

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΜΣ: ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ

Διπλωματική εργασία με τίτλο:
Holographic MIMO communications
Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Αγγελική Αλεξίου



Φοιτητής: Γαρύφαλλος Γεώργιος
ΑΜ: ΜΨΕ2001

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα "Holographic MIMO Communications" πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της φοιτήσης μου στο πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών του τμήματος Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιά με τίτλο "Ψηφιακές Επικοινωνίες και Δίκτυα"

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου Κα. Αλεξίου Αγγελική για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση της καθώς και για την υπομονή της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την πολύτιμη στήριξη τους καθώς και τους συμφοιτητές μου για την βοήθεια και υποστήριξη τους.

Περίληψη

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι οι "Holographic MIMO Communications". Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη της τεχνολογίας των MIMO και massive MIMO καθώς και της ανάγκης μιας νέας βελτιωμένης τεχνολογίας έξυπνων κεραιών για τα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας της 6^{ης} γενιάς. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση της ολογραφίας, του ολογραφικού MIMO αλλά και των ολογραφικών MIMO επικοινωνιών. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα όρια τα οποία θέτονται από την τεχνολογία των HMIMO καθώς και ένα μοντέλο καναλιού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα HMIMO συστήματα, το οποίο βασίζεται στις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ένας υπολογισμός των DoF καθώς και μια σύγκριση με ένα massive MIMO σύστημα, ώστε να διαπιστώσουμε τα όρια αλλά και την απόδοση ενός HMIMO συστήματος επικοινωνίας. Τέλος στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

Abstract

The subject of this thesis is "Holographic MIMO Communications". In the first chapter there is a summary of the MIMO and massive MIMO technology as well as the need for a new and improved smart antenna technology for the 6th generation wireless communication systems. In the second chapter there is an analysis of holography, holographic MIMO and holographic MIMO communications. In the third chapter, the limits set by the HMIMO technology as well as a channel model that can be used for HMIMO systems, based on small-scale fading. In the fourth chapter, we will also use it to calculate the Degrees of Freedom and to compare it with a Massive MIMO system, in order to establish the limits and performance of an HMIMO communication system. Finally, chapter 5 presents the conclusions.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	3
Abstract	4
Περιεχόμενα	5
Κατάλογος σχημάτων	6
Κεφάλαιο 1 ^ο	7
Εισαγωγικά στοιχεία και τεχνολογίες έξυπνων κεραιών	7
1.0 Τα ασύρματα δίκτυα 5 ^{ης} και 6 ^{ης} γενιάς	7
1.1 Σκοπός της εργασίας	8
1.2 Τεχνολογίες έξυπνων κεραιών	9
1.3 Συστήματα MIMO και ιστορικά στοιχεία	10
1.3.1 Χωρική ποικιλομορφία	11
1.3.2 χωρική πολυπλεξία	11
1.3.3 Beamforming	12
1.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης των MIMO	12
1.4 Συστήματα mMIMO (massive MIMO)	12
Κεφάλαιο 2 ^ο	14
Ολογραφία και ολογραφικές επικοινωνίες	14
2.1 Τα όρια της κλασσικής διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	14
2.2 Τι είναι οι ολογραφικές επικοινωνίες;	17
2.3 Ολογραφία	18
2.4 Κατηγορίες ολογραφίας	19
2.5 Μετα-επιφάνειες και μετα-υλικά	20
2.6 Ολογραφικά MIMO	21
2.7 Σχεδιαστικά μοντέλα των HMIMOs	22
2.8 Μεθοδολογία κατασκευής	23
2.9 Μηχανισμοί ρύθμισης των HMIMOs	25
2.10 Τρόποι λειτουργίας των HMIMOs	25
2.11 Λειτουργικότητα, χαρακτηριστικά και εφαρμογές	26
2.11 Ανακεφαλαίωση	28
Κεφάλαιο 3 ^ο	29
Μοντέλο καναλιού και κριτήρια αξιολόγησης επιδόσεων	29
3.1 Τεχνολογίες ενεργοποίησης	29
3.2 Μοντελοποίηση καναλιού	30

3.3 Το προτεινόμενο μοντέλο για διαλείψεις μικρής κλίμακας σε τρισδιάστατο χώρο	30
3.4 Το ανάπυγμα Fourier σε σειρές επίπεδων κυμάτων	35
3.5 Μετρηκές του καναλιού	37
3.6 Ανακεφαλαίωση.....	37
Κεφάλαιο 4 ^ο	38
Υπολογισμός των DoF στα Ολογραφικά MIMO.....	38
4.1 Μεθοδολογία.....	38
4.2 Το uplink ενός massive MIMO συστήματος σαν σημείο αναφοράς.....	38
4.3 το μοντέλο αναφοράς για το Holographic MIMO σύστημα.....	39
4.4 Η συνθήκη 2BT και το θεωρητικό όριο των DoF.....	40
4.4.1 Σενάριο Γραμμικής διάταξης	40
4.4.2 Σενάριο επίπεδης διάταξης	41
4.4.3 Σενάριο ογκομετρικής διάταξης.....	42
4.5 τελικά αποτελέσματα και συμπεράσματα	43
Κεφάλαιο 5 ^ο	44
Συμπερασματα.....	44
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	46

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1. Συγκριση μεταξύ των ρυθμών μετάδοσης του Wireless LAN και του mobile.....	8
Σχήμα 1.2. Σχεδιαστικό διάγραμμα συστήματος MIMO.....	11
Σχήμα 2.0 οι ακτίνες απο οποιοδήποτε σημείο της κεραίας είναι παραλλήλες στην περιοχή Fraunhofer.....	15
Σχήμα 2.1. Απεικόνιση των πεδίων μιας κεραίας με μέγιστο μέγεθος διάστασης, D	16
Σχήμα 2.2. Όριο της περιοχής Fraunhofer σαν συνάρτηση της συχνότητας λειτουργίας και του μεγέθους της κεραίας	17
Σχήμα 2.3. Διαδικασία ολογραφίας.....	19
Σχήμα 2.4. Διάφορα μετα-υλικά και μετα-επιφάνειες.....	20
Σχήμα 2.5 Περιβαλλον με HMIMO	22
Σχήμα 2.6. Κατασκευαστική δομή HMIMO.....	23
Σχήμα 2.7 Δομή HMIMO.....	24
Σχήμα 2.8 Σεναρια εφαρμογής HMIMO σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.....	28
Σχήμα 3.1. Διάδοση κλιμακωτών επίπεδων κυμάτων σε τρισδιάστατο επίπεδο.....	32
Σχήμα 3.2 Φασματική σφαίρα και διαδομένα κύματα	34

Σχήμα 3.3 Δισδιάστατο διαγραμμα ελλειπτικού πλέγματος ϵ	36
Σχήμα 4.1 πίνακας σχέσης μεταξύ του ergodic achievable rate και του αριθμού των κεραιών στο BS	39
Σχήμα 4.2 Γραμμική διάταξη	41
Σχήμα 4.4 Ογκομετρική διάταξη	43

Κεφάλαιο 1^ο

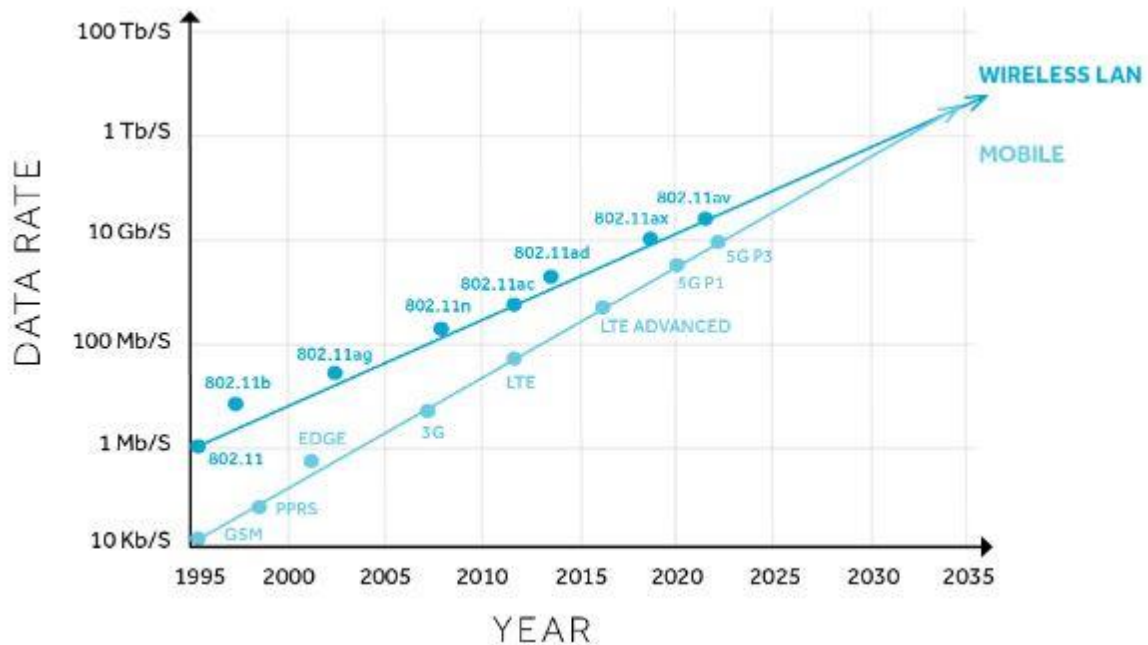
Εισαγωγικά στοιχεία και τεχνολογίες έξυπνων κεραιών

1.0 Τα ασύρματα δίκτυα 5^{ης} και 6^{ης} γενιάς

Τα ασύρματα δίκτυα 5^{ης} γενιάς είναι πλέον πραγματικότητα και έχουν γίνει εμπορικά διαθέσιμα στο ευρύ κοινό, με τους παρόχους να επενδύουν τεράστια ποσά σε νέες υποδομές ώστε να μπορέσουν να κάλυψουν την ζήτηση που υπάρχει. Οι θεμελιώδεις πυλώνες, πάνω στους οποίους οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι σχεδίασαν τα ασύρματα δίκτυα 5^{ης} γενιάς είναι οι παρακάτω.

- Βελτιώμενο εύρος ζώνης, συγκεκριμένα υποστηρίζονται υπηρεσίες που έχουν υψηλή απαίτηση σε δεδομένα όπως εφαρμογές ροής βίντεο και επαυξημένης πραγματικότητας για κινητά, με αναμενόμενους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων 10 και 20 gigabit ανά δευτερόλεπτο, καθώς και μέσες ταχύτητες δεδομένων των 50 και 100 Mbps στο uplink και στο downlink.
- Εξαιρετικά αξιόπιστες ζεύξεις με χαμηλή καθυστέρηση μεταξύ των τερματικών, καθώς νέες εφαρμογές και υπηρεσίες τηλειατρικής αλλά και απομακρυσμένης οδήγησης οχημάτων απαιτούν πολύ μικρή καθυστέρηση της τάξεως του ενός millisecond.
- Μαζικές επικοινωνίες μεταξύ των μηχανημάτων όπως το διαδίκτυο το πραγμάτων, οι έξυπνες κατοικίες.

Η δραματική αύξηση σε δεδομένα, διασυνδεδεμένες συσκευές και εφαρμογές, ωθεί πλέον, τις ασυρμάτες επικοινωνίες προς τα δίκτυα και τις τεχνολογίες της 6^{ης} γενιάς.



Σχήμα 1.1. Συγκριση μεταξύ των ρυθμών μετάδοσης του Wireless LAN και του mobile.

Εκτιμάται ότι με την ανάπτυξη ασύρματων δικτύων 6^{ης} γενιάς, η αύξηση της κίνησης δεδομένων θα ξεπεράσει τα 5000 exabyte το 2030. Οι υπηρεσίες θα επεκταθούν σε διάφορα περιβάλλοντα όπως το διάστημα, ο αέρας, το έδαφος και η θάλασσα, με σκοπό την δημιουργία ενός παγκόσμιου διαδικτύου των πάντων. Αναδυόμενες εφαρμογές, όπως οι ολογραφικές επικοινωνίες, το απτικό διαδίκτυο, η πλήρως αυτόνομη και απομακρυσμένη οδήγηση, και η τηλειατρική θα κυριαρχήσουν. Υπό αυτές τις προοπτικές, το 6G οραματίζεται να προσφέρει εξαιρετικά καθυλωτικές εμπειρίες, κάλυψη πλήρους διαστάσεων, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, αξιοπιστία, καθώς και συνθετες λειτουργίες επικοινωνίας, ανίχνευσης και ελέγχου των πληροφοριακών συστημάτων με ασφάλεια. Σε σύγκριση με το 5G, το οραματιζόμενο 6G θα προσφέρει τρομερή απόδοση προσφέροντας σχεδόν δέκα φορές υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων οι οποίοι θα φτάνουν μέχρι και τα 1 Tbps. Υπόσχεται επίσης δέκα εκατομμύρια συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, πυκνότητα σύνδεσης που είναι 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του 5G. Μεγάλη αξιοπιστία (σχεδόν πάνω από 99.99999%) και λιγότερο από 0,1 χιλιοστά του δευτερολέπτου καθυστέρηση. Υψηλότερη φασματική και ενεργειακή απόδοση, αντίστοιχα. Έως 10 GHz εύρος ζώνης σε συχνότητες κυμάτων χιλιοστών (mmWave). και 100 GHz σε THz και συχνότητες ορατού φωτός και ακρίβεια τοποθέτησης σε επίπεδο εκατοστών και υποστήριξη υψηλής κινητικότητας έως 1000 χιλιόμετρα ανά ώρα.

1.1 Σκοπός της εργασίας

Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του 5G και να βελτιστοποιηθεί πλήρως το σύστημα, έγιναν προσπάθειες ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα του και να μειωθεί το Latency. Καθοριστικό ρόλο σε αυτό είχαν οι παρακάτω τεχνολογίες.

- Massive MIMO (mMIMO), μια τεχνολογία που βασίζεται στην χρήση μεγάλου αριθμού κεραιών οι οποίες είναι κατανομημένες σε συστοιχίες.
- mmWave επικοινωνίες, με σκοπό την αξιοποίηση του φάσματος σε μεγαλύτερες συχνότητες.

- Ultra dense networks(UDNs), πρόκειται για εξαιρετικά μικρές κυψέλες οι οποίες μπορούν να προσφέρουν μεγάλο εύρος υπηρεσιών σε χρήστες σε μια μικρή περιοχή.

Οι παραπάνω συνδυασμοί τεχνολογιών μπορούν να επιφέρουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και να μειώσουν τα προβλήματα μετάδοσης, αλλά και τις διαλείψεις που δημιουργούνται λόγω του multipath. Πέρα από το 5G, οι παραπάνω τεχνολογίες μπορούν να εξελιχθούν περαιτέρω και να χρησιμοποιηθούν και στα ασύρματα δίκτυα 6^{ης} γενιάς. Συγκεκριμένα η τεχνολογία των mMIMO μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω σε ακόμα μεγαλύτερες συστοιχίες κεραιών, οι οποίες σε συνδυασμό με την αξιοποίηση του φάσματος σε μεγαλύτερες συχνότητες, της τάξεως των THz, θα είναι σε θέση να δημιουργήσουν πολύ μικρές κυψέλες για ακόμα πυκνότερα δίκτυα. Καθώς χρειάζεται αλλαγή στην φιλοσοφία σχεδιασμού του ασύρματου δικτύου σε κάτι πλήρως παραμετροποιήσιμο από άκρη-σε-άκρη, συμπεριλαμβανομένου και του ασύρματου περιβάλλοντος, ώστε να στοχεύσουμε πέρα από το 5G, ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η παρουσίαση και ανάλυση των τεχνολογιών που αφορούν τις ολογραφικές επικοινωνίες και συγκεκριμένα τα ολογραφικά MIMO. Πρόκειται για νέες αλλά και προϋπάρχουσες τεχνολογίες οι οποίες στοχεύουν στην επίλυση πολλών πρακτικών προβλημάτων που παρουσιάζονται στα mMIMO και MIMO συστήματα και παρουσιάζουν πολύ θετικά αποτελέσματα. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ανάλυση στις τεχνολογίες έξυπνων κεραιών και στα MIMO συστήματα, τα οποία ήδη χρησιμοποιούνται στα δίκτυα 4ης και 5ης γενιάς. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση των ολογραφικών επικοινωνιών της ολογραφίας ενώ αναλύονται διεξοδικά και τα ολογραφικά MIMO στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ανάλυση στα θεωρητικά όρια και στις παραμέτρους επίδοσης των ολογραφικών MIMO ενώ στο Τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα μοντέλο καναλιού για τα ολογραφικά MIMO που βασίζεται στις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Μέσω του μοντέλου αυτού θα υπολογίσουμε και τα λεγόμενα DoF(Degrees of Freedom) ώστε να ερευνήσουμε και τα πραγματικά όρια του συστήματος σε αριθμό κεραιών

1.2 Τεχνολογίες έξυπνων κεραιών

Για την υλοποίηση των ασύρματων δικτύων 4^{ης} γενιάς καθοριστικό ρόλο είχε η ανάπτυξη τεχνολογιών για έξυπνες κεραιές. Πρόκειται για συστοιχίες κεραιών, οι οποίες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους και χρησιμοποιούν αλγορίθμους ψηφιακής επεξεργασίας σήματος για να υπολογίσουν την κατεύθυνση του σήματος ενός τερματικού(User Equipment). Έπειτα η κατεύθυνση ή τοποθεσία χρησιμοποιείται από την κεραιά ώστε να εστιάσει την ισχύ της προς αυτό το τερματικό, δημιουργώντας έτσι μια κατευθυντική δέσμη. Η βασικότερη υλοποίηση της τεχνολογίας έξυπνων κεραιών είναι τα συστήματα MIMO(multiple-input-multiple-output). Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες οι οποίες παραθέτουμε επιγραμματικά παρακάτω [1].

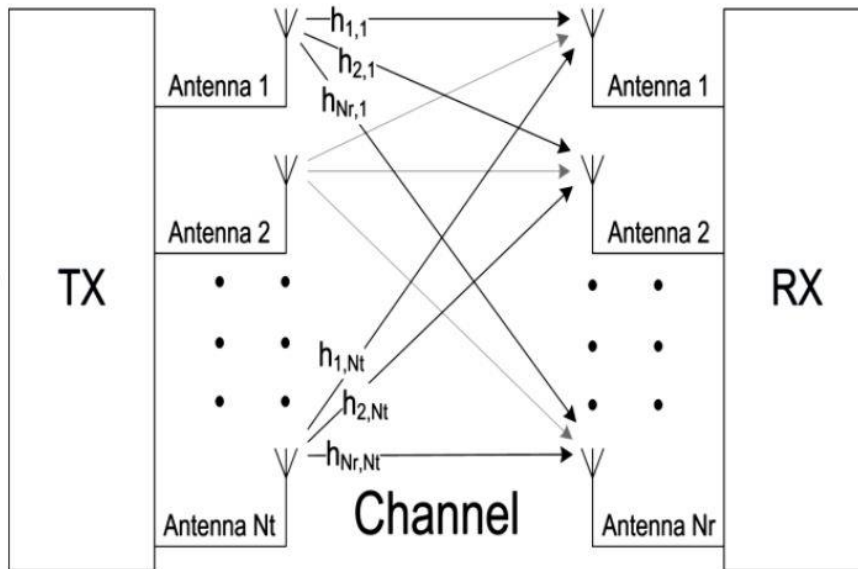
- **A) SISO(Single-input-Single-output):** Πρόκειται για την απλούστερη κατηγορία καθώς μια κεραιά για εκπομπή και μία για λήψη. Δεν υπάρχει ποικιλομορφία και το κανάλι είναι περιορισμένο και επηρεάζεται από διαλείψεις.
- **B) SIMO(Single-input-Multiple-output):** Πρόκειται για μια μορφή MIMO στην οποία υπάρχει μια κεραιά εκπομπής και πολλαπλές κεραιές για λήψη. Με την συγκεκριμένη τεχνική επιτυγχάνεται ποικιλομορφία στο δέκτη και χρησιμοποιείται κυρίως για να λαμβάνει ο δέκτης σήματα από ανεξάρτητες πηγές με σκοπό τον περιορισμό των παρεμβολών και των διαλείψεων. Το μειονέκτημα του συγκεκριμένου σχήματος είναι ότι όλη η επεξεργασία πρέπει να γίνεται στον δέκτη.
- **Γ) MISO(Multiple-input-Single-output):** Γνωστή και σαν ποικιλομορφία στον πομπό, σε αυτή την τεχνική πολλαπλές κεραιές χρησιμοποιούνται για μετάδοση ενώ η μοναδική κεραιά που

χρησιμοποιείται για λήψη θα λάβει την καλύτερη έκδοση του σήματος. Το πλεονέκτημα εδώ είναι ότι οι μονάδα επεξεργασίας μεταφέρεται στο πομπό με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους του δέκτη.

- **Δ) MIMO(Multiple-input-Multiple-output):** Σε αυτήν την τεχνική πολλαπλές κεραιές χρησιμοποιούνται για την εκπομπή αλλά και την λήψη πετυχαίνοντας έτσι την δημιουργία πολλών διαφορετικών μονοπατιών απο την μια κεραιά στην άλλη.

1.3 Συστήματα MIMO και ιστορικά στοιχεία

Η βασική ιδέα των συστημάτων MIMO είναι σχεδόν η ίδια με αυτή των τεχνικών απόκλισης. Τα συστήματα MIMO μεταδίδουν διαφορετικό σήμα από κάθε κεραιά εκπομπής, ούτως ώστε από την διάταξη των κεραιών λήψης να λαμβάνεται μία υπέρθεση όλων των εκπεμπόμενων σημάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το ίδιο σήμα να λαμβάνεται πολλές φορές σε διαφορετικές θέσεις, με σχεδόν μηδενική πιθανότητα όλα τα ληφθέντα αντίγραφα του αρχικού σήματος, να έχουν υποστεί διάλειψη. Με την μέθοδο αυτή, ουσιαστικά το τελικό αποτέλεσμα αποτελεί μια ζεύξη, κατά την οποία το λαμβανόμενο σήμα έχει μεγαλύτερο σηματοθορυβικό λόγο. Τα συστήματα MIMO, όχι μόνο βελτιώνουν την επικοινωνία, όπως και οι τεχνικές απόκλισης, αλλά αυξάνουν σε σημαντικό βαθμό και την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων, μέσω της τεχνικής που ονομάζεται χωρική πολυπλεξία (Spatial Multiplexing). Η τεχνική αυτή, ορίζει την διάνοξη πολλών παράλληλων και διακριτών καναλιών, μεταξύ των δύο άκρων της τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης, πράγμα το οποίο μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την χρήση πολλών κεραιών εκατέρωθεν της επικοινωνίας. Έτσι δημιουργούνται ανεξάρτητα μονοπάτια επικοινωνίας, τα οποία μεταφέρουν διαφορετικά δεδομένα. Η ιδέα της χρήσης πολλαπλών κεραιών για τα κυψελωτά δίκτυα, μελετήθηκε απο τον G.J Foschini στα μέσα της δεκαετίας του 1990, με σκοπό την επίτευξη της βελτίωση της κατευθυντικότητας του σταθμού βάσης κατά την εκπομπή και λήψη ο οποίος Αξιοποίησε αποτελέσματα απο την θεωρία πληροφορίας που αφορούσαν την χωρητικότητα του MIMO καναλιού. Η αρχιτεκτονική αυτή είναι γνωστή σαν Bell Labs layered space-time(BLAST) system. Ο όρος έξυπνη κεραιά δόθηκε στο κεραιοσύστημα του σταθμού βάσης, το οποίο μέσω του beamforming δημιουργεί μια δέσμη η οποία μπορεί να ακολουθήσει το κινητό τηλέφωνο. Οι έξυπνες κεραιές αυξάνουν το κέρδος του σήματος στην κατεύθυνση της ακτίνας, στην οποία βρίσκεται και ο δέκτης και συνάμα μειώνουν τις καταστροφικές παρεμβολές στους δέκτες που βρίσκονται σε άλλες κατευθύνσεις. Για να δημιουργηθεί η ακτίνα χρειάζεται οι κεραιές του εκπομπού να απέχουν μια συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους. Αυτή η απόσταση είναι συνήθως ίση με το μίσο του μήκους κύματος του μεταδιδόμενου σήματος ώστε να ικανοποιεί το θέωρημα δειγματοληψείας Nyquist-Shannon και να αποφεύγεται η αλλοίωση. Ένας περιορισμός του beamforming, σε αστικό περιβάλλον, είναι η σκέδαση του κατευθυντικού σήματος λόγω των κτηρίων και των κινούμενων αντικειμένων. Σαν αποτέλεσμα η επικοδομική παρεμβολή των ακτίνων παραμορφώνεται με αποτέλεσμα το κέρδος του σήματος να χάνεται. Στα τέλη του 1990 αυτό το μειονέκτημα μετατράπηκε σε πλεονέκτημα με την χρήση χωρικά χρονικών κωδίκων καθώς και τεχνολογίας χωρικής πολυπλεξίας. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μέσω αυτών των τεχνικών αξιοποιεί τα φαινόμενα πολλαπλής διάδοσης του σήματος στο ασύρματο περιβάλλον ώστε να αυξήσει την ρυθμαπόδοση ή να μειώσει το BER(bit error rate). Η απόσταση μεταξύ των κεραιών που συνήθως επιλέγεται σε αυτά τα συστήματα είναι μεγαλύτερη απο το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου σήματος ώστε να μειωθεί η συσχέτιση μεταξύ των MIMO καναλιων και να αυξηθεί ο βαθμός της ποικιλομορφίας. Η τεχνολογία MIMO είναι συμβατή κυρίως με κανάλια επίπεδων διαλείψεων. Σε αυτά τα κανάλια μειώνεται η τεχνολογία MIMO μειώνει την πολυπλοκότητα και την κατανάλωση ισχύος του δέκτη. Η τεχνολογία αυτή έχει πλέον πρωτυποποιηθεί με αποτέλεσμα να βρίσκεται σχεδον σε όλες τις επίγειες ασύρματες τεχνολογίες όπως το LTE και το WiFi.



Σχήμα 1.2. Σχεδιαστικό διάγραμμα συστήματος MIMO

1.3.1 Χωρική ποικιλομορφία

Κάτα την ασύρματη μετάδοση ενός σήματος απο τον πομπό στο δέκτη, λόγω των φαινομένων ανάκλασης και σκέδασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ανάλογα με το περιβάλλον, ακολουθούνται πολλές και διαφορετικές διαδρομές απο το σήμα μέχρι να φτάσει στον δέκτη. Επομένως στον δέκτη θα φτάσει πολλές φορές το ίδιο σήμα με κάποια χρονική καθυστέρηση καθώς και με διαφορετικό πλάτος και διεύθυνση διάδοσης. Με την χρήση πολλών κεραιών μπορούμε να λάβουμε όλα τα σήματα και να τα αθροίσουμε ώστε να βελτιώσουμε την ποιότητα του σήματος αλλά και να μειώσουμε τις διαλείψεις (απότομα βυθίσματα στο σήμα) καθώς στατιστικά η πιθανότητα την ίδια χρονική στιγμή να υπάρχει διάλειψη σε διαφορετικές εκδοχές του ίδιου σήματος είναι πολύ μικρή. Η τεχνική ονομάζεται χωρική ποικιλομορφία καθώς οι κεραιές είναι χωρικά διαφορετικές μεταξύ τους και αποτελεί το θεμέλιο λειτουργίας των MIMO συστημάτων.

1.3.2 χωρική πολυπλεξία

Η χωρική πολυπλεξία είναι μια MIMO τεχνική μετάδοσης, στην οποία ανεξάρτητα και ξεχωριστά κωδικοποιημένα σήματα, τα οποία λέγονται ροές, μεταδίδονται απο πολλαπλές κεραιές. Σε αντίθεση με την χωρική ποικιλομορφία η χωρική πολυπλεξία απαιτεί πολλαπλές κεραιές και στον πομπό αλλά και στον δέκτη και ο πομπός δεν χρειάζεται να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά του καναλιού. Μέσω αυτής της λειτουργίας, η οποία ορίζεται και σαν μέγιστος βαθμός χωρικής πολυπλεξίας, η χωρητικότητα είναι $N_s = \min(N_t, N_r)$, όπου το N_s είναι ο συνολικός αριθμός κεραιών ενώ το N_t και το N_r είναι οι αριθμοί των κεραιών στον πομπό και στον δέκτη αντίστοιχα. Εάν χρησιμοποιηθεί ένας γραμμικός δέκτης αυτό σημαίνει ότι N_s ροές μπορούν να μεταδοθούν παράλληλα αυξάνοντας την φασματική απόδοση κατά N_s . Εάν οι μεταδιδόμενες ροές φτάσουν στο δέκτη με διαφορετικά χωρικά αποτυπώματα, ο δέκτης μπορεί να τα διαχωρίσει, το οποίο οδηγεί σε αύξηση της χωρητικότητας του

καναλιού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χωρική πολυπλεξία βελτιώνει καλύτερα την χωρητικότητα όταν ο σηματοθορυβικός λόγος(SNR) είναι υψηλός.

1.3.3 Beamforming

Το beamforming είναι μια τεχνική επεξεργασίας σήματος η οποία χρησιμοποιείται ώστε να ελέγξει την κατευθυντικότητα του μοτίβου ακτινοβολίας σε ένα σύστημα κεραιών. Κατά την διάρκεια λήψης ενός σήματος, το beamforming μπορεί να αυξήσει την ευαισθησία του δέκτη προς την κατεύθυνση του επιθυμητού σήματος και να την μειώσει προς τις κατευθύνσεις που υπάρχουν παρεμβολές και θόρυβος. Επίσης μπορεί να αυξήσει την ακτινοβολούσα ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος σε μια επιθυμητή κατεύθυνση.

1.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης των MIMO

Αν αξιολογήσουμε την απόδοση των συστημάτων MIMO καταλήγουμε στα εξής πλεονεκτήματα κατά την χρήση τους. Ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνεται με την βοήθεια της χωρικής πολυπλεξίας και των πολλαπλών κεραιών μας βοηθάει να επιτύχουμε υψηλή ρυθμαπόδοση τόσο στο Uplink όσο και στο Downlink. Η επίτευξη χαμηλού BER(bit error rate) λόγω των προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος που εφαρμόζονται από τις πολλαπλές κεραιές είναι πολύ βοηθητική για το σύστημα. Η επίτευξη αυξημένης κάλυψης σε μια κυψέλη λόγω της χρήσης του beamforming. Η μείωση των διαλείψεων μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Λόγω της χρήσης των τεχνικών χωρικής ποικιλομορφίας. Τέλος βελτιώνεται επίσης η ασφάλεια του φυσικού επιπέδου καθώς είναι πολύ πιο δύσκολο να αποσπάσει κάποιος πληροφορία λόγω των διαφορετικών αλγορίθμων, κωδίκων και ροών του συστήματος. Παρόλα αυτά υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα στην χρήση των συστημάτων MIMO. Οι πόροι που απαιτούνται σε εξοπλισμός αλλά και η πολυπλοκότητα του όλο συστήματος είναι σαφώς πολύ μεγαλύτερα από ότι ενα χρησιμοποιούσαμε μόνο μια κεραία για τον πομπό και μια για τον δέκτη. Κάθε κεραία χρειάζεται διαφορετικές μονάδες RF για να λειτουργήσει και να επεξεργαστεί το σήμα και χρειάζεται επίσης και πολύ ισχυρούς επεξεργαστές ώστε να μπορούν να υπολογιστούν οι περίπλοκοι αλγόριθμοί του συστήματος. Αυτή η άυξηση σε εξοπλισμό επιφέρει και αύξηση στην κατανάλωση του συστήματος, η μπαταρίες των κινητών για παράδειγμα αδειάζουν γρηγορότερα λόγω της απαίτησης σε ισχύ. Τέλος το κόστος του εξοπλισμού επίσης κατατάσσεται στα μειονεκτήματα καθώς όσο μεγαλύτερο το σύστημα τόσο αυξάνεται και το κόστος του.

1.4 Συστήματα mMIMO (massive MIMO)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα συστήματα MIMO αποτελούν, πλέον, αναπόσπαστο κομμάτι των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την επίτευξη υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης και φασματικής απόδοσης. Παρόλα αυτά ενώ η MIMO τεχνολογία βρίσκεται σε κάθε 4G τηλεπικοινωνιακό σύστημα, χρειάζεται βελτιώσεις ώστε να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων 5^{ης} γενιάς, καθώς εκτιμάται ότι δεν θα μπορεί να αντέξει τον αυξημένο αριθμό διασυνδεδεμένων συσκευών και τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που υπόσχεται το 5G. Την βελτίωση αυτή έρχεται να δώσει η τεχνολογία massive MIMO(mMIMO) η οποία υπόσχεται να υπερκαλύψει την απαίτηση σε ακόμα υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης και σε

χρήστες. Η τεχνολογία mMIMO ουσιαστικά ομαδοποιεί μεγάλο αριθμό κεραιών σε ένα σταθμό βάσης ώστε να μπορέσει να εξυπηρετήσει μεγάλο αριθμό χρηστών ταυτόχρονα. Καθώς ο αριθμός των κεραιών αυξάνεται επιτυγχάνεται ακόμα καλύτερο beamforming καθώς συγκεντρώνουν την ενέργεια σε ακόμα μικρότερη περιοχή προς τον χρήστη βελτιστοποιώντας την φασματική απόδοση και την ρυθμαπόδοση του συστήματος.

Στα πλεονεκτήματα των mMIMO περιλαμβάνονται:

- *Αυξημένη φασματική απόδοση*
- *Υψηλή αξιοπιστία συνδέσεων*
- *Ανθεκτικότητα σε παρεμβολές*
- *Μεγαλύτερη κάλυψη*

Ενώ στα μειονεκτήματα έχουμε:

- *Κοστός σε ενέργεια*
- *Μεγεθός συστήματος*
- *Δυσκολία πρακτικής εφαρμογής*

Όπως βλέπουμε και παραπάνω, παρόλο που έχουμε αρκετά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας mMIMO, παρουσιάζονται αρκετά προβλήματα στην πρακτική εφαρμογή τους, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η συστοιχία των κεραιών του συστήματος τόσο μεγαλύτερο είναι και το κόστος σε ενέργεια το μέγεθος του συστήματος αλλά και η πολυπλοκότητα. Πραγματικά το οποίο το κάνει δύσκολο να ενσωματωθεί και να συντηρηθεί. Επίσης η συγκεκριμένη τεχνολογία υπόσχεται θεωρητικά όρια που αγγίζουν τον άπειρο αριθμό κεραιών όμως είναι πρακτικά αδυνατό να επιτευχθούν. Θα πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψιν μας και το ασύρματό περιβάλλον, το οποίο αποτελεί έναν μη διαχειρίσιμο παράγοντα και αν δεν βελτιστοποιηθεί, μειώνει την αποδοτικότητα της ζεύξης. Ενώ τα mMIMO ήδη προσφέρουν κάποιους τρόπους βελτιστοποίησης του ασύρματου καναλιού, παρουσιάζουν προβλήματα όσο το σύστημα μεγαλώνει καθώς το περιβάλλον ασύρματης διάδοσης αγνοεί την επικοινωνία μέσα στο σύστημα ενώ το μοντέλο του καναλιού παραμένει πιθανολογικό όταν θα έπρεπε να είναι στοχαστικό. Επομένως για να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο η τεχνολογία των MIMO και mMIMO συστημάτων και να μπορέσουν να καληφθούν οι απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων 6^{ης} γενιάς σε υψηλό ρυθμό μετάδοσης, χαμηλές καθυστερήσεις και υψηλή χωρητικότητα χρειάζεται μια νέα καινούργια τεχνολογία που θα επανεφεύρει τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τόσο την τεχνολογία κεραιών αλλά και το ασύρματο κανάλι ώστε να στοχεύσουμε πέρα από το mMIMO συστήματα.

Κεφάλαιο 2^ο

Ολογραφία και ολογραφικές επικοινωνίες

2.1 Τα όρια της κλασσικής διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση σε ταχύτερες και αξιόπιστες ασύρματες επικοινωνίες ωθεί την σημερινή ραδιο-τεχνολογία στα όρια της. Τα ασύρματα ραδιοσυστήματα 5^{ης} γενιάς, αναμένεται να αξιοποιήσουν πλήρως την τεχνολογία των MIMO ώστε να μπορέσουν να εξυπηρετήσουν μεγάλο αριθμό χρηστών σε μια περιοχή. Όμως για τα ασύρματα δίκτυα 6^{ης} γενιάς υπάρχουν αυστηρότερες απαιτήσεις αναφορικά με τον ρυθμό μετάδοσης το εύρος ζώνης, την χωρητικότητα αλλά και την αξιοπιστία των συστημάτων, επομένως για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις αυτές θα χρειαστεί ένας μεγαλύτερος αριθμός απο κεραίες στο σύστημα ωθώντας την σχεδιαστική κατεύθυνση προς τα συστήματα mMIMO σε συνδυασμό με υψηλότερες συχνότητες όπου μεγαλύτερο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο. Παρόλα αυτά η χρήση μεγαλύτερων συστοιχιών κεραιών σε συνδυασμό με υψηλότερες συχνότητες θέτει νέες προκλήσεις, καθώς τα κλασσικά μοντέλα τα οποία βασίζονται στην μετάδοση η/μ κυμάτων στην περιοχή μακρινού πεδίου (περιοχή Fraunhofer) αποτυγχάνουν.

Η περιοχή Fraunhofer ή περιοχή μακρινού πεδίου αποτελεί την μια απο τις τρεις περιοχές που περιτριγυρίζουν μια κεραία. Οι άλλες δύο είναι, η ακτινοβολούσα περιοχή κοντινού πεδίου ή περιοχή Fresnel και η αντιδρούσα περιοχή κοντινού πεδίου. Στην περιοχή του μακρινού πεδίου το μοτίβο ακτινοβολίας της κεραίας δεν αλλάζει σχήμα ανάλογα με την απόσταση R στην οποία εκπέμπεται το κύμα. Επίσης το μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο του κύματος είναι ορθογώνια μεταξύ τους και με την κατεύθυνση διάδοσης, με αποτέλεσμα το κύμα να θεωρείται επίπεδο (plane wave). Εάν η μέγιστη γραμμική διαστάση μιας κεραίας είναι D και το μήκος κύματος λ , τότε θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω τρεις σχέσεις ώστε να λειτουργεί η κεραία στην περιοχή Fraunhofer.

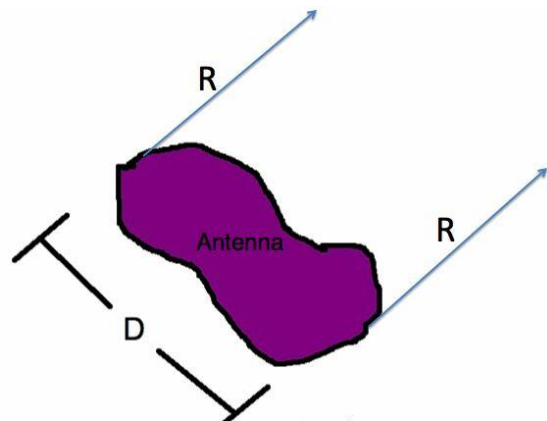
$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

$$R \gg D \quad (2)$$

$$R \gg \lambda \quad (3)$$

Όπου το σύμβολο \gg σημαίνει πολύ μεγαλύτερο και θεωρείται ότι ισχύει όταν το αριστερό μέρος είναι δέκα φορές μεγαλύτερο ή και περισσότερο απο το δεξιό μέρος. Η πρώτη και η δεύτερη σχέση βεβαιώνουν ότι η ισχύς η οποία ακτινοβολείται σε μια κατεύθυνση απο διαφορετικά μέρη της κεραίας είναι παράλληλη όπως φαίνεται και απο την σχήμα 2.0. Με αυτό διασφαλίζεται ότι τα διαδιδόμενα κύματα θα συμπεριφέρονται σαν επίπεδα. Τέλος δίπλα στην ακτινοβολούσα κεραία υπάρχουν αντιδραστικά πεδία απο την αντιδρούσα περιοχή κοντινού πεδίου, των οποίων το μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο εξασθενεί ανάλογα με την απόσταση R , η τρίτη σχέση διασφαλίζει

ακριβώς αυτό ότι δηλαδή δεν θα υπάρχουν επιπλέον μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία απο την αντιδρούσα περιοχή κοντινού πεδίου προς την περιοχή Fraunhofer.



Σχήμα 2.0 οι ακτίνες απο οποιοδήποτε σημείο της κεραίας είναι παραλλήλες στην περιοχή Fraunhofer

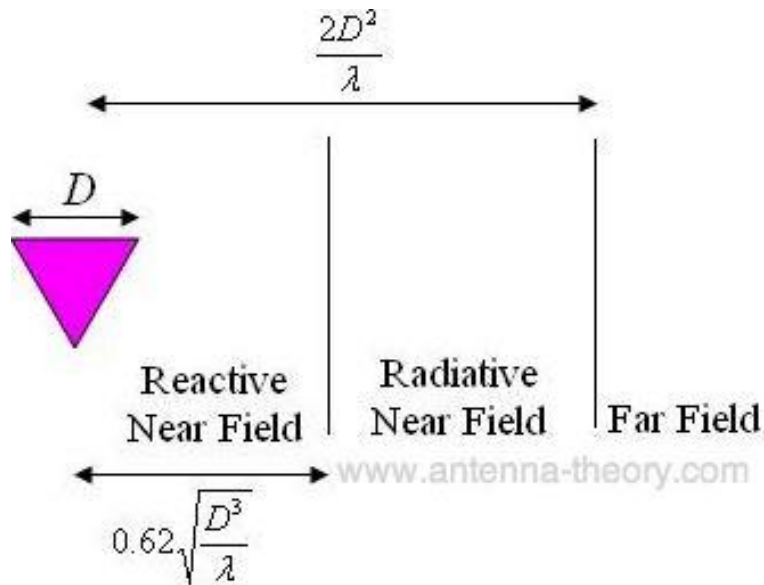
Σε άμεση γεινίαση με την κεραία έχουμε την αντιδρούσα περιοχή κοντινού πεδίου. Σε αυτή την περιοχή τα πεδία είναι κυρίως αντιδραστικά, πράγμα που σημαίνει ότι το μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο είναι εκτός φάσης κατά 90 μοίρες μεταξύ τους. Επομένως το όριο της περιοχής δίνεται απο την παρακάτω σχέση

$$R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (4)$$

Τέλος η ακτινοβολούσα ισχύ κοντινού πεδίου ή περιοχή Fresnel, είναι η περιοχή ανάμεσα στην ζώνη κοντινού και μακρινού πεδίου. Σε αυτή την περιοχή τα αντιδραστικά πεδία δεν κυριαρχούν, αντιθέτως τα ακτινοβολούντα πεδία αρχίζουν να εμφανίζονται και δεν έχουμε διάδοση επίπεδου κύματος αλλά σφαιρικού. Σε αυτή την περιοχή όμως το μοτίβο ακτινοβολίας της κεραίας ποικίλει ανάλογα με την απόσταση. Η περιοχή δίνεται απο την παρακάτω σχέση.

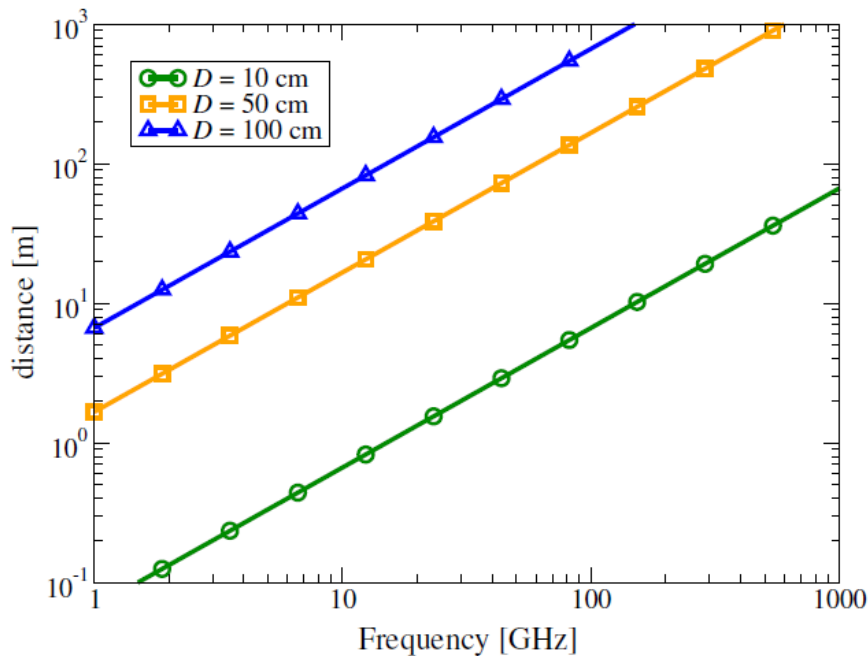
$$0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} < R < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (5)$$

Επίσης απο την σχέση (5) παρατηρούμε ότι αυτή η περιοχή μπορεί και να μην υπάρχει αναλόγως την τιμή που θα πάρει το **D**. Τέλος και οι τρεις περιοχές απεικονίζονται στην παρακάτω σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1. Απεικόνιση των πεδίων μιας κεραίας με μέγιστο μέγεθος διάστασης, D

Απο τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, κατά την κλασική διάδοση, στην περιοχή μακρινού πεδίου η ραδιοζεύξη είναι πολύ μεγαλύτερη σε μήκος απο την κεραία εκπομπής ώστε να επιτευχθεί η διάδοση του επίπεδου κύματος. Αντιστρόφως όταν το μέγεθος της κεραίας είναι συγκρίσιμο με την απόσταση της ζεύξης τότε η διάδοση του κύματος γίνεται μέσα στην περιοχή κοντινού πεδίου της κεραίας (περιοχή Fresnel). Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.2.) απεικονίζεται το όριο μεταξύ της περιοχής Fresnel και την περιοχής Fraunhofer σαν συνάρτηση της συχνότητας λειτουργίας της κεραίας λαμβάνοντας υπόψιν και το μέγεθος της κεραίας. Το χαμηλότερο κομμάτι του διαγράμματος αντιστοιχεί στην περιοχή Fresnel ενώ το υψηλότερο κομμάτι στην περιοχή Fraunhofer. Όπως βλέπουμε και απο το διάγραμμα, όταν κεραίες, οι οποίες έχουν μέγεθος μεταξύ του 1 cm και των 10 cm λειτουργούν σε πολύ υψηλές συχνότητες, οι αποστάσεις διάδοσης μέχρι τα 100 m βρίσκονται μέσα στην ζώνη Fresnel, με αποτέλεσμα να μην έχουμε διάδοση επίπεδου κύματος αλλά σφαιρικού. Επομένως η λειτουργία μιας κεραίας κάτω απο το όριο Fraunhofer απαιτεί νέα σχεδιαστικά μοντέλα για τους υπολογισμούς. Απαιτείται λοιπόν αλλαγή στην φιλοσοφία σχεδιασμού κεραιών, ώστε να μπορέσουμε να αξιοποιήσουμε πλήρως τα χαρακτηριστικά που παρέχονται απο τα διάφορα είδη ηλεκτρομαγνητικής μετάδοσης, αλλά και για να πλησιάσουμε τα όρια του ασύρματου καναλιού, πρέπει να χειραγωγήσουμε πλήρως το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται απο την κεραία. Αυτή είναι η βασική ιδέα των Ολογραφικών επικοινωνιών.



Σχήμα 2.2. Όριο της περιοχής Fraunhofer σαν συνάρτηση της συχνότητας λειτουργίας και του μεγέθους της κεραίας

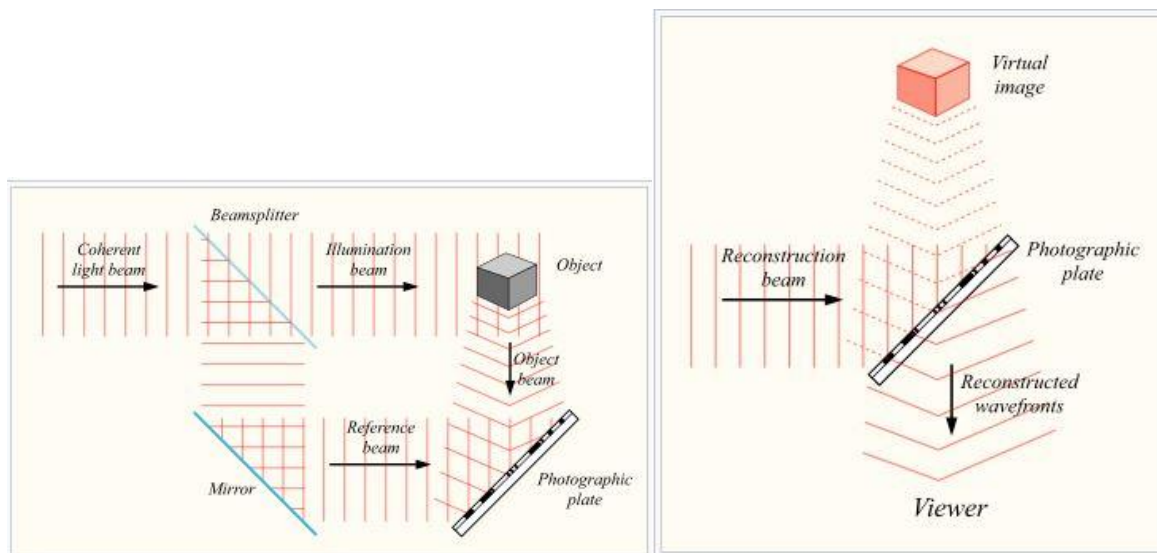
2.2 Τι είναι οι ολογραφικές επικοινωνίες;

Οι ολογραφικές επικοινωνίες, χρησιμοποιώντας κεραίες που αξιοποιούν την Ολογραφία, επιτυγχάνουν την πλήρη χειραγώγηση του ασύρματου περιβάλλοντος. Η ολογραφική ικανότητα μιας κεραίας εκπομπής στην ζώνη κοντινού πεδίου βασίζεται στην δυνατότητα κατανομής της πυκνότητας του ρεύματος, που την διαρέει, στην επιφάνεια της προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη ευελιξία στον σχεδιασμό του ακτινοβολούντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (πυκνότητα, πλάτος, κατευθυντικότητα κλπ). Αντίστοιχα η ολογραφική ικανότητα στην πλευρά της κεραίας λήψης βασίζεται στην δυνατότητα στάθμισης του προσκρουόμενου ηλεκτρικού πεδίου συμφωνά με μια επιθυμητή λειτουργία, με αποτέλεσμα την χειραγώγηση του τρόπου που λαμβάνει την πληροφορία η κεραία χωρίς να χρειαστεί να αλλάξουμε το φυσικό της σχήμα. Απο τεχνολογικής πλευράς, η εμφάνιση και η ανάπτυξη πλήρως προγραμματιζόμενων μετα-υλικών (meta materials) και μετα-επιφανειών (meta surfaces) και η ευρεία εφαρμογή τους στα ασύρματα δίκτυα 5^{ης} και 6^{ης} γενιάς θα αποτελέσει μια εφικτή λύση στην υλοποίηση των ολογραφικών ραδιοσυστημάτων. Τα μετα-υλικά είναι μια καινούργια κατηγορία υλικών, φτιαγμένα τεχνητά ώστε να μπορούν να αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία με τρόπους που δεν υπάρχουν στην φύση. Αποτελούνται από μεταλλικές ή διηλεκτρικές δομές, μικρότερες από ένα μήκος κύματος. Οι μικροδομές αυτές μπορούν να καθορίσουν την ηλεκτρική και μαγνητική συμπεριφορά του μετά-υλικού επιτυγχάνοντας έτσι την επιθυμητή λειτουργικότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όσον αφορά το πλάτος την φάση και την κατευθυντικότητα του. Τα μετα-υλικά μπορούν να κατανεμηθούν σε δισδιάστατους σχηματισμούς και να δημιουργήσουν μετα-επιφάνειες οι οποίες είναι πλήρως προγραμματιζόμενες και μπορούν να ενσωματωθούν οπουδήποτε. Η ιδέα αυτή έχει προσελκύσει αρκετό ερευνητικό ενδιαφέρον καθώς οι διατάξεις που χρησιμοποιούν τέτοιες δομές ονομάζονται ευφυές προγραμματιζόμενες επιφάνειες

(intelligent reconfigurable surfaces, IRS), οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν τεχνητό multipath ή επιπρόσθετα κανάλια επικοινωνίας μεταξύ του πομπού και του δέκτη αυξάνοντας την κάλυψη αλλά και τα degrees of freedom(DoF) της ασύρματης επικοινωνίας. Όταν χρησιμοποιούνται σαν ενεργές κεραιές τα IRS μπορούν να αυξήσουν τις σχεδιαστικές παραμέτρους, επιτρέποντας την παραμετροποίηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με μεγάλη ευελιξία. Όταν οι δομές αυτές είναι μεγάλου μεγέθους ονομάζονται large intelligent surfaces(LIS). Λόγω του μεγάλου τους μεγέθους, η διάδοση των ραδιοκυμάτων σε υψηλές συχνότητες, της τάξεως των THz γίνεται στην περιοχή Fresnel αντί της περιοχής Fraunhofer καθιστώντας τα κλασικά μοντέλα διάδοσης επίπεδων κυμάτων που βασίζονται στην περιοχή Fraunhofer άχρηστα.

2.3 Ολογραφία

Ο Ούγγρο-Βρετανός φυσικός Dennis Gabor τιμήθηκε με βραβείο Nobel το 1971, για την εφεύρεση και ανάπτυξη της ολογραφικής μέθοδου. Αν και η τεχνολογία αναπτύχθηκε το 1940, από αυτόν, με σκοπό την βελτίωση των μικροσκοπίων ηλεκτρονίων, όταν αναπτύχθηκαν τα λέιζερ, την δεκαετία του 60, η τεχνολογία μπόρεσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές με διαφορετικά κύματα. Η βασική αρχή της ολογραφίας είναι να χρησιμοποιεί το μοτίβο παρεμβολής που δημιουργείται από τα κύματα φωτός για να συλλαμβάνει τις τρισδιάστατες πληροφορίες ενός αντικειμένου. Για να γίνει αυτό, ένα λέιζερ χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει μια συνεκτική δέσμη φωτός που χωρίζεται σε δύο μέρη: τη δέσμη αντικειμένου και τη δέσμη αναφοράς. Η δέσμη του αντικειμένου κατευθύνεται προς το αντικείμενο που απεικονίζεται και διασκορπίζεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Μέρος του σκεδασμένου φωτός στη συνέχεια ανακλάται σε ένα ολογραφικό φιλμ και παρεμβαίνει στη δέσμη αναφοράς. Αυτό το μοτίβο παρεμβολής καταγράφεται στο φιλμ ως μια σειρά από κρόσια. Όταν το φιλμ φωτίζεται από μια δέσμη λέιζερ, το μοτίβο παρεμβολής προκαλεί την ανακατασκευή της δέσμης του αντικειμένου στην αρχική της τρισδιάστατη μορφή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια ολογραφική σχήμα που φαίνεται να επιπλέει στο χώρο και μπορεί να προβληθεί από διαφορετικές γωνίες. Η ολογραφία έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνικές απεικόνισης, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητάς της να συλλαμβάνει τις πλήρεις τρισδιάστατες πληροφορίες ενός αντικειμένου και την αντοχή της σε παραμόρφωση και υποβάθμιση. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως ολογράμματα ασφαλείας, ολογραφικές συσκευές αποθήκευσης και ολογραφικές οθόνες.



Σχήμα 2.3. Διαδικασία ολογραφίας

2.4 Κατηγορίες ολογραφίας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η βασική αρχή της ολογραφίας είναι η καταγραφή μια παρεμβολής σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και έπειτα η ανασύνθεση της σαν ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Ενώ η αρχική τεχνική πραγματοποιήθηκε με ακτίνες-Χ για την δημιουργία εικόνων, σήμερα υπάρχουν 3 κατηγορίες τεχνικών ολογραφίας.

A) Οπτική ολογραφία

Αφορά την ολογραφία που πραγματοποιείται μέσω της οπτικής τεχνολογίας. Ουσιαστικά χρησιμοποιώντας μια δέσμη λέιζερ, η οποία αφού διαχωριστεί στα δύο από έναν οπτικό διαχωρητή, προσπίπτει σε ένα αντικείμενο ενώ η δεύτερη σε ένα καθρέπτη. Έπειτα και οι δύο δέσμες προσπίπτουν σε ένα φωτογραφικό φιλμ, βρισκόμενες σε υπέρθεση, ώστε να γίνει η καταγραφή του ολογράματος. Για την αναδόμηση του ολογράματος θα πρέπει πάλι η δέσμη αναφοράς να προσπίψει πάνω στο φιλμ ώστε να αναδομηθεί η σχήμα και να εμφανιστεί το ολόγραμμα. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί αρκετό οπτικό εξοπλισμό και χρειάζεται και ένα πραγματικό αντικείμενο αναφοράς για να λειτουργήσει.

B) Ολογραφία μέσω υπολογιστή

Με την βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών αλλά και των χωρικών διαμορφωτών του φωτός, δημιουργήθηκε η ολογραφία μέσω υπολογιστή η οποία μπορεί να λύσει τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην οπτική ολογραφία. Αντι για την καταγραφή και αναδόμηση του ολογράματος με οπτικό τρόπο η ολογραφία μέσω υπολογιστή χρησιμοποιεί υπολογισμούς που πραγματοποιούνται από ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή. Με τον συγκεκριμένο μηχανισμό όχι μόνο μειώνεται ο απαραίτητος εξοπλισμός αλλά εξαφανίζεται και η ανάγκη για ένα πραγματικό αντικείμενο αναφοράς καθώς μπορεί να δημιουργηθεί μια προσομοίωση του μέσω του υπολογιστή.

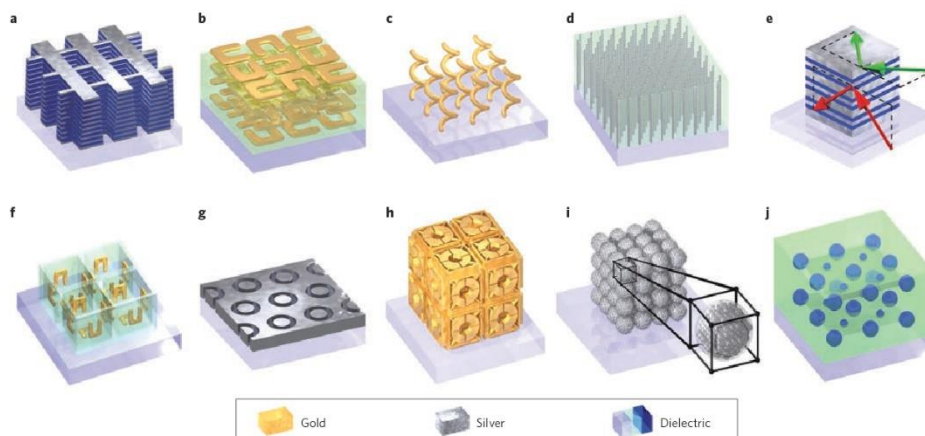
Γ) Ηλεκτρομαγνητική ολογραφία

Συνδυάζοντας την ολογραφία με τις τεχνολογίες κεραιών μπορούμε να καταγράψουμε και να ανακατασκευάσουμε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα σαν ολόγραμμα, η τεχνική αυτή αποτελεί το θεμέλιο των ολογραφικών επικοινωνιών. Δυο υλοποιήσεις υπάρχουν εδώ. Η μια ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική ολογραφία μέσω κεραίας διαρρέοντος κύματος, όπου μια πηγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αντικαθιστά το λέιζερ ή τον υπολογιστή και το διάφραγμα μιας κεραίας (η αλλιώς το ολογραφικό MIMO όπως θα δούμε αργότερα) έχει τον ρόλο του μέσου καταγραφής αντί για φιλμ ενώ η δεύτερη υλοποίηση είναι μέσω φωτονικών σφιδά-συνδεδεμένων κεραιών. Σε συνδυασμό με τις κεραίες χρησιμοποιούνται φωτο-δίοδοι, φωτο-τρανζιστορς και οπτικοί διαμορφωτές για την μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε φως. Έδω η καταγραφή και η αναδόμηση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος γίνεται στο πεδίο του φωτός.

Βάση των παραπάνω, η υλοποίηση που θα μας απασχολήσει είναι η ηλεκτρομαγνητική ολογραφία καθώς αυτή έχει τις βάσεις για την βελτίωση των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

2.5 Μετα-επιφάνειες και μετα-υλικά

Τα μετα-υλικά αποτελούν μια κατηγορία τεχνητά φτιαγμένων υλικών με ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες οι οποίες δεν υπάρχουν στην φύση. Αποτελούνται από άτομα μικρότερα από ένα μήκος κύματος, τα οποία είναι σφιδά δεμένα ώστε να σχηματίσουν δομές οι οποίες επηρεάζουν τις φυσικές τους ιδιότητες αλλά και τα χαρακτηριστικά τους. Αντίστοιχα οι μετα-επιφάνειες είναι δισδιάστατες δομές οι οποίες αποτελούνται από μεταλλικά ή διηλεκτρικά σωματίδια, τα οποία χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν και να αλλάξουν διάφορες παραμέτρους σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, όπως την φάση το πλάτος αλλά και την πόλωση του. Οι μετα-επιφάνειες έχουν μεγαλύτερο πλεονέκτημα έναντι των μετα-υλικών, όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών, καθώς η δισδιάστατη δομή τους τα καθιστά ελκυστικά για την χρήση σε πλήθωρα εφαρμογών. Αντίθετα οι δομές που κατασκευάζονται από μετα-υλικά είναι συνήθως τριδιάστατες και η δυσκολία που παρουσιάζεται στην κατασκευή τους, λόγω της περίπλοκης τριδιάστατης δομής τους αλλά και το κόστος τους, τα καθιστά ασύμφορα για χρήση σε εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών.



Σχήμα 2.4. Διάφορα μετα-υλικά και μετα-επιφάνειες

2.6 Ολογραφικά MIMO

Η ενσωμάτωση των μετα-επιφανειών και της ολογραφίας σε mMIMO συστήματα θα δημιουργήσει ένα νέο και επαναστατικό μοντέλο MIMO συστημάτων, το οποίο ονομάζεται HOLOGRAPHIC MIMO (HMIMO), για τα δίκτυα της 6^{ης} γενιάς. Η τεχνολογία αυτή ανοίκει στο ευρύτερο πλαίσιο των ολογραφικών ασύρματων επικοινωνιών και χρησιμοποιεί συστοιχίες κεραιών, οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν και σαν συνεχόμενες ενεργές επιφάνειες (aperture), για τη δημιουργία μιας δέσμης ραδιοκυμάτων που μπορεί να κατευθυνθεί προς έναν συγκεκριμένο δέκτη. Αυτή η τεχνική σχηματισμού δέσμης (beamforming) χρησιμοποιείται ήδη στα MIMO συστήματα, αλλά η ολογραφία την οδηγεί στο επόμενο επίπεδο δημιουργώντας πολλαπλές δέσμες με διαφορετικές φάσεις και πλάτη για την κωδικοποίηση πληροφοριών, των ραδιο-κυμάτων που θα μεταδωθούν, δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο ολογραφικό σχήμα. Για τη δημιουργία του ολογραφικού σχήματος, το σύστημα χρησιμοποιεί μια τεχνική που ονομάζεται χωρική διαμόρφωση (Spatial Modulation). Η χωρική διαμόρφωση περιλαμβάνει τη χαρτογράφηση των πληροφοριών που θα μεταδοθούν σε ένα σύνολο ορθογώνιων συναρτήσεων βάσης, όπως το ανάπτυγμα Fourier ή τα πολυώνυμα Zernike. Αυτές οι βασικές συναρτήσεις χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη διαμόρφωση του πλάτους και της φάσης των ραδιοκυμάτων σε κάθε κεραιά της συστοιχίας. Το μιγαδικό μοτίβο ραδιοκυμάτων σχηματίζει ένα «ολόγραμμα» που μεταφέρει τις πληροφορίες που πρέπει να μεταδοθούν. Αυτό το ολόγραμμα μπορεί να κατευθυνθεί προς έναν συγκεκριμένο δέκτη χρησιμοποιώντας τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης, οι οποίες επιτρέπουν στο σύστημα να δημιουργεί δέσμες ραδιοκυμάτων υψηλής εστίασης που μπορούν να μεταδωθούν προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της ολογραφικής ασύρματης επικοινωνίας είναι η ικανότητά της να μειώνει τις παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών ακτίνων. Χρησιμοποιώντας πολλαπλές δέσμες με διαφορετικές φάσεις και πλάτη, το σύστημα μπορεί να δημιουργήσει «μηδενικά» στο μοτίβο ακτινοβολίας όπου η ισχύς του σήματος είναι πολύ χαμηλή. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των παρεμβολών από άλλες πηγές, όπως άλλες ασύρματες συσκευές ή αντανάκλασεις από κτίρια και άλλα αντικείμενα. Υπάρχουν τρεις κύριοι λόγοι για την εφαρμογή των HMIMO. Πρώτον, ένα σύστημα συνεχούς ανοίγματος είναι ένας πιο ελκυστικός τρόπος για να επιτευχθεί υψηλή χωρική ανάλυση στις ασύρματες επικοινωνίες, από το να υπάρχει μεγάλος αριθμός απο συμβατικές διακριτές κεραιές, όπου για να λειτουργήσει η καθεμία ξεχωριστά χρειάζεται διαφορετικό υλικό και εξοπλισμό. Ο αριθμός των θυρών RF στα HMIMO μπορεί να είναι ίσος με τον αριθμό των σημάτων που είναι για χωρική πολυπλεξία. Δεύτερον, το συνεχές aperture επιτρέπει τη δημιουργία και την ανίχνευση ηλεκτρομαγνητικών κύματων με αυθαίρετα στοιχεία χωρικής συχνότητας, χωρίς ανεπιθύμητους πλευρικούς λοβούς. Με άλλα λόγια, η ίδια επιφάνεια μπορεί να αναδιαμορφωθεί για να λειτουργεί άψογα σε οποιαδήποτε φέρουσα συχνότητα καθώς η επίδραση της χωρικής αλιοποίησης που συμβαίνει όταν υπάρχουν κεραιές, σε πολύ κοντίνες μεταξύ τους, αποστάσεις ανακουφίζεται από την συνεχή ενεργό περιοχή. Τρίτον, ένα σύστημα συνεχούς χώρου είναι πολύ πιο εύκολο να αναλυθεί από ένα μεγάλης κλίμακας σύστημα διακριτού χώρου. Το όραμα είναι ότι τα HMIMOs θα μπορέσουν να ενσωματωθούν σε οποιαδήποτε επιφάνεια (σχήμα 2.5), συμπεριλαμβανομένων των επιφανειών σε κτηρία καθώς ακόμη και σε υφάσματα κάνοντας τις κεραιές αισθητικά αποδεκτές. Επίσης η χαμηλή ισχύς που καταναλώνει το σύστημα μας επιτρέπει να εξετάσουμε και τα πραγματικά όρια του συστήματος.



Σχήμα 2.5 Περιβαλλον με HMIMO

2.7 Σχεδιαστικά μοντέλα των HMIMOs

Τα HMIMOs μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάση δύο χαρακτηριστικών τους, την ισχύ που καταναλώνουν και την κατασκευαστική δομή τους.

α) Κατηγοριοποίηση με βάση την ισχύ κατανάλωσης

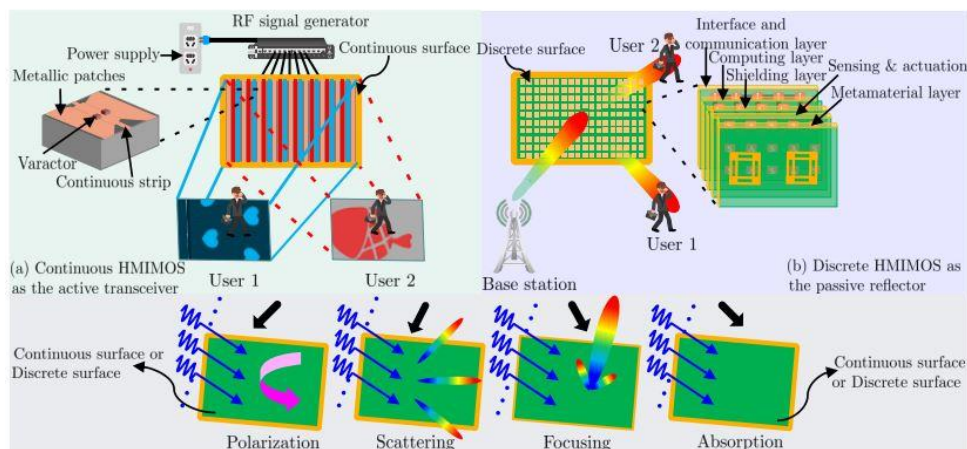
Σε ένα παραμετροποιήσιμο ασύρματο περιβάλλον, ένα HMIMO μπορεί να αξιοποιηθεί σαν πομπός, δέκτης ή ανακλαστήρας. Όταν λαμβάνει το ρόλο του πομπού, χρειάζεται να ενσωματωθούν κυκλώματα επεξεργασίας σήματος και RF μονάδες στην επιφάνεια του, σε αυτήν την περίπτωση ονομάζεται ενεργητικό HMIMO. Τα ενεργητικά HMIMOs αποτελούν την φυσική εξέλιξη των κλασικών mMIMO συστημάτων εναποθέτοντας όλο και περισσότερες κεραιές, οι οποίες ελέγχονται από λογισμικό, σε μια πεπερασμένη δισδιάστατη επιφάνεια. Μια πρακτική εφαρμογή των ενεργών HMIMOs μπορεί να είναι η ενσωμάτωση ενός άπειρου αριθμού μικροσκοπικών στοιχείο-κεραιών με αναπρογραμματιζόμενες διαδικασίες δικτύου σαν μια συνεχόμενη ενεργός περιοχή κεραιών. Η συγκεκριμένη υλοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λαμβάνει και να στέλνει τηλεπικοινωνιακά σήματα με την χρήση της ολογραφικής αρχής. Επίσης μια ακόμα υλοποίηση ενεργών HMIMOs είναι με την χρήση διακριτών φωτονικών κεραιών οι οποίες είναι οργανωμένες σε συστοιχίες και έχουν ενσωματωμένους οπτικο-ηλεκτρικούς ανιχνευτές και διαμορφωτές για την μετάδοση την μετατροπή και την διαμόρφωση του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό.

Τα παθητικά HMIMOs ή αλλιώς αναπρογραμματιζόμενες ευφυές επιφάνειες (reconfigurable intelligent surfaces) αποτελούν την δεύτερη κατηγορία καθώς συμπεριφέρονται σαν παθητικοί ανακλαστήρες ή κυματοσυλλέκτες και μπορούν να προγραμματιστούν ώστε να αλλάζουν ένα ηλεκτρομαγνητικό

πεδίο. Συγκρινωντάς τα παθητικά με τα αντίστοιχα ενεργητικά HMIMOs, διαπιστώνει κανείς ότι τα πρώτα φτιάχνονται από παθητικά στοιχεία χαμηλού κόστους τα οποία δεν χρειάζονται αποκλειστικές μονάδες ισχύος για να λειτουργήσουν, οι αισθητήρες και τα κυκλώματα τους μπορούν να τροφοδοτηθούν από μικρές μονάδες συλλογής ενέργειας. Αυτό όμως που κάνει την τεχνολογία των HMIMOs θελκτική, είναι η ικανότητά τους να διαμορφώνουν τα ραδιοκύματα που προσπίπτουν σε αυτά και να προωθούν τα εισερχόμενα σήματα, χωρίς την χρήση ενισχυτή ισχύος και αλυσίδας RF και επίσης χωρίς την εφαρμογή εξελιγμένης επεξεργασίας σήματος. Επιπλέον, το παθητικό HMIMO μπορεί να λειτουργήσει σε λειτουργία full duplex χωρίς σημαντικές αυτο-παρεμβολές ή αυξημένο επίπεδο θορύβου και απαιτούν μόνο χαμηλής ταχύτητας συνδέσεις ελέγχου ή συνδέσεις backhaul. Τέλος τα παθητικά HMIMO μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στο ασύρματο περιβάλλον καθώς το εξαιρετικά χαμηλό κόστος κατασκευής τους και η χαμηλή τους κατανάλωση επιτρέπει την ενσωμάτωση του σε κτήρια, μέσα μεταφοράς, εργοστάσια ακόμα και σε ρούχα.

β) Κατηγοριοποίηση με βάση την κατασκευαστική δομή

Όταν τα HMIMOs ενσωματώνουν έναν σχεδόν άπειρο αριθμό στοιχείων σε μια περιορισμένη επιφάνεια, προκειμένου να σχηματιστεί ένα χωρικά συνεχές aperture στον πομποδέκτη, τότε ονομάζονται συνεχόμενα HMIMOs. Χρησιμοποιώντας την ολογραφική αρχή της καταγραφής και αναδιαμόρφωσης της παρεμβολής σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, δημιουργείται ένα σήμα "εκπαίδευσης" από μια RF πηγή, το οποίο στην συνέχεια χωρίζεται σε δύο κύματα, αναφοράς και αντικειμένου. Το ένα κύμα κατευθύνεται προς το αντικείμενο και καθώς ανακλάται, ένα μέρος του συγχωνεύεται με το δεύτερο κύμα αναφοράς και εν συνεχεία το νέο κύμα πηγαίνει στην είσοδο των HMIMOs. Έπειτα γίνεται η μετατροπή του εκπεμπόμενου σήματος στην επιθυμητή δέσμη μέσα από το aperture του HMIMO. Δεδομένου ότι η συνεχής ενεργή επιφάνεια επωφελείται από το πλήθος των άπειρων ενσωματωμένων κεραιών, το οποίο είναι και το ασυμπτωτικό όριο των mMIMOs, τα πιθανά πλεονεκτήματα λόγω αυτού είναι η επίτευξη μεγαλύτερης χωρικής ανάλυσης. Η δεύτερη κατηγορία είναι τα διακριτά HMIMOs. Πρόκειται για συνθέσεις πολλών διαφορετικών μικρομονάδων, οι οποίες αποτελούνται από αναπρογραμματιζόμενα μετα-υλικά, τα οποία απαιτούν χαμηλή ισχύ και έχουν φθινό κόστος κατασκευής. Συγκεκριμένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν υγρά κρύσταλλοι ώστε να αλλαχθούν οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες της μικρομονάδας.

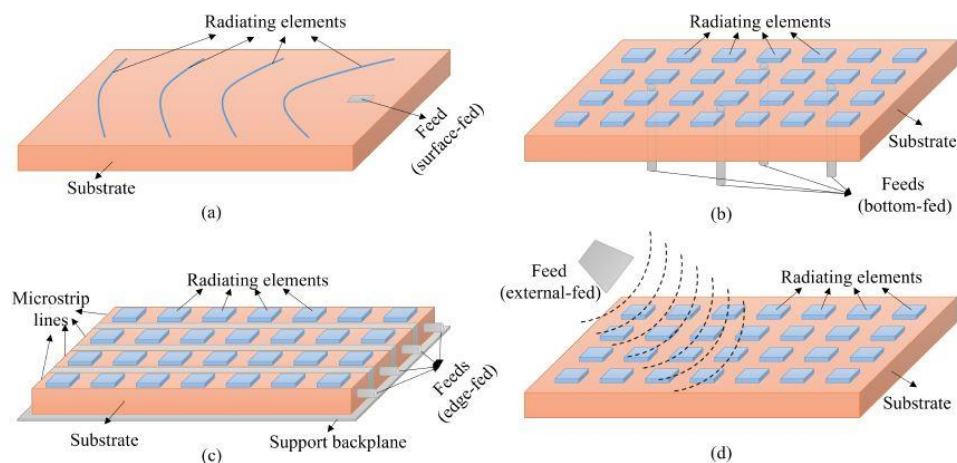


Σχήμα 2.6. Κατασκευαστική δομή HMIMO.

2.8 Μεθοδολογία κατασκευής

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές κατασκευής των HMIMOs. Αρκετές από αυτές περιλαμβάνουν την λιθογραφία μέσω ακτίνων ηλεκτρονίων ή την αποτύπωση μέσω λέιζερ σε τυπωμένες πλακέτες

ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Οι τεχνικές αυτές παραγούν ΗΜΙΜΟs είτε με συνεχόμενα ανοίγματα, είτε με διακριτά. Τα συνεχόμενα ΗΜΙΜΟs συνήθως αποτελούνται απο μια στρώση ένος μετα-υλικού πάνω στην οποία υπάρχουν ημιαγώγιμα εξαρτήματα όπως δίοδοι και πυκνωτές, ένω ελέγχοντας το ρεύμα, το οποίο περνάει απο τις διόδους, μπορούμε να ελέγξουμε την φάση και το πλάτος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που προσπίπτουν πάνω στην επιφάνεια. Αντίθετα, τα διακριτά ΗΜΙΜΟs εμπεριέχουν πολλές μικρομονάδες οι οποίες έχουν τον ρόλο κεραιών. Είναι και αυτές φτιαγμένες απο μετα-υλικά αλλά έχουν πολλές στρώσεις έτσι ώστε η κάθε στρώση να αποτελεί μια διαφορετική μονάδα για την υποστήριξη διαφόρων λειτουργιών του συστήματος, όπως η θωράκιση η επεξεργασία του σήματος αλλά και οι αισθητήρες. Πιο συγκεκριμένα οι στρώσεις φτιάχνονται απο μετα-υλικά γραφένιου ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά της μικρομονάδας. Αρκέτες εταιρείες έχουν προχωρήσει ήδη στην ανάπτυξη πρωτοτύπων, με πολύ καλά αποτελέσματα και ετοιμάζονται πλέον να περάσουν στο στάδιο της εμπορικής ανάπτυξης.



Σχήμα 2.7 Δομή ΗΜΙΜΟ.

Στα δομικά στοιχεία των ΗΜΙΜΟs συμπεριλαμβάνονται 3 βασικά εξαρτήματα. Την τροφοδοσία, το υπόστρωμα και το ακτινοβόλο στοιχείο όπως φαίνεται και στην Σχήμα 2.7. Η τροφοδοσία χρησιμοποιείται για την παραγωγή των κυμάτων αναφοράς τα οποία διαδίδονται στην επιφάνεια του ΗΜΙΜΟ. Ανάλογα με το σημείο που θα τοποθετηθεί στο ΗΜΙΜΟ, θα αλλάξει και ο τρόπος διάδοσης του κύματος αναφοράς, επίσης ο τρόπος διάδοσης αλλάζει και ανάλογα με τον τύπο της τροφοδοσίας (μόνοπολο, δίπολο ομοαξονικό κλπ.) αλλά και το σημείο στο οποίο θα τοποθετηθεί πάνω στο ΗΜΙΜΟ, αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η τροφοδοσία μπορεί να βρίσκεται και έξω απο την ΗΜΙΜΟ δομή παρέχοντας ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία στην διάταξη των στοιχείων. Το υπόστρωμα χρησιμοποιείται απο την ΗΜΙΜΟ δομή σαν κυματοδηγός, ο οποίος επιτρέπει στα κύματα αναφοράς να διαδίδονται πάνω του. Όταν ενσωματωθεί κάποια ανακλαστική επιφάνεια πάνω στο υπόστρωμα το κύμα αναφοράς αρχίζει και διαρρέει στον ελεύθερο χώρο, επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ημιαγώγιμα ή διηλεκτρικά υλικά για την κατασκευή του. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού για την επένδυση του υποστρώματος είναι πολύ σημαντική, ειδικά στην περίπτωση που η ολογραφική μέθοδος γίνεται μέσω την κεραιάς διαρέοντος κύματος (Leaky wave antenna ή LWA για συντομία). Αλλοί παράγοντες για την επιλογή του υποστρώματος είναι το κόστος κατασκευής αλλά και η μεθοδολογία κατασκευής του ΗΜΙΜΟ. Το σχήμα του υποστρώματος μπορεί να διαφέρει ανά δομή καθώς σε κάποιες διατάξεις μπορεί να έχει την μορφή ταινιογραμμών αντί να

καλύπτει αρμονικά όλη την επιφάνεια του ΗΜΙΜΟ. Τα ακτινοβόλα στοιχεία τα οποία κατα κανόνα τοποθετούνται πάνω στο υποστρώμα, είναι είτε ομοιόμορφα είτε ανομοιόμορφα και μπορεί να έχουν πληθώρα διαφορετικών σχημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος τους και η απόσταση μεταξύ γειτονικών στοιχείων είναι συνήθως κάποια υποδιαίρεση του μήκους κύματος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, επιτρέποντας έτσι και την πλήρη χειραγώγηση του. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ακτινοβολούντων στοιχείων μπορεί να είναι είτε μεταλλικά είτε διηλεκτρικά. Συνήθως τα μέταλλα είναι καταλληλότερα για μικρότερες συχνότητες καθώς λειτουργούν σαν καλοί αγωγοί του ρεύματος όμως όταν η συχνότητα αυξάνεται οι απώλειες λόγω της αντίστασης του υλικού είναι αρκετά σημαντικές, σε αυτές τις περιπτώσεις προτιμάται κάποιο διηλεκτρικό υλικό όπως το γραφένιο. Το σχήμα των στοιχείων είναι επίσης πολύ σημαντικό καθώς πρέπει να ικανοποιεί την ολογραφική αρχή.

2.9 Μηχανισμοί ρύθμισης των ΗΜΙΜΟs

Μέσω των μηχανισμών ρύθμισης το ΗΜΙΜΟ μπορεί να πετύχει την δημιουργία και σύλληψη οποιούδηποτε ολογράμματος, ρυθμίζοντας δυναμικά τα στοιχεία του. Οι μηχανισμοί αυτοί βασίζονται στους υγρούς κρυστάλλους, στο γραφένιο σε φωτοευαίσθητες διατάξεις αλλά και στην συσώρευση στοιχείων. Η ρύθμιση μέσω συσσωρευμένων στοιχείων γίνεται με την εφαρμογή συνεχούς ρεύματος σε αυτά, τα οποία ανάλογα με την στάθμη αλλάζουν και πολώση(κατάσταση ON/OFF) ώστε να ρυθμιστεί κατάλληλα το ΗΜΙΜΟ. Η ρύθμιση μέσω υγρών κρυστάλλων επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας σε αυτούς κάποιο εξωτερικό ηλεκτρομαγνητικό ερέθισμα. Λόγω της ιδιότητας τους να ρέουν σαν υγρά τα μόρια του μπορούν είτε να συμπτηχθούν είτε να απομακρυνθούν απο και προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Το μειονέκτημα τους είναι ότι οι αντιδράσεις τους στα ερεθίσματα αυτά είναι αργές, επομένως σε εφαρμογές, που απαιτούν γρήγορη ρύθμιση του ΗΜΙΜΟ, δεν μπορεί να χρησιμοποιήθει ο συγκεκριμένος μηχανισμός. Το γραφένιο αποτελεί επίσης ενα πολύ καλό υλικό το οποίο λόγω της ελεγχόμενης αγωγιμότητας του μέσω μαγνητικών ή ηλεκτρικών μέσων, ενδείκνυται για την χρήση σαν μηχανισμός ρύθμισης σε ΗΜΙΜΟ εφαρμογές. Τέλος η ρύθμιση μέσω φωτοευαίσθητων διατάξεων γίνεται χρησιμοποιώντας φωτοδιόδους η διάφορους άλλους ημιαγωγούς για την διασύνδεση των ακτινοβολούντων στοιχείων, έτσι όταν περνάει φώς συγκεκριμένου μήκους κύματος απο μια διάταξη δημιουργείται παραλληλα και νεα σύνδεση μεταξύ κάποιων στοιχείων ή αποκόπτεται απο κάποια άλλα.

2.10 Τρόποι λειτουργείας των ΗΜΙΜΟs

Υπάρχουν τέσσερις τρόποι λειτουργείας για τα ΗΜΙΜΟs, το συνεχές ΗΜΙΜΟ λειτουργεί σαν ενεργός εκπομπός ενώ το διακριτό ΗΜΙΜΟ σαν παθητικός ανακλαστήρας. Το διακριτο ΗΜΙΜΟ σαν ενεργός εκπομπός ενώ το συνεχές σαν παθητικός ανακλαστήρας. Λογω του ερευνητικού ενδιαφέροντος θα εστιάσουμε στις πρώτες δύο λειτουργείες.

Το συνεχές ΗΜΙΜΟ σαν ενεργός εκπομπός παράγει RF σήματα, τα οποία διαδίδονται μέσω ενός κατευθυνόμενου δίκτυου διανομής το οποίο βρίσκεται πάνω στο aperture του ΗΜΙΜΟ και αποτελείται απο εναν μεγάλο αριθμό ηλεκτρονικών στοιχείων τα οποία μπορούν να αλλάξουν κατεύθυνση, ώστε να είναι ευκολότερο το beamforming, και ελέγχονται απο λογισμικό. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ του συνεχούς ενεργού ΗΜΙΜΟ και των παθητικών αναπρογραμματιζομενων ΗΜΙΜΟs είναι ότι η διαδικασία του beamforming του

πρώτου επιτυγχάνεται βάση της ολογραφικής τεχνικής και αποτελεί μια καινοτόμα τεχνική η οποία βασίζεται σε χαμηλού κόστους και ισχύς καθώς και περιορισμένου μεγέθους κεραίες οι οποίες ελέγχονται με λογισμικό.

Το διακριτό HMIMO σαν παθητικός ανακλαστήρας, είναι ένας άλλος τρόπος λειτουργίας, λέγεται αλλιώς και κυματοσυλλέκτης. Σε αυτή την περίπτωση το HMIMO αποτελείται από μικρές αναπρογραμματιζόμενες κυψελωτές μονάδες, στις οποίες το beamforming γίνεται με τον συμβατικό τρόπο των mMIMO.

2.11 Λειτουργικότητα, χαρακτηριστικά και εφαρμογές

Οι ευφυές επιφάνειες μπορούν να υποστηρίξουν μια πληθώρα ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων ή αλλιώς λειτουργιών. Με βάση τον προγραμματισμό τους και την κατασκευαστική δομή των στοιχείων τους, τα HMIMOs έχουν κάποιες βασικές ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις. Πρώτον την πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Δεύτερον την σκέδαση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όπου ουσιαστικά η επιφάνεια ανακατευθύνει τα προσκρουόμενα κύματα προς τις επιθυμητές κατευθύνσεις. Τρίτον μολυβοειδής εστίαση, καθώς το HMIMO λειτουργεί σαν ένας φακός για το ηλεκτρομαγνητικό κύμα σε ένα σημείο του μακρινού πεδίου διάδοσης, αυτή η λειτουργικότητα ανήκει στις δυνατότητες του beamforming. Τέταρτον απορόφηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Συγκρίνοντας το HMIMO με άλλες ασύρματες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών, το χαρακτηριστικό που το κάνει να ξεχωρίζει είναι η δυνατότητα του να κάνει τόσο το περιβάλλον όσο και την διαδικασία της ηλεκτρομαγνητικής εκπομπής πλήρως ελέγχόμενα. Καθώς ένα HMIMO είναι κατασκευασμένο με την πρόθεση να λειτουργεί είτε σαν παθητικός ανακλαστήρας είτε σαν πηγή σήματος ή κυματοσυλλέκτης, τα θεμελιώδεις χαρακτηριστικά του αλλά και οι κύριες διαφορές του με τα mMIMO συστήματα αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω.

Τα HMIMOs μπορούν να είναι εντελώς παθητικά, διότι δεν απαιτούν καμία εσωτερική πηγή ενέργειας ώστε να επεξεργαστούν το εισερχόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο φέρει την πληροφορία. Επίσης τα ανοίγματα εκπομπής και λήψης των HMIMOs μπορούν να θεωρηθούν σαν χωρικά συνεχή και γίνονται έρευνες ώστε να μπορέσουν να υλοποιηθούν με χαμηλό κόστος. Ο θερμικός θόρυβος στον δέκτη είναι απών από τα HMIMO, διότι τα παθητικά HMIMO δεν απαιτούν την μετατροπή της κυματομορφής σε σήμα βασικής ζώνης, αλλά επεξεργάζονται με αναλογικό τρόπο το προσκρουόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Τα στοιχεία των HMIMO μπορούν να ρυθμιστούν με λογισμικό καθώς είναι σχεδόν παραμετροποιήσιμα όλα τα χαρακτηριστικά τους. Τα HMIMOs μπορούν επίσης να λειτουργήσουν σε οποιαδήποτε συχνότητα του φάσματος, από ακουστικές συχνότητες μέχρι και συχνότητες του φωτός.

Βλέπουμε λοιπόν ότι λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών τους, τα HMIMOs αποτελούν τον ιδανικό υποψήφιο για τα χαμηλής κατανάλωσης και καθυστέρησης ασύρματα δίκτυα 6^{ης}

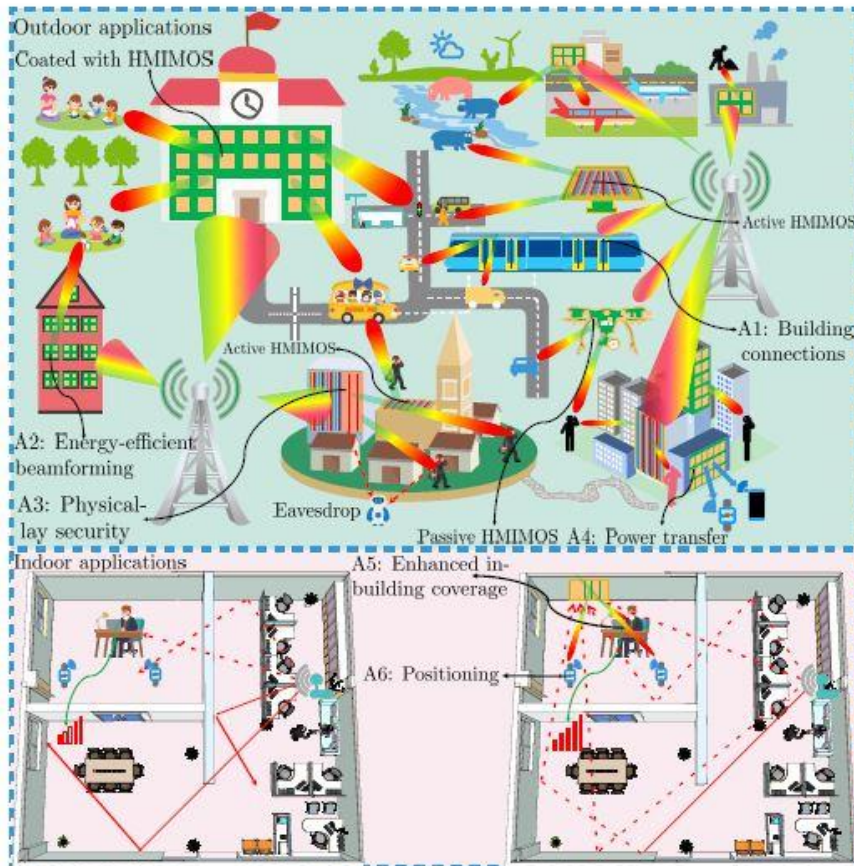
γενιάς. Ενδεικτικά παρατίθενται και κάποιες εφαρμογές που ενδεχόμενος θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τα ΗΜΙΜΟs.

Εφαρμογές εξωτερικού χώρου

Θεωρούμε ένα διακριτό παθητικό ΗΜΙΜΟ σαν επεξηγηματικό παράδειγμα, το οποίο αποτελείται από έναν πεπερασμένο αριθμό στοιχείων και είναι φτιαγμένο ώστε να προώθει διαφορετικές εκδοχές του προσκρουόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (με διαφορετική φάση για την κάθε εκδοχή) προς τους χρήστες οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικά σενάρια εξωτερικού χώρου όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.8. Θεωρούμε επίσης ότι τα ΗΜΙΜΟs είναι ογκομετρικές δομές οι οποίες ποικίλουν σε μέγεθος και πάχος ώστε να μπορούν να προσαρμοστούν σε όλα τα αντικείμενα που βρίσκονται στο περιβάλλον. Όπως βλέπουμε και από το σχήμα 2.8, τα ΗΜΙΜΟs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επέκταση της κάλυψης των σταθμών βάσης που βρίσκονται εσωτερικά σε κάποιο κτήριο ώστε να έχουν καλύτερο σήμα οι χρήστες που βρίσκονται έξω από το κτήριο αλλά και το ανάποδο, ιδίως όταν στην ζεύξη μεσολαβούν αρκετά εμποδια. Τα ΗΜΙΜΟs μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ανακύκλωση των περιβάλλοντων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με σκοπό την συγκέντρωσή τους σε περιοχές που βρίσκονται χρήστες με σκοπό την βελτιστοποίηση του σηματοθορυβικού λόγου. Τα ΗΜΙΜΟs μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν (όπως και τα ΜΙΜΟ) για ασφάλεια στο φυσικό επίπεδο καθώς είναι πολύ δύσκολο να υποκλέψει κάποιος εκτός του συστήματος κάποιο σήμα.

Εφαρμογές εσωτερικού χώρου

Η ασύρματη επικοινωνία σε εσωτερικό χώρο υπόκειται σε πολυδιαδρομική μετάδοση εξαιτίας των φαινομένων σκέδασης που δημιουργούνται λόγω του περιβάλλοντος καθώς το σήμα προσκρούει σε τοίχους και αντικείμενα. Επίσης υπάρχει και αρκετή RF μόλυνση λόγω των ηλεκτρικών συσκευών που βρίσκονται σε περιορισμένο χώρο. Τα ΗΜΙΜΟs έχουν την δυνατότητα να είναι ιδιαίτερα ευεργετικά σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου εκμεταλλευόμενα την δυνατότητα τους να ελέγχουν και να κατευθύνουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα προς τις επιθυμητές κατευθύνσεις. Όπως φαίνεται και στην σχήμα 2.8 κάτω δεξιά, η διάδοση του σήματος μπορεί να ενισχυθεί χρησιμοποιώντας ένα ΗΜΙΜΟ το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο σε ένα τοίχο, ώστε να βοηθήσει το σήμα να φτάσει τον τελικό χρήστη από το σημείο πρόσβασης. Επίσης τα ΗΜΙΜΟs μπορούν να επιφέρουν καλύτερα ανίχνευση κάποιου χρήστη μέσα σε εσωτερικό χώρο, κάτι το οποίο μπορεί να βοηθήσει τα συστήματα GPS τα οποία παρουσιάζουν μείωση της ακρίβειας της ανίχνευσης σε εσωτερικούς χώρους.



Σχήμα 2.8 Σενάρια εφαρμογής ΗΜΙΜΟ σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους

2.11 Ανακεφαλαίωση

Στο κεφάλαιο αυτό, εξηγήθηκε η ανάγκη της εφαρμογής της τεχνολογίας των ολογραφικών ΜΙΜΟ για τα δίκτυα 6ης γενιάς λόγω των ορίων της κλασικής διάδοσης κυμάτων, όταν οι διαστάσεις της κεραίας είναι πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος. Παρουσιάστηκαν διεξοδικά οι αρχές και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες των ΗΜΙΜΟ και δώθηκαν και κάποια σενάρια εφαρμογής τους σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει μια αξιολόγηση της επίδοσης τους.

Κεφάλαιο 3°

Μοντέλο καναλιού και κριτήρια αξιολόγησης επιδόσεων

3.1 Τεχνολογίες ενεργοποίησης

Καθώς οι ΗΜΙΜΟ επιφάνειες παρέχουν μόνο την βασική φυσική οντότητα η οποία, είναι μεν αναγκαία, αλλά δεν είναι αρκετή για την εφαρμογή των ΗΜΙΜΟ στις ασύρματες επικοινωνίες. Χρειάζεται λοιπόν να αναπτύξουμε κατάλληλες τεχνολογίες στο φυσικό επίπεδο ώστε να κατευθύνουμε τις επιφάνειες ΗΜΙΜΟ πλησίων των θεωρητικών τους ορίων. Για το λόγο αυτό κρίσιμες τεχνολογίες ενεργοποίησης όπως η πρόβλεψη του καναλιού και το ολογραφικό beamforming έχουν τεράστια σημασία. Παρόλα αυτά ο σχεδιασμός αυτών των τεχνολογιών για τα ΗΜΙΜΟ συστήματα ενέχει θεμελιώδεις διαφορές και προβλήματα εν σχέση με τις αντίστοιχες τεχνολογίες των mΜΙΜΟ ασύρματων συστημάτων. Οι διαφορές οφείλονται κυριώς στις παρακάτω πτυχές. Καταρχάς οι κατασκευαστικές δομές των ΗΜΙΜΟ και οι μηχανισμοί λειτουργείας τους είναι εντελώς διαφορετικοί απο αυτούς των mΜΙΜΟ. Αυτομάτως αυτό προκαλεί την ανάγκη για ένα διακριτό μαθηματικό μοντέλο το οποίο θα εισαγάγει νέους πρακτικούς περιορισμούς οι οποίοι με την σειρά τους θα επηρεάσουν τον σχεδιασμό των τεχνολογιών ενεργοποίησης. Επιπροσθέτως το συνεχές aperture το οποίο καλύπτεται απο φαινομενικά άπειρο αριθμό μικροσκοπικών κεραιοστοιχείων και λόγω του οποίου μπορούμε να χειραγωγήσουμε το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, απαιτεί να πραγματοποιηθεί η ψηφιακή επεξεργασία του σήματος στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αντίθετα με τα mΜΙΜΟ στα οποία χρησιμοποιείται η κλασσική επεξεργασία σήματος η οποία μάλιστα θα γίνεται εξαιρετικά δύσκολα λόγω του τεράστιου αριθμού των κεραιών αλλά και της πολυπλοκότητας του συστήματος. Τέλος η χαμηλη κατανάλωση ισχύος των επιφανειών ΗΜΙΜΟ επιτρέπει την λειτουργία στην περιοχή κοντινού πεδίου αντίθετα με τις τεχνολογίες ενεργοποίησης των mΜΙΜΟ που βασίζονται στη περιοχή μακρινου πεδίου. Συνοψίζοντας τα νέα χαρακτηριστικά των ΗΜΙΜΟs ενέχουν αρκετές σχεδιαστικές διαφορές στις τεχνολογίες ενεργοποίησης συγκριτικά με τα mΜΙΜΟ. Όπως και στα mΜΙΜΟ συστήματα επικοινωνίας έτσι και στα ΗΜΙΜΟ είναι σημαντική η πρόβλεψη του καναλιού ώστε να μπορεί το σύστημα να γνωρίζει όλες τις παραμέτρους και να αποκωδικοποιεί με ακρίβεια το λαμβανόμενο σήμα. Την ίδια στιγμή η πρόβλεψη καναλιού στο ΗΜΙΜΟ είναι πιο πολύπλοκη απο το κλασσικό διακριτό και ασυσχέτιστο σενάριο που αφορά μια δομή στοιχειοκεραιών, αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχει ζευγάρωμα μεταξύ των στοιχείων του ΗΜΙΜΟ. Εάν χρησιμοποιήσουμε μια συμβατική μέθοδο πρόβλεψης του καναλιού που βασίζεται σε σήματα πιλότους θα παρατηρήσουμε ότι οδηγούν σε πολύ υψηλό overhead και όπως είπαμε και παραπάνω η θεώρηση ότι το σύστημα θα λειτουργήσει στην περιοχή μακρινού πεδίου δεν λειτουργεί εδώ λόγω του αυξημένου μεγέθους της επιφανειας του ΗΜΙΜΟ. Επιπροσθέτως η έλλειψη σε επαρκή μοντέλα καναλιού για το ΗΜΙΜΟ κάνει την διαδικασία ακόμα δυσκολότερη. Στο κεφαλαίο αυτό θα παρουσιαστεί ένα μοντέλο καναλιού το οποίο θα μας βοηθήσει να υπολογίσουμε τις διαλείψεις μικρής κλίμακας αλλά και τα DoF, στο επόμενο κεφαλαίο, ώστε να εξετάσουμε έστω και θεωρητικά τα όρια ένος ΗΜΙΜΟ.

3.2 Μοντελοποίηση καναλιού

Σύμφωνα με την φυσική δομή των ΗΜΙΜΟ που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι δέκτες που χρησιμοποιούνται σε ΗΜΙΜΟ επικοινωνίες, υλοποιούνται εφαρμόζοντας στα ΗΜΙΜΟ σχεδόν άπειρα ακτινοβολούντα στοιχεία δημιουργώντας έτσι ένα χωρικά συνεχές ηλεκτρομαγνητικό aperture, όπου τα χαρακτηριστικά του δεν μπορούν να περιγραφούν όπως αυτά των κλασικών συστοιχιών διακριτών κεραιών. Το κλασικό μοντέλο διαλείψεων καναλιού του Rayleigh αδυνατεί να περιγράψει το κανάλι λόγω της ισχυρής χωρικής συσχέτισης αλλά και της σύνδεσης μεταξύ των μικροσκοπικών ακτινοβολούντων στοιχείων, τα οποία είναι και πυκνά τοποθετημένα σε περιορισμένο χώρο. Επίσης όσο το aperture γίνεται όλο και μεγαλύτερο ή απόσταση στην οποία γίνεται η επικοινωνία πέφτει μέσα στην ζώνη Fresnel, δηλαδή στην ζώνη κοντινού πεδίου, επομένως υποθέσεις που αφορούν την ζώνη μακρινού πεδίου δεν μπορούν να ληφθούν υποψή. Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε την επίδοση των Ολογραφικών ΜΙΜΟ, χρειαζόμαστε ένα μοντέλο καναλιού που μπορεί να προσομοιώσει τα βασικά χαρακτηριστικά του τεράστιου αριθμού κεραιών, οι οποίες είναι πυκνά τοποθετημένες σε περιορισμένο χώρο. Το ασύρματο κανάλι αποτελείται από τις διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας. Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας οφείλονται σε απώλειες λόγω μεγάλης απόστασης και σκίασης, ενώ οι διαλείψεις μικρής κλίμακας οφείλονται σε μικρές παραλλαγές του περιβάλλοντος διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Καθώς και οι δύο τύποι διαλείψεων έχουν κεντρικό ρόλο στις ασύρματες επικοινωνίες, το προτεινόμενο μοντέλο ασχολείται μόνο με τις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Για τον υπολογισμό του καναλιού μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοχαστικά ή ντετερμινιστικά μοντέλα. Αν και τα ντετερμινιστικά μοντέλα μπορούν να υπολογίσουν και να προβλέψουν το κανάλι με μεγάλη ακρίβεια αλλά το μειονέκτημα τους είναι ότι βασίζονται σε συγκεκριμένα σενάρια. Αντίθετα τα στοχαστικά μοντέλα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευελιξία καθώς είναι ανεξάρτητα από το περιβάλλον μετάδοσης. Ένα πολύ γνωστό στοχαστικό μοντέλο το οποίο αποτελεί την βάση των θεωρητικών ερευνών σε ΜΙΜΟ είναι αυτό του Rayleigh(i.i.d). Καθώς το συγκεκριμένο μοντέλο είναι πάρα πολύ καλό σε σενάρια όπου δεν υπάρχει απευθείας ορατότητα μεταξύ του πομπού και του δέκτη στο μακρινό πεδίο, όταν ο χώρος μεταξύ των κεραιών είναι πάρα πολύ μικρός και η χωρική συσχέτιση αυξάνεται το μοντέλο κρίνεται ανεπαρκές. Ένα στοχαστικό μοντέλο για τις διαλείψεις μικρής κλίμακας, το οποίο έχει μια ομοιότητα με τις πραγματικές φυσικές συνθήκες είναι αυτό του Clarke, για δισδιάστατη αλλά και τρισδιάστατη ανάλυση. Το μοντέλο βασίζεται σε ένα σενάριο όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή ενώ τα ραδιοκύματα δεν είναι πολωμένα και διαδίδονται στο μακρινό πεδίο ενός τυχαίου ιστροπικού περιβάλλοντος. Κάτω από αυτές τις συνθήκες το μοντέλο του Clarke αποτελεί ιδανικό ώστε να συνθέσουμε ένα νέο πιο γενικευμένο στοχαστικό μοντέλο για τις διαλείψεις μικρής κλίμακας των τρισδιάστατων χωρικά σταθερών καναλιών, το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε σενάρια όπου το περιβάλλον θα είναι μη ιστροπικό. Το συγκεκριμένο μοντέλο θα πρέπει να είναι μαθηματικά προσεγγίσιμο και αριθμητικά αναπαράξιμο ώστε να έχει φυσικό νόημα.

3.3 Το προτεινόμενο μοντέλο για διαλείψεις μικρής κλίμακας σε τρισδιάστατο χώρο

Το μοντέλο καναλιού που έχει αναπτυχθεί από τους A.Pizzo και L.Sanguinetti [9] είναι ιδανικό καθώς παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με το μοντέλο του Clarke. Παρακάτω παρουσιάζεται η μεθοδολογία και η λογική πίσω από τον υπολογισμό του.

Θεωρούμε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται προς κάθε κατεύθυνση σε ένα ομογενές ιστροπικό μέσο με τυχαία σκέδαση. Κάτω από αυτές τις συνθήκες το ηλεκτρομαγνητικό κύμα χωρίς πόλωση συμπεριφέρεται σαν ακουστικό κύμα και οι τρισδιάστατες διαλείψεις μικρής κλίμακας στο μακρινό πεδίο μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν ένα τυχαίο πεδίο χωρικής συχνότητας.

$$\{h_\omega(x, y, z) : (x, y, z) \in \mathbb{R}^3, \omega \in (-\infty, \infty)\} \quad (3.1)$$

Το οποίο είναι συνάρτηση της συχνότητας ω και των χωρικών καρτεσιανών συντεταγμένων (x, y, z) . Θεωρούμε επίσης ότι το κύμα είναι μονοχρωματικό, εκπέμπεται και διαδίδεται δηλαδή σε μία μόνο συχνότητα ω επομένως θεωρούμε ότι $h = h_\omega$. Οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν χωρικά σταθερό Γκαουσιανό πεδίο μηδενικού μέσου όρου με χωρική αυτοσυσχέτιση. Η ηλεκτρομαγνητική φύση των διαλείψεων μικρής κλίμακας απαιτεί κάθε αντίληψη του $h(x, y, z)$ να ικανοποιεί, με πιθανότητα ίση με 1, την εξίσωση του Helmholtz στο πεδίο της συχνότητας, επομένως θα πρέπει:

$$(\nabla^2 + \kappa^2) h(x, y, z) = 0 \quad (3.2)$$

Οπου $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ το οποίο είναι ο αριθμός του κύματος ή αλλιώς η γωνιακή μετατόπιση και το c είναι η ταχύτητα του φωτός. Οπότε θεωρούμε ότι:

$$h(x, y, z) = H e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} \quad (3.3)$$

Αξιοποιώντας το γεγονός ότι η **(2)** αποτελεί μια χαρακτηριστική εξίσωση με ανάδελτα και πραγματοποιώντας αντικατάσταση μεταξύ των **(2)** και **(3)** έχουμε την λύση $Kx^2 + Ky^2 + Kz^2 = K^2$. Οπότε :

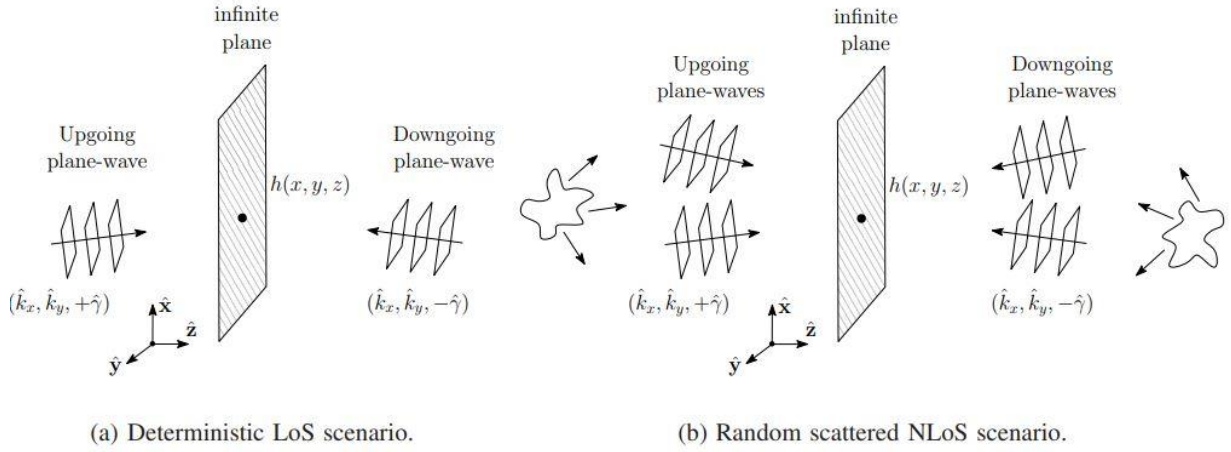
$$k_z = \pm \gamma(k_x, k_y) = \pm \sqrt{\kappa^2 - k_x^2 - k_y^2}. \quad (3.4)$$

Περιορίζοντας την ανάλυση για Kz το οποίο ανήκει στους πραγματικούς αριθμούς και ότι τα Kx και Ky έχουν συμπαγή στήριξη η οποία δίνεται από ένα δίσκο με ακτίνα κ ,

$$\mathcal{D}(\kappa) = \{(k_x, k_y) \in \mathbb{R}^2 : k_x^2 + k_y^2 \leq \kappa^2\} \quad (3.5)$$

Όποτε έχουμε τις παρακάτω δύο διακριτές χαρακτηριστικές εξισώσεις για το **(2)** οι οποίες περιγράφουν δύο επίπεδα κύματα που προσκρούουν σε ένα σημείο (x, y, z) . Στο παρακάτω διαγραμμα φαίνεται και πιο αναλυτικά η απεικόνιση των κυμάτων. Τα δύο επίπεδα κύματα περιγράφονται από τις εξισώσεις στο (6)

$$\{H^+ e^{i(k_x x + k_y y + \gamma(k_x, k_y) z)}\} \quad \{H^- e^{i(k_x x + k_y y - \gamma(k_x, k_y) z)}\} \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.1. Διάδοση κλιμακωτών επίπεδων κυμάτων σε τρισδιάστατο επίπεδο

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του (6) η χαρακτηριστική λύση της σχέσης (2) είναι η παρακάτω:

$$h(x, y, z) = \iint_{\mathcal{D}(k)} \left(H^+(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y + \gamma(k_x, k_y) z)} + H^-(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y - \gamma(k_x, k_y) z)} \right) dk_x dk_y \quad (3.7)$$

Στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία η παραπάνω σχέση είναι γνωστή σαν γενική ομογενής λύση, επίπεδων κυμάτων, της εξίσωσης του Helmholtz όπου τα πλάτη των κυμάτων H^{\pm} είναι μιγαδικές συναρτήσεις που πέρνουν αυθαίρετες τιμές μέσα στο $D(k)$. Με άλλα λόγια υπάρχουν άπειρα σκεδασμένα κύμματα που προσπίπτουν στο (x, y, z) από διαφορετικές κατευθύνσεις, αυτό συμβαίνει λόγω της αλληλεπίδρασης των κυμάτων με το περιβάλλον σκέδασης όπως φαίνεται και στην παραπάνω σχήμα.

Η συνάρτηση της χωρικής αυτοσυσχέτισης του Γκαουσιανού τυχαίου πεδίου μας παρέχει μια ολοκληρωμένη στατιστική περιγραφή στο πεδίο του χώρου.

$$c_h(x, y, z) = \mathbb{E}\{h^*(x', y', z') h(x + x', y + y', z + z')\} \quad (3.8)$$

Υπολογιζόμενη για κάθε ζευγάρι του ${}^c h(x', y', z')$, εναλλακτικά το $h(x, y, z)$ μπορεί να περιγραφεί στο πεδίο της χωρικής συχνότητας μέσω της πυκνότητας φασματικής ισχύος.

$$S_h(k_x, k_y, k_z) = \iiint_{-\infty}^{\infty} c_h(x, y, z) e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} dx dy dz \quad (3.9)$$

Από την οποία για το Ch έχουμε:

$$c_h(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint_{-\infty}^{\infty} S_h(k_x, k_y, k_z) e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y dk_z. \quad (3.10)$$

Από την παραπάνω σχέση παρατηρούμε ότι το πεδίο του χώρου και της χωρικής συχνότητας αντικαθιστά το χρόνο και την συχνότητα της κλασσικής ανάλυσης fourier. Εφαρμόζοντας το ανάδελα και στα δύο μέρη της σχέσης (8) και μετακινώντας το ένας μέρος στην άλλη πλευρά ώστε η σχέση να είναι ίση με το μηδέν, βλέπουμε ότι ικανοποιείται η εξίσωση του Helmholtz.

$$\nabla^2 c_h(x, y, z) + \kappa^2 c_h(x, y, z) = 0 \quad (3.11)$$

$$(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - \kappa^2) S_h(k_x, k_y, k_z) = 0. \quad (3.12)$$

Καθώς θεωρούμε ότι το μεσο διάδοσης είναι άπειρο, υποδηλώνεται ότι το Sh(Kx, Ky, Kz) ορίζεται σε ένα υποστήριγμα με μηδενικές μετρήσεις επομένως δεν μπορεί να μεταφραστεί σαν κανονική συνάρτηση αλλά σαν κατανομή δέλτα. Επομένως η πυκνότητα φασματικής ισχύος για κάθε h(x, y, z) το οποίο ικανοποιεί την σχέση (2) παίρνει την μορφή:

$$S_h(k_x, k_y, k_z) = A_h^2(k_x, k_y, k_z) \delta(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - \kappa^2) \quad (3.13)$$

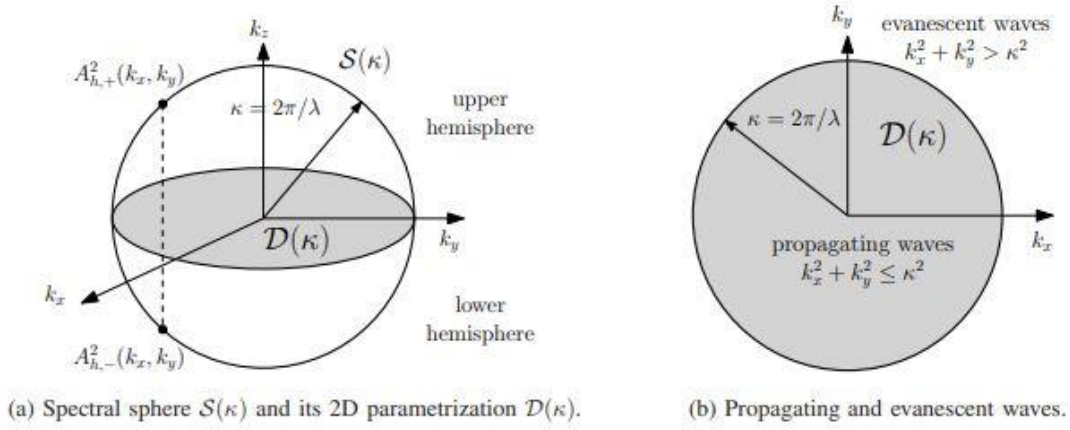
Όπου το Ah είναι ο φασματικός παράγοντας δηλαδή ένα πραγματικό μη αρνητικό ντετερμινιστικό πεδίο, ο οποίος μοντελοποιεί την φασματική επιλεκτικότητα της σκέδασης. Σε Οποιαδήποτε διάλειψη μικρής κλίμακας η πυκνότητα φασματικής ισχύος πρέπει να έχει την παραπάνω μορφή. Αυτή είναι η στατιστική εμπλοκή της εξίσωσης του Helmholtz με το h. Η πυκνότητα φασματικής ισχύος των διαδιδόμενων κυμάτων υπολογίζεται εάν εφαρμοστεί ο ανάστροφος μετασχηματισμός Fourier στο Sh(Kx, Ky, Kz) επομένως από την σχέση (9) έχουμε:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_h(k_x, k_y, k_z) e^{ik_z z} dk_z = \iint_{-\infty}^{\infty} c_h(x, y, z) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy. \quad (3.14)$$

Η σύνθεση της συνάρτησης δέλτα του Dirac σαν διαφοροποιήσιμη συνάρτηση μπορεί να προσδιοριστεί με την παρακάτω σχέση:

$$\delta(k_z^2 - (\kappa^2 - k_x^2 - k_y^2)) = \frac{\delta(k_z - \gamma) + \delta(k_z + \gamma)}{2\gamma} \quad (3.15)$$

Όπου η παράμετρος γ έχει προσδιοριστεί στην σχέση (4), επίσης δείχνοντας ότι $A_h^2 \pm(k_x, k_y) = A_h^2(k_x, k_y, \gamma)$ οι τιμές προσδιορίζονται απο τον φασματικό παράγοντα $Kz = \pm \gamma$ πάνω στον άξονα Kz όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχήμα, στο διάγραμμα (a).



Σχήμα 3.2 Φασματική σφαίρα και διαδιδόμενα κύματα

Έπειτα χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (15),(14),(13) έχουμε το άθροισμά τις δύο δισδιάστατες πυκνότητες φασματικής ισχύος.

$$S_h^\pm(k_x, k_y) = \frac{A_{h,\pm}^2(k_x, k_y)/4\pi}{\sqrt{\kappa^2 - k_x^2 - k_y^2}}, \quad (k_x, k_y) \in \mathcal{D}(\kappa) \quad (3.16)$$

Όπως φαίνεται και απο τα παραπάνω διαγράμματα, το S_h^\pm δίνεται παραμετροποιώντας το άνω και κάτω ημισφαίριο του $S(\kappa)$ μέσω του στηρίγματος της δισδιάστατης χωρικής συχνότητας του δίσκου $\mathcal{D}(\kappa)$. Προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο για το h το οποίο αποτελεί ένα χωρικά σταθερό τυχαίο Γκαουσιανό πεδίο με μηδενικό μέσο όρο, μπορούμε να επιλέξουμε πλάτη H^\pm τα οποία αποτελούν μια ανεξάρτητη δισδιάστατη συλλογή στατιστικά ανεξάρτητων Γκαουσιανών τυχαίων μεταβλητών.

$$H^\pm(k_x, k_y) = \sqrt{S_h^\pm(k_x, k_y)} W^\pm(k_x, k_y) \quad (3.17)$$

Το $S_h^\pm(k_x, k_y)$ αποτελεί τα φάσματα των επίπεδων κυμάτων και μπορεί επίσης να συσχετιστεί ,φυσικά, με τα ανερχόμενα και κατερχόμενα διαδιδόμενα κύματα στην σχέση (7), τα οποία για κάθε (k_x, k_y) που ανήκουν στο $\mathcal{D}(\kappa)$ προσδιορίζουν την μέση ισχύ η οποία μεταφέρεται σε κάθε κατεύθυνση (k_x, k_y, \pm) . Τα πεδία λευκού θορύβου συλαμβάνουν την τυχειότητα της σκέδασης του περιβάλλοντος διάδοσης. Αν αντικαταστήσουμε το πλάτος των διαδιδόμενων κυμάτων με την ομογενή λύση επίπεδων κυμάτων (7) έχουμε την παρακάτω σχέση η οποία απεικονίζει τις τρισδιάστατες διαλείψεις μικρής κλίμακας.

$$h(x, y, z) = h_+(x, y, z) + h_-(x, y, z) \quad (3.18)$$

Όπου τα επιμέρους κομμάτια της μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω:

$$h_{\pm}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\sqrt{\pi}} \iint_{\mathcal{D}(\kappa)} \frac{A_{h,\pm}(k_x, k_y)}{(\kappa^2 - k_x^2 - k_y^2)^{1/4}} W^{\pm}(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y \pm \sqrt{\kappa^2 - k_x^2 - k_y^2} z)} dk_x dk_y$$

(3.19)

Όπως παρατηρούμε το $h(x, y, z)$ εκφράζεται πλήρως σαν μια γραμμική υπέρθεση ενός σχεδόν άπειρου αριθμού ανερχόμενων και κατερχόμενων κυμάτων των οποίων τα πλάτη είναι στατιστικά ανεξάρτητες και τυχαίες γκαουσιανές μεταβλητές. Επίσης στην συγκεκριμένη περίπτωση ο μετασχηματισμός Fourier δρά σαν μια συνεχής αποσύνθεση των επίπεδων κυμάτων του καναλιού και για αυτό το λόγο αναφερόμαστε στις σχέσεις (15)&(16) σαν μια φασματική απεικόνιση επίπεδων κυμάτων του h μέσω του Fourier.

3.4 Το ανάπτυγμα Fourier σε σειρές επίπεδων κυμάτων

Θεωρούμε ότι οι διαλείψεις μικρής κλίμακας παρατηρούνται σε έναν χωρικά συνεχή ορθογώνιο χώρο (x, y, z) όπου τα μήκη των πλευρών είναι διακριτά, L_x , L_y και $L_z < \max(L_x, L_y)$ μαζί με τους τρεις καρτεσιανούς άξονες. Σε αυτή την περίπτωση μόνο ένας πεπερασμένος αριθμός επίπεδων κυμάτων μπορεί να επιλυθεί. Αν δηγηματοληπτήσουμε τον κυματικό αριθμό (Wavenumber) με διάστημα $\frac{2\pi}{L_x}$ και $\frac{2\pi}{L_y}$. Με την ανακλιμάκωση του K_x και του K_y στους άξονες σαν $\frac{2\pi}{L_x} K_x$ και $\frac{2\pi}{L_y} K_y$ το δισδιάστατο ελλειπτικό πλέγμα φαίνεται στην παρακάτω σχήμα και υπολογίζεται απο την παρακάτω σχέση.

$$\mathcal{E} = \{(\ell, m) \in \mathbb{Z}^2 : (\ell\lambda/L_x)^2 + (m\lambda/L_y)^2 \leq 1\} \quad (3.20)$$

Η αναπαράσταση της σχέσης (16) μπορεί να υπολογιστεί απο ένα δισδιάστατο ανάπτυγμα fourier σε σειρές επίπεδων κυμάτων.

$$h(x, y, z) \approx \sum_{\ell, m \in \mathcal{E}} H_{\ell m}(z) e^{j2\pi \left(\frac{\ell x}{L_x} + \frac{m y}{L_y} \right)} \quad (3.21)$$

Όπου οι συντελεστές του αναπτύγματος Fourier είναι οι τυχαίες μεταβλητές.

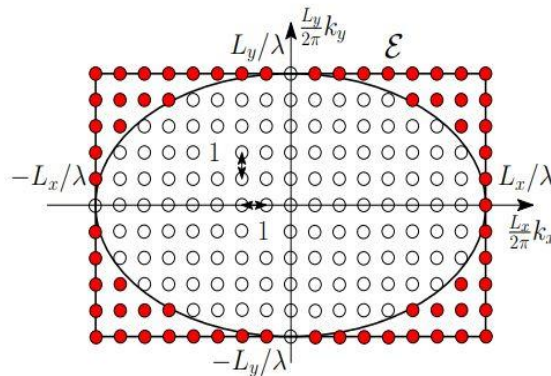
$$H_{\ell m}(z) = H_{\ell m}^+ e^{j\gamma_{\ell m} z} + H_{\ell m}^- e^{-j\gamma_{\ell m} z} \quad \gamma_{\ell m} = \gamma \left(2\pi\ell/L_x, 2\pi m/L_y \right) \quad (3.22)$$

Ένω το $H_{\ell m}^{\pm}$ είναι μια στατιστικά ανεξάρτητες και κυκλικά συμμετρικές Γκαουσιανές μεταβλητές. Για κάθε ζευγάρι (ℓ, m) το $H_{\ell m}^{\pm}$ σχετίζεται με τα αριστερά ή δεξιά μεσοδιαστήματα τα οποία δημιουργούνται απο το άπειρο πεδίο-Z που περνάει μέσα απο το (x, y, z) . Επίσης απο την σχέση (18) παρατηρούμε ότι δημιουργείται ένα περιοδικό τυχαίο πεδίο το οποίο προσεγγίζει τις διαλείψεις

μικρής κλίμακας $h(x,y,z)$ μέσω της δισδιάστατης θεμελιώδους περιόδου L_x και L_y . Το προσεγγιστικό σφάλμα της σχέσης (18) μειώνεται όταν ο λόγος $\frac{\min(L_x,L_y)}{\lambda}$ μεγαλώνει, ενώ εξαφανίζεται όταν τείνει στο άπειρο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς η σχέση (9) ακολουθεί την προσέγγιση ότι δεν απαιτείται το μέγεθος της στοιχειοκεραίας να είναι μεγάλο παρα μόνο κανονικοποιημένο βάση του κανόνα του μήκους κύματος λ . Στην πράξη το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συχνότητες φέροντος οι οποίες είναι αρκετά υψηλές κρατώντας το μέγεθος της στοιχειοκεραίας σταθερό ώστε να φθάσει την επιθυμητή ακρίβεια. Με συχνότητα $f = 3$ GHz (δηλαδή $\lambda = 10$ cm), το μήκος του ανοίγματος της κεραίας τα οποία έχουν $L_x = L_y = 1$ m, παρέχουν ήδη $\frac{\min(L_x,L_y)}{\lambda} = 10$ το οποίο αυξάνεται σε 100 όταν έχουμε συχνότητα $f = 30$ GHz. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι αυτές οι τιμές αρκούν για την επίτευξη μιας καλής προσέγγισης. Αν θεωρήσουμε τώρα ότι οι διαλείψεις μικρής κλίμακας παρατηρούνται σε ένα τομέα μιας γραμμής, το ανάπτυγμα Fourier της σειράς επίπεδων κυμάτων μεταφράζεται σαν την παρακάτω σχέση.

$$h(x) \approx \sum_{\ell=-L_x/\lambda}^{L_x/\lambda-1} H_\ell e^{j\frac{2\pi\ell x}{L_x}} \quad (3.23)$$

Το υποστίρηγμα του κυματικού αριθμού του $h(x)$ περιορίζεται στο $k_x \in (-\kappa, \kappa)$ και μπορεί να υπολογιστεί από την κατάρευση του δισδιάστατου πλέγματος του δίσκου, που απεικονίζεται παρακάτω, στον άξονα του k_z . Να σημειωθεί ότι το κ αναπαριστά το εύρος ζώνης του κυματικού αριθμού.



Σχήμα 3.3 Δισδιάστατο διαγραμμα ελλειπτικού πλέγματος ϵ

3.5 Μετρικές του καναλιού

Η αξιολόγηση της επίδοσης του καναλιού γίνεται μέσω των παρακάτω μετρητικών.

Αξιολόγηση μέσω DoF: Τα DoF αναπαριστούν τον αριθμό των ξεχωριστών ροών δεδομένων, οι οποίες μπορούν να μεταδωθούν ταυτόχρονα στο ασύρματο μέσο διάδοσης. Αυτό τα καθιστά εξαιρετικό παράγοντα ώστε να κατανοήσουμε τα όρια ενός συστήματος HMIMO. Στα συστήματα MIMO η χωρητικότητα αυξάνεται γραμμικά με τον αριθμό των Degrees of Freedom (DoF), τα οποία εξαρτώνται από τις συστοιχίες κεραιών και από την σκέδαση του περιβάλλοντος. Ένα ολογραφικό MIMO μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα χωρικά συνεχές aperture των στοιχειοκεραιών όπου ο συνολικός αριθμός τους τείνει στο άπειρο. Όμως σε πραγματικές συνθήκες ο φυσικός χώρος στο aperture των στοιχειόκεραιών είναι πολύ περιορισμένος. Από διάφορα άλλα μοντέλα γνωρίζουμε ότι τα DoF ανά μέτρο σε ένα τομέα περιορίζονται στο μισό του μήκους κύματος του μεταδιδόμενου σήματος.

Χωρητικότητα καναλιού : Για τα HMIMO επικοινωνιακά συστήματα, η χωρητικότητα καναλιού αποτελεί το κλειδί ώστε να προσδιορίσουμε της δυνατότητες τους. Είναι επίσης άμεσα συνδεδεμένη με τα DoF καθώς όσο περισσότερα είναι τα DoF τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα του συστήματος. Η χωρητικότητα πρέπει να εξετάζεται ανα μοντέλο καναλιού καθώς τα αποτελέσματα διαφέρουν αναλόγως αν το κανάλι είναι LoS (line of sight) ή όχι. Συνήθως όταν το κανάλι είναι LoS δεν συμπεριλαμβάνεται σκέδαση η οποία να επηρεάζει την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Δειγματοληψία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου: Καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία διαμορφώνονται από το HMIMO είναι συνεχή στον χώρο, θα πρέπει να διακριτοποιηθούν ώστε να γίνει η ψηφιακή επεξεργασία τους. Για αυτό είναι σημαντική η δειγματοληψία ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί στο μέγιστο η πληροφορία που φέρει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα με όσο το δυνατόν λιγότερα δείγματα.

3.6 Ανακεφαλαίωση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η ανάγκη για την δημιουργία ενός μοντέλου καναλιού για τα HMIMO ώστε να είναι εφικτός ο υπολογισμός των θεωρητικών τους ορίων αλλά και η αξιολόγηση της απόδοσης τους. Αναλύθηκε επίσης το μοντέλο καναλιού του A. Pizzo και του L. Sanguinetti το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο για τον υπολογισμό των DoF σε μια HMIMO διάταξη.

Κεφάλαιο 4^ο

Υπολογισμός των DoF στα Ολογραφικά MIMO

4.1 Μεθοδολογία

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η χωρητικότητα των MIMO συστημάτων είναι ανάλογη των DoF(degrees of freedom), τα οποία καθορίζονται από το περιβάλλον σκέδασης και από την γεωμετρία των στοιχειοκεραιών. Επομένως βρίσκοντας τον μέγιστο αριθμό των DoF σε μια συμπαγή δομή στοιχειοκεραιών μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα και για την χωρητικότητα του συστήματος άλλα και για το θεωρητικό όριο του αριθμού των κεραιών για ένα ΗΜΙΜΟ σύστημα. Θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο καναλιού για διαλείψεις μικρής κλίμακας το οποίο αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ενώ μέσω του MATLAB θα τρέξουμε τις προσομιώσεις, έπειτα θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με ένα σύστημα massive MIMO το οποίο θα λειτουργήσει σαν σημείο αναφοράς και παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω.

4.2 Το uplink ενός massive MIMO συστήματος σαν σημείο αναφοράς

Για να ορίσουμε το αναφερόμενο massive MIMO σύστημα θεωρούμε, ένα γενικό μοντέλο καναλιού το οποίο μας επιτρέπει να θέσουμε διαφορετικά path loss καθώς και τα λαμβανόμενα channel matrixes για κάθε κανάλι μεταξύ των UE(user equipment) και του BS(base station) όπου ο αριθμός των κεραιών N του BS και ο αριθμός των κεραιών K του UE, αυξάνονται ασυμπτωτικά με την ίδια ταχύτητα.

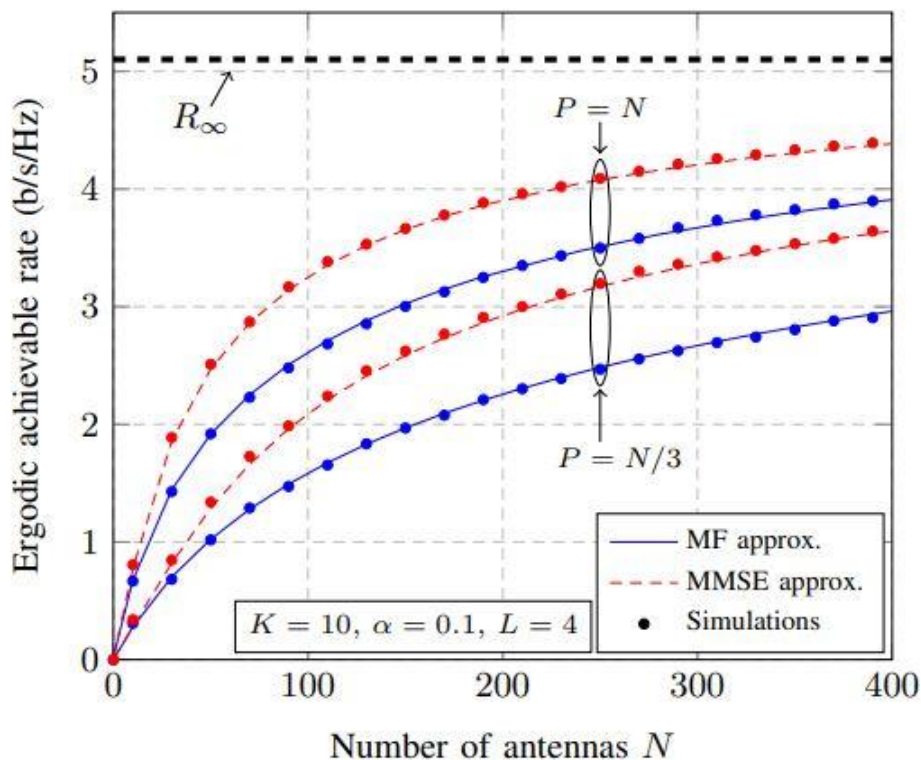
Επομένως για ένα πολυ-κυψελικό σύστημα το οποίο αποτελείται από πλήθος κυψελών $L = 4$, με ένα BS και πλήθος κεραιών K στα UEs(έχουν μόνο μια κεραιά το κάθε ένα), το κανάλι μπορεί να αναπαρασταθεί με την παρακάτω σχέση.

$$\mathbf{y}_j = \sqrt{\rho} \sum_{l=1}^L \mathbf{H}_{jl} \mathbf{x}_l + \mathbf{n}_j \quad (4.1)$$

Όπου το \mathbf{H}_{jl} είναι ο πίνακας του καναλιού(channel matrix) από τα UEs του cell 'l' προς τον BS, το ρ είναι το SNR ενώ το \mathbf{n}_j είναι ο θόρυβος(white gaussian). Να σημειωθεί ότι εξετάζουμε το uplink της ζεύξης μεταξύ των UEs και του BS έτσι ώστε να μπορέσει να θεωρηθεί massive MIMO το σύστημα αλλά με μια διακριτή-μοναδική κεραιά σε κάθε UE αντί για ένα aperture που αποτελείται από πολλές δομές. Για να προβλεφθεί το κανάλι στον BS χρησιμοποιούνται σήματα πιλότοι από τα UEs από τα οποία προκύπτει ο υπολογισμός του θεωρητικού μέγιστου ρυθμού μετάδοσης του καναλιού κάτω από διάλειψη(ergodic achievable rate).

Επομένως για την προσομείωση θα θεωρήσουμε πλήθη κεραιών N στον BS ενώ οι κεραιές στα UEs είναι $K = 10$, ο αριθμός των κυψελών είναι $L = 4$ ενώ το μεταδιδόμενο SNR είναι $\rho = 0$ και έχουμε και ένα παράγοντα διακυψελικής παρεμβολής $\alpha = 0.1$, ενώ το R είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να φτάσει το σύστημα.

Το παρακάτω διάγραμμα (4.1) που προκύπτει από την προσομείωση, απεικονίζει τα DoF στα UEs, τα οποία ανάλογα με την πρόβλεψη του BS για το κανάλι μπορεί να είναι και ίσα με τον αριθμό των κεραιών, σε συνάρτηση με το ergodic achievable rate και με βάση δύο διαφορετικές προσεγγίσεις (MMSE, MF) του BS για το κανάλι.



Σχήμα 4.1 Πίνακας σχέσης μεταξύ του ergodic achievable rate και του αριθμού των κεραιών στο BS

Όπως θα παρατηρήσουμε και στο διάγραμμα σε περαιτέρω αύξηση των κεραιών δεν θα αλλάξει σημαντικά ο ρυθμός μετάδοσης.

4.3 το μοντέλο αναφοράς για το Holographic MIMO σύστημα

Στο μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε θεωρούμε ότι το aperture των στοιχειοκεραιών έχει ορθογώνια συμμετρία και ότι το κανάλι είναι χωρικά σταθερό και μονοχρωματικό ενώ στο περιβάλλον διάδοσης υπάρχει μόνο σκέδαση. Έπειτα θα χρησιμοποιήσουμε μια σηματο-χωρική προσέγγιση η οποία βασίζεται στον χωρικό μετασχηματισμό Fourier σε καρτεσιανές συντεταγμένες ώστε να υπολογίσουμε το θεωρητικό όριο των DoF. Ο τρόπος αυτός μας δίνει ζευγάρια από στατιστικά ανεξάρτητους και τυχαίους συντελεστές των οποίων το cardinality μας δίνει, κατα

προσέγγιση, τα DoF. Τα σενάρια που θα εξεταστούν είναι τρία, για διατάξεις που είναι επίπεδες, γραμμικές και ογκομετρικές ώστε να δούμε σε θεωρητικό επίπεδο πόσες στοιχειοκεραίες άρα και DoF μπορούν να χωρέσουν σε κάθε διάταξη. Έπειτα θα γίνει μια σύγκριση με το massive MIMO σύστημα που αναφέρθηκε παραπάνω. Επιπλέον θα εστιάσουμε μόνο στον δέκτη καθώς για τον πομπό ισχύουν λίγο πολύ τα ίδια.

4.4 Η συνθήκη 2BT και το θεωρητικό όριο των DoF

Πρώτου περάσουμε στα σενάρια θα εξετάσουμε λίγο την φόρμουλα του 2BT για τα κανάλια των κυματομορφών στη σχέση (21), όπου B: το εύρος ζώνης ενώ T: η περίοδος. Θεώρουμε ότι ένα κανάλι κυματομορφής $h(t)$ που έχει περιορισμένο εύρος ζώνης B και χρονικό διάστημα $[0, T]$. Το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon-Nyquist ορίζει ότι μπορούμε να προσεγγίσουμε το $h(t)$ σαν ένα γραμμικό συνδυασμό μετρήσιμων γραμμικών στοιχείων της βάσης της καρδινότητας με συντελεστές οι οποίοι έχουν συλλεχθεί μέσα στο $[0, T]$ και απέχουν μεταξύ τους $\frac{1}{2}B$:

$$h(t) \approx \sum_{n=-BT}^{BT-1} h\left(\frac{n}{2B}\right) \text{sinc}(2Bt - n), \quad t \in [0, T] \quad (4.1)$$

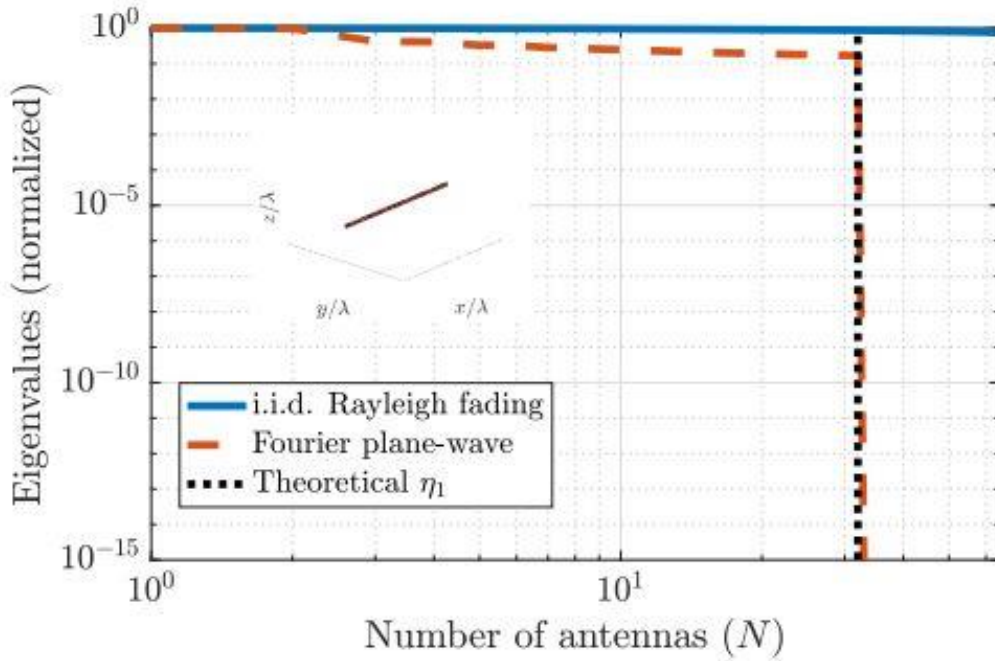
Όπου το προσεγγιστικό σφάλμα γίνεται αμελητέο όσο το BT τείνει προς το άπειρο. Το όριο φαίνεται όταν η περίοδος T τείνει στο άπειρο ενώ το B τείνει στο μηδέν. Αλλά η περίοδος T έχει γρηγορότερη σύγκλιση ώστε το BT να τείνει στο άπειρο. Αυτό συμβαίνει επειδή τα φυσικά σήματα έχουν περιορισμένη ενέργεια και υπόκεινται σε φαινόμενα φασματικής συγκέντρωσης κάτω από τα οποία, καθώς η περίοδος τους αυξάνεται, το εύρος ζώνης γίνεται όλο και μικρότερο με αποτέλεσμα οι τιμές των DoF να περιορίζονται σε διακριτές μη μηδενικές. Οι οποίες είναι προϊόντα μεταξύ της διάρκειας της περιόδου και του εύρους ζώνης της συχνότητας. Η σχέση (3.21) του προηγούμενου κεφαλαίου αποτελεί αναπτύγμα ορθοκανονικών συναρτήσεων με περιορισμένο εύρος ζώνης και πεπερασμένο αριθμό συντελεστών των οποίων το cardinality καθορίζει τις χωρικές διαστάσεις ή αλλιώς τα Degrees of Freedom.

4.4.1 Σενάριο Γραμμικής διάταξης

Σε αυτό το σενάριο θα θεωρήσουμε ότι έχουμε μια μονοδιάστατη γραμμή V1 για την οποία οι διαλείψεις μικρής κλίμακας $h(x, y, z)$ παρατηρούνται σε ένα τομέα της. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης παρατίθενται παρακάτω.

$$L_x = 16\lambda, \Delta = 4/\lambda, \lambda = 10\text{cm}$$

Όπου L_x το μήκος της διάταξης, Δ η απόσταση μεταξύ των σημείων στην διάταξη και λ το μήκος κύματος. Λόγω στατιστικής ανεξαρτησίας των συντελεστών του Fourier, ο μέσος αριθμός των DoF περιορίζεται στο cardinality του καναλιού, οπότε έχουμε την σχέση $\eta_1 = \frac{2}{\lambda} L_x = \frac{\kappa}{\pi} L_x$ (4.2), η οποία ορίζει ότι τα DoF δίνονται από το ρυθμό μεταξύ του μεγέθους του ανοίγματος L_x και του μισού του μήκους κύματος ή εναλλακτικά από το γινόμενο μεταξύ του L_x και του κυματικού αριθμού κ .



Σχήμα 4.2 Γραμμική διάταξη

Αφού τρέξουμε την προσομείωση στο Matlab, μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Διάγραμμα 4.1 ότι ο θεωρητικός υπολογισμός των DoF μέσω της σχέσης (2) συμβαδίζει με τον υπολογισμό της θεωρητικής τιμής του η_1 . Επίσης απο το διάγραμμα φαίνεται ότι το μοντέλο του Rayleigh δεν είναι ικανό να προσδιορίσει τα DoF και άρα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την περίπτωση.

4.4.2 Σενάριο επίπεδης διάταξης

Σε αυτό το σενάριο θα θεωρήσουμε ότι έχουμε δισδιάστατη ορθογώνια δομή V_2 , ενώ οι διαλείψεις μικρής κλίμακας $h(x,y,z)$ παρατηρούνται σε ένα δισδιάστατο ορθογώνιο V_2 με μήκη $L_x > L_y$. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης:

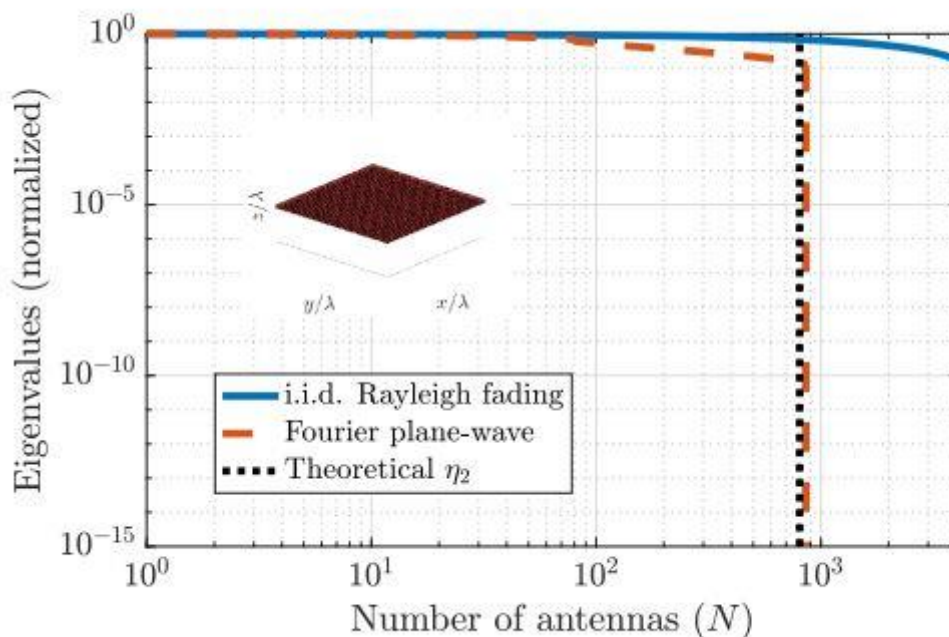
$$L_x = 32\lambda, \Delta = 4/\lambda, \lambda = 10\text{cm}, L_y = 16.$$

Όπου L_x και L_y οι διαστάσεις της διάταξης, Δ η απόσταση μεταξύ των σημείων στην διάταξη και λ το μήκος κύματος. Το ανάπτυγμα Fourier της σειράς επίπεδων κυμάτων του $h(x) = h(x,y,0)$ δίνεται απο:

$$h(x, y) \approx \sum_{(\ell, m) \in \mathcal{E}} c_{\ell, m} \varphi_{\ell, m}(x, y) \quad (x, y) \in \mathcal{V}_2 \quad (4.3)$$

Όπου η $\varphi_{\ell m}(x, y) = \varphi_{\ell}(x)\varphi_m(y)$ είναι η δισδιάστατη βάση του Fourier. Ο μέσος αριθμός των DoF περιορίζεται απο το cardinality του $\{Hlm\}$, το οποίο δίνεται απο την μέτρηση του διακριτού στηρίγματος των κυματικών αριθμών. Αυτό υπολογίζεται μετρώντας τον αριθμό των σημείων του πλέγματος στο διάγραμμα 4.3, οπότε έχουμε $\eta_2 = \frac{\pi}{\lambda^2} L_x L_y$ (4.4). Το οποίο σημαίνει ότι τα DoF είναι αναλογα με την επιφάνεια του ανοίγματος του V_2 η οποία μετριέται σε μονάδες του τετραγωνικού μήκους κύματος. Παρατηρούμε επίσης ότι ενώ θα περιμέναμε ότι το ανάπτυγμα του πεδίου απο μονοδιάστατο σε δισδιάστατο θα μας έδινε $\frac{4L_x L_y}{\lambda^2}$ DoF, αυτό δεν

ισχύει. Καθώς τα DoF μειώνονται κατά ένα παράγοντα $\pi/4 < 1$ ο οποίος είναι ακριβώς η απόσταση μεταξύ των περιοχών του δίσκου $D(k)$ και του τετραγώνου $R(k)$ περιορίζοντας τα. Αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα 4.2.



Σχήμα 4.3 Επίπεδη διάταξη

4.4.3 Σενάριο ογκομετρικής διάταξης

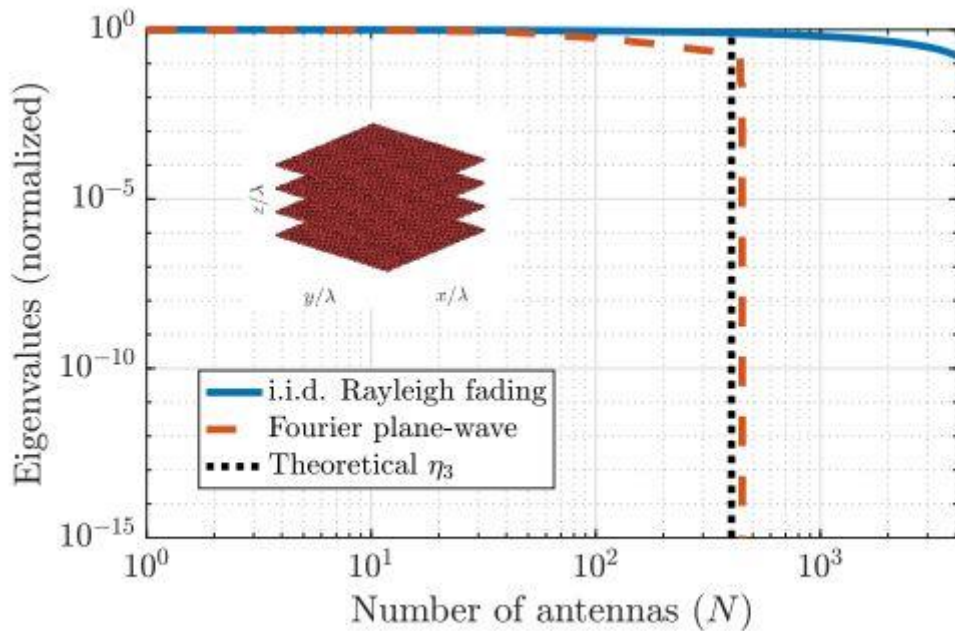
Σε αυτό το σενάριο θα θεωρήσουμε ότι έχουμε ογκομετρική δομή \mathcal{V}_3 ενώ οι διαλείψεις μικρής κλίμακας $h(x,y,z)$ παρατηρούνται σε ένα τρισδιάστατο παραλληλεπίπεδο \mathcal{V}_3 με μήκη L_x, L_y και $L_z < \min(L_x, L_y)$. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης:

$$\mathbf{L}_x = 16\lambda, \Delta = 4/\lambda, \lambda = 10\text{cm}, \mathbf{L}_y = 16, \mathbf{L}_z = 8.$$

Όπου L_x, L_z και L_y οι διαστάσεις της διάταξης, Δ η απόσταση μεταξύ των σημείων στην διάταξη και λ το μήκος κύματος. Από την σχέση (21) Το ανάπτυγμα Fourier της σειράς επίπεδων κυμάτων του $h(x,y,z)$ δίνεται από:

$$h(x,y,z) \approx \sum_{(\ell,m) \in \mathcal{E}} c_{\ell,m}(z) \varphi_{\ell,m}(x,y) \quad (x,y,z) \in \mathcal{V}_3 \quad (4.5)$$

Όπου $c_{\ell,m}(z) = c_{\ell,m}^+ e^{j\gamma_{\ell m} z} + c_{\ell,m}^- e^{-j\gamma_{\ell m} z}$. Λόγω της στατιστικής ανεξαρτησίας των στοιχείων του $h(x,y)$ ο αριθμός των DoF δίνεται από την σχέση $\eta_3 = \frac{2\pi}{\lambda^2} \mathbf{L}_x \mathbf{L}_y$, η οποία δεν εξαρτάται από το L_z . Έτσι η ανάπτυξη του τρισδιάστατου ορθογώνιου ανοίγματος σε ένα τρισδιάστατο ογκομετρικό aperture δίνει ασυμπτωτικά μια διπλάσια αύξηση στα DoF. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας $h(x,y,z)$ αιχμαλωτίζονται από δύο παράλληλες επίπεδες επιφάνειες στις οποίες εάν μόνο η μια από τις δύο συμβάλει στο $h(x,y,z)$ τότε έχουμε $\eta_3 = \eta_2$.



Σχήμα 4.4 Ογκομετρική διάταξη

4.5 τελικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

Τώρα θα χρησιμοποιήσουμε αριθμητικά αποτελέσματα ώστε να επιβεβαιώσουμε την ακρίβεια των θεωρητικών αποτελεσμάτων για τα V_1, V_2, V_3 τα οποία έχουν σχετικά μικρό μέγεθος σε σχέση με το μήκος κύματος λ . Θα παράξουμε, αριθμητικά, ένα συνεχές aperture διακριτοποιώντας σε ένα χωρικό πλέγμα $V_N = \{(x, y, z)_i \in V : i = 1, \dots, N\}$ N σημείων με απόσταση Δ μεταξύ όλων των αξόνων. Αυθαίρετα διαλέγουμε $\Delta = \lambda/4$. Τα δείγματα του καναλιού δημιουργούνται δειγματοληπώντας τις (24)(25)(26) για κάθε $(x, y, z)_i \in V_N$ και συλλέγονται στο h . Για να αξιολογήσουμε την χωρική διάσταση η οποία δημιουργείται από τον τυχαίο πίνακα h , παράγουμε πρώτα ένα σύνολο M από τυχαίους πίνακες $H = [h_1, \dots, h_M]$ με στατιστική διανομή $M \gg N$. Τότε τα DoF που υπολογίζονται από το μοντέλο διαλείψεων του Rayleigh χρησιμοποιούνται σαν ανώτερα όρια. Στο διάγραμμα 4.4 απεικονίζεται μια μονοδιάστατη διάταξη μήκους 16λ (ή αλλιώς $N = 64$ κεραιές). Διάταξεις υψηλότερων διαστάσεων απεικονίζονται στα διαγράμματα 4.5 και 4.6 για δισδιάστατη διάταξη $L_x = L_y = 16\lambda$ ($N = 2048$) και τρισδιάστατη διάταξη $L_x = L_y = 8\lambda$ και $L_z = \lambda$ ($N = 4096$). Όπως βλέπουμε και από τα διαγράμματα οι θεωρητικές τιμές επιβεβαιώνονται και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Αυτό που παρατηρούμε τόσο από τα διαγράμματα των προσομοιώσεων όσο και από τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι ότι ο αριθμός των DoF, δεν αλλάζει ανάλογα με τον τύπο της διάταξης.

Αν συγκρίνουμε τον αριθμό κεραιών του Holographic MIMO με αυτό του Massive MIMO παρατηρούμε ότι, για την δισδιάστατη και τρισδιάστατη διάταξη ο αριθμός των κεραιών είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν στο BS του Massive MIMO και όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, λόγω του ότι το σύστημα λειτουργεί στην περιοχή κοντινού πεδίου (Fresnel) και αποτελεί

ενα συνεχόμενο aperture έχουμε αύξηση του ρυθμού μετάδοσης με την αύξηση του αριθμού των κεραιών. Σε αντίθεση με το Massive MIMO σύστημα, όπου ακόμα και αν αυξηθούν οι κεραιές ο ρυθμός μετάδοσης δεν θα μεταβληθεί σημαντικά.

Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι δεν έχει κάποια απολύτως διαφορά στα DoF εαν η HMIMO διάταξη θα είναι ογκομετρική, επίπεδη ή γραμμική. Οι παράμετροι που καθορίζουν τα DoF είναι στην πραγματικότητα οι διαστάσεις του aperture του HMIMO, L_x και L_y . Επίσης απο τα διαγράμματα επιβεβαιώνεται ότι το μοντέλο του Rayleigh το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον στο μακρινό πεδίο δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση των HMIMO.

Κεφάλαιο 5°

Συμπερασματα

Συνοψίζοντας μελετήσαμε την ανάγκη για την εύρεση μιας τεχνολογίας που θα βελτιώσει τα mMIMO συστήματα. Τα Holographic MIMO τα οποία όπως φαίνεται ,καταφέρνουν να προσεγγίζουν το πρακτικό όριο των άπειρων κεραιών που θέτουν τα mMIMO χωρίς να αυξάνουν τον φυσικό αριθμό των κεραιών τους αποτελούν όντως μια βελτίωση της υπάρχουσας τεχνολογίας των mMIMO και ανοίγουν τον δρόμο για τις ολογραφικές επικοινωνίες.

Το στοχαστικό μοντέλο του A.Pizzo και του L.Sanguinetti το οποίο χρησιμοποιήσαμε για τον υπολογισμό των DoF αποτελεί ενα πολύ χρήσιμο εργαλείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην θεωρητική ανάλυση των ολογραφικών MIMO συστημάτων. Τα DoF αποτελούν το πιο αξιόπιστο μετρητικό για τα θεωρητικά όρια των HMIMO, καθώς πρακτικά ο αριθμός τους μας λει πόσες κεραιές μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα συμπτυγμένο χώρο τέτοιο ώστε η διακριτή διάταξη που θα δημιουργηθεί να επιτύχει την ίδια χωρητικότητα με ένα συνεχές σύστημα. Επόμενως τα DoF βελτιστοποιούν το tradeoff μεταξύ της χωρητικότητας και του κόστους μιας διάταξης μεγιστοποιώντας την ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομείωσης επίσης επιβεβαιώνουν του θεωρητικούς υπολογισμούς των DoF. Στην ανάλυση του καναλιού εστίασαμε σε ιστροπικό περιβάλλον με σκέδαση αλλά το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μη ιστροπικό περιβάλλον. Αξίζει επίσης να κάνουμε μια σύγκριση με το μοντέλο του Rayleigh το οποίο όπως φαίνεται και απο τα διαγράμματα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα HMIMO τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Παρόλο που βρισκόμαστε ακόμα αρκετά μακριά απο την πρακτική εφαρμογή των HMIMO, η έρευνα γύρω απο αυτά συνεχίζεται με τις προσπάθειες να επικεντρώνονται στην εύρεση αποδοτικότερων

αλγορίθμων και μοντέλων πρόβλεψης του ολογραφικού ασύρματου καναλίου αλλά και σε νέους τρόπους με τους οποίους μπορεί να γίνει το ολογραφικό beamforming.

Τα ολογραφικά MIMO αποτελούν μια καινοτόμα τεχνολογία, η οποία θα παίξει καθοριστικό ρόλο στα ασύρματα συστήματα τηλεπικοινωνιών της 6^{ης} γενιάς.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] <https://www.ijert.org/research/a-review-on-mimo-systems-with-antenna-selection-IJERTCONV5IS22046.pdf>
- [2] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7284607/>
- [3] Holographic Communication using Intelligent Surfaces, Davide Dardari, Senior Member, IEEE, Nicoló Decarli, Member, IEEE,
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Holography>
- [5] Design Procedure of a Frequency Reconfigurable Metasurface Antenna at mmWave Band
- [6] AN OVERVIEW OF MIMO-ORIENTED CHANNEL ACCESS IN WIRELESS MOHAMMAD Z. SIAM AND MARWAN KRUNZ, UNIVERSITY OF ARIZONA
- [7] Holographic MIMO Surfaces for 6G Wireless Networks: Opportunities, Challenges, and Trends Chongwen Huang, Member, IEEE, Sha Hu, Member, IEEE, George C. Alexandropoulos, Senior Member, IEEE, Alessio Zappone, Senior Member, IEEE, Chau Yuen, Senior Member, IEEE, Rui Zhang, Fellow, IEEE, Marco Di Renzo, Fellow, IEEE, and M´erouane Debbah, Fellow, IEEE
- [8] Degrees of Freedom of Holographic MIMO Channels Andrea Pizzo and Thomas L. Marzetta Department of Electrical and Computer Engineering New York University, USA {andrea.pizzo, tlm}@nyu.edu Luca Sanguinetti Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione University of Pisa, Italy luca.sanguinetti@unipi.it
- [9] Spatially-Stationary Model for Holographic MIMO Small-Scale Fading Andrea Pizzo, Member, IEEE, Thomas L. Marzetta, Fellow, IEEE, Luca Sanguinetti, Senior Member, IEEE
- [10] Holographic Beam Forming and MIMO By Eric J. Black, PhD, CTO, Pivotal Commware
- [11] A Tutorial on Holographic MIMO Communications—Part II: Performance Analysis and Holographic Beamforming Jiancheng An, Member, IEEE, Chau Yuen, Fellow, IEEE, Chongwen Huang, Member, IEEE, Merouane Debbah, Fellow, IEEE, H. Vincent Poor, Life Fellow, IEEE, and Lajos Hanzo, Life Fellow, IEEE (Invited Paper)
- [12] Twelve Scientific Challenges for 6G: Rethinking the Foundations of Communications Theory Marwa Chafii, Member, IEEE, Lina Bariah, Senior Member, IEEE, Sami Muhaidat, Senior Member, IEEE, and Merouane Debbah, Fellow, IEEE
- [13] T. Marzetta, “Spatially-stationary propagating random field model for Massive MIMO small-scale fading,” in IEEE International Symposium on Information Theory, 2018. Proceedings., June 2018.
- [14] L. Sanguinetti, E. Björnson, and J. Hoydis, “Towards massive MIMO 2.0: Understanding spatial correlation, interference suppression, and pilot contamination,” IEEE Transactions on Communications, vol. 68, no. 1, pp. 232–257, January 2020.

- [15] A. S. Y. Poon, R. W. Brodersen, and D. N. C. Tse, "Degrees of freedom in multiple-antenna channels: a signal space approach," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 2, pp. 523–536, Feb 2005
- [16] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005
- [17] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna gaussian channels," *European Trans. Telecommun.*, vol. 10, no. 6, pp. 585–595, 1999.
- [18] W. C. Chew, *Waves and Fields in Inhomogenous Media*, Wiley-IEEE Press, 1995.
- [19] Reconfigurable Holographic Surface: A New Paradigm to Implement Holographic Radio Ruoqi Deng, Student Member, IEEE, Yutong Zhang, Student Member, IEEE, Haobo Zhang, Student Member, IEEE, Boya Di, Member, IEEE, Hongliang Zhang, Member, IEEE, and Lingyang Song, Fellow, IEEE
- [20] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, Feb. 2014
- [21] *Holographic MIMO Communications: Theoretical Foundations, Enabling Technologies, and Future Directions* Tierui Gong, Member, IEEE, Ioanna Vinieratou, Student Member, IEEE, Ran Ji, Chongwen Huang, Member, IEEE, George C. Alexandropoulos, Senior Member, IEEE, Li Wei, Zhaoyang Zhang, Senior Member, IEEE, M´erouane Debbah, Fellow, IEEE, H. Vincent Poor, Fellow, IEEE, and Chau Yuen, Fellow, IEEE
- [22] Z. Wan, Z. Gao, F. Gao, M. D. Renzo, and M.-S. Alouini, "Terahertz massive MIMO with holographic reconfigurable intelligent surfaces,"
- [23] C. Huang et al., "Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 5, pp. 118-125, Oct. 2020.
- [24] H. Wang, N. Shlezinger, S. Jin, Y. C. Eldar, I. Yoo, M. F. Imani, and D. R. Smith, "Dynamic metasurface antennas based downlink massive MIMO systems," in *Proc. 2019 IEEE 20th Int. Workshop Signal Process. Adv. Wireless Commun. (SPAWC)*, Jul. 2019, pp. 1–5.
- [25] K. Dovelos, S. D. Assimonis, H. Quoc Ngo, B. Bellalta, and M. Matthaiou, "Electromagnetic modeling of holographic intelligent reflecting surfaces at Terahertz bands," in *Proc. 2021 55th Asilomar Conf. Signals, Sys., Comp.*, 2021, pp. 415–420.
- [26] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films," *Science*, vol. 306, no. 5696, pp. 666–669, Oct. 2004.
- [27] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, "Massive MIMO has unlimited capacity," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 574–590, Jan. 2018.
- [28] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjoland, and F. Tufvesson, "6G wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities," *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 7, pp. 1166–1199, Jul. 2021.
- [29] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Q. Li, "6G wireless communications: Vision and potential techniques," *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 4, pp. 70–75, Aug. 2019.

[30] G. C. Alexandropoulos, G. Lerosey, M. Debbah, and M. Fink, "Reconfigurable intelligent surfaces and metamaterials: The potential of wave propagation control for 6G wireless communications," IEEE ComSoc TCCN Newslett., vol. 6, no. 1, pp. 25–37, Jun. 2020.

[31] A. Elzanaty, A. Guerra, F. Guidi, D. Dardari, and M.-S. Alouini, "Towards 6G holographic localization: Enabling technologies and perspectives," arXiv preprint arXiv:2103.12415, 2021.

[32] Holographic Beam Forming and MIMO By Eric J. Black, PhD, CTO, Pivotal Commware.

[33] Massive MIMO: How many antennas do we need? Jakob Hoydis*†, Stephan ten Brink‡, and Merouane Debbah´ † *Department of Telecommunications, Supelec, 3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif-sur-Yvette, France ´ †Alcatel-Lucent Chair on Flexible Radio, Supelec, 3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif-sur-Yvette, France ´ ‡Bell Labs, Alcatel-Lucent, Lorenzstr. 10, 70435 Stuttgart, Germany {jakob.hoydis, merouane.debbah}@supelec.fr, stephan.tenbrink@alcatel-lucent.com