



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ανάλυση και Σχεδίαση Επαναπρογραμματιζόμενων Μικροκυματικών Μεταεπιφανειών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΕΥΘΥΜΙΑΔΗ ΔΗΜΗΤΡΗ

Επιβλέποντες:

Δρ. Αλέξανδρος Πιτιλάκης

Καθηγητής Θεόδωρος Ζυγκιρίδης

ΚΟΖΑΝΗ/ΙΟΥΛΙΟΣ/2024



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
& COMPUTER ENGINEERING

Analysis and design of reconfigurable microwave metasurfaces

THESIS

EFTHYMIADIS DIMITRIS

SUPERVISOR(s): Dr. Pitilakis Alexandros

Prof. Zygiridis Theodoros

KOZANI/JULY/2024



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο “Ανάλυση και σχεδίαση επαναπρογραμματιζόμενων μικροκυματικών μεταεπιφανειών” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Αλέξανδρου Πιτιλάκη και Θεόδωρου Ζυγκιρίδη αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Ευθυμιάδης Δημήτριος, Πιτιλάκης Αλέξανδρος & Ζυγκιρίδης Θεόδωρος, 2024, Κοζάνη

Copyright (C) Eftimiadis Dimitrios, Pitilakis Alexandros & Zygiridis Theodoros, 2024, Kozani

Υπογραφή Φοιτητή: _____

Περίληψη

Την τελευταία δεκαετία, οι μεταεπιφάνειες αποτελούν ένα από τα πιο ενδιαφέροντα θέματα της σύγχρονης έρευνας κι επιστήμης. Είναι τεχνητές επιφάνειες με δομή απολύτως κατασκευασμένη από τον άνθρωπο και με ελεγχόμενες από αυτόν ιδιότητες και λειτουργίες. Αλληλοεπιδρούν με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και τροποποιούν τη συμπεριφορά τους, υπάρχουν ποικίλες λειτουργικές εφαρμογές τις οποίες μπορεί να υποστηρίξει μια μεταεπιφάνεια, όπως πλήρη απορρόφηση των κυμάτων, διαμόρφωση μετώπου κύματος, μετατροπή πόλωσης, εστίαση, εκτροπή ή ανάκλασή τους υπό κάθε δυνατή γωνία. Φυσικά, η μελέτη αυτών των λειτουργιών, αλλά και των μεταεπιφανειών γενικότερα, απαιτεί τη χρήση κάποιας κατάλληλης υπολογιστικής μεθόδου και τεχνικής εισαγωγής της μεταεπιφάνειας σε προσομοιώσεις.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη μελέτη και την ανάλυση μεταεπιφανειών για τον τρόπο λειτουργίας τους στη συχνότητα κοντά στα 5GHz όπου βρίσκεται εφαρμογή κυρίως στον τηλεπικοινωνιακό τομέα. Ειδικότερα, θα αρχίσουμε τη παρουσίαση με την αναφορά διάφορων μεταεπιφανειών χωρίζοντας τα ανάλογα με τις ιδιότητες και λειτουργίες του. Στη συνέχεια θα κάνουμε ανάλυση των στατικών μεταεπιφανειών εξετάζοντας το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο καθώς και επιβεβαίωση του βάσης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από προσομοιώσεις με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου CST STUDIO SUITE. Τέλος, θα αναφερθούμε στις ελεγχόμενες μεταεπιφάνειες και στους τρόπους ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο ελεγχόμενης μεταεπιφάνειας το οποίο θα εξεταστεί εκτενέστερα με προσομοιώσεις που θα πραγματοποιούν διάφορες λειτουργίες οι οποίες θα είναι αναγκαίες για τις ασύρματες επικοινωνίες της νέας γενιάς.

Λέξεις Κλειδιά

Μεταϋλικά, μεταεπιφάνειες, υπολογιστικός ηλεκτρομαγνητικός, επιφάνειες υψηλής αντίστασης, συντονιζόμενη τέλεια απορρόφηση, έξυπνες μεταεπιφάνειες

Abstract

In the last decade, metasurfaces have been one of the most interesting topics of modern research and science. They are artificial surfaces with a structure entirely made by humans and with properties and functions controlled by humans. By interacting with electromagnetic waves and modifying their behavior, there are a variety of functional applications that a metasurface can support, such as full absorption of waves, wavefront shaping, polarizing, focusing, deflecting or reflecting them at any possible angle. Of course, the study of these functions, and of metasurfaces in general, requires the use of an appropriate computational method and technique for introducing the metasurface into simulations.

This thesis aims to study and analyze metasurfaces for their reaction mode at frequencies in the 5 GHz where it finds application mainly in the telecommunication sector. Specifically, we will start the presentation by mentioning different metasurfaces by dividing them according to their properties and functions. We will then perform an analysis of static metasurfaces by reviewing the basic theoretical background as well as its validation based on results obtained from simulations using the CST STUDIO SUITE computational package. Finally, we will discuss controlled metasurfaces and the control modes that can be applied, with particular emphasis on a specific controlled metasurface model that will be further explored with simulations that perform various operations necessary for the new generation wireless communications.

Keywords

Metamaterials, metasurfaces, computational electromagnetics, high-impedance surfaces, tunable perfect absorption, smart metasurfaces

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Αλέξανδρο Πιτιλάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, την επιμονή του, τη συμπαράστασή του, τη συνεχή του υποστήριξη και το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος. Ευχαριστώ επίσης τον συνεπιβλέποντα, Καθηγητή Θεόδωρο Ζυγκιρίδη, για τη βοήθειά του, όποτε χρειάστηκε.

Τέλος, θα ήθελα εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΚΟΖΑΝΗ/ΙΟΥΛΙΟΣ/2024

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	7
Abstract	8
Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα	12
Πρόλογος.....	14
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	15
1.1 Στατικές και ελεγχόμενες μεταεπιφάνειες.....	16
1.2 Απορροφητικές, ανακλαστικές και διαθλαστικές μεταεπιφάνειες	16
1.3 Ομοιόμορφα και ανομοιόμορφα κωδικοποιημένες μεταεπιφάνειες	18
Κεφάλαιο 2: Τεχνικές ανάλυσης των μεταεπιφανειών	19
2.1 Θεωρία Floquet Σε επίπεδο μοναδιαίου κελιού.....	20
2.2 Θεωρία Floquet Σε επίπεδο υπερκελιού.....	22
2.3 Ανάλυση σε επίπεδο πλήρους ανοίγματος	23
Κεφάλαιο 3: Στατικές μεταεπιφάνειες στη PCB τεχνολογία.....	28
3.1 PCB τεχνολογία	28
3.2 Συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης από μια συστοιχία μεταλλικών ταινιών.....	30
3.3 Συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης από μια συστοιχία τετράγωνων μεταλλικών καλυμμάτων (patches).....	33
3.4 Επιφάνεια υψηλής αντίστασης που αποτελείται από μεταλλικές ταινίες	36
3.5 Ηλεκτρομαγνητικός απορροφητής.....	39
Κεφάλαιο 4: Ελεγχόμενες μεταεπιφάνειες από μεταβλητά συγκεντρωμένα φορτία	43
4.1 Ολοκληρωμένα κυκλώματα RC.....	43
4.2 Μοναδιαίο κελί για πλήρη έλεγχο ανάκλασης σε μία πόλωση	44
4.2.1 Ρυθμιζόμενη τέλεια απορρόφηση.....	45
4.2.2 Ρυθμιζόμενη ανώμαλη ανάκλαση	48
4.2.3 Δομή των υπερκελιών.....	48
4.2.4 Ανώμαλη ανάκλαση σε TE πόλωση.....	50
4.2.5 Ανώμαλη ανάκλαση σε TM πόλωση.....	53
4.3 Μοναδιαία κελιά για ανεξάρτητο πλήρη έλεγχο δύο πολώσεων.....	54
4.3.1 Μοναδιαίο κελί 2x2	54
4.3.2 Μοναδιαίο κελί 1x1	58
4.4 Έλεγχος μετώπου κύματος σε επίπεδες μεταεπιφάνειες	60
Κεφάλαιο 5:.....	66

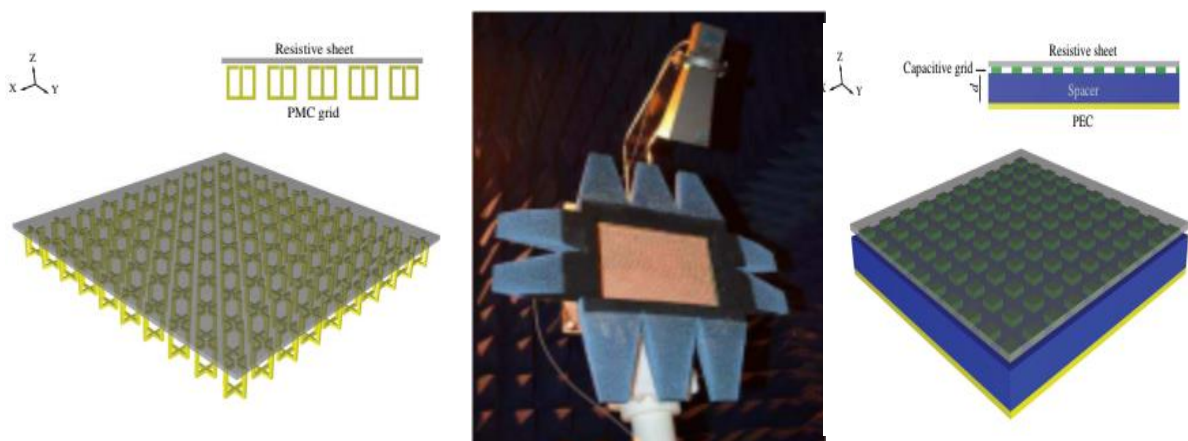
5.1 Επίλογος.....	66
5.2 Μελλοντικές προεκτάσεις	66
Βιβλιογραφία	68
Συνομογραφίες.....	70

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το χρονικό διάστημα από τον Οκτώβριο 2022 ως τον Ιούνιο 2024. Στο πλαίσιο της εργασίας επικεντρώθηκα στην ανάλυση τόσο θεωρητικών όσο και υπολογιστικών πτυχών των στατικών και επαναπρογραμματιζομένων μεταεπιφανειών. Η εργασία αυτή αποτελεί σημαντικό εφόδιο για την κατανόηση των μεταεπιφανειών σε μικροκυματικές εφαρμογές και περιλαμβάνονται βασικές αρχές και μεθοδολογίες που είναι απαραίτητες για τον σχεδιασμό τους.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Οι μεταεπιφάνειες είναι οι δισδιάστατες (δηλαδή επίπεδες) εκδοχές των μεταλλικών, και χαρακτηρίζονται από πάχος αρκετά μικρότερο του μήκους κύματος. Είναι συνθετικά υλικά, συνήθως αποτελούμενα από περιοδική επανάληψη πολλών όμοιων μοναδιαίων κελιών (unit cells) ή μετα-ατόμων (meta atoms), που το καθένα έχει μικροδομή που κατασκευάζεται από τον άνθρωπο και τους προσδίδει ιδιαίτερες ιδιότητες. Μελετώνται και χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε ηλεκτρομαγνητικές μικροκυματικές εφαρμογές λόγω του μικρού τους βάρους, του χαμηλού κόστους και της ευκολίας κατασκευής τους, αφού η μικροδομή έχει διαστάσεις χιλιοστών του μέτρου. Αντιθέτως, σε υψηλότερες συχνότητες, όπως THz ή οπτικές, θα απαιτούνταν μικρομετρικές ή νανομετρικές διαστάσεις που δυσκολεύουν ιδιαίτερα τις κατασκευές. Η σχεδίαση των μοναδιαίων κελιών που συνθέτουν τις μεταεπιφάνειες τους προσδίδουν τις ιδιαίτερες αλληλεπιδράσεις με τα εισερχόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ένα κλασικό παράδειγμα μεταεπιφανειών είναι οι επιφάνειες υψηλής αντίστασης (EYA) που μπορούν να υλοποιήσουν την έννοια του ανοιχτού κυκλώματος (ή γενικότερα της πλήρους ανάκλασης με ελεγχόμενη διαφορά φάσης) για ακτινοβολούμενα κύματα. Θυμίζετε πως οι συνηθισμένοι ανακλαστήρες από μέταλλο υλοποιούν την έννοια του βραχυκυκλώματος. Μια άλλη εφαρμογή των μεταεπιφανειών είναι η πλήρης απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, στο μικροκυματικό φάσμα ή άλλου, η υλοποίηση δηλαδή της έννοιας του προσαρμοσμένου φορτίου για ακτινοβολούμενα κύματα. Οι πρακτικές εφαρμογές που μπορούν να έχουν οι μεταεπιφάνειες στην καθημερινότητα μας διαφέρουν ανάλογα με το φάσμα λειτουργείας τους. Στη συγκεκριμένη εργασία δίνουμε έμφαση στο μικροκυματικό φάσμα που βρίσκει εφαρμογή κυρίως στον τηλεπικοινωνιακό τομέα, και συγκεκριμένα στις ασύρματες επικοινωνίες νέας γενιάς (6G), όπου η περιοχή των “Reconfigurable Intelligent Surfaces” (RIS) έχει δει πρωτοφανή ανάπτυξη την τελευταία πενταετία



Σχήμα 1.1: Διάφορα μοντέλα μεταεπιφανιών

1.1 Στατικές και ελεγχόμενες μεταεπιφάνειες

Οι στατικές μεταεπιφάνειες είναι αυτές που δεν επιδέχονται ελέγχου ή επαναπρογραμματισμού μετά την κατασκευή τους. Έχουν πολλές ομοιότητες με τις ανακλαστικές διατάξεις (reflectarrays) και τους επίπεδους φακούς. Είναι συνήθως λεπτές επιφάνειες υψηλής αντίστασης με πιθανές λειτουργίες την απορρόφηση, εστίαση, μετατροπή πόλωσης, σκέδαση ή ανακατεύθυνση των προσπίπτοντων κυμάτων. Σημειώστε πως μια στατική μεταεπιφάνεια έχει τη δυνατότητα να εφαρμόσει μόνο μια από τις παραπάνω λειτουργίες, από την αρχή της κατασκευής της χωρίς να έχει την δυνατότητα να αλλάξει. Αυτό αποτελεί πρόβλημα στις περιπτώσεις που πιθανόν να προκύψουν διαφορετικές ανάγκες κατά την χρησιμοποίησή τους. Οι στατικές μεταεπιφάνειες συνήθως κατασκευάζονται με χάραξη κατάλληλου σχήματος στην εκτεθειμένη μεταλλική όψη ενός διηλεκτρικού υποστρώματος που βρίσκεται επάνω σε ένα ανακλαστικό επίπεδο. Τα σχήματα είναι συνήθως απλά, π.χ., παραλληλόγραμμα ή ελλείψεις, αντίστοιχα με τις τυπωμένες κεραίες τύπου patch.

Μετά τη μελέτη των επιφανειών υψηλής αντίστασης προχωρήσαμε στην ανάλυση επαναπρογραμματιζόμενων ή ελεγχόμενων μεταεπιφανειών. Οι ηλεκτρομαγνητικές μεταεπιφάνειες μπορούν να χαρακτηριστούν ως ελεγχόμενες εάν είναι σε θέση να εκτελούν πολλαπλές ρυθμιζόμενες λειτουργίες, με την επιθυμητή απόκριση να ελέγχεται από έναν υπολογιστή που επηρεάζει τις επιμέρους ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες κάθε μοναδιαίου κελιού της μεταεπιφάνειας. Στις μικροκυματικές συχνότητες, ο έλεγχος συνήθως επιτυγχάνεται με ενσωμάτωση συγκεντρωμένων φορτίων μέσα σε κάθε κελί. Ελέγχοντας την μιγαδική ισοδύναμη αντίσταση του κάθε φορτίου ελέγχουμε την επιφανειακή αντίσταση του κελιού, και άρα συνολικά και την απόκριση της μεταεπιφάνειας. Μία τέτοια ελεγχόμενη μεταεπιφάνεια μπορεί να επιτύχει ρυθμιζόμενη τέλεια απορρόφηση ή ρυθμιζόμενη ανώμαλη ανάκλαση χωρίς να αλλάζουμε το κυρίως σώμα της μεταεπιφάνειας, δηλαδή κάποια γεωμετρική διάσταση, παρά μόνο το μιγαδικό φορτίο σε κάθε κελί, κάτι που ελέγχεται με ηλεκτρικό τρόπο (π.χ. δίοδοι PIN ή varistor). Σημειώνεται πως υπάρχουν ελεγχόμενες μεταεπιφάνειες διαφορετικών τύπων:

Ολικού ή τοπικού ελέγχου, εφόσον μπορούμε να ελέγχουμε όλα τα κελιά μαζί (αλλά στην ίδια ρύθμιση) ή κάθε κελί μεμονωμένα, αντίστοιχα.

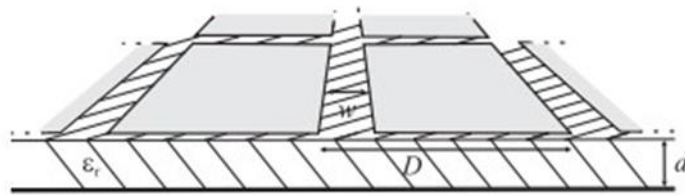
- Βαθμωτού ή μιγαδικού ελέγχου, εφόσον μπορούμε να ελέγχουμε μόνο το πραγματικό (ή το φανταστικό) μέρος της επιφανειακής αντίστασης ή και τα δύο, αντίστοιχα.
- Διακριτού ή συνεχούς ελέγχου, εφόσον οι τιμές της επιφανειακής αντίστασης μπορούν να λάβουν μόνο λίγες διακριτές τιμές ή οποιαδήποτε τιμή (εντός συγκεκριμένου διαστήματος), αντίστοιχα.

Εύλογα καταλαβαίνει κανείς πως το επιθυμητό είναι μία μεταεπιφάνεια τοπικού, μιγαδικού και συνεχούς ελέγχου, για μέγιστη λειτουργικότητα. Παρόλα αυτά, απλούστερες εκδοχές συχνά αρκούν για συγκεκριμένες εφαρμογές.

1.2 Απορροφητικές, ανακλαστικές και διαθλαστικές μεταεπιφάνειες

Οι μετα-επιφάνειες μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τις γεωμετρικές διαστάσεις και ΗΜ ιδιότητες των υλικών:

- **Απορροφητικές μεταεπιφάνειες:** Αυτές οι επιφάνειες απορροφούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Μία διάταξη επίπεδου απορροφητή παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.2** όπου το υπόστρωμα είναι διηλεκτρικό με απώλειες. Η διάταξη των ορθογώνιων μεταλλικών καλυμμάτων (patches) που βρίσκονται επάνω στην διηλεκτρική πλάκα εμφανίζουν χωρητική ισοδύναμη απόκριση η οποία, σε συνδυασμό με την επαγωγική ισοδύναμη απόκριση που εμφανίζεται από τη γειωμένη διηλεκτρική πλάκα με απώλειες, σχηματίζει έναν συντονισμό, αντίστοιχα με ένα κύκλωμα RLC. Ο συντονισμός αυτός και οι απώλειες που εμφανίζει το υλικό του διηλεκτρικού μετατρέπει τη διάταξη στο **Σχήμα 1.2** σε έναν απλό απορροφητή. Εφόσον το διηλεκτρικό έχει αρκετά μεγάλες απώλειες, η απορρόφηση μπορεί να είναι τέλεια, αλλά αυτό συμβαίνει αυστηρά μόνο σε μία συχνότητα και σε μία κατεύθυνση (γωνία) πρόσπτωσης. Για αλλαγή της συχνότητας ή γωνίας τέλει απορρόφησης απαιτείται ανασχεδιασμός της μεταεπιφάνειας.



Σχήμα 1.2: Μοντέλο μιας μεταεπιφάνειας που αποτελείται από τετράγωνα μεταλλικά τμήματα (patches) πάνω σε μία γειωμένη διηλεκτρική πλάκα. Αυτή η διάταξη μπορεί να λειτουργήσει ως ΕΥΑ, ανάλογα με τις γεωμετρικές διαστάσεις. Αν η διηλεκτρική πλάκα έχει απώλειες, η ίδια διάταξη γίνεται απορροφητής, με κατάλληλη σχεδίαση.

- **Ανακλαστικές μεταεπιφάνειες:** Αυτές οι επιφάνειες ανακλούν το επίπεδο κύμα εισάγοντας όμως μία επιθυμητή διαφορά φάσης αυθαίρετα επιλεγμένης τιμής. Αποτελούν ουσιαστικά επιφάνειες υψηλής αντίστασης (ΕΥΑ), και υλοποιούν την έννοια του ανοιχτού κυκλώματος (ή γενικότερα της πλήρους ανάκλασης με ελεγχόμενη διαφορά φάσης) για ακτινοβολούμενα κύματα με χρήση των μεταεπιφανειών. Ανομοιόμορφες ανακλαστικές μετα-επιφάνειες, όπου όλα τα κελιά δεν είναι ίδια μεταξύ τους, μπορούν να υλοποιήσουν διαφράγματα περίθλασης (diffraction gratings) για ανακατεύθυνση κυμάτων ή επίπεδα κάτοπτρα εστίασης.
- **Διαθλαστικές μεταεπιφάνειες:** Αυτές οι επιφάνειες διαθλούν το προσπίπτον κύμα, προκαλώντας μια αλλαγή στην κατεύθυνσή του. Με τον έλεγχο των μεγεθών και σχημάτων των στοιχειωδών μονάδων μεταεπιφανειών, μπορούν να επιτευχθούν διαφορετικοί αποτελεσματικοί δείκτες διάθλασης επιφανείας και η επιφάνεια μπορεί να σχεδιαστεί για να παρέχει διάφορες λειτουργίες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό διδιάστατων υπερλεπτών μικροκυματικών φακών τύπου Luneburg και φακών “fish-eye” (180 μοίρες οπτικό πεδίο), οι οποίοι εφαρμόζονται σε επιφανειακούς κυματοδηγούς για συστήματα κεραιών και επίπεδες πηγές μικροκυμάτων.

Στην παρούσα εργασία θα μας απασχολήσουν οι επαναπρογραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες που μπορούν να λειτουργήσουν σε ανακλαστική ή σε απορροφητική λειτουργία: Αυτές οι επιφάνειες είναι ελεγχόμενες με ηλεκτρικό μηχανισμό τόσο όσον αφορά την απορροφητικότητα όσο και την ανακλαστικότητα τους. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (ICs), τα οποία μπορούν να παρέχουν σε μία θύρα εξόδου τους ένα συγκεντρωμένο

σύνθετο (μιγαδικό) φορτίο στη μικροκυματική συχνότητα, με ανεξάρτητο έλεγχο του πραγματικού (αντίσταση) και φανταστικού (αντίδραση) μέρους. Ένα τέτοιο ελεγχόμενο φορτίο, κατάλληλα

τοποθετημένο σε μία μεταεπιφάνεια, μπορεί να προσφέρει πλήρη (μιγαδικό και συνεχή) και τοπικό έλεγχο της επιφανειακής σύνθετης αντίστασης στο άνοιγμα της μεταεπιφάνειας, ορίζοντας τελικά τη λειτουργία της.

1.3 Ομοιόμορφα και ανομοιόμορφα κωδικοποιημένες μεταεπιφάνειες

Οι μεταεπιφάνειες μπορούν να είναι είτε ομοιόμορφα κωδικοποιημένες (όπου όλα τα κελιά είναι ίδια μεταξύ τους) είτε ανομοιόμορφα κωδικοποιημένες (όπου τα κελιά διαφοροποιούνται μεταξύ τους).

- **Ομοιόμορφα Κωδικοποιημένες Επιφάνειες:** Σε αυτόν τον τύπο επιφανειών, όλα τα κελιά έχουν την ίδια ιδιότητα ή κατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια είναι ομοιόμορφη σε όλη την περιοχή της. Οι ομοιόμορφα κωδικοποιημένες επιφάνειες μπορούν να είναι και ολικά ελεγχόμενες, π.χ. με την βοήθεια ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, έτσι ώστε να μπορούμε να αλλάζουμε την λειτουργία της ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια της. Οι απορροφητές επιπέδων κυμάτων (με εφαρμογή π.χ. στην Stealth τεχνολογία) ή οι μετατροπείς πόλωσης (waveplates) φτιάχνονται με ομοιόμορφα κωδικοποιημένες μεταεπιφάνειες.
- **Ανομοιόμορφα Κωδικοποιημένες Επιφάνειες:** Σε αυτές τις επιφάνειες, τα κελιά διαφοροποιούνται μεταξύ τους σε κάποια ιδιότητα, π.χ., το κάθε κελί να έχει λίγο διαφορετική φάση ανάκλασης. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει πολύπλοκα μοτίβα, σχέδια ή δομές πάνω στην επιφάνεια, ανάλογα τον έλεγχο των κελιών, τοπικά, σε γραμμές/στήλες, σε άλλα “υπερκελιά”. Συνεπώς η βελτίωση των ανομοιόμορφα κωδικοποιημένων επιφανειών είναι ότι μπορούμε να αλλάξουμε το φορτίο σε κάθε κελί ξεχωριστά δίνοντας έτσι ξεχωριστές ιδιότητες σε κάθε κελί, κάτι που επιτρέπει συλλογικά πιο πολύπλοκες λειτουργίες της μεταεπιφάνειας όπως έλεγχο της γωνίας ανάκλασης (ανακατεύθυνση δέσμης) ή εστίαση.

Κεφάλαιο 2: Τεχνικές ανάλυσης των μεταεπιφανειών

Για να μελετήσουμε και να αναλύσουμε την απόκριση μίας μεταεπιφάνειας ως προς το προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα ξεκινάμε πάντα από την μελέτη ενός μόνο μοναδιαίου κελιού. Μια υπόθεση που συχνά γίνεται είναι πως το ίδιο κελί επαναλαμβάνεται άπειρες φορές, άρα θα πρέπει η δομή της μεταεπιφάνειας να είναι περιοδική, επομένως χρειαζόμαστε ένα μαθηματικό εργαλείο ώστε να μας βοηθήσει στην μελέτη της διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα περιοδικό μέσο. Ένα τέτοιο εργαλείο είναι η θεωρία Floquet. Στις περιοδικές δομές η διάδοση των κυμάτων διέπεται πάλι από τις εξισώσεις του Maxwell σχετιζόμενες με το υλικό στον χώρο στον οποίο διαδίδονται, αλλά και με κατάλληλες οριακές συνθήκες περιοδικότητας εφαρμοσμένες στα όριά του. Οι οριακές συνθήκες σχετίζονται με την πόλωση και την κατεύθυνση των προσπίπτοντων κυμάτων. Σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται ένα σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων με περιοδικούς συντελεστές. Η επίλυση του προβλήματος μοιάζει με αυτή ενός πολύθυρου ηλεκτρικού δικτύου και τελικά δίνει την απόκριση της διάταξης για καθένα από τους ρυθμούς που “υποστηρίζει” το κελί στο οποίο εφαρμόστηκε η θεωρία. Οι ρυθμοί αυτοί ονομάζονται ρυθμοί ή τάξεις παράθλασης (diffraction order), και χωρίζονται σε οδηγούμενους και αποσβεννύμενους (evanescent). Μόνο οι οδηγούμενοι έχουν σημασία στις διατάξεις που θα μελετήσουμε. Ο κάθε ρυθμός παράθλασης χαρακτηρίζεται από μία χωρική κατανομή του ΗΜ πεδίου και από έναν συντελεστή σκέδασης (scattering, S, parameter). Τέλος, οι ρυθμοί παράθλασης έχουν ο καθένας μία “τάξη” (order) και χωρίζονται σε δύο πολώσεις, εγκάρσια ηλεκτρική (transverse electric, TE) και εγκάρσια μαγνητική (transverse magnetic, TM), όπου το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης, αντίστοιχα.

Την θεωρία Floquet την εφαρμόζουμε παρακάτω στην μελέτη ενός μοναδιαίου κελιού ή ενός υπερκελιού, τα οποία έχουν άπειρη περιοδική επανάληψη. Στην περίπτωση όμως ενός πεπερασμένου ανοίγματος μεταεπιφάνειας, όπου τα κελιά είναι εν δυνάμει διαφορετικά χωρίς κάποια συμμετρία ή περιοδικότητα, χρειαζόμαστε άλλα εργαλεία για τον υπολογισμό της απόκρισης.

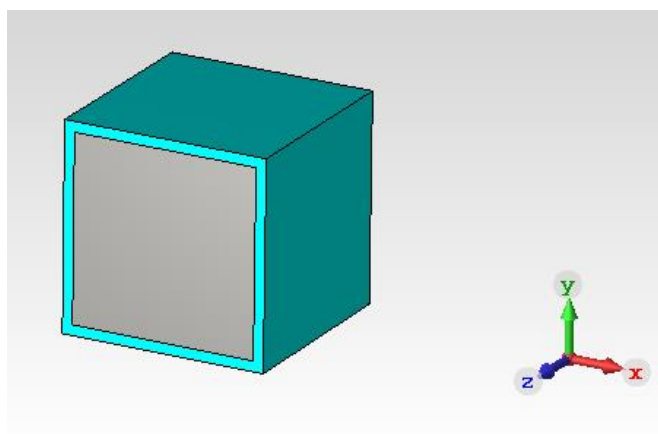
Τα εργαλεία αυτά είναι η γεωμετρική και η κυματική οπτική. Η γεωμετρική οπτική, ή αλλιώς ακτινική θεωρία, μελετάει τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υπό μορφή ακτίνων, που η κάθε μία προσομοιάζει τοπικά ένα επίπεδο κύμα συγκεκριμένης κατεύθυνσης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της ακτινικής θεωρίας είναι η προσέγγιση υψηλών συχνοτήτων, που απαιτεί πως οι γεωμετρικές διαστάσεις του χώρου που αλληλοεπιδρά με τις ακτίνες είναι πάντα πολύ μεγαλύτερες του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή, όλη η διάδοση μπορεί να συμπυκνωθεί σε τρεις φυσικές διεργασίες: ευθύγραμμη διάδοση (εντός ομογενούς μέσου) και ανάκλαση ή/και διάθλαση από διεπιφάνεια δύο διαφορετικών υλικών. Η κυματική οπτική (wave optics or physical optics) επεκτείνει την γεωμετρική οπτική στην περίπτωση των διατάξεων που είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος, και μπορεί να λαμβάνει σωστά τα φαινόμενα περίθλασης που, π.χ., προκύπτουν από τα όρια μιας πεπερασμένου ανοίγματος μεταεπιφάνειας. Το πιο βασικό εργαλείο της κυματικής οπτικής είναι η αρχή Huygens-Fresnel, που

λέει ότι σε κάθε συχνότητα, κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως μια δευτερεύουσα πηγή σφαιρικών κυμάτων. Με διάδοση όλων των επιμέρους σφαιρικών κυμάτων (το καθένα με, εν δυνάμει, διαφορετική φάση και/ή πλάτος) και επαλληλία για τη συμβολή τους, μπορεί να υπολογιστεί η συνολική απόκριση μίας μεταεπιφάνειας ή, γενικότερα, ενός σκεδαστή. Μόνη προϋπόθεση για την εφαρμογή αυτής της αρχής είναι τα κύματα να είναι χρονικά σύμφωνα (ίδια συχνότητα και πόλωση) και χωρικά σύμφωνα (τα μέτωπα κύματος να έχουν γενικά μεγάλη καμπυλότητα σε σχέση με το μήκος κύματος).

2.1 Θεωρία Floquet Σε επίπεδο μοναδιαίου κελιού

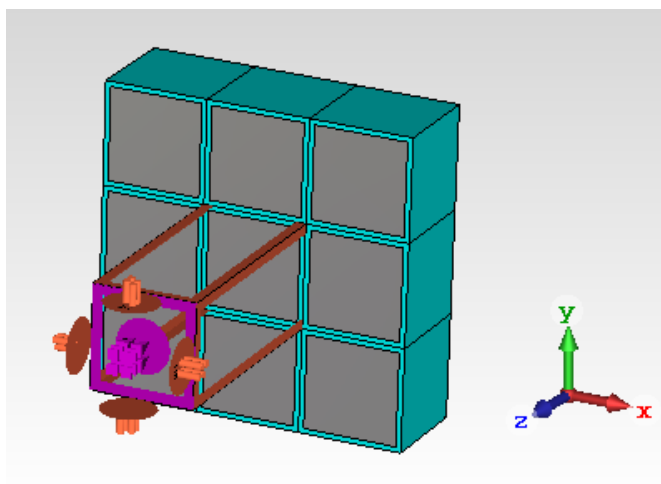
Η θεωρία Floquet είναι ένα σημαντικό μαθηματικό εργαλείο ιδιαίτερα χρήσιμο στην κατανόηση και στην ανάλυση της συμπεριφοράς περιοδικών διατάξεων. Στην περίπτωση ενός μοναδιαίου κελιού (με διαστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος), η θεωρία Floquet μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση του πώς η διάταξη αυτή αλληλοεπιδρά με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Τα μεταλλικά συνήθως εμφανίζουν συντονισμούς, δηλαδή εμφανίζουν έντονη απόκριση (π.χ. μέγιστη απορρόφηση ή πλήρη ανάκλαση), αλλά μόνο σε συγκεκριμένες συχνότητες ή γωνίες πρόσπτωσης. Για να έχουμε τον απαιτούμενο συντονισμό ενός μοναδιαίου κελιού βασίζομαστε κυρίως στη δομή, το μέγεθος και τις ΗΜ ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται η μεταεπιφάνεια. Το μέγεθος το οποίο θα πρέπει να έχει η μεταεπιφάνεια εξαρτάται κυρίως από την συχνότητα που θέλουμε να ασχοληθούμε. Συνήθως το μέγεθος ενός κελιού είναι μικρότερο από το $1/4$ έως $1/10$ του μήκους κύματος της συχνότητας, με τον περιορισμό βέβαια η κατασκευή του να είναι εφικτή με την χρήση της διαθέσιμης τεχνολογίας. Όταν το κελί έχει διαστάσεις μικρότερες του λ , τότε ο υποστηριζόμενος ρυθμός παράθλασης του μοναδιαίου κελιού θα είναι μόνο μηδενικής τάξης, σε καθεμία από τις δύο πολώσεις (TE και TM). Επιπλέον παράγοντες που παίζουν βασικό ρόλο για τον συντονισμό μίας μεταεπιφάνειας είναι η γωνία πρόσπτωσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς και η πόλωση του. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που επιζητούμε μια τέλεια απορρόφηση του προσπίπτοντος κύματος πρέπει η αντίσταση εισόδου της μεταεπιφάνειας (ή επιφανειακή αντίσταση) να είναι προσαρμοσμένη στην κυματική αντίσταση του ελεύθερου χώρου, δηλαδή να ταυτίζεται με αυτήν σε μέτρο και φάση. Συνεπώς μια αλλαγή της προσπίπτουσας πόλωσης ή της γωνίας πρόσπτωσης αλλάζει και την εν λόγω κυματική αντίσταση.



Σχήμα 2.1: Μοναδιαίο κελί σχεδιασμένο στο CST STUDIO SUITE

Η σχεδίαση ενός μοναδιαίου κελιού εξαρτάται από την λειτουργία που επιθυμούμε να κάνει. Στην παρούσα εργασία τα μοναδιαία κελιά που μελετάμε είναι κατά κύριο λόγο ορθογώνια και έχουν για μεταλλικά καλύμματα (patches) επάνω σε γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα. Ένα απλό ορθογώνιο κελί το παρατηρούμε στο **Σχήμα 2.1**. Στο **Σχήμα 2.2** παρατηρούμε την περιοδική επανάληψη του κελιού που προέρχεται από την επιβολή της θεωρίας Floquet. Στις τέσσερις πλευρικές έδρες έχουμε περιοδικές συνθήκες (π.χ., επιβολή συνέχειας στην αριστερή και τη δεξιά έδρα, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης) ενώ στην πάνω και κάτω έδρα (φαίνεται μόνο η πάνω), που έχει μωβ χρώμα, είναι οι θύρες Floquet. Σε αντιστοιχία με τα ηλεκτρικά δίκτυα υψηλών συχνοτήτων σε καθεμία από τις δύο θύρες Floquet υπάρχουν δύο πολώσεις (TE και TM), και μπορούμε να έχουμε προσπίπτοντα σε οποιαδήποτε από αυτές, που γενικά θα προκαλεί σκεδαζόμενα κύματα σε όλες τις θύρες και στις δύο πολώσεις. Επίλυση του προβλήματος για συγκεκριμένη διέγερση (πρόσπτωση) οδηγεί στον υπολογισμό του συντελεστή σκέδασης του κελιού. Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 2.2**, αν έχουμε πρόσπτωση (διέγερση) μόνο από την πάνω θύρα στην TE πόλωση, η επίλυση μας δίνει τον συντελεστή ανάκλασης (στην πάνω θύρα) και τον συντελεστή μετάδοσης (στην κάτω θύρα) και στις δύο πολώσεις (TE και TM). Σημειώνεται πως στην περίπτωση των κελιών με διαστάσεις μικρότερες του λ , έχουμε μόνο μηδενικής τάξης ρυθμούς, κάτι που σημαίνει πως η κατεύθυνση των ανακλώμενων και διαθλώμενων κυμάτων υπακούει τελικά στους νόμους του Snell



Σχήμα 2.2: Περιοδική δομή μοναδιαίου κελιού

2.2 Θεωρία Floquet Σε επίπεδο υπερκελίου

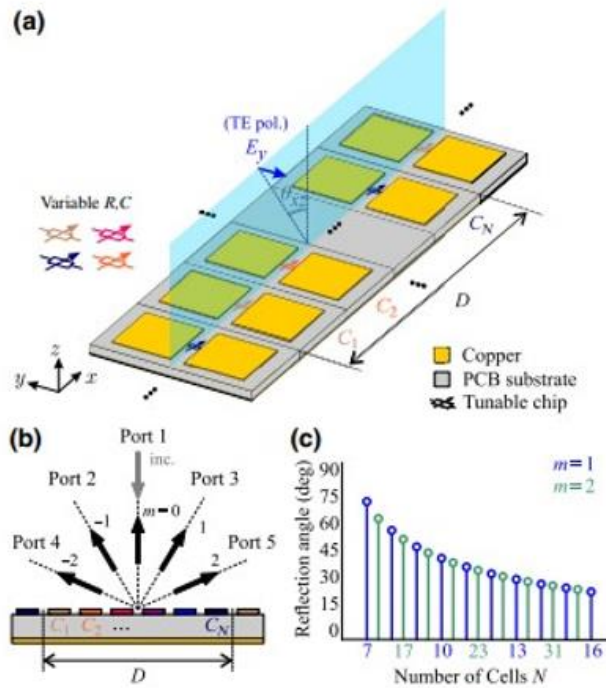
Η θεωρία Floquet μπορεί να εφαρμοστεί επίσης σε επίπεδο υπερ-κελίου, που αντιπροσωπεύει μια περιοδική δομή που επαναλαμβάνεται με περίοδο που είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της συχνότητας (λ). Με την έννοια υπερ-κελί (super-cell) αναφερόμαστε συνήθως στην ένωση πολλών μοναδιαίων κελιών τα οποία δημιουργούν ένα ενιαίο μεγαλύτερο κελί. Η χρήση των υπερ-κελιών σε μεταεπιφάνειες μπορεί να προσφέρει πρόσθετο βαθμό ελευθερίας στο σχεδιασμό των μεταεπιφανειών, επιτρέποντας τη δημιουργία πιο σύνθετων και πολύπλοκων δομών. Το υπερ-κελί λόγω της ένωσης πολλαπλών μοναδιαίων κελιών σε μία ενιαία δομή αποκτάει ένα μέγεθος το οποίο είναι μεγαλύτερο από μήκος κύματος της ακτινοβολίας, αυτό θα μας οδηγήσει σε καινούριες λειτουργίες, όπως η ανακατεύθυνση μίας δέσμης (προσπίπτοντως μετώπου κύματος). Στην περίπτωση αυτή υποστηρίζονται και άλλη ρυθμοί παράθλασης, τάξης μεγαλύτερης ή μικρότερης του μηδέν. Η μέγιστη τάξη των ρυθμών παράθλασης εξαρτάται από το μέγεθος της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος: όσο μεγαλύτερες οι διαστάσεις του υπερκελίου, τόσο περισσότεροι ρυθμοί θα υποστηρίζονται (τάξεις $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$). Επομένως ένα υπερ-κελί θα μας δίνει ανώτερης τάξης ρυθμούς παράθλασης σε σχέση με το μοναδιαίο κελί που έχει την δυνατότητα να παρέχει μόνο την μηδενικής τάξης παράθλαση. Σημειώνεται πως οι ρυθμοί παράθλασης έχουν γωνίες ανάκλασης ή διάθλασης που διαφοροποιούνται ανάλογα με το μέγεθος του υπερκελίου σε σχέση με το λ . Από το **Σχήμα 2.3** παρατηρούμε τις διάφορες θύρες παράθλασης-ανάκλασης καθώς και τις γωνίες ανάκλασης ανάλογα με τον αριθμό των μοναδιαίων κελιών που θα συνθέτουν το υπερ-κελί. Τα μεγέθη αυτά συμπεκνώνονται στην εξίσωση του διαφράγματος παράθλασης (diffraction grating equation) που, σε μία διάσταση, γράφεται:

$$\sin(\theta_{refl}) = \sin(\theta_{inc}) + m \frac{\lambda}{d},$$

όπου m είναι ο ακέραιος που ελέγχει την τάξη του ρυθμού παράθλασης και d είναι η διάσταση του υπερκελίου. Γνωρίζοντας τη γωνία πρόσπτωσης, και πως το ημίτονο δύναται να πάρει τιμές μόνο μεταξύ $[-1, +1]$, μπορούμε να υπολογίσουμε τα ζεύγη $\{\theta_{refl}, m\}$ που ικανοποιούν την εξίσωση. Εύκολα φαίνεται πως για κελιά με $d < \lambda$ μόνο η λύση $m=0$ είναι αποδεκτή

Με την επίτευξη της ανώμαλης ανάκλασης και τον προσεκτικό σχεδιασμό της διάταξης και των ιδιοτήτων των μοναδιαίων κελιών που συνθέτουν ένα υπερκελί, μπορεί να ελεγχθεί η φάση και το πλάτος των ανακλώμενων κυμάτων σε διαφορετικές συχνότητες και κατευθύνσεις. Αυτός ο έλεγχος επιτρέπει την ακριβή προσαρμογή των ιδιοτήτων ανάκλασης, επιτρέποντας λειτουργίες όπως η ανακατεύθυνση δέσμης ή η εστίαση δέσμης, και μάλιστα με εξάρτηση από την πόλωση.

Η ανώμαλη ανάκλαση αποτελεί ένα θεμελιώδη μηχανισμό που επεκτείνει την κανονική ανάκλαση και έχει εφαρμογές σε διάφορους τομείς όπως η οπτική, οι τηλεπικοινωνίες και η ανίχνευση. Για παράδειγμα, στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες ή στην τεχνολογία κεραιών, οι μεταεπιφάνειες με δυνατότητες ανώμαλης ανάκλασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό συμπαγών και αποδοτικών εξαρτημάτων όπως κάτοπτρα, φακοί, εκτροπείς δέσμης ή ολογράμματα.



Σχήμα 2.3: (α) Σχηματική απεικόνιση ενός υπερκελίου για την ανώμαλη ανακατεύθυνση μετώπου κύματος στο επίπεδο x - z . Τα διαφορετικά χρώματα των μοναδιαίων κελιών αντιπροσωπεύουν διαφορετικές ρυθμίσεις, π.χ., διαφορετική χωρητικότητα. (β) Αντιστοίχιση θυρών με τις τάξεις παράθλασης, για την ανάκλαση και για κάθετη πρόσπτωση. (γ) Διακριτό φάσμα γωνιών ανώμαλης ανακατεύθυνσης για διαφορετικούς αριθμούς μοναδιαίων κελιών σε κάθε υπερκελί, που εκμεταλλεύονται την πρώτη και την δεύτερη τάξη περίθλασης (υποθέτοντας κανονική πρόσπτωση).

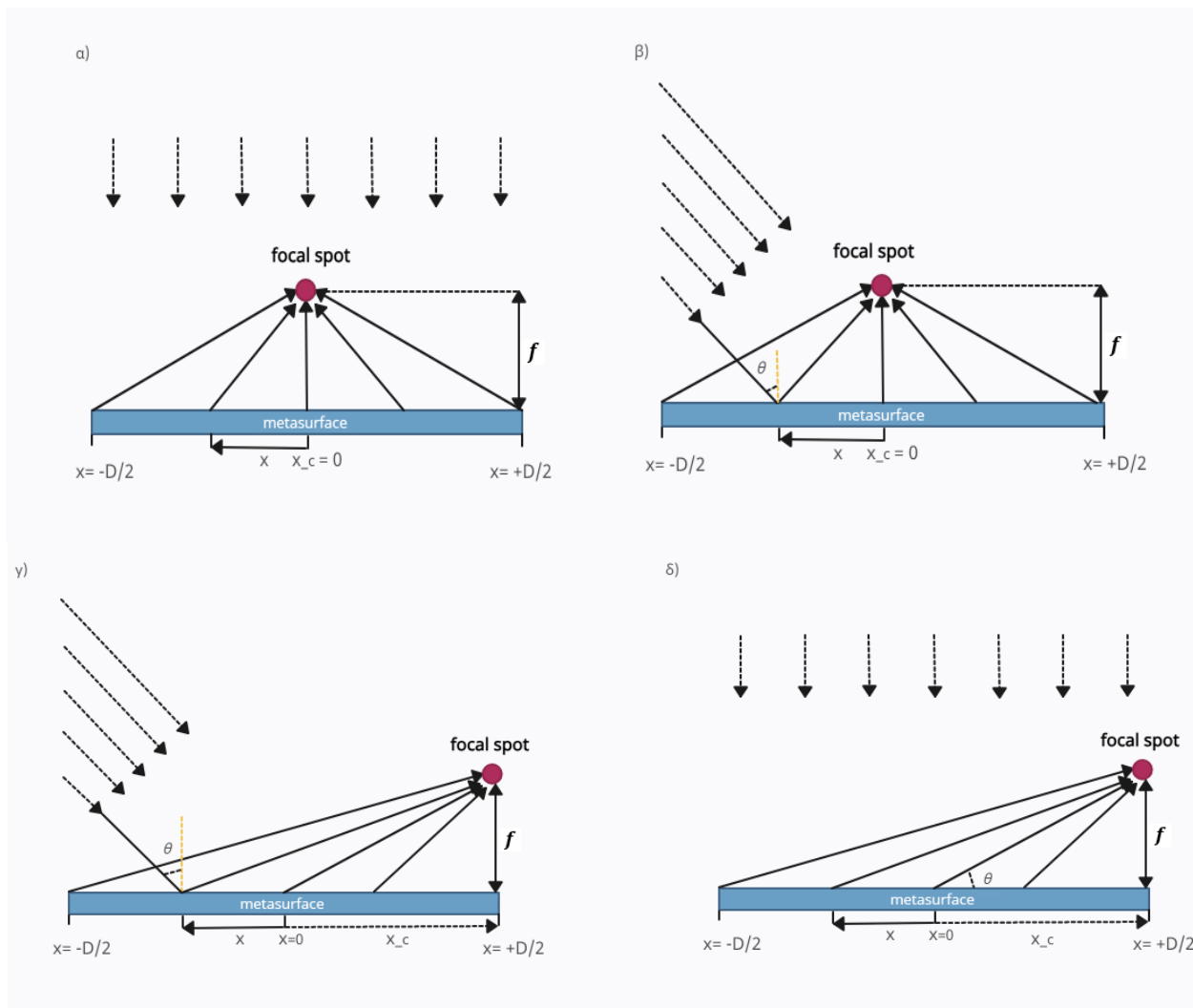
2.3 Ανάλυση σε επίπεδο πλήρους ανοίγματος

Οι μεταεπιφάνειες που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες αποτελούνται από περιοδικά επαναλαμβανόμενα μοναδιαία κελιά (μικρότερα ή μεγαλύτερα του λ) πάνω στα οποία μπορούσαμε να μελετήσουμε την διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος με την χρήση της θεωρίας Floquet. Υπάρχουν όμως μεταεπιφάνειες στις οποίες τα μοναδιαία κελιά είναι εν δυνάμει διαφορετικά χωρίς να έχουν κάποια συμμετρία και περιοδικότητα, ή μεταεπιφάνειες πεπερασμένου ανοίγματος, όπου “παύει” η άπειρη περιοδική επανάληψη. Σε αυτές τις περιπτώσεις για να μελετήσουμε την απόκριση της μεταεπιφάνειας ως προς το προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα θα χρειαστούμε την θεωρία της Γεωμετρικής Οπτικής και της Κυματικής Οπτικής.

- **Γεωμετρική Οπτική** ασχολείται κυρίως με την περιγραφή των περισσότερων φαινομένων που έχουν σχέση με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και με τις ποσοτικές σχέσεις αυτών χωρίς να υπεισέρχεται στην ερμηνεία της φύσεως αυτών των φαινομένων. Με βάση την ακτινική θεωρία το φως αποτελείται από ένα σύνολο ακτίνων που διαδίδονται ευθύγραμμα και εξηγεί τη διάδοση του φωτός και την αλληλεπίδρασή του με αντικείμενα διαστάσεων πολύ μεγαλύτερων του λ , χρησιμοποιώντας γεωμετρικές αρχές, όπως οι νόμοι της ανάκλασης και της διάθλασης.
- **Κυματική Οπτική** είναι μια θεωρία πάνω στη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που επικεντρώνεται στις κυματικές ιδιότητές του, αντίθετα με τη γεωμετρική οπτική που βασίζεται στη γεωμετρία της αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με διάφορα μέσα. Η κυματική οπτική χρησιμοποιεί τις εξισώσεις του Maxwell, συνήθως με μικρές μόνο απλοποιήσεις, για να μοντελοποιήσει την εξάπλωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, καθώς και τις αλληλεπιδράσεις τους με αντικείμενα που είναι μεγαλύτερα (αλλά όχι πολύ) σε σχέση με το μήκος κύματος ή έχουν ανομοιογένεια στο άνοιγμα τους. Ένα βασικό εργαλείο της κυματικής οπτικής είναι η αρχή Huygens-Fresnel, η οποία αναφέρει ότι κάθε σημείο μετώπου κύματος μπορεί να θεωρηθεί σαν σημειακή πηγή δευτερεύουσας σφαιρικής διαταραχής. Η κάθε πηγή θεωρείται πως εκπέμπει σφαιρικό κύμα (σε όλες τις δυνατές κατευθύνσεις, ισοτροπικά) με τη δική της διαφορά φάσης και το δικό της πλάτος. Η υπέρθεση (συμβολή) όλων των δευτερεύουσων πηγών οδηγεί στο υπολογισμό του σκεδαζόμενου μετώπου κύματος, στο μακρινό ή στο κοντινό πεδίο.

Οι ανομοιογενείς μ/ε πεπερασμένου ανοίγματος που θα μελετηθούν στην εργασία αυτή μπορεί να έχουν κελιά που διαφοροποιούνται ως προς το μέγεθος, την τοπολογία (π.χ. σχήμα μεταλλικού patch), τις ΗΜ ιδιότητες (π.χ. διηλεκτρική σταθερά υποστρώματος), ή οποιαδήποτε άλλη παράμετρο (π.χ. οι RC τιμές στα ελεγχόμενες). Φυσικά ορίζεται πάντα σαφώς η γεωμετρική τους διάταξη στον χώρο και μπορεί να υπολογιστεί η απόκριση (συντελεστής ανάκλασης) του κάθε κελιού μεμονωμένα.

Με τον κατάλληλο σχεδιασμό της γεωμετρίας, του μεγέθους, της διάταξης και επιλογής του κατάλληλου διηλεκτρικού οι μεταεπιφάνειες μπορούν να αλλάζουν τη φάση του προσπίπτοντος μετώπου κύματος σε όλη την επιφάνεια, επιτρέποντας την ανακατεύθυνση ή την εστίαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε επιθυμητό σημείο. Όταν ένα επίπεδο κύμα αλληλοεπιδρά με μια μεταεπιφάνεια σχεδιασμένη για εστίαση, η μεταεπιφάνεια μεταβάλλει την κατανομή φάσης του μετώπου κύματος, προκαλώντας εποικοδομητική παρεμβολή στο επιθυμητό σημείο εστίασης, ενώ καταστέλλει τις συνεισφορές από άλλες περιοχές. Αυτό οδηγεί στο σχηματισμό μιας εστιασμένης δέσμης που, στο εστιακό σημείο (focal point or focus), παρουσιάζει αυξημένη ένταση. Τονίζεται πως τέτοια λειτουργία, εστίασης δηλαδή, υλοποιείται τυπικά με παραβολικούς μεταλλικούς ανακλαστήρες (“πίατα”), π.χ., για λήψη από δορυφόρους γεωστατικής τροχιάς: Το μεταλλικό πιάτο αυξάνει την ενεργό επιφάνεια, άρα και το κέρδος, μιας απλής χοανοκεραίας που τοποθετείται στην εστία της παραβολής. Μία ελεγχόμενη μεταεπιφάνεια μπορεί να πετύχει το ίδιο αποτέλεσμα με επίπεδη διάταξη και επίσης να δώσει τη δυνατότητα του αναπρογραμματισμού ώστε, π.χ., να μπορεί να στοχεύει η κεραία σε έναν χαμηλής τροχιάς δορυφόρο (που κινείται στον ουρανό) χωρίς φυσική μετακίνηση της ίδιας της κεραίας.



Σχήμα 2.4: α) Επίπεδη μεταεπιφάνεια που κάνει εστίαση στον άξονα από κάθετη πρόσπτωση. β) Επίπεδη μεταεπιφάνεια που κάνει εστίαση στον άξονα από πλάγια πρόσπτωση. γ) Επίπεδη μεταεπιφάνεια που κάνει εστίαση εκτός άξονα από πλάγια πρόσπτωση. δ) Επίπεδη μεταεπιφάνεια που κάνει εστίαση εκτός άξονα από κάθετη πρόσπτωση.

Για τον υπολογισμό της επίπεδης μεταεπιφάνειας που θα κάνει εστίαση, θέλουμε πλήρη ανάκλαση αλλά με διαφορετική φάση σε κάθε σημείο, έτσι ώστε να υλοποιείται ένα συγκλίνων μέτωπο κύματος μετά την ανάκλαση. Με χρήση της γεωμετρικής οπτικής υπολογίζουμε τη φάση

ανάκλασης που απαιτείται ώστε μια τυχαία ακτίνα που προσπίπτει σε συγκεκριμένο σημείο της μεταεπιφάνειας να καταλήξει με συγκεκριμένη φάση στην επιθυμητή εστία. Έτσι, για μια μονοδιάσταση μεταεπιφάνεια καταλήγουμε στην εξής εξίσωση:

$$\Phi_x = k_0 \sqrt{f^2 + (x_c + x)^2} + k_0 \left(x + \frac{D}{2}\right) \sin \theta + \Phi_x. \quad (2.1)$$

k_0 : ο κυματικός αριθμός ,

f : η κάθετη απόσταση του σημείου εστίασης από την επίπεδη μεταεπιφάνεια,

D : η διάμετρος της μεταεπιφάνειας,

x_c : η εγκάρσια απόσταση της εστίας από τον άξονα (κέντρο) της μεταεπιφάνειας,

x : το τυχαίο σημείο της μεταεπιφάνειας στο οποίο προσπίπτει μία ακτίνα από το μέτωπο κύματος,

θ : η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας στην μεταεπιφάνεια. Θεωρούμε επίπεδο προσπίπτον κύμα άρα η θ είναι η ίδια σε όλα τα x .

Φ_0 : φάση αναφοράς, που μπορεί να οριστεί αυθαίρετα, συνήθως έτσι ώστε $\Phi(0) = 0$

Έτσι, με αναφορά φάσης το κέντρο της μεταεπιφάνειας ($x = 0$) έχουμε προφίλ φάσης

$$\Delta\Phi(x) = k_0 \sqrt{f^2 + x_c^2} - k_0 \sqrt{f^2 + (x_c + x)^2} - k_0 x \sin \theta. \quad (2.2)$$

Για κάθετη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας στην μεταεπιφάνεια ($x_c = 0, \theta = 0$):

$$\Delta\Phi_0(x) = k_0 (f - \sqrt{f^2 + x_c^2}), \quad (2.3)$$

Για κύμα πλάγιας πρόσπτωσης και αναφορά φάσης το κέντρο της μεταεπιφάνειας ($x_c = 0, \theta \neq 0$):

$$\Delta\Phi(x) = \Delta\Phi_0(x) - k_0 x \sin \theta. \quad (2.4)$$

Για παράδειγμα στην απλή περίπτωση που έχουμε κάθετη πρόσπτωση κύματος και επιδιώκουμε να κάνουμε εστίαση στο άξονα της μεταεπιφάνειας πρέπει όλες οι ακτίνες που ανακλώνται από την μεταεπιφάνεια (ανεξαρτήτως θέσης) να φτάσουν στο εστιακό σημείο με την ίδια ακριβώς φάση. Η φάση της εστιαζόμενης ακτίνας προκύπτει από την εξής σχέση:

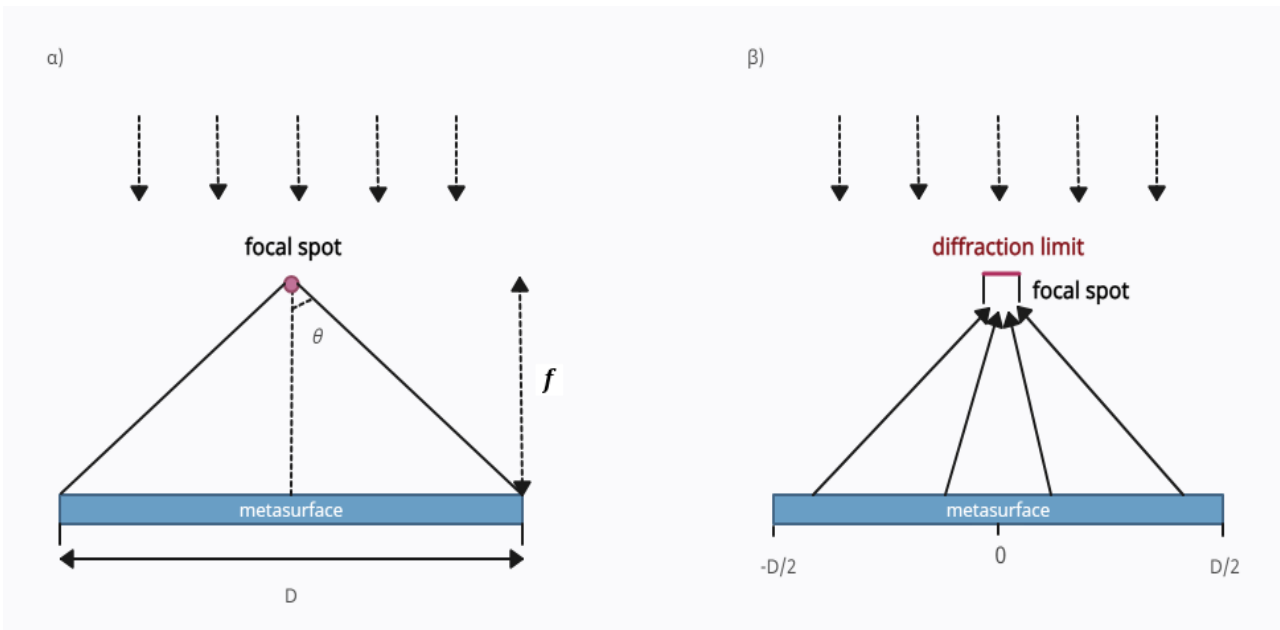
$$\Phi_x = k_0 f + k_0 \sqrt{f^2 + x^2} + \Phi_0. \quad (2.5)$$

Η κατανομή φάσης στην μεταεπιφάνεια φαίνεται "συνεχής" στο **Σχήμα 2.4**, αλλά (υπό παραδοχές) μπορούμε να την "δειγματοληπτίσουμε" στο κέντρο των κελιών, άρα να γίνει διακριτή, χωρίς να αλλάξει πολύ η τελική απόκριση, αρκεί τα κελιά να είναι μικρά σε σχέση με το μήκος κύματος. Έχοντας υπολογίσει με το απλό εργαλείο της γεωμετρικής οπτικής την κωδικοποίηση φάσης της μεταεπιφάνειας για εστίαση σε σημείο, μπορούμε στη συνέχεια με την κυματική οπτική να υπολογίσουμε το μέγεθος σημείου (spot size) δηλαδή πόσο καλά εστιασμένη είναι η δέσμη. Γνωρίζουμε πως το μέγεθος σημείου είναι γενικά αντιστρόφως ανάλογο της διαμέτρου του ανοίγματος, και η οριακή τιμή του δίνεται από το όριο παράθλασης (diffraction limit) που ορίζεται ως

$$d_{spot} = \frac{\lambda}{2 NA}. \quad (2.6)$$

Στην παραπάνω σχέση, NA είναι το αριθμητικό άνοιγμα (numerical aperture) του συστήματος εστίασης, βλέπε **Σχήμα 2.5(β)**, και σχετίζεται με τη γωνία του “κώνου αποδοχής” του συστήματος, άρα με τη διάμετρό του και την εστιακή απόσταση. Από το σχήμα, με χρήση τριγωνομετρίας, προκύπτει το αριθμητικό άνοιγμα ενός φακού με δεδομένη εστιακή απόσταση και διάμετρο:

$$NA = \sin\theta = \frac{0.5D}{\sqrt{f^2+(0.5D)^2}} \quad (2.7)$$



Σχήμα 2.5: (α) Αριστερά φαίνεται ένα απλοποιημένο σύστημα εστίασης διαμέτρου D και εστιακής απόστασης f . Δουλειά του είναι να δέχεται ένα επίπεδο κύμα και να το εστιάζει. (β) Δεξιά φαίνεται μια σχηματική απεικόνιση της εστίασης υπό τις αρχές της κυματικής οπτικής που προβλέπουν πως η συγκέντρωση του πεδίου στο εστιακό σημείο είναι πεπερασμένης διαμέτρου d_{spot} , όπως δίνεται από τη σχέση $\frac{\lambda}{2 NA}$

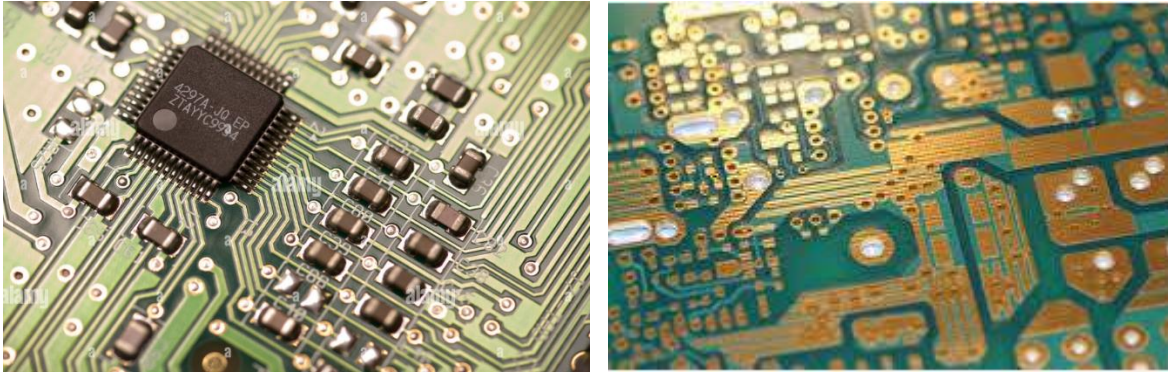
Κεφάλαιο 3: Στατικές μεταεπιφάνιες στη PCB τεχνολογία

3.1 PCB τεχνολογία

Η τεχνολογία των τυπωμένων επίπεδων κυκλωμάτων ή «πλακετών» (Printed Circuit Board, PCB) αποτελεί θεμέλιο λίθο στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα, καθώς επιτρέπει τη σύνδεση και τον έλεγχο των διαφορετικών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που υπάρχουν σε ένα ηλεκτρονικό σύνθετο κύκλωμα. Η ίδια τεχνολογία χρησιμοποιείται ουσιαστικά και στα «μονολιθικά» ολοκληρωμένα μικροκυματικά κυκλώματα (monolithic microwave integrated circuits, MMIC). Συνεπώς η τεχνολογία PCB είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη λειτουργία και την εξέλιξη των μεταεπιφανειών που λειτουργούν σε συχνότητες μέχρι και τα μικροκύματα και τα χιλιοστομετρικά, καθώς και γενικότερα των σύγχρονων ηλεκτρονικών συστημάτων. Ορισμένες βασικές πτυχές της χρήσης της τεχνολογίας PCB :

- Η πλακέτα PCB είναι ένα λεπτό φύλλο μονωτικού υλικού που έχει μεταλλικούς αγωγούς στην μία επιφάνειά του, ενώ η άλλη επιφάνεια είναι πλήρως επιμεταλλωμένη (metal backplane). Αυτοί οι αγωγοί χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των διαφορετικών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, διακόπτες και ηλεκτρονικές ενώσεις που απαρτίζουν το τυπωμένο κύκλωμα. Στις υψηλές συχνότητες, οι μεταλλικοί αγωγοί συμπεριφέρονται ως ανοιχτοί επίπεδοι κυματοδηγοί (π.χ. τύπου μικροταινίας [microstrip]) οπότε τα «ηλεκτρικά» τους μήκη, έχουν μεγάλη σημασία.
- Τα διάφορα διακριτά ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι συγκολλημένα στην πλακέτα PCB, επιτρέποντας στους μεταλλικούς συνδέσμους κάθε εξαρτήματος να συνδεθούν στους αγωγούς της πλακέτας. Με αυτόν το τρόπο δημιουργείται ένα κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα που επιτρέπει τα ηλεκτρικά σήματα να «διατρέχουν» τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και να επιτελούν τη συγκεκριμένη λειτουργία τους.
- Η τεχνολογία PCB επιτρέπει τη κατασκευή πολυστρωματικών δομών. Με την έννοια πολυστρωματικών δομών αναφερόμαστε στην ένωση πολλαπλών στρωμάτων από διαμορφωμένα αγωγή και διηλεκτρικά υλικά, η οποία μπορεί να είναι επωφελής, εκτός από σύνθετα MMIC, και για σχεδίαση μεταεπιφανειών που απαιτούν πολύπλοκες τρισδιάστατες διαμορφώσεις.
- Τα τυπωμένα κυκλώματα σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο λογισμικό, το οποίο μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε ένα λεπτομερές σχέδιο της πλακέτας PCB και των εξαρτημάτων που θα χρησιμοποιηθούν. Αυτός ο σχεδιασμός χρησιμοποιείται για τη κατασκευή της πλακέτας PCB που γίνεται με τεχνικές χημικής, μηχανικής ή οπτικής (με χρήση laser) χάραξης.

Συνοπτικά, η πλακέτα PCB είναι μία βάση από αγωγίμα και διηλεκτρικά υλικά που επιτρέπει τη σύνδεση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ενός συστήματος για τη δημιουργία ενός κλειστού ηλεκτρικού κυκλώματος που εκτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία.



Σχήμα 3.1 : Πλακέτες κυκλωμάτων PCB τεχνολογίας, όπου με κίτρινο ή χρυσαφί χρώμα φαίνονται οι συνήθως χάλκινοι αγωγιμοί «δρόμοι» που συνδέουν τα διάφορα διακριτά εξαρτήματα του κυκλώματος. Στην φωτογραφία στα αριστερά διακρίνονται περίπου 15 συγκεντρωμένα φορτία (αντιστάσεις ή πυκνωτές) δύο ακροδεκτών, και ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (integrated circuit, IC) «τσιπ», με περίπου δέκα ηλεκτρικές επαφές σε καθεμία από τις τέσσερις πλευρές τους. Στη φωτογραφία στα δεξιά παρατηρούμε αρκετές τρύπες (μικροί μαύροι κύκλοι) που είναι “vias”, δηλαδή κοίλοι κύλινδροι με εσωτερική επιμετάλλωση, που συνδέουν ηλεκτρικά δύο σημεία σε διαφορετικά επίπεδα (στρώματα) ή πλευρές ενός σύνθετου πολύ-επίπεδου PCB.

Όπως είχαμε προαναφερθεί οι ελεγχόμενες μεταεπιφάνειες είναι σε θέση να εκτελούν πολλαπλές ρυθμιζόμενες λειτουργίες, με την επιθυμητή απόκριση να ελέγχεται από έναν υπολογιστή που επηρεάζει τις επιμέρους ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες κάθε μοναδιαίου κελιού της μεταεπιφάνειας. Ο έλεγχος αυτός είναι εφικτός με τη βοήθεια της τεχνολογία τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB). Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί η τεχνολογία PCB για την υλοποίηση μεταεπιφανειών:

- Τεχνικές κατασκευής τυπωμένων κυκλωμάτων: Οι τεχνικές κατασκευής PCB μπορούν να προσαρμοστούν για τη δημιουργία πολύπλοκων μοτίβων αγωγίμων γραμμών ή «αχνών» (traces) σε διηλεκτρικά υποστρώματα. Αυτά τα μοτίβα μπορούν να σχεδιαστούν για να σχηματίσουν την επιθυμητή δομή της μεταεπιφάνειας. Τεχνικές όπως η φωτολιθογραφία, η χάραξη και η εκτύπωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν τις γεωμετρικές διαστάσεις των μεταεπιφανειών στην πλακέτα.
- Ολοκλήρωση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων: Η τεχνολογία PCB επιτρέπει την ενσωμάτωση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και κυκλωμάτων στη μεταεπιφάνεια. Με την χρήση ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων όπως IC (chip) ή διόδους μεταβλητής χωρητικότητας (variable capacitor, varactor) έχουμε την δυνατότητα να επηρεάσουμε τις επιμέρους ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες κάθε μοναδιαίου κελιού της μεταεπιφάνειας στην υψηλή συχνότητα.

- Συνδυασμός διηλεκτρικών και αγώγιμων υλικών: Με την δυνατότητα της ένωσης μιας πλακέτας PCB με διηλεκτρικά και αγώγιμα υλικά επιτρέπει τις μεταεπιφάνειες με την κατάλληλη επιλογή του διηλεκτρικού τα επιτύχουν λειτουργίες όπως συντονισμό, διαμόρφωση της φάσης του κύματος καθώς και έλεγχο της πόλωσης.
- Έλεγχος της μεταεπιφάνειας: Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της χρήσης PCB τεχνολογίας είναι ότι μας δίνει την δυνατότητα τοποθέτησης αισθητήρων καθώς και διαφόρων ειδών μικροσίπ ελέγχου στην πλακέτα, με αποτέλεσμα να μπορούμε να έχουμε την εποπτεία καθώς και τον χειρισμό της μεταεπιφάνειας μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

3.2 Συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης από μια συστοιχία μεταλλικών ταινιών

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε μεταεπιφάνειες που αποτελούνται από μεταλλικές ταινίες, τετραγωνικά καλύμματα (patches) ή πλέγματα (grid) πάνω σε διηλεκτρικό υπόστρωμα, με/χωρίς επιμετάλλωση στο πίσω μέρος (metallic backplane, ground plane) [1]. Η μελέτη βασίστηκε σε θεωρητικά μοντέλα γραμμής μεταφοράς (transmission line model, TLM), που καλύπτουν και τις δύο πιθανές πολώσεις του προσπίπτοντος κύματος, δηλαδή κάθετη (TE) και παράλληλη (TM) στο επίπεδο της πρόσπτωσης, όπως και την περίπτωση της πλάγιας πρόσπτωσης (oblique incidence).



Σχήμα 3.3 : α) Πλέγμα από αγώγιμες ταινίες σε ελεύθερο χώρο β) συστοιχία από patches σε ελεύθερο χώρο. Δηλαδή, με γκρι χρώμα εννοείται ο ηλεκτρικός αγωγός και με λευκό ο κενός χώρος (συνήθως αέρας αλλά μπορεί και άλλο ομογενές διηλεκτρικό). Οι διατάξεις αυτές είναι περιοδικές προς τις δύο εγκάρσιες κατευθύνσεις και για αυτό αρκεί η μελέτη μόνο ενός «μοναδιαίου κελιού» (unit cell) τους.

Ξεκινάμε με επίπεδες περιοδικές συστοιχίες από πεπερασμένες μακριές μεταλλικές ταινίες κατά μήκος των αξόνων x και y όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.3(α)**. Στην περίπτωση που το κελί είναι τετραγωνικό και διαμέτρου αρκετά μικρότερης του μήκους κύματος ($D \ll \lambda$), τότε η δομή μπορεί να θεωρηθεί ιστροπική και έτσι η ηλεκτρομαγνητική της απόκριση να εξαρτάται λιγότερο από την επιλογή του επιπέδου πρόσπτωσης. Πλέγμα με $w \ll D$, όπου w είναι το πλάτος των μεταλλικών λωρίδων, μπορεί να θεωρηθεί ως πλέγμα μεταλλικών ταινιών με ιδανικές επαφές μεταξύ των διασταυρούμενων ταινιών. Υποθέτουμε πρόσπτωση του κύματος στο xz επίπεδο, όταν το ηλεκτρικό πεδίο έχει μια μη μηδενική x ή y συνιστώσα (παράλληλη με τις ταινίες), η απόκριση του πλέγματος είναι επαγωγική σε χαμηλές συχνότητες. Η απόκριση μπορεί να χαρακτηριστεί από την σύνθετη αντίσταση Z_g , η οποία συνδέει τη μέση εφαπτομενική συνιστώσα του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου στο xy επίπεδο \widehat{E}_x^{tot} ή \widehat{E}_y^{tot} με την μέση επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος \widehat{J} που προκαλείται από το προσπίπτον επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα και ρέει κατά μήκος των ταινιών. Για την TE πόλωση: $\widehat{E}_y^{tot} = Z_g^{TE} \widehat{J}_y$ όπου Z_g^{TE} είναι η σύνθετη αντίσταση για το TE πολωμένο προσπίπτον κύμα και \widehat{J}_y είναι η μέση πυκνότητα επιφανειακού ρεύματος κατά μήκος του άξονα y . Οι μέσες οριακές συνθήκες για αυτά τα πλέγματα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [2]:

$$\widehat{E}_x^{tot} = j \frac{h_{eff}}{2} \alpha \left[\widehat{J}_x + \frac{1}{k_{eff}^2 (1 + \frac{b}{D})} \frac{b}{D} \frac{\theta^2}{\theta_x^2} \widehat{J}_x \right], \quad (3.1)$$

$$\widehat{E}_y^{tot} = j \frac{h_{eff}}{2} \alpha \widehat{J}_y, \quad (3.2)$$

για TM και TE πολωμένα προσπίπτοντα πεδία, αντίστοιχα. Στους παραπάνω τύπους b και D είναι οι περίοδοι της δομής κατά μήκος του άξονα x και y , αντίστοιχα, $\eta_{eff} = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0 \epsilon_{eff}}$ είναι η κυματική αντίσταση του «ομογενοποιημένου» μέσου με ϵ_{eff} να είναι η ενεργός (effective) σχετική διηλεκτρική σταθερά και α η λεγόμενη «παράμετρος του πλέγματος» (grid parameter)[2], ένας αδιάστατος αριθμός, συνήθως πραγματικός. Στην ιστροπική περίπτωση ισχύει $b = D$. Επιπλέον, $k_{eff} = k_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}$ είναι ο κυματικός αριθμός του διανύσματος του προσπίπτοντος κύματος στο μέσο υποδοχής και μ_0, ϵ_0, k_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα, η διηλεκτρική σταθερά και ο κυματικός αριθμός στον ελεύθερο χώρο, αντίστοιχα. Για την περίπτωση που το πλέγμα βρίσκεται στην διεπιφάνεια του αέρα (κενού) και ενός διηλεκτρικού υποστρώματος με σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$, η διηλεκτρική σταθερά του ισοδύναμου ομοιόμορφου μέσου μπορεί να προσεγγισθεί ως

$$\epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2}. \quad (3.3)$$

Η παράμετρος του πλέγματος α για μια ηλεκτρικά πυκνή $k_{eff} D \ll 2\pi$ συστοιχία από ιδανικά αγωγίμες ταινίες, στην ιστροπική περίπτωση, έχει ως εξής

$$\alpha = \frac{k_{eff} D}{\pi} \ln \left(\frac{1}{\sin \frac{\pi w}{2D}} \right), \quad (3.4)$$

όπου w είναι το πλάτος της λωρίδας. Για περιπτώσεις $w \ll D$, ο λογάριθμος στην σχέση (3.4) μπορεί να προσεγγιστεί ως $\ln \left(\frac{2D}{\pi w} \right)$, αφού $\sin \delta \approx \delta$ για $\delta \ll 1$.

Σύμφωνα με τις σχέσεις (3.1) και (3.2) αν αντικαταστήσουμε το $\frac{\partial}{\partial x}$ με $-jk_x$, όπου $k_x = k_0 \sin \theta$ (θ είναι η γωνία πρόσπτωσης και $k_y = 0$) να είναι η x συνιστώσα του διανύσματος του προσπίπτοντος κύματος στον ελεύθερο χώρο, τότε θα μας δώσουν τις αντιστάσεις πλέγματος (grid impedance) για TM και TE προσπίπτοντα πεδία:

$$Z_g^{TM} = j \frac{h_{eff}}{2} \alpha \left(1 - \frac{k_0^2 \sin^2 \theta}{k_{eff}^2} \right), \quad (3.5)$$

$$Z_g^{TE} = j \frac{h_{eff}}{2} \alpha. \quad (3.6)$$

Τώρα μπορούμε να εξάγουμε τη σύνθετη αντίσταση πλέγματος για τη συμπληρωματική (complementary) δομή **Σχήμα 3.3(β)**, δηλαδή των τετραγωνικών αγωγίμων patches στον αέρα (κενό). Για να βρούμε την σύνθετη αντίσταση της συμπληρωματικής δομής χρησιμοποιούμε την προσεγγιστική αρχή Babinet ([2],[3]) από την οποία προκύπτει, όσον αναφορά την σύνθετη αντίσταση, πως

$$Z_g^{TE} Z_{g'}^{TM} = \frac{h_{eff}^2}{4}, \quad (3.7)$$

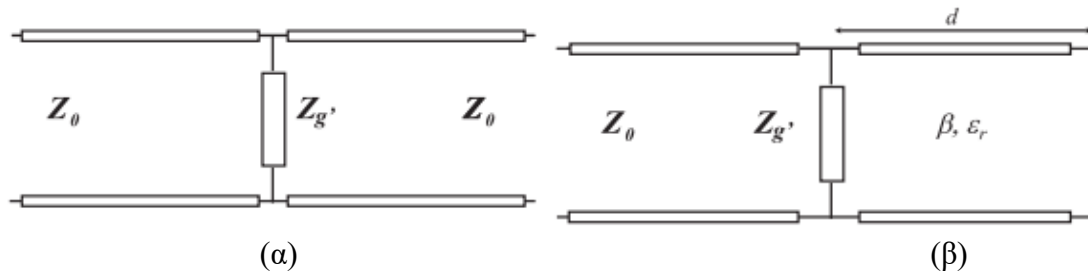
όπου $Z_{g'}^{TM}$ είναι η σύνθετη αντίσταση της συμπληρωματικής δομής για την περίπτωση πρόσπτωσης TM-πόλωσης. Ομοίως, η σύνθετη αντίσταση της συμπληρωματικής δομής για την περίπτωση πρόσπτωσης TE-πόλωσης προκύπτει μέσω της αρχής Babinet και της σύνθετης αντίστασης Z_g^{TM} δηλαδή

$$Z_{g'}^{TM} = -j \frac{h_{eff}}{2\alpha}, \quad (3.9)$$

$$Z_{g'}^{TE} = -j \frac{h_{eff}}{2\alpha \left(1 - \frac{k_0^2 \sin^2 \theta}{k_{eff}^2} \right)}. \quad (3.10)$$

Εάν το επίπεδο πρόσπτωσης για το πλέγμα των λωρίδων στο **Σχήμα 3.3(α)** για προσπίπτον κύμα TE-πόλωσης είναι το xz επίπεδο, τότε (σύμφωνα με την αρχή Babinet) για το πλέγμα των patches στο **Σχήμα 3.3(β)** για προσπίπτον πεδίο TE πόλωσης το επίπεδο πρόσπτωσης είναι το yz επίπεδο. Έχουμε πλέον εξάγει κλειστές σχέσεις για τον υπολογισμό των αντιστάσεων πλέγματος, και για τις δύο δομές (ταινίες ή patches) και για τις δύο πολώσεις (TE ή TM), που εξαρτώνται από τις γεωμετρικές διαστάσεις, τις ΗΜ ιδιότητες του υποστρώματος και φυσικά το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που θεωρούμε πως προσπίπτει πάνω σε αυτές τις μεταεπιφάνειες.

3.3 Συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης από μια συστοιχία τετράγωνων μεταλλικών καλυμμάτων (patches)



Σχήμα 3.4: (α) Το ισοδύναμο μοντέλο γραμμής μεταφοράς (TLM) για ένα πλέγμα λεπτών ταινιών ή για μια συστοιχία από τετράγωνα μεταλλικά patches σε ελεύθερο χώρο, όπου η κυματική αντίσταση είναι αυτή του κενού, που λαμβάνει την τιμή $Z_0 \approx 377 \Omega$ (σταθερά) για κάθετη πρόσπτωση, ενώ για πλάγια πρόσπτωση εξαρτάται και από τη γωνία και από την πόλωση. (β) Το ισοδύναμο μοντέλο γραμμής μεταφοράς όταν η προηγούμενη διάταξη (πλέγμα ταινιών ή patches) δεν είναι στο κενό αλλά από την μία της πλευρά είναι σε επαφή με μια διηλεκτρική πλάκα με δεδομένο πάχος και διηλεκτρική σταθερά και με επιμετάλλωση στο πίσω μέρος της (γείωση).

Ξεκινάμε από τη μελέτη μίας μεταλλικής μεταεπιφάνειας στον αέρα, δηλαδή χωρίς διηλεκτρικό υπόστρωμα. Στο **Σχήμα 3.4(α)** φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή ανάκλασης και μετάδοσης μίας τέτοιας διάταξης, εφόσον γνωρίζουμε τη σύνθετη αντίσταση Z_g που χαρακτηρίζει τη μεταεπιφάνεια, ανάλογα με τον τύπο (λεπτές ταινίες ή φαρδιά patches) και την πόλωση. Τελικά, υπολογίζοντας τη σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} της μεταεπιφάνειας (μαζί με το διηλεκτρικό υπόστρωμα και τη γείωση, όπου υπάρχει) μπορούμε να υπολογίσουμε τον μιγαδικό συντελεστή ανάκλασης της συνολικής διάταξης

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (3.11)$$

Το κυκλωματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε λαμβάνει υπόψη και την γωνία αλλά και την πόλωση του προσπίπτοντος, δηλαδή κάθετη ή παράλληλη στο επίπεδο πρόσπτωσης, που στην αγγλική βιβλιογραφία αναφέρονται ως TE (transverse electric) και TM (transverse magnetic), αντίστοιχα. Οι σύνθετες αντιστάσεις ελεύθερου χώρου Z_0 του κυκλωματικού μοντέλου για τις λειτουργίες πολώσεις TE και TM δίνονται για διαφορετικές γωνίες σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης ως:

$$Z_0^{TE} = \frac{\eta_0}{\cos\theta}, \quad (3.12)$$

$$\mathbf{Z}_0^{TM} = \eta_0 \cos\theta, \quad (3.13)$$

όπου η_0 είναι η κυματική αντίσταση του επίπεδου κύματος στον ελεύθερο χώρο (377Ω). Παρατηρούμε πως για κάθετη πρόσπτωση (normal incidence), $\theta = 0$, οι αντιστάσεις ταυτίζονται για τις δύο πολώσεις, ενώ διαφοροποιούνται για $\theta > 0$. Η σύνθετη αντίσταση των patches για τις TE και TM πολώσεις είναι, αντίστοιχα,

$$\mathbf{Z}_g^{TE} = -j \cdot \frac{\eta_0}{2a \left(1 - \frac{\sin^2\theta}{2}\right)}, \quad (3.14)$$

$$\mathbf{Z}_g^{TM} = -j \cdot \frac{\eta_0}{2a}. \quad (3.15)$$

Για τη διάταξη του φαίνεται στο **Σχήμα 3.4(α)**, υποθέτοντας προσαρμογή (matching) δεξιά από τη μεταεπιφάνεια, δηλαδή πως δεν πρόκειται να υπάρχει ποτέ κύμα που να διαδίδεται από τα δεξιά προς τα αριστερά της διάταξης, συμπεραίνουμε ότι η συνολική αντίσταση εισόδου προκύπτει απλά από την παράλληλη σύνδεση της σύνθετης αντίστασης του πλέγματος Z_g και της κυματικής αντίστασης του κενού χώρου (ανάλογα με την γωνία και την πόλωση) δεξιά αυτής Z_0 :

$$\mathbf{Z}_{in}^{-1} = \mathbf{Z}_g^{-1} + \mathbf{Z}_0^{-1}. \quad (3.16)$$

Σύμφωνα με τις προβλέψεις ενός άλλου αναλυτικού μοντέλου, των Holloway, Mohammed και Kuester [4], που αναπτύχθηκε για συστοιχία φαρυδιών τετραγωνικών ‘patches’ με περίοδο D , η γωνιακή εξάρτηση της σύνθετης αντίστασης στην περίπτωση της TE πόλωσης είναι διαφορετική από αυτήν της (3.14). Οι σύνθετες αντιστάσεις του πλέγματος προκύπτουν για αυτό το μοντέλο ίσες με

$$\mathbf{Z}_H^{TE, TM} = -j \cdot \frac{\eta_0}{2a}, \quad (3.17)$$

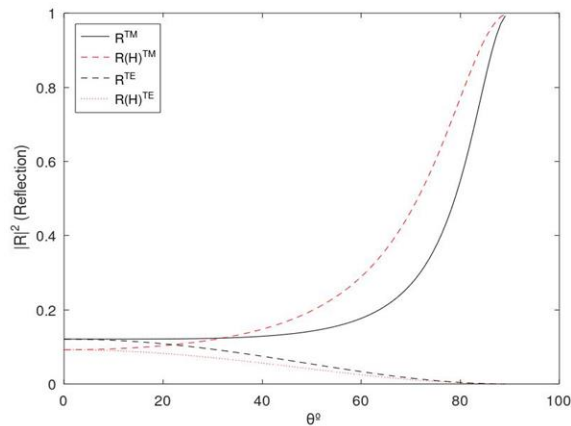
όπου η σταθερά πλέγματος είναι

$$\alpha = \kappa D \frac{0.51 \left(\frac{D-w}{D}\right)^3}{1 - 0.367 \left(\frac{D-w}{D}\right)^3}. \quad (3.18)$$

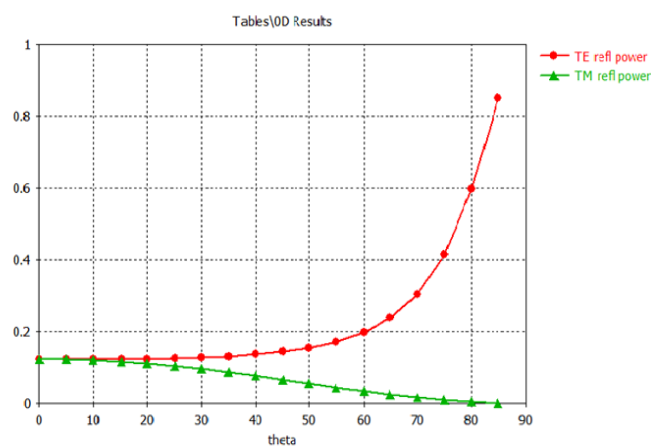
Ο δείκτης «H» που χρησιμοποιείται αναφέρεται από το αρχικό γράμμα του Holloway. Εκτός από τις διαφορετικές προσεγγίσεις για την παράμετρο του πλέγματος α , οι αναλυτικές εκφράσεις που παρουσιάζονται στις (3.14), (3.15) και (3.17) έχουν σαφώς διαφορετικές γωνιακές εξαρτήσεις. Προκειμένου να συγκριθεί η ακρίβεια των δύο μοντέλων εξετάζουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από το παρόν μοντέλο και από αυτό του C. L. Holloway et al.

Στο **Σχήμα 3.5** παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από το παρόν μοντέλο και από αυτό του C. L. Holloway et al. Σε όλες τις αριθμητικές προσομοιώσεις η περιοδικές δομές θεωρήθηκαν άπειρες. Οι συντελεστές ανάκλασης έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας το μοντέλο γραμμής μεταφοράς από το **Σχήμα 3.4(α)** με διαστάσεις $D = \frac{\lambda}{10}$ και $w = \frac{D}{10}$. Παρατηρούμε πως τα μοντέλα αποκλίνουν για πλάγια πρόσπτωση γωνίας $\theta > 10^\circ$. Σύμφωνα με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που βλέπουμε στο **Σχήμα 3.5** με αυτά από το **Σχήμα 3.6** που προέκυψαν από

υπολογιστικές προσομοιώσεις (CST STUDIO SUITE) διαπιστώνουμε ότι το παρόν αναλυτικό μοντέλο παρουσιάζει πολύ καλή συμφωνία με τα αριθμητικά αποτελέσματα, ενώ το μοντέλο του C. L. Holloway et al φαίνεται να είναι λιγότερο ακριβές.



Σχήμα 3.5: Ο συντελεστής ανάκλασης TE- και TM-πόλωσης σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης για μια σειρά από τετράγωνα μεταλλικά patches με αέρα εκατέρωθεν. Οι διαστάσεις του μοναδιαίου κελιού είναι οι εξής: $D = \frac{\lambda}{10}$ και $w = \frac{D}{10}$. Η R(H) αντιστοιχεί στα αποτελέσματα σύμφωνα με το μοντέλο των C. L. Holloway et al.



Σχήμα 3.6: Σε αυτό το σχήμα βλέπουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από υπολογιστικές προσομοιώσεις (CST STUDIO SUITE) και παρατηρούμε ότι το μοντέλο που μελετήσαμε είναι αρκετά πιο ακριβές, σε αντίθεση με το μοντέλο των C. L. Holloway et al. το οποίο φαίνεται λιγότερο ακριβές.

3.4 Επιφάνεια υψηλής αντίστασης που αποτελείται από μεταλλικές ταινίες

Οι δομές που μελετήθηκαν παραπάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σχεδίαση επιφανειών υψηλής αντίστασης (High Impedance Surfaces, HIS), που είναι το ισοδύναμο ενός ανοιχτού κυκλώματος (δηλαδή πρακτικά άπειρης αντίστασης) για κύματα ελευθέρου χώρου. Κατά μία πιο γενικευμένη έννοια, οι HIS μπορούν να σχεδιαστούν για πλήρη ανάκλαση, $|\Gamma| = 1$, και με οποιαδήποτε φάση στο διάστημα $[0, 2\pi]$. Θυμίζουμε πως το βραχυκύκλωμα (γείωση, π.χ., από μεταλλικό φύλλο) και το ανοιχτό κύκλωμα αντιστοιχούν, στα πλαίσια των γραμμών μεταφοράς υψηλών συχνοτήτων, στις δύο αντιδιαμετρικές τιμές του μιγαδικού συντελεστή ανάκλασης, δηλαδή $\Gamma = -1$ και $+1$.

Οι HIS που μελετώνται στην συγκεκριμένη ενότητα αποτελούνται από πλέγματα φαρδιών μεταλλικών ταινιών (που εμφανίζουν χωρητική ισοδύναμη απόκριση) σε διηλεκτρική πλάκα πάχους d με σχετική διαπερατότητα ϵ_r που είναι γειωμένη από μία μεταλλική βάση. Όπως θα δούμε, μία λεπτή γειωμένη διηλεκτρική πλάκα εμφανίζει επαγωγική αντίδραση, άρα μεταξύ αυτής και του πλέγματος μπορεί να δημιουργηθεί ένας συντονισμός ανάλογος με ένα συγκεντρωμένο LC κύκλωμα.

Η σύνθετη αντίσταση του HIS μπορεί να εξαχθεί από το κυκλωματικό μοντέλο γραμμής μεταφοράς από το **Σχήμα 3.4(β)**, όπου β είναι η συνιστώσα της σταθεράς διάδοσης κάθετα στην επιφάνεια. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου είναι μια παράλληλη σύνδεση της σύνθετης αντίστασης του πλέγματος Z_g (σχέσεις 3.9 και 3.10) και της επιφανειακής σύνθετης αντίστασης του γειωμένου διηλεκτρικού στρώματος Z_s :

$$(3.19) \quad \mathbf{Z}_{in}^{-1} = \mathbf{Z}_{g'}^{-1} + \mathbf{Z}_s^{-1}.$$

Η επιφανειακή σύνθετη αντίσταση Z_s (του γειωμένου διηλεκτρικού υποστρώματος) προκύπτει από γνωστές σχέσεις που μετασχηματίζουν ένα βραχυκύκλωμα (γείωση) κατά μήκος μίας γραμμής μεταφοράς με μήκος όσο το πάχος του υποστρώματος. Για πλάγια πρόσπτωση, η έκφραση μπορεί να γραφτεί σε δυαδική (dyadic) μορφή, η οποία ξεχωρίζει τις κυματικές αντιστάσεις Z_s^{TE} και Z_s^{TM} για τις περιπτώσεις TE και TM πόλωσης, αντίστοιχα, ως εξής

$$\overline{\overline{\mathbf{Z}}}_s = j\omega\mu \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \left(\overline{\overline{\mathbf{I}}}_t - \frac{k_t k_t}{k^2} \right). \quad (3.20)$$

Στην παραπάνω σχέση, μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υποστρώματος (στην δικιά μας περίπτωση $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ καθώς εξετάζουμε μη-μαγνητικά διηλεκτρικά), $\beta = \sqrt{k^2 - k_t^2}$ είναι η σταθερά διάδοσης στην ισοδύναμη γραμμή μεταφοράς με μήκος όσο το πάχος του υποστρώματος, $k = k_0 \sqrt{\epsilon_r}$ είναι ο κυματικός αριθμός στο υλικό του υποστρώματος και k_t είναι η εφαπτομενική συνιστώσα του κυματικού αριθμού ($k_t = k_0 \sin \theta$), όπως επιβάλλεται από το κύμα πρόσπτωσης. Σημειώνεται πως οι οριακές συνθήκες του ΗΜ πεδίου επιβάλουν ισότητα τηςεφαπτομενικής συνιστώσας (και) του κυματικού αριθμού στη διεπιφάνεια δύο διαφορετικών διηλεκτρικών.

Για μια HIS που αποτελείται από συστοιχία ορθογώνιων μεταλλικών στοιχείων, οι σύνθετες αντιστάσεις εισόδου για TM και TE πόλωση προκύπτουν από τις σχέσεις (3.9), (3.10) και (3.20), μετά από κάποιες πράξεις, ως:

$$\mathbf{Z}_{in}^{TE} = \frac{j\omega\mu \frac{\tan(\beta d)}{\beta}}{1 - 2k_{eff} a \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \left(1 - \frac{2}{\epsilon_r + 1} \sin^2 \theta\right)}, \quad (3.21)$$

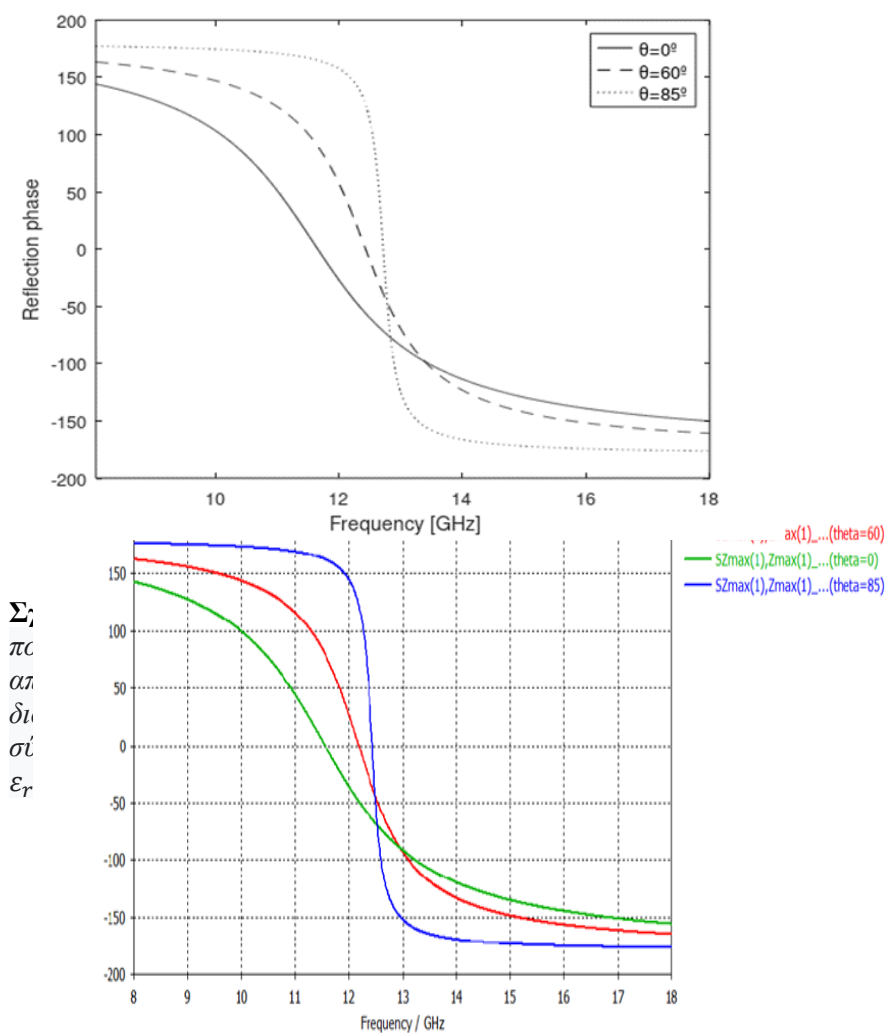
$$\mathbf{Z}_{in}^{TM} = \frac{j\omega\mu \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \cos^2(\theta 2)}{1 - 2k_{eff} a \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \cos^2(\theta 2)}. \quad (3.22)$$

όπου $k_{eff} = k_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}$ είναι ο κυματικός αριθμός του διανύσματος του προσπίπτοντος κύματος στο μέσο υποδοχής, θ είναι η γωνία πρόσπτωσης του κύματος από τον ελεύθερο χώρο και $\theta 2$ η αντίστοιχη γωνία διάδοσης επίπεδου κύματος εντός του διηλεκτρικού που υπολογίζεται από τον νόμο της διάθλασης (Snell) ως:

$$\theta 2 = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta)}{\sqrt{\epsilon_r}}\right). \quad (3.23)$$

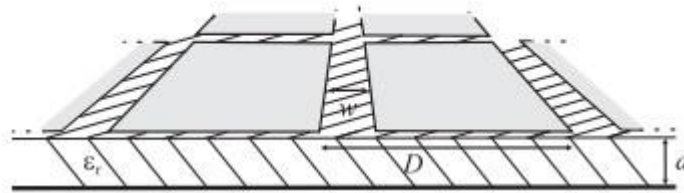
Δεδομένου ότι η επιφάνεια υψηλής αντίστασης είναι αδιαπέραστη και χωρίς απώλειες, το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης θα είναι πάντα ίσο με την μονάδα (αν υπάρχει και μετάδοση ή απώλειες στο διηλεκτρικό, τότε η ανάκλαση θα είναι μικρότερη της μονάδας).

Τώρα θα συγκρίνουμε το αναλυτικό μοντέλο με αριθμητικές προσομοιώσεις. Η επιφάνεια υψηλής αντίστασης (HIS) που εξετάζουμε αποτελείται από πλέγματα φαρδιών μεταλλικών ταινιών (που εμφανίζουν χωρητική ισοδύναμη απόκριση) πάνω σε διηλεκτρική πλάκα πάχους d με σχετική διαπερατότητα ϵ_r η οποία είναι γειωμένη, δηλαδή στην πίσω της πλευρά υπάρχει μία μεταλλική βάση (επιμετάλλωση). Σύμφωνα λοιπόν με το μοντέλο [1] για μία HIS που περιλαμβάνει χωρητικό πλέγμα και με τις εξής παραμέτρους : $D = 2 \text{ mm}$, $w = 0,2 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$ και $\epsilon_r=10.2$ (χωρίς απώλειες, δηλαδή $\tan\delta = 0$) προκύπτουν τα αποτελέσματα στο **Σχήμα 3.7** τα οποία τα επαληθεύσαμε από την αριθμητική προσομοίωση του ίδιου κελιού στο CST, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.8**.



Σχήμα 3.8: Τα αποτελέσματα για TE-πολωμένη πρόσπτωση που προέκυψαν από υπολογιστικές προσομοιώσεις (CST STUDIO SUITE) μιας μεταεπιφάνειας που αποτελείται από ένα πλέγματα φαρδιών μεταλλικών ταινιών (strips) πάνω σε μια διηλεκτρική πλάκα με μεταλλική βάση όπως αυτό στο Σχήμα 3.7.

3.5 Ηλεκτρομαγνητικός απορροφητής



Σχήμα 3.9: Σχέδιο της διάταξης ενός απορροφητή ο οποίος αποτελείται από τετράγωνα μεταλλικά τμήματα (patches) και από μία γειωμένη διηλεκτρική πλάκα με απώλειες. Η δομή είναι ίδια με αυτή των HIS, με τη διαφορά ότι το υπόστρωμα πλέον είναι διηλεκτρικό με απώλειες.

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε έναν επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό απορροφητή για ικανοποιητική λειτουργία σε ένα ευρύ φάσμα (κώνο) γωνιών πρόσπτωσης, τόσο για την TE όσο και για την TM πόλωση[5]. Η διάταξη μεταλλικών καλυμμάτων (patches) που βρίσκονται επάνω στην διηλεκτρική πλάκα, εμφανίζουν χωρητική ισοδύναμη απόκριση η οποία, σε συνδυασμό με την επαγωγική ισοδύναμη απόκριση που εμφανίζεται από τη γειωμένη διηλεκτρική πλάκα με απώλειες, σχηματίζεται συντονισμός, αντίστοιχα με ένα κύκλωμα RLC. Ο συντονισμός αυτός και οι απώλειες που εμφανίζει το υλικό του διηλεκτρικού μετατρέπει το παραπάνω μοντέλο από το **Σχήμα 3.9** σε έναν απορροφητή. Στο **Σχήμα 3.10** με βάση το μοντέλο του άρθρου [2] και με τις παραμέτρους $D = 5 \text{ mm}$, $w = 0.1 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$ και $\epsilon_r = 9(1 - j0.222)$ παρατηρούμε ότι ο απορροφητής μας κάνει πλήρη απορρόφηση στην κάθετη πρόσπτωση και στις γωνίες 30° έως και 60° για τις δύο πολώσεις (TE & TM). Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρούμε και στις υπολογιστικές προσομοιώσεις, **Σχήμα 3.11**, επιβεβαιώνοντας την λειτουργία του αναλυτικού μοντέλου και σε αυτήν την εφαρμογή.

Για την δομή απορροφητή **Σχήμα 3.9** οι σύνθετες αντιστάσεις εισόδου TE και TM του απορροφητή είναι:

$$Z_{in}^{TE} = \frac{j\omega\mu_0 \frac{\tan(\beta d)}{\beta}}{1 - 2k_{eff} a \frac{\tan(\beta d)}{\beta} \left(1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\epsilon_r + 1}\right)}, \quad (3.24)$$

$$\mathbf{Z}_{inp}^{TM} = \frac{j\omega\mu_0 \frac{\tan(\beta d)}{\beta} (1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\epsilon_r})}{1 - 2k_{eff}\alpha \frac{\tan(\beta d)}{\beta} (1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\epsilon_r})}, \quad (3.25)$$

όπου $\beta = \sqrt{k_0^2 \epsilon_r - k_t^2}$, d το πάχος του γειωμένου διηλεκτρικού στο υπόστρωμα, $k_{eff} = k_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}$ το διάνουσμα κύματος μέσα στο ισοδύναμο ομογενές μέσο που είναι ο «μέσος όρος» των υλικών πάνω και κάτω από τη συστοιχία patch, $\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2}$ η σχετική διηλεκτρική σταθερά του ισοδύναμου ομογενούς μέσου, ϵ_r η σχετική διαπερατότητα του υποστρώματος και θ η γωνία

πρόσπτωσης. Επιπλέον, το α είναι η παράμετρος πλέγματος για μια ηλεκτρικά πυκνή ($k_{eff}D \ll 2\pi$) διάταξη ιδανικά αγωγίμων λωρίδων και γράφεται:

$$\alpha = \frac{k_{eff} D}{\pi} \ln \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{\pi w}{2D} \right)} \right). \quad (3.26)$$

Βλέπουμε ότι όλοι οι εξαρτώμενοι από τη γωνία όροι στις σχέσεις (3.24) και (3.25) έχουν την σχετική διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος (βλέπε επίσης [6]), ϵ_r στο παρονομαστή. Εύλογα συμπεράνουμε ότι αυξάνοντας τη σταθερά του υποστρώματος μπορούμε να μειώσουμε την επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στις επιφανειακές αντιστάσεις. Για σχετικά υψηλές τιμές του ϵ_r οι εκφράσεις (3.24) και (3.25) για την επιφανειακή σύνθετη αντίσταση απλοποιούνται αμφοτέρως στην περίπτωση ηλεκτρικά λεπτών υποστρωμάτων σε

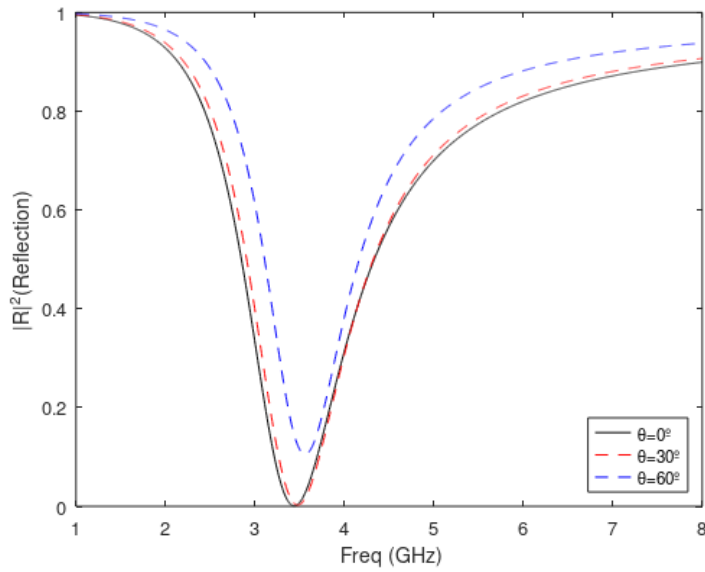
$$\mathbf{Z}_s^{TE} = \mathbf{Z}_s^{TM} \approx \frac{j\omega\mu_0 d}{1 - 2k_{eff}\alpha d}, \quad (3.27)$$

η οποία σαφώς δεν είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης. Αυξάνοντας τις απώλειες στο υπόστρωμα (αυτό θα επηρέαζε τους όρους k_{eff} και α), η επιφανειακή δομή υψηλής αντίστασης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως απορροφητής που έχει σταθερή λειτουργία ως προς τη γωνία πρόσπτωσης.

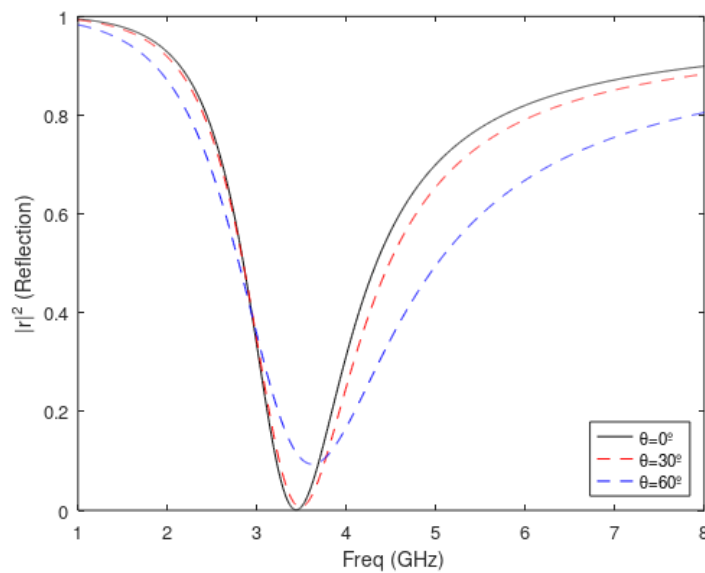
Το χαμηλό εύρος ζώνης συχνοτήτων αποτελεί ένα περιορισμό για τον απορροφητή που εξετάζουμε, καθώς και γενικά για τους περισσότερους απορροφητές υψηλής αντίστασης, που οφείλεται στην αξιοποίηση του συντονισμού. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του περιορισμού αυτού μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση του πάχους του διηλεκτρικού υποστρώματος αλλά κάτι τέτοιο είναι μη επιθυμητό, καθώς αυξάνει τον όγκο και το βάρος.

Στο **Σχήμα 3.10** παρατηρούμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το αναλυτικό μοντέλο του ηλεκτρομαγνητικού απορροφητή που εξετάσαμε ενώ στο **Σχήμα 3.11** τα αποτελέσματα που προέκυψαν από υπολογιστικές προσομοιώσεις (CST STUDIO SUITE). Από τα δύο παραπάνω αποτελέσματα (**Σχήμα 3.10** και **Σχήμα 3.11**), τα οποία συνάδουν, βλέπουμε ότι το μοντέλο του απορροφητή που μελετήθηκε στο [1] κάνει πλήρη απορρόφηση της ισχύος στα 3.4 GHz στις γωνίες πρόσπτωσης των 0° έως και 60° και για τις δύο πολώσεις (TE και TM).

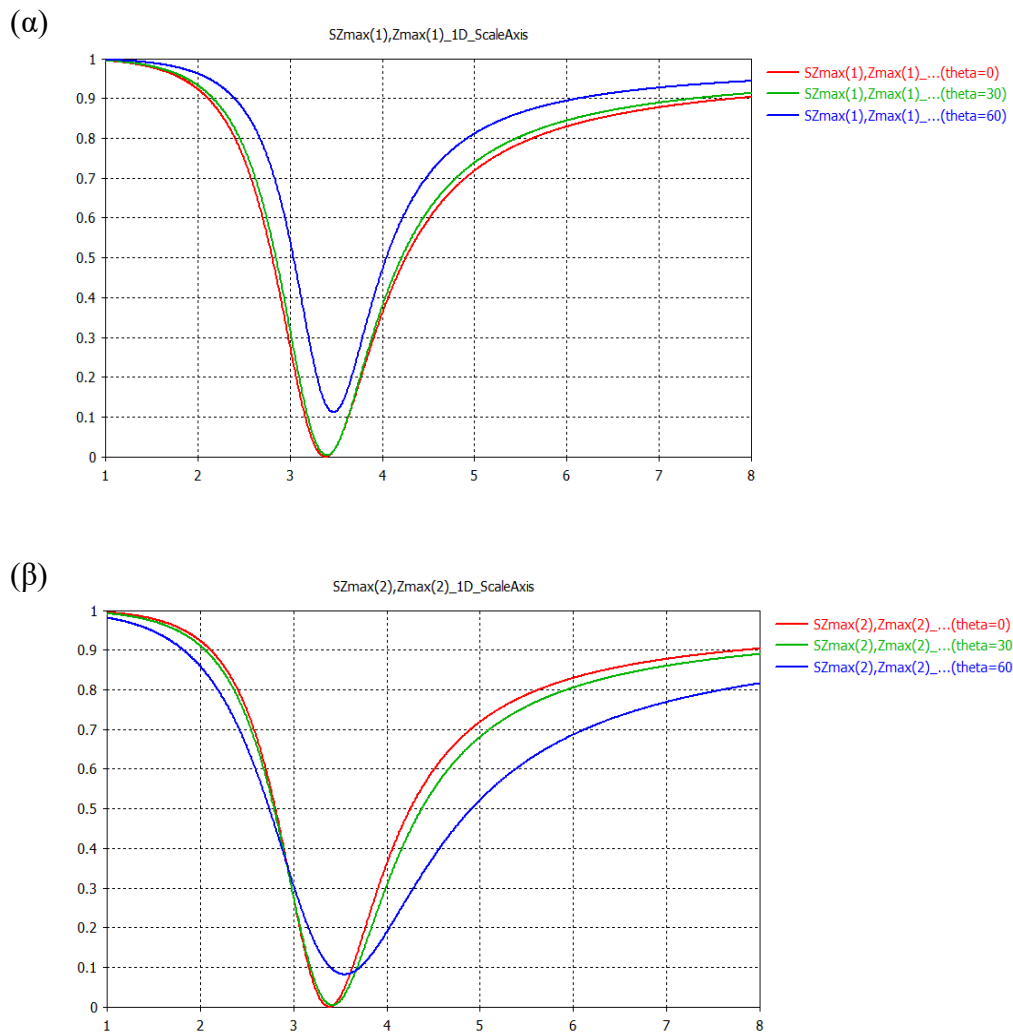
(α)



(β)



Σχήμα 3.10: Οι συντελεστές ανάκλασης της ισχύος για τις γωνίες πρόσπτωσης 0° , 30° και 60° για (α) TE και (β) TM πόλωση, όπως προέκυψαν από το αναλυτικό μοντέλο. Οι παράμετροι του απορροφητή είναι οι παρακάτω: $D = 5 \text{ mm}$, $w = 0,1 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$ και $\epsilon_r = 9(1 - j0.222)$.



Σχήμα 3.11: Οι συντελεστές ανάκλασης της ισχύος για τις γωνίες πρόσπτωσης 0° , 30° και 60° για (α) TE και (β) TM πόλωση, όπως προέκυψαν από υπολογιστικές προσομοιώσεις (CST STUDIO SUITE) με τις παραμέτρους του απορροφητή να είναι: $D = 5 \text{ mm}$, $w = 0,1 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$ και $\epsilon_r = 9(1 - j0.222)$.

Κεφάλαιο 4: Ελεγχόμενες μεταεπιφάνειες από μεταβλητά συγκεντρωμένα φορτία

4.1 Ολοκληρωμένα κυκλώματα RC

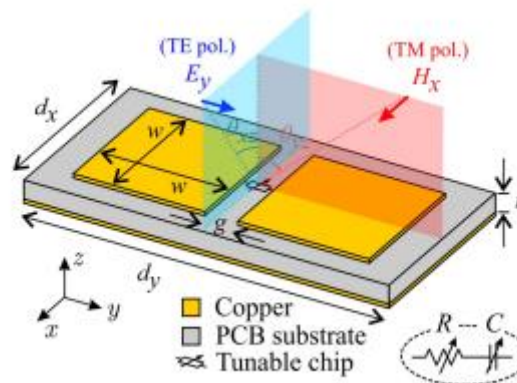
Στα πρώτα κεφάλαια της εργασίας είδαμε ότι οι μεταεπιφάνειες με τον κατάλληλο σχεδιασμό και με τα κατάλληλα συνθετικά υλικά μπορούν να εμφανίζουν συντονισμούς που μπορούν να βελτιστοποιήσουν την απόκριση (π.χ. μέγιστη απορρόφηση ή πλήρη ανάκλαση), ωστόσο οι μεταεπιφάνειες αυτές έχουν τον περιορισμό να εκτελούν μόνο μια συγκεκριμένη λειτουργία (αυτή για την οποία σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν) σε συγκεκριμένες συχνότητες ή γωνίες πρόσπτωσης, για παράδειγμα, ένας απορροφητής λειτουργεί σε μια συγκεκριμένη συχνότητα όπου η σύνθετη αντίσταση εισόδου είναι προσαρμοσμένη στον ελεύθερο χώρο. Σε περίπτωση που θελήσουμε να αλλάξουμε τη συχνότητα λειτουργίας ή ακόμη και τη λειτουργικότητα, οι διαδικασίες επανασχεδιασμού και επανακατασκευής είναι αναπόφευκτες λόγω της δομικής φύσης των μοναδιαίων κελιών. Στις μικροκυματικές συχνότητες μας δίνεται η δυνατότητα επίλυσης τέτοιων περιορισμών με την τοποθέτηση μέσα σε κάθε μοναδιαίο κελί ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (integrated circuits, ICs) που μπορούν με ηλεκτρικό έλεγχο να παρουσιάζουν την επιθυμητή μιγαδική αντίσταση (π.χ., συνδυασμό αντίστασης με χωρητικότητα) στους ακροδέκτες τους. Σε τέτοιου είδους μεταεπιφάνειες δίνεται ο χαρακτηρισμός ελεγχόμενες (controllable) ή αναπρογραμματιζόμενες (reconfigurable) γιατί έχουν την ικανότητα να εκτελούν διαφορετικές ρυθμιζόμενες λειτουργίες ανάλογα με τον έλεγχο μέσω ενός υπολογιστή.

Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) είναι ένα κύκλωμα μικρού μεγέθους που αποτελείται συνήθως από πολλαπλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα συνδεδεμένα μεταξύ τους όπως τρανζίστορ, αντιστάσεις, πυκνωτές ή πηνία. Αυτά τα κυκλώματα λειτουργούν μακροσκοπικά ως ηλεκτρονικοί διακόπτες ή ως ηλεκτρικά στοιχεία μεταβαλλόμενης αντίδρασης ή αντίστασης, δηλαδή παρέχουν σε μία θύρα εξόδου υψηλής συχνότητας το ισοδύναμο ενός συγκεντρωμένου σύνθετου (μιγαδικού) φορτίου, με ανεξάρτητο έλεγχο του πραγματικού (αντίσταση) και φανταστικού (αντίδραση) μέρους. Σαν γενική αρχή, από την κυκλωματική ανάλυση των προηγούμενων κεφαλαίων, διαπιστώνουμε πως η χωρητικότητα του φορτίου ελέγχει τη συχνότητα συντονισμού ενώ η αντίσταση ελέγχει τον συντελεστή ποιότητας, δηλαδή το βάθος και το εύρος ζώνης του συντονισμού. Οι διόδοι PIN και οι πυκνωτές varactor αποτελούν συνήθως τα κύρια στοιχεία αυτών των κυκλωμάτων.

Για τον έλεγχο των διόδων ή των IC, γενικότερα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συστοιχία επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (field-programmable gate array, FPGA). Το FPGA είναι ένα είδος ψηφιακού κυκλώματος που μπορεί να αναπρογραμματιστεί για να εκτελέσει διάφορες λειτουργίες και είναι κατάλληλο για τον έλεγχο και την παραμετροποίηση των διόδων PIN σε αυτήν την εφαρμογή.

4.2 Μοναδιαίο κελί για πλήρη έλεγχο ανάκλασης σε μία πόλωση

Ένα μοντέλο ελεγχόμενης μεταεπιφάνειας που μελετήσαμε είναι αυτό που απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.1**, όπου το μοναδιαίο κελί της μεταεπιφάνειας αποτελείται από μια σειρά δύο μεταλλικών καλυμμάτων (patches) πάνω σε ένα γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα έχοντας τοποθετημένο ένα ρυθμιζόμενο ολοκληρωμένο κύκλωμα RC το οποίο συνδέει τα δύο μεταλλικά καλύμματα κατά της κατεύθυνσης y . Έτσι, ονομάζουμε το κελί αυτό τύπου «2x1» και, σε μία μεγάλη ελεγχόμενη μεταεπιφάνεια, καθένα RC φορτίο θα ελέγχει ένα τέτοιο κελί. Η εν λόγω μεταεπιφάνεια έχει σχεδιαστεί για πολλαπλές ρυθμιζόμενες λειτουργίες στα 5 GHz, δηλαδή, ρυθμιζόμενη τέλεια απορρόφηση (TPA) για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και ρυθμιζόμενη ανώμαλη ανάκλαση (TAR) προς διαφορετικές κατευθύνσεις[7,8-9]. Θα παρατηρήσουμε ότι χωρίς να αλλάξουμε τις γεωμετρικές ιδιότητες της προτεινόμενης μεταεπιφάνειας και των υλικών της, μπορούμε να μεταβούμε από τη μία λειτουργία σε μια άλλη στην ίδια συχνότητα με αλλαγή μόνο των RC φορτίων δίνοντας μας επιπλέον και τη δυνατότητα αναδιαμόρφωσης των μοναδιαίων κελιών σε νέα υπερκελιά. Υποθέτουμε λοιπόν πως με τη χρήση ενός υπολογιστή μπορούμε να ελέγχουμε και να ρυθμίζουμε ανεξάρτητα τις τιμές R και C των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε κάθε κελί της μεταεπιφάνειας ξεχωριστά, με αποτέλεσμα να συντονίζουμε τόσο τις αντιδραστικές όσο και τις απορροφητικές ιδιότητες των μοναδιαίων κελιών, με ταυτόχρονο ή ανεξάρτητο τρόπο.



Σχήμα 4.1: Το σχήμα του μοναδιαίου κελιού της προτεινόμενης ελεγχόμενης μεταεπιφάνειας. Οι διαστάσεις του κελιού είναι $d_x = d_y/w = 9,12\text{mm}$, $t = 1,016\text{mm}$, $w = 8,12\text{mm}$ και $g = 1\text{mm}$. Ένα ρυθμιζόμενο τσίπ RC είναι ενσωματωμένο για να παρέχει μια μεταβλητή σύνθετη αντίσταση για τοπική (σε κάθε κελί) και συνεχή τροποποίηση της σύνθετης αντίστασης της μεταεπιφάνειας

Στη περίπτωση σχεδιασμού της μεταεπιφάνειας, και για να εξασφαλιστεί αναλυτικότητα της απόκρισης (resolution) στις γωνίες ανάκλασης, τότε το μέγεθος του μοναδιαίου κελιού θα πρέπει να είναι μικρότερο του μήκους κύματος (subwavelength) αλλά όχι πολύ μικρό ώστε να είναι εφικτή η κατασκευή του με τη χρήση της διαθέσιμης τεχνολογίας και να είναι τα γειτονικά κελιά όσο γίνεται πιο ασύζευκτα. Σύμφωνα με το άρθρο [10] το μοναδιαίο κελί έχει ένα γειωμένο διηλεκτρικό μεγέθους $d_x = d_y/2 = 9.12\text{mm}$ (περίπου 0.15λ). Ένας επιπλέον παράγοντας που

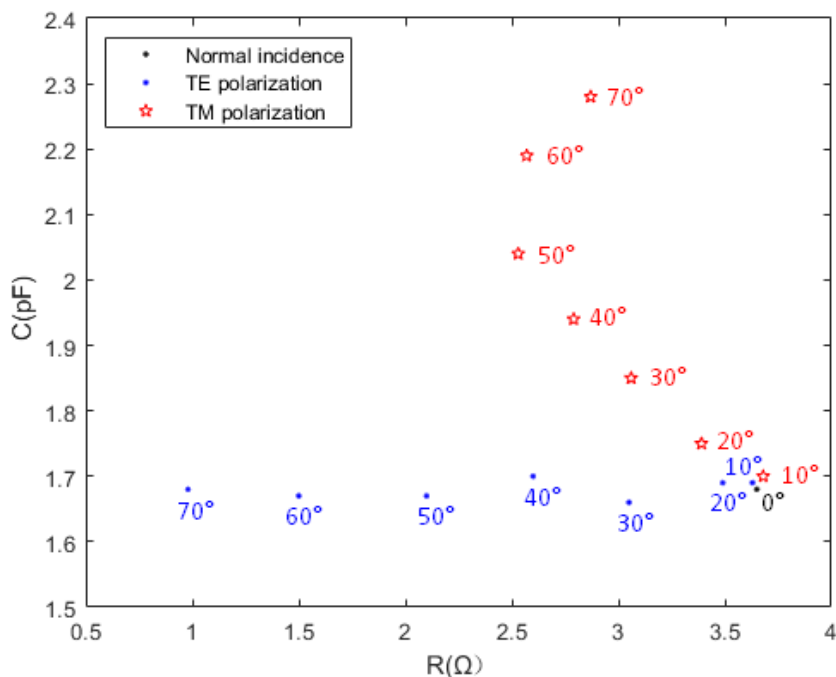
λήφθηκε υπόψιν για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό του μοναδιαίου κελιού είναι το ελεγχόμενο εύρος της φάσης του συντελεστή ανάκλασης του μοναδιαίου κελιού να είναι όσο το δυνατόν ευρύτερο, δεδομένου του εύρους λειτουργίας του ρυθμιζόμενου τσιπ, δηλαδή των τιμών C και R που μπορεί να δώσει.

Αυτό απαιτεί ένα συντονισμό, δηλαδή ένα υψηλό παράγοντα ποιότητας Q ο οποίος είναι ανάλογος του $\sqrt{C_{eff}/L_{eff}}$, όπου C_{eff} είναι η «ενεργός» (effective, equivalent) χωρητικότητα και L_{eff} είναι η ενεργός αυτεπαγωγή όταν η δομή θεωρείται ως ισοδύναμο παράλληλο κύκλωμα RLC [11]. Η ενεργός χωρητικότητα C_{eff} προέρχεται από το διάκενο μεταξύ των μεταλλικών καλυμμάτων (patches) και τη συνεισφορά του συγκεντρωμένου κυκλώματος RC, ενώ η ενεργός αυτεπαγωγή L_{eff} οφείλεται κυρίως στο γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα. Τέλος, ο σχεδιασμός περιορίζεται επίσης από τις διαθέσιμες R και C τιμές που μας παρέχουν τα ολοκληρωμένα κυκλώματα: Στην συγκεκριμένη υλοποίηση, θεωρήθηκε πως το εύρος συντονισμού είναι περίπου 0-5 Ohm για το R και 1-5 pF για το C. Συμπεριλαμβανομένων όλων των παραπάνω παραγόντων το μοναδιαίο κελί έχει σχεδιαστεί να κατασκευαστεί πάνω σε ένα λεπτό γειωμένο διηλεκτρικό πάχους $t = 1.016$ mm, τα τετράγωνα καλύμματα θα αποτελούνται από χαλκό πλάτους $w = 8.12$ mm με πάχος επιμετάλλωσης 18 μ m και η μεταξύ τους απόσταση είναι 1mm όπου συνδέεται το ρυθμιζόμενο κύκλωμα RC. Το λεπτό υπόστρωμα είναι ένα στρωματοποιημένο (laminate) υπόστρωμα υψηλής συχνότητας Rogers RT/Duroid 5880, το οποίο χαρακτηρίζεται από τη σχετική διαπερατότητα $\epsilon_r = 2.2(1 - j \tan\delta)$ με πολύ χαμηλές απώλειες, δηλαδή εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = 0.0009$. Λόγο του χαμηλού $\tan\delta$ η απώλεια είναι αμελητέα και έτσι το προσπίπτον κύμα δεν εξασθενεί αισθητά στο υπόστρωμα, ενώ με την πλάκα χαλκού κάτω από το πίσω μέρος της μεταεπιφάνειας εμποδίζεται η μετάδοση στο πίσω μέρος και δημιουργείται ένας διαμήκης συντονισμός. Έτσι, η απόκριση της μεταεπιφάνειας ποσοτικοποιείται μόνο από τον συντελεστή ανάκλασης, του οποίου η μιγαδική τιμή εξαρτάται σημαντικά από το ελεγχόμενο RC φορτίο.

4.2.1 Ρυθμιζόμενη τέλεια απορρόφηση

Καθώς η ελεγχόμενη μεταεπιφάνεια είναι ικανή να ρυθμίσει και την αντίσταση και την αντίδραση της σύνθετης επιφανειακής της αντίστασης, σε κάθε κελί ξεχωριστά, μπορεί να πραγματοποιήσει πολλές ρυθμιζόμενες λειτουργίες που δεν μπορούν να επιτευχθούν σε μία συσκευή με συμβατικούς τρόπους. Για παράδειγμα, για να έχουμε μια τέλεια απορρόφηση θα πρέπει η σύνθετη αντίσταση εισόδου να είναι προσαρμοσμένη με την αντίσταση ελεύθερου χώρου, έτσι αν υπάρξει αλλαγή της προσπίπτουσας πόλωσης και της γωνίας πρόσπτωσης θα έχουμε τη δυνατότητα να τροποποιήσουμε τη σύνθετη αντίσταση εισόδου ώστε να επιτευχθεί η ίδια λειτουργία (τέλεια απορρόφηση) στο αλλαγμένο προσπίπτον. Παρόλο που η απαιτούμενη σύνθετη αντίσταση εισόδου παραμένει καθαρά ωμική για οποιαδήποτε πρόσπτωση (π.χ. ίση με 377 Ω για κάθετη πρόσπτωση), η τιμή της μπορεί να αλλάξει με τη γωνία και την πόλωση. Συνεπώς, είναι απαραίτητος ο συντονισμός τόσο της επιφανειακής αντίστασης όσο και της αντίδρασης της συστοιχίας patch. Ο συντονισμός αυτός μπορεί να επιτευχθεί με την κατάλληλη ρύθμιση των μεταβλητών RC φορτίων της μεταεπιφάνειας, συνολικά και συνεχώς, δηλαδή όλα τα μοναδιαία κελιά πρέπει να έχουν την ίδια ρύθμιση, αλλά οι επιτρεπόμενες ρυθμίσεις δεν πρέπει να περιορίζονται σε ένα διακριτό σύνολο τιμών. Στην ελεγχόμενη μεταεπιφάνεια που εξετάζουμε ο συντελεστής απορρόφησης δίνεται από την σχέση $A = 1 - |\Gamma|^2$, όπου $|\Gamma|$ δηλώνει το μέτρο του μιγαδικού συντελεστή ανάκλασης. Ο στόχος μας για να έχουμε μια τέλεια απορρόφηση είναι ο συντελεστής ανάκλασης να έχει μια πολύ χαμηλή τιμή π.χ. ($|\Gamma| < -30$ dB). Στο **Σχήμα 4.2** παρατηρούμε τις απαιτούμενες ρυθμίσεις των RC φορτίων της ελεγχόμενης μεταεπιφάνειας να πραγματοποιεί τέλεια απορρόφηση για διαφορετικές γωνίες

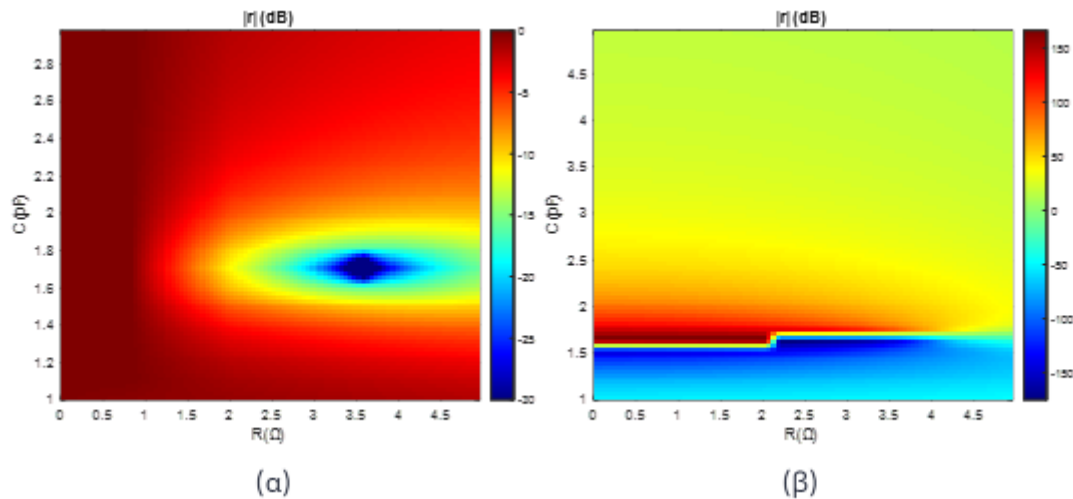
πρόσπτωσης στις δύο κύριες πολώσεις. Η πρώτη είναι η εγκάρσια ηλεκτρική (transverse electric, TE) όπου το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου είναι παράλληλο με τον άξονα y για μεταβλητή γωνία θ μέσα στο xz επίπεδο, και η δεύτερη είναι η εγκάρσια μαγνητική (transverse magnetic, TM) όπου το μαγνητικό πεδίο είναι παράλληλο με τον άξονα y , για την ίδια γωνία. Οι πολώσεις TE και TM είναι ορθογώνιες μεταξύ τους (δηλαδή είναι ανεξάρτητες και ασύζευκτες όσο είμαστε στον κενό χώρο) και μπορούν να περιγράψουν οποιαδήποτε ελλειπτική πόλωση για επίπεδο ΗΜ κύματα. Υπό προϋποθέσεις, οι TE και TM μπορούν να αντιστοιχιστούν στην γραμμική οριζόντια (H) και κατακόρυφη (V) πόλωση, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις ασύρματες επικοινωνίες.



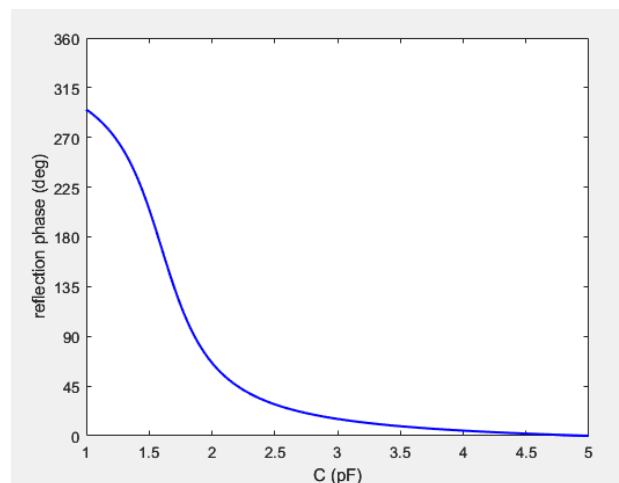
Σχήμα 4.2: Οι απαιτούμενες τιμές R και C των ηλεκτρονικών στοιχείων για την επίτευξη του τέλει απορροφητή σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης για τις δύο ορθογώνιες πολώσεις TE και TM. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 5 GHz.

Για τον εντοπισμό των απαιτούμενων τιμών χωρητικότητας C και αντίστασης R ώστε η μεταεπιφάνεια να λειτουργεί ως απορροφητής στη συχνότητα των 5GHz, ακολουθήσαμε μια αριθμητική προσέγγιση και προσομοίωση της δομής του μοναδιαίου κελιού με τη χρήση του CST STUDIO SUITE. Από το **Σχήμα 4.2** παρατηρούμε ότι στη κάθετη πρόσπτωση ($\theta_i = 0^\circ$) με τιμές $R = 3.65 \Omega$ και $C = 1.68 \text{ pF}$ έχουμε συντελεστή ανάκλασης $|r| < -30 \text{ dB}$ που δείχνει σχεδόν τέλεια απορρόφηση. Για πλάγια πρόσπτωση μεταβάλλουμε τη γωνία πρόσπτωσης από 10° έως 70° και στις δύο πολώσεις υπολογίζοντας τις τιμές αντίστασης R και χωρητικότητας C όπου ο συντελεστής ανάκλασης έχει τιμή μικρότερη από αυτή των -30 dB . Παρατηρούμε για τη πόλωση TE (transverse electric) η απαιτούμενη χωρητικότητα παραμένει σχεδόν σταθερή στη τιμή $C \approx 1.68 \text{ pF}$, αντιθέτως η αντίσταση κυμαίνεται από $R = 3.6 \Omega$ (που αντιστοιχεί στις 10°) έως $R = 0.98 \Omega$ (που αντιστοιχεί στις 70°). Στην TM (transverse magnetic) οι τιμές μεταβάλλονται τόσο στο R όσο και στο C καθώς μετατοπίζεται η γωνία πρόσπτωσης. Οι απαιτούμενες τιμές R και C που συνοψίζονται στο **Σχήμα 4.2** είναι πρακτικές και μπορούν εύκολα να υλοποιηθούν με τη χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων [12]. Η διαφορετική συμπεριφορά στις δύο ορθογώνιες πολώσεις

προέρχεται από τη διαφορετική αντίδραση της σύνθετης αντίστασης στη πλάγια πρόσπτωση. Καθώς μεταβάλεται η γωνία πρόσπτωσης θ μεταβάλεται και η αντίσταση του ελεύθερου χώρου Z_0 δηλαδή $Z_{0,TE} = \eta_0 / \cos\theta$ και $Z_{0,TM} = \eta_0 \cos\theta$, συνεπώς απαιτείτε αλλαγή της αντίστασης R και στις δυο πολώσεις. Για τη χωρητικότητα C από την άλλη χρειάζεται αλλαγή μόνο στην TM πόλωση για το λόγο ότι το $Im[Z_{inp}]$ μειώνεται σημαντικά συνεπώς απαιτείται μεγαλύτερη χωρητικότητα για να αντισταθμιστεί η μείωση αυτή, ενώ για την TE πόλωση η αντίδραση παραμένει σταθερή.



Σχήμα 4.3: Ανεξάρτητος έλεγχος του πλάτους της ανάκλασης σε dB (α) και της φάσης σε μοίρες (β) ρυθμίζοντας την αντίσταση R και την χωρητικότητα C του ελεγχόμενου φορτίου. Παρατηρούμε πως η μέγιστη απορρόφηση επιτυγχάνεται για $C=1.7 \text{ pF}$ και $R=3.5 \Omega$, ενώ για $R=0$ (απουσία αντίστασης) έχουμε μέγιστη ανάκλαση και η φάση μπορεί να ελεγχθεί σχεδόν σε όλο το εύρος 360° .



Σχήμα 4.4: Φάση συντελεστή ανάκλασης για μια ομοιόμορφη μεταεπιφάνεια ως συνάρτηση της χωρητικότητας του ρυθμιζόμενου φορτίου. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 5 GHz, έχουμε κάθετη πρόσπτωση και η αντίσταση του φορτίου είναι μηδέν..

4.2.2 Ρυθμιζόμενη ανώμαλη ανάκλαση

Στο Σχήμα 4.3 έχουμε ένα χρωματικό χάρτη που δείχνει το πλάτος και τη φάση του συντελεστή ανάκλασης ως προς τις αλλαγές των R και C όταν η μεταεπιφάνεια ρυθμίζεται ομοιογενώς (όλα τα κελιά είναι ίδια) για την κάθετη γωνία πρόσπτωσης ($\theta_i = 0^\circ$) στα 5 GHz με πόλωση παράλληλη με τον y-άξονα, κατά μήκος δηλαδή του μεταβλητού φορτίου. Το πλάτος ανάκλασης μπορεί να διαμορφωθεί από -30 dB έως σχεδόν 0 dB καθώς και η φάση ανάκλασης από -150° έως $+140^\circ$.

Για μια επιθυμητή φάση ανάκλασης μπορεί κανείς να συντονίσει το πλάτος ανάκλασης σε ένα ευρύ φάσμα, και αντίστροφα. Ένας τέτοιος ανεξάρτητος έλεγχος του πλάτους και της φάσης ανάκλασης μπορεί να φανεί χρήσιμος για εφαρμογές ολογραφίας και διαμόρφωσης δέσμης (beamforming) ή γενικότερα για διαμόρφωση του μετώπου κύματος. Η δυνατότητα που μας δίνει η ελεγχόμενη μεταεπιφάνεια να ρυθμίζουμε ξεχωριστά το RC φορτίο για κάθε μοναδιαίο κελί, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα από το Σχήμα 4.3, μας επιτρέπει να προχωρήσουμε σε πιο πολύπλοκες ρυθμιζόμενες λειτουργίες. Μία τέτοια λειτουργία είναι η ρυθμιζόμενη ανακατεύθυνση δέσμης (beam steering) ή ανώμαλη ανάκλαση, όπου το προσπίπτον κύμα μπορεί να ανακλαστεί προς διαφορετικές κατευθύνσεις πέρα από τη κατοπτρική (specular) [9,13,14-15], που προβλέπει ο συμβατικός νόμος της ανάκλασης. Ωστόσο, έχει αποδεχτεί ότι η ανάκλαση ενός επίπεδου κύματος πέρα από το συνήθη νόμο της ανάκλασης μπορεί να οδηγεί σε παρασιτικές ανακλάσεις προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις λόγω περίθλασης (π.χ, [9]). Οι παρασιτικές αυτές ανακλάσεις μπορούν να κατασταλούν με την κατασκευή κατάλληλα σχεδιασμένων υπερκελιών (supercells) που προάγουν ανάκλαση σε μια συγκεκριμένη τάξη περίθλασης ενώ καταστέλλουν την ακτινοβολία σε άλλες τάξεις περίθλασης πραγματοποιώντας σχεδόν τέλεια ανώμαλη ανάκλαση [9,14-16].

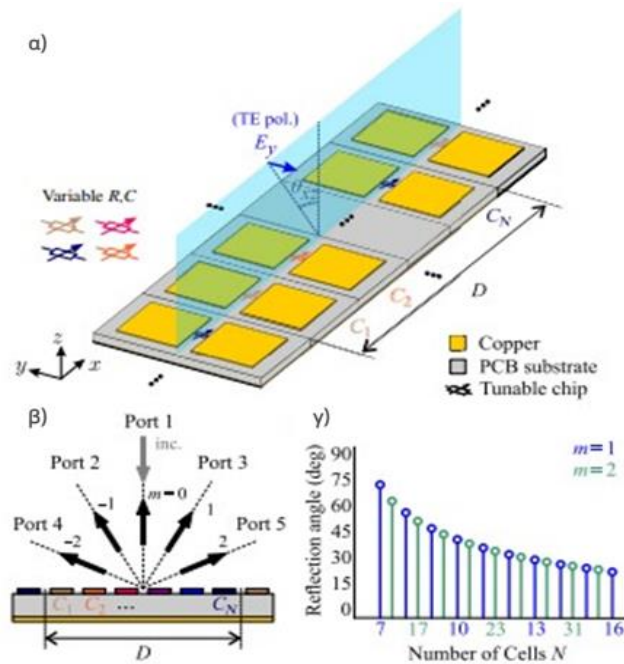
4.2.3 Δομή των υπερκελιών

Για την επίτευξη τέλει ανώμαλης ανάκλασης, σχεδιάστηκε ένα υπερκελί (supercell) αποτελούμενο από N μοναδιαία κελιά (ώστε η συνολική έκταση να είναι $D = Nd$) με μεταβαλλόμενες διαφορετικές χωρητικότητες C_1, C_2, \dots, C_N . Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται ένα υπερκελί διατεταγμένο κατά μήκος του άξονα x που μπορεί να εκτελέσει ανώμαλη ανάκλαση στο επίπεδο πρόσπτωσης x-z. Σημειώνεται πως η μεταβολή του μεγέθους του υπερκελιού, σε διάσταση μεγαλύτερη του μήκους κύματος, επιτρέπει την ανώμαλη ανάκλαση σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Για παράδειγμα, όταν το μέγεθος του υπερκελιού D είναι $2\lambda_0 < D < 3\lambda_0$ υπό κανονική πρόσπτωση έχουμε τέσσερις τάξεις περίθλασης ($m = \pm 1, \pm 2$) εκτός από την κανονική ($m = 0$), για κάθε τάξη περίθλασης αντιστοιχεί και μια θύρα. Η γωνία ανάκλασης για μια δεδομένη τάξη περίθλασης m, προκύπτει από την εξίσωση του διαφράγματος περίθλασης (diffraction grating equation),

$$k_0(\sin \theta_r - \sin \theta_i) = m(2\pi/D). \quad (4.1)$$

Η παραπάνω εξίσωση προσδιορίζει πως μία περιοδική διάταξη (διάφραγμα) σκεδάζει ένα επίπεδο κύμα σε διακριτές κατευθύνσεις που εμφανίζουν έντονη εξάρτηση (διασπορά) από τη συχνότητα, μέσω του κυματικού αριθμού k_0 . Συγκεκριμένα, για τη κάθετη πρόσπτωση ($\theta_i = 0$) η γωνία «ανώμαλης» ανάκλασης δίνεται από $\theta_r = \sin^{-1}(m\lambda_0/D)$. Στο Σχήμα 4.5(γ) βλέπουμε τις ανώμαλες γωνίες ανάκλασης για την πρώτη και τη δεύτερη τάξη περίθλασης ως προς τον αριθμό των κελιών που αποτελούν το υπερκελί, όπου βλέπουμε πως καλύπτεται ένα εύρος μεταξύ 75° και 30° με το πολύ 16 κελιά

Ως πρώτο βήμα στη διαδικασία σχεδιασμού επιβάλλουμε ένα γραμμικό «προφίλ» φάσης στα επιμέρους μοναδιαία κελιά κατά μήκος του υπερκελίου, $\varphi(x) = \varphi_0 - m(\frac{2\pi}{D})x$, «προωθώντας» έτσι μια συγκεκριμένη τάξη περίθλασης δηλαδή μια συγκεκριμένη γωνία σκέδασης. Σημειώνουμε ότι η αντίσταση R των μεταβλητών φορτίων τίθεται σκόπιμα στο μηδέν σε όλα τα κελιά για να ελαχιστοποιηθεί έτσι η απορρόφηση. Στη συνέχεια, για να καθορίσουμε τις απαιτούμενες χωρητικότητες των φορτίων, ώστε να έχουμε μία καλή αρχική εκτίμηση για την γραμμική-κλίση της φάσης των κελιών, χρειαζόμαστε μια γραφική παράσταση που να συσχετίζει τη φάση της ανάκλασης του μοναδιαίου κελιού με τη χωρητικότητα του φορτίου. Για να είναι ρεαλιστικές οι τιμές χωρητικότητας, ορίζουμε να κυμαίνονται στην περιοχή [1, 5] pF, αλλά παρατηρούμε πως ακόμη και υπό αυτό τον περιορισμό υπάρχει πρόσβαση σε ένα μεγάλο εύρος φάσης ανάκλασης, μεγαλύτερο των 300° , ενώ το πλάτος ανάκλασης παραμένει σχεδόν μοναδιαίο. Μία τέτοια γραφική παράσταση παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.4** για ένα προσπίπτον επίπεδο κύμα στη συχνότητα των 5 GHz.



Σχήμα 4.5: (α) Σχηματική απεικόνιση του υπερκελίου για την ανώμαλη ανάκλαση στο επίπεδο x - z . Τα διαφορετικά χρώματα των μεταβλητών RC φορτίων αντιπροσωπεύουν διαφορετικές ρυθμίσεις χωρητικότητας.

(β) Ονομασία θυρών και αντιστοιχία με τις τάξεις περίθλασης ανάκλασης για κάθετη πρόσπτωση σε κελί με διάσταση $D > 2\lambda$.

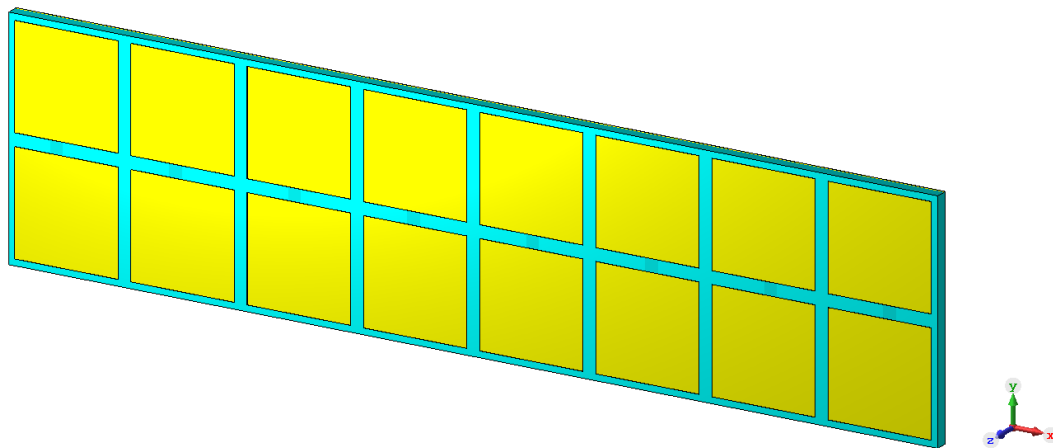
(γ) Οι γωνίες ανάκλασης για διαφορετικούς αριθμούς μοναδιαίων κελιών για την πρώτη και την δεύτερη τάξη περίθλασης (υποθέτοντας κάθετη πρόσπτωση).

4.2.4 Ανώμαλη ανάκλαση σε TE πόλωση

Για την επίτευξη ανώμαλης ανάκλασης για πρόσπτωση με την εγκάρσια ηλεκτρική (TE) πόλωση δημιουργήθηκε ένα υπερκελί το οποίο αποτελείται από 8 μοναδιαία κελιά κατά μήκος του άξονα x, δηλαδή $D = Nd_x = 72.96 \text{ mm} \sim 1.2\lambda_0$, όπως εικονίζεται στο **Σχήμα 4.6**. Σύμφωνα με την εξίσωση περίθλασης ($k_0 (\sin \theta_r - \sin \theta_i) = m \left(\frac{2\pi}{D}\right)$) για τη κάθετη πρόσπτωση (normal incidence), έχουμε $m = \pm 1$ τάξη περίθλασης στις κατευθύνσεις $\pm 55,3^\circ$. Χρησιμοποιώντας τη καμπύλη φάσης-χωρητικότητας **Σχήμα 4.4**, προσδιορίζουμε τις τιμές χωρητικότητας των φορτίων των μοναδιαίων κελιών για την επίτευξη του επιθυμητού γραμμικού προφίλ φάσης και τη προώθηση της $m = +1$ τάξη περίθλασης οι οποίες απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.7(α)**. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές χωρητικότητας, εκτελούμε προσομοίωση του υπερκελιού στο CST με τρεις TE θύρες (αφού $2\lambda > D > \lambda$) και λαμβάνουμε σαν αποτέλεσμα το παρακάτω πίνακα σκέδασης, που εμφανίζει τη σχέση της μετάδοσης μεταξύ των θυρών, δηλαδή των κατευθύνσεων. Ο πίνακας S που δίνεται παρακάτω αφορά το μέτρο των επιμέρους συντελεστών σκέδασης (ανάκλασης) στις τρεις θύρες σε dB.

$$|S|_{dB}^{init.} = \begin{bmatrix} -26.65 & -12.55 & -0.68 \\ -12.55 & -2.01 & -10.15 \\ -0.68 & -10.15 & -28.36 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Βλέπουμε ότι ο πίνακας είναι συμμετρικός, όπως υπαγορεύεται από την αμοιβαιότητα. Κατά τη κάθετη πρόσπτωση, δηλαδή από τη θύρα 1 (port 1), βλέπουμε πως η ισχύς ανακλάται πράγματι ως επί το πλείστον στη περίθλαση τάξης $m = +1$ (port 3), όπως φαίνεται από το υψηλό πλάτος της S_{31} στο πίνακα (1).



Σχήμα 4.6: Υπερκελί 8 μοναδιαίων κελιών κατά τον άξονα x σχεδιασμένο στο CST STUDIO SUITE. Τα ελεγχόμενα φορτία, σε κάθε κελί, είναι παράλληλα με τον y-άξονα.

Ωστόσο, υπάρχει κάποια ανεπιθύμητη ανάκλαση ως προς τη θύρα 2 ($m = -1$), η οποία αν και μικρή δεν είναι αμελητέα ($|S_{21}| = -12.55$ dB). Οι παρασιτικές ανακλάσεις αναμένονται, δεδομένου ότι η περιοδική προσέγγιση βάση της οποίας εξήχθη από το **Σχήμα 4.4** δεν είναι ακριβής όταν μεταβαίνουμε από μοναδιαίο κελί σε ένα υπερκελί καθώς υπάρχει μεταβολή του τοπικού πλάτους ανάκλασης μαζί με τη φάση της τοπικής ανάκλασης. Αυτό οφείλεται στη σύζευξη μεταξύ των γειτονικών κελιών και μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε με ανασχεδίαση της γεωμετρίας είτε με ρύθμιση των C τιμών.

Για τη μείωση των παρασιτικών ανακλάσεων έγινε βελτιστοποίηση των C τιμών με την χρήση του λογισμικού *CST STUDIO SUITE*, τα βελτιστοποιημένα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω πίνακα (2) :

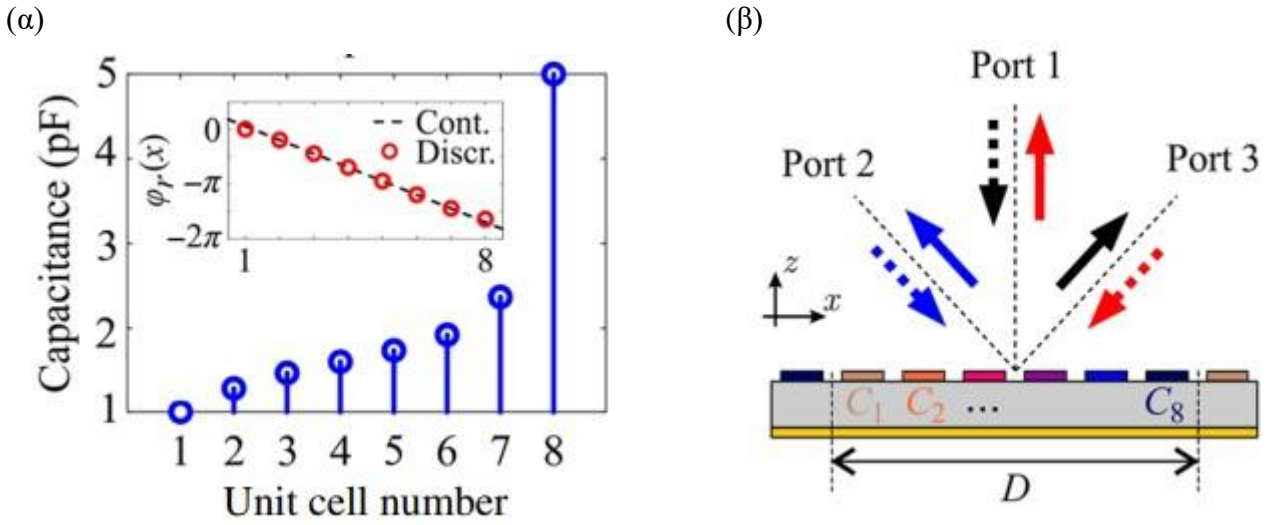
$$|S|_{dB}^{opt.} = \begin{bmatrix} -32 & -20 & -0.35 \\ -20 & -1.2 & -20 \\ -0.35 & -20 & -26 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Παρατηρούμε ότι με τη βελτιστοποίηση έχουμε υψηλότερο πλάτος ανάκλασης μεταξύ της θύρας 1 και θύρας 3 $|S_{31}| = |S_{13}| = -0.35$ dB όπως και για την οπισθοανάκλαση (retro-reflection) στην θύρα 2 $|S_{22}| = -1.2$ dB, ενώ το πλάτος ανάκλασης της θύρα 2 μεταξύ της θύρας 1 και της θύρας 3 είναι χαμηλότερο $|S_{12}| = |S_{21}| = -20$ dB και $|S_{23}| = |S_{32}| = -20$ dB με αποτέλεσμα να υπάρχει και μείωση των παρασιτικών ανακλάσεων. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές χωρητικότητάς πριν και μετά την βελτιστοποίηση για το υπερκελί 8 μοναδιαίων κελιών.

C(PF)	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
INIT.	1	1.25	1.41	1.56	1.75	1.92	2	5
OPT.	1	1.33	1.48	1.62	1.69	1.93	2	5

Πίνακας 1: Οι τιμές της χωρητικότητας C πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για το υπερκελί 8 μοναδιαίων κελιών κατά μήκος του άξονα x.

Ο τοπικός έλεγχος των φορτίων σε μια μεγάλη μεταεπιφάνεια μας δίνει τη δυνατότητα να αναδιατάσουμε το υπερκελί ώστε να επιτύχουμε ανώμαλη ανάκλαση σε διαφορετικές γωνίες, επιτρέποντας έτσι την αναδιαμόρφωση της λειτουργίας της μεταεπιφάνειας. Παρόμοια με το υπερκελί 8 μοναδιαίων κελιών ακολουθήσαμε την ίδια διαδικασία για ένα υπερκελί με 9 κελιά το οποίο αντιστοιχεί σε $m = \pm 1$ τάξη περίθλασης στις κατευθύνσεις $\pm 46.9^\circ$. Οι αντίστοιχοι πίνακες σκέδασης S πριν και μετά την βελτιστοποίηση είναι :



Σχήμα 4.7: (α) Οι τιμές χωρητικότητας των RC φορτίων ενός υπερκελίου που αποτελείται από 8 μοναδιαία κελιά για να πραγματοποιήσει ανώμαλη ανάκλαση στην πρώτη τάξη περίθλασης, (β) η ονομασία των θυρών και οι τρεις περιπτώσεις ανάκλασης του προσπίπτοντος κύματος για το γραμμικό προφίλ: 1 → 3, 2 → 2, 3 → 1.

$$|S|_{dB}^{init.} = \begin{bmatrix} -27.5 & -15 & -0.47 \\ -12.55 & -1.82 & -12.8 \\ -0.47 & -12.8 & -27.1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$|S|_{dB}^{opt.} = \begin{bmatrix} -30 & -32 & -0.35 \\ -32 & -1.7 & -20.5 \\ -0.35 & -20.5 & -26.7 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

C(PF)	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
INIT.	1	1.24	1.43	1.56	1.67	1.80	2	2.53	5
OPT.	1.16	1.15	1.44	1.58	1.76	1.69	2.01	2.88	4.96

Πίνακας 2: Οι τιμές της χωρητικότητας C πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για το υπερκέλι 9 μοναδιαίων κελιών κατά μήκος του άξονα x

Τέλος, από το **Σχήμα 4.5(γ)**, βλέπουμε πως χρησιμοποιώντας υψηλότερη τάξη περίθλασης μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε την απόσταση μεταξύ των διακριτών γωνιών ανάκλασης που προκύπτουν από τη λειτουργία της πρώτης τάξης περίθλασης. Αυτό μας επιτρέπει μεγαλύτερη αναλυτικότητα στη στόχευση της ανακατευθυνόμενης δέσμης. Για να υπάρχει $m = \pm 2$ τάξη περίθλασης πρέπει $D > 2\lambda$, οπότε επιλέχτηκε ένα υπερκέλι που αποτελείται από 17 ενωμένα μοναδιαία κελιά, το οποίο δίνει ανάκλαση σε κατεύθυνση στις $\pm 50.7^\circ$ η οποία είναι μεταξύ των γωνιών 55.3° και 46.9° των δύο προηγούμενων υπερκελιών $N=8$ και $N=9$ κελιών. Στη περίπτωση αυτή οι τιμές της χωρητικότητας που θα βάλουμε κατά μήκος των κελιών θα είναι τέτοιες ώστε το γραμμικό προφίλ φάσης να καλύπτει το διάστημα $0-4\pi$ (ενώ για τις $m = \pm 1$ τάξη περίθλασης το

γραμμικό προφίλ της φάσης ήταν $0-2\pi$). Οι πίνακες παραμέτρων S πριν και μετά την βελτιστοποίηση για διέγερση από την θύρα 1 είναι :

$$|S|_{dB}^{init.} = [-16.5 \quad -13.5 \quad -24 \quad -23 \quad -0.74], \quad (5)$$

$$|S|_{dB}^{opt.} = [-19.5 \quad -20.1 \quad -21.5 \quad -28 \quad -0.5]. \quad (6)$$

Μετά τη βελτιστοποίηση οι παρασιτικές ανακλάσεις στη θύρα 2 (port 2, $m = -1$ τάξη περίθλασης) μειώνονται αισθητά καθώς από $|S_{12}|_{dB}^{init.} = -13.5dB$ βελτιστοποιήθηκε σε $|S_{12}|_{dB}^{opt.} = -20.1dB$.

4.2.5 Ανώμαλη ανάκλαση σε TM πόλωση

Η ιδιότητα των μοναδιαίων κελιών να μπορούν να αναδιαταχθούν εύκολα μας δίνει τη δυνατότητα εκτός από την TE (transverse electric) πόλωση να μπορούμε να επιτύχουμε ανώμαλη ανάκλαση και στην TM (transverse magnetic) πόλωση. Σε αυτή τη περίπτωση δημιουργήσαμε ένα υπερκελί με 5

μοναδιαία κελιά διατεταγμένα κατά τον άξονα y για να πραγματοποιήσουμε την απαιτούμενη κλίση φάσης κατά τη διεύθυνση y . Το εν λόγω υπερκελί ($D = Ndx = 91.2 \text{ mm} \sim 1.5\lambda_0$), αντιστοιχεί σε $m = \pm 1$ τάξη περίθλασης στις κατευθύνσεις $\pm 41.1^\circ$. Όπως και στα προηγούμενα υπερκελιά έτσι και σε αυτό τις τιμές της χωρητικότητας τις εντοπίζουμε χρησιμοποιώντας τη καμπύλη φάσης-χωρητικότητας **Σχήμα 4.4**. Οι πίνακες παραμέτρων S πριν και μετά τη βελτιστοποίηση είναι :

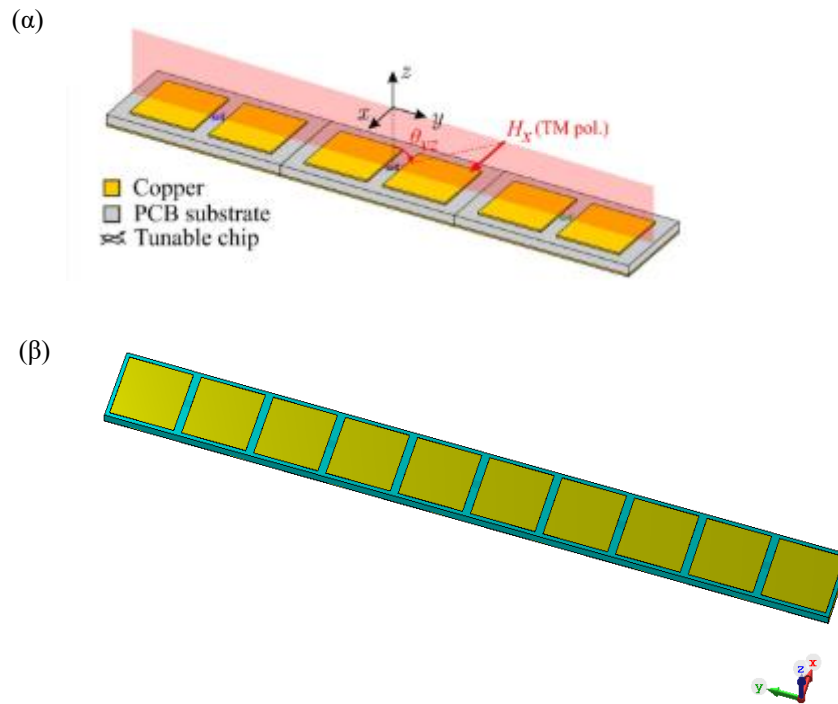
$$|S|_{dB}^{init.} = \begin{bmatrix} -15.72 & -9.18 & -1.02 \\ -9.18 & -2.01 & -12.8 \\ -1.02 & -7.7 & -34.66 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$|S|_{dB}^{opt.} = \begin{bmatrix} -28.5 & -32.5 & -0.33 \\ -32.5 & -0.72 & -25 \\ -0.33 & -25 & -25 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Στα αρχικά αποτελέσματα παρατηρούμε ότι δεν είναι ικανοποιητικά σε σχέση με αυτά των προηγούμενων υπερκελιών που αλληλοεπιδρούσαν με την TE (transverse electric) πόλωση Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη σύζευξη των κελιών (αφού το E-πεδίο είναι πλέον παράλληλο στη διάσταση y κατά την οποία διατάσσονται κελιά) αλλά και στο γεγονός ότι το μοναδιαίο κελί έχει μεγαλύτερο μήκος ($d_y = 2d_x = 18.24 \text{ mm} \sim \lambda_0/3$), που οδηγεί σε μια διαφορετική προσέγγιση της απαιτούμενης φάσης ανάκλασης. Ωστόσο, ακόμη και σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα βελτιώθηκαν αισθητά μέσω της βελτιστοποίησης.

C(pF)	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
INIT.	1	1.6	1.5	2.15	3.5
OPT.	1	1.69	1.49	2.19	3.2

Πίνακας 3: Οι τιμές της χωρητικότητας C πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για το υπερκέλι 5 μοναδιαίων κελιών κατά μήκος του άξονα y .



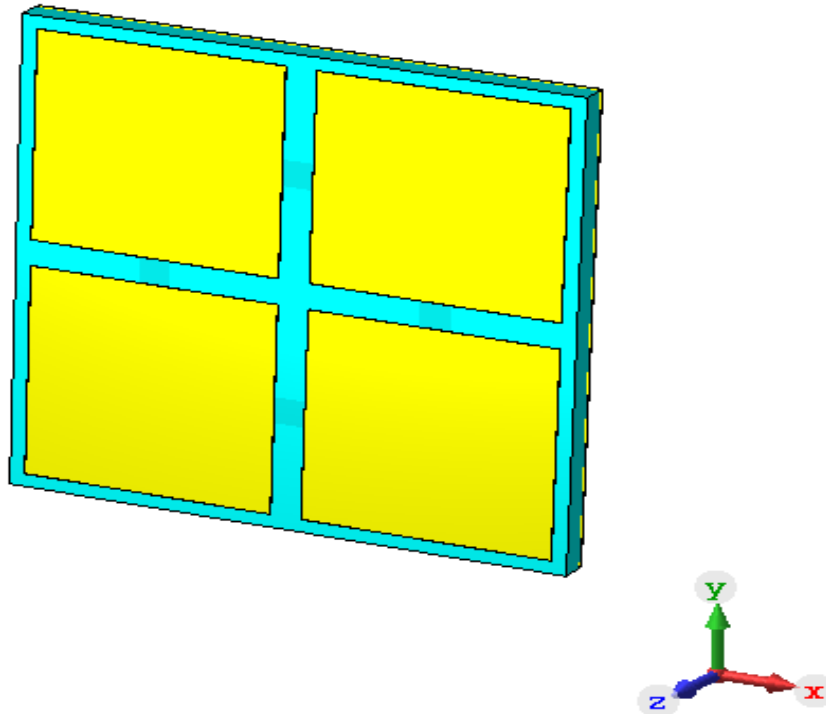
Εικόνα 4.8: (α) Ανώμαλη ανάκλαση στο επίπεδο y - z TM (transverse magnetic) πόλωση με ένα υπερκελί $N=3$ κατά μήκος του άξονα y που προωθεί τη πρώτη τάξη περίθλασης. (β) Σχηματική απεικόνιση υπερκελίου 5 μοναδιαίων κελιών κατά μήκος του άξονα y σχεδιασμένο στο *CST STUDIO SUITE*.

4.3 Μοναδιαία κελιά για ανεξάρτητο πλήρη έλεγχο δύο πολώσεων

4.3.1 Μοναδιαίο κελί 2x2

Έχοντας κατανοήσει το τρόπο λειτουργίας της ελεγχόμενης μεταεπιφάνειας της προηγούμενης ενότητας η μελέτη προχώρησε στη σχεδίαση και ανάλυση νέων μοντέλων ελεγχόμενων μεταεπιφανειών των οποίων τα μοναδιαία κελιά έχουν παρόμοια δομή με το κελί 1x2, αλλά είναι κατάλληλα σχεδιασμένα ώστε να έχουν τη δυνατότητα να αλληλοεπιδρούν συγχρόνως και με τις δύο κάθετες πολώσεις TE (transverse electric) και TM (transverse magnetic), χωρίς να απαιτείται αναδιάταξη των κελιών όπως γίνεται με το κελί 1x2 (**Σχήμα 4.1**). Η ελεγχόμενη μεταεπιφάνεια που θα εξετάσουμε στην ενότητα αποτελείται, όπως και πριν, από μια σειρά περιοδικών μεταλλικών καλυμμάτων (patches) πάνω σε ένα γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα έχοντας τοποθετημένα τέσσερα ελεγχόμενα φορτία RC που συνδέουν τα τέσσερα μεταλλικά καλύμματα κατά το μήκος της κατεύθυνσης x και y σχηματίζοντας έτσι ένα τετράγωνο μοναδιαίο κελί τύπου «2x2», όπως στο **Σχήμα 4.9**. Με την καταχώρηση των κατάλληλων τιμών της αντίστασης R και της χωρητικότητας

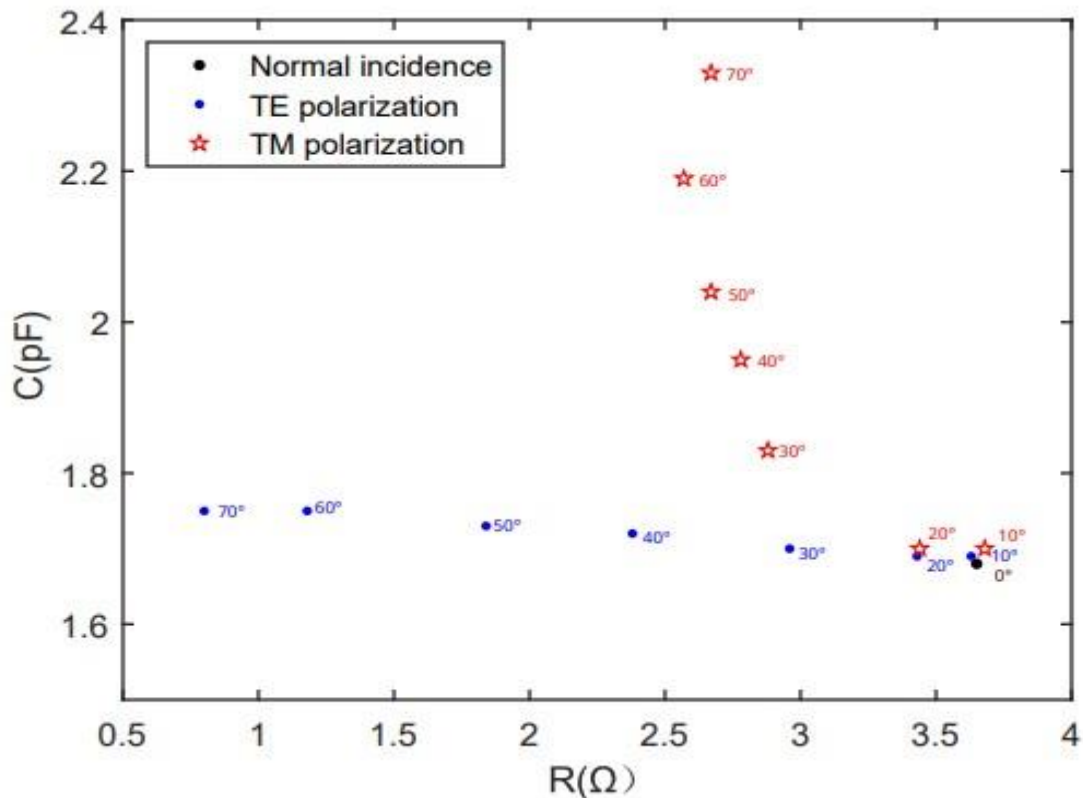
C η ελεγχόμενη μεταεπιφάνεια έχει «ανισοτροπία» δηλαδή διαφορετική απόκριση ανάλογα με την πόλωση. Π.χ., μπορεί να απορροφά επιλεκτικά μία μόνο από τις δύο γραμμικές πολώσεις (TE ή TM) και να ανακλά την άλλη, για διαφορετικές συχνότητες ή/και γωνίες πρόσπτωσης.



Σχήμα 4.9: Τετράγωνο κελί για έλεγχο δύο πολώσεων. Στην εργασία αυτή, τα τέσσερα RC φορτία τέθηκαν ίδια ανά δύο, δηλαδή σχηματίζοντας δύο διαφορετικά ζευγάρια (κατά y και x άξονες).

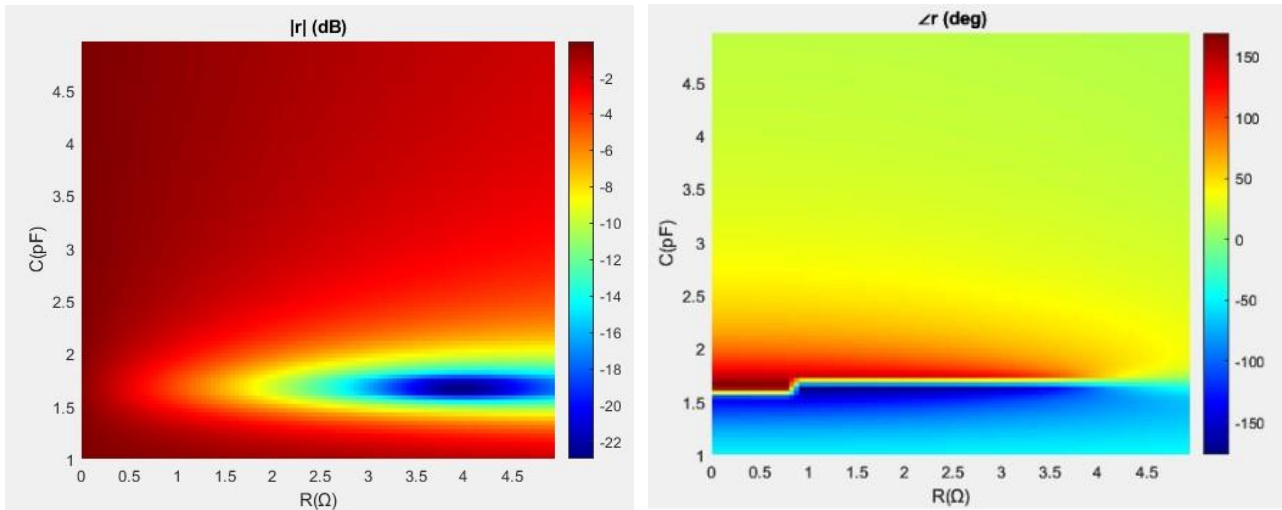
Το **Σχήμα 4.10** μας δείχνει τις τιμές R και C που πρέπει να λάβουν τα ολοκληρωμένα κυκλώματα στη συχνότητα των 5 GHz για την επίτευξη πλήρης απορρόφησης, δηλαδή εκεί που ο συντελεστής ανάκλασης $|\Gamma|$ έχει τιμή μικρότερη από αυτή των -30 dB, για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και στις δύο πολώσεις TE και TM. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατηρούμε ότι στη κάθετη πρόσπτωση ($\theta_i = 0^\circ$) με τιμές $R = 3.65 \Omega$ και $C = 1.68$ pF έχουμε συντελεστή ανάκλασης $|\Gamma| < -30$ dB που δείχνει σχεδόν τέλεια απορρόφηση. Για τη πλάγια πρόσπτωση μεταβάλλουμε τη γωνία πρόσπτωσης από 10° έως 70° , όπως πραγματοποιήθηκε παρομοίως στη προηγούμενη ενότητα με το κελί 1×2 , βλέπε εικόνα 4.2. Για την πόλωση TE (transverse electric) η απαιτούμενη χωρητικότητα C κυμαίνεται με μικρές διαφορές, για $\theta_i = 10^\circ$ έχουμε $C = 1.68$ pF ενώ για $\theta_i = 70^\circ$ έχουμε $C = 1.75$ pF, αντιθέτως η αντίσταση R κυμαίνεται από $R = 3.63 \Omega$ (που αντιστοιχεί στις 10°) έως $R = 0.8 \Omega$ (που αντιστοιχεί στις 70°). Στην TM (transverse magnetic) οι τιμές μεταβάλλονται τόσο στο R όσο και στο C καθώς μετατοπίζεται η γωνία πρόσπτωσης. Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι οι τιμές RC των δύο μοναδιαίων κελιών 1×2 και 2×2 έχουν μικρές αποκλίσεις το οποίο είναι λογικό διότι η δομή και η σύνθεση τους είναι παρόμοια. Επίσης στο **Σχήμα 4.11** δείχνουμε ένα χρωματικό χάρτη που δείχνει το πλάτος και τη φάση του συντελεστή

ανάκλασης ως προς τις αλλαγές των R και C όταν η μεταεπιφάνεια ρυθμίζεται ομοιογενώς για κάθετη γωνία πρόσπτωσης ($\theta_i = 0^\circ$) στα 5 GHz.

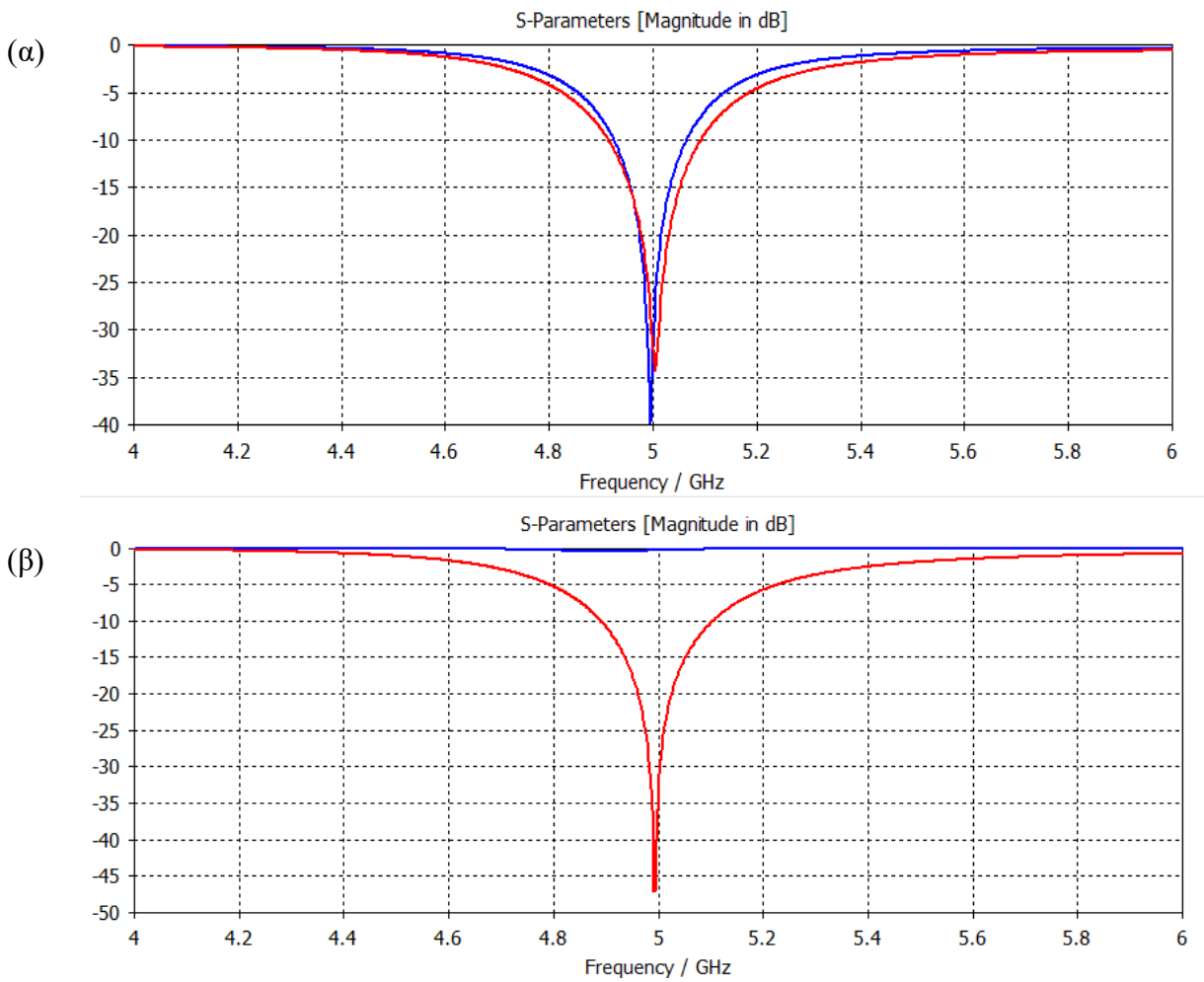


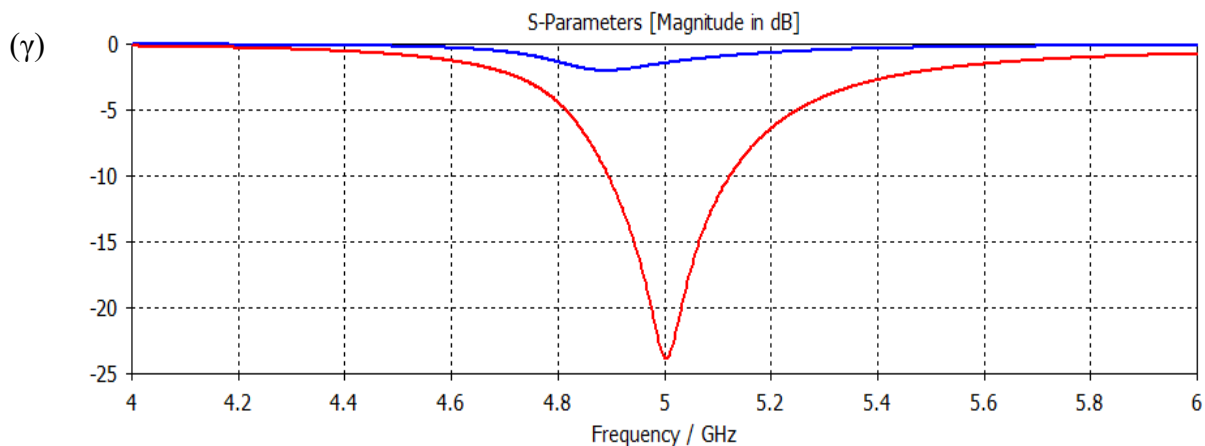
Σχήμα 4.10: Οι απαιτούμενες τιμές R και C των ελεγχόμενων φορτίων για την επίτευξη τέλει απορρόφησης σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης για τις δύο ορθογώνιες πολώσεις TE και TM στο κελί τύπου 2×2 . Η συχνότητα λειτουργίας είναι 5 GHz.

Με την μελέτη και την επιβεβαίωση κάποιων βασικών λειτουργιών του νέου μοντέλου μεταεπιφάνειας προχωρήσαμε στην υλοποίηση πιο πολύπλοκων λειτουργιών, όπως στην επιλεκτική απορρόφηση των TE και TM πολώσεων σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης με διαφορετική γωνία πλάγιας πόλωσης. Στο **Σχήμα 4.12** φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από υπολογιστικές προσομοιώσεις της μεταεπιφάνειας. Στο **Σχήμα 4.12 (α)** παρατηρούμε την μεταεπιφάνεια να πραγματοποιεί τέλεια απορρόφηση και στις δύο πολώσεις με γωνία πρόσπτωσης $\theta_i = 45^\circ$ και κατεύθυνση πόλωσης $\varphi = 60^\circ$. Τα αποτελέσματα από το **Σχήμα 4.12(β)** και **Σχήμα 4.12(γ)** προκύπτουν για την περίπτωση της επιλεκτικής απορρόφησης, η μεταεπιφάνεια πραγματοποιεί πλήρη ανάκλαση της TE (transverse electric) πόλωσης και πλήρη απορρόφηση της TM (transverse magnetic) πόλωσης με γωνία πρόσπτωσης $\theta_i = 15^\circ$ και κατεύθυνση πόλωσης $\varphi = 0^\circ$ και $\varphi = 200^\circ$ αντίστοιχα.



Σχήμα 4.11: Ανεξάρτητος έλεγχος του πλάτους της ανάκλασης σε dB (a) και της φάσης σε μοίρες (b) ρυθμίζοντας την αντίσταση R και χωρητικότητα C του ελεγχόμενου φορτίου . Παρατηρούμε πως οι τιμές C και R όπου το κελί 2x2 κάνει απορρόφηση είναι ίδιες με αυτές του αρχικού μοντέλου.

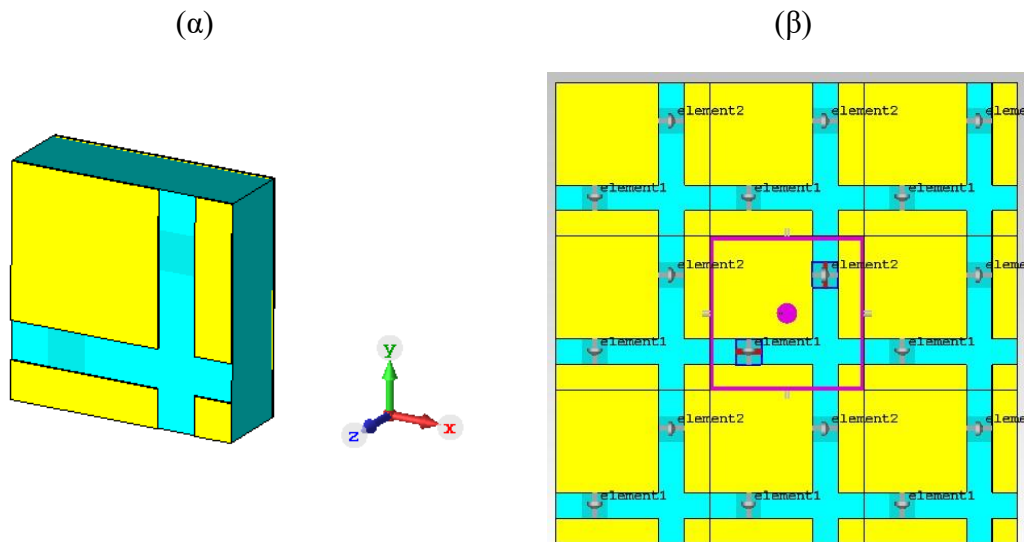




Σχήμα 4.12: Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από προσομοιώσεις του κελιού «2x2», με μπλε χρώμα συμβολίζετε η TE πόλωση και με κόκκινο η TM. (α) Πλήρης απορρόφηση και των δυο κάθετων πολώσεων TE και TM, αμφότερα με γωνία πρόσπτωσης του κύματος $\theta_i = 45^\circ$ και κατεύθυνση πόλωσης $\varphi = 60^\circ$. (β) Πλήρης ανάκλαση της TE πόλωσης και πλήρη απορρόφηση της TM πόλωσης με γωνία πρόσπτωσης $\theta_i = 15^\circ$ χωρίς στροφή πόλωσης, δηλαδή $\varphi = 0^\circ$. (γ) Πλήρης ανάκλαση της TE πόλωσης και πλήρης απορρόφηση της TM πόλωσης με γωνία πρόσπτωσης $\theta_i = 15^\circ$ και κατεύθυνση πόλωσης $\varphi = 200^\circ$.

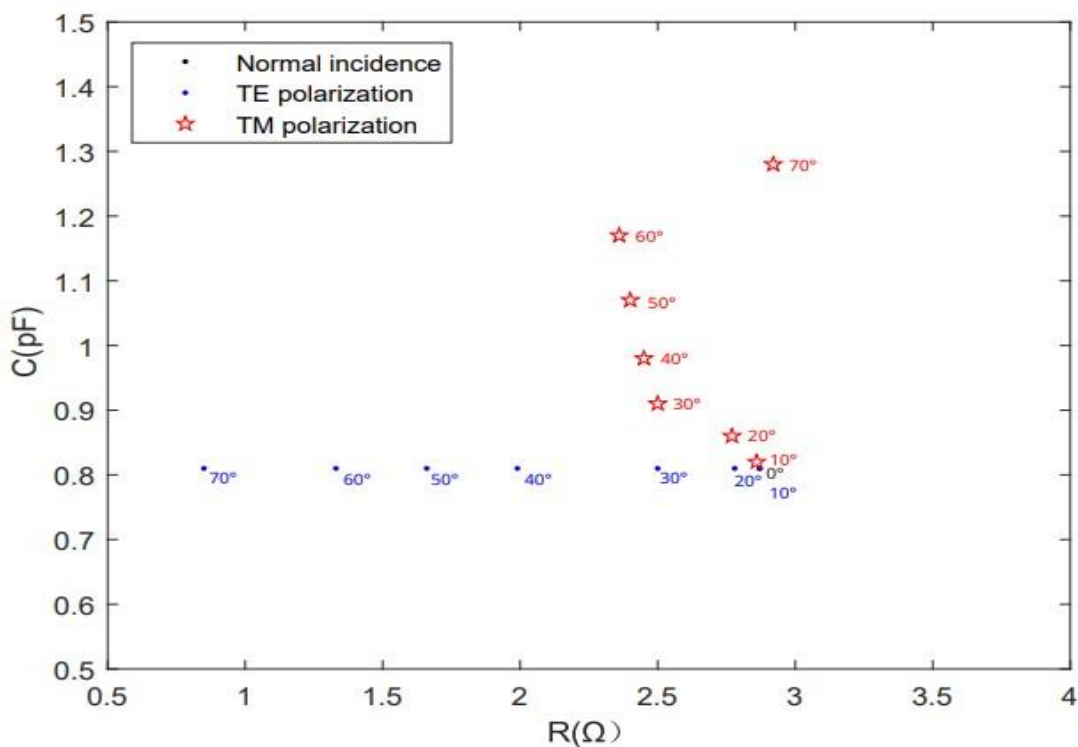
4.3.2 Μοναδιαίο κελί 1x1

Ένα καινούργιο μοντέλο ελεγχόμενης μεταεπιφάνειας που μελετήθηκε ώστε να έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί πολλαπλές λειτουργίες και στις δυο κάθετες πολώσεις είναι αυτό στο **Σχήμα 4.13**. Στόχος μας είναι ο ανασχεδιασμός της γεωμετρίας ώστε να επιτευχθεί συντονισμός στην ίδια συχνότητα με τα προηγούμενα κελιά (1x2 και 2x2) για τη συχνότητα 5 GHz. Το μοναδιαίο κελί 1x1 έχει σχεδιαστεί να κατασκευαστεί πάνω σε ένα λεπτό γειωμένο διηλεκτρικό πάχους $t = 0.8$ mm, τα τετράγωνα καλύμματα θα αποτελούνται από χαλκό πλάτους $w = 2$ mm με πάχος επιμετάλλωσης 18 μm και η απόσταση με τα απέναντι κελιά είναι 0.4 mm όπου συνδέεται το ρυθμιζόμενο κύκλωμα RC. Το λεπτό υπόστρωμα είναι διηλεκτρικό υψηλής συχνότητας Rogers RT/Duroid 5880, το οποίο χαρακτηρίζεται από τη σχετική διαπερατότητα $\epsilon_r = 2.2(1 - j \tan\delta)$ με εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = 0.0009$. Εκτός από τις διαφορετικές παραμέτρους, η γεωμετρία για το μοναδιαίο κελί 1x1 ανασχεδιάστηκε σε σχέση με τα προηγούμενα κελιά. Σε κάθε περίπτωση, μία σημαντική διαφορά είναι πως τα μοναδιαία κελιά της μεταεπιφάνειας είναι όλα «ηλεκτρικά ενωμένα» μεταξύ τους λόγω των ελεγχόμενων RC, και προς τις δύο εγκάρσιες κατευθύνσεις x και y, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.13(β)**. Αυτό αναμένεται να έχει κάποιες αρνητικές παρενέργειες, όπως ισχυρότερη σύζευξη μεταξύ διαφορετικών κελιών σε ανομοιογενείς μεταεπιφάνειες (όπως τα διαφράγματα περίθλασης για ανώμαλη ανάκλαση).



Σχήμα 4.13: (α) Μοναδιαίο κελί για λειτουργία δύο πολώσεων, (β) υπερκελί.

Στο **Σχήμα 4.14** βλέπουμε τις τιμές R και C όπου το μοναδιαίο κελί κάνει πλήρη απορρόφηση στα 5 GHz στις δύο κύριες πολώσεις για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Παρατηρούμε ότι μοιάζει σχηματικά με τα 1×2 και 2×2 κελιά λόγω της γεωμετρίας του, όμως οι τιμές του είναι διαφορετικές, όπως είναι αναμενόμενο, λόγω των διαφορετικών παραμέτρων του (πάχος, πλάτος).

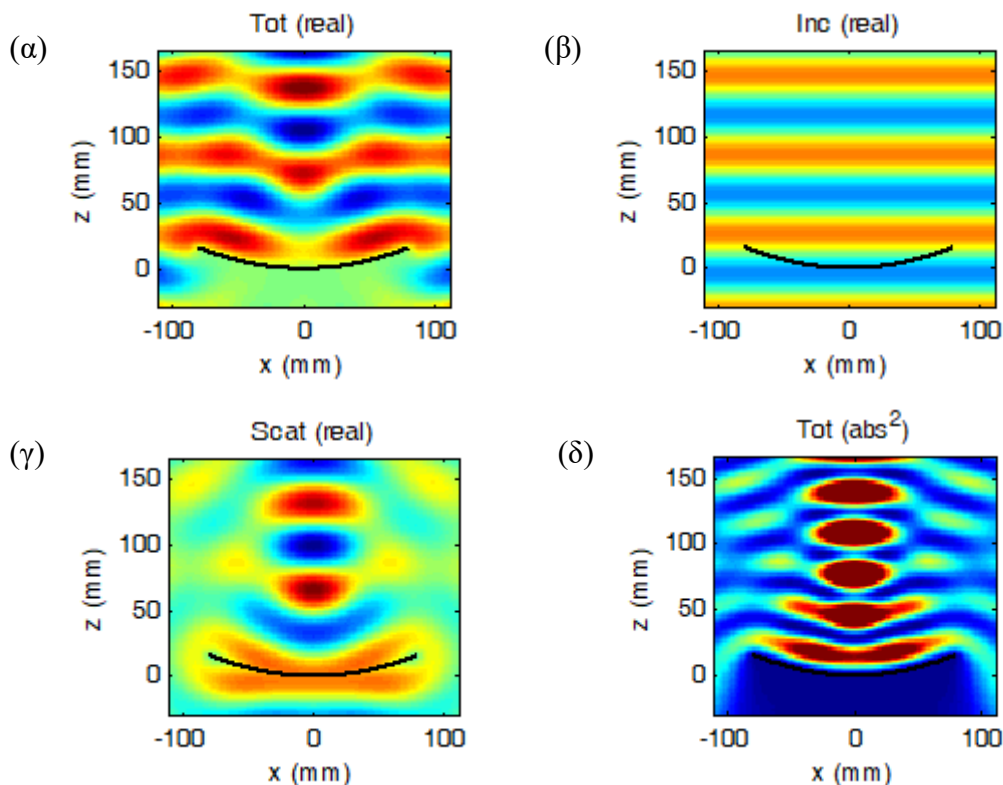


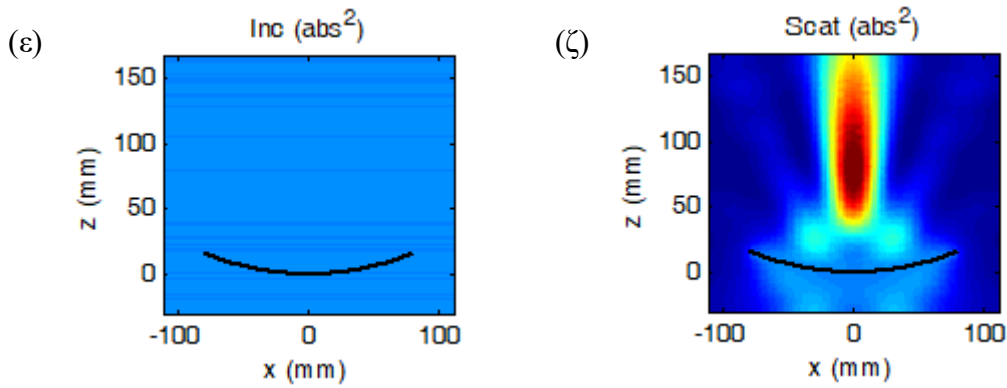
Σχήμα 4.14: Οι απαιτούμενες τιμές R και C των ελεγχόμενων φορτίων για την επίτευξη τέλει απορρόφησης σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης για τις δύο ορθογώνιες πολώσεις TE και TM στο κελί 1×1 . Η συχνότητα λειτουργίας είναι 5 GHz.

4.4 Έλεγχος μετώπου κύματος σε επίπεδες μεταεπιφάνειες

Με την μέχρι στιγμής μελέτη να επικεντρώνεται ως επί το πλείστον στο σχεδιασμό μοναδιαίων κελιών ώστε να πραγματοποιούν πολλαπλές ρυθμιζόμενες λειτουργίες, όπως ανάκλαση και απορρόφηση των προσπίπτων επίπεδων κυμάτων, προχωρήσαμε στην μελέτη πιο πολύπλοκων λειτουργιών που μπορούν να βρουν εφαρμογή σε ασύρματες επικοινωνίες. Μία τέτοιου είδους λειτουργία είναι η εστίαση δέσμης σε ένα τυχαίο σημείο στον 3Δ χώρο, ώστε να εξετάσουμε κατά πόσο είναι ικανή μία επίπεδη μεταεπιφάνεια να πραγματοποιήσει τη λειτουργία ενός «πιάτου» παραβολικού σχήματος (άρα μεγάλου όγκου), του οποίου η χρήση είναι ευρέως διαδεδομένη στις μέρες μας στον τηλεπικοινωνιακό τομέα, π.χ., στις ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων όπου απαιτείται μεγάλο κέρδος.

Στο **Σχήμα 4.15** παρατηρούμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από CST προσομοίωση για την εστίαση δέσμης του παραβολικού πιάτου από PEC υλικό (τέλειος ανακλαστήρας) στην συχνότητα των 5 GHz από κάθετη πρόσπτωση ($\theta_i = 0^\circ$). Εικονίζεται το συνολικό πεδίο (που υπολογίζει το CST) και το σκεδαζόμενο, που εξήχθη αφαιρώντας από το συνολικό το γνωστό προσπίπτον. Στην προσομοίωση αυτή η απόσταση του εστιακού σημείου (focal spot) είναι $f_d = 100$ mm, κάθετα από το κέντρο του πιάτου, και η τοπική απόκλιση του από το $z=0$ επίπεδο, δz , δίνεται από τη γεωμετρική οπτική ως $\delta z(\rho) = \rho^2/4f_d$, όπου ρ είναι η εγκάρσια απόσταση από τον οπτικό άξονα. Σημειώστε πως το πιάτο θεωρείται άπειρο κατά τον y -άξονα, κάτι που υλοποιήθηκε υπολογιστικά με συνθήκη PEC στα y -όρια του χώρου και υπονοεί λειτουργία σε TE πόλωση (για TM πόλωση επιλέξαμε PMC συνθήκη). Στην περίπτωση αυτή, εκτροπές αναμένονται λόγω της περίθλασης που οφείλεται στο ότι η διάμετρος του ανοίγματος του πιάτου είναι μόλις 2,5λ.





Σχήμα 4.15: Λειτουργία εστίασης ενός παραβολικού PEC πιάτου στα 5 GHz, (α) Διάγραμμα του συνολικού πεδίου του κύματος. (β) Διάγραμμα πεδίου πρόσπτωσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. (γ) Διάγραμμα σκεδαζόμενου πεδίου. (δ) Διάγραμμα ισχύος του συνολικού πεδίου του κύματος. (ε) Διάγραμμα ισχύος του πεδίου πρόσπτωσης του κύματος. (ζ) Διάγραμμα ισχύος του σκεδαζόμενου πεδίου.

Όπως είδαμε, με τον κατάλληλο σχεδιασμό της γεωμετρίας, του μεγέθους, της διάταξης και επιλογής του κατάλληλου διηλεκτρικού οι μεταεπιφάνειες μπορούν να αλλάζουν τη φάση του προσπίπτοντος μετώπου κύματος σε όλη την επιφάνεια, επιτρέποντας την ανακατεύθυνση ή την εστίαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε επιθυμητό σημείο. Όταν ένα επίπεδο κύμα αλληλοεπιδρά με μια μεταεπιφάνεια σχεδιασμένη για εστίαση, η μεταεπιφάνεια μεταβάλλει τοπικά την φάση του προσπίπτοντος μετώπου κύματος, δημιουργώντας σκεδαζόμενο μέτωπο κύματος με την επιθυμητή εποικοδομητική παρεμβολή στο σημείο εστίασης, ενώ παράλληλα καταστέλλει τις συνεισφορές/συμβολή από/προς άλλες περιοχές.

Η μεταεπιφάνεια που εξετάσαμε ώστε να πραγματοποιήσει τη λειτουργία ενός παραβολικού πιάτου αποτελείται από 17 μοναδιαία κελιά 1×2 , **Σχήμα 4.16**, ίδια με αυτά που αναλύθηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Η επιλογή του συγκεκριμένου υπερκελίου έγινε λόγω του μεγέθους του, το οποίο είναι μεγαλύτερο του μήκους του προσπίπτοντος κύματος, ώστε να έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει μεγαλύτερους ρυθμούς περίθλασης, συγκεκριμένα υποστηρίζει $m = \pm 2$ τάξη περίθλασης. Στα y -όρια της διάταξης επιλέχθηκαν PEC συνθήκες (οπότε έχουμε κύματα με TE πόλωση, δηλαδή με E-πεδίο κατά τον y -άξονα).

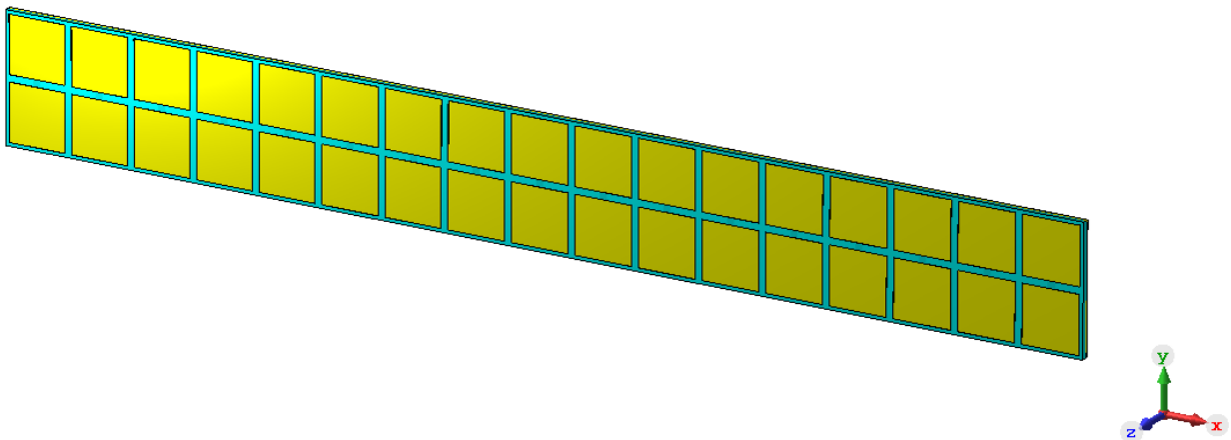
Για να έχει την ικανότητα το υπερκελί να πραγματοποιήσει τη λειτουργία ενός παραβολικού πιάτου πρέπει να ρυθμίσουμε τα RC φορτία με τις κατάλληλες τιμές χωρητικότητας και αντίστασης, η τιμή της αντίστασης R γνωρίζουμε εκ των προτέρων ότι είναι μηδέν ώστε να ελαχιστοποιήσουμε την απορρόφηση και να έχουμε τέλεια ανάκλαση. Για να εντοπίσουμε τις χωρητικότητες C χρειάζεται στην αρχή να εντοπίσουμε την διαφορά φάσης μεταξύ της φάσης της ακτίνας που προσπίπτει σε συγκεκριμένο σημείο της μεταεπιφάνειας και της φάσης που απαιτείτε ώστε να καταλήξει στο σημείο εστίασης, ο υπολογισμός της διαφορά φάσης προκύπτει από την γενική εξίσωση (2.1) που αναλύσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην περίπτωση μας όμως που έχουμε κάθετη πρόσπτωση κάνουμε χρήση της εξίσωσης (2.3)

$$\Delta\Phi_0(x) = k_0(f - \sqrt{f^2 + x_c^2}),$$

με f η κάθετη απόσταση του σημείου εστίασης από την επίπεδη μεταεπιφάνεια και x_c η εγκάρσια απόσταση της εστίας από τον άξονα (κέντρο) της μεταεπιφάνειας. Με τον εντοπισμό της διαφοράς φάσης του κάθε κελιού ξεχωριστά χρησιμοποιούμε το διάγραμμα φάσης-χωρητικότητας **Σχήμα 4.4** ώστε να εντοπίσουμε τις κατάλληλες τιμές C . Στον πίνακα 4 βλέπουμε τις τιμές της χωρητικότητας που καταχωρήθηκαν σε κάθε κελί ώστε το υπερκελί να πραγματοποιήσει εστίαση δέσμης στο κέντρο της μεταεπιφάνειας με απόσταση $f = 100 \text{ mm}$ **Σχήμα 4.17**.

C(pF)	C₁	C₂	C₃	C₄	C₅	C₆	C₇	C₈	C₉
value	1.67	1.77	1.89	2	2.29	2.68	3.39	4.39	5
C(pF)	C₁₀	C₁₁	C₁₂	C₁₃	C₁₄	C₁₅	C₁₆	C₁₇	
value	4.39	3.39	2.68	2.29	2	1.89	1.77	1.67	

Πίνακας 4: Οι τιμές της χωρητικότητας C του υπερκελιού (supercell) 17 μοναδιαίων κελιών για εστίαση δέσμης στο κέντρο της μεταεπιφάνειας με απόσταση $f = 100 \text{ mm}$



Σχήμα 4.16: Υπερκελί που αποτελείτε από 17 μοναδιαία κελιά 1×2 κατά τον x -άξονα, με πλάτος κελιού $9,12 \text{ mm}$ και πάχος $1,016 \text{ mm}$. Το καθένα έχει ενσωματωμένο από ένα ελεγχόμενο RC φορτίο.

Ένας απλός τρόπος για τον έλεγχο της φάσης είναι, αντί για RC φορτία, να έχουμε κύβους από διηλεκτρικό με ίδιες διαστάσεις (πλάτος, πάχος) αλλά με την κατάλληλη σχετική διηλεκτρική σταθερά, ϵ_r δημιουργώντας έτσι μια ισοδύναμη επίπεδη μεταεπιφάνεια για μία συγκεκριμένη-συχρότητα. Για τον υπολογισμό της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r με κάθετη πρόσπτωση πρέπει ο συντελεστής ανάκλασης Γ να ισούται με το επιθυμητό συντελεστή ανάκλασης Γ_x , δηλαδή $\Gamma = \Gamma_x$. Οι εξισώσεις του συντελεστή ανάκλασης και του επιθυμητού συντελεστή ανάκλασης αντίστοιχα είναι:

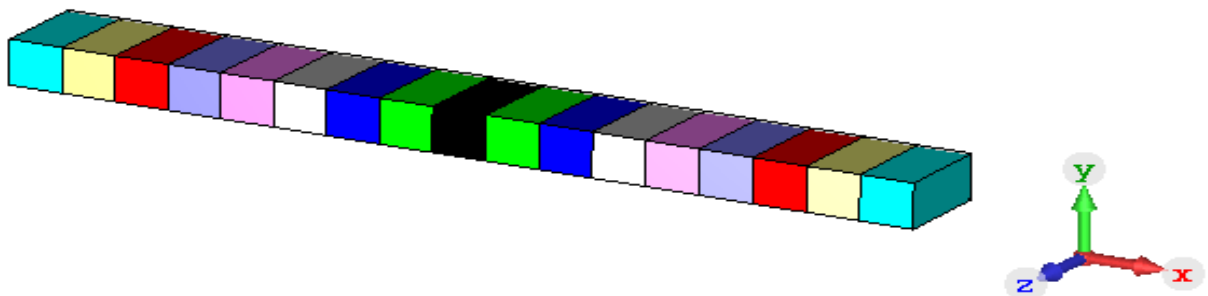
$$\Gamma = \frac{j \tan \beta d - \sqrt{\epsilon_r}}{j \tan \beta d + \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (4.1)$$

$$\Gamma_x = A e^{j\varphi}. \quad (4.2)$$

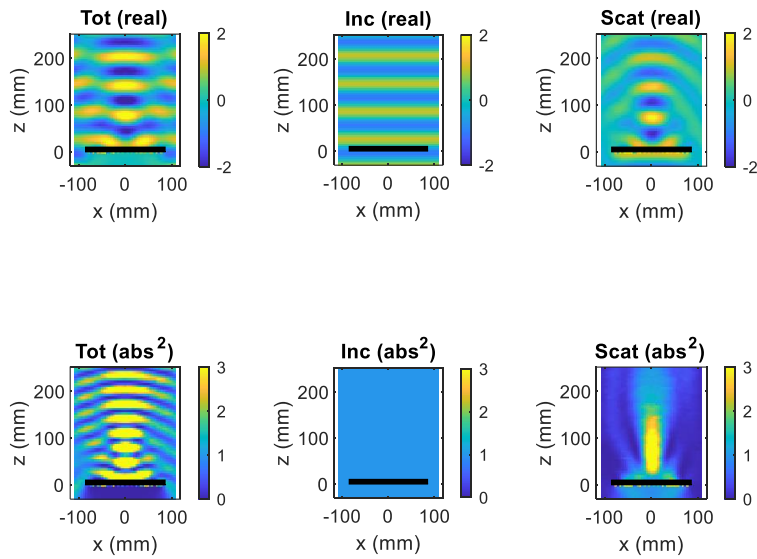
Στις παραπάνω εξισώσεις β είναι η φασική σταθερά όπου $\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_r}$ με k_0 να είναι ο κυματικός αριθμός, d το πάχος του διηλεκτρικού, φ είναι η επιθυμητή φάση της ανάκλασης σε rad που υποδεικνύει τη διαφορά φάσης μεταξύ του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος. Το A συμβολίζει το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης, δηλαδή το πλάτος του ανακλώμενου κύματος σε σχέση με το προσπίπτον κύμα. Η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 όπου 0 σημαίνει ότι δεν υπάρχει ανάκλαση (όλο το κύμα απορροφάτε) και 1 ότι το κύμα ανακλάται πλήρως (τέλεια ανάκλαση), στην περίπτωσή μας που επιθυμούμε πλήρη ανάκλαση και εστίαση της δέσμης η τιμή του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης είναι 1.

Για λόγους σύγκρισης αποτελεσμάτων της ελεγχόμενης μεταεπιφάνειας που εξετάζουμε κατασκευάσαμε μία μεταεπιφάνεια η οποία αποτελείται από γειωμένο διηλεκτρικό και ρυθμίζουμε κατάλληλα την τιμή της διαπερατότητα ϵ_r ανάλογα με την λειτουργία που πρόκειται να πραγματοποιηθεί.

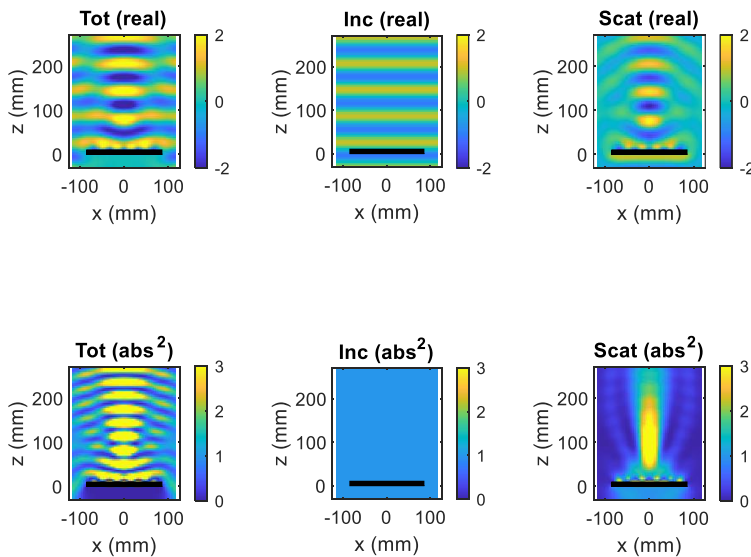
Το **Σχήμα 4.18** μας παρουσιάζει το υπερκελί $N=17$ να κάνει εστίαση δέσμης με σημείο εστίασης (focal spot) 100 mm, τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ικανοποιητικά καθώς πλησιάζουν αρκετά με αυτά του παραβολικού πιάτου **Σχήμα 4.15**. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούμε επίσης στο **Σχήμα 4.19** από την μεταεπιφάνεια που αποτελείτε μόνο από γειωμένο διηλεκτρικό 17 μοναδιαίων διηλεκτρικών κελιών **Σχήμα 4.17** με πάχος 20 mm, πλάτος και μήκος 10 mm, η επιμετάλλωση στο πίσω μέρος της μεταεπιφάνειας αποτελείτε από PEC.



Σχήμα 4.17: Υπερκελί το οποίο αποτελείτε από 17 μοναδιαία διηλεκτρικά κελιά. Τα διαφορετικά χρώματα δηλώνουν διαφορετική διηλεκτρική σταθερά για κάθε υλικό.



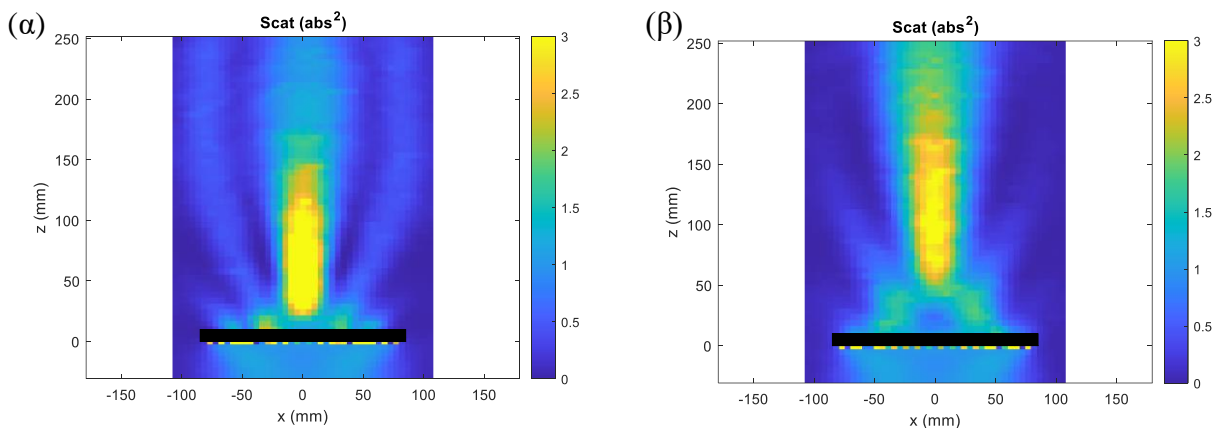
Σχήμα 4.18: Πίνακας με διαγράμματα πεδίου και ισχύος ενός υπερκελίου (*supercell*) που αποτελείται από 17 μοναδιαία κελιά 1×2 με κατάλληλα RC φορτία στο καθένα ώστε να δημιουργούν απόσταση εστιακού σημείου 100mm κάθετα από το κέντρο του υπερκελίου. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 5GHz και η πρόσπτωση κάθετη.



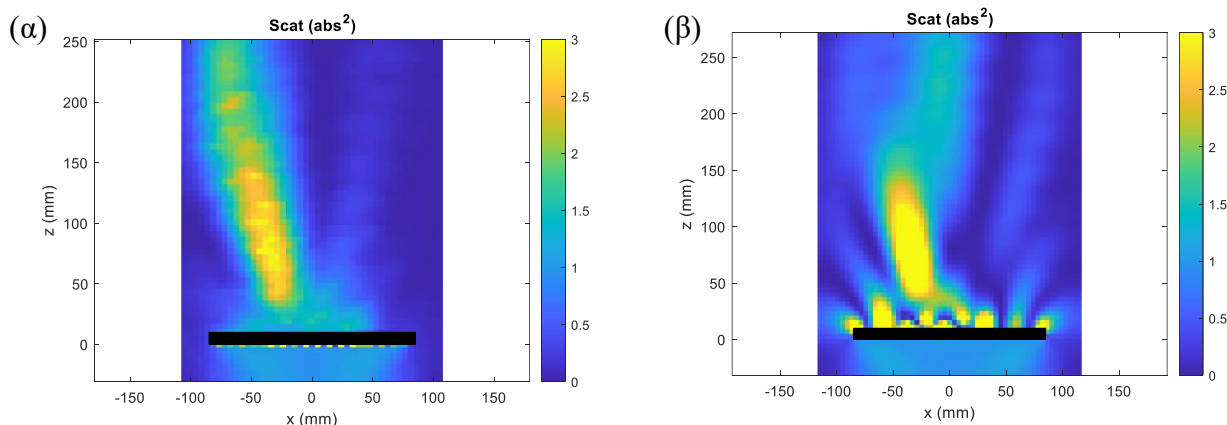
Σχήμα 4.19: Πίνακας με διαγράμματα πεδίου και ισχύος ενός υπερκελίου (*supercell*) που αποτελείται από 17 κόβους γειωμένου διηλεκτρικού διαφορετικού ϵ_r με απόσταση εστιακού σημείου 100mm στο κέντρο του υπερκελίου. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 5GHz και η πρόσπτωση κάθετη.

Έχοντας ως βάση τη θεωρία που αναπτύξαμε στον κεφάλαιο 2.3 (θεωρία Floquet σε επίπεδο πλήρους ανοίγματος) και με την χρήση της εξίσωσης (2.3) προχωρήσαμε στον εντοπισμό των τιμών της χωρητικότητας C για να καταχωρίσουμε σε κάθε μοναδιαίο κελί του υπερκελιού ώστε να επιτύχουμε εστίαση δέσμης σε διαφορετικό εστιακό σημείο της επιλογής μας ($f = 75\text{mm}$, $f = 150\text{mm}$). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις βρίσκονται στο Σχήμα 4.20, παρατηρούμε ότι για το σημείο εστίασης $f = 75\text{mm}$ η μεταεπιφάνεια πραγματοποιεί καλύτερη εστίαση σε σχέση με το σημείο εστίασης $f = 150\text{mm}$.

Το Σχήμα 4.21 παρουσιάζει τη δυνατότητα που έχουν οι μεταεπιφάνειες να εστιάζουν το σκεδαζόμενο κύμα σε διαφορετικό σημείο πέρα από το κέντρο ($x=0$) της μεταεπιφάνειας, στο Σχήμα 4.21(α) βλέπουμε τα αποτελέσματα του υπερκελιού με μοναδιαία κελιά 1×2 και στο Σχήμα 4.21(β) του υπερκελιού με γειωμένα διηλεκτρικά κυβάρια διαφορετικού ϵ_r (χωρίς μεταλλικά καλύμματα). Η δυνατότητα να διαφοροποιεί το σημείο εστίασης καθώς και την απόστασή του, μπορεί να αποτελέσει μεγάλο πλεονέκτημα για τη χρήση των μεταεπιφανειών στην μελλοντική τεχνολογία των τηλεπικοινωνιών.



Σχήμα 4.20: (α) Διαγράμμα σκεδαζόμενου πεδίου υπερκελιού $N=17$ απόσταση εστιακού σημείου 75mm , (β) Διαγράμμα σκεδαζόμενου πεδίου υπερκελιού $N=17$ απόσταση εστιακού σημείου 150mm . Η συχνότητα λειτουργίας είναι 5GHz .



Σχήμα 4.21: (α) Σκεδαζόμενη ακτινοβολία υπερκελιού $N=17$ που αποτελείται από μοναδιαία κελιά 1×2 με κάθετη απόσταση εστιακού σημείου 100mm και μετατοπισμένο κέντρο εστίασης $x = -54.72\text{mm}$, (β) Σκεδαζόμενη ακτινοβολία υπερκελιού $N=17$ που αποτελείται από γειωμένο διηλεκτρικό με απόσταση εστιακού σημείου 100mm και κέντρο εστίασης $x = -50\text{mm}$. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 5GHz .

Κεφάλαιο 5:

5.1 Επίλογος

Ανακεφαλαιώνοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με τη μελέτη και την ανάλυση μεταεπιφανειών αναδεικνύοντας κάποιες λειτουργίες τους στο μικροκυματικό φάσμα που βρίσκει εφαρμογή κυρίως στο τηλεπικοινωνιακό τομέα, και συγκεκριμένα στις ασύρματες επικοινωνίες νέας γενιάς (6G). Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις ηλεκτρονικά ελεγχόμενες μεταεπιφάνειες παρουσιάζοντας τις δυνατότητες τους να μπορούν να υλοποιούν πολλαπλές ρυθμιζόμενες λειτουργίες με την ενσωμάτωση και τον έλεγχο συγκεντρωμένων φορτίων.

Εκτενέστερα, στην αρχή της εργασίας γίνεται αναφορά στους διάφορους τύπους μεταεπιφανειών και τις λειτουργίες τους, τονίζοντας κάποιες διαφορές που υπήρχαν μεταξύ τους. Επισημάνθηκε ο καίριος ρόλος της θεωρίας Floquet στη μελέτη της διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα περιοδικό μέσο ώστε να καταστεί δυνατή η ανάλυση της απόκρισης της μεταεπιφάνειας ως προς το προσπίπτον κύμα. Έπειτα, έγινε χρήση της θεωρίας Floquet σε μεταεπιφάνειες που αποτελούνται από μοναδιαία κελιά όπως και σε αυτές που αποτελούνται από υπερκελιά, δηλαδή συνδυασμούς πολλών διαφορετικών κελιών ώστε το συνολικό μέγεθος να είναι μεγαλύτερο του μήκους κύματος. Οι μεταεπιφάνειες στις οποίες τα μοναδιαία κελιά είναι εν δυνάμει διαφορετικά μεταξύ τους, χωρίς να έχουν κάποια συμμετρία ή περιοδικότητα, λέγονται μεταεπιφάνειες πεπερασμένου ανοίγματος όπου η άπειρη περιοδική επανάληψη σταματάει να υφίσταται. Για τη μελέτη αυτών έγινε χρήση της θεωρίας της Γεωμετρικής Οπτικής και της Κυματικής Οπτικής.

Τέλος, έγινε μελέτη και ανάλυση στατικών και ελεγχόμενων μεταεπιφανειών εξετάζοντας την αποδοτικότητα των ποικίλων λειτουργειών τους. Το κεφάλαιο 3 και η ενότητα 4.2 έχουν τη βάση τους σε επιστημονικά άρθρα τα οποία μελετήθηκαν και αναλύθηκαν για την επίτευξη νέων μοντέλων μεταεπιφανειών καθώς και την εξέλιξη των ήδη υπάρχοντων. Πολύ σημαντικό ρόλο φυσικά για τη διεκπεραίωση της έρευνας είχε το υπολογιστικό πακέτο CST STUDIO SUITE, με τη βοήθεια του οποίου πραγματοποιήθηκαν όλες οι προσομοιώσεις, ενώ οι παραμετρικές αναλύσεις χρειάστηκαν επιπλέον και τη χρήση Matlab.

5.2 Μελλοντικές προεκτάσεις

Από τη στιγμή που τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν είναι σύμφωνα με τη θεωρία τόσο για την δυνατότητα απορρόφησης όσο και ανώμαλης ανάκλασης των προσπιπτόντων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δημιουργούνται νέες κατευθύνσεις ως προς τη μελέτη είτε των ίδιων διατάξεων που προτάθηκαν είτε παραλλαγών τους. Οι μελέτες αυτές μπορεί να έχουν ως αντικείμενο ενδιαφέροντος τη βελτίωση της απόκρισης (εύρος ζώνης, ύψος απορρόφησης) των διατάξεων, απλοποίηση της γεωμετρίας τους ή και διαφορετική τοποθέτηση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Αρχικά, προτείνεται η τοποθέτηση των RC φορτίων στη πίσω όψη της μεταεπιφάνειας (κάτω από το επίπεδο γείωσης) για λόγους εξάλειψης παρασιτικών παρεμβολών. Τα φορτία θα συνδέονται με το πάνω μέρος της μεταεπιφάνειας (μεταλλικά καλύμματα) μέσω επιμεταλλομένων οπών (vias) ενώ οι ιδιότητες της μεταεπιφάνειας μπορούν να αναδιαμορφωθούν. Επιπλέον για το κελί 2x2 το οποίο αποτελείται από την ένωση τεσσάρων μοναδιαίων κελιών μπορεί να γίνει αναδιαμόρφωση με τοποθέτηση ενός RC φορτίου έναντι τεσσάρων. Η ανάγκη της συγκεκριμένης αναδιαμόρφωσης οφείλεται στην απαίτηση πιο πολύπλοκων γραμμών δρομολόγησης για την επικοινωνία μεταξύ των τεσσάρων RC φορτίων, επιπρόσθετα όταν το μέγεθος της μοναδιαίας κελιού είναι περίπου 10 mm ($\lambda/6$ στα 5 GHz), η χωρική τοποθέτηση των φορτίων μέσα σε μια τόσο μικρή επιφάνεια απαιτεί προηγμένες τεχνολογίες κατασκευής, οι οποίες αυξάνουν το κόστος.

Μια επιπλέον προέκταση της έρευνας θα ήταν ο έλεγχος μετώπου του επίπεδου κύματος που αναλύθηκε στην ενότητα 4.4. Πέρα από τη βελτίωση των αποτελεσμάτων θα μπορούσε να επεκταθεί η μελέτη στην εστίαση της δέσμης σε σημείο της επιλογής μας από πλάγια πρόσπτωση διάφορων γωνιών. Επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον αλλά και δυσκολίες θα εμφάνιζε η περίπτωση εστίασης δέσμης με τη χρήση των κελιών 1x1 και 2x2 έναντι του κελιού 1x2, μια τέτοια επιλογή θα έδινε τη δυνατότητα ταυτόχρονου ελέγχου και των δύο κάθετων πολώσεων TM και TE. Με τη κατάλληλη ρύθμιση των τιμών αντίστασης R και χωρητικότητας C των φορτίων RC στους άξονες x-y θα υπήρχε η δυνατότητα η κάθε πόλωση να έχει διαφορετικό σημείο εστίασης. Μεταεπιφάνειες που συγκεντρώνουν όλα αυτά τα χαρακτηριστικά, δηλαδή αυθαίρετα μιγαδικά προφίλ συντελεστή ανάκλασης στη μεταεπιφάνεια, για λειτουργία σε δύο πολώσεις ταυτόχρονα, αποκαλούνται διανυσματικές ολογραφικές μεταεπιφάνειες (vector holographic metasurfaces).

Βιβλιογραφία

- [1] O. Luukkonen et al., "Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 6, pp. 1624-1632, June 2008, doi: 10.1109/TAP.2008.923327.
- [2] S. A. Tretyakov, *Analytical Modeling in Applied Electromagnetics*, Artech House: Norwood, MA, 2003.
- [3] Lewis B. Whitbourn and Richard C. Compton, "Equivalent-circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary," *Appl. Opt.* 24, 217-220 (1985).
- [4] C. L. Holloway, M. A. Mohamed, E. F. Kuester and A. Dienstfrey, "Reflection and transmission properties of a metafilm: with an application to a controllable surface composed of resonant particles," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, no. 4, pp. 853-865, Nov. 2005, doi: 10.1109/TEMPC.2005.853719.
- [5] O. Luukkonen, F. Costa, C. R. Simovski, A. Monorchio and S. A. Tretyakov, "A Thin Electromagnetic Absorber for Wide Incidence Angles and Both Polarizations," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 10, pp. 3119-3125, Oct. 2009, doi: 10.1109/TAP.2009.2028601.
- [6] A. Monorchio, G. Manara, and L. Lanuzza, "Synthesis of artificial magnetic conductors by using multilayered frequency selective surfaces," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 1, Issue 11, pp. 196–199, (2002).
- [7] Y. Ra'di, C. R. Simovski, and S. A. Tretyakov, *Thin Perfect Absorbers for Electromagnetic Waves: Theory, Design, and Realizations*, *Phys. Rev. Appl.* 3, 037001 (2015).
- [8] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. Broas, N. Alexopolous, and E. Yablonovitch, High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 47, 2059 (1999).
- [9] A. Díaz-Rubio, V. S. Asadchy, A. Elsakka, and S. A. , From the generalized reflection law to the realization of perfect anomalous reflectors, *Sci. Adv.* 3, e1602714 (2017).
- [10] Liu, Fu, Odysseas Tsilipakos, Alexandros Ptilakis, Anna C. Tasolamprou, Mohammad Sajjad Mirmoosa, Nikolaos V. Kantartzis, Do-Hoon Kwon, Maria Kafesaki, Costas M. Soukoulis and Sergei A. Tretyakov. "Intelligent Metasurfaces with Continuously Tunable Local Surface Impedance for Multiple Reconfigurable Functions." *Physical Review Applied* (2018): n. pag.
- [11] O. Luukkonen, C. Simovski, G. Granet, G. Goussetis, D. Lioubtchenko, A. V. Raisanen, and S. A. Tretyakov, "Simple and accurate analytical model of planar grids and high-impedance surfaces comprising metal strips or patches", *IEEE Trans. Antennas Propag.* 56, 1624 (2008).

- [12] A. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic Circuits* (Oxford University Press, New York, 2014).
- [13] N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, and Z. Gaburro, Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction, *Science* 334, 333 (2011).
- [14] V. S. Asadchy, A. Díaz-Rubio, S. N. Tsvetkova, D.-H. Kwon, A. Elsakka, M. Albooyeh, and S. A. Tretyakov, Flat Engineered Multichannel Reflectors, *Phys. Rev. X* 7, 031046 (2017).
- [15] H. Chalabi, Y. Ra'di, D. L. Sounas, and A. Alù, Efficient anomalous reflection through near-field interactions in metasurfaces, *Physical Review B* 96, 075432 (2017).
- [16] O. Rabinovich and A. Epstein, Analytical design of printed circuit board (PCB) metagratings for perfect anomalous reflection, *IEEE Trans. Antennas Propag.* 66, 4086 (2018).

Συντομογραφίες

6G	Sixth generation	Δίκτυα έκτης γενιάς
PCB	Printed circuit board	Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος
PEC	Perfect electrical conductor	Τέλειος ηλεκτρικός αγωγός
IC	Integrated circuit	Ολοκληρωμένο κύκλωμα
R	Resistance	Αντίσταση
C	Capacity	Χωρητικότητα
PMC	Perfect magnetic conductor	Τέλειος μαγνητικός αγωγός
TE	Transverse electric	Εγκάρσια ηλεκτρική πόλωση
TM	Transverse magnetic	Εγκάρσια μαγνητική πόλωση
TPA	Tunable perfect absorption	Ρυθμιζόμενη τέλεια απορρόφηση
TAR	Tunable anomalous reflection	Ρυθμιζόμενη ανώμαλη ανάκλαση
FPGA	field-programmable gate array	Συστοιχία προγραμματιζόμενων πυλών πεδίου
HIS	High Impedance Surfaces	Επιφάνειες υψηλής αντίστασης
TLM	Transmission line model	Μοντέλο γραμμής μεταφοράς
MMIC	monolithic microwave integrated circuits	«Μονολοθικά» ολοκληρωμένα μικροκυματικά κυκλώματα
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces	Επαναπρογραμματιζόμενες ευφυείς επιφάνειες

