



**ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ, ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ &**  
**ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**  
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**«ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ & ΔΙΚΤΥΑ Η/Υ»**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Σχεδίαση συστοιχίας επίπεδων κεραιών (patch antennas) και του δικτύου τροφοδοσίας τους στο εύρος ζώνης 8-11 GHz, για εφαρμογές σε συστήματα radar**

**Design of a patch antenna array and its feeding network in the frequency range 8–11 GHz for radar systems applications**

**Ιωάννης Κωντζόγλου**

**Επιβλέπων: Δρ. Στυλιανός Τσίτσος (Καθηγητής)**

**Αύγουστος 2022**

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάζεται αρχικά μία επίπεδη μικροταινιακή κεραία (patch) και στη συνέχεια μία συστοιχία δύο κεραιών patch χρησιμοποιώντας έναν διαιρέτη ισχύος Wilkinson. Η προσομοίωση γίνεται με το λογισμικό HFSS. Μελετώνται τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών και στη συνέχεια επιχειρείται ηλεκτρονική στροφή της δέσμης ακτινοβολίας με αλλαγή της φάσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στις δύο κεραιές της συστοιχίας. Μια τέτοια διάταξη είναι χρήσιμη σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. σε radar αυτοκινήτων), όπου δεν είναι δυνατή η φυσική στροφή της συστοιχίας.

## Abstract

In this MSc dissertation, we initially design a microstrip patch antenna array and then a phased array consisting of two patch antennas using a Wilkinson power divider. HFSS is used in the simulations. We study the radiation patterns of the antennas and subsequently we perform electronic beam steering by varying the phase of the electromagnetic wave between the two array antennas. Such an arrangement is useful in many applications (i.e., vehicle radars), where the physical rotation is not possible.

## «ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ»

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Διπλωματική μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Μεταπτυχιακού Τίτλου των Μεταπτυχιακών Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η ΜΔΕ προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

Όνομα & Επώνυμο Συγγραφέα (Με Κεφαλαία):

.....

Υπογραφή (Ολογράφως, χωρίς μονογραφή):

.....

Ημερομηνία (Ημέρα – Μήνας – Έτος):

.....

## **Ευχαριστίες**

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Στυλιανό Τσίτσο για την σημαντική βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Κυριαζίδη, ο οποίος μου εξήγησε με υπομονή τη βασική λειτουργία του λογισμικού HFSS και ήταν παρών σε όποια βοήθεια του ζήτησα.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>2</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ.....</b>	<b>7</b>
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Δομή μικροταινιακών κεραιών.....	8
1.3 Είδη μικροταινιακών κεραιών.....	8
1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μικροταινιακών κεραιών .....	12
1.5 Εφαρμογές μικροταινιακών κεραιών.....	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ ΜΕ</b>	
<b>ΟΡΘΟΓΩΝΙΟ PATCH.....</b>	<b>14</b>
2.1 Εισαγωγή.....	14
2.2 Βασικές αρχές λειτουργίας μικροταινιακών κεραιών patch.....	14
2.3 Μέθοδοι Ανάλυσης.....	15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ</b>	
<b>ΚΕΡΑΙΑΣ PATCH.....</b>	<b>17</b>
3.1 Υπολογισμός παραμέτρων.....	17
3.2 Διαιρέτης ισχύος Wilkinson.....	19
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ PATCH</b>	
<b>ΚΑΙ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΔΥΟ ΚΕΡΑΙΩΝ PATCH ΣΤΟ</b>	
<b>ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ HFSS.....</b>	<b>20</b>
4.1 Εισαγωγή.....	20
4.2 Προσομοίωση μικροταινιακής κεραίας patch.....	20
4.3 Προσομοίωση συστοιχίας δύο μικροταινιακών κεραιών patch.....	23
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>30</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>31</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>32</b>



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

## ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ

### 1.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία των κεραιών έχει προσελκύσει τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον των ερευνητών. Σε αυτό, σημαντικό ρόλο έχει παίξει η ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών και οι απαιτήσεις που ορίζουν οι εξελίξεις τους. Σε πρώτη φάση, τη δεκαετία του 1990, όταν και ξεκίνησε η ανάπτυξη της κινητής επικοινωνίας, η κεραία αποτελούσε ένα ξεχωριστό αλλά ταυτόχρονα σημαντικό κομμάτι της κάθε ασύρματης συσκευής. Αυτή, η κεραία δηλαδή, ήταν δυνατόν να επιλεγθεί, άσχετα από τον σχεδιασμό της συσκευής.

Έτσι, λοιπόν, το εξωτερικό μονόπολο εξελίχθηκε στην πιο δημοφιλή επιλογή κεραίας. Η μοναδική απαίτηση λειτουργίας της ήταν η ανάγκη ύπαρξης κάποιου επιπέδου γείωσης. Κάτι τέτοιο υλοποιούνταν πολύ εύκολα με τη χρήση μεταλλικού περιβλήματος στη συσκευή, για να υπάρχει κάποιο – κάποιες φορές, υποτυπώδες – επίπεδο γείωσης.

Η πάροδος του χρόνου, φέρνει την εξέλιξη της τεχνολογίας και αυτή με τη σειρά της φέρνει αλλαγές στις τεχνολογίες ολοκλήρωσης πολύ μεγάλης κλίμακας (VLSI). Έτσι, το μέγεθος των chips συνεχώς μειώνεται, με αποτέλεσμα οι ασύρματες συσκευές να γίνονται όλο και μικρότερες. Αυτό είχε ως συνέπεια, να δημιουργηθεί η ανάγκη η κεραία να αποτελεί μέρος – μέσω της ολοκλήρωσης – του συστήματος του πομποδέκτη (transceiver). Άλλωστε, μια ενσωματωμένη κεραία έχει καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα αλλά και μηδενικό πρόσθετο κόστος (συμπεριλαμβάνεται σε αυτό της κατασκευής). Αξίζει να σημειωθεί, ότι η μετατροπή της κεραίας από εξωτερικό εξάρτημα σε αναπόσπαστο κομμάτι του εσωτερικού των συσκευών, έχει αλλάξει όλα όσα γνωρίζαμε για τις κεραίες.

Οι απαιτήσεις αναφορικά με τον σχεδιασμό των τερματικών συσκευών, αρχικά ήταν η υψηλή απόδοση (λόγω της απαίτησης για χαμηλή κατανάλωση ισχύος – και κατ' επέκταση – πιο μεγάλη αυτονομία), ικανοποιητικό εύρος ζώνης και διάγραμμα ακτινοβολίας πολλαπλών κατευθύνσεων (omni-directional). Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν τόσο τις επίγειες εξωτερικές αλλά και εσωτερικές ασύρματες επικοινωνίες (outdoor και indoor communications).

Η τάση της τεχνολογίας για όλο και πιο μικρές συσκευές οδήγησε στη σμίκρυνση των διαστάσεων των κεραιών. Στο πρώτο στάδιο της εξέλιξής τους, οι κεραίες ήταν μικρού μεγέθους, υψηλής απόδοσης, με επαρκές εύρος ζώνης και παν-κατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας.

Η επόμενη φάση, χρονολογικά., τοποθετείται στα τέλη της δεκαετίας του 1990. Στην περίοδο αυτή, οι ασύρματες επικοινωνίες αρχίζουν να προσφέρουν πλήθος υπηρεσιών σε

διαφορετικά φάσματα συχνοτήτων. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της ψηφιακής κινητής τηλεφωνίας (GSM), η οποία λειτουργεί σε διαφορετικές συχνότητες σε Ευρώπη, ΗΠΑ και Ιαπωνία. Επίσης, την ίδια χρονική περίοδο ο οργανισμός IEEE ομαδοποιεί και τυποποιεί τις τεχνολογίες ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN, 802.11).

Οι δύο παραπάνω συνθήκες έφεραν την ανάγκη για κεραίες που μπορούν να λειτουργούν σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων, τόσο στην κινητή τηλεφωνία όσο και στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Παράλληλα, την ίδια περίοδο, κυριαρχεί και η τάση ενοποίησης διαφορετικών υπηρεσιών σε μία ασύρματη συσκευή. Η σχεδίαση σε αυτή τη δεύτερη φάση, απαιτούσε το μέγεθος των κεραιών – ειδικά στις φορητές συσκευές – να είναι πλέον εξαιρετικά μικρό, η απόδοσή τους να είναι υψηλή και να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής της πόλωσης και του διαγράμματος ακτινοβολίας τους.

Γίνεται κατανοητό, πως οι παραπάνω προδιαγραφές δεν ήταν εύκολο να πληρούνται από τις κλασικές κεραίες σύρματος. Η παραπάνω παραδοχή οδήγησε στην ανάπτυξη της μικροταινιακής κεραίας και – γενικότερα – της τυπωμένης κεραίας. Σε αυτό βοήθησαν τα ειδικά λειτουργικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων συσκευών καθώς και οι δίαυλοι επικοινωνίας των σημερινών ασύρματων δικτύων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η εξέλιξη των μικροταινιακών κεραιών ακολούθησε βήμα-βήμα την ανάπτυξη και εξέλιξη των σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιών.

## **1.2 Δομή μικροταινιακών κεραιών**

Οι μικροταινιακές κεραίες έχουν – αθροιστικά – περισσότερα πλεονεκτήματα από τις συμβατικές κεραίες. Η βασική μορφή μιας μικροταινιακής κεραίας περιλαμβάνει ένα στοιχείο που ακτινοβολεί (patch), το οποίο βρίσκεται στη μία πλευρά ενός διηλεκτρικού υποστρώματος. Στην άλλη πλευρά, υπάρχει ένα επίπεδο γείωσης. Τις περισσότερες φορές, το patch είναι φτιαγμένο από αγώγιμο υλικό (συνήθως χαλκός ή χρυσός), ενώ το σχήμα του διαμορφώνεται ανάλογα με τις ανάγκες κατασκευής της κεραίας. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται τετράγωνα, ορθογώνια, κυκλικά και ταινίες patch, λόγω της εύκολης ανάλυσης και κατασκευής τους και των ελκυστικών χαρακτηριστικών ακτινοβολίας τους. Το patch μαζί με τις γραμμές τροφοδοσίας τους είναι τυπωμένα πάνω στο διηλεκτρικό υπόστρωμα.

## **1.3 Είδη μικροταινιακών κεραιών**

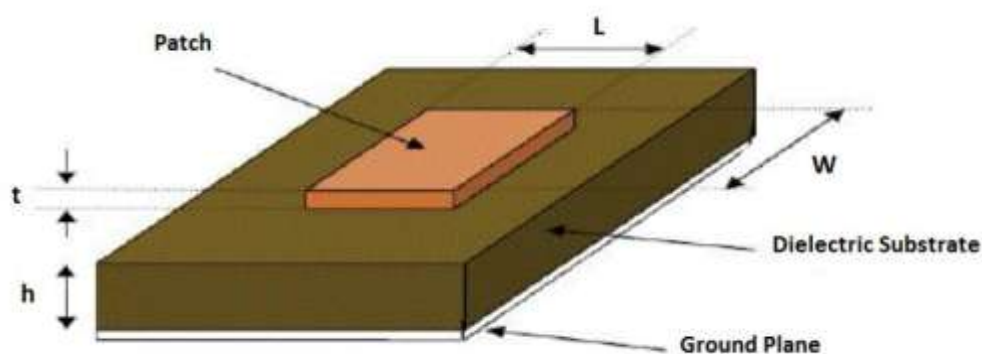
Συνολικά διακρίνουμε τρία είδη:

- α) Μικροταινιακές κεραίες patch (microstrip patch antennas).
- β) Μικροταινιακές κεραίες οδεύοντος κύματος (microstrip traveling-wave antennas).
- γ) Μικροταινιακές κεραίες σχισμής (microstrip slot antennas).

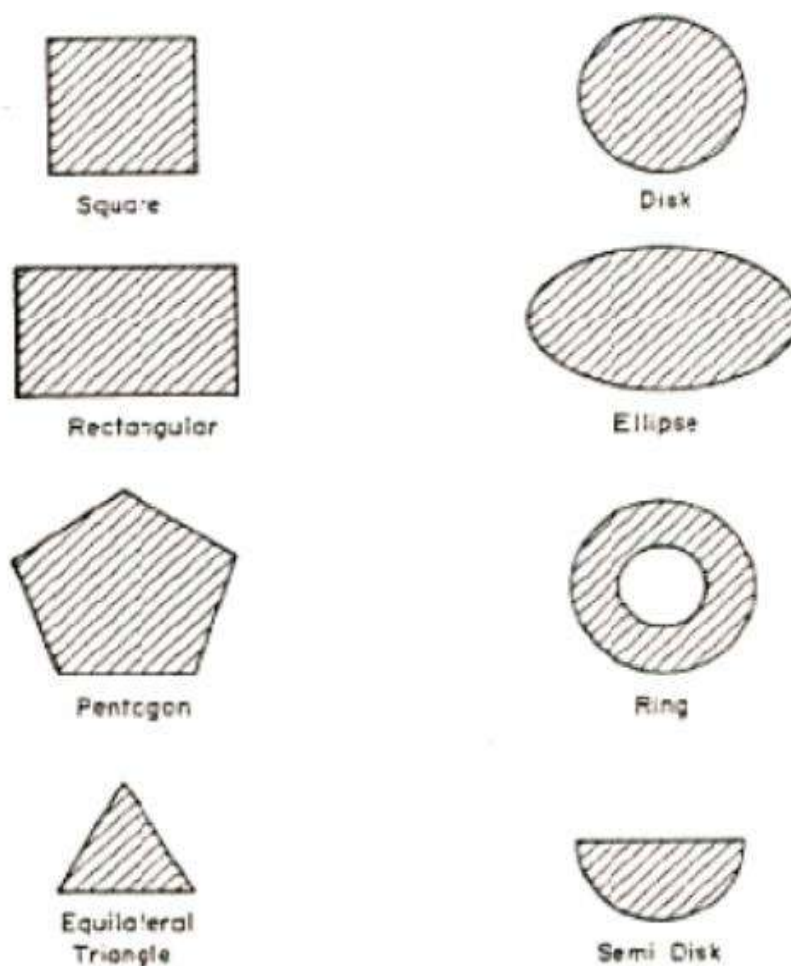


### 1.3.1 Μικροταινιακές κεραίες patch

Τα χαρακτηριστικά αυτών των κεραιών φαίνονται στο Σχήμα 1.1. Το patch μπορεί να έχει διάφορες μορφές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.1: Δομή μικροταινιακής κεραίας.



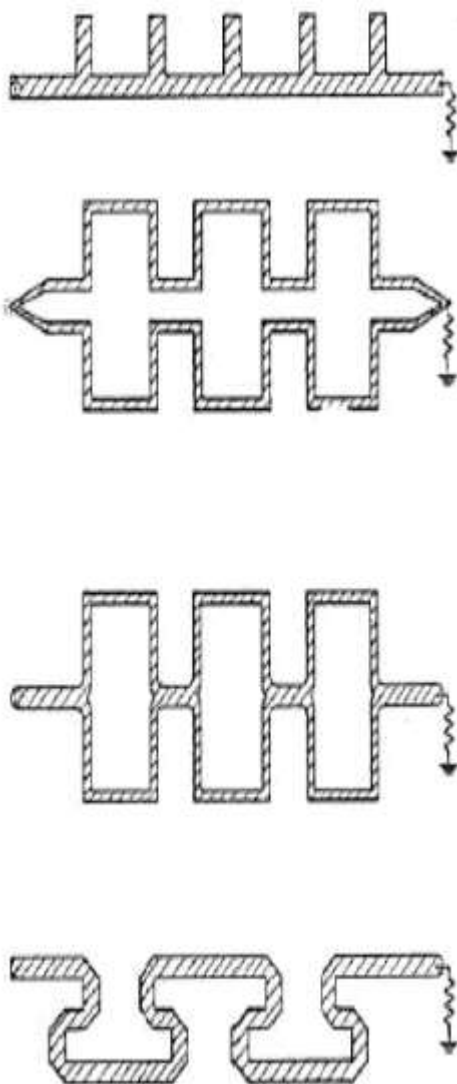
Σχήμα 1.2: Συνηθισμένες μορφές patch μικροταινιακών κεραιών.

Η μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας των μικροταινιακών κεραιών patch μοιάζει αρκετά με των αυτή των διπόλων. Ωστόσο, παρατηρούνται διαφορές. Τα ορθογωνικά και

κυκλικά patches είναι αυτά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά. Τυπικές τιμές κέρδους για μια μικροταινιακή κεραία patch είναι 5 – 6 dB. Να σημειωθεί, ότι το τελευταίο χρονικό διάστημα, η έρευνα έχει εστιάσει στη μείωση του μεγέθους τους και στην αύξηση του εύρους ζώνης τους.

### 1.3.2 Μικροταινιακές κεραίες οδεύοντος κύματος

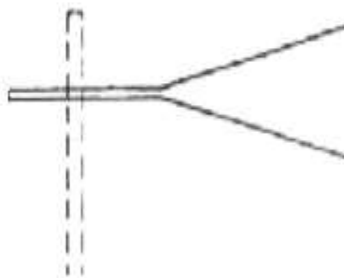
Αποτελούνται από αγωγίμα τμήματα που επαναλαμβάνονται περιοδικά, (όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3) και δημιουργούν μικροταινιακή γραμμή μεγάλου μήκους και κατάλληλου πλάτους.



Σχήμα 1.3: Μικροταινιακές κεραίες οδεύοντος κύματος.

Το ένα άκρο μιας κεραίας οδεύοντος κύματος προσαρμόζεται σε κατάλληλο φορτίο, έτσι ώστε να μην υπάρχουν στάσιμα κύματα. Ένα πλεονέκτημα αυτού του τύπου κεραίας είναι ότι ο κύριος λοβός ακτινοβολίας μπορεί να προκαθοριστεί και να έχει την επιθυμητή. Μια πολύ

δημοφιλής κεραία οδεύοντος κύματος είναι η κεραία σχισμής με βαθμιαίο άνοιγμα (tapered slot antenna, Σχήμα 1.4).

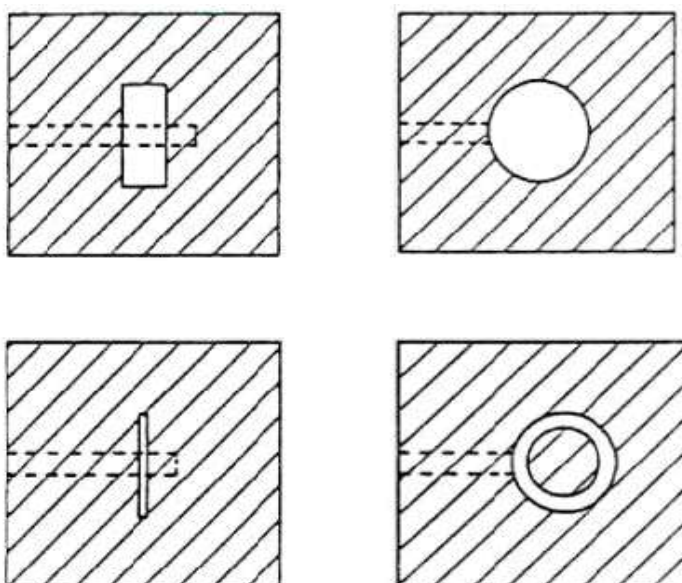


**Σχήμα 1.4:** Κεραία οδεύοντος κύματος με βαθμιαίο άνοιγμα (tapered slot antenna).

### 1.3.3 Μικροταινιακές κεραίες σχισμής

Οι κεραίες αυτές σχηματίζονται, όταν στο κάτω μέρος της μικροταινιακής γραμμής (μεταλλική επιφάνεια γείωσης), χαραχθεί μια σχισμή. Στο λεπτό αγώγιμο στρώμα πάνω από το διηλεκτρικό, χαράσσεται μια οποιασδήποτε γεωμετρίας σχισμή. Οι μορφές των patches που περιγράψαμε παραπάνω, μπορούν να χαραχθούν στη μεταλλική επιφάνεια και να προκύψει μια κεραία σχισμής.

Σε αντίθεση με τις μικροταινιακές κεραίες patch, οι κεραίες σχισμής – στο σύνολό τους ακτινοβολούν και προς τις δύο περιοχές του χώρου. Για ακτινοβολία μόνο προς μια κατεύθυνση, χρειάζεται ειδικός ανακλαστήρας. Στο Σχήμα 1.5, παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές κεραίες σχισμής.



**Σχήμα 1.5:** Μικροταινιακές κεραίες σχισμής.

## 1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μικροταινιακών κεραιών

Στην παράγραφο αυτή, θα συνοψίσουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μικροταινιακών κεραιών έναντι των συμβατικών.

Τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- Μικρότερο βάρος και γενικά μικρότερος όγκος που τις κάνουν εύχρηστες.
- Χαμηλό κόστος κατασκευής.
- Ευκολία κατασκευής.
- Με απλές τεχνικές τροφοδοσίας, είναι δυνατή η παραγωγή γραμμικής και κυκλικής πόλωσης.
- Μπορούν να υλοποιηθούν εύκολα, κεραίες διπλής πόλωσης και/ή διπλής συχνότητας (dual polarization/dual frequency).
- Ενσωματώνονται εύκολα και γρήγορα σε άλλα κυκλώματα.
- Μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα με τις γραμμές τροφοδοσίας τους.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην αεροναυπηγική, αφού μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια αεροσκαφών και πυραύλων.

Παρ' όλα αυτά, όπως σε κάθε τεχνολογική εφαρμογή, οι μικροταινιακές κεραίες έχουν και μειονεκτήματα. Αυτά (τα οποία, ωστόσο, μπορούν να αντιμετωπιστούν με άλλες τεχνικές) είναι:

- Στενό εύρος ζώνης, ειδικότερα στις κεραίες patch που έχουν γείωση στο υπόστρωμά τους.
- Όχι πολύ υψηλό κέρδος (έως 6 dB).
- Υψηλές ωμικές απώλειες, ειδικά όταν τοποθετούνται σε συστοιχίες.
- Ακτινοβολία στον μισό χώρο.
- Απαιτήση σύνθετων τεχνικών τροφοδοσίας όταν απαιτείται υψηλή απόδοση.
- Δυσκολία στην επίτευξη της επιθυμητής πόλωσης.
- Άεργος ακτινοβολία λόγω της τροφοδοσίας και των διαφόρων συνδέσεων.
- Διέγερση κυμάτων επιφανείας (πρόσθετες απώλειες).

## 1.5 Εφαρμογές μικροταινιακών κεραιών

Οι μικροταινιακές κεραίες, πλέον, χρησιμοποιούνται σε όλα τα πεδία έρευνας και ανάπτυξης. Αν και αρχικά προορίζονταν για τον τομέα της άμυνας και του διαστήματος, σήμερα οι εφαρμογές τους αναπτύσσονται με ταχύτερο ρυθμό στις εμπορικές εφαρμογές. Φυσικά, οι προδιαγραφές τους διαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή.

Οι κυριότερες εφαρμογές των μικροταινιακών κεραιών είναι οι εξής:

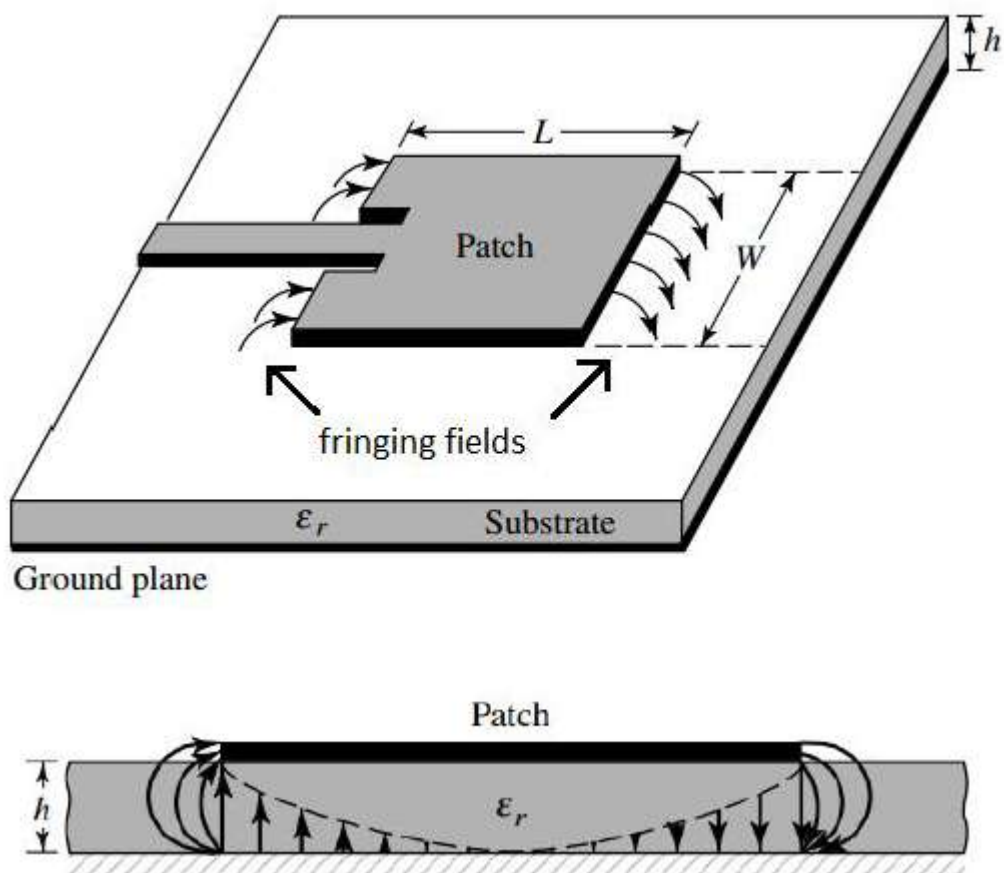
- Προσδιορισμός θέσης μέσω δορυφόρου (GPS, 1227 και 1575 MHz).
- Κινητή τηλεφωνία (ζώνες 800–3800 MHz, ανάλογα με την τεχνολογία).
- Δορυφορικές Επικοινωνίες (1–40 GHz, ανάλογα την εφαρμογή).
- Συστήματα Αναγνώρισης μέσω Ραδιοσυχνοτήτων (RFID, 30 Hz – 5,8 GHz).
- Συστήματα radar (π.χ. για εντοπισμό και αποφυγή συγκρούσεων (75 GHz και 96 GHz).
- Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (WLAN) (2,40–2,48 GHz και 5GHz)
- Τηλεϊατρική (2,45 GHz).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

### ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ ΜΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΟ PATCH

#### 2.1 Εισαγωγή

Οι μικροταινιακές κεραίες με ορθογώνιο patch (Σχήμα 2.1) είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιημένες μικροταινιακές κεραίες. Το ορθογώνιο patch είναι εύκολο να αναλυθεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία των γραμμών μεταφοράς και τα μοντέλα κοιλότητας, τα οποία παρέχουν ακρίβεια για λεπτά υποστρώματα.



Σχήμα 2.1: Μικροταινιακή κεραία με ορθογώνιο patch.

#### 2.2 Βασικές αρχές λειτουργίας μικροταινιακών κεραιών patch

Οι μικροταινιακές κεραίες patch είναι βασικές διατάξεις με ευρεία εφαρμογή. Αν και η κατασκευή τους είναι παρόμοια με τα τυπωμένα κυκλώματα, η μορφή και το είδος μιας κεραίας patch λειτουργεί και σαν σύστημα συντονισμού, το οποίο δεν είναι ιδιαίτερος εύρηστο, ειδικά όταν γίνεται προσπάθεια βελτιστοποίησης της γενικότερης απόδοσής τους ώστε να

ικανοποιούνται οι ηλεκτρικές και μηχανικές απαιτήσεις ενός συστήματος, του οποίου είναι βασικά και λειτουργικά τμήματα.

Ακόμη και στην πιο απλή μορφή τους, δηλαδή σε απλή επίπεδη γεωμετρία, η πρόβλεψη και ο καθορισμός της απόδοσης μιας τέτοιας κεραίας δεν είναι εύκολα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο έχουν υιοθετηθεί προσεγγιστικές μέθοδοι, οι οποίες εφαρμόζουν απλές τεχνικές, δίνοντας σημαντικές πληροφορίες για τον τρόπο λειτουργίας μιας μικροταινιακής κεραίας.

Εφαρμόζοντας ένα δυναμικό στο άκρο τροφοδοσίας του patch, διεγείρεται ένα ρεύμα στην επιφάνειά του και ταυτόχρονα δημιουργούνται κάθετα ηλεκτρικά πεδία στο διηλεκτρικό υπόστρωμα (μεταξύ του patch και του επιπέδου γείωσης). Αν το μήκος του patch είναι ίσο με  $\lambda/2$ , παράγεται ένα επαγόμενο ακτινοβολούμενο πεδίο που συντονίζεται σε μία καθορισμένη συχνότητα.

Η ακτινοβολούμενη ισχύς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που χρησιμοποιείται, καθώς ο περιορισμός των πεδίων καθορίζεται τόσο από την διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υποστρώματος όσο και από την επιφάνεια του patch.

Δεδομένου ότι δημιουργείται ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα με σημείο τροφοδοσίας που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το ανοιχτό άκρο του patch, υπάρχει μία σχετικά υψηλή τάση και ένα σχετικά μικρό ρεύμα από το άκρο τροφοδοσίας, δημιουργώντας μία υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου της διάταξης.

Αν, πάλι, το σημείο τροφοδοσίας της κεραίας βρίσκεται κοντά στο κέντρο του patch, το δυναμικό έχει σχεδόν ελάχιστη τιμή (απέχοντας  $\lambda/4$  από το ανοιχτό άκρο του κυκλώματος) και το ρεύμα που δημιουργείται είναι μέγιστο, δημιουργώντας μία χαμηλή αντίσταση εισόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μέγιστη μεταβίβαση ισχύος στην μικροταινιακή κεραία. Άρα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το σημείο τροφοδοσίας μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της σύνθετης αντίστασης εισόδου της κεραίας.

## 2.3 Μέθοδοι Ανάλυσης

Γενικά, η ανάλυση των μικροταινιακών κεραιών patch είναι δύσκολη. Η κλασσική προσέγγιση τις χαρακτηρίζει ως κεραίες συντονισμού σε μη-ομοιογενές περιβάλλον. Για την ανάλυσή τους, έχουν αναπτυχθεί αριθμητικές (προσεγγιστικές) μέθοδοι ανάλυσης πλήρους κύματος (full-wave analysis). Οι μέθοδοι αυτές πραγματοποιούν αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Maxwell για τις μικροταινιακές κεραίες, υπολογίζοντας, εκτός από τις γεωμετρικές τους διαστάσεις και τις κατάλληλες οριακές συνθήκες (υπόστρωμα γείωσης, σήμα διέγερσης). Εφαρμόζουν αναδρομικές σχέσεις χρησιμοποιώντας την ολοκληρωτική ή την διαφορική μορφή των εξισώσεων Maxwell. Η διαδικασία επίλυσης γίνεται αριθμητικά, αξιοποιώντας ειδικές

μαθηματικές μεθόδους παρεμβολής με χρήση πολωνύμων, στοχεύοντας στην αριθμητική σύγκλιση και ακρίβεια των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Έτσι, υπολογίζονται αριθμητικά το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσονται κοντά και μακριά από την κεραία.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μία από τις αριθμητικές (προσεγγιστικές) μεθόδους ανάλυσης πλήρους κύματος που χρησιμοποιείται συχνά στο σχεδιασμό μικροταινιακών κεραιών patch. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί διαφορικές εξισώσεις σε αριθμητική μορφή, γεγονός που την καθιστά «αργή» συγκριτικά με τη μέθοδο των ολοκληρωτικών εξισώσεων. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, ειδικά όταν οι μικροταινιακές κεραίες patch συνδυάζονται με ενεργές συσκευές για την ενεργοποίηση του πεδίου τους, καθώς και όταν χρησιμοποιούνται κελύφη/περιβλήματα στήριξης/τοποθέτησης των κεραιών, που επηρεάζουν τα πεδία της κεραίας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΕΡΑΙΑΣ PATCH

### 3.1 Υπολογισμός παραμέτρων

Το διηλεκτρικό υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση της μικροταινιακής κεραίας patch έχει τα εξής χαρακτηριστικά (βλ. Σχήμα 3.1):

- Διηλεκτρική σταθερά:  $\epsilon_r = 3,38$
- Ύψος:  $h = 0,52 \text{ mm}$

Επειδή η μικροταινιακή γραμμή είναι ανοιχτή, μέρος των πεδίων (fringing fields) – πέραν του υποστρώματος – υπάρχει και στον αέρα. Έτσι, ορίζουμε **την ισοδύναμη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_{\text{reff}}$** , η οποία είναι συνάρτηση της συχνότητας λειτουργίας της κεραίας. Καθώς αυξάνεται η συχνότητα, οι περισσότερες γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου συγκεντρώνονται στο υπόστρωμα. Η ισοδύναμη διηλεκτρική σταθερά δίνεται ως εξής:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-0.5} \quad (3.1)$$

Το πλάτος τους patch υπολογίζεται από τον τύπο:

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (3.2)$$

όπου  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$  είναι η ταχύτητα του φωτός και  $f_0$  η συχνότητα λειτουργίας της κεραίας. Θέτουμε  $f_0 = 9,5 \text{ GHz}$  (για εφαρμογή π.χ. σε σύστημα radar αυτοκινήτων). Από την (3.2) προκύπτει:

**Πλάτος patch:  $W = 0,010676 \text{ m} = 10,676 \text{ mm}$**

Από την (3.1) προκύπτει:

**Ισοδύναμη διηλεκτρική σταθερά:  $\epsilon_{\text{reff}} = 3,1355$**

Λόγω της ισοδύναμης διηλεκτρικής σταθεράς, το μήκος του patch της κεραίας «φαίνεται» ηλεκτρικά μεγαλύτερο από τις φυσικές του διαστάσεις κατά  $\Delta L$  (ενεργό μήκος, Σχήμα 3.1). Το  $\Delta L$  υπολογίζεται ως εξής:

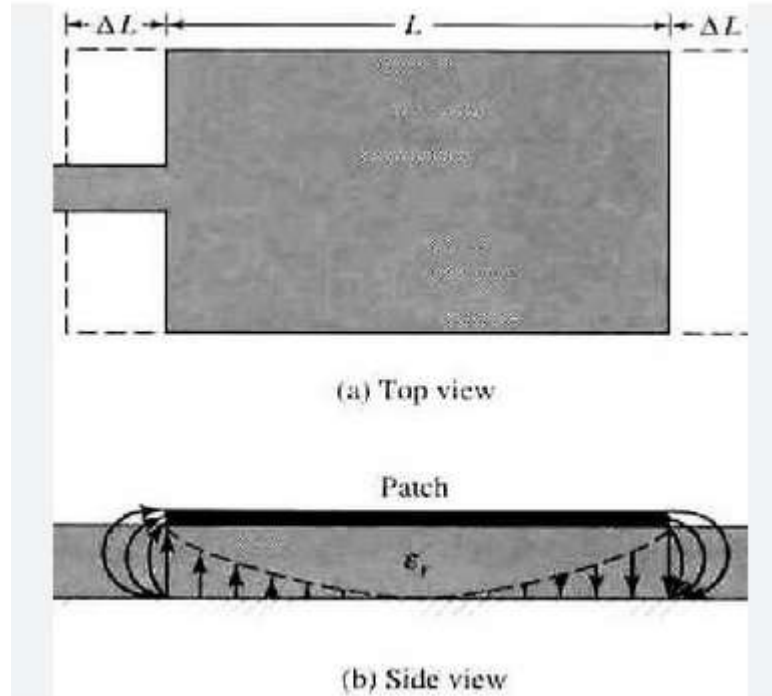
$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.813 \right)} \quad (3.3)$$

απ' όπου προκύπτει  $\frac{\Delta L}{h} = 0,48$  ή  $\Delta L = 0,25 \text{ mm}$ .

Το φυσικό μήκος του patch υπολογίζεται από τον τύπο:

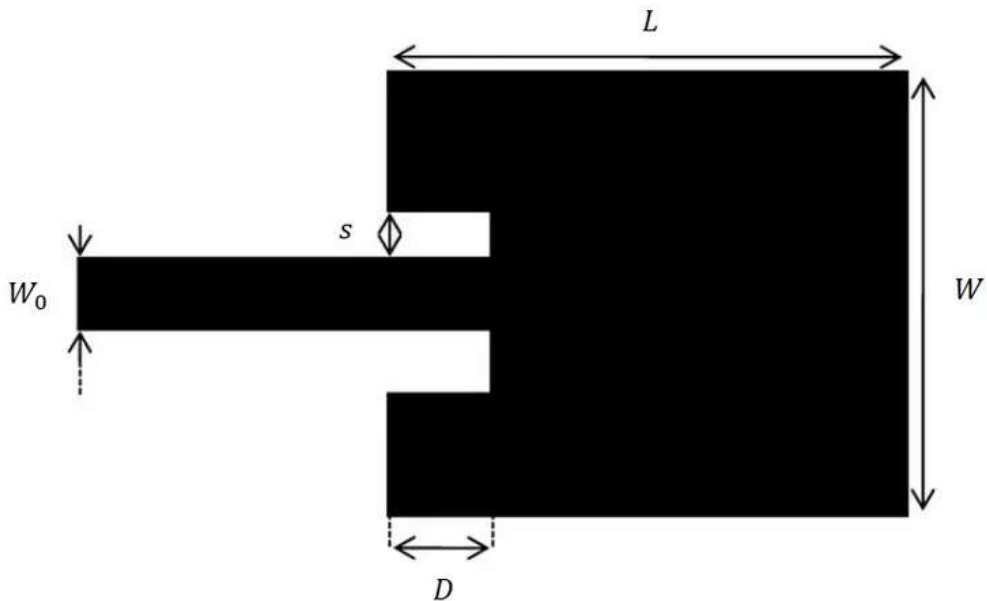
$$L = \frac{1}{2f_{fr}\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (3.4)$$

απ' όπου προκύπτει  $L = 8,417 \text{ mm}$ .



**Σχήμα 3.1:** Φυσικό και ενεργό μήκος μικροταινιακής κεραίας patch.

Στο Σχήμα 3.2, φαίνεται η τελική μορφή του patch μαζί με την γραμμή τροφοδοσίας του, όπου το πλάτος της γραμμής τροφοδοσίας  $W_0$  αντιστοιχεί σε γραμμή τροφοδοσίας  $Z_0 = 50 \Omega$  και υπολογίζεται από τις εξισ. του Παραρτήματος. Έτσι, προκύπτει  $W_0 = 1,21 \text{ mm}$ .



**Σχήμα 3.2:** Patch μαζί με την γραμμή τροφοδοσίας του.

Η απόσταση  $D$  υπολογίζεται ως εξής:

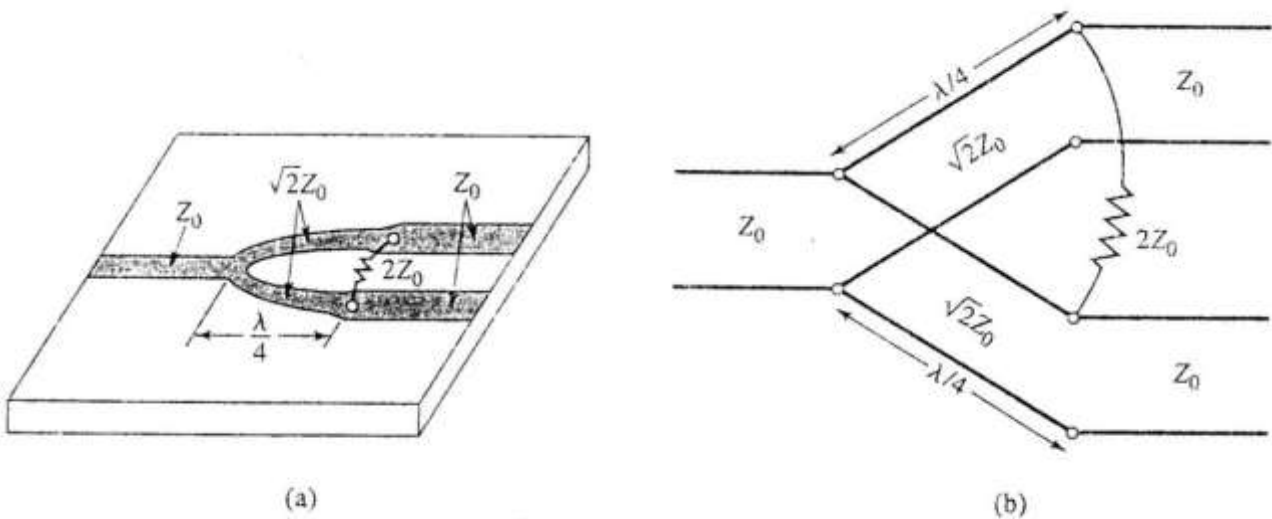
$$D = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left( \sqrt[4]{\frac{Z_{Antenna}}{Z_0}} \right) \quad (3.5)$$

όπου η αντίσταση της κεραίας  $Z_{antenna} = 9,034 \Omega$  υπολογίζεται από τις εξισ. του Παραρτήματος για την τιμή του  $W$  που υπολογίστηκε παραπάνω. Από την (3.5), προκύπτει  $D=2,31 \text{ mm}$ . Το  $s$  μπορεί προσεγγιστικά να υπολογιστεί από τη σχέση  $s \approx 1,5 W_0 = 1,82 \text{ mm/}$

### 3.2 Διαιρέτης ισχύος Wilkinson

Για την υλοποίηση μιας συστοιχίας δύο κεραιών, είναι αναγκαία η χρήση ενός διαιρέτη Wilkinson (Σχήμα 3.3), ώστε να είναι δυνατή η τροφοδοσία τους. Σε σχέση με άλλους τύπους διαιρετών, ο διαιρέτης Wilkinson έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Όλες οι θύρες του είναι προσαρμοσμένες.
- Υπάρχει ισχυρή απομόνωση μεταξύ των θυρών εξόδου του.
- Μπορεί να επιτύχει ίση ή άνιση κατανομή ισχύος.



**Σχήμα 3.3:** (α) Διαιρέτης ισχύος Wilkinson σε μικροταινιακή μορφή και (β) ισοδύναμο κύκλωμα γραμμών μεταφοράς.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ PATCH ΚΑΙ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

### ΔΥΟ ΚΕΡΑΙΩΝ PATCH ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ HFSS

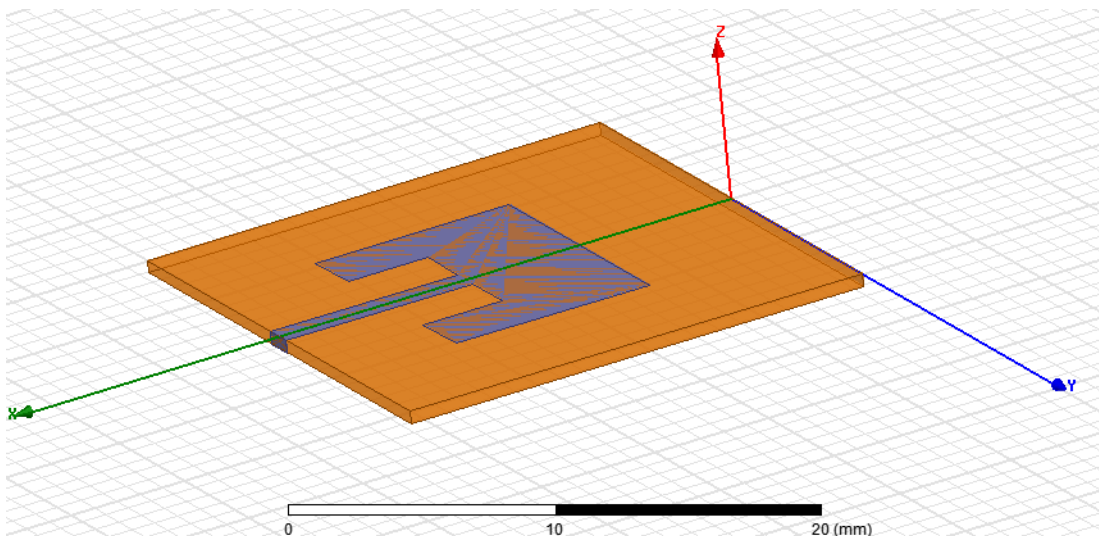
#### 4.1 Εισαγωγή

Το HFSS (High Frequency Structural Simulator) είναι ένα εμπορικό λογισμικό που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών δομών, π.χ. κεραιών και διαφόρων μικροκυματικών διατάξεων, όπως φίλτρα, γραμμές μεταφοράς, κυματοδηγούς, διαιρέτες ισχύος κ.ά.



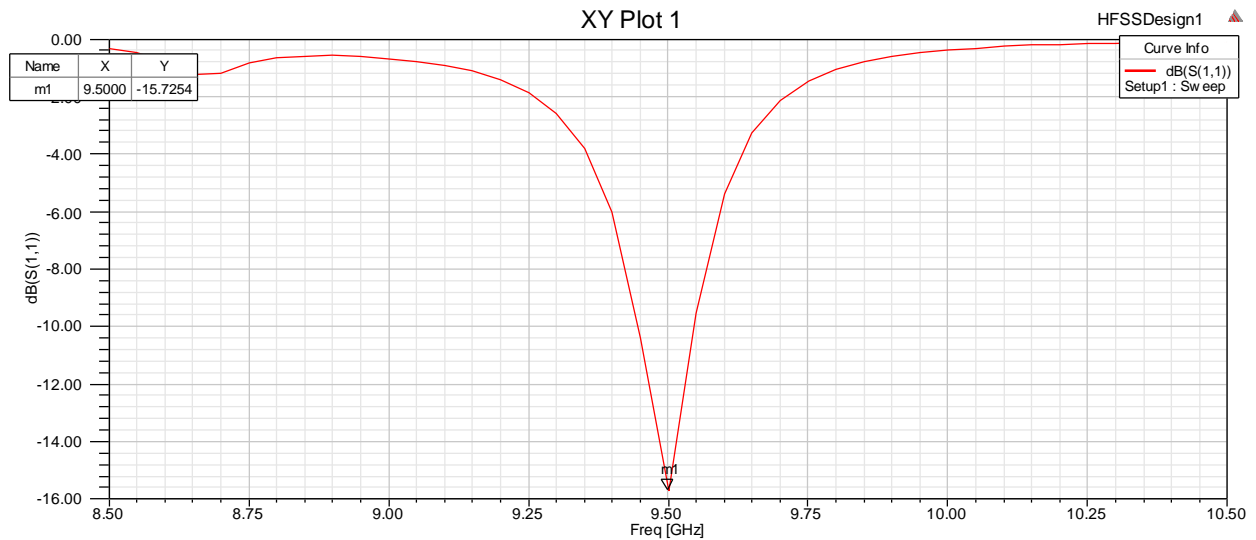
#### 4.2 Προσομοίωση μικροταινιακής κεραίας patch

Με βάση τις διαστάσεις που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο, προσομοιώθηκε στο HFSS το μοντέλο μιας μικροταινιακής κεραίας patch (Σχήμα 4.1).



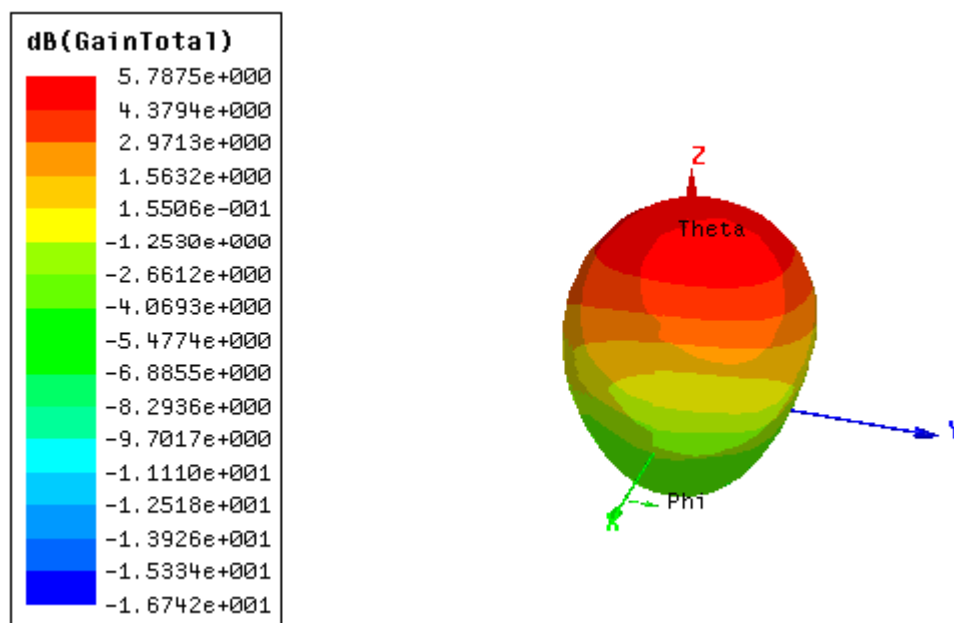
Σχήμα 4.1: Μοντέλο μικροταινιακής κεραίας patch στο HFSS.

Οι απώλειες επιστροφής ως συνάρτηση της συχνότητας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2 (παράμετρος σκέδασης S11). Παρατηρούμε ότι η τιμή της παραμέτρου σκέδασης S11 στη συχνότητα των 9,5 GHz (συχνότητα συντονισμού) είναι  $-15,725$  dB (0,0268 σε αριθμό ή 2,68%). Συνεπώς, επιτυγχάνεται καλή προσαρμογή της κεραίας στη γραμμή τροφοδοσίας της.



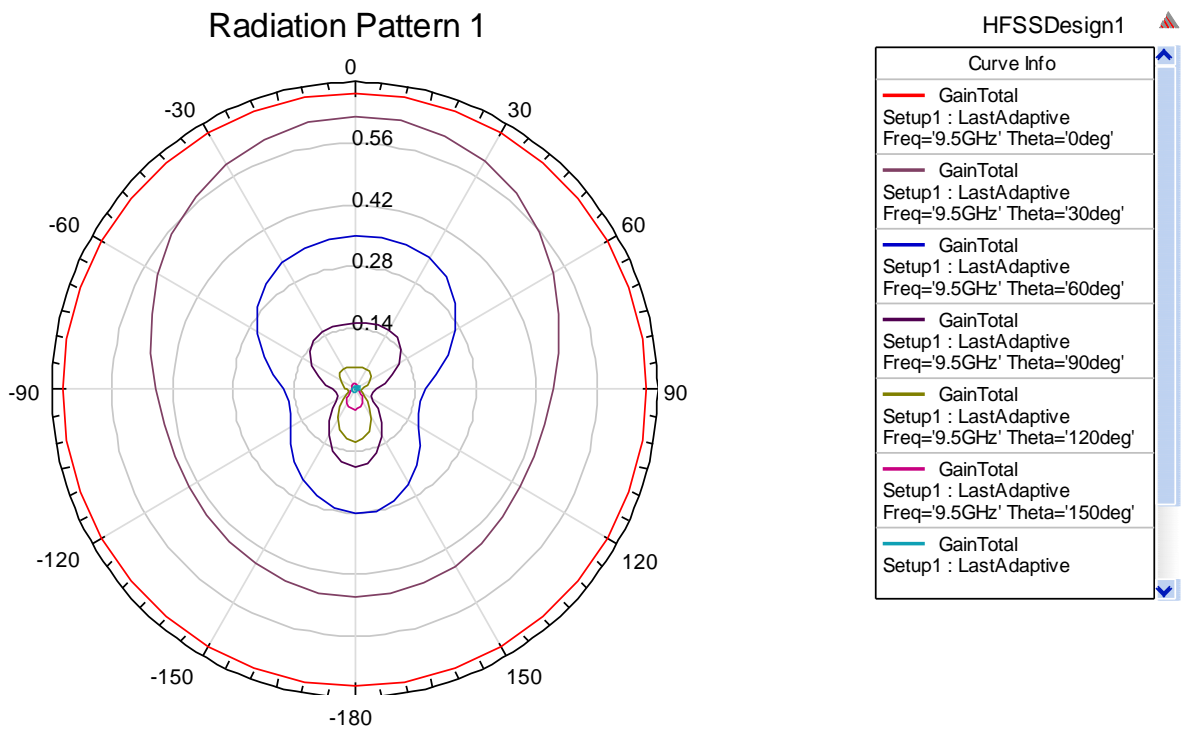
**Σχήμα 4.2:** Απώλειες επιστροφής ως συνάρτηση της συχνότητας (παράμετρος σκέδασης S11) για την κεραία του Σχήματος 4.1.

Το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3, όπου παρατηρούμε ένα κύριο λοβό ακτινοβολίας στη διεύθυνση z με κέρδος 5.788 dB (3,79 σε αριθμό) σε σχέση με την αντίστοιχη ιστροπική κεραία.



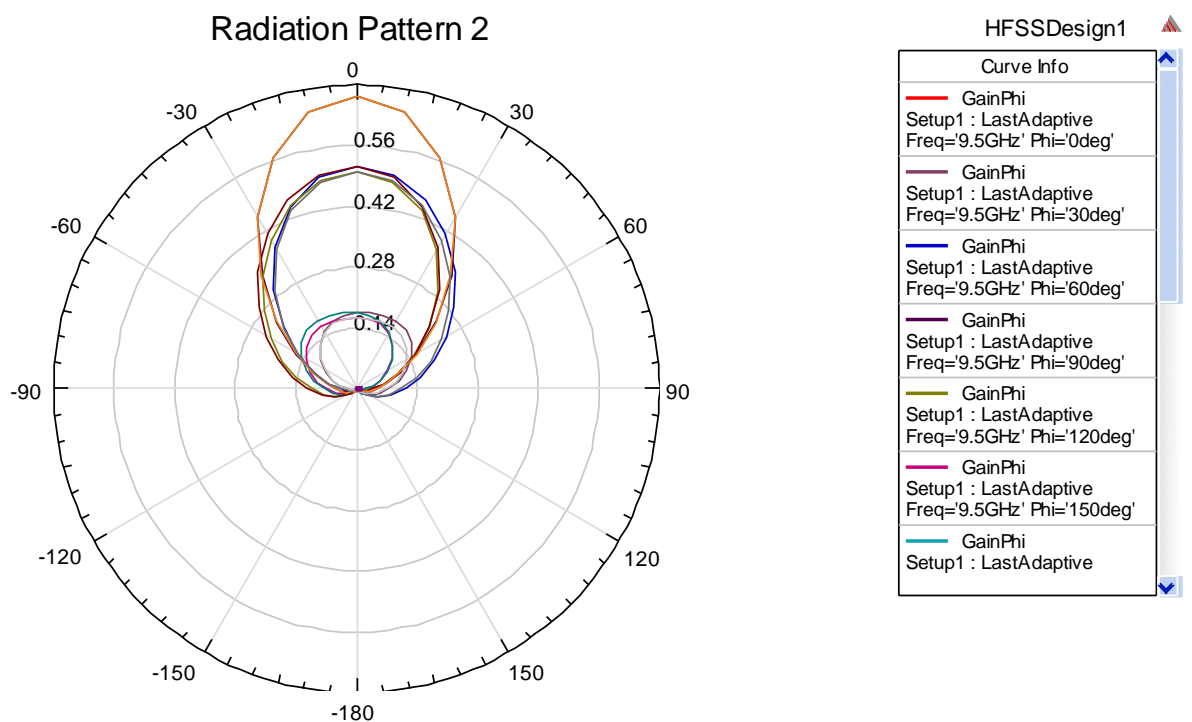
**Σχήμα 4.3:** Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας του Σχήματος 4.1.

Το δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας στο επίπεδο  $x-y$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4, όπου παρατηρούμε ότι η γωνία μισής ισχύος είναι περίπου  $60^\circ$ .



**Σχήμα 4.4:** Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Σχήματος 4.1 στο επίπεδο  $x-y$ .

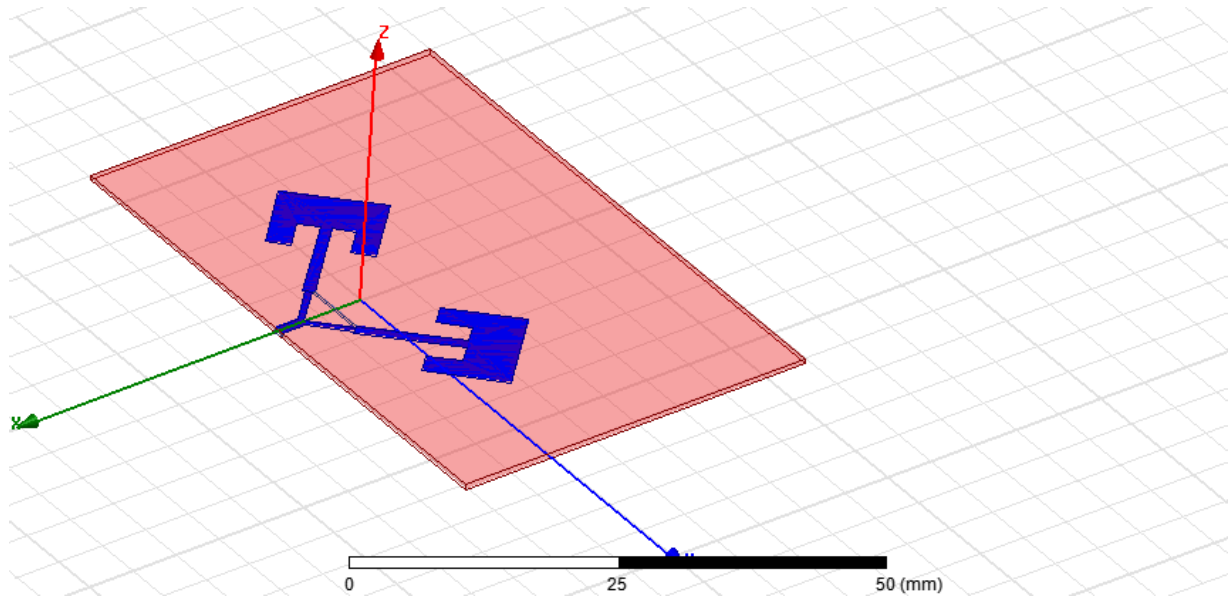
Το δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας στο επίπεδο  $x-z$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5, όπου παρατηρούμε ότι η γωνία μισής ισχύος είναι περίπου  $40^\circ$ .



**Σχήμα 4.5:** Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας Σχήματος 4.1 στο επίπεδο  $x-z$ .

### 4.3 Προσομοίωση συστοιχίας δύο μικροταινιακών κεραιών patch

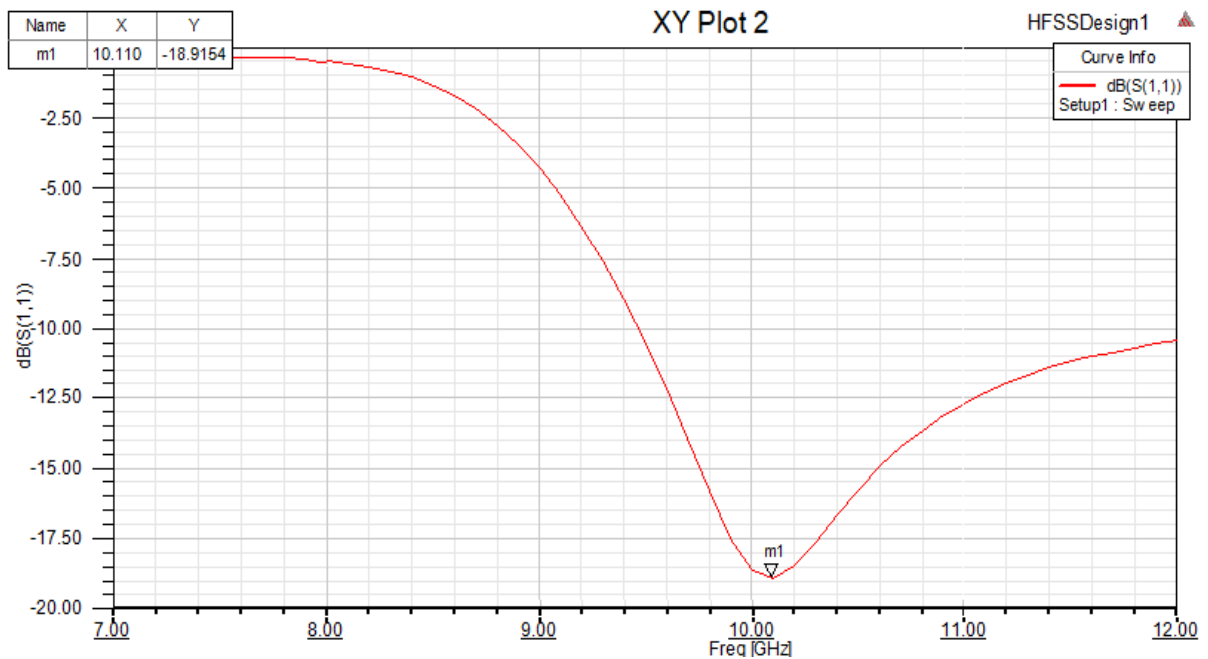
Το μοντέλο συστοιχίας δύο μικροταινιακών κεραιών patch (περιλαμβάνει και τον διαιρέτη ισχύος Wilkinson) που προσομοιώθηκε στο HFSS φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



**Σχήμα 4.6:** Μοντέλο συστοιχίας δύο μικροταινιακών κεραιών patch στο HFSS.

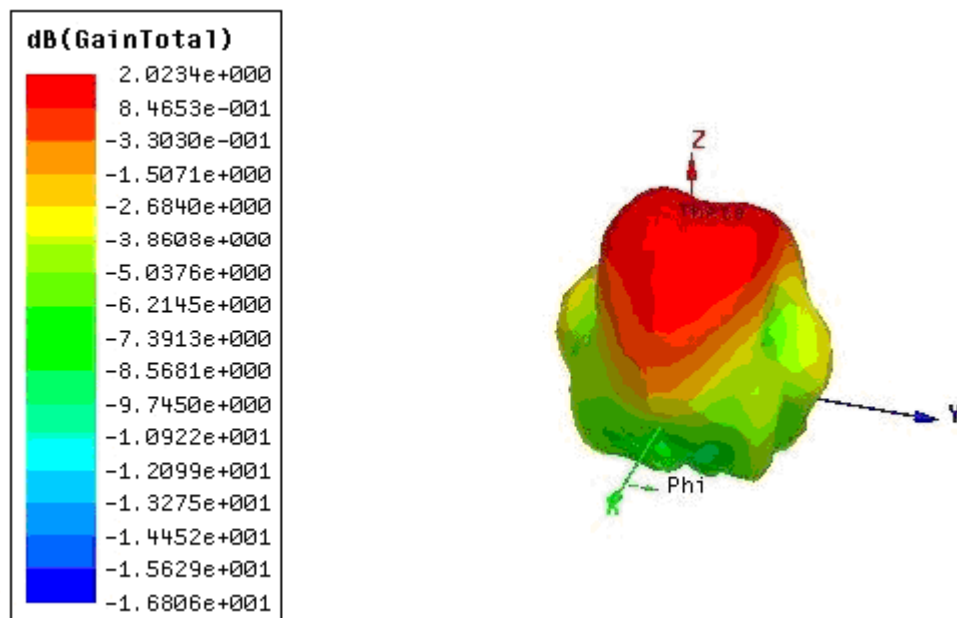
Οι απώλειες επιστροφής ως συνάρτηση της συχνότητας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7 (παράμετρος σκέδασης  $S_{11}$ ). Παρατηρούμε ότι η τιμή της παραμέτρου σκέδασης  $S_{11}$  παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή της στη συχνότητα των 10,11 GHz, δηλαδή έχουμε μια μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού κατά 600 MHz περίπου. Επίσης, ο συντονισμός δεν είναι τόσο οξύς όσο στην περίπτωση της κεραιάς του Σχήματος 4.1. Αυτές οι διαφορές οφείλονται στην παρουσία του διαιρέτη Wilkinson, ο οποίος εισάγει επιπλέον μήκος γραμμών, καθώς και στην πιθανή ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των δύο patches. Παρ' όλα αυτά, επιτυγχάνεται καλή προσαρμογή της κεραιάς στη γραμμή τροφοδοσίας της, δεδομένου ότι η τιμή της παραμέτρου σκέδασης  $S_{11}$  είναι  $-18,9154$  dB (0,0128 σε αριθμό ή 1,28%).





**Σχήμα 4.7:** Απώλειες επιστροφής ως συνάρτηση της συχνότητας (παράμετρος σκέδασης S11) για τη συστοιχία κεραιών του Σχήματος 4.6.

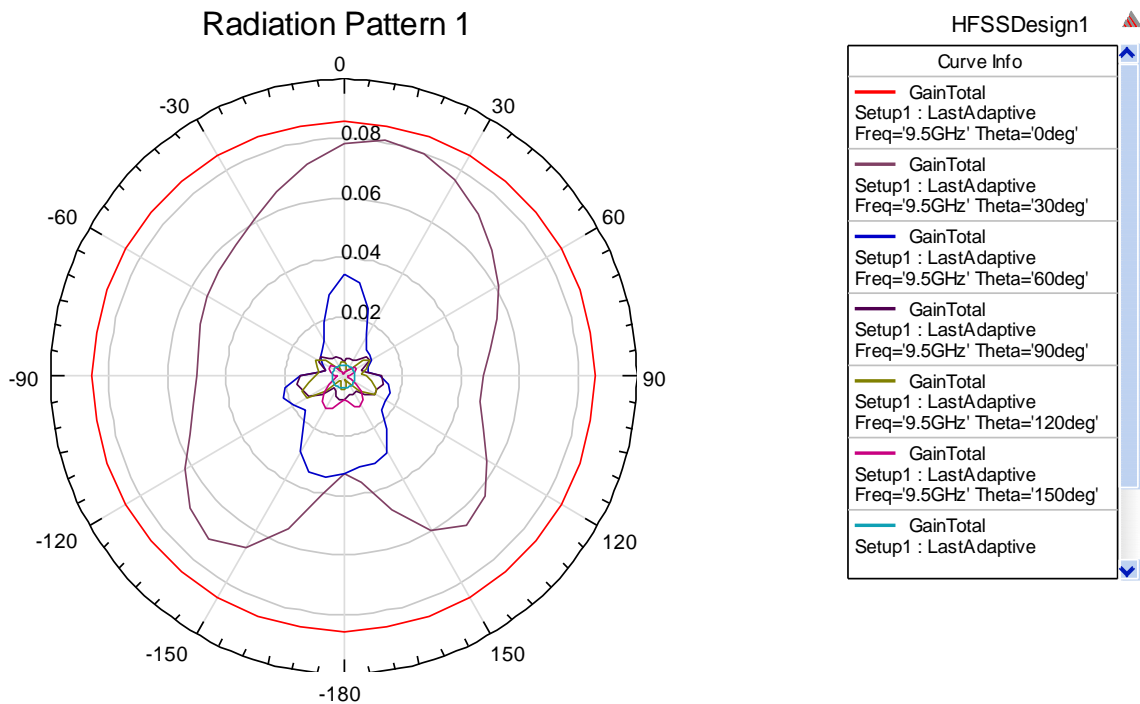
Το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχίας κεραιών του Σχήματος 4.6 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8, όπου παρατηρούμε δύο κύριους λοβούς ακτινοβολίας στη διεύθυνση z με κέρδος 2.0234 dB (1,59 σε αριθμό) σε σχέση με την αντίστοιχη ιστροπική κεραία.



**Σχήμα 4.8:** Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχίας δύο μικροταινιακών κεραιών patch του Σχήματος 4.6.

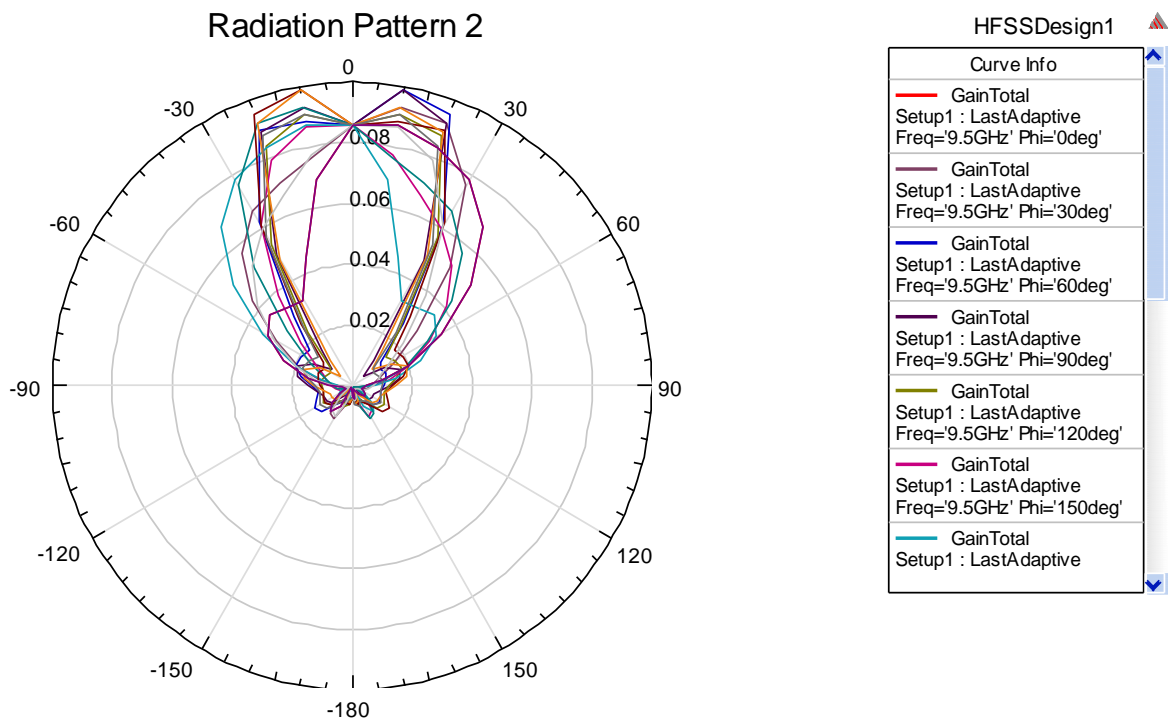


Το δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχίας κεραιών στο επίπεδο  $x-y$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9.



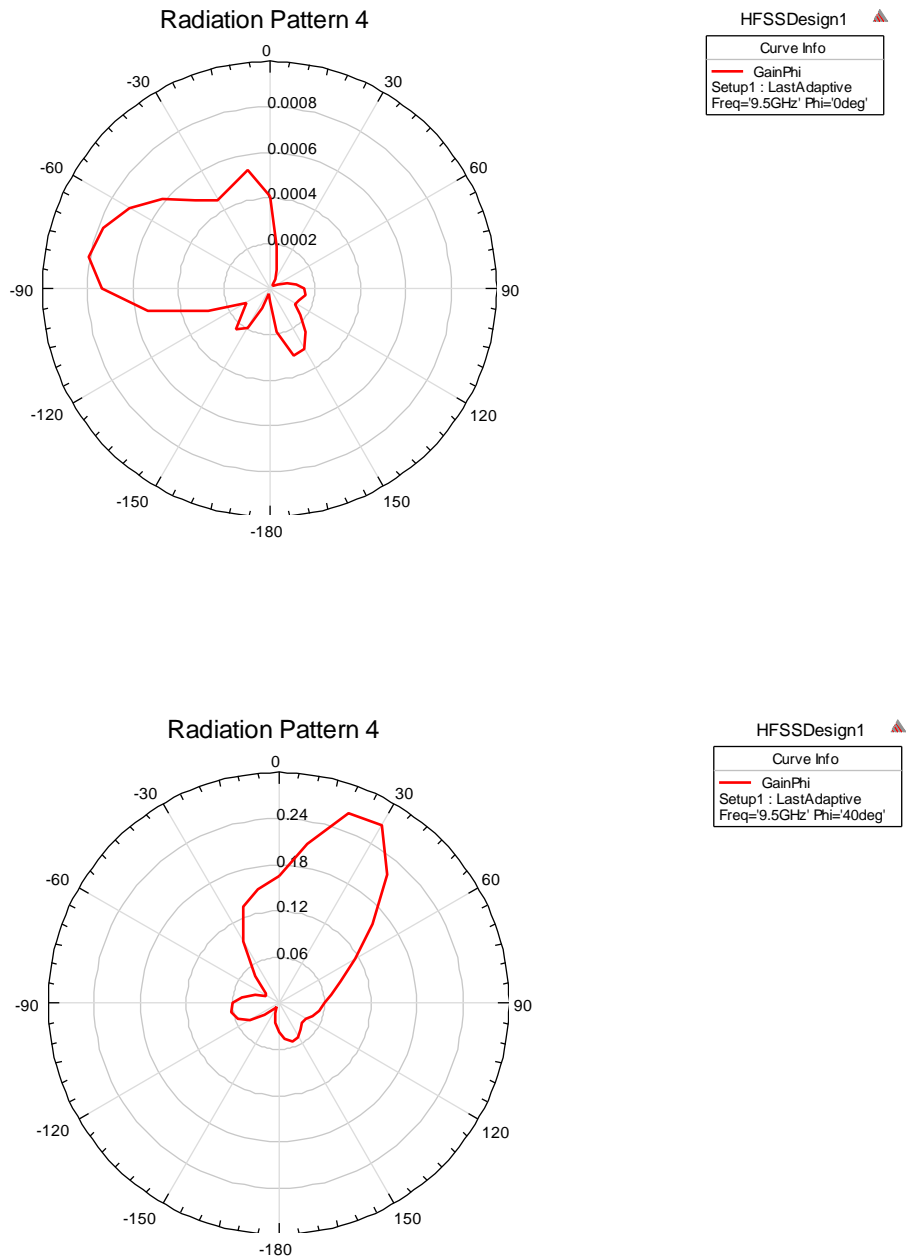
**Σχήμα 4.9:** Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχίας δύο μικροταινιακών κεραιών patch του Σχήματος 4.6 στο επίπεδο  $x-y$ .

Το δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχίας κεραιών στο επίπεδο  $x-z$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10.

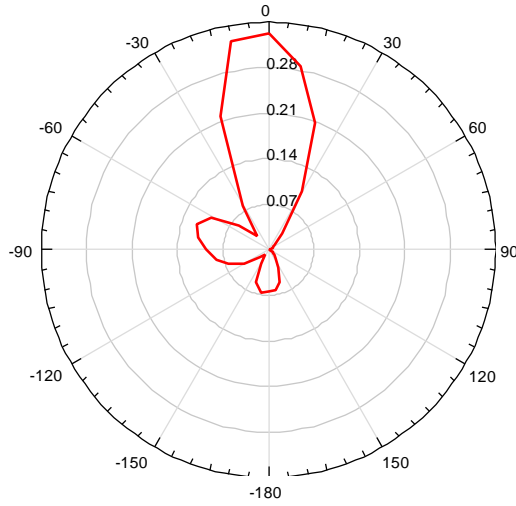


**Σχήμα 4.10:** Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχίας δύο μικροταινιακών κεραιών patch του Σχήματος 4.6 στο επίπεδο  $x-z$ .

Εισάγοντας διαφορά φάσης στα τροφοδοτούμενα κύματα των δύο patches, μπορούμε να επιτύχουμε τη στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας της συστοιχίας του Σχήματος 4.6, όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα του Σχήματος 4.11. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για χρήση π.χ. σε radar αυτοκινήτου, όπου η συστοιχία δεν μπορεί να περιστρέφεται μηχανικά (όπως π.χ. σε radar πλοίων ή αεροδρομίων). Επιτυγχάνεται δηλαδή **ηλεκτρονική στροφή** της δέσμης ακτινοβολίας.



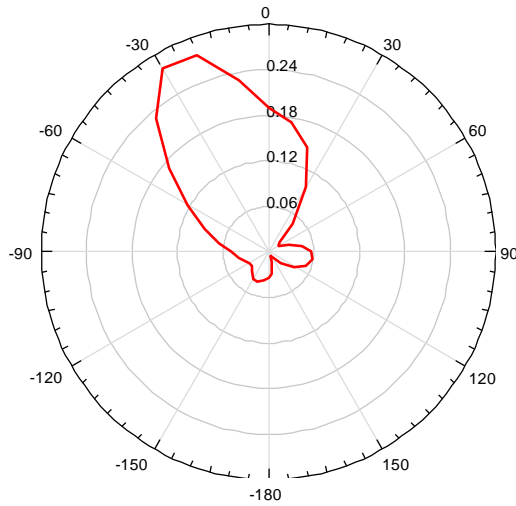
Radiation Pattern 4



HFSSDesign1

Curve Info	
GainPhi	
Setup1 : LastAdaptive	
Freq=9.5GHz' Phi=120deg'	

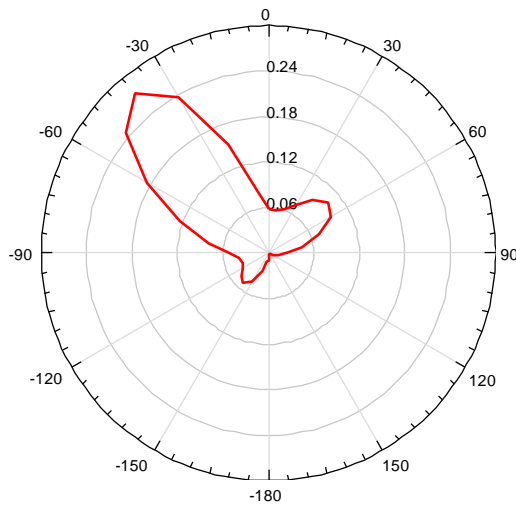
Radiation Pattern 4



HFSSDesign1

Curve Info	
GainPhi	
Setup1 : LastAdaptive	
Freq=9.5GHz' Phi=140deg'	

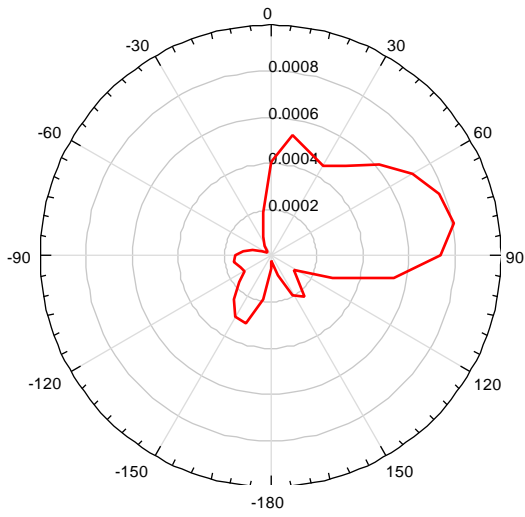
Radiation Pattern 4



HFSSDesign1

Curve Info	
GainPhi	
Setup1 : LastAdaptive	
Freq=9.5GHz' Phi=160deg'	

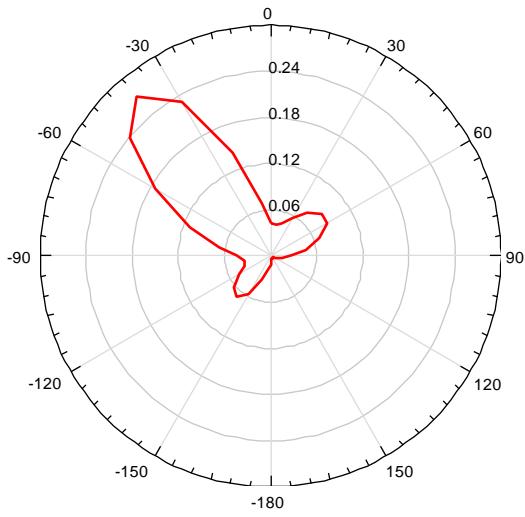
Radiation Pattern 4



HFSSDesign1

Curve Info	
GainPhi	
Setup1 : LastAdaptive	
Freq=9.5GHz' Phi=180deg'	

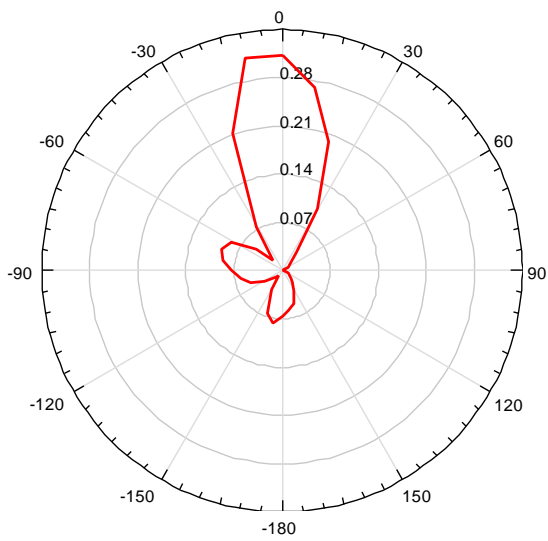
Radiation Pattern 4



HFSSDesign1

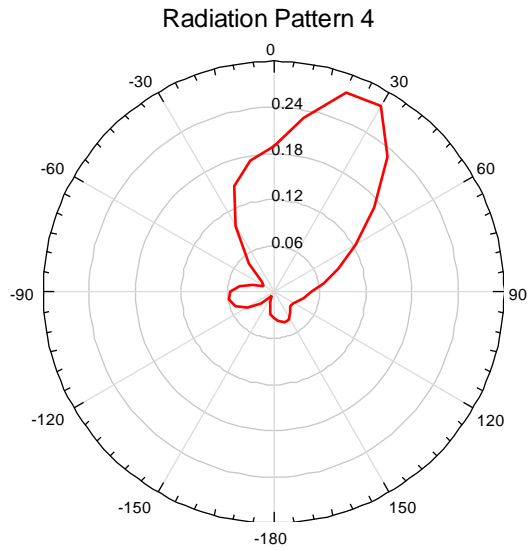
Curve Info	
GainPhi	
Setup1 : LastAdaptive	
Freq=9.5GHz' Phi=200deg'	

Radiation Pattern 4



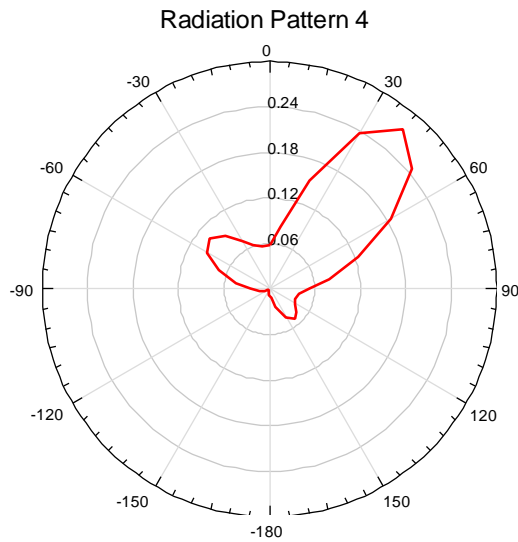
HFSSDesign1

Curve Info	
GainPhi	
Setup1 : LastAdaptive	
Freq=9.5GHz' Phi=240deg'	



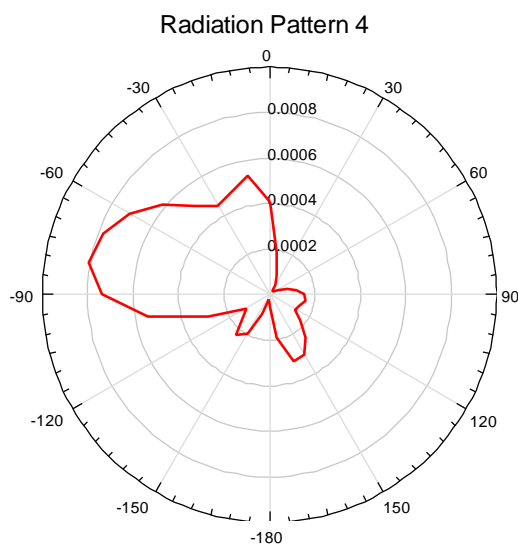
HFSSDesign1 ▲

Curve Info	
—	GainPhi
Setup1 : LastAdaptive	
Freq=9.5GHz' Phi=320deg'	



HFSSDesign1 ▲

Curve Info	
—	GainPhi
Setup1 : LastAdaptive	
Freq=9.5GHz' Phi=340deg'	



HFSSDesign1 ▲

Curve Info	
—	GainPhi
Setup1 : LastAdaptive	
Freq=9.5GHz' Phi=360deg'	

Σχήμα 4.11: Ηλεκτρονική στροφή δέσμης ακτινοβολίας της συστοιχίας κεραιών του Σχήματος 4.6.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Μετά την ολοκλήρωση της εργασίας, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι μικροταινιακές κεραίες patch είναι ουσιαστικά επίπεδες (2 διαστάσεων), γεγονός που τις επιτρέπει να ενσωματώνονται εύκολα και γρήγορα σε άλλα κυκλώματα.
- Επιτυγχάνουν καλή προσαρμογή με τις γραμμές τροφοδοσίας τους.
- Μπορούν να υλοποιηθούν σε συστοιχίες κεραιών patch με την χρήση δύο ή περισσότερων κεραιών και ενός ή περισσότερων διαιρετών ισχύος
- Μία συστοιχία κεραιών patch μπορεί να επιτύχει ηλεκτρονική στροφή της δέσμης ακτινοβολίας, γεγονός που τις κάνει ελκυστικές σε οχήματα, drones, κινητές συσκευές, αεροσκάφη κλπ., όπου δεν είναι δυνατή η μηχανική στροφή των κεραιών.
- Μειονεκτήματά τους είναι το σχετικά μικρό κέρδος τους και το στενό εύρος ζώνης λειτουργίας τους.

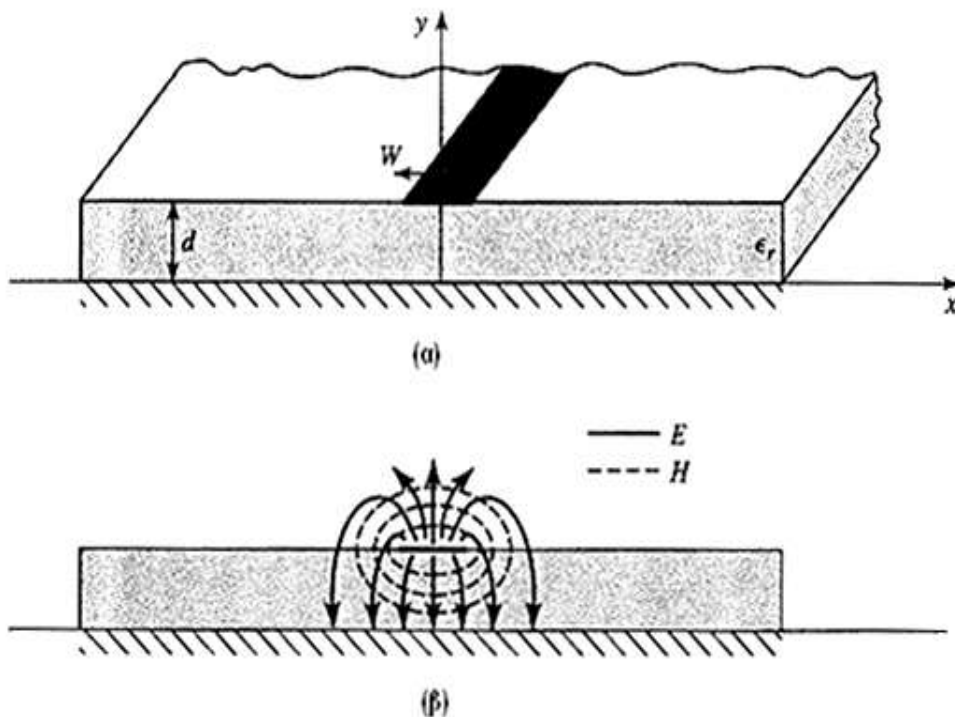
## Βιβλιογραφία

- [1] “Antenna Theory: Analysis and Design”, Constantine A. Balanis, 3rd edition, Hoboken, NJ: Wiley, 2005, ISBN 047166782X (hbk.).
- [2] “Antenna Engineering Handbook”, Richard C. Johnson, 2nd edition, N. York: McGraw–Hill, 1984, ISBN 0070322910.
- [3] “Millimeter-Wave Microstrip and Printed Circuit Antennas”, P. Bartia, Artech House 1991, ISBN 0-89006-333-8.
- [4] “Microwave Engineering”, David M. Pozar, 4<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [5] High Frequency Structure Simulator<sup>TM</sup>, ANSYS Inc., 2015.
- [6] «Σχεδίαση Μικροταινιακής Κεραίας για Ασύρματα Δίκτυα και Δίκτυα 5ης Γενιάς», Γεωργίου Γεώργιος, ΑΠΘ, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Θεσ/νίκη 2019.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Μικροταινιακές γραμμές

Η μικροταινιακή γραμμή (microstrip) είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους τύπους επίπεδων γραμμών μεταφοράς, γιατί σχεδιάζεται με φωτολιθογραφικές διεργασίες και μπορεί να ολοκληρωθεί εύκολα με άλλες παθητικές ή ενεργές μικροκυματικές διατάξεις. Η γεωμετρία μιας μικροταινιακής φαίνεται στο Σχήμα 1α. Ένας αγωγός με πλάτος  $W$  αποτυπώνεται σε ένα λεπτό, γειωμένο διηλεκτρικό υπόστρωμα με πάχος  $d$  και σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$ . Η μορφή του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου της μικροταινιακής γραμμής φαίνεται στο Σχήμα 1β.



**Σχήμα 1:** (α) Μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς. (β) Ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο της γραμμής.

Η παρουσία του διηλεκτρικού στρώματος συγκεντρώνει τα πεδία μέσα στη διηλεκτρική περιοχή, μεταξύ του αγωγού και του επιπέδου γείωσης, ενώ ένα μικρό μέρος των πεδίων υπάρχει και στον αέρα πάνω από το υπόστρωμα. Για αυτό το λόγο η μικροταινιακή γραμμή δεν μπορεί να υποστηρίξει ένα καθαρά εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα (TEM), αφού η φασική

ταχύτητα των πεδίων TEM στη διηλεκτρική περιοχή θα είναι  $u_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ , και η σταθερά διάδοσης  $\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_r}$ , ενώ στην περιοχή του αέρα θα είναι  $u_p = c$  και  $\beta = k_0$  ( $\epsilon_r$  είναι η ισοδύναμη διηλεκτρική σταθερά για τη μικροταινιακή γραμμή). Αφού κάποια από τα πεδία των γραμμών είναι μέσα στην διηλεκτρική περιοχή και κάποια μέσα στον αέρα, η ισοδύναμη



διηλεκτρική σταθερά ικανοποιεί τη σχέση  $1 \ll \varepsilon_e \ll \varepsilon_r$  και εξαρτάται από το πάχος του υποστρώματος  $d$  και το πλάτος του αγωγού  $W$ . Προσεγγιστικά δίνεται από την εξίσωση:

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (1)$$

Δεδομένων των διαστάσεων μιας μικροταινιακής γραμμής, η χαρακτηριστική σύνθετη αντίστασή της μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d}\right) & \text{για } W/d \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_r} [W/d + 1,393 + 0,667 \ln(W/d + 1,444)]} & \text{για } W/d \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

Για δεδομένη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση  $Z_0$  και διηλεκτρική σταθερά  $\varepsilon_r$ , ο λόγος  $W/d$  μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$W/d = \begin{cases} \frac{8\varepsilon^A}{e^{2A} - 2} & \text{για } W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right\} \right] & \text{για } W/d > 2 \end{cases} \quad (3)$$

όπου:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left( 0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r} \right)} \quad (4)$$

και

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (5)$$

Η εξασθένιση μιας μικροταινιακής γραμμής λόγω των διηλεκτρικών απωλειών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$a_d = \frac{k_0 \varepsilon_r (\varepsilon_e - 1) \tan \delta}{2\sqrt{\varepsilon_e} (\varepsilon_r - 1)} \quad (Np/m) \quad (6)$$

(όπου το  $\tan \delta$  εκφράζει τις απώλειες του διηλεκτρικού), ενώ η εξασθένιση λόγω των ωμικών απωλειών του αγωγού δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$a_c = \frac{R_s}{Z_0 W} \quad (Np/m) \quad (7)$$

(όπου  $R_s = \sqrt{\omega \mu_0 / 2\sigma}$  είναι η επιφανειακή ειδική αντίσταση του αγωγού). Για τους περισσότερους τύπους μικροταινιακών γραμμών, οι ωμικές απώλειες του αγωγού είναι πολύ μεγαλύτερες από τις διηλεκτρικές απώλειες.