



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Σχεδίαση και μελέτη τετραγωνικής κεραίας σε διάταξη πολλών  
στοιχείων, για δορυφορικό κινητό τερματικό ,στη ζώνη 11/14 GHz  
και τροφοδότησή της στα 10 GHz**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τατιάνα Κ. Ντανοπούλου

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2005





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

**Σχεδίαση και μελέτη τετραγωνικής κεραίας σε διάταξη πολλών  
στοιχείων, για δορυφορικό κινητό τερματικό ,στη ζώνη 11/14 GHz  
και τροφοδότησή της στα 10 GHz**

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τατιάνα Κ. Ντανοπούλου

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2005.

.....  
Νικόλαος Ουζούνογλου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Παναγιώτης Φράγκος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Κακλαμάνη Δήμητρα  
Επίκουρος καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2005

.....  
Τατιάνα Κ. Ντανοπούλου

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

Copyright © Τατιάνα Ντανοπούλου, 2005.

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 ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Νικόλαο Ουζούνογλου για την καθοδήγηση, το χρόνο που διέθεσε, τις παρατηρήσεις του όλο αυτό το χρονικό διάστημα και για την δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την διπλωματική εργασία σε ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον πεδίο της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού.

Ντανοπούλου Γατιάνα

Οκτώβριος 2005

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη σχεδίαση τετραγωνικής μικροταινιακής κεραίας σε διάταξη πολλών στοιχείων και ανάλυση αυτής για δορυφορικό κινητό τερματικό ,στη ζώνη 11/14 GHz ,με τροφοδότηση στα 10GHz. Αρχικά παρουσιάζονται βασικές έννοιες που αφορούν τόσο τις μικροταινιακές κεραίες όσο και τις κεραίες γενικότερα. Στη συνέχεια αναφέρονται και βασικές έννοιες που αφορούν στη θεωρία των στοιχειοκεραιών. Με βάση τα παραπάνω υλοποιείται η σχεδίαση της τετραγωνικής στοιχειοκεραίας. Αρχικά υπολογίζονται οι διαστάσεις και τα πεδία της ορθογωνικής κεραίας μικροταινιακής νησίδας που αποτελεί το στοιχείο της στοιχειοκεραίας. Έπειτα υπολογίζεται ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας με τον συνολικό αριθμό των στοιχείων και την μεταξύ τους απόσταση να ποικίλουν. Κατόπιν αναφέρονται συνοπτικά οι τεχνικές τροφοδοσίας. Τέλος μελετάται η τροφοδότηση της στοιχειοκεραίας που σχεδιάστηκε, η οποία θεωρείται ότι έχει πέντε συνολικά στοιχεία .Τα στοιχεία τροφοδοτούνται με συχνότητα  $f=10\text{GHz}$ . Η τροφοδότηση γίνεται μέσω μικροταινιακής γραμμής σε κάποιο σημείο της οποίας θα τοποθετηθεί ένας phase shifter. Τόσο το μήκος της γραμμής όσο και η απόσταση του phase shifter από το στοιχείο μεταβάλλονται. Για τις διάφορες τιμές τους, υπολογίζεται ο συντελεστής ανάκλασης εισόδου και ο συντελεστής μετάδοσης στο τέλος της γραμμής μεταφοράς, δηλαδή στο στοιχείο. Ο παράγοντας διάταξης, ο συντελεστής ανάκλασης και ο συντελεστής μετάδοσης προέκυψαν από προγράμματα που υλοποιήθηκαν σε MATLAB

## Λέξεις – κλειδιά

Μικροταινιακή, διαστάσεις, κεραία μικροταινιακής νησίδας, τετραγωνική στοιχειοκεραία, E-επίπεδο, H-επίπεδο, παράγοντας διάταξης, phase shifter, τροφοδότηση, μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς, συντελεστής ανάκλασης εισόδου, συντελεστής μετάδοσης

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is to design and analyze a microstrip square array antenna designed to be used on any car or any other vehicle using micro strip rectangular patch antennas radiating between 11-14GHz. Initially an outline concerning the theory of microstrip antennas and antennas in general is presented. This also occurs for the theory of arrays. The microstrip square array antenna is designed based on the theory presented above. First of all we compute the dimensions and the fields radiated by a rectangular microstrip patch antenna which is the element of the array antenna. Then the array factor is presented for a number of cases, in which the total number of elements and the distance between them vary. Afterwards a reference and a brief analysis are made on technics used to feed microstrip patch. Finally we study how the microstrip square array antenna is fed. The microstrip square array antenna has five elements and its feeding frequency is  $f=10\text{GHz}$ . It is fed through a microstrip transmission line. Along the transmission line a phase shifter is placed. Both the distance of the phase shifter from each element and the length of the transmission line can take different values. All combinations of the above different values of distance and length result in the computation of the reflection coefficient and the transmission coefficient. The array factor, the reflection coefficient  $\kappa$  and transmission coefficient are simulated in MATLAB.

## **Keywords**

Microstrip, dimensions, patch antenna, square array, E-plane, H-plane, array factor, phase shifter, feeding, microstrip transmission line, reflection coefficient, transmission coefficient

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	<b>8</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b>	<b>10</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ</b>	<b>13</b>
1.1 Εισαγωγή	13
1.2 Βασικά χαρακτηριστικά της μικροταινιακής κεραίας	13
1.3 Διηλεκτρικό υπόστρωμα	15
1.4 Είδη μικροταινιακών κεραιών	15
1.4.1 Κεραίες οδεύοντος κύματος	15
1.4.2 Σχισμοκεραίες	17
1.4.3 Κεραίες μικροταινιακής νησίδας	18
1.5 Ανάλυση της ορθογωνικής κεραίας μικροταινιακής νησίδας	19
1.5.1 Μοντέλο γραμμής μεταφοράς (transmission-line model)	19
1.5.2 Μοντέλο κοιλότητας(cavity model)	22
1.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μικροταινιακών κεραιών	24
1.7 Εφαρμογές	25
1.7.1 Ιατρικές Συσκευές	25
1.7.2 Πομποδέκτες radar	26
1.7.3 Τοπικά ασύρματα δίκτυα (WLAN)	26
1.7.4 Δορυφορικές επικοινωνίες	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΕΡΑΙΩΝ</b>	<b>28</b>
<b>ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ</b>	<b>28</b>
2.1 Εισαγωγικές έννοιες	28
2.2 Λοβοί ακτινοβολίας	29
2.3 Ισοτροπικός ακτινοβολητής	30
2.4 Κατευθυντικό κέρδος-Κατευθυντικότητα	30
2.5 ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ	32
2.5.1 Εισαγωγή	32
2.5.2 Στοιχειοκεραία πολλών στοιχείων	33
2.5.3 Υπολογισμός παράγοντα διάταξης	34
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ</b>	<b>36</b>
3.1 Υπολογισμός μεγεθών ορθογωνικής κεραίας μικροταινιακής νησίδας	36
3.2 Υπολογισμός πεδίων της κεραίας	37
3.3 Υπολογισμός του παράγοντα διάταξης	41

3.4 Κώδικας MATLAB για τον παράγοντα διάταξης	42
3.5 Διαγράμματα ακτινοβολίας	45
3.6 Εύρεση του ολικού πεδίου της στοιχειοκεραίας	85
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ</b>	<b>87</b>
4.1 Εισαγωγή	87
4.2 Ομοαξονική γραμμή μεταφοράς	87
4.3 Μικροταινιακή γραμμή	88
4.4 Ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς	91
4.5 Περιγραφή σημάτων και ορισμοί των τάσεων και εντάσεων στα μικροκυματικά	92
4.6 Μικροκυματικά πολύθυρα	94
4.7 Αμφίδρομα πολύθυρα	96
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ ΜΕΣΩ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ.</b>	<b>98</b>
5.1 Ανάλυση του phase shifter	98
5.2 Ανάλυση της τροφοδότησης ενός στοιχείου	99
5.3 Κώδικας MATLAB για τον συντελεστή ανάκλασης και τον συντελεστή μετάδοσης	103
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	<b>139</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>146</b>

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1.1 ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗ ΚΕΡΑΙΑ.....	14
ΣΧΗΜΑ 1.2 ΚΕΡΑΙΕΣ ΟΔΕΥΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	16
ΣΧΗΜΑ 1.3 (Α),(Β) ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΕΣ ΣΧΙΣΜΟΚΕΡΑΙΕΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΟΜΟΕΠΙΠΕΔΗ ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ, (Γ) ΣΧΙΣΜΗ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑ, (Δ) ΚΥΚΛΙΚΗ ΣΧΙΣΜΗ, (Ε) ΛΕΠΤΗ ΣΧΙΣΜΗ, (Ζ) ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗΣ ΣΧΙΣΜΗ.....	17
ΣΧΗΜΑ 1.4 ΒΑΣΙΚΑ ΣΧΗΜΑΤΑ ΝΗΣΙΔΩΝ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ .....	18
ΣΧΗΜΑ 1.4 ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗ ΓΡΑΜΜΗ, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ, ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ.....	21
ΣΧΗΜΑ 1.5 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΙΑΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗΣ ΝΗΣΙΔΑΣ .....	22
ΣΧΗΜΑ 1.6 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΑΙ ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΡΕΥΜΑΤΩΝ .....	24
ΣΧΗΜΑ 2.1 ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ. ....	28
ΣΧΗΜΑ 2.2 ΛΟΒΟΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ, ΑΝΟΙΓΜΑ ΜΙΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ. ....	29
ΣΧΗΜΑ 2.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ. ....	34
ΣΧΗΜΑ 3.1 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ Ε-ΕΠΙΠΕΔΟ ΚΑΙ Η-ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΙΑΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗΣ ΝΗΣΙΔΑΣ .....	40
ΣΧΗΜΑ 3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	45
ΣΧΗΜΑ 3.2.1 ΔΟΚΙΜΗ 1 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ. ....	46
ΣΧΗΜΑ 3.2.2 ΔΟΚΙΜΗ 2 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	46
ΣΧΗΜΑ 3.2.3 ΔΟΚΙΜΗ 3 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	47
ΣΧΗΜΑ 3.2.4 ΔΟΚΙΜΗ 4 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	47
ΣΧΗΜΑ 3.2.5 ΔΟΚΙΜΗ 5 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	48
ΣΧΗΜΑ 3.2.6 ΔΟΚΙΜΗ 6 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	48
ΣΧΗΜΑ 3.2.7 ΔΟΚΙΜΗ 7 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	49
ΣΧΗΜΑ 3.2.8 ΔΟΚΙΜΗ 8 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	49
ΣΧΗΜΑ 3.2.9 ΔΟΚΙΜΗ 9 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	50
ΣΧΗΜΑ 3.2.10 ΔΟΚΙΜΗ 10 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	50
ΣΧΗΜΑ 3.2.11 ΔΟΚΙΜΗ 11 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	51
ΣΧΗΜΑ 3.2.12 ΔΟΚΙΜΗ 12 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	51
ΣΧΗΜΑ 3.2.13 ΔΟΚΙΜΗ 13 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	52
ΣΧΗΜΑ 3.2.14 ΔΟΚΙΜΗ 14 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	52
ΣΧΗΜΑ 3.2.15 ΔΟΚΙΜΗ 15 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	53
ΣΧΗΜΑ 3.2.16 ΔΟΚΙΜΗ 16 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	53
ΣΧΗΜΑ 3.2.17 ΔΟΚΙΜΗ 17 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	54
ΣΧΗΜΑ 3.2.18 ΔΟΚΙΜΗ 18 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	54
ΣΧΗΜΑ 3.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	55
ΣΧΗΜΑ 3.3.1 ΔΟΚΙΜΗ 1 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	56
ΣΧΗΜΑ 3.3.2 ΔΟΚΙΜΗ 2 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	56
ΣΧΗΜΑ 3.3.3 ΔΟΚΙΜΗ 3 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	57
ΣΧΗΜΑ 3.3.4 ΔΟΚΙΜΗ 4 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	57
ΣΧΗΜΑ 3.3.5 ΔΟΚΙΜΗ 5 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	58
ΣΧΗΜΑ 3.3.6 ΔΟΚΙΜΗ 6 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	58
ΣΧΗΜΑ 3.3.7 ΔΟΚΙΜΗ 7 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	59
ΣΧΗΜΑ 3.3.8 ΔΟΚΙΜΗ 8 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	59
ΣΧΗΜΑ 3.3.9 ΔΟΚΙΜΗ 9 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	60
ΣΧΗΜΑ 3.3.10 ΔΟΚΙΜΗ 10 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	60

ΣΧΗΜΑ 3.3.11 ΔΟΚΙΜΗ 11 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	61
ΣΧΗΜΑ 3.3.12 ΔΟΚΙΜΗ 12 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	61
ΣΧΗΜΑ 3.3.13 ΔΟΚΙΜΗ 13 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	62
ΣΧΗΜΑ 3.3.14 ΔΟΚΙΜΗ 14 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	62
ΣΧΗΜΑ 3.3.15 ΔΟΚΙΜΗ 15 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	63
ΣΧΗΜΑ 3.3.16 ΔΟΚΙΜΗ 16 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	63
ΣΧΗΜΑ 3.3.17 ΔΟΚΙΜΗ 17 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	64
ΣΧΗΜΑ 3.3.18 ΔΟΚΙΜΗ 18 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 17 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	64
ΣΧΗΜΑ 3.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	65
ΣΧΗΜΑ 3.4.1 ΔΟΚΙΜΗ 1 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	66
ΣΧΗΜΑ 3.4.2 ΔΟΚΙΜΗ 2 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	66
ΣΧΗΜΑ 3.4.3 ΔΟΚΙΜΗ 3 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	67
ΣΧΗΜΑ 3.4.4 ΔΟΚΙΜΗ 4 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	67
ΣΧΗΜΑ 3.4.5 ΔΟΚΙΜΗ 5 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	68
ΣΧΗΜΑ 3.4.7 ΔΟΚΙΜΗ 7 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	69
ΣΧΗΜΑ 3.4.8 ΔΟΚΙΜΗ 8 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	69
ΣΧΗΜΑ 3.4.9 ΔΟΚΙΜΗ 9 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	70
ΣΧΗΜΑ 3.4.10 ΔΟΚΙΜΗ 10 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	70
ΣΧΗΜΑ 3.4.11 ΔΟΚΙΜΗ 11 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	71
ΣΧΗΜΑ 3.4.12 ΔΟΚΙΜΗ 12 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	71
ΣΧΗΜΑ 3.4.13 ΔΟΚΙΜΗ 13 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	72
ΣΧΗΜΑ 3.4.14 ΔΟΚΙΜΗ 14 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	72
ΣΧΗΜΑ 3.4.15 ΔΟΚΙΜΗ 15 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	73
ΣΧΗΜΑ 3.4.16 ΔΟΚΙΜΗ 16 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	73
ΣΧΗΜΑ 3.4.17 ΔΟΚΙΜΗ 17 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	74
ΣΧΗΜΑ 3.4.18 ΔΟΚΙΜΗ 18 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 37 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	74
ΣΧΗΜΑ 3.5 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	75
ΣΧΗΜΑ 3.5.1 ΔΟΚΙΜΗ 1 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	76
ΣΧΗΜΑ 3.5.2 ΔΟΚΙΜΗ 2 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	76
ΣΧΗΜΑ 3.5.3 ΔΟΚΙΜΗ 3 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	77
ΣΧΗΜΑ 3.5.4 ΔΟΚΙΜΗ 4 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	77
ΣΧΗΜΑ 3.5.5 ΔΟΚΙΜΗ 5 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	78
ΣΧΗΜΑ 3.5.6 ΔΟΚΙΜΗ 6 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	78
ΣΧΗΜΑ 3.5.7 ΔΟΚΙΜΗ 7 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	79
ΣΧΗΜΑ 3.5.8 ΔΟΚΙΜΗ 8 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	79
ΣΧΗΜΑ 3.5.9 ΔΟΚΙΜΗ 9 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	80
ΣΧΗΜΑ 3.5.10 ΔΟΚΙΜΗ 10 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	80
ΣΧΗΜΑ 3.5.11 ΔΟΚΙΜΗ 11 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	81
ΣΧΗΜΑ 3.5.12 ΔΟΚΙΜΗ 12 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	81
ΣΧΗΜΑ 3.5.13 ΔΟΚΙΜΗ 13 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	82
ΣΧΗΜΑ 3.5.14 ΔΟΚΙΜΗ 14 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	82
ΣΧΗΜΑ 3.5.15 ΔΟΚΙΜΗ 15 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	83
ΣΧΗΜΑ 3.5.16 ΔΟΚΙΜΗ 16 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	83
ΣΧΗΜΑ 3.5.17 ΔΟΚΙΜΗ 17 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	84
ΣΧΗΜΑ 3.5.18 ΔΟΚΙΜΗ 18 ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑ ΜΕ 65 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	84
ΣΧΗΜΑ 4.1 ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ.....	88
ΣΧΗΜΑ 4.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΣ.....	89
ΣΧΗΜΑ 4.3 (Α) ΚΛΑΣΙΚΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ PATCH ΚΕΡΑΙΑΣ ΑΠΟ MICROSTRIP LINE, (Β) Η ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑ ΕΙΣΕΡΧΕΤΑΙ ΣΤΟ PATCH, (Γ) ΣΥΖΕΥΞΗ ΜΕΣΩ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ.....	90

ΣΧΗΜΑ 4.4 ΟΜΟΕΠΙΠΕΔΗ ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ .....	91
ΣΧΗΜΑ 4.5 ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΑΠΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΕ ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	93
ΣΧΗΜΑ 4.6 ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΟ ΠΟΛΥΘΥΡΟ .....	94
ΣΧΗΜΑ 5.1 ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΤΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ .....	100
<u><math>v</math></u>	
ΣΧΗΜΑ 5.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ Ζ0 ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ $c$ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΕΣ .....	101
ΣΧΗΜΑ 5.3 Η ΓΡΑΜΜΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	101
ΣΧΗΜΑ 5.4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,1\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,05$ .	106
ΣΧΗΜΑ 5.4.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,1\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,1$ ..	107
ΣΧΗΜΑ 5.4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,1\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,2$ ..	108
ΣΧΗΜΑ 5.4.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,2\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,05$	109
ΣΧΗΜΑ 5.4.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,2\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,1$ ..	110
ΣΧΗΜΑ 5.4.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,2\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,2$ ..	111
ΣΧΗΜΑ 5.5.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,3\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,05$	112
ΣΧΗΜΑ 5.5.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,3\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,1$ ..	113
ΣΧΗΜΑ 5.5.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,3\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,2$ ..	114
ΣΧΗΜΑ 5.5.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,6\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,05$	115
ΣΧΗΜΑ 5.5.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,6\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,1$ ..	116
ΣΧΗΜΑ 5.5.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,6\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,2$ ..	117
ΣΧΗΜΑ 5.5.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,9\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,05$	118
ΣΧΗΜΑ 5.5.8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,9\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,1$ ..	119
ΣΧΗΜΑ 5.5.9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,9\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,2$ ..	120
ΣΧΗΜΑ 5.5.10 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 1,2\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,05$ .....	121
ΣΧΗΜΑ 5.5.11 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 1,2\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,1$	122
ΣΧΗΜΑ 5.5.12 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 1,2\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,2$	123
ΣΧΗΜΑ 5.5.13 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 1,5\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,05$ .....	124
ΣΧΗΜΑ 5.5.14 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 1,5\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,1$	125
ΣΧΗΜΑ 5.5.15 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 1,5\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,2$ .	126
ΣΧΗΜΑ 5.6.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,2\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,05$	127
ΣΧΗΜΑ 5.6.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,2\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,1$ ..	128
ΣΧΗΜΑ 5.6.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,2\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,2$ ..	129
ΣΧΗΜΑ 5.6.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,4\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,05$ .	130
ΣΧΗΜΑ 5.6.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,4\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,1$ ..	131
ΣΧΗΜΑ 5.6.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,4\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,2$ ...	132
ΣΧΗΜΑ 5.6.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,6\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,05$	133
ΣΧΗΜΑ 5.6.8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,6\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,1$ ..	134
ΣΧΗΜΑ 5.6.9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,6\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,2$ ..	135
ΣΧΗΜΑ 5.6.10 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,8\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,05$ .....	136
ΣΧΗΜΑ 5.6.11 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,8\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,1$	137
ΣΧΗΜΑ 5.6.12 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $L1 = 0,8\lambda$ ΚΑΙ $ROUT = 0,2$	138

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ

## 1.1 Εισαγωγή

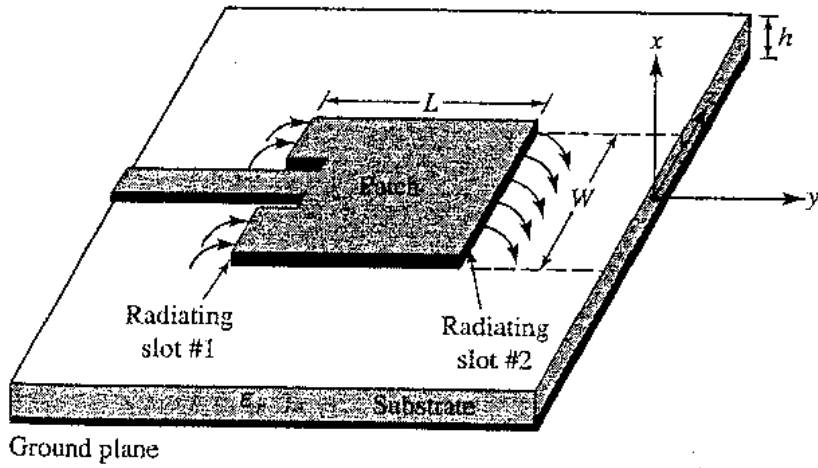
Η πρώτη σκέψη να χρησιμοποιηθεί μια μικροταινιακή διάταξη ως ακτινοβόλο στοιχείο, έγινε το 1953 από τον Deschamps. Το 1955, δύο χρόνια αργότερα, δημοσιεύτηκε η πατέντα από τους Gutton και Baissino. Τέλος, όσον αφορά στο πρακτικό τμήμα, οι πρώτες κεραίες, αναπτύχθηκαν από τους Howell και Manson.

Τη δεκαετία του 1970 εκδηλώθηκε έντονο ενδιαφέρον για τις μικροταινιακές κεραίες οπότε και άρχισε η Παρασκευή τους. Αυτό συνέβηκε διότι εκείνη την εποχή ήταν πλέον δυνατή η μαζική παραγωγή διηλεκτρικών τα οποία είχαν μικρές θερμικές απώλειες και ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες. Επίσης τότε αναπτύχθηκαν βελτιωμένες μέθοδοι λιθογραφίας και καλύτερα θεωρητικά μοντέλα. Από το 1970 και έπειτα έχει γίνει εκτενής έρευνα και έχουν βρεθεί πολλά πεδία εφαρμογών για τις μικροταινιακές κεραίες όπως αεροπλάνα, δορυφόροι κ.α. Σ' αυτές τις περιπτώσεις προτιμώνται οι μικροταινιακές κεραίες επειδή έχουν χαμηλό κόστος και μικρό μέγεθος και βάρος. Επιπλέον είναι αποδοτικές, κατάλληλες τόσο για επίπεδες όσο και για μη επίπεδες επιφάνειες, απλές και φθηνές στην κατασκευή, συμβατές με άλλα μικροκυματικά κυκλώματα και έχουν εύκολη εγκατάσταση. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ποικιλοτρόπως ανάλογα με τη συχνότητα συντονισμού, την πόλωση και την αντίστασή τους. Προσθέτοντας μάλιστα φορτία ανάμεσα σ' αυτές και το αγώγιμο επίπεδο δημιουργούνται κεραίες με μεταβλητή συχνότητα συντονισμού, αντίσταση και πόλωση.

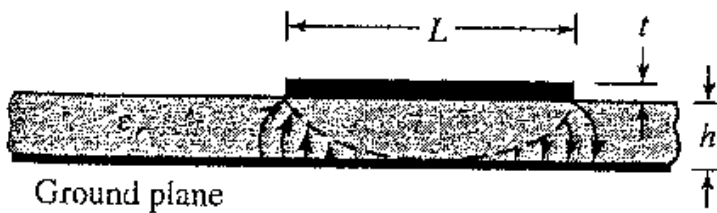
Είναι εμφανές ότι για την κατανόηση των εννοιών τόσο αυτού όσο και των επόμενων κεφαλαίων, ο αναγνώστης θα πρέπει να είναι εξοικειωμένος με τις βασικές θεωρίες μικροκυμάτων και κεραίων.

## 1.2 Βασικά χαρακτηριστικά της μικροταινιακής κεραίας

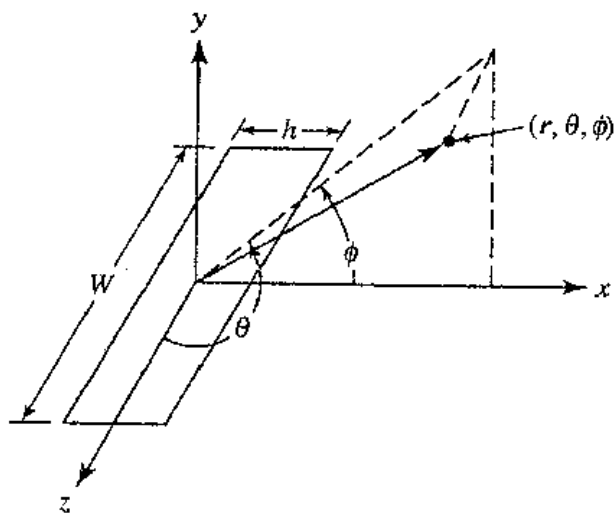
Η μικροταινιακή κεραία αποτελείται από μια πολύ λεπτή αγώγιμη μικροταινιακή νησίδα  $t$  ( $t \ll \lambda_0$ , όπου  $\lambda_0$  το μήκος κύματος ελευθέρου χώρου) που βρίσκεται πάνω σε διηλεκτρικό ύψους  $h$  ( $h \ll \lambda_0$ , συνήθως  $0,003 \cdot \lambda_0 \leq h \leq 0,005 \cdot \lambda_0$ ). Η άλλη πλευρά του διηλεκτρικού είναι γειωμένη (Σχήμα 1.1). Η αγώγιμη νησίδα (patch) είναι ένα λεπτό στρώμα (της τάξης  $\mu\text{m}$ ) συνήθως χαλκού, με μια επίστρωση χρυσού. Το πάχος του διηλεκτρικού υποστρώματος και η διηλεκτρική επιτρεπτικότητα ( $\epsilon_r$ ) επιλέγονται ανάλογα με τη σχεδίαση. Η νησίδα είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε το επίπεδο της μέγιστης ακτινοβολίας να είναι παράλληλο στο επίπεδό της. Για κάθε ορθογωνική νησίδα, το μήκος  $L$  είναι συνήθως  $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$ .



(a) Microstrip antenna



(b) Side view



(c) Coordinate system for each radiating slot

Σχήμα 1.1 Μικροταινιακή κεραία.

### 1.3 Διηλεκτρικό υπόστρωμα

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός διηλεκτρικών υποστρωμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις μικροταινιακές κεραίες. Οι διηλεκτρικές σταθερές τους κυμαίνονται από  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ . Υπόστρωμα με μεγάλο ύψος, του οποίου η διηλεκτρική σταθερά βρίσκεται στο κατώτερο άκρο του εύρους τιμών της, προτιμάται διότι παρέχει καλύτερη απόδοση και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Αυτό όμως οδηγεί στη δημιουργία μεγαλύτερου μεγέθους κεραίων. Λεπτό υπόστρωμα με υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά, προτιμάται για μικροκυματικά κυκλώματα. Σ' αυτή την περίπτωση προκύπτουν κεραίες μικρότερου μεγέθους που όμως λόγω μεγαλύτερων απωλειών, είναι λιγότερο αποδοτικές και έχουν συγκριτικά μικρότερο εύρος ζώνης.

Επειδή οι μικροταινιακές κεραίες συχνά χρησιμοποιούνται σε μικροκυματικά κυκλώματα, πρέπει να βρεθεί ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην καλή απόδοση της κεραίας και στη σχεδίαση του κυκλώματος.

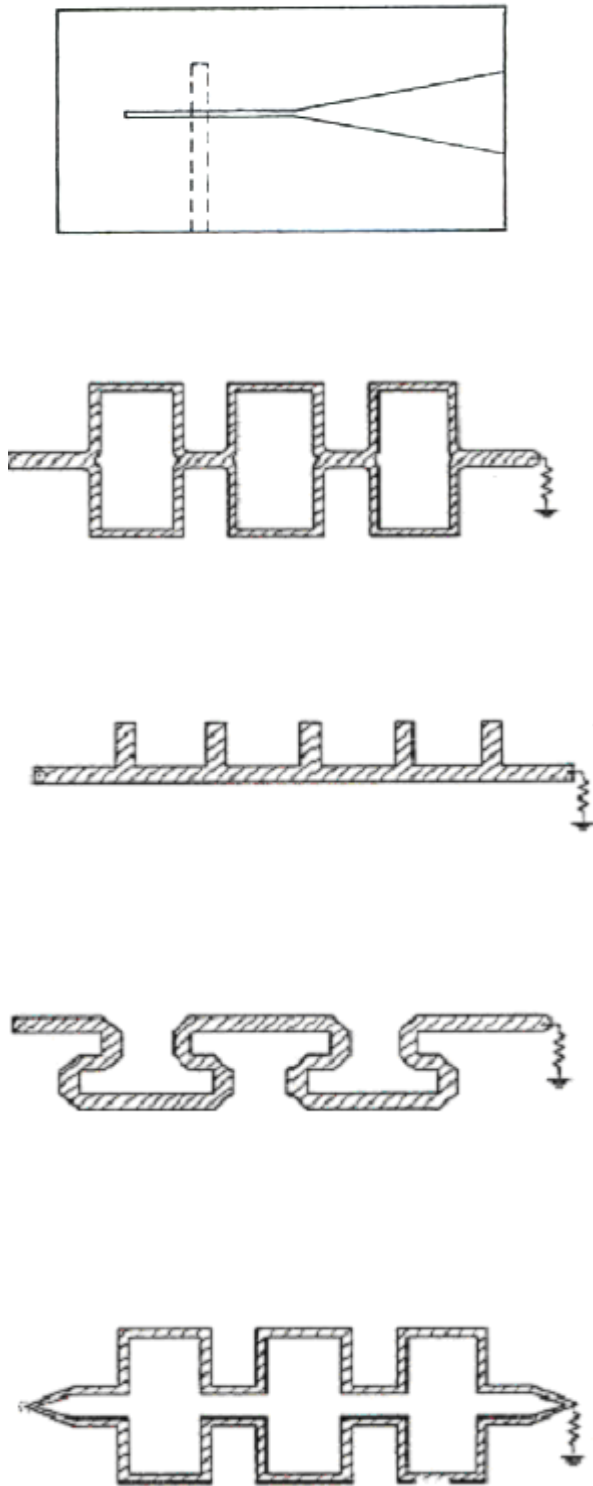
### 1.4 Είδη μικροταινιακών κεραίων

Παραπάνω παρουσιάστηκε μια κεραία μικροταινιακής νησίδας. Συνολικά διακρίνονται τρία είδη μικροταινιακών κεραίων:

- α) Κεραίες οδεύοντος κύματος (microstrip travelling-wave antennas),
- β) Σχισμοκεραίες (microstrip slot antennas) και
- γ) Κεραίες μικροταινιακής νησίδας (microstrip patch antennas).

#### 1.4.1 Κεραίες οδεύοντος κύματος

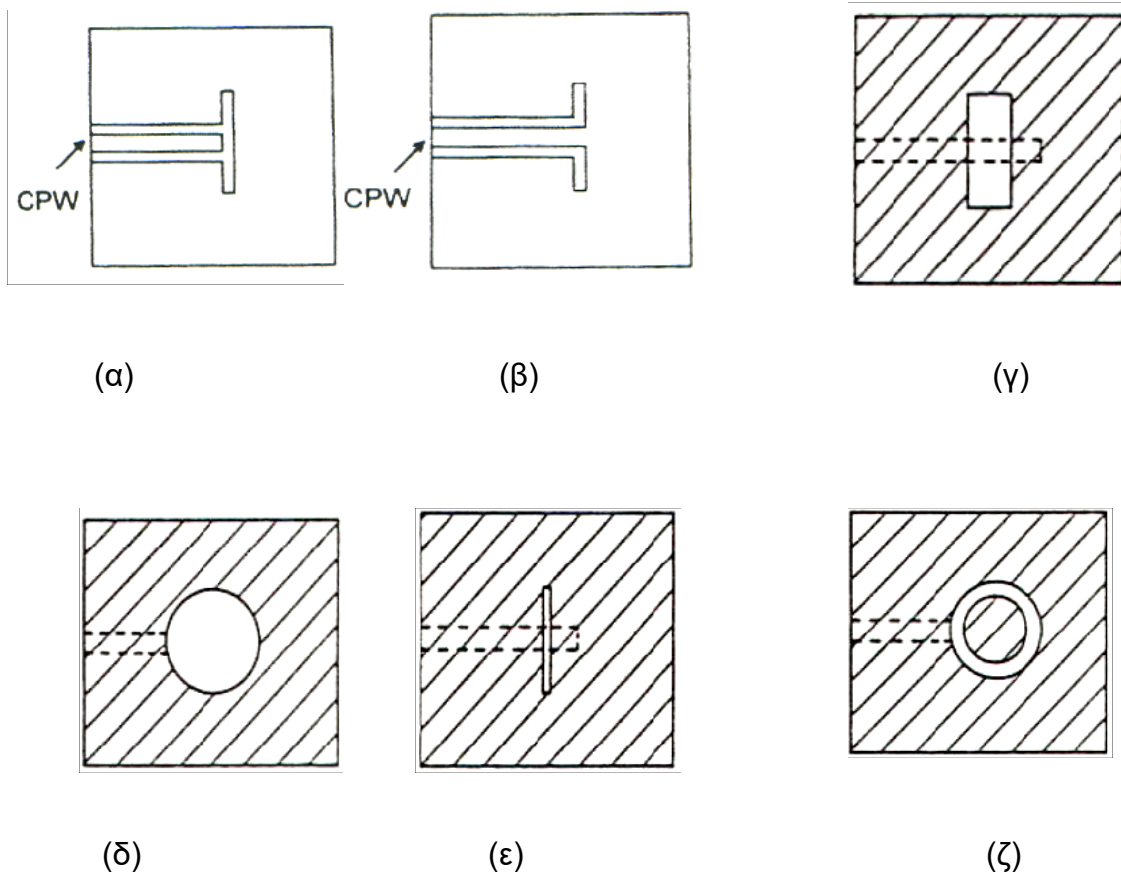
Οι κεραίες οδεύοντος κύματος αποτελούνται από αγώγιμα τμήματα με σχήμα αλυσίδας τα οποία επαναλαμβάνονται περιοδικά (Σχήμα 1.2), ή από μεγάλο μήκος μικροταινιακή γραμμή ούτως ώστε να διεγείρεται TE ρυθμός. Το άλλο άκρο της κεραίας οδεύοντος κύματος τερματίζεται με κατάλληλο φορτίο για να αποφεύγονται τα στάσιμα κύματα. Οι κεραίες αυτές είναι σαφές ότι υποστηρίζουν οδεύοντα κύματα. Έτσι σχεδιάζονται ώστε ο κύριος λοβός ακτινοβολίας να μπορεί να στρέφεται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Όσον αφορά το διάγραμμα ακτινοβολίας τους, παρουσιάζουν ιδιότητες ευρείας ζώνης. Επιπλέον ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων τέτοιων κεραίων οδηγεί σε διατάξεις με μεγαλύτερη κατευθυντικότητα ενώ οι ιδιότητες ευρείας ζώνης εξακολουθούν να ισχύουν. Μια πολύ δημοφιλής MTA (Microstrip Travelling - wave Antenna) είναι η tapered slot που είναι ιδιαίτερα κατευθυντική με μεγάλο κέρδος:



Σχήμα 1.2 Κεραίες οδεύοντος κύματος.

### 1.4.2 Σχισμοκεραίες

Οι σχισμοκεραίες κατασκευάζονται αν σε κλασική μικροταινία χαραχτεί μια σχισμή στο μεταλλικό αγωγό στο κάτω μέρος που θεωρείται ως γείωση. Έτσι προκύπτει σχισμοκεραία που τροφοδοτείται από μικροταινία. Μια σχισμή μπορεί να είναι ορθογωνική, κυκλική ή οποιασδήποτε άλλης γεωμετρίας. Χaráσσεται σε λεπτό αγωγίμο στρώμα πάνω από διηλεκτρικό. Τα σχήματα των σχισμοκεραιών προκύπτουν από αυτά των κεραιών μικροταινιακής νησίδας αν στη μεταλλική επιφάνεια των τελευταίων (Σχήμα 1.4) χαραχθεί μια σχισμή. Οι σχισμοκεραίες είναι γνωστό ότι ακτινοβολούν και προς τις δύο κατευθύνσεις. Για να ακτινοβολούν μόνο προς μια κατεύθυνση απαιτείται ανακλαστήρας ή ground plane πάνω σε διηλεκτρικό. Ακολουθούν κάποιες χαρακτηριστικές σχισμοκεραίες :

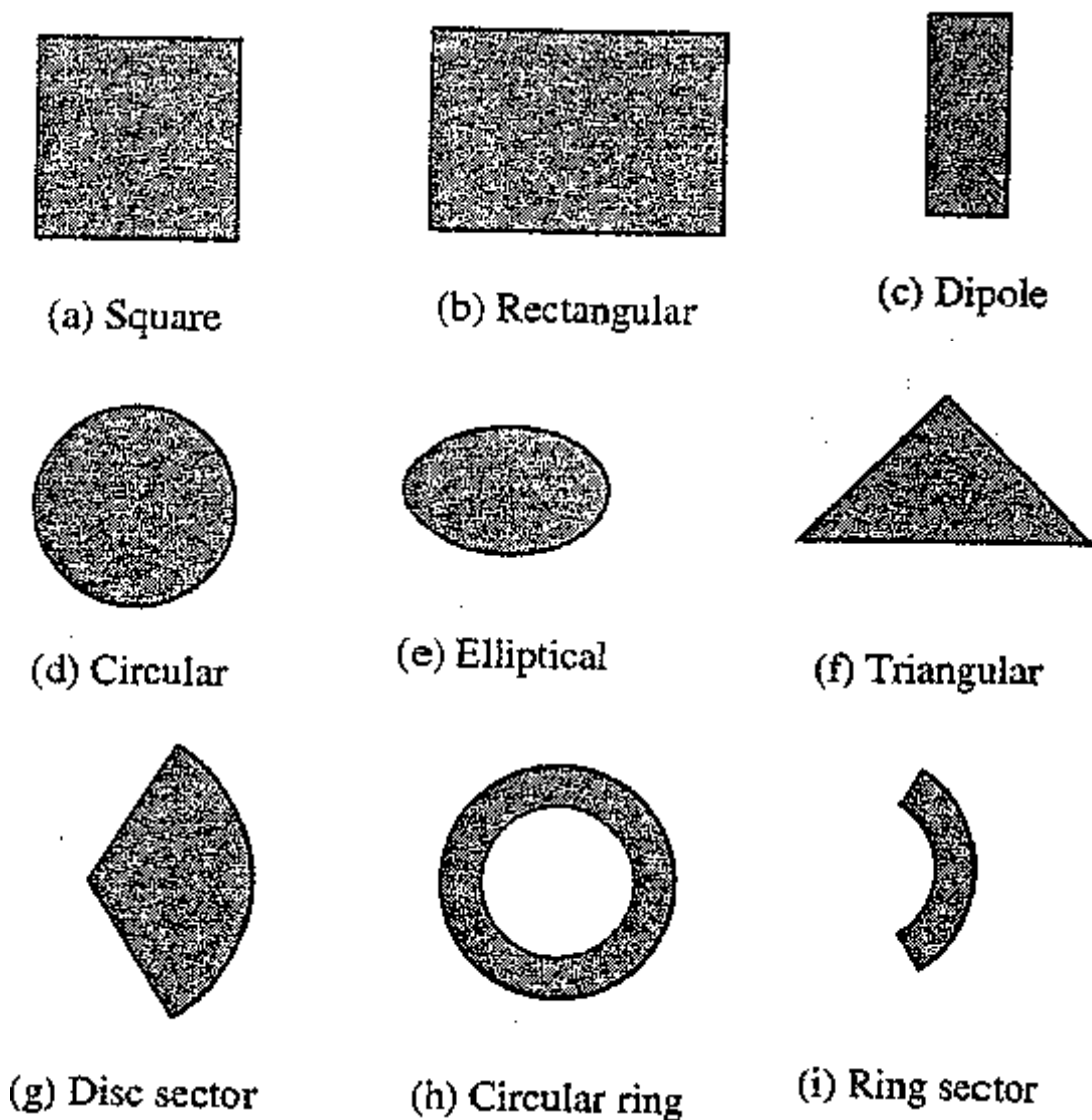


**Σχήμα 1.3** (α),(β) ορθογωνικές σχισμοκεραίες τροφοδοτούμενες από ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς, (γ) Σχισμή τροφοδοτούμενη από μικροταινία, (δ) κυκλική σχισμή, (ε) λεπτή σχισμή, (ζ) δακτυλιοειδής σχισμή.

### 1.4.3 Κεραίες μικροταινιακής νησίδας

Σ' αυτό τον τύπο κεραίας τα ακτινοβολούντα στοιχεία και οι γραμμές τροφοδοσίας είναι συνήθως τυπωμένα στο διηλεκτρικό. Η ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών της κεραίας μικροταινιακής νησίδας έγινε σε προηγούμενη παράγραφο.

Η μεταλλική νησίδα μπορεί να είναι τετραγωνική, ορθογωνική, διπολική, κυκλική, ελλειπτική, τριγωνική ή οποιασδήποτε άλλης μορφής. Οι πιο συνηθισμένες είναι οι τετραγωνικές, ορθογωνικές, διπολικές και οι κυκλικές διότι είναι εύκολο να αναλυθούν, να κατασκευαστούν και να έχουν επιθυμητά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας. Κάποια από τα σχήματα που μπορεί λάβει η μικροταινιακή νησίδα φαίνονται στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4 Βασικά σχήματα νησίδων μικροταινιακών κεραιών .

Τυπικές τιμές κέρδους για μια κεραία μικροταινιακής νησίδας είναι 5 με 6 db, ενώ η γωνία μισής ισχύος κυμαίνεται μεταξύ 700 και 900. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές μελέτες στην προσπάθεια να μειωθεί το μέγεθός τους και να αυξηθεί το εύρος ζώνης τους, το οποίο είναι συνήθως ιδιαίτερα μικρό. Στην κατηγορία των μικροταινιακών κεραίων με μεγάλο εύρος ζώνης και μικρό μέγεθος ανήκουν οι διπολικές μικροταινιακές κεραίες αφού έχουν κληρονομήσει την ιδιότητα του μεγάλου εύρους ζώνης και καταλαμβάνουν μικρό χώρο .

## 1.5 Ανάλυση της ορθογωνικής κεραίας μικροταινιακής νησίδας

Η ανάλυση της ορθογωνικής κεραίας μικροταινιακής νησίδας μπορεί να γίνει είτε με χρήση του μοντέλου της γραμμής μεταφοράς (transmission line model) είτε με χρήση του μοντέλου κοιλότητας (cavity model).

### 1.5.1 Μοντέλο γραμμής μεταφοράς (transmission-line model)

Το μοντέλο transmission-line αναπαριστά την κεραία μικροταινιακής νησίδας με δύο σχισμές που χωρίζονται από γραμμή μεταφοράς μήκους  $L$ , η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντίσταση.

Επειδή οι διαστάσεις της κεραίας είναι πεπερασμένες ως προς το μήκος και το πλάτος, τα πεδία στις ακμές της κεραίας υφίστανται φαινόμενα διαρροής (fringing effects). Τα φαινόμενα αυτά φαίνονται, στο σχήμα 1.1, και για τις δυο ακτινοβολούσες σχισμές κατά το μήκος της κεραίας. Προφανώς το ίδιο ισχύει και για το πλάτος της κεραίας. Το fringing θεωρείται συνάρτηση των διαστάσεων της νησίδας και του ύψους του διηλεκτρικού. Για το επίπεδο  $x-y$  το fringing είναι συνάρτηση του λόγου του μήκους  $L$  της νησίδας προς το ύψος  $h$  του διηλεκτρικού ( $L/h$ ) και της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$  του υποστρώματος. Καθώς για τις μικροταινιακές κεραίες ισχύει  $L/h \gg 1$ , το fringing ελαττώνεται, παρ' όλ' αυτά πρέπει να ληφθεί υπόψη διότι επηρεάζει τη συχνότητα συντονισμού της κεραίας. Τα ίδια ισχύουν και για το πλάτος.

Για τη μικροταινιακή γραμμή του σχ.1.4(α) οι τυπικές ηλεκτρικές γραμμές πεδίου φαίνονται στο σχ. 1.4(b). Πρόκειται για μη ομογενείς γραμμές δύο διηλεκτρικών: συνήθως το υπόστρωμα και τον αέρα. Όπως μπορεί κανείς να δει το μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρικών γραμμών του πεδίου συγκεντρώνεται μέσα στο διηλεκτρικό υπόστρωμα, Μόνο ένα μικρό τμήμα κάποιων γραμμών βρίσκεται στον αέρα. Οι ηλεκτρικές γραμμές πεδίου συγκεντρώνονται κυρίως στο υπόστρωμα διότι  $W/h \gg 1$  και  $\epsilon_r \gg 1$ . Το fringing σ' αυτή την περίπτωση κάνει τη μικροταινιακή γραμμή να έχει μεγαλύτερο ηλεκτρικό πλάτος συγκριτικά με τις φυσικές της διαστάσεις. Επειδή άλλα κύματα ταξιδεύουν μέσα στο υπόστρωμα και άλλα στον αέρα, μια ενεργός

διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_{\text{reff}}$  εισάγεται ώστε να περιλαμβάνει το fringing και τη διάδοση κύματος στη γραμμή .

Για να εισαχθεί η έννοια της ενεργούς διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_{\text{reff}}$  ,ας υποθεθεί ότι η μικροταινιακή γραμμή, με τις αρχικές διαστάσεις και το αρχικό ύψος πάνω από το αγώγιμο επίπεδο, είναι ενσωματωμένη μέσα σε διηλεκτρικό όπως φαίνεται στο σχ. 1.4(c) .Το  $\epsilon_{\text{reff}}$  ορίζεται ως η διηλεκτρική σταθερά ενός ομοιόμορφου διηλεκτρικού υλικού ούτως ώστε η γραμμή του σχ. 1.4(c) να έχει τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, ιδίως σταθερά διάδοσης, με την πραγματική γραμμή του σχ. 1.4(a).

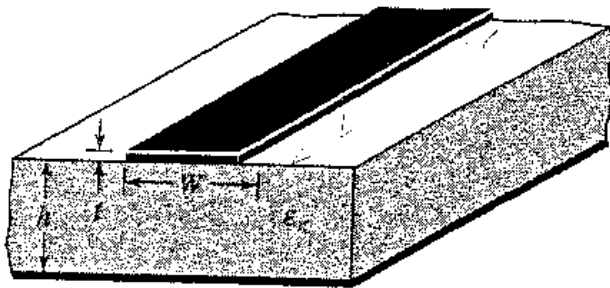
Για γραμμή με αέρα πάνω από το υπόστρωμα η  $\epsilon_{\text{reff}}$  παίρνει τιμές που κυμαίνονται από  $1 < \epsilon_{\text{reff}} < \epsilon_r$  .Για τις περισσότερες εφαρμογές όπου η διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος είναι πολύ μεγαλύτερη της μονάδας ( $\epsilon_r \gg 1$ ) η τιμή της  $\epsilon_{\text{reff}}$  είναι πιο κοντά στην πραγματική τιμή  $\epsilon_r$  του υποστρώματος.

Η  $\epsilon_{\text{reff}}$  είναι συνάρτηση της συχνότητας. Όσο η συχνότητα λειτουργίας αυξάνεται τόσο περισσότερες γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου συγκεντρώνονται στο υπόστρωμα. Έτσι η μικροταινιακή γραμμή συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ομογενής γραμμή ενός διηλεκτρικού (μόνο του υποστρώματος) και η  $\epsilon_{\text{reff}}$  πλησιάζει την τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του υποστρώματος.

Για χαμηλές συχνότητες η  $\epsilon_{\text{reff}}$  είναι ουσιαστικά σταθερή .Στις ενδιάμεσες συχνότητες η τιμή της αρχίζει να αυξάνει μονοτονικά και σταδιακά πλησιάζει την τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του υποστρώματος .Η τιμή της  $\epsilon_{\text{reff}}$  δίνεται από τον τύπο :

$$\frac{W}{h} > 1$$

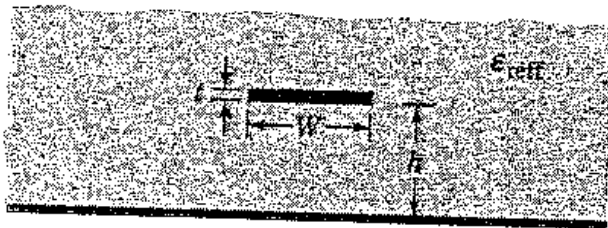
$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}$$



(a) Microstrip line



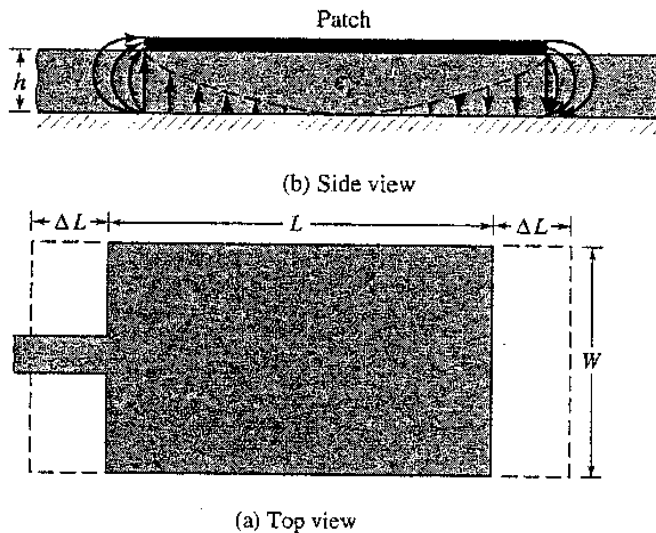
(b) Electric field lines



(c) Effective dielectric constant

**Σχήμα 1.4** Μικροταινιακή γραμμή, ηλεκτρικές γραμμές πεδίου, ενεργός διηλεκτρική σταθερά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εξ' αιτίας των φαινομένων των αιχμών (fringing effects) η κεραία μικροταινιακής νησίδας είναι ηλεκτρικά μεγαλύτερη από τις φυσικές της διαστάσεις. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στο σχ.1.4 για το βασικό E-επίπεδο όπου το μήκος του καλύμματος έχει επιμηκυνθεί σε κάθε άκρο του κατά  $\Delta L$ . Το  $\Delta L$  είναι μια συνάρτηση της  $\epsilon_{\text{reff}}$  και του λόγου πλάτος προς ύψος ( $W/h$ ).



**Σχήμα 1.5** Φυσικές και ενεργές διαστάσεις μιας ορθογωνικής μικροταινιακής νησίδας

### 1.5.2 Μοντέλο κοιλότητας(cavity model)

Σύμφωνα με το cavity model οι μικροταινιακές κεραίες μοιάζουν με κοιλότητες γεμάτες διηλεκτρικό και επιδεικνύουν μεγαλύτερης τάξης τιμές συντονισμού. Τα κανονικοποιημένα πεδία μπορούν σ' αυτή την περίπτωση να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια αν η περιοχή αντιμετωπιστεί σαν μια κοιλότητα που περιβάλλεται (πάνω και κάτω) από ηλεκτρικούς κυματοδηγούς και κατά την περίμετρο της νησίδας από μαγνητικά τοιχώματα (ούτως ώστε να εξομοιωθεί ένα ανοιχτό κύκλωμα).

Πρόκειται για ένα προσεγγιστικό μοντέλο το οποίο οδηγεί κυρίως σε αντίσταση εισόδου που συμπεριφέρεται ως αντίδραση, δηλαδή έχει μόνο φανταστικό μέρος (μηδενικής ή άπειρης τιμής συντονισμού). Παρ' όλ' αυτά, υποθέτοντας ότι τα πραγματικά πεδία προσεγγίζουν αυτά που δημιουργούνται από ένα τέτοιο μοντέλο, η αγωγιμότητα εισόδου και οι συχνότητες συντονισμού που υπολογίζονται με βάση αυτό το μοντέλο είναι αποδεκτές συγκρινόμενες με τις μετρήσεις .

Για μια πιο λεπτομερή προσέγγιση στο cavity model, θα πραγματοποιηθεί μια φυσική αναπαράσταση του σχηματισμού των πεδίων, μέσα στην κοιλότητα, και της ακτινοβολίας, κατά μήκος των πλευρικών τοιχωμάτων. Όταν η μικροταινιακή νησίδα ενεργοποιηθεί ,το φορτίο κατανέμεται στην πάνω και κάτω επιφάνεια της νησίδα , καθώς και στο αγωγίμο επίπεδο, όπως φαίνεται στο σχ.1.4. Η συγκέντρωση φορτίου ελέγχεται από δύο μηχανισμούς: ένα ελκτικό (attractive) και ένα απωθητικό (repulsive ) μηχανισμό .Ο ελκτικός (attractive) μηχανισμός επιδρά μεταξύ αντίθετων φορτίων που βρίσκονται στην κάτω πλευρά της νησίδας και στο αγωγίμο επίπεδο και τείνει να διατηρεί τη συγκέντρωση φορτίων στην κάτω επιφάνεια της νησίδας. Ο απωθητικός μηχανισμός είναι μεταξύ όμοιων φορτίων στην κάτω επιφάνεια του

καλύμματος και τείνει να ωθεί κάποια φορτία στην πάνω επιφάνεια της νησίδας. Τα φορτία ρέουν από την κάτω επιφάνεια ,κατά μήκος των ακμών της νησίδας, στην πάνω επιφάνεια. Η κίνηση αυτών των φορτίων δημιουργεί τις ρευματικές πυκνότητες  $J_b$  και  $J_t$  ,αντίστοιχα, στην κάτω και στην πάνω επιφάνεια της νησίδας. Αυτό φαίνεται στο σχ.1.6 Καθώς για τις περισσότερες πρακτικές μικροταινίες ο λόγος ύψος προς πλάτος ( $h/W$ ) είναι πολύ μικρός ,ο ελκτικός μηχανισμός κυριαρχεί και επομένως το μεγαλύτερο μέρος της συγκέντρωσης φορτίου και της ροής ρεύματος παραμένει στην κάτω επιφάνεια της νησίδας. Όμως η ροή του ρεύματος ελαττώνεται καθώς ο λόγος ύψος προς πλάτος ελαττώνεται. Οριακά η ροή ρεύματος στην πάνω επιφάνεια θεωρείται μηδέν, το οποίο ιδανικά δε δημιουργεί καθόλου επαπτομενικές συνιστώσες μαγνητικού πεδίου στις άκρες της νησίδας. Έτσι τα τέσσερα πλευρικά τοιχώματα θα μπορούσαν να μοντελοποιηθούν από τέλεια μαγνητικά αγωγιμες επιφάνειες οι οποίες ιδανικά δε θα διακόπτουν το μαγνητικό πεδίο και αυτό με τη σειρά του τις συγκεντρώσεις ηλεκτρικού πεδίου κάτω από τη νησίδα. Στην πράξη, όμως, υπάρχει, αν και μικρός, ένας πεπερασμένος λόγος ύψους προς πλάτος. Έτσι τα επιφανειακά μαγνητικά πεδία στις άκρες δε θα είναι ακριβώς μηδέν. Επειδή όμως θα είναι μικρά, μια καλή προσέγγιση για το cavity model είναι να αντιμετωπιστούν τα πλευρικά τοιχώματα σαν να είναι τελείως αγωγιμα.

Αν η μικροταινιακή κεραία αντιμετωπιστεί μόνο σαν μια κοιλότητα, δε είναι δυνατό να βρεθούν τα πλάτη των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων .

Στην πραγματικότητα αντιμετωπίζοντας τα τοιχώματα της κοιλότητας, όπως και το υλικό μέσα σ' αυτή, σαν να μην έχουν απώλειες, η κοιλότητα δε θα ακτινοβολούσε και η αντίσταση εισόδου θα συμπεριφερόταν καθαρά ως αντίδραση (θα είχε μόνο φανταστικό μέρος). Επίσης η συνάρτηση που αναπαριστά την αντίσταση θα είχε μόνο πραγματικούς πόλους. Όσον αφορά την ακτινοβολία λαμβάνονται υπόψη η αντίσταση ακτινοβολίας  $R_r$  και η αντίσταση απωλειών  $R_L$ . Αυτές οι δυο αντιστάσεις επιτρέπουν στην αντίσταση εισόδου να είναι μιγαδική και η συνάρτησή της να έχει μιγαδικούς πόλους. Οι φανταστικοί πόλοι αναπαριστούν, μέσω της αντίστασης ακτινοβολίας και της αντίστασης απωλειών, την ακτινοβολία και τις απώλειες διηλεκτρικού λόγω κυματοδήγησης. Για να έχει η μικροταινία απώλειες χρησιμοποιώντας το cavity model, οπότε και πλέον αναπαριστά κεραία ,οι απώλειες λαμβάνονται υπόψη εισάγοντας μια ενεργό επαπτομενική απώλεια  $\delta_{eff}$  (effective loss tangent). Η  $\delta_{eff}$  επιλέγεται κατάλληλα ώστε να αναπαρασταθεί ο μηχανισμός απωλειών της κοιλότητας. Θεωρείται ως ο αντίστροφος του παράγοντα ποιότητας  $Q$  της κεραίας :

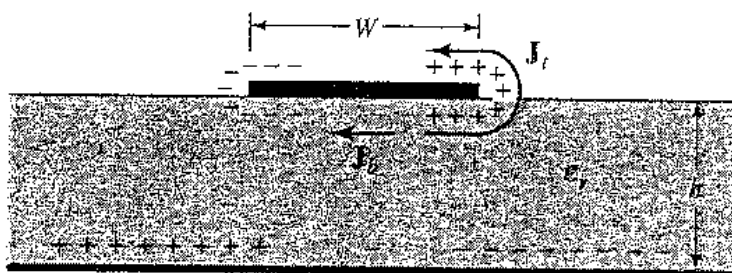
$$\delta_{eff} = 1/Q$$

Επειδή το πάχος της μικροταινίας είναι συνήθως πολύ μικρό τα κύματα που παράγονται μέσα στο διηλεκτρικό υπόστρωμα (μεταξύ του επιπέδου της νησίδας και του αγωγίμου επιπέδου) υφίστανται σημαντικές ανακλάσεις όταν φτάνουν στην άκρη της νησίδας. Έτσι μόνο ένα μικρό μέρος της ενέργειας ακτινοβολείται και κατά συνέπεια η κεραία θεωρείται μη αποδοτική. Τα πεδία κάτω από τη νησίδα δημιουργούν στάσιμα κύματα τα οποία μπορούν να αναπαρασταθούν από συνημιτονοειδείς συναρτήσεις κυμάτων.

Καθώς το ύψος του υποστρώματος είναι πολύ μικρό ( $h \ll \lambda$  ,όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος μέσα στο διηλεκτρικό), οι διακυμάνσεις του πεδίου κατά το ύψος θεωρούνται σταθερές. Επίσης το fringing των πεδίων στις άκρες της νησίδας

είναι πολύ μικρό και κατά συνέπεια το ηλεκτρικό πεδίο είναι σχεδόν κανονικό στην επιφάνειά της.

Θα θεωρείται λοιπόν ότι υπάρχουν μόνο TM ρυθμοί μέσα στην κοιλότητα καθώς οι πάνω και κάτω επιφάνειες είναι ηλεκτρικά αγωγίμες και τα πλευρικά τοιχώματα θα μοντελοποιηθούν έτσι ώστε να γίνουν τελείως μαγνητικά αγωγιμα (εφαπτομενικά μαγνητικά πεδία θα εξαφανίζονται κατά μήκος των τεσσάρων αυτών τοιχωμάτων) .



**Σχήμα 1.6** Συγκεντρώσεις φορτίων και πυκνότητες ρευμάτων

## 1.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μικροταινιακών κεραιών

Οι μικροταινιακές κεραιές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών κεραιών. Έχουν μικρό βάρος και όγκο, γεγονός που καθιστά τη χρήση τους πιο εύκολη. Το κόστος παραγωγής τους είναι χαμηλό. Επιτυγχάνεται με απλές τεχνικές τροφοδότησης γραμμική και κυκλική πόλωση. Ενσωματώνονται εύκολα σε άλλα μικροκυματικά κυκλώματα. Επίσης μπορούν να ενσωματωθούν στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια πυραύλων, σε αεροσκάφη και σε δορυφόρους χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις. Το λεπτό τους πάχος δεν επηρεάζει την αεροδυναμική τους μορφή. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα να παραχθούν ταυτόχρονα γραμμές τροφοδοσίας και προσαρμοστικές διατάξεις, σαν συνέχεια της κεραιάς. Τέλος μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν κεραιές διπλής πόλωσης και/ή δύο συχνοτήτων (dual-polarization/dual-frequency).

Μεγάλα μειονεκτήματα, ως προς τη χρήση, για τις μικροταινιακές κεραιές αποτελούν το στενό εύρος ζώνης (κυρίως στις patch κεραιές με γειωμένο υπόστρωμα) και το χαμηλό κέρδος (περίπου 6 db). Επιπρόσθετα οι ωμικές απώλειες στην τροφοδότηση στοιχειοκεραιών είναι μεγάλες. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητές στοιχειοκεραιές υψηλής απόδοσης, απαιτούνται περίπλοκες τεχνικές τροφοδότησης ενώ εξ' αιτίας της τροφοδοσίας και των διαφόρων συνδέσεων υπάρχει άεργος ακτινοβολία. Οι περισσότερες μικροταινιακές κεραιές ακτινοβολούν στο μισό χώρο. Επίσης είναι δύσκολο να επιτευχθεί αμιγής πόλωση. Τέλος υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες διεγείρονται επιφανειακά κύματα. Η διέγερση κυμάτων επιφάνειας είναι

ανεπιθύμητη καθώς αυτά απορροφούν τμήμα της συνολικά διαθέσιμης ενέργειας για την απευθείας διάδοση.

Βέβαια υπάρχουν διάφορες τεχνικές, όσον αφορά την αντιμετώπιση όλων των παραπάνω μειονεκτημάτων, που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία. Μια από αυτές είναι η αύξηση του ύψους του διηλεκτρικού. Μ' αυτή τη μέθοδο μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της απόδοσης, έως και 90%, αν δεν περιλαμβάνονται επιφανειακά κύματα και αύξηση του εύρους ζώνης έως 35% περίπου.

## 1.7 Εφαρμογές

Είναι αρκετές οι εφαρμογές στις οποίες προτιμώνται οι μικροταινιακές κεραίες έναντι των συμβατικών κεραιών. Αρχικά χρησιμοποιούνταν κυρίως σε στρατιωτικά συστήματα όπως πυραύλους, αεροσκάφη και δορυφόρους. Τελευταία όμως η χρήση τους επεκτείνεται συνεχώς στον εμπορικό τομέα. Αυτό συμβαίνει διότι τα υποστρώματα είναι φθηνά και η τεχνολογία κατασκευής τους έχει πλέον αναπτυχθεί αρκετά. Σύντομα αναμένεται οι μικροταινιακές κεραίες να αντικαταστήσουν τις συμβατικές στις περισσότερες εφαρμογές καθώς πραγματοποιείται συνεχόμενη έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα τους.

Τα πιο αξιοσημείωτα πεδία χρήσης των μικροταινιακών κεραιών είναι τα εξής:

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

Ακολουθεί σύντομη ανάλυση του τρόπου χρήσης των μικροταινιακών κεραιών σε ορισμένες από τις παραπάνω εφαρμογές.

### 1.7.1 Ιατρικές Συσκευές

Στον ιατρικό τομέα έχει αποδειχθεί ότι ένας από τους αποτελεσματικότερους τρόπους να προκληθεί υπερθερμία είναι η μικροκυματική ενέργεια, η οποία και χρησιμοποιείται για τη θεραπεία κακοήθων όγκων. Μόνο μικροταινιακές κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτές τις χρήσεις καθώς απαιτείται μικρό μέγεθος, βάρος και ευκολία στη χρήση, γ'αυτό έχουν αναπτυχθεί τέτοιες κεραίες που λειτουργούν στην S - ζώνη με εύκαμπτη μορφή ώστε να εφάπτονται στην επιφάνεια που θεραπεύεται. Τέλος, μικροταινιακές κεραίες χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των θερμοκρασιακών μεταβολών μέσα στο ανθρώπινο σώμα.

### 1.7.2 Πομποδέκτες radar

Έχουν αναπτυχθεί φορητά radar με σχετικά μικρό βάρος, για την ανίχνευση κινούμενων στόχων όπως οχήματα ή άνθρωποι. Επίσης μικροταινιακές στοιχειοκεραίες χρησιμοποιούνται σε ναυτιλιακά radar. Τέλος έχουν αναπτυχθεί και radar συνθετικού παραθύρου για διάφορα είδη μετρήσεων, όπως ταχύτητας κυμάτων σε ωκεανούς κ.α.

### 1.7.3 Τοπικά ασύρματα δίκτυα (WLAN)

Μια νέα μορφή τοπικών δικτύων αποτελούν τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Networks – WLANs). Είναι μία σχετικά νέα μορφή, που επιτρέπει στους χρήστες να συνδέονται και να ανταλλάσσουν πληροφορίες, χωρίς να απαιτείται η ύπαρξη καλωδίων. 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 ασύρματων δικτύων είναι αυτή τη στιγμή σε εξέλιξη. 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 κεραίες με κατάλληλη σχεδίαση μπορούν να καλύψουν τα παραπάνω πρωτόκολλα, πλεονεκτώντας έναντι των συμβατικών κεραιών λόγω του μικρού μεγέθους και βάρους τους.

### 1.7.4 Δορυφορικές επικοινωνίες

Τα επίγεια κυψελωτά συστήματα που χρησιμοποιούνται στις κινητές επικοινωνίες δεν παρέχουν ολική κάλυψη σε μεγάλες περιοχές. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη των γεωστατικών δορυφορικών συστημάτων INMARSAT (International Maritime Satellite System) και MSAT (Mobile Satellite system). Και τα δύο συστήματα 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 προβλήματα που μπορεί να προκύψουν εξ' αιτίας καιρικών φαινομένων, όπως για παράδειγμα παρεμβολές από άνεμο και χιόνι. Επιπλέον το κόστος και το μέγεθος τους είναι μικρότερο και εύκολα μπορούν να τοποθετηθούν στους τοίχους ή την οροφή ενός κτιρίου.

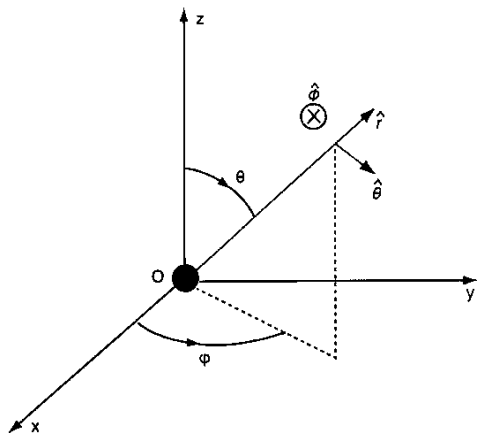
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΕΡΑΙΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ

### 2.1 Εισαγωγικές έννοιες

Ένα από τα χαρακτηριστικά της κεραίας είναι το διάγραμμα ακτινοβολίας της. Πρόκειται για τη γραφική παράσταση του τρόπου ακτινοβολίας της κεραίας καθώς μεταβάλλεται το σημείο παρατήρησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Συνήθως το διάγραμμα ακτινοβολίας προσδιορίζεται για τη μακρινή περιοχή μιας κεραίας και παριστάνεται ως συνάρτηση των συντεταγμένων διεύθυνσης  $\theta$  και  $\phi$  ενός κατάλληλου συστήματος σφαιρικών συντεταγμένων με κέντρο, συνήθως, το γεωμετρικό κέντρο της κεραίας.

Το διάγραμμα ακτινοβολίας δίδεται για μεγέθη όπως είναι η ένταση ακτινοβολίας  $U(\theta, \phi)$ , η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και του μαγνητικού πεδίου. Το διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας ονομάζεται διάγραμμα ισχύος, ενώ το διάγραμμα της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ονομάζεται διάγραμμα πεδίου. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων κατάλληλο για τη χάραξη των διαγραμμάτων ακτινοβολίας μιας κεραίας με γεωμετρικό κέντρο το σημείο  $O$ .

Πρακτικά στις περισσότερες περιπτώσεις, για να περιγράψει το πώς ακτινοβολεί μια κεραία αρκεί να γίνει η σχεδίαση διαγραμμάτων ως συνάρτηση της γωνίας  $\theta$  για συγκεκριμένες τιμές της γωνίας  $\phi$  και η σχεδίαση διαγραμμάτων ως συνάρτηση της γωνίας  $\phi$  για συγκεκριμένες τιμές της γωνίας  $\theta$ . Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η κεραία παρουσιάζει ακτινοβολία γραμμικά πολωμένη. Σ' αυτές, η ακτινοβολία περιγράφεται μέσω δύο κυρίων διαγραμμάτων κατά το  $E$ -επίπεδο και κατά το  $H$ -επίπεδο αντίστοιχα. Το  $E$ -επίπεδο είναι το επίπεδο που ορίζεται από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Αντίστοιχα ορίζεται και το  $H$ -επίπεδο.



Σχήμα 2.1 Σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων ως προς το κέντρο της κεραίας.

## 2.2 Λοβοί ακτινοβολίας

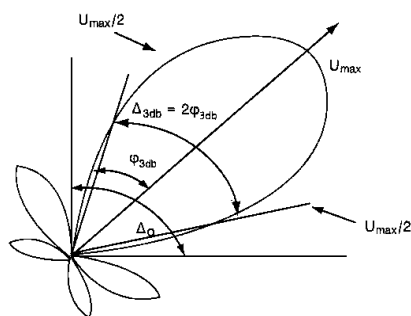
Το τμήμα του διαγράμματος που οριοθετείται από περιοχές πολύ ασθενούς, συνήθως μηδενικής έντασης ακτινοβολίας ονομάζεται λοβός ακτινοβολίας.

Κύριος λοβός ονομάζεται αυτός που περιέχει τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Σε αρκετές περιπτώσεις προκύπτουν περισσότεροι του ενός κύριοι λοβοί. Πρόκειται για ανεπιθύμητους λοβούς που πρέπει να αποφεύγονται με κατάλληλη σχεδίαση. Δευτερεύον λοβός είναι κάθε λοβός ακτινοβολίας που δεν είναι κύριος. Πλευρικοί λοβοί χαρακτηρίζονται αυτοί που δεν περιέχουν τη διεύθυνση ενδιαφέροντος της κεραίας, ενώ με τον όρο οπίσθιος λοβός εννοείται ο λοβός που περιλαμβάνει τη διεύθυνση που είναι αντίθετη αυτής του κύριου λοβού.

Οι δευτερεύοντες λοβοί αντιπροσωπεύουν ακτινοβολία προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις. Κατά συνέπεια πρέπει να ελαχιστοποιούνται. Ο λόγος της ισχύος που εμφανίζει ένας δευτερεύον λοβός στη διεύθυνση μέγιστου του προς την αντίστοιχη ισχύ που εμφανίζει ο κύριος λοβός ονομάζεται στάθμη του πλευρικού λοβού και εκφράζεται σε dB. Ανεκτοί στην πράξη θεωρούνται πλευρικοί λοβοί με στάθμη χαμηλότερη των  $-20$  dB. Η ελαχιστοποίηση των πλευρικών λοβών είναι ιδιαίτερης σημασίας σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμογών για την αποφυγή παρεμβολών, όπως στις περιπτώσεις δορυφορικών επικοινωνιών ή συστημάτων Radar.

Στην περιγραφή των κατευθυντικών ιδιοτήτων μιας κεραίας σημαντικό ρόλο έχει το γωνιακό εύρος  $\Delta\theta$  του κύριου λοβού. Πρόκειται για τη γωνία που σχηματίζουν οι διευθύνσεις μηδενισμών ή ελάχιστων μεταξύ των οποίων περιλαμβάνει η διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Στην πράξη η περιγραφή του κύριου λοβού γίνεται και μέσω του ανοίγματος μισής ισχύος  $\Delta_{3dB}$ . Είναι η γωνία που σχηματίζουν οι διευθύνσεις εκατέρωθεν της διεύθυνσης μέγιστου για τις οποίες η ένταση ακτινοβολίας είναι η μισή της μέγιστης τιμής.

Η γωνία αυτή ορίζεται σε επίπεδο που περιέχει τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Το εύρος του κύριου λοβού είναι ουσιαστικά η παράμετρος που καθορίζει πόσο κατευθυντική είναι μια κεραία. Συνήθως, το εύρος του κύριου λοβού αντισταθμίζεται από τη στάθμη των πλευρικών λοβών, δηλαδή μείωση του εύρους του κύριου λοβού αντισταθμίζεται από τη αύξηση της στάθμης των πλευρικών λοβών. Στο σχήμα 2.2 φαίνονται οι λοβοί ακτινοβολίας, το γωνιακό εύρος και το άνοιγμα μισής ισχύος.



Σχήμα 2.2 Λοβοί ακτινοβολίας, άνοιγμα μισής ισχύος.

## 2.3 Ισοτροπικός ακτινοβολητής

Η κεραία που ακτινοβολεί προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου ονομάζεται ισοτροπικός ακτινοβολητής. Μόνο μια σημειακή πηγή μπορεί να πετύχει τέτοιου είδους ακτινοβολία. Ο ισοτροπικός ακτινοβολητής δεν μπορεί να υλοποιηθεί. Παρ' όλ' αυτά αποτελεί την κεραία αναφοράς προς την οποία συγκρίνονται όλες οι κεραίες που χρησιμοποιούνται στις διάφορες εφαρμογές, όσον αφορά τις κατευθυντικές τους ιδιότητες. Λόγω της σημειακής φύσης του ισοτροπικού ακτινοβολητή, το διάνυσμα Poynting έχει ακτινική διεύθυνση και εξαρτάται μόνο από την απόσταση του σημείου παρατήρησης από την πηγή, δηλαδή

$$\vec{P}_0(\vec{r}) = \frac{W_{rad}}{4\pi r^2} \hat{r}$$

όπου  $W_{rad}$  η ισχύς ακτινοβολίας.

Η αντίστοιχη ένταση ακτινοβολίας του ισοτροπικού ακτινοβολητή είναι σταθερή και ίση προς

$$U_0 = \frac{W_{rad}}{4\pi}$$

## 2.4 Κατευθυντικό κέρδος-Κατευθυντικότητα

Το κατευθυντικό κέρδος  $D_g(\theta, \varphi)$  ορίζεται ως ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας μιας κεραίας προς την ένταση ακτινοβολίας  $U_0$  ισοτροπικού ακτινοβολητή που εκπέμπει την ίδια ισχύ ακτινοβολίας, δηλαδή:

$$D_g(\theta, \varphi)_{/max} = \frac{U(\theta, \varphi)_{/max}}{U_0} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{W_{rad}}$$

$$W_{rad} = \oiint_{\Omega} U(\theta, \varphi) d\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} d\theta [U(\theta, \varphi) \sin \theta]$$

Το κατευθυντικό κέρδος, όπως φαίνεται, είναι συνάρτηση των συντεταγμένων θέσης  $\theta$  και  $\varphi$  του σημείου υπολογισμού του πεδίου ακτινοβολίας μιας κεραίας.

Κατευθυντικότητα  $D_m$  κεραίας ονομάζεται η μέγιστη τιμή του κατευθυντικού κέρδους της

$$D_m = D_g(\theta, \varphi)_{/max} = \frac{U(\theta, \varphi)_{/max}}{U_0} 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{W_{rad}}$$

όπου  $U_{\max}$  η μέγιστη τιμή της έντασης ακτινοβολίας και  $W_{\text{rad}}$  η συνολική ισχύς ακτινοβολίας της κεραίας.

Εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα ότι η κατευθυντικότητα ενός ιστροπικού ακτινοβολητή είναι ίση προς τη μονάδα, αφού η ακτινοβολία του είναι η ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου. Σε κάθε άλλη περίπτωση ακτινοβολητή, η κατευθυντικότητα είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα και αποτελεί ένα μέτρο του πόση κατευθυντική είναι. Το εύρος τιμών που λαμβάνει το κατευθυντικό κέρδος είναι  $[0, D_m]$ . Προκύπτει ότι:

$$D_m = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)_{\max}}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} d\theta U(\theta, \varphi) \sin \theta} \quad (2.1)$$

όπου,

$$\Omega_A = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} d\theta U(\theta, \varphi) \sin \theta \quad (2.2)$$

και

$$U_n(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U(\theta, \varphi)_{\max}}$$

Η συνάρτηση  $U_n(\theta, \varphi)$  είναι η κανονικοποιημένη ένταση ακτινοβολίας της κεραίας. Η παράμετρος  $\Omega_A$  ονομάζεται στερεός λοβός ακτινοβολίας. Ο στερεός λοβός ακτινοβολίας  $\Omega_A$  είναι η στερεά γωνία δια της οποίας θα εκπεμπόταν όλη η ισχύς, αν η κεραία εξέπεμπε σταθερή ένταση ακτινοβολίας και ίση προς  $U(\theta, \varphi)_{\max}$  προς κάθε κατεύθυνση στο εσωτερικό της  $\Omega_A$ . Για κεραίες που διαθέτουν ένα κύριο λοβό και αμελητέους δευτερεύοντες, η παράμετρος  $\Omega_A$  είναι ίση προς το γινόμενο των ανοιγμάτων μισής ισχύος  $\theta_1$  και  $\theta_2$  σε δύο κάθετα μεταξύ τους επίπεδα συμμετρίας του κύριου λοβού ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή, η κατευθυντικότητα προκύπτει από την προσεγγιστική σχέση:

$$D_m = \frac{4\pi}{\theta_1 \theta_2}$$

όπου τα ανοίγματα  $\theta_1$  και  $\theta_2$  μετρούνται σε ακτίνια. Πρέπει να τονιστεί ότι η πιο πάνω σχέση δίνει την κατευθυντικότητα κατευθυντικών κεραιών με ένα κύριο λοβό και αμελητέους δευτερεύοντες. Η σχέση αυτή υπερεκτιμά την κατευθυντικότητα.

Η κατευθυντικότητα εκφράζεται συνήθως σε dB. Μια επιπλέον προσεγγιστική σχέση για τον υπολογισμό της κατευθυντικότητας είναι:

$$D_m = \frac{32 \ln(2)}{\theta_E^2 \theta_E^2}$$

όπου  $\theta_E$  και  $\theta_H$  τα ανοίγματα μισής ισχύος σε ακτίνια κατά το Ε-επίπεδο και το Η-επίπεδο της κεραίας, αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό της κατευθυντικότητας μιας κεραίας προσδιορίζεται αναλυτικά ή αριθμητικά το ολοκλήρωμα της σχέσης (2.2) και στη συνέχεια εφαρμόζεται η (2.1).

## 2.5 ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ

### 2.5.1 Εισαγωγή

Σε πολλές εφαρμογές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν κεραίες που να είναι περισσότερο κατευθυντικές από τις απλές κεραίες. Σε άλλες περιπτώσεις είναι επιθυμητή η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας με απλό τρόπο. Με τη στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας στοιχειοκεραιών ασχολείται τμήμα της εργασίας αυτής.

Μια κατάλληλη μέθοδος για να αντιμετωπισθούν οι παραπάνω απαιτήσεις είναι ο σχηματισμός στοιχειοκεραιών. Οι στοιχειοκεραίες είναι διατάξεις που αποτελούνται από πολλούς όμοιους ακτινοβολητές που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και ακτινοβολούν ή λαμβάνουν ταυτόχρονα. Οι ιδιότητες της στοιχειοκεραίας βελτιώνονται σε σχέση με τις αντίστοιχες ενός απλού στοιχείου της με κατάλληλη επιλογή της ρευματικής διέγερσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα επιμέρους πεδία των στοιχείων ακτινοβολίας συμβάλλουν στις επιθυμητές διευθύνσεις του χώρου, ενώ αλληλοαναιρούνται σε άλλες.

Το συνολικό μακρινό πεδίο μιας στοιχειοκεραίας προκύπτει από τη διανυσματική άθροιση των επιμέρους πεδίων των ακτινοβολητών που την αποτελούν. Στη διαδικασία αυτή προϋπόθεση αποτελεί η μη ύπαρξη σύζευξης μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας. Η ισχύς της παραδοχής αυτής εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των στοιχείων. Σημειώνεται ότι σύζευξη μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας υπάρχει όταν η ρευματική διέγερση κάθε στοιχείου επηρεάζεται από την παρουσία των υπολοίπων στοιχείων.

Οι στοιχειοκεραίες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνουν την κατευθυντικότητα της κεραίας και επιτρέπουν τη στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας με ηλεκτρικό τρόπο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Επιπλέον επιτρέπουν τη σύνθεση επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολίας.

Υπάρχουν πέντε παράγοντες που επηρεάζουν τη μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας. Αυτοί είναι οι εξής:

- 1) Γεωμετρία της στοιχειοκεραίας ( γραμμική, κυκλική, επίπεδη, κ.τ.λ).
- 2) Πλήθος στοιχείων ακτινοβολίας.
- 3) Απόσταση μεταξύ των στοιχείων.
- 4) Συχνότητα λειτουργίας.
- 5) Σχετική ρευματική διέγερση των στοιχείων ακτινοβολίας.

## 2.5.2 Στοιχειοκεραία πολλών στοιχείων

Με τον όρο στοιχειοκεραία εννοείται μια διάταξη όμοιων ακτινοβολητών που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και ακτινοβολούν ή λαμβάνουν ταυτοχρόνως. Τα ρεύματα των στοιχείων ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας είναι δυνατόν να διαφέρουν κατά το μέτρο ή τη φάση. Οι στοιχειοκεραίες διακρίνονται στις χωρικά ομοιόμορφες και στις χωρικά ανομοιόμορφες στοιχειοκεραίες.

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται χωρικά ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες. Γι' αυτές υπάρχει πλήθος μεθόδων ανάλυσης και σύνθεσης. Οι χωρικά ανομοιόμορφες στοιχειοκεραίες παρέχουν στο σχεδιαστή περισσότερους βαθμούς ελευθερίας και, αν και είναι σαφώς δυσκολότερη η θεωρητική ανάλυση τους, αξίζουν ιδιαίτερη προσοχή. Αν  $I_0$  είναι ο φασιθέτης του ρεύματος του στοιχείου της στοιχειοκεραίας που θεωρείται ως στοιχείο αναφοράς, το ρεύμα διέγερσης κάποιου στοιχείου μπορεί να εκφρασθεί υπό τη μορφή:

$$I_m = c_m I_0$$

$$m = 1, 2, \dots, M - 1$$

όπου  $M$  το πλήθος των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Ο μιγαδικός αριθμός  $c_m$  που αποτελεί τον κατάλληλο συντελεστή αναλογίας ονομάζεται ρευματικός συντελεστής του στοιχείου  $m$ .

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές για τη μακρινή περιοχή των ακτινοβολητών, η ένταση ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας  $U(\theta, \varphi)$  γράφεται:

$$U(\theta, \varphi) = U_0(\theta, \varphi) |S(\theta, \varphi)|^2$$

όπου  $U_0(\theta, \varphi)$  η ένταση ακτινοβολίας των όμοιων στοιχείων ακτινοβολίας και  $S(\theta, \varphi)$  ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας. Με τη βοήθεια του σχήματος 2.3 ο παράγοντας διάταξης προσδιορίζεται συναρτήσει των συντεταγμένων θέσης των στοιχείων ακτινοβολίας.

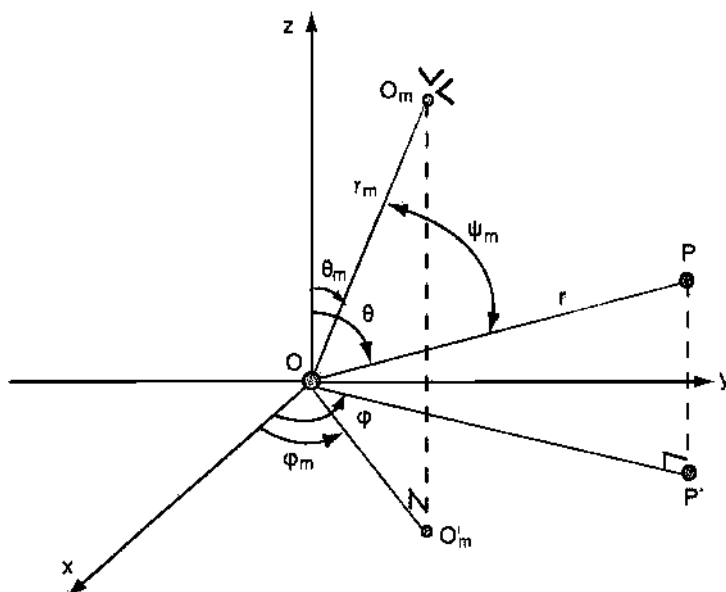
Είναι:

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} c_m \exp(jkr_m \cos \psi_m) \quad (2.3)$$

όπου,

$$\cos \psi_m = \cos \theta_m \cos \theta + \sin \theta_m \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m)$$

και  $k=2\pi/\lambda$  ο κυματικός αριθμός του μέσου διάδοσης.



**Σχήμα 2.3** Γεωμετρία στοιχειοκεραίας.

Από την (2.3) φαίνεται ότι ο παράγοντας διάταξης και επομένως, η ένταση ακτινοβολίας μίας στοιχειοκεραίας εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας, από τη γεωμετρική διάταξη, το πλήθος και τη σχετική διέγερση των στοιχείων. Ο παράγοντας διάταξης μιας στοιχειοκεραίας δεν εξαρτάται από το είδος των ακτινοβολητών που την αποτελούν. Συνήθως προσδιορίζεται αντικαθιστώντας τα στοιχεία ακτινοβολίας με ιστροπικούς ακτινοβολητές τοποθετημένους στα κέντρα διέγερσής τους.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέτρο του παράγοντα διάταξης μιας στοιχειοκεραίας πάντα αφορά τη μακρινή τη μακρινή περιοχή και δεν μεταβάλλεται όταν υπάρξει πεπερασμένη μετατόπιση του κέντρου των συντεταγμένων. Άρα στοιχειοκεραία με συγκεκριμένο πλήθος, γεωμετρική διάταξη και σχετική διέγερση των στοιχείων της έχει μοναδικό κατά μέτρο παράγοντα διάταξης ως συνάρτηση της συχνότητας ανεξάρτητα από την επιλογή του κέντρου των συντεταγμένων. Η επιλογή του κέντρου των συντεταγμένων είναι ελεύθερη με κριτήριο την ευκολία προσδιορισμού του παράγοντα διάταξης και την απλότητα της μαθηματικής έκφρασής του. Συνήθως, επιλέγεται το γεωμετρικό κέντρο της στοιχειοκεραίας ή κάποιο χαρακτηριστικό σημείο της γεωμετρίας της.

### 2.5.3 Υπολογισμός παράγοντα διάταξης

Αρχικός σκοπός της εργασίας αυτής είναι η σχεδίαση του παράγοντα διάταξης με τον αριθμό των στοιχείων της τετραγωνικής στοιχειοκεραίας και

την απόσταση μεταξύ τους να ποικίλλουν. Επιθυμητό είναι ο παράγοντας διάταξης να δημιουργεί ένα κύριο λοβό ακτινοβολίας προς μια συγκεκριμένη επιθυμητή διεύθυνση και ο κύριος αυτός λοβός να μπορεί να στρέφεται σ' όλο το χώρο.

Απαραίτητη προϋπόθεση του προβλήματος είναι η μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε μια προκαθορισμένη διεύθυνση. Το πρόγραμμα στο MATLAB ζητά από το χρήστη να ορίζει τη διεύθυνση αυτή. Στην πραγματικότητα όμως, το πρόγραμμα θα τροφοδοτείται με αυτά τα δεδομένα μέσω μιας άλλης διάταξης που θα υπολογίζει τις συντεταγμένες θέσης του κινητού τερματικού ως προς την κεραία. Έτσι η συγκεκριμένη διάταξη θα μπορεί σε κάθε στιγμή να στρέφει τον κύριο λοβό ακτινοβολίας σύμφωνα με την επιθυμητή διεύθυνση.

Για αυτό το λόγο ο παράγοντας διάταξης έχει την ακόλουθη μορφή:

$$S(\hat{r}) = \sum_{i=0}^M e^{-jk_0 \hat{r} \cdot \hat{r}_i} \cdot C_i$$

$$C_i = e^{jk_0 \hat{r}_0 \cdot \hat{r}_i}$$

$$S(\hat{r}) = \sum_{i=0}^M e^{jk_0 (\hat{r}_0 - \hat{r}) \cdot \hat{r}_i}$$

Ο πιο πάνω παράγοντας διάταξης μεγιστοποιείται για  $\hat{r}_0 = \hat{r}$ .

Με το διάνυσμα  $\hat{r}_0$  αναφερόμαστε στην επιθυμητή διεύθυνση ενώ με το διάνυσμα  $\hat{r}_i$  αναφερόμαστε στις συντεταγμένες θέσης του κάθε στοιχείου ξεχωριστά.

$$\hat{r} = \cos \varphi \sin \theta \hat{x} + \sin \varphi \sin \theta \hat{y} + \cos \theta \hat{z}$$

$$\hat{r}_0 = \cos \varphi_0 \sin \theta_0 \hat{x} + \sin \varphi_0 \sin \theta_0 \hat{y} + \cos \theta_0 \hat{z}$$

$$\vec{r}_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]$$

Όπου  $\vec{r}_i$  το διάνυσμα θέσης του κάθε στοιχείου και  $k_0 = 2\pi / \lambda$  ο κυματικός αριθμός.

M = Ο αριθμός των στοιχείων που απαρτίζουν τη διάταξη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ

Σ' αυτό το κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας υλοποιείται η σχεδίαση ,σε θεωρητικό επίπεδο, της τετραγωνικής στοιχειοκεραίας. Αρχικά υπολογίζονται οι διαστάσεις και τα πεδία της ορθογωνικής μικροταινιακής κεραίας που αποτελεί τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας. Έπειτα υπολογίζεται ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας.

### 3.1 Υπολογισμός μεγεθών ορθογωνικής κεραίας μικροταινιακής νησίδας

Για να προσδιοριστούν οι διαστάσεις της μικροταινιακής κεραίας χρησιμοποιείται το cavity model. Επιθυμητό είναι να κυματοδηγείται μόνο ο πρώτος ρυθμός. Πρώτος ρυθμός είναι ο ρυθμός με τη μικρότερη συχνότητα συντονισμού. Η συχνότητα συντονισμού σ' αυτή την περίπτωση είναι:

$$(f_r)_{010} = \frac{U_0}{2L \sqrt{\epsilon_r}} \text{ , όπου } U_0 \text{ η ταχύτητα του φωτός .}$$

Η διηλεκτρική σταθερά δίνεται ίση με  $\epsilon_r = 2.1$  ,ενώ το ύψος του διηλεκτρικού υποστρώματος της κεραίας είναι  $h = 0.69 \text{ mm}$  .

Εξετάζονται δύο περιπτώσεις κεραίων. Στη μια περίπτωση η συχνότητα συντονισμού είναι 11 GHz και στην άλλη η συχνότητα συντονισμού είναι 14 GHz

Πρώτη περίπτωση :  $(f_r)_{010} = 11 \text{ GHz}$

$$(f_r)_{010} = \frac{U_0}{2L \sqrt{\epsilon_r}} \Rightarrow 11 * 10^9 = \frac{3 * 10^8}{2 * L * \sqrt{2.1}} \Rightarrow L = 9.409 \text{ mm}$$

και

$$W = 7.393 \text{ mm}$$

Δεύτερη περίπτωση :  $(f_r)_{010} = 14 \text{ GHz}$

$$(f_r)_{010} = \frac{U_0}{2L \sqrt{\epsilon_r}} \Rightarrow 14 * 10^9 = \frac{3 * 10^8}{2 * L * \sqrt{2.1}} \Rightarrow L = 7.393 \text{ mm}$$

και

$$W = 9.409 \text{ mm}$$

Συνοπτικά λοιπόν το κάθε στοιχείο έχει διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r = 2,1$ , πάχος μικροταινιακής κεραίας  $h=0,69\text{mm}$  και πλευρές με μήκη στην πρώτη περίπτωση  $L=9.409 \text{ mm}$  και  $W = 7,393 \text{ mm}$ , ενώ στη δεύτερη περίπτωση  $L=7,393 \text{ mm}$  και  $W = 9.409 \text{ mm}$ .

### 3.2 Υπολογισμός πεδίων της κεραίας

Οι δύο περιπτώσεις κεραιών, όπως υπολογίστηκαν προηγουμένως, εμφανίζουν πεδία της μορφής

$$\vec{E} = E_{\phi}^t \hat{\phi}$$

Τα πεδία αυτά προκύπτουν ως το αποτέλεσμα του συνδυασμού των δύο μοντέλων ανάλυσης, του transmission-line και του cavity model.

Ανάλογα με τη συχνότητα συντονισμού προκύπτει το μήκος κύματος

$$\text{Για } (f_r)_{010} = 11 \text{ GHz}$$

το μήκος κύματος  $\lambda_1$  είναι

$$c = \lambda_1 * f_1 \Rightarrow 3 * 10^8 = \lambda_1 * 11 * 10^9 \Rightarrow \lambda_1 = 0.027 \text{ m}$$

$$\text{Για } (f_r)_{010} = 14 \text{ GHz}$$

το μήκος κύματος  $\lambda_2$  είναι

$$c = \lambda_2 * f_2 \Rightarrow 3 * 10^8 = \lambda_2 * 14 * 10^9 \Rightarrow \lambda_2 = 0.021 \text{ m}$$

Το πεδίο υπολογίζεται σύμφωνα με το cavity model από τον τύπο:

$$E_{\phi}^t = +j \frac{k_o h W E_o e^{-jk_e r}}{\pi r} \left\{ \sin \theta \frac{\sin(X)}{X} \frac{\sin(Z)}{Z} \right\} * \cos \left( \frac{k_o L_e}{2} \sin \theta \sin \phi \right)$$

$$\text{όπου } X = \frac{k_o h}{2} \sin \theta \cos \phi$$

$$\text{και } Z = \frac{k_o W}{2} \cos \theta$$

- Στην πρώτη περίπτωση η συχνότητα συντονισμού είναι  $(f_r)_{010} = 11 \text{ GHz}$

Είναι γνωστό ότι

$$h = 0.69mm$$

$$\varepsilon_r = 2.1.$$

Η μικροταινιακή κεραία έχει διαστάσεις

$$L = 9.409mm$$

$$W = 7.393mm.$$

Επιπλέον υπολογίστηκε ότι

$$\lambda_1 = 0.027m.$$

Συνεπώς τα X και Z έχουν τις παρακάτω τιμές

$$X = \frac{k_o h}{2} \sin \theta \cos \phi \Rightarrow$$

$$X = 0.8 \sin \theta \cos \phi$$

$$Z = \frac{k_o W}{2} \cos \theta \Rightarrow$$

$$Z = 0.859 \cos \theta$$

Το  $L_e$  υπολογίζεται σύμφωνα με το transmission – line model .

Για τον υπολογισμό του πρέπει πρώτα να βρεθεί το  $\varepsilon_{\text{reff}}$  που προκύπτει από τον τύπο:

$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \Rightarrow ,$$

$$\varepsilon_{\text{reff}} = 1.927$$

Το  $\varepsilon_{\text{reff}}$  χρησιμοποιείται στην εύρεση του  $\Delta L$ .

$$\text{Γνωρίζουμε ότι } \frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \Rightarrow$$

$$\Delta L = 0.361 * 10^{-3} m$$

$$\text{Άρα } L_e = L + \Delta L \Rightarrow L_e = 10.131mm$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στοιχεία στον αρχικό τύπο προκύπτει:

$$E'_\phi = +j \frac{0.377 E_o e^{-j74.074r}}{r} \left\{ \frac{\sin(0.8 \sin \theta \cos \phi)}{0.8 \cos \phi} \frac{\sin(0.859 \cos \theta)}{0.859 \cos \theta} \right\} * \cos(1.178 \sin \theta \sin \phi) 10^{-3}$$

- Στην δεύτερη περίπτωση η συχνότητα συντονισμού είναι  $(f_r)_{010} = 14GHz$

Και σ' αυτή την περίπτωση ισχύει

$$h = 0.69mm$$

$$\varepsilon_r = 2.1.$$

Η μικροταινιακή κεραία έχει διαστάσεις

$$L = 7.393mm$$

$$W = 9.409mm$$

Επιπλέον υπολογίστηκε ότι

$$\lambda_1 = 0.021m$$

Συνεπώς τα X και Z έχουν τις παρακάτω τιμές

$$X = \frac{k_o h}{2} \sin \theta \cos \phi \Rightarrow$$

$$X = 0.103 \sin \theta \cos \phi$$

$$Z = \frac{k_o W}{2} \cos \theta \Rightarrow$$

$$Z = 1.406 \cos \theta$$

Το  $L_e$  υπολογίζεται και σ' αυτή την περίπτωση σύμφωνα με το transmission – line model. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία αρχικά υπολογίζεται το  $\varepsilon_{reff}$ .

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \Rightarrow ,$$

$$\varepsilon_{reff} = 1.951$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \Rightarrow$$

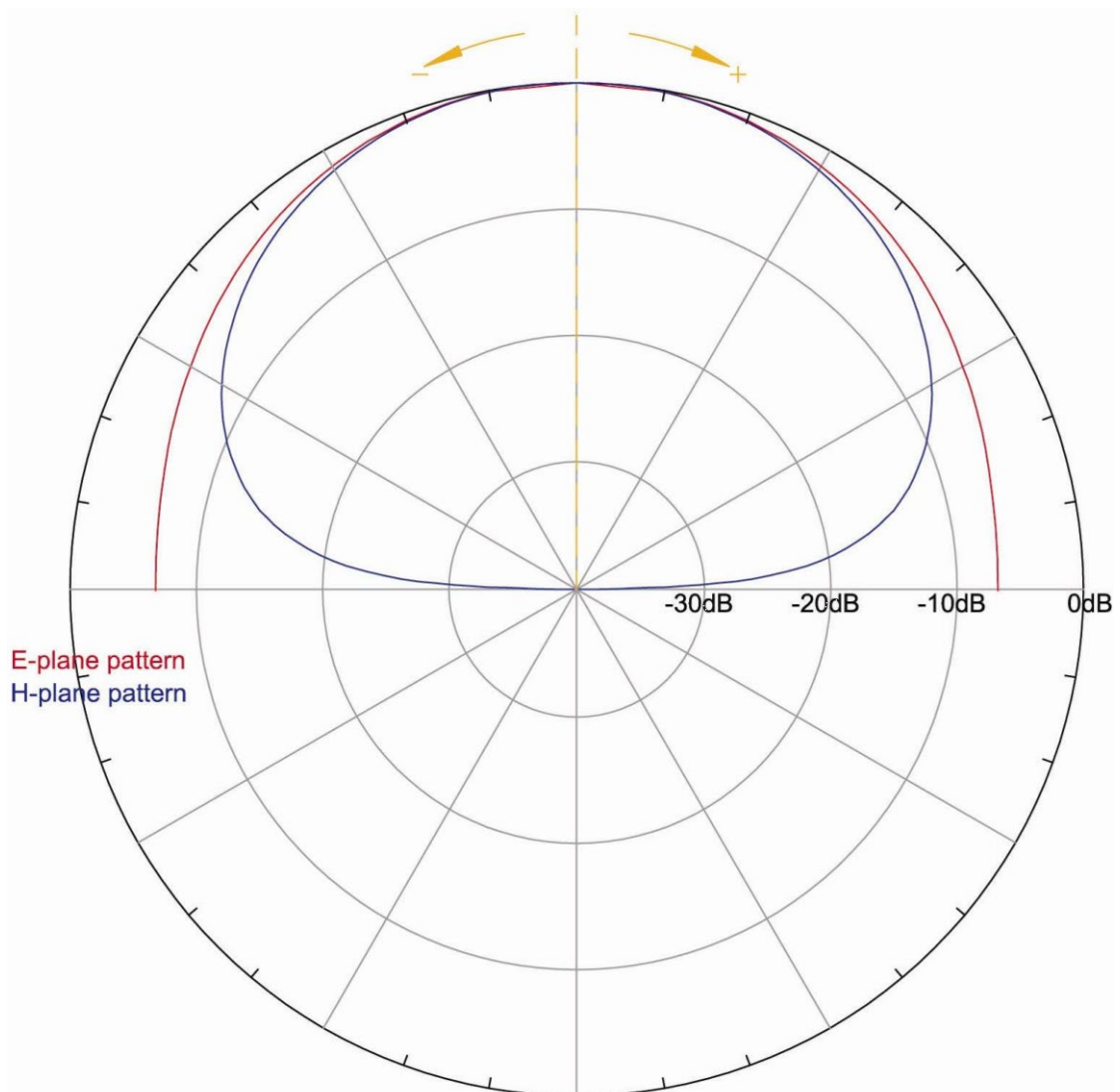
$$\Delta L = 0.363 * 10^{-3} m$$

Άρα  $L_e = L + \Delta L \Rightarrow L_e = 8.119mm$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στοιχεία στον αρχικό τύπο προκύπτει:

$$E'_\phi = +j \frac{0.618E_o e^{-j95.238r}}{r} \left\{ \frac{\sin(0.103 \sin \theta \cos \phi)}{0.103 \cos \phi} \frac{\sin(1.406 \cos \theta)}{1.406 \cos \theta} \right\} * \cos(1.213 \sin \theta \sin \phi) 10^{-3}$$

Με τη χρήση του προγράμματος PCAAD 4.0 έχουμε την γραφική αναπαράσταση των Ε-επίπεδο και Η-επίπεδο μιας κεραίας μικροταινιακής νησίδας.



**Σχήμα 3.1** Γραφική αναπαράσταση των Ε-επίπεδο και Η-επίπεδο μιας κεραίας μικροταινιακής νησίδας

### 3.3 Υπολογισμός του παράγοντα διάταξης

Ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας δίνεται από τον τύπο :

$$S = \sum_i e^{-ik_o \tilde{r}_i \hat{r}} |\alpha_i| e^{j\angle \alpha_i}$$

$$\begin{aligned} |\alpha_i| &= 1 \\ e^{j\angle \alpha_i} &= e^{jk_o \tilde{r}_i \hat{r}_o} \\ \text{όπου} \quad \hat{r} &= \hat{r}_o \end{aligned}$$

$$\hat{r}_o = \cos(\phi_o) \sin(\theta_o) \hat{x} + \sin(\phi_o) \sin(\theta_o) \hat{y} + \cos(\theta_o) \hat{z}$$

είναι η διεύθυνση του επιθυμητού μέγιστου και  $r_i$  είναι οι συντεταγμένες του στοιχείου κάθε φορά

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο παράγοντας διάταξης έχει τη μορφή

$$S(\hat{r}_o, \hat{r}) = \sum_i e^{jk_o r_i (\hat{r}_o - \hat{r})}$$

Η συνάρτηση του παράγοντα διάταξης υλοποιήθηκε στο MATLAB για δύο επίπεδα. Στη μια περίπτωση πρόκειται για το επίπεδο που ορίζεται για σταθερή γωνία  $\theta_o$ . Στην άλλη περίπτωση πρόκειται για το επίπεδο που ορίζεται για σταθερή γωνία  $\phi_o$ . Με τη βοήθεια των προγραμμάτων σχεδιάστηκαν τα αποτελέσματα για τρεις περιπτώσεις διευθύνσεων μέγιστου:

A)  $\hat{r}_o = \frac{\hat{x} + \hat{z}}{\sqrt{2}}$  Δηλαδή  $\theta_o = 45^\circ$  και  $\phi_o = 0$

B)  $\hat{r}_o = \frac{\hat{x} + \hat{y} + \hat{z}}{\sqrt{3}}$  Δηλαδή  $\theta_o = 54.73^\circ$  και  $\phi_o = 45^\circ$

Γ)  $\hat{r}_o = \frac{\hat{y} + \hat{z}}{\sqrt{2}}$  Δηλαδή  $\theta_o = 45^\circ$  και  $\phi_o = 90^\circ$

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα ακτινοβολίας του παράγοντα διάταξης, ως συνάρτηση του  $\phi$  και τα αντίστοιχα ως συνάρτηση του  $\theta$ , για συνολικό αριθμό στοιχείων 5,17,37,65 και απόσταση  $d=0,5\lambda$  ή  $d=0,6\lambda$  ή  $d=0,7\lambda$  για κάθε περίπτωση αριθμού στοιχείων. Η διαδικασία είναι όμοια και για τις τρεις επιθυμητές κατευθύνσεις μέγιστου

### 3.4 Κώδικας MATLAB για τον παράγοντα διάταξης

Πρόκειται για δύο προγράμματα.

Κάθε πρόγραμμα εμφανίζει τον παράγοντα διάταξης για διαφορετικό αριθμό στοιχείων της στοιχειοκεραίας και για διαφορετικές τιμές απόστασης μεταξύ των στοιχείων. Τα προγράμματα ζητούν τις γωνίες της διεύθυνσης μέγιστου, ανάλογα η γωνία  $\phi$  ή η γωνία  $\theta$ , για να καθορισθεί το επίπεδο σχεδίασης του παράγοντα διάταξης, και ο αριθμός  $M$  των στοιχείων που βρίσκονται στη μια πλευρά της στοιχειοκεραίας

Το πρώτο δίνει το διάγραμμα ακτινοβολίας του παράγοντα διάταξης για τη γωνία  $\phi$  κατά τη διεύθυνση μέγιστου του  $\theta$ .

Ακολουθεί ο κώδικας σε MATLAB

```
c=input('dose tin timi tou c1= ');
fo=input('dose tin timi tis gwnias fo= ');
tho=input('dose tin timi tis gwnias tho= ');
th=input('dose tin timi tis gwnias th= ');
M=input('dose tin timi tou M= ');

ro = [cos(fo)*sin(tho) sin(fo)*sin(tho) cos(tho)];

f= 0:.01:2*pi;

l=0;
R=[0 0 0];

for t=1:M

    for b=1:M
x=c*(floor((t-1)/2)+1)*(-1)^t;

y=c*(floor((b-1)/2)+1)*(-1)^b;

R=[x y 0;R];
end
end
z=size(R);

a=[0 0 0];
for f = 0:.01:2*pi;
    l=l+1;
    r = [cos(f)*sin(th) sin(f)*sin(th) cos(th)];
    for o=1:z(1)
        a(o,l)=sum((ro-r).*R(o,:));
```

```

    end
end

c=0;
for e=1:1:z(1)
    c=c+exp(i*2*pi*a(e,:));
    C= abs(c);
end

f = 0:.01:2*pi;
polar(f,C)

```

Το δεύτερο δίνει το διάγραμμα ακτινοβολίας του παράγοντα διάταξης για τη γωνία  $\theta$  κατά τη διεύθυνση μέγιστου του  $\phi$ .

Ακολουθεί ο κώδικας σε MATLAB

```

c=input('dose tin timi tou c1= ');
fo=input('dose tin timi tou fo= ');
tho=input('dose tin timi tou tho= ');
f=input('dose tin timi tou f= ');
M=input('dose tin timi tou M= ');

ro = [cos(fo)*sin(tho) sin(fo)*sin(tho) cos(tho)];

th= 0:.01:2*pi;

l=0;
R=[0 0 0];

for t=1:M

    for b=1:M
x=c*(floor((t-1)/2)+1)*(-1)^t;

y=c*(floor((b-1)/2)+1)*(-1)^b;

R=[x y 0;R];
end
end
z=size(R);

a=[0 0 0];
for th = 0:.01:pi;
    l=l+1;
    r = [cos(f)*sin(th) sin(f)*sin(th) cos(th)];

```

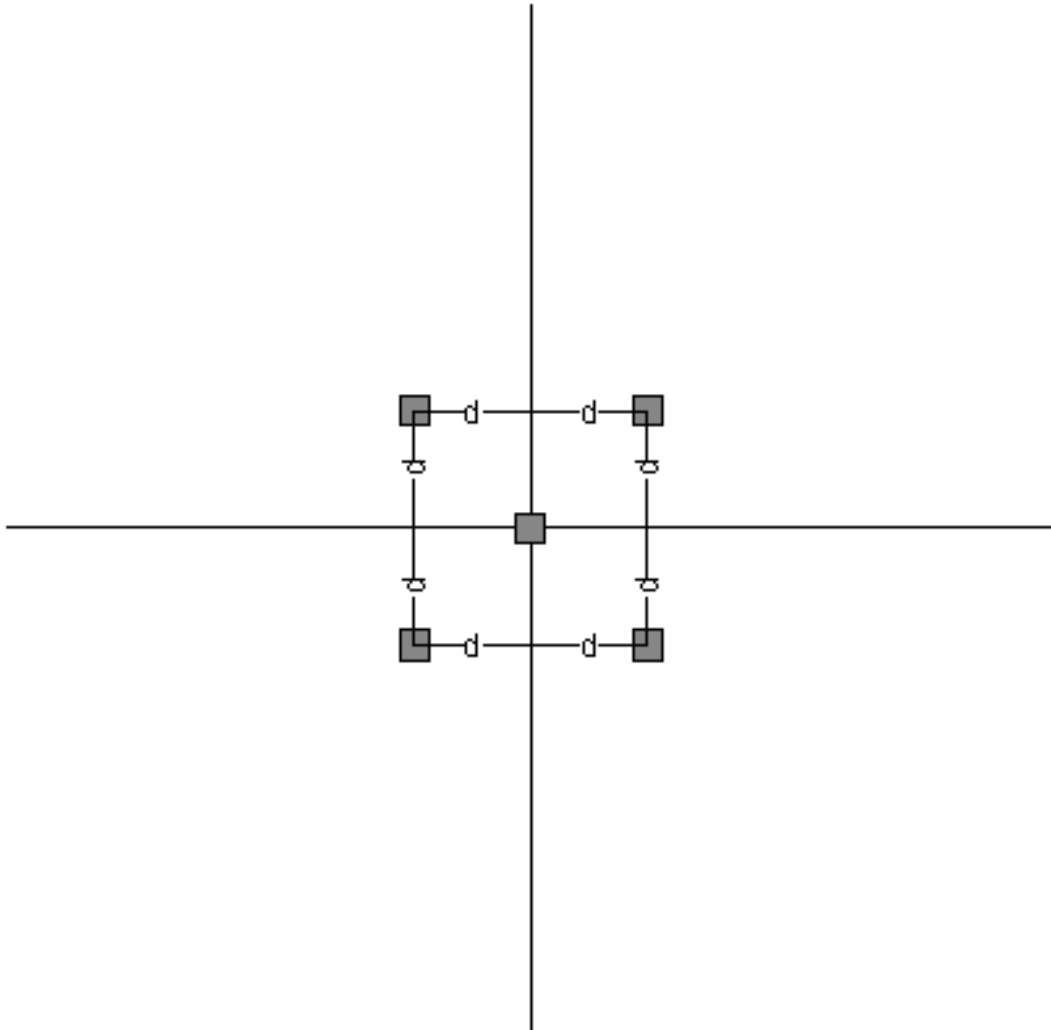
```
    for o=1:z(1)
        a(o,l)=sum((ro-r).*R(o,:));
    end
end

c=0;
for e=1:1:z(1)
    c=c+exp(i*2*pi*a(e,:));
    C= abs(c);
end

th = 0:.01:pi;
polar(th,C)
```

### 3.5 Διαγράμματα ακτινοβολίας

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1<sup>η</sup> : Ο ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΙΝΑΙ ΠΕΝΤΕ

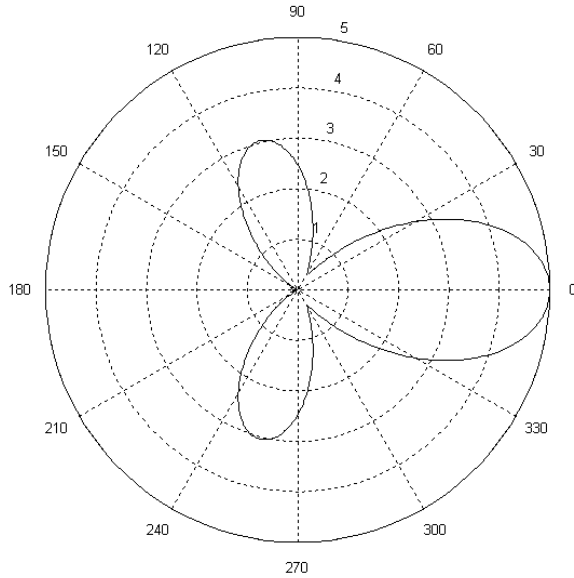


**Σχήμα 3.2** Γεωμετρία διάταξης για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 45^\circ$  και  $\phi_o = 0$

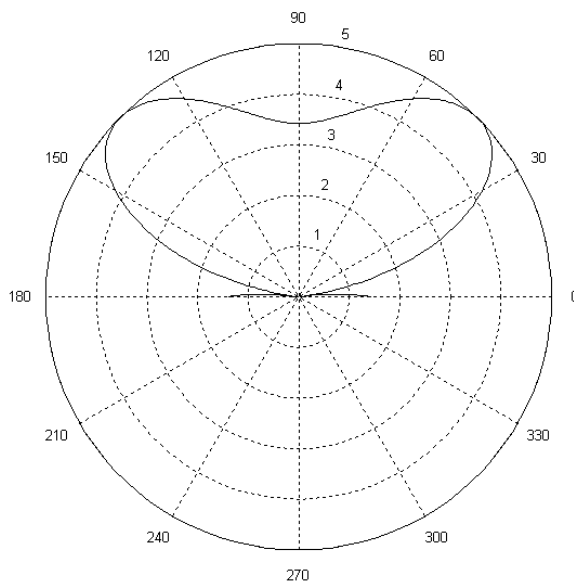
➤ Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$

- Διάγραμμα  $\phi$



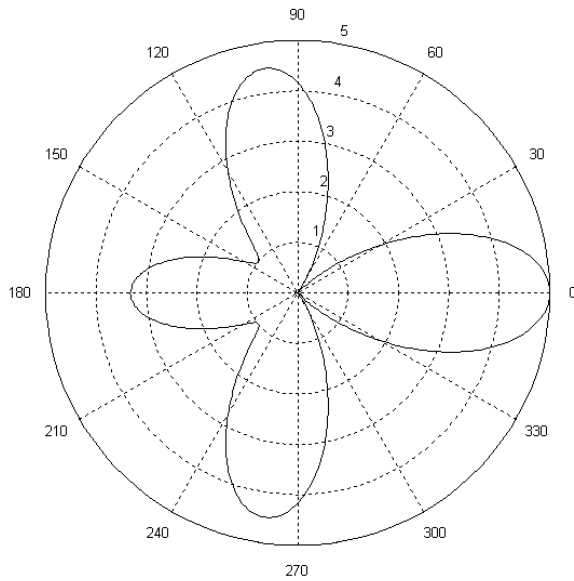
Σχήμα 3.2.1 Δοκιμή 1 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία.

- Διάγραμμα  $\theta$



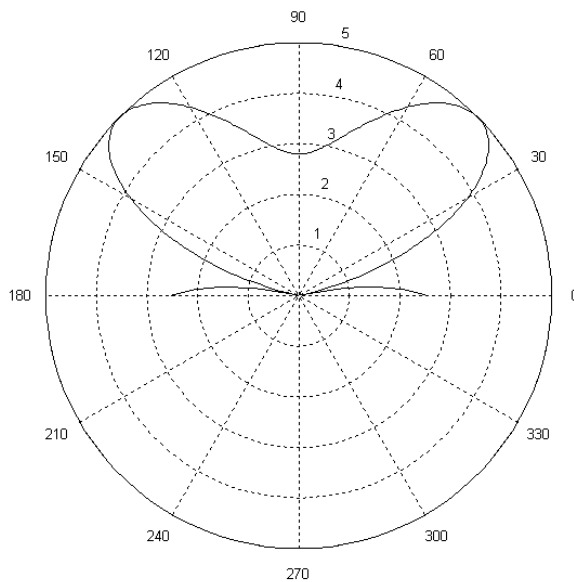
Σχήμα 3.2.2 Δοκιμή 2 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



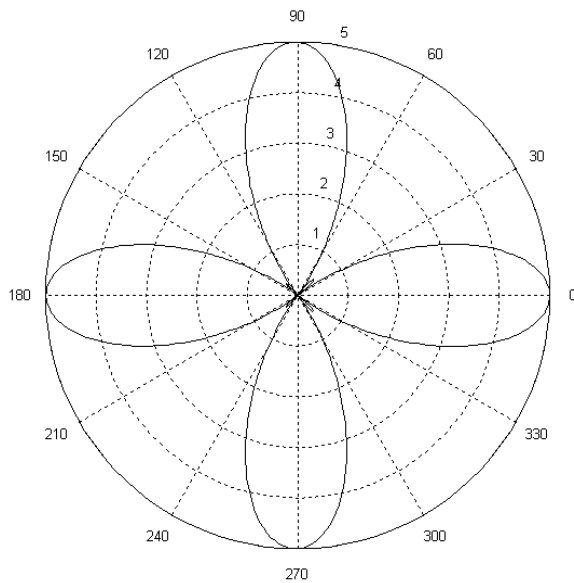
**Σχήμα 3.2.3** Δοκιμή 3 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



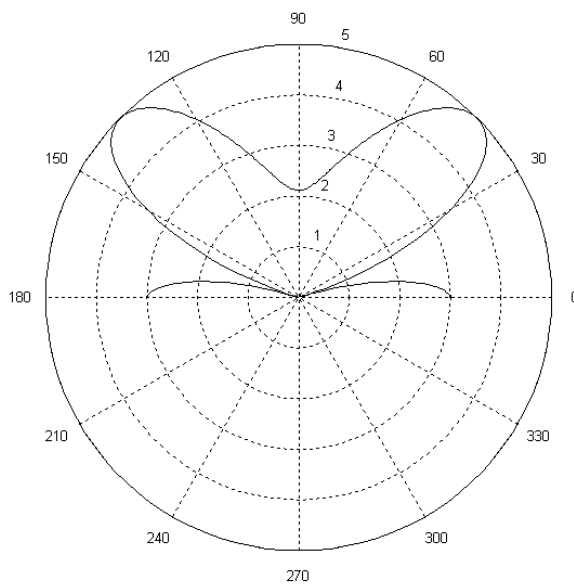
**Σχήμα 3.2.4** Δοκιμή 4 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



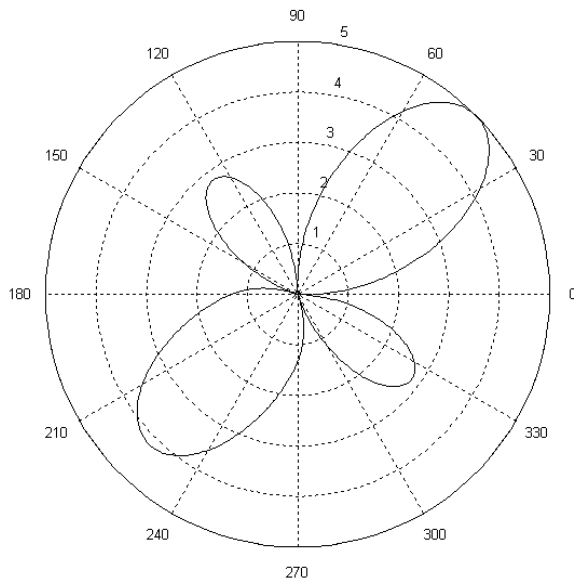
Σχήμα 3.2.5 Δοκιμή 5 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



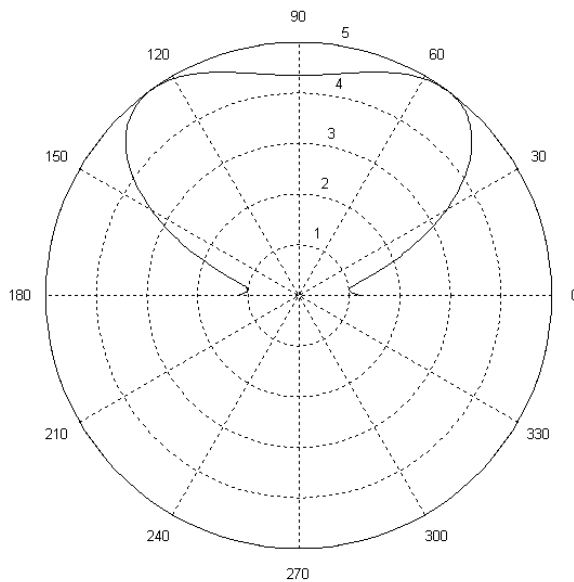
Σχήμα 3.2.6 Δοκιμή 6 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- ❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 54.73^\circ$  και  $\phi_o = 45^\circ$
- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



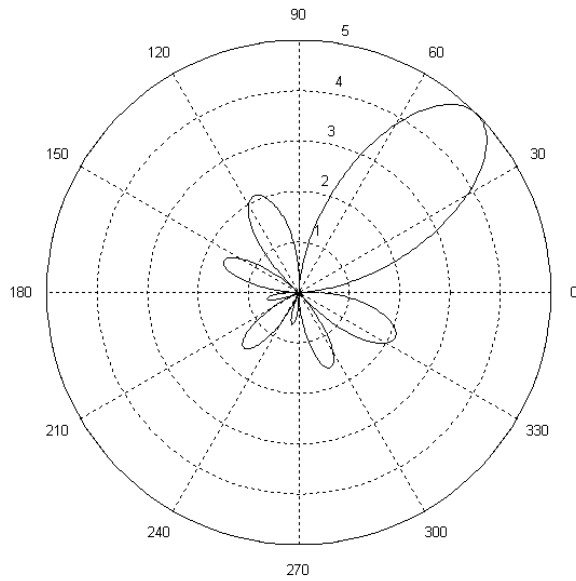
Σχήμα 3.2.7 Δοκιμή 7 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



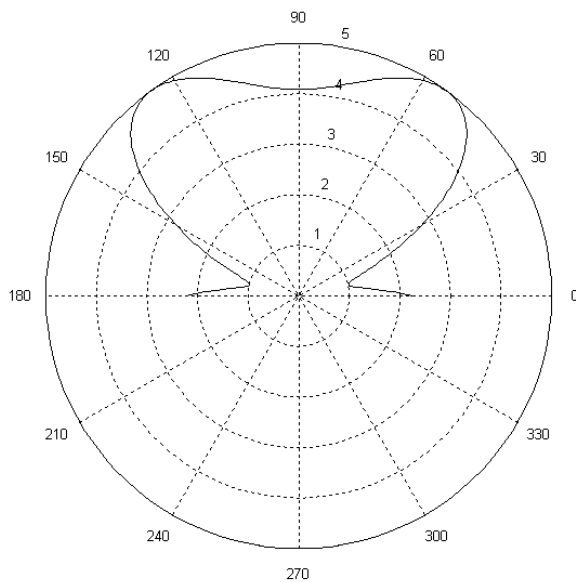
Σχήμα 3.2.8 Δοκιμή 8 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\varphi$



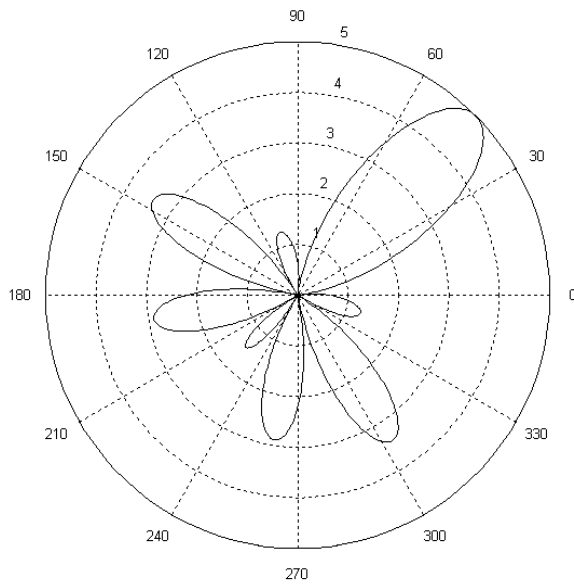
**Σχήμα 3.2.9** Δοκιμή 9 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



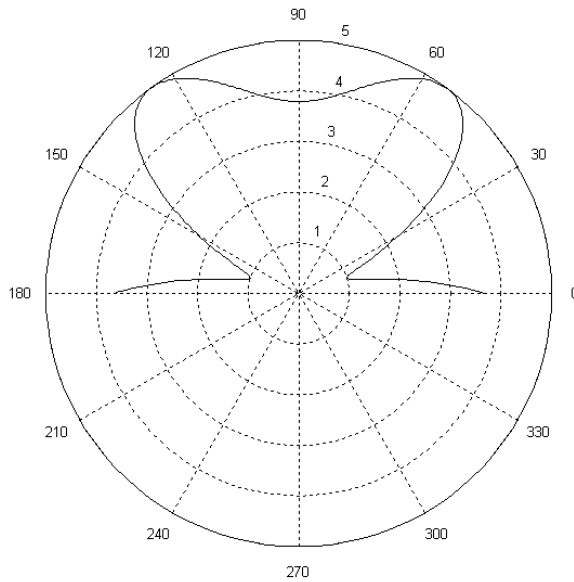
**Σχήμα 3.2.10** Δοκιμή 10 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



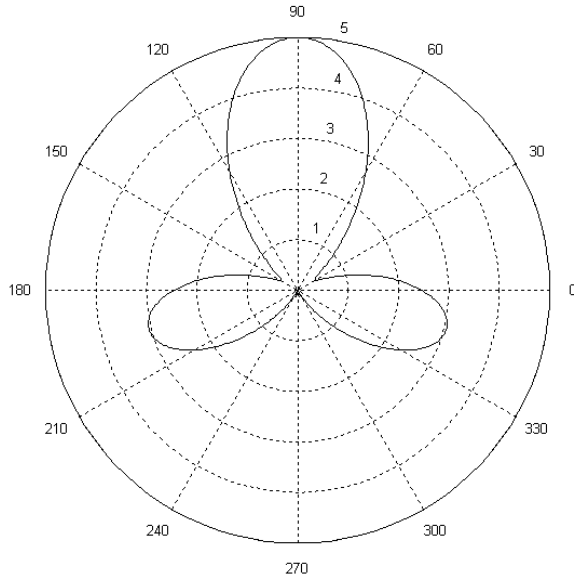
**Σχήμα 3.2.11** Δοκιμή 11 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



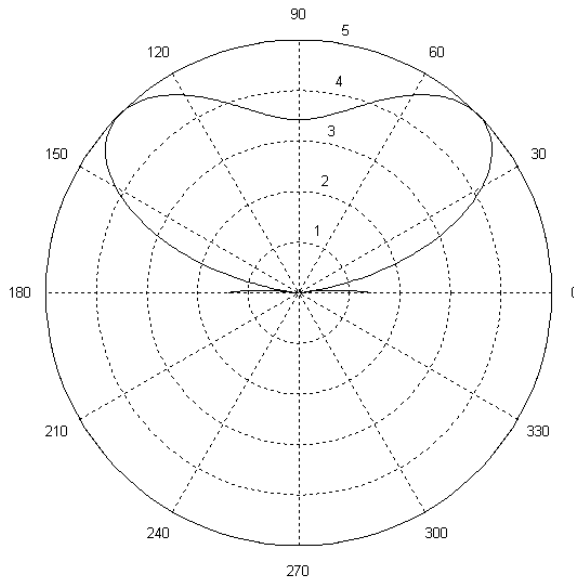
**Σχήμα 3.2.12** Δοκιμή 12 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- ❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 45^\circ$  και  $\phi_o = 90^\circ$ 
  - Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$
  - Διάγραμμα  $\phi$



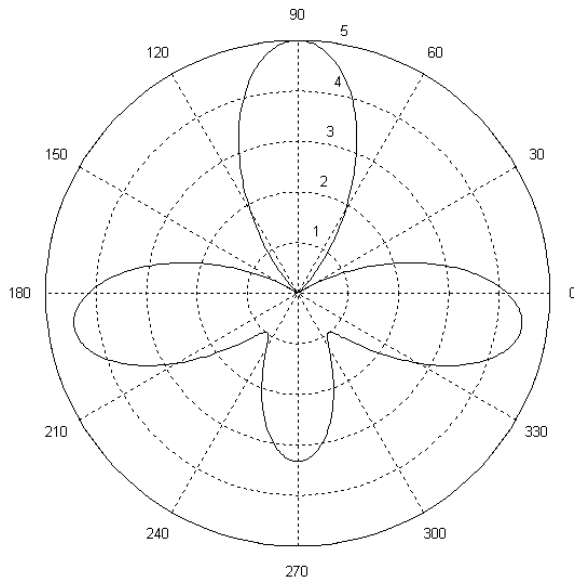
**Σχήμα 3.2.13** Δοκιμή 13 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



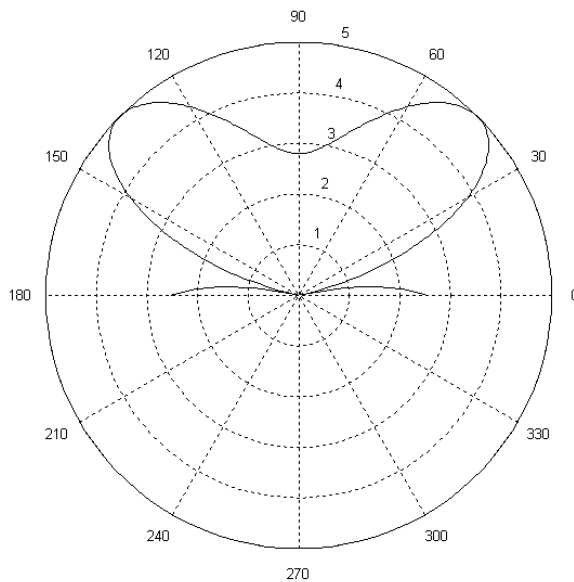
**Σχήμα 3.2.14** Δοκιμή 14 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\varphi$



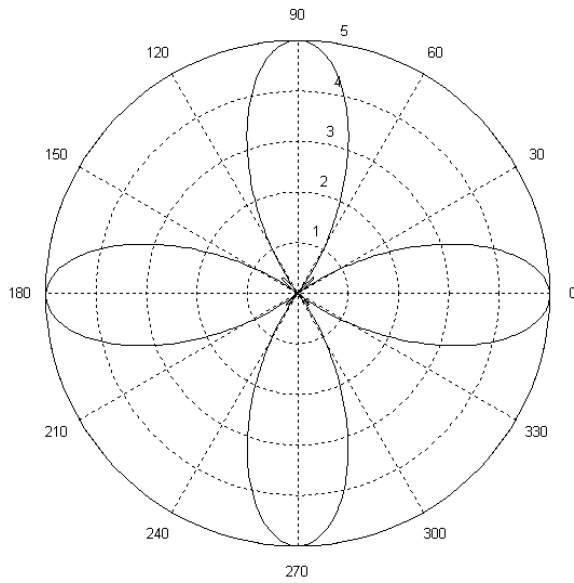
**Σχήμα 3.2.15** Δοκιμή 15 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



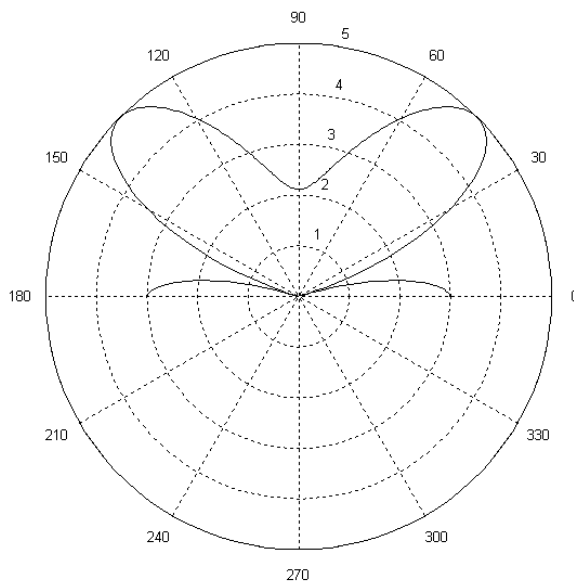
**Σχήμα 3.2.16** Δοκιμή 16 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



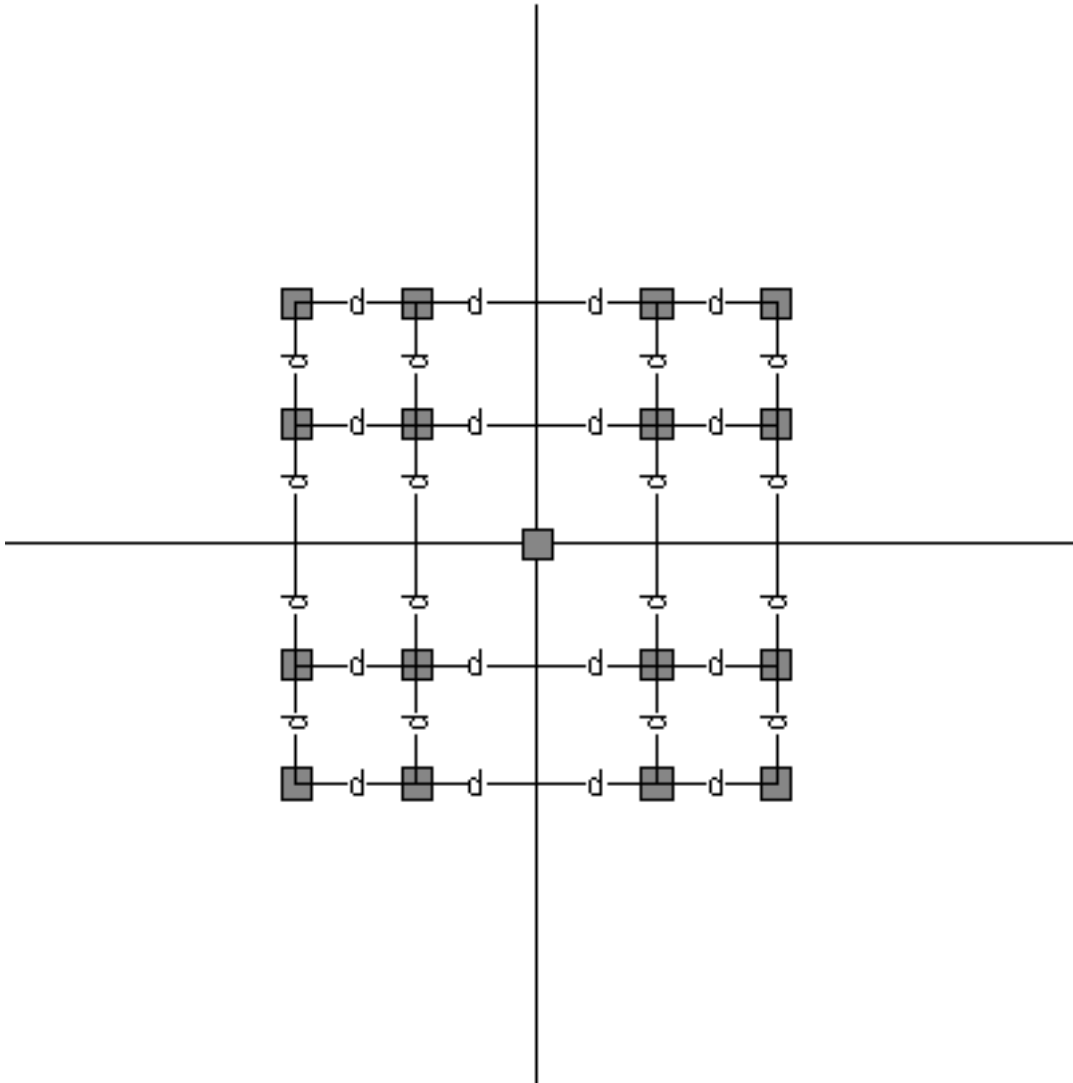
**Σχήμα 3.2.17** Δοκιμή 17 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



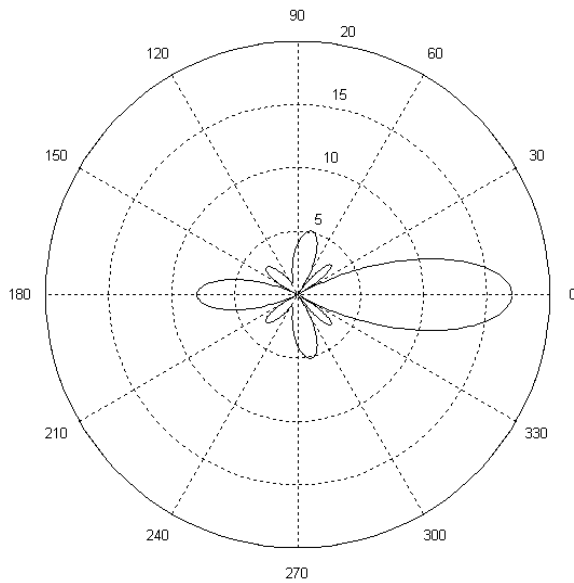
**Σχήμα 3.2.18** Δοκιμή 18 για στοιχειοκεραία με 5 στοιχεία

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2<sup>η</sup> Ο ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΙΝΑΙ 17



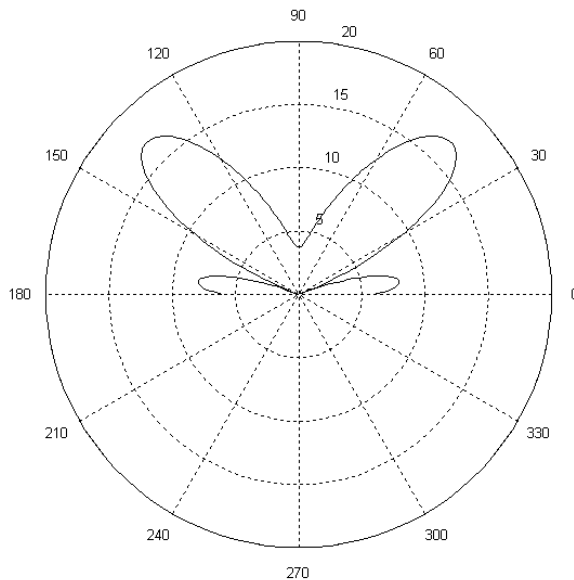
**Σχήμα 3.3** Γεωμετρία διάταξης για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- ❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 45^\circ$  και  $\phi_o = 0$ 
  - Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$
  - Διάγραμμα  $\phi$



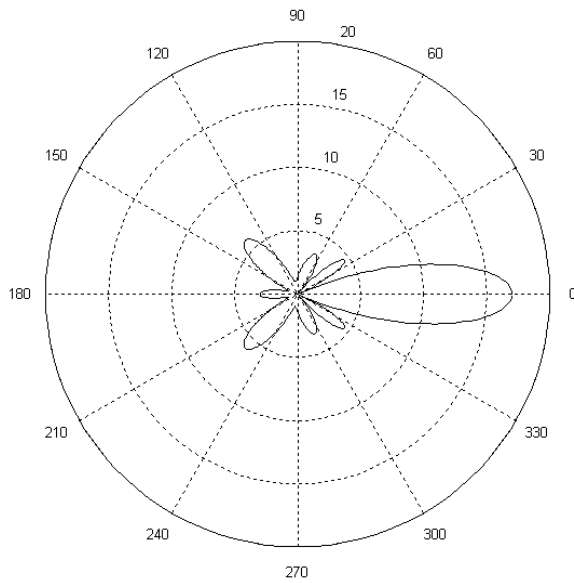
Σχήμα 3.3.1 Δοκιμή 1 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



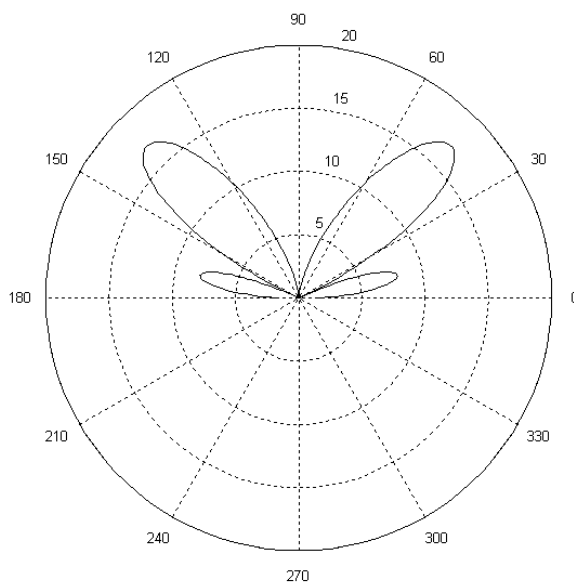
Σχήμα 3.3.2 Δοκιμή 2 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



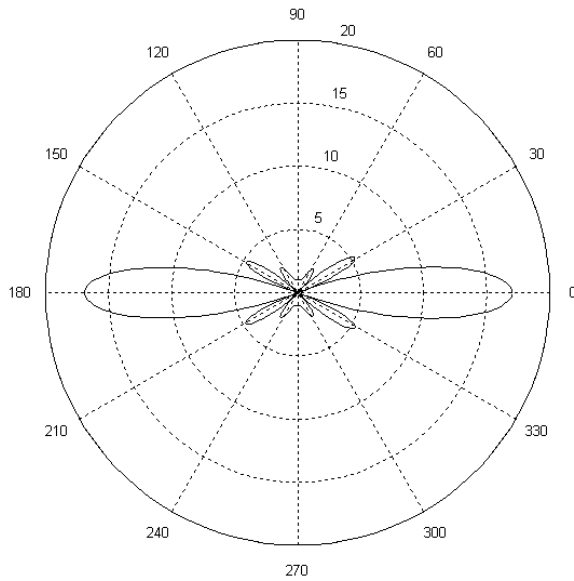
Σχήμα 3.3.3 Δοκιμή 3 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



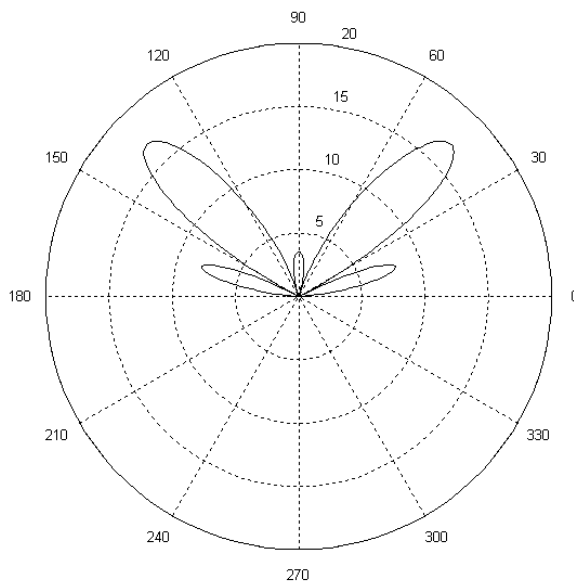
Σχήμα 3.3.4 Δοκιμή 4 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



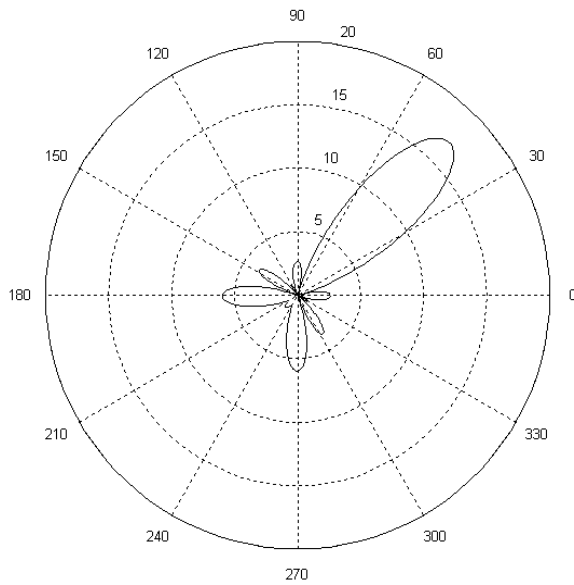
Σχήμα 3.3.5 Δοκιμή 5 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



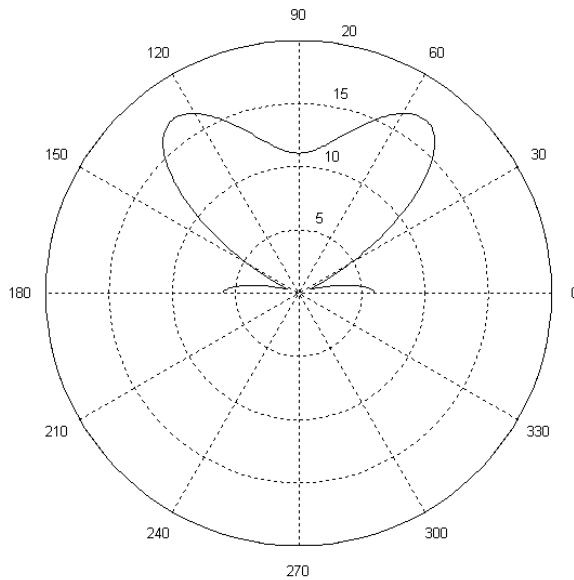
Σχήμα 3.3.6 Δοκιμή 6 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- ❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 54.73^\circ$  και  $\phi_o = 45^\circ$ 
  - Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$
  - Διάγραμμα  $\phi$



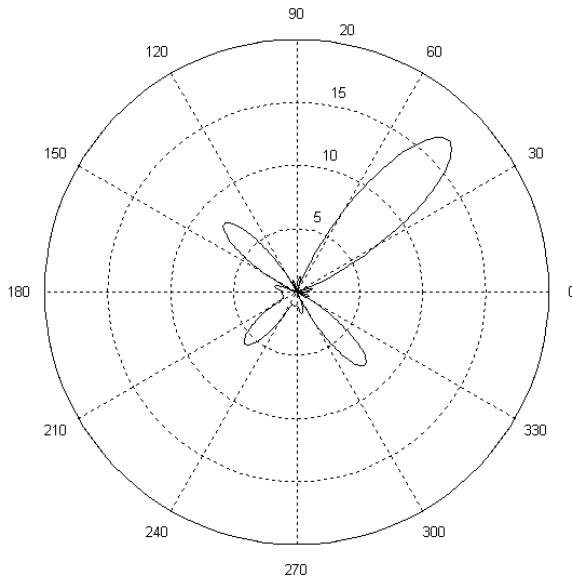
Σχήμα 3.3.7 Δοκιμή 7 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



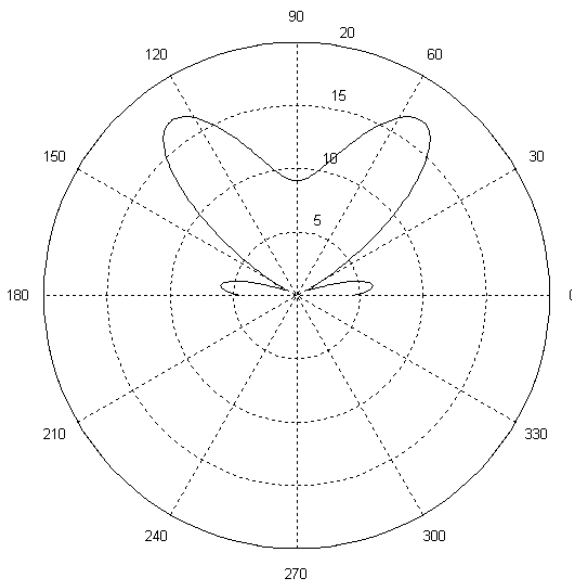
Σχήμα 3.3.8 Δοκιμή 8 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\varphi$



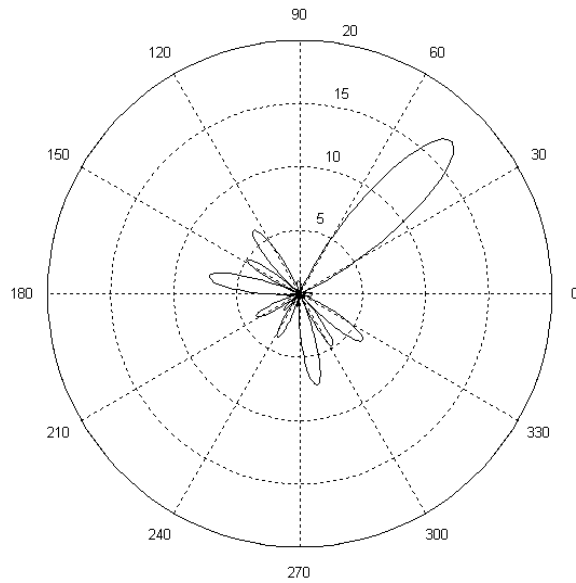
**Σχήμα 3.3.9** Δοκιμή 9 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



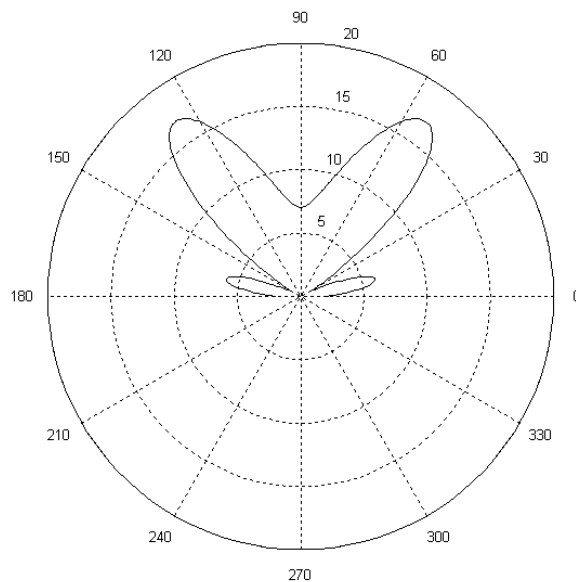
**Σχήμα 3.3.10** Δοκιμή 10 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\varphi$



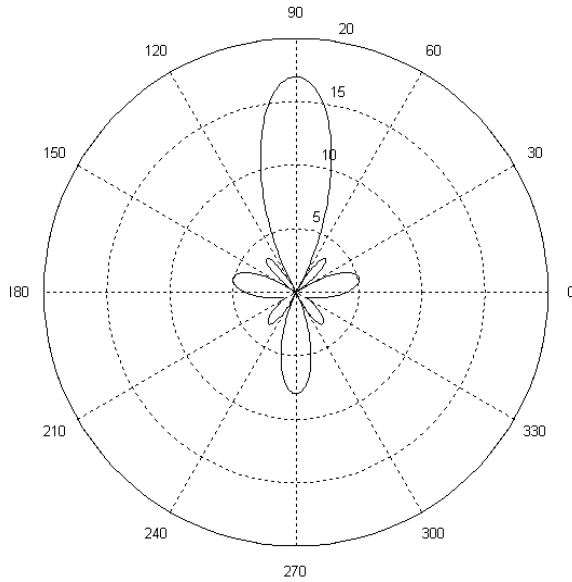
**Σχήμα 3.3.11** Δοκιμή 11 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



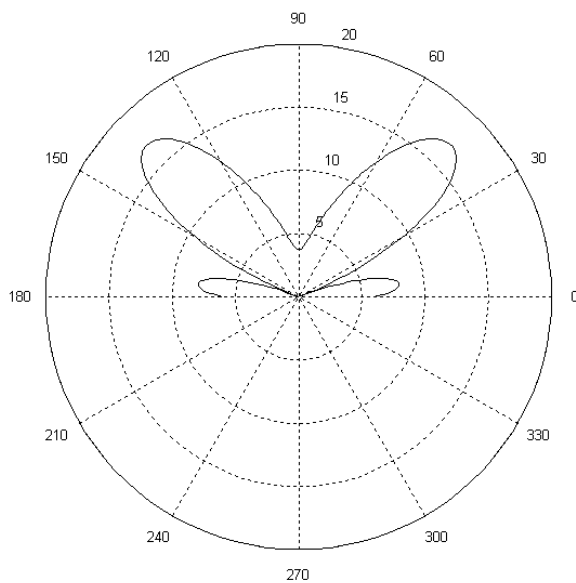
**Σχήμα 3.3.12** Δοκιμή 12 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- ❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 45^\circ$  και  $\phi_o = 90^\circ$ 
  - Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$
  - Διάγραμμα  $\phi$



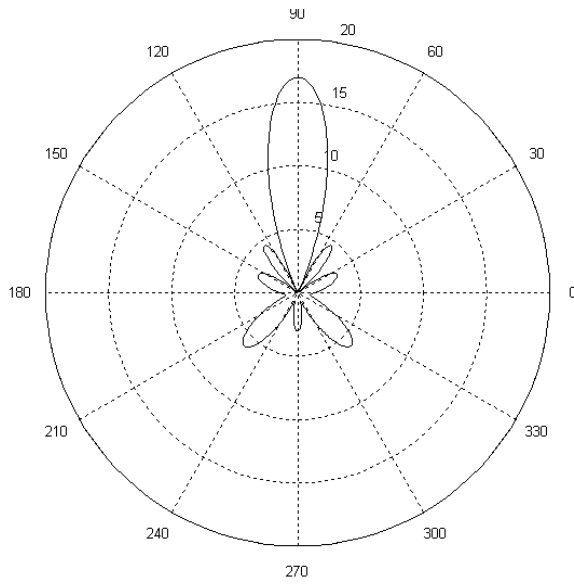
**Σχήμα 3.3.13** Δοκιμή 13 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



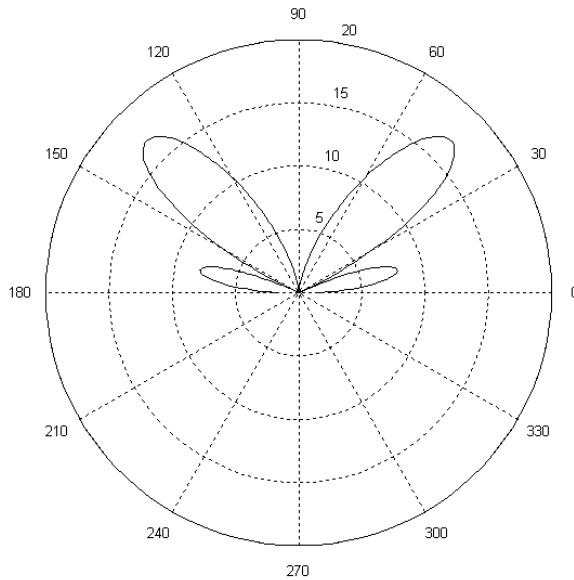
**Σχήμα 3.3.14** Δοκιμή 14 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\varphi$



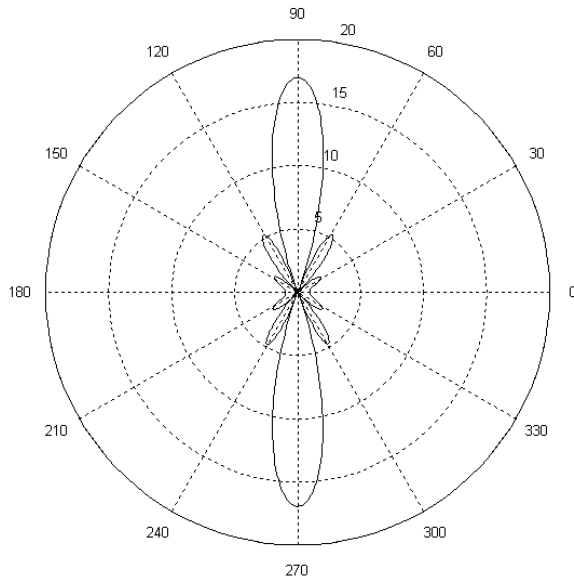
**Σχήμα 3.3.15** Δοκιμή 15 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



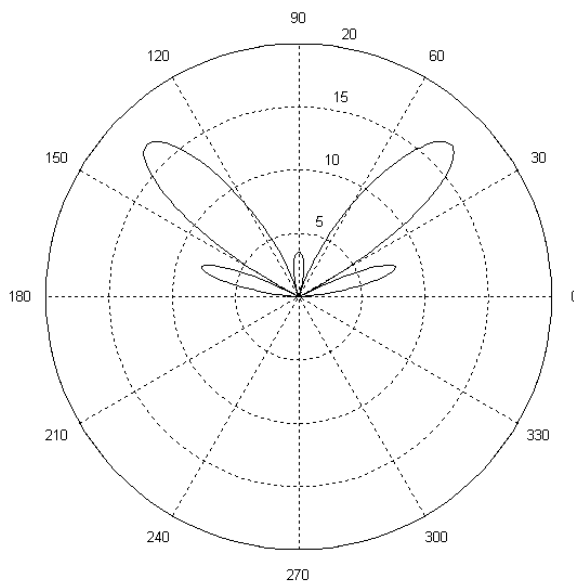
**Σχήμα 3.3.16** Δοκιμή 16 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\varphi$



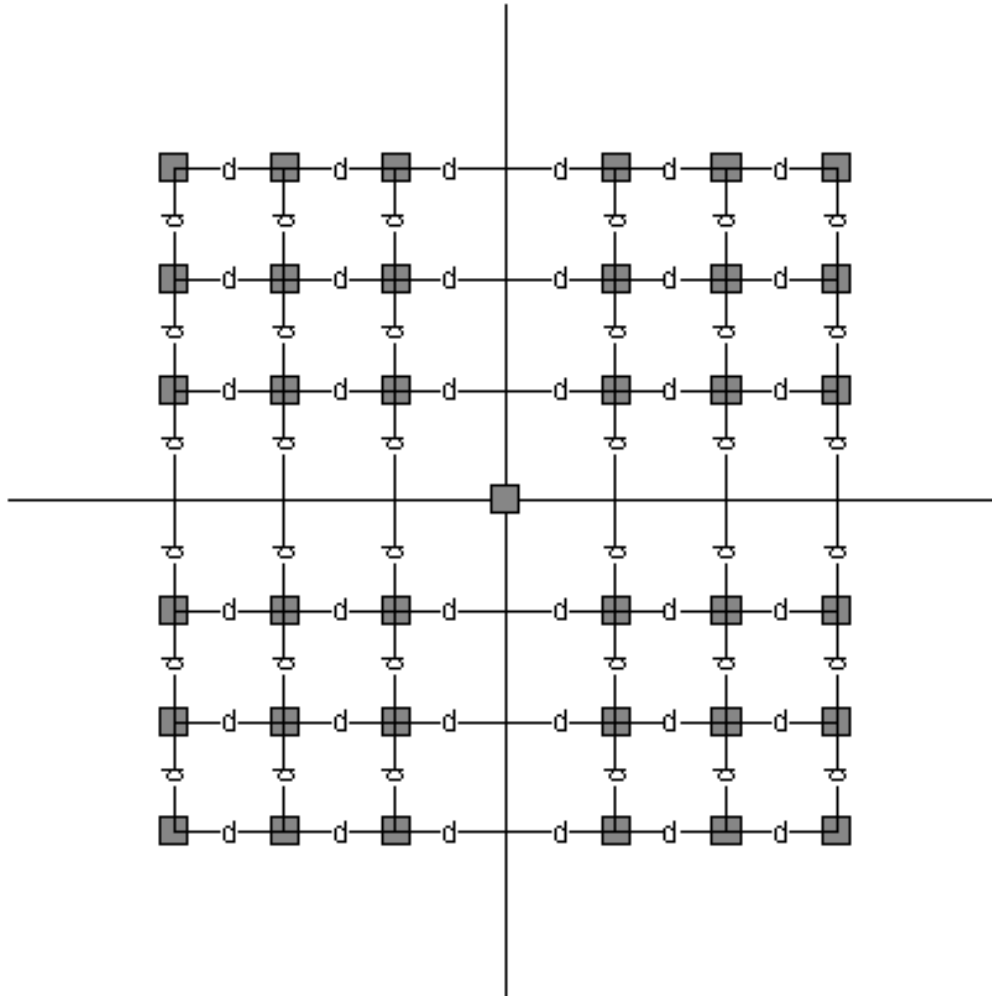
**Σχήμα 3.3.17** Δοκιμή 17 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



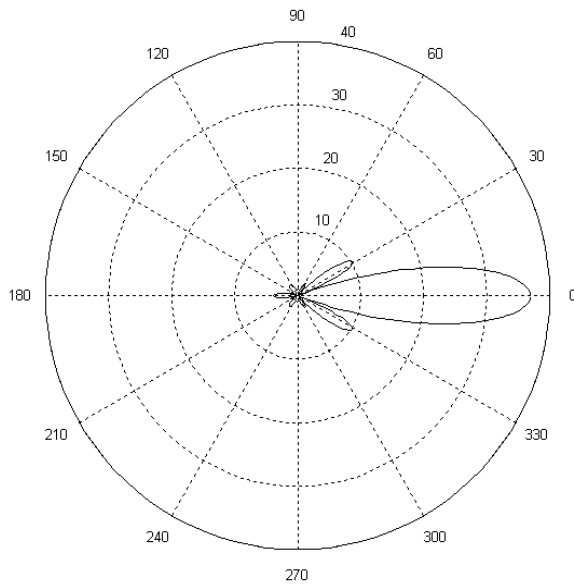
**Σχήμα 3.3.18** Δοκιμή 18 για στοιχειοκεραία με 17 στοιχεία

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3<sup>η</sup>: Ο ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΙΝΑΙ 37



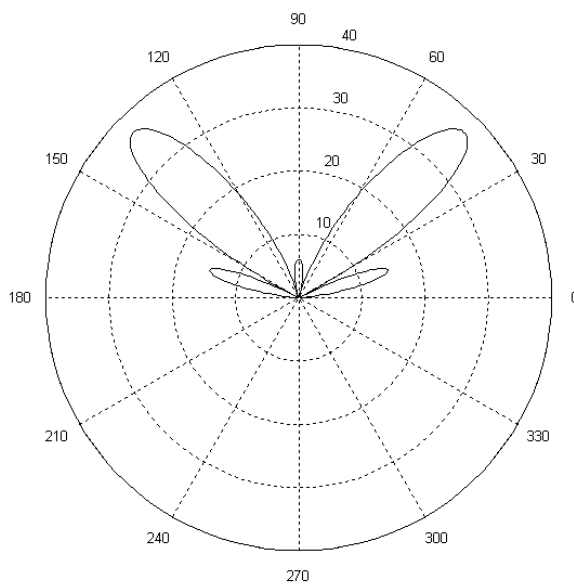
**Σχήμα 3.4** Γεωμετρία διάταξης για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- ❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 45^\circ$  και  $\phi_o = 0$ 
  - Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$
  - Διάγραμμα  $\phi$



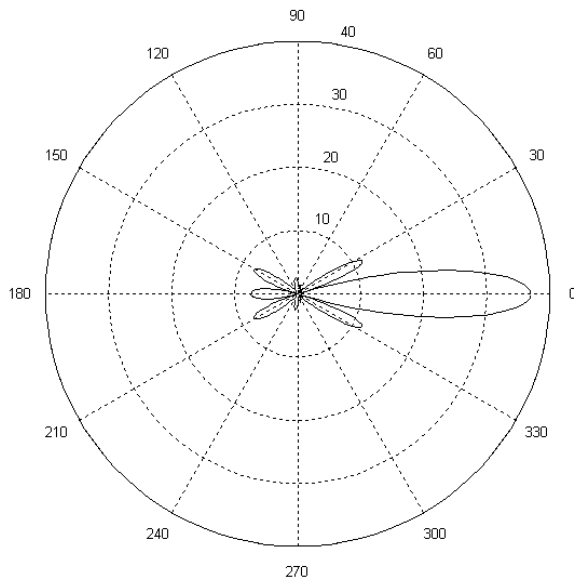
**Σχήμα 3.4.1** Δοκιμή 1 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



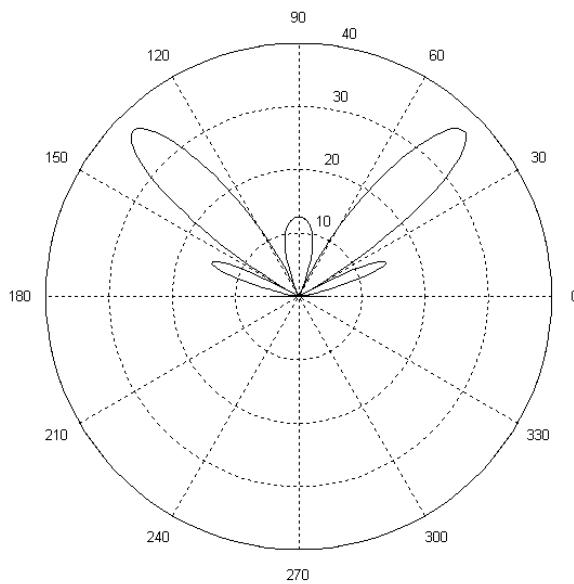
**Σχήμα 3.4.2** Δοκιμή 2 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



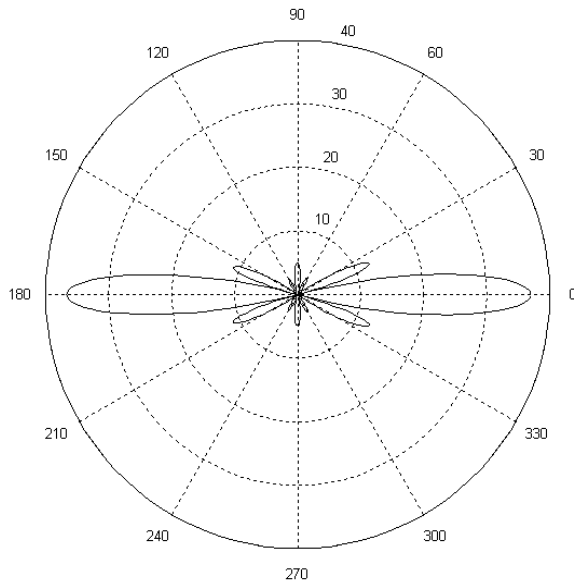
**Σχήμα 3.4.3** Δοκιμή 3 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



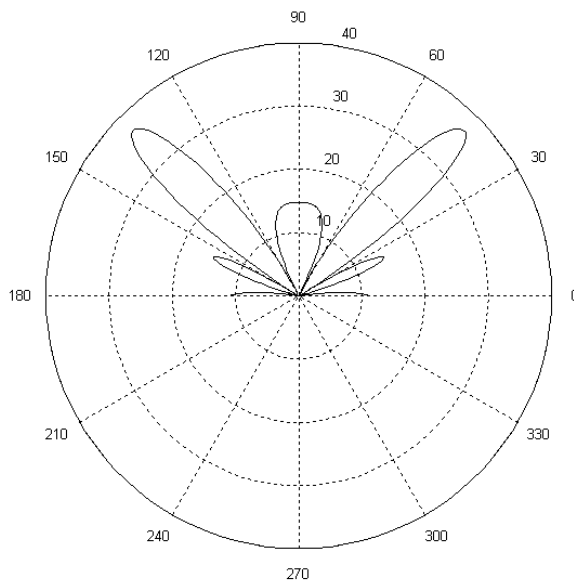
**Σχήμα 3.4.4** Δοκιμή 4 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



**Σχήμα 3.4.5** Δοκιμή 5 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$

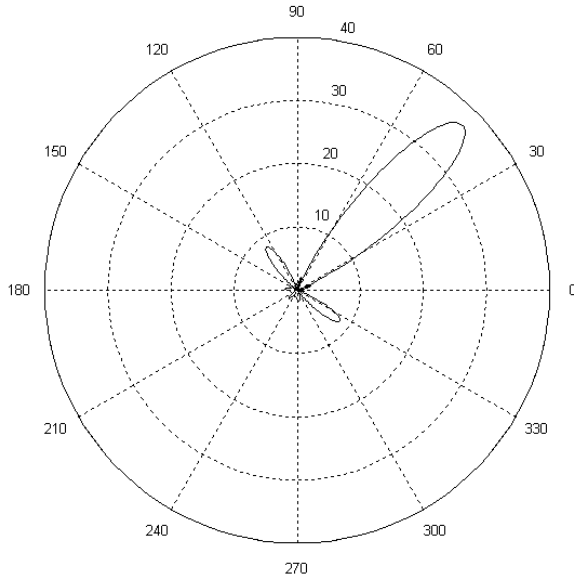


**Σχήμα 3.4.6** Δοκιμή 6 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 54.73^\circ$  και  $\phi_o = 45^\circ$

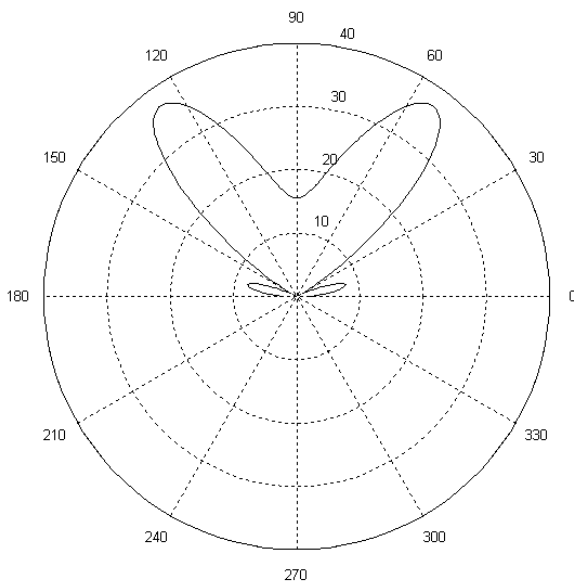
➤ Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$

• Διάγραμμα  $\phi$



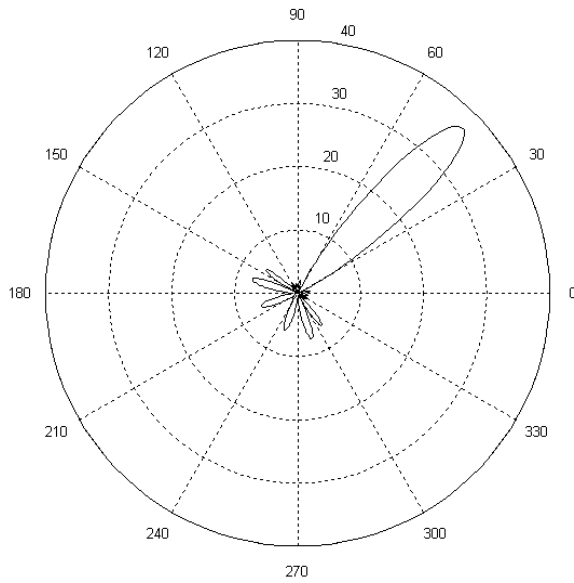
Σχήμα 3.4.7 Δοκιμή 7 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

• Διάγραμμα  $\theta$



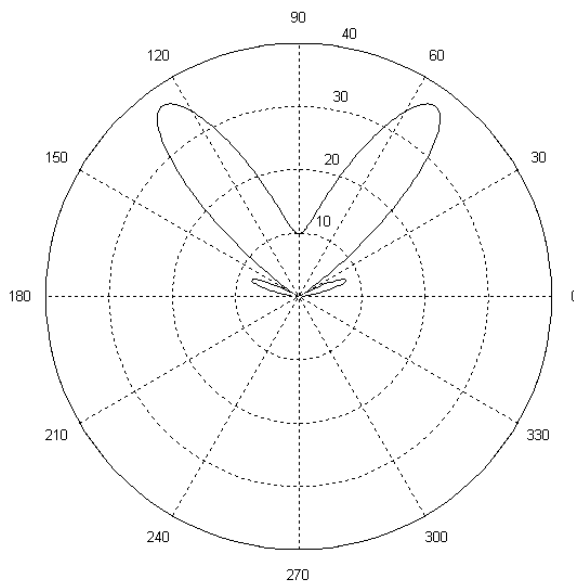
Σχήμα 3.4.8 Δοκιμή 8 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\varphi$



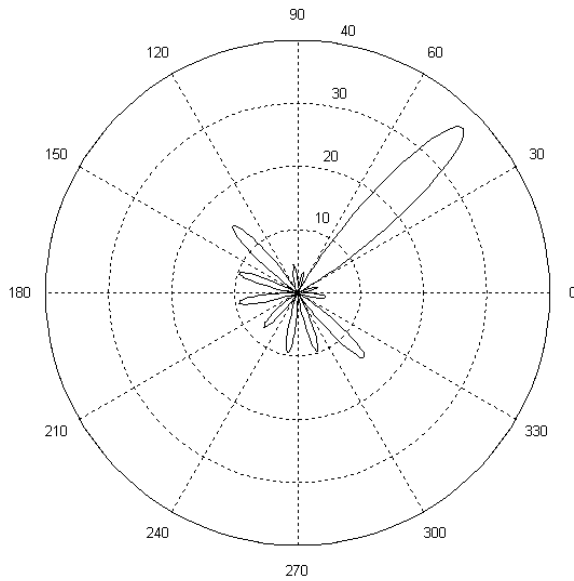
**Σχήμα 3.4.9** Δοκιμή 9 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



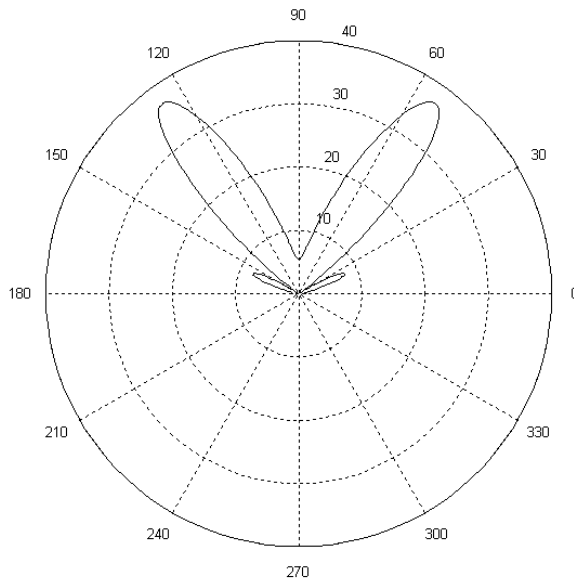
**Σχήμα 3.4.10** Δοκιμή 10 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\varphi$



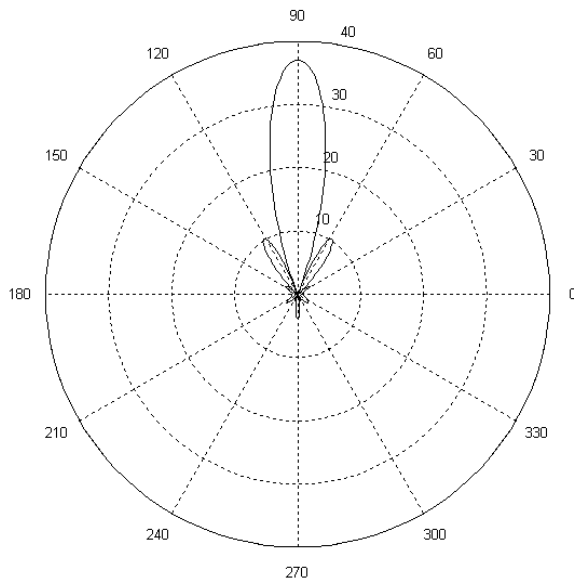
**Σχήμα 3.4.11** Δοκιμή 11 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



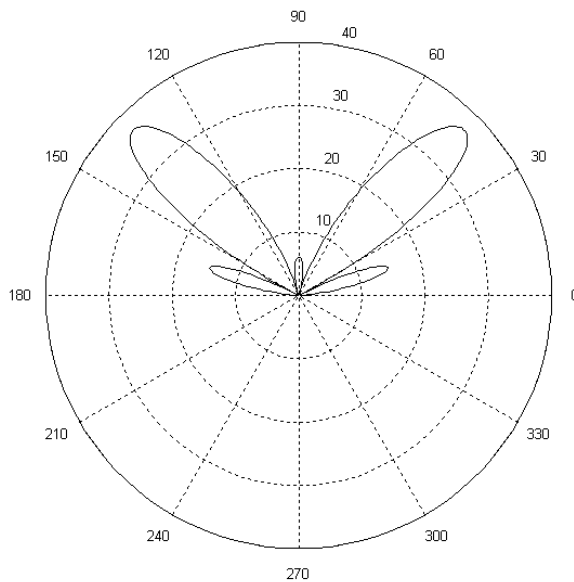
**Σχήμα 3.4.12** Δοκιμή 12 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- ❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 45^\circ$  και  $\phi_o = 90^\circ$ 
  - Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$
  - Διάγραμμα  $\phi$



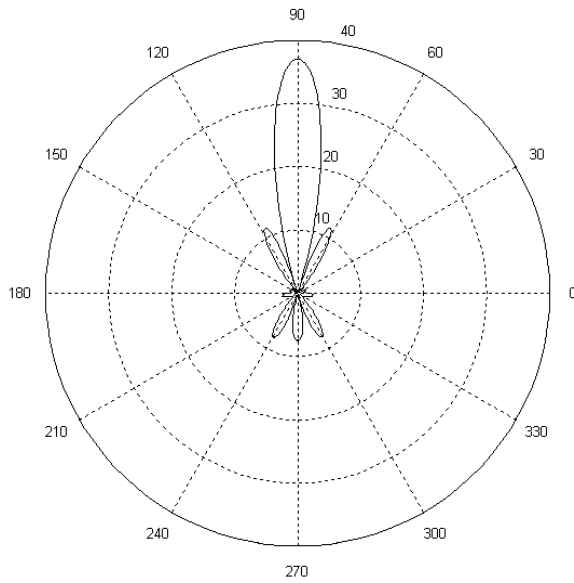
**Σχήμα 3.4.13** Δοκιμή 13 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



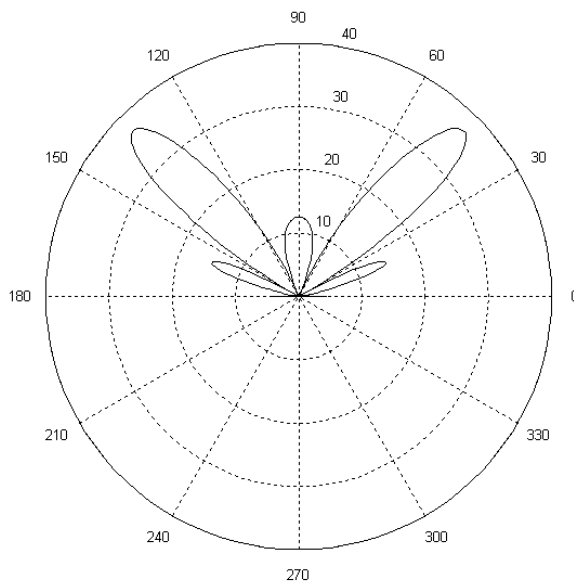
**Σχήμα 3.4.14** Δοκιμή 14 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



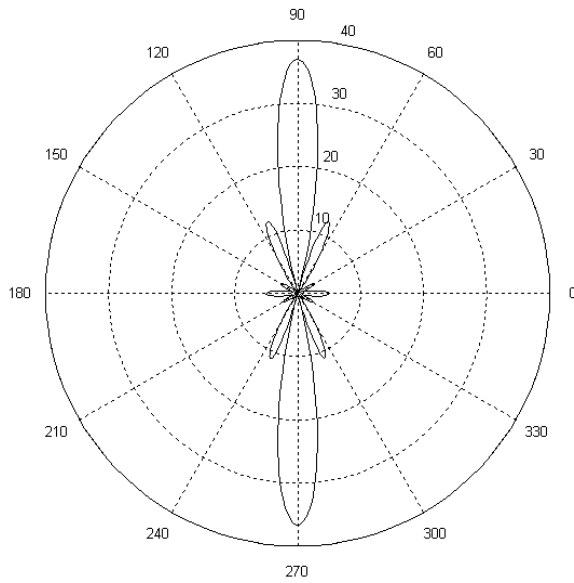
**Σχήμα 3.4.15** Δοκιμή 15 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



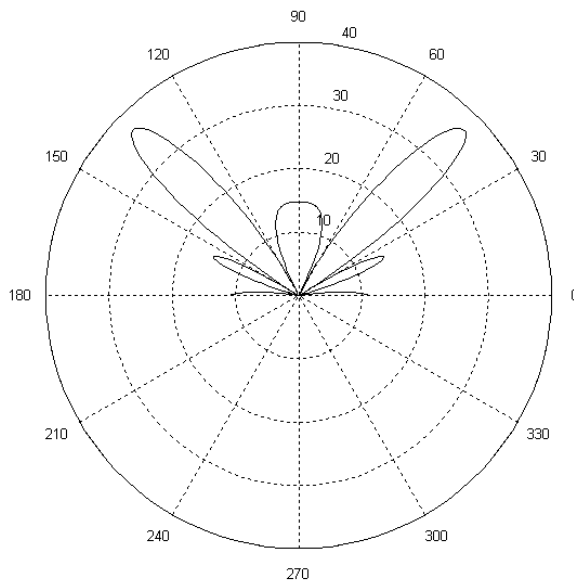
**Σχήμα 3.4.16** Δοκιμή 16 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\varphi$



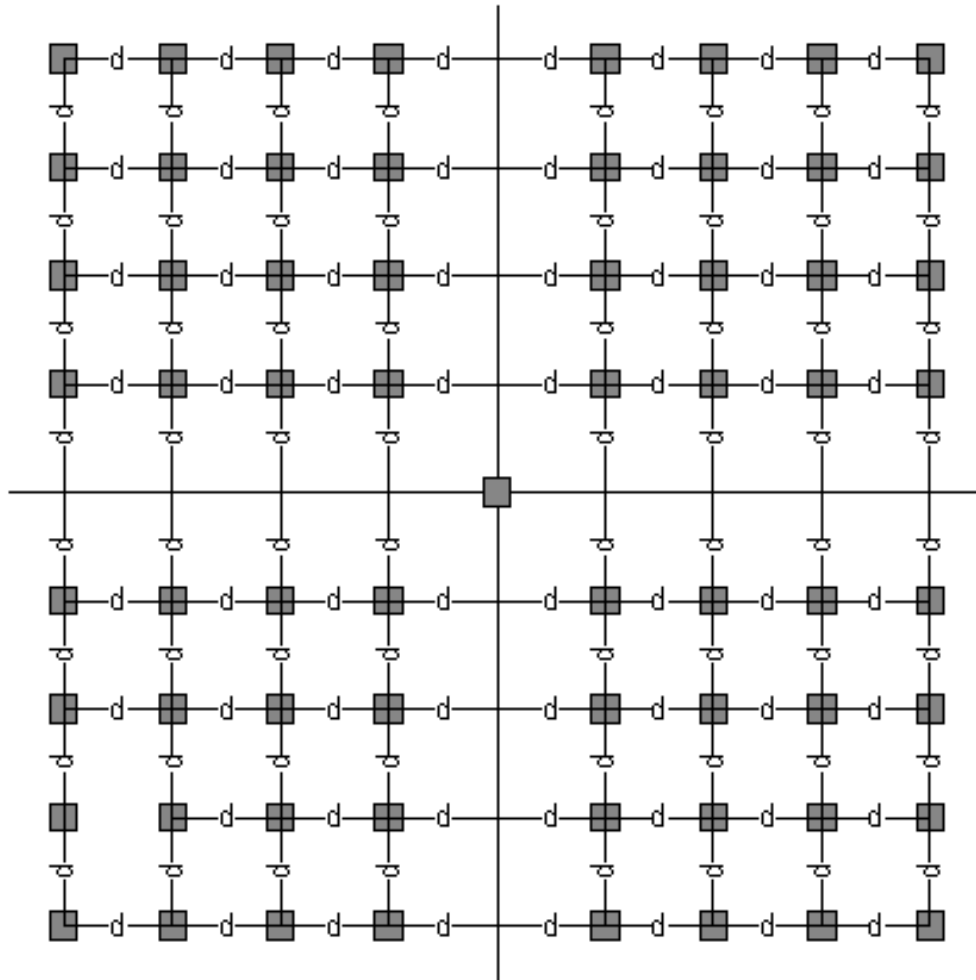
Σχήμα 3.4.17 Δοκιμή 17 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



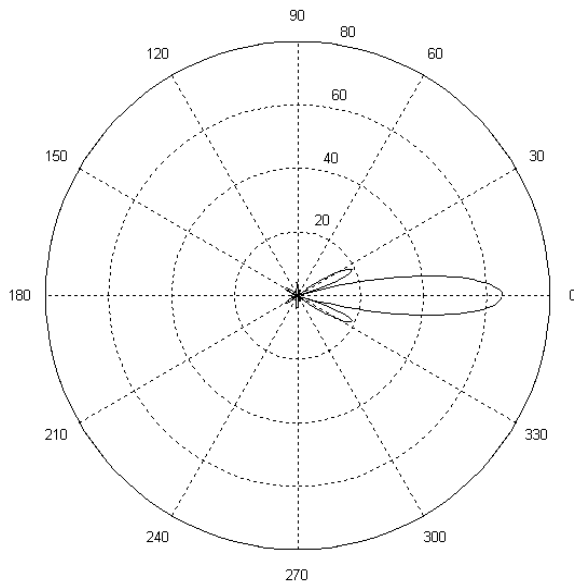
Σχήμα 3.4.18 Δοκιμή 18 για στοιχειοκεραία με 37 στοιχεία

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4<sup>η</sup>: Ο ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΙΝΑΙ 65



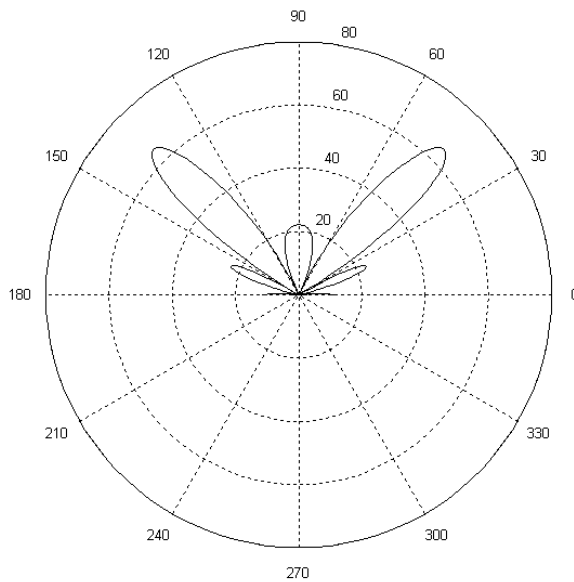
**Σχήμα 3.5** Γεωμετρία διάταξης για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- ❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 45^\circ$  και  $\phi_o = 0$ 
  - Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$
  - Διάγραμμα  $\phi$



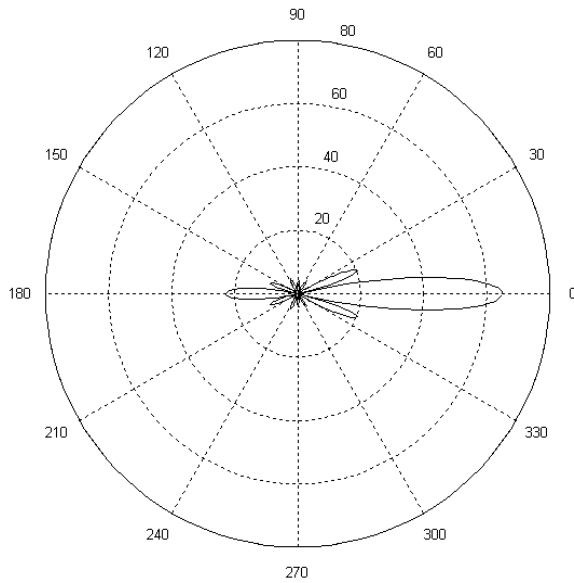
**Σχήμα 3.5.1** Δοκιμή 1 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



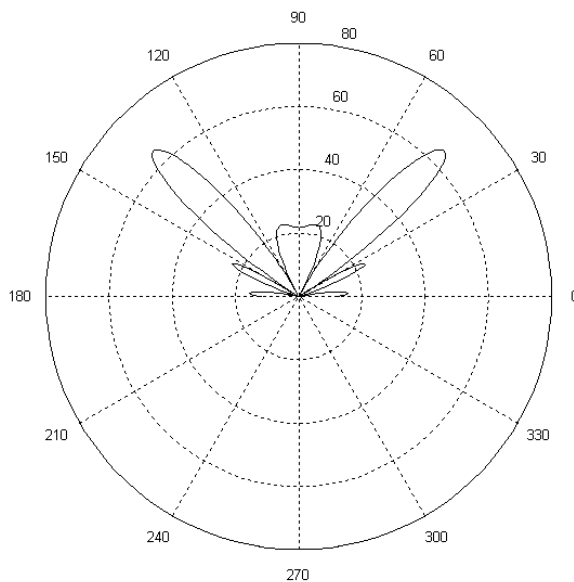
**Σχήμα 3.5.2** Δοκιμή 2 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\varphi$



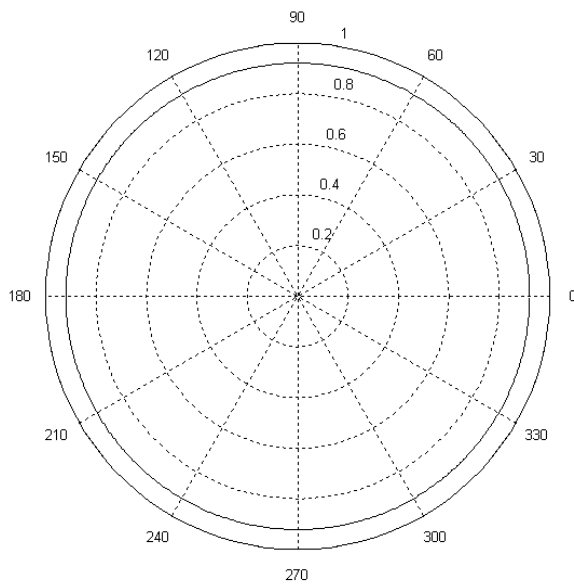
**Σχήμα 3.5.3** Δοκιμή 3 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



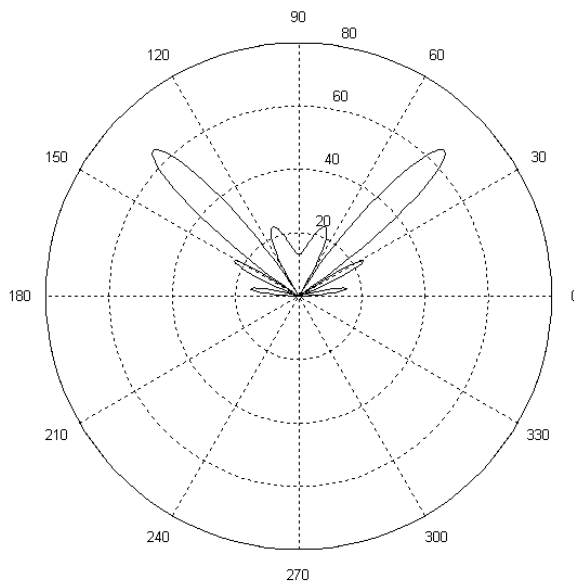
**Σχήμα 3.5.4** Δοκιμή 4 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\varphi$



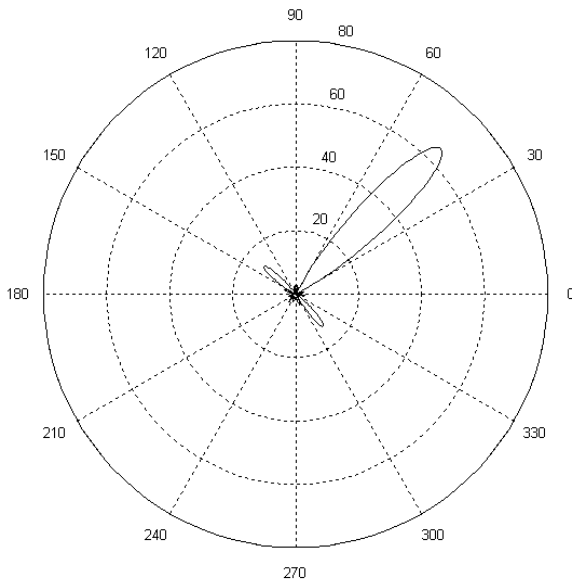
**Σχήμα 3.5.5** Δοκιμή 5 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



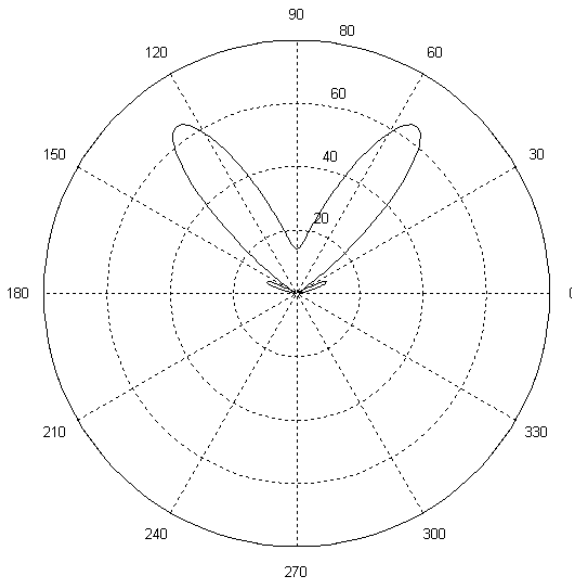
**Σχήμα 3.5.6** Δοκιμή 6 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- ❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 54.73^\circ$  και  $\phi_o = 45^\circ$
- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



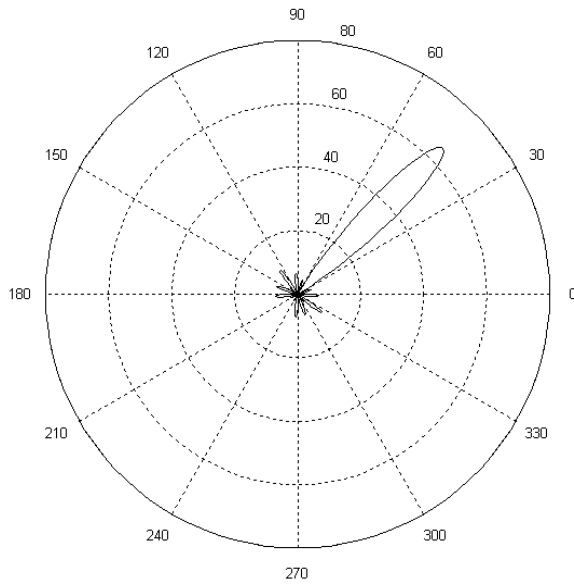
Σχήμα 3.5.7 Δοκιμή 7 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



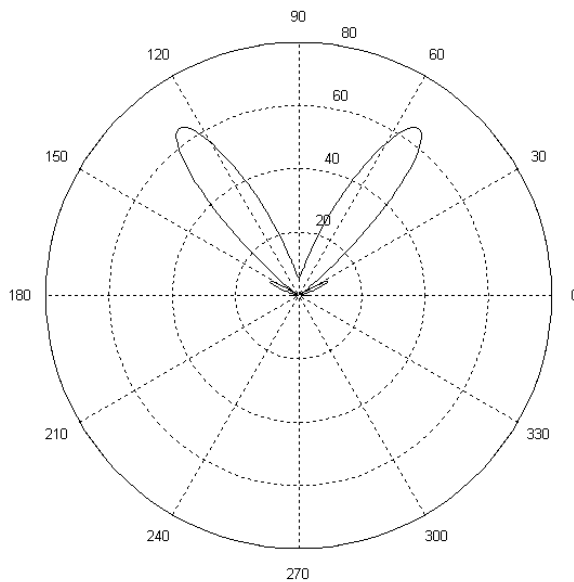
Σχήμα 3.5.8 Δοκιμή 8 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



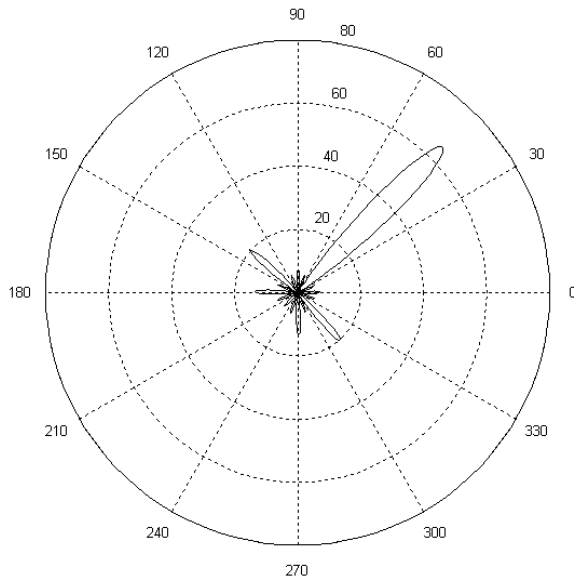
**Σχήμα 3.5.9** Δοκιμή 9 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



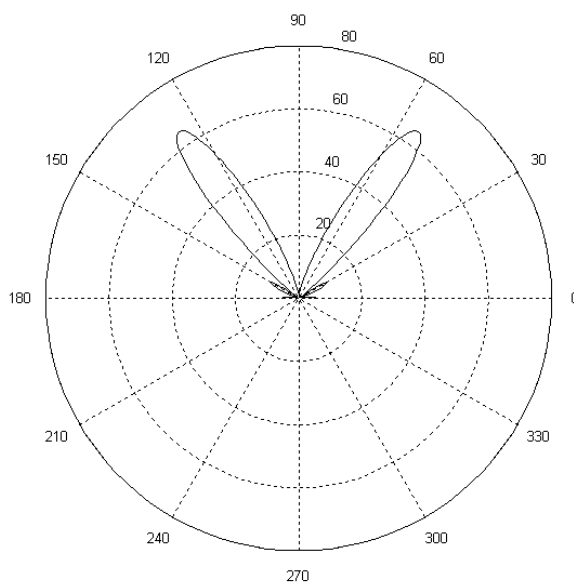
**Σχήμα 3.5.10** Δοκιμή 10 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



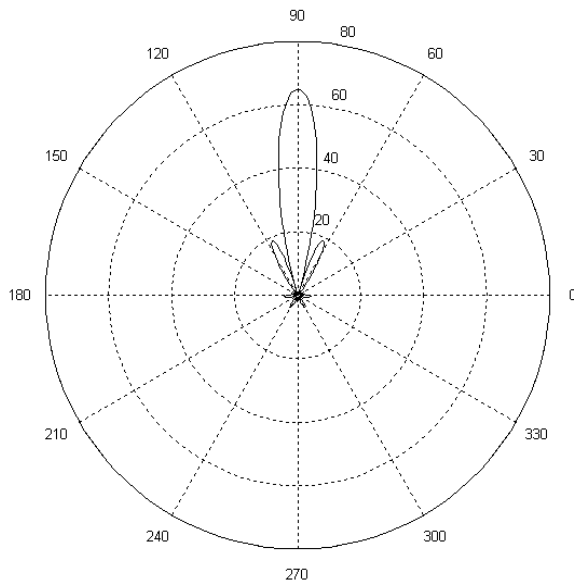
**Σχήμα 3.5.11** Δοκιμή 11 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



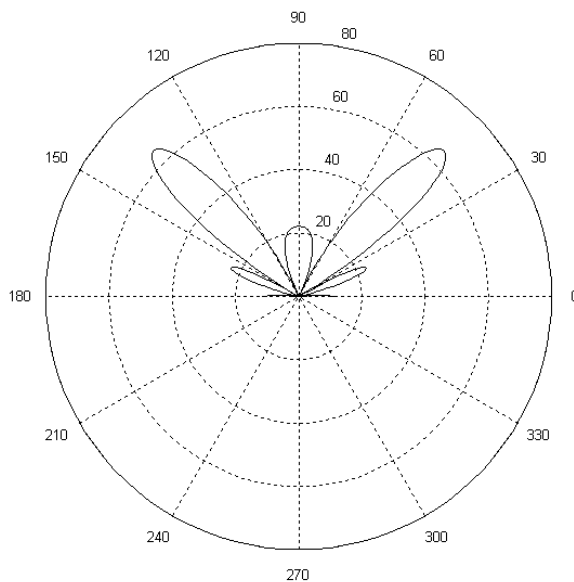
**Σχήμα 3.5.12** Δοκιμή 12 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- ❖ Διεύθυνση μέγιστου :  $\theta_o = 45^\circ$  και  $\phi_o = 90^\circ$ 
  - Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.5\lambda$
  - Διάγραμμα  $\phi$



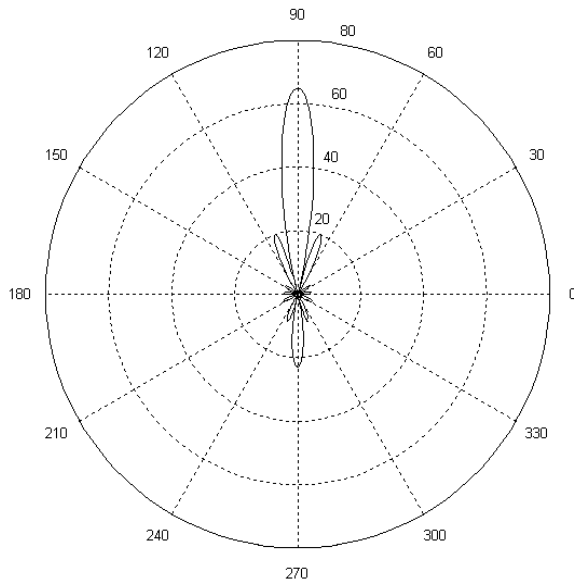
**Σχήμα 3.5.13** Δοκιμή 13 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



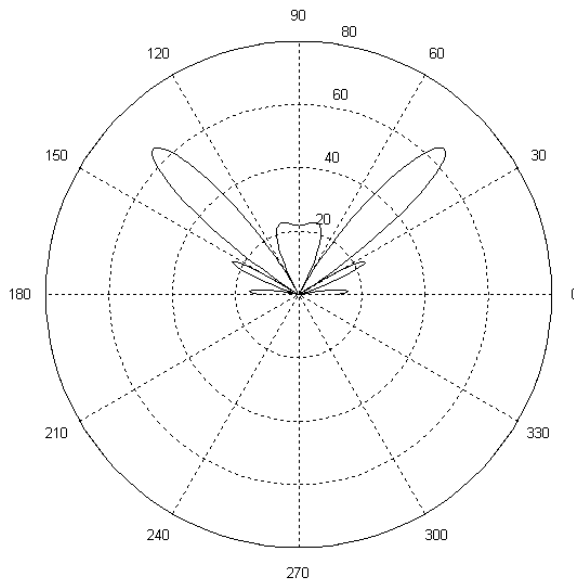
**Σχήμα 3.5.14** Δοκιμή 14 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.6\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



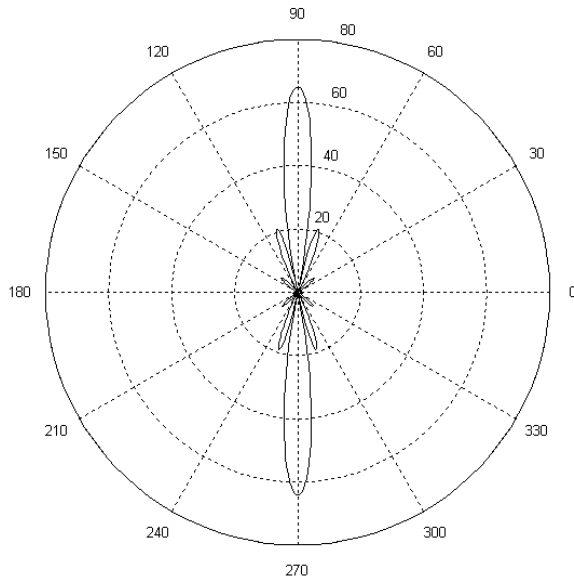
**Σχήμα 3.5.15** Δοκιμή 15 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



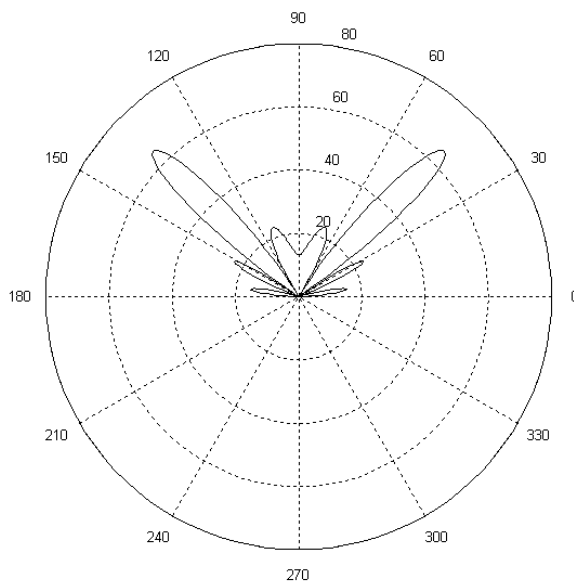
**Σχήμα 3.5.16** Δοκιμή 16 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $d = 0.7\lambda$
- Διάγραμμα  $\phi$



**Σχήμα 3.5.17** Δοκιμή 17 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

- Διάγραμμα  $\theta$



**Σχήμα 3.5.18** Δοκιμή 18 για στοιχειοκεραία με 65 στοιχεία

### 3.6 Εύρεση του ολικού πεδίου της στοιχειοκεραίας

Το συνολικό πεδίο της στοιχειοκεραίας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του πεδίου που ακτινοβολεί μία κεραία με τον παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας. Επειδή ο παράγοντας διάταξης αλλάζει ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων, θα χρησιμοποιηθεί η γενική μορφή του

$$S(\hat{r}_o, \hat{r}) = \sum_i e^{jk_o r_i (\hat{r}_o - \hat{r})}$$

Υπενθυμίζεται ότι το πεδίο που ακτινοβολεί μια κεραία μικροταινιακής νησίδας είναι της μορφής

$$\vec{E} = E_\phi^t \hat{\phi}$$

Συγκεκριμένα για συχνότητα συντονισμού  $f=11\text{GHz}$  γίνεται

$$E_\phi^t = +j \frac{0.377 E_o e^{-j74.074r}}{r} \left\{ \frac{\sin(0.8 \sin \theta \cos \phi)}{0.8 \cos \phi} \frac{\sin(0.859 \cos \theta)}{0.859 \cos \theta} \right\} * \cos(1.178 \sin \theta \sin \phi) 10^{-3}$$

Ενώ για συχνότητα συντονισμού  $f=14\text{GHz}$  γίνεται

$$E_\phi^t = +j \frac{0.618 E_o e^{-j95.238r}}{r} \left\{ \frac{\sin(0.103 \sin \theta \cos \phi)}{0.103 \cos \phi} \frac{\sin(1.406 \cos \theta)}{1.406 \cos \theta} \right\} * \cos(1.213 \sin \theta \sin \phi) 10^{-3}$$

Επομένως το ολικό πεδίο που ακτινοβολεί η στοιχειοκεραία είναι

$$\vec{E}_{\text{ολ}} = E_\phi^t \cdot S(\hat{r}_o, \hat{r}) \hat{\phi} = E_\phi^t \cdot \sum_i e^{jk_o r_i (\hat{r}_o - \hat{r})} \hat{\phi}$$

με τη συχνότητα συντονισμού να καθορίζει ποια δύο μορφές του πεδίου  $E_\phi^t$  θα χρησιμοποιηθεί.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\text{O}\Lambda} &= E_{\phi}^t \cdot S(\hat{r}_o, \hat{r}) \hat{\phi} = \\ &+ j \frac{0.377 E_o e^{-j74.074r}}{r} \left\{ \frac{\sin(0.8 \sin \theta \cos \phi)}{0.8 \cos \phi} \frac{\sin(0.859 \cos \theta)}{0.859 \cos \theta} \right\} * \\ &\cos(1.178 \sin \theta \sin \phi) 10^{-3} \cdot \sum_i e^{jk_o r_i (\hat{r}_o - \hat{r})} \hat{\phi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\text{O}\Lambda} &= E_{\phi}^t \cdot S(\hat{r}_o, \hat{r}) \hat{\phi} = \\ &+ j \frac{0.618 E_o e^{-j95.238r}}{r} \left\{ \frac{\sin(0.103 \sin \theta \cos \phi)}{0.103 \cos \phi} \frac{\sin(1.406 \cos \theta)}{1.406 \cos \theta} \right\} * \\ &\cos(1.213 \sin \theta \sin \phi) 10^{-3} \cdot \sum_i e^{jk_o r_i (\hat{r}_o - \hat{r})} \hat{\phi} \end{aligned}$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ

### 4.1 Εισαγωγή

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αρχικά μέθοδοι τροφοδότησης των μικροταινιακών κεραιών και στη συνέχεια κάποιες βασικές αρχές που διέπουν τα πολύθυρα, ώστε να γίνει κατανοητή η χρήση του phase shifter στις επόμενες παραγράφους.

Παρά τις διαφοροποιήσεις που μπορεί να παρουσιάζουν, οι μέθοδοι τροφοδοσίας εντάσσονται σε κατηγορίες με βάση τη γραμμή μεταφοράς που χρησιμοποιείται. Υπάρχουν τρεις τύποι γραμμών μεταφοράς.

- Ομοαξονική γραμμή μεταφοράς
- Μικροταινιακή γραμμή
- Ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς

### 4.2 Ομοαξονική γραμμή μεταφοράς

Η ομοαξονική γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιείται συχνά λόγω της απλότητας στη σχεδίαση σε κεραίες μικροταινιακής νησίδας. Ο εσωτερικός αγωγός του ομοαξονικού προσκολλάται στην ακτινοβολούσα μικροταινιακή νησίδα, ενώ ο εξωτερικός αγωγός συνδέεται στο επίπεδο της γείωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 .

Η εύρεση της θέσης που κρίνεται κατάλληλη για την τοποθέτηση του ομοαξονικού, είναι μια εμπειρική διαδικασία . Διπλή πόλωση με χρήση ομοαξονικής τροφοδοσίας επιτυγχάνεται με παράλληλη τοποθέτηση δύο ομοαξονικών σε κατάλληλες θέσεις .

Η χρησιμοποίηση των ομοαξονικών γραμμών μεταφοράς έχει καθιερωθεί στην πράξη κυρίως για τους εξής λόγους :

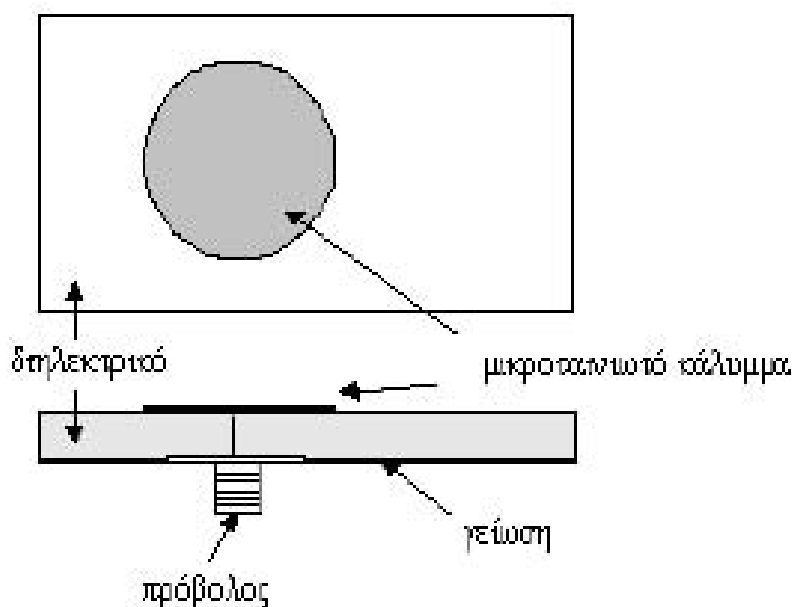
- ❖ Η διάδοση γίνεται με ρυθμό TEM χωρίς παραμόρφωση για όλες τις συχνότητες από  $f = 0$  μέχρι τη συχνότητα  $f = f_{11}$  αποκοπής του ρυθμού  $TE_{11}$  .
- ❖ Η ηλεκτρομαγνητική θωράκιση που επιτυγχάνεται από τον εξωτερικό αγωγό ελαττώνει την επαγωγή σημάτων κατά μήκος της γραμμής από πηγές ηλεκτρομαγνητικού θορύβου .
- ❖ Μπορούν να κατασκευαστούν εύκαμπτες ομοαξονικές γραμμές .
- ❖ Η κυματική αντίσταση  $Z_0$  έχει αρκετά μικρή τιμή .

Μειονέκτημα της ομοαξονικής γραμμής είναι η σχετικά υψηλή εξασθένηση που έχει κυρίως στις μικροκυματικές συχνότητες . Η εξασθένηση οφείλεται στην πεπερασμένη αγωγιμότητα των τοιχωμάτων αλλά και στις απώλειες που συμβαίνουν στο διηλεκτρικό υλικό που τοποθετείται μεταξύ του εσωτερικού

και εξωτερικού αγωγού για λόγους στήριξης. Εύκαμπτες ομοαξονικές γραμμές κατασκευάζονται με τη χρήση πλεκτών εξωτερικών αγωγών . Ο εσωτερικός αγωγός είναι είτε από συμπαγές αγωγό είτε από πολλούς λεπτούς αγωγούς. Σαν διηλεκτρικό χρησιμοποιείται πολυαιθυλένιο ή teflon ή άλλα συνθετικά πλαστικά .

Για τη σύνδεση ομοαξονικών γραμμών και την ένωση με μικροκυματικά κυκλώματα χρησιμοποιούνται συνδετήρες διαφόρων τύπων .Οι πιο γνωστοί τύποι είναι :BNC ,N και SMA. Ανάλογα με τη μορφή κατάληξης του κεντρικού αγωγού οι συνδετήρες διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τους συνδετήρες υποδοχής (jack) και τους συνδετήρες βύσματος. Η σύνδεση συνδετήρων σε ομοαξονικές γραμμές προϋποθέτουν την τήρηση αυστηρών προδιαγραφών κυρίως για συχνότητες πάνω από 1GHz.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η τροφοδοσία μέσω ομοαξονικής γραμμής μεταφοράς



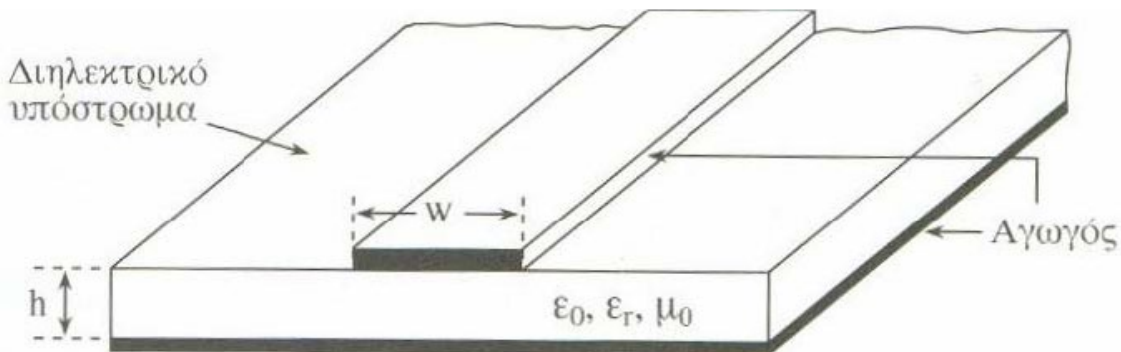
Σχήμα 4.1 Ομοαξονική τροφοδοσία

### 4.3 Μικροταινιακή γραμμή

Η μικροταινία αποτελείται από αγωγό πλάτους  $w$  . Ο αγωγός αυτός βρίσκεται στη πάνω επιφάνεια διηλεκτρικού υποστρώματος πάχους  $h$  . Η άλλη πλευρά του υποστρώματος καλύπτεται από αγωγό. Οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου ορίζονται με τη σχετική διηλεκτρική επιτρεπτικότητα  $\epsilon_r$ . Συνήθως το υπόστρωμα είναι μαγνητικά αδρανές δηλαδή  $\mu = \mu_0$ .

Γνωρίζουμε ότι όταν έχουμε δύο απομονωμένους αγωγούς σε ένα σύστημα κυματοδότησης εμφανίζεται διάδοση με εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα

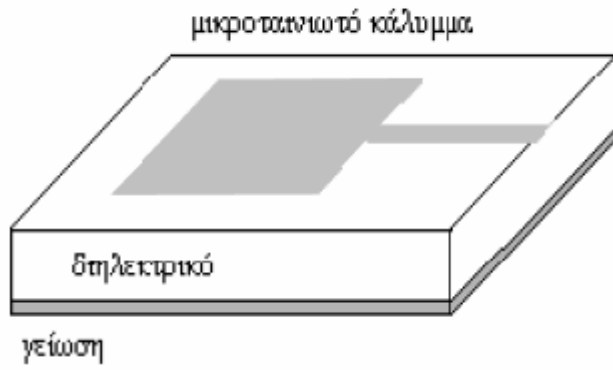
(TEM) που έχει μηδενική συχνότητα αποκοπής. Η ταχύτητα διάδοσης, η χωρητικότητα, η χαρακτηριστική αντίσταση, δηλαδή τα χαρακτηριστικά μεγέθη της γραμμής υπολογίζονται με χρήση της μεθόδου των μεταβολών ή της μεθόδου Galerkin.



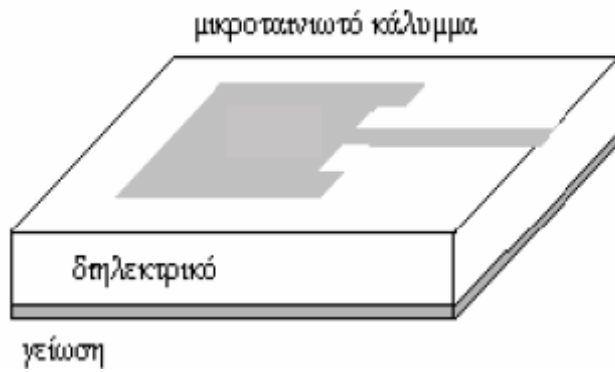
**Σχήμα 4.2** Γεωμετρία μικροταινίας.

Η χρήση μικροταινιακής γραμμής για τροφοδοσία, ενδείκνυται για τις κεραίες μικροταινιακής νησίδας επειδή μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν ως προέκταση του μεταλλικού αγωγού. Σ' αυτή την κατηγορία των τεχνικών τροφοδοσίας υπάρχουν πολλές παραλλαγές. Κάποιες από αυτές είναι η μικροταινία να εισέρχεται στο κάλυμμα ή η διέγερση του καλύμματος να γίνεται με σύζευξη μέσω ενός δεύτερου διηλεκτρικού. Οι παραλλαγές έχουν στόχο τους την καλύτερη δυνατή μεταφορά ισχύος από τη μικροταινία στο κάλυμμα αλλά και την μείωση των κυμάτων επιφανείας και της άεργου ακτινοβολίας.

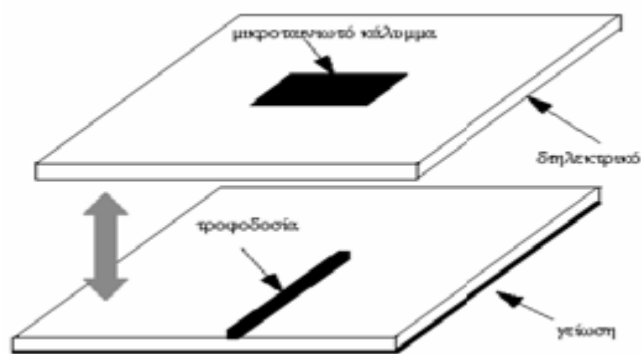
Στο σχήμα 4.3 φαίνονται τόσο η κλασική τροφοδοσία patch κεραίας από microstrip line, όσο και οι παραλλαγές της: η μικροταινία να εισέρχεται στο patch και η σύζευξη μέσω δεύτερου στρώματος διηλεκτρικού.



(α)



(β)



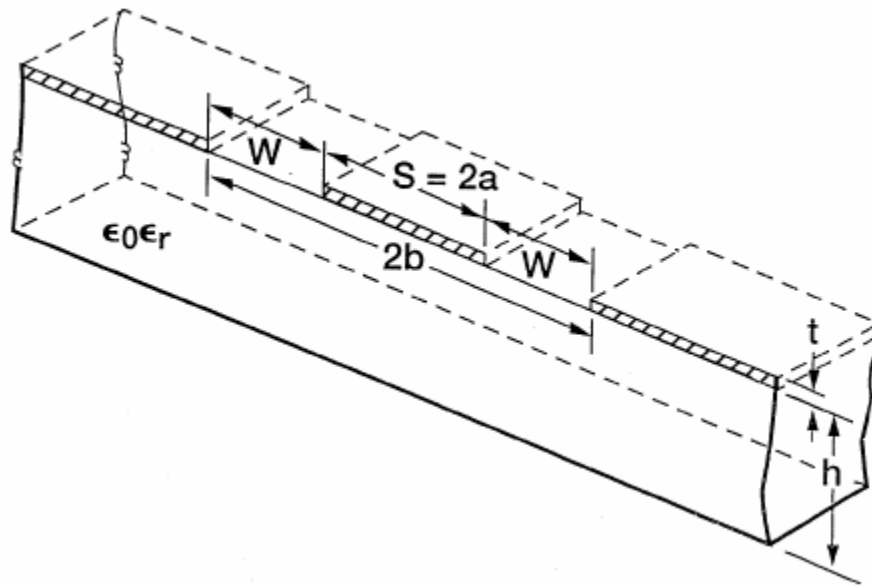
(γ)

**Σχήμα 4.3** (α) κλασική τροφοδοσία patch κεραίας από microstrip line, (β) η μικροταινία εισέρχεται στο patch, (γ) σύζευξη μέσω δεύτερου στρώματος διηλεκτρικού.

#### 4.4 Ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς

Ο C. P. Wen το 1969 παρουσίασε για πρώτη φορά την ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς (coplanar waveguide). Από το 1969 έως σήμερα έχει γίνει μεγάλη πρόοδος που οφείλεται στα μονολιθικά μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα. (monolithic microwave integrated circuits - MMICs).

Η γεωμετρία της ομοεπίπεδης γραμμής μεταφοράς δίνεται στο Σχήμα 4.4.



**Σχήμα 4.4** Ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς .

Όπως είναι γνωστό σ' αυτή τη διάταξη διεγείρονται υβριδικοί TEM ρυθμοί. Επιπλέον προσφέρει πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τη συμβατική μικροταινιακή γραμμή.

Επιτρέπει την απευθείας σύνδεση με MMICs και παρουσιάζει μικρές απώλειες λόγω ακτινβολίας. Η χαρακτηριστική της αντίσταση εξαρτάται από το λόγο  $a/b$ , και επομένως μπορεί να μειωθεί το μέγεθός της, με μόνο αντίτιμο τις υψηλές απώλειες. Στη συμβατική μικροταινιακή γραμμή είναι αναγκαία η προσεκτική ευθυγράμμιση μεταξύ δύο πλευρών του διηλεκτρικού. Στην ομοεπίπεδη γραμμή μεταφοράς όμως, αυτό είναι περιττό, αφού η σύνδεση γίνεται σε ένα επίπεδο ενώ έχει και μικρότερη διασπορά από την απλή μικροταινιακή γραμμή. Τέλος, η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ γειτονικών γραμμών είναι αμελητέα και έτσι προσφέρεται για τη σχεδίαση στοιχειοκεραιών.

Για όλους τους παραπάνω λόγους κρίνεται ιδανική η χρήση ομοεπίπεδων γραμμών για ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

#### 4.5 Περιγραφή σημάτων και ορισμοί των τάσεων και εντάσεων στα μικροκυματικά

Η ανάλυση των γραμμών μεταφοράς έδειξε ότι όταν έχουμε κυματοδηγήση σε ένα μέσο που έχει άπειρη ομοιομορφία ως προς έναν άξονα  $z$ , οι ρυθμοί που διαδίδονται περιγράφονται από κατανομές ηλεκτρικών πεδίων της μορφής

$$\mathbf{E} = \mathbf{e}(x, y) e^{\pm \gamma z}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{h}(x, y) e^{\pm \gamma z}$$

όπου  $\gamma = \alpha + j\beta$  είναι η μιγαδική σταθερά διάδοσης,  $\mathbf{e}(x, y)$  και  $\mathbf{h}(x, y)$  είναι οι διανυσματικές συναρτήσεις των εγκάρσιων συντεταγμένων  $(x, y)$ , δηλαδή οι εντάσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σ' ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα  $z$ .

Έχοντας δει τη φύση των σημάτων που εμφανίζονται στα μικροκυματικά κυκλώματα, στο ωδείων κύμα, που εκφράζει η παραπάνω εξίσωση, αντιστοιχούμε την κανονικοποιημένη κυματική τάση

$$a(z) = \left[ \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint (e \times h^*) \cdot \hat{z} dx dy \right]^{1/2} e^{-\gamma z}$$

για διάδοση παράλληλα στον θετικό άξονα  $z$ .

Η παράσταση μέσα στην τετραγωνική ρίζα δίνει την μεταφερόμενη ισχύ από το κύμα. Το σύμβολο  $\operatorname{Re}$  δείχνει το πραγματικό μέρος του ολοκληρώματος που υπολογίζεται. Η κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = e^{-\gamma z} \mathbf{e}(x, y)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = e^{-\gamma z} \mathbf{h}(x, y)$$

Θεωρώντας βέβαια όπως πάντοτε  $\exp(+j\omega t)$  χρονική μεταβολή.

Γνωρίζοντας ότι η μιγαδική σταθερά διάδοσης είναι  $\gamma = \alpha + j\beta$ , το μέγεθος

$$|a|^2 = \left[ \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint_s (e \times h^*) \cdot \hat{z} dx dy \right] e^{-2\alpha z}$$

δίνει την ισχύ που μεταφέρεται στη θέση  $z$  από το κύμα. Άρα η κανονικοποιημένη τάση  $a(z)$  έχει μονάδες  $(\text{Watt})^{1/2}$ .

Από την εξίσωση

$$a(z) = \left[ \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint (e \times h^*) \cdot \hat{z} dx dy \right]^{1/2} e^{-\gamma z}$$

βλέπουμε εύκολα ότι

$$a(z) = a(z_0) e^{-\gamma(z-z_0)}, \quad (z > z_0)$$

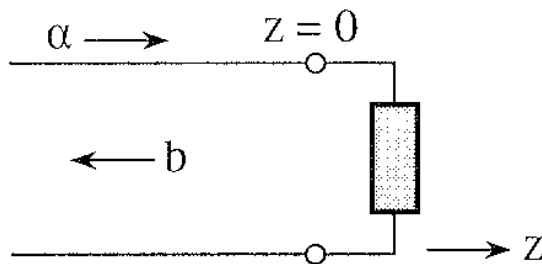
Στην περίπτωση κυμάτων που πορεύονται παράλληλα στον αρνητικό άξονα  $z$  ισχύει ο ίδιος ορισμός της εξίσωσης

$$a(z) = \left[ \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint (e \times h^*) \cdot \bar{z} dx dy \right]^{1/2} e^{-\gamma z}$$

και για το λόγο αυτό η κανονικοποιημένη τάση  $b$  του κύματος αυτού είναι

$$b(z) = b(z_0) e^{+\gamma(z-z_0)}, \quad (z < z_0)$$

Ας υποθέσουμε ένα προσπίπτον κύμα από μια γραμμή μεταφοράς σε ένα φορτίο στο σχήμα που ακολουθεί.



#### Σχήμα 4.5 Ανάκλαση από φορτίο σε γραμμή μεταφοράς

Αν ο συντελεστής ανάκλασης που παρουσιάζεται είναι  $\rho_L$  τότε για ένα προσπίπτον κύμα με κανονικοποιημένη κυματική τάση

$$a(z) = e^{-\gamma z} a_0$$

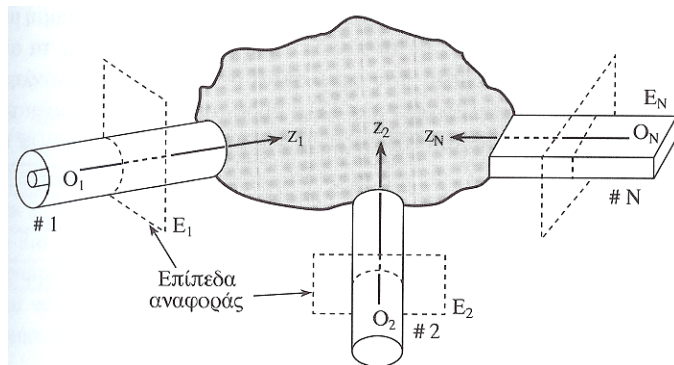
το ανακλώμενο κύμα περιγράφεται από την κανονικοποιημένη κυματική τάση

$$b(z) = e^{\gamma z} \rho_L a_0$$

Ο παραπάνω ορισμός ισχύει για όλους τους τύπους γραμμών μεταφοράς που έχουν ομοιομορφία ως προς τον άξονα διάδοσης που συνήθως ονομάζεται  $z$ .

## 4.6 Μικροκυματικά πολύθυρα

Για την υλοποίηση μικροκυματικών συστημάτων χρησιμοποιούνται μικροκυματικά στοιχεία που έχουν την μορφή πολυθύρων. Οι εισοδοί και έξοδοι στα πολύθυρα γίνονται με γραμμές μεταφοράς που μεταδίδουν τα μικροκυματικά σήματα μ' ένα συγκεκριμένο ρυθμό.



**Σχήμα 4.6** Μικροκυματικό πολύθυρο

Υποθέτοντας ότι πάνω σε κάθε γραμμή μεταφοράς έχουμε μονορυθμική διάδοση τα προσπίπτοντα κύματα στο πολύθυρο θα περιγράφονται από τις κανονικοποιημένες τιμές των κυματικών τάσεων στη μορφή

$$\begin{aligned}
 \alpha_1(z_1) &= \alpha_1(0)e^{-j\beta_1 z_1} \\
 \alpha_2(z_2) &= \alpha_2(0)e^{-j\beta_2 z_2} \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots \\
 \alpha_N(z_N) &= \alpha_N(0)e^{-j\beta_N z_N}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

όπου  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$  είναι η σταθερά διάδοσης των κυμάτων και  $z_1, z_2, \dots, z_N$  οι άξονες που δείχνουν την κατεύθυνση διάδοσης τους πάνω σε κάθε γραμμή μεταφοράς. Ταυτόχρονα με τα προσπίπτοντα κύματα έχουμε ανακλώμενα ή σκεδαζόμενα κύματα που οφείλονται στην απευθείας ανάκλιση από την ίδια θύρα ή από σύζευξη από μια θύρα αντίστοιχα. Τα κύματα αυτά θα περιγράφονται από τις κανονικοποιημένες τιμές των κυματικών τάσεων με ανάλογο τρόπο όπως και προηγουμένως.

$$\begin{aligned}
 b_1(z_1) &= b_1(0)e^{j\beta_1 z_1} \\
 b_2(z_2) &= b_2(0)e^{j\beta_2 z_2} \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots \\
 b_N(z_N) &= b_N(0)e^{j\beta_N z_N}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Αν σκεφτούμε ότι τα κύματα  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$  επιβάλλονται εξωτερικά η απόκριση του πολυθύρου περιγράφεται από τα εξερχόμενα κύματα  $b_1, b_2, \dots, b_N$ . Αφού οι εξισώσεις (4.1), (4.2) επιτρέπουν την εύρεση των σημάτων για οποιαδήποτε τιμή των αξόνων  $z_1, z_2, \dots, z_N$  απαιτείται η γνώση μόνο των μιγαδικών αριθμών  $b_1(0), b_2(0), \dots, b_N(0)$  για συγκεκριμένες εισόδους  $\alpha_1(0), \alpha_2(0), \dots, \alpha_N(0)$ . Αν το πολύθυρο έχει κατασκευαστεί από γραμμικά στοιχεία (που κατά κανόνα έχει) τότε επειδή οι εξισώσεις του Maxwell είναι γραμμικές πρέπει να ισχύει η σχέση

$$\begin{bmatrix} b_1(0) \\ b_2(0) \\ \cdot \\ \cdot \\ b_N(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots\dots\dots S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots\dots\dots S_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ S_{N1} & S_{N2} & \dots\dots\dots S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1(0) \\ \alpha_2(0) \\ \cdot \\ \cdot \\ \alpha_N(0) \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

όπου οι μιγαδικοί αριθμοί  $S_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,N$ ) ονομάζονται παράμετροι σκέδασης του μικροκυματικού πολυθύρου. Η μήτρα της εξίσωσης (4.3) ονομάζεται « μήτρα σκέδασης ». Παρατηρούμε ότι οι αριθμοί  $S_{ij}$  είναι αδιάστατα μεγέθη και από τον ορισμό της (4.3) προκύπτει ότι

$$S_{ij} = \left. \frac{b_i(0)}{\alpha_j(0)} \right|_{\alpha_k(0)=0 (K=1,2,\dots,j-1,j+1,\dots,N)} \tag{4.4}$$

Για να έχουμε  $\alpha_K(0) = 0$  πρέπει στην υπ' αριθμό  $K$  θύρα να μην προσπίπτει κύμα. Για να γίνει αυτό πρέπει η θύρα να τερματιστεί με τη σωστή χαρακτηριστική αντίσταση. Άρα είναι δυνατό να μετρηθούν ή να υπολογιστούν οι παράμετροι  $S_{ij}$  τερματίζοντας όλες τις γραμμές μεταφοράς και εισάγοντας σήμα μόνο σε μια γραμμή. Μετρώντας τα ανακλώμενα – σκεδαζόμενα κύματα σ' όλες τις γραμμές μεταφοράς μπορούμε να καθορίσουμε τις παραμέτρους  $S_{ij}$ .

Σύμφωνα με τον ορισμό των στοιχείων της μήτρας σκέδασης, όπως δόθηκε από την εξίσωση (4.4), για  $i=j$  έχουμε

$$S_{ii} = \frac{b_i(0)}{\alpha_i(0)} \Big|_{\alpha_k(0)=0(K=1,2,\dots,j-1,j+1,\dots,N)}$$

Παρατηρούμε ότι η παράμετρος  $S_{ij}$  είναι ίση με το συντελεστή ανάκλασης στην ισοτή θύρα όταν όλες οι υπόλοιπες θύρες είναι τερματισμένες με τη χαρακτηριστική τους αντίσταση και σε καμιά από αυτές δεν έχουμε προσπίπτων κύμα. Άρα οι διαγώνιοι όροι είναι απ' ευθείας οι συντελεστές ανακλάσεις του πολυθύρου. Όταν  $i \neq j$  η παράμετρος  $S_{ij}$  είναι ο λόγος που δείχνει ότι για την μέτρηση ή τον υπολογισμό αυτής πρέπει να εισάγουμε μόνο προσπίπτον κύμα στην ισοτή θύρα, να τερματίσουμε όλες τις υπόλοιπες και να μετρήσουμε το κύμα (πλάτος και φάση) που εμφανίζεται στην ισοτή θύρα. Η παραπάνω διαδικασία εύρεσης των  $N^2$  στοιχείων της μήτρας  $\bar{S}$  απαιτεί γενικά  $N^2$  μετρήσεις ή υπολογισμούς. Είναι δυνατό αντί να εισάγουμε ένα μόνο προσπίπτον κύμα σε μια θύρα η μέτρηση να γίνει εισάγοντας ταυτόχρονα στις  $N$  θύρες σήματα. Υποθέτοντας ότι κάνουμε  $N$  τέτοιες μετρήσεις, θα έχουμε  $N$  ζεύγη των διανυσμάτων εισόδου και εξόδου.

$$|b(0)_{>1} = S|a(0)_{>1}$$

$$|b(0)_{>2} = S|a(0)_{>2}$$

·  
·  
·

$$|b(0)_{>N} = S|a(0)_{>N}$$

Ορίζοντας τις τετραγωνικές μήτρες

$$\bar{B} = (|b(0)_{>1}, b(0)_{>2}, \dots, b(0)_{>N})$$

$$\bar{A} = (|a(0)_{>1}, a(0)_{>2}, \dots, a(0)_{>N})$$

προκύπτει η μητρική εξίσωση

$$\bar{B} = \bar{S} * \bar{A}$$

της οποίας η λύση είναι

$$\bar{S} = \bar{B} * \bar{A}^{-1}$$

## 4.7 Αμφίδρομα πολύθυρα

Αμφίδρομα είναι τα πολύθυρα στα οποία ισχύει το θεώρημα της αμοιβαιότητας. Υπενθυμίζουμε από την κλασική θεωρία των δικτύων ότι το θεώρημα της αμοιβαιότητας ισχύει για τα γραμμικά κυκλώματα που τα στοιχεία τους έχουν χαρακτηριστικά σταθερά με το χρόνο και είναι αμφίδρομα

(δηλαδή η εναλλαγή των ακροδεκτών των στοιχείων δεν αλλάζει τη συμπεριφορά τους στο κύκλωμα) .  
Σύμφωνα με το θεώρημα της αμοιβαιότητας ισχύει η σχέση

$$\frac{I_2}{V_1} = \frac{I_1}{V_2}$$

Παρατηρούμε ότι το θεώρημα της αμοιβαιότητας ισχύει ανεξάρτητα από τις συνθήκες που επικρατούν στις άλλες θύρες αρκεί τα στοιχεία που συνδέονται σ' αυτές να είναι γραμμικά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ ΜΕΣΩ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ.

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η τροφοδότηση της στοιχειοκεραίας που σχεδιάστηκε προηγουμένως, με πέντε συνολικά στοιχεία .Τα στοιχεία τροφοδοτούνται με συχνότητα  $f=10\text{GHz}$  .Η τροφοδότηση γίνεται μέσω μικροταινιακής γραμμής σε κάποιο σημείο της οποίας θα τοποθετηθεί ένας phase shifter .

### 5.1 Ανάλυση του phase shifter

Γενικά ο phase shifter έχει μια μήτρα σκέδασης της μορφής:

$$S = \begin{bmatrix} |S_{11}|e^{j\angle S_{11}} & |S_{12}|e^{j\angle S_{12}} \\ |S_{21}|e^{j\angle S_{21}} & |S_{22}|e^{j\angle S_{22}} \end{bmatrix}.$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση πρόκειται για τον phase shifter MAPCG0005-DIE . Λειτουργεί στις συχνότητες 7-12 GHz και είναι 6-Bit phase shifter. Από το DATASHEET που ακολουθεί προκύπτουν κάποια από τα στοιχεία της παραπάνω μήτρας σκέδασης .Κάθε φορά χρησιμοποιούνται οι τιμές των διαγραμμάτων που αντιστοιχούν στη συχνότητα λειτουργίας  $f=10\text{GHz}$  . Συγκεκριμένα από το Figure 1 προκύπτει το  $|S_{12}|$ :

$$|S_{12}| \text{ (dB)} = 7.49 \Rightarrow |S_{12}| = 10^{\frac{|S_{12}|}{10}} = 10^{-0.749} = 0.178 .$$

Γνωρίζουμε ότι  $S_{12} = S_{21}$  .

Επομένως  $|S_{12}| = |S_{21}| = 0.178$  .

Από το Figure 2 προκύπτει το  $\Delta\angle S_{12}$  ως η μέσος όρος σε μοίρες :

$$\Delta\angle S_{12} = 2.5^\circ .$$

Από τα Figure 5 και 6 προκύπτουν τα  $|S_{11}|$  και  $|S_{22}|$  αντίστοιχα.

Συγκεκριμένα για το Figure 5 ισχύει:

$$VSWR = 1.53$$

Γνωρίζουμε ότι  $|S_{11}| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$

Άρα  $|S_{11}| = 0.209$

Ομοίως για το Figure 6 ισχύει:

$VSWR = 1.6$

Γνωρίζουμε ότι  $|S_{22}| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$

Άρα  $|S_{22}| = 0.23$

Οι γωνίες της κυρίας διαγώνιου έχουν τιμή  $\angle S_{11} = 0$  και  $\angle S_{22} = 0$ .

Επιπλέον είναι γνωστό ότι  $\angle S_{12} = \angle S_{21}$ . Κατά συνέπεια ο συγκεκριμένος phase shifter μπορεί να στρέψει τα σήματα που εισάγονται κατά γωνίες που είναι αποτέλεσμα του τύπου:

$$\angle S_{12} = 5.625^\circ * b_0 + 11.25^\circ * b_1 + 22.5^\circ * b_2 + 45^\circ * b_3 + 90^\circ * b_4 + 180^\circ * b_5 + \Delta \angle S_{12} \Rightarrow$$

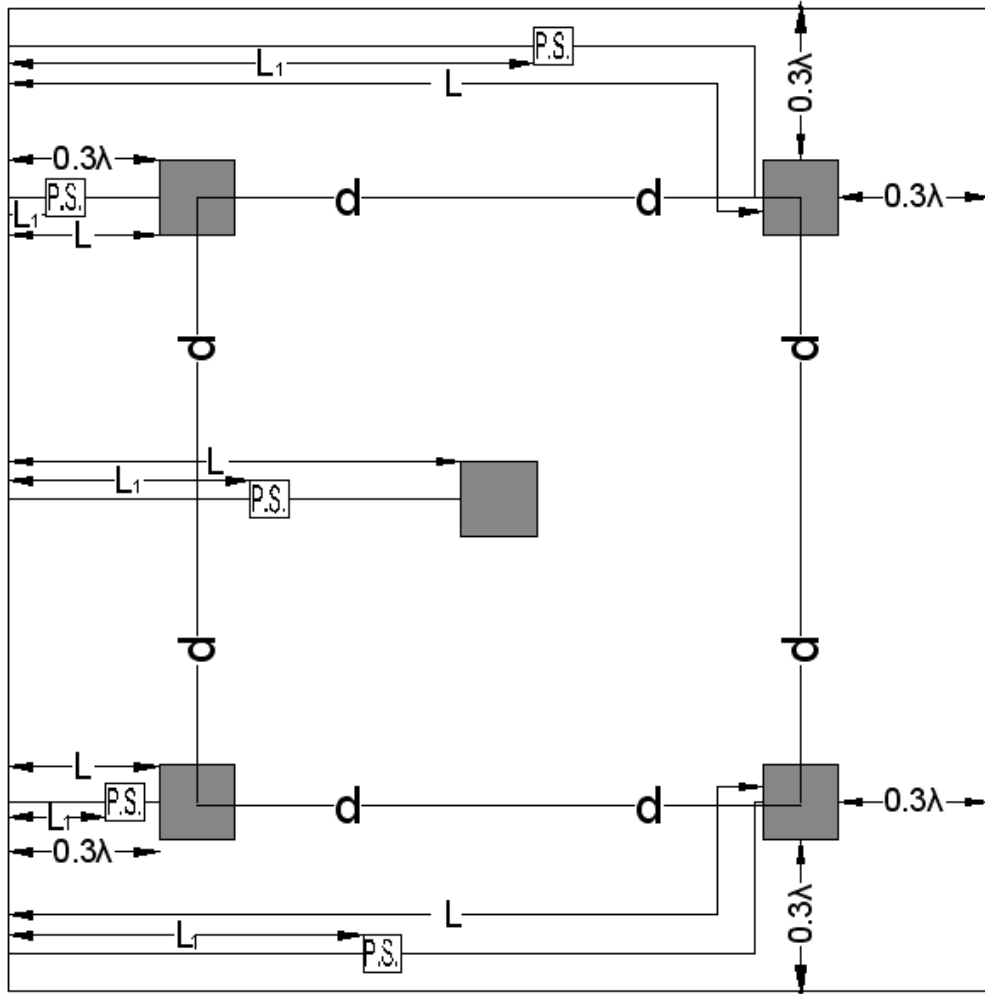
$$\angle S_{12} = 5.625^\circ * b_0 + 11.25^\circ * b_1 + 22.5^\circ * b_2 + 45^\circ * b_3 + 90^\circ * b_4 + 180^\circ * b_5 + 2.5^\circ$$

Η τελική μορφή επομένως της μήτρας σκέδασης είναι:

$$S = \begin{bmatrix} 0.209 & 0.178e^{j\angle S_{12}} \\ 0.178e^{j\angle S_{12}} & 0.23 \end{bmatrix}$$

## 5.2 Ανάλυση της τροφοδότησης ενός στοιχείου

Η ανάλυση της τροφοδότησης ενός στοιχείου μέσω μικροταινιακής γραμμής σε κάποιο σημείο της οποίας τοποθετείται ο παραπάνω phase shifter είναι η ίδια για όλα τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας. Σ' αυτή την παράγραφο χρησιμοποιείται στοιχειοκεραία με πέντε μόνο στοιχεία. Στη συνέχεια ακολουθεί το σχήμα της, με σημειωμένες τις τόσο τις αποστάσεις των στοιχείων μεταξύ τους, όσο και η απόστασή τους από την άκρη της πλακέτας.



**Σχήμα 5.1** Τροφοδοσία της στοιχειοκεραίας

Ως γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιείται μικροταινία. Ακολουθεί πίνακας που δίνει την αντίσταση  $Z_0$  και την ταχύτητα  $\frac{v}{c}$  για διάφορες μικροταινίες.

w/h	$\epsilon_r = 1.0$	$\epsilon_r = 2.5$		$\epsilon_r = 9.0$		
	$Z_0$ ( $\Omega$ )	v/c	$Z_0$ ( $\Omega$ )	v/c	$Z_0$ ( $\Omega$ )	v/c
0.4	185	1	130	0.70	72	0.39
0.6	157	»	112	0.70	63	0.40
0.8	142	»	100	0.70	55	0.40
1.0	128	»	90	0.70	50	0.40
1.2	115	»	82	0.70	45	0.40
1.4	110	»	77	0.70	42	0.40
1.6	100	»	70	0.70	40	0.40
1.8	93	»	65	0.70	35	0.38
2.0	90	»	61	0.69	32	0.38
2.4	80	»	53	0.66	30	0.375
2.8	73	»	50	0.65	27	0.37

**Σχήμα 5.2** Αντίσταση  $Z_0$  και ταχύτητα  $\frac{v}{c}$  για διάφορες μικροταινίες

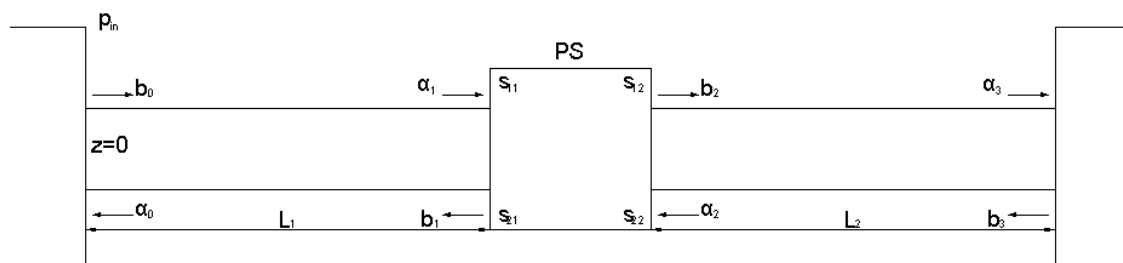
Για τη μικροταινία γνωρίζουμε ότι  $\epsilon_r = 2,5$  και  $Z_0 = 50\Omega$ .

Από τον πίνακα παρατηρούμε ότι  $\frac{v}{c} = 0.65$ , όπου  $v$  η ταχύτητα φάσης και  $c$  η ταχύτητα του φωτός.

Για συχνότητα λειτουργίας  $f = 10\text{GHz}$  η σταθερά διάδοσης  $\beta$  είναι:

$$\beta = \frac{\omega}{v} = 102.56\pi$$

Επιπλέον θεωρούμε  $L$  το συνολικό μήκος της μικροταινιακής γραμμής και  $L_1$  το μήκος της έως το σημείο που τοποθετείται ο phase shifter, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Με δεδομένη την τιμή του συντελεστή ανάκλασης  $\rho_L$  που είναι επιθυμητό να υπάρχει στο στοιχείο αναζητείται η τιμή του συντελεστή ανάκλασης  $\rho_{in}$  στην αρχή της γραμμής μεταφοράς και ο συντελεστής μετάδοσης στο τέλος της γραμμής μεταφοράς, δηλαδή στο σημείο που βρίσκεται το στοιχείο.



**Σχήμα 5.3** Η γραμμή τροφοδοσίας του κάθε στοιχείου

Είναι γνωστό ότι για τον phase shifter ισχύει:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{12}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} a_1 &= b_o e^{-j\beta l_1} \\ b_2 &= S_{12}a_1 + S_{22}a_2 \\ b_2 &= S_{12}b_o e^{-j\beta l_1} + S_{22}a_2 \\ a_3 &= b_2 e^{-j\beta l_2} \\ a_3 &= (S_{12}b_o e^{-j\beta l_1} + S_{22}a_2) e^{-j\beta l_2} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} b_3 &= \rho_L a_3 \\ a_2 &= b_3 e^{-j\beta l_2} \\ a_2 &= \rho_L a_3 e^{-j\beta l_2} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (5.2) στην (5.1) προκύπτει

$$a_3 = (S_{12}b_o e^{-j\beta l_1} + S_{22}\rho_L a_3 e^{-j\beta l_2}) e^{-j\beta l_2} \quad (5.3)$$

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2$$

$$b_1 = S_{11}b_o e^{-j\beta l_1} + S_{12}\rho_L a_3 e^{-j\beta l_2}$$

$$a_0 = b_1 e^{-j\beta l_1}$$

$$a_0 = (S_{11}b_o e^{-j\beta l_1} + S_{12}\rho_L a_3 e^{-j\beta l_2}) e^{-j\beta l_1} \quad (5.4)$$

Από την εξίσωση (5.3) προκύπτει

$$\begin{aligned} a_3 &= S_{12}b_o e^{-j\beta(l_1+l_2)} + S_{22}\rho_L a_3 e^{-j2\beta l_2} \Rightarrow \\ a_3(1 - S_{22}\rho_L e^{-j2\beta l_2}) &= S_{12}b_o e^{-j\beta(l_1+l_2)} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$a_3 = \frac{S_{12}b_o e^{-j\beta(l_1+l_2)}}{1 - S_{22}\rho_L e^{-j2\beta l_2}} \quad (5.5)$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (5.5) στην (5.4) προκύπτει

$$a_0 = \left( S_{11}b_o e^{-j\beta l_1} + S_{12}\rho_L \frac{S_{12}b_o e^{-j\beta(l_1+l_2)}}{1 - S_{22}\rho_L e^{-j2\beta l_2}} e^{-j\beta l_2} \right) e^{-j\beta l_1} \Rightarrow$$

$$a_0 = S_{11}b_o e^{-j2\beta l_1} + S_{12}\rho_L \frac{S_{12}b_o e^{-j2\beta(l_1+l_2)}}{1 - S_{22}\rho_L e^{-j2\beta l_2}}$$

$$\rho_{in} = \left| \frac{a_0}{b_0} \right|$$

$$\rho_{in} = \left| S_{11} e^{-j2\beta l_1} + \frac{S_{12}^2 \rho_L e^{-j2\beta(l_1+l_2)}}{1 - S_{22} \rho_L e^{-j2\beta l_2}} \right|$$

Στη συνέχεια βρίσκουμε τον συντελεστή μετάδοσης στο τέλος της γραμμής μεταφοράς ,δηλαδή στο στοιχείο .Ο συντελεστής μετάδοσης είναι

$$t = \left| \frac{a_3}{b_0} \right|$$

Από την ανάλυση που έγινε προηγουμένως για τη γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιείται η σχέση (5.5) που ξαναγράφεται εδώ ,για ευκολία .

$$a_3 = \frac{S_{12} b_0 e^{-j\beta(l_1+l_2)}}{1 - S_{22} \rho_L e^{-j2\beta l_2}}$$

Με αντικατάστασή της στη σχέση που δίνει το συντελεστή μετάδοσης προκύπτει το ζητούμενο αποτέλεσμα

$$t = \left| \frac{S_{12} e^{-j\beta(l_1+l_2)}}{1 - S_{22} \rho_L e^{-j2\beta l_2}} \right|$$

Οι συναρτήσεις αυτές υλοποιήθηκαν ως δύο διαφορετικά προγράμματα στο MATLAB. Τα προγράμματα ζητούν την τιμή του συντελεστή ανάκλασης στο τέλος της μικροταινιακής γραμμής και τα μήκη L και L<sub>1</sub> σε μήκη κύματος. Το μήκος L είναι το συνολικό μήκος της γραμμής ενώ το L<sub>1</sub> είναι το μήκος της γραμμής μέχρι τον phase shifter. Επιπλέον στο πρόγραμμα για το συντελεστή ανάκλασης διευκρινίζεται ότι η γωνία του S<sub>12</sub> παίρνει 64 διακριτές τιμές. Σε καθεμιά απ' αυτές προστίθεται και το σφάλμα για τη γωνία. Τέλος, στο πρόγραμμα για το συντελεστή μετάδοσης διευκρινίζεται ότι η τιμή του συντελεστή μετάδοσης ,για δεδομένη απόσταση L και L<sub>1</sub> ,είναι σταθερή , οποιαδήποτε τιμή και αν λάβει η γωνία του phase shifter

### 5.3 Κώδικας MATLAB για τον συντελεστή ανάκλασης

#### και τον συντελεστή μετάδοσης

Παρατίθεται ο κώδικας για την υλοποίηση της συνάρτησης του συντελεστή ανάκλασης

```
S11= 0.209;
S22=0.23;
```

```

S12=0.178;
b=102.56*pi;
D=0.0138*pi;
pout=input('dose tin timi tou pout= ');
l=0.03;
L1=input('dose tin timi tou L1 se l= ');
L=input('dose tin timi tou L se l= ');
L2=L-L1;

A1 = S11*exp (-i*2*b*L1);
A2 = ((S12^2)*pout*exp (-i*2*b*L))/(1-S22*pout*exp (-i*2*b*L2));

PINa =[0];
for f=0:0.03125*pi:2*pi
    A =A1+A2*exp(i*2*(f+D));
    PINa= [PINa;abs(A)];
end

z=size(PINa);
PIN=PINa(2:z);%ΚΑΘΕ ΓΡΑΜΜΗ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΜΙΑΣ
ΣΤΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ

k=0:5.625:360;
stem(k,PIN,'fill','-')

```

Ακολουθεί ο κώδικας για την υλοποίηση της συνάρτησης του συντελεστή μετάδοσης

```

S11= 0.209;
S22=0.23;
S12=0.178;
b=102.56*pi;
pout=input('dose tin timi tou pout= ');
l=0.03;
L1=input('dose tin timi tou L1 se l= ');
L=input('dose tin timi tou L se l= ');
L2=L-L1;

A1 = S12*exp(-i*b*L);
A2 =1-S22*pout*exp(-i*2*b*L2);
T= abs(A1/A2)

```

---

## 5.4 Αποτελέσματα για τον συντελεστή ανάκλασης και τον συντελεστή μετάδοσης

Τα αποτελέσματα για το συντελεστή ανάκλασης είναι διαγράμματα. Η τιμή του  $\rho_{in}$  αλλάζει για τις διάφορες τιμές που μπορεί να πάρει η γωνία του 6-Bit phase shifter. Αντίθετα για κάθε περίπτωση προκύπτει μόνο μια τιμή για τον συντελεστή μετάδοσης. Υπενθυμίζεται ότι πρόκειται για γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες.

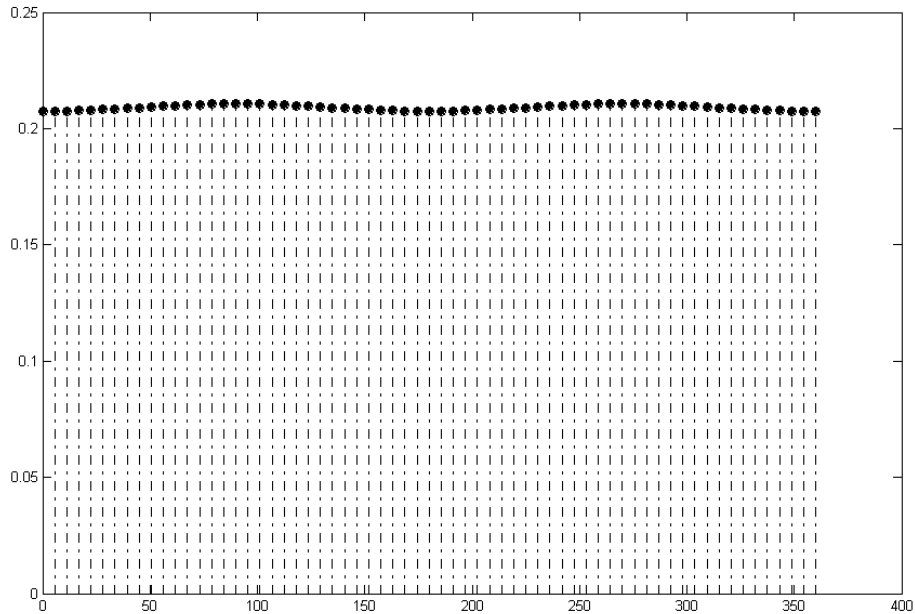
Εξετάζεται μόνο η περίπτωση που  $d=0.6\lambda$ . Τα πέντε στοιχεία κατηγοριοποιούνται σε ανάλογα με το συνολικό μήκος  $L$ . Διακρίνονται τρεις περιπτώσεις

- Το στοιχείο με μήκος γραμμής μεταφοράς  $L=0,3\lambda$
- Το στοιχείο με μήκος γραμμής μεταφοράς  $L=1,8\lambda$
- Το στοιχείο με μήκος γραμμής μεταφοράς  $L=0,9\lambda$

**A)** Το στοιχείο με μήκος γραμμής μεταφοράς  $L=0,3\lambda$

- $L_1 = 0,1\lambda$

$$\rho_{out} = 0,05$$



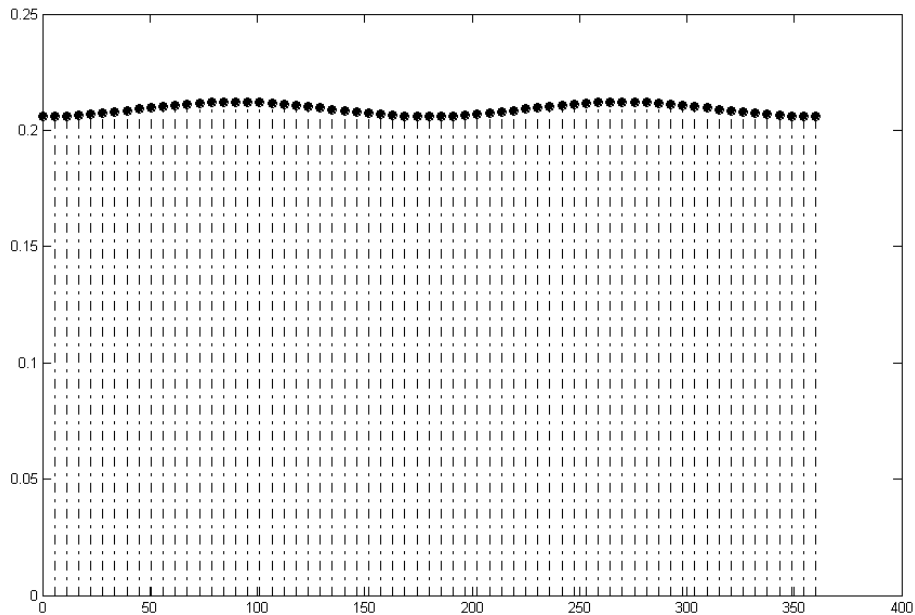
**Σχήμα 5.4.1** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,1\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,05$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1760$$

- $L_1 = 0,1\lambda$

$$\rho_{out} = 0,1$$



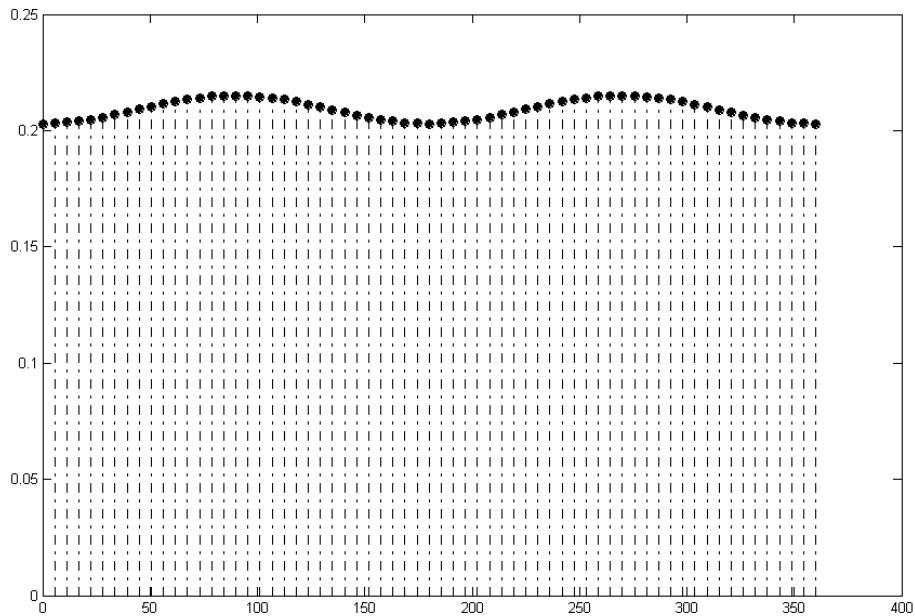
**Σχήμα 5.4.2** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,1\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,1$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1740$$

- $L_1 = 0,1\lambda$

$$\rho_{out} = 0,2$$



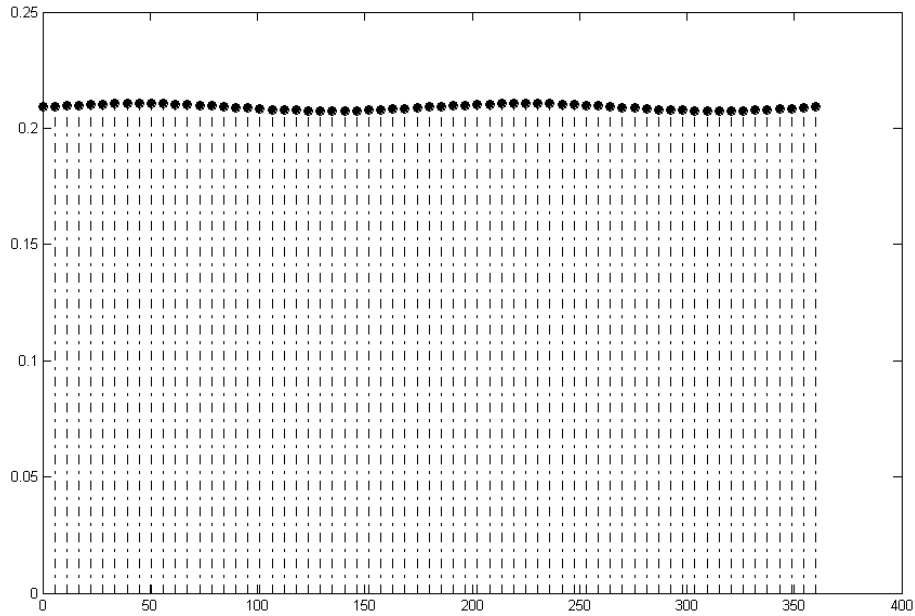
**Σχήμα 5.4.3** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,1\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,2$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1702$$

- $L_1 = 0,2\lambda$

$$\rho_{out} = 0,05$$



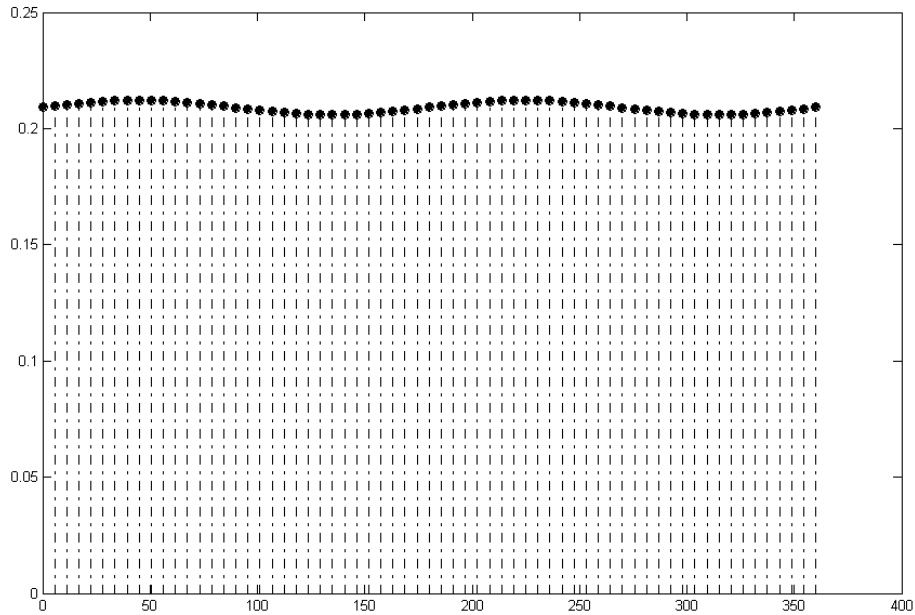
**Σχήμα 5.4.4** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,2\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,05$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1779$$

- $L_1 = 0,2\lambda$

$$\rho_{out} = 0,1$$



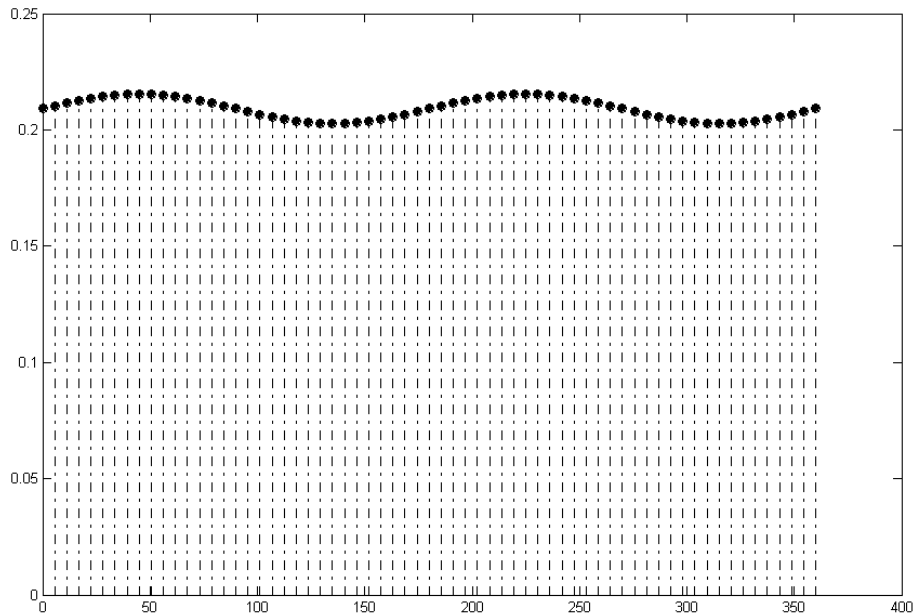
**Σχήμα 5.4.5** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,2\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,1$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1778$$

- $L_1 = 0,2\lambda$

$\rho_{out} = 0,2$



**Σχήμα 5.4.6** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,2\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,2$

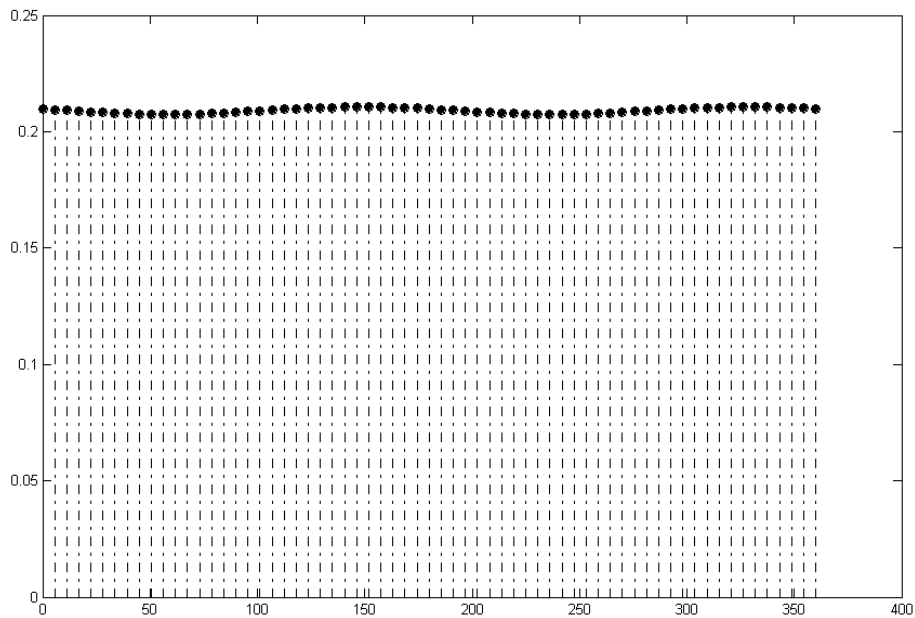
Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$T = 0.1775$

**B)** Το στοιχείο με μήκος γραμμής μεταφοράς  $L=1,8\lambda$

- $L_1 = 0,3\lambda$

$$\rho_{out} = 0,05$$



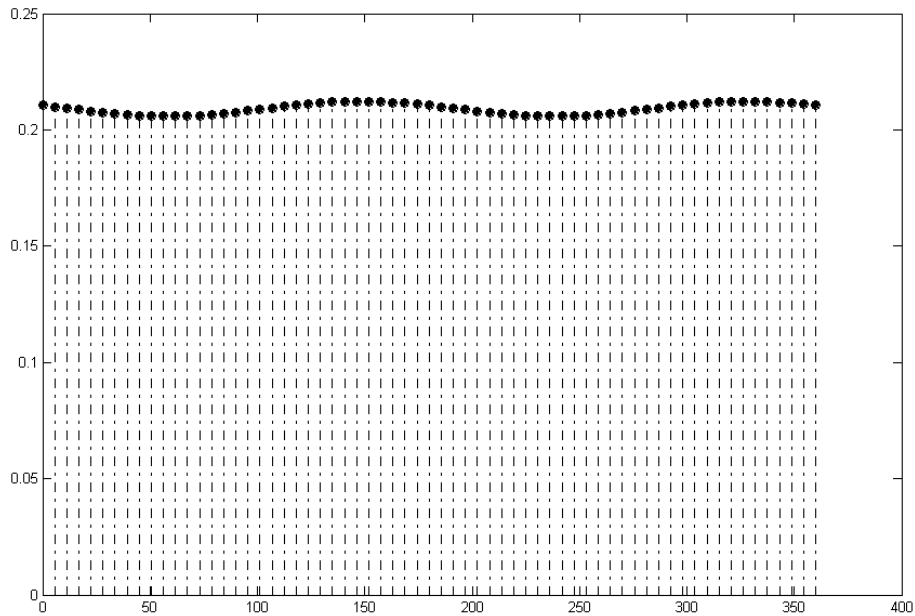
**Σχήμα 5.5.1** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,3\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,05$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1791$$

- $L_1 = 0,3\lambda$

$$\rho_{out} = 0,1$$



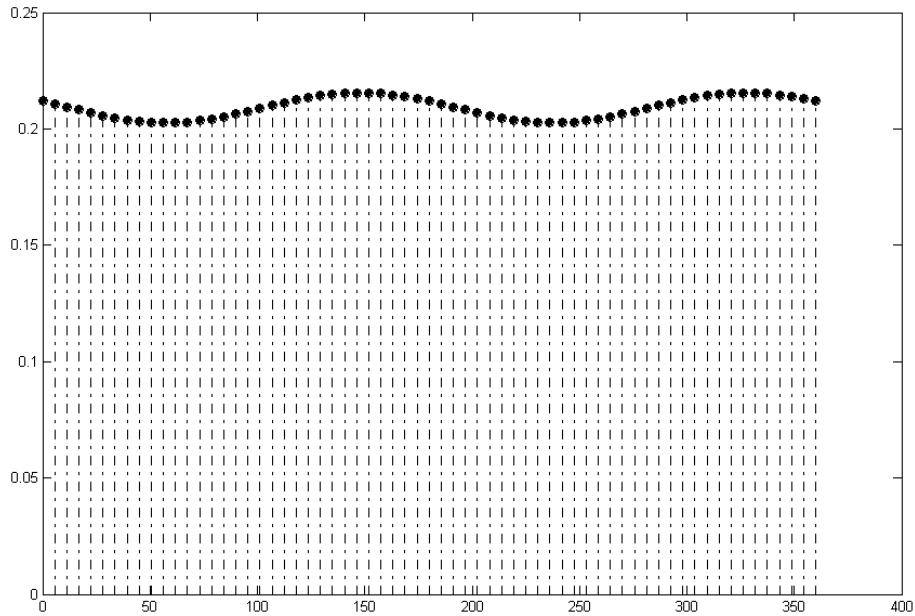
**Σχήμα 5.5.2** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,3\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,1$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1802$$

- $L_1 = 0,3\lambda$

$$\rho_{out} = 0,2$$



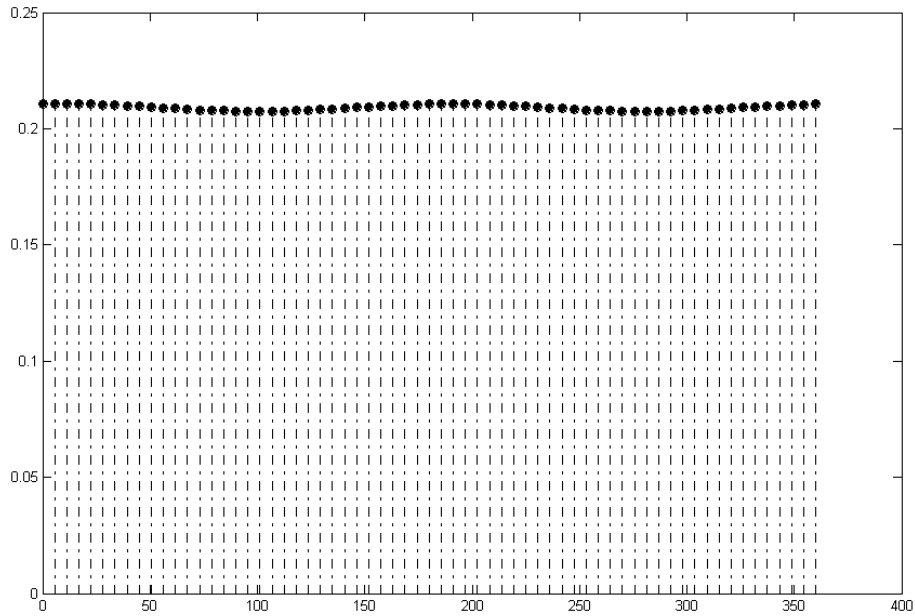
**Σχήμα 5.5.3** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,3\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,2$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1824$$

- $L_1 = 0,6\lambda$

$$\rho_{out} = 0,05$$



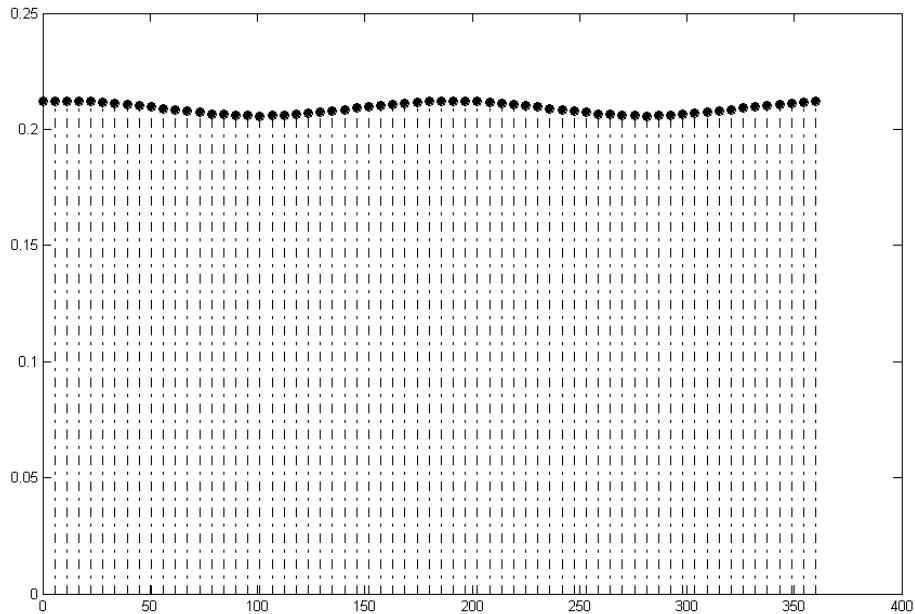
**Σχήμα 5.5.4** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,6\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,05$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1799$$

- $L_1 = 0,6\lambda$

$$\rho_{out} = 0,1$$



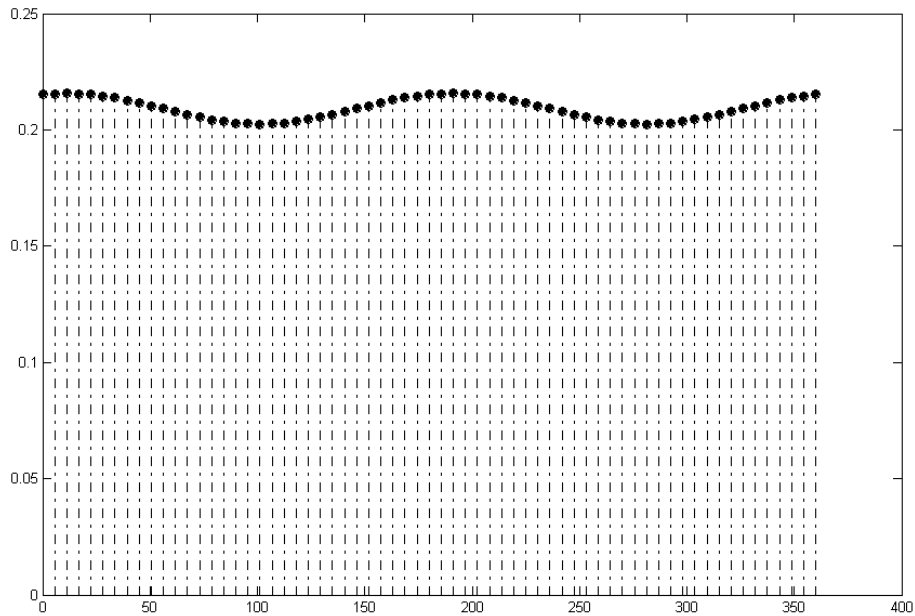
**Σχήμα 5.5.5** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,6\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,1$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1818$$

- $L_1 = 0,6\lambda$

$$\rho_{out} = 0,2$$



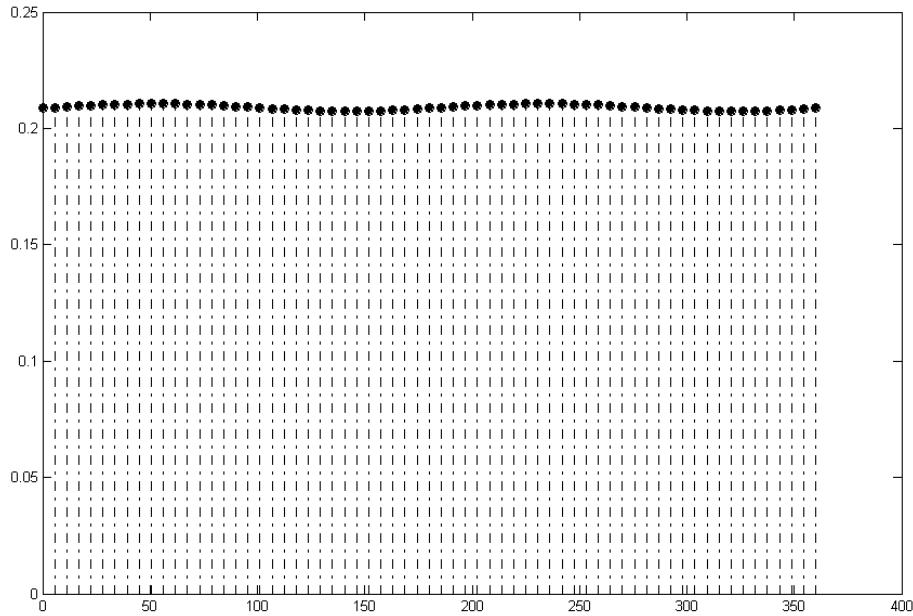
**Σχήμα 5.5.6** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,6\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,2$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1856$$

- $L_1 = 0,9\lambda$

$$\rho_{out} = 0,05$$



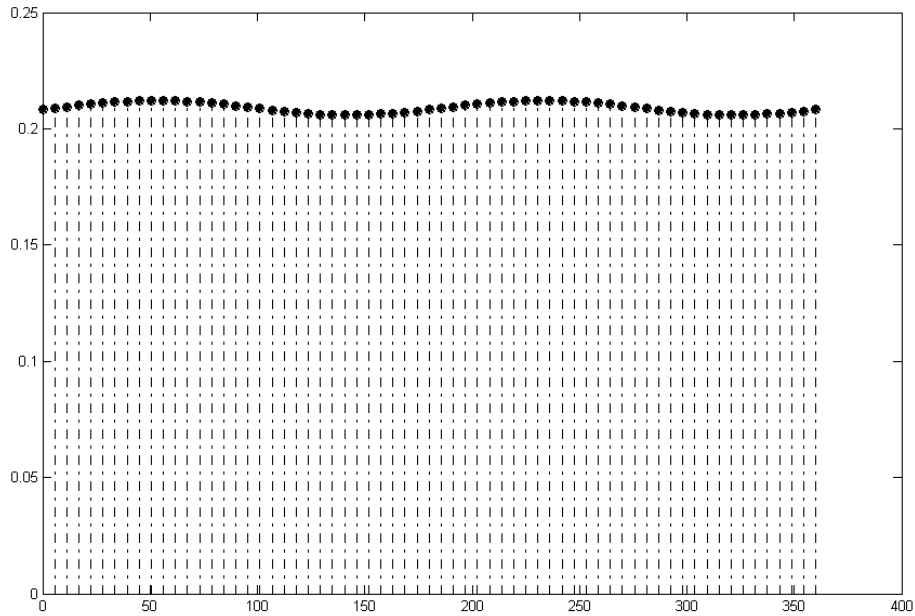
**Σχήμα 5.5.7** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,9\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,05$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1773$$

- $L_1 = 0,9\lambda$

$$\rho_{out} = 0,1$$



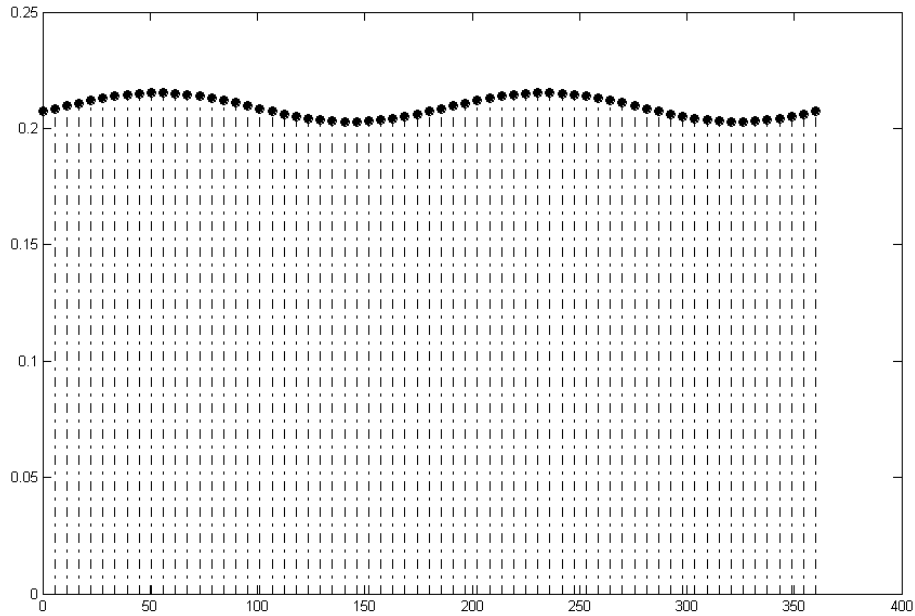
**Σχήμα 5.5.8** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,9\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,1$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1766$$

- $L_1 = 0,9\lambda$

$$\rho_{out} = 0,2$$



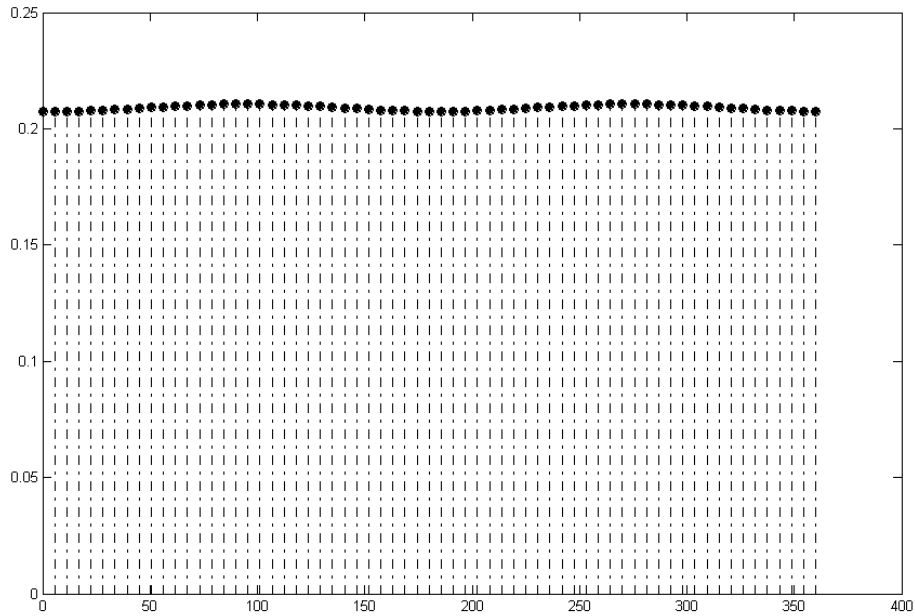
**Σχήμα 5.5.9** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,9\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,2$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1752$$

- $L_1 = 1,2\lambda$

$$\rho_{out} = 0,05$$



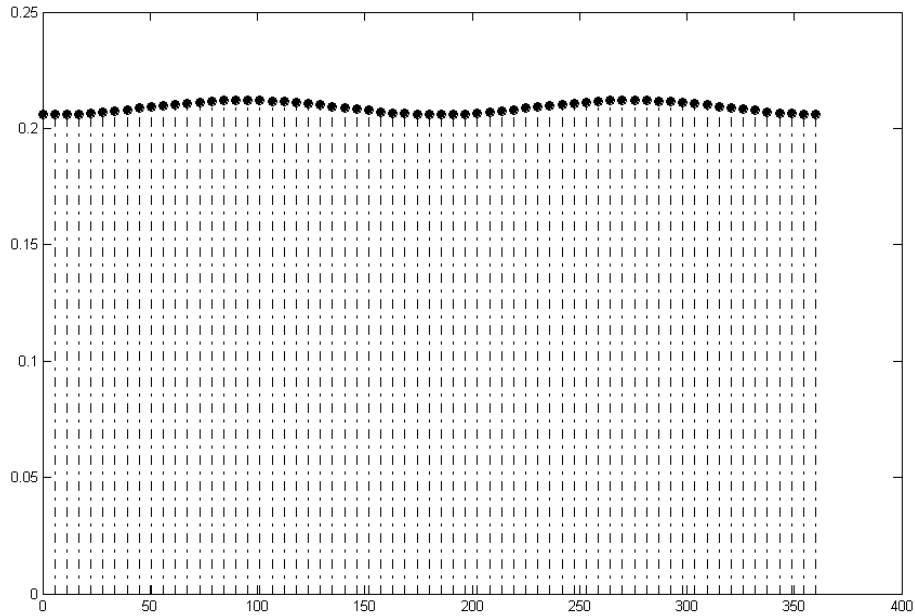
**Σχήμα 5.5.10** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 1,2\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,05$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1760$$

- $L_1 = 1,2\lambda$

$\rho_{out} = 0,1$



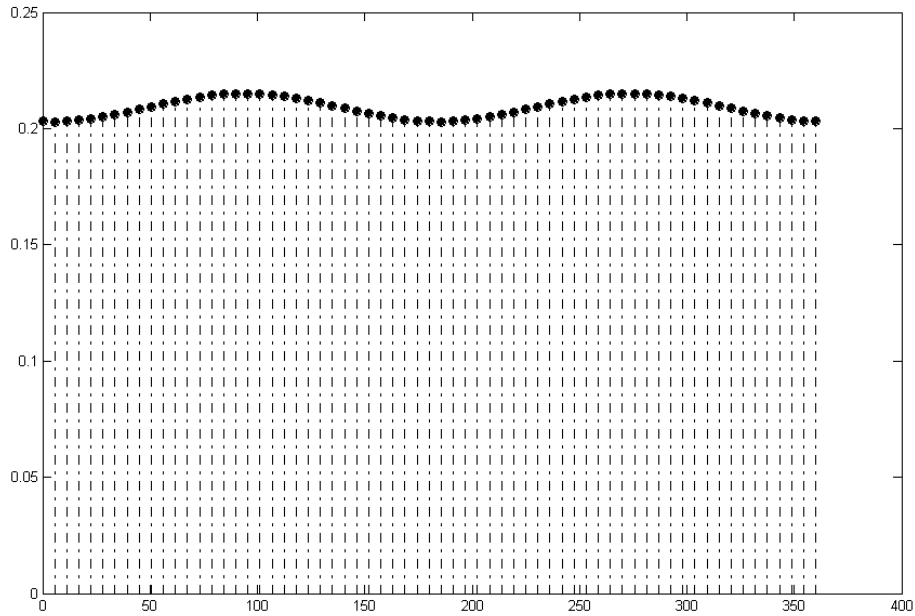
**Σχήμα 5.5.11** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 1,2\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,1$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$T = 0.1741$

- $L_1 = 1,2\lambda$

$\rho_{out} = 0,2$



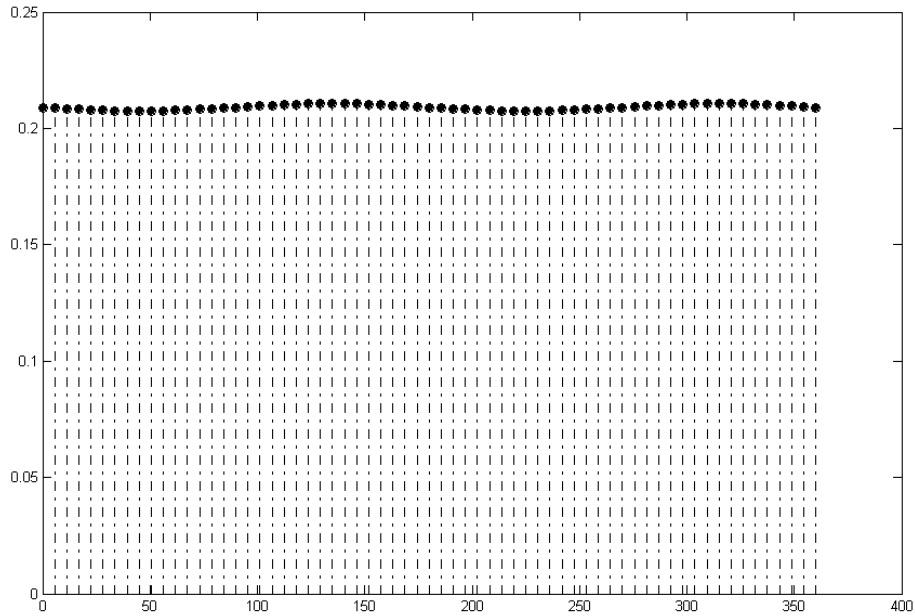
**Σχήμα 5.5.12** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 1,2\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,2$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$T = 0.1704$

- $L_1 = 1,5\lambda$

$\rho_{out} = 0,05$



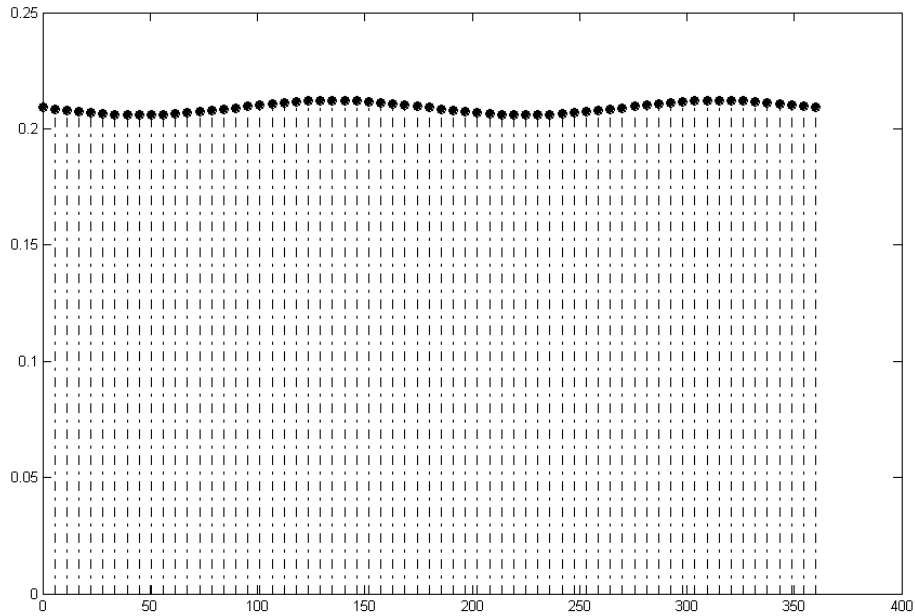
**Σχήμα 5.5.13** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 1,5\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,05$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$T = 0.1782$

- $L_1 = 1,5\lambda$

$$\rho_{out} = 0,1$$



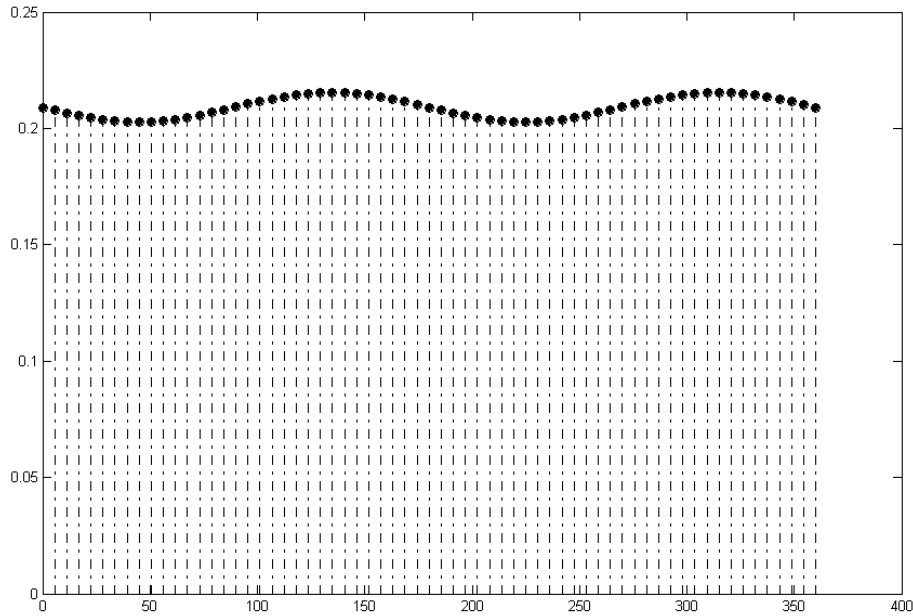
**Σχήμα 5.5.14** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 1,5\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,1$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1784$$

- $L_1 = 1,5\lambda$

$$\rho_{out} = 0,2$$



**Σχήμα 5.5.15** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 1,5\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,2$

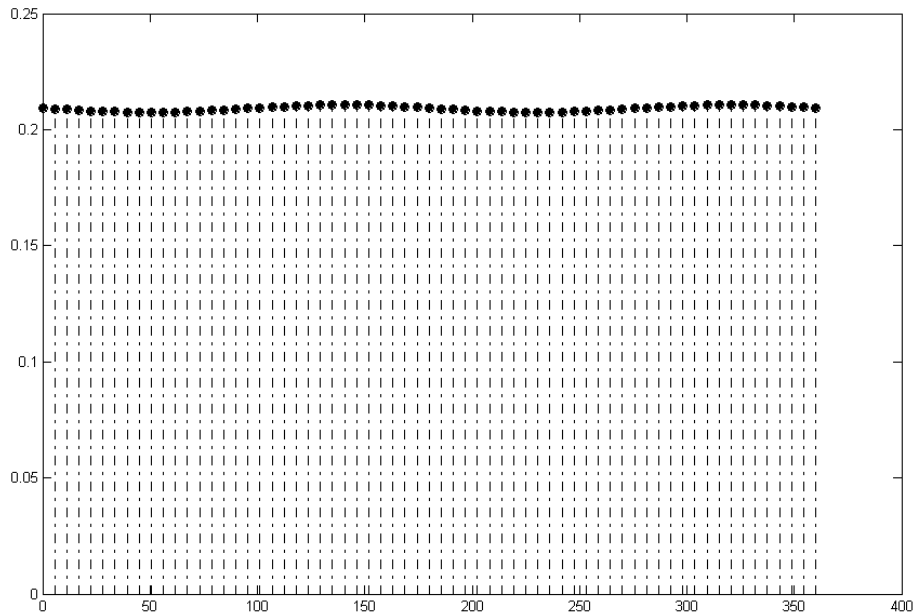
Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1787$$

Γ) Το στοιχείο με μήκος γραμμής μεταφοράς  $L=0,9\lambda$

- $L_1 = 0,2\lambda$

$$\rho_{out} = 0,05$$



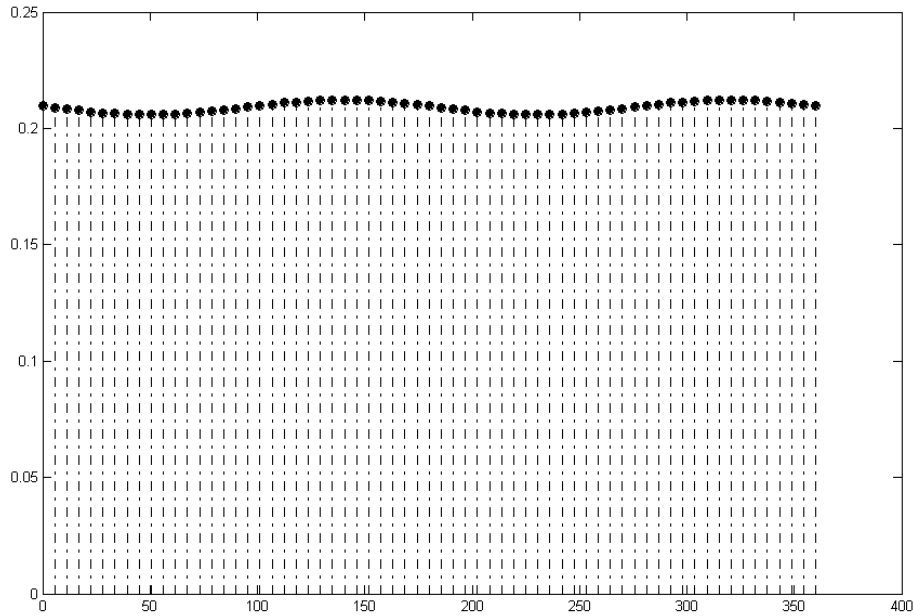
**Σχήμα 5.6.1** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,2\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,05$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1785$$

- $L_1 = 0,2\lambda$

$$\rho_{out} = 0,1$$



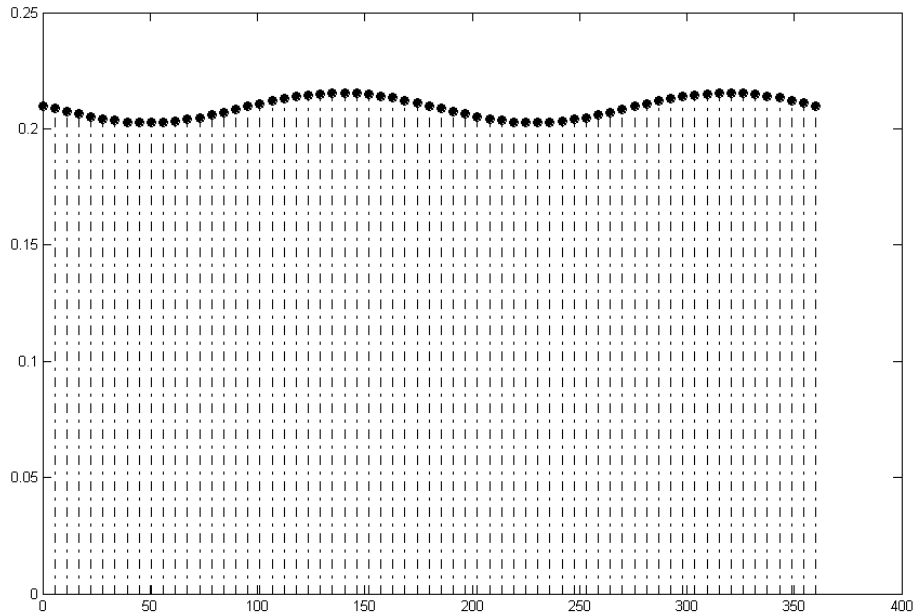
**Σχήμα 5.6.2** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,2\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,1$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1790$$

- $L_1 = 0,2\lambda$

$$\rho_{out} = 0,2$$



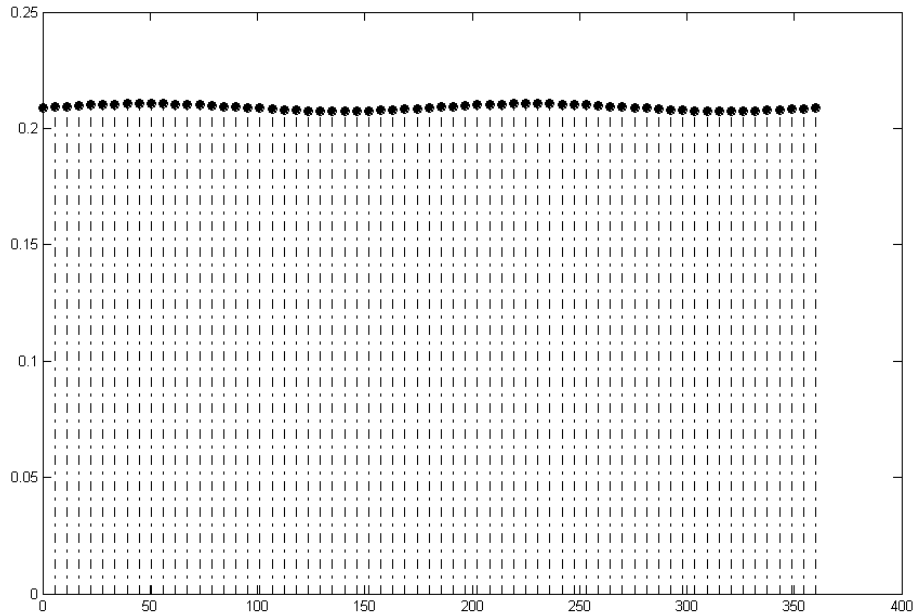
**Σχήμα 5.6.3** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,2\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,2$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1800$$

- $L_1 = 0,4\lambda$

$\rho_{out} = 0,05$



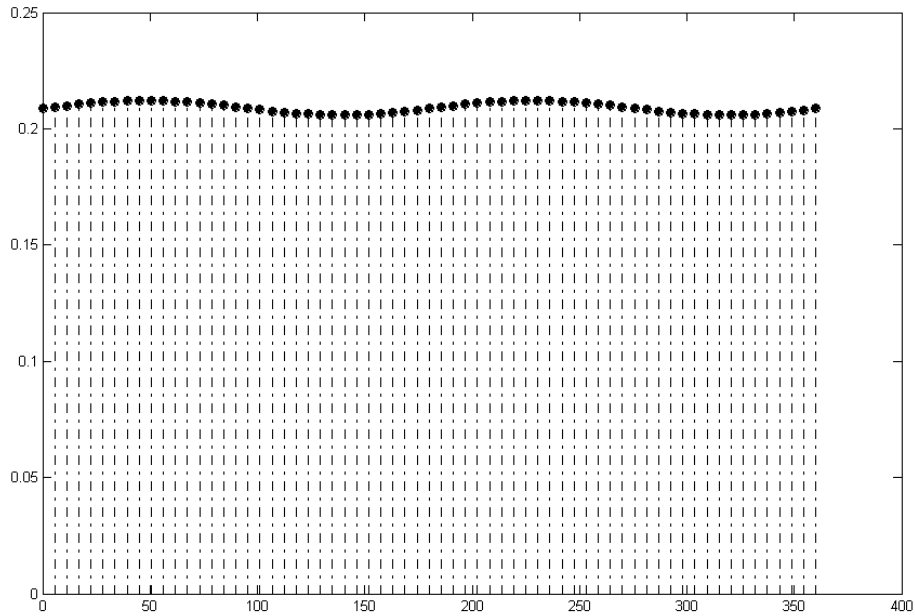
**Σχήμα 5.6.4** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,4\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,05$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$T = 0.1776$

- $L_1 = 0,4\lambda$

$$\rho_{out} = 0,1$$



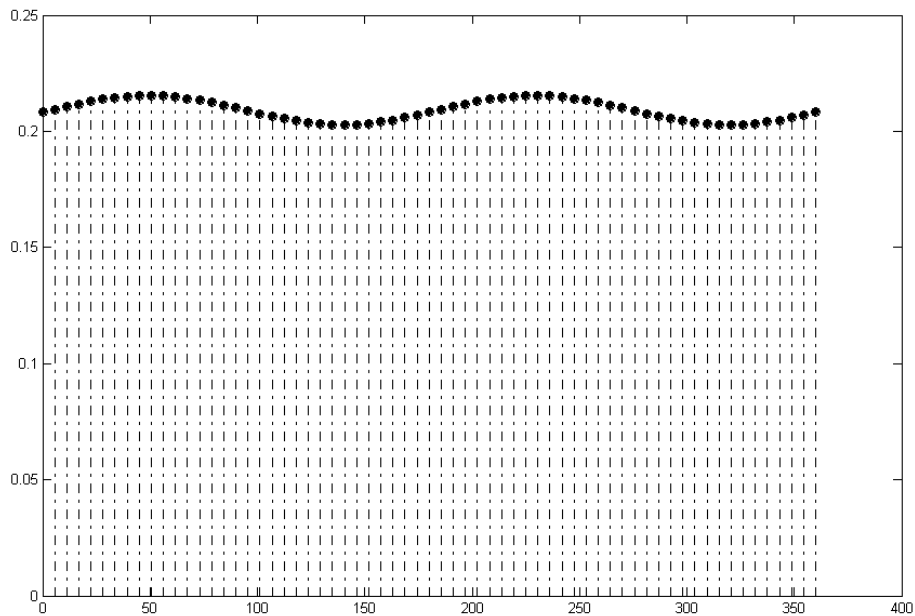
**Σχήμα 5.6.5** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,4\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,1$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1772$$

- $L_1 = 0,4\lambda$

$$\rho_{out} = 0,2$$



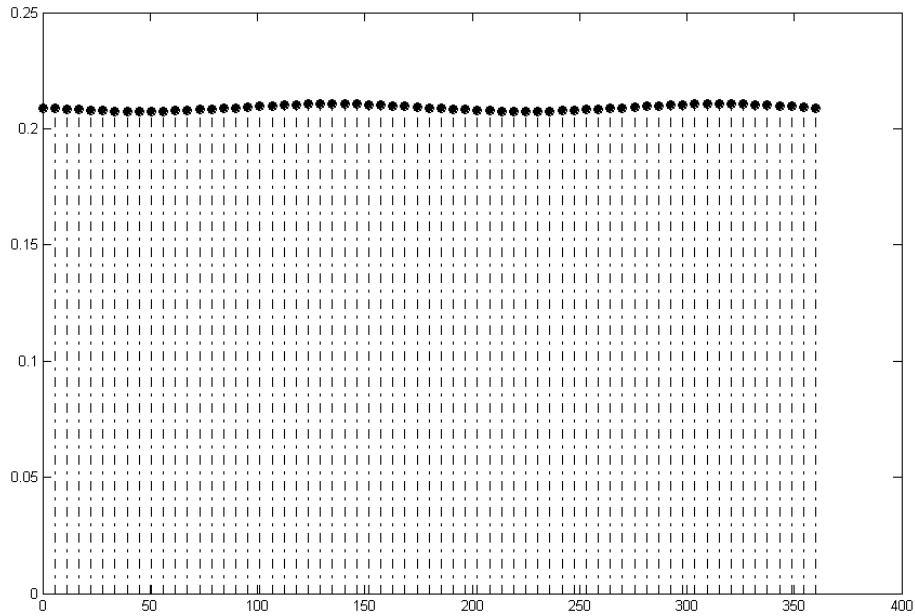
**Σχήμα 5.6.6** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,4\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,2$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1763$$

- $L_1 = 0,6\lambda$

$$\rho_{out} = 0,05$$



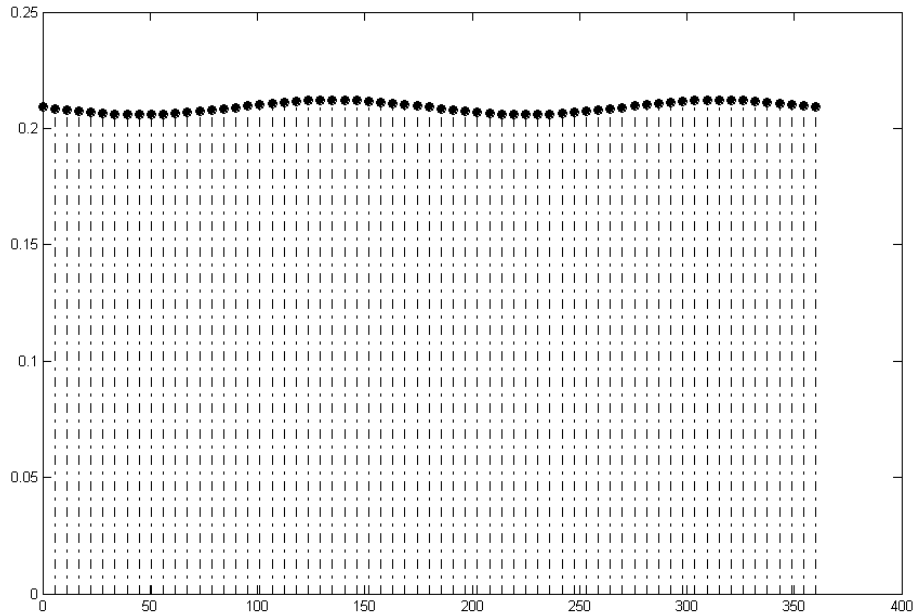
**Σχήμα 5.6.7** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,6\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,05$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1782$$

- $L_1 = 0,6\lambda$

$$\rho_{out} = 0,1$$

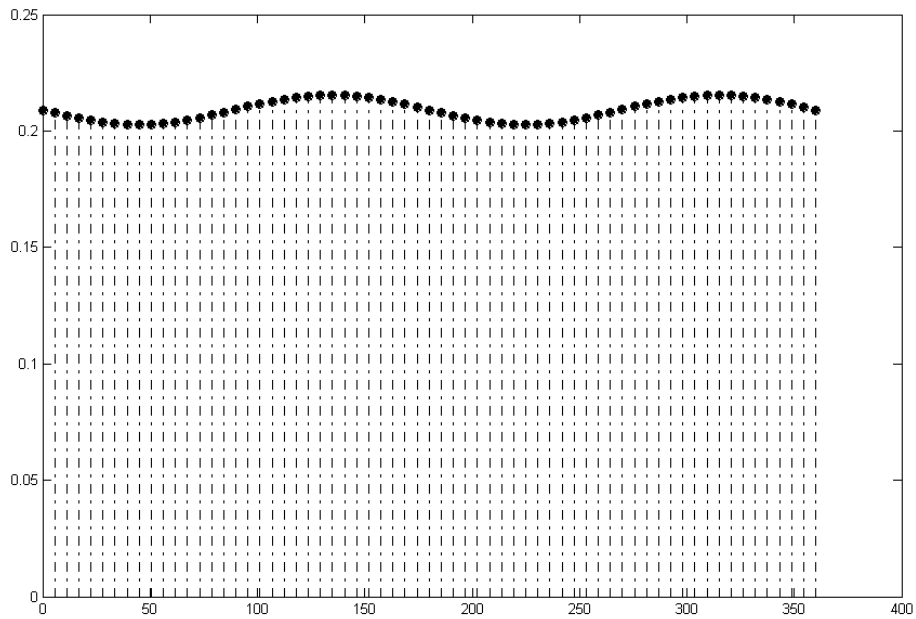


**Σχήμα 5.6.8** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,6\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,1$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1784$$

- $L_1 = 0,6\lambda$   
 $\rho_{out} = 0,2$



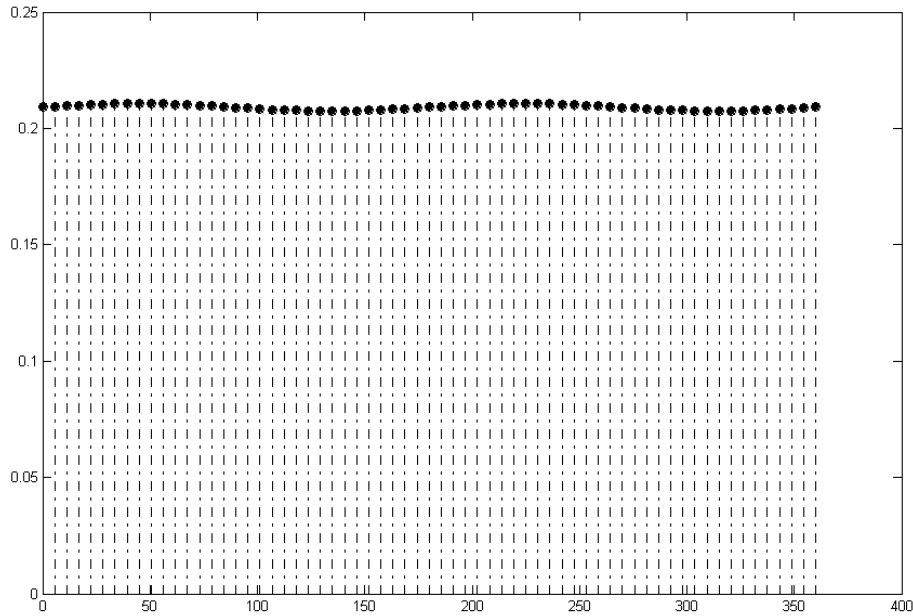
**Σχήμα 5.6.9** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,6\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,2$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1787$$

- $L_1 = 0,8\lambda$

$\rho_{out} = 0,05$



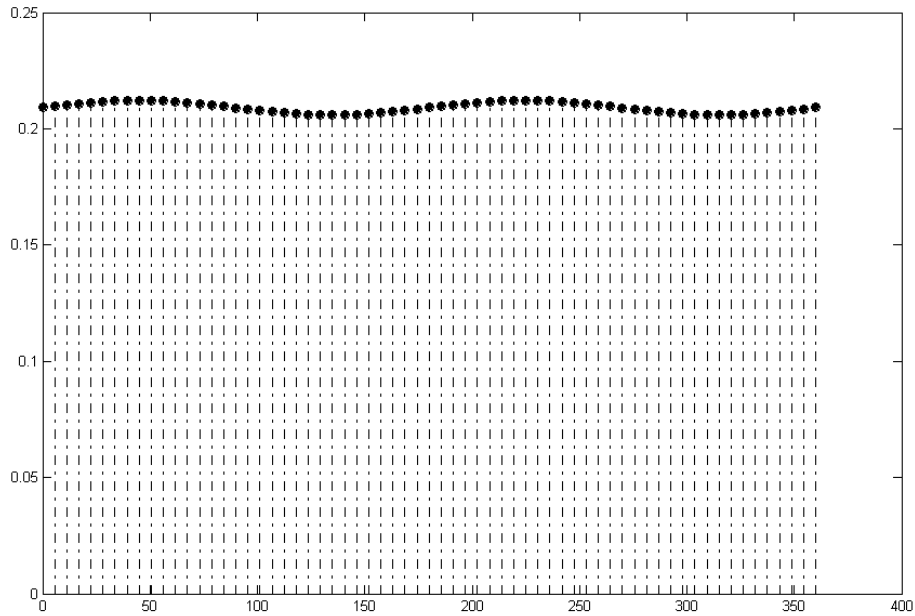
**Σχήμα 5.6.10** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,8\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,05$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$T = 0.1779$

- $L_1 = 0,8\lambda$

$$\rho_{out} = 0,1$$

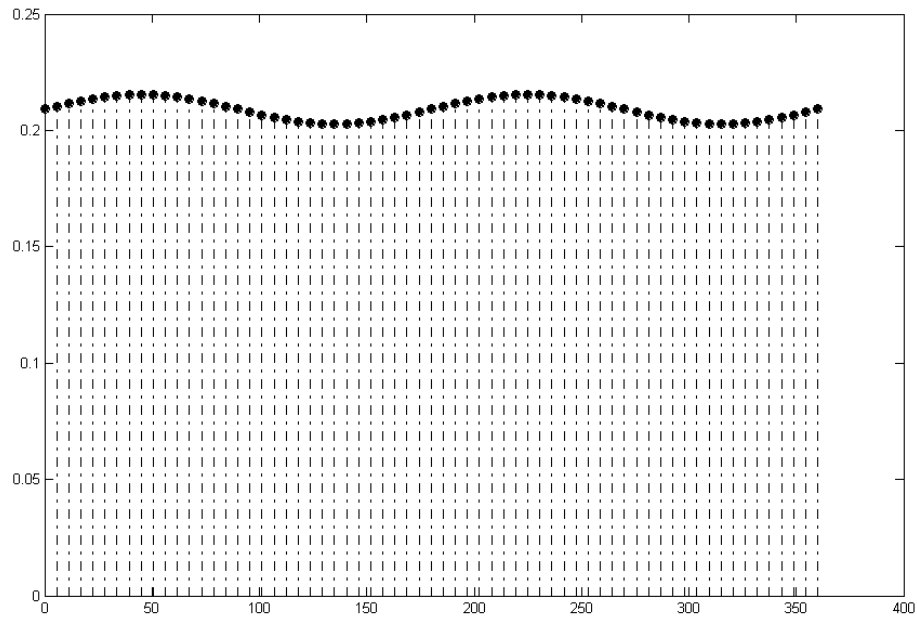


**Σχήμα 5.6.11** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,8\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,1$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1778$$

- $L_1 = 0,8\lambda$   
 $\rho_{out} = 0,2$



**Σχήμα 5.6.12** Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης για  $L_1 = 0,8\lambda$  και  $\rho_{out} = 0,2$

Ο συντελεστής μετάδοσης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι

$$T = 0.1775$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

RO-P-DS-3053 --

**6-Bit Digital Phase Shifter**  
**7.0-12.0 GHz**

Preliminary Information

**MAPCGM0005-DIE**

**Features**

- ◆ 6 Bit Digital Phase Shifter
- ◆ 7.0-12.0 GHz Operation
- ◆ 360° Coverage, LSB = 5.6°
- ◆ TTL Control Inputs
- ◆ Self-Aligned MSAG® MESFET Process

**Primary Applications**

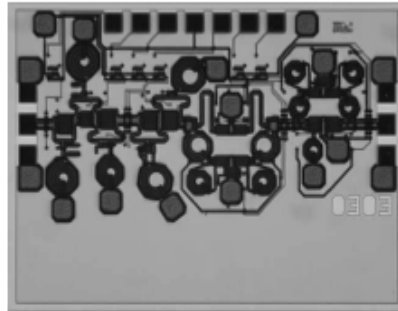
- ◆ Satellite Communication
- ◆ Military and Weather Radar

**Description**

The MAPCGM0005-Die is a 6-bit Phase Shifter with Parallel TTL Input Control. This product is fully matched to 50 ohms on both the input and output. The part has 360° of phase coverage with LSB of 5.6°.

Each device is 100% RF tested on wafer to ensure performance compliance. The part is fabricated using M/A-COM's repeatable, high performance and highly reliable GaAs Multifunction Self-Aligned Gate (MSAG®) MESFET Process.

7.0-12.0 GHz GaAs MMIC Phase Shifter



Electrical Characteristics:  $T_B = 40^\circ\text{C}^1$ ,  $Z_0 = 50\Omega$ ,  $V_{EE} = -5V$

Parameter	Symbol	Typical	Units
Bandwidth	f	7.0-12.0	GHz
Insertion Loss	IL	10	dB
Input VSWR, All States	VSWR	2.5:1	
Output VSWR, All States	VSWR	1.8:1	
RMS Phase Error	$\phi_{RMS}$	6	°
RMS Phase Error, Calibrated	$\phi_{RMS}$	3	°
Peak to Peak Gain Variation, All States	$\Delta G_n$	3	dB
Digital Driver Current	$I_{CC}$	< 10	mA
Input Third Order Intercept	ITOI	35	dBm
Input 1-dB Compression Point	P1dB	23	dBm

1.  $T_B$  = MMIC Base Temperature

**6-Bit Digital Phase Shifter**

**MAPCGM0005-DIE**

**Maximum Operating Conditions <sup>1</sup>**

Parameter	Symbol	Absolute Maximum	Units
Input Power	$P_{IN}$	30	dBm
Digital Driver Voltage	$V_{EE}$	-6.0	V
Junction Temperature	$T_J$	180	°C
Storage Temperature	$T_{STG}$	-55 to +150	°C

1. Operation outside of these ranges may reduce product reliability. Operation at other than the typical values may result in performance outside the guaranteed limits.

**Recommended Operating Conditions**

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Digital Driver Voltage	$V_{EE}$	-5.2	-5	-4.8	V
Control Voltage	$V_{control\ pins}$				
Logic High		3	5	5	V
Logic Low		0	0	0.4	V

**Operating Instructions**

This device is static and light sensitive. The digital circuitry operation can be impaired under high intensity light, e.g. microscope light. Please handle with care. To operate the device, follow these steps.

1. Power Up: Apply  $V_{EE} = -5$  V.
2. Apply Logic Voltages to control Circuits as listed in Recommended Operating Conditions
3. Power Down: Set  $V_{EE} = 0$



Specifications subject to change without notice.

Customer Service: Tel. (888)-563-3949

Email: [macom\\_adbu\\_ics@tycoelectronics.com](mailto:macom_adbu_ics@tycoelectronics.com)

■ North America: Tel. (800) 356-2266

■ Asia/Pacific: Tel +81-44-844-8296, Fax +81-44-844-8298

■ Europe: Tel. +44 (1344) 869595, Fax+44 (1344) 300020



Visit [www.macom.com](http://www.macom.com) for additional data sheets and product information.

6-Bit Digital Phase Shifter

MAPCGM0005-DIE

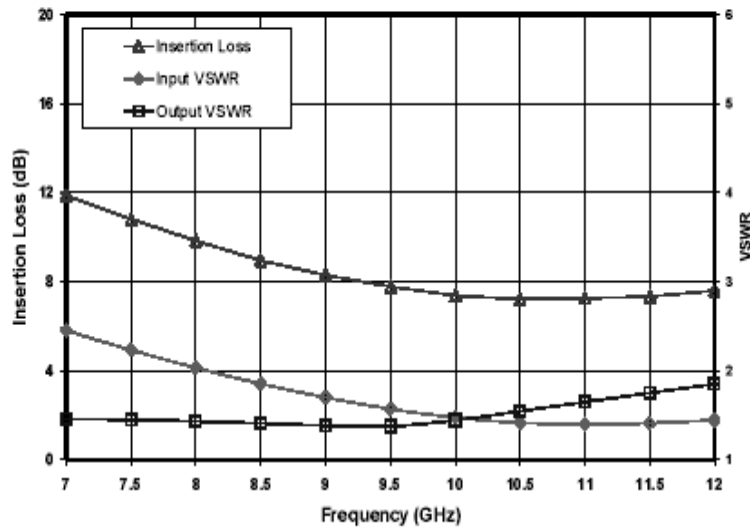


Figure 1. Reference State Insertion Loss, Input and Output VSWR vs. Frequency

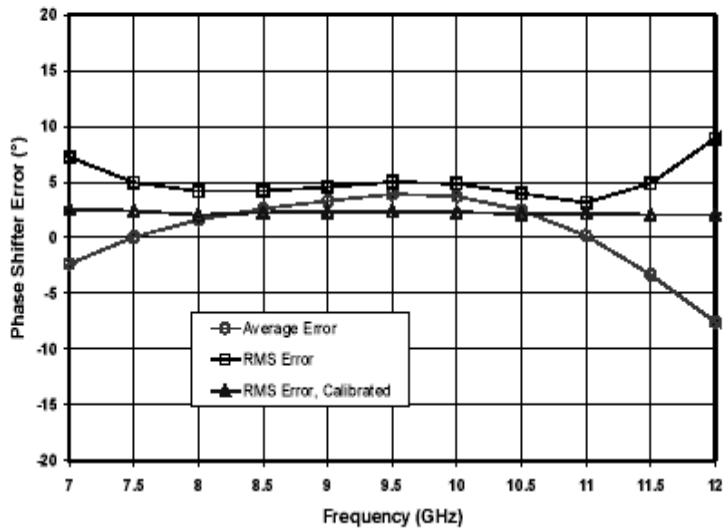


Figure 2. Phase Shifter Figures of Merit: Average Error vs Reference State, RMS Error and Calibrated RMS Error over All States

Specifications subject to change without notice.

Customer Service: Tel. (888)-563-3949

Email: [macom\\_adbu\\_ics@tycoelectronics.com](mailto:macom_adbu_ics@tycoelectronics.com)

North America: Tel. (800) 366-2266

Asia/Pacific: Tel +81-44-844-8296, Fax +81-44-844-8298

Europe: Tel. +44 (1344) 869 595, Fax+44 (1344) 300 020



Visit [www.macom.com](http://www.macom.com) for additional data sheets and product information.

6-Bit Digital Phase Shifter

MAPCGM0005-DIE

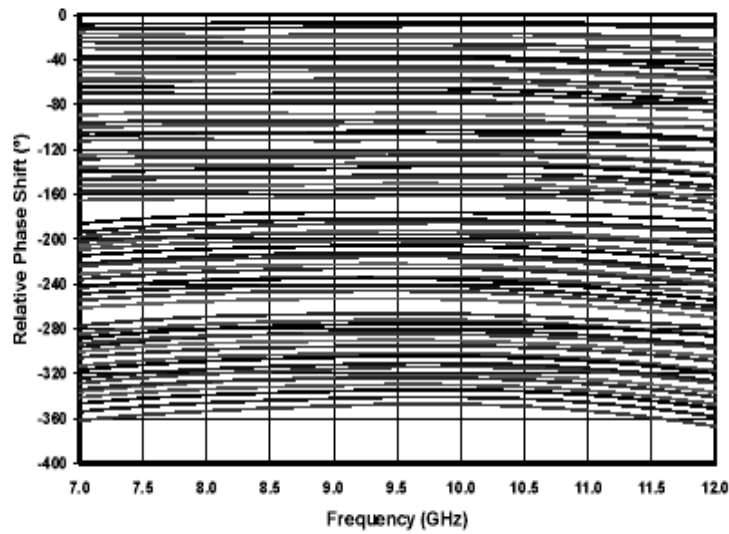


Figure 3. Relative Phase Shift vs Phase Shifter State

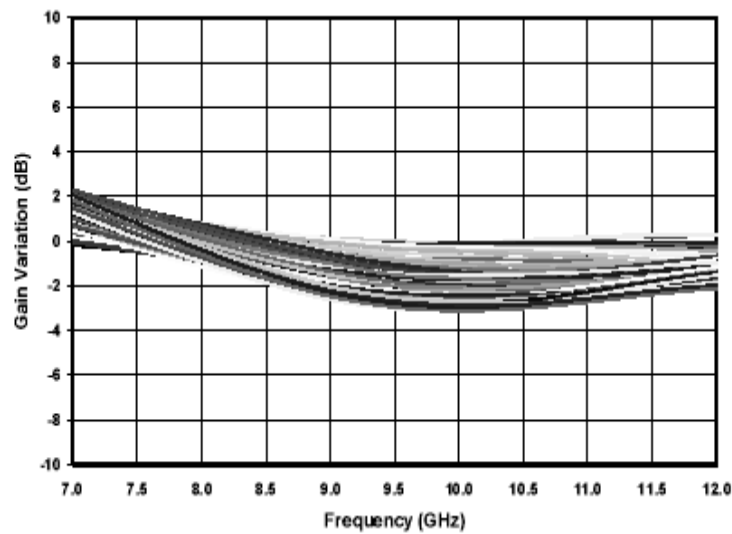


Figure 4. Relative Gain Change vs Phase Shifter State

Specifications subject to change without notice.

Customer Service: Tel. (888)-563-3949

Email: [macom\\_adbu\\_ics@tycoelectronics.com](mailto:macom_adbu_ics@tycoelectronics.com)

■ North America: Tel. (800) 366-2266

■ Asia/Pacific: Tel +81-44-844-8296, Fax +81-44-844-8298

■ Europe: Tel. +44 (1344) 869596, Fax+44 (1344) 300020



Visit [www.macom.com](http://www.macom.com) for additional data sheets and product information.

6-Bit Digital Phase Shifter

MAPCGM0005-DIE

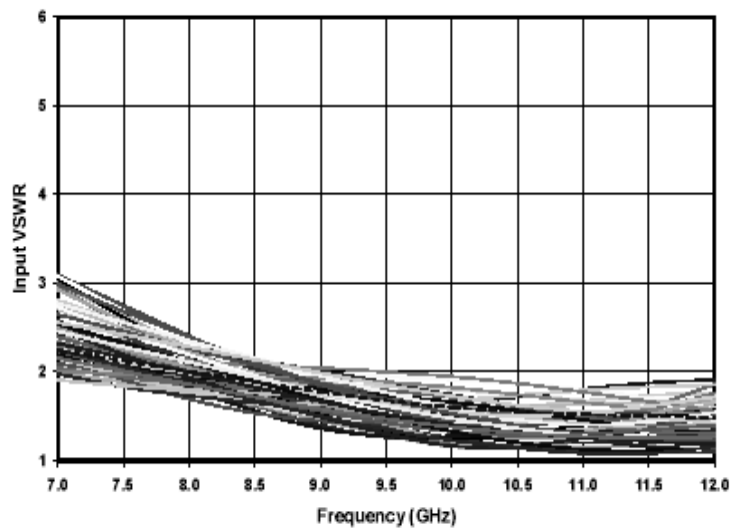


Figure 5. Input VSWR vs Phase Shifter State

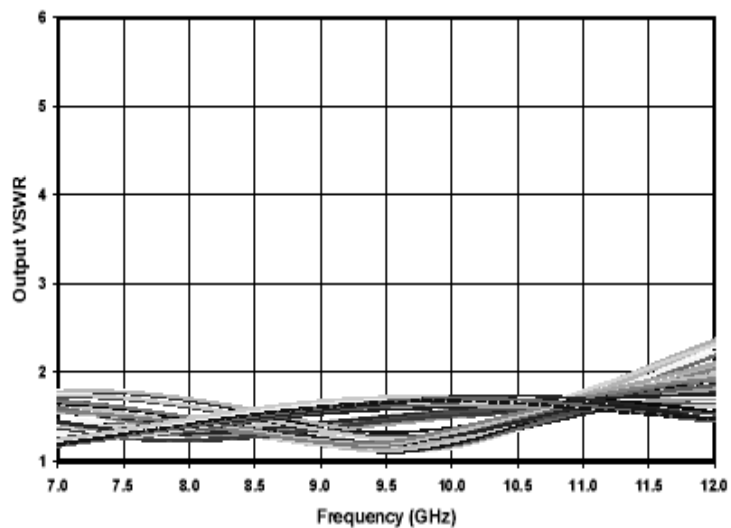


Figure 6. Output VSWR vs Phase Shifter State

Specifications subject to change without notice.

Customer Service: Tel. (888)-563-3949

Email: [macom\\_adbu\\_ics@tycoelectronics.com](mailto:macom_adbu_ics@tycoelectronics.com)

■ North America: Tel. (800) 366-2266

■ Asia/Pacific: Tel +81-44-844-8296, Fax +81-44-844-8298

■ Europe: Tel. +44 (1344) 869 595, Fax+44 (1344) 300 020



Visit [www.macom.com](http://www.macom.com) for additional data sheets and product information.

6-Bit Digital Phase Shifter

MAPCGM0005-DIE

Mechanical Information

Chip Size: 2.923 x 2.054 x 0.075 mm (115 x 81 x 3 mils)

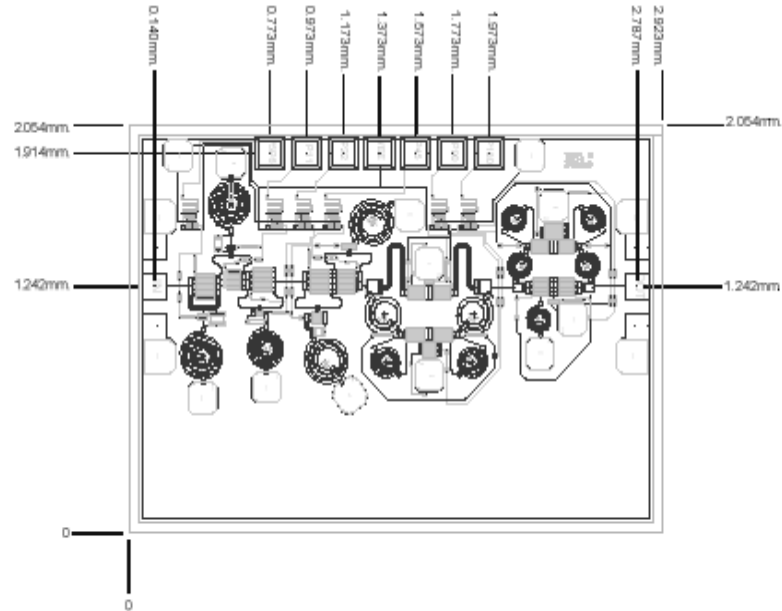
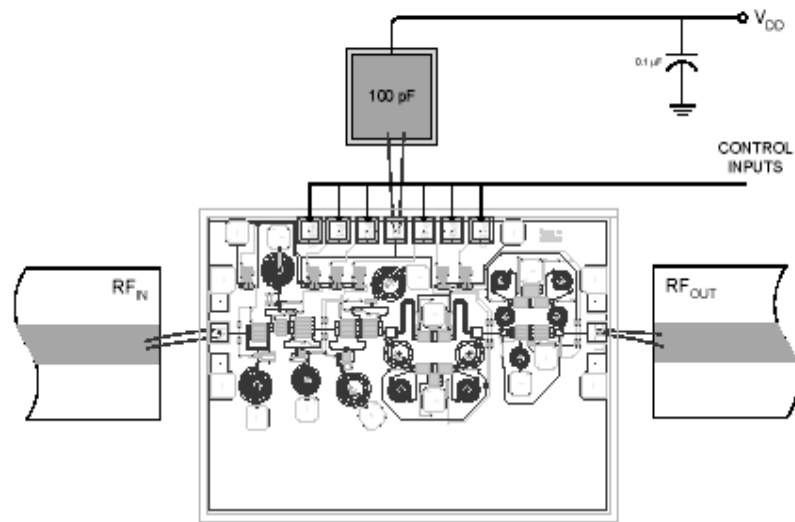


Figure 7. Die Layout

Bond Pad Dimensions

Pad	Size (μm)	Size (mils)
RF (2)	100 x 200	4 x 8
Digital Driver Voltage VEE (1)	125 x 125	5 x 5
TTL Control (6)	125 x 125	5 x 5

**6-Bit Digital Phase Shifter** **MAPCGM0005-DIE**



**Figure 8. Recommended bonding diagram for pedestal mount.**  
Support circuitry typical of MMIC characterization.

**Assembly Instructions:**

**Die attach:** Low thermal conductivity silver epoxies are acceptable for die attach of this MMIC. Follow the manufacturer's instructions. If solder is employed, use AuSn (80/20) 1-2 mil preform solder. Limit time @ 300 °C to less than 5 minutes.

**Wirebonding:** Bond @ 160 °C using standard ball or thermal compression wedge bond techniques. For DC and RF pad connections, use either ball or wedge bonds. For best performance, especially above 10 GHz, wedge bonds of shortest length employed on the RF interconnects is preferred over ball bonds.

**Biasing Note:** Must apply negative bias to  $V_{EE}$  before applying positive bias to Control Pads.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] G. A. Deschamps, "Microstrip Microwave Antennas", 3rd USAF Symposium on Antennas, 1953.
- [2] Χ. Καψάλης και Π. Κωττής, "Κεραίες - Ασύρματες ζεύξεις", εκδόσεις Τζιολα Θεσσαλονίκη, 2003.
- [3] 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.
- [4] James J. R. and P. S. Hall (Eds), "Handbook of Microstrip Antennas", Peter Peregrinus, London, 1989.
- [5] Gutton. H. and G. Baissinot, "Flat Aerial for Ultra high frequencies", French Patent No. 70313, 1955.
- [6] Δήμητρα - θεοδώρα Κακλαμάνη, "Υπολογιστικές τεχνικές για συστήματα μετάδοσης πληροφορίας", Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002.
- [7] 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.
- [8] R. E. Manson, "Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-22, No. 1, (1974).
- [9] Rainee N. Simons, "Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems", John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] J. W. Howell, "Microstrip antennas", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-23, No. 1, (1975), 90-93.
- [13] Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου, "Εισαγωγή στα μικροκύματα", εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1994.
- [14] P. Bhartia, Inder Bahl, R. Garg and A. Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook", Artech House, January, 2001.

[15] 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.

[16] [www.macom.com/data/datasheet/MAPCGM0005-DIE.pdf](http://www.macom.com/data/datasheet/MAPCGM0005-DIE.pdf)