



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη Ευρυζωνικών Σχισμοκεραιών Τροφοδοτούμενων από Ομοεπίπεδη Γραμμή Μεταφοράς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αργύρης Ζ. Αναστόπουλος
Χρήστος Ε. Γκιθώνας

Επιβλέπων : Δήμητρα Ι. Κακλαμάνη
Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2004



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη Ευρυζωνικών Σχισμοκεραιών Τροφοδοτούμενων από Ομοεπίπεδη Γραμμή Μεταφοράς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αργύρης Ζ. Αναστόπουλος
Χρήστος Ε. Γκιθώνας

Επιβλέπων : Δήμητρα Ι. Κακλαμάνη
Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10η Οκτωβρίου 2004

.....
Δήμητρα Κακλαμάνη
Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιάκωβος Βενιέρης
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2004

.....
Αργύρης Ζ. Αναστόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Ε. Γκιθώνας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αργύρης Αναστόπουλος, 2004.

Copyright © Χρήστος Γκιθώνας, 2004.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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 δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά την επίκουρο Καθηγήτρια Δήμητρα Κακλαμάνη για την δυνατότητα που μας έδωσε να εκπονήσουμε την διπλωματική εργασία σε ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον πεδίο της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού. Επίσης ευχαριστούμε τον υποψήφιο διδάκτορα Ευάγγελο Αγγελόπουλο για την καθοδήγηση, το χρόνο που διέθεσε και τις παρατηρήσεις του όλο αυτό το χρονικό διάστημα. Τέλος θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή κ. Ιωάννη Αβαριτσιώτη για την διάθεση του εργαστηρίου αισθητήρων όπου έγινε η κατασκευή των κεραιών και τον κύριο Κολιόπουλο που ανέλαβε το τεχνικό μέρος της κατασκευής.

Αναστόπουλος Αργύρης
Γκιθώνας Χρήστος

Οκτώβριος 2004

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη των ευρυζωνικών σχισμοκεραιών. Οι μικροταινιακές κεραίες τα τελευταία χρόνια έχουν γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη και τείνουν να αντικαταστήσουν τις περισσότερες συμβατικές κεραίες, καθώς τα πλεονεκτήματά τους – χαμηλό κόστος, ευκολία κατασκευής, μικρό μέγεθος, δυνατότητα μαζικής παραγωγής – τις καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικές. Η ευρυζωνικότητα είναι επίσης μια σύγχρονη τεχνολογική απαίτηση, καθώς υπάρχει ανάγκη για διασύνδεση διαφορετικών υπηρεσιών που λειτουργούν σε διαφορετικές πριοχές συχνότητων, ειδικά όσο αφορά τα ασύρματα τοπικά δίκτυα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μοντελοποιήσαμε ένα πλήθος κεραιών που συνοψίζουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Στόχος μας κατά την υπολογιστική σχεδίαση ήταν η διεύρυνση του εύρους ζώνης λειτουργίας τους, έχοντας όμως υπόψη και τις άλλες σημαντικές παραμέτρους: αντίσταση εισόδου, διαγράμματα ακτινοβολίας, αξονικός λόγος, κέρδος.

Τα καλύτερα μοντέλα που προέκυψαν από την προσομοίωση τυπώθηκαν με τη μέθοδο της φωτολιθογραφίας και μετρήθηκαν στον ανηχοϊκό θάλαμο.

Λέξεις – κλειδιά

Μικροταινιακή, σχισμοκεραία, ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς, ευρυζωνική, μετασχηματισμός αντίστασης εισόδου, ορθογωνική, τριγωνική, καμπυλωμένη, παρασιτικά στοιχεία, κυλινδρική, ανακλαστήρας, φωτολιθογραφία.

Abstract

The aim of this thesis is the study of ultra wideband slot antennas. During last years microstrip antennas have evolved at a great rate and tend to replace most conventional antennas, since their advantages – low cost, easy fabrication, low volume, mass production possibility – make them very attractive. Wide impedance matching is also a technological demand, since there is the need for connection between different services that use different frequency bands, especially concerning wireless local networks (WLANs).

In the present paper we modeled an amount of antennas who recapitulate the above features. Our purpose during computing designing was the achievement of wider impedance matching, having also in mind others significant parameters: impedance input, radiation pattern, axial ratio, gain.

Best models derived from simulation were printed with the method of photolithography and were measured into anechoic room.

Keywords

Microstrip, slot antenna, coplanar waveguide, wideband, impedance transition, rectangular, bow-tie, curved, parasitic elements, cylindrical, reflector, photolithography.

Περιεχόμενα.....	8
Ευρετήριο σχημάτων.....	10
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	
1.1 Εισαγωγή.....	16
1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μικροταινιακών κεραιών.....	17
1.3 Είδη μικροταινιακών κεραιών.....	18
1.4 Τεχνικές τροφοδοσίας.....	22
1.5 Θεωρητική μελέτη CPW-fed slot antennas.....	26
1.6 Υπολογιστικά θέματα – Εξομοιώσεις.....	31
1.7 Εφαρμογές.....	35
1.8 Βιβλιογραφία.....	38
Κεφάλαιο 2: Ορθογωνικές σχισμοκεραίες	
2.1 Εισαγωγή.....	41
2.2 Σχεδίαση-μοντελοποίηση ορθογωνικής σχισμοκεραίας.....	43
2.3 Παραμετρική μελέτη ορθογωνικής σχισμοκεραίας.....	47
2.4 Προσαρμογή με μετασχηματισμό της ομοεπίπεδης γραμμής.....	49
2.5 Περισσότερες ορθογωνικές σχισμοκεραίες.....	51
2.6 Προσθήκη παρασιτικών στοιχείων.....	53
2.7 Βιβλιογραφία.....	60
Παράρτημα 2Α.....	61
Παράρτημα 2Β.....	66
Κεφάλαιο 3: Bow-Tie σχισμοκεραίες	
3.1 Εισαγωγή.....	70
3.2 Συμμετρικό μοντέλο bow-tie.....	71
3.3 Ασύμμετρο μοντέλο bow-tie.....	74
3.4 Η σημασία του transition.....	80
3.5 Ασύμμετρο μοντέλο bow-tie με παρασιτικά.....	82
3.6 Βιβλιογραφία.....	84
Παράρτημα 3.....	86
Κεφάλαιο 4: Χρήση Ανακλαστήρα/Περισσότερα μοντέλα Σχισμοκεραιών	
4.1 Χρήση Ανακλαστήρα.....	95
4.2 Bow-tie με καμπυλωμένες πλευρές.....	102
4.3 Κυλινδρικό μοντέλο.....	104
4.4 Περισσότερες σχισμοκεραίες.....	107
4.5 Βιβλιογραφία.....	110

Κεφάλαιο 5: Κατασκευή και μέτρηση κεραιών	
5.1 Κατασκευή των σχισμοκεραιών.....	112
5.2 Διαδικασία μετρήσεων.....	120
5.2.1 Network Analyzer.....	120
5.2.2 Ανηχοικός θάλαμος.....	122
5.3 Αποτελέσματα μετρήσεων.....	126
5.3.1 Ορθογωνική σχισμοκεραία χωρίς transition.....	126
5.3.2 Ορθογωνική σχισμοκεραία με transition.....	129
5.3.3 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία.....	132
5.3.4 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία.....	137
5.3.5 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία – αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο.....	142
5.3.6 bow-tie κεραία.....	147
5.3.7 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία.....	156
5.4 Συμπεράσματα.....	167
Παράρτημα 5A.....	170
Παράρτημα 5B.....	171

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1.1 Κεραία μικροταινιακού καλύμματος.....	16
Σχήμα 1.2 Βασικά σχήματα καλυμμάτων μικροταινιακών κεραιών.....	19
Σχήμα 1.3 Κεραίες οδεύοντος κύματος.....	20
Σχήμα 1.4 Διάφορες σχισμοκεραίες.....	21
Σχήμα 1.5 Ποιοτική σύγκριση patch και slot κεραιών.....	22
Σχήμα 1.6 Γεωμετρία μικροταινίας.....	23
Σχήμα 1.7 Τρόποι τροφοδοσίας.....	23
Σχήμα 1.8 Ομοαξονική τροφοδοσία.....	24
Σχήμα 1.9 Ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς.....	25
Σχήμα 1.10 πυκνότητα πλέγματος σε Coplanar γραμμή.....	35
Σχήμα 2.1 CPW-fed active slot antenna.....	41
Σχήμα 2.2 microstrip patch antenna with coplanar feed line.....	42
Σχήμα 2.3 CPW fed MMIC slot dipole.....	42
Σχήμα 2.4 Ορθογωνική σχισμοκεραία.....	43
Σχήμα 2.5 Ορθογωνική σχισμοκεραία σε συχνότητα λειτουργίας 5.5 GHz.....	44
Σχήμα 2.6 S_{11} ορθογωνικής σχισμοκεραίας.....	45
Σχήμα 2.7 $f=5$ GHz επίπεδο $x-z$	46
Σχήμα 2.8 $f=5$ GHz επίπεδο $y-z$	46
Σχήμα 2.9 $f=5.5$ GHz επίπεδο $x-z$	46
Σχήμα 2.10 $f=5.5$ GHz επίπεδο $y-z$	46
Σχήμα 2.11 $f=6$ GHz επίπεδο $x-z$	46
Σχήμα 2.12 $f=6$ GHz επίπεδο $y-z$	46
Σχήμα 2.13 Μεταβολή L_1 συναρτήσει συχνότητας.....	48
Σχήμα 2.14 transition ορθογωνικής σχισμοκεραίας.....	50
Σχήμα 2.15 Συγκριτικό S_{11} με /χωρίς transition.....	51
Σχήμα 2.16 $d_2=16.5$, $u=20$, $L_1=25$, $L=70$, $W=50$, $\epsilon_r=4.4$, $s=4$, $g=0.5$	52
Σχήμα 2.17 $d_2=8.75$, $u=15$, $L_1=25$, $L=70$, $W=50$, $\epsilon_r=4.4$, $s=4$, $g=0.5$	52
Σχήμα 2.18 $d_2=10$, $u=15$, $L_1=25$, $L=70$, $W=50$, $\epsilon_r=4.4$, $s=4$, $g=0.5$	52
Σχήμα 2.19 $d_2=5$, $u=5$, $L_1=15$, $L=70$, $W=50$, $\epsilon_r=4.4$, $s=4$, $g=0.5$	53
Σχήμα 2.20 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία.....	53
Σχήμα 2.21 Μοντέλο ορθογωνικής σχισμοκεραίας με παρασιτικά.....	54
Σχήμα 2.22 Διεύρυνση εύρους ζώνης μετά τη προσθήκη του παρασιτικού.....	55
Σχήμα 2.23 Πυκνότητα επιφανειακών ρευμάτων.....	56
Σχήμα 2.24 $f=5$ GHz επίπεδο $x-z$	57
Σχήμα 2.25 $f=5$ GHz επίπεδο $y-z$	57
Σχήμα 2.26 $f=5.5$ GHz επίπεδο $x-z$	57
Σχήμα 2.27 $f=5.5$ GHz επίπεδο $y-z$	57
Σχήμα 2.28 $f=6$ GHz επίπεδο $x-z$	57
Σχήμα 2.29 $f=6$ GHz επίπεδο $y-z$	57
Σχήμα 2.30 $f=6.5$ GHz επίπεδο $x-z$	58
Σχήμα 2.31 $f=6.5$ GHz επίπεδο $y-z$	58
Σχήμα 2.32 $f=7$ GHz επίπεδο $x-z$	58

Σχήμα 2.33 $f=7$ GHz επίπεδο $y-z$	58
Σχήμα 2.34 Transition αντίστασης εισόδου σε ορθογωνική με παρασιτικά.....	59
Σχήμα 2.35 Συγκριτικό S_{11} με /χωρίς transition σε ορθογωνική με παρασιτικά.	60
Σχήμα 2.36 Μεταβολή του L_1	61
Σχήμα 2.37 Μεταβολή του u	61
Σχήμα 2.38 Μεταβολή του s	62
Σχήμα 2.39 Μεταβολή του g	62
Σχήμα 2.40 Μεταβολή του L	63
Σχήμα 2.41 Μεταβολή του W	63
Σχήμα 2.42 Μεταβολή του d_2	64
Σχήμα 2.43 Μεταβολή του er	64
Σχήμα 2.44 Μεταβολή του h	65
Σχήμα 2.45 Μεταβολή του L_2	66
Σχήμα 2.46 Μεταβολή του u_2	66
Σχήμα 2.47 Μεταβολή του s_2	67
Σχήμα 2.48 Μεταβολή του d_2	67
Σχήμα 2.49 Μεταβολή του d_{12}	68
Σχήμα 3.1 Bow-tie slot antenna.....	70
Σχήμα 3.2 Μοντέλο συμμετρικής bow-tie.....	71
Σχήμα 3.3 S_{11} συμμετρικής bow-tie.....	72
Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ακτινοβολίας συμμετρικής bow-tie στα 2.5 GHz.....	73
Σχήμα 3.5 Διάγραμμα ακτινοβολίας συμμετρικής bow-tie στα 3 GHz.....	73
Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ακτινοβολίας συμμετρικής bow-tie στα 4 GHz.....	73
Σχήμα 3.7 Διάγραμμα ακτινοβολίας συμμετρικής bow-tie στα 5 GHz.....	74
Σχήμα 3.8 Μοντέλο ασύμμετρης bow-tie.....	74
Σχήμα 3.9 Διάταξη/τιμές για ασύμμετρη bow-tie.....	76
Σχήμα 3.10 S_{11} για ασύμμετρη bow-tie.....	76
Σχήμα 3.11 $f=2.5$ GHz επίπεδο $x-z$	77
Σχήμα 3.12 $f=2.5$ GHz επίπεδο $y-z$	77
Σχήμα 3.13 $f=3.5$ GHz επίπεδο $x-z$	77
Σχήμα 3.14 $f=3.5$ GHz επίπεδο $y-z$	77
Σχήμα 3.15 $f=4.5$ GHz επίπεδο $x-z$	77
Σχήμα 3.16 $f=4.5$ GHz επίπεδο $y-z$	77
Σχήμα 3.17 $f=5.5$ GHz επίπεδο $x-z$	78
Σχήμα 3.18 $f=5.5$ GHz επίπεδο $y-z$	78
Σχήμα 3.19 $f=6.5$ GHz επίπεδο $x-z$	78
Σχήμα 3.20 $f=6.5$ GHz επίπεδο $y-z$	78
Σχήμα 3.21 $f=7.5$ GHz επίπεδο $x-z$	78
Σχήμα 3.22 $f=7.5$ GHz επίπεδο $y-z$	78
Σχήμα 3.23 $f=8$ GHz επίπεδο $x-z$	79
Σχήμα 3.24 $f=8$ GHz επίπεδο $y-z$	79
Σχήμα 3.25 Μοντέλο bow-tie χωρίς transition.....	81
Σχήμα 3.26 Συγκριτικό διάγραμμα S_{11} με/χωρίς transition για bow-tie.....	81
Σχήμα 3.27 Διάταξη/τιμές για ασύμμετρη bow-tie με παρασιτικά.....	83

Σχήμα 3.28 S11 για ασύμμετρη bow-tie με παρασιτικά.....	83
Σχήμα 3.29 Συγκεντρώσεις επιφανειακών ρευμάτων στα 4.5 GHz.....	84
Σχήμα 3.30 Μεταβολή του L.....	86
Σχήμα 3.31 Μεταβολή του W.....	86
Σχήμα 3.32 Μεταβολή του d2.....	87
Σχήμα 3.33 Μεταβολή του fi.....	87
Σχήμα 3.34 Μεταβολή του L1.....	88
Σχήμα 3.35 Μεταβολή του u.....	88
Σχήμα 3.36 Μεταβολή του h.....	89
Σχήμα 3.37 Μεταβολή του er.....	89
Σχήμα 3.38 Μεταβολή του L.....	90
Σχήμα 3.39 Μεταβολή του W.....	90
Σχήμα 3.40 Μεταβολή του L1.....	91
Σχήμα 3.41 Μεταβολή του fi.....	91
Σχήμα 3.42 Μεταβολή του th.....	92
Σχήμα 3.43 Μεταβολή του L2.....	92
Σχήμα 3.44 Μεταβολή του fi2.....	93
Σχήμα 3.45 Μεταβολή του s2.....	93
Σχήμα 4.1 Επίπεδος και Παραβολικός ανακλαστήρας.....	95
Σχήμα 4.2 Bow-tie με τριεδρικό ανακλαστήρα.....	96
Σχήμα 4.3 Πρόσοψη Διάταξης.....	97
Σχήμα 4.4 S11 bow-tie σχισμοκεραίας με τριεδρικό ανακλαστήρα.....	97
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 2.5 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z.....	98
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 3.5 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z.....	99
Σχήμα 4.7 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 5 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z.....	100
Σχήμα 4.8 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 6 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z.....	100
Σχήμα 4.9 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 7 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z.....	101
Σχήμα 4.10 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 8 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z.....	102
Σχήμα 4.11 Γεωμετρία καμπυλωμένης bow-tie.....	103
Σχήμα 4.12 Συγκριτικό διάγραμμα S11 καμπυλωμένης-γραμμικής bow-tie.....	103
Σχήμα 4.13 Μοντέλο κυλινδρικής σχισμοκεραίας/τιμές παραμέτρων.....	105
Σχήμα 4.14 S11 για διάφορες καμπυλότητες κυλινδρικής σχισμοκεραίας.....	106
Σχήμα 4.15 Διαγράμματα ακτινοβολίας στο x-z επίπεδο για τιμές του R1.....	107
Σχήμα 4.16 Τετραγωνική σχισμοκεραία CPW-fed.....	108
Σχήμα 4.17 Δακτυλιοειδής σχισμοκεραία.....	108
Σχήμα 4.18 Στοιχειοκεραία 3 στοιχείων.....	109
Σχήμα 4.19 Διπλή πόλωση με coplanar στοιχεία.....	110
Σχήμα 5.1 Artwork των προς τύπωση κεραιών.....	114
Σχήμα 5.2 Τυπωμένες κεραιές.....	120
Σχήμα 5.3 Network Analyzer.....	121
Σχήμα 5.4 Άποψη Ανηχοικού θαλάμου/μέτρηση θ-επιπέδου.....	122
Σχήμα 5.5 Χοανοκεραία.....	123
Σχήμα 5.6 Sweep Generator: Marconi 631.....	123
Σχήμα 5.7 Spectrum analyzer	124

Σχήμα 5.8 Dual Stepper Motor Driver: arrick Robotics MD-2	125
Σχήμα 5.9 Διάταξη για μέτρηση του φ-επιπέδου.....	125
Σχήμα 5.10 Ορθογωνική σχισμοκεραία χωρίς transition.....	126
Σχήμα 5.11 S11 Ορθογωνικής σχισμοκεραίας χωρίς transition.....	126
Σχήμα 5.12 Ορθογωνική χωρίς transition, $f = 5.5$ GHz, φ-επίπεδο.....	127
Σχήμα 5.13 Ορθογωνική χωρίς transition, $f = 5.5$ GHz, θ-επίπεδο.....	128
Σχήμα 5.14 Ορθογωνική σχισμοκεραία με transition.....	129
Σχήμα 5.15 S11 ορθογωνικής σχισμοκεραίας με transition.....	129
Σχήμα 5.16 Ορθογωνική σχισμοκεραία με transition, $f = 4.5$ GHz, φ-επίπεδο..	130
Σχήμα 5.17 Ορθογωνική σχισμοκεραία με transition, $f = 4.5$ GHz, θ-επίπεδο..	131
Σχήμα 5.18 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία.....	132
Σχήμα 5.19 S11 ορθογωνικής σχισμοκεραίας με παρασιτικά στοιχεία.....	132
Σχήμα 5.20 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 4.5$ GHz, φ-επίπεδο.....	133
Σχήμα 5.21 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 4.5$ GHz, θ-επίπεδο.....	134
Σχήμα 5.22 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 7$ GHz, φ-επίπεδο.....	135
Σχήμα 5.23 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 7$ GHz, θ-επίπεδο.....	136
Σχήμα 5.24 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία.....	137
Σχήμα 5.25 S11 Καμπυλωμένης bow-tie κεραίας.....	137
Σχήμα 5.26 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία, $f = 2.5$ GHz, φ-επίπεδο.....	138
Σχήμα 5.27 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία, $f = 2.5$ GHz, θ-επίπεδο.....	139
Σχήμα 5.28 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία, $f = 6$ GHz, φ-επίπεδο.....	140
Σχήμα 5.29 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία, $f = 6$ GHz, θ-επίπεδο.....	141
Σχήμα 5.30 Αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie κεραίας.....	142
Σχήμα 5.31 S11 Αντίστοιχου γραμμικού μοντέλου καμπυλωμένης bow-tie.....	142
Σχήμα 5.32 Αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie, $f = 3$ GHz, φ-επίπεδο.....	143
Σχήμα 5.33 Αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie, $f = 3$ GHz, θ-επίπεδο.....	144
Σχήμα 5.34 Αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie, $f = 6$ GHz, φ-επίπεδο.....	145
Σχήμα 5.35 Αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie, $f = 6$ GHz, θ-επίπεδο.....	146
Σχήμα 5.36 bow-tie κεραία.....	147
Σχήμα 5.37 S11 bow-tie κεραίας.....	147
Σχήμα 5.38 bow-tie κεραία, $f = 2.8$ GHz, φ-επίπεδο.....	148
Σχήμα 5.39 bow-tie κεραία, $f = 2.8$ GHz, θ-επίπεδο.....	149
Σχήμα 5.40 bow-tie κεραία, $f = 5$ GHz, φ-επίπεδο.....	150
Σχήμα 5.41 bow-tie κεραία, $f = 5$ GHz, θ-επίπεδο.....	151
Σχήμα 5.42 bow-tie κεραία, $f = 8$ GHz, φ-επίπεδο.....	152
Σχήμα 5.43 bow-tie κεραία, $f = 8$ GHz, θ-επίπεδο.....	153

Σχήμα 5.44 bow-tie κεραία, $f = 10$ GHz, ϕ -επίπεδο.....	154
Σχήμα 5.45 bow-tie κεραία, $f = 10$ GHz, θ -επίπεδο.....	155
Σχήμα 5.46 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία.....	156
Σχήμα 5.47 S11 bow-tie κεραίας με παρασιτικά στοιχεία.....	156
Σχήμα 5.48 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 2.5$ GHz, ϕ -επίπεδο....	157
Σχήμα 5.49 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 2.5$ GHz, θ -επίπεδο....	158
Σχήμα 5.50 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 4.2$ GHz, ϕ -επίπεδο.....	159
Σχήμα 5.51 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 4.2$ GHz, θ -επίπεδο.....	160
Σχήμα 5.52 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 5.5$ GHz, ϕ -επίπεδο.....	161
Σχήμα 5.53 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 5.5$ GHz, θ -επίπεδο.....	162
Σχήμα 5.54 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 8.2$ GHz, ϕ -επίπεδο.....	163
Σχήμα 5.55 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 8.2$ GHz, θ -επίπεδο.....	164
Σχήμα 5.56 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 10$ GHz, ϕ -επίπεδο.....	165
Σχήμα 5.57 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 10$ GHz, θ -επίπεδο.....	166
Σχήμα 5.58 Rectangular με/χωρίς transition.....	167
Σχήμα 5.59 Επίδραση παρασιτικών στοιχείων στη rectangular.....	167
Σχήμα 5.60 Συγκριτικό διάγραμμα curved/linear bow-tie.....	168
Σχήμα 5.61 Bow-tie/Bow-tie με παρασιτικά.....	169

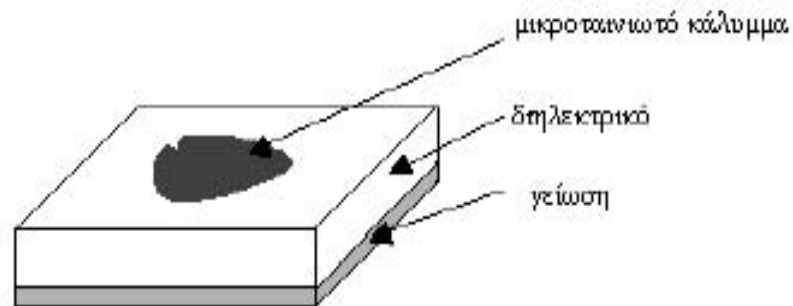
Περιεχόμενα:

- 1.1 Εισαγωγή
- 1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μικροταινιακών κεραιών
- 1.3 Είδη μικροταινιακών κεραιών
- 1.4 Τεχνικές τροφοδοσίας
- 1.5 Θεωρητική μελέτη CPW-fed slot antennas
- 1.6 Υπολογιστικά θέματα – Εξομοιώσεις
- 1.7 Εφαρμογές
- 1.8 Βιβλιογραφία

1.1 Εισαγωγή

Η ιδέα της χρήσης μικροταινιακής διάταξης ως ακτινοβόλο στοιχείο ανήκει στον Deschamps το 1953 [1]. Μετά από δύο χρόνια η πατέντα δημοσιεύτηκε από τους Gutton και Baissino [2]. Πρακτικά ωστόσο άρχισαν να παρασκευάζονται αυτές οι κεραίες τη δεκαετία του 70, όταν ήταν πλέον δυνατή η μαζική παραγωγή διηλεκτρικών με μικρές θερμικές απώλειες και ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες, ενώ επίσης αναπτύχθηκαν βελτιωμένες μέθοδοι λιθογραφίας και καλύτερα θεωρητικά μοντέλα. Οι πρώτες τέτοιες πρακτικές κεραίες αναπτύχθηκαν από τους Howell [3] και Manson [4]. Από τότε έχει γίνει εκτενής έρευνα και έχουν βρεθεί πολλά πεδία εφαρμογών για τις μικροταινιακές κεραίες, εκμεταλλευόμενοι τα σημαντικά τους πλεονεκτήματα όπως το μικρό βάρος, το χαμηλό κόστος, τη συμβατότητα με άλλα μικροκυματικά κυκλώματα κ.α.

Η μικροταινιακή κεραία, στη πιο απλή της μορφή, αποτελείται από ένα αγώγιμο μικροταινιακό κάλυμμα πάνω σε διηλεκτρικό, η άλλη πλευρά του οποίου είναι γειωμένη (Σχήμα 1.1). Το επιπλέον αγώγιμο κάλυμμα (patch) είναι ένα λεπτό στρώμα (τάξεως μm) συνήθως χαλκού με μια επίστρωση χρυσού, ενώ το πάχος και η διηλεκτρική επιτρεπτότητα του διηλεκτρικού (ϵ_r) επιλέγονται ανάλογα με τη σχεδίαση.



Σχήμα 1.1 Κεραία μικροταινιακού καλύμματος

Για την κατανόηση των εννοιών τόσο αυτού όσο και των επόμενων κεφαλαίων είναι απαραίτητο ο αναγνώστης να είναι εξοικειωμένος με τις βασικές θεωρίες μικροκυμάτων και κεραιών. Τα [5], [6] καλύπτουν πλήρως τις προαπαιτούμενες γνώσεις. Για επιμέρους θέματα που αναφέρονται σε αυτό το κεφάλαιο αποτέλεσαν σημαντικές πηγές τα [7], [8] και [9].

1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μικροταινιακών κεραιών

Οι μικροταινιακές κεραιές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών κεραιών και παρακάτω συνοψίζουμε τα σημαντικότερα:

- Μικρό βάρος και όγκο που τις καθιστούν εύκολες στη χρήση
- Χαμηλό κόστος παραγωγής
- Με απλές τεχνικές τροφοδότησης είναι δυνατή η παραγωγή γραμμικής και κυκλικής πόλωσης
- Μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν κεραιές διπλής πόλωσης και/ή δύο συχνοτήτων (dual-polarization/dual-frequency)
- Μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε άλλα μικροκυματικά κυκλώματα
- Γραμμές τροφοδοσίας και προσαρμοστικές διατάξεις μπορούν να παραχθούν ταυτόχρονα σαν συνέχεια της κεραιάς
- Μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια πυραύλων, σε αεροσκάφη και σε δορυφόρους χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις, ενώ το λεπτό τους πάχος δεν επηρεάζει την αεροδυναμική τους μορφή

Ωστόσο υπάρχουν και σημαντικοί περιορισμοί σε αυτό τον τύπο κεραιών:

- Στενό εύρος ζώνης (κυρίως στις patch κεραιές με γειωμένο υπόστρωμα)
- Χαμηλό κέρδος (περίπου 6 db)
- Μεγάλες ωμικές απώλειες στην τροφοδότηση στοιχειοκεραιών

- Οι περισσότερες μικροταινιακές κεραιές ακτινοβολούν στο μισό χώρο
- Περίπλοκες τεχνικές τροφοδότησης απαιτούνται για στοιχειοκεραίες υψηλής απόδοσης
- Αμιγής πόλωση είναι δύσκολο να επιτευχθεί
- Άεργος ακτινοβολία από τη τροφοδοσία και τις διάφορες συνδέσεις
- Διέγερση κυμάτων επιφανείας

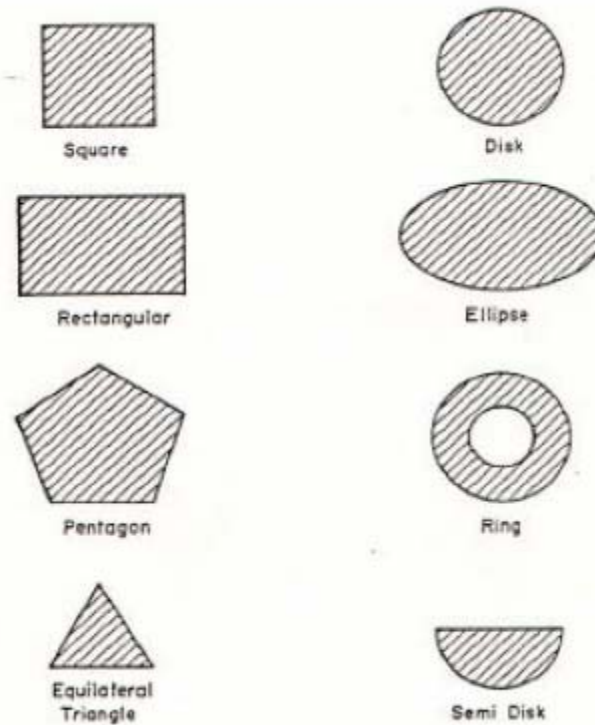
Βέβαια πρέπει να σημειώσουμε πως για την αντιμετώπιση όλων των παραπάνω μειονεκτημάτων έχουν εφαρμοστεί διάφορες τεχνικές με επιτυχία.

1.3 Είδη μικροταινιακών κεραιών

Η κεραιά που παρουσιάσαμε στην Παράγραφο 1.1 είναι κεραιά μικροταινιακού καλύμματος και αποτελεί ένα από τα είδη των μικροταινιακών κεραιών. Συνολικά διακρίνουμε τρία είδη: α) Κεραιές μικροταινιακού καλύμματος (microstrip patch antennas), β) Κεραιές οδεύοντος κύματος (microstrip traveling-wave antennas) και γ) Σχισμοκεραίες (microstrip slot antennas)

A. Κεραιές μικροταινιακού καλύμματος

Τα χαρακτηριστικά αυτών των κεραιών φαίνονται στο Σχήμα 1.1. Το μεταλλικό κάλυμμα μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή αν και τα πιο διαδεδομένα είναι αυτά που δίνονται στο Σχήμα 1.2. Ο τρόπος που ακτινοβολούν μοιάζει αρκετά με των διπόλων αν και γεωμετρικά διαφέρουν πολύ. Ορθογωνικά και κυκλικά καλύμματα χρησιμοποιούνται ευρέως.



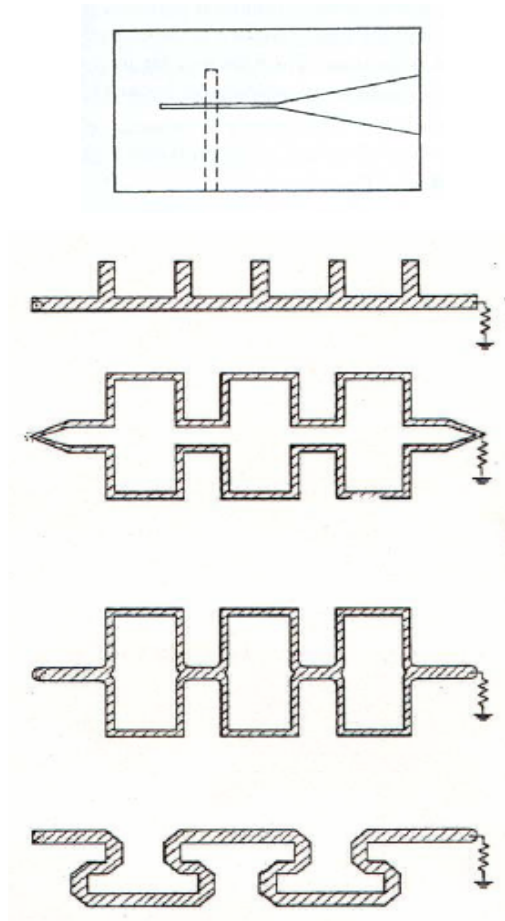
Σχήμα 1.2 Βασικά σχήματα καλυμμάτων μικροταινιακών κεραιών

Τυπικές τιμές κέρδους για μια κεραία μικροταινιακού καλύμματος είναι 5 με 6 db, ενώ η γωνία μισής ισχύος κυμαίνεται μεταξύ 70^0 και 90^0 . Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές μελέτες στην προσπάθεια για μείωση του μεγέθους τους και αύξηση του εύρους ζώνης τους, που είναι κατά κανόνα ιδιαίτερα μικρό.

B. Κεραίες οδεύοντος κύματος

Αποτελούνται από αγωγίμα τμήματα που επαναλαμβάνονται περιοδικά σε σχήμα αλυσίδας (Σχήμα 1.3) ή από μεγάλου μήκους μικροταινιακή γραμμή κατάλληλου πλάτους ώστε να διεγείρεται TE ρυθμός. Το άλλο άκρο της κεραίας οδεύοντος κύματος τερματίζεται με κατάλληλο φορτίο ώστε να αποφευχθούν τα στάσιμα κύματα. Το πλεονέκτημα αυτών των κεραιών είναι ότι ο κύριος λοβός ακτινοβολίας μπορεί να καθοριστεί από τη σχεδίαση και να είναι προς

οποιαδήποτε κατεύθυνση. Μια πολύ δημοφιλής ΜΤΑ (Microstrip Traveling-wave Antenna) είναι η tapered slot που είναι ιδιαίτερα κατευθυντική με μεγάλο κέρδος:

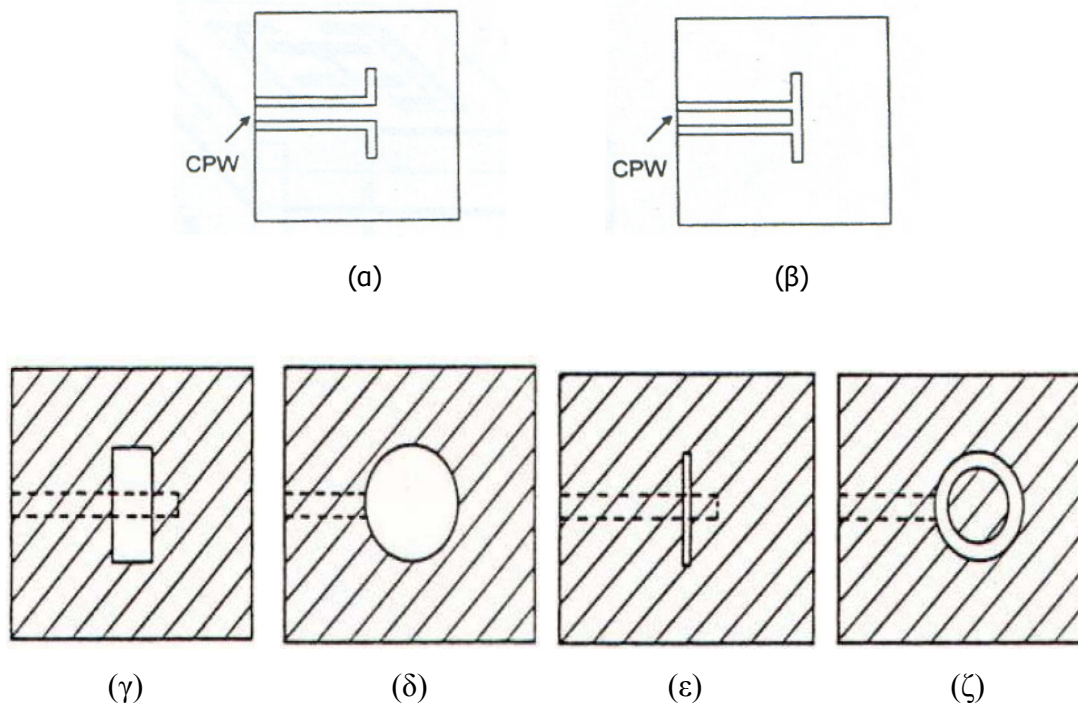


Σχήμα 1.3 Κεραίες οδεύοντος κύματος

Γ. Σχισμοκεραίες

Με αυτή την κατηγορία θα ασχοληθούμε εκτενώς γιατί αποτελεί και το θέμα της διπλωματικής. Οι σχισμοκεραίες προκύπτουν πολύ εύκολα από την κλασική μικροταινία αν χαράξουμε μια σχισμή στο μεταλλικό αγωγό στο κάτω μέρος που θεωρούμε ως γείωση. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει *σχισμοκεραία τροφοδοτούμενη από μικροταινία*. Υπάρχει και άλλος τρόπος τροφοδότησης που

θα δούμε παρακάτω αλλά η λογική των σχισμοκεραιών είναι αυτή: σε λεπτό αγώγιμο στρώμα πάνω από διηλεκτρικό χαράσσεται μια οποιασδήποτε γεωμετρίας σχισμή. Τα ίδια σχήματα που χρησιμοποιούμε ως patch κεραίες (Σχήμα 1.2) μπορούν να χαραχθούν στη μεταλλική επιφάνεια και να προκύψει μια αντίστοιχη slot κεραία. Ωστόσο, μόνο μερικά βασικά γεωμετρικά σχήματα έχουν μελετηθεί. Σε αντίθεση με τις κεραίες μικροταινιακού καλύμματος, οι σχισμοκεραίες εν γένει ακτινοβολούν και προς τις δύο κατευθύνσεις και για την ακτινοβολία μόνο προς μία κατεύθυνση απαιτείται ανακλαστήρας ή ground plane πάνω σε διηλεκτρικό. Παρακάτω δίνονται κάποιες χαρακτηριστικές σχισμοκεραίες:



Σχήμα 1.4 (α), (β) ορθογωνικές σχισμοκεραίες τροφοδοτούμενες από ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς, (γ) Σχισμή τροφοδοτούμενη από μικροταινία, (δ) κυκλική σχισμή, (ε) λεπτή σχισμή, (ζ) δακτυλιοειδής σχισμή

Οι σχισμοκεραίες, όπως προκύπτει από ένα πλήθος δημοσιεύσεων τα τελευταία χρόνια, παρουσιάζουν ιδιαίτερα ευρυζωνική συμπεριφορά και για αυτόν το λόγο επιλέγουμε να τις μελετήσουμε διεξοδικά σε αυτή τη διπλωματική. Στον

πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά τους συγκριτικά με αυτά των κεραιών μικροταινιακού καλύμματος:

Χαρακτηριστικά	Patch antennas	Slot antennas
Ανάλυση και σχεδίαση	Εύκολη	Εύκολη
Κατασκευή	Πολύ εύκολη	Πολύ εύκολη
Περιθώριο ανοχής κατά την κατασκευή	Κρίσιμο	Όχι ιδιαίτερα κρίσιμο
Προφίλ	Λεπτό	Λεπτό
Δυνατότητα σχημάτων	Οποιοδήποτε	Περιορισμένα
Ακτινοβολία	Σε μια κατεύθυνση	Σε μια ή και στις δύο κατευθύνσεις
Πόλωση	Γραμμική και κυκλική	Γραμμική και κυκλική
Εύρος ζώνης	Στενό	Ευρύ
Δυνατότητα λειτουργίας σε δύο συχνότητες	Δυνατή	Δυνατή
Άεργος ακτινοβολία	Μέτρια	Χαμηλή
Απομόνωση μεταξύ των ακτινοβολούντων στοιχείων	Σχετικά καλή	Καλή
Αξονικός λόγος	Χαμηλός	Πολύ χαμηλός

Πίνακας 1.5 Ποιοτική σύγκριση patch και slot κεραιών

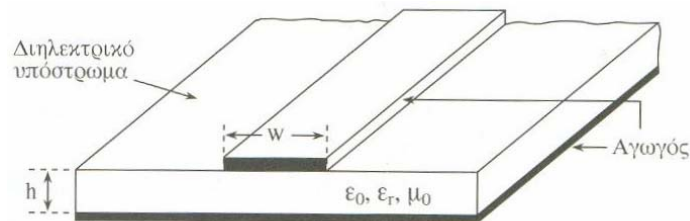
1.4 Τεχνικές τροφοδοσίας

Μέχρι τώρα δεν αναφερθήκαμε στους τρόπους με τους οποίους τροφοδοτούνται οι μικροταινιακές κεραιές. Αν και υπάρχουν πολλές παραλλαγές μπορούμε να τις ομαδοποιήσουμε σε τρεις βασικές κατηγορίες: α) μικροταινιακή γραμμή, β) ομοαξονική τροφοδοσία και γ) ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς.

A. Μικροταινιακή γραμμή

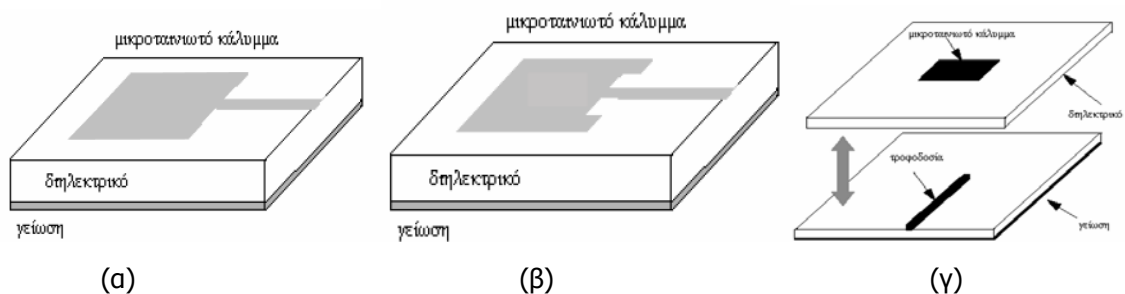
Η μικροταινία αποτελείται από αγωγό πλάτους w που βρίσκεται στη πάνω επιφάνεια διηλεκτρικής πλάκας, ενώ η άλλη της πλευρά καλύπτεται από αγωγό.

Οι ρυθμοί που κυματοδηγούνται είναι υβριδικοί, σύνθεση δηλαδή ρυθμών TE και TM. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών της γραμμής (ταχύτητα διάδοσης, χωρητικότητα, χαρακτηριστική αντίσταση) χρησιμοποιούνται η μέθοδος των μεταβολών ή η μέθοδος Galerkin [5].



Σχήμα 1.6 Γεωμετρία μικροταινίας

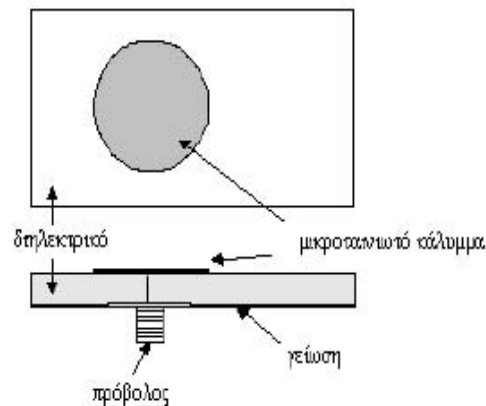
Αυτός ο τρόπος τροφοδοσίας ενδείκνυται για τις patch κεραίες καθώς μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν ως προέκταση του μεταλλικού αγωγού. Υπάρχουν επίσης πολλές παραλλαγές όπως αυτή που η μικροταινία εισέρχεται στο κάλυμμα ή η διέγερση του καλύμματος γίνεται με σύζευξη μέσω ενός δεύτερου διηλεκτρικού. Στόχος αυτών των παραλλαγών είναι η καλύτερη δυνατή μεταφορά ισχύος από τη μικροταινία στο κάλυμμα αλλά επίσης και να μειωθούν τα κύματα επιφανείας και η άεργος ακτινοβολία.



Σχήμα 1.7 (α) κλασική τροφοδοσία patch κεραίας από microstrip line, (β) η μικροταινία εισέρχεται στο patch, (γ) σύζευξη μέσω δεύτερου στρώματος διηλεκτρικού

B. Ομοαξονική τροφοδοσία

Χρησιμοποιείται συχνά λόγω της απλότητας στη σχεδίαση σε patch κεραίες. Ο εσωτερικός αγωγός του ομοαξονικού προσκολλάται στο ακτινοβόλο μικροταινιακό κάλυμμα, ενώ ο εξωτερικός αγωγός συνδέεται στο επίπεδο της γείωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8. Η κατάλληλη θέση του ομοαξονικού βρίσκεται εμπειρικά, ενώ με παράλληλη τοποθέτηση δύο ομοαξονικών σε κατάλληλες θέσεις επιτυγχάνεται διπλή πόλωση. Ωστόσο έχουν το βασικό μειονέκτημα στις ευρυζωνικές διατάξεις όπου χρησιμοποιείται πιο παχύ διηλεκτρικό, οπότε το μεγάλο μήκος του εσωτερικού αγωγού που διαπερνά το διηλεκτρικό συμβάλει σε άεργο ακτινοβολία και στη δημιουργία κυμάτων επιφανείας

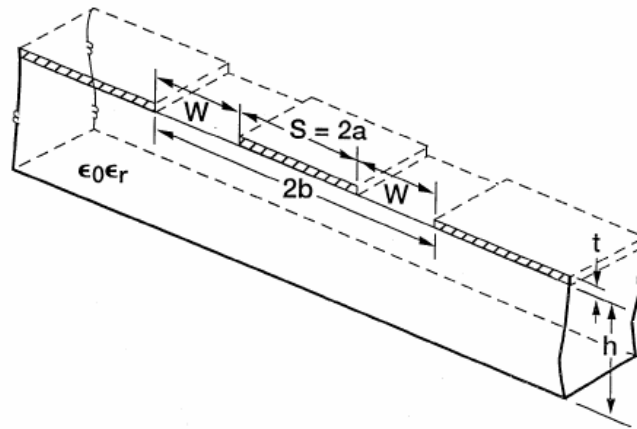


Σχήμα 1.8 Ομοαξονική τροφοδοσία

Γ. Ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς

Η ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς (coplanar waveguide) παρουσιάζεται πρώτη φορά από τον C. P. Wen [10] το 1969. Απο τότε έχει γίνει τεράστια πρόοδος που οφείλεται στα μονολιθικά μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα

(monolithic microwave integrated circuits - MMICs). Η γεωμετρία της δίνεται στο Σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9 Ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς

Σε αυτή τη διάταξη διεγείρονται υβριδικοί TEM ρυθμοί και προσφέρει κάποια πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη συμβατική μικροταινιακή γραμμή:

- Απευθείας σύνδεση με MMICs
- Δεν είναι αναγκαία η προσεκτική ευθυγράμμιση μεταξύ των δύο πλευρών του διηλεκτρικού, αφού η σχεδίαση γίνεται σε ένα επίπεδο
- Μικρές απώλειες λόγω ακτινοβολίας
- Μικρότερη διασπορά
- Η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ γειτονικών γραμμών είναι αμελητέα και έτσι προσφέρονται για τη σχεδίαση στοιχειοκεραιών
- Η χαρακτηριστική αντίσταση εξαρτάται από το λόγο a/b , και επομένως μπορούμε να έχουμε μείωση του μεγέθους με μόνο αντίτιμο τις υψηλές απώλειες

Για αυτούς κυρίως τους λόγους η χρήση ομοεπίπεδων γραμμών είναι ιδανική για πλήθος εφαρμογών.

1.5 Θεωρητική μελέτη CPW-fed slot antennas

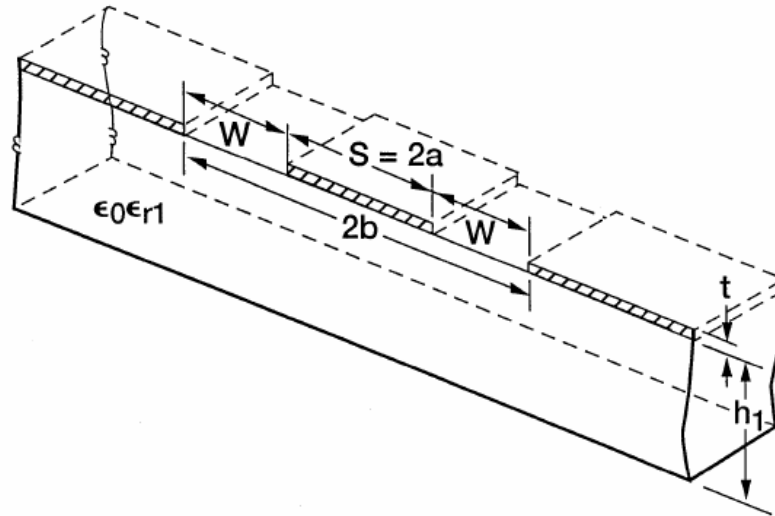
Επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας πλέον στις σχισμοκεραίες τροφοδοτούμενες από ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς (CPW-fed slot antennas). Τα χαρακτηριστικά τους έχουν γίνει σαφή από τα όσα αναφέρονται παραπάνω, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των σχισμοκεραιών (Πίνακας 1.5) και των ομοεπίπεδων γραμμών μεταφοράς (Παράγραφος 1.4).

Σε αυτή την παράγραφο θα κάνουμε μια ανάλυση αυτών των κεραιών η οποία συνίσταται σε δύο μέρη: Αρχικά θα δούμε τα χαρακτηριστικά των ομοεπίπεδων γραμμών και στη συνέχεια τον τρόπο ακτινοβολίας των σχισμών.

A) Χαρακτηριστικά μεγέθη ομοεπίπεδων γραμμών

Ως χαρακτηριστικά μεγέθη εννοούμε την χωρητικότητα, την χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου και την ταχύτητα διάδοσης. Για τον υπολογισμό τους έχουν χρησιμοποιηθεί επαναληπτικές μέθοδοι, όπως η μέθοδος της χαλάρωσης και η υβριδική μέθοδος [11], [12]. Ωστόσο τα αποτελέσματα που παραθέτουμε εδώ έχουν προκύψει από εφαρμογή τεχνικών σύμμορφης απεικόνισης [13].

Η τεχνική σύμμορφης απεικόνισης υποθέτει υβριδικό TEM ρυθμό διάδοσης κατά μήκος της γραμμής. Επίσης γίνεται η παραδοχή ότι το αγωγίμο στρώμα μετάλλου έχει άπειρη αγωγιμότητα και μηδενικό πάχος, ενώ το διηλεκτρικό θεωρείται ιστροπικό και χωρίς απώλειες. Στα όρια του διηλεκτρικού θεωρούνται μαγνητικά “τείχη” και υπολογίζεται η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια εντός της διάταξης. Στην συνέχεια υπολογίζεται η χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους και έπειτα όλα τα άλλα μεγέθη με τη μεθοδολογία που εξηγούμε παρακάτω.



Αρχικά αντικαθιστούμε το διηλεκτρικό στρώμα με αέρα (δηλαδή $\epsilon_r=1$). Με την τεχνική της σύμμορφης απεικόνισης υπολογίζουμε το C_{air} , δηλαδή τη χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους:

$$C_{air} = 4\epsilon_0 \frac{K(\kappa_0)}{K(\kappa_0')}, \text{ όπου } \kappa_0 = \frac{S}{S + 2W}, \kappa_0' = \sqrt{1 - \kappa_0^2} \quad (1)$$

ενώ η συνάρτηση $K(m)$ είναι το ελλειπτικό ολοκλήρωμα πρώτου είδους που δίνεται από τον τύπο:

$$K(m) = \int_0^1 \frac{dt}{\sqrt{[(1-t^2)(1-mt^2)]}} = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - m \sin^2 \theta}}$$

Προφανώς, η ταχύτητα διάδοσης του TEM ρυθμού σε αυτή την περίπτωση θα είναι c , δηλαδή η ταχύτητα του φωτός στον ελεύθερο χώρο. Από την γνωστή σχέση $u = 1/\sqrt{LC}$ θα έχουμε:

$$L = \frac{1}{c^2 C_{air}} \quad (2)$$

Η τιμή αυτή για την αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους θα πρέπει να είναι η ίδια και για όταν $\epsilon_r \neq 1$, καθώς τότε η διάταξη θα είναι μαγνητικά ισοδύναμη με όταν $\epsilon_r = 1$ (και στις δύο περιπτώσεις έχουμε $\mu = \mu_0$). Επομένως από τον τύπο $u = 1/\sqrt{LC}$ απαλείφεται το L και γίνεται:

$$u = c \sqrt{\frac{C_{\text{air}}}{C}} \quad (3)$$

Ενώ η χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου Z_0 γράφεται ως:

$$Z_0 = \frac{1}{c \sqrt{C_{\text{air}} C}} \quad (4)$$

Ο μόνος άγνωστος πλέον είναι η χωρητικότητα C , που υπολογίζεται ανάλογα με την C_{air} και είναι:

$$C = 2\epsilon_0(\epsilon_{r1} - 1) \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \quad (5)$$

Όπου k_1, k_1' :

$$k_1 = \frac{\sinh(\pi S / 4h_1)}{\sinh\{\pi(S + 2W) / 4h_1\}}$$

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2}$$

Αντικαθιστώντας στις (3), (4) τις (1), (5) προκύπτει τελικά:

$$u = c \sqrt{\frac{2K(k_0)K(k_1')}{(\epsilon_{r1} - 1)K(k_0')K(k_1)}}$$

$$Z_0 = \frac{1}{c \sqrt{8\epsilon_0^2 (\epsilon_{r1} - 1) \frac{K(k_1)K(k_0)}{K(k_1')K(k_0')}}}$$

Σημειώνουμε πως για την απλοποίηση στους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται κυρίως προσεγγιστικές συναρτήσεις των λόγων των ελλειπτικών συναρτήσεων $K(x_1)/K(x_2)$. Επίσης για τους υπολογισμούς των παραπάνω μεγεθών έχουν προταθεί και αρκετά εμπειρικά μοντέλα [14].

B) Ακτινοβολία σχισμής

Το ηλεκτρικό πεδίο για μια κεντρικά τροφοδοτούμενη σχισμή πλάτους W_s και μήκους L_s μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$E_\theta = \frac{-j \cdot k_0}{4\pi} \cdot \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \int_{-W_s/2}^{W_s/2} \int_{-L_s/2}^{L_s/2} [-M_x \sin \phi + M_y \cos \phi] \cdot \exp[jk_0(x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi)] dx dy \quad (6)$$

$$E_\phi = \frac{j \cdot k_0}{4\pi} \cdot \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos \theta \int_{-W_s/2}^{W_s/2} \int_{-L_s/2}^{L_s/2} [M_x \cos \phi + M_y \sin \phi] \cdot \exp[jk_0(x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi)] dx dy \quad (7)$$

Όπου $\vec{M}(x, y) = M_x \hat{x} + M_y \hat{y}$ είναι το μαγνητικό επιφανειακό ρεύμα και μπορεί να γραφεί συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου στη σχισμή ως:

$$\vec{M}(x, y) = \vec{E}(x, y) \times \hat{z} = E_y \hat{x} - E_x \hat{y}$$

Όταν η σχισμή έχει μικρό πλάτος σε σχέση με το μήκος κύματος ελευθέρου χώρου, δηλαδή $W_s \ll \lambda_0$, τότε το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της σχισμής μπορεί να θεωρηθεί συνεχές. Εάν $E_x=0$ και $E_y=E_0 \cos(\pi x/L_s)$ τότε με αντικατάσταση στις (6), (7) και υποθέτοντας ότι $k_0 W_s \rightarrow 0$ καταλήγουμε στις:

$$E_\theta = \frac{-jk_0 E_0 L_s W_s}{2\pi^2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \frac{\cos X}{(2X/\pi)^2 - 1} \sin \phi \quad (8)$$

$$E_\phi = \frac{jk_0 E_0 L_s W_s}{2\pi^2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \frac{\cos X}{(2X/\pi)^2 - 1} \cos \phi \cdot \cos \theta \quad (9)$$

όπου

$$X = \frac{k_0 L_s}{2} \sin \theta \cos \phi$$

Οι σχέσεις (8), (9) έχουν πολύ περιορισμένη πρακτική σημασία, αφού προκύπτουν μετά από αρκετές προσεγγίσεις. Σε πολλές περιπτώσεις το πλάτος της σχισμής είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από λ_0 και δεν μπορούμε να εκτιμήσουμε την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της σχισμής. Επιπλέον η ιδιαιτερότητα της ομοεπίπεδης γραμμής περιπλέκει περισσότερο το θεωρητικό μοντέλο.

Έτσι, στη γενική περίπτωση είναι αρκετά περίπλοκος ο υπολογισμός των (6), (7) και δύσκολα καταλήγουν σε κλειστή σχέση. Η πλήρης ανάλυση των σχισμοκεραιών γίνεται επομένως κυρίως με χρήση υπολογιστικών τεχνικών, που είναι και το αντικείμενο της επόμενης παραγράφου.

1.6 Υπολογιστικά θέματα – Εξομοιώσεις

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις αποτελούν τον πλέον ενδεδειγμένο τρόπο για την επίλυση φυσικών προβλημάτων στις μέρες μας, αφού οι αναλυτικές λύσεις περιορίζονται μόνο σε πολύ απλές διατάξεις ενώ η πειραματική μελέτη δεν είναι πάντα εύκολη και οικονομικά εφικτή. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη πρόοδος τόσο σε επίπεδο εύρεσης αποδοτικών αλγορίθμων για την επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων όσο και στην ανάπτυξη εμπορικών λογισμικών που επιλύουν εύκολα κάθε μορφής ηλεκτρομαγνητικό πρόβλημα χωρίς να απαιτείται από τον χρήστη να αναπτύξει κώδικα.

Οι κυριότερες υπολογιστικές μέθοδοι που μοντελοποιούν και επιλύουν Η/Μ προβλήματα είναι: Moment method in space domain [Newman, 1981], Moment method in spectral domain, Transform-domain analyses, Mixed potential integral equation approach (MPIE), Conjugate-gradient fast Fourier transform (CGFFT) technique, Finite Difference Time Domain (FDTD), Finite Element Method (FEM).

Δεν θα αναφερθούμε στη καθεμία ξεχωριστά, αλλά θα περιγράψουμε συνοπτικά τον τρόπο λειτουργίας τους. Αρχικά δημιουργείται ένα διακριτό πλέγμα σημείων στο χώρο. Στη συνέχεια καταστρώνονται οι εξισώσεις του Maxwell είτε στην ολοκληρωτική είτε στη διαφορική τους μορφή και επιλύονται με διάφορους τρόπους για το σύνολο των σημείων του πλέγματος. Στην FDTD επιλύονται μέσω της εφαρμογής κεντρικών διαφορών για τις χρονικές και χωρικές παραγώγους. Στην FEM τα πεδία σε κάθε υποπεριοχή του χώρου εκφράζονται με κατάλληλες συναρτήσεις βάσης και η λύση προκύπτει από την ελαχιστοποίηση ενός συναρτησιακού. Σε άλλες μεθόδους τα άγνωστα μεγέθη εκφράζονται ως υπέρθεση γνωστών συναρτήσεων με άγνωστα βάρη και με εφαρμογή των οριακών συνθηκών προκύπτουν επιλύσιμα συστήματα ολοκληρωτικών εξισώσεων.

Τα εμπορικά διαθέσιμα λογισμικά (ADS, HFSS, CST) χρησιμοποιούν τις παραπάνω τεχνικές, συνδυασμούς τους ή/και παραλλαγές τους. Κοινό γνώρισμα όλων είναι η δημιουργία πλέγματος. Έχουν επίσης αναπτύξει έξυπνους αλγορίθμους όπου το πλέγμα πυκνώνει αυτόματα σε σημεία με απότομες μεταβάσεις ή ασυνέχειες και αραιώνει σε περιοχές με μεγάλη ομοιογένεια. Ωστόσο ο σχεδιαστής πρέπει πάντα να έχει πλήρη εικόνα του πλέγματος ώστε να μπορεί να κρίνει σε συγκεκριμένα σημεία του μοντέλου αν είναι ικανοποιητικό ή όχι. Μια επίσης πολλή σημαντική δυνατότητα αυτών των προγραμμάτων είναι το *adaptive meshing* δημιουργείται ένα αρχικό πλέγμα, τρέχει μια πρώτη προσομοίωση και ανάλογα με τα αποτελέσματα παράγεται δεύτερο πλέγμα πυκνωμένο σε κατάλληλα σημεία, επαναλαμβάνεται η προσομοίωση κ.ο.κ. Αυτή η λειτουργία όπως είναι προφανές προσφέρει μεγάλη ακρίβεια και τη χρησιμοποιήσαμε συχνά κατά τις προσομοιώσεις μας.

Μία άλλη μέθοδος που διαφέρει από τις παραπάνω και δεν χρησιμοποιείται από τα εμπορικά λογισμικά είναι η μέθοδος βοηθητικών πηγών. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται είναι ότι δεν είναι γενική αλλά εφαρμόζεται ανάλογα με τη γεωμετρία της διάταξης που μελετάται. Ωστόσο, η εύκολη ανάπτυξη κώδικα και το πολύ μικρότερο υπολογιστικό κόστος την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική σε πολλές εφαρμογές, ανάμεσά τους και στη μοντελοποίηση μικροταινιακών κεραιών. Η αρχή της μεθόδου είναι ότι τα άγνωστα πεδία περιγράφονται με τη βοήθεια κάποιων υποθετικών βοηθητικών πηγών που τοποθετούνται σύμμορφα ως προς τη φυσική επιφάνεια της διάταξης που μελετάμε. Στη συνέχεια υπολογίζονται τα πεδία από εφαρμογή οριακών συνθηκών στη φυσική επιφάνεια της διάταξης. Για περισσότερες πληροφορίες σε αυτήν την μέθοδο που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον παραπέμπουμε στο [8].

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε ήταν το HFSS. Στη συνέχεια δείχνοντας βήμα-βήμα τον τρόπο με τον οποίο κάναμε τη σχεδίαση θα αναφέρουμε και τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του προγράμματος.

A) Μοντελοποίηση

Το περιβάλλον του HFSS περιέχει τα βασικά γεωμετρικά σχήματα καθώς επίσης και τη δυνατότητα χρήσης ακανόνιστων σχημάτων τα οποία μπορούν να εξαχθούν ως επιφάνεια (extrude). Έτσι μπορούμε εύκολα να σχεδιάσουμε κάθε γεωμετρικό σχήμα και να κάνουμε συνενώσεις, αφαιρέσεις, τομές τους (Boolean add, subtract, insert, intersect κ.α.). Οι ιδιότητες του κάθε υλικού (μαγνητική - ηλεκτρική επιτρεπτότητα, αγωγιμότητα, απώλειες) επίσης ορίζονται και μάλιστα διατίθεται βιβλιοθήκη που περιλαμβάνει πολλά στοιχεία.

Έχοντας ορίσει τη γεωμετρία της διάταξης και τα τυπικά μεγέθη (περιοχή συχνοτήτων, μονάδες μέτρησης, περιβάλλον υλικό), ορίζουμε το boundary box, ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που περιλαμβάνει όλη τη διάταξη και μέσα στο οποίο γίνονται υπολογισμοί για επιφανειακά ρεύματα και πεδιακές κατανομές στο κοντινό πεδίο. Κάθε πληροφορία μακρινού πεδίου υπολογίζεται με βάση τους υπολογισμούς στο boundary box. Επίσης στην επιφάνεια του boundary box ορίζονται οριακές συνθήκες και συμμετρίες αν τυχόν υπάρχουν.

Η διέγερση της διάταξης μοντελοποιείται από waveguide ports, πλαίσια δηλαδή από το οποία εισέρχεται ισχύς. Βέβαια μπορούμε να μοντελοποιήσουμε κάθε είδους ομοαξονική ή άλλη διασύνδεση. Τα σήματα εισόδου παράγονται αυτόματα από το πρόγραμμα, και είναι συνήθως Γκαουσιανοί παλμοί πεπερασμένης διάρκειας, παράγοντας κάτι σαν κρουστική διέγερση.

B) Παραμετροποίηση

Αν θέλουμε να μελετήσουμε κάποιο τύπο μικροταινιακής κεραίας είναι αναγκαίο να αναπτύξουμε παραμετρικό μοντέλο, διαφορετικά θα πρέπει συνεχώς να επεμβαίνουμε στη σχεδίαση και να της αλλάζουμε τη γεωμετρία που είναι ασύμφορο και μη πρακτικό. Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να ορίσεις παραμέτρους και να τις εντάξεις στο μοντέλο που σχεδιάζεις με πολλούς

τρόπους. Η παραμετροποίηση που κάναμε ήταν πλήρης σε όλα τα μοντέλα, δηλαδή κάθε διάσταση και απόσταση αντιστοιχεί σε κάποια παράμετρο.

Το HFSS έχει κάποια εργαλεία που βοηθούν σημαντικά τη παραμετρική μελέτη: Στο parameter sweep ορίζεις το μέγεθος που θέλεις να καταγράφεται (συντελεστής ανάκλασης, διάγραμμα ακτινοβολίας κ.α.) και στη συνέχεια θέτεις την/τις παραμέτρους που επιθυμείς να μεταβάλλονται και με πιο βήμα. Στο optimizer θέτεις κάποιον στόχο (π.χ $S_{11} < 10$ db σε κάποια συχνότητα) και δηλώνεις τα περιθώρια μεταβολής των/της παραμέτρου που επιθυμείς· το πρόγραμμα στη συνέχεια βρίσκει την βέλτιστη λύση.

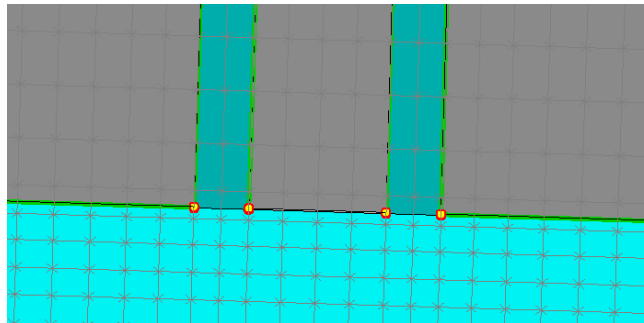
Βέβαια με τις παραπάνω δυνατότητες μπορεί κανείς να υποθέσει πως η διαδικασία είναι απόλυτα αυτοματοποιημένη και ο σχεδιαστής δεν έχει κάποιο ουσιαστικό ρόλο από τη στιγμή που έχει σχεδιάσει και μοντελοποιήσει την διάταξη του. Κάτι τέτοιο δεν είναι ακριβές· σε κάθε μοντέλο υπάρχουν δεκάδες παράμετροι και αν αναλογιστούμε πως μπορούν να μεταβάλλονται παράλληλα προκύπτει ένας τεράστιος πολυπλοκότητας σύστημα που αφενός έχει τεράστιο υπολογιστικό κόστος να επιλυθεί και αφετέρου η πληροφορία που θα προκύψει θα είναι υπερβολικά συγκεχυμένη (π.χ χιλιάδες διαγράμματα). Έτσι εξαρτάται από το σχεδιαστή να επιλέξει τα κρίσιμα σημεία της διάταξης και με βάση την εμπειρία του να απλοποιήσει την παραπάνω διαδικασία, εκμεταλλευόμενος πάντα τα υπολογιστικά οφέλη.

Γ) Οπτικοποίηση - Προσομοιώσεις

Η οπτικοποίηση είναι πολύ σημαντική σε όλα τα στάδια της σχεδίασης. Έχουμε ήδη επισημάνει την σημασία του πλέγματος· το πρόγραμμά μας επιτρέπει να βλέπουμε την πυκνότητα του σε όλα τα σημεία (Σχήμα 1.10). Πολλές δυνατότητες οπτικοποίησης μας δίνονται φυσικά μετά το τέλος της εξομοίωσης. Μπορούμε να δούμε τρισδιάστατα-διδιάστατα-πολικά διαγράμματα ακτινοβολίας, επιφανειακές πυκνότητες ρευμάτων συναρτηθεί του χρόνου, κοντινό ηλεκτρικό/μαγνητικό πεδίο κ.α. Το πρόγραμμα επίσης εκτός από το συντελεστή ανάκλασης

υπολογίζει το λόγο στάσιμων κυμάτων, την αντίσταση/αγωγιμότητα της κεραίας, το χάρτη Smith κ.α.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις υπάρχουν διαφόρων ειδών, αλλά εμείς χρησιμοποιήσαμε την transient ανάλυση. Ο χρόνος προσομοίωσης μπορεί να είναι από λίγα λεπτά έως και πολλές ώρες/μέρες ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια και την πυκνότητα του πλέγματος. Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης δίνονται κάποιες πληροφορίες για την πορεία της και αναφέρονται πιθανά προβλήματα



Σχήμα 1.10 πυκνότητα πλέγματος σε Coplanar γραμμή

1.7 Εφαρμογές

Για πλήθος εφαρμογών προτιμώνται οι μικροταινιακές κεραίες έναντι των συμβατικών κεραιών. Αρχικά χρησιμοποιούνταν κυρίως σε στρατιωτικά συστήματα όπως πυραύλους, αεροσκάφη και δορυφόρους. Τα τελευταία χρόνια η χρήση τους επεκτείνεται συνεχώς στον εμπορικό τομέα εξαιτίας των φθηνών υποστρωμάτων και της ώριμης πλέον τεχνολογίας παρασκευής. Με την συνεχόμενη έρευνα και ανάπτυξη των μικροταινιακών κεραιών αναμένεται σύντομα να αντικαταστήσουν τις συμβατικές κεραίες στις περισσότερες εφαρμογές.

Τα πιο αξιοσημείωτα συστήματα στα οποία χρησιμοποιούνται μικροταινιακές κεραίες είναι τα εξής:

- Δορυφορικές επικοινωνίες, υπηρεσίες απευθείας μετάδοσης (DBS)
- Ασύρματα τοπικά δίκτυα
- Doppler και άλλα radar
- Συστήματα ελέγχου και εντολών
- Πυραύλους και τηλεμετρία
- Βιοιατρικές συσκευές ακτινοβολίας

Στη συνέχεια δίνονται κάποια επιπλέον στοιχεία για τις σημαντικότερες από τις παραπάνω εφαρμογές.

Δορυφορικές επικοινωνίες

Στις κινητές επικοινωνίες τα επίγεια κυψελωτά συστήματα δεν παρέχουν ολική κάλυψη σε μεγάλες περιοχές και για αυτό έχουν αναπτυχθεί τα γεωστατικά δορυφορικά συστήματα INMARSAT (International Maritime Satellite System) και MSAT (Mobile Satellite system). Και τα δύο λειτουργούν στην L-ζώνη και έχουν κατασκευαστεί μικροταινιακές στοιχειοκεραίες μεσαίου μεγέθους και κέρδους των 15 db που χρησιμοποιούνται σε επίγειους δέκτες. Επίσης μικροταινιακές κεραίες μεγέθους 5cm×5cm με κυκλική πόλωση έχουν αναπτυχθεί και για συστήματα GPS (Global Positioning Systems) που μπορούν να τοποθετηθούν στην οροφή αυτοκινήτου. Τέλος οι μικροταινιακές στοιχειοκεραίες ενδέχεται τα επόμενα χρόνια να αντικαταστήσουν τους συνηθισμένους δέκτες παραβολικού ανακλαστήρα που χρησιμοποιούνται για δορυφορικές υπηρεσίες απευθείας μετάδοσης (κυρίως τηλεόραση). Οι μικροταινιακές κεραίες σε αντίθεση με τα παραβολικά κάτοπτρα, έχουν μεγαλύτερη ανοχή σε παρεμβολές από άνεμο και χιόνι, το κόστος τους είναι μικρότερο, το μέγεθος του επίσης και εύκολα μπορούν να τοποθετηθούν στους τοίχους ή την οροφή ενός κτιρίου.

Τοπικά ασύρματα δίκτυα (WLAN)

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Networks – WLANs) είναι μία σχετικά νέα μορφή τοπικών δικτύων, που επιτρέπει στους χρήστες να συνδέονται και να ανταλλάσσουν πληροφορία, χωρίς να δεσμεύονται από την ύπαρξη καλωδίωσης. Η προσφορά κινητικότητας στους χρήστες είναι το κύριο χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα ασύρματα από τα ενσύρματα δίκτυα.

Υπάρχει ένας αριθμός ασυρμάτων δικτύων που λειτουργούν στην ISM (Industrial, Scientific, Medical) ζώνη. Τέτοια δίκτυα είναι το FreePort και το WaveLAN. Το FreePort παρέχει ένα ασύρματο Ethernet (IEEE 802.3) και λειτουργεί στις ζώνες 2400 – 2483 MHz για εκπομπή και 5725 – 5850 MHz για λήψη. Το WaveLAN παρέχει άμεση επικοινωνία (peer – to – peer) και λειτουργεί στη ζώνη 902 – 928 MHz στις ΗΠΑ και στη ζώνη 2400 – 2480 MHz σε άλλες 39 χώρες. Υπάρχει επίσης και το σύστημα Altair, που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Ethernet (IEEE 802.3) και λειτουργεί στην μικροκυματική περιοχή συχνοτήτων των 18 GHz.

Δύο πρότυπα είναι αυτή τη στιγμή σε εξέλιξη όσο αναφορά τα ασύρματα δίκτυα. Το ένα αναπτύσσεται στην Ευρώπη από το ETSI (European Telecommunications Standard Institute) και ονομάζεται HIPERLAN (High – Performance European Radio LAN). Το άλλο αναπτύσσεται από την IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) και ονομάζεται 802.11 WLAN.

Οι μικροταινιακές κεραιές με κατάλληλη σχεδίαση μπορούν να καλύψουν τα παραπάνω πρωτόκολλα, με σημαντικό πλεονέκτημα το μικρό μέγεθος και βάρος τους. Η ευρυζωνικότητα που μελετάμε σε αυτή την διπλωματική είναι ένα σύγχρονο τεχνολογικό ζητούμενο καθώς υπάρχει διαρκώς ανάγκη για ενοποίηση των διαφόρων υπηρεσιών που λειτουργούν σε διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων.

Πομποδέκτες radar

Έχουν αναπτυχθεί φορητά radar, σχετικά μικρού βάρους, για ανίχνευση κινούμενων στόχων όπως οχήματα ή ανθρώπους. Επίσης μικροταινιακές στοιχειοκεραίες χρησιμοποιούνται σε ναυτιλιακά radar, όπως αυτή που αναφέρεται στο [15] και αποτελείται από 48 κυκλικά patch, κέρδους 22 db και 6° εύρος στο αζιμούθιο. Τέλος έχουν αναπτυχθεί και radar συνθετικού παραθύρου για διάφορα είδη μετρήσεων, όπως ταχύτητας κυμάτων σε ωκεανούς κ.α.

Ιατρικές Συσκευές

Στον ιατρικό τομέα η μικροκυματική ενέργεια έχει αποδειχθεί ότι είναι από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους να προκληθεί υπερθερμία όταν θεραπεύονται κακοήθεις όγκοι. Μόνο μικροταινιακές κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτές τις χρήσεις καθώς απαιτείται μικρό μέγεθος, βάρος και ευκολία στη χρήση. Έχουν αναπτυχθεί τέτοιες κεραίες που λειτουργούν στην S - ζώνη και έχουν εύκαμπτη μορφή ώστε να εφάπτονται στην επιφάνεια που θεραπεύεται. Επίσης μικροταινιακές κεραίες έχουν χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση των θερμοκρασιακών μεταβολών μέσα στο ανθρώπινο σώμα.

1.8 Βιβλιογραφία

1. G. A. Deschamps, "Microstrip Microwave Antennas", 3rd USAF Symposium on Antennas, 1953
2. Gutton. H. and G. Baissinot, "Flat Aerial for Ultra high frequencies", French Patent No. 70313, 1955
3. J. W. Howell, "Microstrip antennas", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-23, No. 1, (1975), 90-93

4. R. E. Manson, “Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays”, IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-22, No. 1, (1974)
5. Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου, “Εισαγωγή στα μικροκύματα”, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1994
6. Χ. Καψάλης και Π. Κωττής, “Κεραίες - Ασύρματες ζεύξεις”, εκδόσεις Τζιολα Θεσσαλονίκη, 2003
7. P. Bhartia, Inder Bahl, R. Garg and A. Ittipiboon, “Microstrip Antenna Design Handbook”, Artech House, January, 2001
8. Δήμητρα - Θεοδώρα Κακλαμάνη, “Υπολογιστικές τεχνικές για συστήματα μετάδοσης πληροφορίας”, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002
9. Rainee N. Simons, “Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems”, John Wiley & Sons, Inc., 2001
10. C. P. Wen, “Coplanar Waveguide: A Surface Strip Transmission Line Suitable for Nonreciprocal Gyromagnetic Device Applications”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 17, No. 12, pp. 1087-1090, Dec. 1969.
11. T. Hatsuda, “Computation of the Characteristics of Coplanar-Type Strip Lines by the Relaxation Method”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 20, No. 6, pp. 413-416, June 1972.
12. C. N. Chang, Y. C. Wong and C. H. Chen, “Hybrid Quasistatic Analysis for Multilayer Coplanar Lines”, IEE Proc., Part-H, Vol. 138, No. 4, pp. 307-312, Aug. 1991.
13. C. Veyres and V. F. Hanna, “Extension of the Application of Conformal Mapping Techniques to Coplanar Lines with Finite Dimensions”, Int. J. Electron., Vol. 48, No. 1, pp. 47-56, Jan. 1980.
14. Celal Yildiz and Mustafa Turkmen, “New and very simple CAD models for coplanar waveguide synthesis”, Microwave and optical technology letters, Vol. 41, No. 1, April 5 2004
15. James J. R. and P. S. Hall (Eds), “Handbook of Microstrip Antennas”, Peter Peregrinus, London, 1989.

Περιεχόμενα:

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Σχεδίαση-μοντελοποίηση ορθογωνικής σχισμοκεραίας
- 2.3 Παραμετρική μελέτη ορθογωνικής σχισμοκεραίας
- 2.4 Προσαρμογή με μετασχηματισμό της ομοεπίπεδης γραμμής
- 2.5 Περισσότερες ορθογωνικές σχισμοκεραίες
- 2.6 Προσθήκη παρασιτικών στοιχείων
- 2.7 Βιβλιογραφία

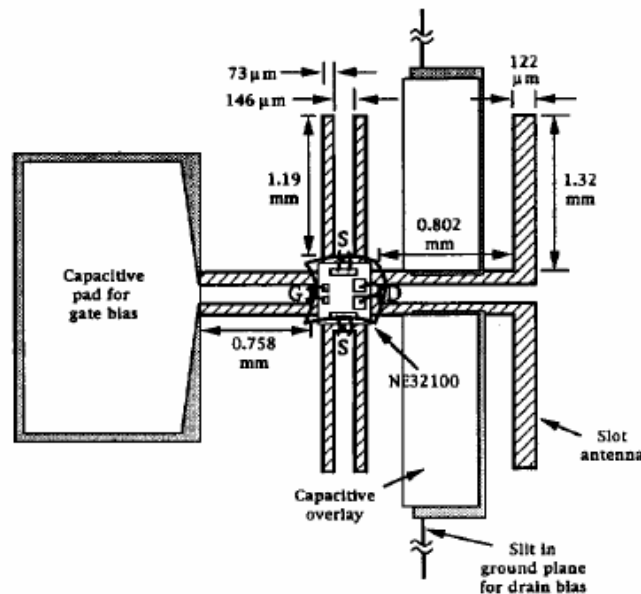
Παράρτημα 2Α

Παράρτημα 2Β

2.1 Εισαγωγή

Ό,τι γνωρίζουμε για τις σχισμοκεραίες (slot antennas) προκύπτει από ένα πλήθος δημοσιεύσεων που έχουν γραφεί κυρίως από τη δεκαετία του 90 έως σήμερα, ωστόσο αυτός ο τύπος των μικροταινιακών κεραιών δεν έχει μελετηθεί διεξοδικά και με εκτενή τρόπο όπως οι κεραιές μικροταινωτού καλύμματος (patch antennas).

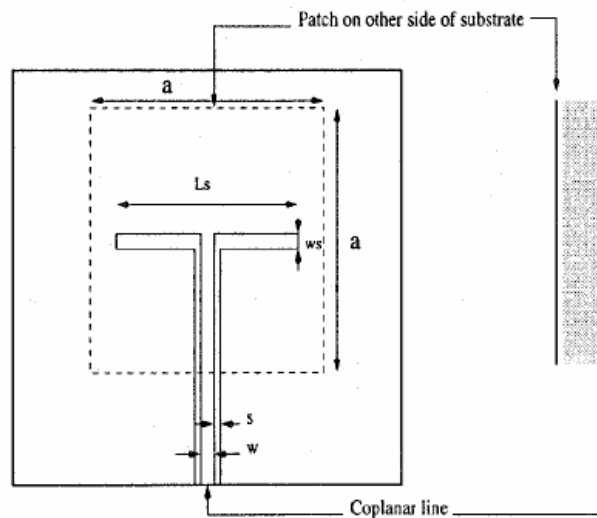
Το 1994, στο [1], παρουσιάζεται ένας μικροκυματικός ενισχυτής χαμηλής ισχύος, επίπεδης κατασκευής, ο οποίος τροφοδοτεί μια ορθογωνική σχισμοκεραία και λειτουργεί στα 20GHz. Σε αυτή τη δημοσίευση γίνονται προφανή τα πλεονεκτήματα της ομοεπίπεδης γραμμής μεταφοράς (coplanar waveguide), ενώ κύρια στοιχεία είναι το μικρό μέγεθος της κατασκευής και η συμβατότητα με MMICs που καθιστούν την διάταξη ικανή για την κατασκευή ενός φθηνού πομπού \δέκτη radar (Σχήμα 2.1).



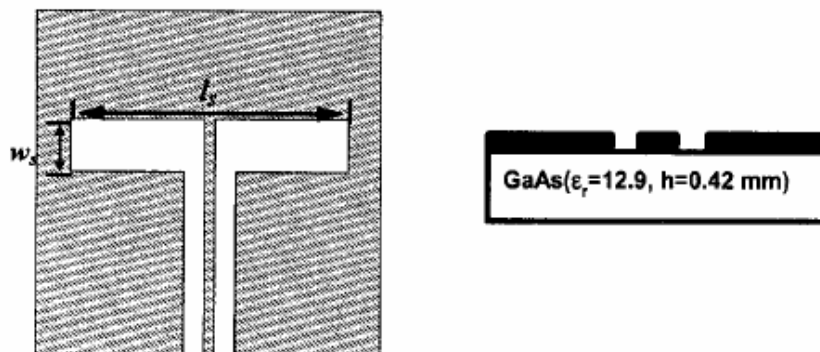
Σχήμα 2.1 CPW-fed active slot antenna

Στα [2], [3] η διάταξη της ορθογωνικής σχισμοκεραίας χρησιμοποιείται σαν κύκλωμα τροφοδότησης (feeding network) σε κεραιές μικροταινιωτού καλύμματος σε συχνότητες λειτουργίας 5 GHz [2] και 30GHz [3]. Η διάταξη δίνεται στο Σχήμα 2.2 και συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των κεραιών μικροταινιωτών καλυμμάτων και της επίπεδης γραμμής μεταφοράς.

Στο [4] μελετάται η ορθογωνική σχισμοκεραία στις υψηλές συχνότητες (20-30 GHz) σε υπόστρωμα GaAs υψηλής διηλεκτρικής επιτρεπτότητας ($\epsilon_r=12.9$) και εξετάζεται η εξάρτηση της συχνότητας λειτουργίας και του εύρους ζώνης από το μήκος και το πλάτος της σχισμής (l_s, w_s Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.2 microstrip patch antenna with coplanar feed line

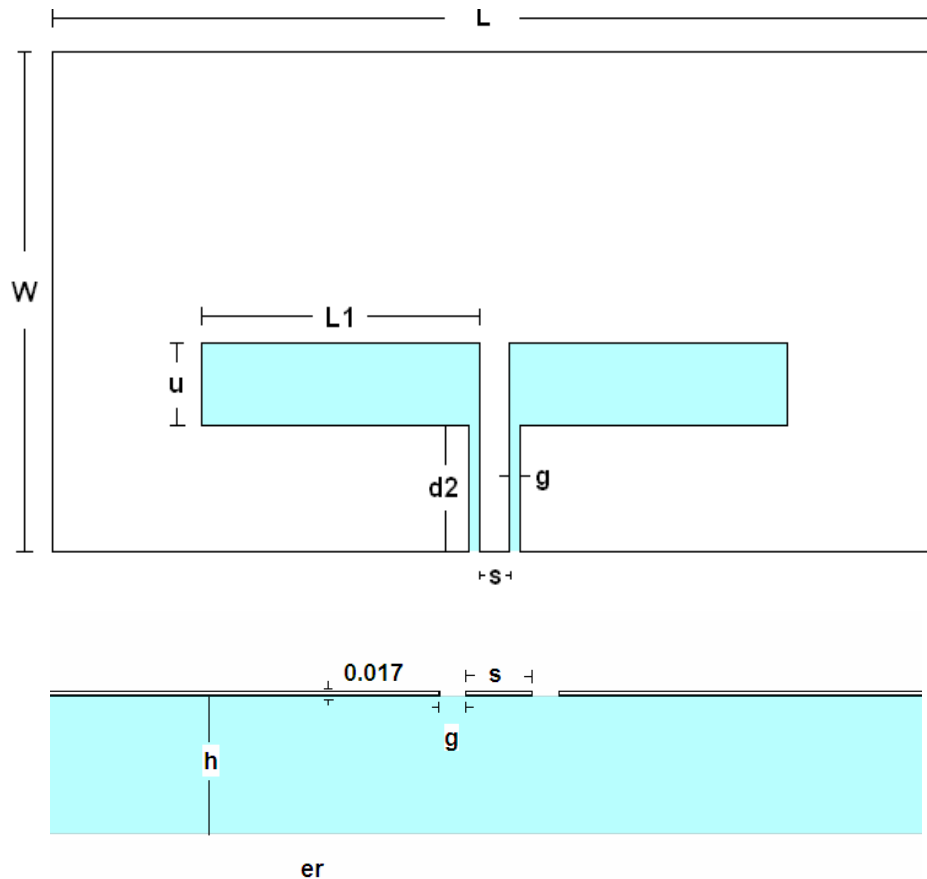


Σχήμα 2.3 CPW fed MMIC slot dipole

Η δική μας σχεδίαση εστιάζεται στις συχνότητες έως και 10 GHz, ενώ επιθυμούμε να έχουμε όσο το δυνατόν πιο ευρυζωνική λειτουργία και να εξετάσουμε όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κεραίας (χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου, τρόποι προσαρμογής, διαγράμματα ακτινοβολίας, θέματα πολώσεως).

2.2 Σχεδίαση-μοντελοποίηση ορθογωνικής σχισμοκεραίας

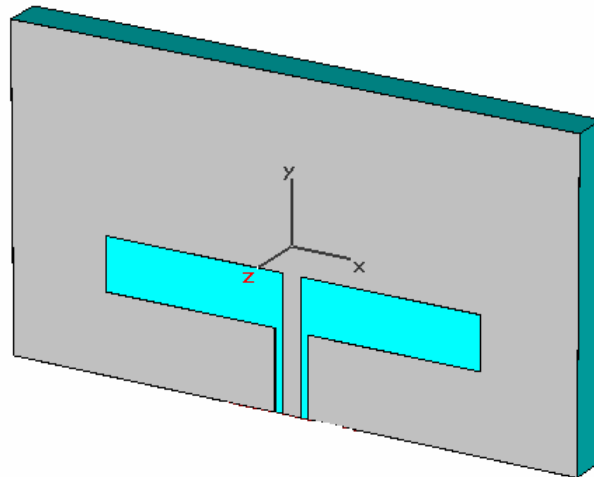
Το μοντέλο της ορθογωνικής σχισμοκεραίας (Σχήμα 2.4) χαρακτηρίζεται από τη απλότητα στη γεωμετρία και τον μικρό αριθμό παραμέτρων που απαιτούνται για την παραμετροποίηση του.



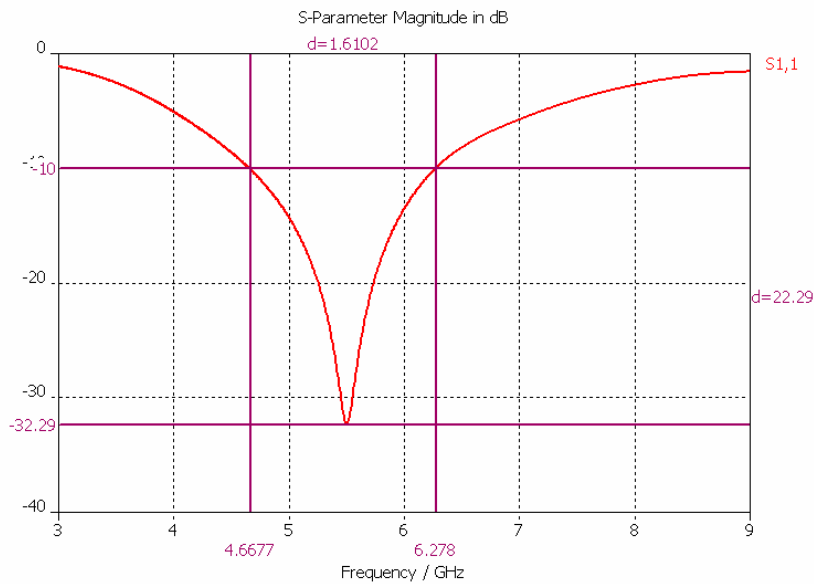
Σχήμα 2.4 Ορθογωνική σχισμοκεραία

Αρχικά θα εστιάσουμε την σχεδίαση στην περιοχή των 5-6 GHz, που χρησιμοποιείται για ζεύξεις μικρών αποστάσεων σύμφωνα με το πρωτόκολλο IEEE 802.11a. Για αυτό το λόγο επιλέγουμε αρχικά $L1 = \lambda/4 = 13\text{mm}$. Έπειτα από αρκετές δοκιμές, αλλάζοντας παράλληλα τις διάφορες μεταβλητές, καταλήγουμε στην παρακάτω σχεδίαση που καλύπτει αυτήν τη περιοχή συχνοτήτων. Ακολουθεί ο πίνακας με τις τιμές των παραμέτρων, καθώς και ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} (Σχήμα 2.6):

Παράμετρος	Τιμή
L	46
L1	14.5
W	24
d2	6
er	3.27
g	0.6
h	3.175
s	1.5
u	4



Σχήμα 2.5 Ορθογωνική σχισμοκεραία σε συχνότητα λειτουργίας 5.5 GHz



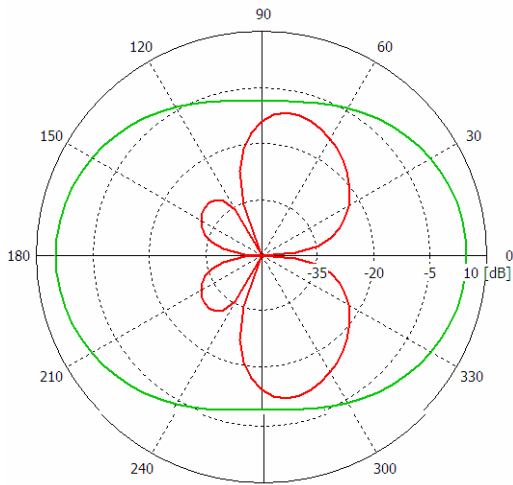
Σχήμα 2.6 S_{11} ορθογωνικής σχισμοκεραίας

Πρέπει να σημειώσουμε πως στην παραπάνω σχεδίαση θεωρήσαμε διηλεκτρικό Roger 4003 με $\epsilon_r=3.27$, ύψος $h=3.175$ και πάχος μετάλλου 0.017mm , που είναι ένα εμπορικά διαθέσιμο διηλεκτρικό κατάλληλο για σχεδίαση σε αυτές τις συχνότητες.

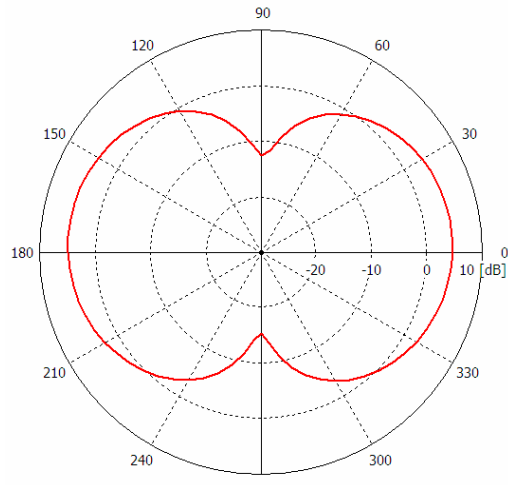
Η χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου της κεραίας που εξαρτάται από το διηλεκτρικό και τις παραμέτρους s , g υπολογίζεται ότι είναι 72 Ohms . Για την τροφοδοσία της επομένως χρειάζεται προσαρμοστική διάταξη, που συνήθως είναι ένα balun $\lambda/4$ (Παρακάτω μελετάμε έναν άλλο τρόπο προσαρμογής, με χρήση μετασχηματισμού τυπωμένου πάνω στην κεραία).

Το εύρος ζώνης που επιτυγχάνεται είναι 1.6 GHz γύρω από τη κεντρική συχνότητα των 5.5 GHz , ή διαφορετικά επιτυγχάνεται bandwidth ratio 30% που είναι ικανοποιητικό δεδομένης της απλής γεωμετρίας της κεραίας.

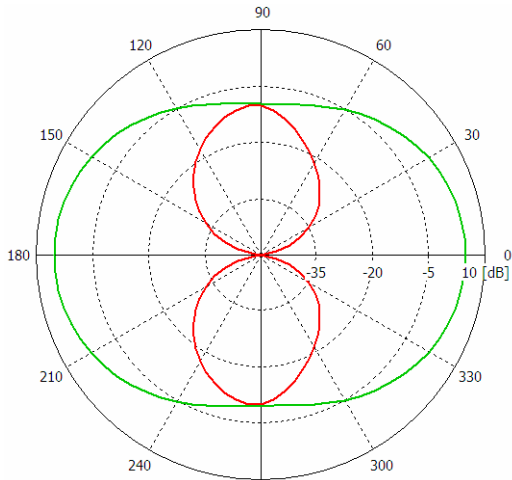
Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας, ως προς το κέρδος:



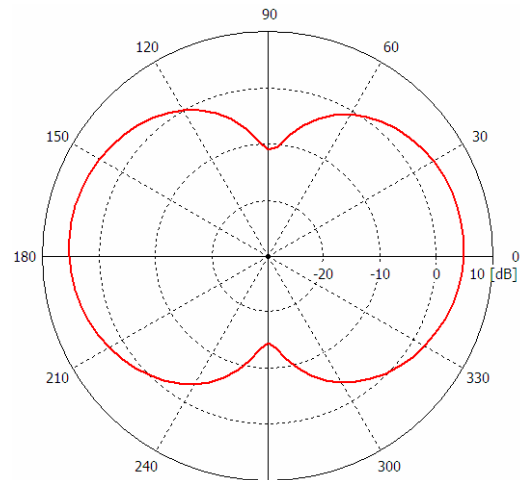
Σχήμα 2.7 $f=5$ GHz επίπεδο $x-z$



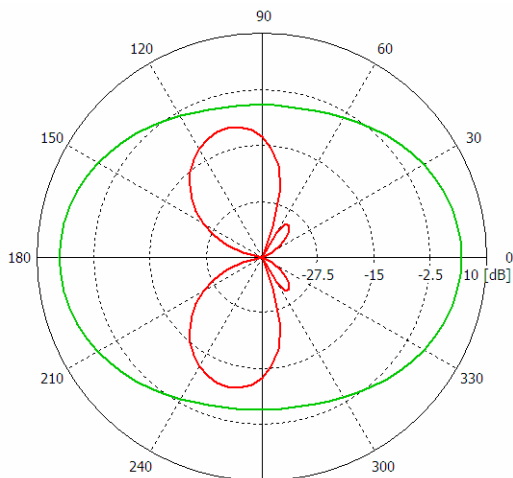
Σχήμα 2.8 $f=5$ GHz επίπεδο $y-z$



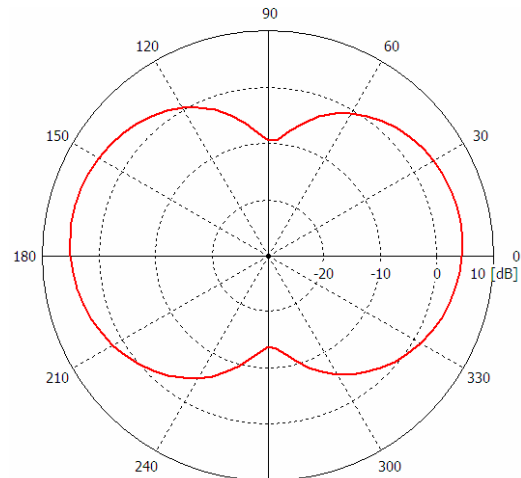
Σχήμα 2.9 $f=5.5$ GHz επίπεδο $x-z$



Σχήμα 2.10 $f=5.5$ GHz επίπεδο $y-z$



Σχήμα 2.11 $f=6$ GHz επίπεδο $x-z$



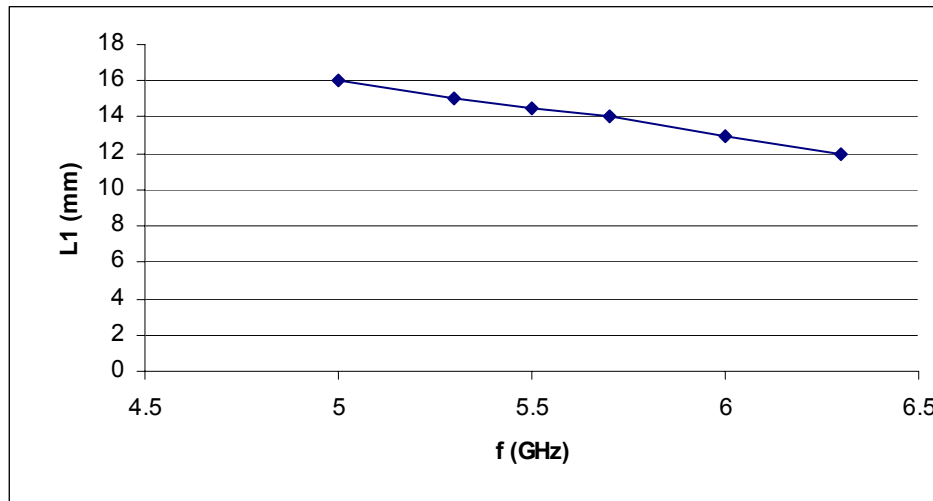
Σχήμα 2.12 $f=6$ GHz επίπεδο $y-z$

Παρατηρούμε πως σε όλο το εύρος ζώνης της κεραίας τα διαγράμματα έχουν περίπου την ίδια μορφή, ακτινοβολώντας μετωπικά και ως προς τις δύο κατευθύνσεις, σχηματίζοντας δύο κυρίως λοβούς κέρδους περίπου 5.5 db. Η ορθογωνική σχισμοκεραία παράγει κατακόρυφη πόλωση, όμοια με δίπολο, και παρατηρούμε ότι ο αξονικός λόγος είναι κάτω από -20 db. Ο ιδιαίτερα χαμηλός αξονικός λόγος είναι ένα από τα πλεονεκτήματα αυτών των κεραιών σε σχέση με τις κεραίες μικροταινιωτού καλύμματος.

2.3 Παραμετρική μελέτη ορθογωνικής σχισμοκεραίας

Έχοντας καταλήξει στο παραπάνω βέλτιστο μοντέλο ως προς την επίτευξη συντονισμού και ως προς το εύρος ζώνης για τη συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων, μελετάμε την μεταβολή του συντελεστή ανάκλασης S_{11} αλλάζοντας κάθε παράμετρο ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα αυτά δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα 1A, ενώ σε αυτή την παράγραφο συνοψίζουμε τα σημαντικότερα σημεία.

Μήκος σχισμής L_1 : Η παράμετρος αυτή καθορίζει την συχνότητα συντονισμού, και μάλιστα η σχέση μεταξύ τους είναι γραμμική, καθώς για μεγαλύτερες συχνότητες ο συντονισμός παρατηρείται σε αντίστοιχα μικρότερα L_1 . Από το Σχήμα 2.36 του Παραρτήματος 2A εύκολα προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα όπου φαίνεται αυτή η αναλογία:



Σχήμα 2.13 Μεταβολή L1 συναρτήσει συχνότητας

Πλάτος σχισμής u : Το πλάτος της σχισμής καθορίζει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στις αιχμές της σχισμής, δεν επηρεάζει την συχνότητα συντονισμού αλλά καθορίζει το “βάθος” του συντονισμού, δηλαδή καθορίζει την ικανότητα απορρόφησης ισχύος της διάταξης. Δεν πρέπει να ξεχνάμε πως η όλη διάταξη δεν είναι τίποτα άλλο παρά μια γραμμή μεταφοράς η οποία τερματίζεται από μια σχισμή. Αν ο τερματισμός είναι ο κατάλληλος τότε μεγάλο μέρος της κυματοδηγούμενης ενέργειας ακτινοβολείται και επιτυγχάνεται ο στόχος μας. Το πλάτος u είναι καθοριστικό για τον τερματισμό και βλέπουμε πως για μικρές αποκλίσεις από την αρχική τιμή $u=4\text{mm}$ σε $u=3$ ή 5mm το βάθος του συντονισμού πέφτει κατακόρυφα (Σχήμα 2.37).

Παράμετροι coplanar γραμμής s, g : Οι s, g παράμετροι, δηλαδή το διάκενο μεταξύ των σχισμών και το πλάτος των σχισμών της ομοεπίεδης γραμμής μεταφοράς αντίστοιχα, είναι σημαντικές για έναν επιπλέον λόγο: καθορίζουν την χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου της κεραίας. Επιθυμούμε η Z_{in} να είναι 50Ω , ωστόσο για να έχουμε μεγαλύτερη σχεδιαστική ελευθερία, μεταβάλουμε

τα s , g ανεξάρτητα και θα μελετήσουμε στη παράγραφο 2.4 τρόπους προσαρμογής.

Όσον αφορά το S_{11} , το s αποτελεί σημαντική σχεδιαστική παράμετρο καθώς βλέπουμε πως μεταβάλλοντας το μετατοπίζεται η συχνότητα συντονισμού (Σχήμα 2.38), ενώ το g φαίνεται να έχει μικρή επίδραση στο βάθος του συντονισμού (Σχήμα 2.39).

Διαστάσεις κεραίας L , W : Οι διαστάσεις του μεταλλικού πλαισίου της σχισμοκεραίας επιλέγουμε να είναι μικρότερες των 50mm, καθώς μας ενδιαφέρει το μικρό μέγεθος της όλης διάταξης. Μικρές μεταβολές γύρω από την αρχική τιμή του L φαίνεται να μην έχουν ιδιαίτερη επίπτωση στο S_{11} (Σχήμα 2.40), ενώ αντίθετα το πλάτος W μεταβάλλει τόσο το βάθος συντονισμού όσο και τη κεντρική συχνότητα (Σχήμα 2.41).

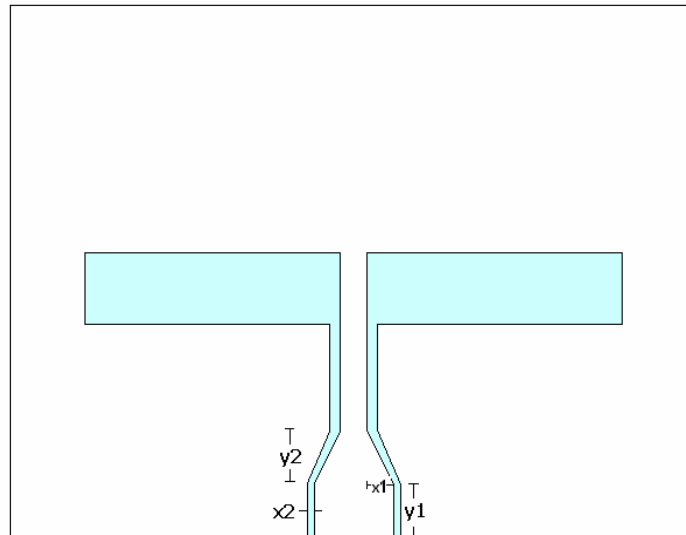
Αλλαγή διηλεκτρικού (παραμέτρων h , ϵ_r): Από τα σχήματα 2.43, 2.44 βλέπουμε πως αλλαγή διηλεκτρικού (είτε του ύψους του h , είτε του ϵ_r) οδηγεί σε τελείως άλλα αποτελέσματα. Επομένως προτιμούμε αρχικά να επιλέγουμε το διηλεκτρικό και να υλοποιούμε την σχεδίαση μας με βάση αυτό, παρά την αντίστροφη διαδικασία η οποία φαίνεται μη αποδοτική.

Σημειώνουμε πως παρά την διαφορετική συχνότητα λειτουργίας στο [4] όπου η σχεδίαση επικεντρώνεται σε πολύ υψηλές συχνότητες, τα συμπεράσματα μας συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τα αντίστοιχα αυτής της δημοσίευσης.

2.4 Προσαρμογή με μετασχηματισμό της ομοεπίπεδης γραμμής

Κύριο μειονέκτημα της παραπάνω κεραίας είναι η αντίσταση εισόδου της ($Z_{in}=72 \text{ Ohms}$). Επιθυμούμε την προσαρμογή της κεραίας χωρίς να

παρεμβάλουμε κάποια διάταξη προσαρμογής μεταξύ κεραιάς και τροφοδοσίας. Χρησιμοποιούμε για αυτό το λόγο το παρακάτω μετασχηματισμό (transition):



Σχήμα 2.14 transition ορθογωνικής σχισμοκεραίας

Το παραπάνω transition έχει χρησιμοποιηθεί στο [5], μετασχηματίζοντας την coplanar γραμμή προκειμένου να είναι τέτοια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά s , g στην είσοδο ώστε να μπορεί να τροφοδοτηθεί με SMA. Σε αυτή τη δημοσίευση ωστόσο δεν αλλάζει η χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου, από 50 Ohms πριν το transition καταλήγει πάλι στα 50 Ohms, έχοντας αλλάξει μόνο τις διαστάσεις των s , g .

Επιθυμούμε επεκτείνοντας αυτή τη μέθοδο να μετασχηματίσουμε την Z_{in} από τα 72 στα 50, χωρίς να αλλάξει η λειτουργία της κεραιάς. Το μοντέλο του Σχήματος 1.14 είναι παραμετρικό και με διαδοχικές δοκιμές των υψών y_1 , y_2 και κατάλληλη ρύθμιση των x_1 , x_2 ώστε $Z_{in}=50$ Ohms, καταλήγουμε στην παρακάτω λύση:

$$x_1 = 1.5 \text{ mm}$$

$$x_2 = 0.4 \text{ mm}$$

$$y_1 = 3 \text{ mm}$$

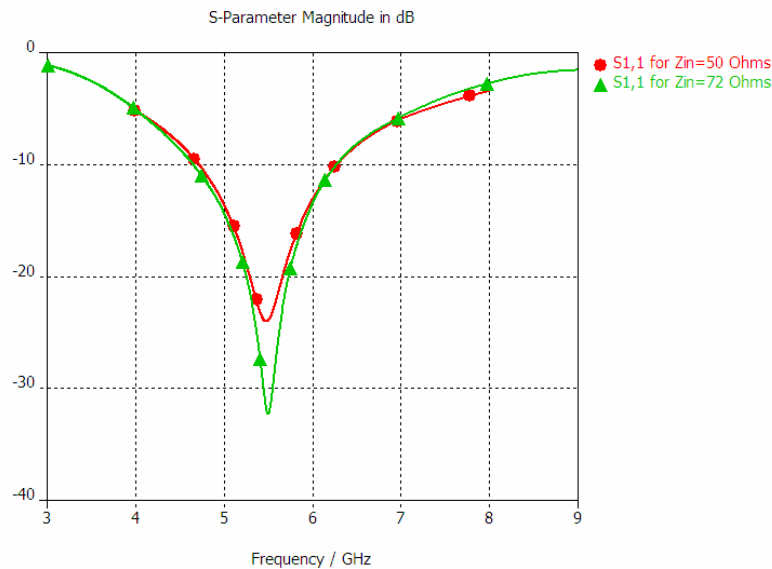
$$y_2 = 3 \text{ mm}$$

$$L' = 39 \text{ mm}$$

$$W' = 30 \text{ mm}$$

Επειδή με την προσθήκη του transition άλλαξε το μήκος της ομοεπίπεδης γραμμής, μεταβάλλαμε ελάχιστα τα μήκη L , W σε L' , W' . Ωστόσο όλοι οι άλλοι παράμετροι που αφορούν στην σχισμή έχουν παραμείνει ίδιοι με πριν.

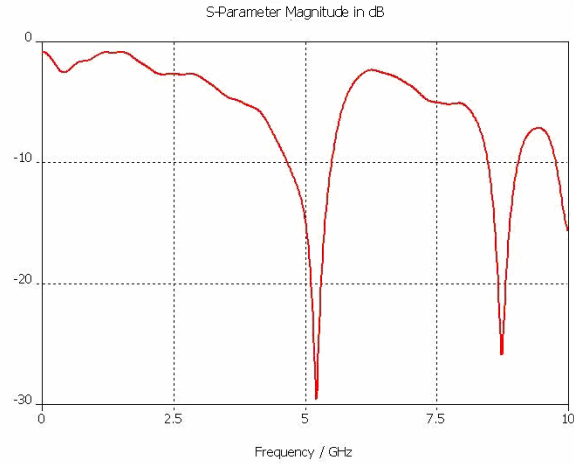
Στο Σχήμα 2.15 που ακολουθεί, φαίνεται συγκριτικά το S_{11} με την προσθήκη του transition σε σχέση με πριν:



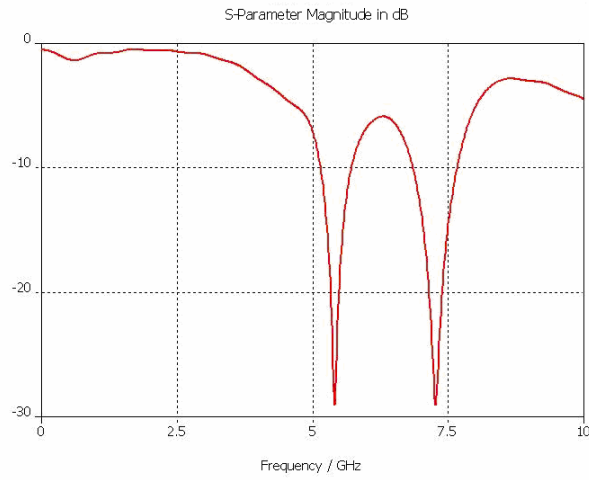
Σχήμα 2.15 Συγκριτικό S_{11} με /χωρίς transition

2.5 Περισσότερες ορθογωνικές σχισμοκεραίες

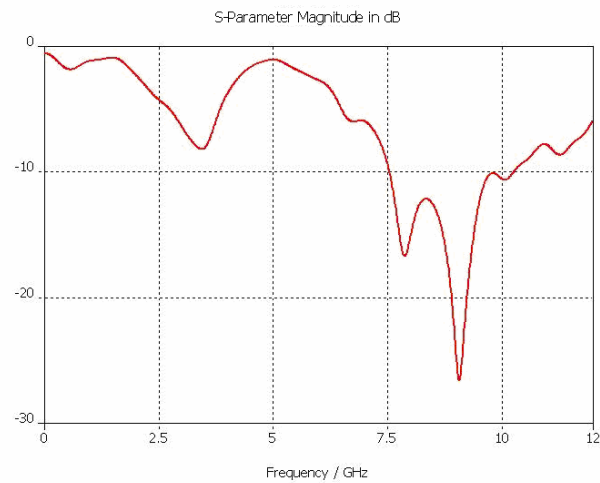
Στην παραπάνω σχεδίαση επικεντρωθήκαμε σε μία μόνο περιοχή συχνοτήτων. Ωστόσο μεταβάλλοντας τις διαστάσεις του ανοίγματος στο μέταλλο έχουμε λειτουργία σε διάφορες περιοχές συχνοτήτων. Παρακάτω παραθέτουμε κάποιες από τις περιπτώσεις που παρατηρήσαμε dual-band ή wideband λειτουργία κατά την παραμετρική ανάλυσή μας:



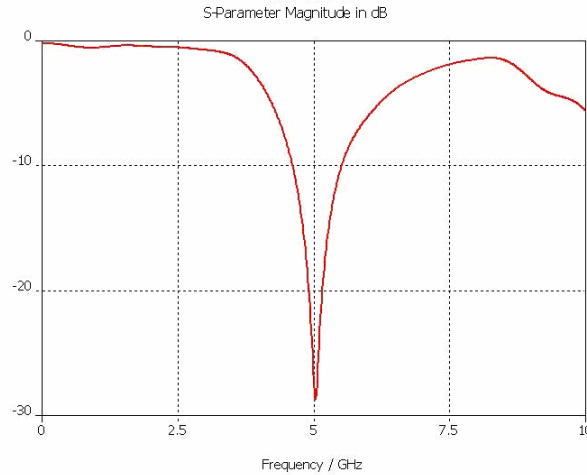
Σχήμα 2.16 $d_2=16.5$, $u=20$, $L_1=25$, $L=70$, $W=50$, $\epsilon_r = 4.4$, $s=4$, $g=0.5$



Σχήμα 2.17 $d_2=8.75$, $u=15$, $L_1=25$, $L=70$, $W=50$, $\epsilon_r = 4.4$, $s=4$, $g=0.5$



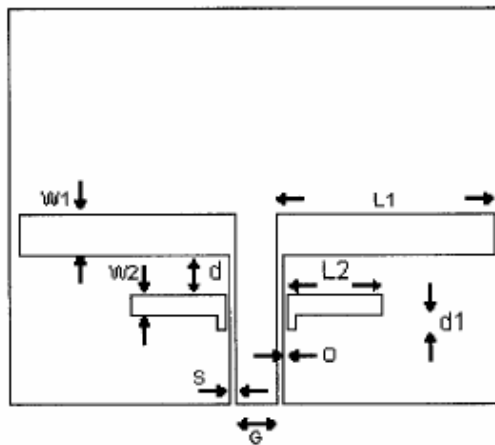
Σχήμα 2.18 $d_2=10$, $u=15$, $L_1=25$, $L=70$, $W=50$, $\epsilon_r = 4.4$, $s=4$, $g=0.5$



Σχήμα 2.19 $d_2=5, u=5, L_1=15, L=70, W=50, \epsilon_r =4.4, s=4, g=0.5$

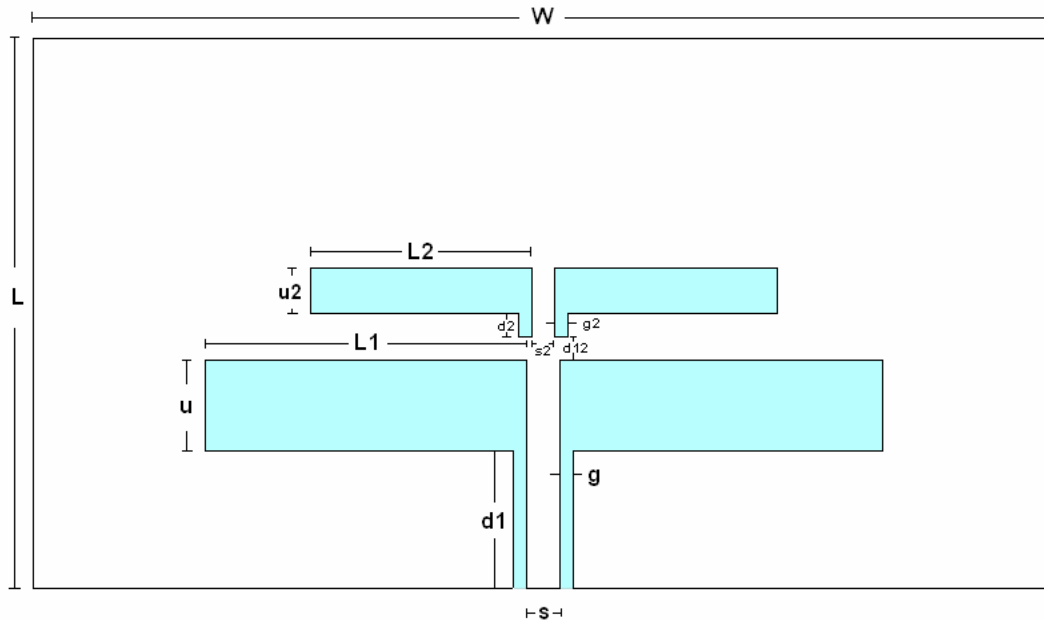
2.6 Προσθήκη παρασιτικών στοιχείων

Η προσθήκη παρασιτικών στοιχείων σε ορθογωνική σχισμοκεραία γίνεται στο [6] (Σχήμα 2.20) με σκοπό την διεύρυνση του εύρους ζώνης λειτουργίας. Χωρίς τα παρασιτικά, η σχισμή μήκους L_1 συντονίζεται στα 2.5 GHz και έχει ένα εύρος περίπου 1 GHz. Το μήκος L_2 του παρασιτικού επιλέγεται ώστε να συντονίζεται στα 5 GHz. Ο συνδυασμός και των δύο καταλήγει σε μια ιδιαίτερα ευρυζωνική λειτουργία από 2.35-6.85 GHz.



Σχήμα 2.20 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία

Δοκιμάσαμε να εφαρμόσουμε το ίδιο και στο δικό μας μοντέλο, αλλά η τοποθέτηση των παρασιτικών με αυτό τον τρόπο δεν απέδιδε κάποια σημαντική διεύρυνση του εύρους. Για αυτό το λόγο τοποθετήσαμε τα παρασιτικά στο τέλος της ομοεπίπεδης γραμμής όπως φαίνεται στο μοντέλο του Σχήματος 2.21.



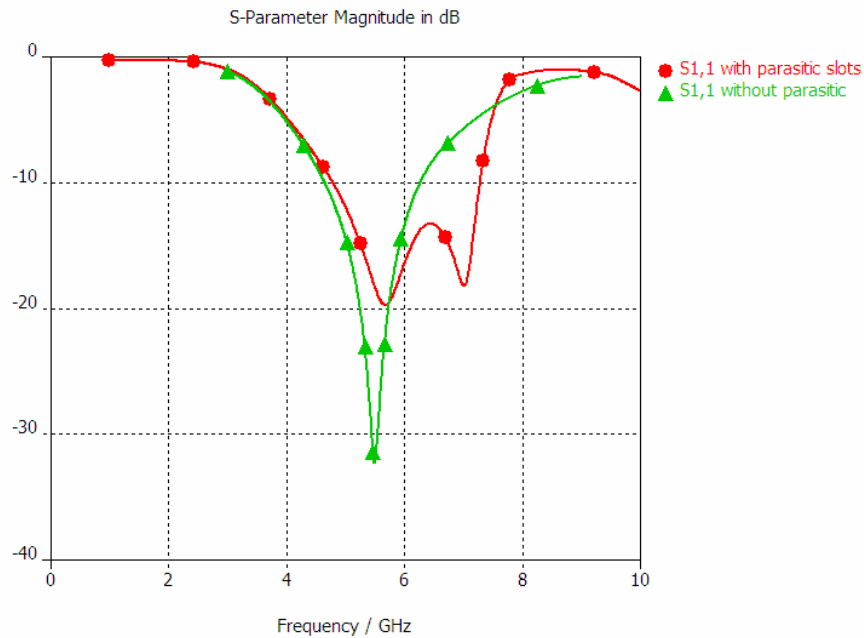
Σχήμα 2.21 Μοντέλο ορθογωνικής σχισμοκεραίας με παρασιτικά

Μετά από προσομοιώσεις με μεταβολές των παραμέτρων του παρασιτικού στοιχείου καταφέραμε να αυξήσουμε το εύρος ζώνης της διάταξης από 1.6 GHz σε 2.5 GHz:

Παράμετρος	Τιμή
L	46
L1	14.5
L2	10
W	24
d1	6
d12	0.5
d2	1.2
er	3.27
g	0.6
g2	0.6
h	3.125
s	1.5

s2	1
u	4
u2	2

Από το παρακάτω διάγραμμα του S_{11} φαίνεται η σημαντική διεύρυνση που επιτυγχάνεται με την προσθήκη των παρασιτικών:



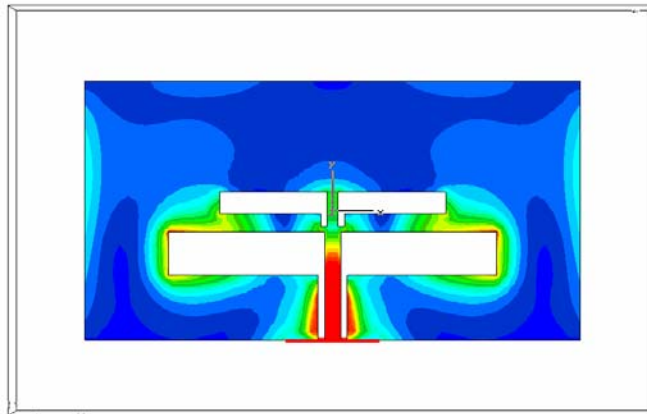
Σχήμα 2.22 Διεύρυνση εύρους ζώνης μετά τη προσθήκη του παρασιτικού

Στο Παράρτημα 2B δίνονται τα διαγράμματα των παραμετρικών μεταβολών του μοντέλου με τα παρασιτικά στοιχεία. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι είναι ιδιαίτερα σημαντική η απόσταση του παρασιτικού από το τέλος της coplanar γραμμής (d_{12}) και το μήκος d_2 που προφανώς τροφοδοτεί το παρασιτικό στοιχείο. Το μήκος L_2 είναι αυτό που καθορίζει το συντονισμό (Σχήμα 2.45), ενώ και το πλάτος u_2 παίζει επίσης σημαντικό ρόλο (Σχήμα 2.46). Γενικά μπορούμε να παρατηρήσουμε πως αλλάζοντας τη γεωμετρία του παρασιτικού μπορούμε να ενισχύσουμε το συντονισμό στα 7 GHz, αλλά παράλληλα αυτό λειτουργεί σε βάρος του αρχικού συντονισμού των 5.5 GHz. Τελικά επιλέγουμε

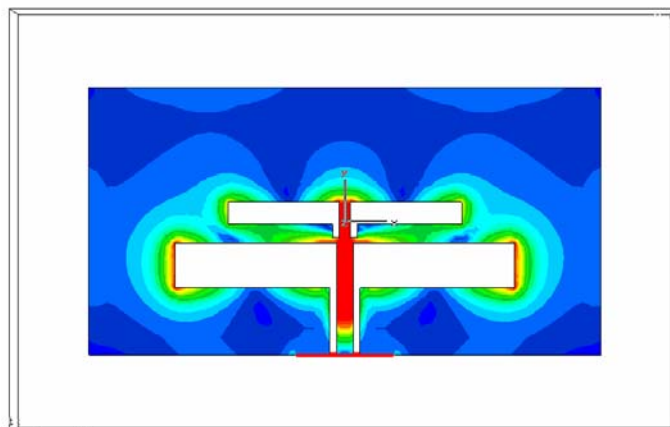
μια ενδιάμεση κατάσταση ώστε να συγκεράσουμε τους δύο αντικρουόμενους σχεδιαστικούς στόχους: και διευρυμένο εύρος ζώνης και ικανοποιητική απορρόφηση ισχύος (βαθύ συντονισμό).

Είναι πολύ σημαντική η οπτικοποίηση των επιφανειακών ρευμάτων, με τη βοήθεια των οποίων φαίνεται ο τρόπος τροφοδότησης στα διάφορα σημεία της διάταξης. Στο παρακάτω σχήμα, υπάρχει μια χρωματική διαβάθμιση όπου το κόκκινο αντιστοιχεί στη μέγιστη πυκνότητα επιφανειακού ρεύματος και το μπλε στην ελάχιστη:

Επιφανειακά ρεύματα για $t=t_1$:

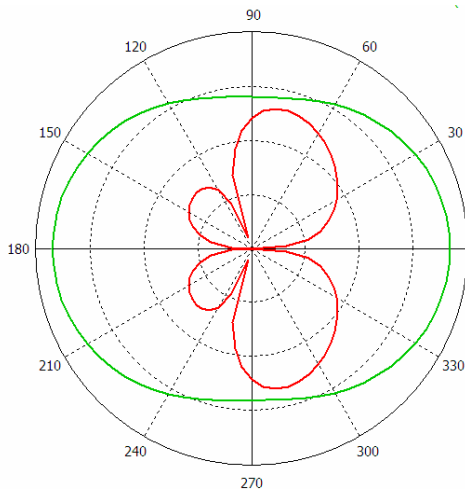


Επιφανειακά ρεύματα για $t=t_1+dt$:

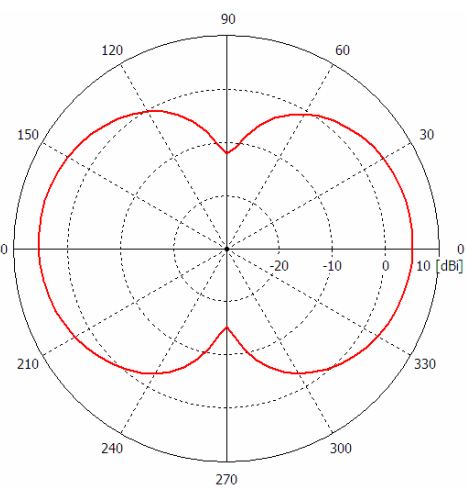


Σχήμα 2.23 Πυκνότητα επιφανειακών ρευμάτων

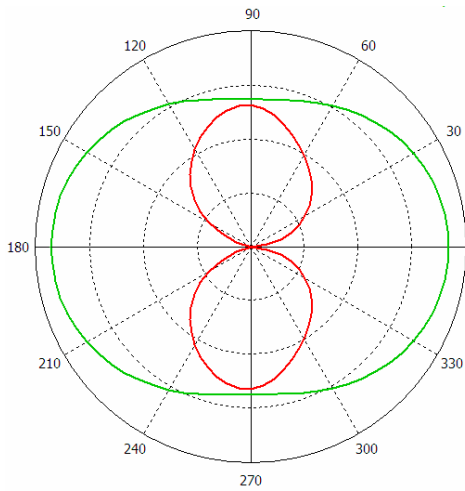
Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας:



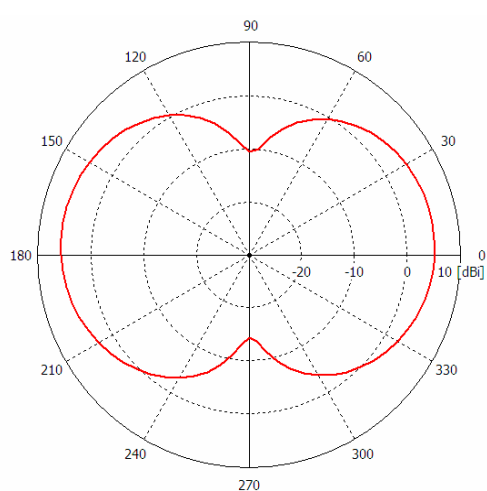
Σχήμα 2.24 $f=5$ GHz επίπεδο $x-z$



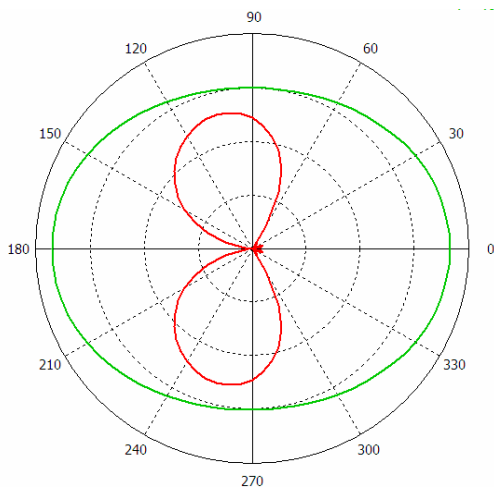
Σχήμα 2.25 $f=5$ GHz επίπεδο $y-z$



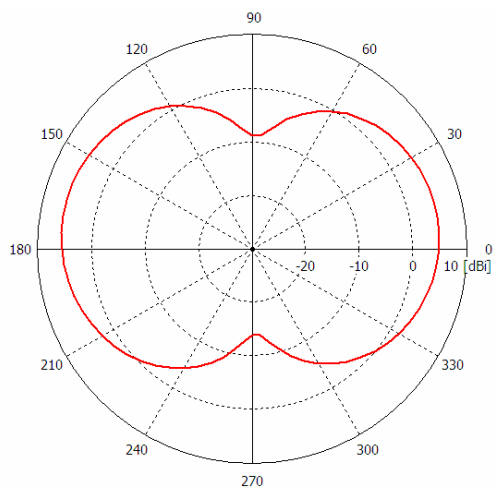
Σχήμα 2.26 $f=5.5$ GHz επίπεδο $x-z$



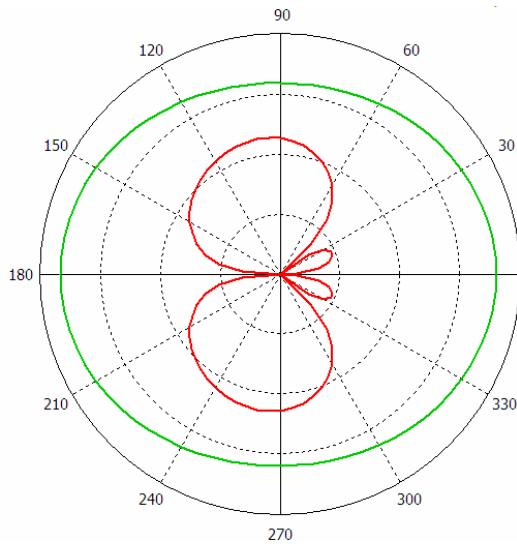
Σχήμα 2.27 $f=5.5$ GHz επίπεδο $y-z$



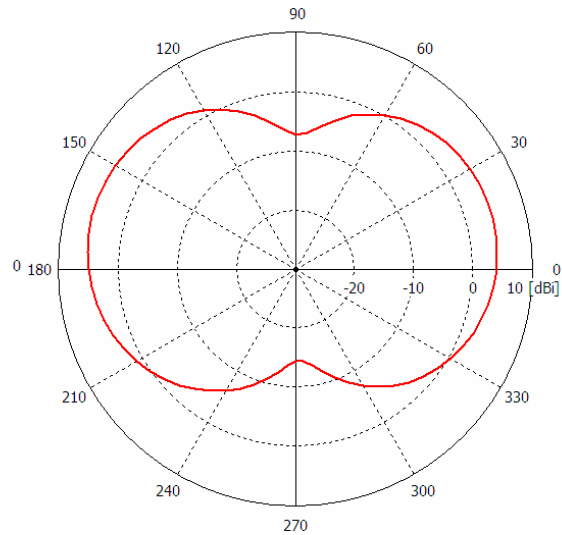
Σχήμα 2.28 $f=6$ GHz επίπεδο $x-z$



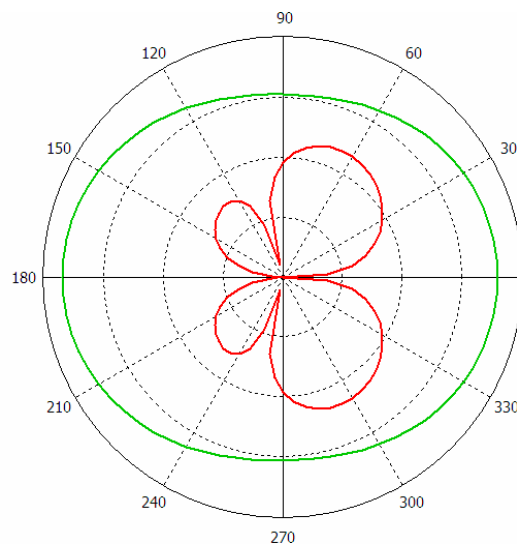
Σχήμα 2.29 $f=6$ GHz επίπεδο $y-z$



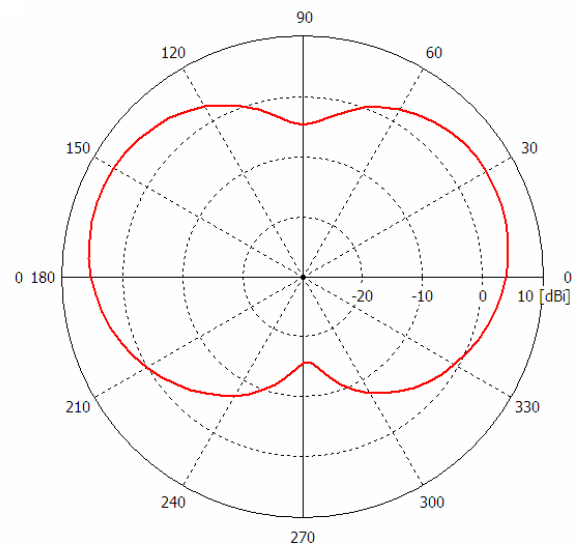
Σχήμα 2.30 $f=6.5$ GHz επίπεδο $x-z$



Σχήμα 2.31 $f=6.5$ GHz επίπεδο $y-z$



Σχήμα 2.32 $f=7$ GHz επίπεδο $x-z$

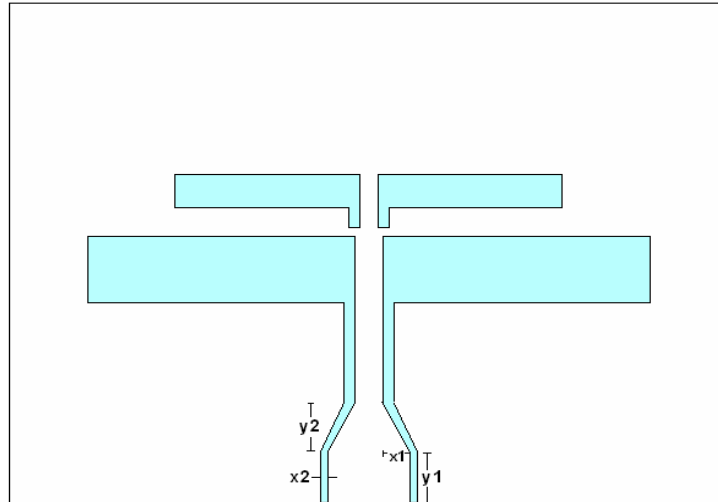


Σχήμα 2.33 $f=7$ GHz επίπεδο $y-z$

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας δε διαφέρουν πολύ από αυτά της απλής ορθογωνικής σχισμοκεραίας (Σχήματα 2.7-2.12), εκτός από μία ανύψωση του κυρίου λοβού κατά 5° έως 15° ανάλογα με την συχνότητα ως προς το επίπεδο $x-z$.

Ολοκληρώνουμε τη μελέτη της ορθογωνικής σχισμοκεραίας με παρασιτικά στοιχεία, κάνοντας χρήση του μετασχηματισμού χαρακτηριστικής αντίστασης που

εφαρμόσαμε στην παράγραφο 2.4 και δίνουμε τα συγκριτικά διαγράμματα στο Σχήμα 2.35.



Σχήμα 2.34 Transition αντίστασης εισόδου σε ορθογωνική με παρασιτικά

Μετά την παραμετρική προσομοίωση βρήκαμε πως το καλύτερο transition (αυτό που επιφέρει την ελάχιστη μεταβολή στο S_{11}), είναι ίδιο με αυτό της απλής ορθογωνικής χωρίς παρασιτικά όπως αναμενόταν, δηλαδή:

$$x1 = 1.5 \text{ mm}$$

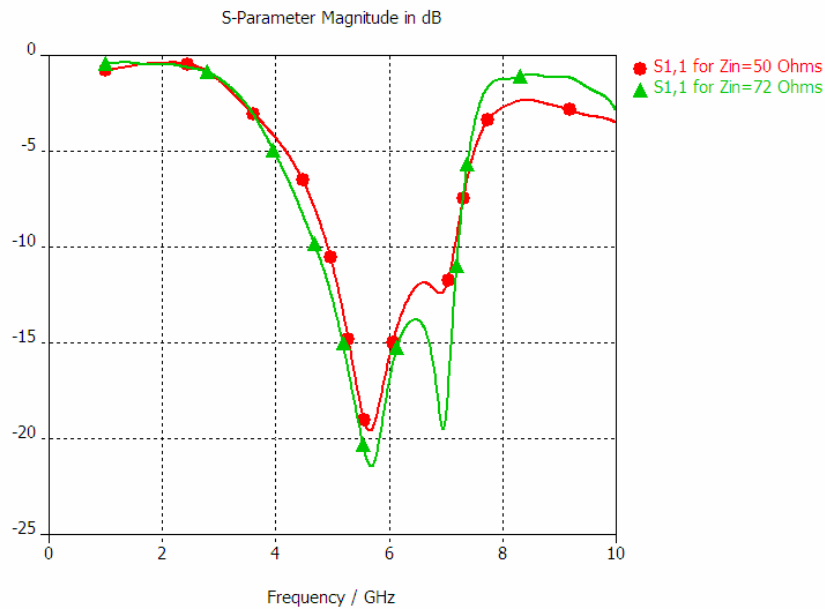
$$x2 = 0.4 \text{ mm}$$

$$y1 = 3 \text{ mm}$$

$$y2 = 3 \text{ mm}$$

$$L' = 39 \text{ mm}$$

$$W' = 30 \text{ mm}$$



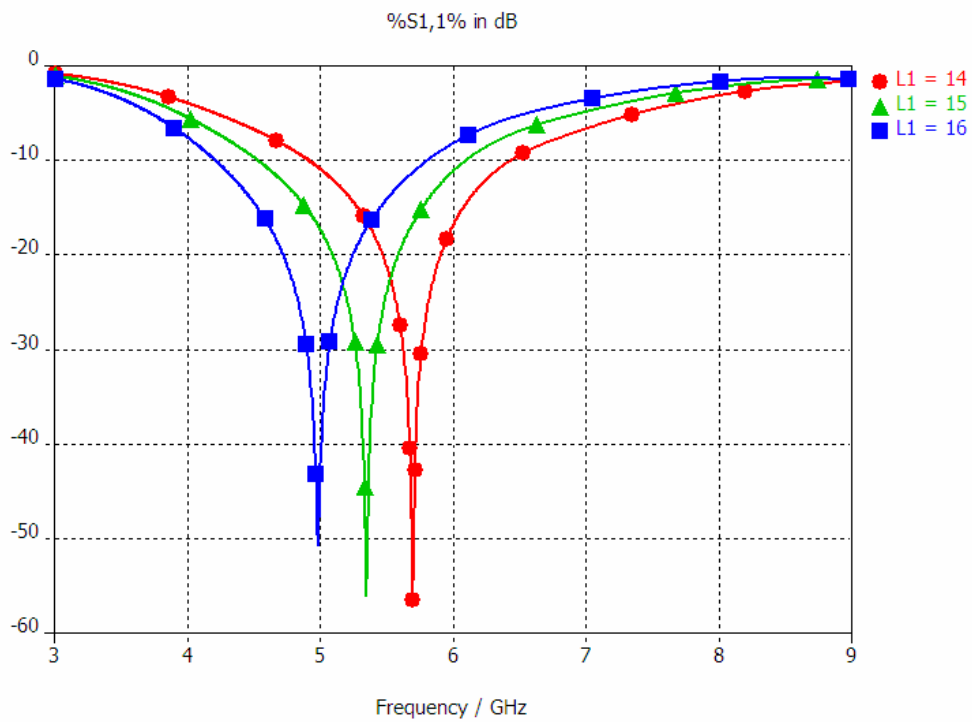
Σχήμα 2.35 Συγκριτικό S_{11} με /χωρίς transition σε ορθογωνική με παρασιτικά

2.7 Βιβλιογραφία

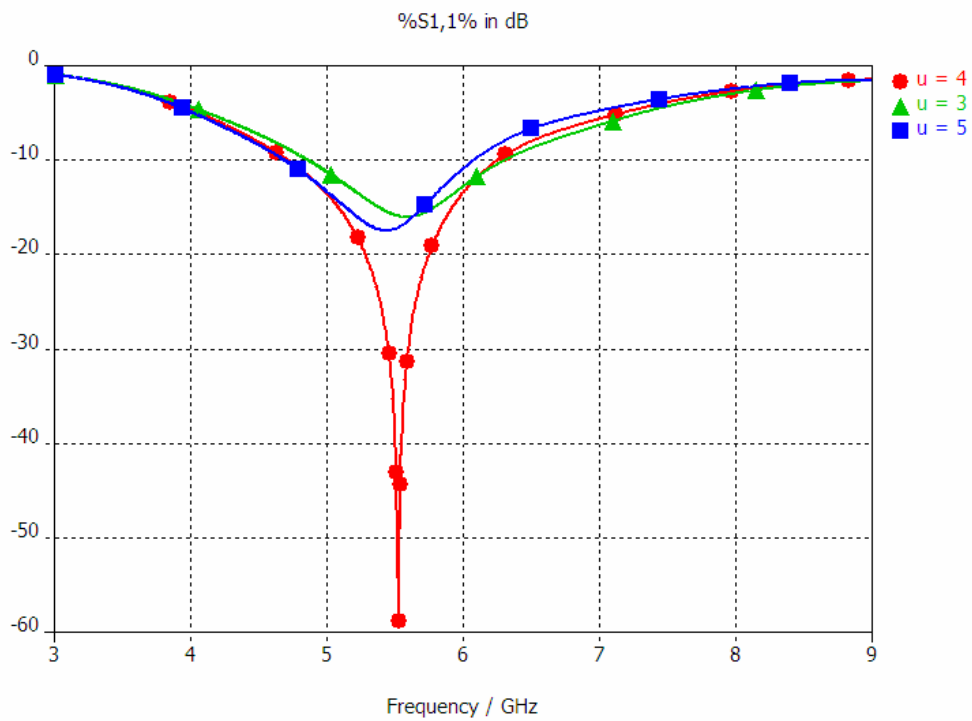
1. B. K. Kormanyos, W. Harokopus, L. P. B. Katehi, and G. M.Rebeiz, "CPW-Fed Active Slot Antennas", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 42, Apr. 1994, pp. 541-545.
2. Menzel W. and W. Grabherr, "A Microstrip Patch With coplanar feded Line", IEEE Microwave and guided Wave Lett., Vol. 1, No.11, pp. 340-342, Nov. 1991
3. M. Boulmalf and G. Y. Delisle, "CPW fed Microstrip Antenna for Indoor Broadband Wireless Communications", 1998
4. S. K. Padhi, N.C. Karmakar and C.L. Law, "CPW fed MMIC slot dipole for mm-wave applications", 2002
5. Guiping Zheng, Ahmed A. Kishk, Allen W. Glisson and Alexander B. Yakovlev, "Slot antenna fed by a CPW line with tapered transition", microwave and optical technology letters / Vol. 38, No. 6, September 20 2003, pp. 465-467
6. Xian-Chang Lin, Ling-Teng Wang, Cheng-Liang Lai and Yu-Seng Liu, "A broadband CPW-FED Inductive slot antenna", microwave and optical technology letters / Vol. 41, No. 1, April 5 2004, pp. 12-14

Παράρτημα 2Α

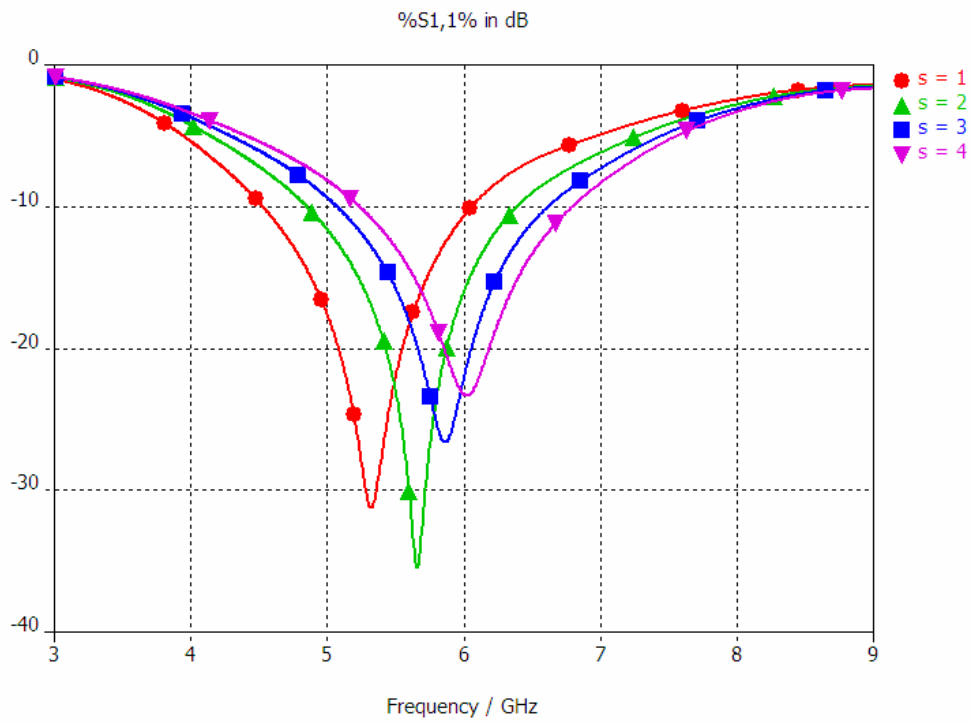
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ CPW-FED RECTANGULAR



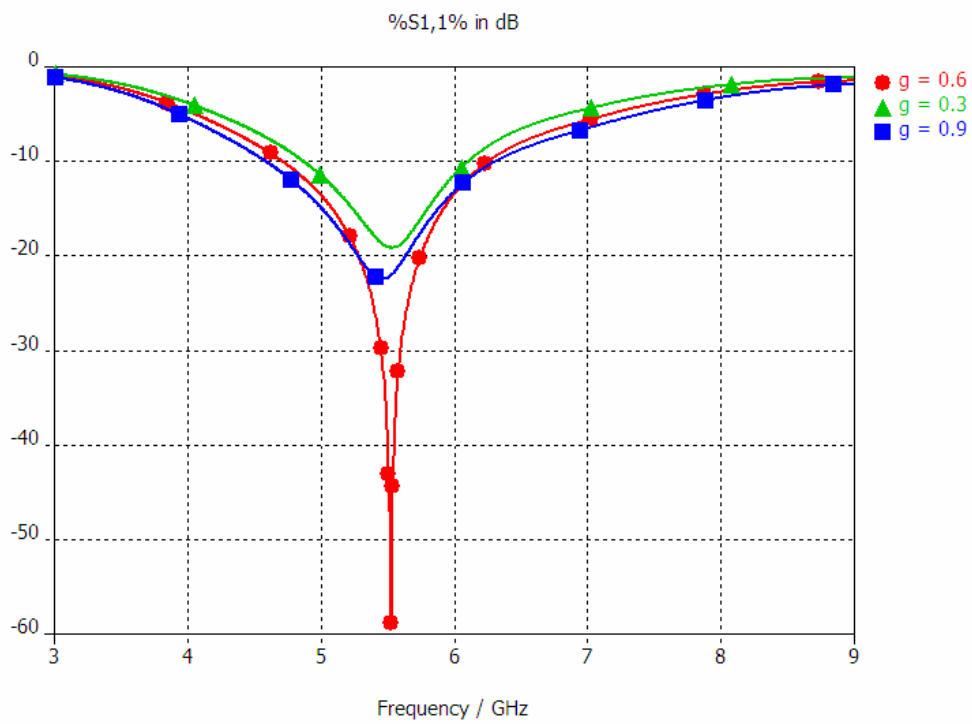
Σχήμα 2.36 Μεταβολή του L1



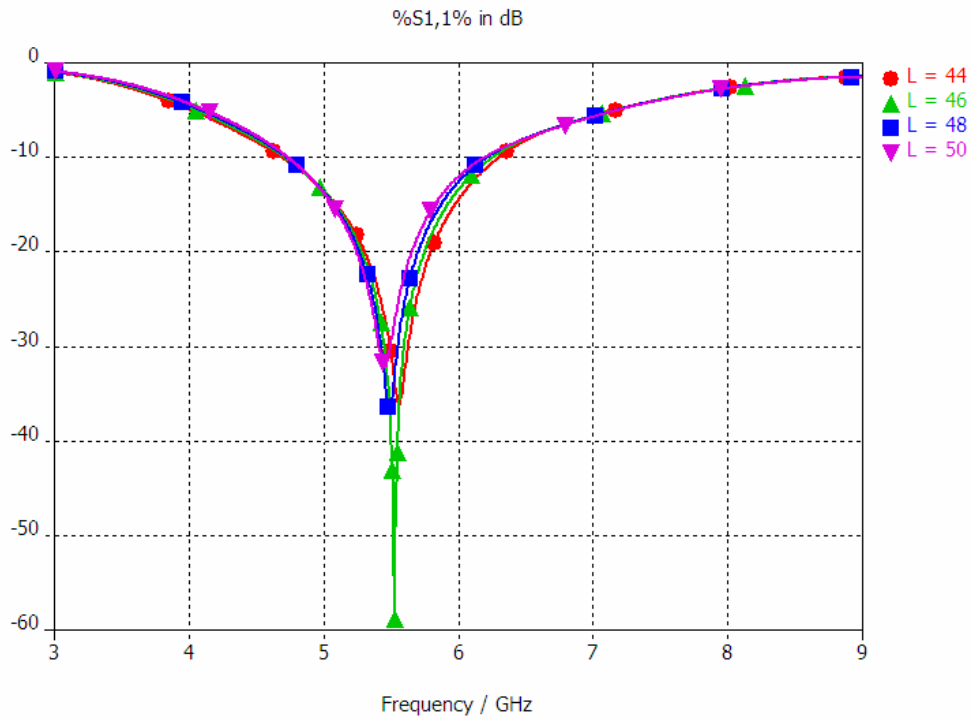
Σχήμα 2.37 Μεταβολή του u



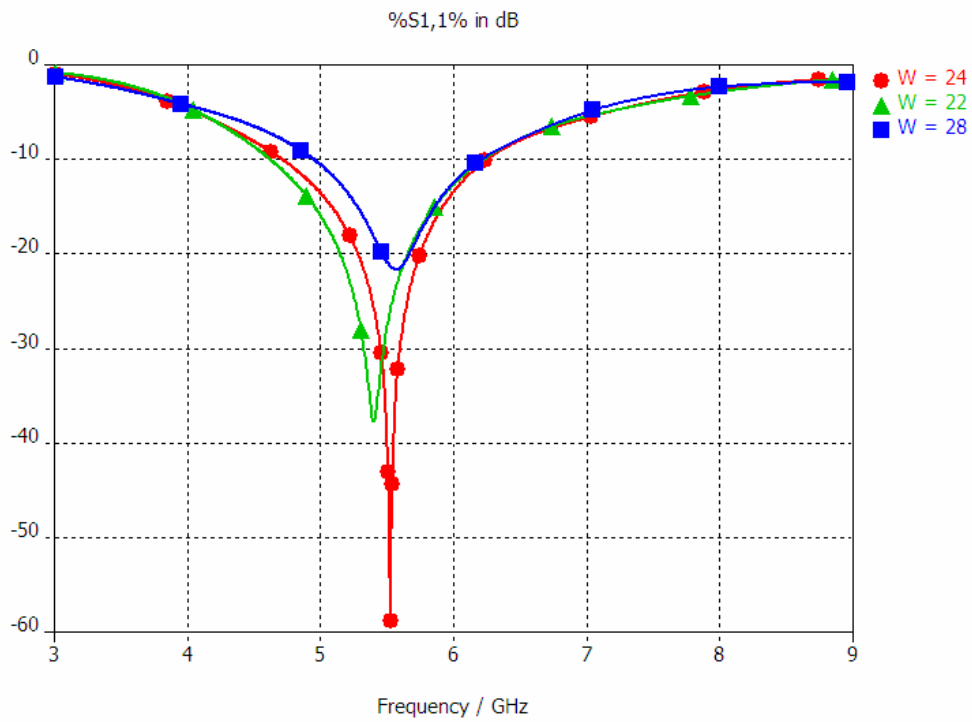
Σχήμα 2.38 Μεταβολή του s



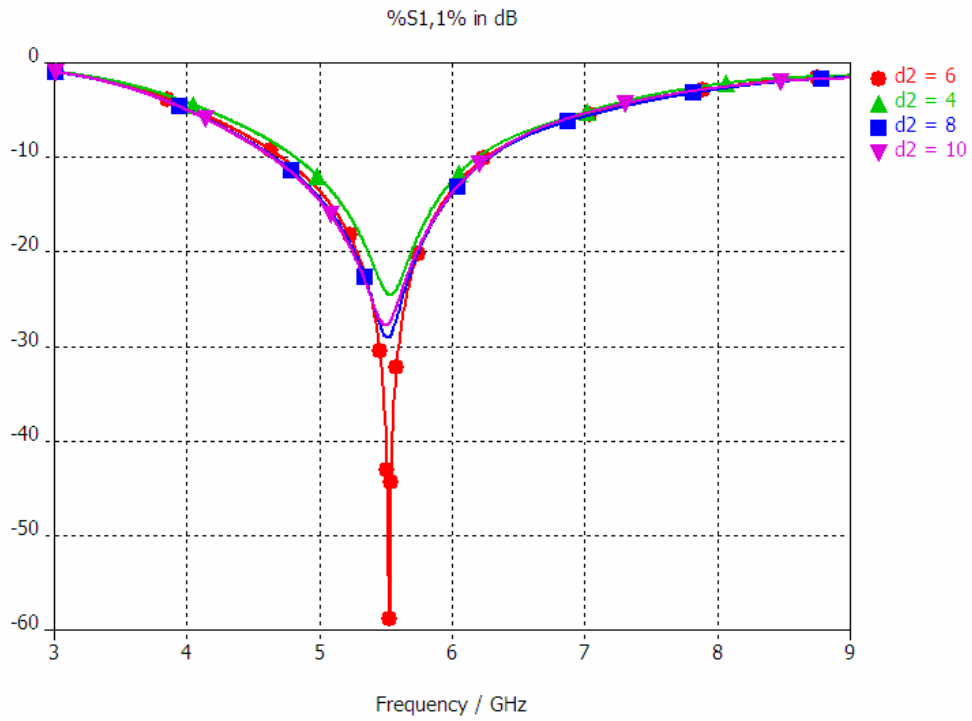
Σχήμα 2.39 Μεταβολή του g



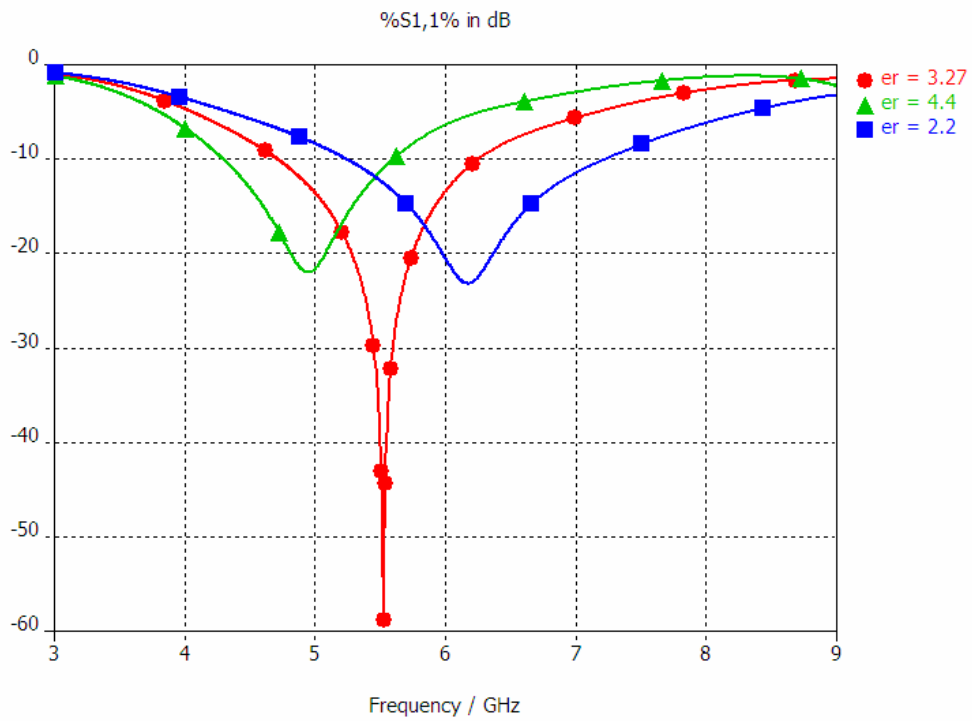
Σχήμα 2.40 Μεταβολή του L



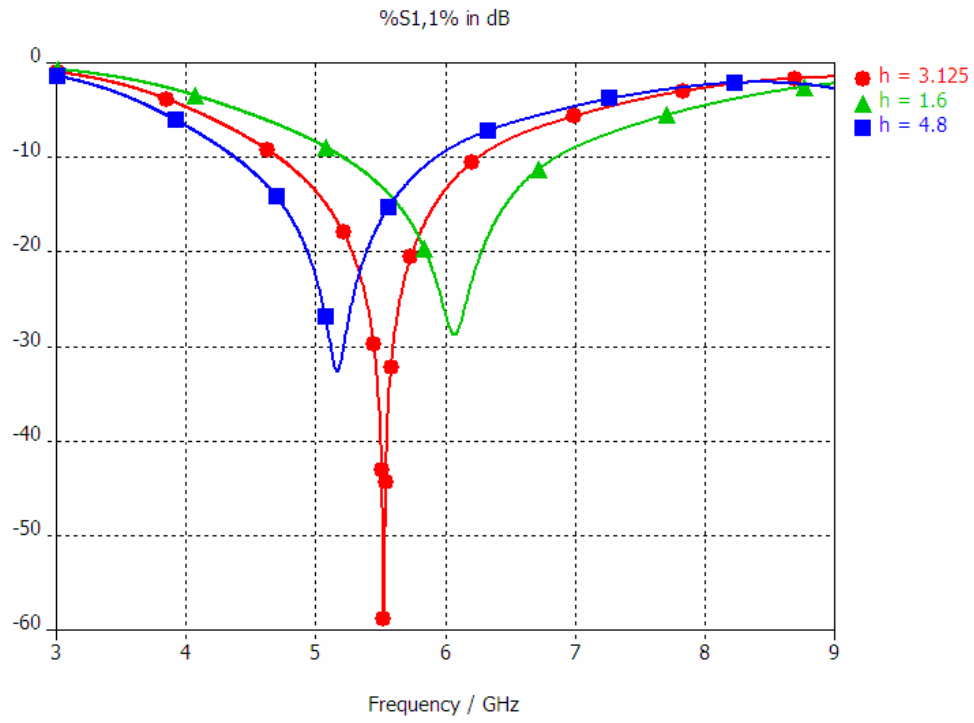
Σχήμα 2.41 Μεταβολή του W



Σχήμα 2.42 Μεταβολή του d_2



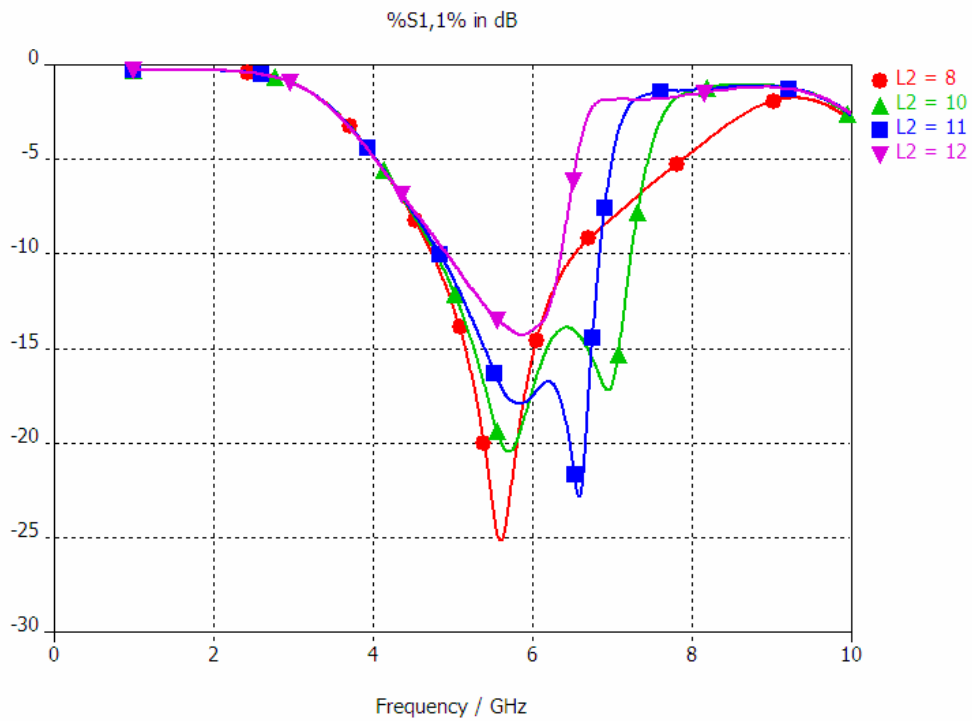
Σχήμα 2.43 Μεταβολή του ϵ_r



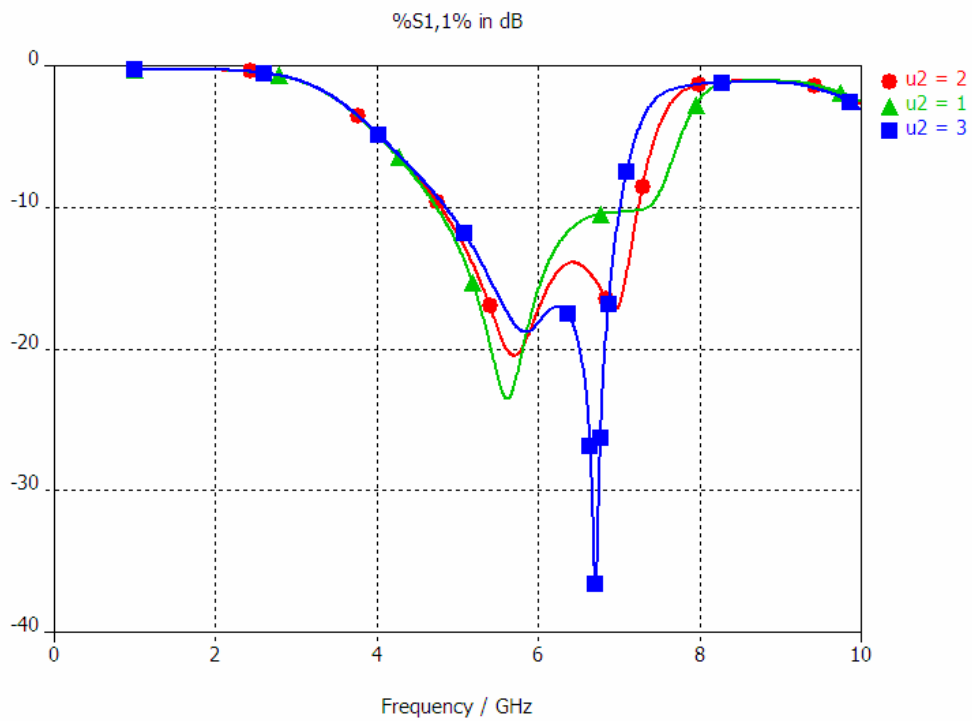
Σχήμα 2.44 Μεταβολή του h

Παράρτημα 2B

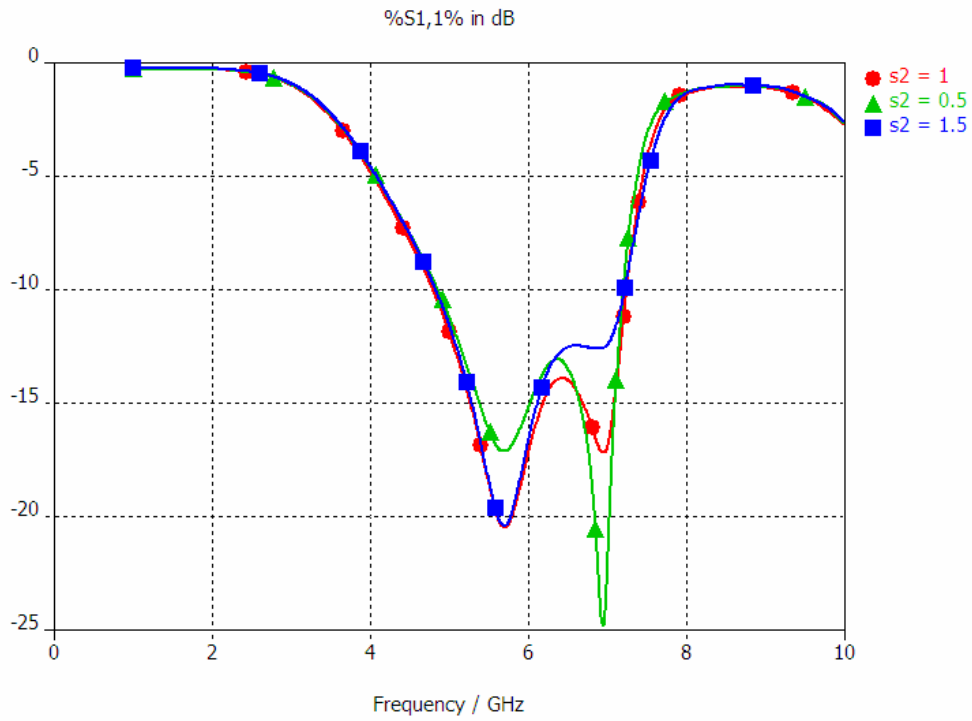
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ CPW-FED RECTANGULAR WITH PARASITIC SLOTS



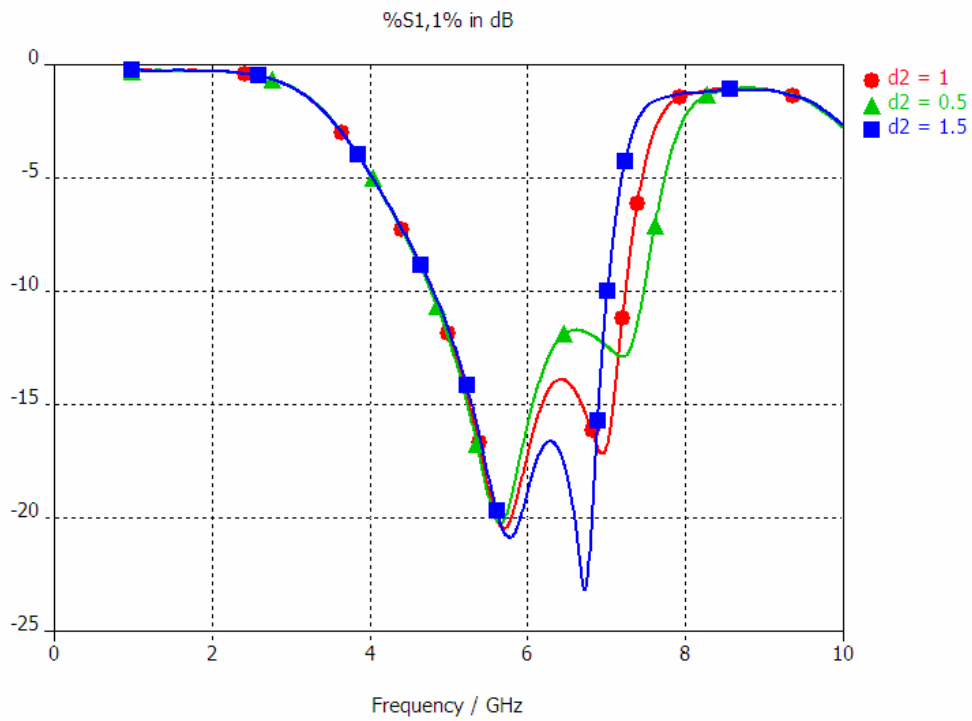
Σχήμα 2.45 Μεταβολή του L2



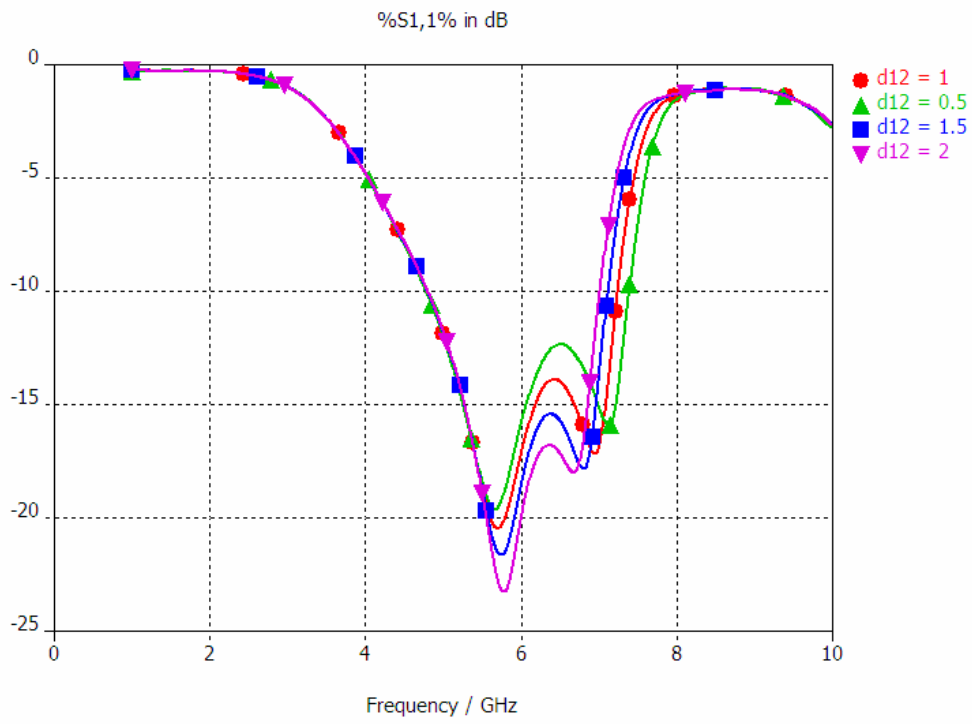
Σχήμα 2.46 Μεταβολή του u2



Σχήμα 2.47 Μεταβολή του s_2



Σχήμα 2.48 Μεταβολή του d_2



Σχήμα 2.49 Μεταβολή του d12

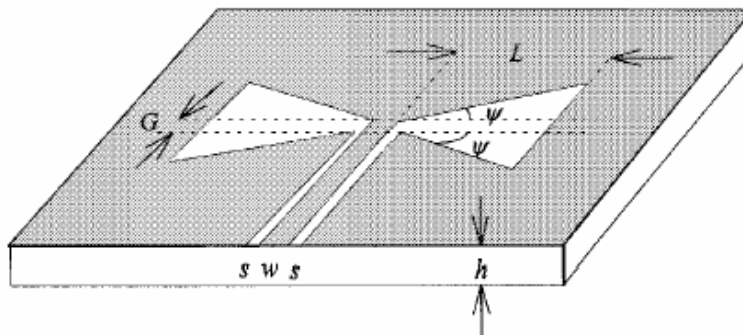
Περιεχόμενα:

- 3.1 Εισαγωγή
- 3.2 Συμμετρικό μοντέλο bow-tie
- 3.3 Ασύμμετρο μοντέλο bow-tie
- 3.4 Η σημασία του transition
- 3.5 Ασύμμετρο μοντέλο bow-tie με παρασιτικά
- 3.6 Βιβλιογραφία

Παράρτημα 3 : Παραμετρικά Διαγράμματα

3.1 Εισαγωγή

Η bow-tie γεωμετρία στις μικροταινιακές κεραίες είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Έχει εφαρμοστεί σε κεραίες μικροταινωτού καλύμματος ([1], [2] και [3]) όπου σημειώνεται το αυξημένο εύρος ζώνης λειτουργίας που επιτυγχάνουν. Η ίδια γεωμετρία μπορεί προφανώς να χρησιμοποιηθεί και σε σχισμοκεραίες επιφέροντας ανάλογο αποτέλεσμα. Τέτοιες δημοσιεύσεις έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια: Το 1998 στο [4] ανάλογα με την γωνία ψ (Σχήμα 3.1) αναφέρεται ότι επιτυγχάνεται bandwidth ratio τουλάχιστον 36% ενώ η κεντρική συχνότητα είναι στα 2.4 GHz. Το 1999 αντίστοιχο bandwidth ratio καταγράφεται για τις συχνότητες 12-16 GHz [5], ενώ στο [6] η σχεδίαση επικεντρώνεται στα 10 GHz και γίνεται χρήση κάποιων εμπειρικών σχέσεων για να καθοριστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της bow-tie.



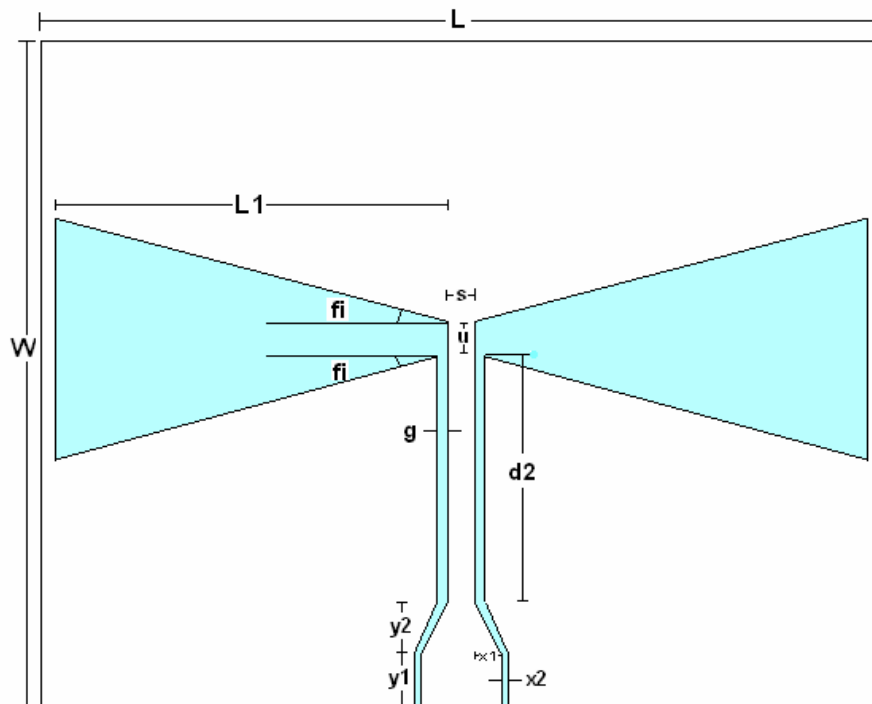
Σχήμα 3.1 Bow-tie slot antenna

Στη δική μας σχεδίαση θα μελετήσουμε την σχισμοκεραία bow-tie (κεραία παπιγιόν), επεκτείνοντας το μοντέλο της απλής ορθογωνικής σχισμοκεραίας του Κεφαλαίου 2, με στόχο την διεύρυνση του εύρους ζώνης.

3.2 Συμμετρικό μοντέλο bow-tie

Η συμμετρία του μοντέλου, πέρα από αυτήν ως προς τον άξονα- y , αναφέρεται στον άξονα- x για τη σχισμή bow-tie. Η γωνία f_i είναι ίδια πάνω και κάτω όπως επίσης και το μήκος L_1 (Σχήμα 3.2).

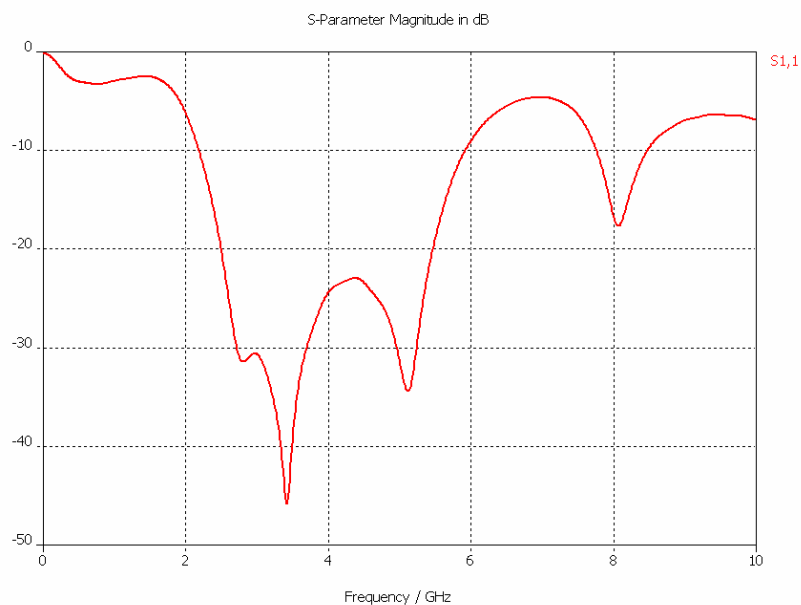
Θα χρησιμοποιήσουμε το transition που χρησιμοποιήσαμε και στο Κεφάλαιο 2, το οποίο μας δίνει μεγαλύτερη ελευθερία στη σχεδίαση με καθορισμένη την χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου στα 50 Ohms.



Σχήμα 3.2 Μοντέλο συμμετρικής bow-tie

Ύστερα από παραμετρική μελέτη καταλήγουμε στο παρακάτω ιδιαίτερα ευρυζωνικό μοντέλο που λειτουργεί στην περιοχή 2-6 GHz με ικανοποιητικό S_{11} ($S_{11} < 10$ db). Επίσης είναι πολύ σημαντικό πως στο μεγαλύτερο μέρος του εύρους ζώνης το S_{11} βρίσκεται κάτω από 20 db, που εγγυάται την υψηλή απόδοση της διάταξης.

Παράμετρος	Τιμή
L	47
L1	22
W	38
d2	14
er	3.27
g	0.6
h	3.175
s	1.5
fi	0.264799
x1	3.125
x2	1.5
y1	3
y2	3

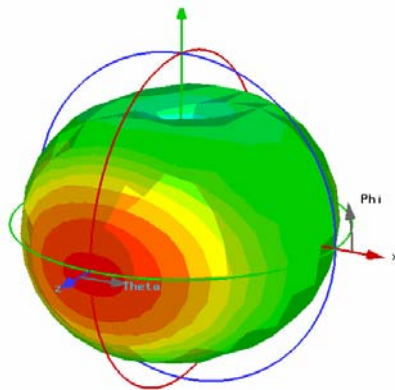


Σχήμα 3.3 S11 συμμετρικής bow-tie

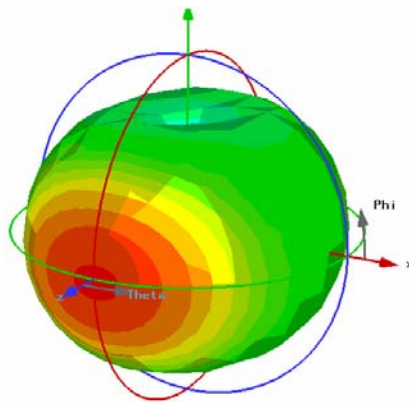
Στο Παράρτημα στο τέλος του κεφαλαίου δίνονται τα παραμετρικά διαγράμματα τόσο αυτού όσο και των υπολοίπων μοντέλων bow-tie.

Ακολουθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας, όπου παρατηρούμε ότι σε όλες τις συχνότητες έχουμε ένα κύριο λοβό μετωπικά της κεραίας. Στις χαμηλότερες συχνότητες το κέρδος είναι μικρό (3-4 db) αλλά ο λοβός είναι διευρυμένος στο

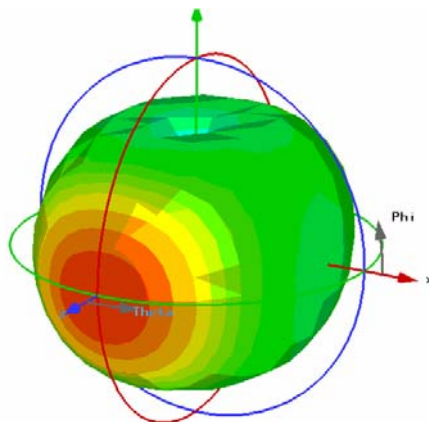
επίπεδο χ - z (γωνία 3-dB 80°). Όσο μεγαλώνει η συχνότητα η κεραία γίνεται πιο κατευθυντική, με κέρδος στα 5 dB και γωνία μισής ισχύος 60° . Επίσης είναι σημαντικό πως ο αξονικός λόγος παραμένει χαμηλός για όλο το εύρος ζώνης (κάτω από -15dB):



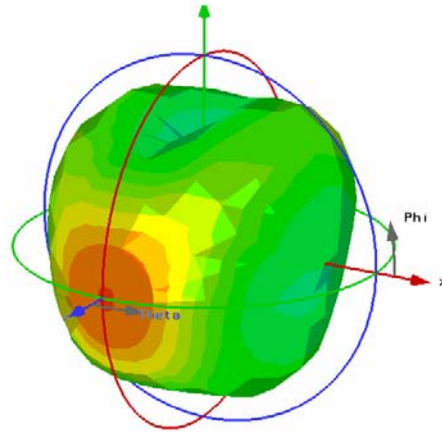
Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ακτινοβολίας συμμετρικής bow-tie στα 2.5 GHz



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα ακτινοβολίας συμμετρικής bow-tie στα 3 GHz



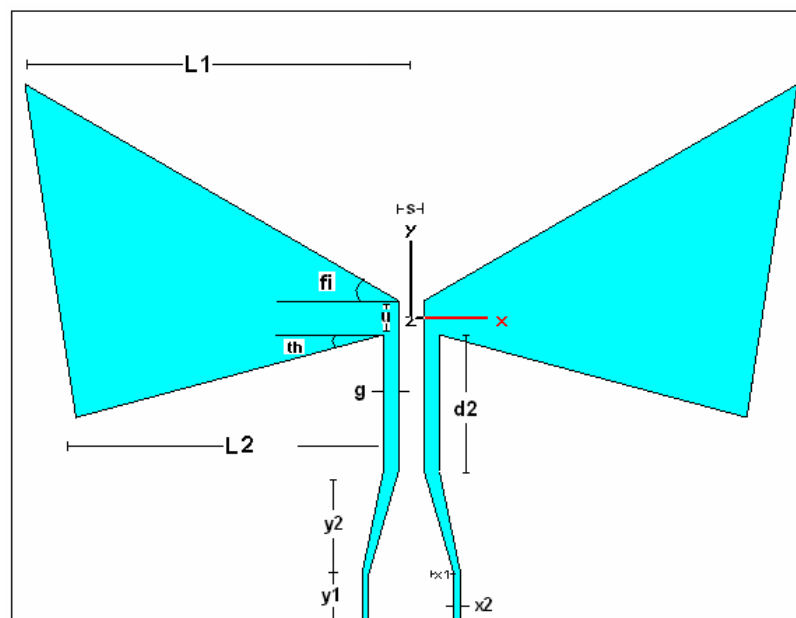
Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ακτινοβολίας συμμετρικής bow-tie στα 4 GHz



Σχήμα 3.7 Διάγραμμα ακτινοβολίας συμμετρικής bow-tie στα 5 GHz

3.3 Ασύμμετρο μοντέλο bow-tie

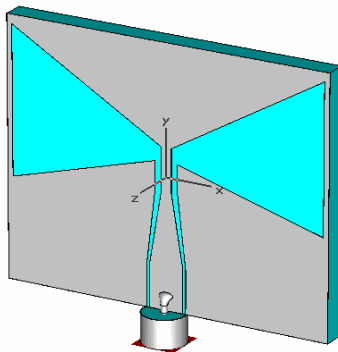
Με βάση το συμμετρικό μοντέλο που μελετήσαμε παραπάνω επεκτείνουμε τη σχεδίαση σε μη συμμετρικό μοντέλο. Δηλαδή μπορούμε να μεταβάλουμε τις γωνίες θ_1 , θ_2 ανεξάρτητα καθώς και τα L_1 , L_2 :



Σχήμα 3.8 Μοντέλο ασύμμετρης bow-tie

Σε αυτό το μοντέλο προσομοιώσαμε στην είσοδο της κεραίας και το SMA από το οποίο θα τροφοδοτείται για μεγαλύτερη ακρίβεια. Στις μέχρι τώρα προσομοιώσεις θεωρούσαμε ότι η κεραία τροφοδοτείται από ένα waveguide port, ένα ορθογωνικό πλαίσιο από το οποίο εισέρχεται ισχύς. Αυτό το κάναμε γιατί πολλές από τις κεραίες που σχεδιάσαμε είχαν $Z_{in} \neq 50 \text{ Ohms}$ (ενώ το SMA έχει $Z_{in} = 50$), ενώ επιπλέον το SMA αυξάνει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο λόγω της κυλινδρικής του μορφής. Πάντως για απλές γεωμετρίες όπως αυτή της ορθογωνικής ελέγξαμε τις διαφορές, με και χωρίς SMA, και τα σφάλματα δεν ήταν σημαντικά.

Η βέλτιστη διάταξη που σχεδιάσαμε δίνεται παρακάτω:

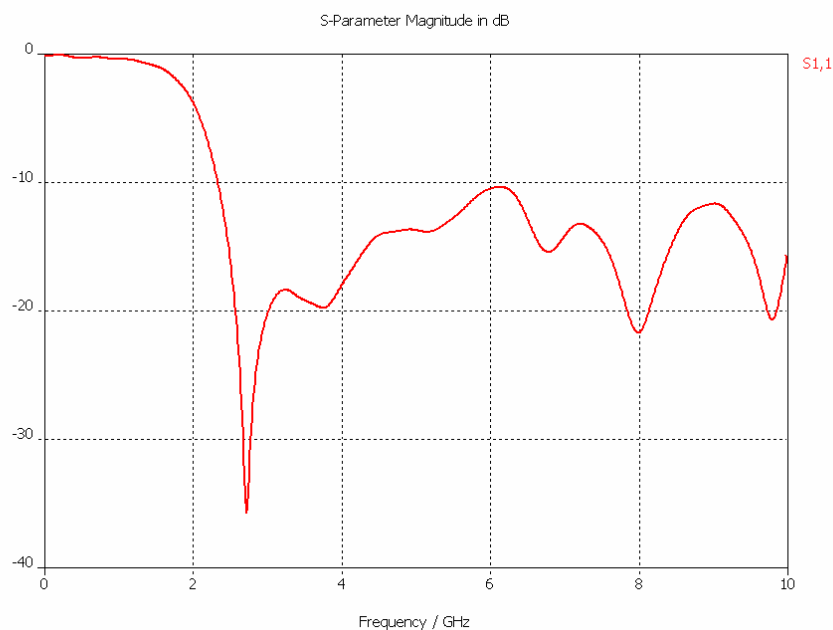


<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
L	47
L1	22
L2	22
W	36
d2	4
er	3.27
fi	0.5235987755983
g	0.9
h	3.125
s	1.5
th	0.26179938779915
u	2
x1	1.7

x2	0.4
y1	6
y2	10

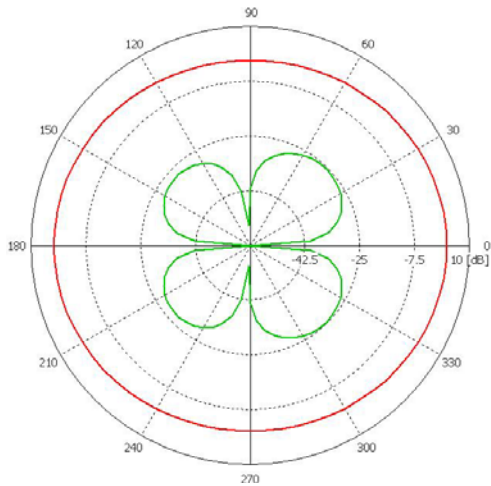
Σχήμα 3.9 Διάταξη/τιμές για ασύμμετρη bow-tie

Χαρακτηριστικό της κεραίας είναι τα μεγάλα ρεύματα που εμφανίζονται στα άκρα της, στη μικρή απόσταση μεταξύ του μετάλλου και του ανοίγματος. Επίσης πρέπει να σημειώσουμε πως η κεραία δεν λειτούργησε ικανοποιητικά με το αρχικό transition που έχουμε σχεδιάσει αλλά με διαδοχικές δοκιμές βρήκαμε κατάλληλες τιμές για τα y_1 , y_2 . Το εύρος ζώνης της κεραίας, σύμφωνα με το κριτήριο των -10 dB, είναι 2.2-10 GHz, που αντιστοιχεί σε bandwidth ratio 77% και επομένως πρόκειται για ιδιαίτερα ευρυζωνική κεραία (Ultra wide band).

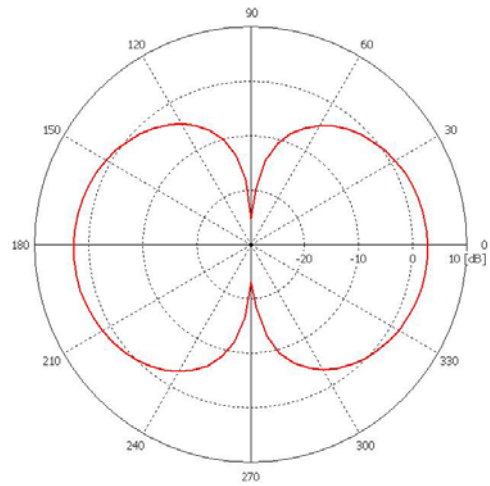


Σχήμα 3.10 S11 για ασύμμετρη bow-tie

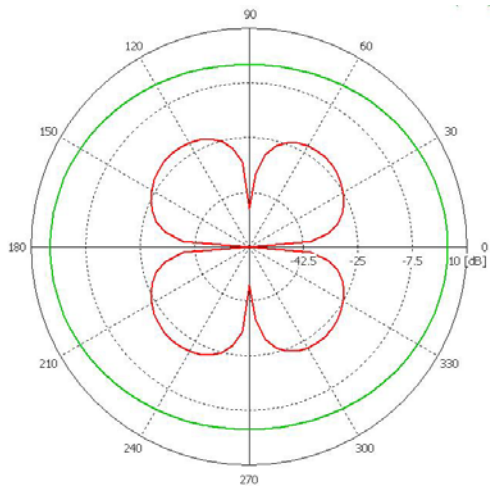
Τα διαγράμματα ακτινοβολίας δίνονται παρακάτω:



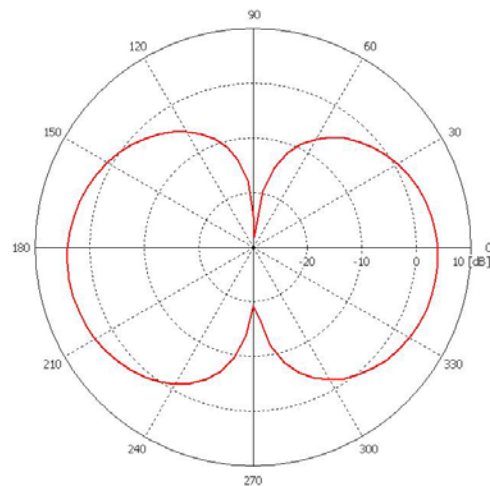
Σχήμα 3.11 $f=2.5$ GHz επίπεδο $x-z$



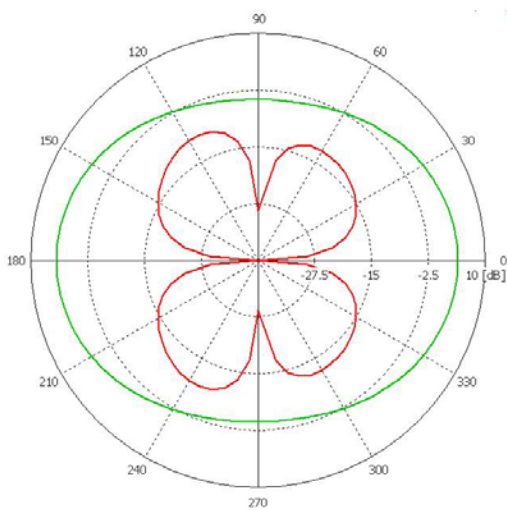
Σχήμα 3.12 $f=2.5$ GHz επίπεδο $y-z$



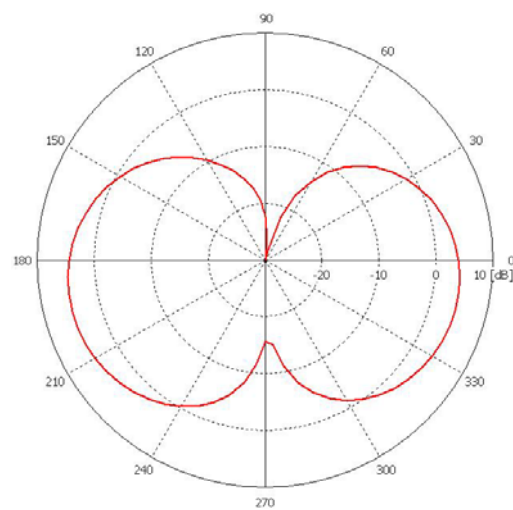
Σχήμα 3.13 $f=3.5$ GHz επίπεδο $x-z$



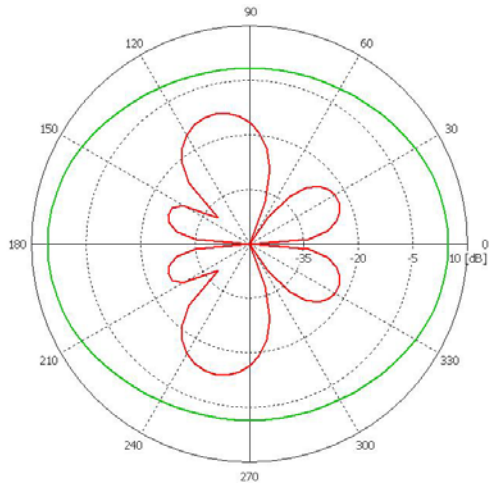
Σχήμα 3.14 $f=3.5$ GHz επίπεδο $y-z$



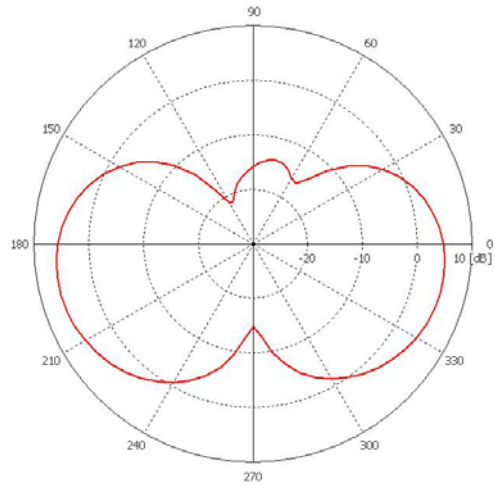
Σχήμα 3.15 $f=4.5$ GHz επίπεδο $x-z$



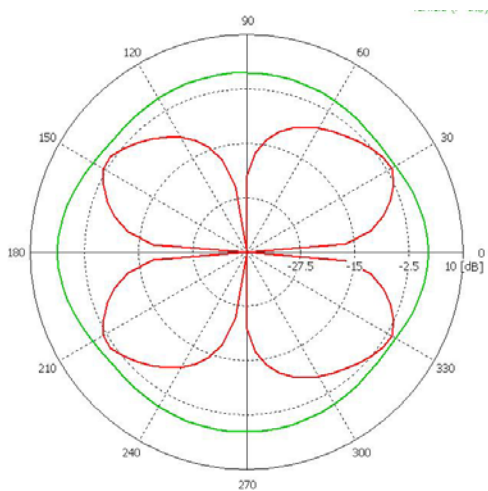
Σχήμα 3.16 $f=4.5$ GHz επίπεδο $y-z$



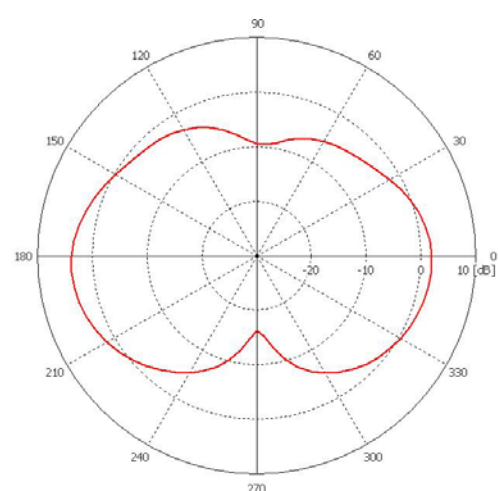
Σχήμα 3.17 $f=5.5$ GHz επίπεδο $x-z$



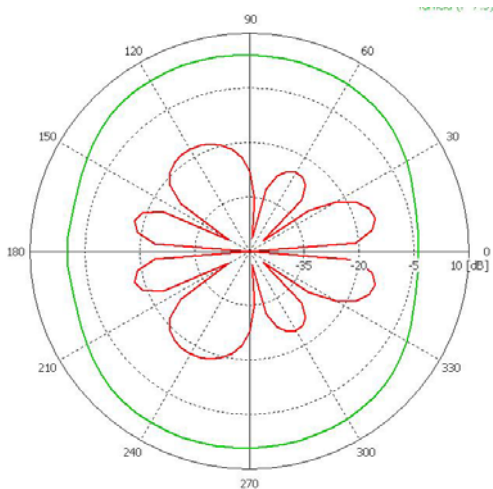
Σχήμα 3.18 $f=5.5$ GHz επίπεδο $y-z$



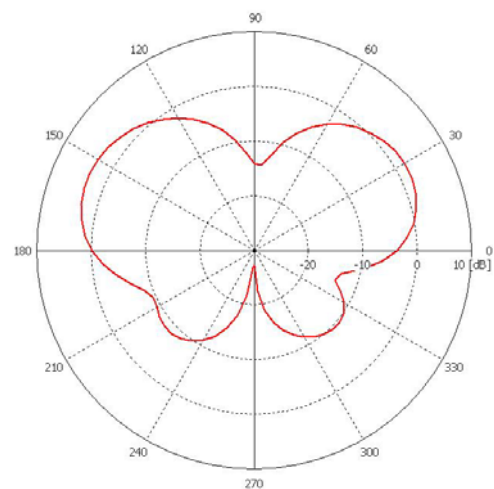
Σχήμα 3.19 $f=6.5$ GHz επίπεδο $x-z$



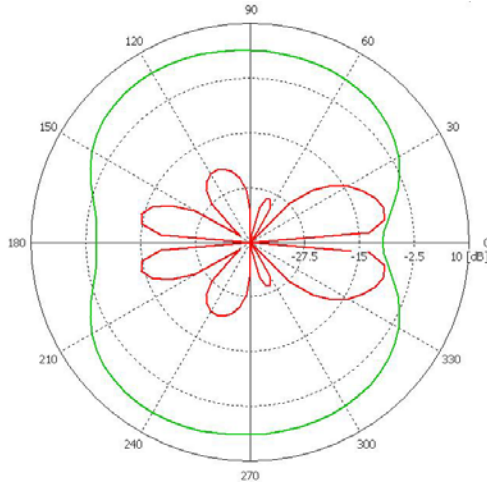
Σχήμα 3.20 $f=6.5$ GHz επίπεδο $y-z$



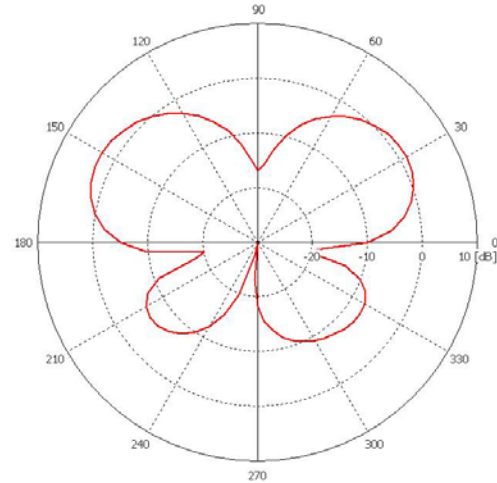
Σχήμα 3.21 $f=7.5$ GHz επίπεδο $x-z$



Σχήμα 3.22 $f=7.5$ GHz επίπεδο $y-z$

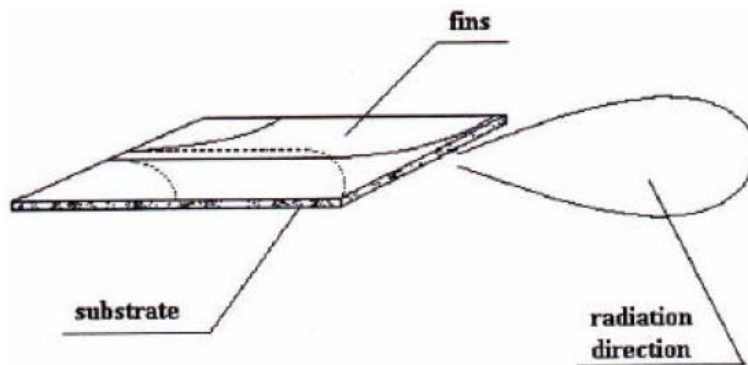


Σχήμα 3.23 $f=8$ GHz επίπεδο $x-z$



Σχήμα 3.24 $f=8$ GHz επίπεδο $y-z$

Στα διαγράμματα ακτινοβολίας βλέπουμε σημαντικές διαφοροποιήσεις στις διάφορες συχνότητες. Στις χαμηλότερες συχνότητες παρατηρούμε τον συνηθισμένο τρόπο ακτινοβολίας με έναν μετωπικό λοβό και προς τις δύο κατευθύνσεις. Στα 6 GHz αρχίζει η ακτινοβολία πλευρικά της κεραιάς, στο επίπεδο $x-y$, όπου παρατηρούμε όμως χαμηλό αξονικό λόγο. Στις υψηλότερες συχνότητες αυτός ο τρόπος ακτινοβολίας γίνεται πιο έντονος, με μειωμένο ωστόσο αξονικό λόγο. Η ακτινοβολία της σχισμοκεραιάς προς αυτήν την κατεύθυνση, στην προέκταση δηλαδή των σχισμών, θυμίζει τις tapered slot antennas που παρουσιάζουν end-fire radiation:



Παρά το ιδιαίτερα αυξημένο εύρος ζώνης, ειδικά στην περιοχή συχνοτήτων γύρω από τα 6 GHz βλέπουμε πως είμαστε οριακά κάτω από τα 10 db. Πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι κατά την κατασκευή της κεραίας κάθε ανακρίβεια στη χάραξη ή αστοχία υλικού ενδέχεται να αλλάξει την παραπάνω θεωρητική απόκριση. Έτσι είναι θέμα καλής σχεδίασης να είμαστε αρκετά κάτω από τα αποδεκτά όρια (των 10db στη περίπτωση μας) έτσι ώστε να υπάρχει κάποιο περιθώριο σφάλματος μεταξύ θεωρητικού μοντέλου και πραγματικότητας.

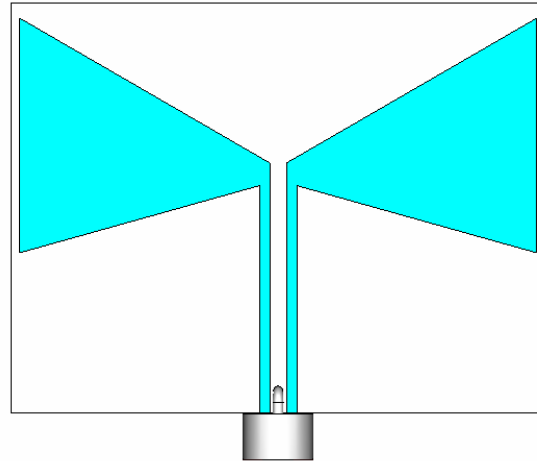
Για αυτό το λόγο στην παράγραφο 3.5 επιχειρούμε με χρήση παρασιτικών στοιχείων να βαθύνουμε το συντονισμό γύρω από τα 6 GHz, σε αντίθεση με την ορθογωνική, όπου τα χρησιμοποιήσαμε για να αυξήσουμε το εύρος ζώνης.

3.4 Η σημασία του transition

Σε όλα τα παραπάνω μοντέλα κάναμε χρήση μετασχηματισμού στην ομοεπίπεδη γραμμή, ώστε να έχουμε χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου 50 Ohms και μεγαλύτερη σχεδιαστική ελευθερία. Πρέπει να σημειώσουμε πως ακόμα και όταν χρησιμοποιείται coplanar γραμμή με $Z_{in} \neq 50$, μπορούμε να την τροφοδοτήσουμε με SMA των 50 Ohms. Αυτό συμβαίνει γιατί ολόκληρη η διάταξη, και οι σχισμές δηλαδή μαζί με την ομοεπίπεδη γραμμή καθορίζουν την αντίσταση εισόδου, και επομένως είναι σύνηθες σε κάποιες περιοχές συχνοτήτων να συντονίζει η κεραία· σε αυτές τις περιοχές η χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου θα είναι 50 Ohms λόγω του SMA. Παρά όμως τη παρατηρούμενη σύζευξη ισχύος, αυτή η απότομη μετάβαση από τα 50 Ohms του SMA στην χαρακτηριστική αντίσταση της ομοεπίπεδης γραμμής σίγουρα δυσχεραίνει την απόδοση της σχισμοκεραίας.

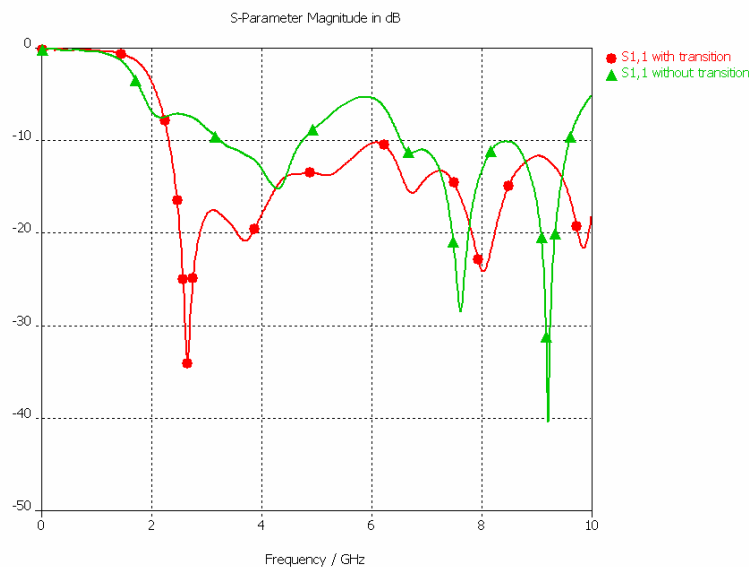
Αυτό αποδεικνύουμε σε αυτή την παράγραφο χρησιμοποιώντας το ασύμμετρο μοντέλο της bow-tie σχισμοκεραίας. Αγνοώντας το transition και αντικαθιστώντας το με ευθύγραμμο τμήμα ομοεπίπεδης γραμμής προκύπτει το

μοντέλο του Σχήματος 3.25. Η χαρακτηριστική αντίσταση της ομοεπίπεδης γραμμής είναι 70 Ohms (του SMA πάντα 50).



Σχήμα 3.25 Μοντέλο bow-tie χωρίς transition

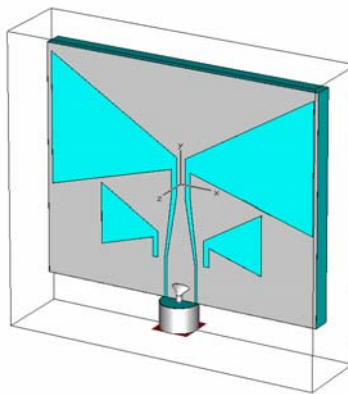
Στο διάγραμμα 3.26 βλέπουμε πως η παραπάνω σχισμοκεραία συντονίζεται στα 7-9 GHz σε αντίθεση με το αντίστοιχο μοντέλο με το transition που η ίδια κεραία συντονίζει από 2.2 - 10 GHz. Η επίπτωση στο εύρος ζώνης είναι καθοριστική και οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως χωρίς το transition τα μοντέλα που σχεδιάσαμε δεν θα είχαν την ίδια ευρυζωνική συμπεριφορά.



Σχήμα 3.26 Συγκριτικό διάγραμμα S11 με/χωρίς transition για bow-tie

3.5 Ασύμμετρο μοντέλο bow-tie με παρασιτικά

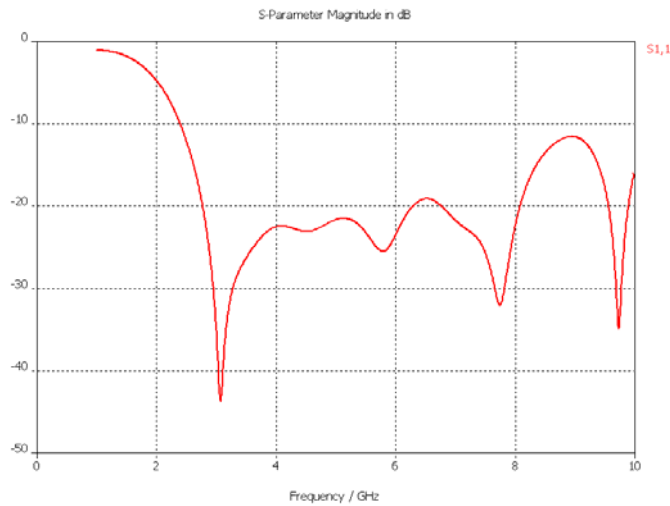
Μελετάμε τις επιδράσεις στο μοντέλο της παραγράφου 3.3 μετά την προσθήκη παρασιτικών. Το bandwidth ratio αυτού του μοντέλου ήταν ικανοποιητικό αλλά επιδιώκουμε μεγαλύτερο βάθος συντονισμού για την περιοχή των 6 GHz για τους λόγους που εξηγήσαμε παραπάνω. Δοκιμάσαμε διάφορες θέσεις, αποστάσεις και μεγέθη για τα παρασιτικά στοιχεία και καταλήξαμε στη παρακάτω διάταξη που ικανοποιεί το στόχο που θέσαμε:



<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
L	47
L1	22
L2	10
W	36
d1	4
d2	3
d20	-12
dy	-16
er	3.27
fi	0.5235987755983
fi2	0.5235987755983
g	0.9
g2	0.9
h	3.125
s	1.5
s2	8
th	0.26179938779915

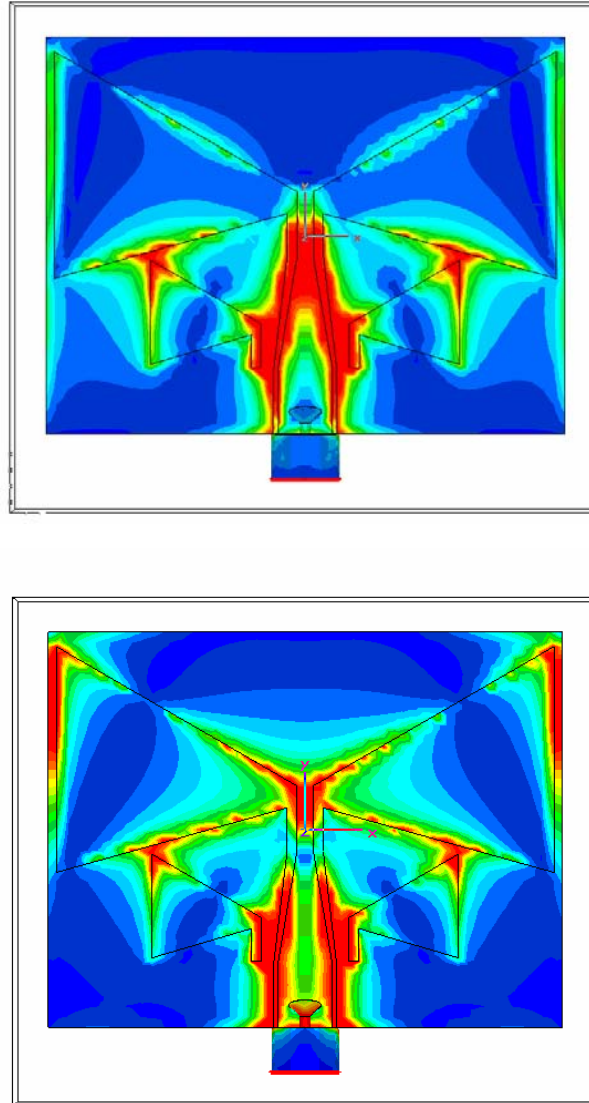
th2	0.26179938779915
u	2
u2	1
x1	1.7
x2	0.4
y1	6
y2	10

Σχήμα 3.27 Διάταξη/τιμές για ασύμμετρη bow-tie με παρασιτικά



Σχήμα 3.28 S11 για ασύμμετρη bow-tie με παρασιτικά

Παρατηρούμε πως με τα παρασιτικά στοιχεία πετυχαίνουμε συντελεστή ανάκλασης κάτω των -20 db για την περιοχή 2.2 έως 8 GHz ενώ το συνολικό εύρος είναι από 2.2 έως 10. Τα επιφανειακά ρεύματα πάνω στη σχισμοκεραία δείχνουν τον τρόπο που τροφοδοτούνται τα παρασιτικά στοιχεία ενώ επίσης φαίνεται η μεγάλη συγκέντρωση ρεύματος στα άκρα των σχισμών:



Σχήμα 3.29 Συγκεντρώσεις επιφανειακών ρευμάτων στα 4.5 GHz

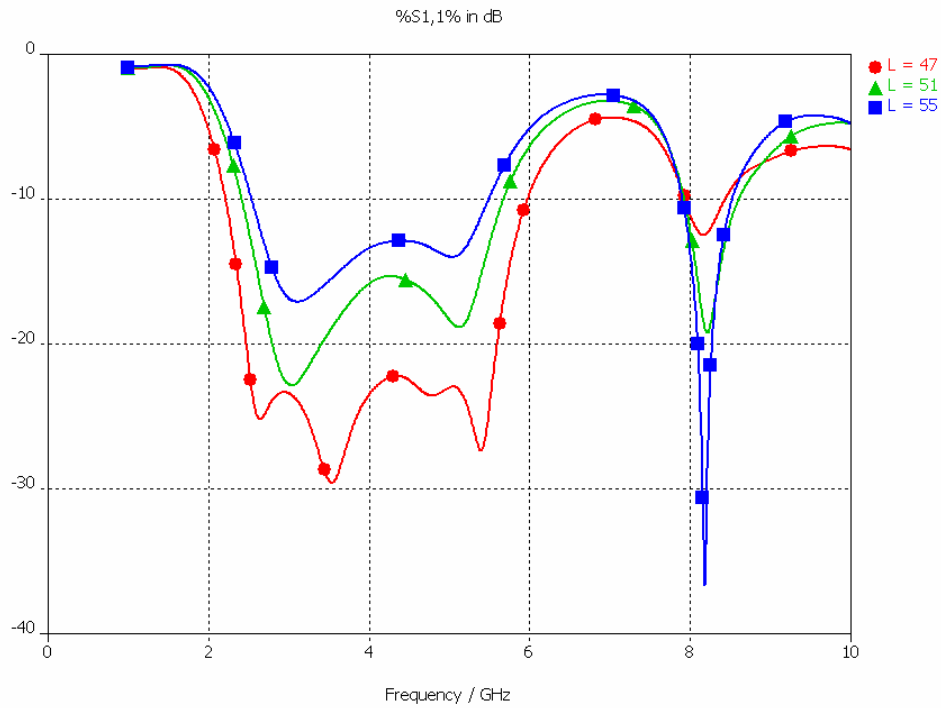
3.6 Βιβλιογραφία

1. Sener Uysal, Mook-Seng Leong and Chee Hong Ng, “bowtie Patch Antennas and Simple Arrays for Wireless Indoor Communications”, IEEE transactions on microwave theory and techniques, Vol. 47, No. 6, June 1999

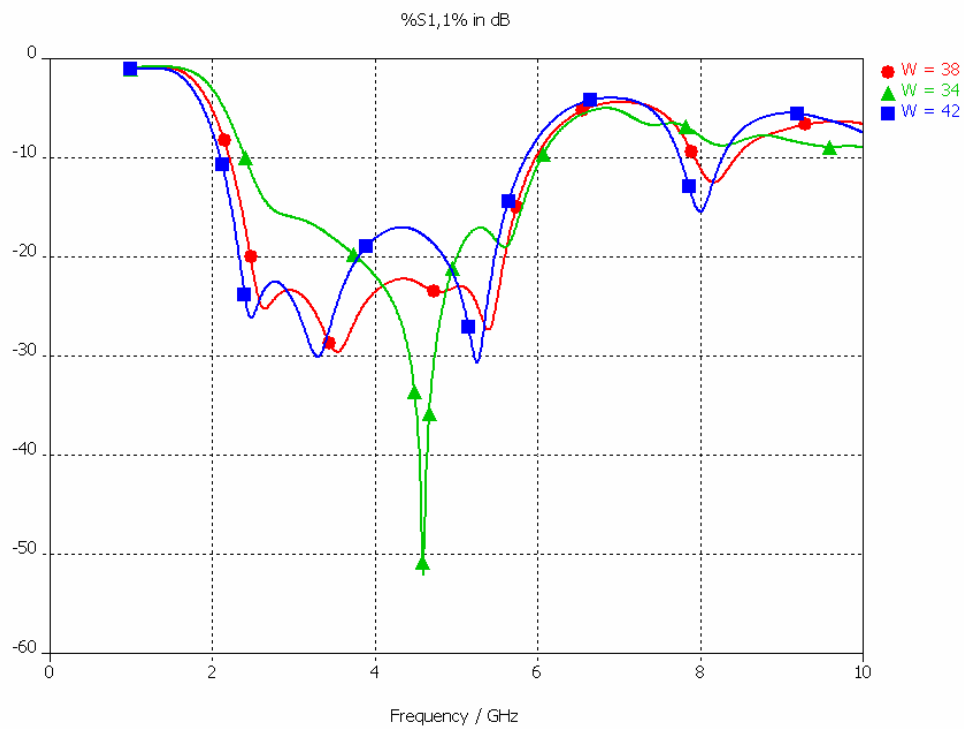
-
2. Paul L. Chin, Atef Z. Elsherbani and Charles E. Smith, "Characteristics of coplanar bow-tie patch antennas", 2002
 3. Yu-De Lin and Syh-Nan Tsai, "Coplanar waveguide fed Uniplanar bow-tie Antenna", IEE transactions on antennas and propagation, Vol 45, No. 2, February 1997
 4. Jen-Fen Huang and Chih-Wen Kuo, "CPW-fed bow-tie slot antenna", microwave and optical technology letters / Vol. 19, No. 5, December 5 1998
 5. E. A. Soliman, S. Brebels, P. Delmotte, Vandenbosch and Benye, "Bow-tie slot antenna fed by CPW", Electronics letters, April 1999, Vol.35 No. 7
 6. Guiping Zheng, Atef Elsherbeni and Charles E. Smith, "A coplanar waveguide bow-tie aperture antenna", 2002

Παράρτημα

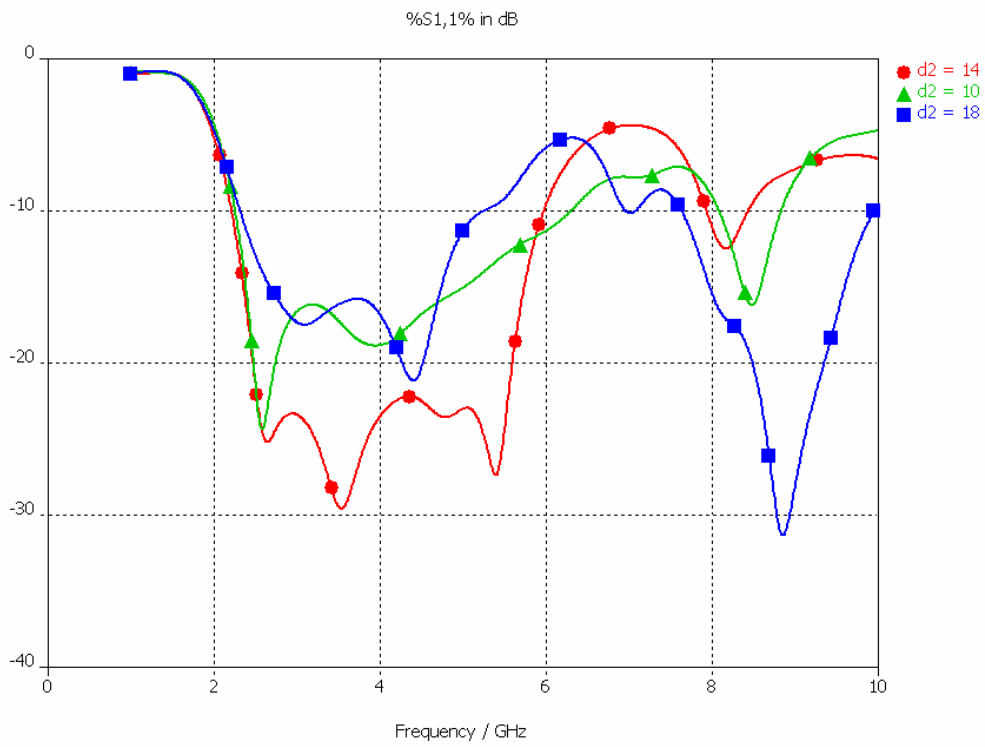
Διαγράμματα Symmetric bow-tie



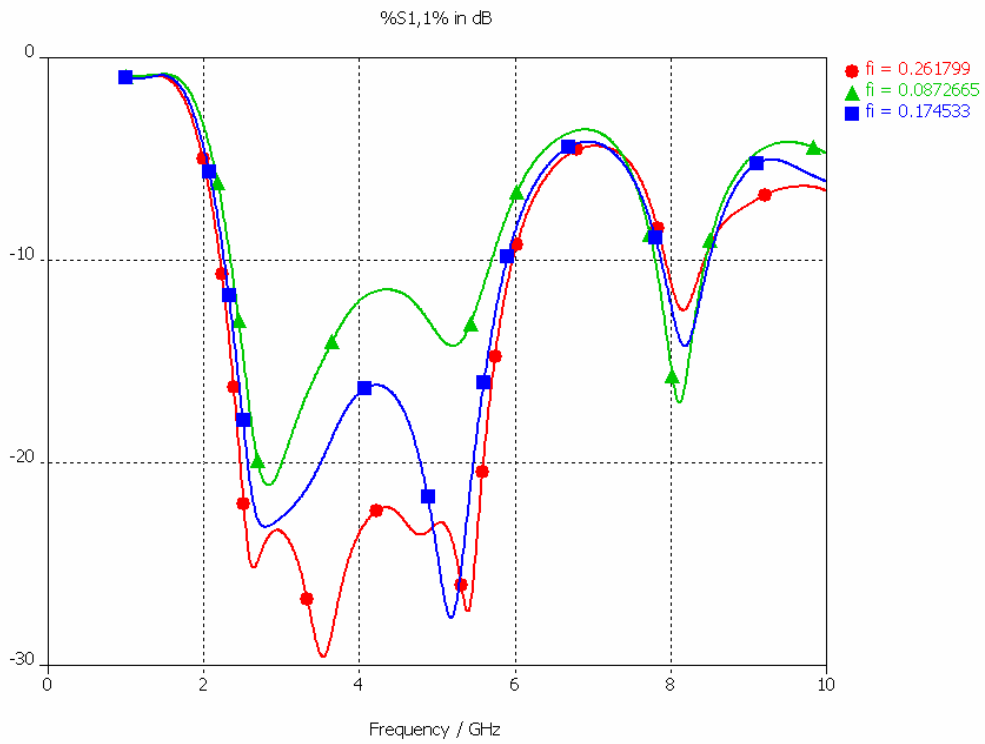
Σχήμα 3.30 Μεταβολή του L



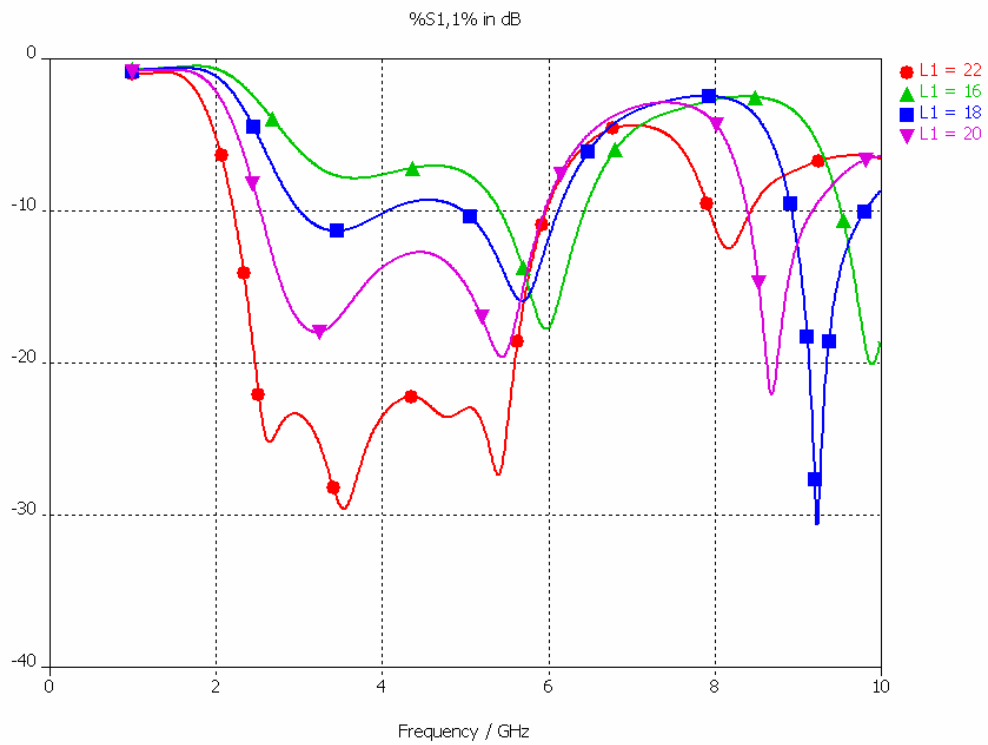
Σχήμα 3.31 Μεταβολή του W



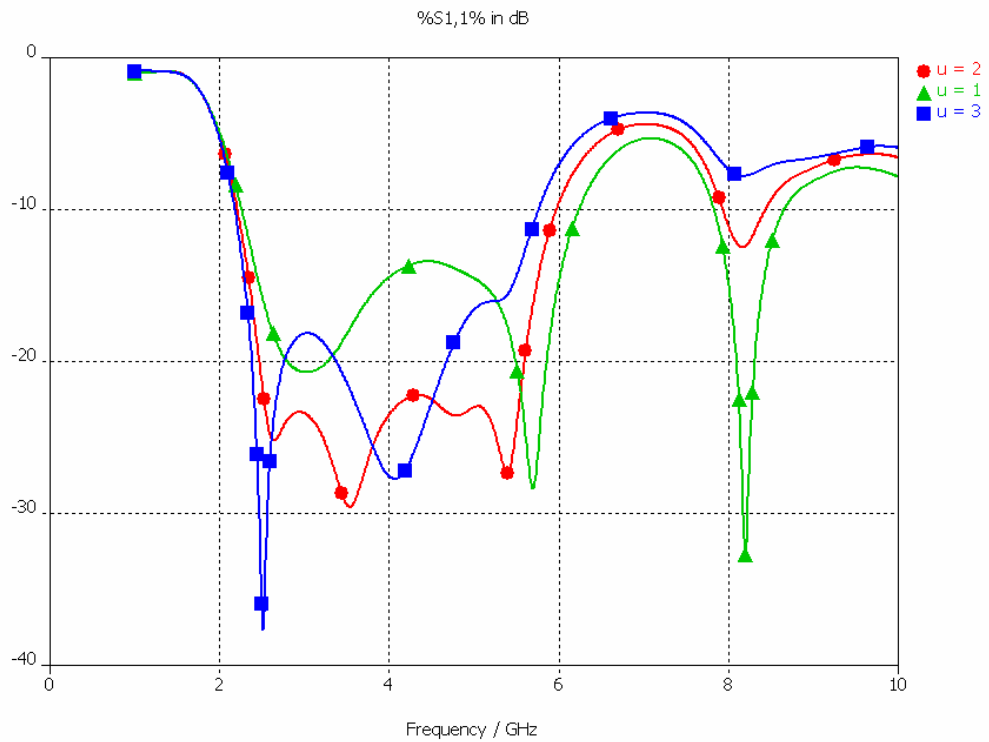
Σχήμα 3.32 Μεταβολή του d2



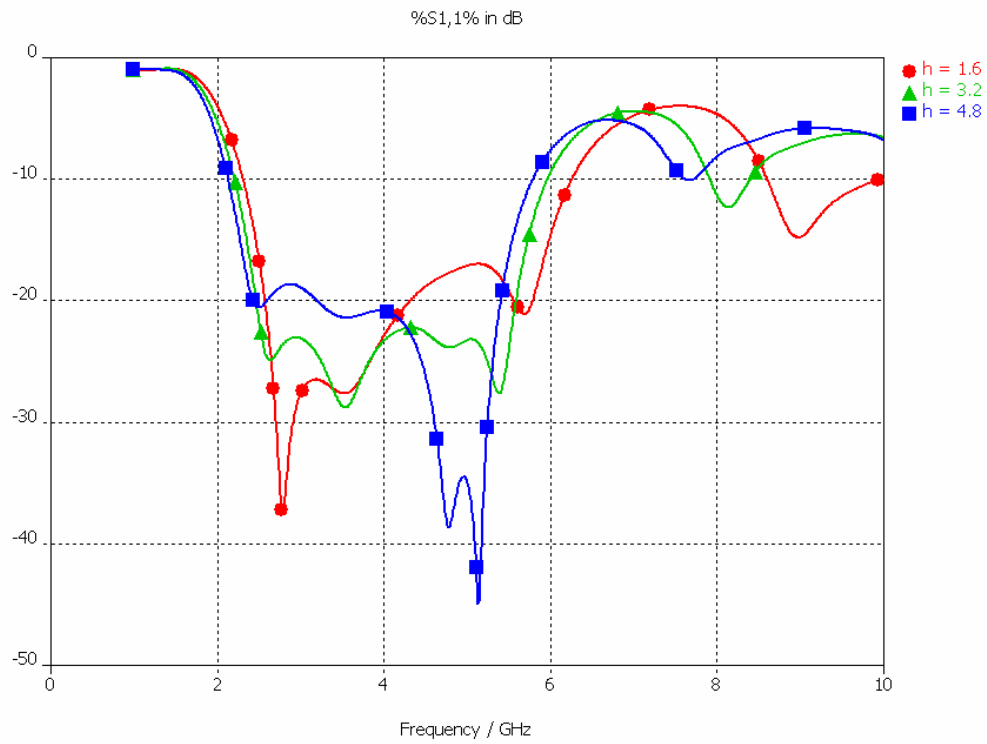
Σχήμα 3.33 Μεταβολή του fi



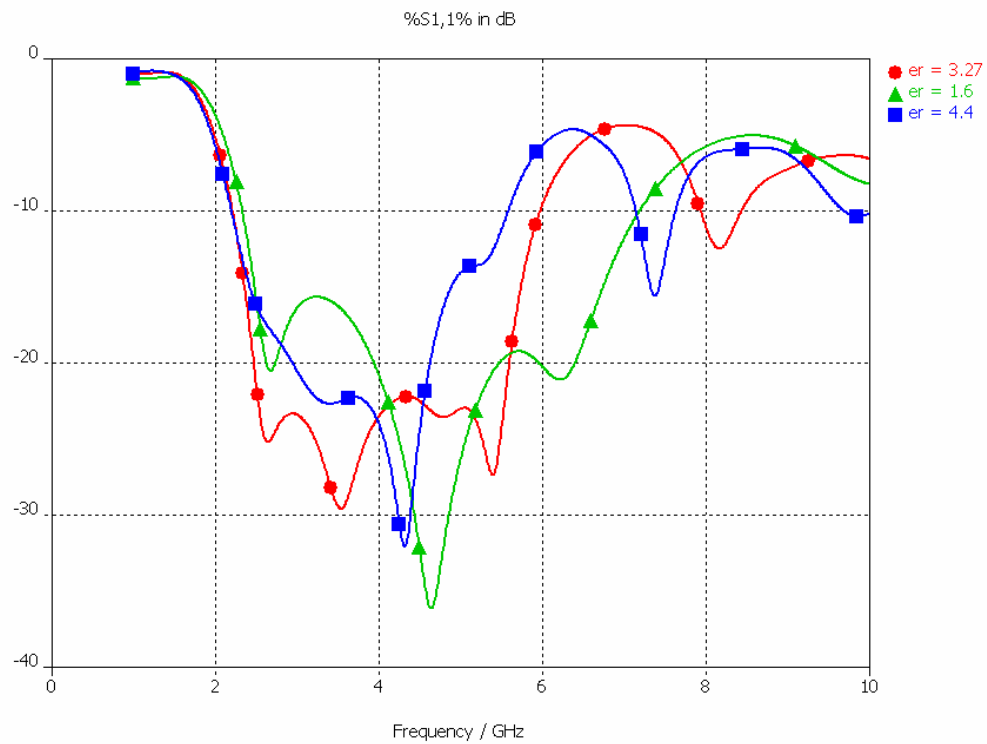
Σχήμα 3.34 Μεταβολή του L_1



Σχήμα 3.35 Μεταβολή του u

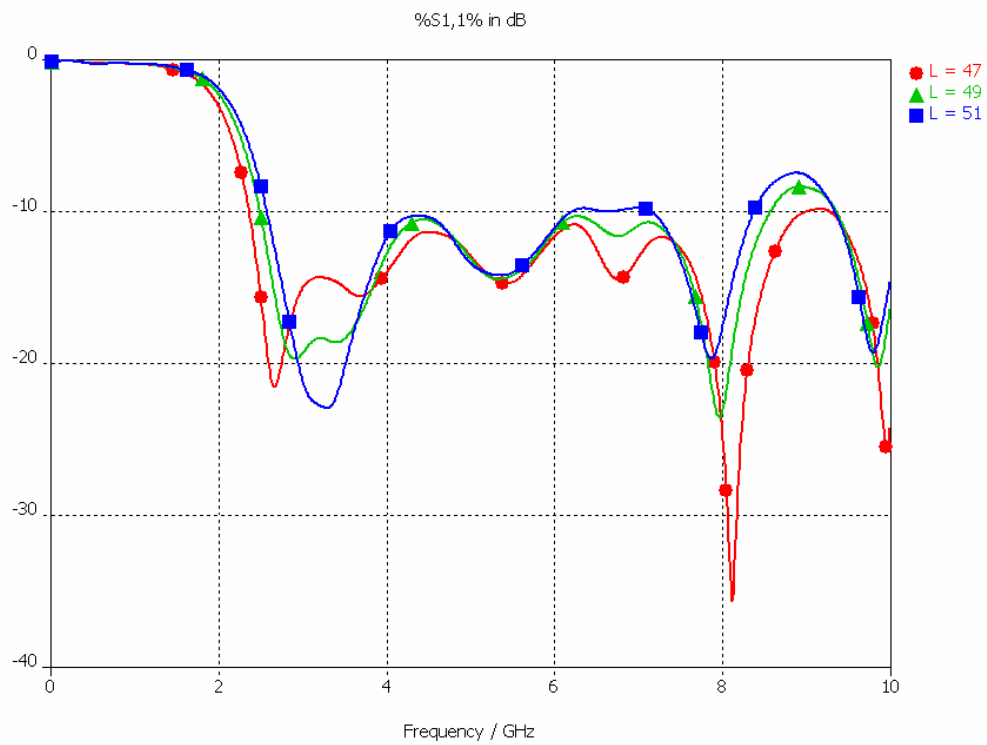


Σχήμα 3.36 Μεταβολή του h

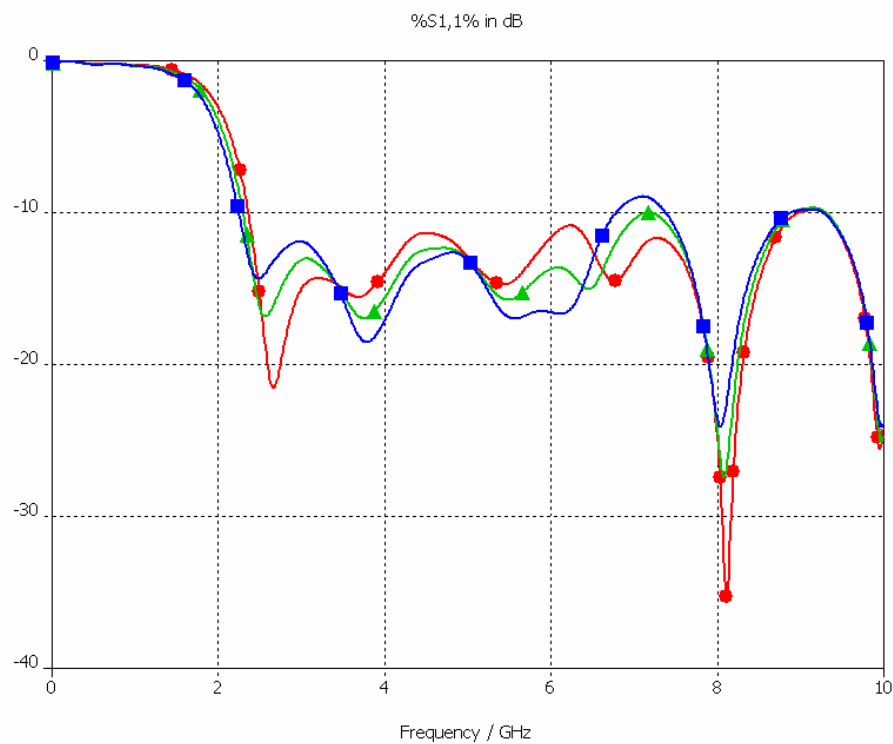


Σχήμα 3.37 Μεταβολή του ϵ_r

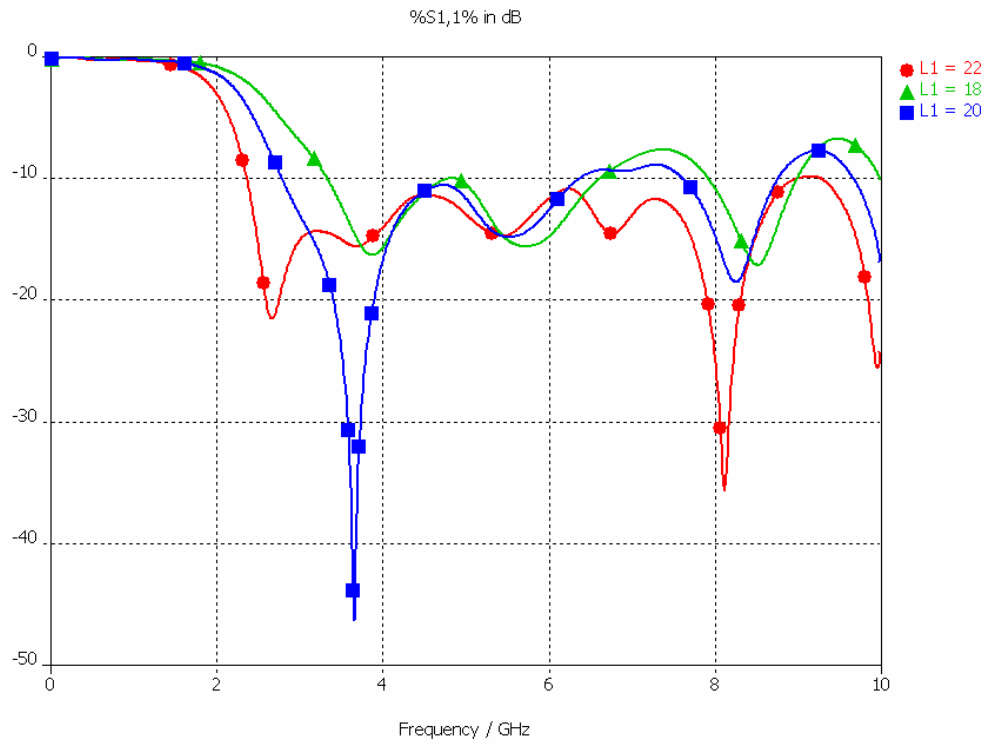
Διαγράμματα Asymmetric bow-tie



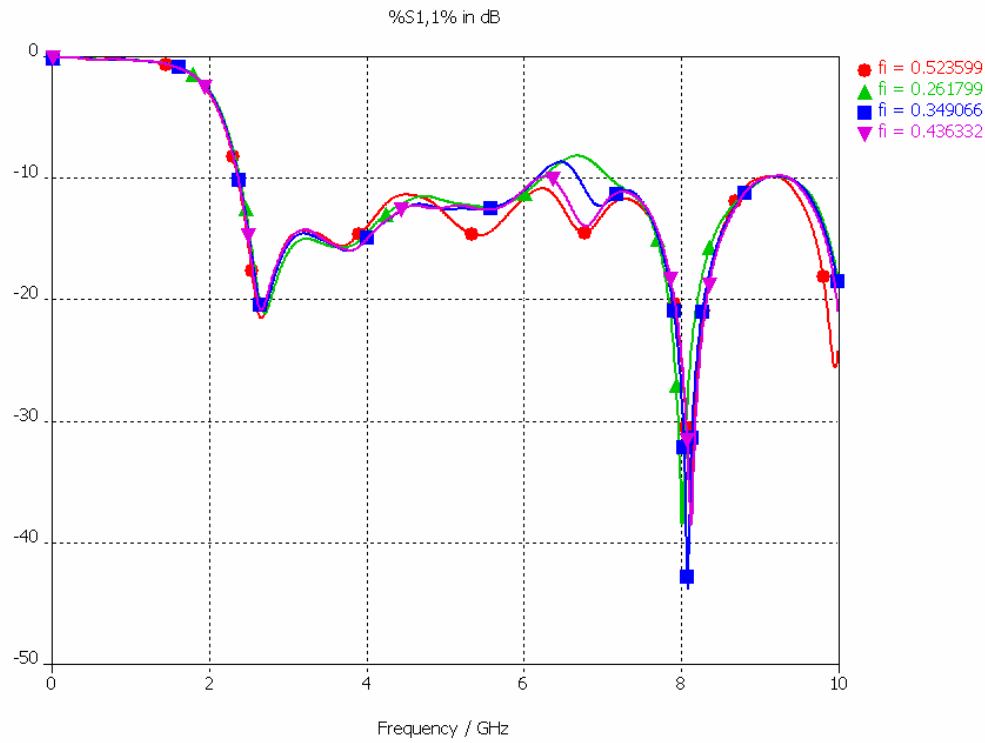
Σχήμα 3.38 Μεταβολή του L



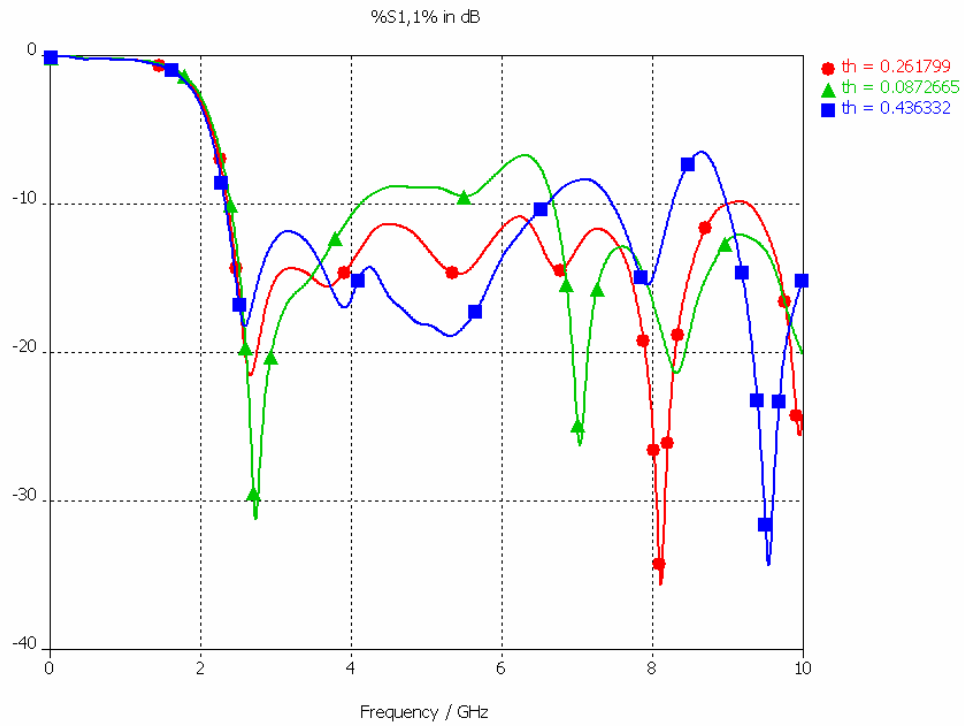
Σχήμα 3.39 Μεταβολή του W



Σχήμα 3.40 Μεταβολή του L_1

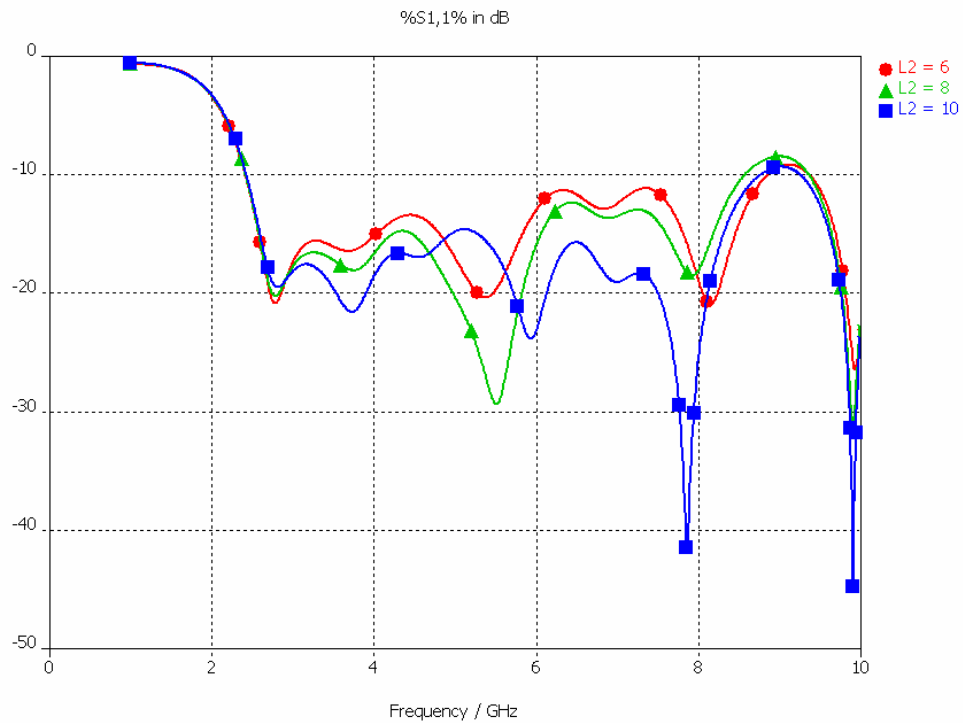


Σχήμα 3.41 Μεταβολή του f_i

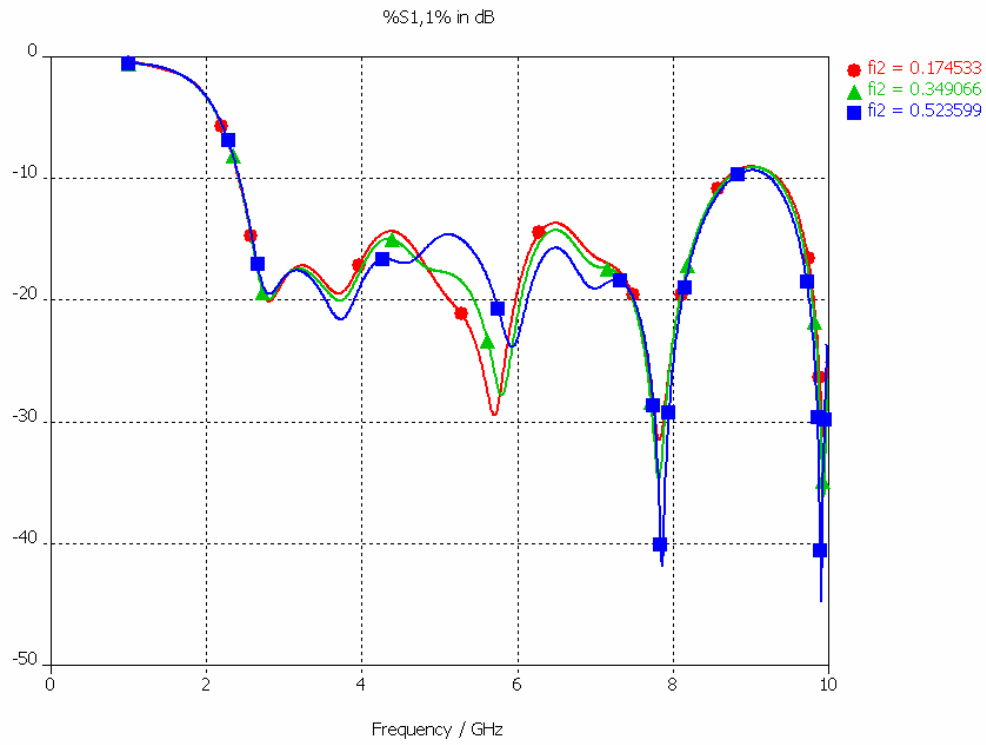


Σχήμα 3.42 Μεταβολή του th

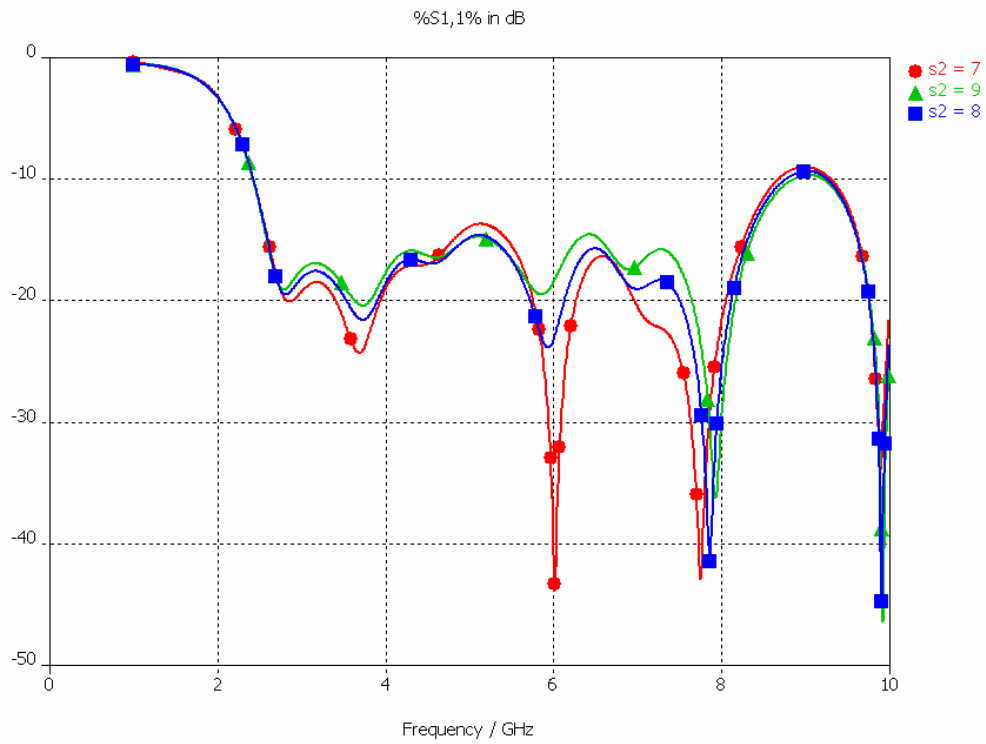
Διαγράμματα για το παρασιτικό στοιχείο σε Asymmetric bow-tie



Σχήμα 3.43 Μεταβολή του $L2$



Σχήμα 3.44 Μεταβολή του f_2



Σχήμα 3.45 Μεταβολή του s_2

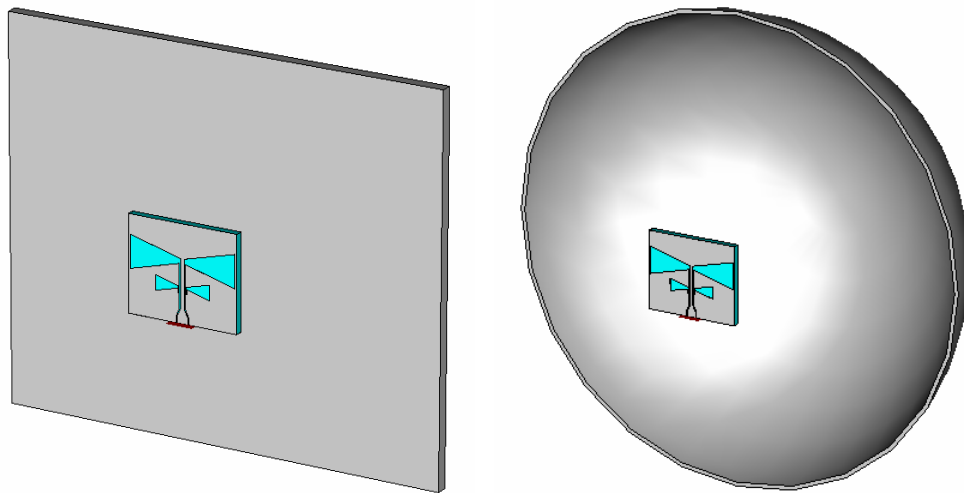
Περιεχόμενα:

- 4.1 Χρήση Ανακλαστήρα
- 4.2 Bow-tie με καμπυλωμένες πλευρές
- 4.3 Κυλινδρικό μοντέλο
- 4.4 Περισσότερες σχισμοκεραίες
- 4.5 Βιβλιογραφία

4.1 Χρήση Ανακλαστήρα

Ένα βασικό μειονέκτημα των κεραιών που μελετήθηκαν μέχρι τώρα είναι το μέτριο κέρδος (περίπου 5 db), ενώ επίσης ακτινοβολούν σε 2 κατευθύνσεις. Για να αντιμετωπιστεί αυτός ο περιορισμός μια πρώτη λύση θα ήταν να χρησιμοποιήσουμε ένα λεπτό στρώμα μετάλλου σαν γείωση στο πίσω μέρος του διηλεκτρικού. Όμως αυτή η διάταξη δεν επιτρέπει ευρυζωνική λειτουργία. Επομένως κρίνεται απαραίτητη η χρήση ανακλαστήρα.

Δοκιμάσαμε επίπεδο ανακλαστήρα καθώς και παραβολικό (Σχήμα 4.1), αλλά τελικά καλύτερα αποτελέσματα πήραμε με τον τριεδρικό ανακλαστήρα που φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Τέτοιοι ανακλαστήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για δίπολα, που δικαιώνει την επιλογή μας, καθώς η συμπεριφορά των σχισμοκεραιών μοιάζει σε πολλά σημεία με των δίπολων. Σημειώνουμε πως η τροφοδοσία γίνεται από SMA, το οποίο διαπερνά την κάτω επιφάνεια.

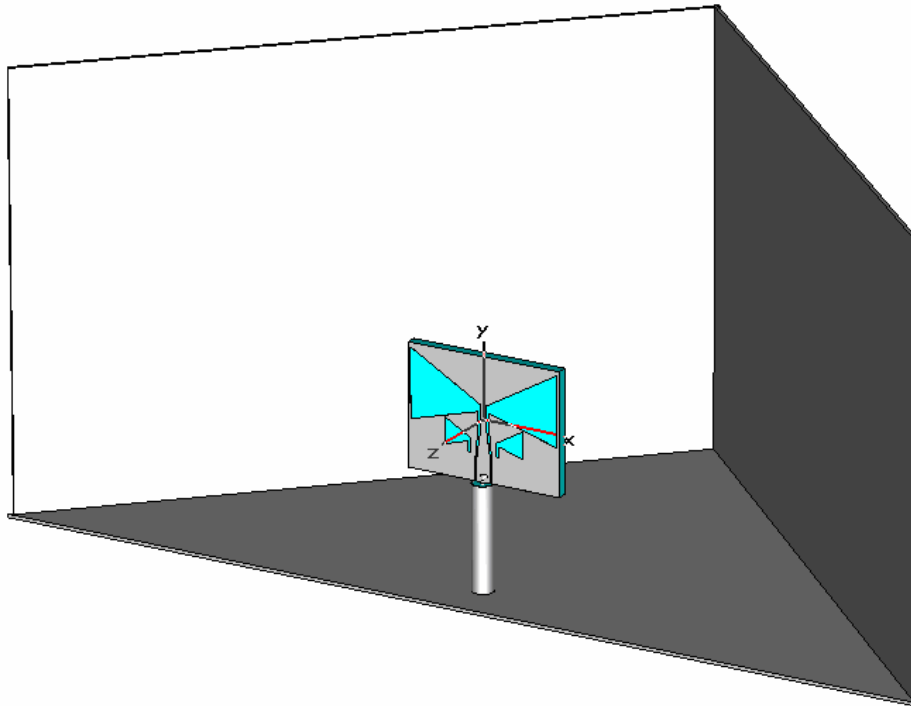


Σχήμα 4.1 Επίπεδος και Παραβολικός ανακλαστήρας

Το μοντέλο της σχισμοκεραίας που χρησιμοποιείται είναι της ασύμμετρης bow-tie με παρασιτικά που παρουσιάζει εύρος 2.2-10 GHz (Παρ.3.4).

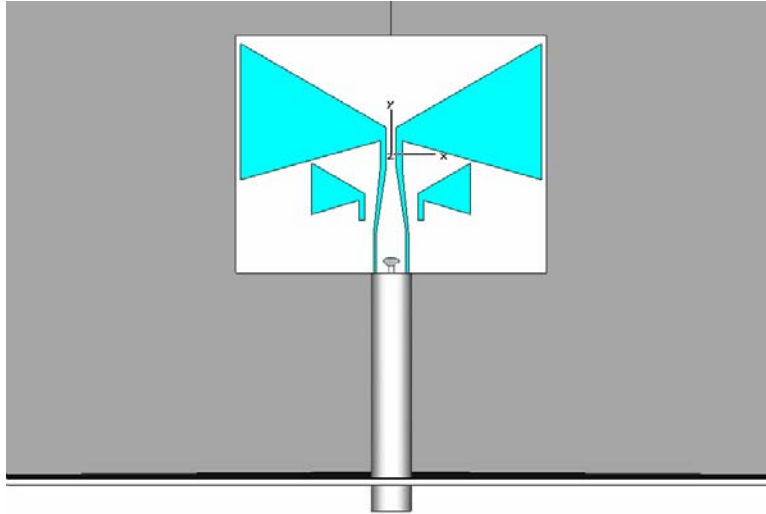
Παρατηρήσαμε ότι όσο πιο κοντά τοποθετούμε τον ανακλαστήρα στη κεραία τόσο πιο κατευθυντικό γίνεται το διάγραμμα, αλλά το S_{11} χαλάει σημαντικά σε σχέση με αυτό της κεραίας όταν υπολογίστηκε χωρίς ανακλαστήρα. Προφανώς, οι ανακλάσεις στο μέταλλο του ανακλαστήρα δημιουργούν νέες ρευματικές κατανομές στην σχισμοκεραία και για αυτό αλλάζει η απόκρισή της.

Επομένως για ικανοποιητική λειτουργία σταδιακά δοκιμάσαμε μεγαλύτερες αποστάσεις αυξάνοντας παράλληλα το μέγεθος του ανακλαστήρα, καθώς όσο απομακρυνόμαστε από την κεραία χρειάζεται μεγαλύτερη επιφάνεια ανάκλασης. Βέβαια το συνολικό μέγεθος της διάταξης δεν πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να κάνει μη χρηστική τη κεραία. Έχουμε δηλαδή δύο αντικρουόμενους σχεδιαστικούς στόχους: θέλουμε να κρατήσουμε το μέγεθος μικρό και παράλληλα να έχουμε αξιόπιστη λειτουργία. Η παρακάτω επιλογή μας, λαμβάνει υπόψη και τις δύο αυτές παραμέτρους:



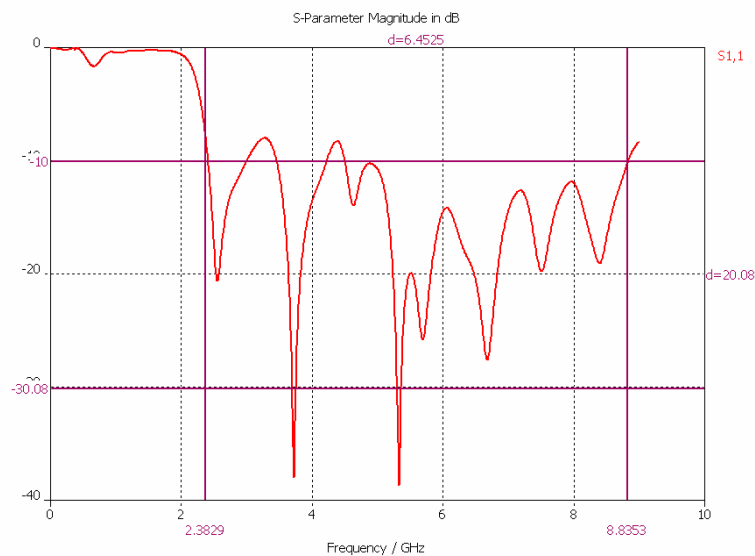
Σχήμα 4.2 Bow-tie με τριεδρικό ανακλαστήρα

Ο ανακλαστήρας έχει μήκος 20cm, ύψος 13cm και πάχος 1 mm. Η corlanar κεραία τοποθετείται σε ύψος 3cm από τη βάση (υπάρχουν τέτοιου ύψους SMA ή εναλλακτικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε 2 SMA σε σειρά).



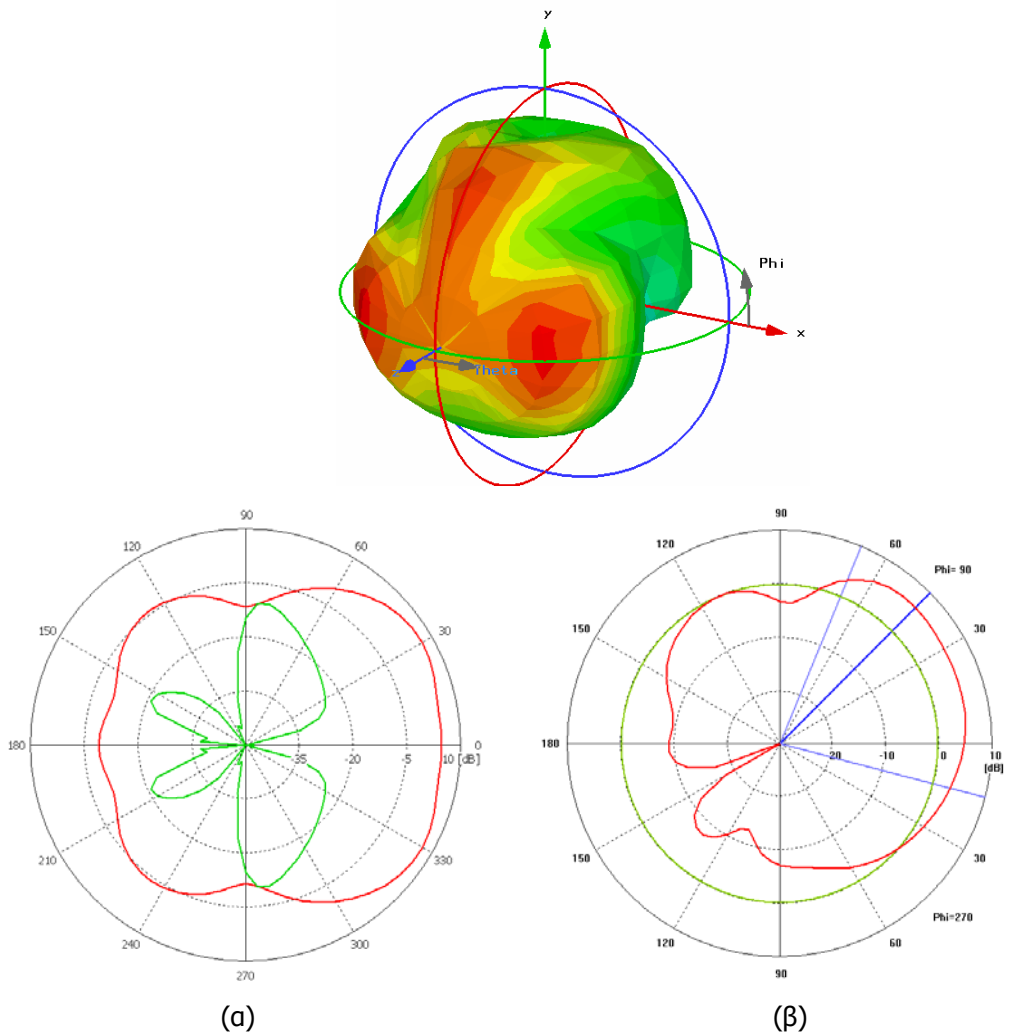
Σχήμα 4.3 Πρόσωση Διάταξης

Έχουμε λειτουργία σε μεγάλο εύρος ζώνης (2.4 - 8.8 GHz) κάτω από 10 dB, εκτός από κάποιες μικρές διακυμάνσεις στις συχνότητες 3 και 4.5 GHz.

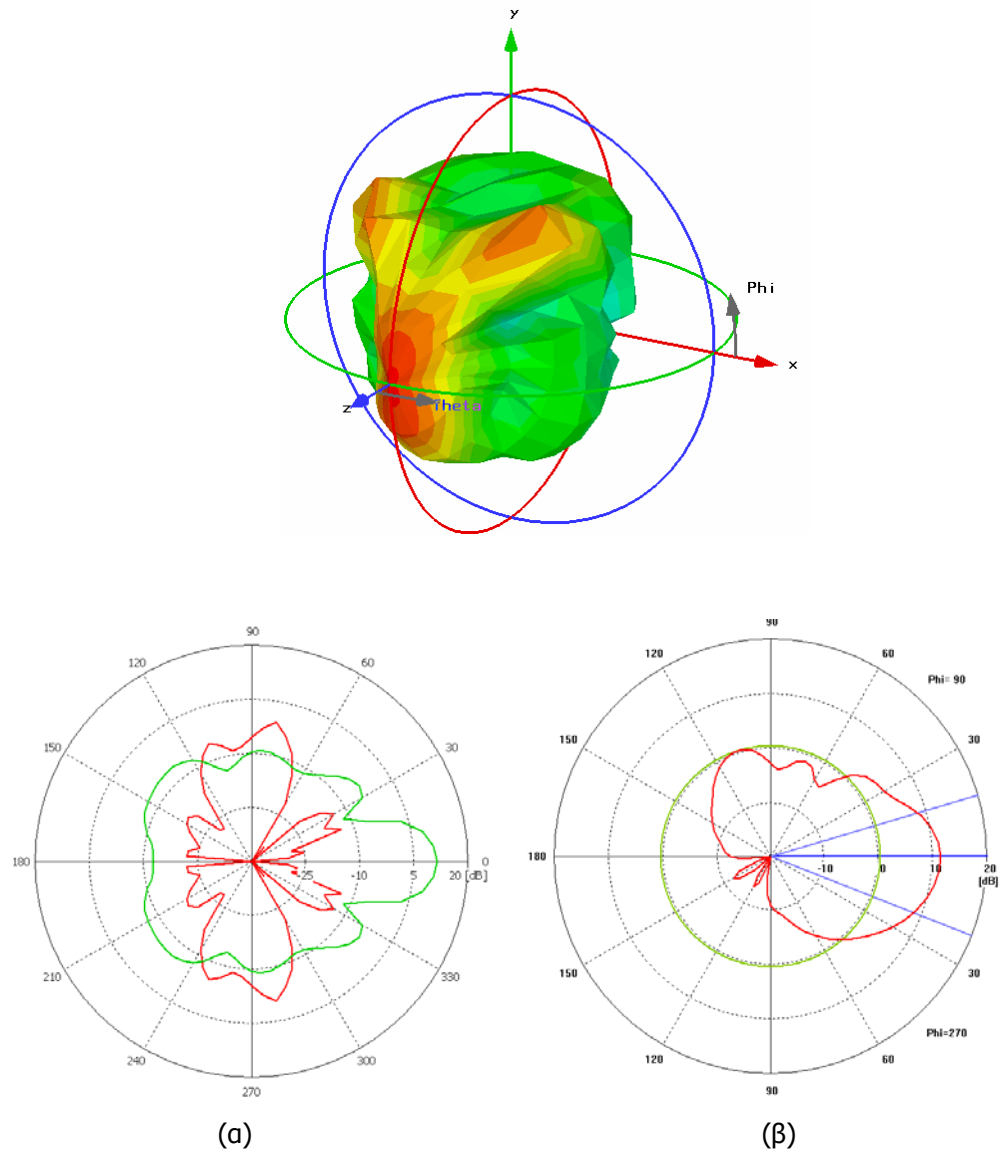


Σχήμα 4.4 S11 bow-tie σχισμοκεραίας με τριεδρικό ανακλαστήρα

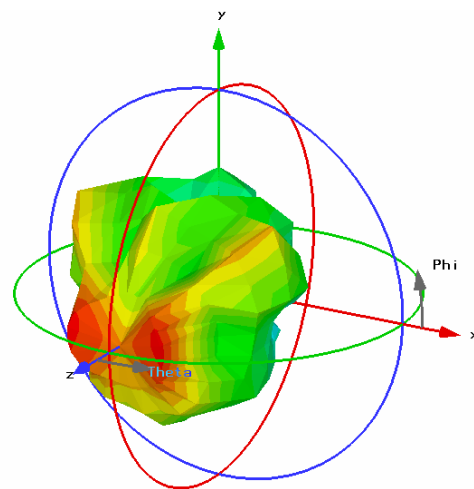
Στη συνέχεια παραθέτουμε τα διαγράμματα ακτινοβολίας. Όπως αναμενόταν παρατηρούμε διπλασιασμό του κέρδους (10-13 db). Επίσης πρέπει να σημειώσουμε πως ο ανακλαστήρας μάλλον επιδρά θετικά όσον αφορά την “καθαρότητα” της γραμμικής πόλωσης αφού έχουμε αξονικούς λόγους άνω των -20 db, σε αντίθεση με την απλή bow-tie που σε κάποιες περιοχές συχνοτήτων εμφάνιζε χαμηλότερο αξονικό λόγο. Πάνω στο θέμα δεν βρήκαμε σχετικές δημοσιεύσεις εκτός από αυτήν στο [1]: σε αυτό το άρθρο χρησιμοποιείται επίπεδος ανακλαστήρας για μια slot κεραία τροφοδοτούμενη από microstrip, ενώ η βέλτιστη απόσταση του ανακλαστήρα από την κεραία είναι $\lambda_0/4$, όπου ελαχιστοποιούνται οι πλευρικοί λοβοί και μεγιστοποιείται ο λόγος front-to-back.

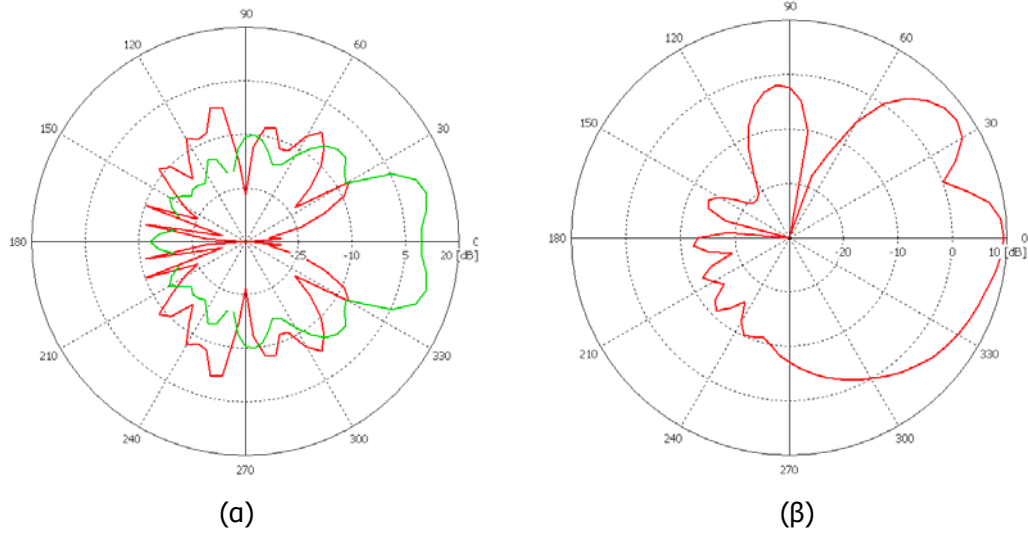


Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 2.5 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z

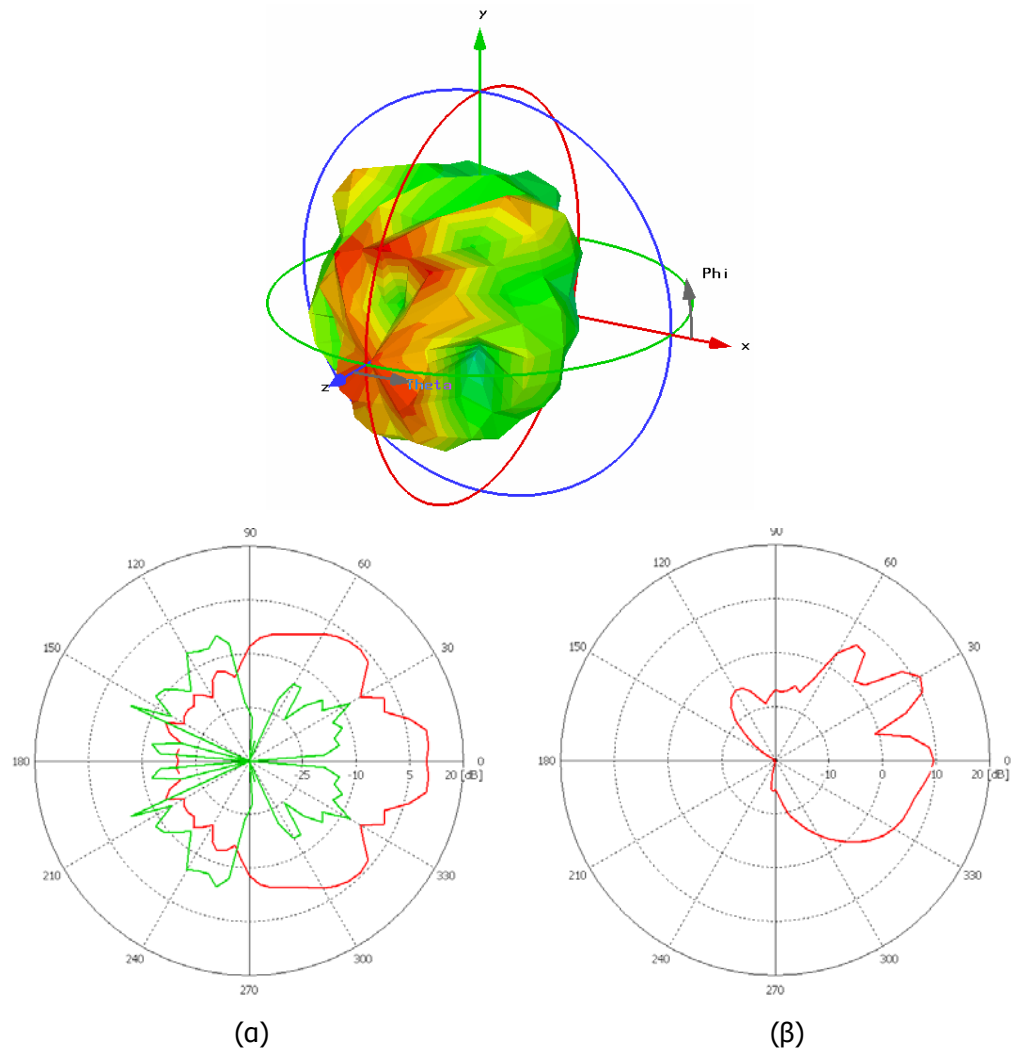


Σχήμα 4.6 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 3.5 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z

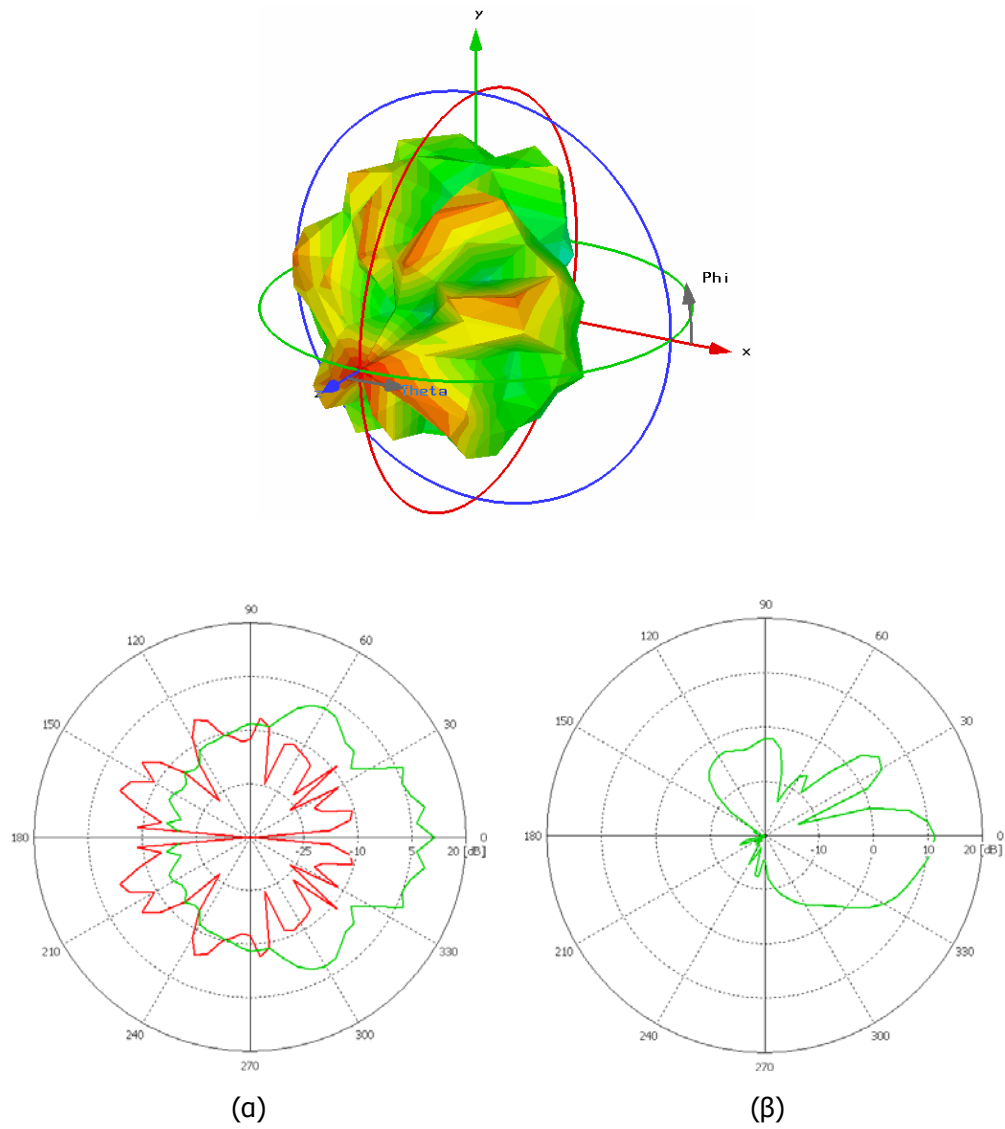




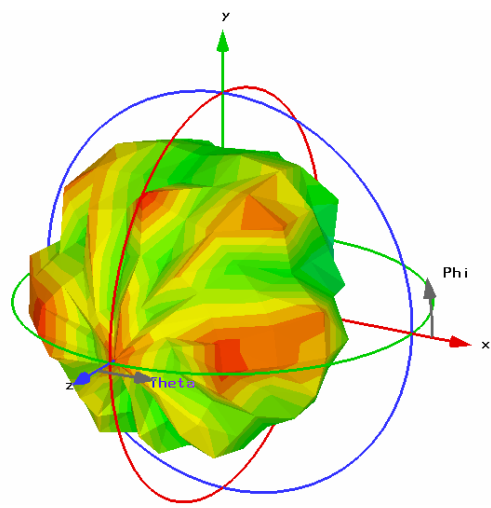
Σχήμα 4.7 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 5 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z

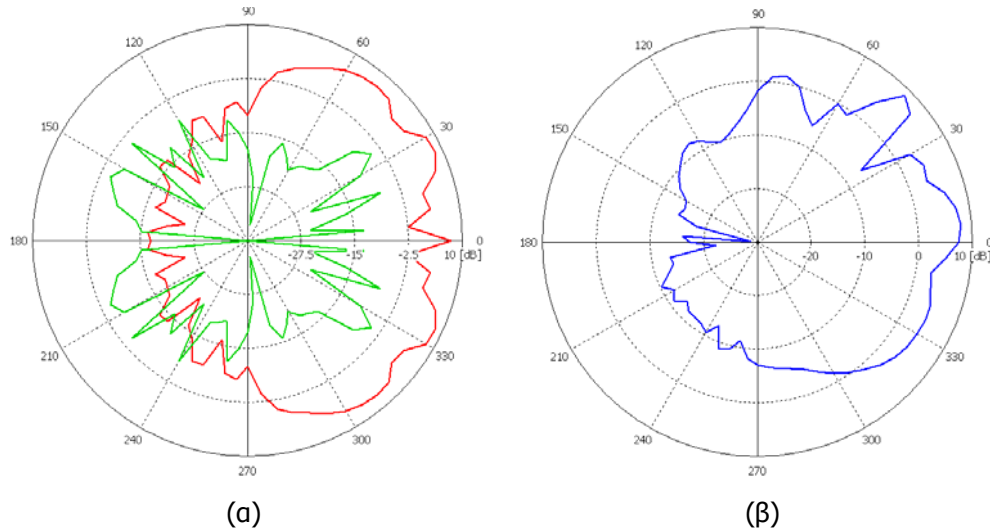


Σχήμα 4.8 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 6 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z



Σχήμα 4.9 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 7 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z



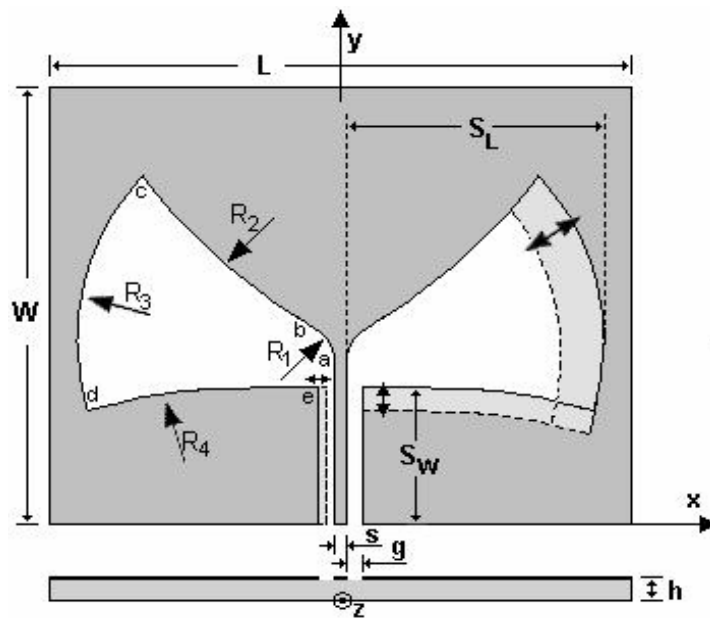


Σχήμα 4.10 Διάγραμμα ακτινοβολίας στα 8 GHz επίπεδο (α) x-z (β) y-z

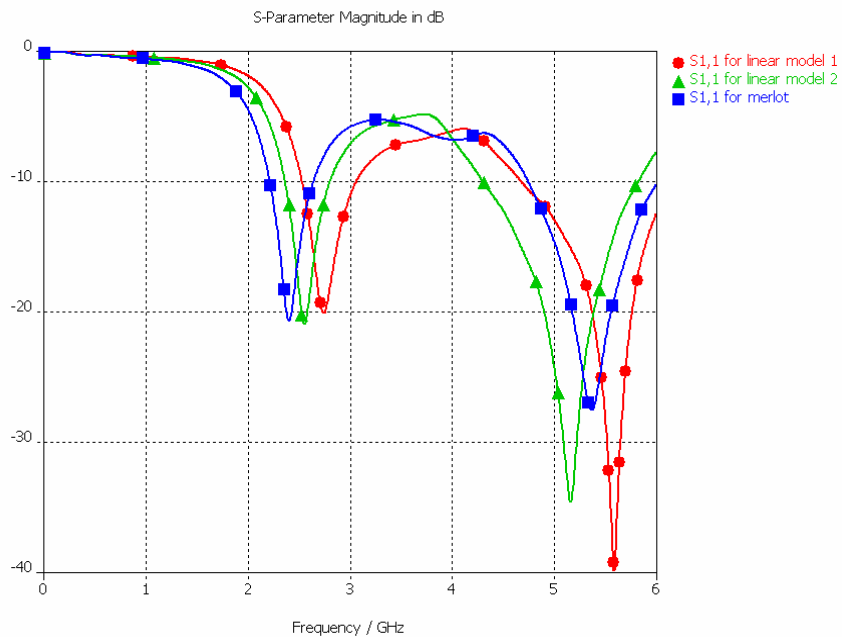
4.2 Bow-tie με καμπυλωμένες πλευρές

Αυτό το μοντέλο είναι μια παραλλαγή της κλασικής bow-tie, όπου όλες οι πλευρές καμπυλώνονται εκτός από αυτές της ομοεπίπεδης γραμμής τροφοδοσίας. Η καμπύλωση αυτή αλλάζει την ροή των επιφανειακών μαγνητικών ρευμάτων κοντά στις σχισμές και ενδέχεται να αλλάζει η απόκριση της διάταξης. Το θέμα αυτό παρουσιάζεται στο [7] και σε αυτή την παράγραφο χρησιμοποιούμε αυτό το μοντέλο για να κάνουμε κάποιες συγκρίσεις της απλής bow-tie με αυτήν με τις καμπυλωμένες πλευρές.

Το μοντέλο δίνεται παρακάτω (Σχήμα 4.11). Έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να συντονίζεται στα 2.45 και 5.4 GHz για να καλύπτει τα πρότυπα 802.11a και 802.11b. Εμείς προσεγγίσαμε το μοντέλο με δύο αντίστοιχων διαστάσεων γραμμικά μοντέλα. Το πρώτο προσεγγίζει την curved bow-tie εσωτερικά με ευθύγραμμα τμήματα, ενώ το δεύτερο από την εξωτερική μεριά.



Σχήμα 4.11 .Γεωμετρία καμπυλωμένης bow-tie $L = 49.5 \text{ mm}$, $W = 35.5 \text{ mm}$, $h = 3.125 \text{ mm}$, $S_W = 10.58 \text{ mm}$, $S_L = 23.8 \text{ mm}$, $s = 1 \text{ mm}$, $g = 1.35 \text{ mm}$



Σχήμα 4.12 Συγκριτικό διάγραμμα S11 καμπυλωμένης-γραμμικής bow-tie

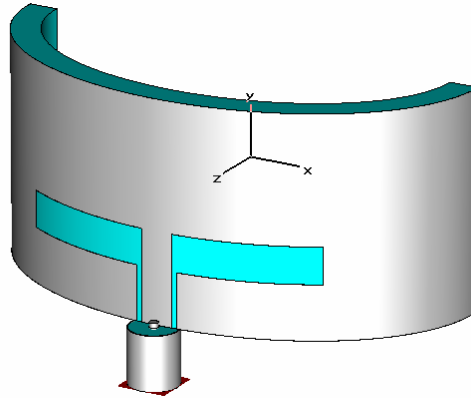
Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε πως η καμπύλωση των πλευρών επιδρά στην απόκριση της bow-tie. Γενικά στις σχισμοκεραίες, όσο μεγαλώνει το μήκος της σχισμής ο συντονισμός μετατοπίζεται σε χαμηλότερες συχνότητες. Επομένως, εφόσον το ένα γραμμικό μοντέλο προσεγγίζει την καμπυλωμένη bow-tie εσωτερικά και το άλλο εξωτερικά θα περιμέναμε στα διαγράμματα του S11 το καμπυλωμένο μοντέλο να βρίσκεται ανάμεσα στα άλλα δύο. Κάτι τέτοιο όντως συμβαίνει στην δεύτερη περιοχή συντονισμού, αυτή των 5.5 GHz. Στην χαμηλότερη όμως περιοχή, αυτή των 2.45 GHz τη χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού εμφανίζει η καμπυλωμένη bow-tie.

Βέβαια δεν ξέρουμε αν το παραπάνω συμπέρασμα μπορεί να γενικευθεί σε όλες τις σχισμοκεραίες, ωστόσο είναι μια ένδειξη πως η καμπύλωση των πλευρών οδηγεί σε μικρότερες συχνότητες συντονισμού και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τεχνικές μείωσης μεγέθους που είναι σημαντικό ζήτημα στις μικροταινιακές κεραίες.

4.3 Κυλινδρικό μοντέλο

Μέχρι τώρα τα μοντέλα που μελετήσαμε ήταν επίπεδα, ωστόσο σε αρκετές εφαρμογές είναι απαραίτητη η κυκλική ή η ελλειπτική μορφή της μικροταινιακής κεραίας. Τέτοιες εφαρμογές αφορούν σε ιατρικές συσκευές (Παράγραφος 1.7), σε περιπτώσεις όπου η κεραία πρόκειται να τοποθετηθεί εφαπτομενικά κάποιου πυραύλου ή σε radar που θέλουμε να έχουν ευρύτερη περιοχή κάλυψης.

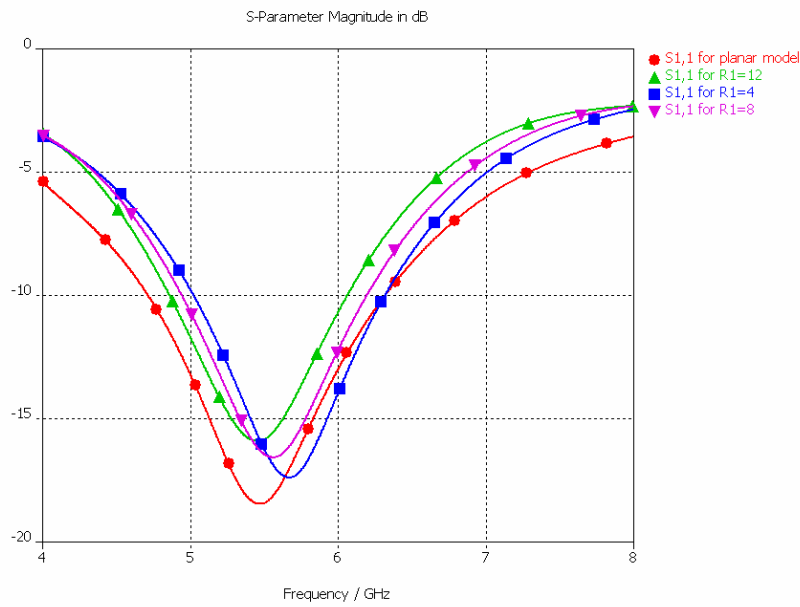
Ένα τέτοιο μοντέλο δίνεται παρακάτω. Πρόκειται για ορθογωνική σχισμοκεραία πάνω σε διηλεκτρικό με $\epsilon_r=3.27$ και ύψος $h=3.175$ που έχει ελλειπτική μορφή. Το μοντέλο είναι πλήρως παραμετρικό με ακτίνα της έλλειψης στον άξονα-x τη μεταβλητή L και στον άξονα-y τη μεταβλητή R1. Οι υπόλοιποι παράμετροι ορίζονται σύμφωνα με το Σχήμα 2.4.



<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
L	46
L1	15
R1	16
W	24
d1	6
er	3.27
g	0.6
h	3.175
s	3.5
u	4

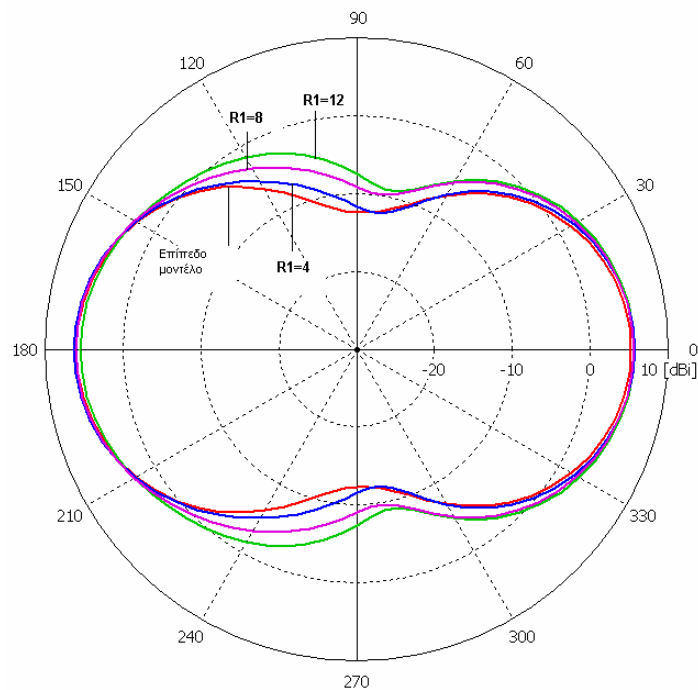
Σχήμα 4.13 Μοντέλο κυλινδρικής σχισμοκεραίας/τιμές παραμέτρων

Το παραπάνω μοντέλο λειτουργεί στα 5.5 GHz με εύρος ζώνης 1.6 GHz. Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται ο συντελεστής ανάκλασης για το αντίστοιχο επίπεδο μοντέλο και για διάφορες ακτίνες R1 της κυλινδρικής. Πρέπει να τονίσουμε πως η καμπύλωση προκαλεί αρκετές αλλαγές στη διάταξη· στο [2] δίνονται τα χαρακτηριστικά των ελλειπτικών corlanar γραμμών που διαφέρουν σε σχέση με τις επίπεδες.



Σχήμα 4.14 S11 για διάφορες καμπυλότητες κυλινδρικής σχισμοκεραίας

Επιπλέον αλλάζουν και τα διαγράμματα ακτινοβολίας, με μία διεύρυνση τόσο του εμπρόσθιου αλλά κυρίως του οπίσθιου λοβού στο επίπεδο x-z, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.15 Διαγράμματα ακτινοβολίας στο x-z επίπεδο για διάφορες τιμές του R1

Αυτή η διεύρυνση του λοβού στο φ-επίπεδο είναι το χαρακτηριστικό γνώρισμα των καμπυλωμένων μικροταινιακών κεραιών. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρουμε αναλυτικά τις τιμές του κέρδους και το εύρος του ανοίγματος (άνοιγμα μισής ισχύος) για διάφορες τιμές της ακτίνας R1:

Μοντέλο	Εμπρόσθιος λοβός		Οπίσθιος λοβός	
	Κέρδος (db)	Άνοιγμα ($^{\circ}$)	Κέρδος (db)	Άνοιγμα ($^{\circ}$)
επίπεδο	5	74	6	57
R1= 4 mm	5.8	80	6.4	55
R1= 8 mm	5.6	88	6.1	59
R1= 12 mm	5.6	63	5.8	100
R1= 16 mm	5.6	66	5	118
R1= 20 mm	5.2	71	4	126

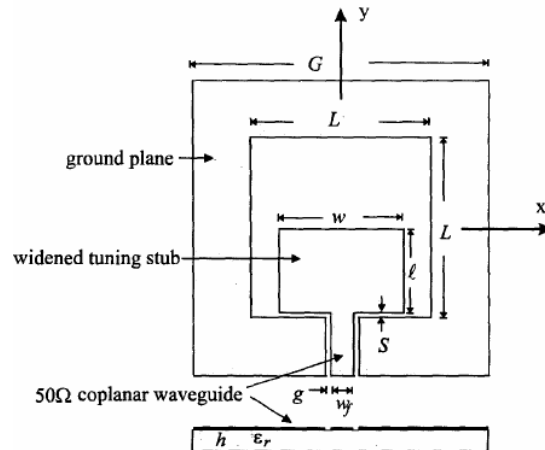
Πίνακας 4.15 Κέρδος και άνοιγμα 3-db για διάφορα R1

Κλείνοντας αυτή την παράγραφο, πρέπει να επισημάνουμε και τα προβλήματα που έχει το παραπάνω μοντέλο. Η ακτινοβολία και προς τις δύο κατευθύνσεις είναι περιοριστικός παράγοντας αν θέλουμε η συσκευή να εφάπτεται κάπου. Αν θεωρήσουμε ένα επίπεδο γείωσης στο πίσω μέρος τότε προκύπτει άλλος τύπος σχισμοκεραιών που δεν επιτρέπει ευρυζωνική λειτουργία και απαιτεί διαφορετική σχεδίαση. Το θέμα ξεφεύγει επομένως από τα όρια της διπλωματικής και δεν το μελετάμε σε μεγαλύτερο βάθος. Ωστόσο το μοντέλο που παραθέτουμε και τα συγκριτικά αποτελέσματα που προέκυψαν αποτελούν μια πρώτη προσέγγιση για σχισμοκεραίες τέτοιου είδους.

4.4 Περισσότερες σχισμοκεραίες

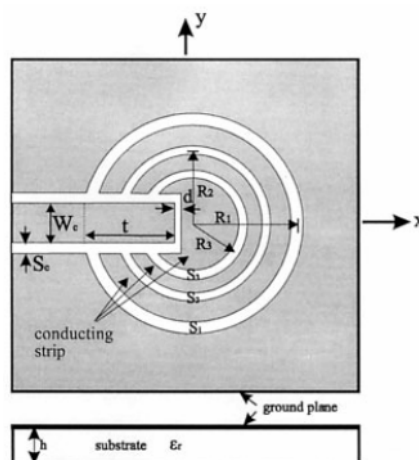
Εκτός από τα μοντέλα που μελετήσαμε υπάρχει ένα πλήθος δημοσιεύσεων σχετικά με τις σχισμοκεραίες που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζουμε τις σημαντικότερες ώστε να έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις σχισμοκεραίες.

Στο [3] παρουσιάζεται μια CPW-fed τετραγωνική σχισμοκεραία διαστάσεων 72×72 mm που λειτουργεί στα 1.9 GHz και έχει bandwidth ratio 60%. Ουσιαστικά πρόκειται για συνδυασμό patch και slot κεραίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16. Το εσωτερικό μεταλλικό τμήμα έχει τέτοια γεωμετρία ώστε η χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου να είναι στα 50 Ohms, ενώ η εξωτερική μεταλλική επιφάνεια λειτουργεί ως γείωση.



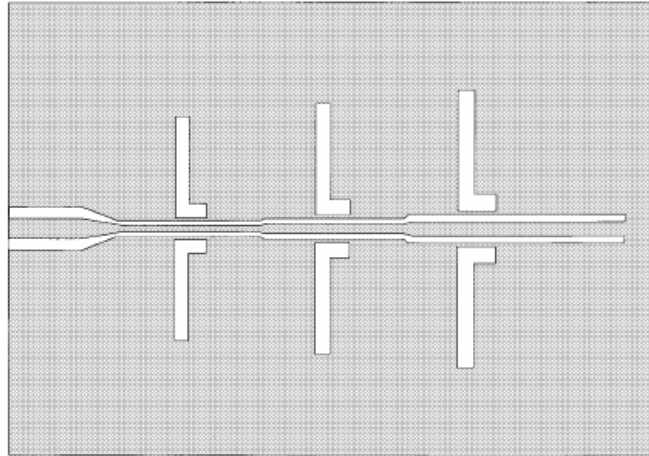
Σχήμα 4.16 Τετραγωνική σχισμοκεραία CPW-fed

Στο [4] παρουσιάζεται μια δακτυλιοειδής σχισμοκεραία που μπορεί να τροφοδοτηθεί είτε από CPW είτε από microstrip. Τα κυκλικά τμήματα της έχουν διαφορετικές ακτίνες και καθορίζουν τις πολλαπλές συχνότητες συντονισμού της στο εύρος 1.5 με 6 GHz (Σχήμα 4.17).



Σχήμα 4.17 Δακτυλιοειδής σχισμοκεραία

Στο [5] προτείνεται ένας νέος τρόπος τροφοδότησης, επαγωγικά από coplanar γραμμή σε slots. Αυτή η τεχνική είναι ιδανική για τροφοδότηση στοιχειοκεραιών. Στο 4.18 φαίνεται μια τέτοια στοιχειοκεραία τριών στοιχείων που το μέγεθός τους αυξάνει λογαριθμικά. Το κάθε στοιχείο συντονίζεται ξεχωριστά και συνολικά η διάταξη παρουσιάζει εύρος ζώνης περίπου 4-5 GHz.

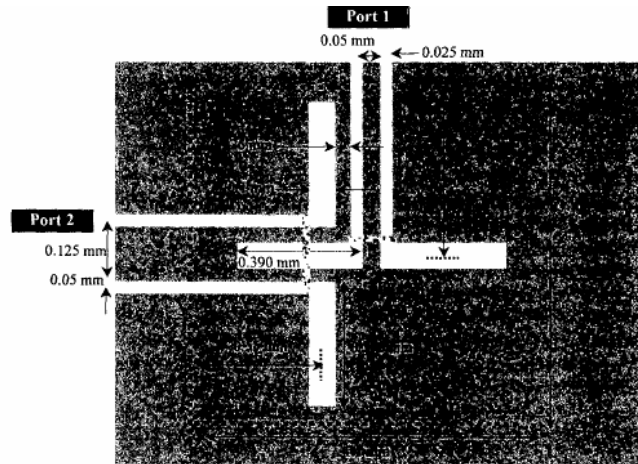


Σχήμα 4.18 Στοιχειοκεραία 3 στοιχείων

Είναι σημαντικό στις κινητές επικοινωνίες ο χρήστης να μπορεί να λαμβάνει σήμα οποιαδήποτε κατεύθυνση και να έχει ο δέκτης του. Για αυτό προτιμώνται σε δέκτες οι κυκλικές πολώσεις ή η διπλή πόλωση κεραιών που ακολουθείται από συγκριτή σήματος. Με την ομοαξονική τροφοδοσία εύκολα επιτυγχάνεται διπλή πόλωση, χρησιμοποιώντας δύο σημεία τροφοδοσίας. Ωστόσο στις ομοεπίπεδες γραμμές η διπλή πόλωση είναι δύσκολη για γεωμετρικούς κυρίως λόγους. Μια πρώτη λύση θα ήταν η πολυστρωματική σχεδίαση που έχει όμως το σημαντικό μειονέκτημα της δημιουργίας ρυθμών μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών.

Μια σχεδίαση διπλής πόλωσης σε ένα επίπεδο δίνεται στο [6]. Δύο ομοεπίπεδες γραμμές χαράσσονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.19 και παράγουν τη διπλή πόλωση. Η όλη διάταξη του σχήματος χρησιμοποιείται σαν κύκλωμα

τροφοδότησης (feeding network) σε μεταλλικό κάλυμμα που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του διηλεκτρικού.



Σχήμα 4.19 Διπλή πόλωση με coplanar στοιχεία

4.5 Βιβλιογραφία

1. Yoshimura Y. "A Microstrip Line slot Antenna", IEEE Trans. on Microwave Theory and techniques, vol. MTT-20, 1972, pp. 760-762
2. Ceyhun Karpuz and Adnan Gorur, "Quastatic solutions of elliptical coplanar waveguides", microwave and optical technology letters, Vol. 20, No. 6, March 20 1999
3. Horng-Dean Chen and wen-Shyang Chen, "A broadband CPW-fed square slot antenna", 2001
4. Jin-Sen Chen, "Multi-frequency characteristics of annular-ring slot antennas", microwave and optical technology letters / Vol. 38, No. 6, September 20 2003
5. Santiago Sierra-Garcia and Jean-Jacques Laurin, "Study of a CPW Inductively Coupled Slot Antenna", IEEE transactions on antennas and propagation, Vol. 47, No. 1, Jan. 1999
6. K. Hettak, G. Y. Delisle and M. G. Stubbw, "A novel variant of dual polarized CPW fed patch antenna for broadband wireless communication", 2000
7. Evangelos S. Angelopoulos, Chrysoula Papagianni and Dimitra I. Kaklamani, "A Dual-Band Modified CPW-Fed Curved Bow-Tie Slot Antenna With Wideband Characteristics"

Περιεχόμενα:

- 5.1 Κατασκευή των σχισμοκεραιών
- 5.2 Διαδικασία μετρήσεων
 - 5.2.1 Network Analyzer
 - 5.2.2 Ανηχοικός θάλαμος
- 5.3 Αποτελέσματα μετρήσεων
 - 5.3.1 Ορθογωνική σχισμοκεραία χωρίς transition
 - 5.3.2 Ορθογωνική σχισμοκεραία με transition
 - 5.3.3 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία
 - 5.3.4 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία
 - 5.3.5 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία–αντίστοιχο γραμ. μοντέλο
 - 5.3.6. bow-tie κεραία
 - 5.3.7 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία
- 5.4 Συμπεράσματα

Παράρτημα 5A

Παράρτημα 5B

Οι σχισμοκεραιές που επιλέξαμε να κατασκευάσουμε και να μετρήσουμε είναι οι πιο αντιπροσωπευτικές από αυτές που μελετήθηκαν στα Κεφάλαια 1-4. Το διηλεκτρικό που τελικά χρησιμοποιήσαμε διαφέρει ελάχιστα από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις και έγιναν κάποιες μικρές τροποποιήσεις ώστε να έχουμε την βέλτιστη απόδοση των κεραιών. Το διηλεκτρικό είναι της εταιρίας Taconic μοντέλο TLC32, έχει ύψος 1.575mm και $\epsilon_r=3$. Τα πλήρη χαρακτηριστικά του δίνονται στο Παράρτημα 5A. Στο Παράρτημα 5B παραθέτουμε τις μετρήσεις που έγιναν στον ανηχοϊκό θάλαμο.

5.1 Κατασκευή των σχισμοκεραιών

Η υποδομή του εργαστηρίου όπου κατασκευάστηκαν οι σχισμοκεραιές παρέχει την δυνατότητα παραγωγής πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB's) διαστάσεων έως και (12" x 12" (305 x 305 mm)). Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η υποδομή κατασκευής PCBs λειτουργεί σε "negative active made". Αυτό σημαίνει ότι το φωτοευαίσθητο υλικό είναι αρνητικό και άρα το φιλμ (artwork) του πρότυπου κυκλώματος πρέπει να είναι αρνητικό, δηλαδή οι περιοχές που επιθυμούμε να υπάρχει χαλκός πρέπει να είναι διάφανες.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία κατασκευής, πρέπει να γίνει επιλογή του κατάλληλου τύπου φωτοευαίσθητου χημικού υλικού (photoresist) που θα χρησιμοποιηθεί για ευαισθητοποίηση (επίστρωση) της πλακέτας. Υπάρχουν δύο τύποι:

1) Dry film resist

Το χημικό υλικό έχει πάχος περίπου 1.3 mil (0.0013"), είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στα γδαρσίματα και δύσκολα αλλοιώνεται. Η διαδικασία επεξεργασίας του βασίζεται στη χρήση νερού.

2) Liquid resist

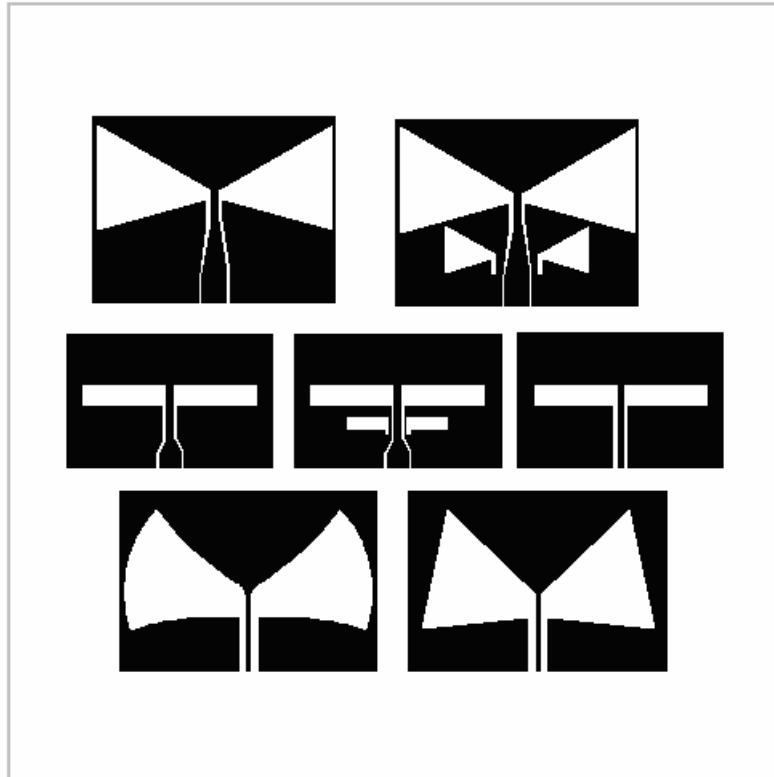
Είναι ένα πολύ λεπτό επιστρωμένο χημικό υλικό, πολύ ευαίσθητο και πρέπει να δουλεύεται με προσοχή. Ωστόσο, είναι το καλύτερο υλικό για πρότυπα κυκλώματα με λεπτές γραμμές, πάχους 15 mil (0.4 mm) ή μικρότερα. Η διαδικασία επεξεργασίας του περιλαμβάνει την χρήση διαφόρων χημικών/διαλυτικών υλικών (solvent process).

Το φωτοευαίσθητο υλικό που διατίθεται στο εργαστήριο είναι τύπου liquid resist "KPR" και έχει την δυνατότητα να επιστρώνεται πάνω σε απλής και διπλής όψεως πλακέτες Χαλκού, κράματος Χαλκού, Ορείχαλκου, Μαγνησίου, Νικελίου και Ανοδιωμένου Αλουμινίου. Το υλικό εφαρμόζεται πάνω στις πλακέτες σχηματίζοντας ένα στρώμα πάχους περίπου 0.2 mil (0.0002"). Για την κατασκευή ακολουθήθηκαν οι παρακάτω 9 φάσεις:

1η ΦΑΣΗ

ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ ΚΑΙ ΚΟΨΙΜΟ ΑΥΤΗΣ

Το διηλεκτρικό που είχαμε στη διάθεσή μας ήταν διαστάσεων 15cm x 15cm. Με βάση αυτές τις διαστάσεις σχεδιάσαμε το κατάλληλο artwork, στο οποίο τοποθετήσαμε 7 κεραίες και το τυπώσαμε σε διαφάνεια με χρήση laser printer ώστε να εξασφαλίσουμε μεγάλη ανάλυση και ακρίβεια στο τύπωμα. Η διαφάνεια χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια σαν "μάσκα" για το στάδιο της φωτολιθογραφίας. Το artwork που κατασκευάσαμε φαίνεται στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί :



Σχήμα 5.1 Artwork των προς τύπωση κεραιών

2η ΦΑΣΗ

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΛΥΨΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ ΜΕ ΦΩΤΟΕΥΑΙΣΘΗΤΟ ΥΛΙΚΟ - ΣΥΣΚΕΥΗ BTS-101

Η συσκευή είναι σχεδιασμένη να επιστρώνει ομοιόμορφα υγρό φωτοευαίσθητο "liquid resist" πάνω στην επιφάνεια επίπεδων πλακετών μεγίστων διαστάσεων 12"χ12". Οι πλακέτες στερεώνονται κάθετα από το πάνω μέρος της συσκευής και βυθίζονται σε μια από τις δύο ειδικές δεξαμενές ανοξείδωτου χάλυβα, διαστάσεων 13" x 13" x 1". Κάθε δεξαμενή μπορεί να γεμίσει μέχρι 3/4 γαλονιού "liquid resist" KPR-3 (1 Αμερικάνικο gal=3.8 lit.). Η ταχύτητα βύθισης των πλακετών είναι σταθερή 36" στο λεπτό. Η ανάδυση των πλακετών γίνεται αυτόματα και είναι ομαλή σε

προκαθορισμένη ταχύτητα 12" ανά λεπτό. Το πάχος της επίστρωσης εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Την ταχύτητα ανύψωσης της πλακέτας
- Την θερμοκρασία του φωτοευαίσθητου υλικού και της πλακέτας που επιστρώνεται (24°C)
- Το ιξώδες του φωτοευαίσθητου υλικού

Ειδικότερα όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα ανύψωσης τόσο παχύτερη θα είναι η επίστρωση

Επειδή το φωτοευαίσθητο υλικό είναι ευαίσθητο στην υπεριώδη ακτινοβολία, πρέπει να εξασφαλιστούν συνθήκες σωστού φωτισμού στο χώρο (π.χ. κίτρινες λάμπες πυρακτώσεως ή χρυσές λάμπες φθορισμού). Οι πλακέτες πρέπει να είναι στεγνές και καθαρές πριν βυθιστούν μέσα στο φωτοευαίσθητο υγρό. Όταν το φωτοευαίσθητο υλικό KPR-3 εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία μέσω ενός αρνητικού φιλμ, πάνω στο οποίο είναι τυπωμένο το πρότυπο κύκλωμα (artwork), τότε πολυμερίζεται και «σκληραίνει» στις περιοχές του κυκλώματος που είναι διάφανες. Οι εκτεθειμένες περιοχές που έχουν «σκληρύνει» παραμένουν αναλλοίωτες όταν η πλακέτα βυθιστεί αργότερα μέσα στη συσκευή (BTD-201) σταθεροποίησης της εικόνας του τυπωμένου κυκλώματος στην πλακέτα. Αντιθέτως, στην σκοτεινή περιοχή του πρότυπου κυκλώματος, που προστατεύτηκε από την υπεριώδη ακτινοβολία, το φωτοευαίσθητο υλικό KPR-3 διαλύεται λόγω μη πολυμερισμού και η επιφάνεια του χαλκού που εκτέθηκε είναι έτοιμη για αποχάλκωση.

3η ΦΑΣΗ

ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΕΥΑΙΣΘΗΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Για ξήρανση και διατήρηση του "liquid resist" φωτοευαίσθητου υλικού μετά την επίστρωσή του πάνω στην πλακέτα, είναι απαραίτητη η έκθεσή του σε φούρνο υπερύθρου ακτινοβολίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τον θερμοστατικά

ελεγχόμενο φούρνο BTO-102, σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα του 1 έως 1.5 λεπτού. Τα κύματα της υπερύθρου ακτινοβολίας στεγνώνουν και τις εσωτερικές επιφάνειες της επιστρωμένης πλακέτας, έτσι ώστε να περιορίζεται η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου επιφανειακού στεγνώματος. Όταν η πλακέτα βγει από το φούρνο, αφήνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, για να κρυώσει.

4η ΦΑΣΗ

ΕΚΘΕΣΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ ΣΕ ΥΠΕΡΙΩΔΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (ΦΩΤΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ)

Για την μεταφορά του artwork στο φωτοευαίσθητο υλικό χρησιμοποιήθηκε η συσκευή BTX-200A. Η συσκευή εκπέμπει μέσω του αρνητικού τυπωμένου κυκλώματος (artwork) υπεριώδη ακτινοβολία πάνω στην επιστρωμένη με φωτοευαίσθητο υλικό πλακέτα. Η συσκευή περιλαμβάνει πέντε λυχνίες φθορισμού, οι οποίες δίνουν μια έξοδο που πλησιάζει την περιοχή υπεριώδους ακτινοβολίας, περίπου 350 έως 425 νανόμετρα. Επειδή, αυτή είναι και η περιοχή ευαισθησίας του φωτοευαίσθητου υλικού, ο χρόνος έκθεσης είναι πολύ σύντομος. Για Dry film φωτοευαίσθητες πλακέτες χαλκού, ο χρόνος έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία είναι 45 έως 65 sec. Για liquid film φωτοευαίσθητες πλακέτες χαλκού ο χρόνος έκθεσης είναι 90 έως 120 sec.

5η ΦΑΣΗ

ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΤΟΥ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΕΤΑ

Η εμφάνιση του φωτοευαίσθητου υλικού επιτεύχθηκε με την χρήση της συσκευής BTD-201. Η συσκευή είναι κατάλληλη για να σταθεροποιεί "liquid resist" φωτοευαίσθητες επιστρωμένες επιφάνειες που έχουν εκτεθεί σε υπεριώδη ακτινοβολία. Ο κύκλος σταθεροποίησης διαρκεί λιγότερο από λεπτό και ελέγχεται από ένα ενσωματωμένο χρονόμετρο 10 λεπτών. Οι περιοχές της πλακέτας που έχουν ήδη εκτεθεί στην υπεριώδη ακτινοβολία, έχουν σκληρύνει και δε μπορούν να αφαιρεθούν κατά τον ψεκασμό με το διάλυμα σταθεροποίησης. Αφού

τοποθετηθούν μέσα στη συσκευή οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων που προορίζονται για σταθεροποίηση, κλείνουμε το γυάλινο καπάκι της συσκευής και βεβαιωνόμαστε ότι πιέζεται ο ειδικός διακόπτης ασφαλείας. Κατόπιν ρυθμίζουμε το χρονόμετρο. Με φρέσκο διάλυμα σταθεροποίησης ο χρόνος που απαιτείται είναι 30 με 45 sec (Καθώς το διάλυμα θα κορεστεί με φωτοευαίσθητο χημικό υλικό, θα πρέπει να αυξάνεται και ο χρόνος σταθεροποίησης. Όταν ο χρόνος σταθεροποίησης αυξηθεί υπερβολικά προτείνεται η αντικατάσταση με φρέσκο διάλυμα). Μόλις ολοκληρωθεί ο χρόνος σταθεροποίησης, η συσκευή αυτόματα σταματάει να ψεκάζει. Αφαιρούμε τη σκόνη με την πλακέτα και ξεβγάζουμε με άφθονο νερό μέσα στην συσκευή BTR-203. Κατόπιν στεγνώνουμε στη συσκευή BWD-204.

Αν μετά την διαδικασία αποχάλκωσης που ακολουθεί παραμείνουν ίχνη γυαλιστερού χαλκού πάνω στην πλακέτα, σημαίνει ότι εξακολουθεί να υπάρχει στρώμα από μαλακό φωτοευαίσθητο χημικό υλικό πάνω στην πλακέτα και απαιτείται επιπρόσθετη διαδικασία σταθεροποίησης. Σε αυτήν την περίπτωση ξεπλένουμε και στεγνώνουμε την πλακέτα και επανερχόμαστε στην διαδικασία σταθεροποίησης. Προτείνεται η πρόσθετη σταθεροποίηση να μην ξεπερνά τα 15 sec, ώστε να αποφύγουμε περίπτωση υπερβολικής σταθεροποίησης. Σε περίπτωση που εξακολουθούν να υπάρχουν ίχνη φωτοευαίσθητου υλικού, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία αλλά σε καμιά περίπτωση ο χρόνος της επιπρόσθετης σταθεροποίησης δεν πρέπει να υπερβεί τα 15 sec.

6η ΦΑΣΗ

ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΩΝ ΧΑΛΚΙΝΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ

Για την αποχάλκωση των πλακετών χρησιμοποιήθηκε η συσκευή αποχάλκωσης πλακετών διπλής όψεως, BTE-202. Η συσκευή είναι κατάλληλη για να αφαιρεί τα τμήματα του χαλκού που δεν προβλέπονται στο τυπωμένο κύκλωμα. Σαν αποχάλκωτικό μέσο χρησιμοποιείται διάλυμα κρυστάλλων

Υπερθεικού Νατρίου σε νερό με καταλύτη για σταθερότητα παραγωγής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι κρύσταλλοι Υπερθεικού Νατρίου έχουν απεριόριστη διάρκεια ζωής όταν είναι σε στεγνή κατάσταση, αλλά περιορισμένη όταν αναμιχθούν με νερό. Η συσκευή αποχάλκωσης διαθέτει ψεκαστήρες που ψεκάζουν συνεχώς (με το διάλυμα) και τις δύο πλευρές της πλακέτας για την απομάκρυνση του χαλκού. Η διαδικασία αφαίρεσης χαλκού γίνεται εντός 3 λεπτών. Η συσκευή διαθέτει ρυθμιζόμενο χρονοδιακόπτη για την αυτόματη διακοπή της λειτουργίας της συσκευής μόλις περατωθεί ο προγραμματισθείς χρόνος αποχάλκωσης. Αφού τοποθετήσουμε τις πλακέτες στον θύλακα της σχάρας συγκράτησης, τοποθετούμε σκάρα μέσα στην δεξαμενή αποχάλκωσης κρεμώντας την από τις ειδικές εγκοπές της συσκευής. Κατόπιν τοποθετούμε το γυάλινο καπάκι και βεβαιωνόμαστε ότι πιέζει τον διακόπτη ασφάλειας. Για περίπτωση που δεν έχει αποχάλκωθεί τελείως η επιφάνεια προτείνονται επαναλαμβανόμενοι κύκλοι αποχάλκωσης των 30 sec. Επίσης προτείνεται η χειροκίνητη περιστροφή των πλακετών, στο μέσο του κύκλου αποχάλκωσης.

7η ΦΑΣΗ

ΠΛΥΣΙΜΟ ΤΩΝ ΠΛΑΚΕΤΩΝ ΜΕ ΝΕΡΟ

Μετά την αποχάλκωση αφαιρούμε τη σχάρα από τη συσκευή BTE-202 και την τοποθετούμε μαζί με τις πλάκες στη συσκευή BTR-203 για να ξεπλυθούν από τα χημικά υγρά. Η συσκευή διαθέτει διάφανο PVC σωλήνα εκκένωσης νερού, ο οποίος συνδέεται στο κάτω μέρος της συσκευής. Η είσοδος νερού της συσκευής συνδέεται σε βρύση με απλό λάστιχο. Πριν την πρώτη χρήση προτείνεται η ευθυγράμμιση των σωληνών ψεκασμού της συσκευής. Οι σωλήνες ψεκασμού ευθυγραμμίζονται ώστε να πετυχαίνουν ελάχιστα στο κέντρο την σχάρα με την αποχάλκωμένη πλακέτα.

8η ΦΑΣΗ

ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΠΛΑΚΕΤΩΝ

Για το στέγνωμα των πλακετών χρησιμοποιήθηκε η συσκευή BWD-204. Οι πλακέτες τοποθετούνται στη συσκευή και η ξήρανση γίνεται εντός 10 δευτερολέπτων. Η συσκευή διαθέτει ιμάντα για την εισαγωγή και εξαγωγή των πλακετών και χρησιμοποιεί ένα μηχανοκίνητο σύστημα αποτελούμενο από δύο κυλίνδρους στεγνώματος, ανάμεσα από τους οποίους περνά η πλακέτα. Η εξαγωγή των πλακετών γίνεται από την σχισμή που βρίσκεται στην πρόσοψη της συσκευής.

9η ΦΑΣΗ

ΚΟΨΙΜΟ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ

Τέλος με το ψαλίδι πάγκου MS-6 κόψαμε τα τεμάχια των κεραιών στις επιθυμητές διαστάσεις.

Όλη η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ηλεκτρονικών αισθητήρων του ΕΜΠ.

Ακολούθησε καθαρισμός των κεραιών από το φωτοευαίσθητο υλικό που είχε παραμείνει πάνω τους και προσθήκη των SMA στο εργαστήριο μικροκυμάτων του ΕΜΠ. Η τελική μορφή των κεραιών φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

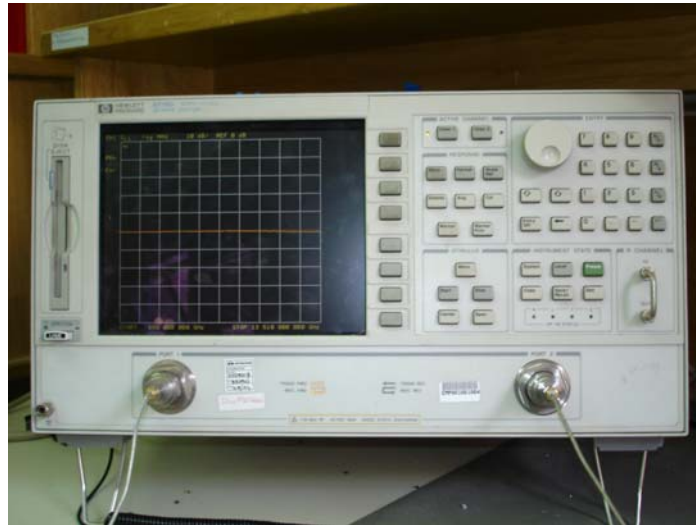


Σχήμα 5.2 Τυπωμένες κεραίες

5.2 Διαδικασία μετρήσεων

5.2.1 Network Analyzer

Η μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης S_{11} των κεραίων έγινε με χρήση του Network Analyzer του εργαστηρίου μικροκυμάτων του ΕΜΠ, μοντέλο Hewlett Packard 8719D (Σχήμα 5.3). Ο Network Analyzer είναι ένα όργανο μέτρησης διαφόρων χαρακτηριστικών ενός κυκλώματος, που μπορεί να είναι είτε σε μορφή πλακέτας είτε να αποτελεί διακριτό στοιχείο ενός κυκλώματος μετάδοσης ή λήψης (π.χ. καλώδια, κεραίες κ.λ.π.). Το όργανο αυτό έχει δύο κανάλια επικοινωνίας με το κύκλωμα: τη θύρα μετάδοσης και τη θύρα ανάκλασης (transmission port, reflection port).



Σχήμα 5.3 Network Analyzer

Η θύρα ανάκλασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση πολλών χαρακτηριστικών του κυκλώματος, όπως:

- Το συντελεστή ανάκλασης, σε κάθε θύρα του κυκλώματος
- Το μέτρο του ανακλώμενου κύματος
- Τη φάση και τη καθυστέρηση ομάδας του ανακλώμενου κύματος
- Το πραγματικό και φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης εισόδου και εξόδου του κυκλώματος
- Το λόγο στάσιμων κυμάτων

Η θύρα μετάδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση παρόμοιων χαρακτηριστικών του κυκλώματος, όπως:

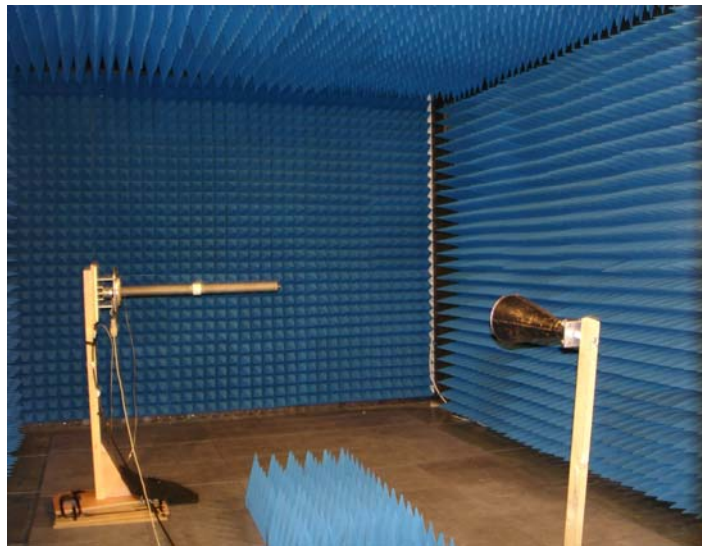
- Το συντελεστής μετάδοσης, από μια θύρα του κυκλώματος σε άλλη
- Το μέτρο του μεταδιδόμενου κύματος
- Τη φάση και τη καθυστέρηση ομάδας του μεταδιδόμενου κύματος

Η απεικόνιση των παραπάνω μεγεθών μπορεί να γίνει είτε σε καρτεσιανό είτε σε πολικό διάγραμμα ή και σε χάρτη Smith.

Με κατάλληλες ρυθμίσεις των καναλιών 1 και 2, ο Network Analyzer μπορεί επίσης να μετρήσει την ισχύ εισόδου και εξόδου ενός κυκλώματος, τις απώλειες μετατροπής που εισάγει το κύκλωμα, την AM καθυστέρηση του κυκλώματος και τις απώλειες καλωδίων.

Το κύριο χαρακτηριστικό που μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε βέβαια είναι ο συντελεστής ανάκλασης συναρτήσεως της συχνότητας. Αφού έγιναν τα απαραίτητα setup και calibration πραγματοποιήθηκε η μέτρηση του συντελεστή S_{11} των κεραιών. Τα δεδομένα αποθηκεύτηκαν στο floppy disk drive που είναι ενσωματωμένο στο μηχάνημα.

5.2.2 Ανηχοικός θάλαμος



Σχήμα 5.4 Άποψη Ανηχοικού θαλάμου/μέτρηση θ-επιπέδου

Στο παραπάνω σχήμα δίνεται μια άποψη του ανηχοικού θαλάμου όπου και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Η αρχή που εφαρμόζεται είναι απλή: Έχουμε ως κεραία εκπομπής μια χοανοκεραία (Σχήμα 5.5) η οποία είναι ιδιαίτερα κατευθυντική και εκπέμπει επίπεδο κύμα

κατακόρυφης ή οριζόντιας πόλωσης ανάλογα σε ποια από τις δύο εισόδους την τροφοδοτούμε. Η ισχύς εκπομπής της χοανοκεραίας προέρχεται από μια γεννήτρια *Marconi 6311* (Σχήμα 5.6) που μπορεί να προσδώσει μέγιστη ισχύ 17dBm και δίνει σήματα συχνοτήτων 10MHz-20GHz· το εκπεμπόμενο σήμα μπορεί να είναι διαμορφωμένο κατά πολλούς τρόπους ωστόσο εμείς χρησιμοποιούμε αδιαμόρφωτο φέρον (CW).



Σχήμα 5.5 Χοανοκεραία



Σχήμα 5.6 Sweep Generator: Marconi 6311

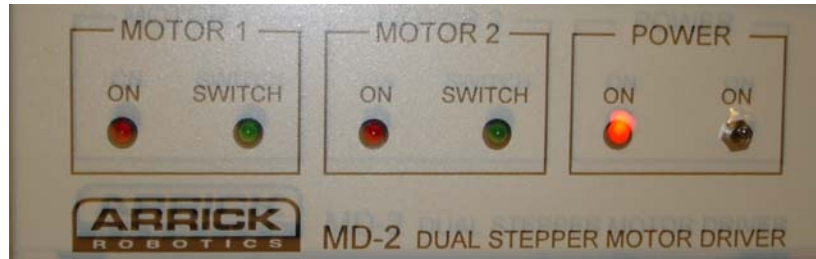
Η κεραία προς μέτρηση στηρίζεται σε στρεφόμενη διάταξη που αποτελείται από έναν ρότορα ελεγχόμενο από Η/Υ (*Dual Stepper Motor Driver: Arrick Robotics MD-2*, Σχήμα 5.8). Το σήμα λήψης οδηγείται στον Spectrum

analyzer Hewlett Packard 8565E (Σχήμα 5.7) ο οποίος μας δίνει την δυνατότητα μέτρησης μέχρι και -80 dbm σήματος, όριο πέραν του οποίου το σήμα δεν διαχωρίζεται από τον θόρυβο με ορατή διαφορά. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων φροντίζαμε η Marconi να δίνει σταθερή ισχύ (συνήθως 10 dbm) και περιστρέφοντας τον ρότορα καταγράψαμε την λαμβανόμενη ισχύ. Στη συνέχεια κανονικοποιούμε τις τιμές που καταγράψαμε ως προς το μηδέν και έτσι προκύπτει το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας.

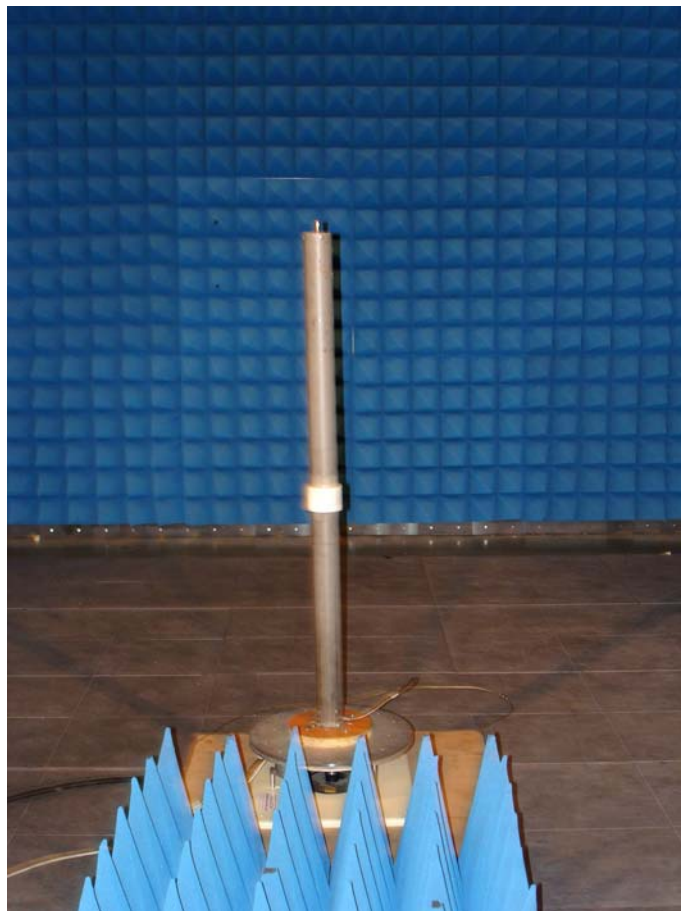
Για τις μετρήσεις στο φ-επίπεδο χρησιμοποιείται η διάταξη του σχήματος 5.9, ενώ για το θ-επίπεδο στηρίζουμε τον ρότορα σε κατακόρυφη βάση και χρησιμοποιούμε connector σχήματος ορθής γωνίας (Σχήμα 5.4). Και στις δύο διατάξεις είναι σημαντική η σωστή ευθυγράμμιση κεραίας εκπομπής με κεραία λήψης. Πρέπει επίσης να παρατηρήσουμε πως στο θ-επίπεδο έχουμε ένα μεγαλύτερο σφάλμα κατά τις μετρήσεις καθώς ο άξονας περιστροφής δεν είναι στο κέντρο της κεραίας αλλά στο σημείο τροφοδοσίας (στο SMA).



Σχήμα 5.7 Spectrum analyzer



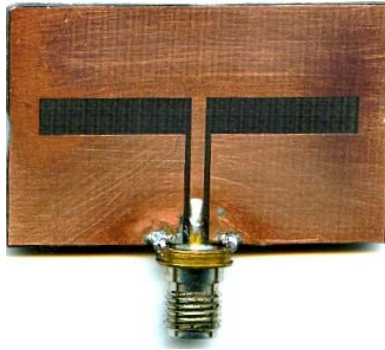
Σχήμα 5.8 Dual Stepper Motor Driver: arrick Robotics MD-2



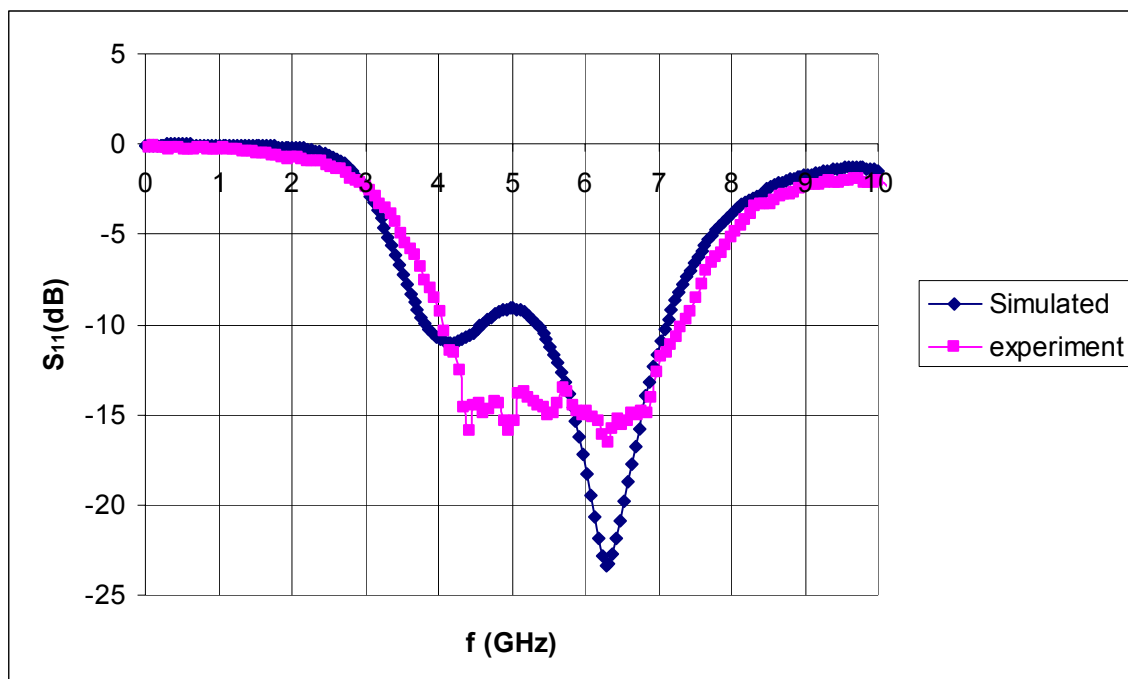
Σχήμα 5.9 Διάταξη για μέτρηση του φ-επιπέδου

5.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

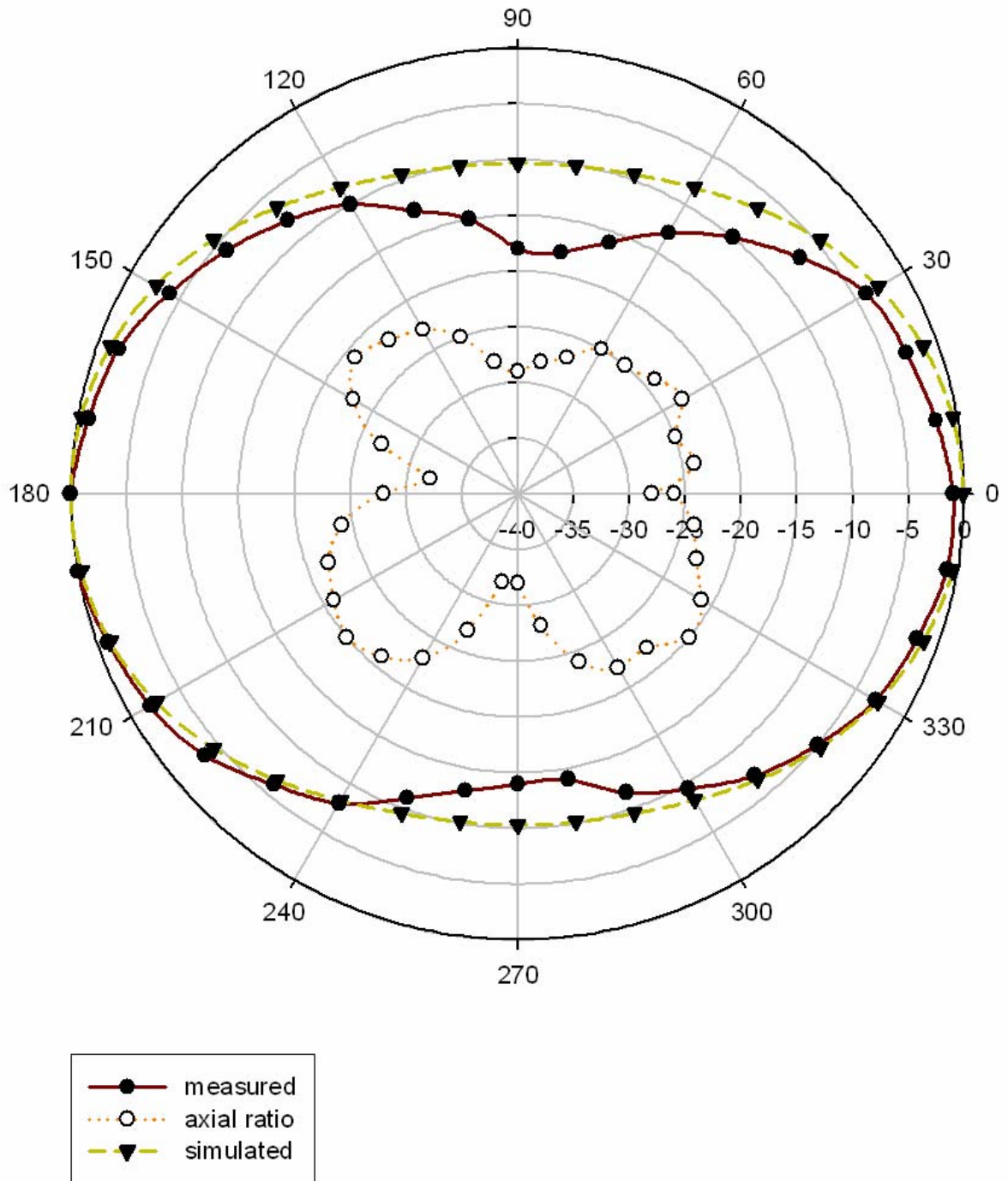
5.3.1 Ορθογωνική σχισμοκεραία χωρίς transition



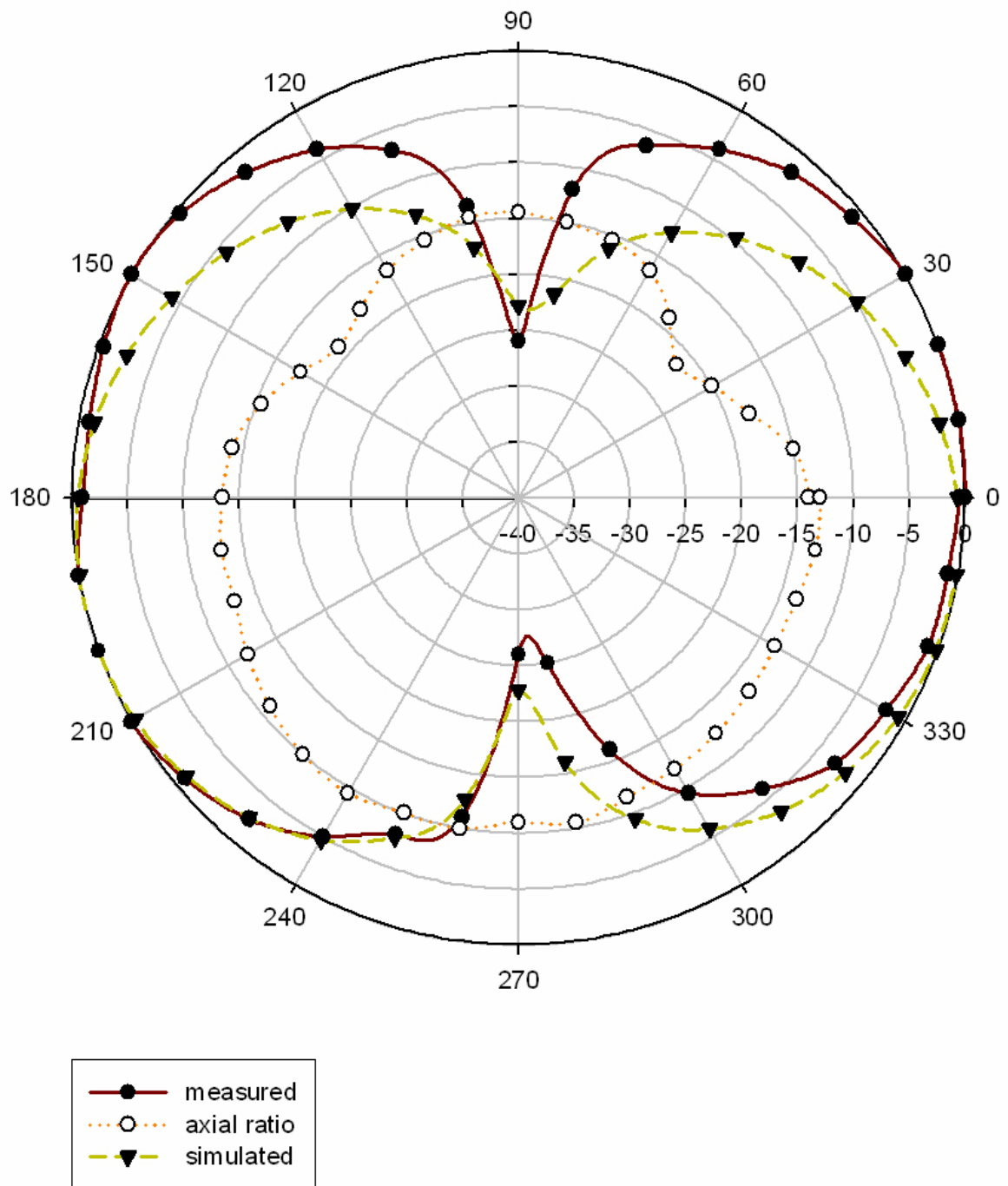
Σχήμα 5.10 Ορθογωνική σχισμοκεραία χωρίς transition



Σχήμα 5.11 S_{11} Ορθογωνικής σχισμοκεραίας χωρίς transition



Σχήμα 5.12 Ορθογωνική σχισμοκεραία χωρίς transition, $f = 5.5$ GHz, ϕ -επίπεδο

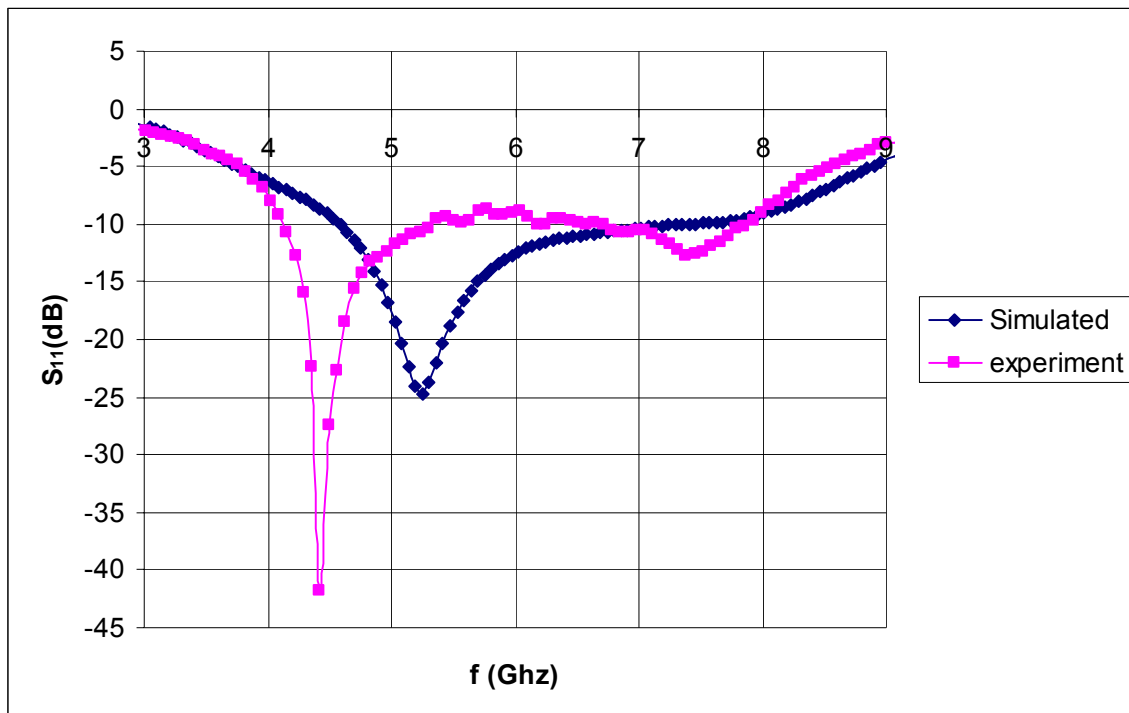


Σχήμα 5.13 Ορθογωνική σχισμοκεραία χωρίς transition, $f = 5.5$ GHz, θ -επιπέδο

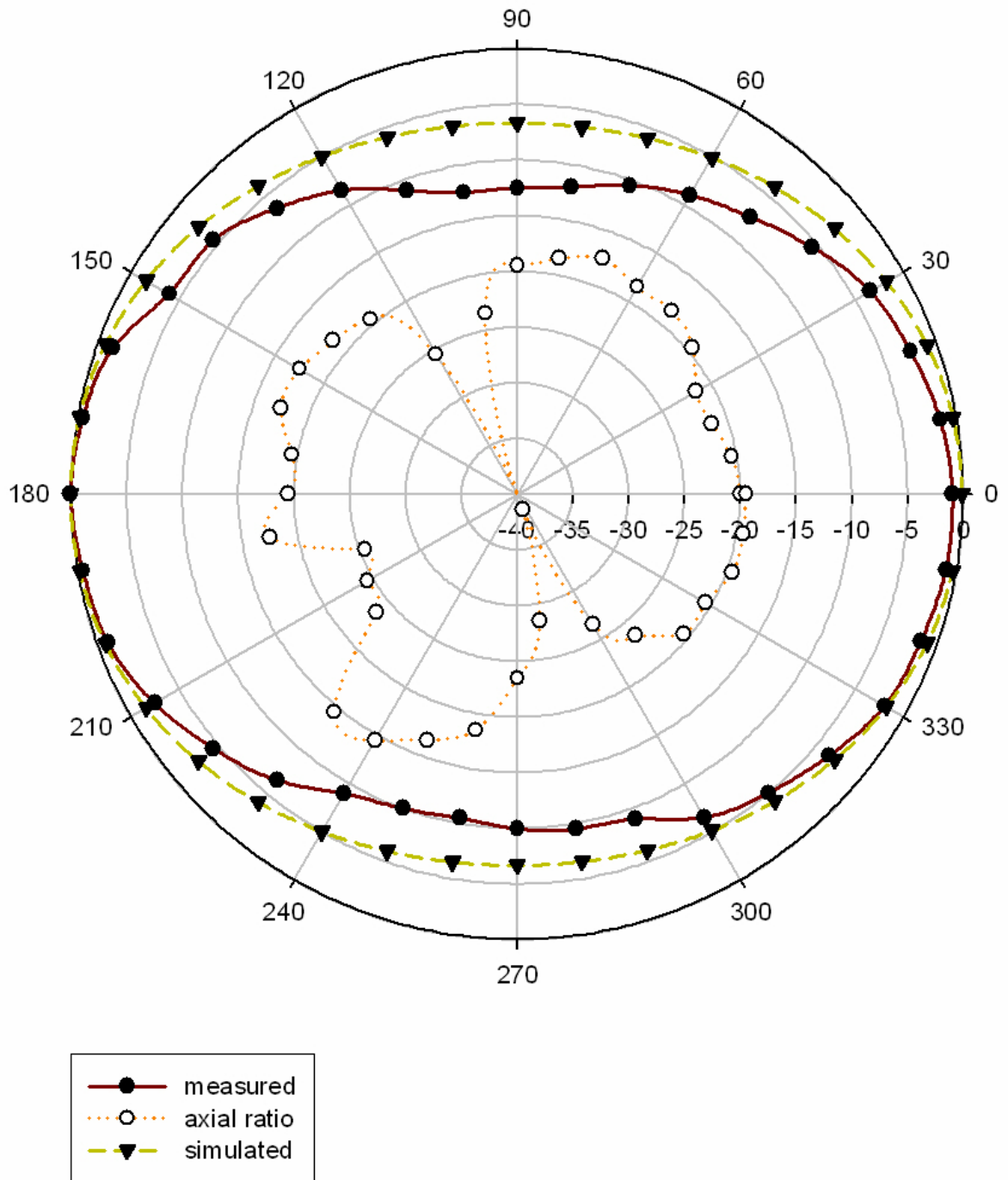
5.3.2 Ορθογωνική σχισμοκεραία με transition



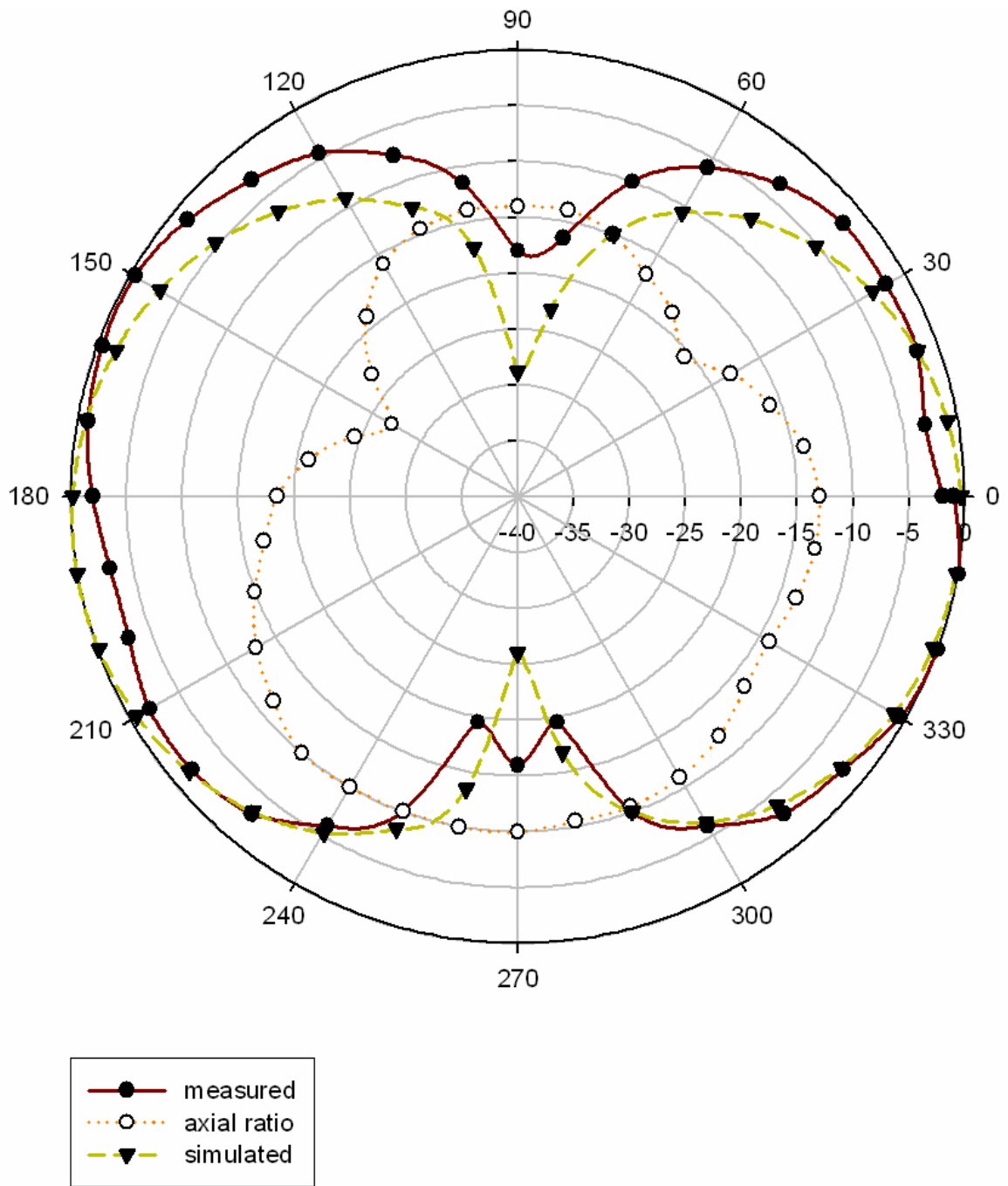
Σχήμα 5.14 Ορθογωνική σχισμοκεραία με transition



Σχήμα 5.15 S₁₁ ορθογωνικής σχισμοκεραίας με transition

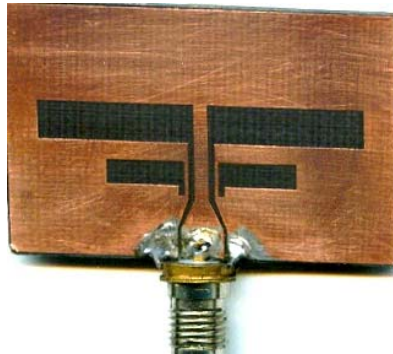


Σχήμα 5.16 Ορθογωνική σχισμοκεραία με transition, $f = 4.5$ GHz, ϕ -επίπεδο

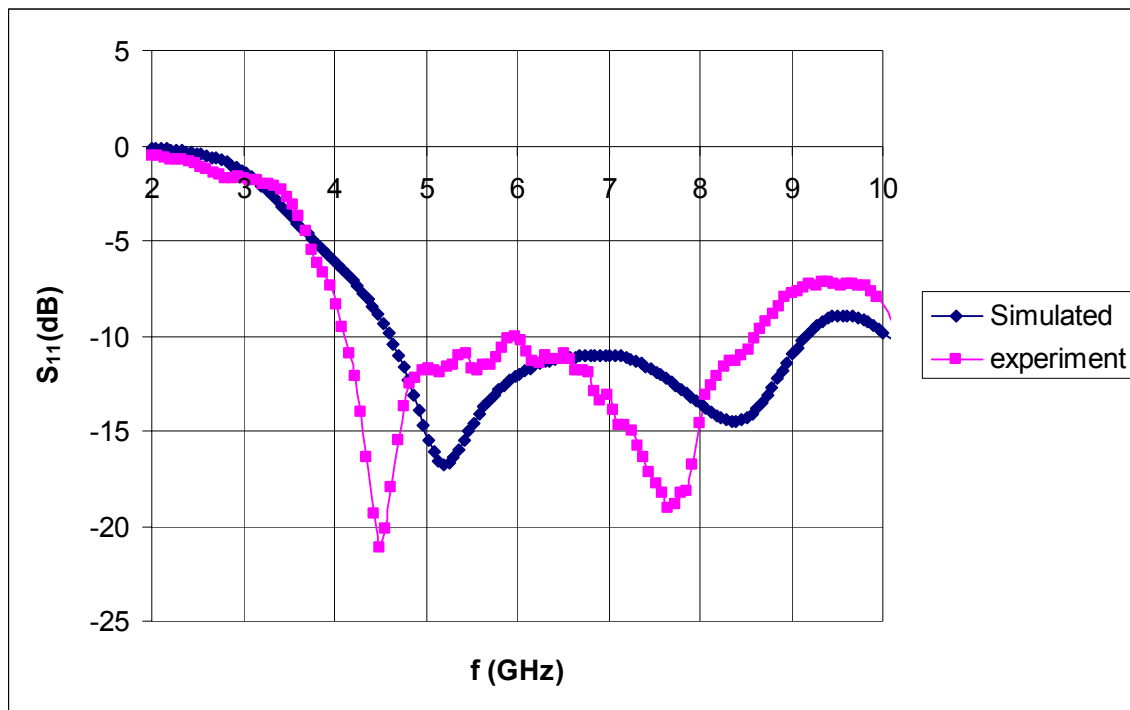


Σχήμα 5.17 Ορθογωνική σχισμοκεραία με transition, $f = 4.5 \text{ GHz}$, θ -επίπεδο

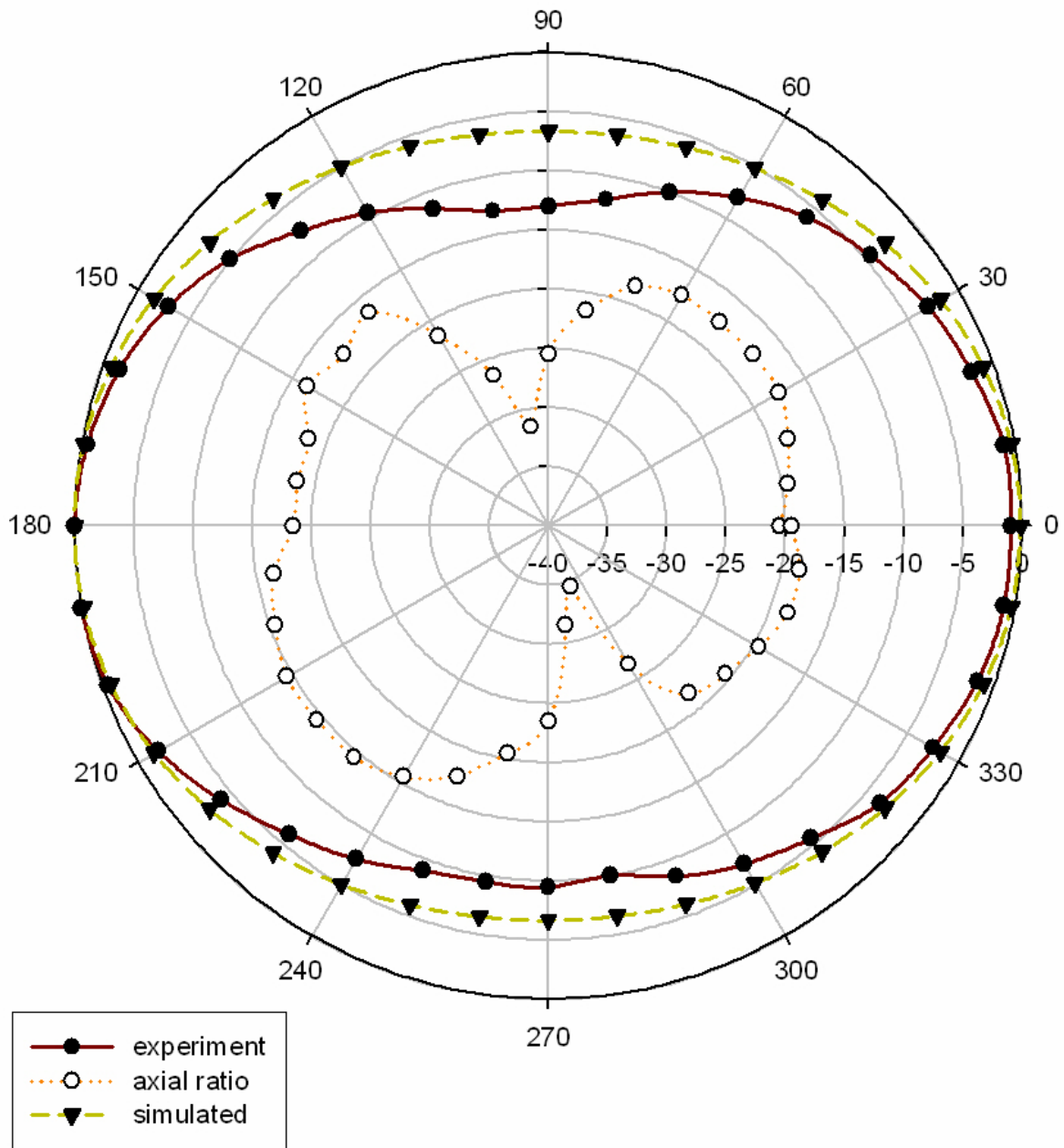
5.3.3 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία



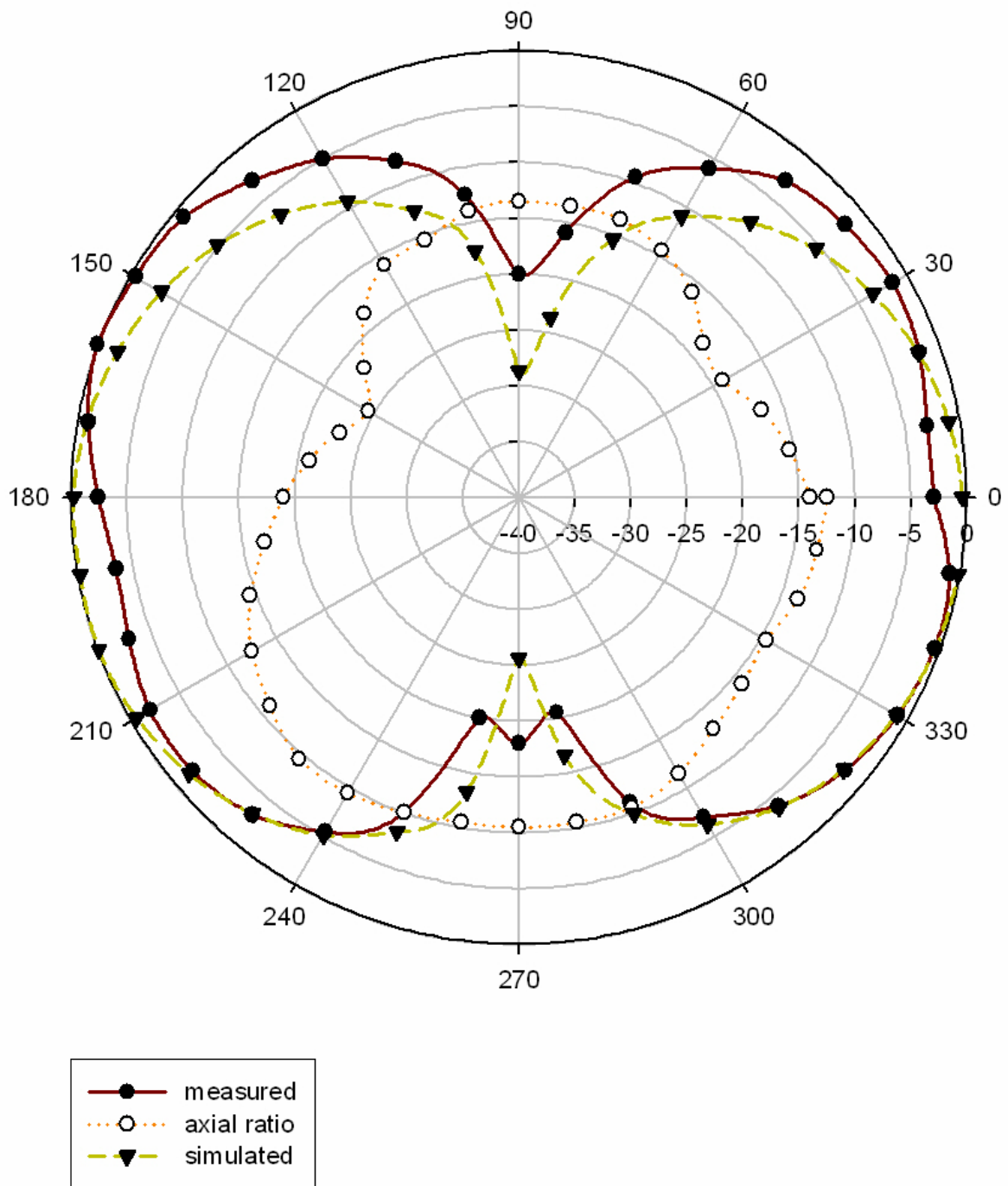
Σχήμα 5.18 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία



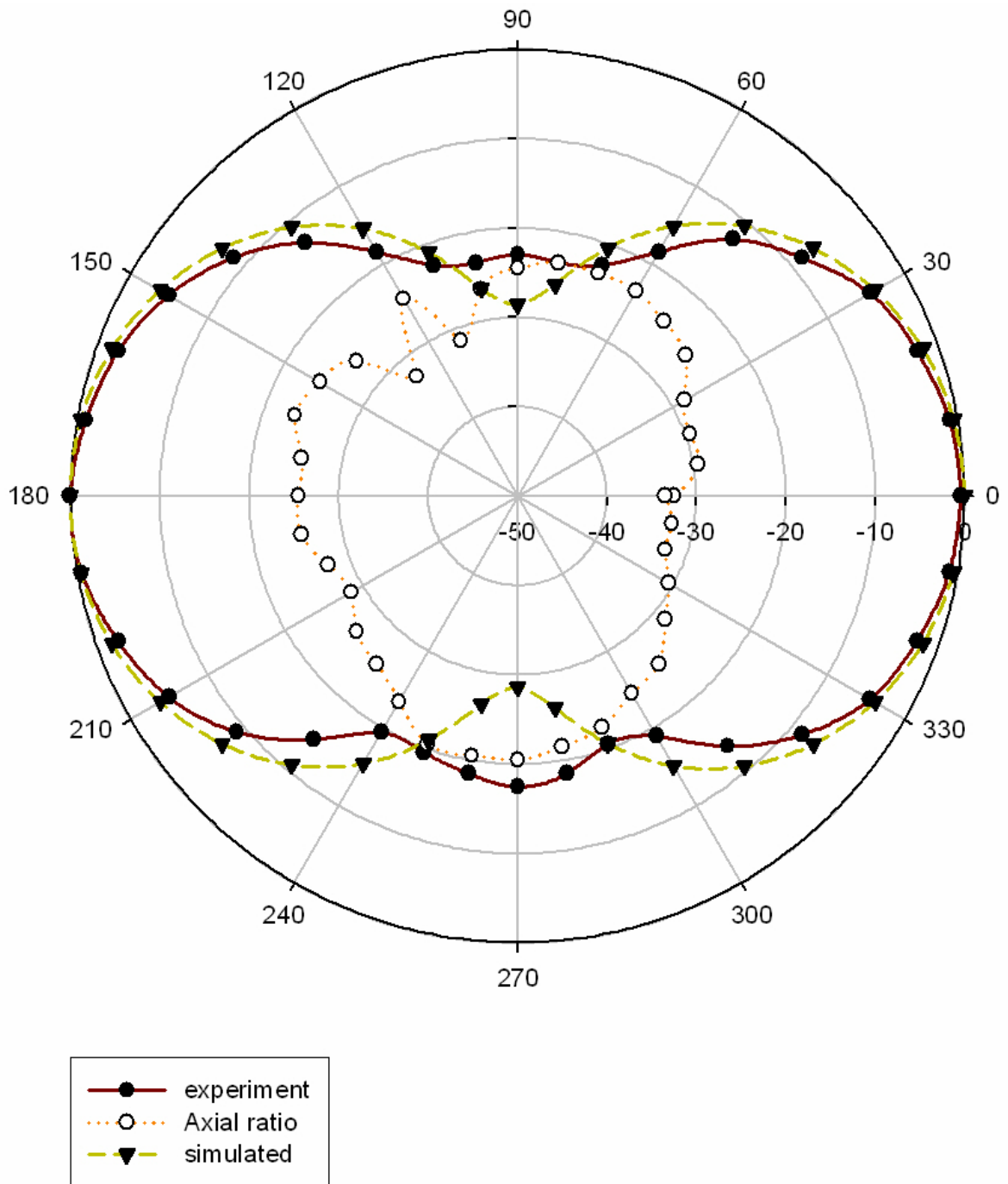
Σχήμα 5.19 S₁₁ ορθογωνικής σχισμοκεραίας με παρασιτικά στοιχεία



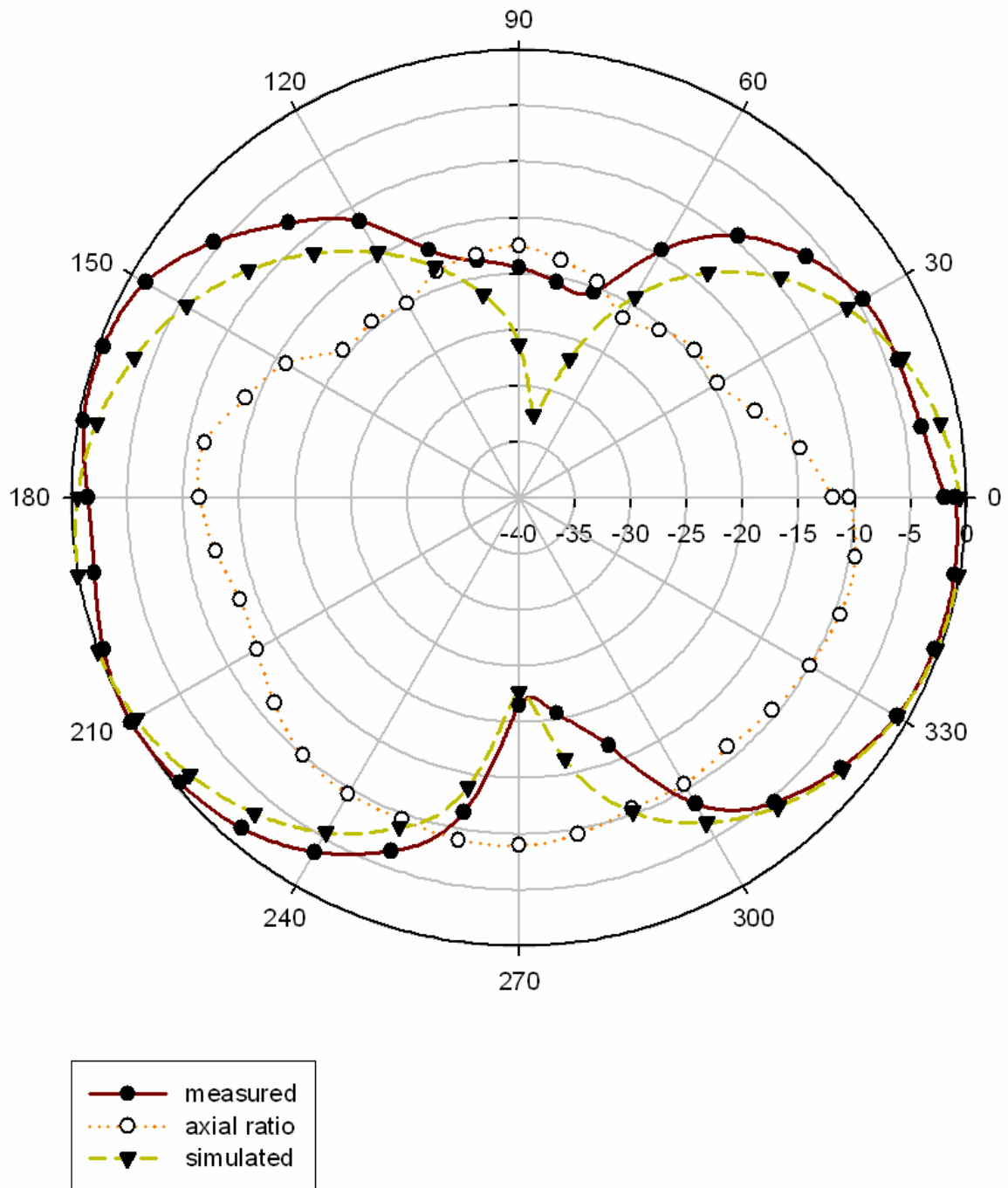
Σχήμα 5.20 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 4.5$ GHz, ϕ -επίπεδο



Σχήμα 5.21 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 4.5$ GHz, θ -επίπεδο

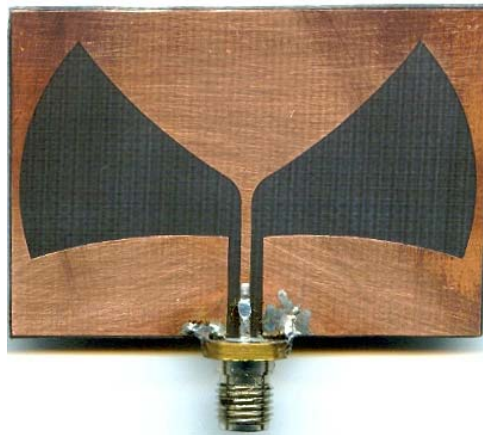


Σχήμα 5.22 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 7$ GHz, ϕ -επίπεδο

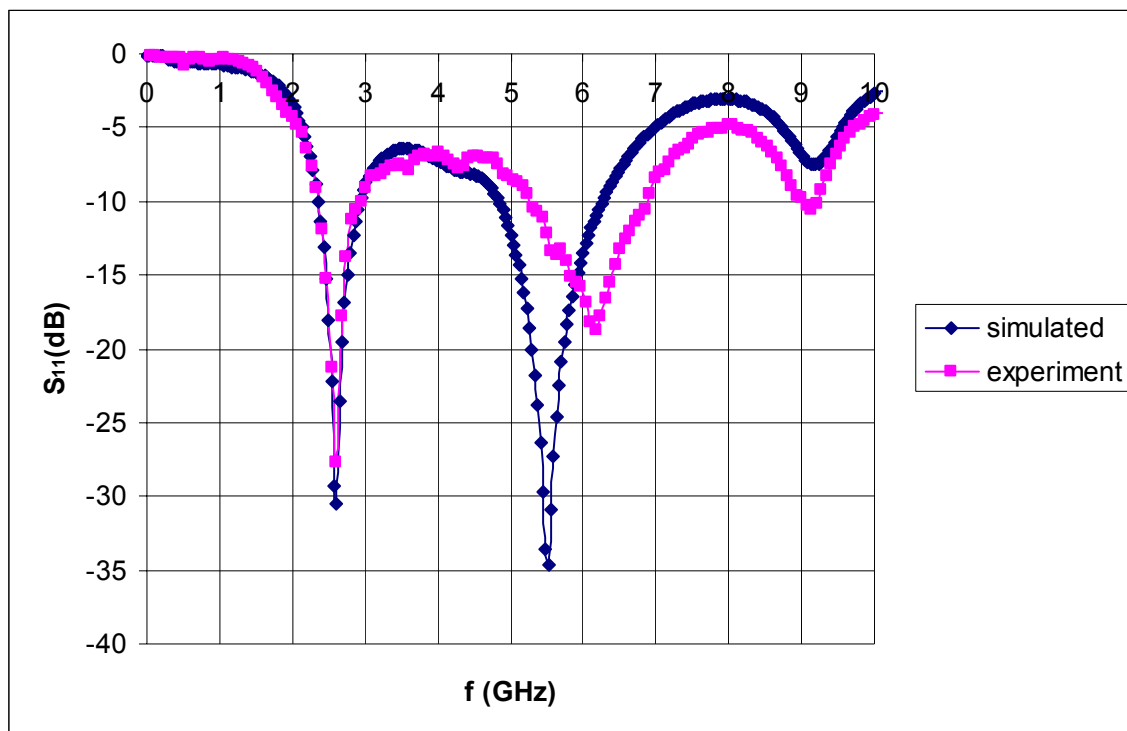


Σχήμα 5.23 Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 7$ GHz, θ -επίπεδο

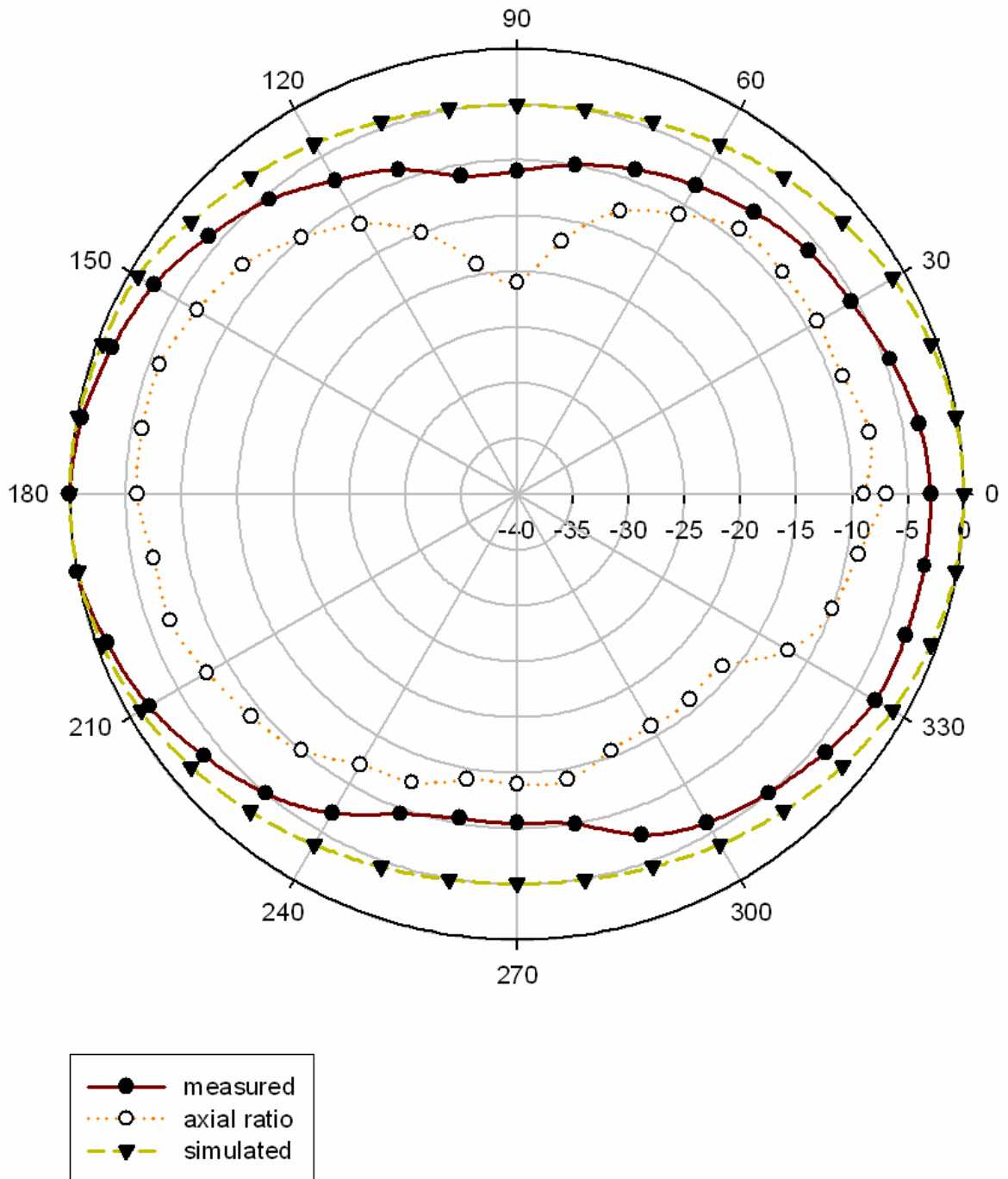
5.3.4 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία



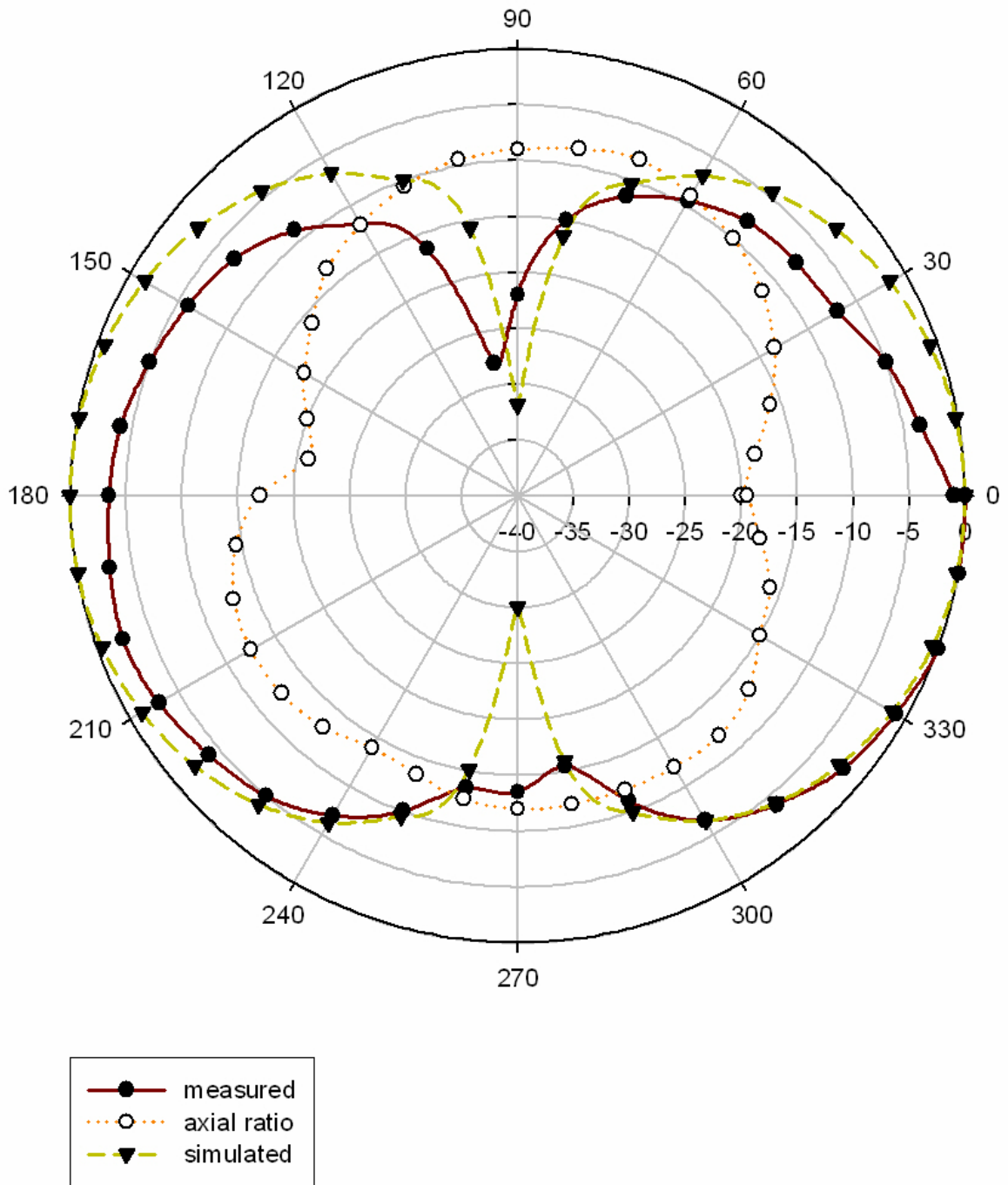
Σχήμα 5.24 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία



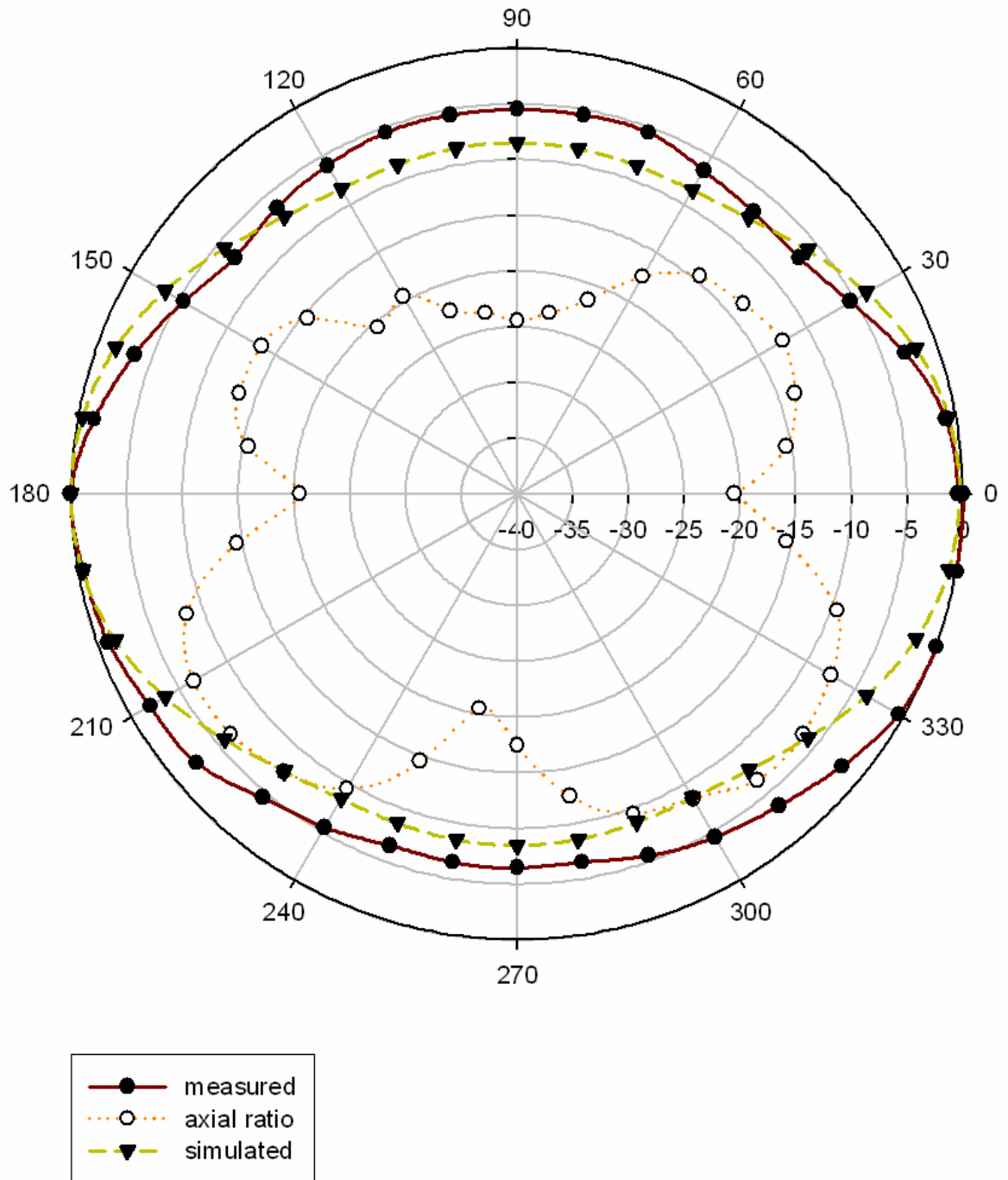
Σχήμα 5.25 S₁₁ Καμπυλωμένης bow-tie κεραίας



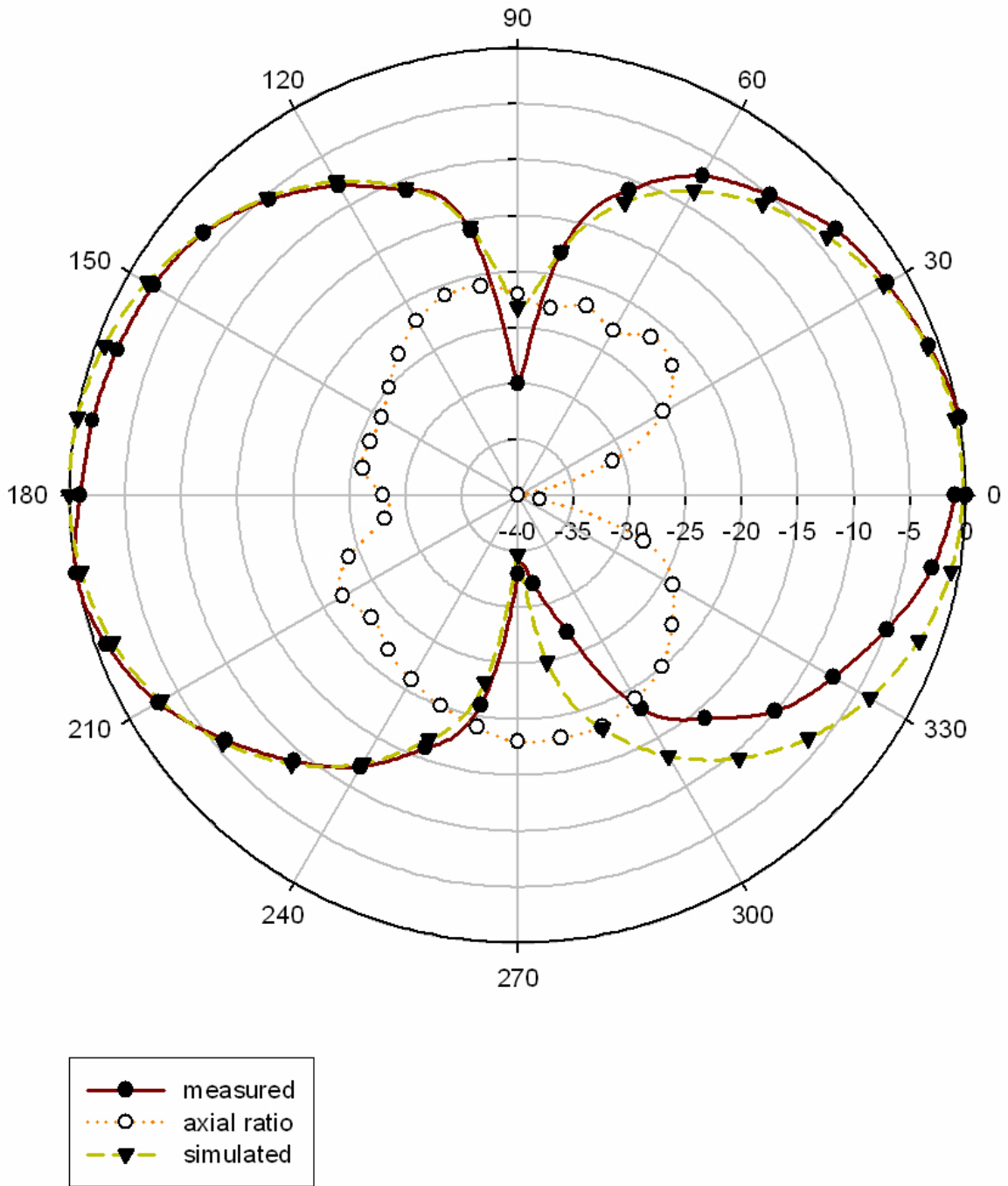
Σχήμα 5.26 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία, $f = 2.5$ GHz, φ -επίπεδο



Σχήμα 5.27 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία, $f = 2.5$ GHz, θ -επίπεδο

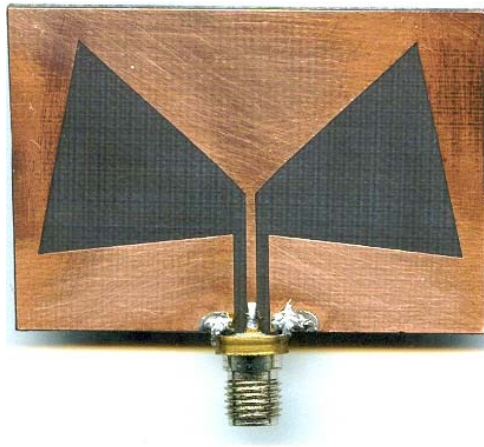


Σχήμα 5.28 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία, $f = 6$ GHz, ϕ -επίπεδο

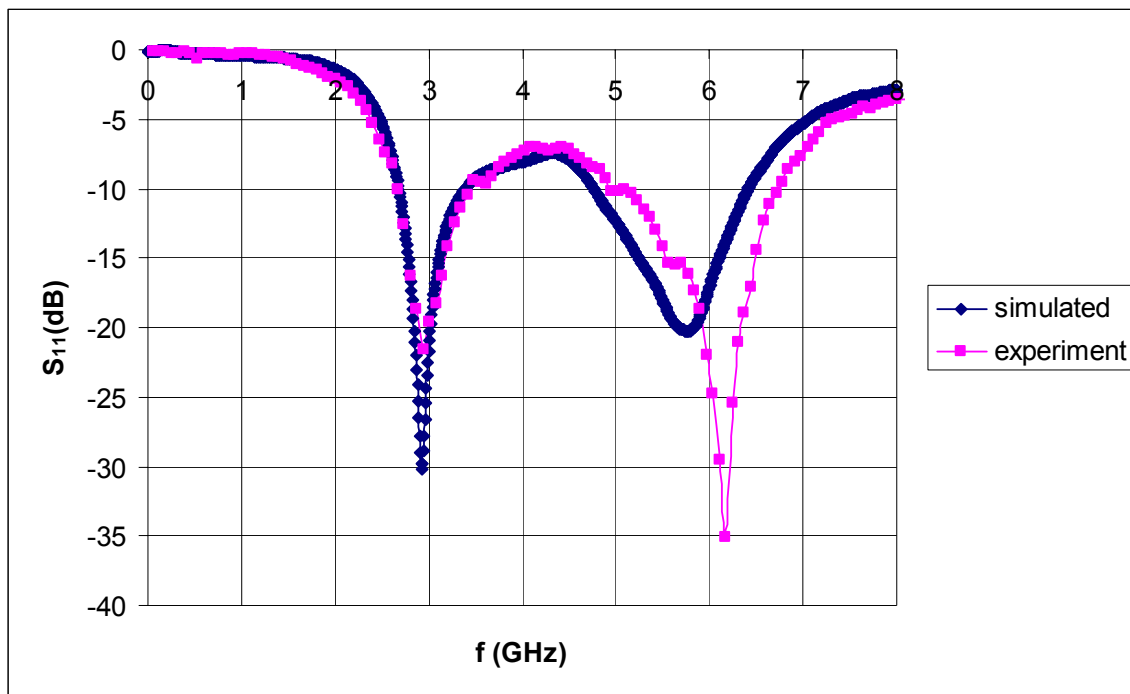


Σχήμα 5.29 Καμπυλωμένη bow-tie κεραία, $f = 6 \text{ GHz}$, θ -επίπεδο

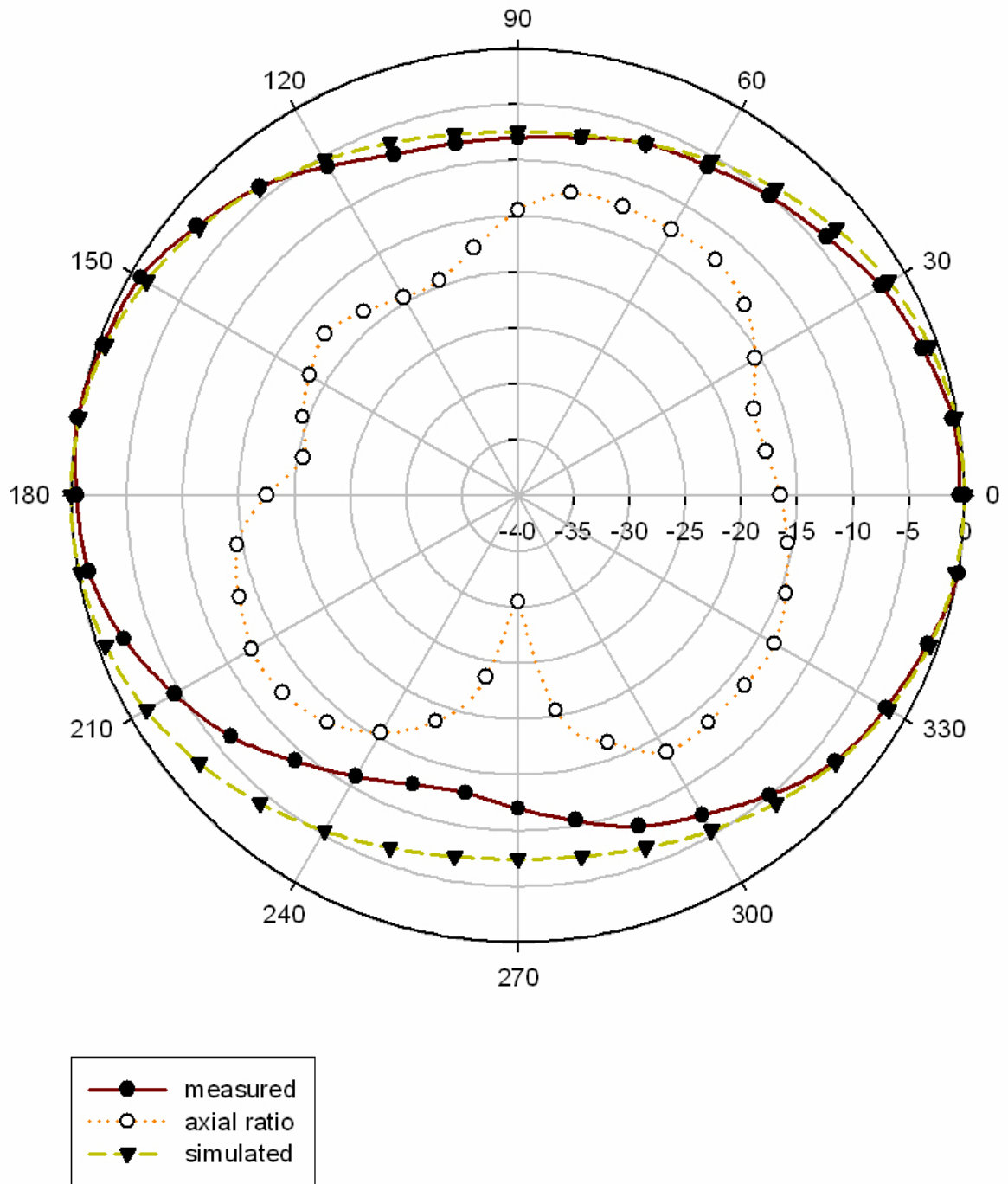
5.3.5 Αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie κεραίας



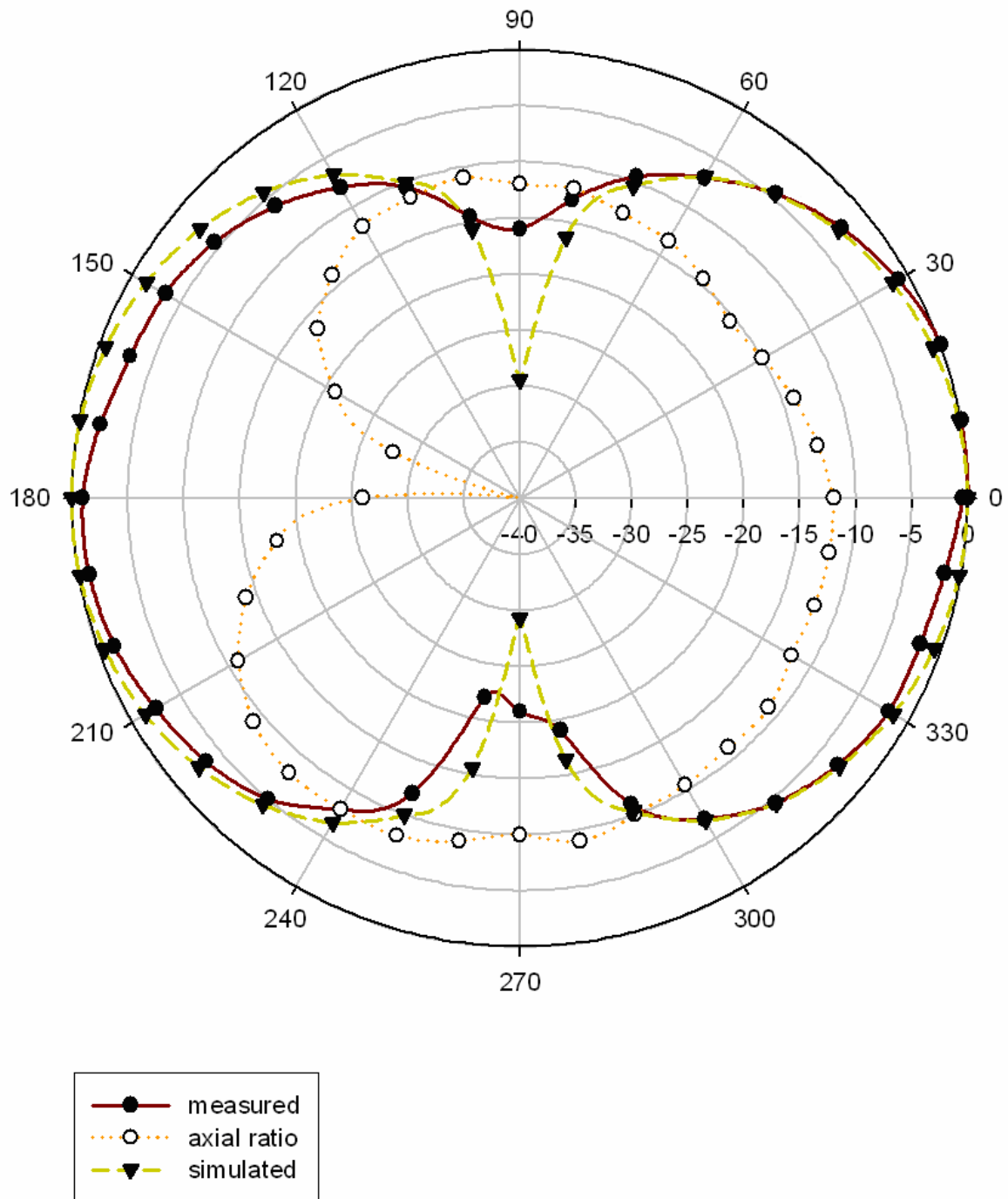
Σχήμα 5.30 Αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie κεραίας



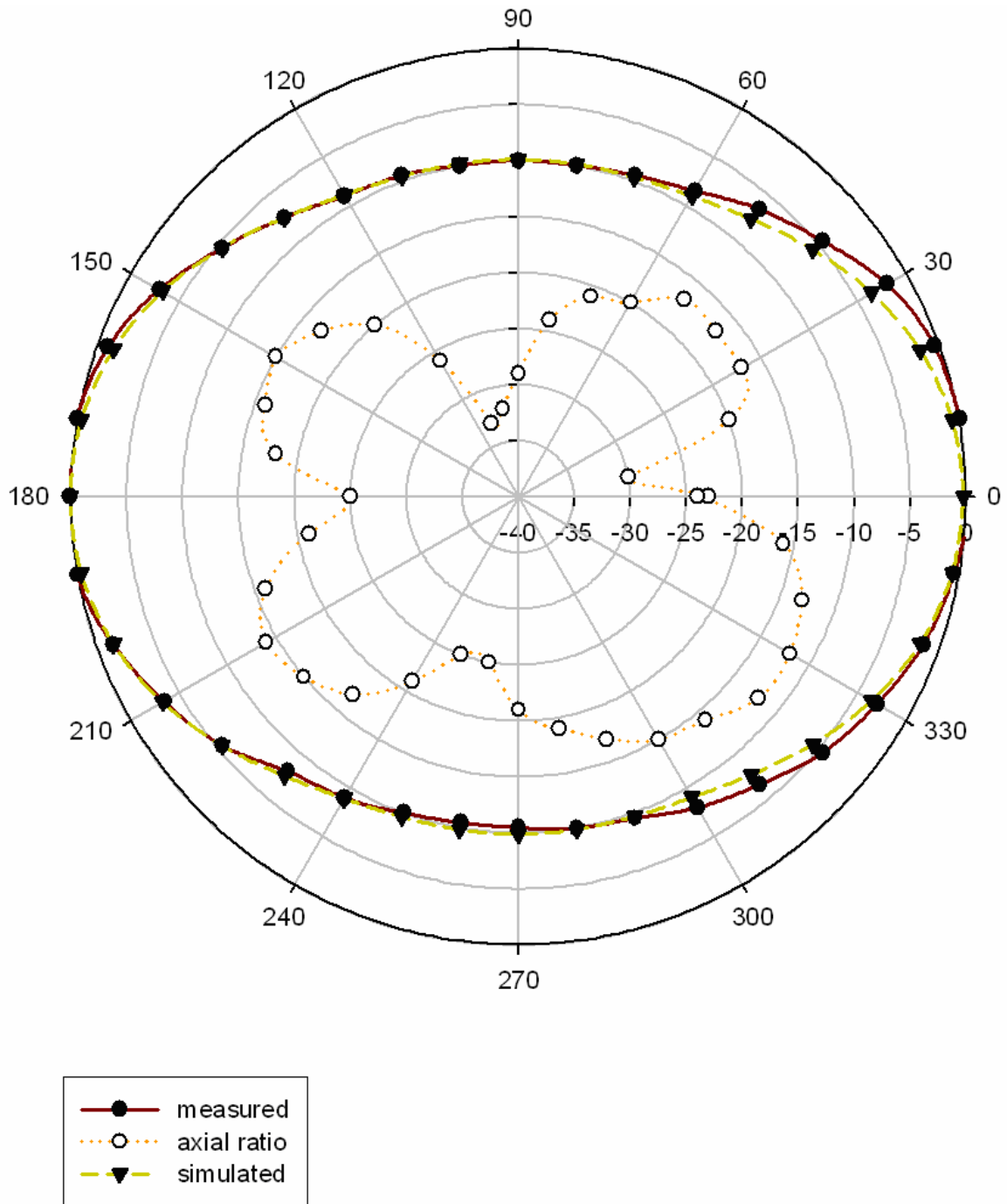
Σχήμα 5.31 S₁₁ Αντίστοιχου γραμμικού μοντέλου καμπυλωμένης bow-tie



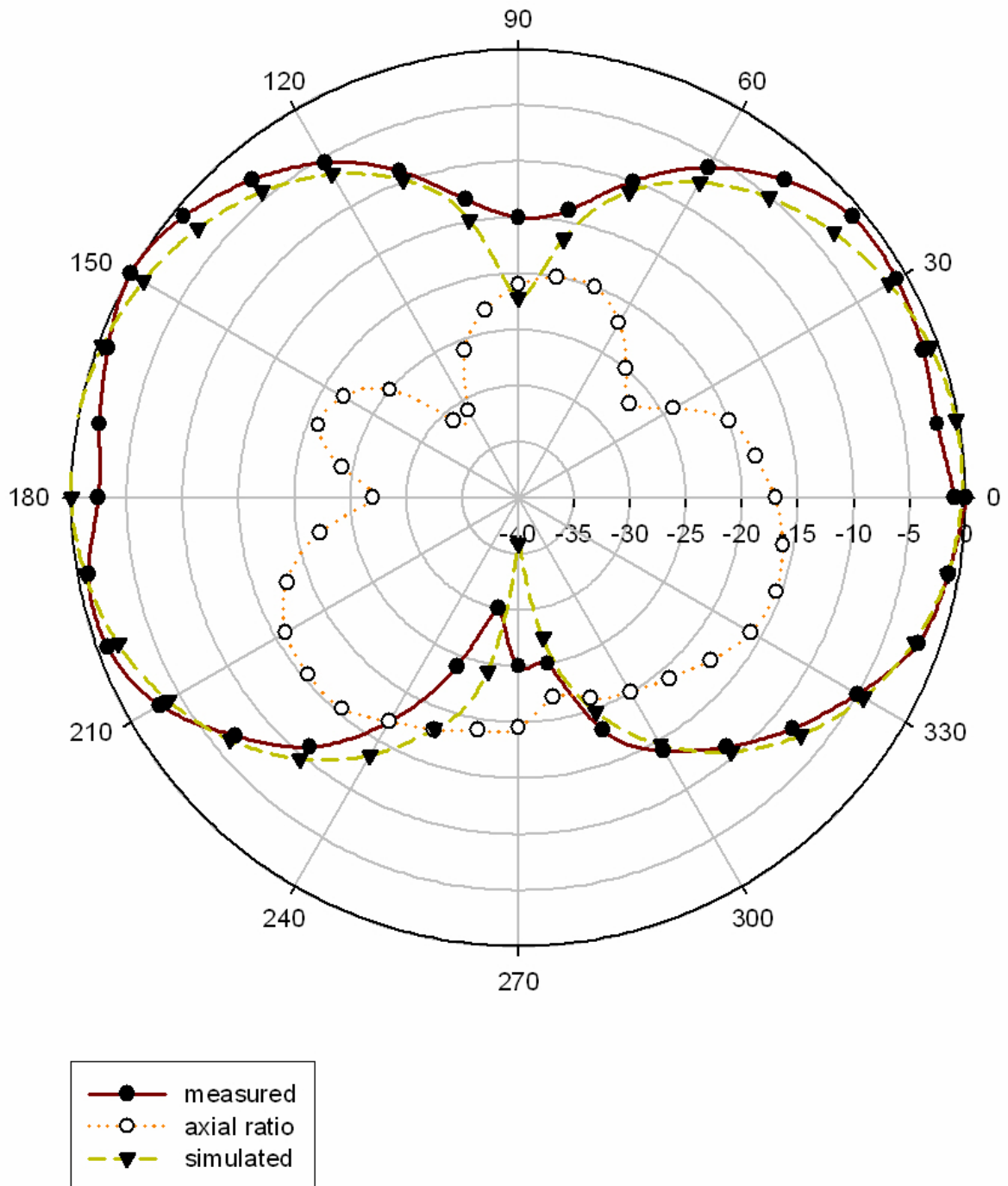
Σχήμα 5.32 Αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie, $f = 3 \text{ GHz}$, ϕ -επίπεδο



Σχήμα 5.33 Αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie, $f = 3$ GHz, θ -επίπεδο

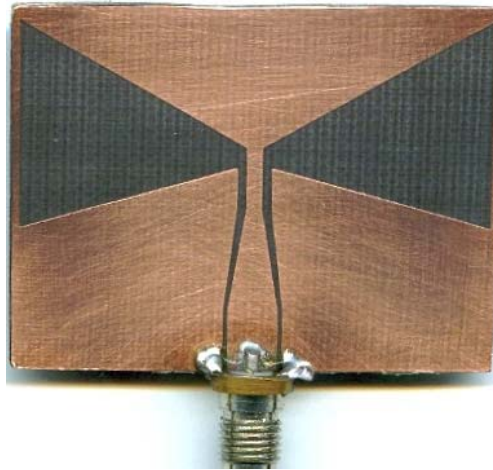


Σχήμα 5.34 Αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie, $f = 6$ GHz, φ -επίπεδο

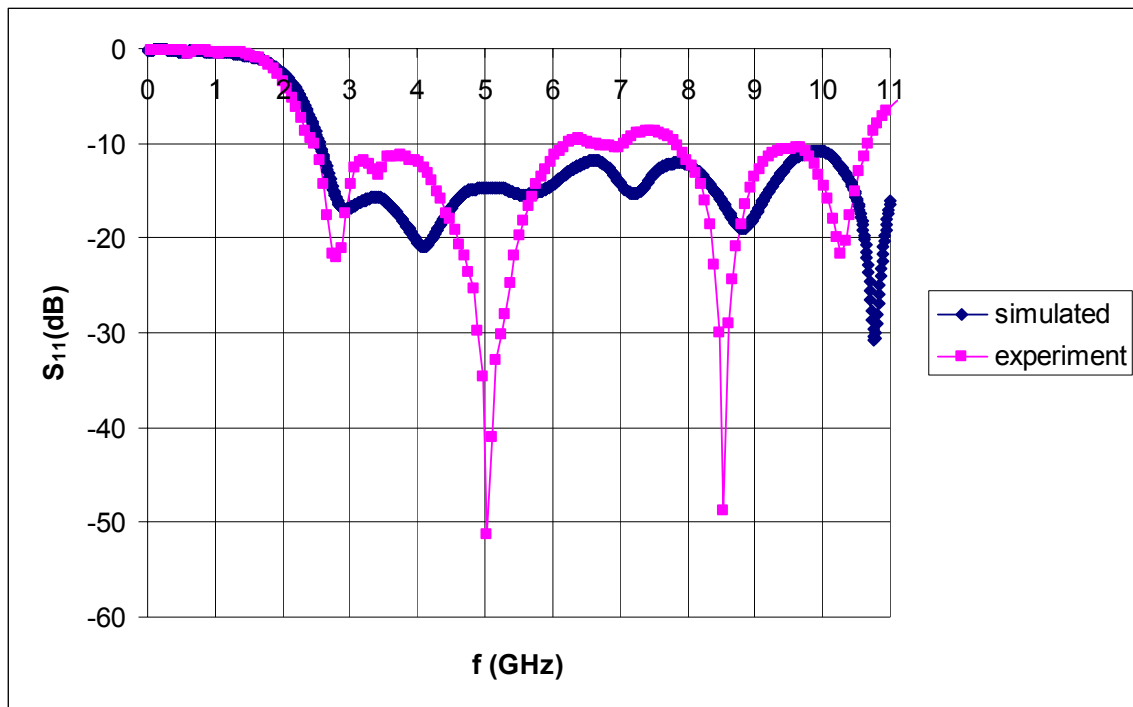


Σχήμα 5.35 Αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie, $f = 6$ GHz, θ -επίπεδο

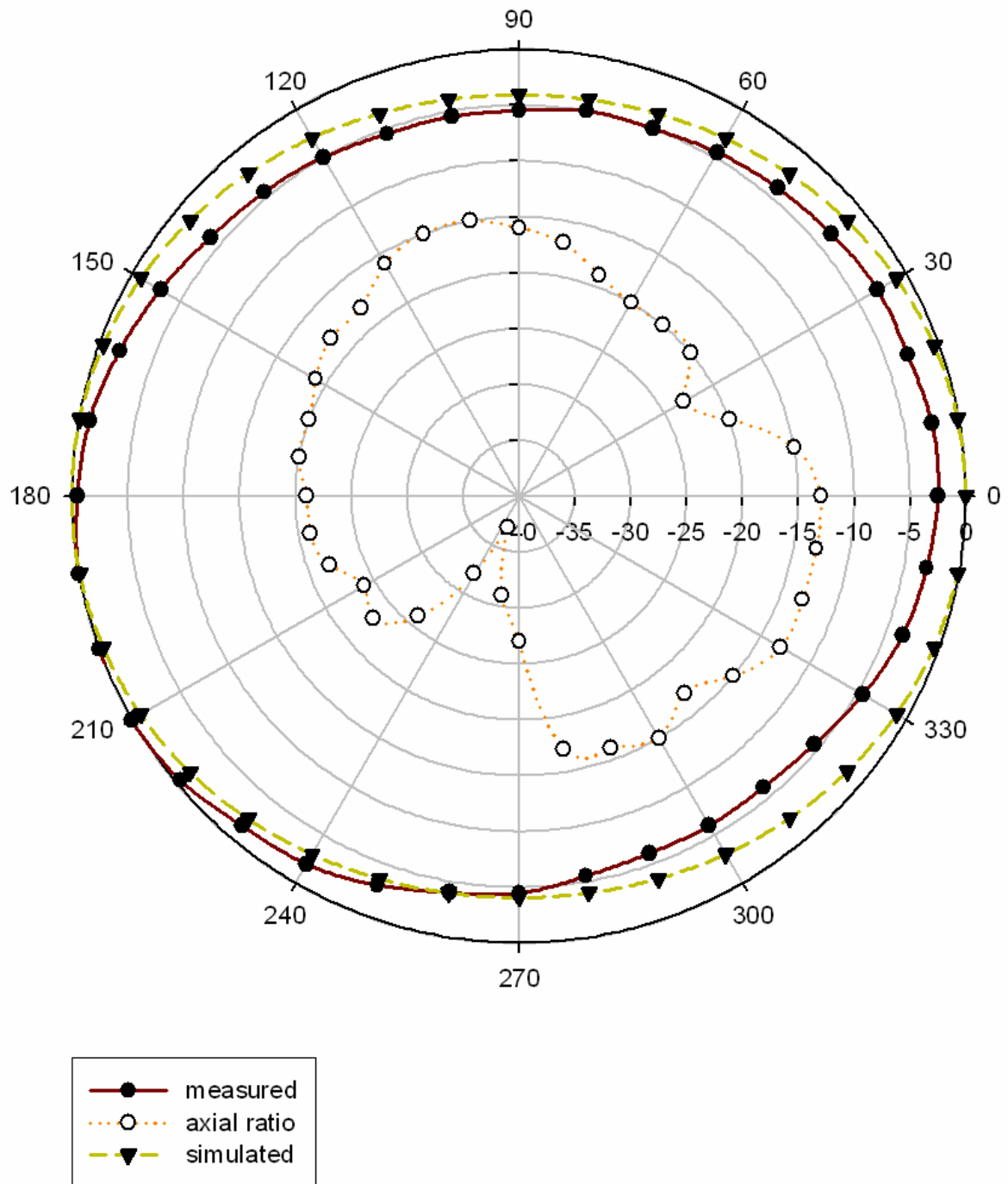
5.3.6 bow-tie κεραία



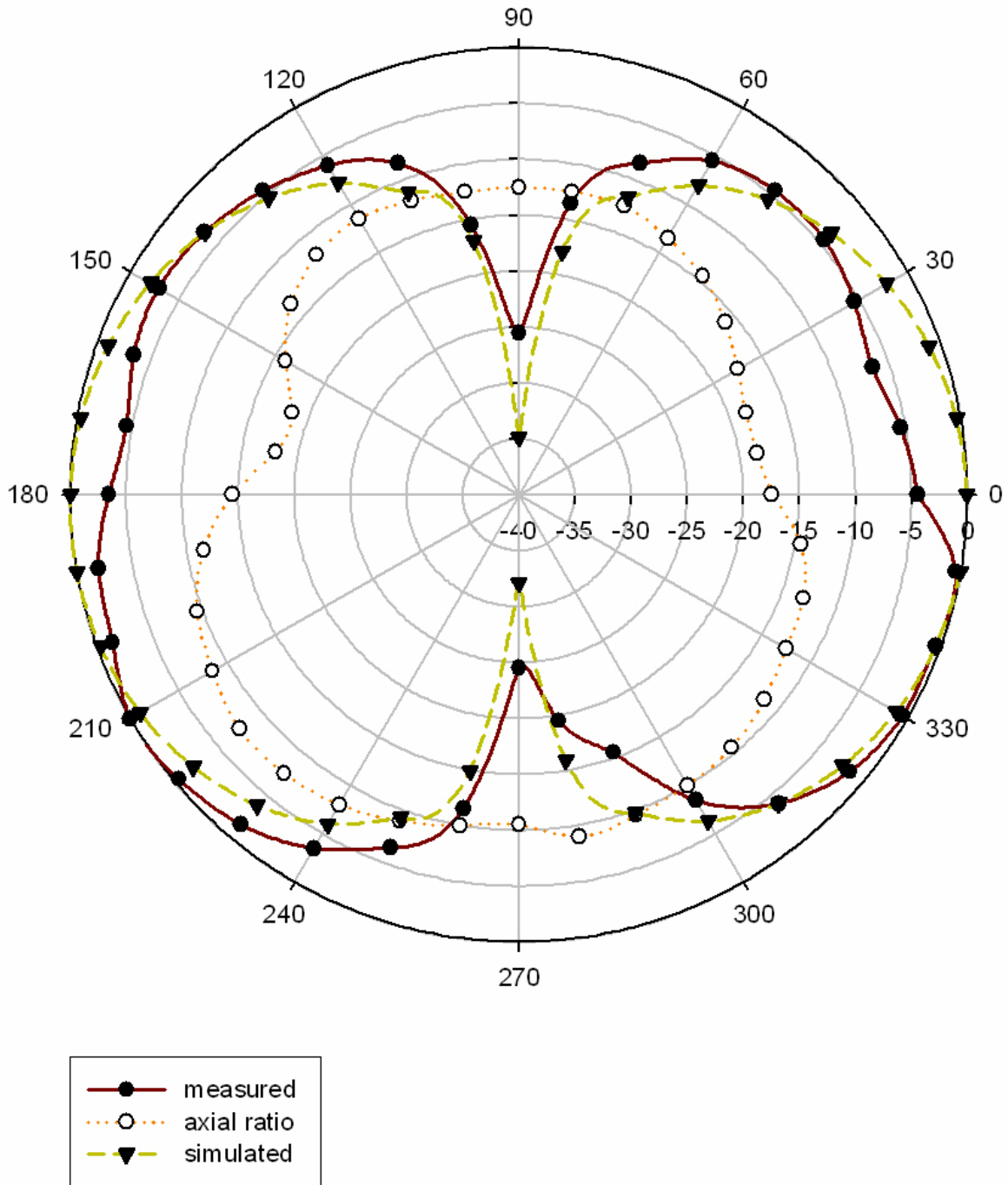
Σχήμα 5.36 bow-tie κεραία



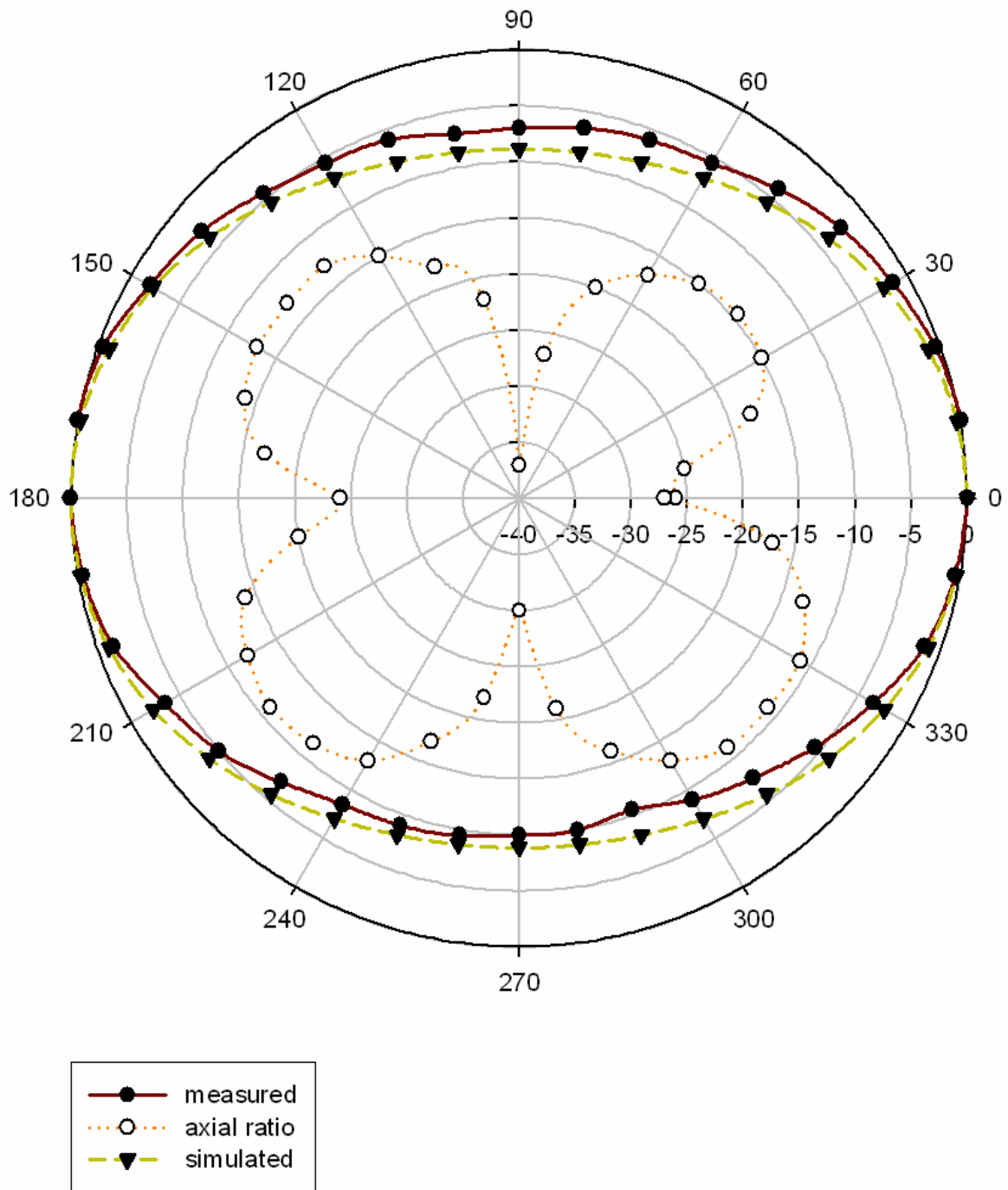
Σχήμα 5.37 S₁₁ bow-tie κεραίας



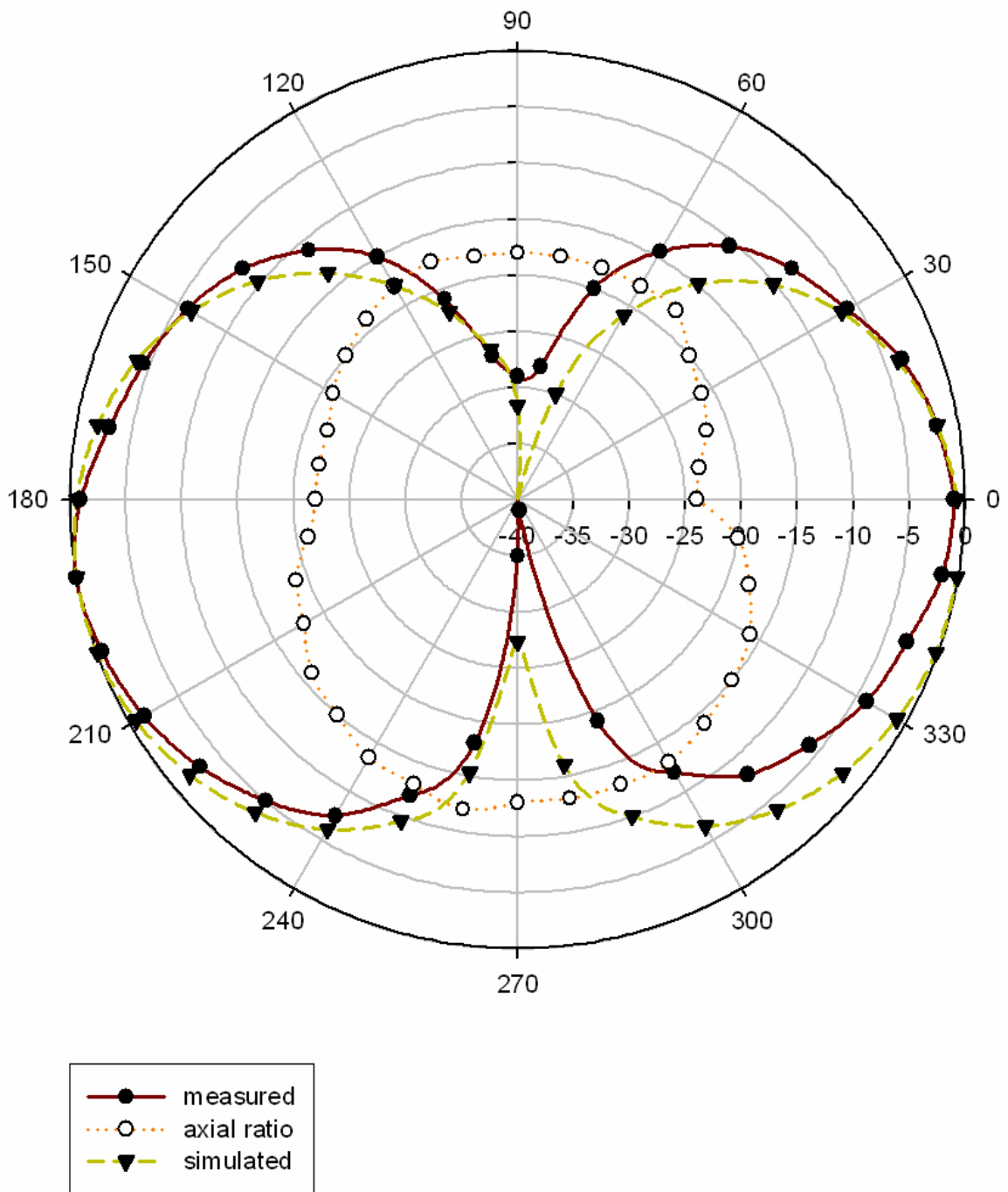
Σχήμα 5.38 bow-tie κεραία, $f = 2.8$ GHz, ϕ -επιπέδο



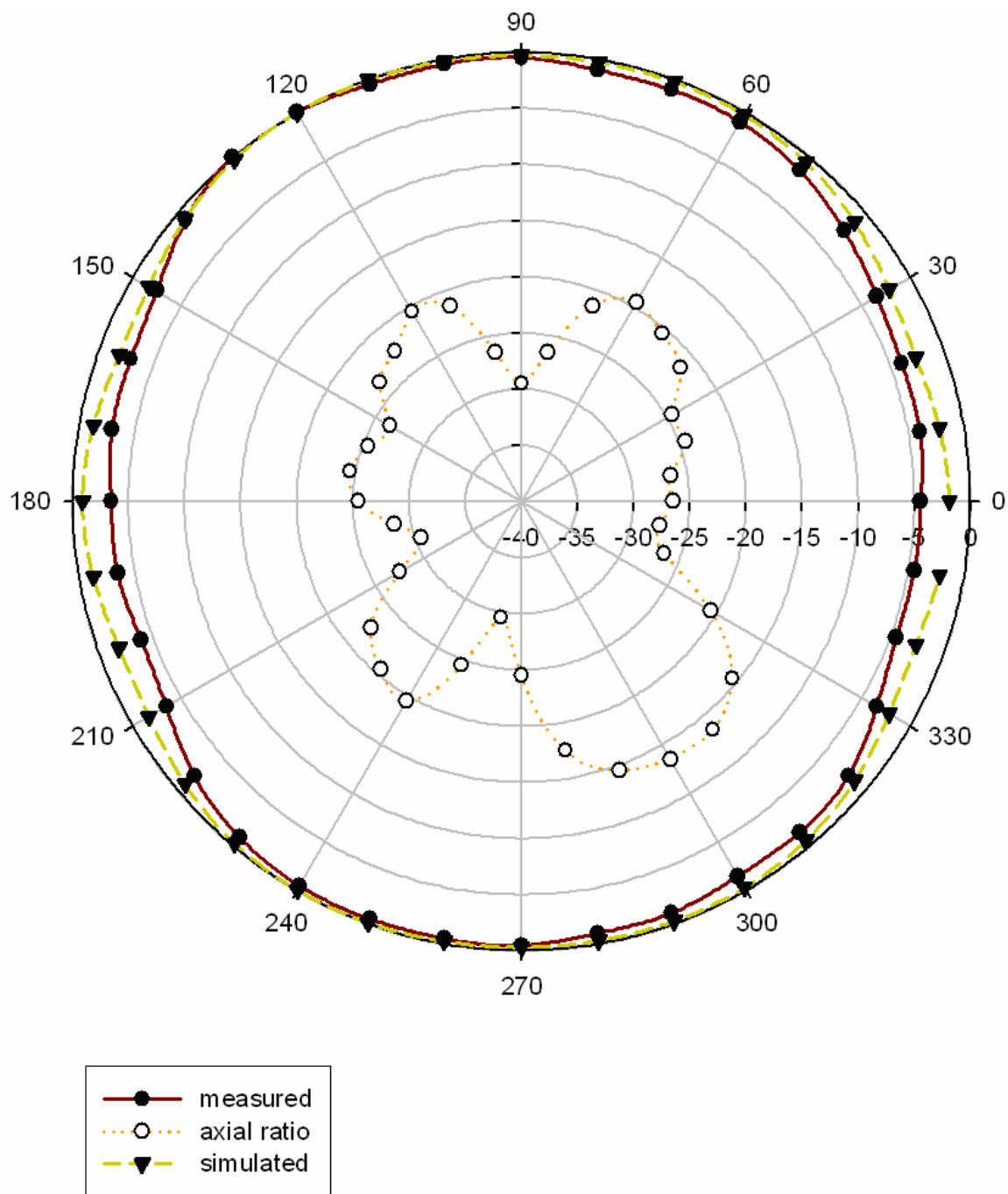
Σχήμα 5.39 bow-tie κεραία, $f = 2.8$ GHz, θ -επιπέδο



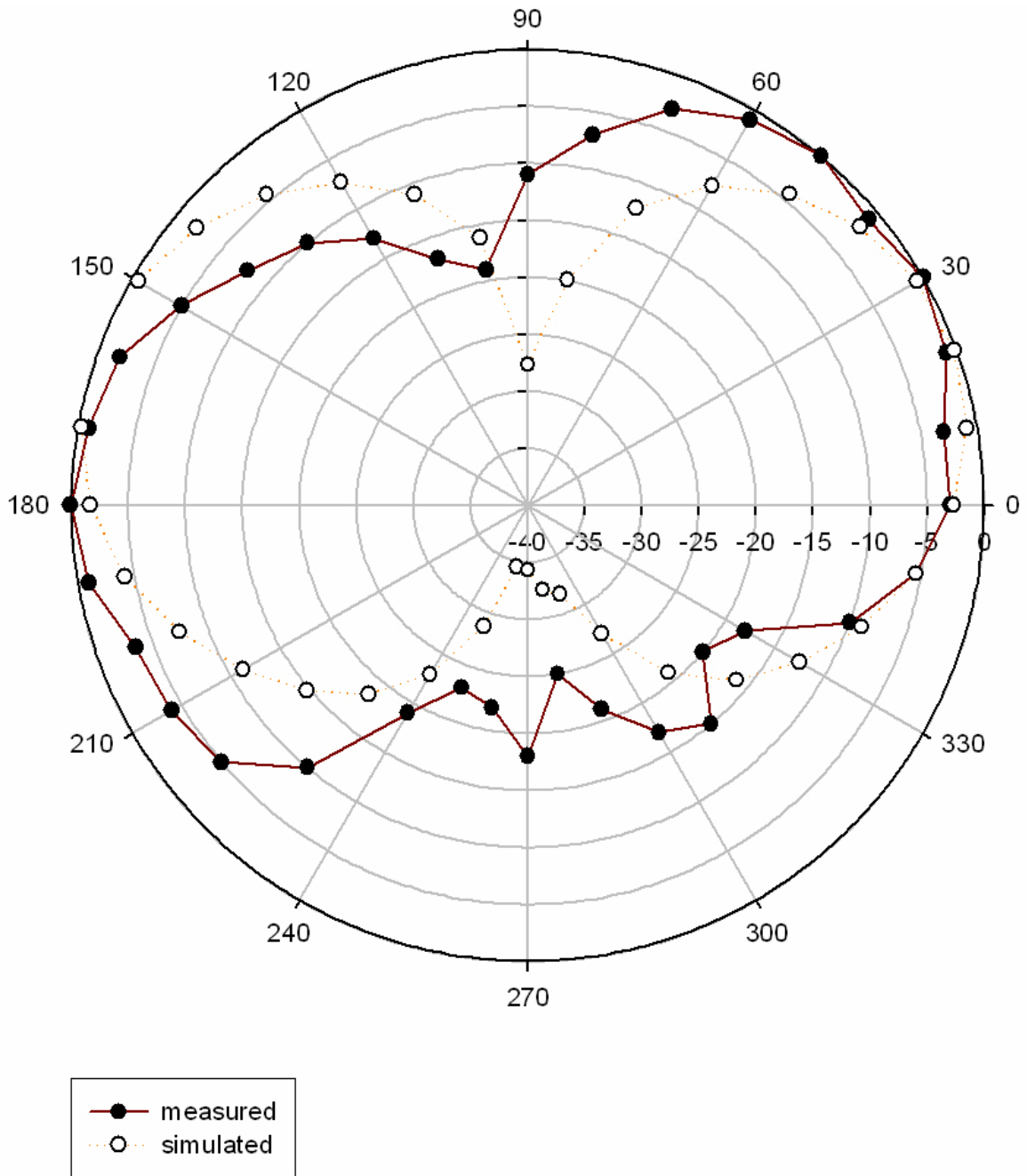
Σχήμα 5.40 bow-tie κεραία, $f = 5$ GHz, ϕ -επιπέδο



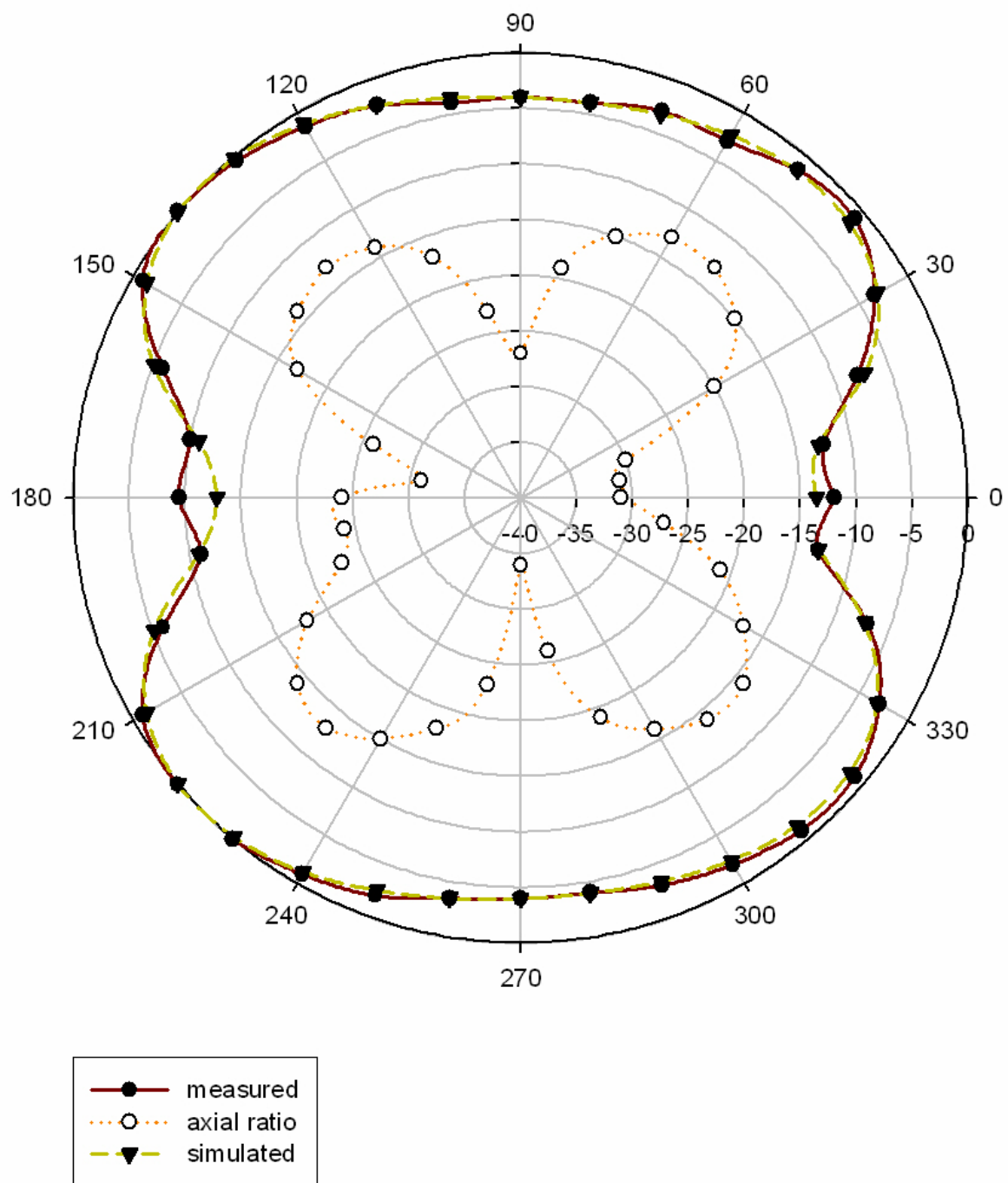
Σχήμα 5.41 bow-tie κεραία, $f = 5$ GHz, θ -επίπεδο



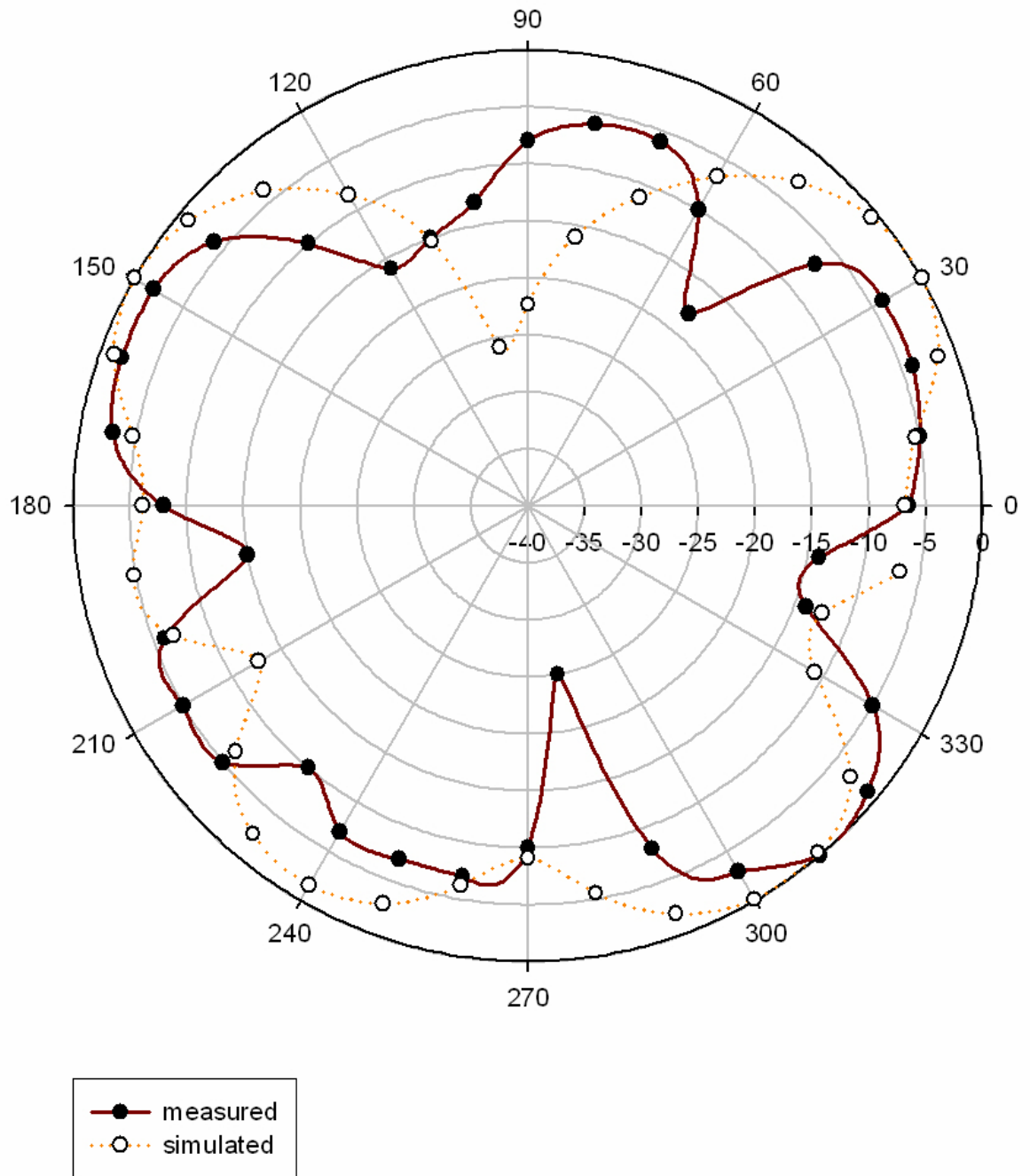
Σχήμα 5.42 bow-tie κεραία, $f = 8$ GHz, φ -επίπεδο



Σχήμα 5.43 bow-tie κεραία, $f = 8 \text{ GHz}$, θ -επιπέδο



Σχήμα 5.44 bow-tie κεραία, $f = 10$ GHz, ϕ -επίπεδο

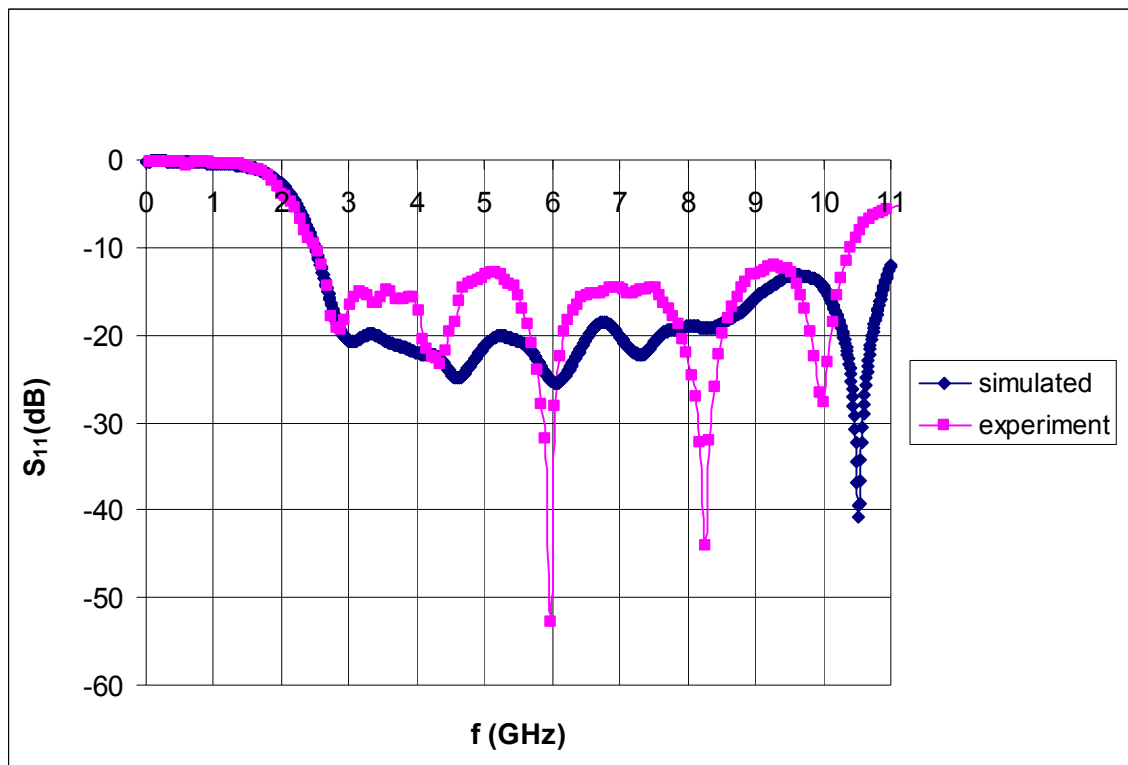


Σχήμα 5.45 bow-tie κεραία, $f = 10$ GHz, θ -επίπεδο

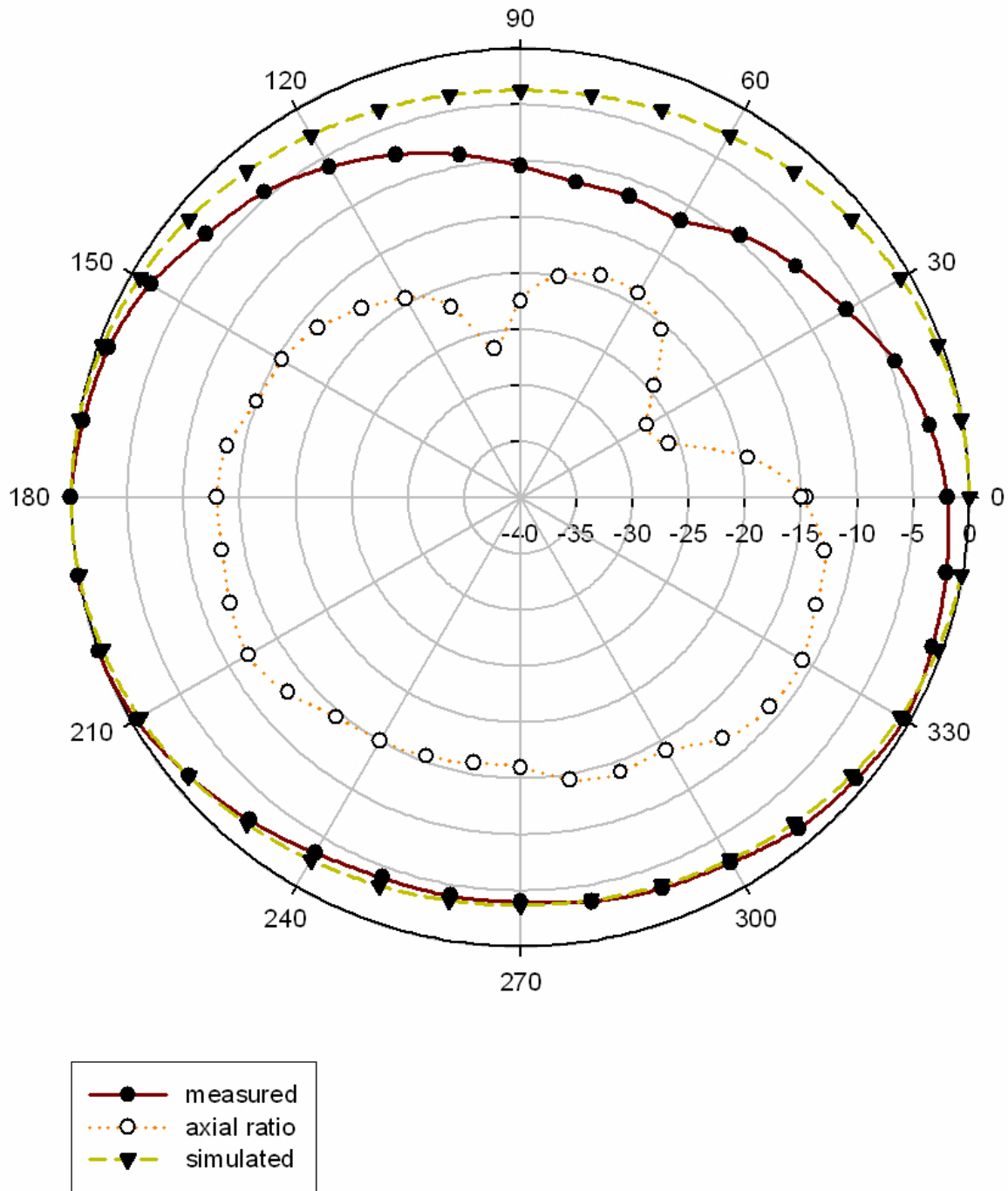
5.3.7 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία



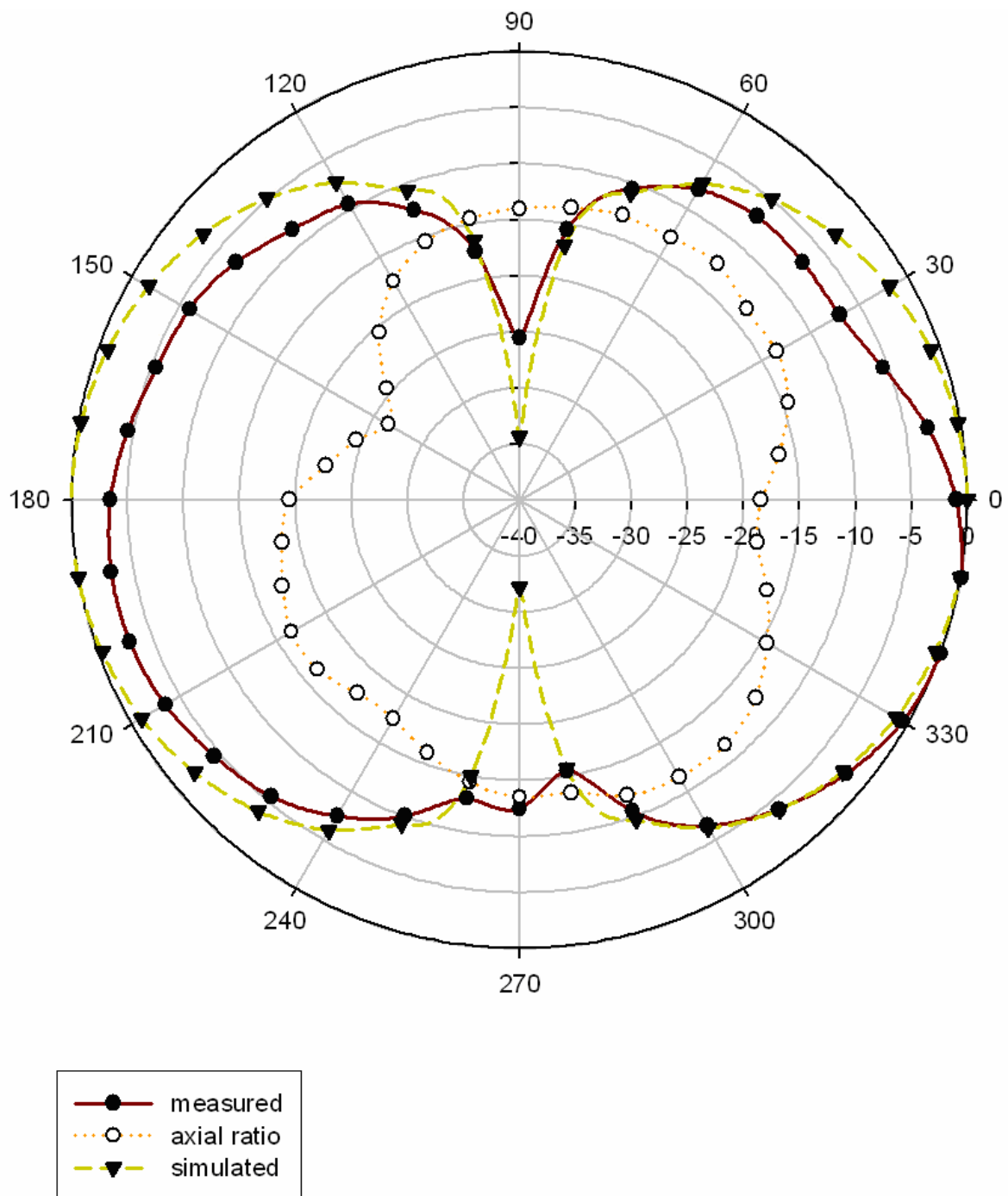
Σχήμα 5.46 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία



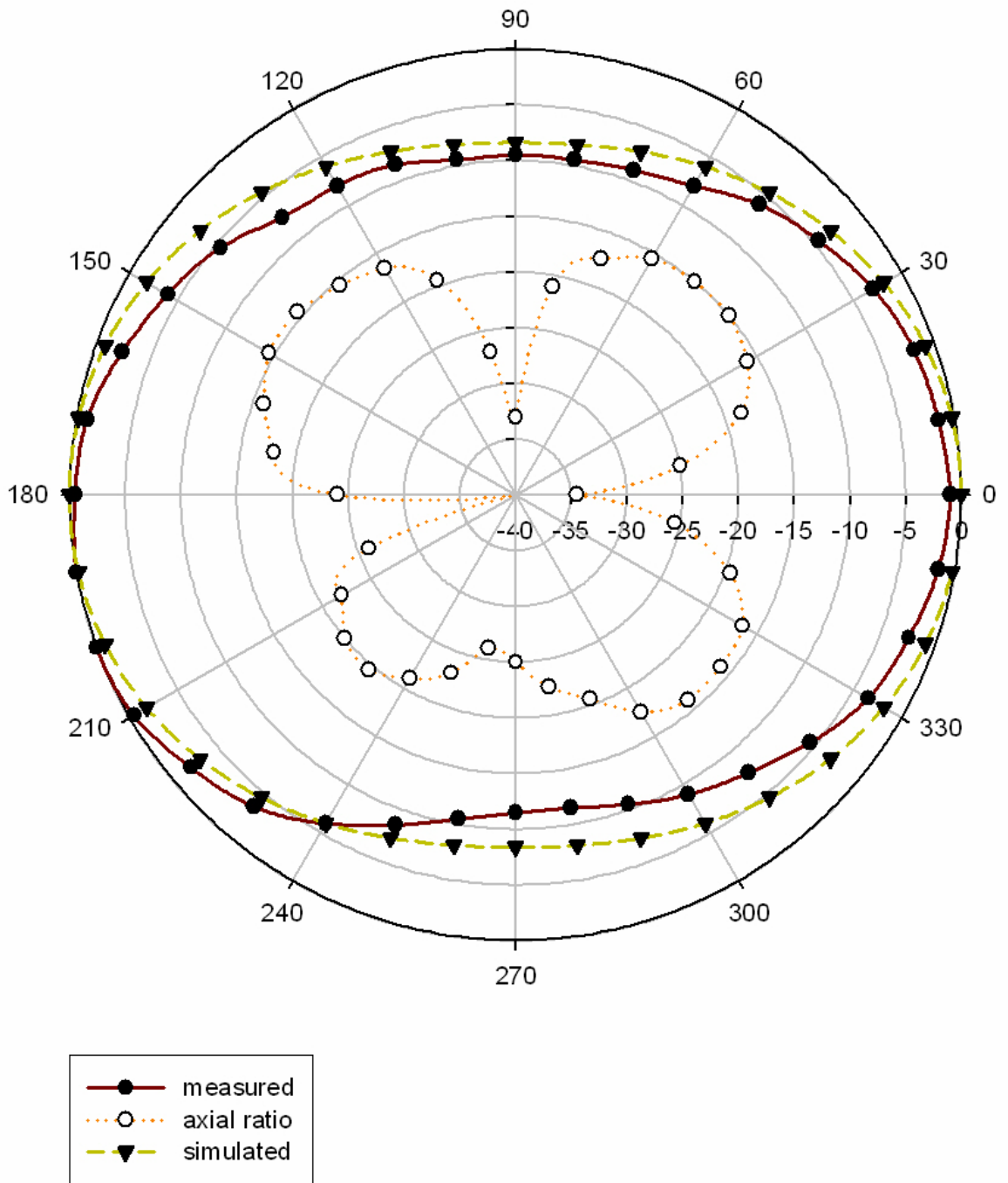
Σχήμα 5.47 S11 bow-tie κεραίας με παρασιτικά στοιχεία



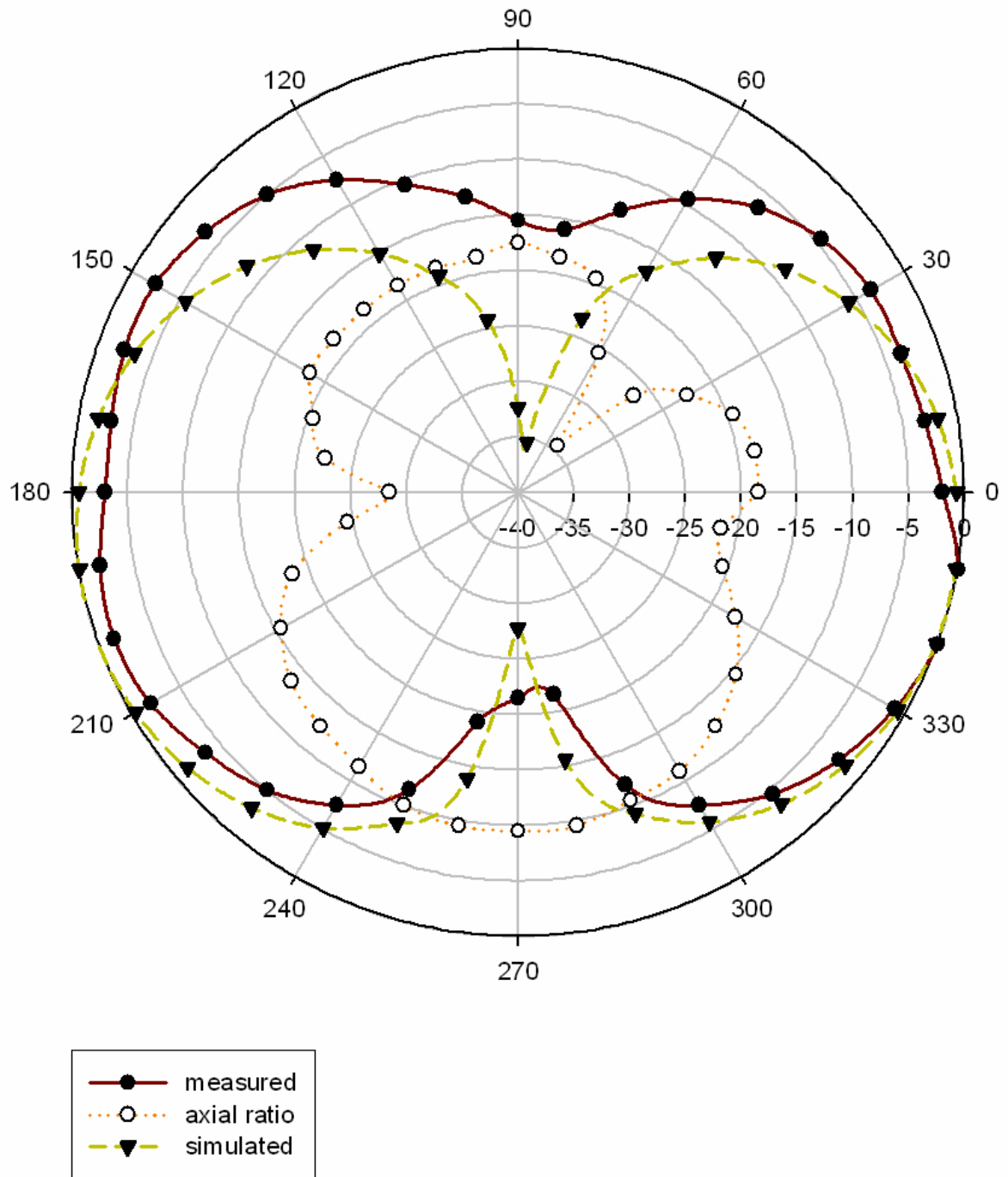
Σχήμα 5.48 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 2.5$ GHz, ϕ -επίπεδο



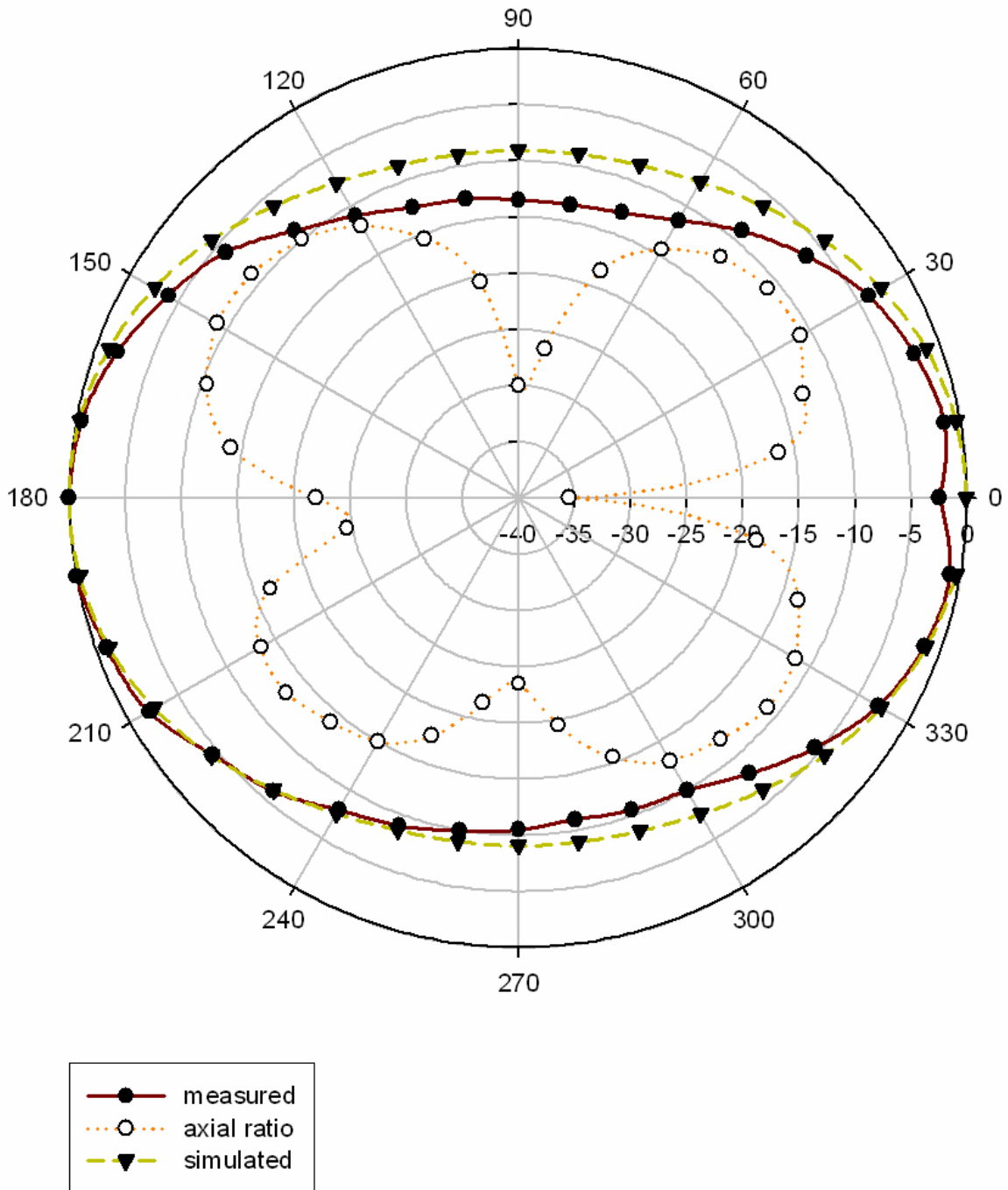
Σχήμα 5.49 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 2.5$ GHz, θ -επίπεδο



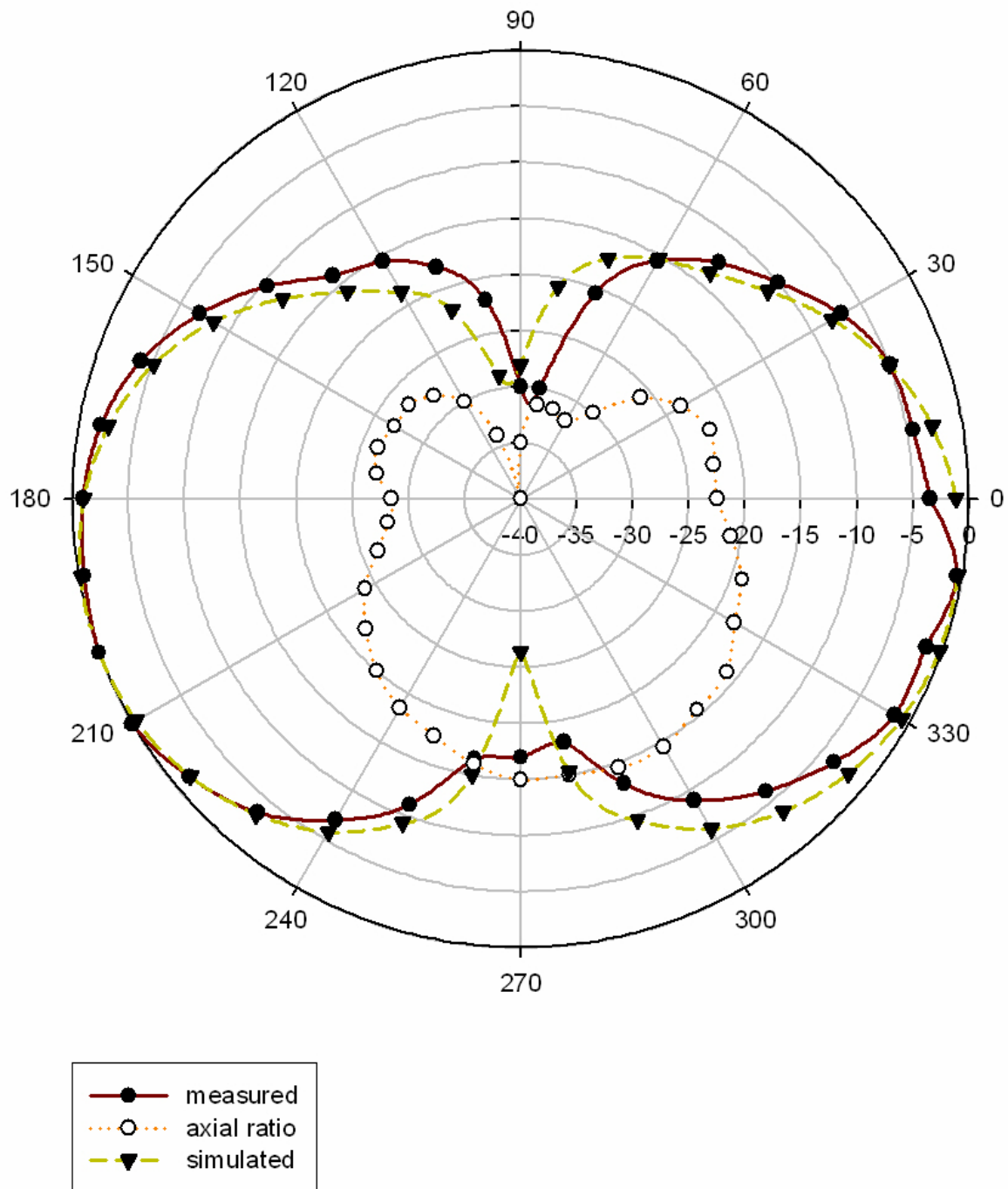
Σχήμα 5.50 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 4.2$ GHz, φ-επίπεδο



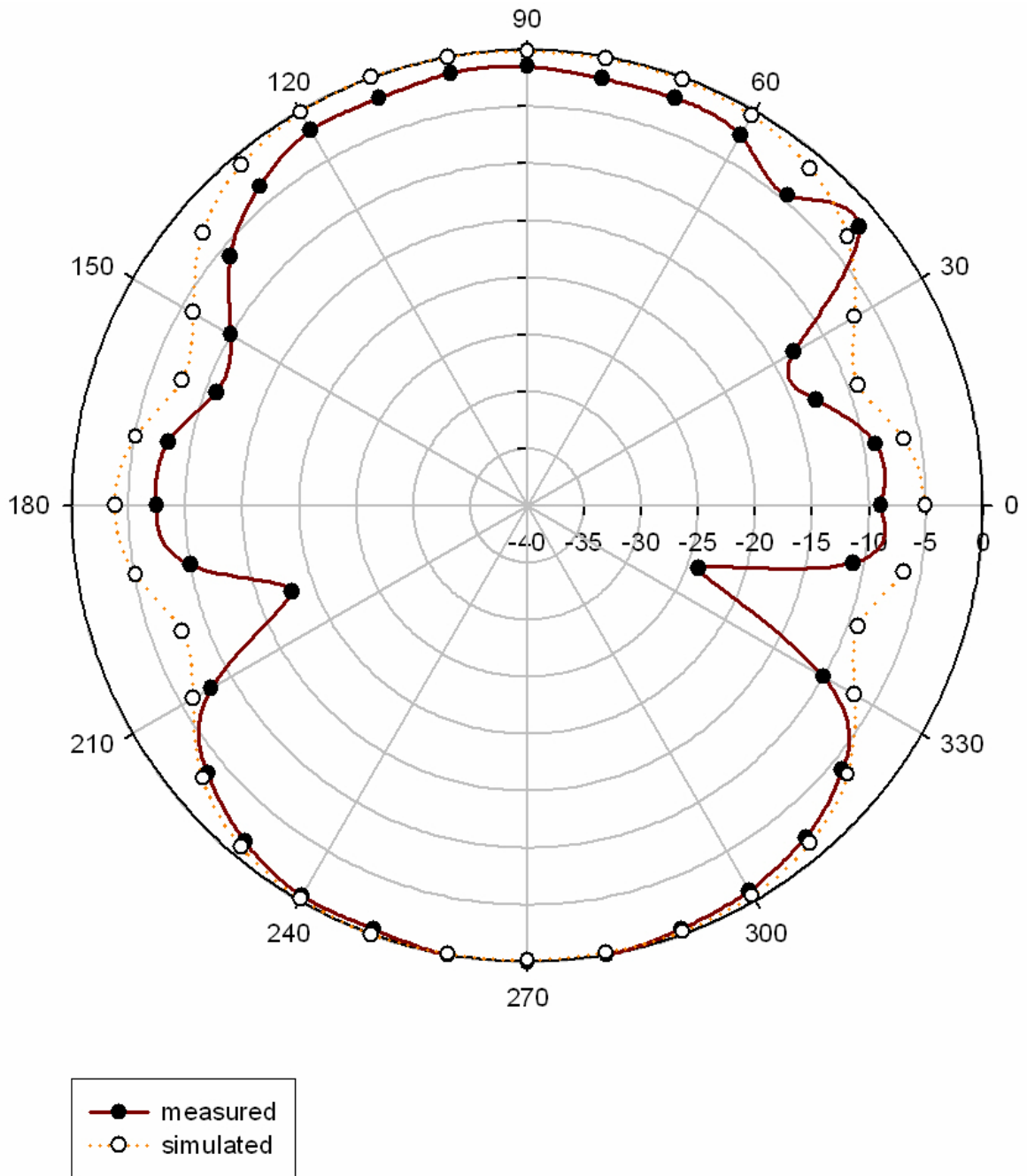
Σχήμα 5.51 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 4.2$ GHz, θ -επίπεδο



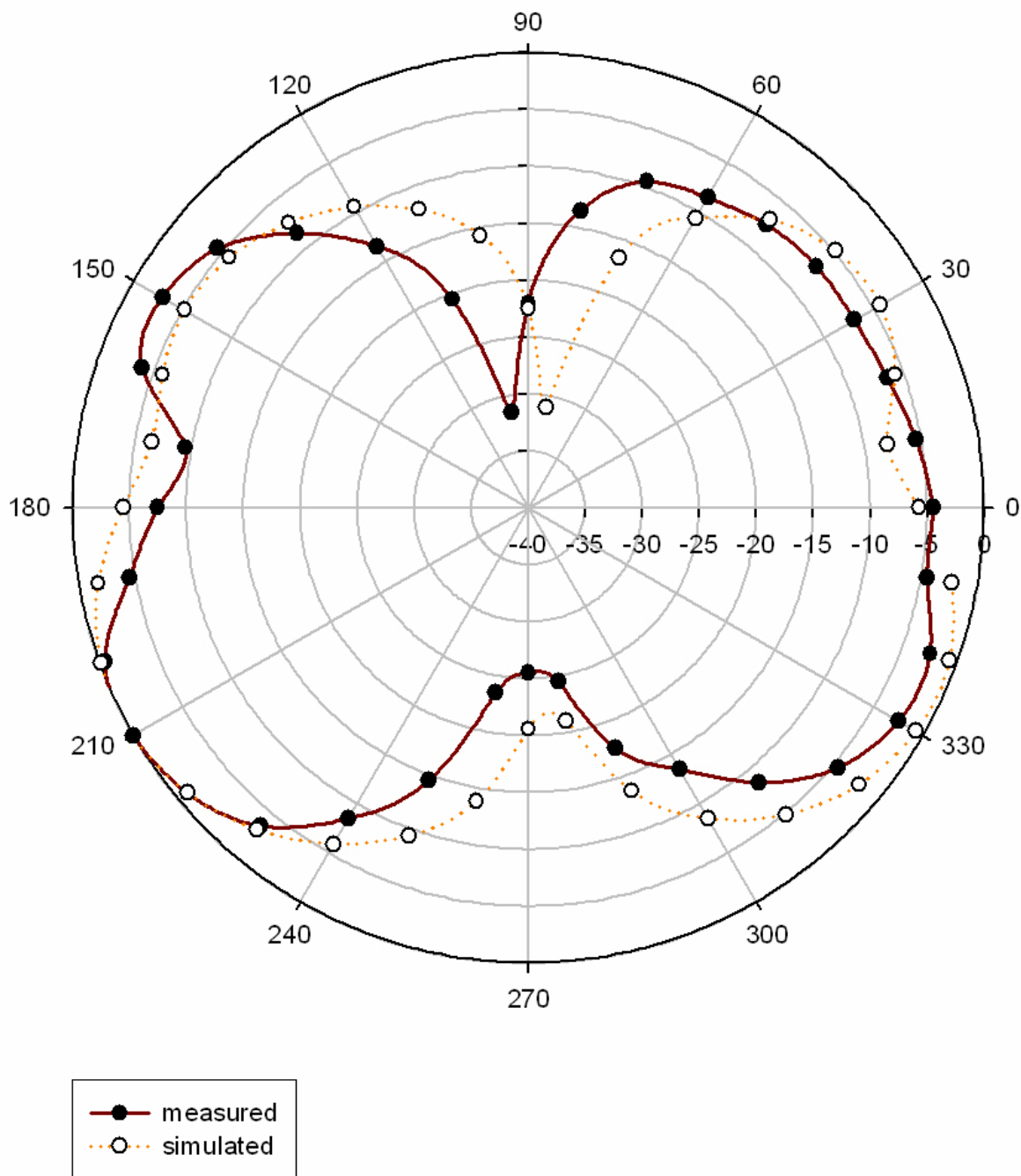
Σχήμα 5.52 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 5.5$ GHz, ϕ -επίπεδο



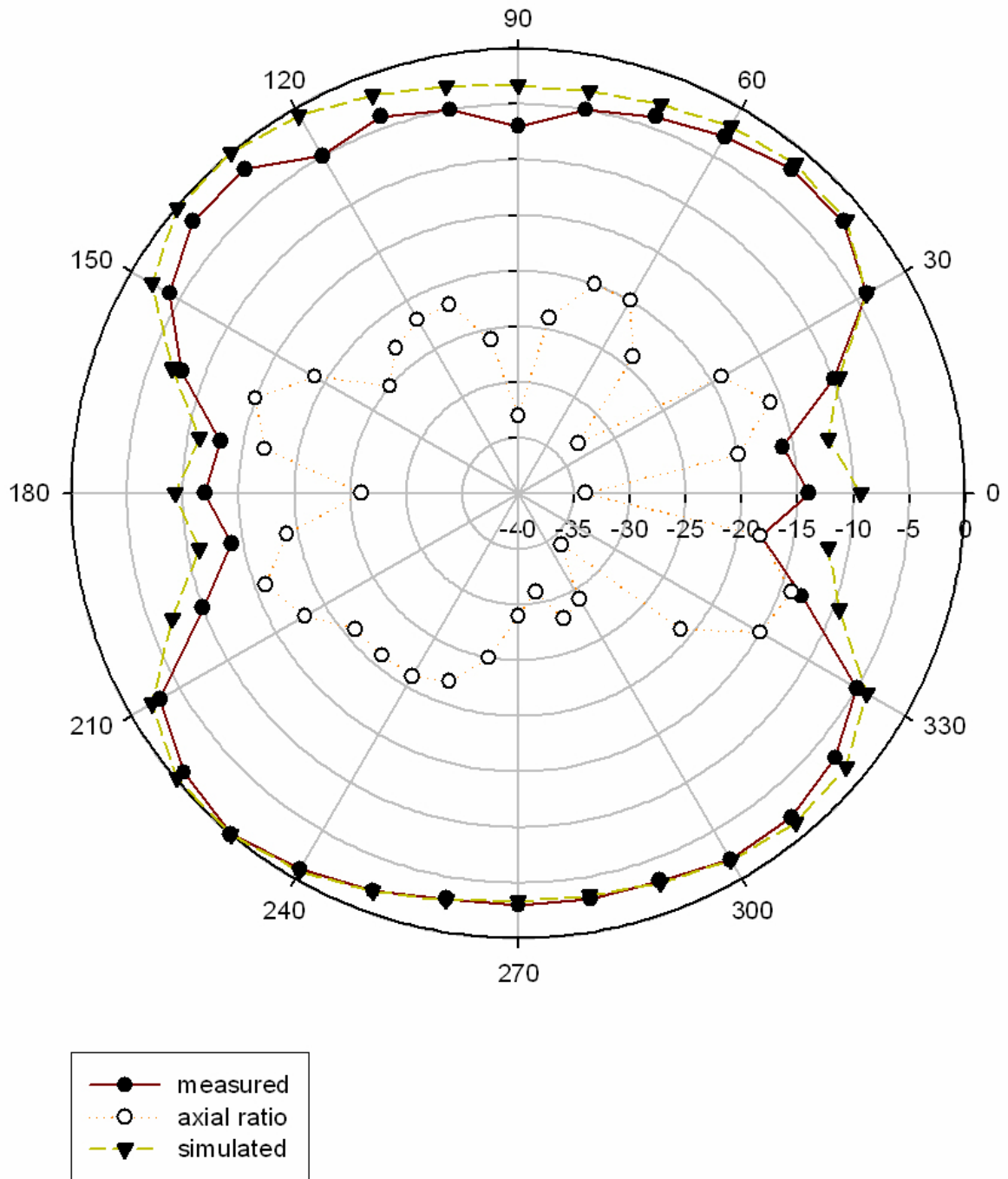
Σχήμα 5.53 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 5.5$ GHz, θ -επίπεδο



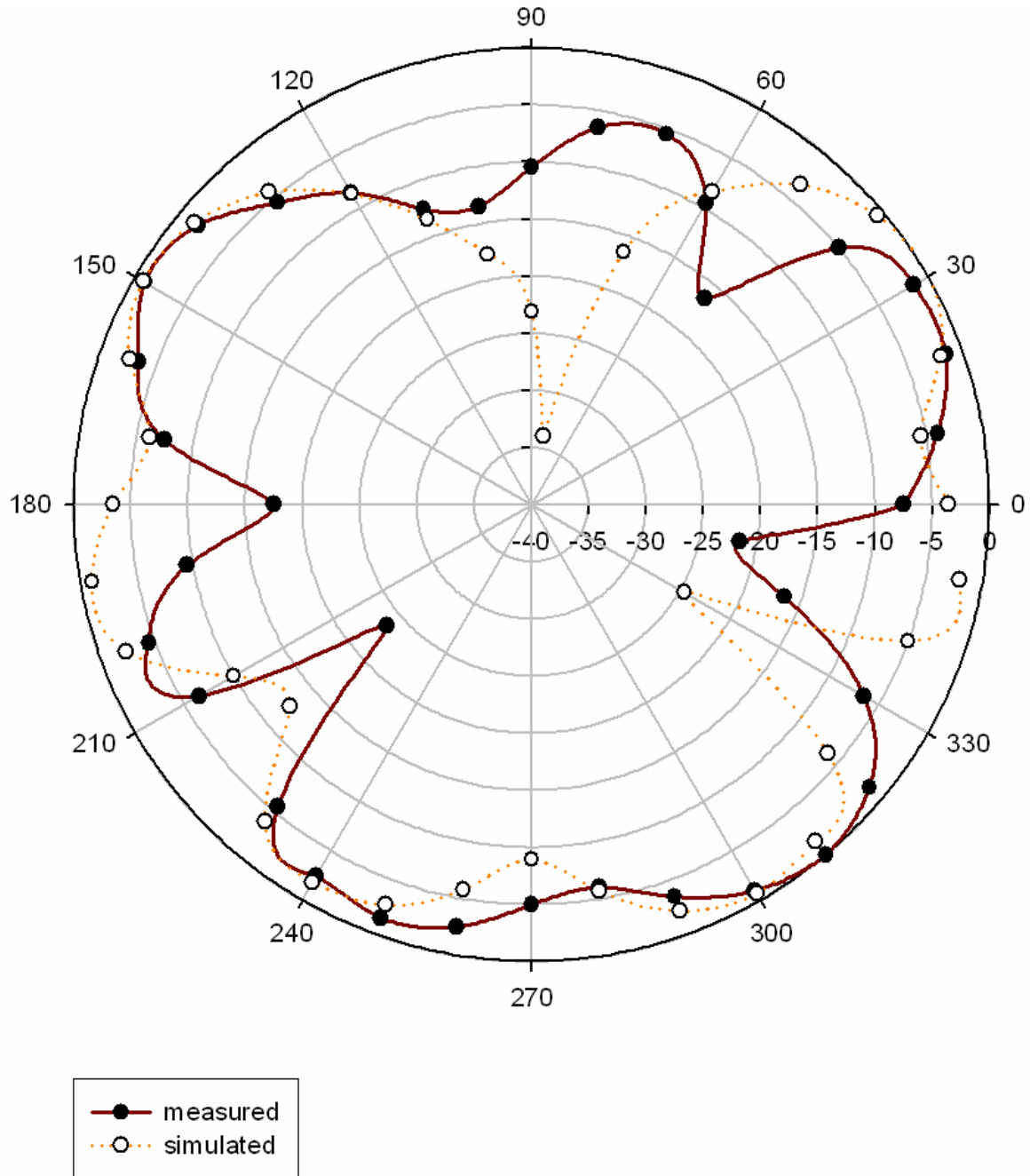
Σχήμα 5.54 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 8.2$ GHz, φ-επίπεδο



Σχήμα 5.55 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 8.2$ GHz, θ -επίπεδο



Σχήμα 5.56 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 10$ GHz, ϕ -επίπεδο

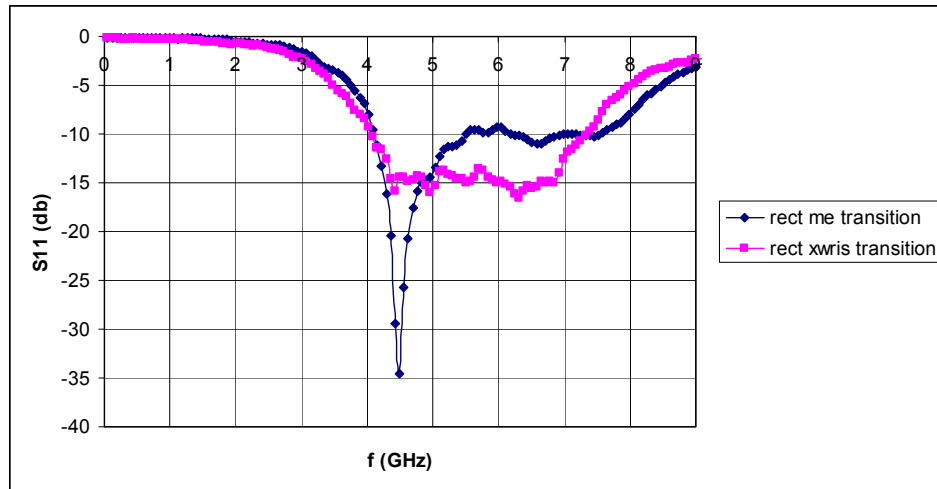


Σχήμα 5.57 bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία, $f = 10$ GHz, θ -επίπεδο

5.4 Συμπεράσματα

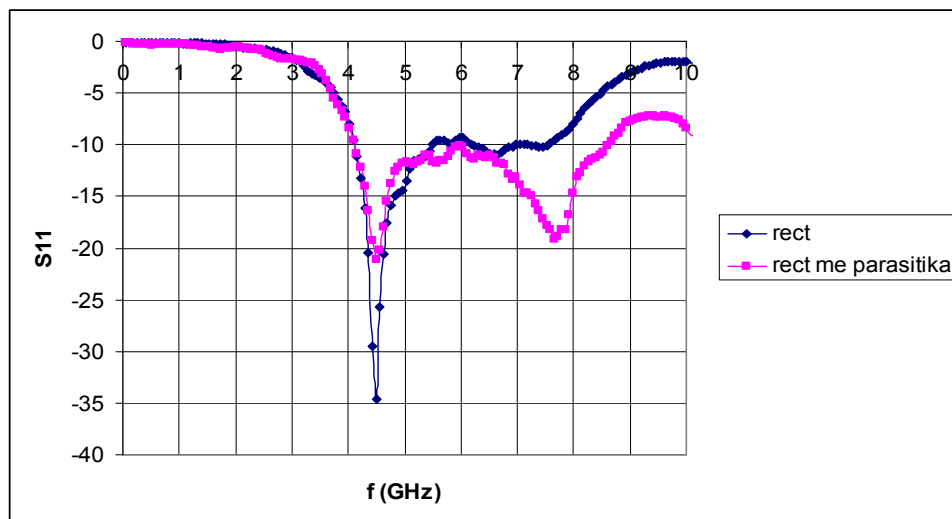
- **Ορθογωνικές σχισμοκεραίες**

Παρατηρούμε ότι η ορθογωνική σχισμοκεραία χωρίς το transition παρουσιάζει μικρότερη απορρόφηση ισχύος στη συχνότητα συντονισμού. Παρακάτω παραθέτουμε το συγκριτικό διάγραμμα χρησιμοποιώντας τις πειραματικές τιμές:



Σχήμα 5.58 Rectangular με/χωρίς transition

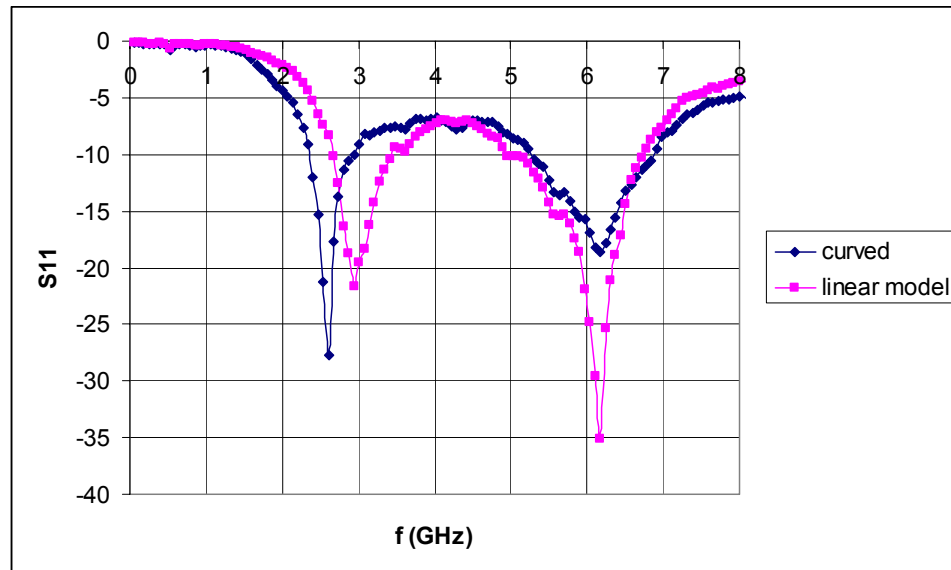
Με την προσθήκη των παρασιτικών βλέπουμε πως επιτυγχάνεται ένας δεύτερος συντονισμός, και θυμίζουμε ότι η συχνότητα του είναι ανάλογη του μήκους της σχισμής:



Σχήμα 5.59 Επίδραση παρασιτικών στοιχείων στη rectangular

- **Καμπυλωμένη bow-tie**

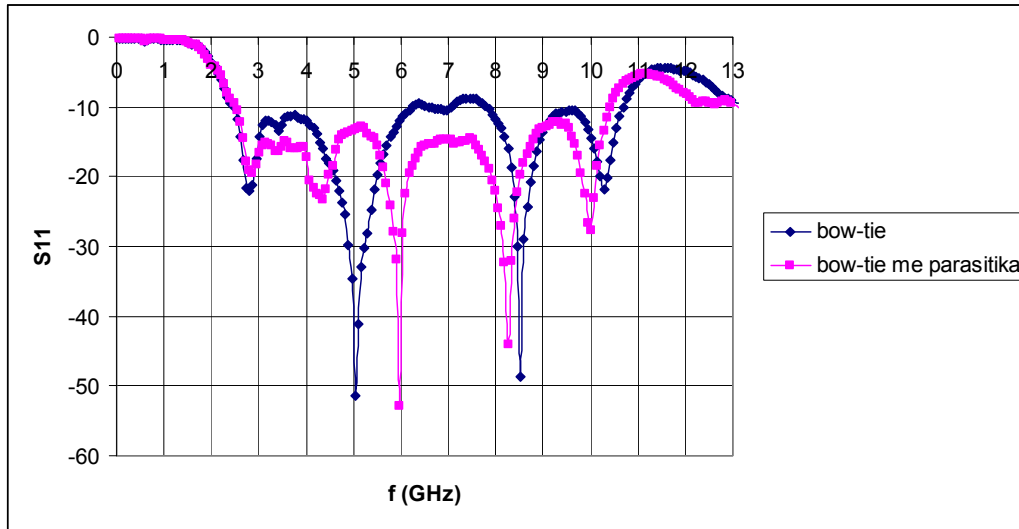
Στην προσομοίωση είδαμε ότι η καμπύλωση των πλευρών της bow-tie είχε ως αποτέλεσμα μικρότερη συχνότητα συντονισμού. Αυτό επιβεβαιώνεται και πειραματικά, καθώς η καμπυλωμένη σχισμοκεραία συντονίζεται περίπου 300 MHz χαμηλότερα σε σχέση με την αντίστοιχη γραμμική στην μπάντα των 2.8 GHz:



Σχήμα 5.60 Συγκριτικό διάγραμμα curved/linear bow-tie

- **Bow-tie**

Με αυτές τις δύο σχισμοκεραίες (bow-tie και bow-tie με παρασιτικά) πετυχαίνουμε το μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Οι πειραματικές τιμές είναι αρκετά κοντά στις προσομοιώσεις με μια διακύμανση στο βάθος του συντονισμού, αλλά παραμένοντας σε όλο το εύρος σταθερά κάτω από 10db. Η προσθήκη των παρασιτικών διαπιστώνουμε ότι επιδρά βαθαίνοντας τον ήδη υπάρχον συντονισμό στα 6 GHz:

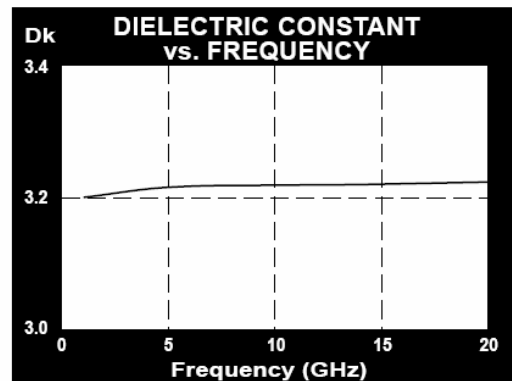
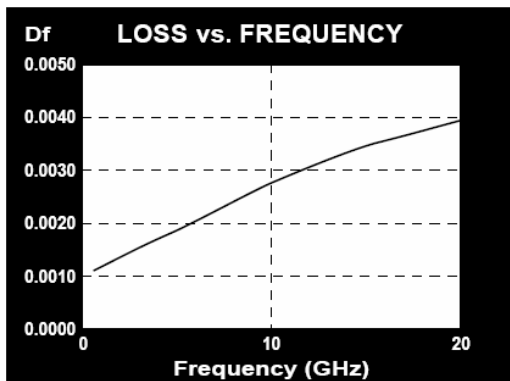
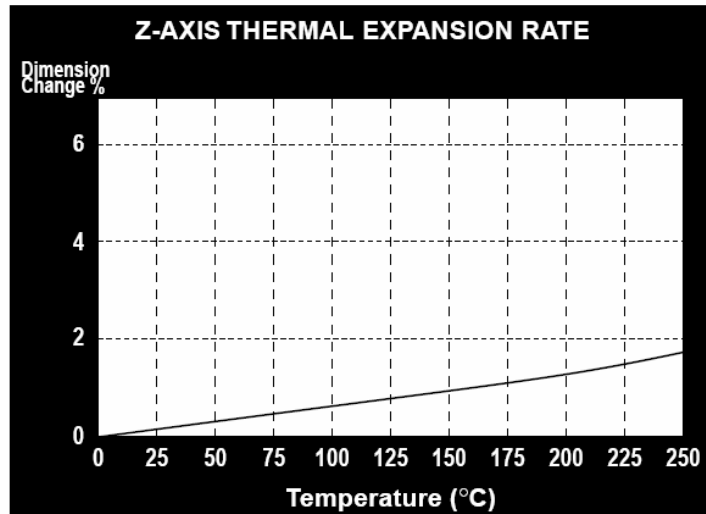


Σχήμα 5.61 Bow-tie/Bow-tie με παρασιτικά

Παράρτημα 5A

TLC-32 TYPICAL VALUES					
Property	Test Method	Units	Value	Units	Value
Dielectric Constant @ 10 GHz	IPC-TM 650 2.5.5.5		3.20		3.20
Dissipation Factor @ 10 GHz	IPC-TM 650 2.5.5.5		0.0030		0.0030
Moisture Absorption	IPC-TM 650 2.6.2.1	%	<.02	%	<.02
Dielectric Breakdown	IPC-TM 650 2.5.6	kV	>60	kV	>60
Volume Resistivity	IPC-TM 650 2.5.17.1	Mohm/cm	10 ⁷	Mohm/cm	10 ⁷
Surface Resistivity	IPC-TM 650 2.5.17.1	Mohm	10 ⁷	Mohm	10 ⁷
Arc Resistance	IPC-TM 650 2.5.1	seconds	>180	seconds	>180
Flexural Strength Lengthwise	IPC-TM 650 2.4.4	lbs./in.	>40,000	N/mm ²	>276
Flexural Strength Crosswise	IPC-TM 650 2.4.4	lbs./in.	>35,000	N/mm ²	>241
Peel Strength (1oz copper)	IPC-TM 650 2.4.8	lbs./linear in.	12.0	N/mm	2.1
Thermal Conductivity	Cenco-Fitch	BTU/in./hr/ft ² /°F	1.60	W/m/K	0.23
x-y CTE	ASTM D 3386 (TMA)	ppm/°C	9-12	ppm/°C	9-12
z CTE	ASTM D 3386 (TMA)	ppm/°C	70	ppm/°C	70
UL-94 Flammability Rating	UL-94		V-0		V-0

Type	Dk
TLY-5A	2.17
TLY-5	2.20
TLY-3	2.33
TLT-0 TLX-0	2.45
TLT-9 TLX-9	2.50
TLT-8 TLX-8	2.55
TLT-7 TLX-7	2.60
TLT-6 TLX-6	2.65
TLE-95	2.95
TLC-27	2.75
TLC-30	3.00
TLC-32	3.20
RF-30	3.00
RF-35	3.50
RF-60	6.15
CER-10	10



Παράρτημα 5B

f είναι η συχνότητα λειτουργίας, P η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια και d η απόσταση χρονοκεραίας και προς μέτρηση κεραίας,

Ορθογωνική σχισμοκεραία χωρίς transition					
f=5,5GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=5,5GHz	P=10dBm	d=2,73m
phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-42	-69	0	-67	-52,5
10	-43	-65	10	-58	-53,5
20	-44	-66	20	-51,5	-54
30	-45	-64	30	-48	-54,5
40	-48	-65	40	-45	-55
50	-51	-66	50	-44	-55,5
60	-54	-66	60	-43	-55,5
70	-57	-68	70	-43	-55
80	-59	-69	80	-42,5	-55
90	-59	-70	90	-42	-56
100	-56	-69	100	-42	-57
110	-54	-66	110	-42	-60
120	-51	-64	120	-42	-62
130	-49	-63	130	-43	-63,5
140	-47	-62	140	-44	-61
150	-45	-64	150	-46	-58,5
160	-43	-68	160	-48,5	-57,5
170	-42	-73	170	-54	-57
180	-41	-69	180	-68	-56,5
190	-41	-65	190	-55,5	-56,5
200	-42	-63	200	-49	-57,5
210	-43	-62	210	-46	-58,5
220	-44,5	-61	220	-44	-60
230	-47	-62	230	-42,5	-61
240	-49	-64	240	-42	-59,5
250	-52	-68	250	-42,5	-57,5
260	-54	-73	260	-43	-56
270	-55	-73	270	-43	-55,5
280	-55	-69	280	-42	-55
290	-52,5	-65	290	-42	-55
300	-50,5	-63	300	-42	-54
310	-48	-63	310	-43	-53
320	-46	-61	320	-44,5	-52
330	-44	-62	330	-47	-51,5
340	-43	-64	340	-50	-52
350	-42	-65	350	-53	-52
360	-42	-67	360	-68	-53

Ορθογωνική σχισμοκεραία με transition					
f=4,5GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=4,5GHz	P=10dBm	d=2,73m
phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-41,5	-60,5	0	-61,5	-52,5
10	-42	-61	10	-52	-52,5
20	-43	-62	20	-48	-53
30	-44	-62	30	-45	-54
40	-46	-60	40	-44	-55,5
50	-48	-59	50	-42,5	-56
60	-49,5	-59	60	-42	-55,5
70	-51	-58	70	-42	-55
80	-52,5	-59	80	-43	-55
90	-53	-60	90	-44	-55
100	-53	-64	100	-45	-56
110	-51,5	-82	110	-44	-58
120	-49	-66	120	-44	-60
130	-47	-60	130	-44	-62,5
140	-45	-59	140	-45,5	-60,5
150	-44,5	-58	150	-48	-59
160	-42	-58	160	-52	-57
170	-41	-60	170	-58,5	-56
180	-40,5	-60	180	-60	-56
190	-41	-58	190	-53,5	-56
200	-41,5	-66	200	-49,5	-56,5
210	-43	-65	210	-46,5	-58
220	-45	-64	220	-45	-61
230	-47	-55	230	-43,5	-65
240	-49,5	-55	240	-42,5	-69
250	-50,5	-57	250	-42,5	-66,5
260	-51	-59	260	-43	-63
270	-50,5	-64	270	-44	-60,5
280	-50	-69	280	-45	-59
290	-49,5	-79	290	-45	-57
300	-47	-67	300	-44	-55
310	-45,5	-64	310	-44	-53,5
320	-44	-61	320	-45	-52
330	-42,5	-61	330	-48	-52
340	-42	-60	340	-52	-52
350	-41,5	-60	350	-61,5	-52
360	-41,5	-60	360	-58	-52

Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία – Πίνακας 1					
f=4,5GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=7GHz	P=10dBm	d=2,73m
phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-41,5	-61	0	-48	-80
10	-41,5	-60	10	-48,5	-77
20	-42,5	-59	20	-50	-77
30	-43,5	-58	30	-52	-76
40	-45	-58	40	-56	-73
50	-46,5	-58	50	-60	-72
60	-48,5	-58	60	-66	-71
70	-50,5	-59	70	-70	-71
80	-52,5	-62	80	-71	-71
90	-53,5	-66	90	-70,5	-72
100	-53,5	-72	100	-71	-74
110	-52	-67	110	-70	-79
120	-50	-62	120	-66	-72
130	-48	-57	130	-60,5	-80
140	-45,5	-58	140	-56	-74
150	-43,5	-57	150	-52,5	-72
160	-42	-59	160	-50	-71
170	-41	-59	170	-48,5	-73
180	-40,5	-59	180	-47,5	-73
190	-40,5	-57	190	-48	-73
200	-41	-56	200	-50	-75
210	-42,5	-55	210	-52,5	-76
220	-44,5	-55	220	-56,5	-74
230	-46,5	-55	230	-62	-73
240	-48	-56	240	-67	-71
250	-49,5	-58	250	-67	-68
260	-50	-61	260	-66	-68
270	-50	-64	270	-65	-68
280	-50,5	-72	280	-66	-69
290	-49	-75	290	-68	-70
300	-47,5	-67	300	-66,5	-72
310	-46	-62	310	-61	-73
320	-44	-61	320	-56	-76
330	-43	-60	330	-52	-78
340	-42	-59	340	-50	-80
350	-41,5	-59	350	-48,5	-80
360	-41,5	-60	360	-48	-81

Ορθογωνική σχισμοκεραία με παρασιτικά στοιχεία – Πίνακας 2					
f=4,5GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=7GHz	P=10dBm	d=2,73m
theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-62,5	-52,5	0	-69	-58
10	-53	-52,5	10	-65	-59
20	-49	-53,5	20	-57	-59
30	-46	-55	30	-53	-59,5
40	-44	-56	40	-51	-59
50	-43	-56,5	50	-49,5	-58,5
60	-42,5	-55,5	60	-49	-58
70	-43	-55	70	-49	-58
80	-44	-54,5	80	-49,5	-59
90	-45	-56	90	-50,5	-60,5
100	-45	-57,5	100	-52	-63
110	-44	-59	110	-52,5	-66
120	-43,5	-61	120	-53	-68
130	-44	-60,5	130	-55	-68
140	-45	-58	140	-58	-69
150	-48	-56,5	150	-63	-70
160	-51,5	-55,5	160	-69	-68
170	-58	-55,5	170	-69	-67
180	-62	-55,5	180	-68	-66
190	-54,5	-56	190	-67	-66,5
200	-50	-57,5	200	-65	-67
210	-47	-58	210	-60	-68,5
220	-45	-60,5	220	-56,5	-68
230	-43	-64	230	-53	-68
240	-42,5	-66,5	240	-50	-64,5
250	-42	-65	250	-49	-62,5
260	-43	-63	260	-49	-60
270	-44,5	-61	270	-50	-60
280	-45,5	-59	280	-50	-61
290	-45	-56,5	290	-49	-62
300	-44	-54,5	300	-48,5	-61,5
310	-44	-53	310	-49	-60
320	-45	-51,5	320	-50	-58,5
330	-47,5	-51,5	330	-52	-58
340	-52	-52	340	-55	-58
350	-62	-52,5	350	-60	-57,5
360	-60	-52	360	-70	-57,5

Καμπυλωμένη bow-tie κεραία – Πίνακας 1					
f=2,5GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=6GHz	P=10dBm	d=2,73m
phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-41	-47	0	-44	-64
10	-41,5	-46	10	-44,5	-59
20	-42,5	-47	20	-46,5	-57
30	-43,5	-47	30	-49	-56
40	-44	-47	40	-50,5	-57
50	-45	-47	50	-50,5	-58
60	-46	-49	60	-50	-61
70	-47	-51	70	-49	-65
80	-48	-55	80	-49	-67
90	-49	-59	90	-49	-68
100	-49	-57	100	-49	-67
110	-47	-53	110	-49	-66
120	-45,5	-50	120	-49,5	-63
130	-43,5	-48	130	-50	-64
140	-42	-46	140	-50,5	-59
150	-40,5	-45	150	-49	-57
160	-39,5	-44	160	-47	-57
170	-38,5	-44	170	-45	-59
180	-38	-44	180	-43,5	-64
190	-38	-45	190	-44	-58
200	-39	-45	200	-44,5	-52
210	-40	-46	210	-45,5	-50
220	-41,5	-47	220	-46	-50
230	-43	-48	230	-48	-51
240	-45	-50	240	-49	-53
250	-47,5	-50,5	250	-50	-58
260	-48,5	-52	260	-50	-64
270	-48,5	-52	270	-50	-61
280	-48	-52	280	-50	-56
290	-45,5	-53,5	290	-49	-53
300	-44	-54	300	-48	-52
310	-43	-54	310	-47	-50
320	-42	-54	320	-45,5	-50
330	-41	-50	330	-44	-51
340	-41	-48	340	-43,5	-53
350	-41	-47	350	-43,5	-59
360	-41	-45	360	-43,5	-64

Καμπυλωμένη bow-tie κεραία – Πίνακας 2					
f=2,5GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=6GHz	P=10dBm	d=2,73m
theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-55,5	-52	0	-74	-60
10	-51	-52	10	-69	-60
20	-46,5	-52	20	-60	-61
30	-44	-52	30	-56	-62
40	-42	-53	40	-52	-64
50	-41	-55	50	-49,5	-66
60	-40	-56	60	-47	-70
70	-40	-58	70	-44,5	-80
80	-40	-59,5	80	-43	-85
90	-41	-60	90	-42	-86
100	-43,5	-58,5	100	-42	-82
110	-45	-56	110	-43	-73
120	-47	-53,5	120	-44	-67
130	-47,5	-51,5	130	-45	-64
140	-48	-50	140	-47	-63,5
150	-49,5	-49	150	-49	-65
160	-51,5	-48	160	-53	-64
170	-55	-48,5	170	-60	-65
180	-62	-49	180	-72	-64
190	-68	-49,5	190	-58	-63
200	-56,5	-50,5	200	-53	-63
210	-52	-52	210	-50	-64
220	-49	-53,5	220	-47,5	-65,5
230	-47	-56	230	-45,5	-67
240	-46	-58	240	-44,5	-68
250	-45	-60	250	-44	-68
260	-44	-61	260	-43,5	-68
270	-43,5	-57	270	-43	-70
280	-43	-54,5	280	-42	-70
290	-42,5	-53	290	-43	-66
300	-43	-52,5	300	-45	-64
310	-44	-52,5	310	-48	-65
320	-45	-53	320	-51	-64
330	-47	-54	330	-54	-63
340	-50	-53,5	340	-58	-62
350	-53,5	-52,5	350	-63	-61
360	-53,5	-52	360	-75	-60

Αντίστοιχο γραμ. μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie κεραίας–Πιν. 1					
f=3GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=6GHz	P=10dBm	d=2,73m
phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-37	-53	0	-42,5	-66
10	-37	-54	10	-43	-73
20	-38	-54	20	-43,5	-63
30	-39	-52	30	-45	-60
40	-40,5	-50	40	-47,5	-60
50	-41,5	-49	50	-49,5	-60
60	-42,5	-49	60	-51,5	-63
70	-43	-49	70	-52,5	-64
80	-44	-49	80	-53	-67
90	-44,5	-51	90	-53	-72
100	-44,5	-54	100	-53	-75
110	-44	-56	110	-52,5	-76
120	-42,5	-56	120	-52	-69
130	-40,5	-55	130	-50,5	-63
140	-39	-54	140	-48,5	-60
150	-37,5	-55	150	-46	-58
160	-37	-56	160	-44	-59
170	-36,5	-57	170	-43	-61
180	-37	-54	180	-43	-68
190	-37,5	-51	190	-43	-64
200	-39	-50	200	-44,5	-59
210	-41	-49	210	-46,5	-57
220	-43	-49	220	-48,5	-58
230	-45,5	-50	230	-51	-60
240	-47,5	-52	240	-52	-64
250	-49	-55	250	-53	-68
260	-49,5	-60	260	-53,5	-68
270	-48,5	-67	270	-53,5	-64
280	-47	-57	280	-53	-62
290	-45	-53	290	-52,5	-60
300	-43,5	-50	300	-51	-58
310	-41,5	-50	310	-49,5	-57
320	-39,5	-50	320	-47,5	-55
330	-38,5	-50	330	-46	-55
340	-37,5	-51	340	-44,5	-56
350	-36,5	-52	350	-43,5	-59
360	-36,5	-53	360	-42,5	-67

Αντίστοιχο γραμ. μοντέλο καμπυλωμένης bow-tie κεραίας–Πίν. 2					
f=3GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=6GHz	P=10dBm	d=2,73m
theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-56	-46	0	-68	-65
10	-48	-47	10	-61	-64
20	-44	-47,5	20	-57	-63
30	-41,5	-48	30	-54	-62
40	-40	-48	40	-51	-60,5
50	-39	-49	50	-48	-59
60	-39	-49	60	-45	-58,5
70	-38,5	-49	70	-43	-59
80	-37,5	-49	80	-43	-60
90	-37	-49	90	-44	-60
100	-37	-50	100	-45	-61,5
110	-37	-51	110	-44,5	-63
120	-38	-52	120	-44	-67
130	-39,5	-52,5	130	-44	-70
140	-41,5	-51,5	140	-46	-68
150	-44	-50,5	150	-49	-65
160	-46,5	-50	160	-53	-63
170	-50	-49	170	-57	-63
180	-53	-49	180	-58	-64
190	-51,5	-48	190	-56	-66
200	-47,5	-48,5	200	-52	-69
210	-45	-49	210	-48,5	-74
220	-43	-51	220	-46	-74
230	-41,5	-53,5	230	-44	-68
240	-40,5	-58	240	-43	-65
250	-40	-65	250	-44	-64
260	-39	-80	260	-45	-67
270	-38	-63	270	-45,5	-70
280	-38	-55	280	-44	-65
290	-38,5	-51	290	-44	-61
300	-39,5	-48	300	-46	-59
310	-40,5	-46	310	-50	-58,5
320	-42	-45	320	-54	-58,5
330	-45	-45	330	-60	-60
340	-49	-45	340	-67	-61
350	-59	-46	350	-73	-62
360	-58	-47	360	-68	-62,5

bow-tie κεραία – Πίνακας 1					
f=2,8GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=5GHz	P=10dBm	d=2,73m
phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-40,5	-51	0	-40	-66
10	-40,5	-53	10	-40	-65
20	-41	-58	20	-40,5	-58
30	-41	-61	30	-41,5	-55
40	-41,5	-58	40	-42,5	-54,5
50	-42	-58	50	-44	-55
60	-42,5	-58	60	-45,5	-57
70	-43	-57	70	-46	-60
80	-43	-55	80	-46,5	-67
90	-43,5	-54	90	-47	-77
100	-43,5	-53	100	-47	-62
110	-43,5	-53	110	-46	-58
120	-43	-54	120	-45,5	-55
130	-42,5	-56	130	-44,5	-53
140	-42	-56	140	-43	-53
150	-41	-57	150	-42	-53
160	-40	-58	160	-40,5	-54
170	-39	-58	170	-40	-57
180	-38,5	-59	180	-40	-64
190	-38	-59	190	-40,5	-60
200	-38	-60	200	-41,5	-54
210	-38	-62	210	-43,5	-52
220	-38,5	-61	220	-45	-51
230	-39,5	-64	230	-47	-51,5
240	-40	-70	240	-48,5	-53
250	-41	-75	250	-49	-57
260	-42	-69	260	-49,5	-62
270	-42,5	-65	270	-50	-70
280	-43,5	-55	280	-50	-61
290	-44	-54	290	-50,5	-56
300	-44	-53	300	-49	-53
310	-44	-55	310	-47,5	-51
320	-43,5	-53	320	-45,5	-51
330	-42,5	-51	330	-43,5	-51
340	-41,5	-51	340	-41,5	-53
350	-41	-51	350	-40,5	-57
360	-40,5	-51	360	-40	-67

bow-tie κεραία – Πίνακας 2					
f=8GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=10GHz	P=10dBm	d=1,21m
phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-58	-80	0	-61	-80
10	-57,5	-80	10	-61,5	-80
20	-57,5	-78	20	-57	-79
30	-57	-78	30	-52,5	-69
40	-56	-75	40	-50	-64
50	-55	-74	50	-50,5	-62
60	-54,5	-73	60	-52	-62
70	-54,5	-75	70	-52	-64
80	-54,5	-80	80	-53	-68
90	-54	-83	90	-53	-76
100	-54	-80	100	-53	-72
110	-54	-75	110	-51,5	-66
120	-53,5	-74	120	-50,5	-63
130	-53,5	-76	130	-49,5	-62
140	-54,5	-77	140	-49	-63
150	-56	-80	150	-50	-66
160	-56,5	-79	160	-55	-75
170	-56,5	-78	170	-59	-80
180	-57	-79	180	-58,5	-73
190	-57	-82	190	-60	-73
200	-57,5	-84	200	-55	-72
210	-57	-81	210	-50	-67
220	-55,5	-76	220	-49	-63
230	-54,5	-74	230	-49	-62
240	-54	-73	240	-50	-64
250	-54	-78	250	-51	-67
260	-54	-83	260	-52,5	-72
270	-54	-78	270	-53	-83
280	-54,5	-71	280	-53	-75
290	-54,5	-68	290	-52	-68
300	-55	-67	300	-51	-65
310	-55	-67	310	-50	-63
320	-55,5	-69	320	-50	-63
330	-57	-74	330	-52	-66
340	-58	-80	340	-56	-70
350	-58	-81	350	-62	-76
360	-59	-81	360	-61	-80

bow-tie κεραία – Πίνακας 3					
f=2,8GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=5GHz	P=10dBm	d=2,73m
theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-56	-45,5	0	-79	-53
10	-52	-46	10	-59	-53
20	-45	-46,5	20	-52	-53
30	-40,5	-47	30	-48	-54
40	-38	-48	40	-46	-55
50	-37	-49	50	-44	-56
60	-37	-49,5	60	-43	-58
70	-37	-51	70	-41,5	-60
80	-38,5	-52	80	-41	-62
90	-41	-54	90	-41	-64
100	-42	-55	100	-42	-63,5
110	-43	-55	110	-43,5	-62
120	-42	-54	120	-46	-61
130	-41	-52,5	130	-48	-60
140	-41	-51	140	-50,5	-58
150	-42	-50	150	-54,5	-58
160	-45	-49	160	-60	-58
170	-50	-49	170	-68	-58
180	-62	-49	180	-69	-58
190	-52	-49	190	-67	-58
200	-45	-48,5	200	-61	-57,5
210	-42,5	-48	210	-55	-58
220	-41	-48,5	220	-51	-59
230	-40	-50	230	-48	-60
240	-39,5	-52,5	240	-46	-61
250	-40	-55	250	-44,5	-62
260	-41	-54,5	260	-43	-62
270	-40	-51	270	-41	-62
280	-38,5	-48	280	-40	-61
290	-38	-46	290	-40,5	-59
300	-36,5	-45	300	-41,5	-58
310	-37	-44	310	-43	-56
320	-38	-44	320	-45	-55
330	-40	-44,5	330	-47,5	-53,5
340	-43	-45,5	340	-52	-53
350	-48	-46,5	350	-58	-52
360	-61	-47	360	-75	-53

bow-tie κεραία – Πίνακας 4					
f=8GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=10GHz	P=14dBm	d=2,73m
theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-80		0	-82	
10	-76		10	-65	
20	-72		20	-60	
30	-70		30	-57	
40	-75		40	-58	
50	-73		50	-62	
60	-65		60	-71	
70	-60,5		70	-71	
80	-59		80	-67	
90	-58		90	-63,5	
100	-58		100	-62	
110	-56		110	-61	
120	-55		120	-61	
130	-56		130	-64	
140	-55		140	-75	
150	-56		150	-67	
160	-58		160	-63	
170	-62		170	-63	
180	-66		180	-65	
190	-74		190	-70	
200	-72		200	-72	
210	-68		210	-73	
220	-65		220	-67	
230	-63		230	-61	
240	-60		240	-59	
250	-57		250	-59	
260	-56		260	-60	
270	-55		270	-65	
280	-56		280	-72	
290	-58,5		290	-63	
300	-59		300	-62	
310	-60		310	-62	
320	-65		320	-67	
330	-74		330	-64	
340	-78		340	-64	
350	-77		350	-64	
360	-73		360	-67	

bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία - Πίνακας 1								
f=2,5 GHz	P=10 dBm	d=2,73m	f=4,2 GHz	P=10 dBm	d=2,73m	f=5,5 GHz	P=10 dBm	d=2,73m
phi (μοίρες)	co (dBm)	cross (dBm)	phi (μοίρες)	co (dBm)	cross (dBm)	phi (μοίρες)	co (dBm)	cross (dBm)
0	-40,5	-53	0	-41,5	-75	0	-44	-77
10	-41,5	-58	10	-42	-65,5	10	-43	-58
20	-43	-64,5	20	-42,5	-59	20	-44	-54,5
30	-45	-65,5	30	-43,5	-56,5	30	-45,5	-52,5
40	-46,5	-63	40	-45	-55,5	40	-48	-52,5
50	-48	-59	50	-46,5	-55,5	50	-50,5	-53,5
60	-50	-57,5	60	-48,5	-56	60	-53	-56
70	-50	-57,5	70	-49,5	-58	70	-54,5	-60
80	-50	-58,5	80	-50	-61,5	80	-55	-68
90	-49	-61	90	-50	-73,5	90	-55	-71,5
100	-47,5	-65	100	-50	-67,5	100	-54,5	-62
110	-46	-60,5	110	-49	-60	110	-54	-57
120	-44,5	-58	120	-48,5	-57	120	-52,5	-53,5
130	-43	-56,5	130	-48	-56	130	-50,5	-51,5
140	-42	-55	140	-46	-55	140	-47,5	-50,5
150	-40,5	-54	150	-44,5	-55	150	-45,5	-50,5
160	-39,5	-53,5	160	-43	-56,5	160	-43,5	-52
170	-39	-52	170	-41,5	-58,5	170	-42	-55,5
180	-38,5	-51,5	180	-41	-64,5	180	-41,5	-63,5
190	-38,5	-51,5	190	-40,5	-83	190	-41,5	-66
200	-38,5	-51	200	-40,5	-66,5	200	-42,5	-58
210	-39	-50,5	210	-41	-62,5	210	-43,5	-55
220	-40	-51,5	220	-42,5	-60,5	220	-46	-54,5
230	-41	-53	230	-44	-60	230	-47,5	-55,5
240	-42	-53,5	240	-46,5	-61,5	240	-49,5	-56,5
250	-42,5	-54	250	-49	-63,5	250	-50,5	-59
260	-42,5	-54,5	260	-51	-66,5	260	-51,5	-63
270	-42,5	-54,5	270	-52	-65,5	270	-52	-65
280	-42	-53	280	-52	-63	280	-52,5	-61
290	-41,5	-52,5	290	-51	-61	290	-52	-57
300	-41	-52,5	300	-49,5	-58	300	-51,5	-54,5
310	-40	-50,5	310	-48	-56,5	310	-49,5	-53,5
320	-39,5	-49,5	320	-46	-56,5	320	-47	-52,5
330	-39	-49,5	330	-44	-57	330	-44,5	-53
340	-39,5	-50,5	340	-43	-60	340	-43	-55
350	-40	-51	350	-42	-66	350	-42,5	-60
360	-41	-53,5	360	41,5	-73	360	-43	-78

bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία - Πίνακας 2					
f=8,2GHz	P=10dBm	d=2,73m	f=10GHz	P=10dBm	d=1,21m
phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	phi(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-61		0	-64	-84
10	-61		10	-66	-70
20	-65		20	-60	-66
30	-65		30	-54	-69
40	-54		40	-52	-83
50	-56,5		50	-52	-74
60	-54,5		60	-53	-70
70	-54		70	-54	-70
80	-54		80	-55	-74
90	-53,5		90	-57	-83
100	-53,5		100	-55	-76
110	-54		110	-54	-72
120	-54		120	-55	-72
130	-55,5		130	-52	-73
140	-58		140	-52	-75
150	-62		150	-54	-69
160	-63		160	-58	-65
170	-60		170	-63	-67
180	-59,5		180	-62	-76
190	-62		190	-64	-69
200	-70		200	-60	-66
210	-60		210	-53	-68
220	-55,5		220	-51	-71
230	-53,5		230	-50	-71
240	-52,5		240	-51	-71
250	-52,5		250	-52	-72
260	-52		260	-53	-75
270	-52		270	-53	-79
280	-52		280	-53	-81
290	-52,5		290	-53	-78
300	-53		300	-52	-79
310	-54		310	-52	-84
320	-56		320	-53	-71
330	-62		330	-55	-65
340	-76		340	-63	-64
350	-63		350	-68	-68
360	-61		360	-64	-83

bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία - Πίνακας 3								
f=2,5 GHz	P=10 dBm	d=2,73 m	f=4,2 GHz	P=10 dBm	d=2,73 m	f=5,5 GHz	P=10 dBm	d=2,73 m
theta (μοίρες)	co (dBm)	cross (dBm)	theta (μοίρες)	co (dBm)	cross (dBm)	theta (μοίρες)	co (dBm)	cross (dBm)
0	-54	-52	0	-62	-50	0	-58	-55
10	-49	-50,5	10	-52,5	-51	10	-53	-54,5
20	-45	-50	20	-48	-51,5	20	-49	-54,5
30	-42,5	-50	30	-45	-53	30	-46	-55,5
40	-40,5	-51	40	-43	-55	40	-43,5	-56
50	-39	-53	50	-41,5	-58	50	-41,5	-58
60	-38,5	-55	60	-40,5	-61	60	-41,5	-59
70	-38,5	-57	70	-40,5	-62	70	-40,5	-61
80	-38,5	-58	80	-41,5	-60	80	-42	-62
90	-39,5	-57	90	-42,5	-59	90	-43,5	-62,5
100	-41,5	-55	100	-43,5	-59	100	-44,5	-62,5
110	-44	-53	110	-44	-60	110	-45	-62
120	-45,5	-52	120	-44	-63	120	-47	-63,5
130	-45,5	-52	130	-45	-67	130	-50	-66
140	-45,5	-51	140	-47	-75	140	-52,5	-70
150	-46,5	-51,5	150	-50	-66	150	-55,5	-72
160	-49	-51,5	160	-53,5	-60	160	-60,5	-71,5
170	-54	-52	170	-56,5	-59	170	-70	-71,5
180	-64	-52,5	180	-56	-58	180	-70	-75
190	-56	-53	190	-53,5	-59	190	-62	-80
200	-51	-54	200	-51	-59	200	-58	-74
210	-48	-56	210	-48	-59	210	-55,5	-70
220	-47	-59	220	-45,5	-59	220	-54	-68
230	-45,5	-63	230	-44	-59	230	-50,5	-67
240	-44,5	-65	240	-43	-59	240	-47	-67
250	-44	-63	250	-43	-61	250	-44	-66,5
260	-43	-61	260	-43,5	-63	260	-42	-67
270	-42	-58	270	-43,5	-69	270	-41	-68,5
280	-41,5	-57	280	-42,5	-65	280	-40,5	-68
290	-41,5	-56	290	-42	-59	290	-40	-66,5
300	-42	-55	300	-42,5	-56	300	-40	-64
310	-43	-55	310	-44	-54	310	-41,5	-62
320	-44	-56	320	-45,5	-53	320	-43,5	-60
330	-46	-56	330	-48	-52	330	-47	-58,5
340	-48,5	-54,5	340	-52	-50,5	340	-51	-57,5
350	-51,5	-53	350	-59,5	-50	350	-56,5	-56
360	-51	-52	360	-62	-50	360	57	-55

bow-tie κεραία με παρασιτικά στοιχεία - Πίνακας 4					
f=8,2GHz	P=14dBm	d=2,73m	f=10GHz	P=14dBm	d=2,73m
theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)	theta(μοίρες)	co(dBm)	cross(dBm)
0	-75		0	-62,5	
10	-68		10	-60	
20	-64		20	-57,5	
30	-59		30	-56,5	
40	-55		40	-58	
50	-53		50	-63	
60	-53		60	-73	
70	-55		70	-78	
80	-56,5		80	-68	
90	-55		90	-64	
100	-56		100	-60,5	
110	-57		110	-58	
120	-57,5		120	-58	
130	-57,5		130	-61,5	
140	-58		140	-73	
150	-59		150	-66	
160	-60		160	-62	
170	-64		170	-63	
180	-72,5		180	-67	
190	-82		190	-70	
200	-71		200	-69	
210	-64		210	-65	
220	-59		220	-62	
230	-55		230	-58,5	
240	-53,5		240	-57,5	
250	-54,5		250	-60	
260	-60		260	-64	
270	-58		270	-74	
280	-55		280	-66	
290	-51		290	-61	
300	-50,5		300	-63	
310	-51,5		310	-80	
320	-54		320	-62	
330	-59		330	-59	
340	-65		340	-58	
350	-74		350	-59	
360	-76		360	-61,5	