



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Ειδικές Κεραίες Αναφορά

Εργασία 1

Διακολουκάς Δημήτριος
ΑΕΜ 10642

Email: ddiakolou@ece.auth.gr

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή στο Paper και στο ζητούμενο	2
2	Υλοποίηση γεωμετρίας και εξομοίωσης της κεραίας ανά περίπτωση	3
2.1	Κατασκευή γεωμετρίας SRR	3
2.2	Μονοπολική κεραία και επίπεδη πλακέτα	4
2.3	Πλέγμα και εξομοίωση	5
2.4	Παρουσίαση υπολοίπων Περιπτώσεων - μεταβολές Παραμέτρων Γεωμετρίας Κεραίων	5
2.4.1	Περίπτωση 2	6
2.4.2	Περίπτωση 3	7
2.4.3	Περίπτωση 4	8
3	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Σχολιασμός και Υπολογισμός Μεγεθών Απόδοσης	10
3.1	Εισαγωγή	10
3.2	Αποτελέσματα Οπτικοποίησης	10
3.2.1	Συντελεστής Ανάκλασης $ S_{11} $	10
3.2.2	Τρισδιάστατο Διάγραμμα Ακτινοβολίας	12
3.2.3	Τομή Ανύψωσης (Elevation Pattern)	14
3.2.4	Σχολιασμός	16
3.3	Μαθηματικό Υπόβαθρο	17
3.4	Αποτελέσματα ανά Περίπτωση	18
3.4.1	Περίπτωση 1 — Microstrip-fed, Ευθύγραμμη	18
3.4.2	Περίπτωση 2 — Coplanar-fed, Ευθύγραμμο	19
3.4.3	Περίπτωση 3 — Microstrip-fed, Σχήματος L	19
3.4.4	Περίπτωση 4 — Coplanar-fed, Σχήματος L	19
3.5	Σύνοψη Αποτελεσμάτων και Απόδοσης	20

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στο Paper και στο ζητούμενο

Η παρούσα εργασία βασίζεται στο επιστημονικό paper με τίτλο:

“Metamaterial-Based Electrically Small Multiband Planar Monopole Antennas”,

IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 10, 2011.

Το paper πραγματεύεται το σχεδιασμό και την ανάλυση ηλεκτρικά μικρών και πολυζωνικών επίπεδων μονοπολικών κεραιών (planar monopole antennas) με χρήση δομών μεταϊλικών (metamaterials), συγκεκριμένα δακτυλιοειδών μεταλλικών δομών τύπου SRR (Split Ring Resonator). Οι κεραιές αυτές επιτυγχάνουν πολυζωνική λειτουργία και ενισχυμένη συμπαγή ακτινοβολία, ενώ παραμένουν σε μικρές φυσικές διαστάσεις.

Στόχος του paper είναι η διερεύνηση διαφορετικών διαμορφώσεων SRR σε επίπεδες μονοπολικές κεραιές και η μελέτη των επιπτώσεών τους στις παραμέτρους ακτινοβολίας, όπως:

- Ο συντελεστής ανάκλασης $|S_{11}|$,
- Τα διαγράμματα ακτινοβολίας,
- Η αποδοτικότητα ακτινοβολίας (radiation efficiency),
- Η σύγκριση με το θεωρητικό όριο του Chu (Chu limit).

Στα πλαίσια του μαθήματος, ζητήθηκε να επιλεγεί ένα paper από προτεινόμενη λίστα και να αναπαραχθούν τα αποτελέσματά του χρησιμοποιώντας το πακέτο **Antenna Toolbox** της πλατφόρμας **MATLAB**. Πιο συγκεκριμένα, για το επιλεγμένο paper:

1. Δημιουργήθηκε μοντέλο της SRR-φορτωμένης κεραιάς με χρήση Boolean γεωμετρικών πράξεων.
2. Πραγματοποιήθηκε μελέτη του συντελεστή ανάκλασης $|S_{11}|$ σε εύρος 1–8 GHz.
3. Αναλύθηκαν τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατη και επίπεδη μορφή.
4. Υπολογίστηκε η αποδοτικότητα ακτινοβολίας μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης του διαγράμματος κέρδους.
5. Υπολογίστηκε το θεωρητικό όριο του Chu και η αποτελεσματική ποιότητα Q_{eff} της κεραιάς, συγκρίνοντας την κεραιά με και χωρίς μεταϊλικό.

Μέσω των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνεται η ανωτερότητα του σχεδιασμού μεταϊλικών ως προς τη συμπαγή λειτουργία και τις πολυζωνικές επιδόσεις, όπως ακριβώς περιγράφεται στο paper. Σε αυτό το σημείο να σημειώσω και ότι για την υλοποίηση βασίστηκα σημαντικά στο βοηθητικό .pdf αρχείο Antenna Matlab Toolbox Tutorial που μας παραχωρήθηκε.

Κεφάλαιο 2

Υλοποίηση γεωμετρίας και εξομοίωσης της κεραίας ανά περίπτωση

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται αναλυτικά η υλοποίηση της κεραίας όπως αυτή μελετάται στο άρθρο. Η κατασκευή έγινε μέσω του **Antenna Toolbox** του MATLAB, ακολουθώντας με ακρίβεια τις γεωμετρικές διαστάσεις και διαμορφώσεις του σχήματος 3 του άρθρου.



Σχήμα 2.1: Σχήμα με φυσικές γεωμετρίες ειδικής κεραίας.

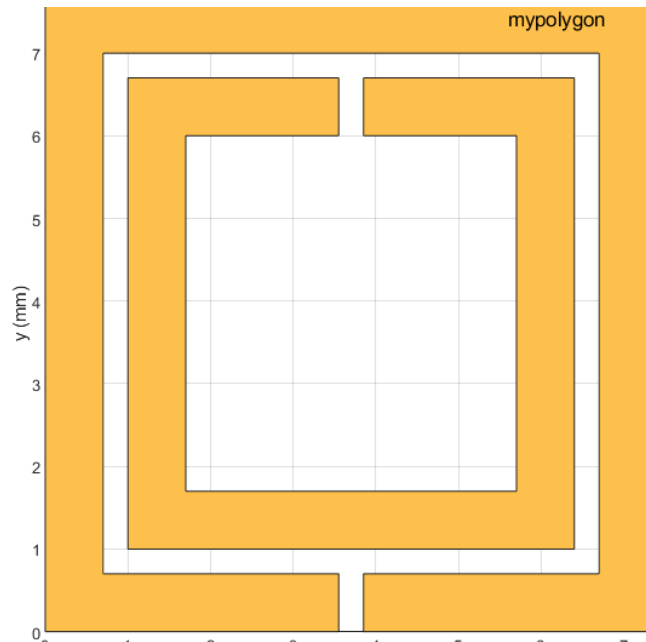
2.1 Κατασκευή γεωμετρίας SRR

Η κεραία αποτελείται από μία ευθύγραμμη επίπεδη μονοπολική δομή, η οποία φορτίζεται με διπλή δακτυλιοειδή μεταλλική δομή τύπου SRR (*Split Ring Resonator*). Οι διαστάσεις έχουν ληφθεί απευθείας από το άρθρο:

- Εξωτερικός δακτύλιος: $y = 7.4\text{mm}$, $z = 7.7\text{mm}$,
- Πλάτος αγωγού: $c = 0.7\text{mm}$, διάκενο $g = 0.3\text{mm}$,
- Ύψος μονοπολικής κεραίας: $l_m = 8.8\text{mm}$,
- Πλάτος μονοπολικής ταινίας: $w_m = 3\text{mm}$,

- Πλάτος επιγείων μεταλλικών επιφανειών: $w_g = 26.6\text{mm}$,
- Διαστάσεις πλακέτας: $26.6 \times 21.8\text{mm}$.

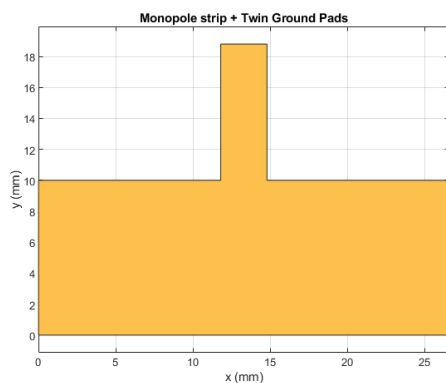
Η γεωμετρία του διπλού SRR αποδίδεται με πράξεις Boolean (ένωση και αφαίρεση γεωμετρικών παραλληλογράμμων). Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται το αποτέλεσμα:



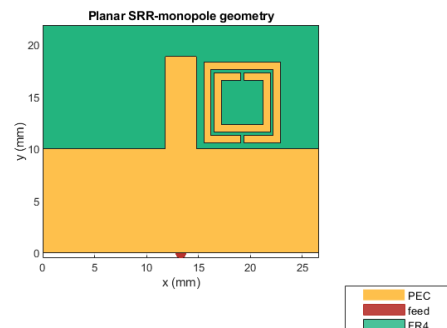
Σχήμα 2.2: Γεωμετρία κυψελίδας διπλού SRR.

2.2 Μονοπολική κεραία και επίπεδη πλακέτα

Η μονοπολική ταινία τοποθετείται κάθετα από την κορυφή των δύο επίγειων επιφανειών (pads) και τροφοδοτείται με κάθετο μεταλλικό ακροδέκτη. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η πλήρης γεωμετρία της κατασκευής, μαζί με τα pads και την κεραία:



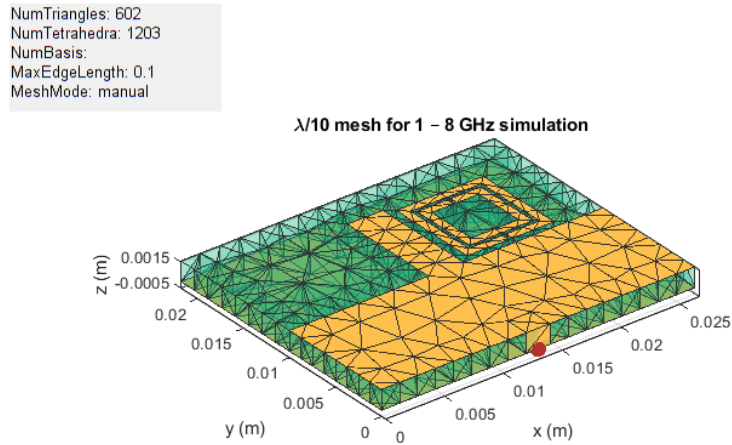
Σχήμα 2.3: Γεωμετρία μονόπολου και Ground Pads με SRR (Περίπτωση 1).



Σχήμα 2.4: Ολοκληρωμένη γεωμετρία κεραίας με SRR (Περίπτωση 1).

2.3 Πλέγμα και εξομοίωση

Για την ανάγκη ακρίβειας στη χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου, εφαρμόστηκε πλέγμα μήκους ακμής $\lambda/10$ εντός του εύρους 1GHz έως 8 GHz. Το πλέγμα υπολογίζεται αυτόματα από την εντολή `mesh(pcb, ...)` με παραμέτρους που ελέγχουν την ανάπτυξη του στοιχείου πλέγματος (growth rate), τη μέγιστη και ελάχιστη ακμή. Παρακάτω παρουσιάζεται το αντίστοιχο πλέγμα για αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 2.5: Mesh Ολόκληρης κεραίας (Περίπτωση 1).

Η τροφοδοσία τοποθετήθηκε στη βάση του μονοπολικού αγωγού, μεταξύ της κορυφής των επιγείων και της κάτω πλευράς του αγωγού. Επομένως, υλοποιήθηκε με τροφοδοσία τύπου μέσω από τη στρώση 3 (ground) στη στρώση 1 (αγωγός), σύμφωνα με την απαίτηση του Antenna Toolbox.

2.4 Παρουσίαση υπολοίπων Περιπτώσεων - μεταβολές Παραμέτρων Γεωμετρίας Κεραιών

Η βασική περίπτωση υλοποιείται με βάση τη γεωμετρία της μονοπολικής κεραίας μικροταινίας, όπως αυτή παρουσιάζεται στο paper που επιλέχθηκε. Οι υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις του άρθρου προκύπτουν με στοχευμένες αλλαγές στις διαστάσεις και στη δομή του αγωγίμου τμήματος της κεραίας. Συνοπτικά:

• Περίπτωση 1 — Microstrip-fed, ευθύγραμμη:

Όπως δίνεται στην αρχική γεωμετρία, οι διαστάσεις είναι:

- ΣΡΡ: $y = 7.4 \text{ mm}$, $z = 7.7 \text{ mm}$
- Μονοπολικό μήκος: $l_m = 8.8 \text{ mm}$
- Μονοπολικό πλάτος: $w_m = 3 \text{ mm}$

– Γείωση: $l_g = 10 \text{ mm}$, $w_g = 26.6 \text{ mm}$

• **Περίπτωση 2 — Coplanar-fed, ευθύγραμμη:**

Η τροφοδοσία είναι συν-επίπεδη (coplanar). Εδώ τροποποιούνται οι αποστάσεις SRR και το πλάτος του επίπεδου αγωγίμου. Επιπλέον:

– $y = 7.6 \text{ mm}$, $z = 7.3 \text{ mm}$

– $w_g = 11.5 \text{ mm}$ (πλάτος κάθε pad)

• **Περίπτωση 3 — Microstrip-fed, σχήματος L:**

Όπως στην Περίπτωση 1, αλλά αλλάζει το ύψος του μονοπολικού σκέλους και προστίθεται οριζόντιο τμήμα. Οι νέες παράμετροι είναι:

– $l_m = 11.8 \text{ mm}$ (κάθετο σκέλος)

– $k_m = 11.8 \text{ mm}$ (οριζόντιο σκέλος)

• **Περίπτωση 4 — Coplanar-fed, σχήματος L:**

Συνδυασμός των τροποποιήσεων της Περίπτωσης 2 και 3:

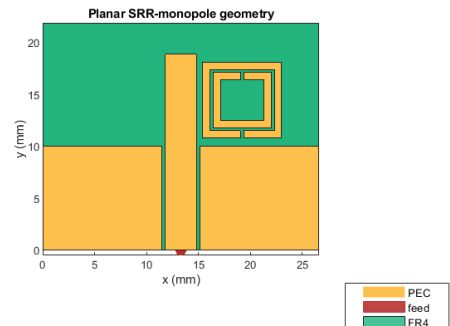
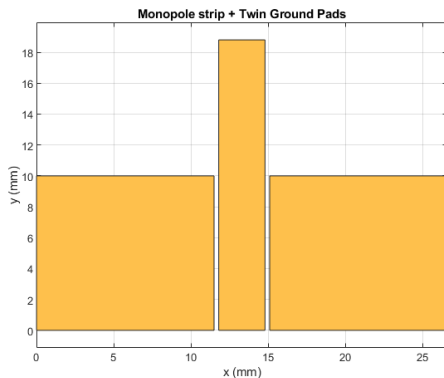
– $y = 7.4 \text{ mm}$, $z = 7.4 \text{ mm}$

– $l_m = 11.8 \text{ mm}$, $k_m = 11.8 \text{ mm}$

– $w_g = 11.5 \text{ mm}$

Τα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν σε κάθε επιμέρους περίπτωση για την γεωμετρία παρουσιάζονται παρακάτω και ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με την Περίπτωση 1 ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι η γεωμετρία του SRR παραμένει ίδια:

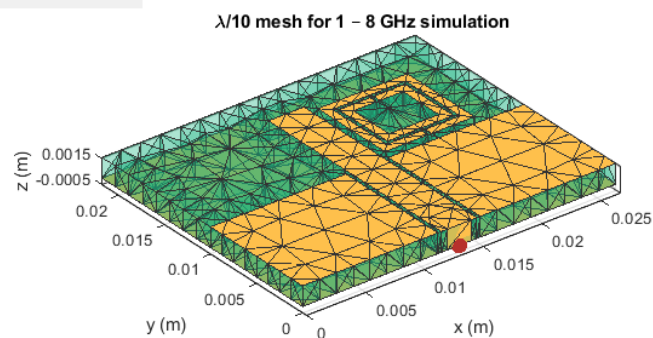
2.4.1 Περίπτωση 2



Σχήμα 2.6: Γεωμετρία μονόπολου και Ground Pads με SRR (Περίπτωση 2).

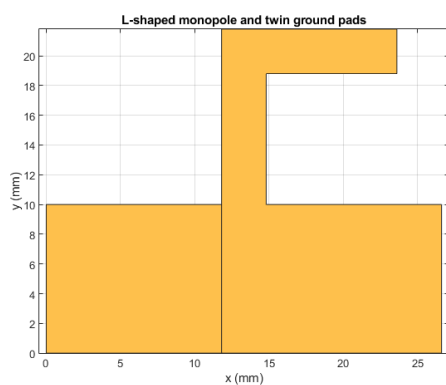
Σχήμα 2.7: Ολοκληρωμένη γεωμετρία κεραίας με SRR (Περίπτωση 2).

NumTriangles: 670
 NumTetrahedra: 1353
 NumBasis:
 MaxEdgeLength: 0.1
 MeshMode: manual

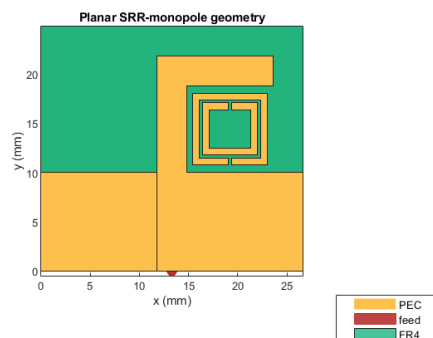


Σχήμα 2.8: Mesh Ολόκληρης κεραίας (Περίπτωση 2).

2.4.2 Περίπτωση 3

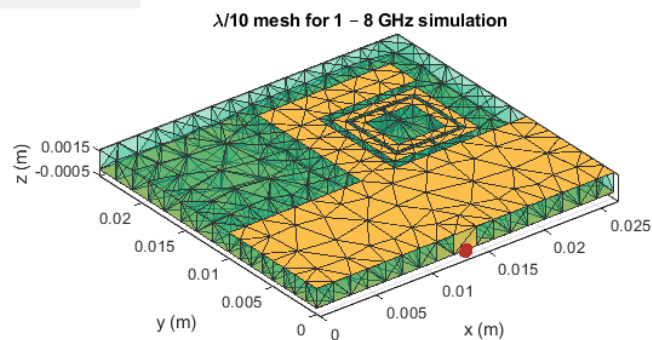


Σχήμα 2.9: Γεωμετρία μονόπολου και Ground Pads με SRR (Περίπτωση 3).



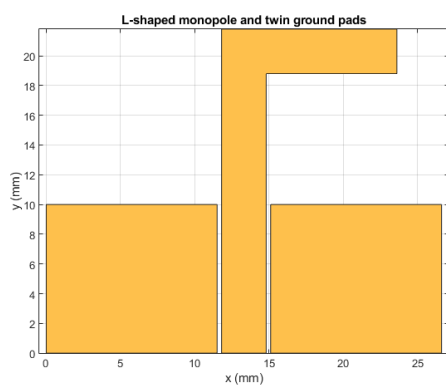
Σχήμα 2.10: Ολοκληρωμένη γεωμετρία κεραίας με SRR (Περίπτωση 3).

NumTriangles: 682
 NumTetrahedra: 1365
 NumBasis:
 MaxEdgeLength: 0.1
 MeshMode: manual

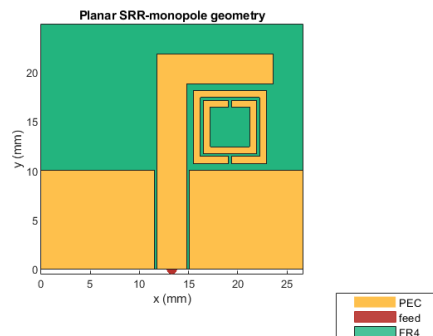


Σχήμα 2.11: Mesh Ολόκληρης κεραίας (Περίπτωση 3).

2.4.3 Περίπτωση 4

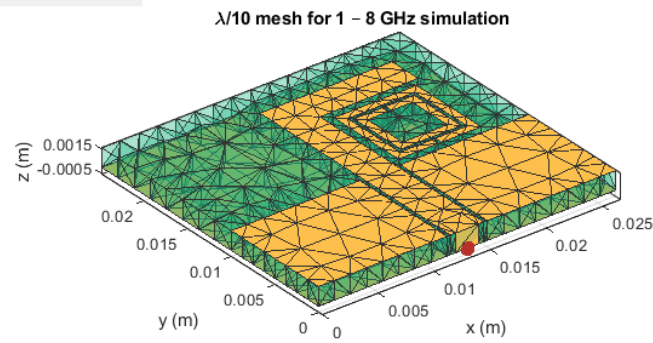


Σχήμα 2.12: Γεωμετρία μονόπολου και Ground Pads με SRR (Περίπτωση 4).



Σχήμα 2.13: Ολοκληρωμένη γεωμετρία κεραίας με SRR (Περίπτωση 4).

NumTriangles: 746
NumTetrahedra: 1503
NumBasis:
MaxEdgeLength: 0.1
MeshMode: manual



Σχήμα 2.14: Mesh Ολόκληρης κεραίας (Περίπτωση 4).

Κάθε περίπτωση οδηγεί σε διαφορετική συχνοτική συμπεριφορά, όπως αυτή επιβεβαιώνεται από τη γραφική παράσταση του συντελεστή ανάκλασης $|S_{11}|$ όπως θα δούμε και παρακάτω άλλωστε, και επηρεάζει κρίσιμα τη χωρική κατανομή της ακτινοβολίας και την απόδοση της κεραίας. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι οι γεωμετρίες που προέκυψαν είναι ταυτόσημες με εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν στο paper και ότι οι αντίστοιχοι κώδικες για κάθε περίπτωση βρίσκονται στα αρχεία MATLAB Part1.m, Part2.m, Part3.m και Part4.m αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 3

Ανάλυση Αποτελεσμάτων Σχολιασμός και Υπολογισμός Μεγεθών Απόδοσης

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εξομοίωσης για κάθε γεωμετρία που σχεδιάστηκε. Για κάθε μία από τις τέσσερις περιπτώσεις, εξάγονται κρίσιμα μεγέθη απόδοσης της κεραίας, όπως:

- Το εύρος ζώνης -10 dB (Bandwidth),
- Η αποδοτικότητα ακτινοβολίας (Radiation Efficiency),
- Η ποιότητα Q και το Chu Limit,
- Το *Effective* Q ως μέτρο συμπαγούς σχεδίασης.

3.2 Αποτελέσματα Οπτικοποίησης

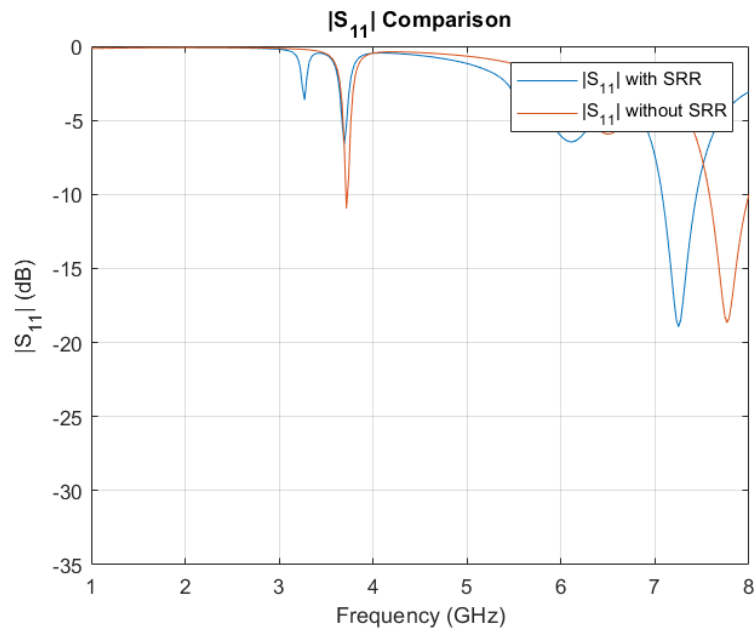
Η εξαγωγή των γραφημάτων και η οπτική απεικόνιση των χαρακτηριστικών των κεραιών αποτελεί κρίσιμο βήμα αξιολόγησης της συμπεριφοράς τους. Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται οι βασικές μορφές οπτικοποίησης που προέκυψαν από την εξομοίωση:

3.2.1 Συντελεστής Ανάκλασης $|S_{11}|$

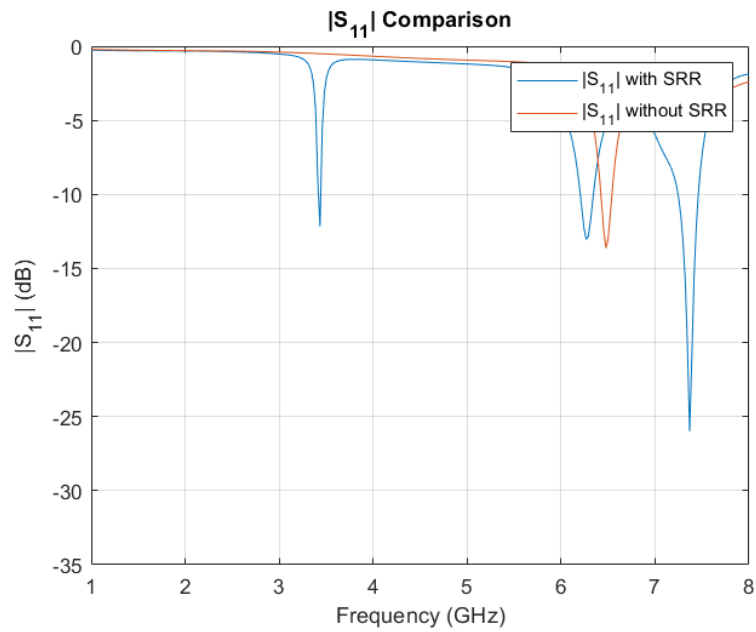
Ο συντελεστής ανάκλασης $|S_{11}|$ εξάγεται από το αντικείμενο σπαραμετερς του MATLAB ως:

```
freq = linspace(1e9,8e9,300);  
S = sparameters(pcb, freq, 50);  
S11_dB = 20*log10(abs(squeeze(S.Parameters(1,1,:))));
```

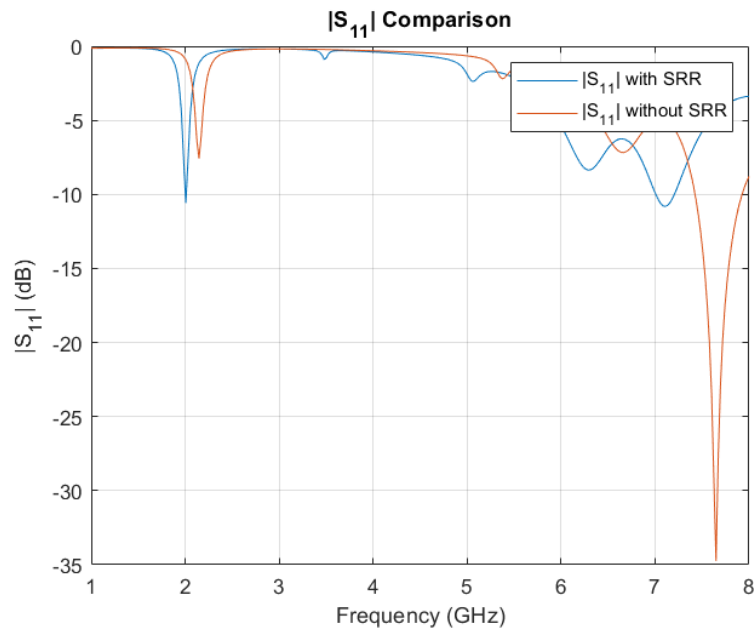
Αναπαρίσταται γραφικά σε σχέση με τη συχνότητα, παρέχοντας πληροφορία για το συντονισμό της κεραίας και τη συχνοτική περιοχή στην οποία επιτυγχάνεται καλή προσαρμογή (δηλαδή $|S_{11}| < -10$ dB). Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για κάθε μία από τις περιπτώσεις 1, 2, 3 και 4 όταν η κεραία έχει SRR και όταν δεν έχει SRR:



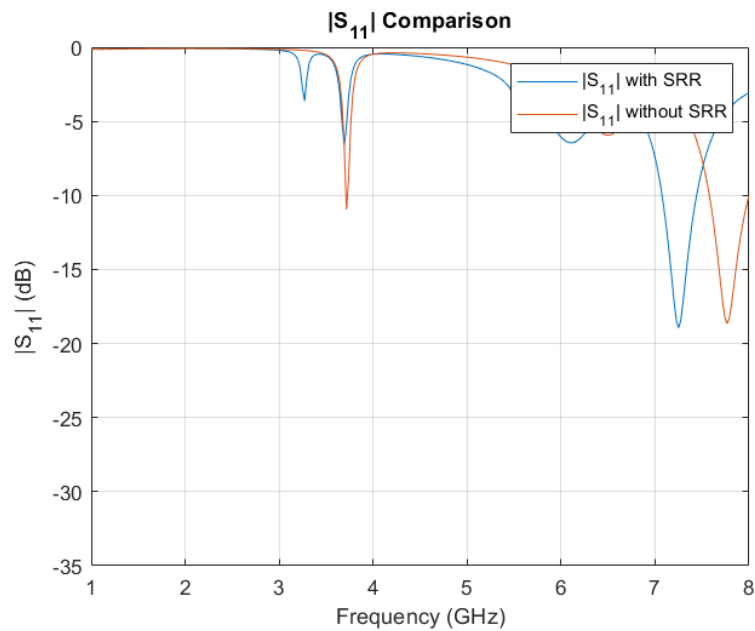
Σχήμα 3.1: Σύγκριση $|S_{11}|$ για την πρώτη κεραία με και χωρίς SRR (Περίπτωση 1).



Σχήμα 3.2: Σύγκριση $|S_{11}|$ για την δεύτερη κεραία με και χωρίς SRR (Περίπτωση 2).



Σχήμα 3.3: Σύγκριση $|S_{11}|$ για την τρίτη κεραία με και χωρίς SRR (Περίπτωση 3).



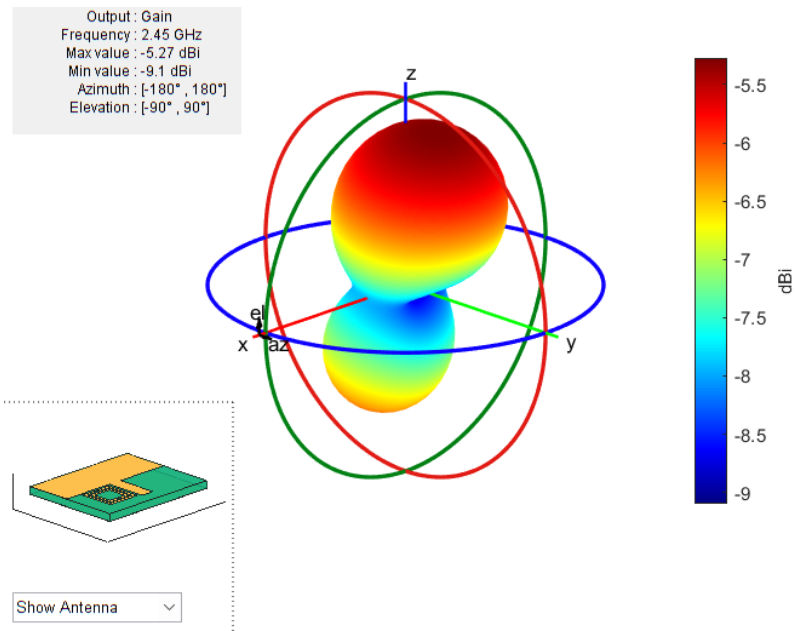
Σχήμα 3.4: Σύγκριση $|S_{11}|$ για την τέταρτη κεραία με και χωρίς SRR (Περίπτωση 4).

3.2.2 Τρισδιάστατο Διάγραμμα Ακτινοβολίας

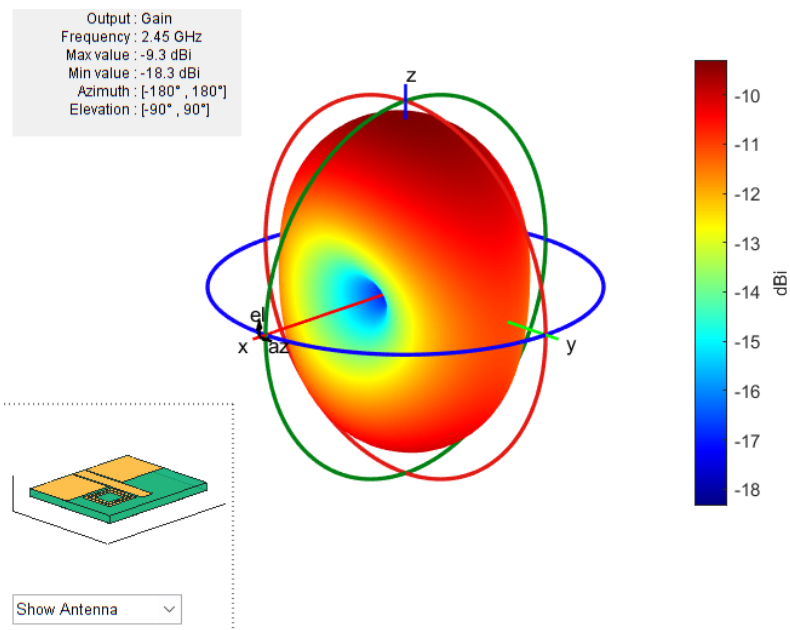
Το MATLAB προσφέρει τη δυνατότητα απεικόνισης του διαγράμματος ακτινοβολίας μέσω της εντολής:

```
pattern(pcb, 2.45e9);
```

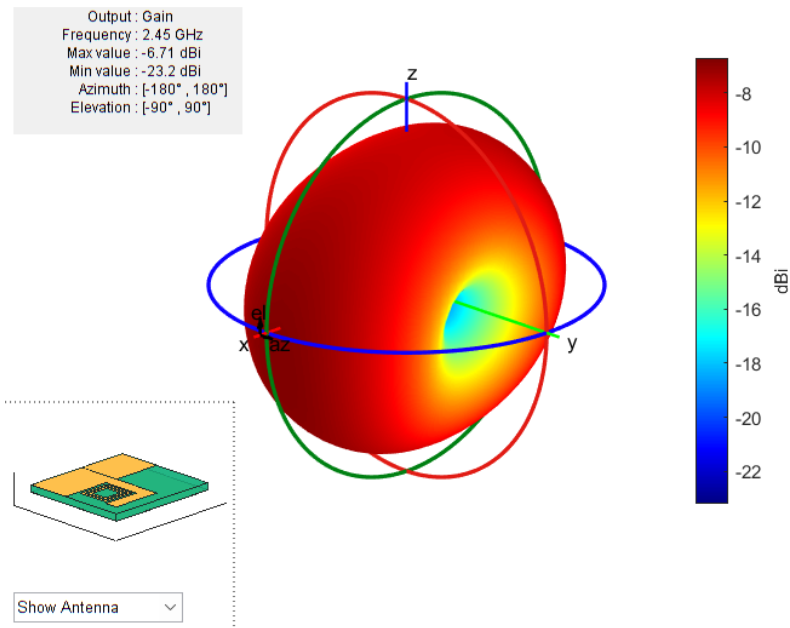
Αυτό παράγει την τρισδιάστατη κατανομή της ακτινοβολούμενης ισχύος στο χώρο για τη συχνότητα λειτουργίας $f = 2.45 \text{ GHz}$. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για κάθε μία από τις περιπτώσεις 1, 2, 3 και 4 όταν η κεραία έχει SRR:



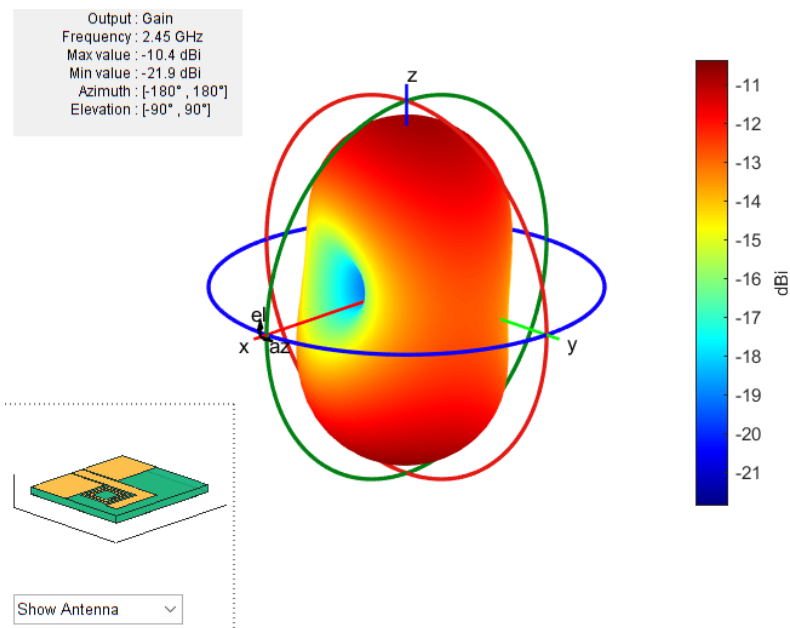
Σχήμα 3.5: (Περίπτωση 1) Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στα 2.45 GHz.



Σχήμα 3.6: (Περίπτωση 2) Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στα 2.45 GHz.



Σχήμα 3.7: (Περίπτωση 3) Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στα 2.45 GHz.



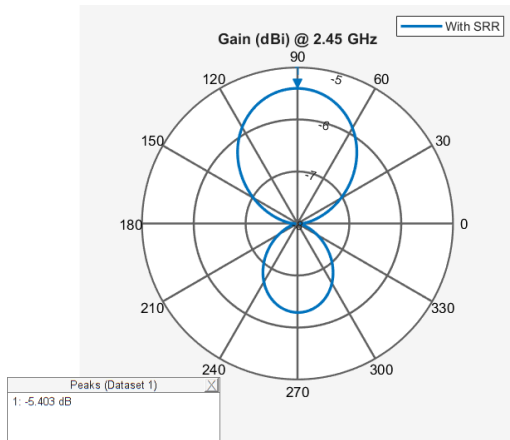
Σχήμα 3.8: (Περίπτωση 4) Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στα 2.45 GHz.

3.2.3 Τομή Ανύψωσης (Elevation Pattern)

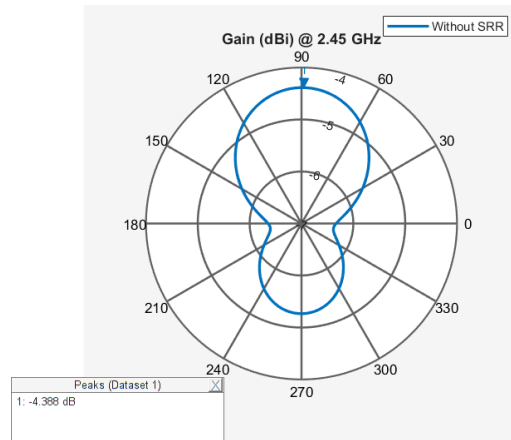
Το διάγραμμα ανύψωσης αποδίδει την εξάρτηση της ακτινοβολίας ως προς τη γωνία θ στο επίπεδο $\varphi = 0^\circ$ όπως ακριβώς επιδεικνύεται και στο paper , το οποίο αναπαριστά τη **κάθετη τομή** του διαγράμματος:

```
patternElevation(pcb, 2.45e9, 0);
```

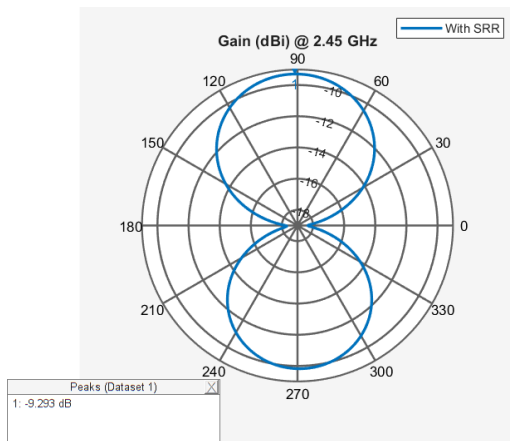
Με αυτό τον τρόπο παρατηρείται η ύπαρξη κύριων λοβών και πλευρικών λοβών (sidelobes), καθώς και η συμμετρία της ακτινοβολίας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για κάθε μία από τις περιπτώσεις 1, 2, 3 και 4 όταν η κεραία έχει SRR και όταν δεν έχει SRR:



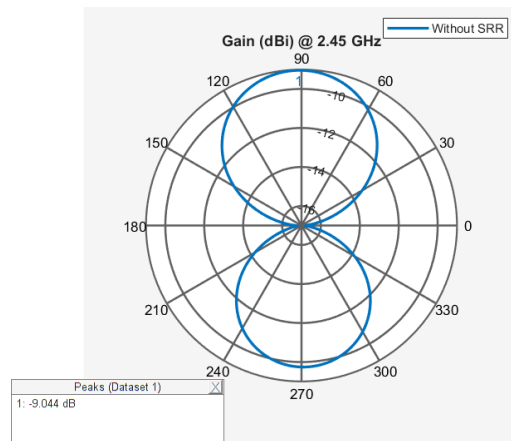
Σχήμα 3.9: Διάγραμμα ανύψωσης ($\varphi = 0^\circ$) με SRR (Περίπτωση 1).



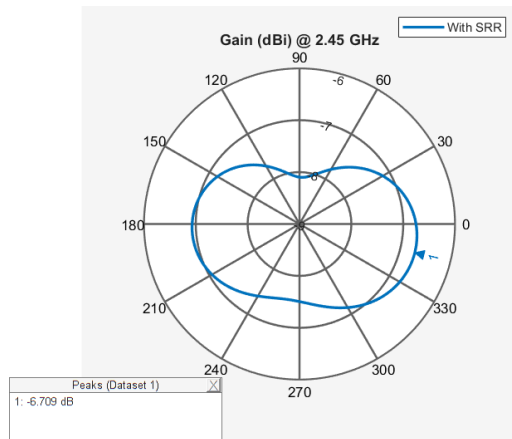
Σχήμα 3.10: Διάγραμμα ανύψωσης ($\varphi = 0^\circ$) χωρίς SRR (Περίπτωση 1).



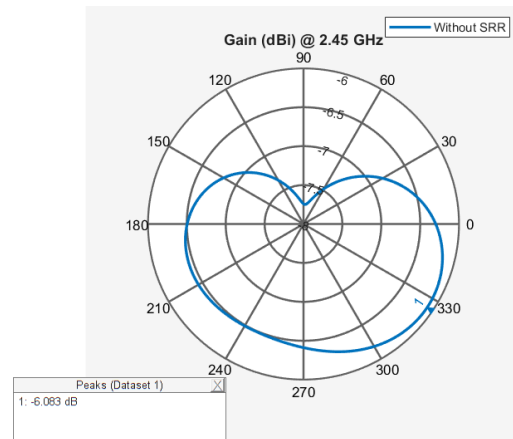
Σχήμα 3.11: Διάγραμμα ανύψωσης ($\varphi = 0^\circ$) με SRR (Περίπτωση 2).



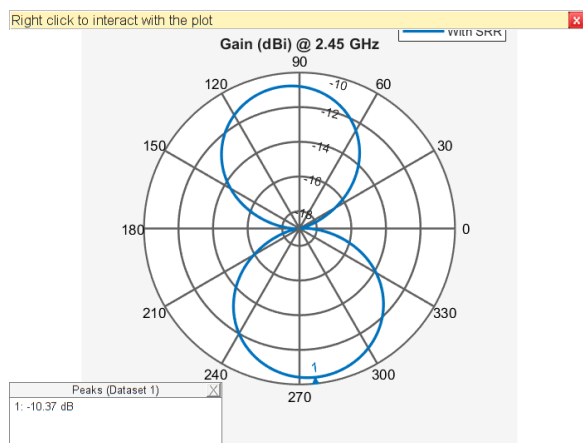
Σχήμα 3.12: Διάγραμμα ανύψωσης ($\varphi = 0^\circ$) χωρίς SRR (Περίπτωση 2).



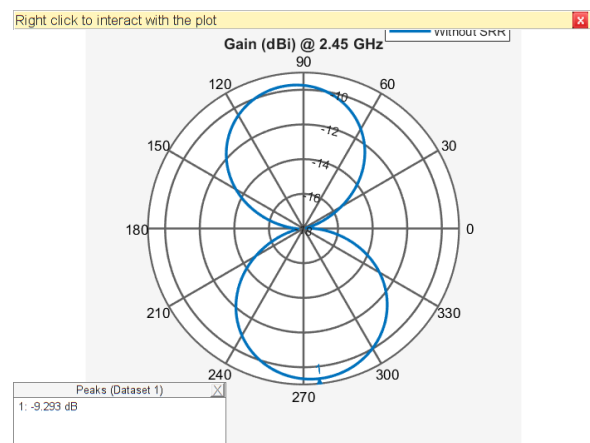
Σχήμα 3.13: Διάγραμμα ανύψωσης ($\varphi = 0^\circ$) με SRR (Περίπτωση 3).



Σχήμα 3.14: Διάγραμμα ανύψωσης ($\varphi = 0^\circ$) χωρίς SRR (Περίπτωση 3).



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα ανύψωσης ($\varphi = 0^\circ$) με SRR (Περίπτωση 4).



Σχήμα 3.16: Διάγραμμα ανύψωσης ($\varphi = 0^\circ$) χωρίς SRR (Περίπτωση 4).

3.2.4 Σχολιασμός

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας αποδεικνύουν ότι η εισαγωγή μεταλλικής δακτυλιοειδούς δομής (SRR) επηρεάζει σημαντικά τη χωρική κατανομή και τη σύζευξη με τα γειτονικά μεταλλικά στοιχεία. Συγκεκριμένα όσον αφορά την ανάλυση και Συμπεράσματα Σ-παραμέτρων: Στα Σχήματα 3.1 έως 3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εξομοίωσης για τις τέσσερις διαφορετικές γεωμετρίες κεραιών, με και χωρίς την ενσωμάτωση μεταλλικού στοιχείου SRR. Οι καμπύλες $|S_{11}|$ αναδεικνύουν ξεκάθαρα τις επιπτώσεις του SRR στη συχνοτική απόκριση.

• Περίπτωση 1 – Μικροταινιακή μονοπολική κεραία:

- Η παρουσία του SRR επιφέρει την εμφάνιση δύο έντονων συντονισμών.
- Ο πρώτος συντονισμός γύρω από τα 2.5 GHz απουσιάζει πλήρως στην απλή κεραία.
- Το εύρος ζώνης είναι σχετικά περιορισμένο αλλά σαφώς καθορισμένο.

• Περίπτωση 2 – Συν-επίπεδη μονοπολική κεραία:

- Χωρίς το SRR, εντοπίζεται μόνο ένας υψηλός και αδύναμος συντονισμός.
- Με την προσθήκη του SRR, εμφανίζονται επιπλέον ζώνες λειτουργίας σε χαμηλότερες συχνότητες.
- Παρατηρείται δυνατότητα πολυσυχνотικής λειτουργίας (multiband).

• **Περίπτωση 3 – Μικροταινιακή κεραία σχήματος L:**

- Το οριζόντιο σκέλος αυξάνει τον αριθμό των συντονισμών.
- Η επίδραση του SRR είναι ιδιαίτερα εμφανής σε χαμηλότερες συχνότητες.
- Παρατηρείται μεγαλύτερο εύρος ζώνης και περισσότερα σημεία λειτουργίας.

• **Περίπτωση 4 – Συν-επίπεδη κεραία σχήματος L:**

- Η πιο πολύπλοκη γεωμετρία οδηγεί σε πιο πλούσια και εκτεταμένη απόκριση.
- Με το SRR παρατηρούνται πολλαπλοί βαθιοί συντονισμοί, ιδίως στην περιοχή 5–6.5 GHz .
- Το SRR και το σχήμα L συνεργάζονται για μέγιστη απόδοση.

Συνολικά Συμπεράσματα

- Η προσθήκη SRR βελτιώνει σημαντικά την πολυσυχνотική συμπεριφορά.
- Οι δομές τύπου L ενισχύουν την ευρυζωνικότητα και προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία.
- Οι συντονισμοί που δημιουργούνται είναι σταθεροί και καλά ελεγχόμενοι, επαληθεύοντας το σχεδιαστικό μοντέλο του άρθρου παρόλο που υπάρχουν αποκλίσεις στα plots από αυτά που παρουσιάστηκαν στο paper .
- **Επηρεασμός κατανομής πεδίου:** Η εισαγωγή της μεταλλικής δακτυλιοειδούς δομής (SRR) μεταβάλλει την κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο χώρο, οδηγώντας σε ανακατανομή της ενέργειας σε διαφορετικές γωνίες ακτινοβολίας.

3.3 Μαθηματικό Υπόβαθρο

Αποδοτικότητα Ακτινοβολίας

Η αποδοτικότητα ακτινοβολίας προσεγγίστηκε μέσω του λόγου μέγιστου κέρδους προς μέγιστη κατευθυντικότητα:

$$\eta = \frac{G_{\max}}{D_{\max}} \quad \text{με } G, D \text{ σε γραμμική μορφή}$$

Οι τιμές dBi μετατράπηκαν σε γραμμική μορφή:

$$G_{\text{lin}} = 10^{G/10}, \quad D_{\text{lin}} = 10^{D/10} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{G_{\text{lin}}}{D_{\text{lin}}}$$

Εύρος Ζώνης (-10 dB)

Το εύρος ζώνης προκύπτει ως διαφορά μεταξύ των ακραίων συχνοτήτων όπου ο συντελεστής ανάκλασης ικανοποιεί:

$$|S_{11}| \leq -10 \text{ dB} \Rightarrow \text{BW} = f_{\text{end}} - f_{\text{start}}$$

Chu Limit και Q

Για την ανάλυση συμπαγούς σχεδίασης εφαρμόστηκε η θεωρία Chu:

$$ka = \frac{2\pi a}{\lambda}, \quad Q_{\text{Chu}} = \frac{1}{ka^3} + \frac{1}{ka}$$

Όπου a η ακτίνα νοητής σφαίρας:

$$a = \sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 + l_m^2}$$

Και:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Η πραγματική ποιότητα κεραίας ορίζεται ως:

$$Q = \frac{f_0}{\text{BW}}, \quad Q_{\text{eff}} = \frac{Q}{\eta}$$

3.4 Αποτελέσματα ανά Περίπτωση

3.4.1 Περίπτωση 1 — Microstrip-fed, Ευθύγραμμη

- Με SRR(Μεταλλικό Στοιχείο Αντίστασης):

- Εύρος Ζώνης -10 dB: 7.09 – 7.44 GHz (351.2 MHz)
- Εκτιμώμενη Αποδοτικότητα: 19.19%
- Αποτελεσματική Ποιότητα Q_{eff} : 36.35

- Χωρίς SRR:

- Εύρος Ζώνης -10 dB: 3.72 – 7.98 GHz (4260.9 MHz)
- Εκτιμώμενη Αποδοτικότητα: 24.02%
- Αποτελεσματική Ποιότητα Q_{eff} : 2.39

- Ανάλυση Συμπαγούς Σχεδίασης (Chu Limit):

- $ka = 1.1817$
- Χαμηλό Όριο Chu για το Q : 1.45

3.4.2 Περίπτωση 2 — Coplanar-fed, Ευθύγραμμο

- **Με SRR (Μεταλλικό Στοιχείο Αντίστασης):**
 - Εύρος Ζώνης -10 dB: 3.43 – 7.44 GHz (4003.3 MHz)
 - Εκτιμώμενη Αποδοτικότητα: 6.91%
 - Αποτελεσματική Ποιότητα Q_{eff} : 8.86
- **Χωρίς SRR:**
 - Εύρος Ζώνης -10 dB: 6.43 – 6.53 GHz (93.6 MHz)
 - Εκτιμώμενη Αποδοτικότητα: 7.31%
 - Αποτελεσματική Ποιότητα Q_{eff} : 358.09
- **Ανάλυση Συμπαγούς Σχεδίασης (Chu Limit):**
 - $ka = 1.1817$
 - Χαμηλό Όριο Chu για το Q : 1.45

3.4.3 Περίπτωση 3 — Microstrip-fed, Σχήματος L

- **Με SRR (Μεταλλικό Στοιχείο Αντίστασης):**
 - Εύρος Ζώνης -10 dB: 2.01 – 7.20 GHz (5197.3 MHz)
 - Εκτιμώμενη Αποδοτικότητα: 12.97%
 - Αποτελεσματική Ποιότητα Q_{eff} : 3.63
- **Χωρίς SRR:**
 - Εύρος Ζώνης -10 dB: 7.44 – 7.91 GHz (468.2 MHz)
 - Εκτιμώμενη Αποδοτικότητα: 14.54%
 - Αποτελεσματική Ποιότητα Q_{eff} : 35.98
- **Ανάλυση Συμπαγούς Σχεδίασης (Chu Limit):**
 - $ka = 1.3104$
 - Χαμηλό Όριο Chu για το Q : 1.21

3.4.4 Περίπτωση 4 — Coplanar-fed, Σχήματος L

- **Με SRR (Μεταλλικό Στοιχείο Αντίστασης):**
 - Εύρος Ζώνης -10 dB: 3.48 – 7.51 GHz (4026.8 MHz)
 - Εκτιμώμενη Αποδοτικότητα: 4.87%
 - Αποτελεσματική Ποιότητα Q_{eff} : 12.49
- **Χωρίς SRR:**

- Εύρος Ζώνης -10 dB: 6.34 – 6.57 GHz (234.1 MHz)
- Εκτιμώμενη Αποδοτικότητα: 6.41%
- Αποτελεσματική Ποιότητα Q_{eff} : 163.24
- **Ανάλυση Συμπαγούς Σχεδίασης (Chu Limit):**
 - $ka = 1.3104$
 - Χαμηλό Όριο Chu για το Q : 1.21

3.5 Σύνοψη Αποτελεσμάτων και Απόδοσης

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μελέτη μου όπως παρατηρούμε δεν συμπίπτουν δυστυχώς τόσο με αυτά του Paper για το εύρος ζώνης την αποδοτικότητα και το όριο Chuπαρόλο που η γεωμετρία είναι σωστή. Η παρατήρηση αυτή γίνεται διότι:

- **Χαμηλή αποδοτικότητα**
 - FR_4 ($\tan\delta \approx 0.02$) και λεπτά ίχνη \Rightarrow απώλειες 10–25%.
- **Μεγάλο Q_{eff} σε σχέση με Chu**
 - Τα περισσότερα δείγματα απέχουν $\sim 10\times$ από το θεωρητικό κατώφλι.
 - Ελλιπής γέμιση του διαθέσιμου όγκου ακτινοβολίας.
- **Ασυνεπής επίδραση SRR στο εύρος ζώνης**
 - Σε ορισμένες γεωμετρίες το BW στενεύει αντί να αυξάνεται.
 - $-S_{11}$ μόλις περνά τα $-10\text{dB} \Rightarrow$ οριακό ταίριασμα.
- **Πιθανή ιδέα για βελτίωση**
 - Να ρυθμίσουμε περισσότερα τις μεταβλητές S , FeedDiameter , FeedLocations , freq στον κώδικα
 - Πιθανά λάθη στην λογική υπολογισμών εύρους ζώνης και αποδοτικότητας.

Βιβλιογραφία

- [1] Metamaterial-Based Electrically Small Multiband Planar Monopole Antennas
- [2] Antenna Matlab Toolbox Tutorial