

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών

[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244  
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
Department of Electrical & Electronics Engineering

[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

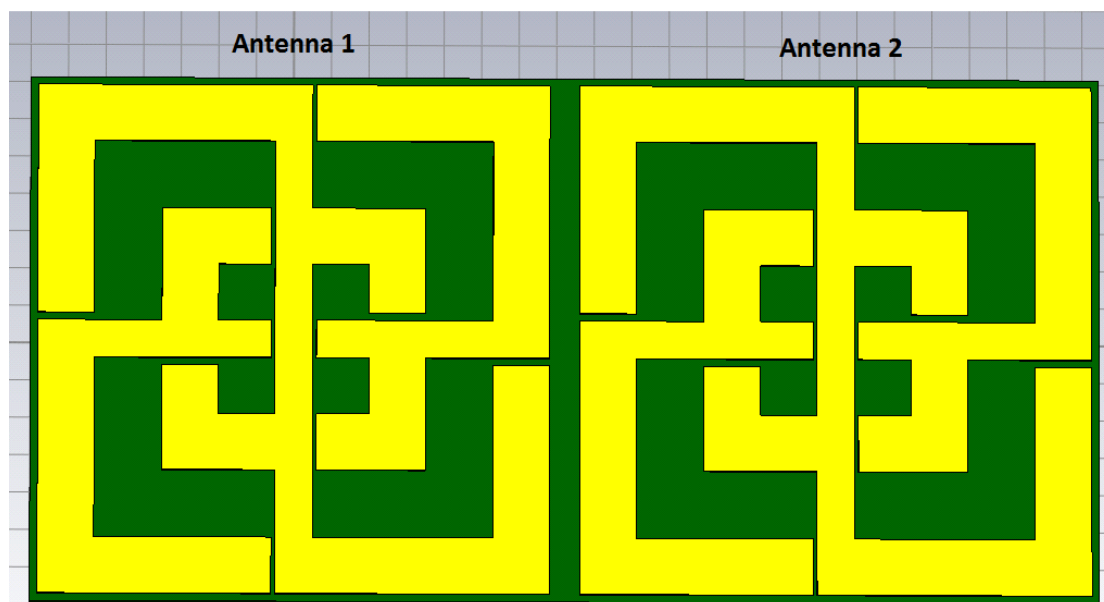
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece  
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

Master of Science By Research in  
Electrical & Electronics Engineering

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Τίτλος: Μελέτη βελτιστοποίησης της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ στοιχείων  
κεραιών MIMO*



Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια: Μαρία Δούκα, AM 005  
Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Ν. Βουδούρης, Καθηγητής

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2020

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών  
[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244  
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
Department of Electrical & Electronics Engineering  
[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

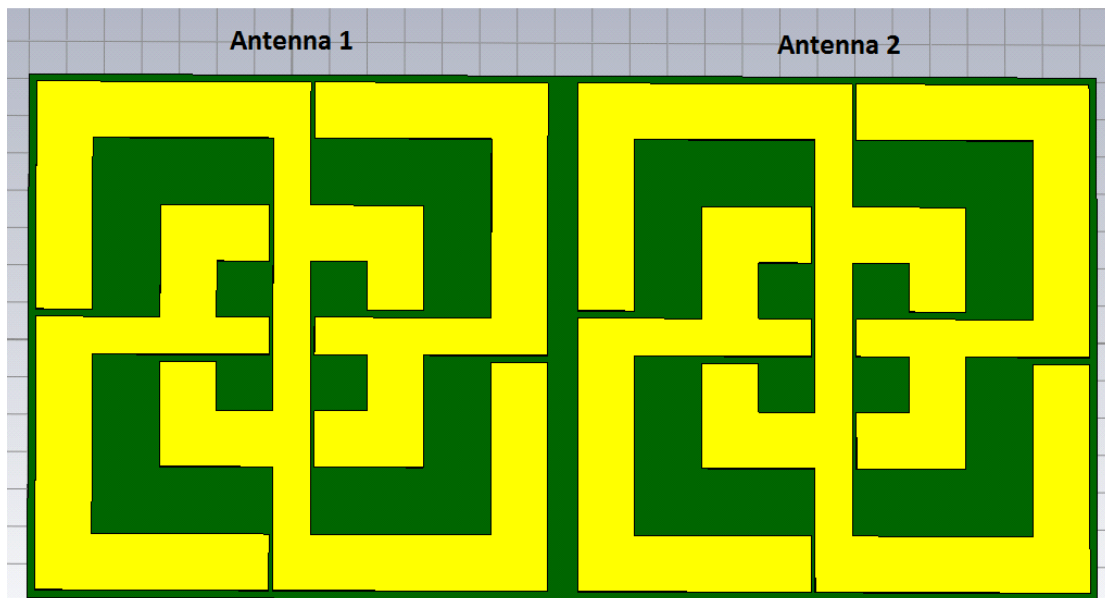
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece  
Tel: +30 210 538-1225, Fax: +30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
*Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας*

Master of Science By Research in  
*Electrical & Electronics Engineering*

## MSc Thesis

*Title: Study on mutual coupling optimization between elements in MIMO antennas*



Student: Douka, Maria, Registration Number 0005  
MSc Thesis Supervisor: K. N. Voudouris, Professor

ATHENS-EGALEO, JUNE 2020

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Κωνσταντίνος Βουδούρης	Αθανάσιος Νασιόπουλος	Νικόλαος Σταθόπουλος
Καθηγητής	Καθηγητής	Καθηγητής

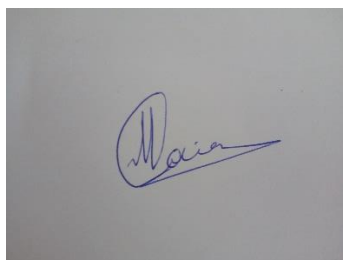
## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μαρία Δούκα του Αθανασίου, με αριθμό μητρώου 0005 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών “Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας” του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι η συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του τίτλου μου».

Η Δηλούσα



Μαρία Δούκα

Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, ο αλματώδης ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται η τεχνολογία και οι σχετικές υπηρεσίες είχαν σαν συνέπεια και την παράλληλη ζήτηση για αυξημένη χωρητικότητα και ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Η τεχνολογία Πολλαπλής – Εισόδου – Εξόδου MIMO (Multiple – Input – Multiple – Output), η οποία αποτελεί την εξέλιξη του παλαιότερου τηλεπικοινωνιακού συστήματος Μονής – Εισόδου – Εξόδου SISO (Single – Input – Single – Output) εφαρμόστηκε προκειμένου να επιτευχθούν οι προαναφερθείσες απαιτήσεις. Ένα MIMO σύστημα έχει την ικανότητα να στέλνει και να δέχεται πολλαπλά ανεξάρτητα κανάλια ταυτόχρονα, επάνω στο ίδιο κανάλι, το οποίο αποτελεί μία ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα της διάδοσης των πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation). Όμως, παρά τα πλεονεκτήματά της, το γεγονός ότι σε ένα MIMO σύστημα οι κεραιές είναι τοποθετημένες σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους δημιουργεί αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των στοιχείων που εκπέμπουν, κάτι που επηρεάζει αρνητικά τα επιμέρους χαρακτηριστικά της κεραιάς και κατά συνέπεια την απόδοση του συστήματος.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, υπό τον τίτλο “ Μελέτη βελτιστοποίησης της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ στοιχείων κεραιών MIMO”, έχει ως σκοπό τη μελέτη, και ανάλυση συστημάτων MIMO καθώς και τη μελέτη συστημάτων απόζευξης (decoupling networks) που οδηγούν στη μείωση της προαναφερθείσας σύζευξης και την αύξηση της απομόνωσης των στοιχείων μεταξύ τους.

Αρχικά γίνεται μια αναδρομή στην ιστορία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η λειτουργία και η δομή των MIMO συστημάτων καθώς και το πώς τα συστήματα αυτά εκμεταλλεύονται το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών (multipath), με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η αύξηση της χωρητικότητας καναλιού. Επιπρόσθετα ορίζεται ο πίνακας μεταφοράς του καναλιού ο οποίος περιέχει στοιχεία που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του καναλιού. Έπειτα δίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των MIMO συστημάτων και ακολουθεί η περιγραφή του υπό μελέτη φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης και των τεχνικών μείωσης αυτού, ενώ κάθε τεχνική επεξηγείται με αρκετά πρόσφατα παραδείγματα που έχουν βρεθεί στη σύγχρονη βιβλιογραφία.

Ουσιαστικό κομμάτι της διπλωματικής αυτής εργασίας αποτελεί το Κεφάλαιο 9 υπό τον τίτλο “Μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ τετράγωνων κεραιών βρόχου σε σύστημα MIMO κεραιών πολύ μικρών διαστάσεων”, στο οποίο εμφανίζεται η έρευνά μου όσον αφορά τη σχεδίαση συστήματος απόζευξης καθώς και τα αποτελέσματα αυτής.

Τέλος, γίνεται σύγκριση όλων των συστημάτων που παρουσιάστηκαν στην εν λόγω εργασία και δίνονται συμπεράσματα που προκύπτουν από το σύνολό της.

**ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ:** CSRR, decoupling network, metamaterial, MIMO antenna, mutual coupling, neutralization line, parasitic element, patch antenna.

## ABSTRACT

The last years, the rapidly increase and change in technology and its relevant services had as a consequence the parallel increase in demand of high data transmission capacity and high data rate, as well. In order for these demands to be fulfilled, the MIMO technology (Multiple – Input – Multiple – Output), which in fact is the evolution of an older mobile communication system which is called SISO (Single – Input – Single – Output), was implemented. A MIMO system presents the remarkable ability of simultaneously sending and receiving a large number of independent channels over the same radio channel, solving thus the problem of multipath propagation, in a satisfying degree. But, inspite of its advantages, the fact that the antennas in a MIMO system are placed in a densed proximity between them, in order to achieve the desired compact size which is essential for contemporary mobile appliances, can cause mutual coupling among the radiating elements. This phenomenon affects significantly the system overall performance by degrading antenna's characteristics, and therefore it needs to be mitigated.

The present dissertation under the title “Study on mutual coupling optimization between elements in MIMO antennas” concerns the investigation and analysis of MIMO systems, as well as the study of decoupling networks that lead to the reduction of the aforementioned coupling and the enhancement of the isolation between the radiating elements.

Initially, there is a retrospection in the history of telecommunication systems. Afterwards, the logic and structure of MIMO systems are described, along with the way that these systems exploit the multipath phenomenon in order to achieve an increase in channel capacity. The channel transfer table which contains elements describing the channel's characteristics, is also defined. Then the advantages and disadvantages of MIMO systems are given, followed by a description of the phenomenon under study of mutual coupling and its reduction techniques, while each technique is explained by several recent examples found in modern literature.

An essential part of this diplomatic MSc Thesis under the title “On reduction of Mutual Coupling Effect for Square Loop Antennas on a very Compact MIMO System”, in

which my research regarding the design of a decoupling network and its results is shown.

Finally, all the systems presented in this paper are compared and conclusions drawn from the whole are given.

**KEYWORDS:** CSRR, decoupling network, metamaterial, MIMO antenna, mutual coupling, neutralization line, parasitic element, patch antenna.



## ***ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ***

Όταν τον Οκτώβριο του 2018 μπήκα στον κόσμο της έρευνας, είχα στα χέρια μου έναν σχεδόν κενό χάρτη, στον οποίο ήταν σχεδιασμένες μόνο οι βασικές διαδρομές. Ξεκίνησα να περπατάω, και κατά τη διάρκεια της διαδρομής άρχισα να σχηματίζω τον χάρτη σιγά-σιγά. Πολλές φορές βρέθηκα σε μικρά παράπλευρα δρομάκια ή ακόμα και σε απογοητευτικά αδιέξοδα, αλλά βρήκα και καινούργια, χρήσιμα μονοπάτια που οδηγούσαν σε νέες ανακαλύψεις, κάτι που λειτούργησε ως επιβράβευση και αποτέλεσε κίνητρο για εμένα.

Στη μέχρι τώρα πορεία μου υπήρξαν αρκετοί άνθρωποι οι οποίοι έπαιξαν σημαντικό ρόλο.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Βουδούρη, ο οποίος με εμπιστεύτηκε για την εκπόνηση της ερευνητικής διπλωματικής μου εργασίας. Οι συμβουλές, οι επισημάνσεις και οι παρατηρήσεις του ήταν πάντα χρήσιμες και λειτούργησαν ως πυξίδα στη διαδρομή μου. Τον ευχαριστώ επίσης από καρδιάς για τα τόσο ενθαρρυντικά του λόγια.

Στη συνέχεια θα ήθελα πραγματικά να ευχαριστήσω τη διευθύντρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών “Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας” του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, την καθηγήτρια κα. Ραγκούση Μαρία, για τη θετικά της λόγια και την ηθική υποστήριξη της καθ’ όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Είναι πολύ σημαντικό οι καθηγητές να αφουγκράζονται και να βρίσκονται δίπλα στον φοιτητή και αυτό είναι κάτι που δεν το ξεχνάω...

Τέλος, αλλά σε καμία περίπτωση μείζονος σημασίας, θα ήθελα να κάνω ιδιαίτερη μνεία στην οικογένειά μου, τον σύζυγό μου Φίλιππο και τους δύο μικρούς μου γιους Γιάννη και Παύλο, οι οποίοι άντεξαν στωικά τις αμέτρητες ώρες διαβάσματός μου... Ειδικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Φίλιππο, ο οποίος υπήρξε νοητός και αόρατος (πάντα όμως παρόν) συνταξιδιώτης και συμπαραστάτης μου...

*Μαρία Δούκα*

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ-ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ-ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

MIMO: Multiple-Input-Multiple-Output

SISO: Single-Input-Single-Output

CSRR: Complementary Split Ring Resonator

MTM: Metamaterial

BER: Bit Error Rate

MPA: Multi-Port Antenna

MEA: Multi-Element Antenna

MPOA: Multi-Polarized Antenna

MMA: Multi-Mode Antenna

SNR: Signal-to Noise Ratio

CSI: Channel State Information

AWGN: Additive White Gaussian Noise

TARC: Total Active Reflection Coefficient

UWB: Ultra-Wide Band

DR: Dielectric Resonator

NRI: Negative Refractive Index

SMA: SubMiniature version A

CST: Computer Simulation Technology

5G: 5<sup>th</sup> Generation

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Εισαγωγή .....	12
2. Αναδρομή στην ιστορία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων .....	13
3. Βασική δομή τηλεπικοινωνιακού συστήματος .....	15
4. Το κανάλι ως μέσο μετάδοσης σήματος .....	16
5. Εισαγωγή στα συστήματα MIMO .....	18
6. Μοντελοποίηση ενός συστήματος MIMO .....	19
7. Πλεονεκτήματα MIMO συστημάτων .....	21
7.1. Κέρδος συστοιχίας .....	21
7.2. Κέρδος χωρικού διαφορισμού .....	21
7.3. Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας .....	22
8. Μειονεκτήματα MIMO συστημάτων .....	23
9. Αμοιβαία σύζευξη (mutual coupling) .....	24
9.1. Αμοιβαία σύζευξη κατά την εκπομπή .....	24
9.2. Αμοιβαία σύζευξη κατά τη λήψη .....	26
10. Τρόποι μείωσης της αμοιβαίας σύζευξης (mutual coupling) .....	27
10.1. Δακτύλιοι CSRR (Complementary Split Ring Resonator) .....	27
10.1.α. Μία μικρών διαστάσεων UWB MIMO κεραία με ενσωματωμένο CSRR δακτύλιο .....	27
10.1.β. Καταστολή της σύζευξης με τη χρήση δομής αποτελούμενης από CSRR	28
10.1.γ. Καταστολή της αμοιβαίας σύζευξης για MIMO κεραία στα 60 GHz με χρήση δακτυλίων .....	30
10.1.δ. Έτερο παράδειγμα μείωσης της αμοιβαίας σύζευξης για MIMO κεραία με χρήση CSRR .....	30
10.1.ε. CSRR δακτύλιοι για αύξηση της απομόνωσης σε κεραία 5 <sup>ης</sup> γενιάς .....	31
10.2. Μεταϋλικά (metamaterials) και μεταεπιφάνειες (metasurfaces) .....	33

10.2.α. MIMO κεραία για φορητές ασύρματες εφαρμογές με υψηλή απομόνωση λόγω μεταϋλικού .....	35
10.2.β. MIMO κεραία και χρήση μεταϋλικών .....	36
10.2.γ. Στοιχειοκεραία και μεταεπιφάνεια .....	37
10.2.δ. Απομόνωση και αύξηση κέρδους με τη χρήση μεταεπιφάνειας σε MIMO εφαρμογές .....	39
10.2.ε. Έτερο παράδειγμα μεταεπιφάνειας σε 5G MIMO κεραία .....	41
10.2.στ. Πρόσθετο παράδειγμα μεταεπιφάνειας ως μεθόδου μείωσης της αμοιβαίας σύζευξης σε MIMO σύστημα κεραιών .....	43
10.2.ζ. Μείωση αμοιβαίας σύζευξης σε μη-επίπεδο κυβικό σύστημα MIMO κεραίας .....	44
10.2.η. Συμπαγής UWB MIMO κεραία με σύστημα απόζευξης με μεταϋλικά .	46
10.2.θ. Μείωση αμοιβαίας σύζευξης σε κεραία σχήματος E .....	47
10.3. Γραμμές ουδετεροποίησης (Neutralization Lines) .....	50
10.3.α. Απόζευξη κεραίας δύο στοιχείων με μία απλή γραμμή ουδετεροποίησης .	50
10.3.β. Συμπαγής κεραία υψηλής απομόνωσης για 5G εφαρμογές .....	52
10.4. Παρασιτικά στοιχεία (Parasitic Elements) .....	54
10.4.α. Αύξηση της απομόνωσης σε μία MIMO κεραία με παρασιτικά στοιχεία. .	54
10.4.β. Αύξηση της απομόνωσης σε μία MIMO κεραία με τη χρήση κυκλικών παρασιτικών στοιχείων .....	55
11. Μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ τετράγωνων κεραιών βρόχου σε σύστημα MIMO κεραιών πολύ μικρών διαστάσεων .....	57
11.1. Σχεδιαστική αντίληψη .....	57
11.2. Σχεδίαση του συστήματος MIMO .....	60
12. Σύγκριση μεταξύ των διαφόρων μεθόδων απόζευξης .....	62
13. Επίλογος .....	65
Βιβλιογραφία .....	67

*The sky is the limit...*

## 1. Εισαγωγή

Στη σύγχρονη τηλεπικοινωνιακή εποχή, η υψηλή μετάδοση δεδομένων και η μεγάλη χωρητικότητα καναλιού είναι καίριας σημασίας. Όσον αφορά τον τομέα των κεραιών, η απαίτηση αυτή ικανοποιείται με τις κεραιές Πολλαπλής Εισόδου – Εξόδου (Multiple – input – multiple - output), οι οποίες έχουν επικρατήσει με την ονομασία MIMO [1-3] και αποτελούν την εξέλιξη του παλαιότερου τηλεπικοινωνιακού συστήματος Μονής Εισόδου – Εξόδου (Single – input – single - output), ή αλλιώς SISO. Ένα SISO σύστημα είναι απλό και εύκολο στη σχεδίαση. Παρ’ όλα αυτά αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα στο τωρινό τηλεπικοινωνιακό πεδίο, όπως περιορισμός στο εύρος δεδομένων και απώλεια εκπεμπόμενης ισχύος. Από την άλλη πλευρά, η MIMO σχεδίαση δίνει στο εν λόγω σύστημα τη δυνατότητα να στέλνει και να δέχεται ταυτόχρονα πολλαπλά ανεξάρτητα κανάλια (channels), λύνοντας έτσι το πρόβλημα της διάδοσης των πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation) [4]. Η χρήση πολλαπλών στοιχείων κεραιάς τόσο στην πηγή (πομπός) όσο και στον προορισμό (δέκτης) μέσα σε έναν περιορισμένο χώρο μπορεί να δημιουργήσει αλλά και να αυξήσει την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των κοντινά αυτών τοποθετημένων κεραιών, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα του επιφανειακού ρεύματος που διεγείρεται από τις θύρες. Η αμοιβαία σύζευξη μπορεί να επέμβει δραματικά στα χαρακτηριστικά μιας κεραιάς, μειώνοντας, εν γένει, την απόδοσή της [5-6]. Επομένως, μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις στη σχεδίαση ενός συστήματος κεραιών MIMO είναι η “απομόνωση” των στοιχείων αυτών και έτσι να επιτευχθεί τελικά μείωση της αμοιβαίας σύζευξης. Αν και η σύζευξη αυτή μπορεί παραδοσιακά να αμβλυνθεί με τεχνικές ρύθμισης και προσαρμογής (calibration techniques) στον ψηφιακό τομέα, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα διαδικασίες precoding και decoding [7-8], particle swarm optimization [9-10] και γενετικούς αλγόριθμους [11-12], υπάρχει ωστόσο ένας εναλλακτικός και πιο ρεαλιστικός τρόπος να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό από την πλευρά της κεραιάς, με τη χρήση τεχνικών διαχωρισμού (decoupling techniques).

Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν δίκτυα διαχωρισμού όπως δακτύλιοι CSRR (Complementary Split-Ring Resonators), μεταϋλικά MTM (metamaterials), μεταεπιφάνειες (metasurfaces), γραμμές ουδετεροποίησης (neutralization lines) και γενικά δομές οι οποίες είναι δυνατό να εμποδίσουν ή να ελαχιστοποιήσουν τη ροή του επιφανειακού ρεύματος και έτσι να ελέγξουν την αμοιβαία σύζευξη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αρχικά μια αναδρομή στην ιστορία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Στη συνέχεια γίνεται μία εισαγωγή στα MIMO συστήματα, περιγράφοντας τη δομή και λογική τους, όπως και τα πλεονεκτήματα / μειονεκτήματά τους. Έπειτα αναλύεται το φαινόμενο της αμοιβαίας σύζευξης το οποίο οφείλεται στην πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ κεραιών πομπού και δέκτη και αποτελεί τον πυρήνα της εν λόγω διπλωματικής εργασίας. Εν συνεχεία περιγράφονται τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού, σύμφωνα με την πρόσφατη βιβλιογραφία. Τέλος, παρουσιάζεται μία καινοτόμος μελέτη και σχεδίαση βελτιστοποίησης της σύζευξης μεταξύ στοιχείων σε MIMO κεραία.

## **2. Αναδρομή στην ιστορία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων**

Η μεταφορά μίας οποιαδήποτε πληροφορίας από έναν αποστολέα σε έναν τουλάχιστον παραλήπτη, κάτι που αποτελεί τον ευρύτερο ορισμό του όρου “τηλεπικοινωνίες”, έχει καταγραφεί ιστορικά σε αμέτρητες προσπάθειες του ανθρώπου να δημιουργήσει αξιόπιστα συστήματα με τα οποία η οποιαδήποτε πληροφορία να μπορεί να μεταδίδεται ταχύτερα απ’ ότι του επιτρέπουν οι σωματικές του δυνατότητες ή οι εκάστοτε συνθήκες. Οι φωτεινοί αναμεταδότες, οι φρυκτωρίες, ο οπτικός τηλεγράφος στην αρχαία Ελλάδα, μέχρι και τα ταχυδρομικά περιστέρια, αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα. Αυτό όμως που επηρέασε όσο τίποτε άλλο τη ραγδαία ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών είναι η ανακάλυψη του ηλεκτρισμού.

Αρχικά ο Alessandro Volta εφηύρε το ηλεκτρικό στοιχείο (1799). Το 1839 εμφανίστηκε ο ηλεκτρικός τηλεγράφος και στη συνέχεια το τηλέφωνο, η εξέλιξη του οποίου ήταν αλματώδης. Υπολογίζεται ότι έως το 1880 λειτουργούσαν στις Ηνωμένες Πολιτείες περί τις 100.000 τηλεφωνικές συσκευές.

Κατόπιν (1864), ο James Clark Maxwell – φυσικός από το Ηνωμένο Βασίλειο-αναφέρθηκε στην ύπαρξη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και διατύπωσε τη βασική θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, περιγράφοντας την αλληλεξάρτηση ηλεκτρισμού και μαγνητισμού. Η πειραματική της επαλήθευση ήρθε το 1887 από τον Hertz, πάνω στον οποίο βασίστηκε ο Guilielmo Marconi και έφτιαξε την πρώτη

ασύρματη συσκευή μετάδοσης πληροφορίας, τον ασύρματο τηλεγράφο, καταφέροντας την πρώτη υπερατλαντική ασύρματη ζεύξη.

Στο σημείο αυτό της ιστορικής αναδρομής αξίζει να αναφερθεί το “Θεώρημα Δειγματοληψίας”, το οποίο διατυπώθηκε από τον Harry Nyquist τη δεκαετία του 1920. Στο θεώρημα αυτό παρουσιάζεται η θεμελιώδης σχέση του εύρους ζώνης που διατίθεται από ένα κανάλι σε συνάρτηση με τον μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας, με τους μεταδιδόμενους παλμούς να έχουν μηδενική παρεμβολή μεταξύ τους, θέτοντας τα θεμέλια για την περαιτέρω ανάπτυξη των ψηφιακών επικοινωνιών.

Οι βάσεις όμως για την ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών τέθηκαν τη δεκαετία του 1940, όταν ο Claude Elwood Shannon ανέπτυξε την έννοια της χωρητικότητας καναλιού και δημοσίευσε τη διάσημη εργασία του “Μαθηματική Θεωρία των Επικοινωνιών” (A Mathematical Theory of Communication), όπου παρουσιάζει την πληροφορία σαν οιοδήποτε άλλο φυσικό μέγεθος, συναφώς, δύναται να μετρηθεί και να χειριστεί από μηχανές. Στην ανωτέρω δημοσίευση γίνεται για πρώτη φορά αναφορά στο δυαδικό ψηφίο (binary digit), γνωστό στη συνέχεια ως bit, ενώ θέτονται τα μαθηματικά εργαλεία που είναι απαραίτητα για τη μέτρηση ενός καναλιού επικοινωνίας, δηλαδή την ποσότητα της πληροφορίας που μπορεί να φτάσει σε ένα σημείο χωρίς σφάλματα, θεμελιώνοντας μαθηματικά τη Θεωρία Πληροφοριών.

Οι περισσότερες όμως θεωρητικές ανακαλύψεις δεν θα μπορούσαν να υλοποιηθούν χωρίς την ανακάλυψη του τρανζίστορ που έλαβε χώρα το 1947 και στη συνέχεια η εφεύρεση του ολοκληρωμένου κυκλώματος αντίστοιχα. Τις επόμενες δεκαετίες εμφανίστηκαν διάφορες εφαρμογές και υπηρεσίες, όπως κυψελωτά συστήματα κινητής τηλεφωνίας, δορυφορικές επικοινωνίες και Διαδίκτυο.

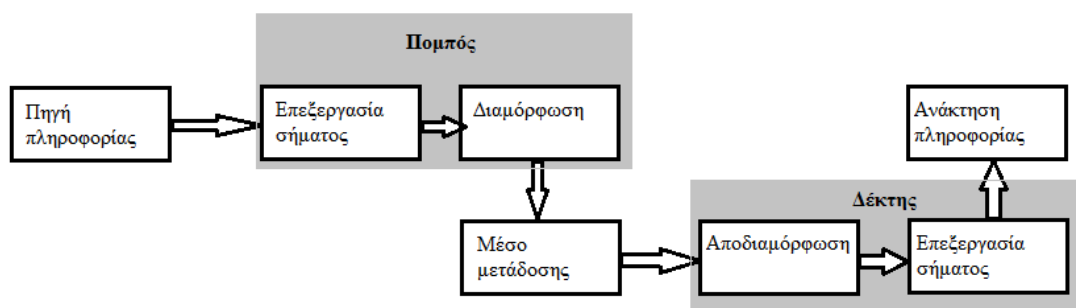
Τα τελευταία χρόνια η χρήση ασύρματων επικοινωνιών αυξήθηκε ραγδαία απαιτώντας παράλληλα ταχύτερη και αξιόπιστη μετάδοση πληροφορίας σε ένα κατειλημμένο, στο μεγαλύτερο μέρος του, φάσμα. Στα πλαίσια αυτά εμφανίστηκαν τα συστήματα Πολλαπλών Εισόδων – Εξόδων MIMO, με τα οποία επιτυγχάνεται υψηλότερη απόδοση του φάσματος, δηλαδή περισσότερα bit ανά second ανά hertz στο εύρος ζώνης, με ταυτόχρονη αξιοπιστία λόγω μειωμένης εξασθένισης. Οι αρχικές μελέτες για τη χρήση μιας τέτοιου είδους τεχνολογίας εμφανίζονται το 1970 στην εργασία των A. Kaye και D. George και το 1975 στην εργασία των W. Van Etten. Στη συνέχεια οι Jack



Winters και Jack Salz από τα εργαστήρια Bell δημοσίευσαν διάφορες παρεμφερείς εργασίες μεταξύ 1984 και 1986, ενώ το 1993 οι Arogyaswami J. Paulthar και Thomas Kailath εισήγαγαν τη χωρική πολυπλεξία στα συστήματα MIMO. Τέλος, αξίζει να σημειώσουμε ότι το 1996 οι Greg Raleigh και Gerard J. Foschini έκαναν μελέτες για μία διαμόρφωση στην οποία πλήθος κεραιών εκπομπής συνδυάζονται σε έναν πομπό προκειμένου να επιτευχθεί βελτίωση της αποτελεσματικότητας των συνδέσεων.

### 3. Βασική Δομή Τηλεπικοινωνιακού Συστήματος

Όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, ανεξάρτητα από τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται, αποτελούνται από συγκεκριμένες δομικές μονάδες, οι οποίες δίνονται στο διάγραμμα του Σχ. 1, με τον πομπό (transmitter), το κανάλι (channel) και τον δέκτη (receiver) να αποτελούν αναπόσπαστα στοιχεία αυτών.



Σχ 1. Διάγραμμα τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Ο πομπός δέχεται το σήμα πληροφορίας από την έξοδο της αντίστοιχης πηγής, το οποίο δύναται να έχει μορφή αναλογική ή ψηφιακή. Το φασματικό περιεχόμενο του σήματος πληροφορίας ονομάζεται baseband, δηλαδή σήμα βασική ζώνης, λόγω της συγκέντρωσής του γύρω από τη μηδενική συχνότητα. Επιπρόσθετα, στον πομπό πραγματοποιούνται οι εξής δύο κύριες λειτουργίες: α) η απαραίτητη επεξεργασία του σήματος, για την αντιμετώπιση της φθοράς που προκαλείται από το κανάλι και β) η μετατροπή – διαμόρφωση του σήματος βασικής ζώνης σε ζωνοπερατό, δηλαδή η μεταφορά του (ανάλογα με το είδος του καναλιού) στην κατάλληλη ζώνη συχνοτήτων.

Το κανάλι είναι το μέσο με το οποίο μεταδίδεται η πληροφορία από τον πομπό στον δέκτη. Κατά την μετάδοση στο κανάλι προκαλείται εξασθένηση, διότι εισάγεται /

παράγεται θόρυβος στο σήμα. Συναφώς ο δέκτης λαμβάνει ένα παραλλαγμένο αντίγραφο του εκπεμφθέντος σήματος. Τα αίτια του ανωτέρω θορύβου ποικίλουν με συνέπεια να επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στην επικοινωνία. Οι δύο βασικές κατηγορίες των καναλιών είναι: τα Hardwire και τα Softwire. Στα Hardwire κανάλια συγκαταλέγονται τα καλώδια από χαλκό, τα ομοαξονικά, οι οπτικές ίνες (πλαστικό ή γυαλί) και οι κυματοδηγοί (κοίλοι μεταλλικοί σωλήνες), ενώ χαρακτηριστικά παραδείγματα της δεύτερης κατηγορίας είναι ο αέρας και το κενό, όπου η μεταφορά της πληροφορίας πραγματοποιείται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα, καθώς επίσης και το νερό, όπου, επί το πλείστον, χρησιμοποιούνται οι ακουστικές συχνότητες.

Τέλος, ο δέκτης μετατρέποντας – αποδιαμορφώνοντας το λαμβανόμενο σήμα από ζωνοπερατό σε βασικής ζώνης και πραγματοποιώντας την κατάλληλη επεξεργασία συμβάλλει ώστε το ανακτηθέν σήμα πληροφορίας να είναι αξιόπιστο.

#### **4. Το κανάλι ως μέσο μετάδοσης σήματος**

Το κανάλι το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στις ασύρματες επικοινωνίες είναι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο ελεύθερος χώρος, δηλαδή ο αέρας. Σε οποιοδήποτε είδος και αν συγκαταλέγεται το κανάλι θέτουμε ορισμένα χαρακτηριστικά για τη λειτουργία του, για να επιτύχουμε μία αξιόπιστη ζεύξη. Επομένως, και στο ασύρματο κανάλι επιδιώκουμε να υφίστανται υψηλή χωρητικότητα και ο ρυθμός μετάδοσης να είναι ο μέγιστος δυνατός, παράλληλα με την ελάχιστη δυνατή πιθανότητα σφάλματος (BER- Bit Error Rate).

Στην αρχή της χρήσης των ασύρματων επικοινωνιών και για πολλές δεκαετίες που ακολούθησαν, οι ζεύξεις ορίζονταν μεταξύ κεραιών οι οποίες είχαν οπτική επαφή (line of sight propagation). Στην περίπτωση αυτή, οι κυριότεροι παράγοντες υποβάθμισης του σήματος ήταν έτερες πηγές θορύβου, συμπεριλαμβανομένου του θερμικού θορύβου και των παρεμβολών (interference) μεταξύ διαφορετικών σημάτων λόγω παράλληλης χρήσης του ίδιου καναλιού από μεγάλο αριθμό χρηστών, καθώς και οι απώλειες διάδοσης (propagation loss).

Αναφορικά με τις ραδιοζεύξεις, η κυριότερη αιτία που υφίστανται απώλειες είναι η διάδοση στον ελεύθερο χώρο, με τη μείωση της λαμβανόμενης ισχύος να είναι ανάλογη

του τετραγώνου της απόστασης. Με την πάροδο των χρόνων και τη συνεχή εξέλιξη στις ασύρματες επικοινωνίες, επήλθε και μεγάλη ζήτηση από χρήστες που βρίσκονται σε αστικά κέντρα, τα οποία είναι πλούσια σε σκεδαστές, με αποτέλεσμα η οπτική επαφή μεταξύ του πομπού και του δέκτη να είναι, σε πολλές περιπτώσεις, αδύνατη. Στην περίπτωση αυτή έχουμε μετάδοση χωρίς οπτική επαφή (Non line of sight propagation). Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η λειτουργία ενός ασύρματου καναλιού δύναται να επηρεαστεί σε μεγάλη κλίμακα και από το περιβάλλον διάδοσης.

Τα κυριότερα φαινόμενα που επηρεάζουν τη μεταφορά/διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι τα ακόλουθα:

- **Ανάκλαση:** ορίζεται ως η αλλαγή στη διεύθυνση της διάδοσης ενός μετώπου κύματος, που πραγματοποιείται μέσα στο ίδιο μέσο, εξαιτίας της πρόσπτωσης σε μια διαχωριστική επιφάνεια.
- **Διάθλαση:** με τον όρο αυτό εννοούμε την εκτροπή στη διεύθυνση διάδοσης ενός κύματος, όταν αυτό διέρχεται από το ένα μέσο σε ένα άλλο μέσο που έχει διαφορετικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες από το πρώτο και οφείλεται στις επακόλουθες μεταβολές της ταχύτητας διάδοσης του κύματος.
- **Περίθλαση:** με τον εν λόγω όρο περιγράφουμε τη διάχυση των κυμάτων που συναντάνε ένα εμπόδιο ή μία οπή διαστάσεων παραπλήσιων του μήκους κύματος, προς όλες τις κατευθύνσεις.
- **Σκέδαση:** με το τελευταίο αυτό φαινόμενο περιγράφουμε τον διασκορπισμό / διάχυση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος προς διαφορετικές διευθύνσεις, όταν αυτό προσπίπτει σε αντικείμενα το μέγεθος των οποίων είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος.

Όλα τα παραπάνω φαινόμενα, τα οποία προκύπτουν από την αλληλεπίδραση που έχει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα με τα διάφορα σώματα – σκεδαστές που συναντά στο εκάστοτε περιβάλλον διάδοσης, έχουν ως αποτέλεσμα τη λήψη από το δέκτη πολλών αντιγράφων του αρχικού σήματος, μεταβαλλόμενου πλάτους και φάσης. Το φαινόμενο αυτό το συναντάμε ως διάδοση πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation) και τις παραμορφώσεις του σήματος ως διαλείψεις (fading).

## 5. Εισαγωγή στα συστήματα MIMO

Χρησιμοποιώντας τον όρο Σύστημα Πολλαπλών Κεραιών (Multi-antenna System) με την ευρύτερη έννοιά του, εννοούμε οιοδήποτε σύστημα λειτουργεί με πολύθυρες κεραιές (multi-port antenna - MPA). Κάθε μία από τις θύρες του ανωτέρω συστήματος μπορεί να αναφέρεται σε διακριτές, φυσικά διαχωρισμένες μεταξύ τους κεραιές, κεραιές διαφορετικής πόλωσης, κεραιές με διαφορετικό διάγραμμα ακτινοβολίας ή ακόμα μπορεί και να αναφέρεται σε έναν συνδυασμό όλων των προαναφερθέντων περιπτώσεων. Επομένως, οι κύριες κατηγορίες των πολύθυρων κεραιών, είναι οι κάτωθι:

- i. πολλαπλών στοιχείων (multi-element antenna - MEA)
- ii. πολλαπλής πόλωσης (multi-polarized antenna - MPOA)
- iii. πολλαπλών ρυθμών (multi-mode antenna - MMA).

Από τούδε, όλες τις διατάξεις πολλαπλών κεραιών που απαντώνται στην παρούσα εργασία θα τις θεωρούμε ως κεραιές πολλαπλών στοιχείων.

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των συστημάτων MIMO οφείλεται στις τεχνικές που χρησιμοποιούν. Οι δύο βασικές κατηγορίες είναι:

- i. η χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing) και
- ii. ο διαφορισμός κωδικοποίησης (diversity coding).

Κατά την περίπτωση της χωρικής πολυπλεξίας, ένα σήμα υψηλού ρυθμού διασπάται σε περισσότερα του ενός σήματα με χαμηλότερο ρυθμό, εκπεμπόμενα από διαφορετικές κεραιές, στην ίδια όμως συχνότητα. Τα σήματα αυτά, φτάνουν, υπό προϋποθέσεις, στον δέκτη, σε σχεδόν παράλληλα κανάλια. Η τεχνική αυτή της πολυπλεξίας είναι αξιόλογη διότι μπορεί να επιφέρει σημαντική αύξηση στη χωρητικότητα, κυρίως για μεγάλα SNR, όπου SNR είναι η σηματοθορυβική σχέση (signal-to-noise ratio), η οποία ισούται με

$$SNR = P/N_oB \quad (1)$$

όπου  $N_o$  είναι η πυκνότητα ισχύος του θορύβου (Watts / Hz),  $B$  είναι το εύρος ζώνης (Hz) και  $P$  είναι η μέση ισχύς του σήματος (Watts).

Όταν έχουμε μικρό αριθμό κεραιών στον πομπό ή/και στον δέκτη, αναγκαστικά περιορίζεται και ο μέγιστος αριθμός των παράλληλων καναλιών. Η εν λόγω τεχνική δύναται να χρησιμοποιηθεί είτε ο πομπός συνδέεται είτε όχι με κάποιου είδους ανάδραση, έχει δηλαδή πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού (channel state information – CSI).

Τον διαφορισμό κωδικοποίησης τον χρησιμοποιούμε όταν ο πομπός δεν δύναται να έχει κάποια πληροφορία αναφορικά με την κατάσταση του καναλιού. Αντίθετα από την τεχνική της χωρικής πολυπλεξίας, στην τεχνική του διαφορισμού κωδικοποίησης εκπέμπεται από την κάθε κεραία το ίδιο ακριβώς σήμα, το οποίο κωδικοποιείται συμφώνως τεχνικών που είναι γνωστές ως κώδικες χώρου - χρόνου (space - time code). Το κέρδος στην περίπτωση αυτή είναι ότι διασφαλίζεται μειωμένη πιθανότητα σφάλματος, καθιστώντας το σύστημα πιο αξιόπιστο.

Οι δύο ανωτέρω τεχνικές δύναται να συνδυαστούν (υπό όρους), αντικείμενο που αποτελεί ξεχωριστό κομμάτι έρευνας και μελέτης [13].

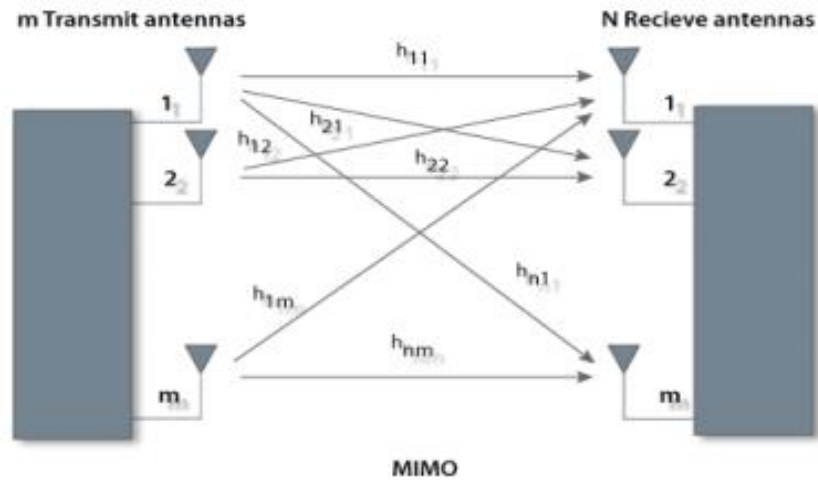
## 6. Μοντελοποίηση ενός συστήματος MIMO

Ας ξεκινήσουμε θεωρώντας ένα πολύθυρο σύστημα ασύρματων επικοινωνιών MIMO, που χρησιμοποιεί για εκπομπή  $M$  αριθμό κεραιών, ενώ στη λήψη χρησιμοποιεί  $N$  κεραιές, και το οποίο απεικονίζεται στο Σχ. 2.

Το σύστημα αυτό συμβολίζεται ως ένα  $M \times N$  σύστημα και η σχέση μεταξύ εισόδου – εξόδου του δίνεται ακολούθως:

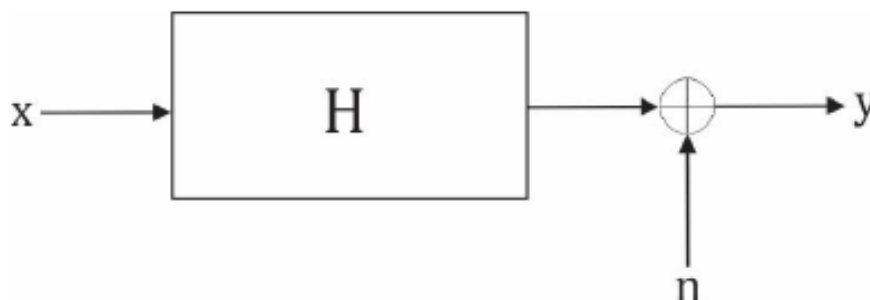
$$y = Hx + n \quad (2)$$

όπου  $H$  συμβολίζεται ο πίνακας καναλιού (channel matrix) διαστάσεων  $N \times M$ . Τα στοιχεία του εν λόγω πίνακα περιέχουν πληροφορίες αναφορικά με το πλάτος και τη φάση των κυμάτων για όλες τις διαδρομές διάδοσης (propagation path), μεταξύ των θυρών εκπομπής  $M$  (κεραίες εκπομπής) και των θυρών λήψης  $N$  (κεραίες λήψης).



Σχ 2. Μοντελοποίηση συστήματος MIMO.

Επιπρόσθετα, τα στοιχεία που εμπεριέχονται στον πίνακα καναλιού  $H$  εκφράζουν τον λόγο της τάσης της κεραίας εκπομπής προς την τάση που επάγεται στην κεραία λήψης. Το διάνυσμα  $x$  που έχει διάσταση  $M \times 1$  αντιπροσωπεύει τα εκπεμπόμενα σύμβολα, το διάνυσμα  $y$ , το οποίο έχει διάσταση  $N \times 1$ , αντιπροσωπεύει αντίστοιχα τα λαμβανόμενα σύμβολα, ενώ το διάνυσμα  $n$  με διάσταση  $N \times 1$  αντιπροσωπεύει τις συνιστώσες του AWGN θορύβου – λευκός προσθετικός γκαουσιανός θόρυβος (Additive White Gaussian Noise). Η σχέση (2) απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχ. 3.



Σχ 3. Σχέση μεταξύ εισόδου – εξόδου ενός MIMO συστήματος.

Ο προαναφερθέν πίνακας  $H$  έχει τη μορφή

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \cdots & \mathbf{H}_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{N1} & \cdots & \mathbf{H}_{NM} \end{bmatrix} \quad (3)$$

όπου το στοιχείο  $H_{ij}$  περιγράφει τους συντελεστές του καναλιού μεταξύ της κεραίας εκπομπής  $j$  και της κεραίας λήψης  $i$ .

## 7. Πλεονεκτήματα MIMO συστημάτων

Τα πλεονεκτήματα των MIMO συστημάτων έναντι των αντίστοιχών τους SISO είναι τα ακόλουθα:

- i. Κέρδος συστοιχίας
- ii. Κέρδος χωρικού διαφορισμού
- iii. Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας

### 7.1. Κέρδος συστοιχίας

Κέρδος συστοιχίας μπορεί να επιτευχθεί με τη σωστή κατανομή των συμβόλων τόσο στις κεραίες εκπομπής όσο και σε περαιτέρω χρονικές περιόδους, ούτως ώστε η πληροφορία να είναι περισσότερη ανθεκτική σε πιθανές διαλείψεις που εισάγει ο διάυλος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο σηματοθορυβικός λόγος που απαιτείται για ένα MIMO σύστημα ( $\text{SNR}_{\text{MIMO}}$ ) να είναι μειωμένος σε σχέση με αυτόν που απαιτείται για ένα σύστημα SISO ( $\text{SNR}_{\text{SISO}}$ ), με τη θεώρηση ότι και τα δύο είναι το ίδιο αξιόπιστα αναφορικά με την πιθανότητα λάθους. Η μαθηματική έκφραση του κέρδους συστοιχίας διατυπώνεται ως εξής:

$$G_A = \text{SNR}_{\text{SISO}} / \text{SNR}_{\text{MIMO}} \quad (4)$$

Επομένως για να πετύχουμε κέρδος συστοιχίας σε ένα MIMO σύστημα πρέπει να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά εκείνα του διαύλου στον δέκτη ή και στον πομπό που σχετίζονται με τις διαλείψεις και τις αποσβέσεις που εισάγονται από τον διάυλο στα διαδιδόμενα κύματα, κάτι που είναι δυσκολότερο στην περίπτωση του πομπού, διότι

χρειάζεται να υπάρχει ζεύξη επιστροφής (reverse link), αυξάνοντας έτσι την περιπλοκότητα του συστήματος.

## 7.2. Κέρδος χωρικού διαφορισμού

Ένα σημαντικό πρόβλημα που απαντάται στις τηλεπικοινωνίες είναι οι διαλείψεις. Με τον όρο διαλείψεις εννοούμε τις τυχαίες μεταβολές στην ισχύ των διαδιδόμενων κυμάτων, που έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή στο πλάτος και τη φάση του σήματος λήψης, κάτι το οποίο καθιστά δύσκολη τη σωστή αποκωδικοποίηση, για παράδειγμα στα συστήματα SISO. Αντίθετα, η τεχνολογία MIMO με τις  $N \cdot M$  εναλλακτικές – διαφορετικές προσφερόμενες από το δίαυλο διαδρομές και με τον κατάλληλο συνδυασμό των διαφορετικών αντιγράφων του σήματος που λαμβάνουν οι κεραιές λήψης, επιτυγχάνει διαφορικό κέρδος και ταυτόχρονη αντιστάθμιση των διαλείψεων. Η επίτευξη διαφορικού κέρδους εξαρτάται από το πόσο ανεξάρτητες είναι οι  $N \cdot M$  διαδρομές, εννοώντας την ύπαρξη διαλείψεων διαφορετικής έκτασης σε κάθε διαδρομή, ούτως ώστε τα διάφορα σήματα, κατά τη λήψη τους, να είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους. Το διαφορικό κέρδος δηλαδή, είναι εξαρτώμενο από τον συνδυασμό των διαφόρων εκδοχών του σήματος στο δέκτη: όσο πιο ανεξάρτητες είναι οι εκδοχές αυτές τόσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος του χωρικού διαφορισμού, επιτυγχάνοντας τη μέγιστη τιμή του όταν είναι οι δυνατές εναλλακτικές διαδρομές μεταξύ του δέκτη και του πομπού είναι τελείως ανεξάρτητες μεταξύ τους. Επομένως, το κέρδος του χωρικού διαφορισμού θα μπορούσε να ισούται με το γινόμενο των κεραιών  $M \cdot N$ :

$$G_d = M * N \quad (5)$$

Επιπρόσθετα, τα αστικά περιβάλλοντα, στα οποία υφίσταται μεγάλος αριθμός σκεδαστών (rich scattering environment), είναι κατάλληλα για ανεξαρτητοποίηση των διαδρομών και συνεπώς για επίτευξη διαφορικού κέρδους, σε αντίθεση με τα ανοικτά περιβάλλοντα όπου ο στόχος είναι η επίτευξη κέρδους διάταξης. Επομένως, κατά τη σχεδίαση ενός MIMO συστήματος είναι πολύ σημαντικό να λάβουμε υπόψη μας και τον περιβάλλοντα χώρο.

## 7.3. Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας

Τα συστήματα MIMO έχουν τη δυνατότητα να αποστέλλουν διαφορετικά σύμβολα ταυτόχρονα από τις κεραιές εκπομπής, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό μετάδοσης



δεδομένων. Έτσι έχουμε αύξηση της χωρητικότητας για το ίδιο εύρος ζώνης και την ίδια συνολική ισχύ εκπομπής που θα απαιτούνταν για ένα αντίστοιχο σύστημα SISO. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται κέρδος χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing gain), για το οποίο είναι απαραίτητο οι εναλλακτικές διαδρομές του σήματος να μην είναι εξαρτώμενες μεταξύ τους, όπως ακριβώς και στο κέρδος χωρικού διαφορισμού. Το μέγιστο κέρδος χωρικής πολυπλεξίας είναι ίσο με το πλήθος των διαφορετικών ζευγών των κεραιών εκπομπής – λήψης, δηλαδή ισούται με  $\min(N,M)$ .

## 8. Μειονεκτήματα MIMO συστημάτων

Στη συνέχεια παρατίθενται μερικά από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των MIMO συστημάτων:

- Οι απαιτήσεις πόρων και η πολυπλοκότητα του υλικού (hardware) είναι υψηλότερες σε σύγκριση με ένα σύστημα μονής κεραίας εισόδου - εξόδου. Κάθε κεραία απαιτεί μεμονωμένες RF μονάδες για την επεξεργασία του σήματος, ενώ επιπρόσθετα, απαιτείται και εξελιγμένο λογισμικό κατάλληλο για τους μαθηματικούς αλγορίθμους των εν λόγω συστημάτων.
- Το hardware των MIMO κεραιών έχει αυξημένες απαιτήσεις όσον αφορά την παροχή ενέργειας. Η μπαταρία καταναλώνεται γρηγορότερα εξαιτίας της επεξεργασίας πολύπλοκων και εντατικών αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος, μειώνοντας έτσι και τον χρόνο ζωής της μπαταρίας σε συσκευές που βασίζονται στην MIMO τεχνολογία.
- Τα MIMO συστήματα κοστίζουν ακριβότερα σε σχέση με πιο ταπιά SISO συστήματα, λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων σε υλικό και λογισμικό.
- Πολύ σημαντικό πρόβλημα είναι η αμοιβαία σύζευξη (mutual coupling) που παρουσιάζεται μεταξύ των στοιχείων-κεραιών σε ένα MIMO σύστημα και σχετίζεται με την πολύ μικρή απόσταση που υπάρχει μεταξύ τους.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης, η παρουσίαση τρόπων βελτιστοποίησής της μετά από έρευνα στη σύγχρονη βιβλιογραφία, καθώς και η σχεδίαση, ανάλυση και παρουσίαση μίας

καινοτόμου MIMO διάταξης με τη χρήση παρασιτικών στοιχείων ως σύστημα διαχωρισμού.

## 9. Αμοιβαία σύζευξη (mutual coupling)

Η αμοιβαία σύζευξη ορίζεται ως η ενέργεια που απορροφάται από μία κεραία σε κοντινή απόσταση όταν μία άλλη κεραία εκπέμπει. Η αμοιβαία σύζευξη έχει την τάση να αλλάζει το διάγραμμα ακτινοβολίας, τους συντελεστές ανάκλασης και την εσωτερική αντίσταση των MIMO κεραιών. Στο [14] παρουσιάζονται εμπειρικά μοντέλα τα οποία μας δίνουν την απλοποιημένη αμοιβαία σύζευξη  $MC_{ij}$  (mutual coupling) ως εξής:

$$MC_{ij} = \exp\left[-\frac{2d_{ij}}{\lambda}(a + j\pi)\right], i \neq j \quad (6)$$

$$MC_{ij} = 1 - \frac{1}{N} \sum_i \sum_{i \neq j} MC_{ij} \quad (7)$$

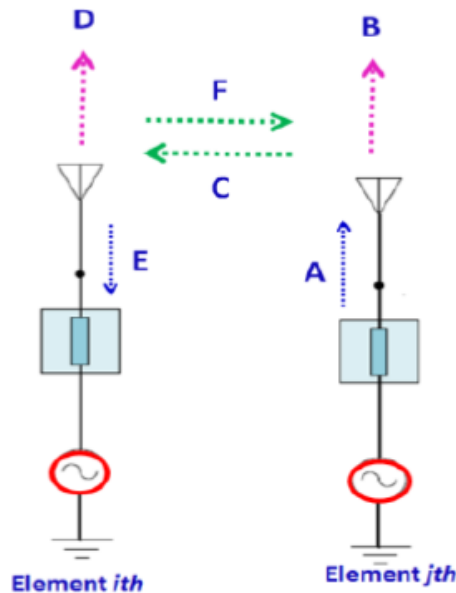
όπου  $MC_{ij}$  είναι η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ του  $i$ th και του  $j$ th στοιχείων της κεραίας,  $d_{ij}$  είναι η απόσταση μεταξύ των στοιχείων αυτών,  $N$  είναι ο αριθμός των στοιχείων της κεραίας και  $a$  είναι μία παράμετρος που ελέγχει το επίπεδο της σύζευξης.

Στην πράξη, η αμοιβαία σύζευξη εξαρτάται τόσο από τη διάταξη των στοιχείων όσο και από τη διέγερσή τους. Συνήθως υπολογίζεται ως S-παράμετρος μεταξύ του  $i$ th και του  $j$ th στοιχείου, έχοντας ως μονάδα μέτρησης τα dB, ή ως η λογαριθμική έκφραση  $-20\log_{10}(|S_{ij}|)$  της απομόνωσης (isolation) μεταξύ τους. Ωστόσο, ο λεπτομερής μηχανισμός της αμοιβαίας σύζευξης εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο μετάδοσης και λήψης.

### 9.1. Αμοιβαία σύζευξη κατά την εκπομπή

Κατά τη διάρκεια της εκπομπής [15], θεωρούμε δύο στοιχεία κεραίας σε συστοιχία, όπως φαίνεται στο Σχ. 4. Στην περίπτωση αυτή, μία πηγή είναι προσαρμοσμένη στο  $j$ th στοιχείο,  $A$  είναι η ενέργεια η οποία παράγεται από την πηγή,  $B$  είναι η ενέργεια η οποία ακτινοβολεί στον ελεύθερο χώρο – κενό και  $C$  η ενέργεια προς το  $i$ th στοιχείο. Το  $D$  μας δείχνει ότι μέρος της ενέργειας που λαμβάνεται από το  $i$ th στοιχείο ακτινοβολείται στον ελεύθερο χώρο, ενώ το υπόλοιπο ταξιδεύει προς την πηγή ( $E$  δείκτης). Ένα μικρό

μέρος της ενέργειας  $D$  που διασκορπίζεται λαμβάνεται από το  $j$ th στοιχείο ως  $F$ . Αυτή η διαδικασία της αμοιβαίας αλληλεπίδρασης συνεχίζεται επαναλαμβανόμενα. Ωστόσο, μετά από αρκετές επαναλήψεις η διασκορπιζόμενη ενέργεια  $D$  μειώνεται σημαντικά. Το συνολικό μακρινό πεδίο (far-field) είναι το διανυσματικό άθροισμα των διασκορπιζόμενων και των ακτινοβολούμενων πεδίων.



Σχ 4. Διάγραμμα μηχανισμού της αμοιβαίας σύζευξης κατά την εκπομπή.

Επομένως, η αμοιβαία σύζευξη διαφοροποιεί και αλλάζει το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας.

Επιπλέον, τα  $E$  κύματα προστίθενται διανυσματικά στα ανακλώμενα και τα προσπίπτοντα κύματα του ίδιου του  $ith$  στοιχείου, προκαλώντας την αύξηση του στάσιμου κύματος, κάτι που είναι υπεύθυνο για τη μεταβολή της εσωτερικής αντίστασης του  $ith$  στοιχείου. Ως εκ τούτου, η αμοιβαία σύζευξη επηρεάζει όχι μόνο την αμοιβαία αντίσταση (mutual impedance) και την εσωτερική αντίσταση (self-impedance) της ίδιας της κεραίας.

Στα συστήματα κεραιών MIMO οι διαφορετικές πόρτες μπορεί να διεγείρονται σε τυχαία φάση. Αυτό προκαλεί σημαντικό αντίκτυπο στην αμοιβαία σύζευξη καθώς και στην προσαρμογή μεταξύ των στοιχείων της κεραίας. Προκειμένου να αξιολογηθεί ο συντελεστής ανάκλασης των συστημάτων MIMO που έχουν τυχαίες φασικές διεγέρσεις σε διαφορετικές θύρες στοιχείων, χρειάζεται να γίνεται ο υπολογισμός του Ολικού Ενεργού Συντελεστή Ανάκλασης TARC (Total Active Reflection Coefficient) [16]. Ο

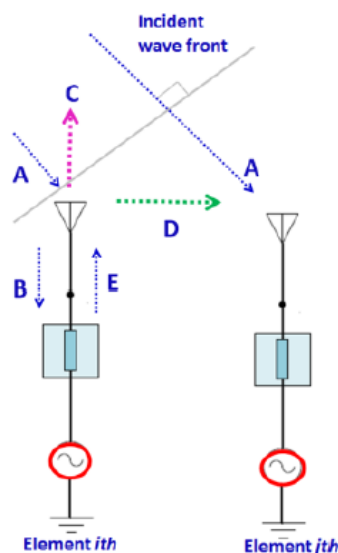
εν λόγω συντελεστής ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της τετραγωνικής ρίζας της ολικής ανακλώμενης ισχύος προς την τετραγωνική ρίζα της ολικής προσπίπτουσας ισχύος [17], όπως φαίνεται στον τύπο (8) που ακολουθεί,

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N |b_i|^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |a_i|^2}} \quad (8)$$

όπου  $a_i$  και  $b_i$  είναι τα προσπίπτοντα και τα ανακλώμενα κύματα, αντίστοιχα. Είναι καθαρός αριθμός, με μονάδα μέτρησης τα dB και παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 0 έως 1, όπου 1 σημαίνει ότι η προσπίπτουσα ισχύς ανακλάται εξ' ολοκλήρου, ενώ το 0 σημαίνει ότι το σύνολο της προσπίπτουσας ισχύος ακτινοβολείται, χωρίς καμία ανάκλαση. Υψηλές τιμές αμοιβαίας σύζευξης μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση του συντελεστή TARC.

## 9.2. Αμοιβαία σύζευξη κατά τη λήψη

Κατά τη διάρκεια της λήψης, ένα επίπεδο κύμα  $A$  εισβάλλει πρώτα στο  $i$ th στοιχείο όπου και δημιουργεί ρεύμα, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.



Σχ 5. Διάγραμμα μηχανισμού της αμοιβαίας σύζευξης κατά τη λήψη.

Ένα μέρος του προσπίπτοντος κύματος  $A$  διοχετεύεται στο δέκτη ως  $B$ , ενώ το υπόλοιπο σκορπίζεται στο χώρο  $C$ . Ωστόσο, κάποιο από το διασκορπιζόμενο αυτό κύμα  $D$  κατευθύνεται προς το  $j$ th στοιχείο, όπου και αθροίζεται διανυσματικά με το

προσπίπτων κύμα. Ως εκ τούτου, το κύμα που λαμβάνει ένα στοιχείο είναι το διανυσματικό άθροισμα των απευθείας κυμάτων και των συνδυασμένων κυμάτων που έρχονται από τα υπόλοιπα στοιχεία της κεραίας. Προκειμένου να πετύχουμε αύξηση της λαμβανόμενης ενέργειας πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε τη διασκορπιζόμενη ενέργεια επιλέγοντας προσεκτικά την τερματική αντίσταση του  $ith$  στοιχείου ώστε το ανακλώμενο κύμα  $E$  να ακυρώνει το διασκορπιζόμενο κύμα  $C$ .

## 10. Τρόποι μείωσης της αμοιβαίας σύζευξης (mutual coupling)

Στο σημείο αυτό θα δούμε διαφορετικές σχεδιάσεις MIMO κεραιών καθώς και τεχνικών μείωσης της αμοιβαίας σύζευξης [18]. Κάθε τεχνική εξηγείται με αρκετά πρόσφατα παραδείγματα που έχουν βρεθεί στη σύγχρονη βιβλιογραφία και είναι οι κάτωθι:

- Δακτύλιοι με CSRR
- Μεταϋλικά και μεταεπιφάνειες
- Γραμμές ουδετεροποίησης
- Παρασιτικά στοιχεία

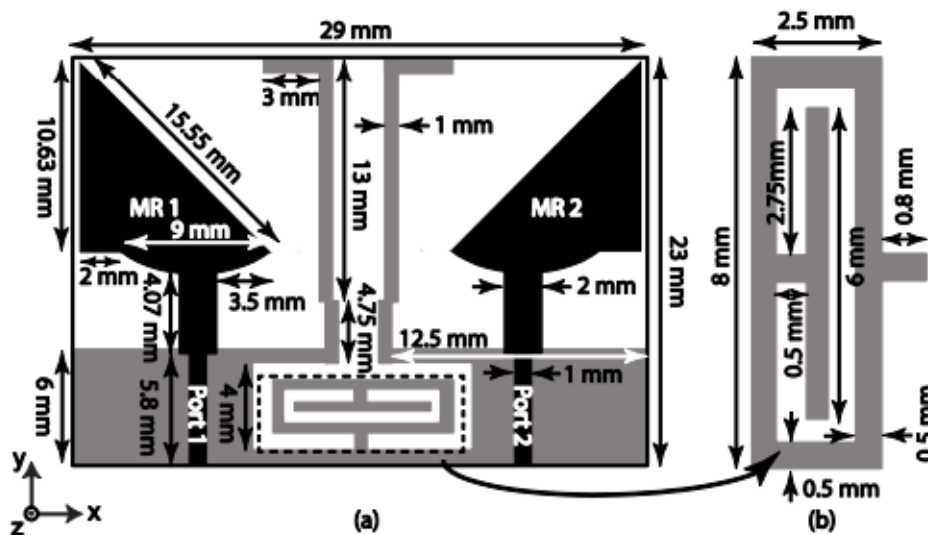
Τέλος, στα πλαίσια της έρευνας του παρόντος Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, θα παρουσιαστεί μία καινοτόμος μελέτη μείωσης της αμοιβαίας σύζευξης, η οποία βασίζεται στην εισαγωγή παρασιτικών στοιχείων στην ίδια τη σχεδίαση των κεραιών, χωρίς να χρειάζεται η ενσωμάτωση κάποιου επιπρόσθετου συστήματος απόζευξης ανάμεσα στα στοιχεία της κεραίας, προσφέροντας στο MIMO σύστημα, εκτός από την επιθυμητή απομόνωση, και πολύ μικρές διαστάσεις.

### 10.1. Δακτύλιοι με CSRR (Complementary Split Ring Resonator)

Οι CSRR είναι συνήθως περιοδικές διατάξεις ομόκεντρων μεταλλικών δακτυλίων με σχισμές [19], που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φίλτρα, ενώ λειτουργούν και ως μέθοδοι βελτίωσης της απομόνωσης μεταξύ στοιχείων σε μία MIMO κεραία και κατ' επέκταση μείωσης της αμοιβαίας σύζευξης.

### 10.1.α. Μία μικρών διαστάσεων UWB MIMO κεραία με ενσωματωμένο CSRR δακτύλιο

Στο Σχ. 6 παρατηρούμε δύο στελέχη αντεστραμμένου σχήματος L, τα οποία έχουν τοποθετηθεί στο επίπεδο γείωσης του πίσω μέρους μιας κεραίας, στο κενό χώρο που οριοθετείται από δύο μονόπολα τριγωνικού σχήματος [20]. Στο επίπεδο γείωσης έχει επίσης ενσωματωθεί ένας δακτύλιος CSRR, έχοντας ως αποτέλεσμα την επιθυμητή απομόνωση σε χαμηλότερες συχνότητες, ενώ η κεραία παραμένει συμπαγής με διαστάσεις 29 mm x 29 mm.



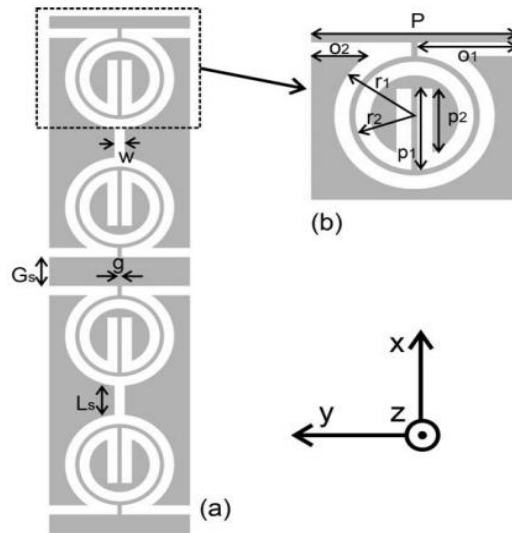
Σχ 6. Σχεδιάγραμμα της προτεινόμενης UWB MIMO κεραίας [20].

Όταν από την κεραία απουσιάζει τόσο ο δακτύλιος όσο και τα στελέχη και διεγείρεται η θύρα 1, τότε έχουμε εμφάνιση ρεύματος και στη θύρα-2 και παρατηρείται υψηλή αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των δύο στοιχείων. Με την προσθήκη του δακτυλίου και των στελεχών, το ρεύμα στη θύρα 2 μειώνεται αισθητά, με το περισσότερο ρεύμα να παγιδεύεται μέσα σε αυτά. Η προτεινόμενη από τους Khan et al. κεραία καλύπτει την περιοχή από 3 έως 12 GHz με  $|S_{11}| < -10$  dB και  $|S_{12}| < -15$  dB, αποδεικνύοντας την απομόνωση μεταξύ των εκπεμπόμενων στοιχείων.

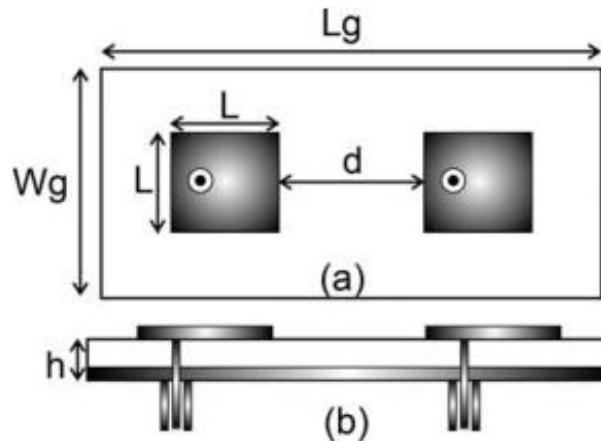
### 10.1.β. Καταστολή της σύζευξης με τη χρήση δομής αποτελούμενης από CSRR

Στο [21], οι Shafique et al. τοποθετούν μία κατασκευή τα δομικά κελιά της οποίας αποτελούνται από δακτυλίους CSRR (Σχ. 7), πρώτα ανάμεσα στις δύο κεραίες, στη συνέχεια στο επίπεδο γείωσης και τέλος και στις δύο πλευρές της στοιχειοκεραίας. Η

στοιχειοκεραία, όπως φαίνεται και στο Σχ. 8, έχει σχεδιαστεί με δύο τετράγωνα στοιχεία που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $0.125 \lambda_0$  για λειτουργία στη συχνότητα 3.7 GHz.



Σχ 7. Κύκλωμα απόζευξης (decoupling network) [21].



Σχ 8. Δομή στοιχειοκεραίας (a) Επάνω όψη, (b) Πλαϊνή όψη [21].

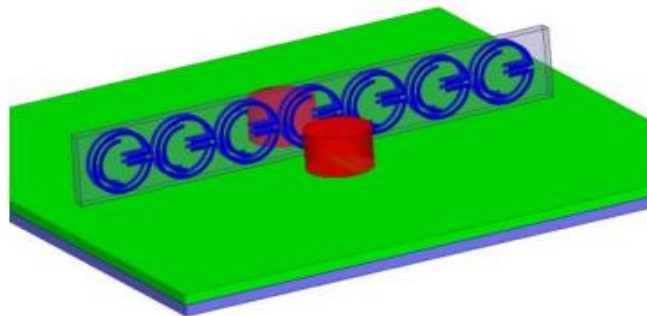
Στον Πίνακα 1 παρατίθεται μία σύγκριση των χαρακτηριστικών της εν λόγω κεραίας και στις τρεις διαφορετικές προαναφερθείσες θέσεις, ανάλογα με το σημείο τοποθέτησης του κυκλώματος απόζευξης, δείχνοντας, για παράδειγμα, πως όταν η δομή με τους CSRR δακτυλίους βρίσκεται και στις δύο πλευρές, επιτυγχάνεται μία σημαντική μείωση της αμοιβαίας σύζευξης, με μία, όμως, ταυτόχρονη μείωση του κέρδους της κεραίας.

	Without SCCSRR	With SCCSRR in ground plane	With SCCSRR in radiating patch	With SCCSRR in both patch and ground
$S_{11}$ (dB)	-26	-21	-34.5	-26
$S_{21}$ (dB)	-21.3	-23.08	-23.6	-36.6
Gain (dB)	4.8	2.7	4.9	3.2

**Πίνακας 1** Σύγκριση των παραμέτρων της κεραίας για διαφορετικά σημεία τοποθέτησης του συστήματος απόζευξης [21].

#### 10.1.γ. Καταστολή της αμοιβαίας σύζευξης για MIMO κεραία στα 60 GHz με χρήση δακτυλίων

Στο [22], μία διάταξη 1 x 7 αποτελούμενη από δακτυλίους τοποθετείται κάθετα ανάμεσα σε δύο διηλεκτρικούς συντονιστές (dielectric resonator DR), όπως απεικονίζεται στο Σχ. 9, με απόσταση μεταξύ των κεραιών ίση με  $0.5 \lambda_0$  στα 60 GHz.



**Σχ 9.** Απεικόνιση των DR κεραιών με την 1x7 διάταξη των δακτυλίων [22].

Οι S-παραμέτροι που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις καταδεικνύουν μία μείωση της αμοιβαίας σύζευξης της τάξης των 30 dB στη ζώνη συχνοτήτων από 57 GHz έως 64 GHz.

#### 10.1.δ. Έτερο παράδειγμα μείωσης της αμοιβαίας σύζευξης για MIMO κεραία με χρήση CSRR

Μια άλλη μελέτη μείωσης της αμοιβαίας σύζευξης με CSRR συναντάμε στο [23]. Αρχικά, οι Jyothsna et al. σχεδίασαν μία μικροταινιακή κεραία με συχνότητα λειτουργίας στα 5.04 GHz. Έπειτα, ένας δακτύλιος CSRR χαράσσεται κάτω από την

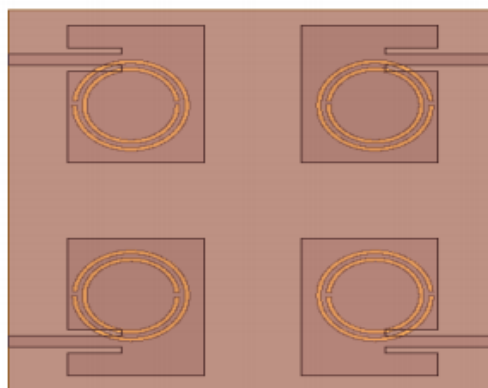


κεραία, όπως φαίνεται στο Σχ. 10, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα σμίκρυνση κατά 50% και αλλαγή της συχνότητας συντονισμού από τα 5.04 GHz στα 2.52 GHz.



**Σχ 10.** Διάταξη της μικροταινιακής κεραίας μαζί με τον CSRR δακτύλιο [23].

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα από τις προαναφερθέντα στοιχεία με απόσταση 10 mm μεταξύ τους, σε μία διάταξη 50 mm x 50 mm, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα σύστημα MIMO κεραίας, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 11. Η συχνότητα συντονισμού του MIMO συστήματος είναι πλέον τα 2.7 GHz, ενώ οι προσομοιώσεις που διεξήχθησαν παρουσίασαν, μεταξύ άλλων, αμοιβαία σύζευξη με τιμή -33 dB στην εν λόγω συχνότητα.

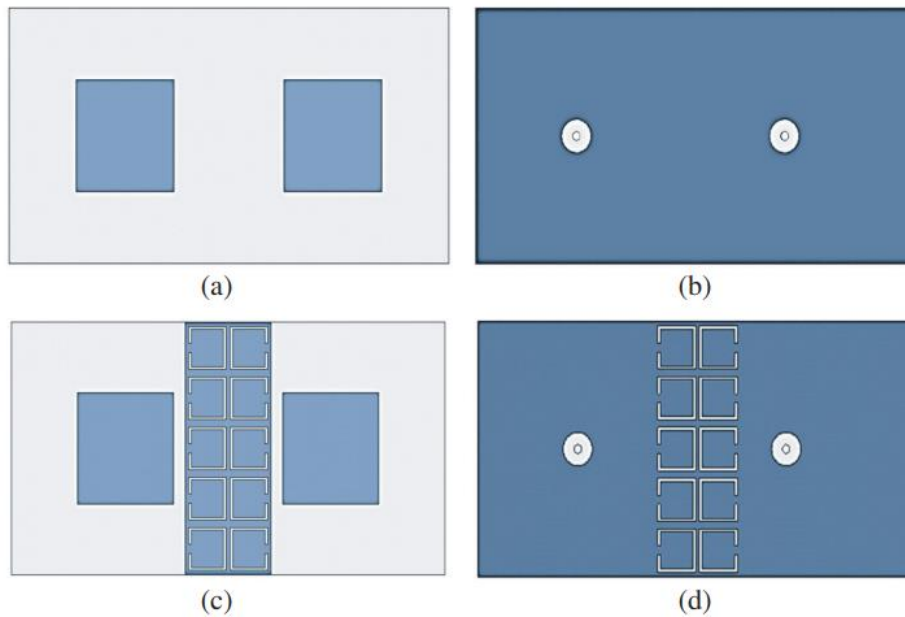


**Σχ 11.** Διάταξη του MIMO συστήματος τεσσάρων στοιχείων [23].

#### 10.1.ε. CSRR δακτύλιοι για αύξηση της απομόνωσης σε κεραία 5<sup>ης</sup> γενιάς

Στο Σχ.12, μια τυπωμένη στοιχειοκεραία με απόσταση 8 mm ( $0.67 \lambda_0$ ) μεταξύ των δύο στοιχείων της, για συχνότητα λειτουργίας 25 GHz, απεικονίζεται. Προκειμένου να

επιτευχθεί αύξηση της απομόνωσης των στοιχείων, μία διάταξη δακτυλίων ενσωματώνεται στην τυπωμένη κεραία και στις δύο πλευρές της [24].



**Σχ 12.** (a) Επάνω όψη MIMO συστήματος χωρίς CSRR, (b) κάτω όψη χωρίς CSRR, (c) Επάνω όψη με CSRR, (d) κάτω όψη με CSRR [24].

Το σύστημα αυτό προσομοιώθηκε και παρατηρήθηκε μείωση της σύζευξης της τάξης των 25 dB, στη συχνότητα των 25 GHz, με την τοποθέτηση των CSRR. Ο κάτωθι Πίνακας 2 συνοψίζει τις τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση, με και χωρίς την εισαγωγή των δακτυλίων στο MIMO σύστημα.

<b>f=25 GHz</b>	<b>Without CSRR</b>	<b>With CSRR</b>
$S_{11}$ (dB)	-31.4	-38.44
$S_{21}$ (dB)	-24.3	-53
Maximum Gain (dB)	10.39	10.53
Radiation Efficiency	85%	88.5%
Peak directivity	11.39	11.53

**Πίνακας 2** Χαρακτηριστικά του MIMO συστήματος με και χωρίς τους δακτυλίους CSRR [24]

Τέλος, ένα πρωτότυπο της προτεινόμενης στοιχειοκεραίας κατασκευάστηκε και μετρήθηκε, καταλήγοντας σε απομόνωση -51 dB μεταξύ των στοιχείων, στη συχνότητα λειτουργίας.

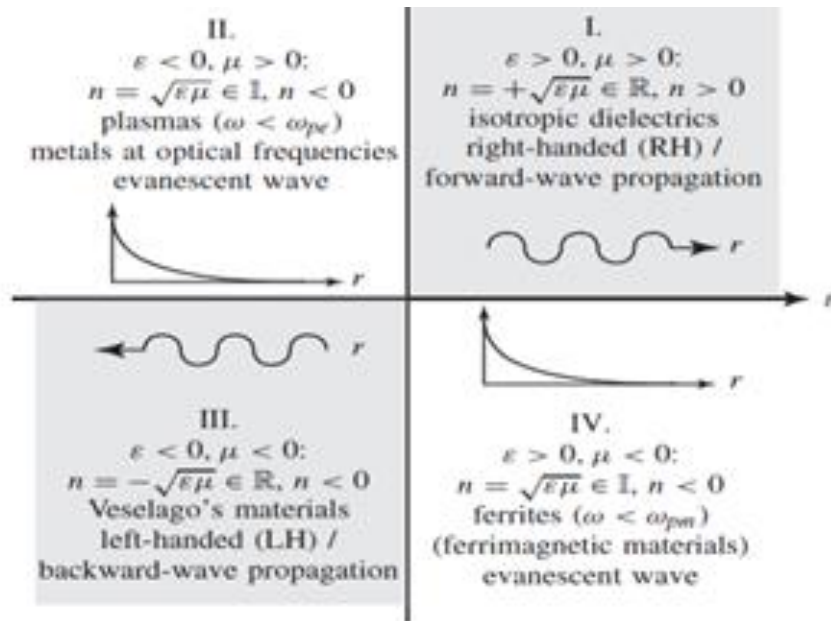
## 10.2. Μεταϋλικά (metamaterials) και μεταεπιφάνειες (metasurfaces)

Τα μεταϋλικά, τα οποία παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά από τον Victor Veselago το 1967, είναι τεχνητά κατασκευασμένα υλικά με ιδιότητες διαφορετικές από των υλικών που βρίσκουμε στη φύση [25].

Οι παράμετροι που περιγράφουν τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού ή ενός μέσου διάδοσης είναι οι εξής: α) η διηλεκτρική επιτρεπτότητα  $\epsilon$ , η οποία περιγράφει το πώς επηρεάζεται ένα υλικό μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, β) η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$ , η οποία μας περιγράφει το πώς επηρεάζεται ένα υλικό από την παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου, γ) ο δείκτης διάθλασης  $n$ , δ) ταχύτητα φάσης  $U_p$ , που είναι η ταχύτητα με την οποία κινούνται σημεία σταθερής φάσης (π.χ. κορυφές) και δίνεται από τον τύπο  $U_p = \omega/k$ , όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα και  $k$  είναι ο αριθμός των κυμάτων, ε) η ταχύτητα ομάδας  $U_g$ , που είναι η ταχύτητα διάδοσης του “φακέλου” ενός διαμορφωμένου οδεύοντος κύματος και δίνεται από τον τύπο  $U_g = d\omega/dk$  και τέλος στ) το μήκος κύματος  $\lambda$ , που είναι η απόσταση μεταξύ δύο ίδιων γειτονικών σημείων σε ένα κύμα.

Τα μεταϋλικά μπορούν να θεωρηθούν ως περιοδικές διατάξεις που αποτελούνται από μονάδες-κελιά (unit cells), των οποίων το μέσο μέγεθος είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος λειτουργίας [25].

Μπορούν να έχουν αρνητική διηλεκτρική επιτρεπτότητα ( $-\epsilon$ ), αρνητική μαγνητική διαπερατότητα ( $-\mu$ ), ή ( $-\epsilon$ ) και ( $-\mu$ ) ταυτόχρονα. Οι τέσσερις πιθανοί συνδυασμοί πρόσημων στο ζευγάρι  $(\epsilon, \mu)$  είναι  $(+, +)$ ,  $(+, -)$ ,  $(-, +)$  και  $(-, -)$ , όπως φαίνεται και στο Σχ. 13. Ενώ οι τρεις πρώτοι συνδυασμοί απαντώνται και στα φυσικά υλικά, ο τελευταίος συνδυασμός  $[(-, -)]$ , με ταυτόχρονη αρνητική αγωγιμότητα και διαπερατότητα, απαντάται μόνο στην καινούργια κατηγορία των αριστερόστροφων (Left-handed LH) υλικών [26].



**Σχ 13.** Κατηγοριοποίηση των μεταλλικών σύμφωνα με την αγωγιμότητα  $\epsilon$  και τη διαπερατότητα  $\mu$  [26].

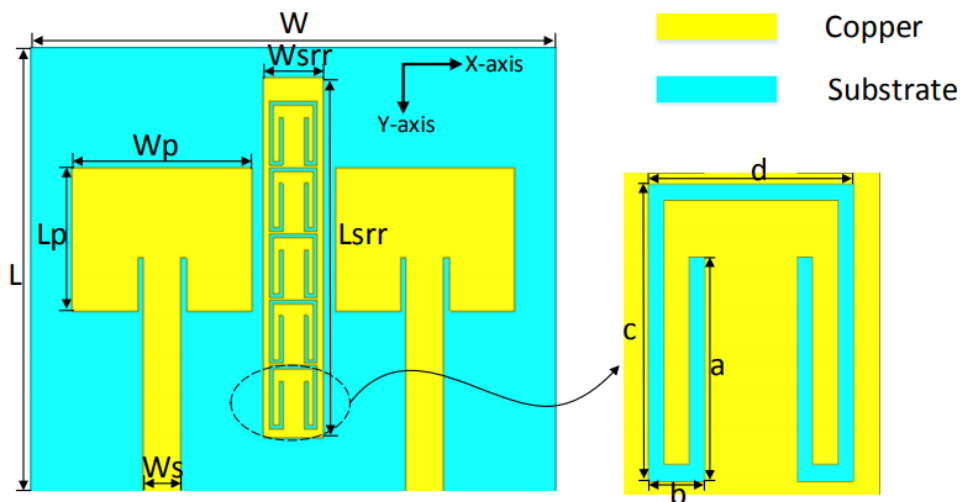
Τα LH υλικά, εξαιτίας των προαναφερθέντων ταυτόχρονα αρνητικών  $\epsilon$  και  $\mu$ , χαρακτηρίζονται από αντιπαράλληλες ταχύτητες φάσης και ομάδας και αρνητικό δείκτη διάθλασης (Negative Refractive Index NRI) που έχουν σαν συνέπεια να έχουμε αρνητική  $U_p$ . Αυτός είναι και ο λόγος που παρουσιάζουν ανάστροφη (προς τα πίσω) διάδοση κύματος.

Οι κεραίες που βασίζονται στα μεταλλικά είναι κεραίες οι οποίες εμπνέονται από αυτά και τα χρησιμοποιούν προκειμένου να βελτιώσουν τις δυνατότητές τους ή να επιτύχουν καινοτόμες λειτουργίες. Χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την απόδοση μιας συμβατικής κεραίας και ξεπερνούν τυχόν προβλήματα που προκύπτουν κατά το σχεδιασμό μιας κεραίας, όπως είναι η σμίκρυνση μεγέθους, η βελτίωση κέρδους, η ενίσχυση της κατευθυντικότητας, η αύξηση του εύρους φάσματος και η καταστολή πλευρικών και οπίσθιων λοβών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα μεταλλικά θα χρησιμοποιηθούν ως κύκλωμα απόζευξης προκειμένου να μειώσουν την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των στοιχείων μίας MIMO κεραίας.

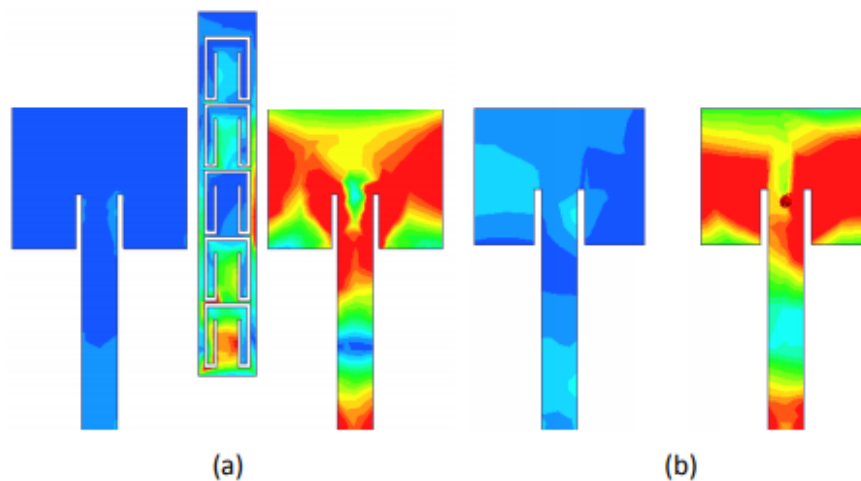
### 10.2.α. MIMO κεραία για φορητές ασύρματες εφαρμογές με υψηλή απομόνωση λόγω μεταλλικού

Στο [27] το προτεινόμενο σχέδιο αποτελείται από δύο στοιχεία τα οποία διεγείρονται χρησιμοποιώντας μία μικροταινιακή λωρίδα πλάτους 3 mm και χαρακτηριστικής αντίστασης 50 Ω, και τα οποία απέχουν μεταξύ τους απόσταση 7 mm ( $0.135 \lambda_0$ ) για συχνότητα 5.8 GHz. Προκειμένου να υπάρχει απομόνωση, οι Iqbal et al. μία διάταξη με μεταλλικά ανάμεσα στα δύο στοιχεία, όπως φαίνεται στο Σχ. 14.



Σχ 14. Μπροστινή όψη της προτεινόμενης MIMO κεραίας [27].

Οι προσομοιώσεις που ακολούθησαν δείχνουν ότι με την ενσωμάτωση των δομικών μονάδων των μεταλλικών επέρχεται μείωση της αμοιβαίας σύζευξης, όπως απεικονίζεται στην κατανομή του επιφανειακού ρεύματος του Σχ. 15.

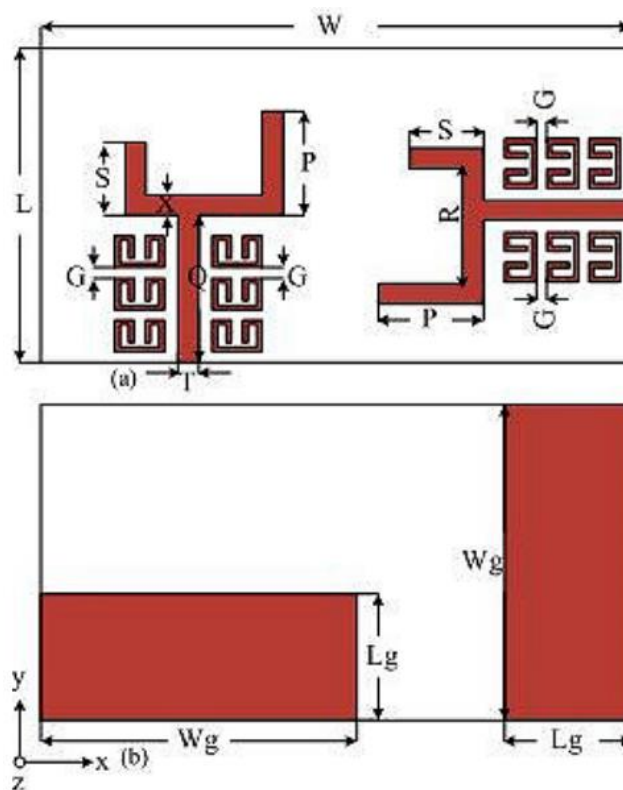


Σχ 15. Κατανομή επιφανειακού ρεύματος (a) με μεταλλικό, (b) χωρίς μεταλλικό [27].

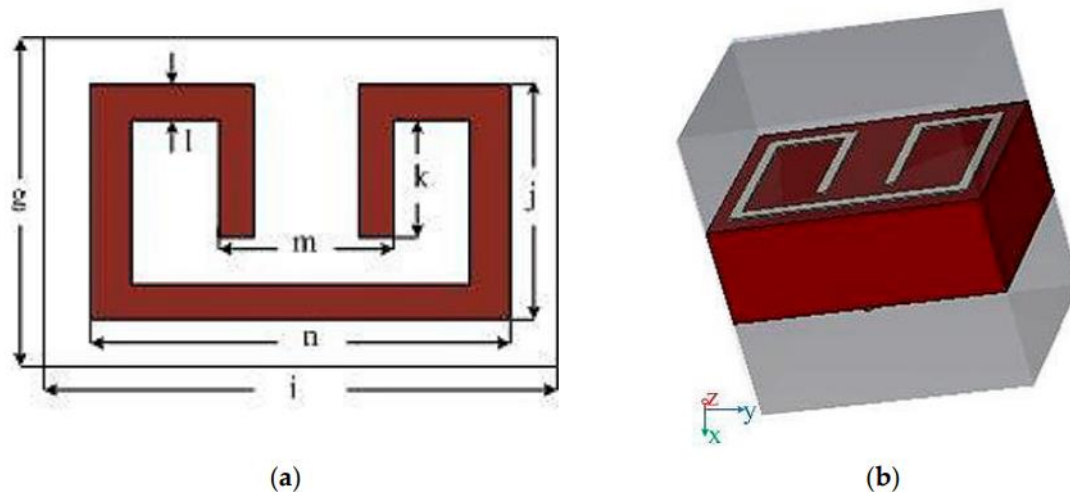
Ακολούθησε η κατασκευή και μέτρηση της κεραίας, ενώ σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπάρχει μια μικρή μετατόπιση στη συχνότητα συντονισμού, κυρίως λόγω απωλειών στην SMA σύνδεση, στα καλώδια, κ.α.

### 10.2.β. MIMO κεραία και χρήση μεταλλικών

Μια παρόμοια δομή μεταλλικών χρησιμοποιήθηκε και στο [28] προκειμένου να επιτευχθεί απομόνωση μεταξύ των στοιχείων σε μία MIMO κεραία. Πιο συγκεκριμένα, οι Jabire et al. παρουσίασαν δύο τυπωμένες κεραίες σε ορθογώνια διάταξη μεταξύ τους, κατά το Σχ. 16. Η απόσταση που τις χωρίζει είναι 22 mm ( $0.29 \lambda_0$ ) στα 5.8 GHz. Μία διάταξη, αποτελούμενη από δύο στήλες με μεταλλικά των οποίων η δομική μονάδα απεικονίζεται στο Σχ. 17, τοποθετείται γύρω από κάθε στοιχείο της κεραίας.



Σχ 16. Γεωμετρία της κεραίας (a) Επάνω όψη, (b) Κάτω όψη [28].

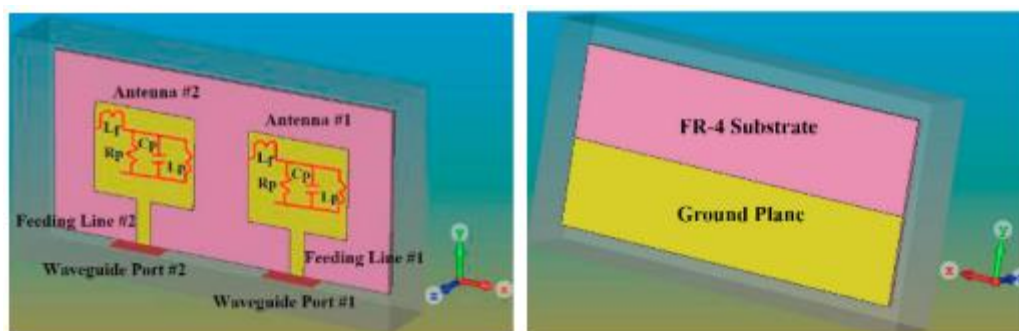


Σχ 17. Δομικό κελί μεταλλικού (a) 2D απεικόνιση, (b) 3D απεικόνιση [28].

Μεταξύ των άλλων πειραματισμών κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων, βρέθηκε ότι η υψηλότερη τιμή  $S_{12}$  που υποδεικνύει υψηλή απομόνωση, επιτεύχθηκε όταν χρησιμοποιήθηκαν έξι από τα προαναφερθέντα κελιά στην διάταξη γύρω από τα στοιχεία εκπομπής. Βάσει αυτού, κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο, με τις μετρήσεις του να δείχνουν μία απομόνωση λίγο μικρότερη από 25 dB στη συχνότητα λειτουργίας.

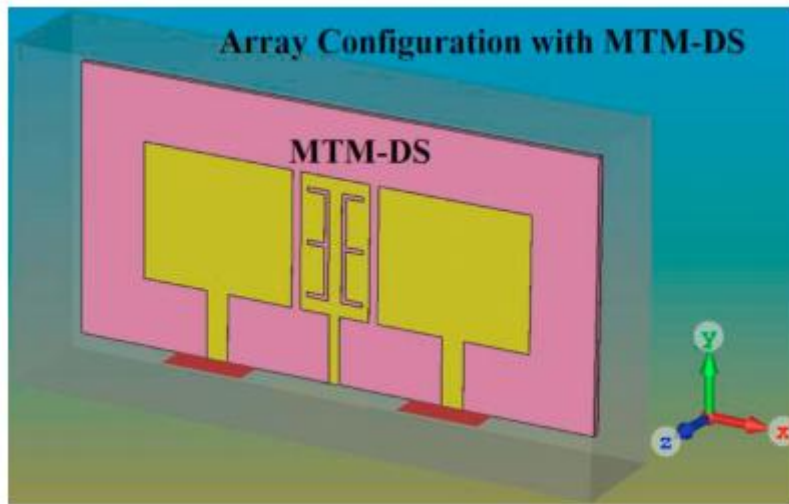
### 10.2.γ. Στοιχειοκεραία και μεταεπιφάνεια

Το αρχικό MIMO σύστημα του [29] αποτελείται από δύο στοιχεία εκπομπής με μεταξύ τους απόσταση  $0.66 \lambda_0$  στα 10 GHz. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Σχ. 18, το επίπεδο γείωσης στην πίσω όψη έχει συντημηθεί προκειμένου να αυξηθεί το εύρος ζώνης.

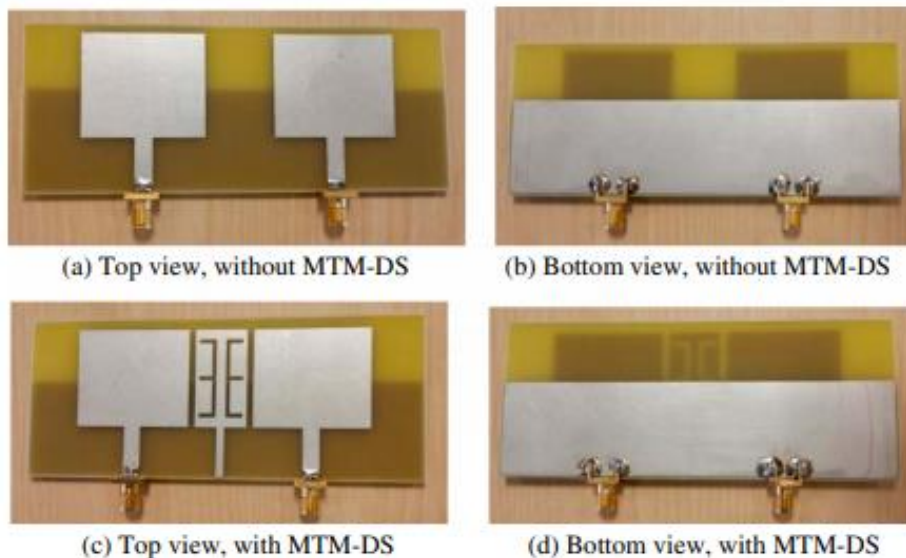


Σχ 18. Μπροστινή και πίσω όψη της στοιχειοκεραίας δύο στοιχείων [29].

Μία διάταξη μεταλλικών αποτελούμενη από δύο σχισμές σχήματος Ε εγχαρασσομένες σε μία μικροταινιακή επιφάνεια και από ένα στέλεχος ανοιχτού κυκλώματος στην κάτω πλευρά, τοποθετούνται ανάμεσα στις δύο κεραίες. Οι προσομοιώσεις της προτεινόμενης MIMO κεραίας που απεικονίζεται στο Σχ. 19 υποδεικνύουν σημαντική καταστολή της αμοιβαίας σύζευξης και οδήγησαν στην κατασκευή της κεραίας, όπως φαίνεται στο Σχ. 20.



Σχ 19. Προτεινόμενη στοιχειοκεραία με διάταξη μεταλλικών [29].



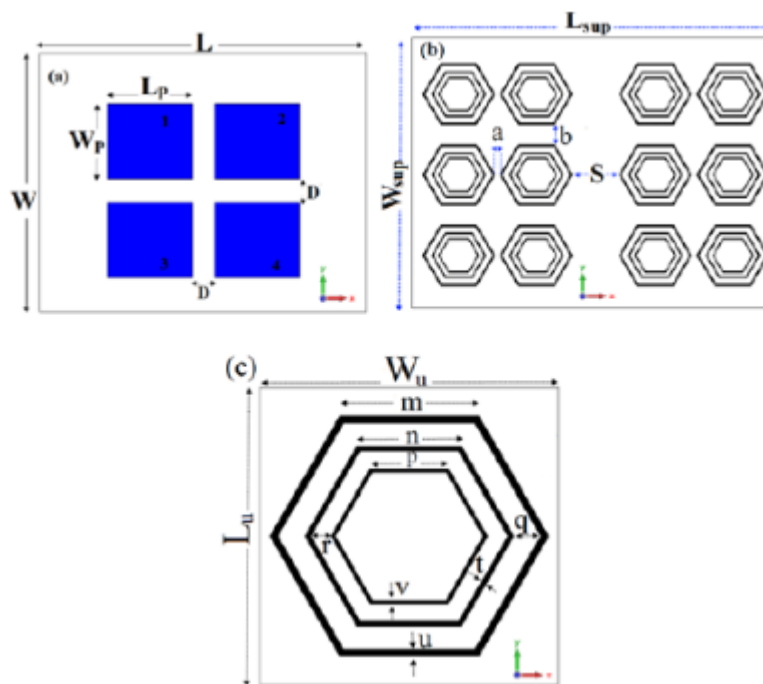
Σχ 20. Μπροστινή και πίσω όψη της MIMO κεραίας χωρίς και με τη χρήση της διάταξης μεταλλικού, αντίστοιχα [29].



Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διενεργήθηκαν υπέδειξαν έναν μέσο όρο καταστολής της αμοιβαίας σύζευξης της τάξεως των -38 dB στη ζώνη συχνοτήτων από 9 GHz έως 11 GHz.

#### 10.2.δ. Απομόνωση και αύξηση κέρδους με τη χρήση μεταεπιφάνειας σε MIMO εφαρμογές

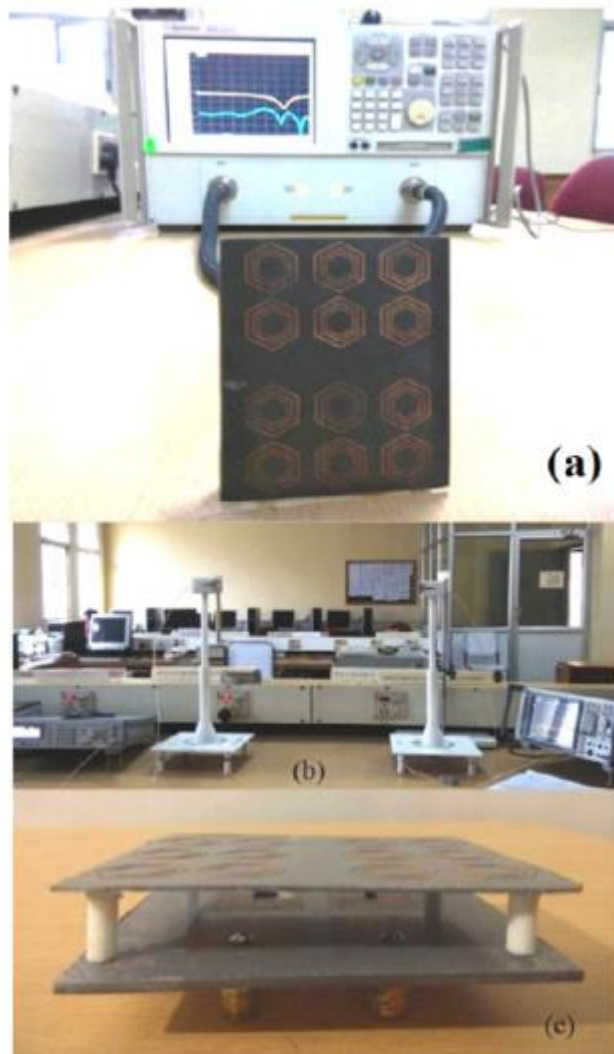
Στο [30] οι Mark et al. προτείνουν μία μεταεπιφάνεια προκειμένου να επιτύχουν απομόνωση ανάμεσα στα στοιχεία της κεραίας τους, με παράλληλη αύξηση κέρδους. Το Σχ. 21 απεικονίζει τη γεωμετρία της προτεινόμενης τεσσάρων στοιχείων MIMO κεραίας καθώς και τη μεταεπιφάνεια που λειτουργεί ως σύστημα απόζευξης.



Σχ 21. (a) Μπροστινή όψη της προτεινόμενης MIMO κεραίας τεσσάρων στοιχείων, (b) Μπροστινή όψη της μεταεπιφάνειας, (c) Γεωμετρία της μονάδας δόμησης του μεταυλικού [30].

Πιο συγκεκριμένα, η προτεινόμενη κεραία αποτελείται από τέσσερα ορθογώνια στοιχεία με 0.057 λ<sub>0</sub> απόσταση μεταξύ τους στη συχνότητα των 5.7 GHz. Κάθε στοιχείο της κεραίας τροφοδοτείται από ομοαξονικό καλώδιο σε απόσταση 4 mm από το κέντρο του. Η μεταεπιφάνεια αποτελείται από δομικές μονάδες (unit cells) πεπερασμένου αριθμού, τον οποίο οι προσπάθειες βελτιστοποίησης υπέδειξαν ως διάταξη 4 x 3. Επίσης από τη βελτιστοποίηση προκύπτει ότι το μέγιστο κέρδος και

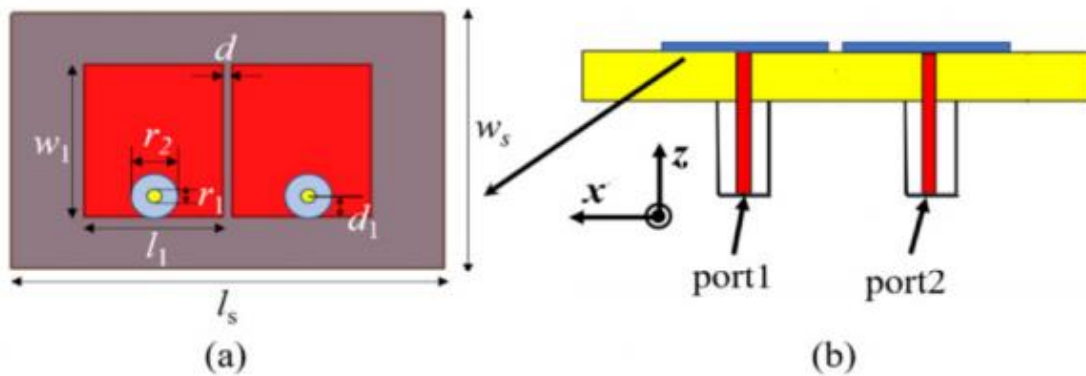
εύρος ζώνης επιτυγχάνονται όταν το ύψος της μεταεπιφάνειας τίθεται στα 9 mm πάνω από την κεραία. Οι προσομοιώσεις που ακολούθησαν δείχνουν μία μικρή μετατόπιση της συχνότητας από τα 5.7 GHz στα 5.85 GHz με τη χρήση της μεταεπιφάνειας, εξαιτίας του στρώματος αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ αυτής και της κεραίας, ενώ επίσης παρατηρείται συγκέντρωση του συζευγμένου πεδίου κυρίως στις δομικές μονάδες της μεταεπιφάνειας, βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την απομόνωση μεταξύ των στοιχείων της κεραίας, με το επίπεδο της να παραμένει πάνω από τα 20 dB σε όλη τη ζώνη λειτουργίας. Τέλος, ένα πρωτότυπο μοντέλο κατασκευάστηκε και μετρήθηκε, όπως φαίνεται στο Σχ. 22, οι μετρήσεις του οποίου συμφωνούν με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, με το επίπεδο της μετρηθείσας απομόνωσης πάνω από τα 21 dB για τη ζώνη λειτουργίας, έχοντας μία αιχμή 41 dB στα 5.84 GHz.



**Σχ 22.** Διαφορετικές απόψεις της κατασκευασθείσας κεραίας [30].

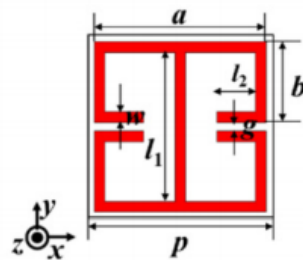
### 10.2.ε. Έτερο παράδειγμα μεταεπιφάνειας σε 5G MIMO κεραία

Ένα πρόσθετο παράδειγμα μεταεπιφάνειας που χρησιμοποιείται για μείωση της αμοιβαίας σύζευξης συναντάμε στο [31]. Το σύστημα της MIMO κεραίας που απαντάται στο Σχ. 23 έχει απόσταση μόλις 1 mm μεταξύ των δύο στοιχείων της, το οποίο ανταποκρίνεται σε  $0.017 \lambda_0$  για συχνότητα 4.9 GHz.



Σχ 23. (a) Μπροστινή όψη και (b) Πλαϊνή όψη του συστήματος MIMO κεραίας δύο στοιχείων [31].

Το Σχ. 24 αναπαριστά την προτεινόμενη δομική μονάδα σύνθεσης της μεταεπιφάνειας, η οποία τοποθετείται πάνω από την προαναφερθείσα κεραία για επίτευξη μείωσης της αμοιβαίας σύζευξης.

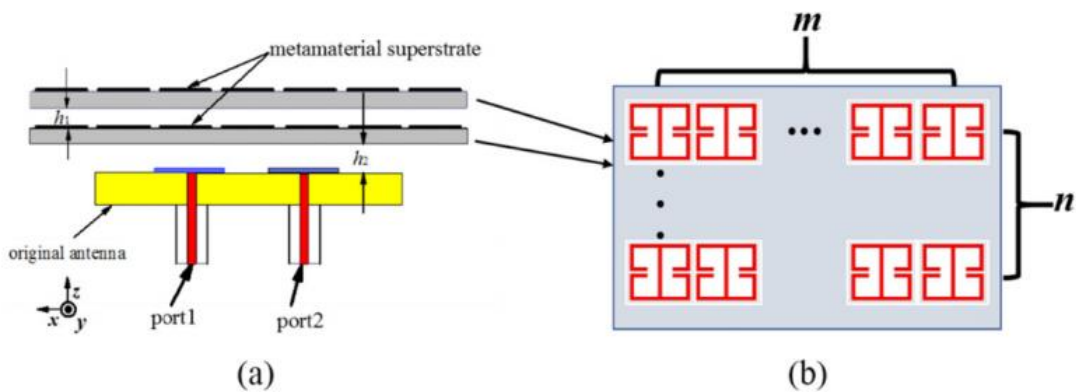


Σχ 24. Σχηματική αναπαράσταση της δομικής μονάδας του μεταυλικού [31].

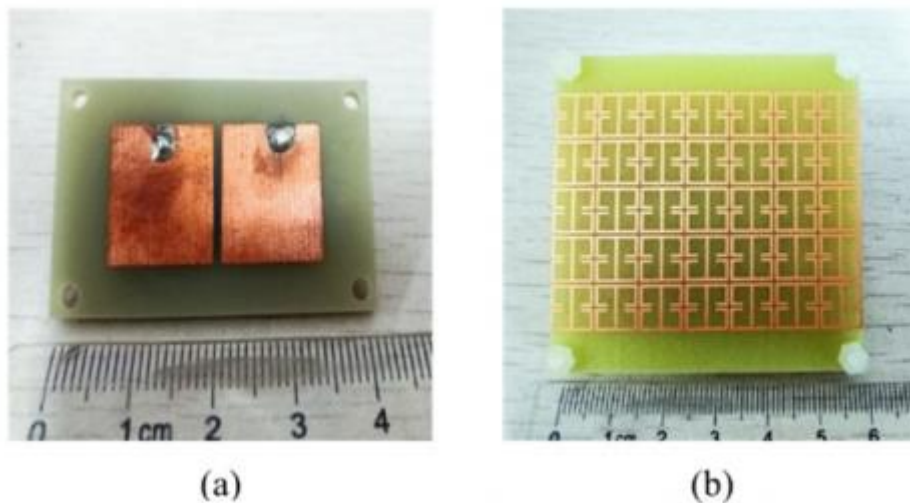
Οι Si et al. μελέτησαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις:

- Την αρχική MIMO κεραία χωρίς την μεταεπιφάνεια (περίπτωση 1)
- Το MIMO σύστημα με μία στρώση μεταεπιφάνειας (περίπτωση 2)
- Το MIMO σύστημα και δύο μεταεπιφάνειες (περίπτωση 3)
- Το MIMO σύστημα και τρεις μεταεπιφάνειες (περίπτωση 4)

Συγκρίσεις που έγιναν στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι η περίπτωση 3 είναι πιο αποτελεσματική από τις υπόλοιπες, με περισσότερο από 20dB απομόνωση μέσα στη ζώνη λειτουργίας και μέγιστη τιμή τα 23 dB στα 4.9 GHz. Επίσης οι προσπάθειες βελτιστοποίησης που ακολούθησαν οδήγησαν σε διάταξη μεταεπιφάνειας 7 x 5. Επομένως το προτεινόμενο MIMO σύστημα συμπεριλαμβανομένου των μεταεπιφανειών απεικονίζεται στο Σχ. 25, ενώ το αντίστοιχο κατασκευασμένο στο Σχ. 26 που ακολουθεί.



Σχ 25. (a) Πλαϊνή όψη του προτεινόμενου MIMO συστήματος με τις δύο μεταεπιφάνειες, (b) Σχηματική απεικόνιση των επιφανειών αυτών [31].

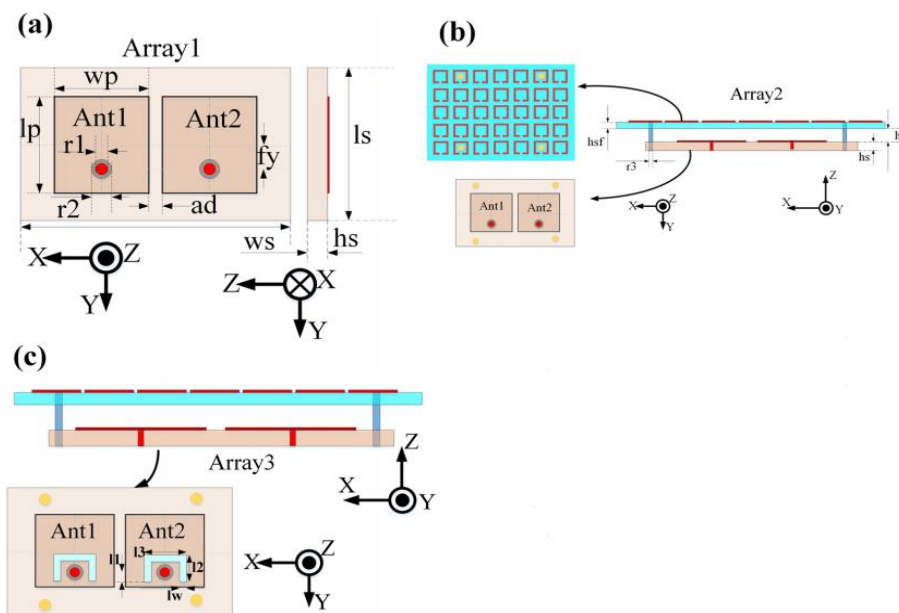


Σχ 26. (a) Η κατασκευασμένη κεραία δύο στοιχείων και (b) Η κατασκευασμένη μεταεπιφάνεια [31].

Οι μετρήσεις που ακολούθησαν καταδεικνύουν και πιστοποιούν την απαιτούμενη απομόνωση του συστήματος με  $S_{21} < -15$  στη ζώνη λειτουργίας.

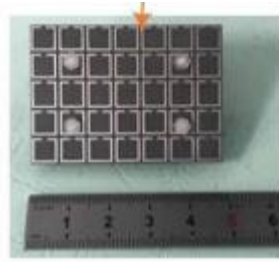
## 10.2.στ. Πρόσθετο παράδειγμα μεταεπιφάνειας ως μεθόδου μείωσης της αμοιβαίας σύζευξης σε MIMO σύστημα κεραιών

Προκειμένου να μειωθεί η αμοιβαία σύζευξη στην απεικονιζόμενη του Σχ. 27 (a) κεραία με διάταξη δύο στοιχείων, μεταξύ των οποίων υπάρχει απόσταση 1 mm ( $0.02 \lambda_0$ ) στα 5.8 GHz, γίνεται χρήση μίας μεταεπιφάνειας [32]. Η επιφάνεια αυτή αποτελείται από τη διάταξη 7 x 5 του Σχ. 27 (b) και τοποθετείται ακριβώς επάνω από τη στοιχειοκεραία, ενώ τέσσερις διηλεκτρικοί στύλοι εισάγονται στη σχεδίαση προκειμένου να παρέχουν μηχανική στήριξη στο σύστημα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν αύξηση στη συμπεριφορά της κεραίας όσον αφορά την απομόνωση, με ταυτόχρονα όμως προβλήματα στην προσαρμογή. Για να ξεπεραστεί αυτό, οι Wang et al. εισήγαγαν δύο τομές σχήματος U κοντά στην τροφοδοσία, όπως φαίνεται στο Σχ. 27 (c).



Σχ 27. (a) Μπροστινή και πλαϊνή όψη της κεραίας δύο στοιχείων, (b) Μπροστινή και πλαϊνή όψη της κεραίας μαζί με την μεταεπιφάνεια, (c) Μπροστινή και πλαϊνή όψη του συστήματος με τις σχισμές σχήματος U [32].

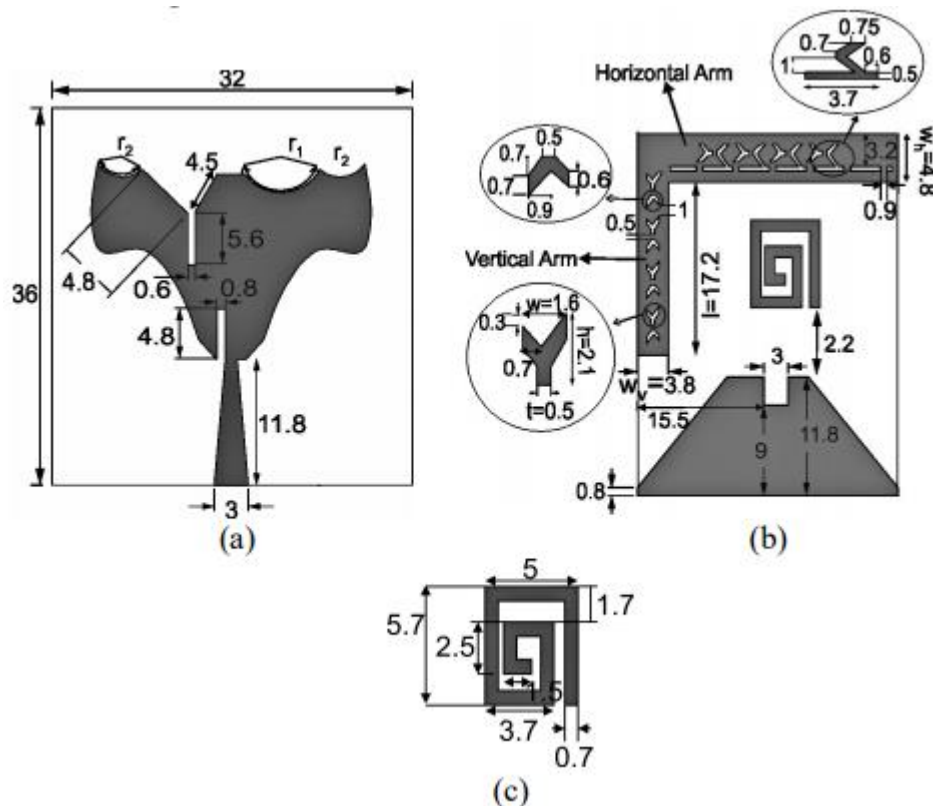
Το τελικό MIMO σύστημα παρέχει απομόνωση μικρότερη των -27 dB από τα 5.49 GHz έως τα 6.0 GHz. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε το πρωτότυπο του Σχ. 28, οι μετρήσεις του οποίου παρουσιάζουν μέγιστη απομόνωση που φτάνει λίγο παραπάνω από τα 40 dB.



Σχ 28. Κατασκευασμένο σύστημα κεραίας [32].

### 10.2.ζ. Μείωση αμοιβαίας σύζευξης σε μη-επίπεδο κυβικό σύστημα MIMO κεραίας

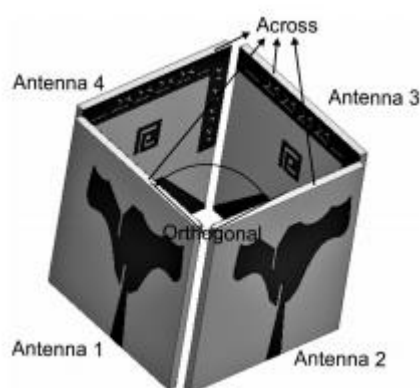
Ένα 3D σχέδιο κατάλληλο για εφαρμογές όπου η επίπεδη διαρρύθμιση δεν είναι εφικτή εξαιτίας περιορισμών στο μέγεθος, παρουσιάζεται στο [33]. Το αρχικό σχέδιο αποτελείται από τέσσερα στοιχεία τοποθετημένα σε κυβοειδή γεωμετρία και σε ορθογώνια διάταξη, γύρω από έναν κύβο πολυστερενίου (φελιζόλ).



Σχ 29. Γεωμετρία της προτεινόμενης κυβοειδούς MIMO κεραίας (a) Μπροστινή όψη, (b) Πίσω όψη, (c) Τετραγωνισμένη σπείρα ως παρασιτικό στοιχείο [33].

Το επίπεδο εκπομπής, στην μπροστινή πλευρά του υποστρώματος, παρουσιάζει μία αφηρημένη σφηνοειδή γεωμετρία με μία γραμμή τροφοδοσίας που στενεύει ομαλά, κάθετες τομές, και ημικύκλια στο επάνω μέρος, όπως φαίνεται στο Σχ. 29 (a), προκειμένου να αυξηθεί το ολικό εύρος και να δημιουργηθούν επιπλέον συχνότητες συντονισμού. Στην πίσω πλευρά του υποστρώματος ένα λοξοκομμένο επίπεδο γείωσης έχει χαραχτεί, όπως υποδηλώνει το Σχ. 29 (b). Επιπρόσθετα, μία τετράγωνη σχισμή έχει προστεθεί στο επίπεδο γείωσης, προς ενίσχυση της προσαρμογής. Προκειμένου να επιτευχθεί προσαρμογή σε όλο το εύρος λειτουργίας, κάτι που είναι δύσκολο λόγω της μη-επίπεδης MIMO διάταξης, η τετραγωνισμένη σπείρα του Σχ. 29 (c) προστίθεται επιπλέον στην πίσω πλευρά, ως παρασιτικό στοιχείο.

Προκειμένου να μειωθεί η ανεπιθύμητη σύζευξη που αναπτύσσεται ανάμεσα στα στοιχεία της κεραίας, ένα σχήμα απόζευξης προστίθεται στο σύστημα. Αυτό το σχήμα προστίθεται στο πίσω μέρος του κάθε στοιχείου και αποτελείται από μία διάταξη σχισμών σε σχήμα Y , μέσα σε μία φόρμα σχήματος ανεστραμμένου L, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 29 (b). Το κάθετο στέλεχος αυτής της ανεστραμμένης L διάταξης παρέχει απομόνωση στις ορθογώνια τοποθετημένες μεταξύ τους κεραίες, ενώ το οριζόντιο στέλεχος, στις κεραίες που είναι αντικριστά ή μία στην άλλη, κάτι που επεξηγείται σχηματικά στο Σχ. 30 που ακολουθεί.



**Σχ 30.** 3D άποψη των στοιχείων της κεραίας χωρίς πολυστυρένιο [33].

Μετά από αρκετές απόπειρες βελτιστοποίησης και προσομοιώσεων, κατασκευάστηκε το πρωτότυπο του Σχ. 31.



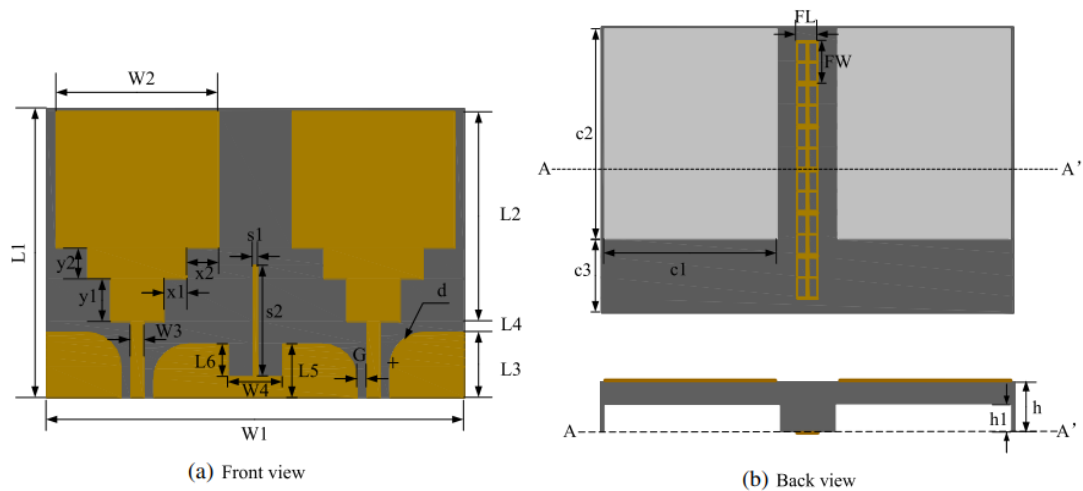
**Σχ 31.** Κατασκευασμένο 3D σύστημα MIMO κεραίας [33].

Τόσο τα προσομοιωμένα όσο και τα μετρηθέντα αποτελέσματα υποδεικνύουν μία απομόνωση της τάξης των 20 dB, στο μεγαλύτερο μέρος της επιθυμητής ζώνης συχνοτήτων.

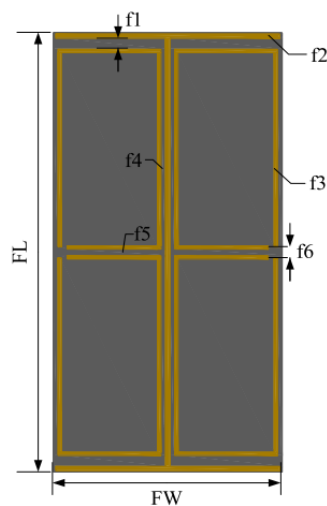
#### **10.2.η. Συμπαγής UWB MIMO κεραία με σύστημα απόζευξης με μεταλλικά**

Ένα άλλο παράδειγμα ενσωμάτωσης μιας δομής μεταλλικών σε ένα σύστημα MIMO κεραίας προκειμένου να υπάρξει μείωση αμοιβαίας σύζευξης, παρουσιάζεται στο [34]. Το υλικό του υποστρώματος είναι το πυρίτιο, το οποίο επιλέχθηκε από τους Zhu et al. για σμίκρυνση της κεραίας και καλύτερη ενσωμάτωση. Αρχικά το σχήμα των δύο στοιχείων εκπομπής είναι ορθογώνιο, αλλά για να αυξηθεί το εύρος ζώνης, το κάτω προφίλ του κάθε στοιχείου αποκτά κλιμακωτή μορφή. Για περαιτέρω επέκταση του εύρους ζώνης συχνοτήτων και για βελτίωση της προσαρμογής, εφαρμόζεται μία θολωτή επεξεργασία σχεδίασης στο επίπεδο γείωσης, δίπλα από την τροφοδοσία, όπως φαίνεται στο Σχ. 32 (a). Εφόσον τόσο το επίπεδο εκπομπής όσο και το επίπεδο γείωσης βρίσκονται στην ίδια πλευρά, χρησιμοποιείται ομοαξονική τροφοδοσία. Στην πίσω πλευρά του υποστρώματος, η οποία αποτυπώνεται στο Σχ. 32 (b), υπάρχουν δύο ορθογώνιες τομές καθώς και μία διάταξη μεταλλικού ανάμεσά τους. Η διάταξη αυτή, η οποία αποτυπώνεται στο Σχ. 33 και χρησιμοποιείται για μείωση της αμοιβαίας σύζευξης, αποτελείται από δομικές μονάδες διαχωρισμένων ορθογώνιων σχημάτων.





Σχ 32. Διάταξη της προτεινόμενης MIMO κεραίας [34].



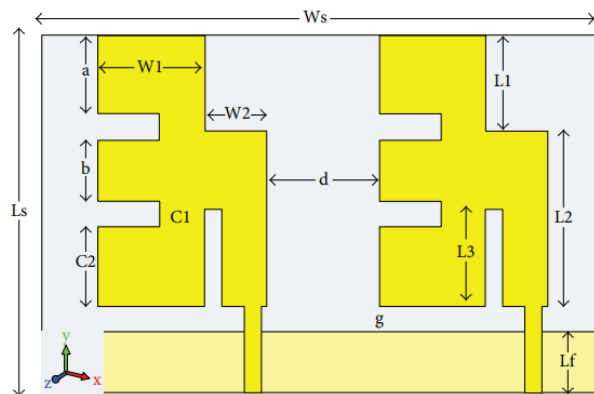
Σχ 33. Γεωμετρία της δομικής μονάδας του μεταλλικού [34].

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζουν μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των εκπεμπόμενων στοιχείων και μία συνολική εμφάνιση απομόνωσης της τάξεως των 16 dB.

### 10.2.0. Μείωση αμοιβαίας σύζευξης σε κεραία σχήματος E

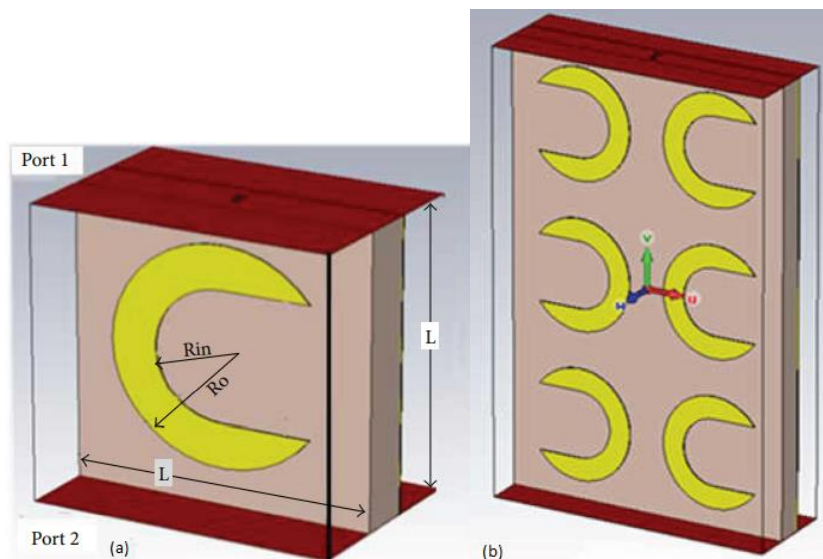
Στο [35] συναντάμε άλλη μία περίπτωση διάταξης μεταλλικού που χρησιμοποιείται προς μείωση της αμοιβαίας σύζευξης. Πιο συγκεκριμένα, το βασικό σύστημα της κεραίας αποτελείται από δύο μικροταινιακές κεραίες σχήματος E που λειτουργούν μεταξύ 5 GHz και 7.5 GHz, και οι οποίες είναι τοποθετημένες είτε σε παράλληλη είτε σε ορθογώνια διάταξη. Η παράλληλη διάταξη απεικονίζεται στο Σχ. 34, με απόσταση

20 mm μεταξύ των δύο στοιχείων, η οποία αντιστοιχεί σε  $0.42 \lambda_0$  για τη συχνότητα συντονισμού των 6.3 GHz.

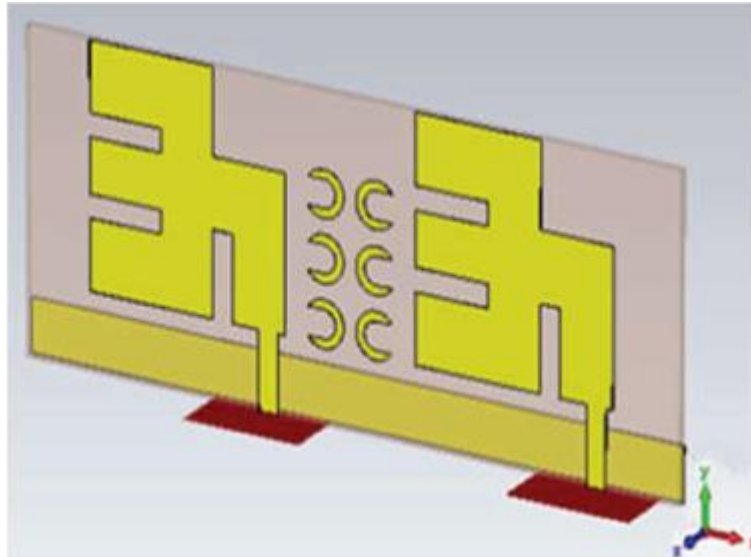


Σχ 34. Παράλληλη διάταξη των δύο κεραιών σε σχήμα E [35].

Προκειμένου να επιτευχθεί απομόνωση, μία 2 x 3 διάταξη συντονιστών σχήματος C εισάγεται ανάμεσά τους, με σχηματισμό που βλέπουμε στο Σχ. 35. Η διάταξη αυτή τελικά τοποθετείται ανάμεσα στα δύο στοιχεία, όπως στο Σχ. 36.



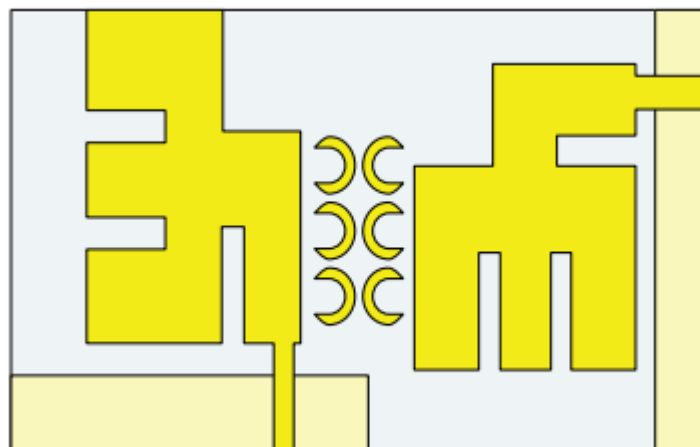
Σχ 35. Απεικόνιση (a) της δομικής μονάδας σχήματος C και (b) της 2 x 3 διάταξης [35].



**Σχ 36.** Τελικό MIMO σύστημα παράλληλου προσανατολισμού [35].

Ένα πρωτότυπο αυτού του συστήματος κατασκευάζεται, οι μετρήσεις του οποίου υποδεικνύουν βελτίωση της απομόνωσης περίπου 12 dB στη συχνότητα συντονισμού.

Όταν τα Ε-στοιχεία τίθενται σε ορθογώνιο προσανατολισμό και η ίδια διάταξη μεταλλικών ενσωματώνεται ανάμεσά τους (Σχ. 37), η συχνότητα συντονισμού μετατοπίζεται στα 6.4 GHz. Έτερο πρωτότυπο κατασκευάστηκε, οι μετρήσεις του οποίου έδειξαν μία βελτίωση της απομόνωσης της τάξεως των 6 dB.



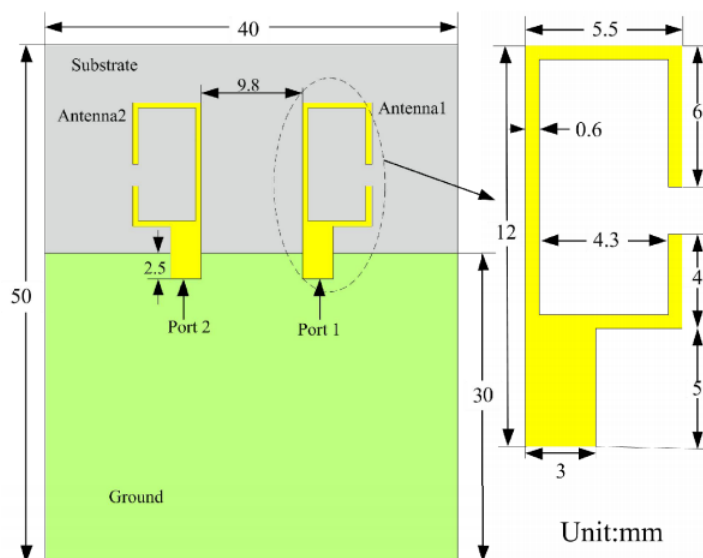
**Σχ 37.** Τελικό MIMO σύστημα ορθογώνιου προσανατολισμού [35].

### 10.3. Γραμμές ουδετεροποίησης (Neutralization Lines)

Οι γραμμές ουδετεροποίησης είναι μία τεχνική η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για να λύνει το πρόβλημα της προσαρμογής. Μία εναλλακτική της χρήση είναι η βελτίωση της απομόνωσης. Το σωστό μέγεθος, σχήμα και διάταξη μιας γραμμής ουδετεροποίησης εξαρτάται από τη γεωμετρία της MIMO κεραίας. Το ιδιαίτερο αυτό σύστημα απόζευξης είναι στην πραγματικότητα μία μεταλλική κατασκευή μικρού πλάτους που σκοπό έχει να ακυρώσει τη σύζευξη εισάγοντας στο σύστημα μία εναλλακτική διαδρομή για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα από την μία κεραία στην άλλη, ίδιου πλάτους αλλά αντίθετης φάσης. Είναι εύκολο στην κατασκευή και την εισαγωγή του στο σύστημα, αλλά είναι περισσότερο κατάλληλο για MIMO κεραίες με μικρό αριθμό στοιχείων. Στη συνέχεια ακολουθούν παραδείγματα συστημάτων MIMO κεραιών με γραμμές ουδετεροποίησης για μείωση της αμοιβαίας σύζευξης.

#### 10.3.α. Απόζευξη κεραίας δύο στοιχείων με μία απλή γραμμή ουδετεροποίησης

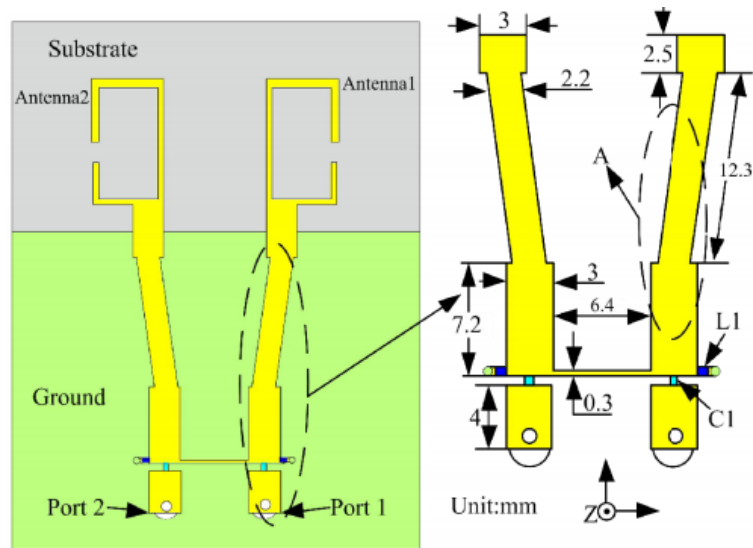
Στο [36], δύο συμμετρικές κεραίες σχήματος C είναι τυπωμένες σε FR4 υπόστρωμα, με απόσταση 9.8 mm, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 38.



Σχ 38. Απεικόνιση της προτεινόμενης κεραίας δύο στοιχείων [36].

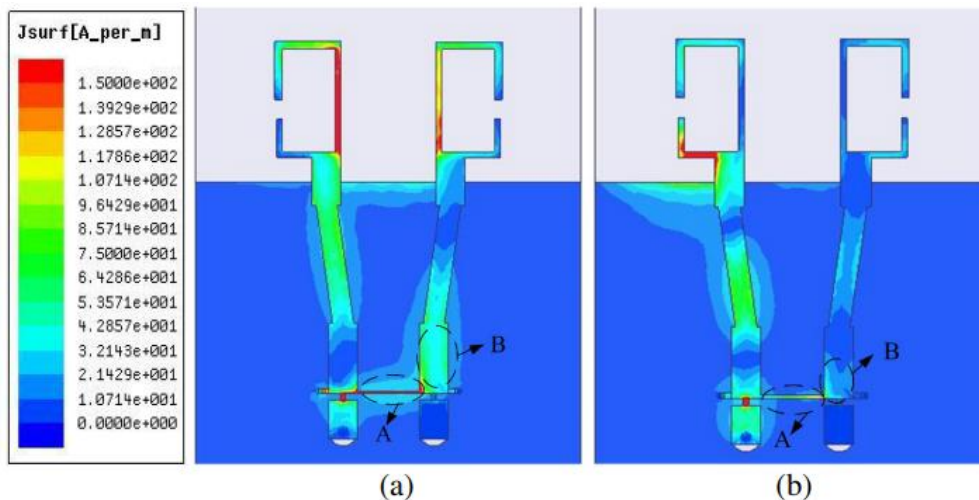
Προκειμένου να επιτύχουν μείωση της αμοιβαίας σύζευξης, οι Ou et al. εισήγαγαν παράλληλα μία γραμμή ουδετεροποίησης, προσαρμόζοντας το μήκος και το πάχος της οποίας κατάφεραν να επιτύχουν αντίθετη σύζευξη στο φορτίο. Όμως, λόγω του ότι

αυτή η μέθοδος προκαλεί προβλήματα στην προσαρμογή, εισήγαγαν ένα LC κύκλωμα σε κάθε πόρτα. Το τελικό σύστημα της MIMO κεραίας απεικονίζεται στο Σχ. 39.



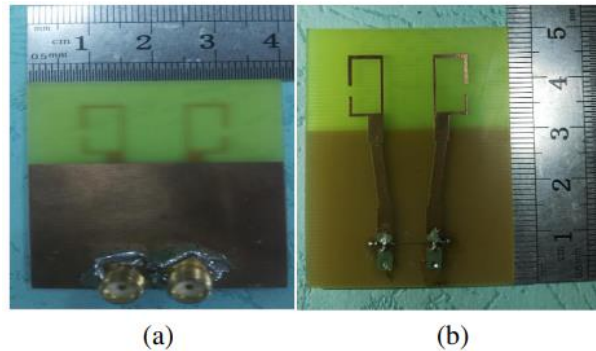
Σχ 39. Απεικόνιση του συστήματος MIMO κεραίας με το κύκλωμα απόζευξης [36].

Επιπρόσθετα, στο Σχ. 40 μπορούμε να παρατηρήσουμε την προσομοιωμένη κατανομή ρεύματος επιφάνειας στα 2.45 GHz και στα 5.8 GHz, που είναι οι συχνότητες συντονισμού. Πιο συγκεκριμένα, η γραμμή ουδετεροποίησης δεσμεύει μία ποσότητα ισχύος του σήματος A από τη θύρα που διεγείρεται και τη μεταφέρει στο φορτίο της άλλης θύρας για να αναιρέσει τη σύζευξη B.



Σχ 40. Κατανομή του προσομοιωμένου ρεύματος επιφάνειας στις συχνότητες (a) 2.45 GHz και (b) 5.8 GHz [36].

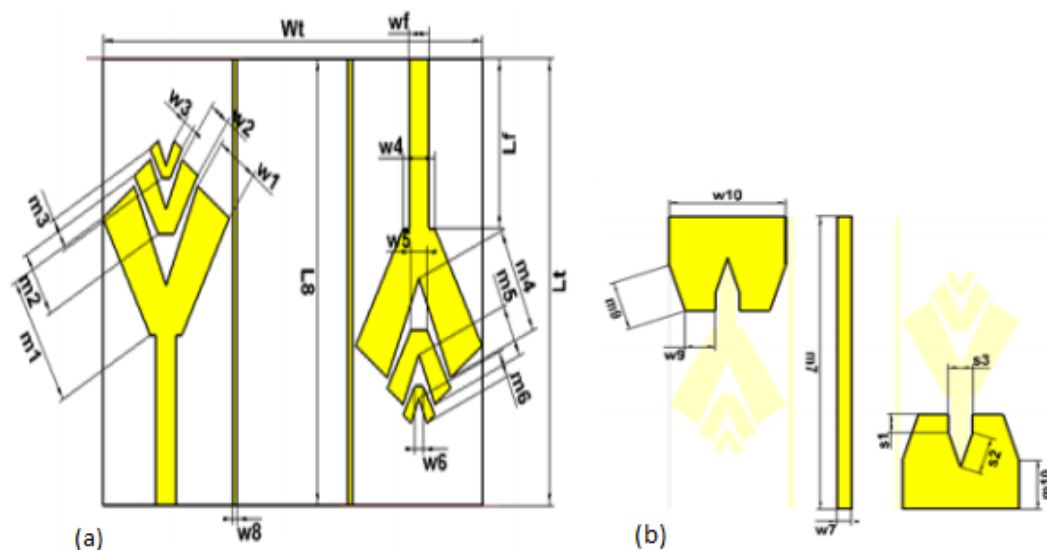
Η προτεινόμενη κεραία κατασκευάστηκε με το πρωτότυπό της να απεικονίζεται στο Σχ. 41. Τα αποτελέσματα τόσο των προσομοιώσεων όσο και των μετρήσεων παρουσιάζουν βελτίωση απομόνωσης πάνω από 20 dB και στις δύο συχνότητες, μετά την ενσωμάτωση του συστήματος απόζευξης στο σύστημα.



Σχ 41. (a) Μπροστινή όψη και (b) Πίσω όψη της κατασκευασθείσας κεραίας [36].

### 10.3.β. Συμπαγής κεραία υψηλής απομόνωσης για 5G εφαρμογές

Ένα επιπλέον παράδειγμα γραμμής ουδετεροποίησης που χρησιμοποιείται ως σύστημα απόζευξης παρουσιάζεται στο [37]. Η προτεινόμενη διάταξη δύο στοιχείων αποτελείται αρχικά δύο μονόπολες κεραίες σχήματος V. Στη συνέχεια, σμικρύνσεις του αρχικού V στοιχείου προστίθενται στο επάνω μέρος του σχήματος, δημιουργώντας το σχέδιο του Σχ. 42 (a), που μοιάζει με μορφοκλάσμα (fractal).

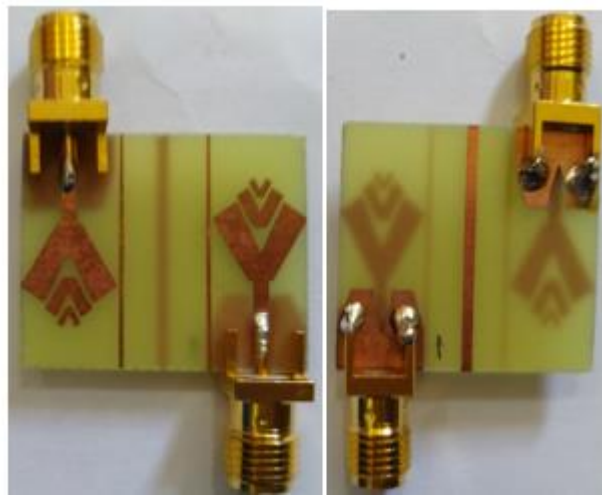


Σχ 42. Απεικόνιση της προτεινόμενης MIMO κεραίας (a) Μπροστινή όψη, (b) Πίσω όψη [37].

Κάθε εκπεμπόμενο στοιχείο τροφοδοτείται μέσω μιας μικροταινιακής λωρίδας μήκους  $L_f$  και πάχους  $W_f$ . Από την άλλη πλευρά του υποστρώματος συναντάμε το επίπεδο γείωσης του Σχ. 42 (b).

Προκειμένου να επιτύχουν υψηλή απομόνωση, οι Ibrahim et al. εισήγαγαν στο επίπεδο εκπομπής δύο γραμμές ουδετεροποίησης, η κάθεμία δίπλα στο εκπεμπόμενο στοιχείο. Έτερη κάθετη γραμμή προστέθηκε και στο επίπεδο γείωσης και αποτυπώνεται στο Σχ. 42 (b).

Το αντίστοιχο πρωτότυπο κατασκευάστηκε και παρουσιάζεται στο Σχ. 43.



Σχ 43. Κατασκευασθέν σύστημα MIMO κεραίας [37].

Η σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένων και μετρηθέντων αποτελεσμάτων υποδεικνύουν απομόνωση μικρότερη των -18.5 dB στην κεντρική συχνότητα των 4.85 GHz, για τη ζώνη λειτουργίας από 4.7 GHz έως 5 GHz.

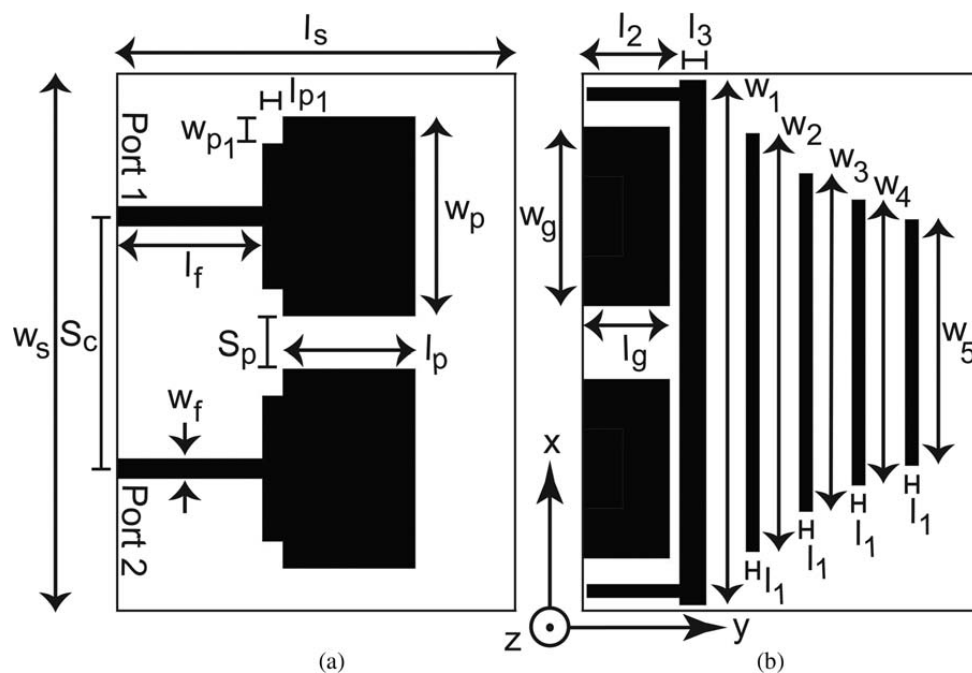
#### 10.4. Παρασιτικά στοιχεία (Parasitic Elements)

Με την προσθήκη παρασιτικών στοιχείων στο σχεδιασμό μιας κεραίας δημιουργούνται παραπάνω από μία διαδρομές σύζευξης, οι οποίες αναιρούν την αρχική, κάτι που οδηγεί σε μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων (elements). Αντί, δηλαδή, το ρεύμα να συζευγνύεται απευθείας από το στοιχείο 1 στο στοιχείο 2, με την ενσωμάτωση των παρασιτικών στοιχείων το ρεύμα συζευγνύεται αρχικά από το

στοιχείο 1 στο παρασιτικό στοιχείο και στη συνέχεια από το παρασιτικό στοιχείο στο στοιχείο 2. Τα κύρια πλεονεκτήματα της εν λόγω μεθόδου είναι η απλότητα στο σχεδιασμό και στην κατασκευή και επιπρόσθετα το μικρό μέγεθος. Στη συνέχεια παρατίθενται δύο παραδείγματα της μεθόδου αυτής, καθώς και η μελέτη που προέκυψε στα πλαίσια της έρευνας του εν λόγω Μεταπτυχιακού Προγράμματος.

#### 10.4.a. Αύξηση της απομόνωσης σε μία MIMO κεραία με παρασιτικά στοιχεία

Στο [38] παρουσιάζεται από τους Khan et al. μία μελέτη επάνω στη μείωση της αμοιβαίας σύζευξης με τη χρήση παρασιτικών στοιχείων.

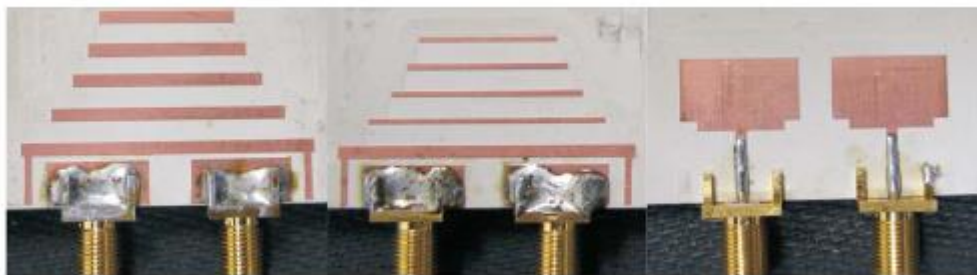


Σχ 44. Γεωμετρία του προτεινόμενου MIMO συστήματος (a) Μπροστινή όψη, (b) Πίσω όψη παρουσία των παρασιτικών στοιχείων [38].

Αρχικά, δύο εκπεμπόμενα στοιχεία με μεταξύ τους απόσταση 4 mm, σχεδιάζονται σε Rogers TMM4 υπόστρωμα πάχους 1.524 mm, διηλεκτρικής σταθεράς 4.5 και απωλειών εφαπτομένης 0.002, όπως φαίνεται στο Σχ. 44 (a). Στο πίσω μέρος του MIMO αυτού συστήματος προστίθενται πέντε παρασιτικά στοιχεία, με τη μορφή οριζόντιας λωρίδας, διαφορετικού μήκους το κάθε ένα, αλλά σταθερού πάχους 2 mm, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 44 (b). Η απόσταση μεταξύ τους είναι ομοίως σταθερή και ίση με 3 mm.



Βάσει του παραπάνω σχεδιασμού, και κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης παραμέτρων του συστήματος, τα δύο πρωτότυπα του Σχ. 45 κατασκευάστηκαν, με διαστάσεις 26 mm x 40.5 mm.

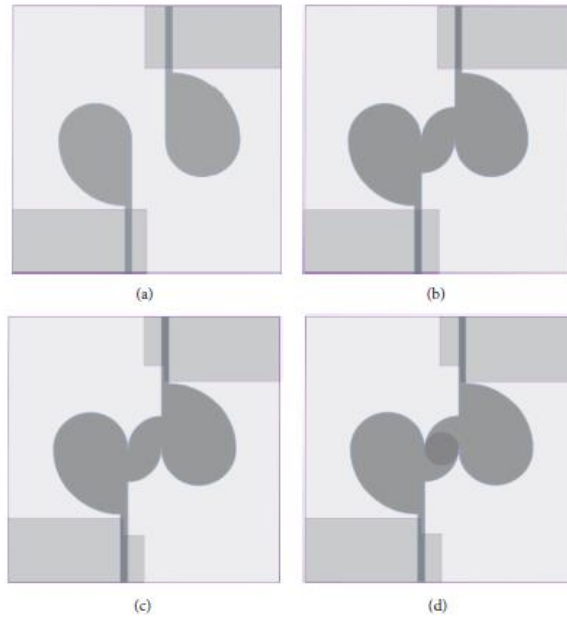


Σχ. 45. Πρωτότυπα που κατασκευάστηκαν [38].

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν τόσο από τις προσομοιώσεις όσο και από τις μετρήσεις, παρουσιάζουν απομόνωση μεταξύ των στοιχείων μεγαλύτερη από 15 dB στη ζώνη από 3 GHz έως 8.5 GHz.

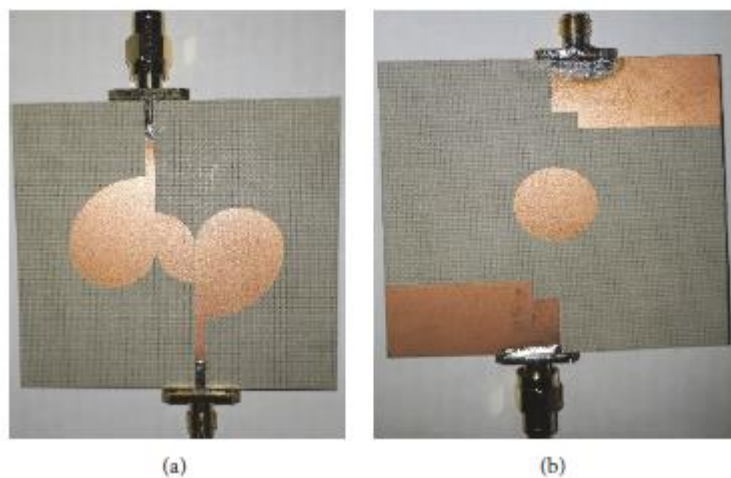
#### 10.4.β. Αύξηση της απομόνωσης σε μία MIMO κεραία με τη χρήση κυκλικών παρασιτικών στοιχείων

Οι Ghimire et al. παρουσιάζουν στο [39] ένα σύστημα MIMO κεραίας, τα σχεδιαστικά βήματα της οποίας απεικονίζονται σταδιακά στο Σχ. 46. Αρχικά, τα δύο στοιχεία τοποθετούνται αντικριστά στο Taconic υπόστρωμα, διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r = 4.5$ , και εφαπτομένης απωλειών  $\tan\delta = 0.0035$ , για να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση του χώρου (Σχ. 46 (a)). Στη συνέχεια, τοποθετούνται δύο δομές τεταρτημορίων ανάμεσα στα στοιχεία, όπως φαίνεται στο Σχ. 46 (b) προς μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, με τη ορθογώνια λάξευση τμήματος του επιπέδου γείωσης (Σχ. 46 (c)) η κεραία αποκτά μεγαλύτερο εύρος ζώνης, το οποίο κυμαίνεται πλέον από 3.1 GHz μέχρι 17.5 GHz, ενώ με την εισαγωγή πρόσθετου κυκλικού παρασιτικού στοιχείου στο ίδιο επίπεδο, όπως βλέπουμε στο Σχ. 46 (d), ενισχύεται η απομόνωση μεταξύ των στοιχείων εκπομπής.



**Σχ 46.** Διαφορετικά στάδια της σχεδίασης της προτεινόμενης UWB MIMO κεραίας (a) Τα δύο στοιχεία της MIMO κεραίας χωρίς τα παρασιτικά στοιχεία, (b) Εισαγωγή δύο παρασιτικών στοιχείων σε σχήμα τεταρτημορίου, (c) Λάξευση επιπέδου γείωσης (d) Εισαγωγή κυκλικού παρασιτικού στοιχείου στο επίπεδο γείωσης [39].

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε το πρωτότυπο του Σχ. 47, διαστάσεων 65 mm x 65 mm x 1.62 mm, ενώ τα αποτελέσματα των μετρήσεων δείχνουν απομόνωση μικρότερη από -21 dB.



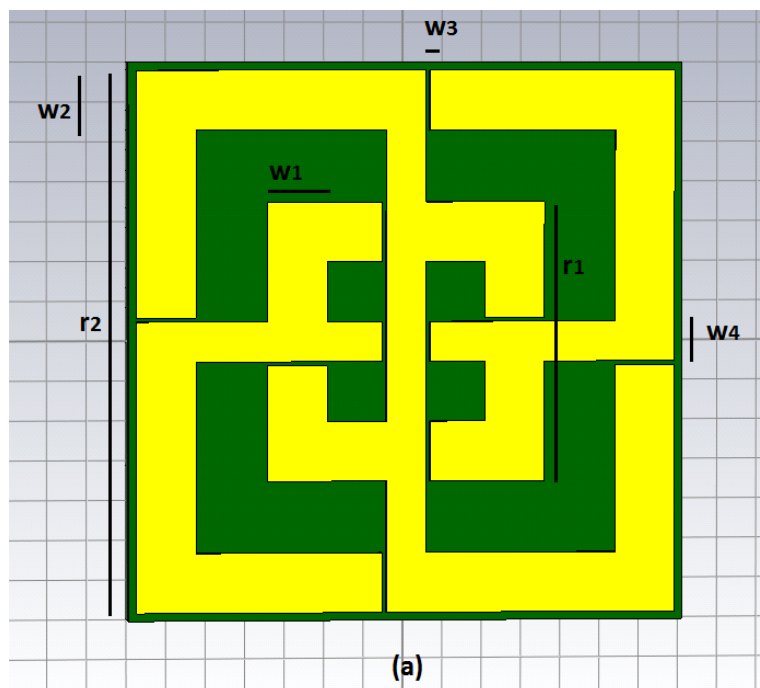
**Σχ 47.** Το πρωτότυπο που κατασκευάστηκε [39].

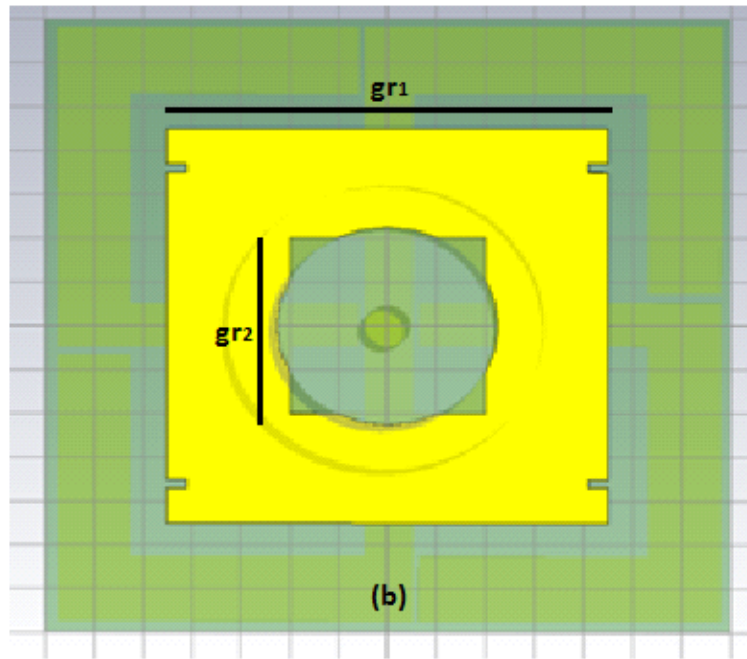
## 11. Μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ τετράγωνων κεραιών βρόχου σε σύστημα MIMO κεραιών πολύ μικρών διαστάσεων

Στη μελέτη που θα ακολουθήσει θα παρουσιαστεί μία καινοφανής προσέγγιση αύξησης της απομόνωσης σε ένα σύστημα MIMO τετράγωνων κεραιών βρόχου (square loop antennas), με την προσθήκη παρασιτικών στοιχείων στη σχεδίασή τους [40]. Αξίζει να σημειωθεί ότι το προτεινόμενο σχέδιο προσφέρει μία σημαντική μείωση της αμοιβαίας σύζευξης της τάξεως των  $-49.19$  dB στη συχνότητα των  $26$  GHz, διατηρώντας παράλληλα ένα πολύ μικρό μέγεθος, με διαστάσεις μόλις  $28.4$  mm x  $14$  mm x  $0.8$  mm.

### 11.1. Σχεδιαστική αντίληψη

Η προτεινόμενη κεραία είναι τυπωμένη επάνω σε ένα υπόστρωμα Rogers 4003C διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r = 3.4$ . Το μέγεθός της είναι πολύ συμπαγές, με τις εξαιρετικά μικρές διαστάσεις των  $14 \times 14 \times 0.8$  mm<sup>3</sup>. Το Σχ. 48 (a) και 48 (b) απεικονίζει την μπροστινή και πίσω όψη της, αντίστοιχα, ενώ οι παράμετροί της παρατίθενται λεπτομερώς, έπειτα από προσπάθειες βελτιστοποίησης, στον Πίνακα 3.





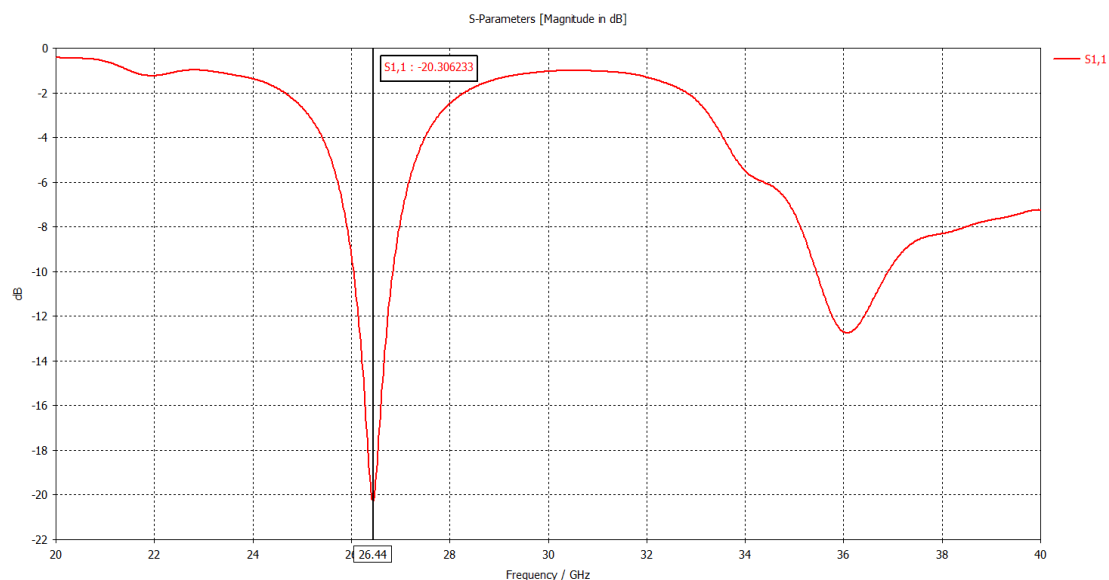
**Σχ 48.** Σχεδιαστική αναπαράσταση της προτεινόμενης κεραίας (a) Μπροστινή όψη και (b) Πίσω όψη [40].

Η σχεδίασή της βασίζεται σε δύο τετράγωνα κεραίες βρόχου. Η πλευρά του εσωτερικού βρόχου έχει διάσταση  $r_1 = 6.6$  mm, ενώ η πλευρά του εξωτερικού βρόχου είναι  $r_2 = 13.6$  mm. Όπως φαίνεται στο Σχ. 48 (a), δύο βραχίονες προστίθενται στη σχεδίαση, ως παρασιτικά στοιχεία. Το συνολικό σχέδιο παρουσιάζει μία συμμετρία, από την οποία μπορεί να επωφεληθεί η απόδοση της κεραίας, ειδικά όσον αφορά το διάγραμμα ακτινοβολίας της. Επιπρόσθετα, η παραμετρική μελέτη έδειξε ότι με την εισαγωγή τομών διαστάσεων  $0.4$  mm x  $0.2$  mm στο επίπεδο γείωσης, η απεικόνιση του οποίου φαίνεται στο Σχ. 48 (b), μπορούμε να επιτύχουμε βελτίωση στην προσαρμογή. Επίσης η τροφοδοσία της κεραίας πραγματοποιείται μέσω ενός  $2.92$  mm K βύσματος, κατάλληλου για συχνότητες μέχρι  $40$  GHz.

Parameter	Dimensions (mm)	Parameter	Dimensions (mm)
$r_1$	6.6	$w_3$	0.1
$r_2$	13.6	$w_4$	1
$w_1$	1.5	$gr_1$	9
$w_2$	1.5	$gr_2$	4

**Πίνακας 3** Διαστάσεις βελτιστοποιημένων παραμέτρων [40].

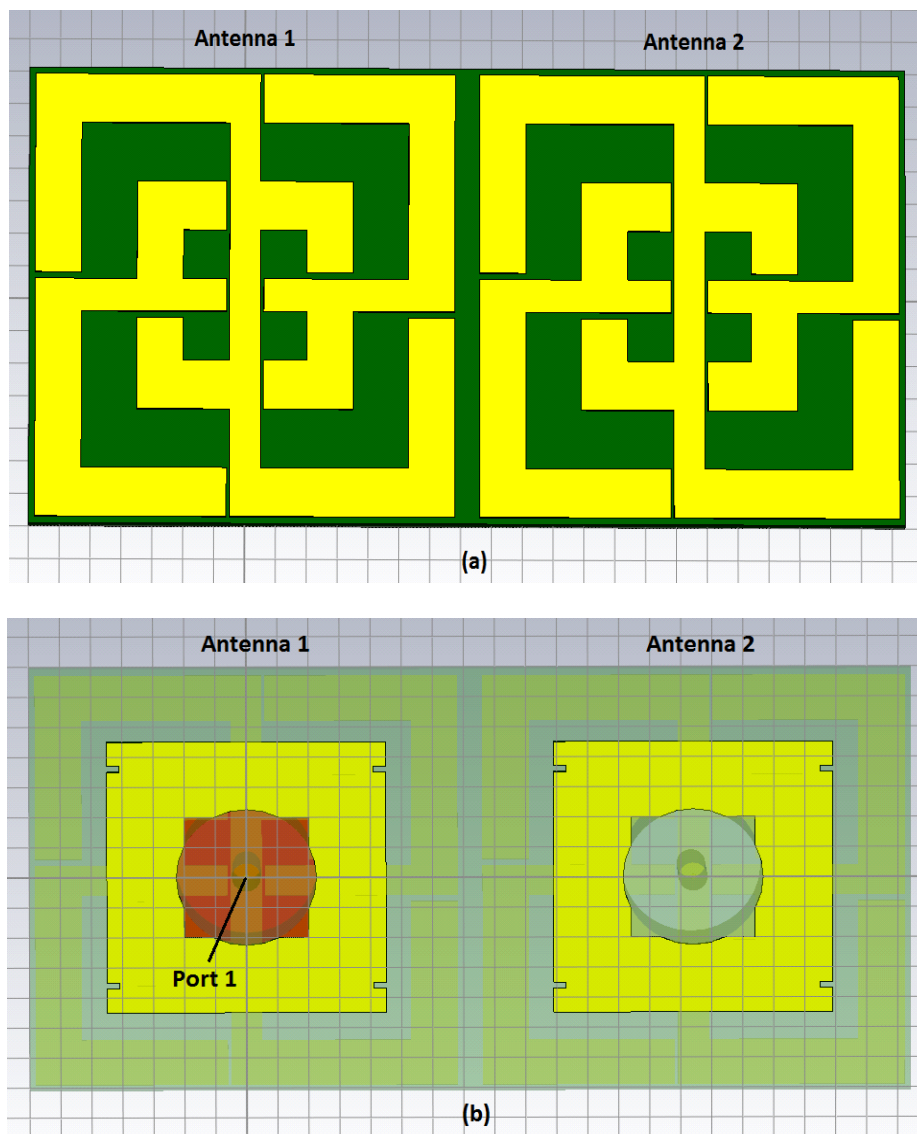
Ένας αριθμός προσομοιώσεων διεξήχθη χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα CST προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός για την προτεινόμενη κεραία μας, καταλήγοντας στις προαναφερθείσες διαστάσεις των παραμέτρων. Η προσομοιωθείσα S-παράμετρος της ανωτέρω κεραίας αποτυπώνεται στο Σχ. 49, όπου παρατηρούμε ότι συντονίζεται στη συχνότητα των 26.44 GHz με  $S_{11} = -20.31$  dB. Επίσης μια δεύτερη συχνότητα συντονισμού διαφαίνεται στα 36.08 GHz.



**Σχ 49.** Προσομοιωθείσα S-παράμετρος για τη μονή προτεινόμενη κεραία [40].

## 11.2. Σχεδίαση του συστήματος MIMO

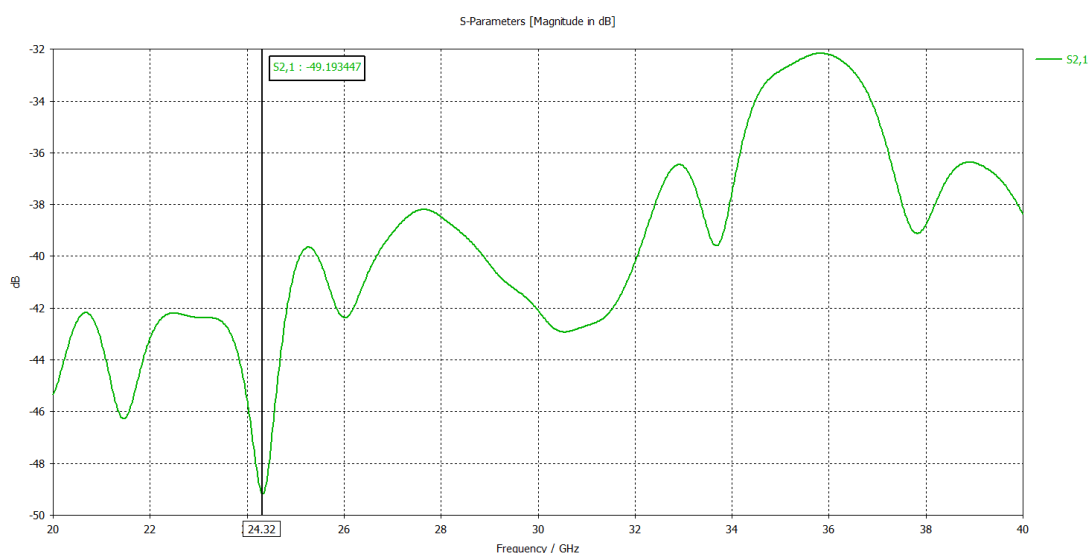
Προκειμένου να διερευνηθεί η απομόνωση της εν λόγω κεραίας σε μία MIMO διάταξη, μία δεύτερη πανομοιότυπη κεραία τοποθετείται δίπλα στην πρώτη, σε πολύ κοντινή απόσταση, μόλις 0.4 mm. Καθότι το ίδιο το σχέδιο της προτεινόμενης κεραίας έχει ενσωματώσει το σύστημα απόζευξης - το οποίο στην περίπτωσή μας είναι οι βραχίονες ως παρασιτικά στοιχεία - δεν απαιτείται κάποια περαιτέρω απόζευξη μεταξύ των στοιχείων που εκπέμπουν.



Σχ 50. Διάταξη του προτεινόμενου MIMO συστήματος (a) Μπροστινή όψη, (b) Πίσω όψη [40].

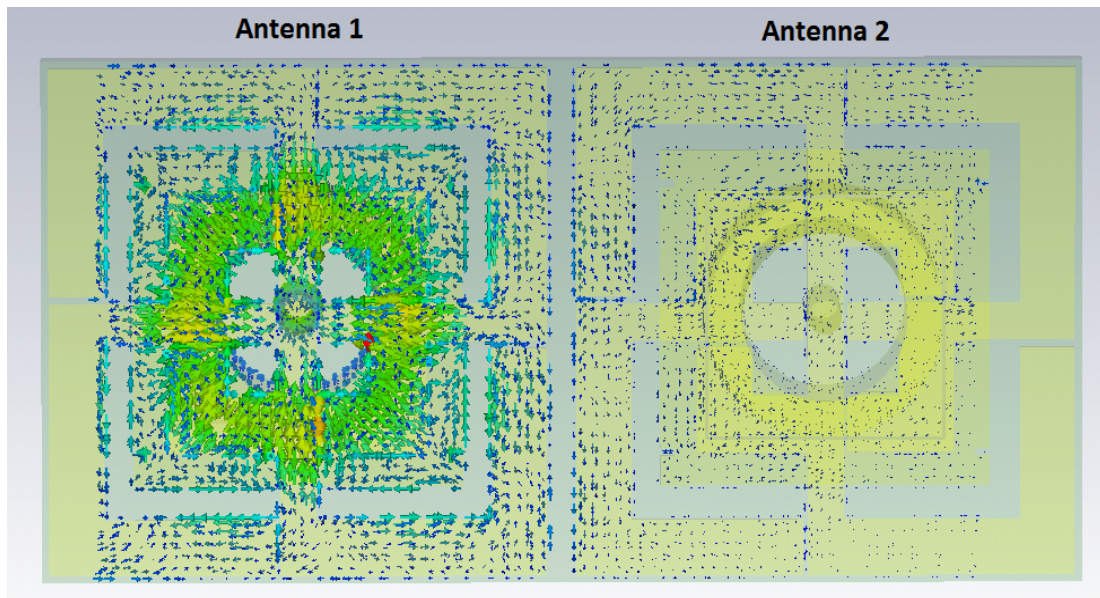
Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η επίτευξη ενός πολύ συμπαγούς συστήματος με εξαιρετικά μικρές διαστάσεις 28.4 mm x 14 mm x 0.8 mm, η απεικόνιση του οποίου εμφανίζεται στο Σχ. 50.

Οι S-παράμετροι της MIMO διάταξης που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται στο Σχ. 51. Η συχνότητα συντονισμού μετατοπίστηκε αμυδρά στα 24.32 GHz, ενώ η τιμή της παραμέτρου  $S_{21} = -49.193447$  dB υποδεικνύει μία άριστη απομόνωση.



**Σχ 51.** Προσομοιούμενη  $S_{21}$  παράμετρος για το προτεινόμενο MIMO σύστημα [40].

Αυτό επιπρόσθετα επιβεβαιώνεται και από την κατανομή του επιφανειακού ρεύματος της προτεινόμενης MIMO κεραίας που αποτυπώνεται στο Σχ. 52, καθώς διαπιστώνεται με σαφήνεια ότι το ρεύμα συγκεντρώνεται κυρίως στην κεραία 1 (Antenna 1), η οποία τροφοδοτείται μέσω της θύρας 1 (Port 1), επιτυγχάνοντας έτσι την επιθυμητή μείωση της αμοιβαίας σύζευξης.



**Σχ 52.** Κατανομή του ρεύματος επιφανείας για το προτεινόμενο MIMO σύστημα [40].



## 12. Σύγκριση μεταξύ των διαφόρων μεθόδων απόζευξης

Στον Πίνακα 4 συγκρίνονται όλες οι διαφορετικές μέθοδοι απόζευξης που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της αμοιβαίας σύζευξης στις διατάξεις των MIMO κεραιών ως περιγράφηκαν νωρίτερα σε αυτήν τη διπλωματική εργασία, αναφορικά με το επίπεδο απομόνωσής τους, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι το κύριο χαρακτηριστικό μας, και επίσης όσον αφορά το μέγεθός τους, το οποίο είναι καίριας σημασίας για όλες τις εφαρμογές επικοινωνιών 5G. Η σύγκριση δείχνει ότι το νέο σχέδιο [40] που προέκυψε από την έρευνα μέσα στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών “Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας” και κατά την εκπόνηση της ερευνητικής διπλωματικής εργασίας υπό τον τίτλο “Μελέτη βελτιστοποίησης της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ στοιχείων κεραιών MIMO”, είναι ένα από τα μικρότερα (ίσως και το μικρότερο μέχρι στιγμής) που έχει βρεθεί στην πιο πρόσφατη βιβλιογραφία, με ταυτόχρονα άριστα επίπεδα απομόνωσης.

Ref.	Size (mm <sup>2</sup> )	Frequency (GHz)	Isolation (dB)	Technique employed
[20]	23 x 29	3 – 12	< -15	a) Two L-shaped stubs on ground, b) CSRR on ground
[21]	74.19 x 44.14	3 – 4	- 23.08	CSRR on ground
	74.19 x 44.14	3 – 4	- 23.6	CSRR on patch
	74.19 x 44.14	3 – 4	- 36.6	CSRR on ground & patch
[22]	----	57 – 64	- 45	CSRR between radiating elements
[23]	50 x 50	2 – 6	- 33	CSRR on ground
[24]	17 x 8.6	24 – 26	- 53	2 x 5 CSRR array between radiating elements and on ground
[27]	44 x 37	5.5 – 6	- 45	Metamaterial structure between the radiating elements
[28]	80 x 40	4.2 – 8	< - 25	Metamaterial structure around the radiating elements
[29]	67.41 x 32.42	9 – 11	- 57	Metamaterial structure between the radiating elements
[30]	70 x 60	5.5 – 6.1	- 41	Metamaterial superstrate
[31]	42 x 26	4.2 – 5.25	- 29	Dual-layer metamaterial superstrate
[32]	40 x 26	5.5 – 6.1	- 43	Metamaterial superstrate (metasurface)
[33]	34 x 34 x 36 (cubical)	3 – 10	< - 20	Inverted L-type metamaterial structure

[34]	38.2 x 26.6	2 – 12	- 37.2	a) Defected ground structure, b) Metamaterial structure on the back side
[35]	100 x 41	5 – 7.5	< - 30	2 x 3 metamaterial structure
[36]	50 x 40	2 – 6	< - 20	Neutralization line
[37]	21 x 24	4.7 – 5	- 28	a) Neutralization line, b) Defected ground
[38]	26 x 40.5	3 – 8.5	< - 15	Parasitic elements
[39]	65 x 65	3.1 – 17.5	< - 21	Parasitic elements
[40]	28.4 x 14	24 - 27	- 49	Parasitic elements

**Πίνακας 4** Σύγκριση συστημάτων απόζευξης όσον αφορά την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ στοιχείων σε συστήματα κεραιών MIMO.

### 13. Επίλογος

Στη σημερινή εποχή είναι επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας καινοτόμων συστημάτων κεραιών που να πληρούν την απαίτηση για μεγάλο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και παράλληλη αύξηση χωρητικότητας, ώστε να μπορούν να λειτουργούν μέσα σε αστικά περιβάλλοντα που είναι πλούσια σε σκεδαστές (rich scattering environment) και ταυτόχρονα να μπορούν να διατηρούν ένα πολύ μικρό μέγεθος προκειμένου να είναι συμβατά με τις εφαρμογές 5<sup>ης</sup> γενιάς (5G – 5<sup>th</sup> generation). Η έλευση της τεχνολογίας 5<sup>ης</sup> γενιάς οδηγεί αδιαμφισβήτητα σε νέες αναδυόμενες τεχνολογίες που με τη σειρά τους θα επιφέρουν περαιτέρω βελτίωση της αρχιτεκτονικής του δικτύου με παράλληλη ικανοποίηση των απαιτήσεων του συνεχώς αυξανόμενου αριθμού χρηστών.

Μέσα στα πλαίσια αυτά, η νέα αυτή τεχνολογία δύναται να υλοποιηθεί με τη χρήση συστημάτων MIMO κεραιών, και ειδικά με τη χρήση μαζικών συστημάτων MIMO (massive MIMO systems), τα οποία συνδυάζουν πολλαπλές κεραίες εισόδου και εξόδου σε ένα μόνο σύστημα με ταυτόχρονα μεγάλα κέρδη, υποσκελίζοντας το πρόβλημα της διάδοσης των πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation).

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιέγραψε με σαφήνεια την ανάλυση των συστημάτων MIMO, τη δομή και τον τρόπο λειτουργίας τους. Στη συνέχεια αναφέρθηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των MIMO συστημάτων και ακολούθησε η περιγραφή του υπό μελέτη φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης. Επίσης παρουσιάστηκαν όλες τις τεχνικές απόζευξης – από την πλευρά της κεραίας – που βρέθηκαν στη σύγχρονη βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται σε διατάξεις MIMO κεραιών προκειμένου να ξεπεραστεί το πρόβλημα της αμοιβαίας σύζευξης που προκύπτει εξαιτίας της χρήσης πολλαπλών στοιχείων κεραιών μέσα σε έναν περιορισμένο χώρο. Η ελάχιστη απαίτηση για αμοιβαία σύζευξη που υιοθετήθηκε από τους περισσότερους ερευνητές είναι τα  $-15$  dB.

Προς επίρρωση των ανωτέρω, παρουσιάστηκαν αναλυτικά πολλαπλά παραδείγματα χρήσης συστημάτων απόζευξης δημοσιευμένα σε επιστημονικά περιοδικά, καθώς και η έρευνά μου υπό τον τίτλο “Μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ τετράγωνων κεραιών βρόχου σε σύστημα MIMO κεραιών πολύ μικρών διαστάσεων”, στο Κεφάλαιο 9, η οποία αποτελεί ουσιαστικό κομμάτι της εργασίας μου στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών μου.

Επιπρόσθετα, η εν λόγω Διπλωματική εργασία αποδεικνύει ότι με τη χρήση δακτυλίων CSRRs και τεχνικών ενσωμάτωσης μεταλλικών διατάξεων μπορεί να επιτευχθεί ευρεία ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας. Από την άλλη πλευρά, η τεχνική απόξευξης με χρήση παρασιτικών στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε σμίκρυνση της κεραίας και την επίτευξη πραγματικά πολύ μικρών διαστάσεων αυτής. Συνοψίζοντας, η εργασία αυτή παρουσιάζει μία μεγάλη περιοχή σχεδιαστικών ικανοτήτων, η οποία μπορεί να προσφέρει μία ευρεία επισκόπηση και δύναται να αποτελέσει μία ενδεδειγμένη αναφορά – παραπομπή για περαιτέρω έρευνα.

## Βιβλιογραφία

1. G. J. Foschini, “Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas”, Bell Labs Tech. J., vol. 1, no. 2, pp.41-59 (1996).
2. C. Oestges, M. Guillaud, and M. Debbah, “Multi-Polarized MIMO Communications: Channel Model, Mutual Information and Array Optimization”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 1057–1061 (2007).
3. M. Sanchez-Fernandez, E. Rajo-Iglesias, O. Quevedo-Teruel, and M. L. Pablo-Gonzalez, “Spectral Efficiency in MIMO Systems Using Space and Pattern Diversities Under Compactness Constraints”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 57, no. 3, pp. 1637–1645 (2008).
4. X. Wang, Z. Feng, and K. M. Luk, “Pattern and Polarization Diversity Antenna With High Isolation for Portable Wireless Devices”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 8, pp. 209–211 (2009).
5. H. S. Lui and H. T. Hui, “Mutual Coupling Compensation for Direction-of-Arrival Estimations Using the Receiving-Mutual Impedance Method”, International Journal of Antennas and Propagation (2010).
6. Wang Bin, Yongyu Chang, and Yang Sun. “Performance of the Large-Scale Adaptive Array Antennas in the Presence of Mutual Coupling ,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 64, No.6, pp.2236-2245 (2016).
7. Sun, L., Li, P., McKay, M.R. and Murch, R.D, “Capacity of MIMO Systems with Mutual Coupling: Transmitter Optimization with Dual Power Constraints”, IEEE Journals & Magazine, vol. 60, no. 2, pp. 848–861 (2012).
8. H. T. Hui, K. Y. Chan, and E. K. N. Yung, “Compensating for the mutual coupling effect in a normal-mode helical antenna array for adaptive nulling”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 52, no. 4, pp. 743–751 (2003).
9. C. Knievel and P. A. Hoeher, “On Particle Swarm Optimization for MIMO Channel Estimation”, Journal of Electrical and Computer Engineering (2012).

10. N. Sindhvani, M. S. Bhamrah, A. Garg, and D. Kumar, “Performance analysis of particle swarm optimization and genetic algorithm in MIMO systems”, 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), pp. 1–6 (2017).
11. Rezioui, A. and Bentarzi, H, “Genetic Algorithm Based MIMO Capacity Enhancement in Spatially Correlated Channels Including Mutual Coupling”, Wireless Personal Communications, vol. 63, no. 3, pp. 689–701 (2012).
12. A. Rezioui and H. Bentarzi, “Capacity Optimization of MIMO Wireless Communication Systems Using a Hybrid Genetic Taguchi Algorithm”, Wireless Pers Commun, vol. 71, no. 2, pp. 1003–1019 (2013).
13. Angel Lozano, Nihar Jindal, “Transmit Diversity vs. Spatial Multiplexing in Modern MIMO Systems”, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, No. 1 (2010).
14. L. Savy and M. Lesturgie, “Coupling effects in MIMO phased array”, IEEE Radar Conference, pp. 1-6 (2016).
15. X. Chen, S. Zhang, and Q. Li, “A Review of Mutual Coupling in MIMO Systems”, IEEE Access, vol. 6, pp. 24706-24719 (2018).
16. M. Manteghi and Y. Rahmat-Samii, “Multiport characteristics of a wide-band cavity backed annular patch antenna for multipolarization operations”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 53, no. 1, pp. 466–474 (2005).
17. S. h Chae, W. i Kawk, S. Park, and K. Lee, “Analysis of mutual coupling in MIMO antenna array by TARC calculation”, Asia-Pacific Microwave Conference, pp. 2090–2093 (2006).
18. Sibille, Alain, Claude Oestges, and Alberto Zanella, “MIMO: from theory to implementation”, Academic Press (2010).
19. J. Bonache, I. Gil, J. Garcia-Garcia, and F. Martin, “Complementary split rings resonators (CSRRs): Towards the miniaturization of microwave device design”, J Comput Electron, vol. 5, no. 2-3, pp. 193-197 (2006).

20. M. S. Khan, A. D-Capobianco, S. M. Asif, D. E. Anagnostou, R. M. Shubair, and B. D. Braaten, "A Compact CSRR Enabled UWB Diversity Antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 808-812 (2016).
21. M. F. Shafique, Z. Qamar, L. Riaz, R. Saleem, and S. A. Khan, "Coupling Suppression in Densely Packed Microstrip Arrays Using Metamaterial Structure", *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(3), 759-763.
22. A. Dadgarpour, B. Zarghooni, and T. A. Denidni, "Mutual-Coupling Suppression for 60 GHz MIMO Antenna Using Metamaterials", 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting (2015).
23. B. Jyothsna, S. M. Vali, and V. N. L. Kumar, "Performance Measures of MIMO System Using CSRR Loaded Miniaturized Microstrip Patch Antenna", *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, ISSN: 2249-8958, Volume-8 Issue-5 (2019).
24. R. Selvaraju, M. H. Jamaluddin, M. R. Kamarudin, J. Nasir, and M. H. Dahri, "Complementary Split Ring Resonator for Isolation Enhancement in 5G Communication Antenna Array", *Progress In Electromagnetics Research C*, **Vol. 83**, 217-228 (2018).
25. R. Rani, P. Kaur and N. Verma, "Metamaterials and their applications in patch antenna: A review," *International Journal of Hybrid Information Technology*, vol. 8, No11, pp. 199-212 (2015).
26. C. Caloz and T. Itoh, "Electromagnetic Metamaterials: Transmission line theory and microwave applications", A John Wiley & sons, Inc., publication.
27. A. Iqbal, O. A. Saraereh, A. Bouazizi, and A. Basir, "Metamaterial-Based Highly Isolated MIMO Antenna for Portable Wireless Applications", *Electronics* 2018, **7**, 267, doi:10.3390/electronics7100267 (2018).
28. A. H. Jabire, H. Zheng, A. Abdu, and Z. Song, "Characteristic Mode Analysis and Design of Wide Band MIMO Antenna Consisting of Metamaterial Unit Cell", *Electronics* 2019, **8**, 68; doi:10.3390/electronics8010068.

29. M. Alibakhshikenari, B. S. Virdee, P. Shukla, C. H. See, and R. Abd-Alhameed, “Interaction Between Closely Packed Array Antenna Elements Using Metasurface for Applications such as MIMO Systems and Synthetic Aperture Radars”, *AGU 100, Radio Science*, Research Article 10.1029/2018RS006533.
30. R. Mark, N. Rajak, K. Mandal, and S. Das, “Isolation and Gain Enhancement Using Metamaterial Based Superstrate for MIMO Application”, *Radioengineering*, Vol. 28, No. 4, 689-695 (2019).
31. L. Si, H. Jiang, X. Lv, and J. Ding, “Broadband Extremely Close-spaced 5G MIMO Antenna with Mutual Coupling Reduction Using Metamaterial-inspired Superstrate”, *Optics Express*, Vol. 27, No. 3, 3472, (2019).
32. Z. Wang, L. Zhao, Y. Cai, S. Zheng, and Y. Yin, “A Meta-surface Antenna Array Decoupling (MAAD) Method for Mutual Coupling Reduction in a MIMO Antenna System”, *Scientific Reports* (2018), 8:3152, doi:10.1038/s41598-018-21619-z.
33. M. Bilal, R. Saleem, H. H. Abbasi, M. F. Shafique, and A. K. Brown, “An FSS Based Non-Planar Quad Element UWB-MIMO Antenna System”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 987-990.
34. X. Zhu, X. Yang, Q. Song, and B. Lui, “Compact UWB-MIMO Antenna with Metamaterial FSS Decoupling Structure”, *Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017:115 DOI 10.1186/s13638-017-0894-3 (2017).
35. R. G. S. Alsultan, and G. O. Yetkin, “Mutual Coupling Reduction of E-shaped MIMO Antenna with Matrix of C-shaped Resonators”, *International Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2018, Article ID 4814176.
36. Y. Ou, X. Cai, and K. Qian, “Two-Element Compact Antennas Decoupled with a Simple Neutralization Line”, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 65, 63–68 (2017).
37. A. M. Ibrahim, I. M. Ibrahim, and N. A. Shairi, “Compact MIMO Antenna with High Isolation for 5G Smartphone Applications”, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 12 (6), 121 – 125, doi:10.25103/jestr.126.15 (2019).



38. M. S. Khan, A-D. Capobianco, M. F. Shafique, B. Ijaz, A. Naqvi, and B. D. Braaten, “Isolation Enhancement of a Wideband MIMO Antenna using Floating Parasitic Elements”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, No. 7 (2015).
39. J. Ghimire, K-W Choi, and D-Y Choi, “Bandwidth Enhancement and Mutual Coupling Reduction Using a Notch and a Parasitic Structure in a UWB-MIMO Antenna”, *Hindawi International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2019, Article ID 8945386, <https://doi.org/10.1155/2019/8945386> (2019).
40. M. Douka, K. N. Voudouris, “On reduction of Mutual Coupling Effect for Square Loop Antenna Arrays”, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, (2020). Under review