πρότυπο LTE επιτρέπει μόνο έως και 8 θύρες κεραιάς στο BS. Επιπλέον, το LTE χρησιμοποιεί τις πληροφορίες καναλιού που υποτίθεται (Chataut & Akl, 2020). Για παράδειγμα, μια επιλογή της κατερχόμενης ζεύξης στο LTE είναι ότι το BS μεταδίδει τα σήματα αναφοράς μέσω πολλών δεσμών Xed.

Στη συνέχεια οι χρήστες αναφέρουν στο BS την ισχυρότερη δέσμη. Το BS θα χρησιμοποιήσει αυτή τη δέσμη για τη μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης. Αντίθετα, το Massive MIMO χρησιμοποιεί τις πληροφορίες καναλιού που υπολογίζονται (μετρούνται). Επομένως, για να μειωθεί το Massive MIMO στην πράξη, απαιτούνται νέα πρότυπα. Σε διαφορετική σημείωση, με το Massive MIMO, ένας δαπανηρός πομποδέκτης 40 Watt θα πρέπει να αντικατασταθεί από μεγάλο αριθμό κεραιών χαμηλής κατανάλωσης και φθηνού κόστους (Feng, Liu, Wu, Zhang & Dang, 2020). Θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη τα σχετικά σχέδια υλικού. Αυτό απαιτεί τεράστια προσπάθεια τόσο από τον ακαδημαϊκό κόσμο όσο και από τη βιομηχανία.

3. Βασικά χαρακτηριστικά MIMO

3.1. Προδιαγραφές και χαρακτηριστικά

Ήδη στα προηγούμενα δύο κεφάλαια έχει γίνει αναφορά στην τεχνολογία συστημάτων κεραιών MIMO (Multiple Input Multiple Output/πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου). Παρακάτω παρουσιάζονται οι προδιαγραφές και βασικά χαρακτηριστικά της (Kim, Ji, Lee, Nam, Tzanidis & Zhang, 2014):

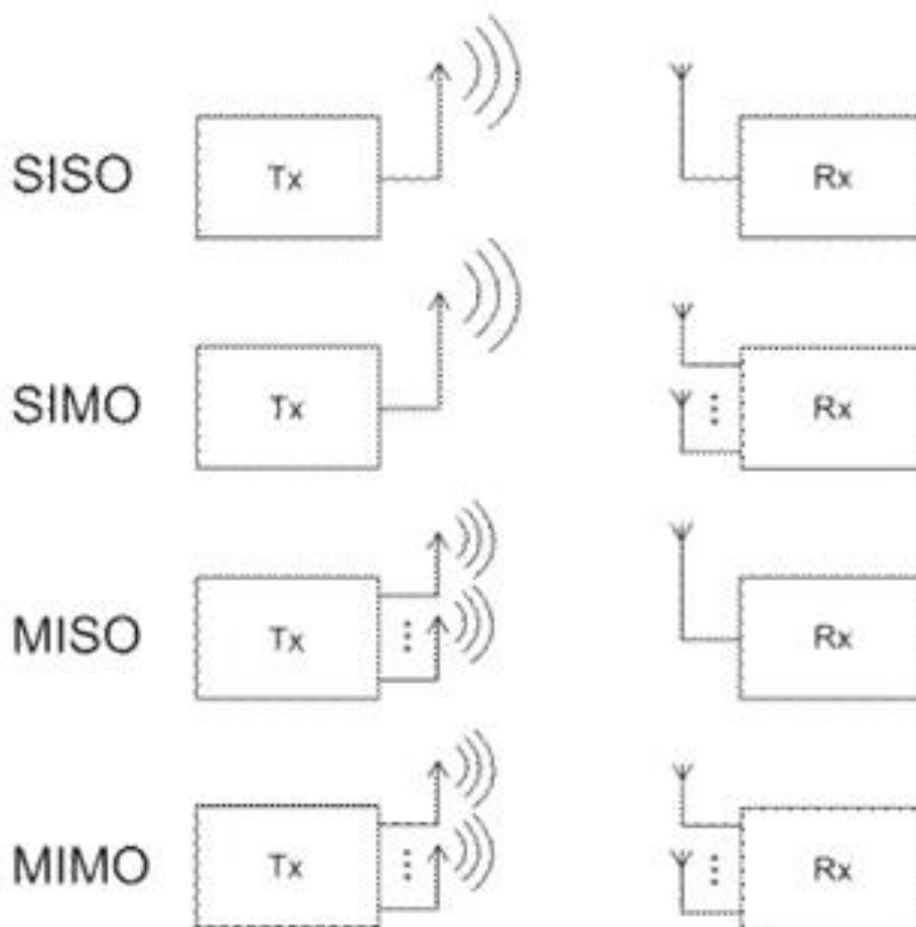
- Αποτελεί μέθοδο αύξησης της ικανότητας μιας ραδιοζεύξης, μέσω χρήσης συστοιχιών κεραιών εκπομπής και λήψης για να αξιοποιούνται πολλαπλές διαδρομές.
- Συνίσταται για να εγκαθιδρυθεί ένα πλήθος κεραιών (κεραιοσυστημάτων) τόσο στον πομπό – σταθμό βάσης όσο και στο δέκτη – συσκευή του χρήστη επιτρέποντας την εκμετάλλευση του χωρικού πεδίου με σκοπό να επιτυγχάνονται υψηλότερες φασματικές αποδόσεις.
- Εκμεταλλεύεται την χωρική κωδικοποίηση των σημάτων ασύρματης μετάδοσης, με την οποία γίνεται η μεγέθυνση του εύρους ζώνης (bandwidth) σε ένα κανάλι επικοινωνίας. Η ιδιαιτερότητα αυτή μεγαλώνει την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων από τον πομπό στον δέκτη και, μάλιστα, αναλόγως με τον αριθμό των συσκευών / κεραιών που χρησιμοποιούνται, αυξάνεται αντίστοιχα και η ταχύτητα.
- Έχει τη δυνατότητα να συνδυάζεται με διάφορα ήδη υπάρχοντα πρότυπα, όπως, τα πρότυπα ασύρματων επικοινωνιών Wi – Fi, WiMax, LTE. Αναλόγως του προτύπου, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστοιχιών των κεραιών διαφοροποιούνται έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η διάταξη του δικτύου, οι διαφορετικές καταστάσεις μετάδοσης των χρηστών, κλπ.
- Η εφαρμογή της οδηγεί σε αύξηση των ρυθμών μετάδοσης, αυξημένη κάλυψη δικτύου και χωρητικότητα.
- Για επίτευξη όλο και υψηλότερης απόδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν συστήματα MIMO 2x2, 4x4 ή 8x8 **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**(δύο κεραιές στο σταθμό βάσης και δύο κεραιές στη συσκευή του χρήστη ή τέσσερις ή οκτώ

αντίστοιχα), αφού η επιτεύξιμη φασματική απόδοση τοποθετούνται σε γραμμική κλίμακα με το πλήθος των κεραιών εκπομπής και λήψης. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εισαγωγή των συστημάτων multi – user MIMO (MU – MIMO).

- Αν γίνει συνδυασμός της με τις τεχνολογίες που προτείνουν τα δίκτυα 5G, τότε αδιαμφισβήτητα επιτυγχάνεται τεράστια αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων στα ήδη βέλτιστα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (Litvinenko & Aboltins, 2016).

3.2. Χαρακτηριστικά τεχνολογιών SISO, MISO και MIMO

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται τα είδη τεχνολογιών SISO, MISO και MIMO:



Εικόνα 2 - Παρουσίαση τεχνολογιών SISO, SIMO, MISO, MIMO

3.2.1. Η περίπτωση Single Input Single Output (SISO)

Ο όρος SISO, όπως εφαρμόζεται στις ασύρματες τεχνολογίες, περιγράφει την τεχνολογία κεραιών που κάνει χρήση μίας μόνο κεραιάς στον πομπό και μίας στο δέκτη. Τα συστήματα SISO αποτελούν την πιο απλή τεχνολογία κεραιών. Δεδομένου όμως ότι οι μονές συχνότητες επηρεάζονται εύκολα από τα φαινόμενα space limit και frequency fading (εξασθένηση), τα συστήματα αυτά μερικές φορές βρίσκονται αντιμέτωπα με προβλήματα από φαινόμενα πολλαπλής διάδοσης του σήματος (Kim, Ji, Lee, Nam, Tzanidis & Zhang, 2014).

Στην περίπτωση του συστήματος SISO, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μεταδίδονται, διασκορπίζονται όταν παρουσιάζονται εμπόδια στην διαδρομή τους (όπως κτίρια, λόφους, κτλ). Στις περιπτώσεις αυτές, τα διασκορπισμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χρησιμοποιούν πολλές διαφορετικές διαδρομές με σκοπό να φτάσουν στον προορισμό τους. Το γεγονός αυτό όμως προκαλεί προβλήματα εξασθένησης. Σε ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνιών αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και αύξηση αριθμού σφαλμάτων.

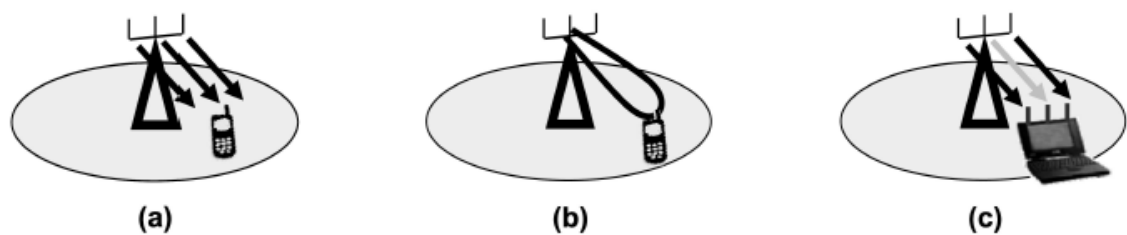
3.2.2. Η περίπτωση Multiple Input Single Output (MISO)

Ο όρος MISO κάνει αναφορά στην τεχνολογία έξυπνων κεραιών που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές στον πομπό και μια μόνο κεραιά στον δέκτη, στοχεύοντας στη βελτίωση της ταχύτητας μετάδοσης και στη μείωση των προβλημάτων που προκαλούνται από το φαινόμενο της πολυδιάδοσης του σήματος (Larsson, Edfors, Tufvesson & Marzetta, 2014).

3.2.3. Η περίπτωση Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Ο όρος MIMO αποτελεί την ασύρματη τεχνολογία κεραιών που κάνει χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό και τον δέκτη και, σε γενικές γραμμές, έχει τη δυνατότητα να προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση σε σχέση με τα απλά SISO συστήματα.

Η τεχνολογία MIMO εκμεταλλεύεται ουσιαστικά το φαινόμενο της πολυδιόδευσης (multipath), κατά το οποίο ένα σήμα από τον πομπό μέσω ανακλάσεων καταλήγει σε πολλαπλά αντίγραφα στον δέκτη. Με τον τρόπο αυτό η ποιότητα του σήματος μειώνεται και προβάλλονται απώλειες κατά την μετάδοση λόγω του φαινομένου της πολυδιόδευσης και των διαλείψεων (Litvinenko & Aboltins, 2016). Η χρήση πολλαπλών κεραιών επιτρέπει τη συλλογή και την οργάνωση των επιμέρους σημάτων, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος. Η ποικιλία των χαρακτηριστικών των συστοιχιών κεραιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τους παρακάτω 3 τρόπους, όπως απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα:



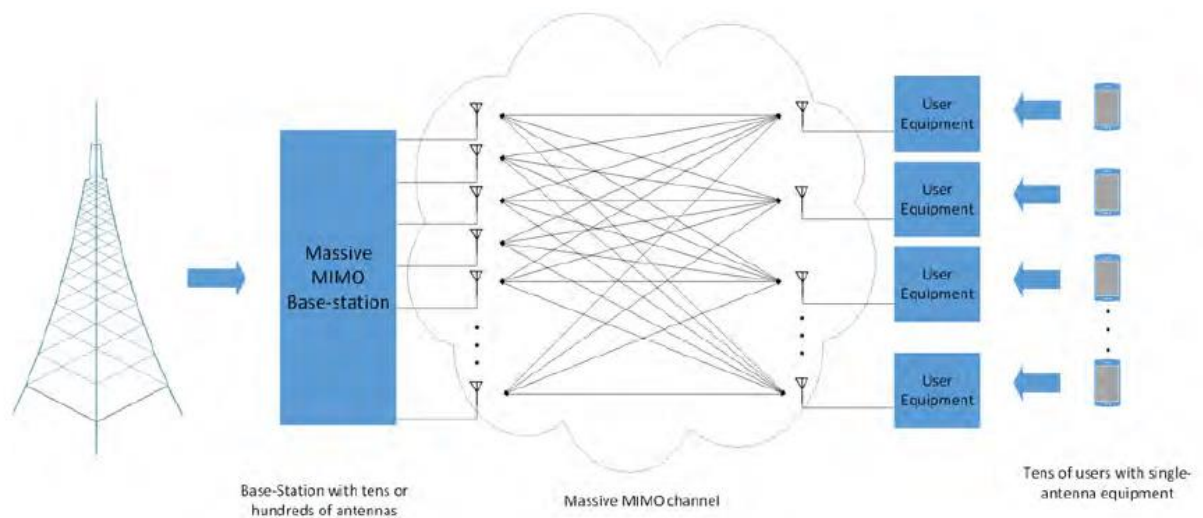
Εικόνα 3 - Είδη κερδών στις συστοιχίες πολλαπλών κεραιών: Κέρδη (α) Ποικιλομορφίας, (β) Διάταξης, (γ) Χωρικής πολυπλεξίας

- **Κέρδος ποικιλομορφίας:** η χωρική ποικιλομορφία καταφέρει τη βελτίωση της ανθεκτικότητας της μετάδοσης λόγω της μείωσης της εξασθένισης εξαιτίας της πολυδιόδευσης.
- **Κέρδος διάταξης:** είναι εφικτή η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών σε διαφορετικές κατευθύνσεις (multi – user MIMO) καθώς υπάρχει η δυνατότητα προκωδικοποίησης και προγραμματισμένης κατευθυντικής διάδοσης.
- **Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας:** ο συνδυασμός των κεραιών που μπορεί να είναι διαθέσιμες συμβάλλει στη μετάδοση προς έναν χρήστη πολλαπλών ροών σήματος.

3.3. Massive MIMO τεχνολογία

Μια ακόμη περίπτωση της MIMO είναι η Massive MIMO τεχνολογία (αλλιώς Large – Scale MIMO ή Large – Scale Antenna Systems). Τα τελευταία χρόνια, έχει απασχολήσει σε παγκόσμιο επίπεδο τους ερευνητές και θεωρείται μια από τις ισχυρότερες υποψηφιότητες για υιοθέτηση από τα 5G δίκτυα, διότι θα παρέχει τη δυνατότητα για μεγαλύτερη απόδοση, αξιοπιστία σύνδεσης, μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και φασματική απόδοση σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα MIMO μικρής κλίμακας (Kim, Ji, Lee, Nam, Tzanidis & Zhang, 2014).

Στα Massive MIMO συστήματα καθιερώθηκε ένα πλήθος κεραιών στους σταθμούς βάσης που αποτελεί μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από το πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούν. Στην εικόνα που ακολουθεί παρατηρούμε ένα σύστημα MU – MIMO όπου ο σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με δεκάδες ή εκατοντάδες κεραιές και ο κάθε χρήστης, από τους δεκάδες που υπάρχουν, έχει εφοδιαστεί με εξοπλισμό απλής κεραιάς (Kumar, Mishra, Mukherjee & Chaudhary, 2012).



Εικόνα 4 - Massive MIMO

Η λογική της επικοινωνίας του κάθε χρήστη με τον σταθμό βάσης μέσω εξοπλισμού απλής κεραιάς δίνει το προνόμιο για χαμηλή κατανάλωση

ενέργειας και για μικρό κόστος του εξοπλισμού στους χρήστες (Kim, Ji, Lee, Nam, Tzanidis & Zhang, 2014).

Τα MU – MIMO συστήματα στηρίζονται στη χωρική πολυπλεξία που μπορεί να αποφέρει αυξημένη αποδοτικότητα, και πιο συγκεκριμένα (Litvinenko & Aboltins, 2016):

- Μεγάλη αξιοπιστία συνδέσμου, λόγω της καταπολέμησης του φαινομένου της εξασθένισης.
- Υψηλή απόδοση του ρυθμού μεταφοράς, διότι καθώς υπάρχει αύξηση του πλήθους κεραιών, υπάρχει και η δημιουργία όλο και περισσότερων ροών δεδομένων προς τους χρήστες, οπότε κατά συνέπεια αυξάνεται και η συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος.
- Μεγαλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, αφού υπάρχει αύξηση με γραμμικό τρόπο του κέρδους πολυπλεξίας με το πλήθος των εξυπηρετούμενων χρηστών.
- Υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και βελτιωμένη κάλυψη δικτύου, διότι η ταυτόχρονη μετάδοση προς πολλαπλούς χρήστες μπορεί να πετύχει μείωση της αθροιστικής ισχύος μετάδοσης στον εξοπλισμό των χρηστών. Από την άλλη, οι σταθμοί βάσης μέσω της προκωδικοποίησης (beamforming) έχουν τη δυνατότητα μετάδοσης με συγκεντρωτικό τρόπο των σημάτων προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα η εκπεμπόμενη ισχύς τόσο στους σταθμούς όσο και στους χρήστες να μειώνεται.

4. Υλοποίηση: Μελέτη διαφορισιμότητας απολαβής πεπερασμένου SNR για συστήματα Massive MIMO

Όταν τα κανάλια και της εκπομπής και της λήψης είναι γνωστού περιεχομένου, μια διαμόρφωση MIMO γνωστή σαν διαμόρφωση «Συνδυασμού Μέγιστων Λόγων» (Maximum Ratio Combining, MRC), επιτρέπει την αξιοπιστία της μεταδιδόμενης πληροφορίας, ακόμα και σε κανάλια με ισχυρή απόσβεση. Αυτό επιτυγχάνεται στέλνοντας το σήμα στη βάση της πιο μεγάλης ιδιοσυνάρτησης του MIMO καναλιού, και με τον τρόπο αυτό μεγιστοποιείται ο SNR της μετάδοσης (White, Cline & Egbert, 2007).

Η μέθοδος αυτή είναι μια μορφή «μορφοποίησης δέσμης» (beamforming), που όπως είδαμε εκμεταλλεύεται την παρουσία πολλών στοιχείων εκπομπής για να βελτιστοποιήσει τη μετάδοση.

Θεωρώντας ένα MIMO-MRC σύστημα, το οποίο στέλνει ένα μόνο σύμβολο για κάθε χρήση του καναλιού το μοντέλο εισόδου-εξόδου μπορεί να γραφεί σαν:

$$\mathbf{y} = \sqrt{\gamma} \mathbf{H} \mathbf{w} s + \mathbf{n} \quad (1)$$

Όπου s είναι το σύμβολο που μεταδίδεται, \mathbf{w} ο πίνακας διαμόρφωσης δέσμης, γ το μέσο SNR για κάθε κεραία λήψης. Τόσο το s όσο και ο \mathbf{w} έχουν μέση τιμή μέτρου ίση με το 1. Ο Πίνακας \mathbf{H} υποθέτουμε ότι είναι ένας πίνακας που αντιπροσωπεύει Rayleigh fading και μπορεί να γραφεί, όπως έχει δειχθεί, σαν

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_w \mathbf{S}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Και θεωρείται πλήρως γνωστός στον εκπομπό και το δέκτη.

Η «αποκωδικοποίηση» του σήματος που λαμβάνεται γίνεται με βάση την αρχή του MRC:

$$z = \mathbf{w}^\dagger \mathbf{H}^\dagger \mathbf{y} \quad (3)$$

$$= \sqrt{\gamma} \mathbf{w}^\dagger \mathbf{H}^\dagger \mathbf{H} \mathbf{w} s + \mathbf{w}^\dagger \mathbf{H}^\dagger \mathbf{n} \quad (4)$$

Και άρα, ο SNR στην έξοδο του συνδυαστή είναι:

$$\gamma_{\text{out}} = \gamma \mathbf{w}^\dagger \mathbf{H}^\dagger \mathbf{H} \mathbf{w} \quad (5)$$

Το διάνυσμα \mathbf{w} μπορεί να επιλεγεί ώστε να μεγιστοποιεί αυτό το SNR, και μάλιστα το βέλτιστο \mathbf{w} , \mathbf{w}_{opt} αντιστοιχεί στη μέγιστη ιδιοτιμή του $\mathbf{H}^\dagger \mathbf{H}$, οπότε και έχουμε:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{out}} &= \gamma \mathbf{w}_{\text{opt}}^\dagger \mathbf{H}^\dagger \mathbf{H} \mathbf{w}_{\text{opt}} \\ &= \gamma \lambda_{\text{max}} \end{aligned} \quad (6)$$

Έχοντας δει τη στατιστική κατανομή της μέγιστης ιδιοτιμής του πίνακα $\mathbf{H}^\dagger \mathbf{H}$, προκύπτει ότι η πυκνότητα πιθανότητας του γ_{out} είναι:

$$f_{\gamma_{\text{out}}}(\gamma_{\text{out}}) = \frac{(-1)^n \Gamma_n(n) \det(\mathbf{\Omega})^{n-1} \det(\mathbf{\Sigma})^{m-1} \left(-\frac{\gamma}{\gamma_{\text{out}}}\right)^{n(n-1)/2}}{\Delta_n(\mathbf{\Omega}) \Delta_m(\mathbf{\Sigma})} \times \left(\frac{n(1-n) \det\left(\Psi\left(\frac{\gamma_{\text{out}}}{\gamma}\right)\right) \gamma}{2\gamma_{\text{out}}} + \sum_{\ell=\tau+1}^m \det\left(\Psi_{\ell}\left(\frac{\gamma_{\text{out}}}{\gamma}\right)\right) \right) \quad (7)$$

Η πιθανότητα αποκοπής, που ορίζεται σαν η πιθανότητα ο SNR να πέσει κάτω από το επιτρεπτό κατώφλι SNR γ_{thr} , μπορεί να βρεθεί απευθείας από την αθροιστική πυκνότητα πιθανότητας (cdf) του γ_{out}

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}(\gamma_{\text{th}}) &\triangleq F_{\gamma_{\text{out}}}(\gamma_{\text{th}}) \\ &= \Pr(\gamma_{\text{out}} \leq \gamma_{\text{th}}) \\ &= F_{\lambda_{\text{max}}}\left(\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma}\right) \\ &= \frac{(-1)^n \Gamma_n(n) \det(\mathbf{\Omega})^{n-1} \det(\mathbf{\Sigma})^{m-1} \det\left(\Psi\left(\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma}\right)\right)}{\Delta_n(\mathbf{\Omega}) \Delta_m(\mathbf{\Sigma}) \left(-\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma}\right)^{n(n-1)/2}} \end{aligned} \quad (8)$$

Για μικρές τιμές του γ_{thr} , αυτή μπορεί να γραφεί σαν:

$$P_{\text{out}}(\gamma_{\text{th}}) = \frac{\Gamma_n(n)}{\det(\mathbf{\Omega})^m \det(\mathbf{\Sigma})^n \Gamma_n(m+n)} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma}\right)^{mn} \quad (9)$$

Έστω σύστημα MIMO που αποτελείται από N_T στοιχεία εκπομπής και N_R στοιχεία λήψης, και έστω οι πίνακες συσχέτισης $\mathbf{\Sigma}_T$ και $\mathbf{\Sigma}_R$ αντίστοιχα. Όπως έχουμε δει, το σήμα στον λήπτη στην περίπτωση της διάδοσης Rayleigh έχει τη μορφή (πίνακας στήλη N_R γραμμών):

$$\bar{z} = \mathbf{H}\bar{y} + \bar{n}. \quad (10)$$

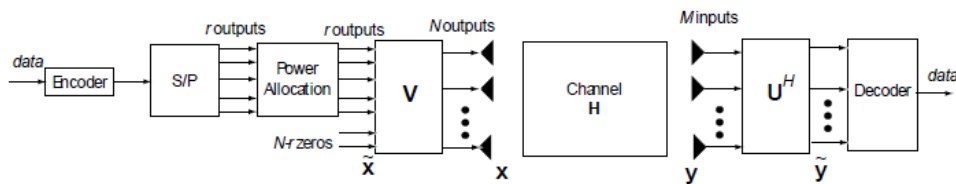
όπου

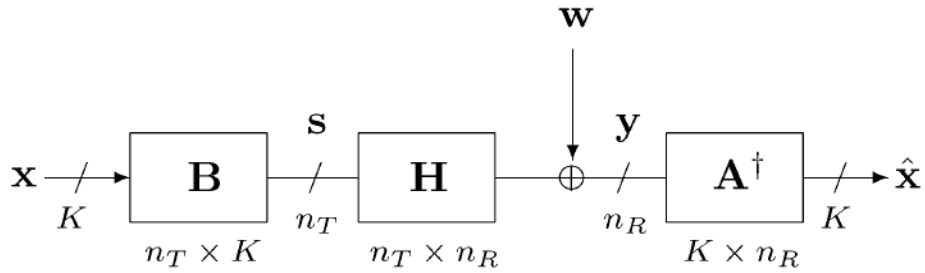
\mathbf{H} ο πίνακας της συσχέτισης των καναλιών, μεγέθους $N_R \times N_T$,

\mathbf{n} ο πίνακας θορύβου, ένας κυκλικά συμμετρικός, μέσου όρου μηδέν και χωρικά μη-συσχετισμένος κανονικοποιημένος στον μοναδιαίο πίνακας-στήλη N_R γραμμών

\mathbf{y} ο πίνακας στήλη N_T γραμμών του μεταδιδόμενου σήματος.

Με άλλα λόγια, ο \mathbf{H} περιγράφει την «ανάμιξη» των καναλιών (τι δέχεται κάθε στοιχείο λήψης από κάθε στοιχείο εκπομπής, και ο \mathbf{n} το μοντέλο θορύβου κατά την εκπομπή, που προστίθεται κατά τη διάδοση (White, Cline & Egbert, 2007).





Σχήμα 1 - Ένα MIMO σχήμα επικοινωνίας (χωρίς το θόρυβο x είναι το y , y είναι το z στον τύπο που έχουμε στο κείμενο στο πρώτο σχήμα, \hat{x} είναι το z και w το n στο δεύτερο)

Με την υπόθεση της μη-άμεσης λήψης (No Line – Of – Sight) και εφαρμόζοντας το διαχωριζόμενο μοντέλο συσχέτισης (μοντέλο Kronecker), μπορούμε να γράψουμε τον πίνακα \mathbf{H} στη μορφή

$$\mathbf{H} = \mathbf{\Sigma}_R^{1/2} \mathbf{H}_w \mathbf{\Sigma}_T^{1/2} \quad (11)$$

Με \mathbf{H}_w πάλι έναν κυκλικά συμμετρικό, μέσου όρου μηδέν αλλά και μοναδιαίας απόκλισης πίνακα τυχαίας διάδοσης.

Ανάλογα με τη μορφή των πινάκων $\mathbf{\Sigma}_T$ και $\mathbf{\Sigma}_R$ μπορούμε να διακρίνουμε διάφορες περιπτώσεις για το μοντέλο διάδοσης, πχ (White, Cline & Egbert, 2007):

- Όταν οι πίνακες συσχέτισης $\mathbf{\Sigma}_T$ και $\mathbf{\Sigma}_R$ είναι μοναδιαίοι, πλήρως ασυσχέτιστα κανάλια
- Όταν ένας από τους πίνακες είναι μοναδιαίος, «ημισυσχετισμένα» κανάλια. (Ανάλογα με το σχετικό μέγεθος των στοιχείων εκπομπής και λήψης, «ελαχιστο-ημισυσχετισμένα» [min-semicorrelated] όταν ο μοναδιαίος είναι ο πίνακας συσχέτισης του μεγαλύτερου αριθμού – «μεγιστο-ημισυσχετισμένα» [max-semicorrelated] στην αντίθετη περίπτωση

- Διπλά συσχετισμένα όταν κανένας από τους πίνακες δεν είναι μοναδιαίος.

Οι περιπτώσεις αυτές αντιστοιχούν σε διαφορετικές πρακτικές περιπτώσεις. Τα συστήματα MIMO (ειδικά για χρήση πχ κινητής τηλεφωνίας) αποτελούνται από μεγάλο αριθμό στοιχείων εκπομπής, οπότε αναπόφευκτα υπάρχει συμβολή μεταξύ γειτονικών (χωρικά ή ηλεκτρικά) κεραιών, άρα το μοντέλο που έχει περισσότερο ενδιαφέρον για τη μελέτη των massive MIMO συστημάτων είναι το μεγιστο-ημισυσχετισμένο μοντέλο καναλιών. Η μελέτη του γίνεται με τη βοήθεια του φάσματος ιδιοτιμών $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ του πίνακα συσχέτισης του συστήματος \mathbf{W} :

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mathbf{H}\mathbf{H}^\dagger, & N_R > N_T, \\ \mathbf{H}^\dagger\mathbf{H}, & N_R \leq N_T. \end{cases} \quad (12)$$

Η απολαβή διαφορισιμότητας ενός συστήματος MIMO ορίζεται κλασικά ως:

$$G_d = - \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{\log P_{out}(\text{SNR})}{\log \text{SNR}} \quad (13)$$

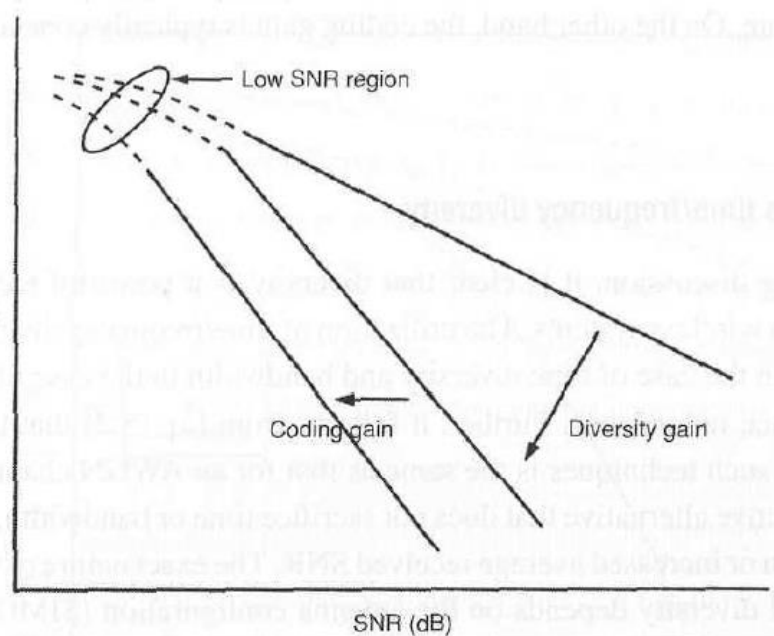
Στην πράξη, φυσικά ποτέ δε μπορούμε να έχουμε άπειρο SNR. Γνωρίζουμε ωστόσο ότι η πιθανότητα αποκοπής (outage probability) του συστήματος για SNR που τείνει στο άπειρο έχει τη μορφή

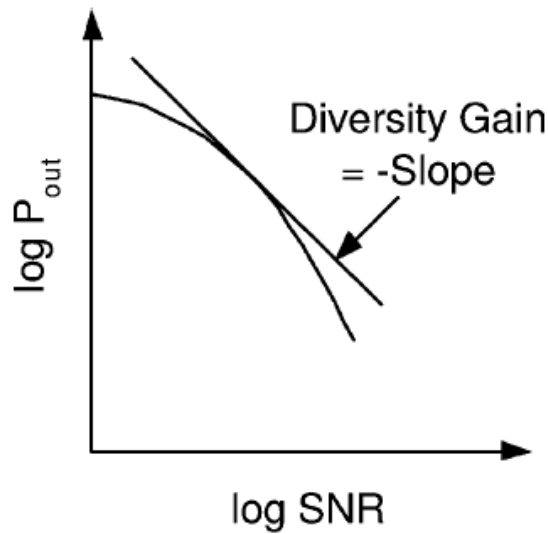
$$P_{out} \sim (G_a \text{SNR})^{G_d} \quad (14)$$

Όπου G_a είναι η απολαβή της συστοιχίας. Οπότε η πρακτική εύρεση του G_d γίνεται σε μια log-log γραφική παράσταση της πιθανότητα αποκοπής συναρτήσει του SNR – η κλίση της ευθείας που προκύπτει (στην περιοχή των μεγάλων SNR) είναι η G_d . Δηλαδή, ο ορισμός της απολαβής είναι ασυμπτωτικός, άρα δίνει την πιθανή βελτίωση του συστήματος με βελτίωση του SNR, αλλά δε δίνει καμία πληροφορία για τη βελτίωση του συστήματος ως έχει (μόνο με χρήση της διαφορισιμότητας). Για παράδειγμα όταν το (κάθε) κανάλι εκπομπής είναι πλήρως γνωστό στον (κάθε) δέκτη, η απολαβή διαφορισιμότητας μεγιστοποιείται:

$$G_d = G_{d_{max}} = N_T \times N_R \quad (15)$$

αλλά δεν έχουμε καμιά γνώση για το επίπεδο SNR όπου αυτό συμβαίνει, ή για την απολαβή σε χαμηλά επίπεδα SNR.





Σχήμα 2 - Ο ορισμός της *diversity gain* πρακτικά (η κλίση στο γράφημα της P_{out} για «άπειρο» (πολύ μεγάλο) SNR).

Όσο μεγαλώνει το G_d , μεγαλώνει και η κλίση, λόγω της ασυμπτωτικής συμπεριφοράς του γραφήματος. Το πρώτο γράφημα είναι της SER, που είναι ανάλογη της P_{out}).

Αν θέλαμε να ορίσουμε την απολαβή διαφορισιμότητας για πεπερασμένο SNR έχουμε το πρόβλημα ότι ο ορισμός θα περιλάμβανε τη διαφόριση του λογαρίθμου της πιθανότητας αποκοπής, η οποία με τη σειρά της δεν είναι γνωστή σε κλειστή, αναλυτική μορφή – παρά μόνο για ειδικές, απλές περιπτώσεις, και τότε επίσης με χρήση αναπτύγματος Taylor (White, Cline & Egbert, 2007).

Ο κλασικός ορισμός της απολαβής διαφορισιμότητας για πεπερασμένο SNR είναι:

$$G_d^{SNR} = -\frac{\partial \log P_{out}^{(global)}(SNR)}{\partial \log SNR} \quad (16)$$

Όπου:

$$P_{out}^{(global)} = \mathbb{P} \{ \rho_1 \leq \rho_{th,1}, \rho_2 \leq \rho_{th,2}, \dots, \rho_\kappa \leq \rho_{th,\kappa} \} \quad (17)$$

Είναι η συνολική πιθανότητα αποκοπής, δηλ. η πιθανότητα ότι ο στιγμιαίος SNR ρ_i σε κάποιο από τα ιδιοκανάλια (που σχετίζονται με τις ιδιοτιμές λ_i του πίνακα συσχέτισης του συστήματος \mathbf{W}) και που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση κ συμβόλων ανά κανάλι, πέφτει κάτω από ένα προδιαγεγραμμένο κατώφλι $\rho_{th,i}$.

Αν το κατώφλι είναι το ίδιο για όλα τα κανάλια (για όλες τις ροές, δηλ. όλους τους συνδυασμούς καναλιών και ίσο με $\bar{\rho}$, και επιπλέον αν έχουμε ισοκατανομή της παρεχόμενης ισχύος, δηλ.

$$\rho_k = \lambda_k q / \kappa \quad (18)$$

Με q το SNR σε καθένα από τα στοιχεία λήψης, τότε μπορούμε να γράψουμε

$$P_{out}^{(global)} = \mathbb{P} \{ \rho_1 \leq \bar{\rho} \} = F_{\lambda_1} \left(\frac{\kappa \bar{\rho}}{q} \right) \quad (19)$$

Όπου η F_{λ_1} υποδηλώνει την αθροιστική συνάρτηση κατανομής της μέγιστης ιδιοτιμής (χωρίς βλάβη της γενικότητας θεωρούμε ότι αυτή είναι η λ_1 , και δίνεται με τη σειρά της από τη σχέση:

$$F_{\lambda_1}(\eta) = \frac{K_{\Sigma}}{|\Sigma|^{N-M+1}} \det \left[\begin{array}{c} (\sigma_j^{N-M+i})_{M-N, M} \\ (\sigma_j^i \gamma(i, \frac{\eta}{\sigma_j}))_{N, M} \end{array} \right]_M \quad (20)$$

Όπου σ_j οι ταξινομημένες ιδιοτιμές του πίνακα Σ .

Τότε η απολαβή διαφορισιμότητας για το σύστημα που περιγράφηκε πιο πάνω είναι:

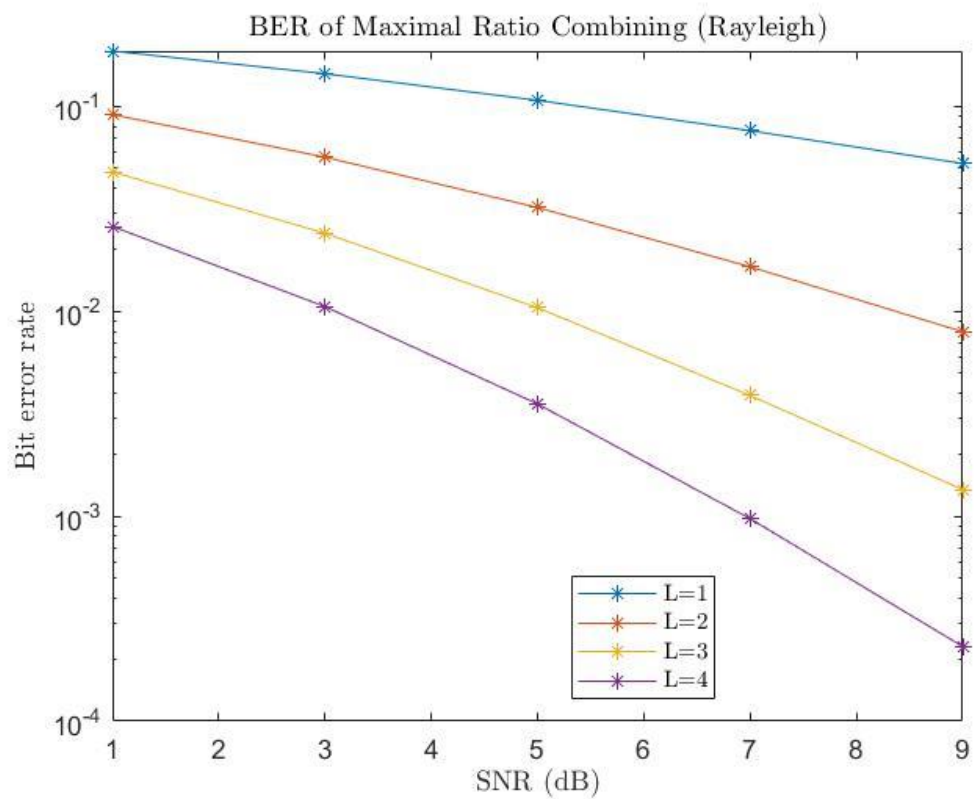
$$G_d^{\text{SNR}}(q) = \frac{\kappa \bar{\rho}}{q} \text{tr} \left(\mathbf{F}^{-1}(\eta) \frac{\partial \mathbf{F}(\eta)}{\partial \eta} \right) \Bigg|_{\eta = \frac{\kappa \bar{\rho}}{q}} \quad (21)$$

Με

$$\mathbf{F}(\eta) = \left[\begin{array}{c} (\sigma_j^{N-M+i})_{M-N, M} \\ (\sigma_j^i \gamma(i, \frac{\eta}{\sigma_j}))_{N, M} \end{array} \right]_M \quad (22)$$

Η διαφορίση γίνεται στοιχείο προς στοιχείο και άρα μπορεί να γίνει εύκολα.

Το απλό μοντέλο MIMO με χρήση MRC δείχνει τα αποτελέσματα ως προς το BER για διαφορετικές «πολυπλοκότητες» MIMO (L) και για διάφορες μέσες τιμές SNR στο δέκτη.



Σχήμα 3 - Μοντέλο MIMO με χρήση MRC δείχνει τα αποτελέσματα ως προς το BER

Ακολουθεί ένα απλό μοντέλο MIMO στο MATLAB:

```
clear all
close all
clc

sample_num = 1000000;

Pe_mrc = zeros(5,4, 2); % maximal ratio combining

% Rayleigh fading channel
R=0;
sigma = 1/sqrt(2);
for enr_index = 1:5
    enr_dB = (enr_index-1)*2+1; % energy-to-noise ratio:1, 3, 5, 7,
9 dB
    enr = 10^(enr_dB/10);

    % generate QPSK data (2 bits)
    data = rand(2,sample_num); % 2*sample_num matrix
    data = 2*(data > 0.5)-1; % map to -1, 1

    Edata = sqrt(2); % symbol energy
    En = Edata/enr; % noise energy

    for L = 1:4
        % generate noise
        n = normrnd(0,sqrt(En/2),2,sample_num,L) +
1i*normrnd(0,sqrt(En/2),2,sample_num,L);

        % generate fading gain (R=0: Rayleigh)
        g = normrnd(R/2,sigma,1,sample_num,L) +
1i*normrnd(R/sqrt(2),1/2,1,sample_num,L);
        g_tmp = repmat(g,2,1,1); % replicate for 2 bits (QPSK)

        tx_data = repmat(data,1,1,L); % replicate for L branches
        % received signal
        r = g_tmp.*tx_data + n;

        %% Maximal Ratio Combining %%
        [Pe_mrc(enr_index, L, R+1), result_mrc] =
maximal_ratio_combining(g_tmp, r, sample_num, data);

    end
end

figure,plot([1 3 5 7 9], Pe_mrc(:, :,1), '-*')
set(gca, 'YScale', 'log')
title('BER of Maximal Ratio Combining (Rayleigh)',Interpreter='latex');
legend({'L=1','L=2','L=3','L=4'},Interpreter="latex");
xlabel('SNR (dB)',Interpreter='latex');
ylabel('Bit error rate',Interpreter='latex');
legend Location best
```

```

function [BER, result] = maximal_ratio_combining(g_2, r, sample_num,
data)
% Maximal ratio combining

r_mrc = real(sum(conj(g_2).*r,3)); % weighted by fading gain and combine
result = (r_mrc > 0)*2 -1; % Detection
BER = get_BER(result, data, sample_num);
end

function Pe = get_BER(A,B,sample_num)
% Calculate bit error rate
wrong = A~= B;
error_count = sum(sum(wrong));
Pe = error_count/sample_num/2;
end

```


5. Συμπεράσματα

Η τεχνολογία MIMO ομαδοποιεί τις κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη για να παρέχει υψηλή φασματική και ενεργειακή απόδοση χρησιμοποιώντας σχετικά απλή επεξεργασία. Δεδομένης της παγκόσμιας ανάγκης για ένα αποτελεσματικό φάσμα, έχει διεξαχθεί περιορισμένος αριθμός ερευνών σχετικά με την τεχνολογία MIMO. Έτσι, πολλές ανοιχτές ερευνητικές προκλήσεις εξακολουθούν να βρίσκονται στο δρόμο αυτής της αναδυόμενης τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης.

Τα συστήματα MIMO προσφέρουν μεγαλύτερη απόδοση, αλλά με επιπλέον κόστος και κατανάλωση ενέργειας. Οι ανταγωνιστικές πιέσεις των καταναλωτικών αγορών επηρεάζουν το ανεκτό κόστος (περιοχή), ενώ οι περιορισμοί στη θερμική και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας περιορίζουν την ανεκτή κατανάλωση ενέργειας στις ασύρματες φορητές συσκευές. Επιπλέον, τα προβλήματα μικτού σήματος, συμπεριλαμβανομένης της σύζευξης και της αλληλεπίδρασης, καθίστανται κρίσιμα σε ενσωματωμένα ασύρματα συστήματα υψηλής απόδοσης που εντοπίζουν το ψηφιακό κύκλωμα με τα αναλογικά ηλεκτρονικά RF, ενώ ακόμα η αναζήτηση λύσεων εξαιρετικά χαμηλού κόστους οδηγεί σε πρόσθετη ενσωμάτωση CPU και άλλων περιφερειακών σε επίπεδο συστήματος.

Σε αυτή την εργασία, παρουσιάστηκε η ακριβής μέθοδος για την εξαγωγή αναλυτικών εκφράσεων για το μέσο BER των συστημάτων MIMO MRC. Τα κανάλια εξασθένισης του επιθυμητού χρήστη και των παρεμβολών θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητα με τη κατανομή Rayleigh. Η Ακριβής μέθοδος βασίζεται στη χρήση της μεταβλητής απόφασης στην έξοδο συνδυασμού που εξαρτάται μόνο από το κανάλι εξασθένισης του επιθυμητού χρήστη. Βρέθηκε ότι ρυθμίζοντας μόνο το κανάλι εξασθένισης του επιθυμητού χρήστη, η κατανομή της συνιστώσας παρεμβολής συν θορύβου είναι ακριβώς Gaussian, πράγμα που οδηγεί σε ακριβείς εκφράσεις για το υπό όρους BER και το μέσο BER.

Η ακριβής μέθοδος είναι πολύ λιγότερο περίπλοκη από τη συμβατική μέθοδο που βασίζεται σε PDF, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη εύρεσης του PDF του SNR εξόδου. Βρέθηκε επίσης ότι η ακριβής έκφραση του μέσου BER των συστημάτων MIMO MRC παρουσία CSI μπορεί να ληφθεί από την έκφραση

για το μέσο BER των συστημάτων MIMO MRC ενός χρήστη αντικαθιστώντας το μέσο SNR ανά κλάδο με την αναλογία του επιθυμητού σήματος μέσης λαμβανόμενης ισχύος προς στη συνολική μέση λαμβανόμενη ισχύ των παρεμβολών συν το θόρυβο.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1]. Alqadami, A. S. M., Jamlos, M. F., Soh, P. J., & Vandenbosch, G. A. (2015). Assessment of PDMS technology in a MIMO antenna array. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 15, 1939-1942.
- [2]. Araújo, D. C., Maksymyuk, T., de Almeida, A. L., Maciel, T., Mota, J. C., & Jo, M. (2016). Massive MIMO: survey and future research topics. *Iet Communications*, 10(15), 1938-1946.
- [3]. Bhatia, R., & Li, L. (2007, May). Throughput optimization of wireless mesh networks with MIMO links. In *IEEE INFOCOM 2007-26th IEEE International Conference on Computer Communications* (pp. 2326-2330). IEEE.
- [4]. Biglieri, E., Calderbank, R., Constantinides, A., Goldsmith, A., Paulraj, A., & Poor, H. V. (2007). *MIMO wireless communications*. Cambridge university press.
- [5]. Björnson, E., Larsson, E. G., & Marzetta, T. L. (2016). Massive MIMO: Ten myths and one critical question. *IEEE Communications Magazine*, 54(2), 114-123.
- [6]. Bolcskei, H. (2006). MIMO-OFDM wireless systems: basics, perspectives, and challenges. *IEEE wireless communications*, 13(4), 31-37.
- [7]. 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.
- [8]. Chien, T. V., & Björnson, E. (2017). Massive MIMO communications. In *5G mobile communications* (pp. 77-116). Springer, cham.
- [9]. Chockalingam, A., & Rajan, B. S. (2014). *Large MIMO systems*. Cambridge University Press.
- [10]. Dubuc, C., Starks, D., Creasy, T., & Hou, Y. (2004). A MIMO-OFDM prototype for next-generation wireless WANs. *IEEE Communications Magazine*, 42(12), 82-87.
- [11]. Feng, L., Liu, Y., Wu, L., Zhang, Z., & Dang, J. (2020). A satellite handover strategy based on MIMO technology in LEO satellite networks. *IEEE Communications Letters*, 24(7), 1505-1509.
- [12]. Fodor, G., Rajatheva, N., Zirwas, W., Thiele, L., Kurras, M., Guo, K., ... & De Carvalho, E. (2017). An overview of massive MIMO

- technology components in METIS. *IEEE Communications Magazine*, 55(6), 155-161.
- [13]. Gilbert, J. M., Choi, W. J., & Sun, Q. (2005, June). MIMO technology for advanced wireless local area networks. In *Proceedings. 42nd Design Automation Conference, 2005.* (pp. 413-415). IEEE.
- [14]. Kaiser, T., Zheng, F., & Dimitrov, E. (2009). An overview of ultra-wide-band systems with MIMO. *Proceedings of the IEEE*, 97(2), 285-312.
- [15]. Kim, Y., Ji, H., Lee, J., Nam, Y. H., Ng, B. L., Tzanidis, I., ... & Zhang, J. (2014). Full dimension MIMO (FD-MIMO): The next evolution of MIMO in LTE systems. *IEEE Wireless Communications*, 21(2), 26-33.
- [16]. Kumar, A., Mishra, K., Mukherjee, A., & Chaudhary, A. K. (2012, March). Channel capacity enhancement using MIMO technology. In *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM-2012)* (pp. 10-15). IEEE.
- [17]. Larsson, E. G., Edfors, O., Tufvesson, F., & Marzetta, T. L. (2014). Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE communications magazine*, 52(2), 186-195.
- [18]. Litvinenko, A., & Aboltins, A. (2016, November). Selection and performance analysis of chaotic spreading sequences for DS-CDMA systems. In *2016 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)* (pp. 38-45). IEEE.
- [19]. Marzetta, T. L. (2015). Massive MIMO: an introduction. *Bell Labs Technical Journal*, 20, 11-22.
- [20]. Marzetta, T. L., Caire, G., Debbah, M., Chih-Lin, I., & Mohammed, S. K. (2013). Special issue on massive MIMO. *Journal of communications and networks*, 15(4), 333-337.
- [21]. Ngo, H. Q. (2015). *Massive MIMO: Fundamentals and system designs* (Vol. 1642). Linköping University Electronic Press.
- [22]. Nimmagadda, S. M. (2020). Optimal spectral and energy efficiency trade-off for massive MIMO technology: analysis on modified lion and grey wolf optimization. *Soft Computing*, 24(16), 12523-12539.
- [23]. Pappa, M., Ramesh, C., & Kumar, M. N. (2017, March). Performance comparison of massive MIMO and conventional MIMO using channel parameters. In *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)* (pp. 1808-1812). IEEE.

- [24]. Patil, P., Patil, M. R., Itraj, S., & Bomble, U. L. (2017, September). A review on MIMO OFDM technology basics and more. In *2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC)* (pp. 119-124). IEEE.
- [25]. Prasad, K. S. V., Hossain, E., & Bhargava, V. K. (2017). Energy efficiency in massive MIMO-based 5G networks: Opportunities and challenges. *IEEE Wireless Communications*, 24(3), 86-94.
- [26]. Psaltopoulos, G. K., & Wittneben, A. (2010). Nonlinear MIMO: Affordable MIMO technology for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(2), 824-832.
- [27]. Shikhantsov, S., Thielens, A., Vermeeren, G., Tanghe, E., Demeester, P., Martens, L., ... & Joseph, W. (2019). Hybrid ray-tracing/FDTD method for human exposure evaluation of a massive MIMO technology in an industrial indoor environment. *IEEE Access*, 7, 21020-21031.
- [28]. Shim, B., & Lee, B. (2013). Evolution of MIMO technology. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 38(8), 712-723.
- [29]. Tsoulos, G. (Ed.). (2018). *MIMO system technology for wireless communications*. CRC press.
- [30]. Vook, F. W., Ghosh, A., & Thomas, T. A. (2014, June). MIMO and beamforming solutions for 5G technology. In *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)* (pp. 1-4). IEEE.
- [31]. Wang, C. X., Hong, X., Ge, X., Cheng, X., Zhang, G., & Thompson, J. (2010). Cooperative MIMO channel models: A survey. *IEEE communications magazine*, 48(2), 80-87.
- [32]. White, K. B., Cline, D., & Egbert, P. K. (2007, September). Poisson disk point sets by hierarchical dart throwing. In *2007 IEEE symposium on interactive ray tracing* (pp. 129-132). IEEE.