



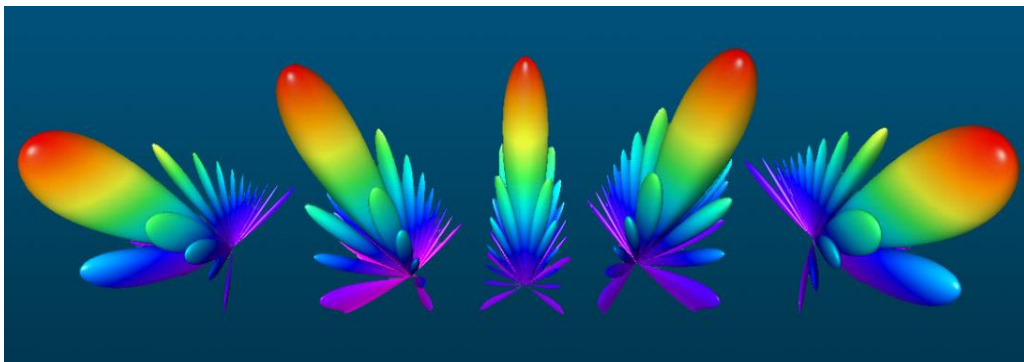
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

**ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ΜΙΜΟ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΓΙΑ  
ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ**



**Φοιτητής: Γκιώνης Ιωάννης  
ΑΜ: 45087**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Κωνσταντίνος Ν. Βουδούρης  
Καθηγητής**

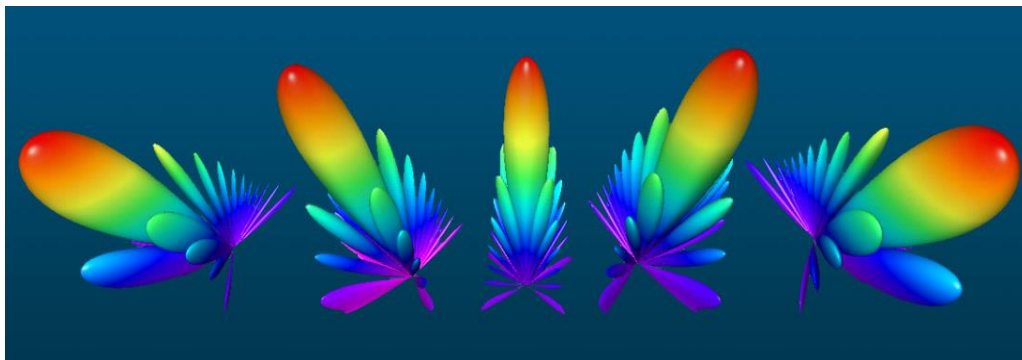
**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΟΚΤΩΒΡΗΣ 2022**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

# **PRINTED MIMO ANTENNAS DESIGN FOR THE NEXT- GENERATION WIRELESS NETWORK**



**Student: GKIONIS IOANNIS**

**Registration Number: 45087**

**Supervisor**

**Konstantinos N. Voudouris**

**Professor of Wireless Communications**

**ATHENS-EGALEO, OCTOBER 2022**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Κωνσταντίνος Βουδούρης Καθηγητής	Στυλιανός Σαββαΐδης Καθηγητής	Στυλιανός Μυτηλιναίος Αν. Καθηγητής

**Copyright ©**

Με επιφύλαξη παντός διακώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ Γκιώνης Ιωάννης ,  
Οκτώβριος, 2022**

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

**ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γκιώνης Ιωάννης του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 45087 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

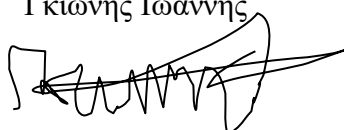
«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 1/10/2023 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος/ουσας καθηγητή/ήτριας.»

Ο Δηλών

Γκιώνης Ιωάννης



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την μελέτη και την ανάλυση κεραιών ΜΙΜΟ για ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς 5G. Η μελέτη περιλαμβάνει καλή γνώση θεωρίας στοιχειοκεραιών και επιπλέον εξοικείωση με το λογισμικό CST-STUDIO για την προσομείωση της κεραίας.

Το πρώτο κεφάλαιο ξεκινά με βασικές παραμέτρους των κεραιών, όπως τα χαρακτηριστικά ενός διαγράμματος ακτινοβολίας, το κέρδος, η κατευθυντικότητα είναι έννοιες που θα πρέπει κάποιος να γνωρίζει για την υλοποίηση μιας τέτοια είδους κατασκευής.

Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά της στοιχειοκεραίες που είναι βασικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας. Είναι φανερό πως οι στοιχειοκεραίες είναι το επικέντρο για την δημιουργία ασυρμάτων δικτύων νέας γενιάς διότι μπορούν να σαρώνουν και στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Επιπλέον γίνεται περιγραφή και άλλων στοιχειοκεραιών όπως η ευρύπλευρη και η ακροπυροδοτική στοιχειοκεραία καθώς και η ανάλυση σε πίνακες για διάφορους υπολογισμούς.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή για μικροταινιακές κεραίες και τους διάφορους τρόπους τροφοδοσίας τους. Είναι φανερό ότι μια τέτοια είδους κατασκευή έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε συστήματα επικοινωνιών υψηλών αποδόσεων διότι είναι χαμηλού προφίλ, χαμηλού βάρους, με σύγχρονη τεχνολογία τυπωμένων κυκλωμάτων.

Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά τις ασύρματες επικοινωνίες και τους διάφορους τρόπους μετάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από το πομπό στον δέκτη. Επίσης γίνεται περιγραφή της πολυδιαδρομικής διάδοσης, των συστημάτων κεραιών ΜΙΜΟ, της τεχνικής μετάδοσης OFDM και την λειτουργία των έξυπνων κεραιών μέσω αλγορίθμων.

Το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας αποσκοπεί στην δημιουργία μιας στοιχειοκεραίας 4X4 στα 5GHz με τετράγωνα μικροταινιακά στοιχεία. Αρχικά εξετάζεται ως μεμονωμένο στοιχείο και ύστερα ως στοιχειοκεραία αναλύοντας της S-παραμέτρους και το διάγραμμα ακτινοβολίας. Επίσης κατασκευάζεται το δίκτυο τροφοδοσίας και γίνεται τοποθέτηση phase shifters για την περιστροφή του λοβού ακτινοβολίας ως προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και έτσι να θεωρηθεί κεραία ΜΙΜΟ. Η κατασκευή γίνεται σύμφωνα με το λογισμικό CST-STUDIO.

## Λέξεις-κλειδιά

Δίκτυο 5G, στοιχειοκεραία, ΜΙΜΟ, μικροταινιακές κεραίες, διάγραμμα ακτινοβολίας, CST-STUDIO

## Abstract

This thesis aims to study and analyze MIMO antennas for new generation 5G wireless networks. The study includes good knowledge of elemental antenna theory and additional extraction with CST-STUDIO software for antenna simulation.

The first chapter starts with the basic parameters of antennas such as characteristics of a beam pattern, gain, directivity are concepts one should know to build such a structure.

The second chapter concerns the array antennas which is a key part of the thesis. It is clear that antennas are the epicenter for the development of new generation wireless networks because they can scan in all three dimensions of space. In addition, there is a description of other elemental antennas such as the wide-sided and end-fire elemental antenna as well as the analysis in tables for various calculations.

In the third chapter, there is an introduction to microstrip antennas and their various feeding methods. It is clear that such a construction has several advantages in high performance communication systems because it is low profile, light weight, with modern printed circuit technology.

The fourth chapter deals with wireless communications and the different ways of transmitting the electromagnetic wave from the transmitter to the receiver. Multipath propagation, MIMO antenna systems, OFDM transmission technique and the operation of smart antennas through algorithms are also described.

The last chapter of the diploma thesis aims at the fabrication of a 4X4 array antenna at 5GHz with square microstrip elements. It is first examined as a single element and then as an array antenna by analyzing its S-parameters and radiation pattern. The power supply network is also constructed and phase shifters are placed to rotate the radiation lobe in any direction and thus be considered a MIMO antenna. The construction is done according to CST-STUDIO software.

**Keyword**

5G network, array antenna, MIMO, microstrip antennas, radiation pattern, CST-STUDIO

## Περιεχόμενα

Κατάλογος πινάκων.....	11
Κατάλογος σχημάτων.....	12
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>15</b>
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	15
Σκοπός και στόχοι.....	16
Μεθοδολογία.....	16
Καινοτομία.....	16
Δομή.....	16
<b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Κεραίες και Βασικές Παράμετροι</b>	<b>17</b>
1.1 Ορισμός κεραίας.....	17
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	18
1.3 Ανάλυση διαγράμματος ακτινοβολίας.....	20
1.3.1 Περιοχές πεδίου ακτινοβολίας.....	21
1.4 Πυκνότητα ισχύος.....	22
1.5 Κατευθυντικότητα κεραίας.....	23
1.6 Απολαβή της κεραίας.....	26
1.7 Κύκλωμα και εμπέδηση κεραίας.....	27
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Στοιχειοκεραίες</b>	<b>30</b>
2.1 Στοιχειοκεραία δύο στοιχείων.....	30
2.1.1 Παράγοντας συστοιχίας.....	32
2.2 Γραμμικές στοιχειοκεραίες.....	33
2.2.1 Στοιχειοκεραίες σάρωσης.....	38
2.2.2 Ευθύγραμμες στοιχειοκεραίες.....	39
2.2.3 Επιπεδικές στοιχειοκεραίες.....	41
2.3 Πίνακες στοιχειοκεραιών.....	45
<b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: Μικροταινιακές κεραίες</b>	<b>49</b>
3.1 Χαρακτηριστικά μικροταινίας.....	49
3.2 Ορθογωνική μικροταινία.....	51
3.2.1 Τεχνικές προσαρμογής.....	54



3.3	S-παράμετροι σκέδασης.....	58
3.4	Συντελεστής ποιότητας Q.....	61
3.4.1	Εύρο; Ζώνης.....	62
3.4.2	Απόδοση ακτινοβολίας.....	63
3.5	Δίκτυα τροφοδοσίας.....	63
3.5.1	Διαρέτης ισχύος wilkinson.....	66
3.5.2	Στροφείς φάσης και εξασθενιτές.....	67
3.6	Σύζευξη μικροταινιακών στοιχείων .....	69
<b>4</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Ασύρματες επικοινωνίες και δίκτυα</b>	<b>71</b>
4.1	Ασύρματο κανάλι.....	71
4.1.1	Τρόποι διάδοσης και εξασθένιση σήματος.....	72
4.1.2	Απώλειες διάδοσης στον ελεύθερο χώρο.....	73
4.1.3	Θόρυβος.....	75
4.1.4	Φαινόμενο πολυδιαδρομικής διάδοσης.....	75
4.1.5	Χωρητικότητα καναλιού.....	77
4.2	Συστήματα κεραιών ΜΙΜΟ.....	78
4.2.1	Μήτρα καναλιού ΜΙΜΟ.....	79
4.2.2	Χωρικός διαχωρισμός και χωρική πολυπλεξία.....	80
4.2.3	Τεχνική μετάδοσης OFDM.....	80
4.2.4	Υλοποίηση OFDM.....	82
4.3	Ευφυείς κεραίες.....	82
4.3.1	Συστήματα ευφών κεραιών.....	83
4.3.2	SDMA.....	85
4.3.3	Διάδοση σήματος.....	87
4.3.4	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ευφών κεραιών.....	88
4.4	Ανασκόπηση γραμμικής και επιπεδικής στοιχειοκεραίας.....	88
4.5	Επιπεδική στοιχειοκεραία με μικροταινιακά στοιχεία.....	89
4.6	Αμοιβαία σύζευξη και αποσύζευξη.....	91
<b>5</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Υλοποίηση μικροταινιακής στοιχειοκεραίας</b>	<b>92</b>
5.1	Το λογισμικό CST-STUDIO.....	93
5.2	Υπολογισμός διαστάσεων μικροταινιακής κεραίας.....	93

5.3	Προσομοίωση της μικροταινιακής κεραίας.....	94
5.4	Δημιουργία στοιχειοκεραίας μέσω μαθηματικής ανάλυσης.....	99
5.5	Δημιουργία στοιχειοκεραίας μέσω γεωμετρικής ανάλυσης.....	101
5.5.1	Μαθηματική ανάλυση με αυξημένη γείωση.....	105
5.5.2	Βελτίωση σύζευξης μεταξύ των στοιχείων.....	107
5.5.3	Μαθηματική ανάλυση με αυξημένη απόσταση στοιχείων.....	110
5.5.4	Περιστροφή λοβού ακτινοβολίας.....	112
5.6	Δίκτυο τροφοδοσίας wilkinson.....	117
5.6.1	Στοιχειοκεραία και διαιρέτης ισχύος wilkinson.....	121
5.7	Σύνοψη κεφαλαίου .....	124
<b>6</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα</b>	
6.1	Συμπεράσματα.....	125

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1 Εξισώσεις ευρύπλευρης στοιχειοκεραίας με ομοιόμορφο πλάτος [1]

Πίνακας 2.2 Εξισώσεις εύρους δέσμης ευρύπλευρης στοιχειοκεραίας με ομοιόμορφο πλάτος [1]

Πίνακας 2.3 Εξισώσεις ακροπυροδοτικής στοιχειοκεραίας με ομοιόμορφο πλάτος [1]

Πίνακας 2.4 Εξισώσεις εύρους δέσμης ακροπυροδοτικής κεραίας ομοιόμορφου πλάτους [1]

Πίνακας 4.1 Ζώνες συχνοτήτων [6]

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα μαθηματικής και γεωμετρικής ανάλυσης

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα μαθηματικής και γεωμετρικής ανάλυσης, με 36mm απόσταση στοιχείων.

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα  $\beta_x$ ,  $\beta_y$

Πίνακας 5.4 Περιστοφή λοβού αζιμοθιακά, ανυψωτικά

## Κατάλογος σχημάτων

- Σχήμα 1.1 Η κεραία ως μεταβατική διάταξη μεταξύ πηγής και ελεύθερου χώρου [1]
- Σχήμα 1.2 Ρανταρ κεραία δευτέρου παγκοσμίου πολέμου [12]
- Σχήμα 1.3 Διάγραμμα ακτινοβολίας Κεραίας [1]
- Σχήμα 1.4 Περιοχές πεδίου κεραίας [1]
- Σχήμα 1.5 Διάγραμμα κατευθυντικότητας διπόλου  $\lambda/2$  [1]
- Σχήμα 1.6 Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για εκπομπή [1]
- Σχήμα 1.7 Ισοδύναμο κατα Thevenin για λήψη [1]
- Σχήμα 2.1 Στοιχειοκεραία δύο στοιχείων [1]
- Σχήμα 2.2 Διάγραμμα ολικού πεδίου ( $\beta=0$ ,  $d=\lambda/4$ ) [1]
- Σχήμα 2.3 Γραμμική στοιχειοκεραία N στοιχείων [1]
- Σχήμα 2.4 Ευρύπλευρη γραμμική στοιχειοκεραία ( $\beta=0$ ,  $d=\lambda/4$ ) [1]
- Σχήμα 2.5 Ακροπυροδοτική στοιχειοκεραία με  $\Theta=0^\circ$ ,  $\Theta=180^\circ$  και  $d = \lambda/4$  [1]
- Σχήμα 2.6 Στοιχειοκεραία σάρωσης με  $d=\lambda/4$ ,  $\theta_0=60^\circ$  [1]
- Σχήμα 2.6 Στοιχειοκεραίες μη-ομοιόμορφου πλάτους άρτιου και περιττού αριθμού στοιχείων [1]
- Σχήμα 2.7 Επιπεδική στοιχειοκεραία  $M \times N$  [1]
- Σχήμα 2.8 διαγράμματα ακτινοβολίας επιπεδικής στοιχειοκεραία με απόσταση  $dx=dy=\lambda/4$  [1]
- Σχήμα 2.9 Επιπεδική στοιχειοκεραία με παρουσία δευτερεύοντων λοβών,  $dx=dy=\lambda/4$  [1]
- Σχήμα 2.10 Επιπεδική στοιχειοκεραία με προοδευτική ολίσθηση φάσης και απόσταση στοιχείων  $dx=dy=\lambda/2$  [1]
- Σχήμα 3.1 Μικροταινιακή κεραία [1]
- Σχήμα 3.2 Σχήματα μικροταινιών [1]
- Σχήμα 3.3 Μικροταινιακή γραμμή, δυναμικές γραμμές, ενεργός διηλεκτρική σταθερά [1]
- Σχήμα 3.4 Διαστάσεις ορθογωνικής μικροταινίας [1]
- Σχήμα 3.5 Μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας [1]
- Σχήμα 3.5 Μετασχηματιστής εμπέδησης [1]
- Σχήμα 3.6 Τροφοδοσία με ομοαξονικό σηματολήπτη [13]
- Σχήμα 3.7 Ομοαξονικός σηματολήπτης [3]
- Σχήμα 3.8 Δίθυρο κύκλωμα [3]

- Σχήμα 3.10 Κύκλωμα τροφοδοσίας με εν σειρά και παράλληλα [1]
- Σχήμα 3.11 Προσαρμογή 100Ω με 50Ω και χρησιμοποίηση μετασχηματιστών  $\lambda/4$  [1]
- Σχήμα 3.12 Δομή δικτύωματος butler matrix 4x4 [10]
- Σχήμα 3.13 Διαιρέτης ισχύος Wilkinson [3]
- Σχήμα 3.14 Κύκλωμα ολίσθησης φάσης, μεταβλητού μήκους γραμμής, διόδους επαφής [3]
- Σχήμα 3.15 Μικροταινιακές κεραίες επιπέδου E και H [1]
- Σχήμα 4.1 Πολυδιαδρομική διάδοση [6]
- Σχήμα 4.2 Φαινόμενο με διασυμβολική παρεμβολή και χωρίς [1]
- Σχήμα 4.3 Δομή MIMO συστήματος [7]
- Σχήμα 4.4 Τεχνική μετάδοσης OFDM [6]
- Σχήμα 4.5 Υλοποίηση OFDM [6]
- Σχήμα 4.6 Σύστημα μεταγωγής δέσμης και προσαρμοστικής κεραίας [1]
- Σχήμα 4.7 Σύστημα προσαρμοστικής στοιχειοκεραίας [1]
- Σχήμα 4.8 Διάγραμμα συστήματος SDMA [1]
- Σχήμα 4.9 SDMA πολλαπλής δέσμης [1]
- Σχήμα 4.10 Επιπεδική στοιχειοκεραία 8x8 με μικροταινιακά στοιχεία [1]
- Σχήμα 4.11 Ρυθμοαπόδοση δικτύου συναρτηση φόρτου [1]
- Σχήμα 4.12 Απομόνωση δύο στοιχείων μέσω MTM-EBG [11]
- Σχήμα 5.1 Σχεδιασμός μεμονωμένου στοιχείου μικροταινιακής κεραίας
- Σχήμα 5.2 Προσαρμογή στα 5GHz
- Σχήμα 5.3 S11-παράμετρος
- Σχήμα 5.4 Συντονισμός στην συχνότητα λειτουργίας 5GHz
- Σχήμα 5.5 Διαγράμματα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατο, πολικό, καρτεσιανό σύστημα
- Σχήμα 5.6 Διαγράμματα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 4X4 σε τρισδιάστατο, πολικό, καρτεσιανό σύστημα
- Σχήμα 5.7 Διαγράμματα ακτινοβολίας απαλαγμένα από πλευρικούς λοβούς
- Σχήμα 5.8 Δημιουργία στοιχειοκεραίας 4X4, απόσταση  $\lambda/2$
- Σχήμα 5.9 S-παράμετροι
- Σχήμα 5.10 Τρισδιάστατο, πολικό, καρτεσιανό διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 4X4
- Σχήμα 5.11 S-παράμετροι απομόνωσης

Σχήμα 5.12 S11 για κεραία με αυξημένη γείωση

Σχήμα 5.13 Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας μαθηματική ανάλυση

Σχήμα 5.14 Πολικό και καρτεσιανό διάγραμμα μαθηματικής ανάλυσης

Σχήμα 5.15 Απομόνωση μεταξύ των στοιχείων, S-παράμετροι

Σχήμα 5.16 Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας με αυξημένη απόσταση στοιχείων μεγαλύτερη  $\lambda/2$

Σχήμα 5.17 Πολικό και καρτεσιανό διάγραμμα ακτινοβολίας

Σχήμα 5.18 Διάγραμμα ακτινοβολίας μαθηματική ανάλυση, 36mm απόσταση στοιχείων

Σχήμα 5.19 Πολικό και καρτεσιανό διάγραμμα ακτινοβολίας μαθηματικής ανάλυσης

Σχήμα 5.20 Περιστροφή διαγράμματος ακτινοβολίας με  $\varphi=90^\circ$ ,  $\theta$ =μεταβαλλόμενο

Σχήμα 5.21 Διαγράμματα ακτινοβολίας περιστροφής λοβού αζυμουθιακά, ανυψωτικά

Σχήμα 5.22 Διαιρέτης ισχύος wilkinson

Σχήμα 5.23 Προσαρμογή 50Ω στα 5GHz

Σχήμα 5.24 S-παράμετροι διαιρέτη ισχύος wilkinson

Σχήμα 5.25 Διαιρέτης ισχύος wilkinson με 16 θύρες εξόδου

Σχήμα 5.30 Διαιρέτες ισχύος Wilkinson και phase shifters

Σχήμα 5.31 Μετατόπιση του λοβού ακτινοβολίας για  $\theta=30^\circ$ ,  $\varphi=90^\circ$

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Οι τηλεπικοινωνίες τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν ραγδαία εξέλιξη ως προς τις ασύρματες επικοινωνίες καθώς έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι στην ζωή του ανθρώπου. Η αύξηση της χωρητικότητας, οι μεγάλες ταχύτητες για επικοινωνία, το δίκτυο 5G είναι το έναυσμα για την εύρεση νέων τεχνολογιών και συστημάτων. Σε όλα τα παραπάνω οι στοιχειοκεραίες παίζουν τον προταγωνιστικό ρόλο καθώς είναι το μέσο με το οποίο μπορεί να επικοινωνεί πομπός-δέκτης. Η αρχιτεκτονική MIMO (multiple input-multiple output) κεραιών έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως είναι η μετατόπιση του λοβού ακτινοβολίας (beam steering) στις τρεις διαστάσεις του χώρου και η αύξηση της χωρητικότητας που είναι το ζητούμενο. Σημαντικό επίσης είναι το beam forming καθώς η τεχνική αυτή βοηθάει στην εύρεση βέλτιστης διαδρομής για μετάδοσης πληροφορίας, ιδιαίτερα σε περιοχές που η επικοινωνία καθιστάται δύσκολη λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης και παραμεβολών. Τέλος 5G δίκτυο αποτελεί την νέα γενιά ασύρματων επικοινωνιών επιτυγχάνοντας ταχύτητες έως και 20Gbps και μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων.

### **Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την ανάλυση και την μελέτη συστημάτων MIMO (πολλαπλές εισόδους -πολλαπλές εξόδους) για ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς 5G, την δημιουργία μιας στοιχειοκεραίας 4X4 με μικροταινιακά στοιχεία, την διαδικασία του beam steering, beam forming, την κατασκευή της στοιχειοκεραίας μέσω του προγράμματος CST-STUDIO. Η παραπάνω μελέτη παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον διότι τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη ως προς την ασύρματη επικοινωνία παρουσιάζει ραγδαία εξέλιξη. Η κάλυψη των αναγκών των ανθρώπων, η αύξηση της χωρητικότητας καθώς και οι μεγάλες ταχύτητες είναι ερωτήματα που πάντα θα απασχολούν τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών, πράγμα που θα οδηγήσει στην ανακάλυψη καινούργιων τεχνολογιών.

## **Σκοπός και στόχοι**

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή μιας MIMO στοιχειοκεραίας 4X4 με μικροταινιακά στοιχεία για ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς στην συχνότητα των 5GHz. Στόχος είναι επίτευξη σάρωσης του λοβού ακτινοβολίας σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου μέσω των phase shifters.

## **Μεθοδολογία**

Η μεθοδολογία της διπλωματικής εργασίας αποτελείται από την μελέτη βιβλίων και άρθρων με τρόπο ώστε να καλύπτεται το σημαντικότερο θεωρητικό υπόβαθρο διπλωματικής. Στην συνέχεια μέσω του λογισμικού CST-STUDIO γίνεται η κατασκευή της στοιχειοκεραίας μέσω μικροταινιακών στοιχείων. Εφόσον συνδυαστούν το θεωρητικό κομμάτι και η κατασκευή της μικροταινιακής στοιχειοκεραίας τέλος έχουν τα συμπεράσματα της ανάλυσης που προέκυψαν.

## **Καινοτομία**

Η μελέτη της στοιχειοκεραίας και η μετατόπιση του λοβού ακτινοβολίας σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου αποτελούν καινοτόμο λύση ως προς τις ασύρματες επικοινωνίες. Για την μετατόπιση του λοβού ακτινοβολίας δεν χρειάζεται να περιστραφή ολόκληρο το σύστημα στοιχειοκεραίας αλλά τοποθετώντας phase shifters μπορεί να μετατοπιστεί και στις τρεις διαστάσεις του χώρου έτσι ώστε να θεωρηθεί MIMO. Επιπλέον υπάρχουν οι ευφυείς ή προσαρμοστικές κεραίες όπου όλα τα παραπάνω γίνονται με την χρήση έξυπνων αλγορίθμων, παρέχοντας καλύτερη μετάδοση πληροφορίας.

## **Δομή**

Η δομή της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται σε κεφάλαια και υποκεφάλαια, αναλύοντας την βασικής θεωρία παραμέτρων κεραίας, στοιχειοκεραιών, μικροταινίες, ασύρματων επικοινωνιών και του τεχνικού σχεδιασμού της στοιχειοκεραίας 4X4, καθώς υπάρχουν πληθώρα σχήματα και πίνακες όπου χρειάζονται για την καλύτερη κατανόηση της εκάστοτε θεωρίας.

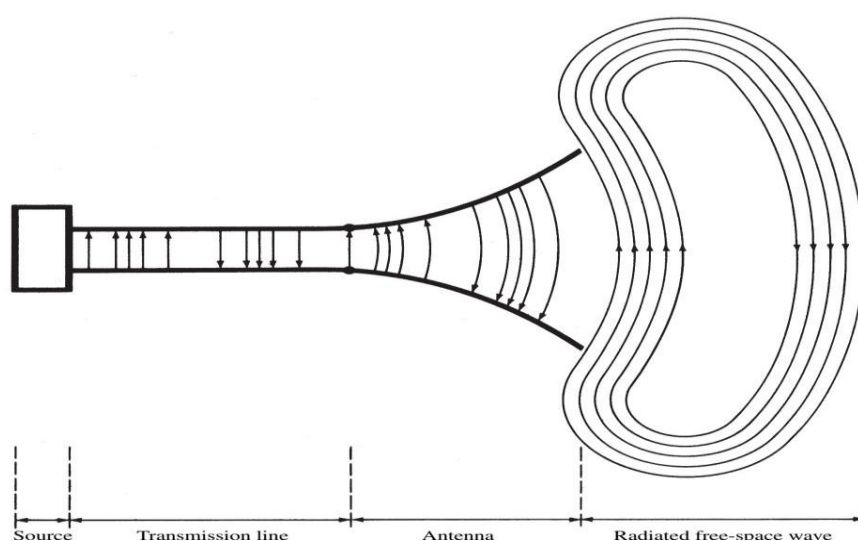


## 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Κεραίες και Βασικές Παράμετροι

Στο παρόν κεφάλαιο θα δοθεί ορισμός για το «τι είναι κεραία» και στην συνέχεια θα αναφερθεί η ιστορική αναδρομή για την πορεία και την εξέλιξη της. Επίσης θα αναφερθούν και θα αναλυθούν σημαντικές παράμετροι των κεραιών για την πλήρη περιγραφή απόδοσης της κεραίας όπως είναι το διάγραμμα ακτινοβολίας, η πυκνότητα ισχύος, η ένταση ακτινοβολίας, καθώς και το κύκλωμα εμπέδησης.

### 1.1 Ορισμός Κεραίας

Με τον όρο κεραία περιγράφεται μια μεταλλική διάταξη κατάλληλη για εκπομπή και λήψη ραδιοκυμάτων. Ο έγκριτος οργανισμός IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) ορίζει την κεραία ως ένα μέσο κατάλληλο για την εκπομπή και λήψη ραδιοκυμάτων. Στην ουσία η κεραία είναι η ενδιάμεση δομή μεταξύ ελεύθερου χώρου και μιας διάταξης κυματοδότησης ή γραμμής μεταφοράς όπου μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα στον χώρο από μια πηγή εκπομπής που ονομάζεται κεραία εκπομπού. Η μεταφορά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων οδηγούνται σε μια άλλη κεραία, που ονομάζεται κεραία δέκτη όπου λαμβάνει τα οδόνοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και τα μετατρέπει σε ηλεκτρικά σήματα στην γραμμή μεταφοράς ή στον κυματοδηγό. Παρόλα αυτά μια κεραία μπορεί να είναι και πομπός και δέκτης.

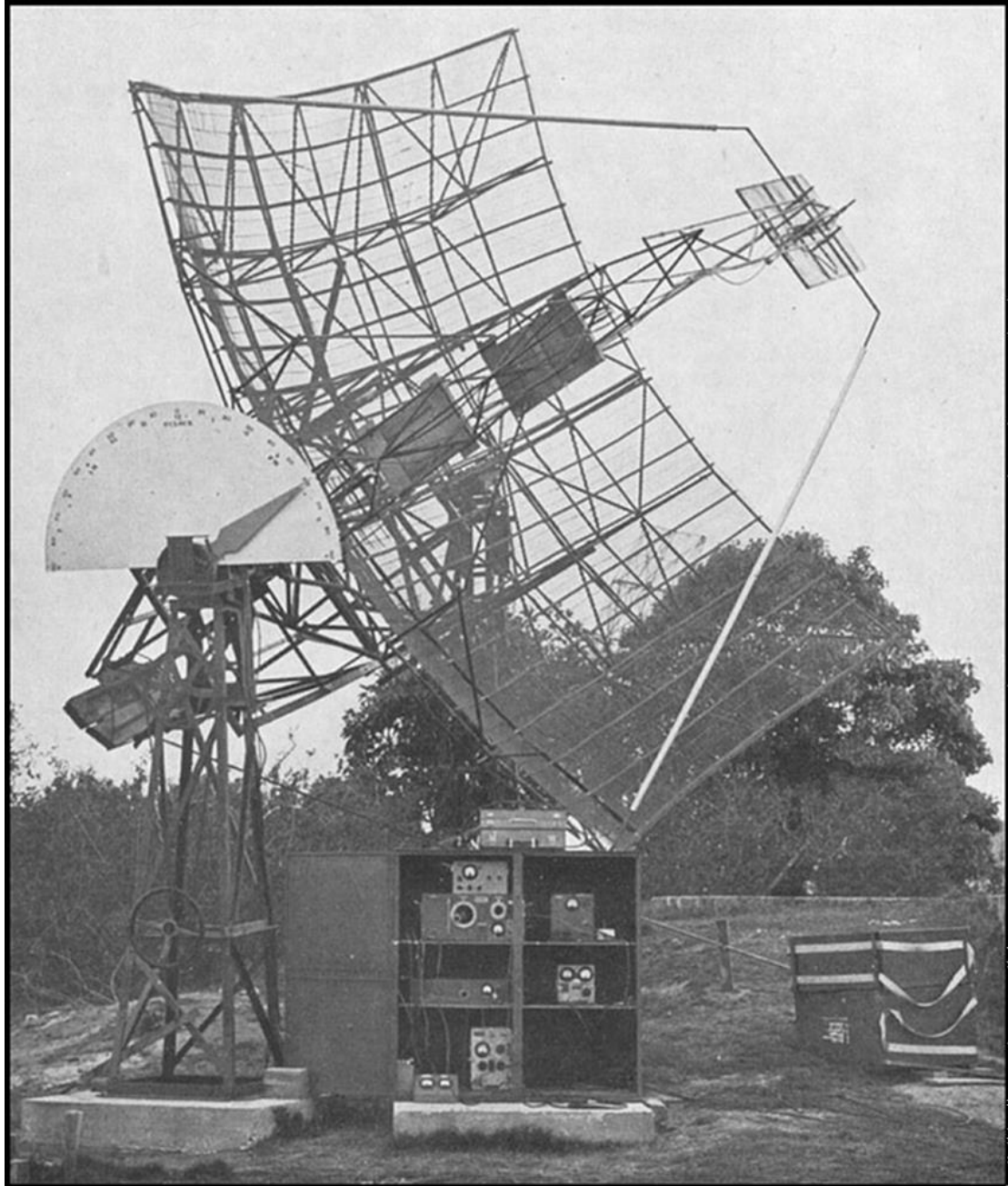


Σχήμα 1.1 Η κεραία ως μεταβατική διάταξη μεταξύ πηγής και ελεύθερου χώρου [1]

## 1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η ιστορική εξέλιξη των κεραιών ξεκινά από τον James Clerk Maxwell ο οποίος κατάφερε να θεμελιώσει τις σχέσεις του ηλεκτρομαγνητισμού μέσω σημαντικών εξισώσεων γνωστές και ως εξισώσεις του Maxwell. Επίσης απέδειξε ότι το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο και ότι τόσο το φως όσο και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται μέσω κυματικών διαταραχών της ίδιας ταχύτητας. Το έργο του δημοσιεύτηκε το 1873. Το 1886 ο καθηγητής Heinrich Rudolf Hertz κατάφερε να παράγει σπινθήρα μήκους κύματος 4m στο διάκενο ενός διπόλου  $\lambda/2$ . Πραγματική εκπομπή σήματος επιτεύχθηκε το 1901 από τον Guglielmo Marconi ο οποίος έστειλε τηλεγραφικά σήματα που διέσχισαν τον ατλαντικό ωκεανό πράγμα που επέτρεψε την επικοινωνία σε δύο μέρη στέλνοντας αλφαριθμητικούς χαρακτήρες κωδικοποιημένα σε ένα αναλογικό σήμα. Η κεραία εκπομπής αποτελούνταν από 50 κατακόρυφα σύρματα τα οποία στηρίζονταν σε ξύλινους στύλους 60m και η κεραία λήψης ήταν ένα τεντωμένο σύρμα 20m. Με την έναρξη του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου παρουσιάστηκε ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας των κεραιών που ένας παράγοντας οφειλόταν στην εφεύρεση μικροκυματικών πηγών όπως klystron, magnetron με συχνότητα πάνω από 1GHz. Μετά το πέρας του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου άρχισαν να υλοποιούνται διάφοροι τύποι στοιχείων ακτινοβολίας πράγμα που κατέστησε την καλύτερη κατανόηση και βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας. Οι κεραίες αυτές μπορεί να έχουν την μορφή ανοίγματος και χρησιμοποιήθηκαν στις τηλεπικοινωνίες, ραντάρ. Το 1970 παρουσιάστηκαν οι κεραίες μικροταινίας (microstrip ή patch antennas) που χρησιμοποιούνται σε συστήματα επικοινωνιών υψηλών αποδόσεων όπως σε συστήματα αεροσκαφών. Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των κεραιών έχει σημειωθεί σημαντική ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών καθώς μπορούν να σταλούν πληροφορίες σε οποιαδήποτε γωνία του κόσμου. Με την εξέλιξη των ασυρμάτων δικτύων από 1G φτάνουμε στην νέα εποχή 5G. Η πρώτη γενιά 1G είχε περιορισμένη γεωγραφική κάλυψη και είχε ως στόχο την υποστήριξη και μετάδοση της φωνής. Η δεύτερη γενιά 2G με την υιοθέτηση της ψηφιακής τεχνολογίας μπορούσε να υποστηριχθεί η μετάδοση φωνής και μικρών μηνυμάτων με μεγάλη αξιοπιστία. Η Τρίτη γενιά 3G είναι υψηλού ρυθμού μετάδοσης και υποστήριξη των υπηρεσιών φωνής και δεδομένων. Η τέταρτη γενιά 4G έχει ως στόχο να παρέχουν υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας αλλά και υψηλής χωρητικότητας. Τέλος στην σήμερα

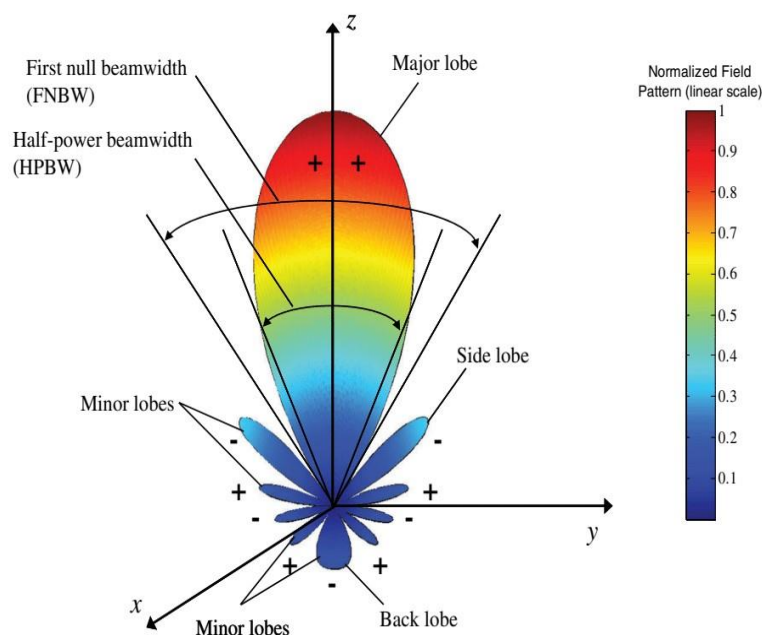
εποχή έρχονται τα δίκτυα πεμπτης γενιάς 5G όπου προσφέρουν αρκετές βελτιώσεις όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης την κάλυψη, την αξιοπιστία και ένας από τους κύριους λόγους είναι ο αυξανόμενος αριθμός τελικών συσκευών IoT (internet of things) και συνεχής αύξηση των δεδομένων.



Σχήμα 1.2 Ρανταρ κεραία δευτέρου παγκοσμίου πολέμου [12]

### 1.3 Ανάλυση Διαγράμματος Ακτινοβολίας

Διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας είναι η γραφική αναπράσταση των ιδιοτήτων ακτινοβολίας της κεραίας ως συνάρτηση χωρικών συντεταγμένων. Στις περισσότερες περιπτώσεις το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας καθορίζεται στην περιοχή μακρινού πεδίου. Επίσης στις ιδιότητες ακτινοβολίας περιλαμβάνονται η πυκνότητα ροής ισχύος, η ένταση ακτινοβολίας, η ένταση του πεδίου, η κετευθυντικότητα και η πόλωση. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας χωρίζονται σε διάγραμμα πλάτους του πεδίου και σε διάγραμμα ισχύος αντίστοιχα το οποίο περιγράφεται σε λογαριθμική κλίμακα ή σε decibel.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα ακτινοβολίας Κεραίας [1]

Στην εικόνα 1.3 παρατηρείται ότι υπάρχουν περισσότεροι από έναν λοβούς. Οι λοβοί αυτοί διαχωρίζονται σε κύριους ή μέγιστους λοβούς, σε δευτερεύοντες, σε πλευρικούς και οπίσθιους λοβούς. Ο κύριος λοβός είναι αυτός που περιέχει την διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Δευτερεύοντες λοβοί χαρακτηρίζονται εκείνη εκτός του κύριου λοβού. Πλευρικός λοβός χαρακτηρίζεται εκείνος ο λοβός που έχει διεύθυνση διαφορετική από την επιθυμητή και συνήθως γειτνοιάζει με τον κύριο λοβό. Οπίσθιος λοβός είναι εκείνος ο οποίος σχηματίζει γωνία περίπου  $180^\circ$  από τον κύριο λοβό. Επιπλέον οι πλευρικοί λοβοί είναι μεγαλύτεροι κατά κανόνα από τους

δευτερεύοντες λοβούς και σταθμές πλευρικών λοβών -20db και μικρότερες είναι μη αποδεκτές.

Επίσης μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι το εύρος δέσμης που είναι ο δαιχωρισμός δύο σημείων μεταξύ του κύριου λοβού. Σημαντικό ρολο παρουσιάζει το εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος ή γωνία ημίσειας ισχύος (HPBW) που είναι το μισό της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας και η γωνιακή απόσταση μεταξύ των πρώτων μηδενισμών (FNBW) που μηδενίζεται η ενέργεια μετάδοσης. Το εύρος δέσμης της κεραίας επηρεάζει τους πλευρικούς λοβούς ανάλογα με την αύξηση ή την μείωση της και αντιστρόφως. Επιπλέον η γωνία ημίσειας ισχύος υπολογίζεται στα -3dB του κύριου λοβού εφόσον το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι στην κλίμακα των dB.

### 1.3.1 Περιοχές πεδίου ακτινοβολίας

Ο χώρος στον οποίο μια κεραία ακτινοβολεί χωρίζεται σε τρεις περιοχές ή ζώνες. Η πρώτη περιοχή περιλαμβάνει το κοντινό αντιδρόν πεδίο, η δεύτερη περιοχή περιλαμβάνει το κοντινό πεδίο ακτινοβολίας ή αλλιώς ζώνη Fresnel και η τελευταία περιοχή είναι το μακρινό πεδίο ή αλλιώς ζώνη Fraunhofer.

Η απόσταση του κοντινού αντιδρόν πεδίου γύρω από την κεραία ορίζεται ως εξής:

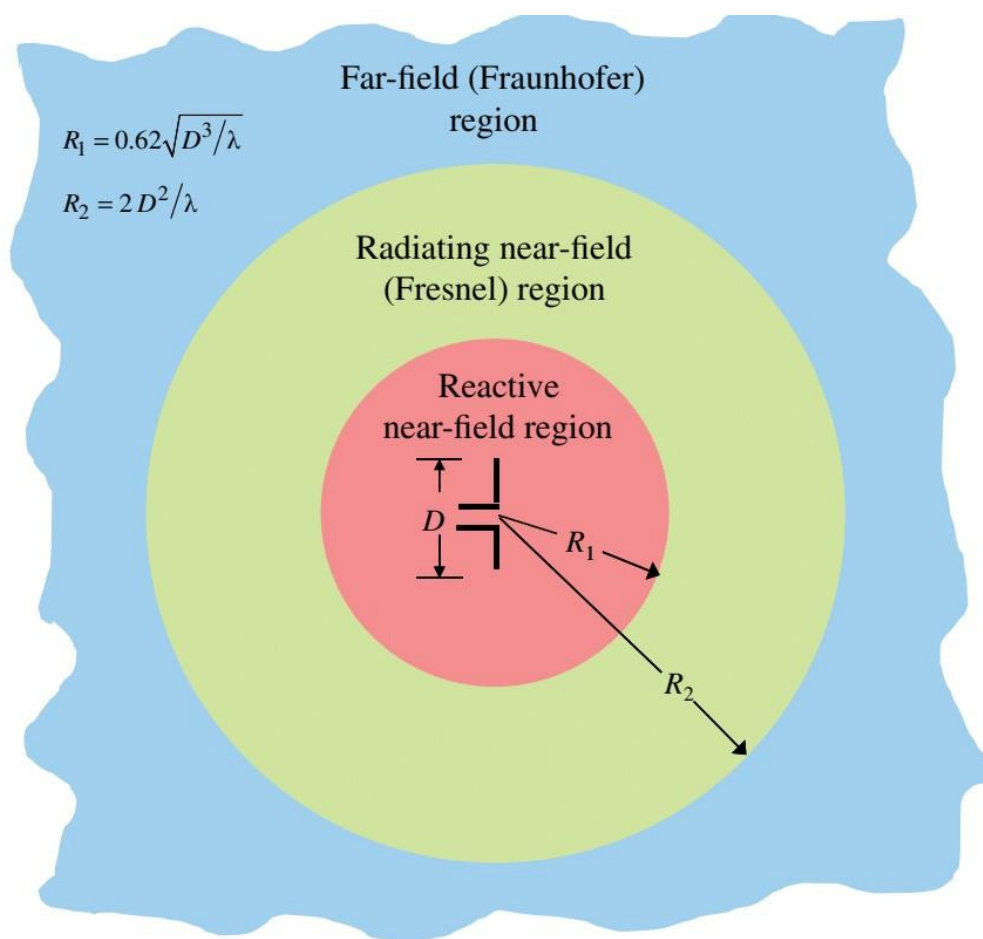
$$R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (1.1)$$

Όπου R είναι η απόσταση από την κεραία, D είναι η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας, λ είναι το μήκος κύματος. Επίσης το D πρέπει να είναι μεγάλο συγκριτικά με το μήκος κύματος λ (D>λ).

Η δεύτερη απόσταση που περιλαμβάνει το κοντινό πεδίο ακτινοβολίας γύρω από μια κεραία ορίζεται ως:

$$R_2 = 2D^2/\lambda \quad (1.2)$$

Οτιδήποτε πέρα από την περιοχή του κοντινού πεδίου, ορίζεται η έννοια του μακρινού πεδίου στο οποίο γίνονται και οι περισσότερες παρατηρήσεις.



Σχήμα 1.4 Περιοχές πεδίου κεραίας [1]

#### 1.4 Πυκνότητα ισχύος

Η πυκνότητα ισχύος είναι το μέγεθος με το οποίο μπορεί να δοθεί η περιγραφή της ισχύος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εφόσον θεωρούνται φορείς ισχύος και ενέργειας. Για την περιγραφή της πυκνότητας ισχύος χρησιμοποιείται το διάνυσμα Poynting.

$$W = E \times H \quad (1.3)$$

Όπου  $W$  είναι το στιγμιαίο διάνυσμα Poynting σε ( $W/m^2$ ),  $E$  η στιγμιαία ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ( $V/m$ ),  $H$  η στιγμιαία ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ( $A/m$ ).

Εφόσον το από το διάνυσμα Poynting εκφράζεται η πυκνότητα ισχύος η συνολική ισχύς σε μια κλειστεί επιφάνεια ορίζεται ως εξής:

$$P = \oint W \cdot ds \quad (1.4)$$

Δηλαδή η συνολική ισχύς είναι η διπλή ολοκλήρωση της πυκνότητας ισχύος του διανύσματος Poynting σε μια κλειστεί επιφάνεια  $ds$ .

Από τα παραπάνω περισσότερο ενδιαφέρον έχει η μέση πυκνότητα ισχύος όπου υπολογίζεται μέσω της σχέσης (1.5):

$$W_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[E \times H^*] \quad (1.5)$$

Συνεπώς η μέση ακτινοβολούμενη ισχύς υπολογίζεται:

$$P_{av} = \frac{1}{2} \oint \text{Re}(E \times H^*) \cdot ds \quad (1.6)$$

Επίσης ακόμα ένα στοιχείο είναι η ένταση ακτινοβολίας που ισχύει στο μακρινό πεδίο και υπολογίζεται από την σχέση (1.7)

$$U = r^2 W_{rad} \quad (1.7)$$

Η ένταση ακτινοβολίας είναι ο πολλαπλασιασμός της μέσης πυκνότητας ισχύος του διανύσματος Poynting με το τετράγωνο της απόστασης.

$U$  είναι η ένταση ακτινοβολίας σε (W/μονάδα στερεάς γωνίας)

$W_{rad}$  είναι η πυκνότητα ακτινοβολίας σε ( $W/m^2$ )

## 1.5 Κατευθυντικότητα κεραίας

Ένα επιπλέον σημαντικό μέγεθος της κεραίας είναι η κατευθυντικότητα. Η κατευθυντικότητα ορίζεται ως ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας μιας κεραίας ως προς μια διεύθυνση, προς τη μέση ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπει συνολικά η

κεραία προς όλες τις κατευθύνσεις. Δεδομένου του ότι σε μια ισοτροπική κεραία η ένταση ακτινοβολίας  $U$  δεν εξαρτάται από τις γωνίες  $\theta, \varphi$  η ένταση ακτινοβολίας υπολογίζεται ως εξής:

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (1.8)$$

Όπου  $P_{rad}$  είναι η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς. Συνεπώς η κατευθυντικότητα μιας μη-ισοτροπικής κεραίας υπολογίζεται από την σχέση (1.9)

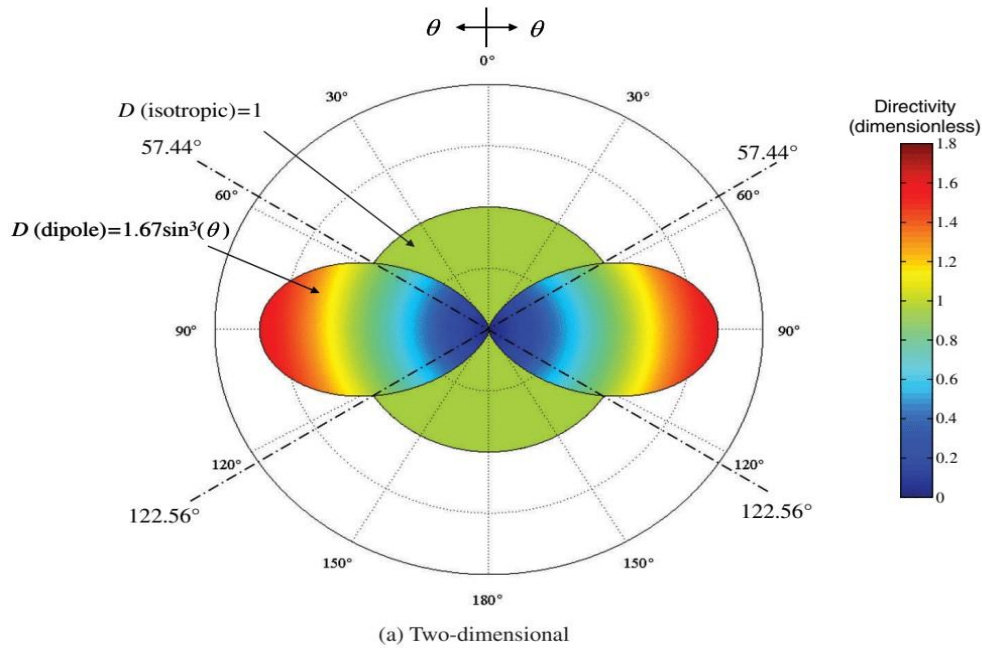
$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1.9)$$

Όταν δεν προσδιορίζεται η διεύθυνση, τότε εννοείται η διεύθυνση μέγιστης έντασης άρα και η μέγιστη κατευθυντικότητα.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (1.10)$$

όπου  $D$  συμβολίζει την κατευθυντικότητα,  $D_0$  είναι η μέγιστη κατευθυντικότητα,  $U$  σε (W/ανά μονάδα στερεάς γωνίας) είναι η ένταση ακτινοβολίας,  $U_{max}$  σε (W/ανά μονάδα στερεάς γωνίας) είναι η μέγιστη ένταση ακτινοβολίας,  $U_0$  σε (W/ανά μονάδα στερεάς γωνίας) είναι η ένταση ακτινοβολίας ισοτροπικής κεραίας,  $P_{rad}$  σε (W) είναι η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς.





Σχήμα 1.5 Διάγραμμα κατευθυντικότητας διπόλου  $\lambda/2$  [1]

Επιπλέον για να περιγράψουμε την κατευθυντικότητα, χρησιμοποιείται και άλλο ένα μέγεθος που ονομάζεται στερεά γωνία εύρους δέσμης. Συνήθως η ιδιότητα αυτή είναι χρήσιμη όταν ο κύριος λοβός είναι αρκετά στενός και οι πλευρικοί λοβοί αμελητέοι. Οπότε η μέγιστη κατευθυντικότητα ορίζεται από την σχέση (1.11):

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi}{\theta_{1r}\theta_{2r}} \quad (1.11)$$

Το  $\Omega_A$  είναι η στερεά γωνία δέσμης

$$\Omega_A \approx \theta_{1r}\theta_{2r} \quad (1.12)$$

Εαν το εύρος δέσμης είναι σε μοίρες τότε η μέγιστη κατευθυντικότητα παίρνει την μορφή

$$D_0 = \frac{41,253}{\theta_{1r}\theta_{2r}} \quad (1.13)$$

Και για επιπεδικές στοιχειοκεραίες παίρνει την μορφή

$$D_O = \frac{32,400}{\theta_{1r}\theta_{2r}} \quad (1.14)$$

## 1.6 Απολαβή της κεραίας

Ενα άλλο χρήσιμο χαρακτηριστικό για την περιγραφή της κεραίας είναι η απολαβή ή κέρδος όπου χρησιμοποιείται για την περιγραφή της απόδοσης της κεραίας. Στην ουσία το κέρδος της κεραίας είναι ο λόγος της κατευθυντικότητας προς την ισχύ εισόδου.

$$G = \frac{4\pi U}{P_{in}} \quad (1.15)$$

Επίσης το κέρδος ισχύος μια κεραίας υπολογίζεται συνήθως ως προς την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Στην συνέχεια συμπερενέται ότι η ισχύς εισόδου τροφοδοσίας έχει άμεση σχέση με την ακτινοβολούμενη ισχύς.

$$P_{rad} = e_{cd}P_{in} \quad (1.16)$$

Το  $e_{cd} = e_c e_d$  εκφράζει την απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας. Τα μεγέθη  $e_c$ ,  $e_d$  εκφράζουν την απόδοση λόγω πεπερασμένης αγωγιμότητας της κεραίας και την διηλεκτρική απόσταση αντίστοιχα και υπολογίζονται πειραματικά.

Για το κέρδος χωρίς απώλειες, όπου υπάρχει τέλεια προσαρμογή δηλαδή η αντίσταση εισόδου είναι ίση με την χαρακτηριστική αντίσταση  $Z_{in}=Z_0$  το κέρδος εκφράζεται ως:

$$G(\theta, \varphi) = e_{cd}D(\theta, \varphi) \quad (1.17)$$

Για το κέρδος στο οποίο συμπεριλαμβάνονται και οι απώλειες δηλαδή, υπάρχουν ανακλάσεις στην γραμμή μεταφοράς τότε το κέρδος υπολογίζεται:

$$G_{re}(\theta, \varphi) = e_o D(\theta, \varphi) \quad (1.18)$$

Το  $e_o = e_r e_c e_d$  εκφράζει την συνολική απόδοση της κεραίας. Ο παραπάνω όρος μπορεί να απλοποιηθεί ως  $e_o = e_r (1 - |\Gamma|^2)$ . Το  $\Gamma$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης και υπολογίζεται από την σχέση (1.19)

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (1.19)$$

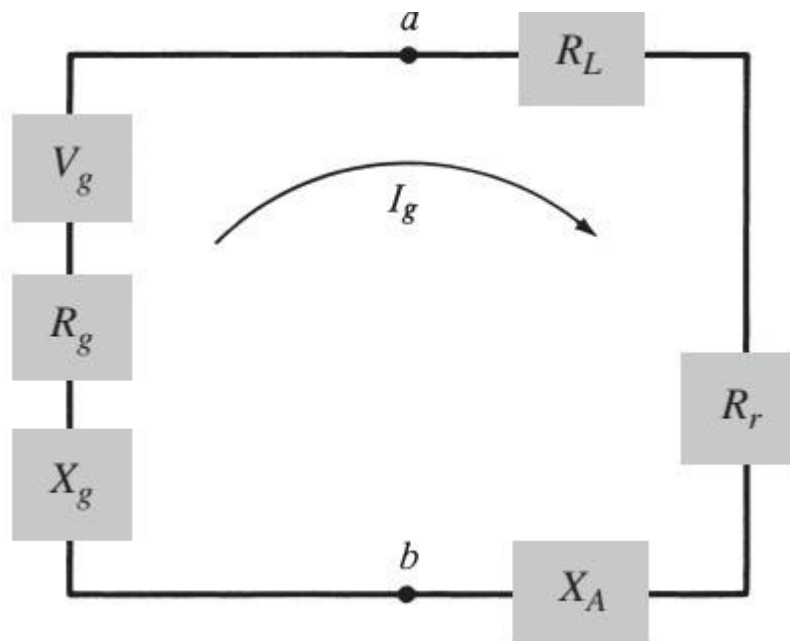
$Z_{in}$ ,  $Z_o$  είναι η αντίσταση εισόδου και η χαρακτηριστική αντίσταση αντίστοιχα. Όπως προαναφέρθηκε αν η αντίσταση εισόδου είναι ίση με την χαρακτηριστική τότε θα ο συντελεστής ανάκλασης θα είναι 0 ( $\Gamma=0$ ), συνεπώς θα υπάρχει προσαρμογή. Σε αυτήν την περίπτωση το κέρδος με και χωρίς απώλειες θα είναι ίσα. Επίσης μπορεί να υπολογιστεί και ο λόγος τάσεων στάσιμου κύματος VSWR.

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (1.20)$$

Στην περίπτωση που υπάρχει προσαρμογή το VSWR ισούται με 1 (VSWR=1).

## 1.7 Κύκλωμα και εμπέδηση κεραίας

Η εμπέδηση εισόδου είναι ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό για την κεραία. Ορίζεται ως η συνθετη αντίσταση στους ακροδέκτες της κεραίας. Η χρήση κατάλληλου ισοδύναμου κυκλώματος μπορεί να οδηγήσει στην μέγιστη μεταφορά ισχύος και να οδηγηθεί μέσω των γραμμών μεταφοράς στην κεραία. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα που παρουσιάζεται είναι το κύκλωμα Thevenin.



Σχήμα 1.6 Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για εκπομπή [1]

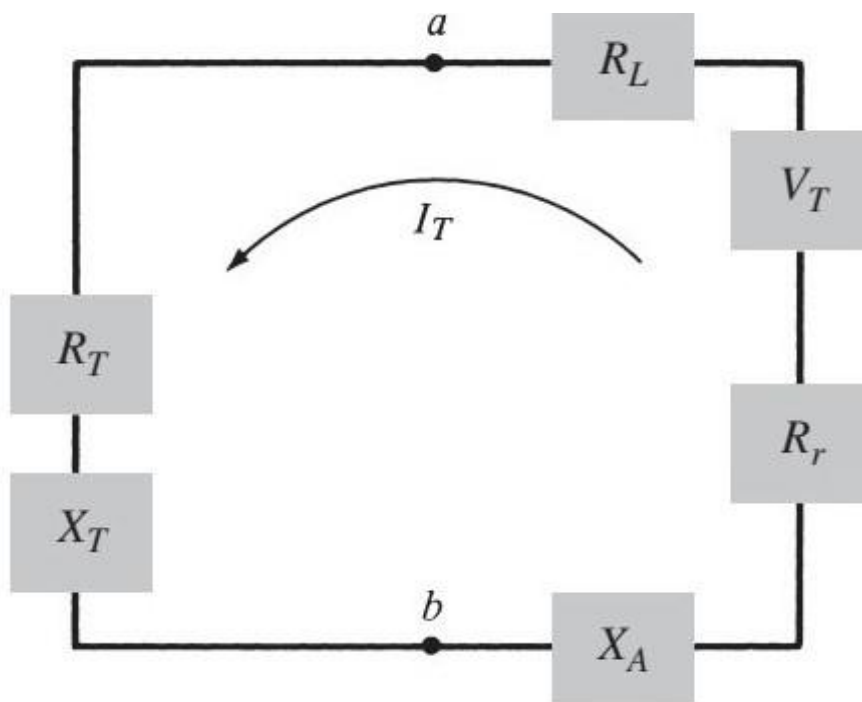
Στην εικόνα (1.6) αποδίδεται η εμπέδηση εισόδου που είναι  $Z_g = R_g + jX_g$ .

Η  $R_L$  είναι η αντίσταση απωλειών κεραίας,  $R_r$  είναι η αντίσταση ακτινοβολίας,  $X_A$  είναι η άεργη αντίσταση στους ακροδέκτες a-b,  $R_g$  το ωμικο μέρος της εμπέδησης και  $X_g$  είναι το άεργο μέρος της εμπέδησης. Συνεπώς αν θεωρηθεί ότι χρησιμοποιείται σε κατάσταση εκπομπής τότε η μέγιστη ισχύς που αποδίδεται στην κεραία σε συνθήκη συζυγούς προσαρμογής, δηλαδή  $R_r + R_L = R_g$ ,  $X_A = -X_g$  είναι:

$$P_S = \frac{|V_g|^2}{4} \left[ \frac{1}{R_r + R_L} \right] \quad (1.21)$$

Κάνοντας την ίδια διαδικασία αλλά αυτή την φορά να είναι η κεραία σε κατάσταση λήψης, η ισχύς που λαμβάνεται στην κεραία υπό συνθήκες συζυγούς προσαρμογής με  $V_T$  ανάλογη της  $V_g$  είναι:

$$P_C = \frac{|V_T|^2}{4} \left[ \frac{1}{R_r + R_L} \right] \quad (1.22)$$



Σχήμα 1.7 Ισοδύναμο κατα Thevenin για λήψη [1]

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° : Στοιχειοκεραίες

Στοιχειοκεραία είναι μια δομή αποτελούμενη από πολλαπλά στοιχεία ακτινοβολίας με συγκεκριμένη ηλεκτρική και γεωμετρική μορφή. Λόγω του ότι ένα μονο στοιχείο παρέχει χαμηλή κατευθυντικότητα και απολαβή, η στοιχειοκεραία έρχεται να λύσει αυτό το πρόβλημα προκειμένου να ικανοποιούνται επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Για να επιτευχθεί η αύξηση της κατευθυντικότητας και της απολαβής συναπάγεται αύξηση του ηλεκτρικού μέγεθους της κεραίας ή πολλαπλά στοιχεία χωρίς απαραίτητη αύξηση του μεγέθους. Επίσης σημαντικό ρόλο για δημιουργηθεί ένα διάγραμμα ακτινοβολίας με πολύ μεγάλη κατευθυντικότητα και απολαβή παρουσιάζει η γεωμετρική τους διάταξη της στοιχειοκεραίας, το πλάτος, η φάση, η απόσταση μεταξύ των στοιχείων. Στο παρόν κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η στοιχειοκεραία δύο στοιχείων, η γραμμικές στοιχειοκεραίες, επιπεδικές στοιχειοκεραίες και η κατευθυντικότητα που παρουσιάζουν.

### 2.1 Στοιχειοκεραία δύο στοιχείων

Εστω μια στοιχειοκεραία δύο στοιχείων στον άξονα y-z όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Η κεραίες βρίσκονται σε απόσταση d μεταξύ τους, και από το κέντρο απέχουν d/2, και ένα σημείο O στο μακρινό πεδίο που απέχει απόσταση r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub> αντίστοιχα και απόσταση r από το κέντρο. Το ολικό πεδίο που ακτινοβολείται εφόσον δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ τους υπολογίζεται από την σχέση 2.1

$$E = E_1 + E_2 = \widehat{\alpha}_\theta j \frac{kI_0 l}{4\pi} \left[ \frac{e^{-j\left(kr_1 - \left(\frac{\beta}{2}\right)\right)}}{r_1} \cos\theta_1 + \frac{e^{-j\left(kr_2 - \left(\frac{\beta}{2}\right)\right)}}{r_2} \cos\theta_2 \right] \quad (2.1)$$

Όπου β είναι η διαφορά φάσης των στοιχείων, το κ=2π/λ και η διέγερση είναι ίδια για τα δύο στοιχεία. Στην συνέχεια με λίγη γεωμετρία και παρατηρήσεις στο μακρινό πεδίο συμπεράνονται τα εξής

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta \quad (2.2)$$

$$r_1 = r - \frac{d}{2} \cos\theta \quad (2.3)$$

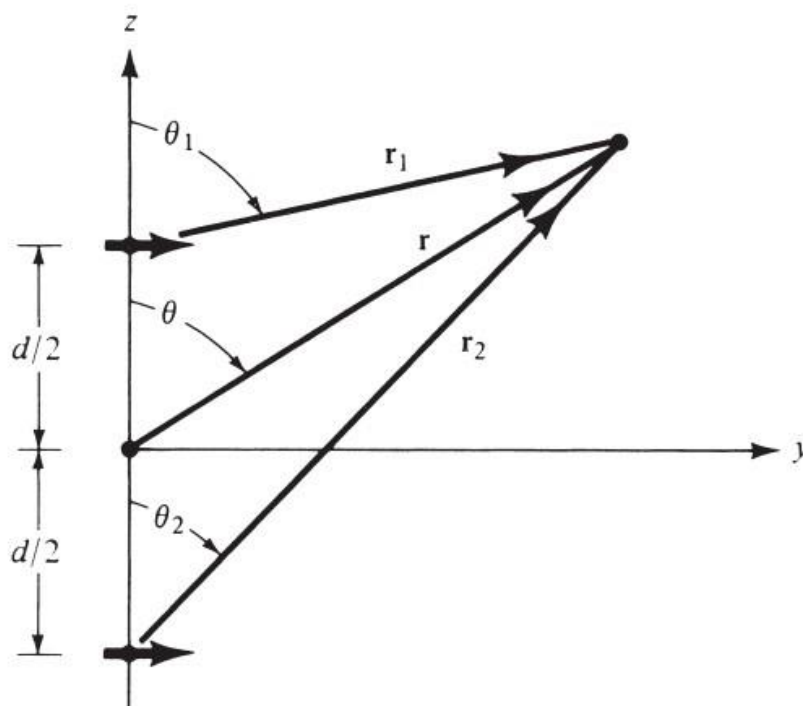
$$r_2 = r + \frac{d}{2} \cos\theta \quad (2.4) \quad \text{με } r = r_1 = r_2$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω η εξίσωση (2.1) λαμβάνει την εξής μορφή

$$\mathbf{E} = \widehat{\alpha}_{\theta} \mathbf{j} \frac{kI_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\theta \left[ e^{j\left(\frac{kdcos\theta+\beta}{2}\right)} + e^{-j\left(\frac{kdcos\theta+\beta}{2}\right)} \right] \Rightarrow$$

$$\mathbf{E} = \widehat{\alpha}_{\theta} \mathbf{j} \frac{kI_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\theta \left[ 2\cos\left(\frac{1}{2}(kdcos\theta + \beta)\right) \right] \quad (2.5)$$

Ο δεύτερος όρος πολλαπλασιάστηκε και διαιρέθηκε με το δύο για να εφαρμοστεί ο τύπος του Euler. Η σχέση (2.5) περιγράφει το ολικό πεδίο μιας κεραίας που είναι ο πολλαπλασιασμός ενός μεμονωμένου στοιχείου με τον δεύτερο παράγοντα που ονομάζεται παράγοντας συστοιχίας.



Σχήμα 2.1 Στοιχειοκεραία δύο στοιχείων [1]

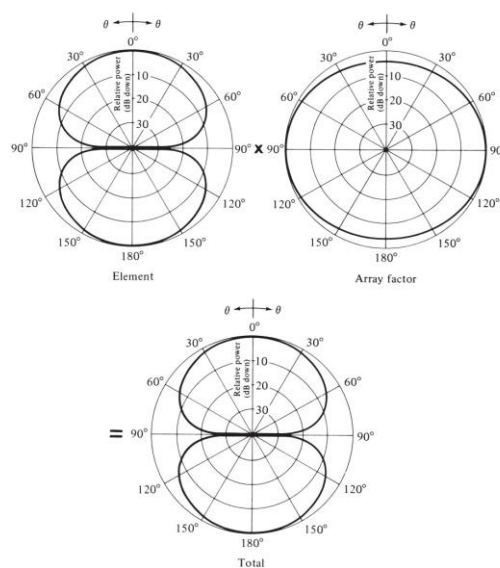
### 2.1.1 Παράγοντας συστοιχίας

Όπως προαναφέρθηκε στην εξίσωση (2.5) ο δεύτερος όρος αποτελεί τον παράγοντα συστοιχίας (array factor).

$$AF = 2\cos\left(\frac{1}{2}(kdcos\theta + \beta)\right) \quad (2.6)$$

Στην ουσία ο πολλαπλασιασμός του μεμονωμένου στοιχείου με τον παράγοντα συστοιχίας αποτελεί μια διαδικασία που ονομάζεται πολλαπλασιασμός διαγραμάτων για στοιχειοκεραίες πανωμοιότυπων στοιχείων και είναι ανάλογη με τον πολλαπλασιασμό διαγραμάτων που ισχύει για συνεχές πηγες. Παρόλα αυτά η παραπάνω διαδικασία ισχύει και για οποιοδήποτε αριθμό στοιχείων ανεξαρτήτως του άμα έχουν ίδια φάση, πλάτος, απόσταση μεταξύ τους.

Επιπλέον ο παράγοντας συστοιχίας είναι μια συνάρτηση που εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων, την γεωμετρική διάταξη της στοιχειοκεραίας, την φάση, το πλάτος και την απόσταση μεταξύ τους. Εφόσον ο παράγοντας συστοιχίας δεν εξαρτάται από τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά των στοιχείων, μπορεί να υπολογιστεί από την αντικατάσταση των στοιχείων με ισοτροπικές πηγές. Συνεπώς το ολικό πεδίο μιας στοιχειοκεραίας υπολογίζεται από την εξίσωση (2.5). Επιπλέον κάθε στοιχειοκεραία έχει τον δικό της παράγοντα συστοιχίας και μπορεί να πάρει μια απλούστερη μορφή εφόσον τα στοιχεία έχουν ίδιο πλάτος, φάση, απόσταση.

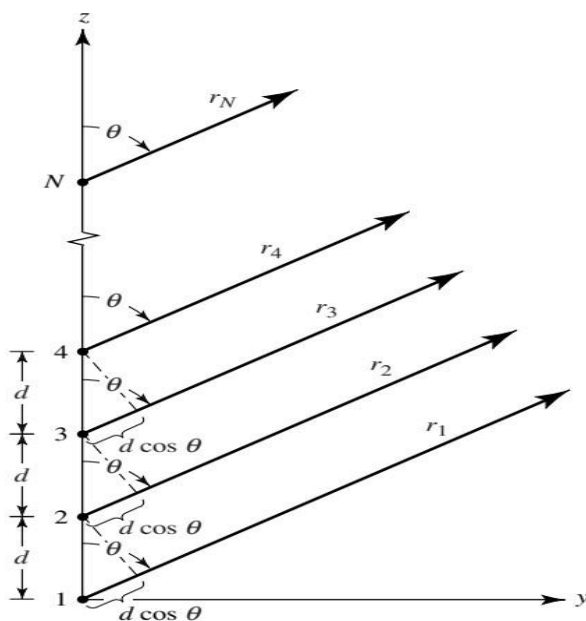


Σχήμα 2.2 Διάγραμμα ολικού πεδίου ( $\beta=0$ ,  $d=\lambda/4$ ) [1]



## 2.2 Γραμμικές στοιχειοκεραίες

Μια στοιχειοκεραία με  $N$  πλήθος πανομοιότυπων στοιχείων όπως παρουσιάζεται στο σχήμα (2.3), με ίσα πλάτη και το καθένα στοιχείο με προοδευτική μεταβολή φάσης ονομάζεται ομοιόμορφη στοιχειοκεραία. Αν είναι και γραμμική τότε αναφέρεται και ως ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία ( uniform linear array).



Σχήμα 2.3 Γραμμική στοιχειοκεραία  $N$  στοιχείων [1]

Ο παράγοντας συστοιχείας μπορεί να υπολογιστεί αντιμετωπίζοντας στα στοιχεία ως ισοτροπικές (σημειακές) πηγές. Συνεπώς ο παράγοντας συστοιχείας θα έχει την εξής μορφή

$$AF = 1 + e^{j(kd\cos\theta+\beta)} + e^{j2(kd\cos\theta+\beta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd\cos\theta+\beta)}$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd\cos\theta+\beta)}$$

Όπου μπορεί να εκφραστεί και ως

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2.7)$$

$$\psi = kd\cos\theta + \beta$$

Επιπλέον μπορεί να διατυπωθεί και με μια εναλλακτική μορφή, πολλαπλασιάζοντας την (2.7) με το  $e^{j\psi}$  και αφαιρώντας την (2.7) με την (2.8)

$$(AF)e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} \dots + e^{j(N-1)\psi} + e^{jN\psi} \quad (2.8)$$

$$(AF)e^{j\psi} - (AF) = e^{jN\psi} - 1$$

$$AF(e^{j\psi} - 1) = e^{jN\psi} - 1 \Rightarrow$$

$$AF = \frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} = e^{j(\frac{N-1}{2})\psi} \left[ \frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\sin(\frac{1}{2}\psi)} \right]$$

Επιλέγοντας για σημείο αναφοράς το κέντρος της στοιχειοκεραίας ο παραγοντας συστοιχείας υπολογίζεται από την (2.9)

$$AF = \left[ \frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\sin(\frac{1}{2}\psi)} \right] \quad (2.9)$$

Αν το  $\psi$  τείνει στο 0 τότε ο παράγοντας συστοιχείας υπολογίζεται ως εξής:

$$AF = \left[ \frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\frac{1}{2}\psi} \right] \quad (2.10)$$

Επίσης οι εξισώσεις (2.9), (2.10) μπορούν να γραφούν και σε κανονικοποιημένη μορφή που είναι οι παρακάτω:

$$(AF)_n = \frac{1}{N} \left[ \frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\sin(\frac{1}{2}\psi)} \right] \quad (2.11)$$

$$(AF)_n = \left[ \frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\frac{N}{2}\psi} \right] \quad (2.12)$$

Με τις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να βρεθούν οι γωνίες μηδενισμών και μεγίστων καθώς και η γωνία ημίσειας ισχύος (-3db) για την ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία.

$$\text{Γωνίες μηδενισμού } \sin\left(\frac{N}{2}\psi\right) = 0 \Rightarrow \frac{N}{2}\psi = \pm n\pi \Rightarrow \theta_n = \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{2n}{N}\pi\right)\right]$$

$$\text{Όπου } n=1,2,3,\dots \quad (2.13)$$

$$n \neq N, 2N, 3N \dots$$

$$\text{Γωνίες μεγίστων: } \frac{1}{2}\psi = \pm m\pi \Rightarrow \theta_m = \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}(-\beta \pm 2m\pi)\right] \quad (2.14)$$

$$m=0,1,2$$

$$\text{Εύρος δέσμης μισής ισχύος: } \frac{N}{2}\psi = \pm 1.391 \Rightarrow \theta_n = \cos^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{2.782}{N}\right)\right] \quad (2.15)$$

$$\text{Επίσης μπορεί να γραφτεί και ως } \theta_h = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{2.782}{N}\right)\right] \quad (2.16)$$

Για μεγάλες τιμές της απόστασης σε σύγκριση του μήκους κύματος ( $d \gg \lambda$ ) η (2.15) λαμβάνει την μορφή

$$\theta_h = \frac{\pi}{2} - \frac{\lambda}{2\pi d} \left[ \frac{\lambda}{2\pi d} \left( -\beta \pm \frac{2.782}{N} \right) \right] \quad (2.17)$$

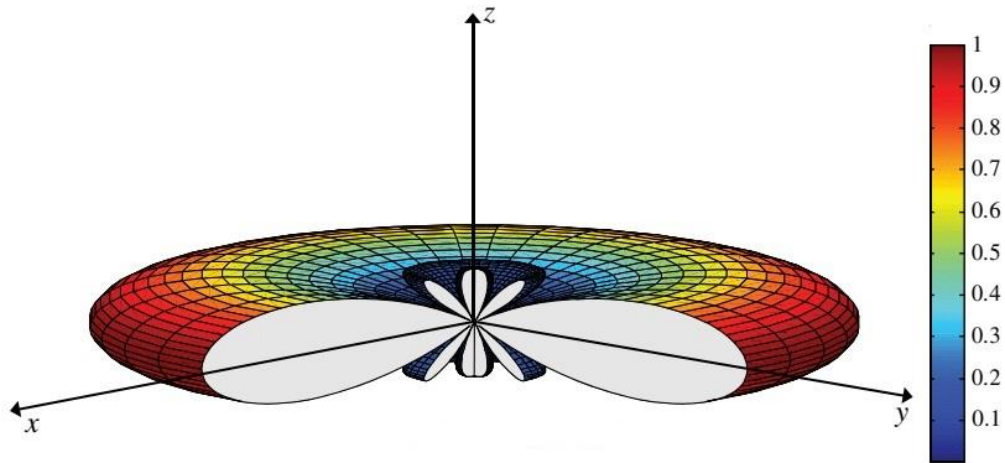
$$\text{και για συμμετρικό διάγραμμα ισχύει } \theta_h = 2|\theta_m - \theta_h| \quad (2.18)$$

Στην συνέχεια θα αναφερθούν επιγραμματικά δύο τύποι ομοιόμορφων γραμμικών στοιχειοκεραιών, που είναι η εύρυπλευρη και η ακροπυροδοτική.

Στην εύρυπλευρη στοιχειοκεραία ο παράγοντας συστοιχίας μεγιστοποιείται για  $\theta = 90^\circ$ , απαραίτητη πορυπόθεση για το μέγιστο του πράγοντα συστοιχίας είναι να έχουν την ίδια διέγερση φάσης.

$$\psi = kdcos\theta + \beta = 0 \Rightarrow kdcos90 + \beta = 0 \Rightarrow \beta = 0 \quad (2.19)$$

Επίσης για την αποφυγή επιπλέον μεγίστων προς άλλες διευθύνσεις που ονομάζονται οχληροι λοβοί πρέπει η απόσταση των στοιχείων να μην είναι πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, πρέπει δηλαδή το  $d < \lambda$ . Σε περίπτωση που  $d = n\lambda$  θα εμφανιστούν μέγιστα και στις  $\theta = 0^\circ, \theta = 180^\circ$ .



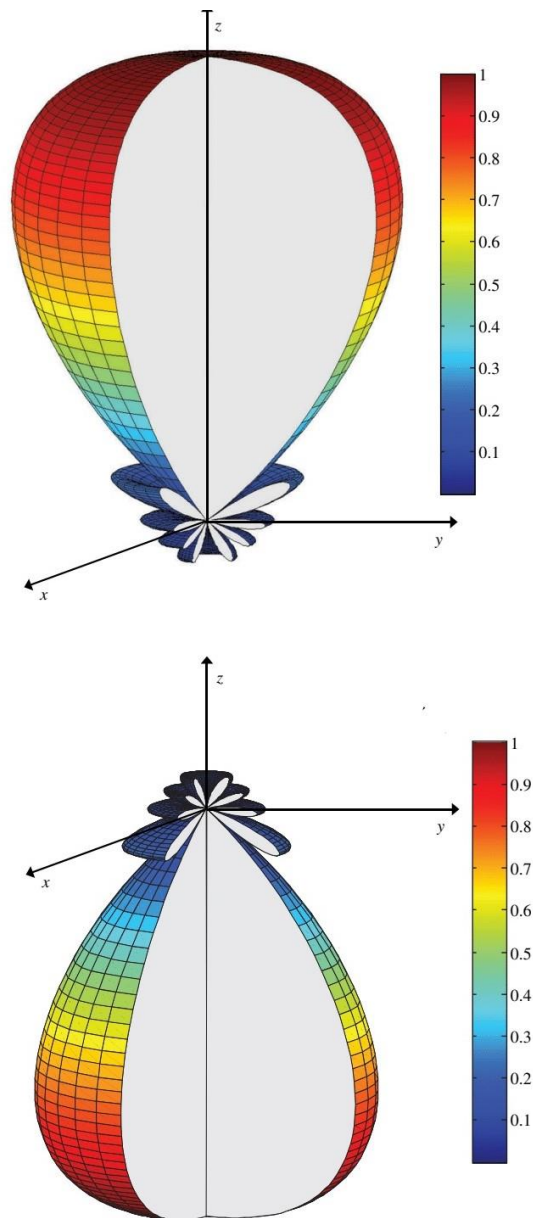
Σχήμα 2.4 Ευρύπλευρη γραμμική στοιχειοκεραία ( $\beta=0$ ,  $d=1/4$ ) [1]

Στην ακροπυροδοτική στοιχειοκεραία ο παράγοντας συστοιχίας μεγιστοποιείται όταν  $\theta = 0^\circ, \theta = 180^\circ$ .

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \Rightarrow kd \cos 0 + \beta \Rightarrow \beta = -kd \quad (2.20)$$

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \Rightarrow kd \cos 180 + \beta \Rightarrow \beta = kd \quad (2.21)$$

Επιπλέον εαν η απόσταση των στοιχείων είναι  $d = \lambda/2$  τότε εμφανίζονται τα μέγιστα και στις δύο κατευθύνσεις. Αν η απόσταση είναι  $d = n\lambda$  θα εμφανιστούν οχληροί λοβοί. Για την αποφυγή οχληρών λοβών και την παρουσία ενός μόνο μέγιστου πρέπει να ισχύει  $d < \lambda/2$ .



Σχήμα 2.5 Ακροπυροδοτική στοιχειοκεραία με  $\Theta=0^\circ$  ,  $\Theta=180^\circ$  και  $d = \lambda/4$  [1]

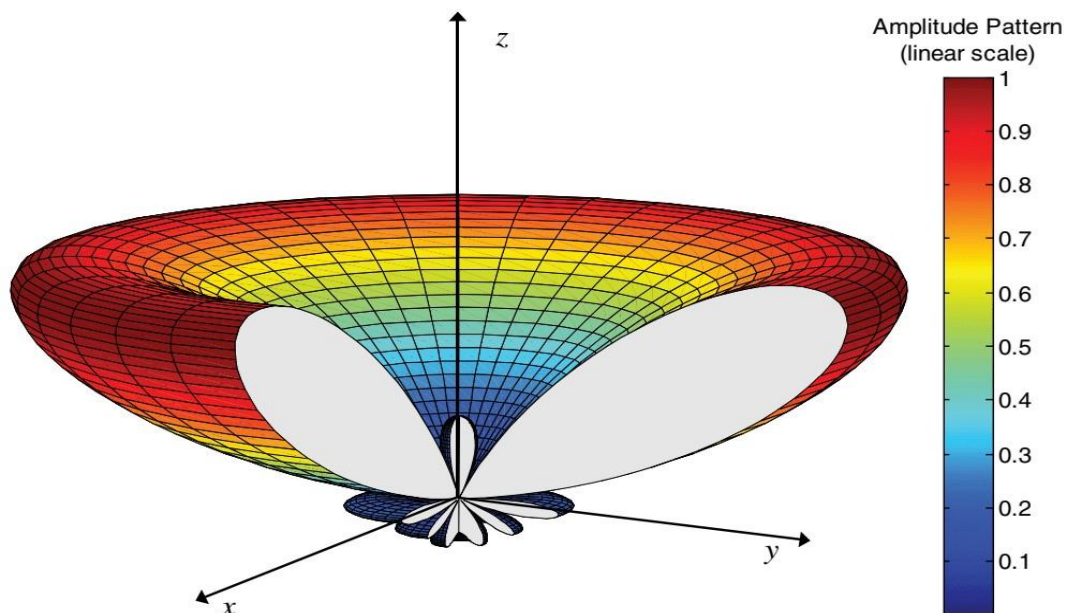
### 2.2.1 Στοιχειοκεραίες σάρωσης

Βασική αρχή λειτουργίας της στοιχειοκεραίας σάρωσης είναι ότι η μέγιστη ακτινοβολία μπορεί να προσανατολιστεί σε οποιαδήποτε διεύθυνση στο χώρο. Για την επιτεύξη αυτής της λειτουργίας χρειάζεται έλεγχος της προοδευτικής διαφοράς φάσης μεταξύ των στοιχείων. Λόγω του ότι η λειτουργία σάρωσης πρέπει να είναι συνεχής, χρησιμοποιούνται στοφείς φάσης (phase shifters) αποτελούμενα από φεριτικά στοιχεία ή διόδους τα οποία θα αναφερθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Στην εικόνα 2.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας για μια στοιχειοκεραία σάρωσης από  $0^\circ \leq \theta_0 \leq 180^\circ$ .

$$\psi = kd\cos\theta + \beta = kd\cos\theta_0 = 0 \Rightarrow \beta = -kd\cos\theta_0 \quad (2.22)$$

Το εύρος δέσμης μισής ισχύος υπολογίζεται από την εξίσωση (2.23)

$$\theta_h = \cos^{-1}\left[\cos\theta_0 - \left(0.0443\frac{\lambda}{L+d}\right)\right] - \cos^{-1}\left[\cos\theta_0 + \left(0.443\frac{\lambda}{L+d}\right)\right] \quad (2.23)$$



Σχήμα 2.6 Στοιχειοκεραία σάρωσης με  $d=\lambda/4$ ,  $\theta_0=60^\circ$  [1]

### 2.2.2 Ευθύγραμμες στοιχειοκεραίες

Έστω μια ευρύπλευρη στοιχειοκεραία με πλήθος  $M$  πανομοιότυπων στοιχείων, ομοιόμορφη απόσταση μεταξύ των στοιχείων και, ανομοιόμορφο πλάτος όπως παρουσιάζεται στην εικόνα (2.6). Στην περίπτωση αυτή ο παράγοντας συστοιχίας χωρίζεται σε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση η ευρύπλευρη στοιχειοκεραία έχει άρτιο αριθμό στοιχείων και στην δεύτερη περίπτωση περιττό αριθμό στοιχείων.

Ξεκινώντας από την πρώτη περίπτωση η στοιχειοκεραία απαρτίζεται από έναν αριθμό άρτιων ιστροπικών πηγών  $2M$  όπου  $M$  είναι ο αριθμός των στοιχείων με απόσταση  $d$  και ανομοιόμορφο πλάτος. Έτσι ο παράγοντας συστοιχίας διατυπώνεται ως εξής:

$$(AF)_{2M} = \alpha_1 e^{j(\frac{1}{2})kdcos\theta} + \alpha_2 e^{j(\frac{3}{2})kdcos\theta} + \dots + \alpha_M e^{j(2M-1)kdcos\theta} + \alpha_1 e^{-j(\frac{1}{2})kdcos\theta} + \alpha_2 e^{-j(\frac{3}{2})kdcos\theta} + \dots + \alpha_M e^{-j(2M-1)kdcos\theta}$$

$$(AF)_{2M} = 2 \sum_{n=1}^M a_n \cos\left[\frac{(2n-1)}{2} kdcos\theta\right] \quad (2.24)$$

Η κανονικοποιημένη μορφή της εξίσωσης (2.22) είναι:

$$(AF)_{2M} = \sum_{n=1}^M a_n \cos\left[\frac{(2n-1)}{2} kdcos\theta\right] \quad (2.25)$$

Για περιττό αριθμό στοιχείων  $2M+1$  με απόσταση  $d$  μεταξύ των στοιχείων και ανομοιόμορφο πλάτος ο παράγοντας συστοιχίας διατυπώνεται ως εξής:

$$(AF)_{2M+1} = 2\alpha_1 + \alpha_2 e^{jkdcos\theta} + \alpha_3 e^{j2kdcos\theta} + \dots + \alpha_{M+1} e^{jMkdcos\theta} + \alpha_2 e^{-jkdcos\theta} + \alpha_3 e^{-j2kdcos\theta} + \dots + \alpha_{M+1} e^{-jMkdcos\theta}$$

$$(AF)_{2M+1} = 2 \sum_{n=1}^M a_n \cos[(n-1)kdcos\theta] \quad (2.26)$$

Η κανονικοποιημένη μορφή της (2.24) είναι:

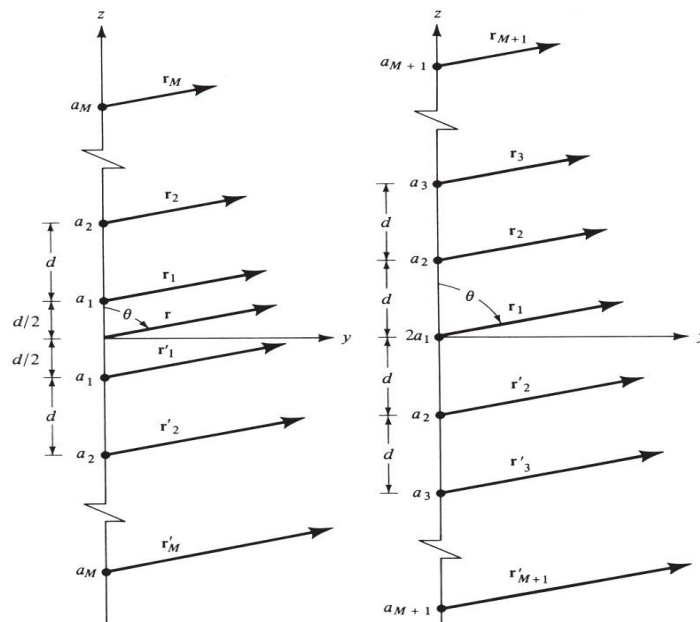
$$(AF)_{2M+1} = \sum_{n=1}^M a_n \cos[(n-1)kdcos\theta] \quad (2.27)$$

Συνεπώς οι εξισώσεις κανονικοποιημένης μορφής για περιττό και άρτιο αριθμό στοιχείων του παράγοντα συστοιχίας είναι

$$(AF)_{2M} = \sum_{n=1}^M a_n \cos\left[\frac{(2n-1)}{2}u\right] \quad (2.28)$$

$$(AF)_{2M+1} = \sum_{n=1}^M a_n \cos[(n-1)u] \quad (2.29)$$

Όπου  $u=(\pi d/\lambda)\cos\theta$

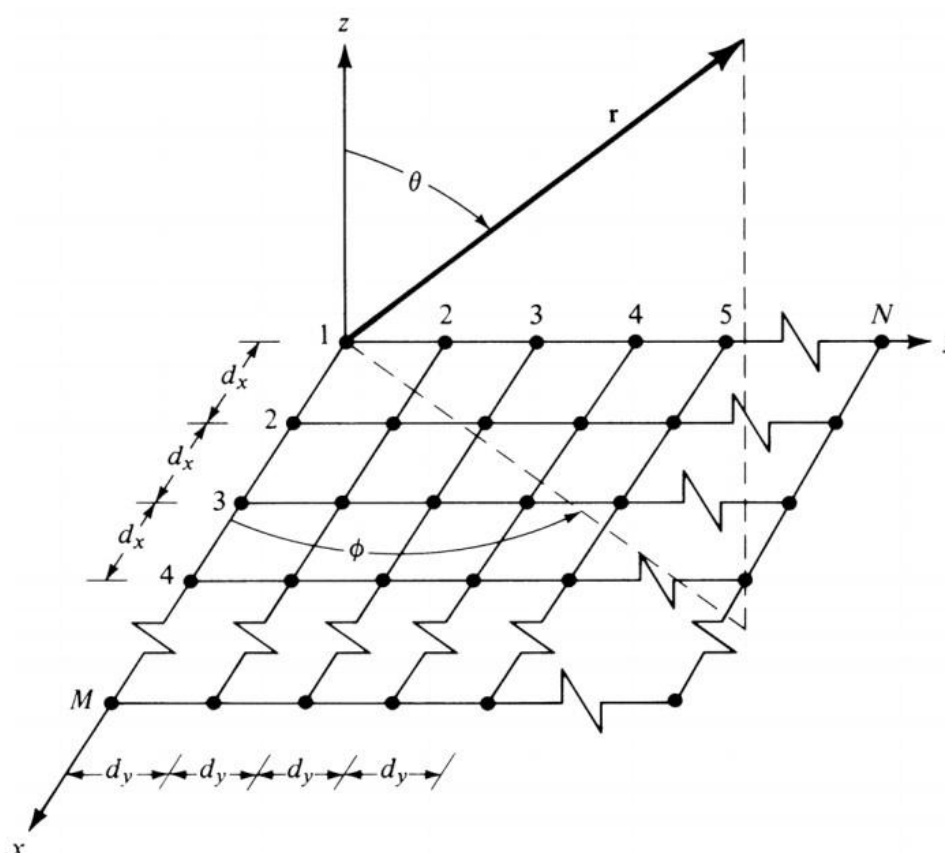


Σχήμα 2.6 Στοιχειοκεραίες μη-ομοιόμορφου πλάτους άρτιου και περιττού αριθμού στοιχείων [1]



### 2.2.3 Επιπεδικές στοιχειοκεραίες MxN

Με την τοποθέτηση των στοιχείων ακτινοβολίας στον  $x, y$  άξονες σχηματίζεται η επιπεδική στοιχειοκεραία MxN όπου έχει την μορφή ορθογωνικού πλέγματος. Οι επιπεδικές στοιχειοκεραίες έχουν πλεονεκτήματα όπως το ότι παρέχουν αυξημένη ευλιξία, πιο συμμετρικά διαγράμματα, με χαμηλότερης στάθμης πλευρικούς λοβούς. Επιπροσθέτος το κυρίαρχο πλεονέκτημα της επιπεδικής στοιχειοκεραίας είναι ότι μπορεί να γίνει σάρωση της κύρια δέσμης και στις 3-διαστάσεις του χώρου, άρα σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου. Στην εικόνα (2.7) παρουσιάζεται η μορφή μια επιπεδικής στοιχειοκεραίας MxN.



Σχήμα 2.7 Επιπεδική στοιχειοκεραία MxN [1]

Για ακόμα μια φορά θα υπολογιστεί ο παράγοντας συστοιχίας θέτοντας στα στοιχεία ακτινοβολίας ως σημειακές ιστροπικές πηγές. Έχοντας στον άξονα  $x$  πλήθος  $M$  στοιχείων ακτινοβολίας με απόσταση  $d_x$  το κάθε ένα από αυτά, στον άξονα  $y$  πλήθος  $N$  στοιχείων με απόσταση  $d_y$  το κάθε ένα από αυτά και, έχουν ομοιόμορφο πλάτος διέγερσης, τότε ο παράγοντας συστοιχίας είναι ο πολλαπλασιασμός τους.

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\varphi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \sin\varphi + \beta_y)} \quad (2.30)$$

Η καννικοποιημένη μορφή της εξίσωσης (2.30)

$$AF_n(\theta, \varphi) = \left[ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right] \left[ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right] \quad (2.31)$$

Όπου  $\psi_x = kd_x \sin\theta \cos\varphi + \beta_x$

$\psi_y = kd_y \sin\theta \sin\varphi + \beta_y$

Επιπλέον αν η απόσταση μεταξύ των στοιχείων είναι μεγαλύτερη απο  $\lambda/2$ , τότε μπορεί να σχηματιστούν πολλαπλά μέγιστα. Πλην το μέγιστο του κύριου λοβού όλα τα υπόλοιπα μέγιστα που παρουσιάζονται αποκαλούνται οχληροί λοβοί. Για την αποφυγή οχλήρων λοβών των επιπεδικών στοιχειοκεραίων πρέπει η απόσταση των στοιχείων να είναι μικρότερη  $\lambda/2$  ( $dx < \lambda/2$  ,  $dy < \lambda/2$ ).

Εν συνεχεία στην περίπτωση όπου απαιτείται μόνο μια κύρια δέσμη κατά την διεύθυνση  $\theta=\theta_0$ ,  $\varphi=\varphi_0$  η προοδευτική ολίσθηση φάσης μεταξύ των στοιχείων στον x,y άξονα πρέπει να είναι

$$\beta_x = -kd_x \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \quad (2.32)$$

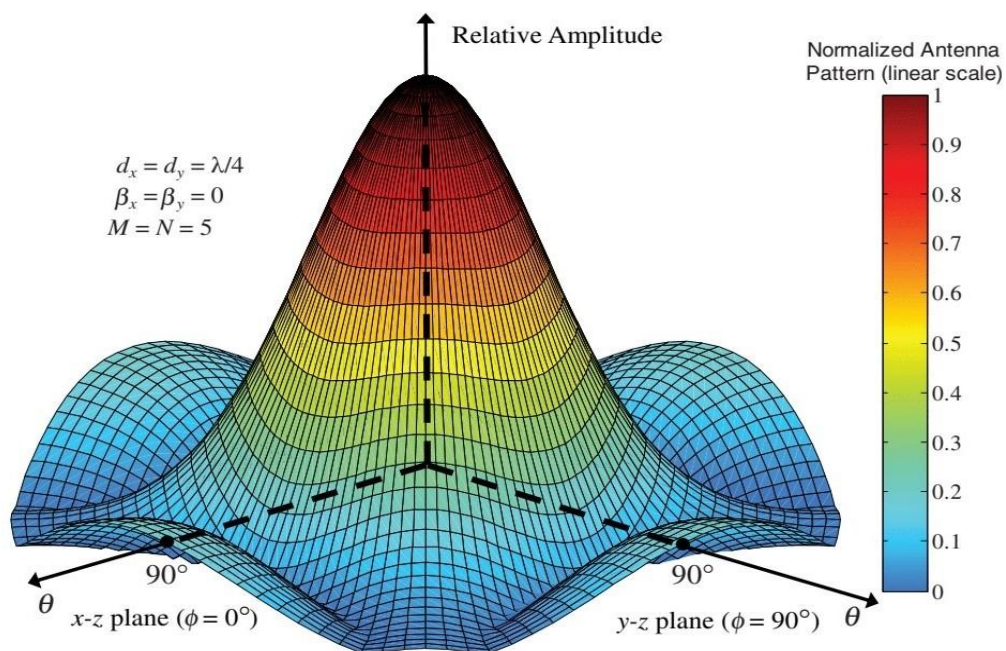
$$\beta_y = -kd_y \sin\theta_0 \sin\varphi_0 \quad (2.33)$$

Όπως προαναφέρθηκε για την αποφυγή οχληρών λοβών η απόσταση μεταξύ των στοιχείων πρέπει να είναι μικρότερη από μισό μήκος κύματος ( $dx < \lambda/2$  ,  $dy < \lambda/2$ ).

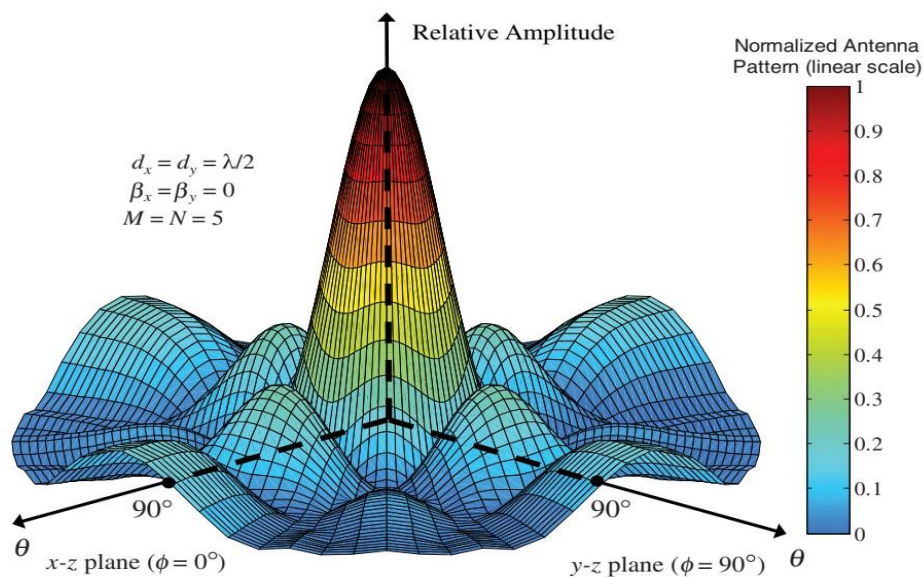
Έστω μια επιπεδική στοιχειοκεραία με ομοιόμορφο πλάτος, με προοδευτική διαφορά φάσης  $\beta_x=\beta_y=0$  και απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $dx=dy=\lambda/4$ . Το μέγιστο της ακτινοβολίας εντοπίζεται στην διεύθυνση  $\Theta_0=0^\circ$ (εικόνα 2.8).

Στην περίπτωση όπου η προοδευτική διαφορά φάση είναι  $\beta_x=\beta_y=0$  αλλά η απόσταση μεταξύ των στοιχείων είναι  $dx=dy=\lambda/2$  τότε θα επιδικνύει πλήρως δευτερεύοντες λοβούς (εικόνα 2.9).

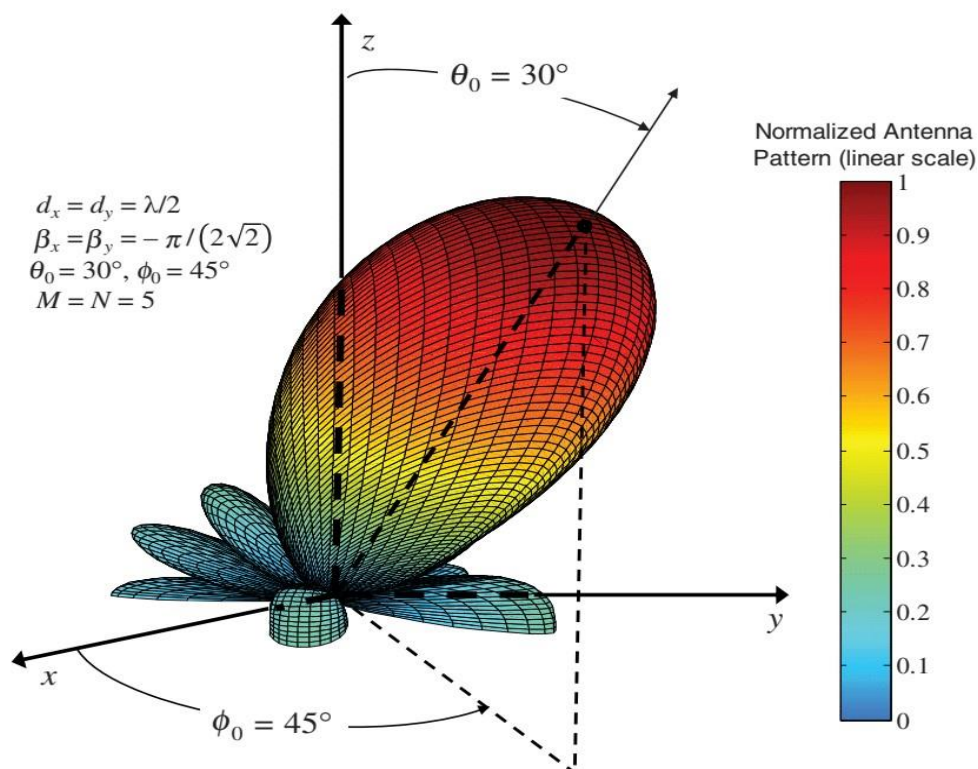
Το κυριότερο χαρακτηριστικό των επίπεδων στοιχειοκεραιών είναι ο μηχανισμός σάρωσης σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου. Η λειτουργία της αποτυπώνεται στην εικόνα 2.10 όπου παρουσιάζει μέγιστο στην διεύθυνση  $\theta_0=30^\circ$ ,  $\phi_0=45^\circ$  και η απόσταση μεταξύ των στοιχείων είναι  $dx=dy=\lambda/2$ .



Σχήμα 2.8 διαγράμματα ακτινοβολίας επιπεδικής στοιχειοκεραία με απόσταση  $dx=dy=\lambda/4$  [1]



Σχήμα 2.9 Επιπεδική στοιχειοκεραία με παρουσία δευτερεύοντων λοβών,  $d_x=d_y=\lambda/4$  [1]



Σχήμα 2.10 Επιπεδική στοιχειοκεραία με προοδευτική ολίσθηση φάσης και απόσταση στοιχείων  $d_x=d_y=\lambda/2$  [1]

### 2.3 Πίνακες στοιχειοκεραιών

Στους παρακάτω πίνακες περιγράφεται το είδος της στοιχειοκεραίας και οι εξισώσεις που απαρτίζουν τους μηδενισμούς, τα μέγιστα, τα σημεία μισής ισχύος, εύρος δέσμης πρώτου μηδενισμού, εύρος δέσμης μισής ισχύος για κάθε μια από τις στοιχειοκεραίες.

NULLS	$\theta_n = \cos^{-1} \left( \pm \frac{n \lambda}{N d} \right)$ $n = 1, 2, 3, \dots$ $n \neq N, 2N, 3N, \dots$
MAXIMA	$\theta_m = \cos^{-1} \left( \pm \frac{m \lambda}{d} \right)$ $m = 0, 1, 2, \dots$
HALF-POWER POINTS	$\theta_h \simeq \cos^{-1} \left( \pm \frac{1.391 \lambda}{\pi N d} \right)$ $\pi d / \lambda \ll 1$
MINOR LOBE MAXIMA	$\theta_s \simeq \cos^{-1} \left[ \pm \frac{\lambda}{2d} \left( \frac{2s + 1}{N} \right) \right]$ $s = 1, 2, 3, \dots$ $\pi d / \lambda \ll 1$

Πίνακας 2.1 Εξισώσεις ευρύπλευρης στοιχειοκεραίας με ομοιόμορφο πλάτος [1]

---

FIRST-NULL BEAMWIDTH (FNBW)	$\Theta_n = 2 \left[ \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left( \frac{\lambda}{Nd} \right) \right]$
HALF-POWER BEAMWIDTH (HPBW)	$\Theta_h \simeq 2 \left[ \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left( \frac{1.391\lambda}{\pi Nd} \right) \right]$ $\pi d/\lambda \ll 1$
FIRST SIDE LOBE BEAMWIDTH (FSLBW)	$\Theta_s \simeq 2 \left[ \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left( \frac{3\lambda}{2dN} \right) \right]$ $\pi d/\lambda \ll 1$

---

Πίνακας 2.2 Εξισώσεις εύρους δέσμης ευρύπλευρης στοιχειοκεραίας με ομοιόμορφο πλάτος [1]

NULLS	$\theta_n = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{n\lambda}{Nd} \right)$ $n = 1, 2, 3, \dots$ $n \neq N, 2N, 3N, \dots$
MAXIMA	$\theta_m = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{m\lambda}{d} \right)$ $m = 0, 1, 2, \dots$
HALF-POWER POINTS	$\theta_h \simeq \cos^{-1} \left( 1 - \frac{1.391\lambda}{\pi dN} \right)$ $\pi d/\lambda \ll 1$
MINOR LOBE MAXIMA	$\theta_s \simeq \cos^{-1} \left[ 1 - \frac{(2s+1)\lambda}{2Nd} \right]$ $s = 1, 2, 3, \dots$ $\pi d/\lambda \ll 1$

Πίνακας 2.3 Εξισώσεις ακροπυροδοτικής στοιχειοκεραίας με ομοόμορφο πλάτος [1]

FIRST-NULL BEAMWIDTH (FNBW)	$\Theta_n = 2 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{\lambda}{Nd} \right)$
HALF-POWER BEAMWIDTH (HPBW)	$\Theta_h \simeq 2 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{1.391\lambda}{\pi dN} \right)$ $\pi d/\lambda \ll 1$
FIRST SIDE LOBE BEAMWIDTH (FSLBW)	$\Theta_s \simeq 2 \cos^{-1} \left( 1 - \frac{3\lambda}{2Nd} \right)$ $\pi d/\lambda \ll 1$

Πίνακας 2.4 Εξισώσεις εύρους δέσμης ακροπυροδοτικής κεραίας ομοιόμορφου πλάτους [1]

Array	Distribution	Type	Direction of Maximum	Element Spacing
Linear	Uniform	Broadside	$\theta_0 = 90^\circ$ only $\theta_0 = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ simultaneously	$d_{\max} < \lambda$ $d = \lambda$
Linear	Uniform	Ordinary end-fire	$\theta_0 = 0^\circ$ only $\theta_0 = 180^\circ$ only $\theta_0 = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ simultaneously	$d_{\max} < \lambda/2$ $d_{\max} < \lambda/2$ $d = \lambda$
Linear	Uniform	Hansen-Woodyard end-fire	$\theta_0 = 0^\circ$ only $\theta_0 = 180^\circ$ only	$d \simeq \lambda/4$ $d \simeq \lambda/4$
Linear	Uniform	Scanning	$\theta_0 = \theta_{\max}$ $0 < \theta_0 < 180^\circ$	$d_{\max} < \lambda$
Linear	Nonuniform	Binomial	$\theta_0 = 90^\circ$ only $\theta_0 = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ simultaneously	$d_{\max} < \lambda$ $d = \lambda$
Linear	Nonuniform	Dolph-Tschebyscheff	$\theta_0 = 90^\circ$ only $\theta_0 = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ simultaneously	$d_{\max} \leq \frac{\lambda}{\pi} \cos^{-1} \left( -\frac{1}{z_0} \right)$ $d = \lambda$
Planar	Uniform	Planar	$\theta_0 = 0^\circ$ only $\theta_0 = 0^\circ, 90^\circ$ and $180^\circ$ ; $\phi_0 = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ simultaneously	$d_{\max} < \lambda$ $d = \lambda$

Πίνακας 2.5 Μέγιστη απόσταση μεταξύ των στοιχείων για ένα ή δύο μέγιστα πλάτους σε γραμμική στοιχειοκεραία [1]



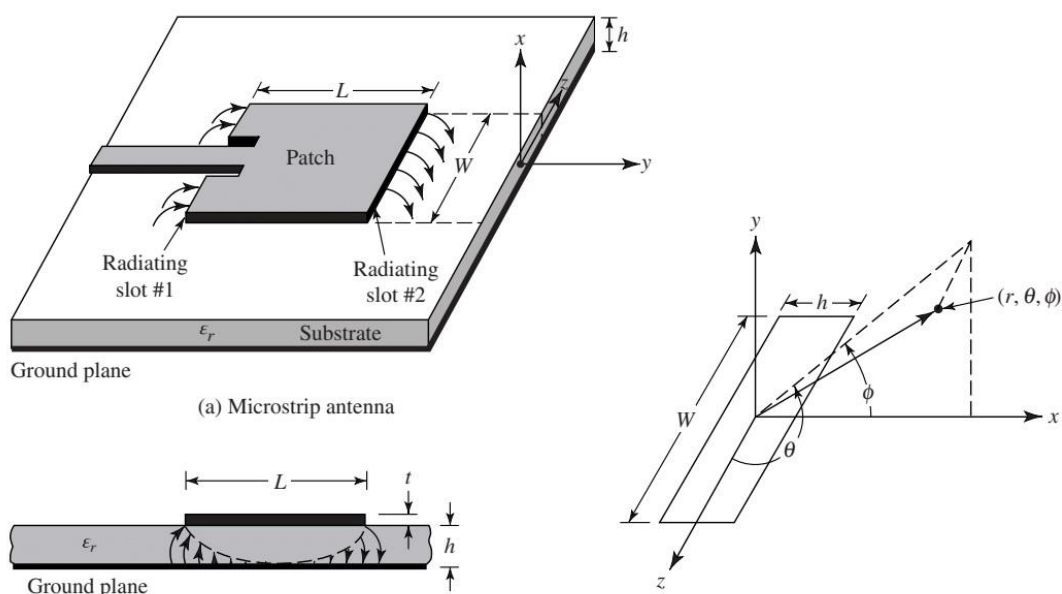
### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Μικροταινιακές κεραίες

Η μικροταινιακή κεραία (microstrip antennas) είναι μια δομή αποτελούμενη από την γείωση, το διηλεκτρικό υπόστρωμα (substrate) και, το φύλλο της μικροταινίας (patch). Οι μικροταινιακές κεραίες είναι χαμηλού προφίλ, χαμηλού βάρους, σύμμορφες με επίπεδες και μη-επίπεδες επιφάνειες, με σύγχρονη τεχνολογία τυπωμένων κυκλωμάτων, ιδανικές για συστήματα επικοινωνίας υψηλών αποδόσεων. Με την κατάλληλη επιλογή σχήματος της μικροταινίας και του ρυθμού διέγερσης παρουσιάζουν αυξημένη ευελιξία ως προς την συχνότητα συντονισμού, την πόλωση, το διάγραμμα ακτινοβολίας και την εμπέδηση. Παρόλα αυτά εμφανίζουν και κάποια μειονεκτήματα όπως είναι η μειωμένη απόδοση, τα χαμηλά επίπεδα ισχύος, το μεγάλο Q, μειωμένη ικανότητα σάρωσης, ψευδοακτινοβολία από την τροφοδοσία, το πολύ μικρό εύρος συχνοτήτων, καθώς επίσης αυξανοντας το ύψος του διηλεκτρικού παρουσιάζονται ανεπιθύμητα επιφανειακά κύματα τα οποία οδεύουν εντός του διηλεκτρικού με αποτέλεσμα την υποβάθμιση πόλωσης και διαγράμματος κεραίας. Για την αντιμετώπιση τους χρησιμοποιούνται κοιλότητες που εξαλείφουν τα επιφανειακά κύματα χωρίς την υποβάθμιση τους εύρους ζώνης.

Στη ενότητα αυτή θα γίνει αναφορά για τις μικροταινιακές κεραίες ως προς την διάταξη και την σχεδίαση ενός ορθογωνικού patch καθώς θα αναφερθούν τεχνικές και δίκτυα τροφοδοσίας αντίστοιχα.

#### 3.1 Χαρακτηριστικά μικροταινίας

Οι μικροταινιακή κεραία αποτελείται από μια λεπτή μεταλλική λωρίδα, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω από το επίπεδο γείωσης, με πάχος  $t \ll \lambda_0$  όπου  $\lambda_0$  το μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο και σε ύψος πολύ μικρότερο του μήκους κύματος  $h \ll \lambda_0$  (συνήθως  $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$ ). Η δομή της μικροταινικής κεραίας αποτελείται από το επίπεδο γείωσης, το φύλλο της μικροταινίας (patch) και, ανάμεσα τους βρίσκεται το διηλεκτρικό υπόστρωμα. Το πάχος της μικροταινίας είναι ίδιο με αυτό της γείωσης. Ο σχεδιασμός της γίνεται με τρόπο ώστε να εμφανίζεται το μέγιστο του διαγράμματος ακτινοβολίας κάθετα στην επιφάνεια ως προς αυτό.

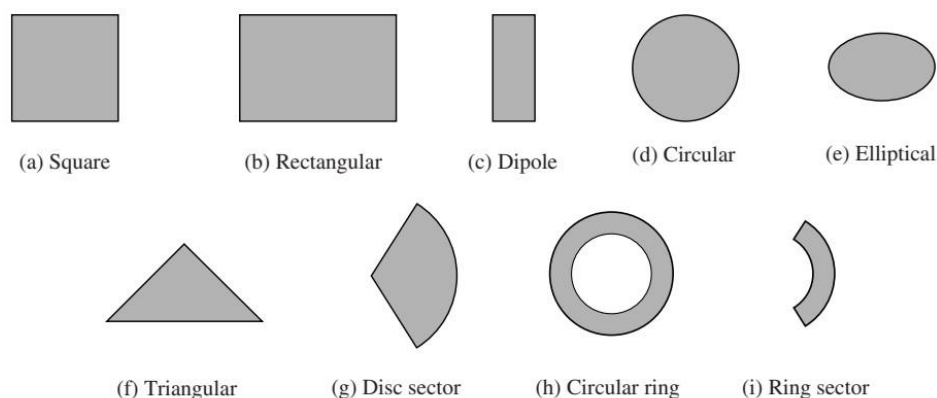


Σχήμα 3.1 Μικροταινιακή κεραία [1]

Επίσης υπάρχουν αρκετοί τύποι υποστρωμάτων όπου η διηλεκτρική σταθερά κυμαίνεται συνήθως από  $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ . Ως προς την απόδοση της κεραίας τα υποστρώματα μεγάλου πάχους και διηλεκτρική σταθερά κοντά στο κάτω όριο, έχουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως μεγαλύτερο εύρος ζώνης και χαλαρά οριοθετημένα πεδία (loosely bound fields), με μειονέκτημα το μεγάλο μέγεθος του στοιχείου.

Σε κυκλώματα μικροκυματικών συστημάτων προτιμώνται υποστρώματα μικρού πάχους λόγω του ότι απευθύνονται αυστηρά οριοθετημένα πεδία (tightly bound fields), ώστε να ελαχιστοποιείται η ανεπιθύμητη ακτινοβολία και σύζευξη, με μείωση όμως την απόδοση της κεραίας και το μικρό εύρος ζώνης.

Επίσης η λωρίδα μικροταινιαίας μπορεί να πάρει διάφορα σχήματα όπως τετραγωνικό, ορθογωνικό, κυκλικό, διπολική λόγω του ότι είναι εύκολα στην κατασκευή και στην ανάλυση τους, και ιδιαίτερα λόγω των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας. Το σημαντικότερο είναι ότι δημιουργώντας μια στοιχειοκεραία μικροταινίων μονής ή πολλαπλής τροφοδοσίας, επιτυγχάνεται σάρωση της δέσμης και υψηλή κατευθυντικότητα.



Σχήμα 3.2 Σχήματα μικροταινιών [1]

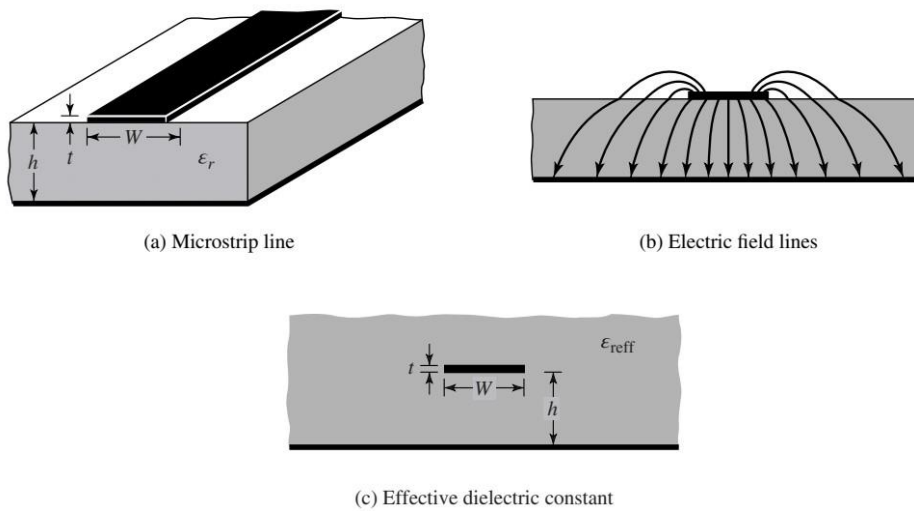
### 3.2 Ορθογωνική μικροταινία

Η ορθογωνική μικροταινία είναι η πιο συνηθισμένη διάταξη μικροταινιακής κεραίας. Είναι εύκολη στην ανάλυση της μέσω γραμμών μεταφοράς και δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα σε υποστρώματα μικρού πάχους. Το μοντέλο γραμμής μεταφοράς είναι σχετικά εύκολο ως προς την δημιουργία και την ανάλυση της, όμως τα αποτελέσματα είναι μειωμένης ακρίβειας. Παρόλα αυτά είναι διαφωτιστικό ως προς την συμπεριφορά της κεραίας.

Λόγω του ότι οι διαστάσεις της μικροταινίας δεν είναι άπειρες εμφανίζονται πεδία κροσσών. Το φαινόμενο αυτό δημιουργείται διότι τα πεδία δεν σταματούν απότομα στα άκρα της αλλά εκτείνονται έξω από αυτό. Στις μικροταινιακές κεράιες παρόλο που τα πεδία κροσσών είναι περιορισμένα, δεν μπορούν να αμεληθούν διότι επηρεάζουν την συχνότητα συντονισμού της κεραίας.

Οι δυναμικές γραμμές που εμφανίζονται στην εικόνα 3.3 το μεγαλύτερο ποσοστό των δυναμικών γραμμών συγκεντρώνεται στο υπόστρωμα και καποιές εκτείνονται έξω από αυτό στον αέρα. Για τον λόγο αυτό δημιουργείται ένα νέο μέγεθος που ονόμαζεται ενεργός διηλεκτρική σταθερά και περιγράφεται από την εξίσωση (3.1) με  $\epsilon_r$  η διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος,  $h$  το ύψος του υποστρώματος,  $W$  το πλάτος της μικροταινίας

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



Σχήμα 3.3 Μικροταινιακή γραμμή, δυναμικές γραμμές, ενεργός διηλεκτρική σταθερά [1]

Λόγω του ότι με τα φαινόμενα κροσσών η μικροταινία δείχνει ηλεκτρικά μεγαλύτερη υπολογίζεται το μήκος της επέκτασης  $\Delta L$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.2)$$

Το ενεργό μήκος της μικροταινίας

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (3.3)$$

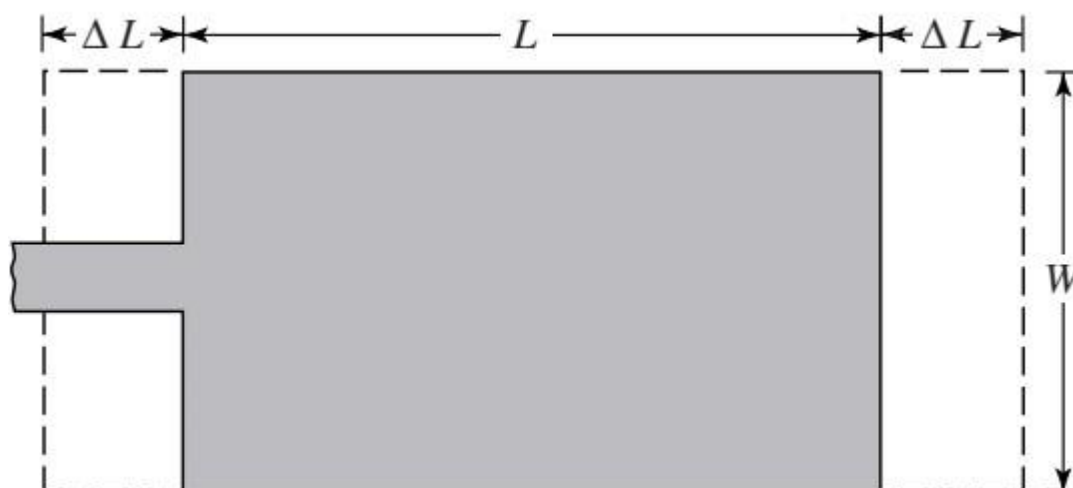
Το πραγματικό μήκος της μικροταινίας υπολογίζεται ως εξής:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L = \frac{1}{2f_r\sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (3.4)$$

Το πλάτος της μικροταινίας υπολογίζεται:

$$W = \frac{u_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.5)$$

Όπου  $u_0$  είναι η ταχύτητα φωτός στον ελεύθερο χώρο  $u_0 = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$



Σχήμα 3.4 Διαστάσεις ορθογωνικής μικροταινίας [1]

Οι παραπάνω εξισώσεις, γωνρίζοντας στην διηλεκτρική σταθερά, την συχνότητα συντονισμού, και το ύψος του υποστρώματος, είναι υπολογισμοί των διαστάσεων την ορθογωνικής μικροταινίας.

### 3.2.1 Τεχνικές προσαρμογής

Η προσαρμογή επιτυγχάνεται όταν η εμπέδηση εισόδου  $Z_{in}$  είναι ίση με την χαρακτηριστική εμπέδηση  $Z_c$ . Η χαρακτηριστική αντίσταση είναι ίση με  $50\Omega$ . Η επιλογή αυτής της τιμής δεν είναι τυχαία, αλλά είναι ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην μείωση της εξασθένισης και της μέγιστη χωρητικότητας ισχύος. Δύο τρόποι προσαρμογής μπορούν να γίνουν με ένθετη τροφοδοσία (insert feed) και με ομοαξονικό σηματολήπτη (coaxial).

Ξεκινώντας με τον τρόπο της ένθετης τροφοδοσίας γνωρίζοντας τα μεγέθη της μικροταινιακής γραμμής μπορεί να υπολογιστεί η χαρακτηριστική αντίσταση  $Z_c$  από τις εξισώσεις:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[ \frac{8h}{W_o} + \frac{W_o}{4h} \right] & \frac{W_o}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[ \frac{W_o}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_o}{h} + 1.444 \right) \right]} & \frac{W_o}{h} > 1 \end{cases} \quad (3.6\alpha - 3.6\beta)$$

Όπου  $W_o$  το πλάτος της μικροταινιακής γραμμής.

Γνωρίζοντας την χαρακτηριστική αντίσταση, διηλεκτρική σταθερά υπολογίζονται οι διαστάσεις της μικροταινιακής γραμμής ως εξής:

$$\frac{W_o}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A}-2} & \frac{W_o}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} (\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r}) \right] & \frac{W_o}{h} > 2 \end{cases} \quad (3.7\alpha - 3.8\beta)$$

Όπου

$$A = \frac{Z_c}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_c\sqrt{\epsilon_r}}$$

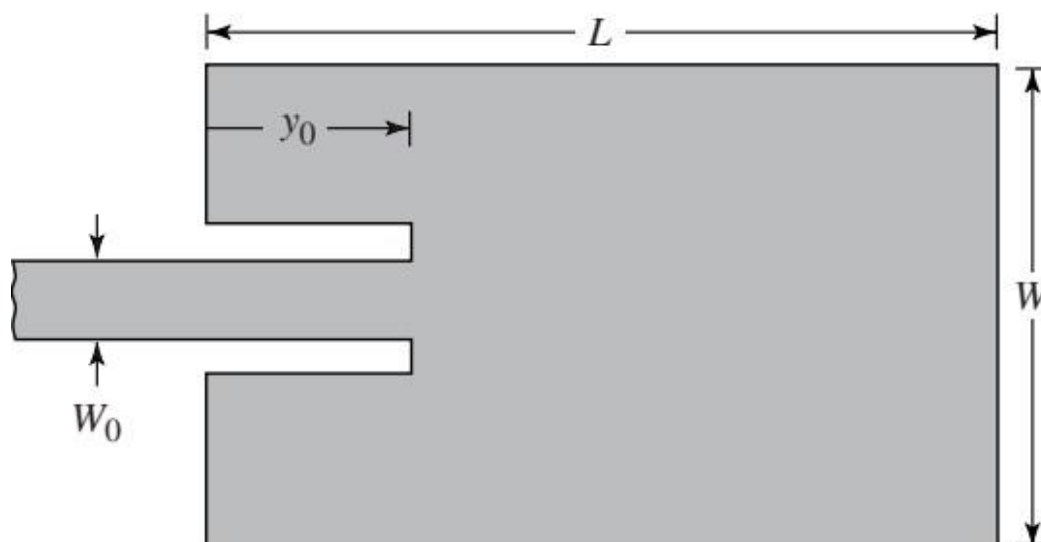
Επιπλέον πρέπει να βρεθεί και το σημείο της ένθετης τροφοδοσίας  $y_0$  και, όπως προαναφέρθηκε παραπάνω πρέπει να εμφανίζει εμπέδηση εισόδου  $50\Omega$  ( $Z_{in} = Z_c$ ). Η εξίσωση υπολογισμού του σημείου είναι:

$$Z_c = R_{in} \cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right) \quad (3.8)$$

Όπου  $R_{in}$  η αντίσταση εισόδου

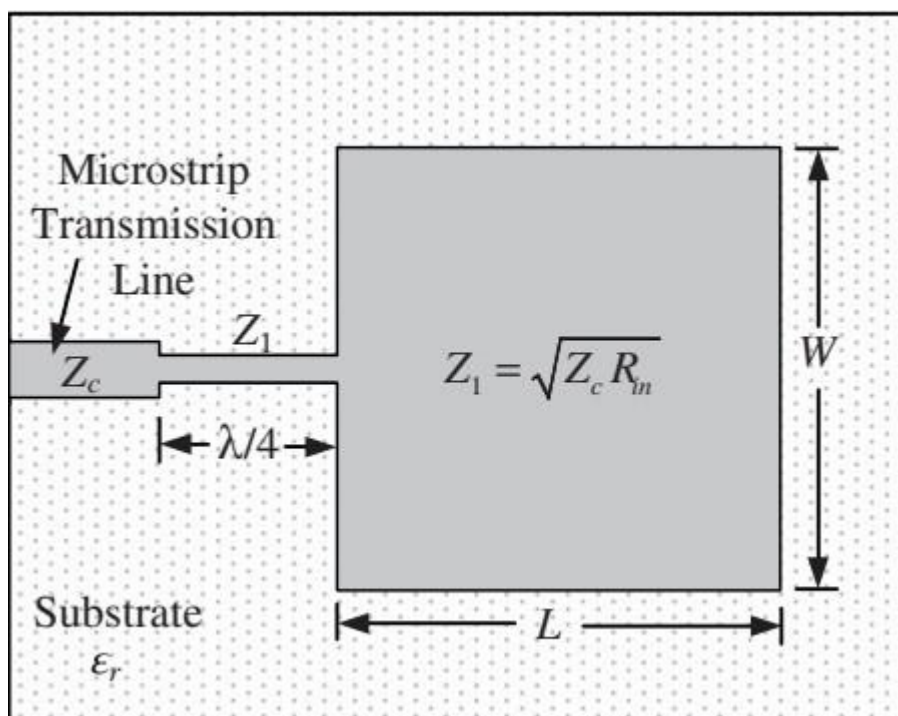
$$R_{in} = 90 \frac{(\epsilon_r)^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W}\right) \quad (3.9)$$

Η εξίσωση 3.9 είναι προσεγγιστική και είναι έγκυρη για υποστρώματα μικρού πάχους με  $h \ll \lambda_0$ .



Σχήμα 3.5 Μικροταινιακή γραμμή τροφοδοσίας [1]

Επιπροσθέτως ένας ακόμα τρόπος προσαρμογής είναι χρησιμοποιώντας μετασχηματιστή εμπέδησης  $\lambda/4$

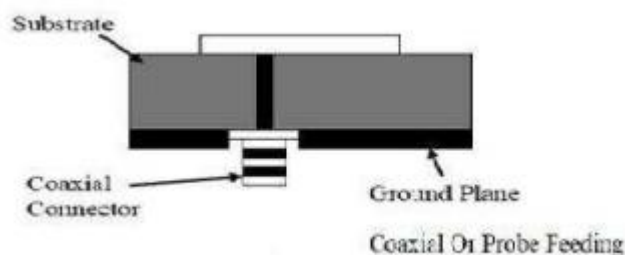


Σχήμα 3.5 Μετασχηματιστής εμπέδησης [1]

Η εξίσωση για το  $Z_1$  προκύπτει από το γεγονός της ιδιότητας της γραμμής  $\lambda/4$  όπου  $R_{in} = \frac{Z_1^2}{Z_c} \Rightarrow Z_1 = \sqrt{Z_c R_{in}}$ . Όπως και πριν θα πρέπει να εμφανίζει εμπέδηση εισόδου  $50\Omega$

Η δεύτερη περίπτωση αφορά τον ομοαξονικό σηματολήπτη. Ο ομοαξονικός σηματολήπτης είναι μια συνηθισμένη τεχνική για την τροφοδοσία της μικροταινίας.





Σχήμα 3.6 Τροφοδοσία με ομοαξονικό σηματολήπτη [13]

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.6 ο ομοαξονικός σηματολήπτης αποτελείται από έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό κονέκτορα. Το εσωτερικό κομμάτι του ομοαξονικού καλωδίου με διάμετρο  $d$  εκτείνεται μέχρι την κορυφή του patch διαπερνώντας στο διηλεκτρικό υπόστρωμα. Το εξωτερικό κομμάτι του ομοαξονικού καλωδίου με διάμετρο  $D$  περικλείει το εσωτερικό κομμάτι, είναι αγώγιμο υλικό με αυτό της γείωσης, συνδέεται στο επίπεδο της γείωσης και παρουσιάζει διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$ . Με τις κατάλληλες αποστάσεις η χαρακτηριστική αντίσταση θα πρέπει να είναι  $50\Omega$ .

$$Z_o = \frac{138 \log_{10} \left( \frac{D}{d} \right)}{\sqrt{\epsilon_r} \pi \left( \frac{D+d}{2} \right)} \quad (3.10)$$

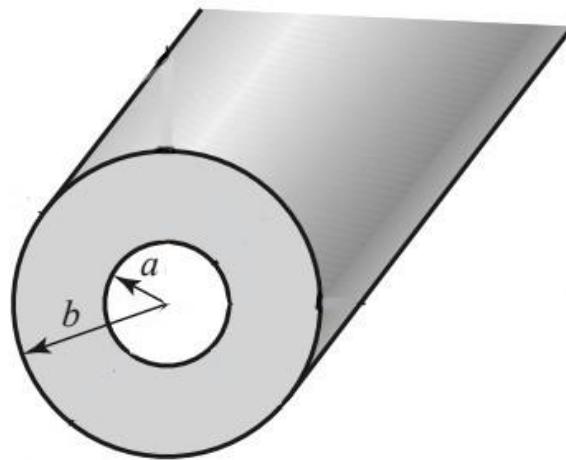
Η επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας για την εμπέδηση  $Z_o$  επιβεβαιώνεται από την παρακάτω εξήσωση:

$$F_{cutoff} = \frac{11.8}{\sqrt{\epsilon_r} \pi \left( \frac{D+d}{2} \right)} \quad (3.11)$$

Οι συντεταγμένες υπολογισμού του ομοαξονικού σηματολήπτη ώστε να δημιουργηθεί η τρύπα πάνω στο patch διαπερνώντας και το διηλεκτρικό υπολογίζεται από τις εξισώσεις:

$$X = \frac{Lp}{2\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (3.12)$$

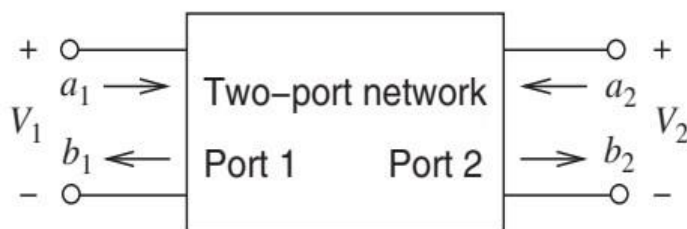
$$Y = \frac{Wp}{\sqrt[3]{\epsilon_{reff}}} \quad (3.13)$$



Σχήμα 3.7 Ομοαξονικός σηματολήπτης [3]

### 3.3 S-παράμετροι σκέδασης

Οι S-παράμετροι είναι πολύ χρήσιμοι ως προς την περιγραφή ενός κυκλώματος. Περιγράφουν την σχέση που υπάρχει ανάμεσα μεταξύ των θυρών. Έστω ένα δίθυρο κύκλωμα όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.8



Σχήμα 3.8 Δίθυρο κύκλωμα [3]

Για τον υπολογισμό των  $S$ -παραμέτρων χρησιμοποιούνται κύματα ισχύος και όχι τιμές τάσης και ρεύματος. Άρα σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα οι μεταβλητές  $a_1, a_2$  είναι η ισχύς στην είσοδο και την έξοδο αντίστοιχα και,  $b_1, b_2$  είναι η ανακλώμενη ισχύς στην είσοδο και την έξοδο αντίστοιχα, του δίθυρου κυκλώματος. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο υπολογισμός των  $S$ -παραμέτρων υπολογίζεται ως εξής:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} | a_2 = 0 \quad (3.14)$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} | a_1 = 0 \quad (3.15)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} | a_1 = 0 \quad (3.16)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} | a_2 = 0 \quad (3.17)$$

Το  $a_1 = a_2 = 0$  σημαίνει ότι η θύρα 1, θύρα 2 αντίστοιχα είναι προσαρμοσμένες σε φορτίο  $50\Omega$  για την αποφυγή των ανακλάσεων.

Οι συντελεστές  $a_1, a_2$  και  $b_1, b_2$  είναι συντελεστές ισχύος του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος. Οι εξισώσεις που της περιγράφουν για το δίθυρο κύκλωμα είναι:

$$\alpha_1 = \frac{V_1^+}{\sqrt{Z_0}} \quad (3.18)$$

$$\alpha_2 = \frac{V_2^+}{\sqrt{Z_0}} \quad (3.19)$$

$$b_1 = \frac{V_2^-}{\sqrt{Z_0}} \quad (3.20)$$

$$b_2 = \frac{V_2^-}{\sqrt{Z_0}} \quad (3.21)$$

Οι S-παράμετροι μπορούν να περιγράψουν ένα δικτύωμα με N-θύρες. Η γενικευμένη μορφή τους περιγράφεται από το μητρώο σκέδασης ως εξής:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix}$$

$$S_{ij} = \frac{b_i}{\alpha_j} \Big|_{\alpha_k = 0 \quad k \neq j} \quad (3.22)$$

$$\alpha_n = \frac{V_n^+}{\sqrt{Z_0}} \quad , \quad b_n = \frac{V_n^-}{\sqrt{Z_0}} \quad (3.23\alpha - 3.23\beta)$$

Όπου  $a_n, b_n$  είναι το προσπίπτον και το ανακλώμενο σήμα

Δηλαδή η S-παράμετρος υπολογίζεται όταν τροφοδοτείται η θύρα j και μετρώντας το πλάτος του ανακλώμενου σήματος.

Το  $S_{ii}$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης όταν όλες οι θύρες είναι προσαρμοσμένες.

Το  $S_{ij}$  είναι ο συντελεστής μετάδοσης από την θύρα j στην θύρα i όταν όλες οι θύρες είναι προσαρμοσμένες.

Συνεπώς από το παραπάνω δύθυρο το S11 είναι ο συντελεστής ανάκλασης με προσαρμοσμένη την θύρα 2, το S22 είναι ο συντελεστής ανάκλασης στην έξοδο με προσαρμοσμένη την θύρα 1, το S12 ο συντελεστής ανάστροφης μετάδοσης από την θύρα 2 στην θύρα 1 άρα υπάρχει προσαρμογή στην θύρα 1, το S21 είναι ο συντελεστής ορθής μετάδοσης από την θύρα 1 στην θύρα 2 με προσαρμογή στην θύρα 2.

Μια παρατήρηση είναι ότι η παραπάνω έννοιες ισχύουν στην περίπτωση όπου όλες οι θύρες είναι προσαρμοσμένες. Αλλάζοντας το τερματικό μπορεί να αλλάξει ο συντελεστής ανάκλασης σε μια θύρα ή ο συντελεστής μετάδοσης μεταξύ των θυρών.

### 3.4 Συντελεστής ποιότητας Q

Ο συντελεστής ποιότητας Q είναι ένας σημαντικός παράγοντας περιγραφής των απωλειών μιας κεραίας. Οι απώλειες αυτές είναι ωμικές, διηλεκτρικές απώλειες, απώλειες ακτινοβολίας, απώλειες επιφανειακού κύματος. Οπότε ο συνολικός συντελεστής ποιότητας  $Q_t$  θα είναι το άθροισμα των παραπάνω απωλειών.

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (3.24)$$

Το  $Q_t$  αφορά το συνολικό συντελεστή ποιότητας, το  $Q_{rad}$  τον συντελεστή ποιότητας λόγω απωλειών ακτινοβολίας, το  $Q_c$  τον συντελεστή ποιότητας λόγω απωλειών αγωγής, το  $Q_d$  τον συντελεστή ποιότητας λόγω διηλεκτρικών απωλειών και  $Q_{sw}$  τον συντελεστή ποιότητας λόγω των επιφανειακών κυμάτων.

Η τελευταία παράμετρος μπορεί να αγνοηθεί στην περίπτωση που το πάχος του διηλεκτρικού είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το μήκος κύματος. Το  $Q_c$ ,  $Q_d$ ,  $Q_{rad}$  υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu \sigma}$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (3.25\alpha - 3.25\beta - 3.25\gamma)$$

$$Q_{rad} = \frac{2\omega \epsilon_r}{hG_t} K$$

Στις παραπάνω εξισώσεις το  $\tan \delta$  είναι ο συντελεστής απωλειών του υποστρώματος, που η τιμή του αλλάζει ανάλογα με το διηλεκτρικό υποστρώμα που χρησιμοποιείται, σ είναι η αγωγιμότητα των αγωγών της μικροταινίας και του επιπέδου γείωσης,  $G_t/l$  είναι η συνολική αγωγιμότητα ανά μονάδα μήκους του ανοίγματος ακτινοβολίας. Ο συντελεστής  $K$  στην περίπτωση όπου το φύλο της μικροταινίας έχει ορθογωνική μορφή, στον κυρίαρχο ρυθμό  $TM_{010}$  το  $K=L/4$  και το  $G_t / l = Grad / W$ .

### 3.4.1 Εύρος ζώνης

Το ποσοστιαίο εύρος ζώνης μιας κεραίας υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$\frac{\Delta f}{f_o} = \frac{1}{Q_t} \quad (3.26)$$

Όπου  $\Delta f$  είναι το εύρος ζώνης,  $f_o$  η συχνότητα συντονισμού.

Η παραπάνω εξίσωση όμως δεν συμπεριλαμβάνει την προσαρμογή που υπάρχει στην κεραία. Για το λόγο αυτό υπάρχει μια τροποποιημένη έκφραση για το ποσοστιαίο εύρος ζώνης.

$$\frac{\Delta f}{f_o} = \frac{VSWR-1}{Q_t \sqrt{VSWR}} \quad (3.27)$$

Το VSWR είναι ο λόγος στάσιμου κύματος.

Γενικά το εύρος ζώνης BW υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση που είναι προσεγγιστική και ισχύει στην περίπτωση όπου το ύψος του υποστρώματος είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το μήκος κύματος ( $h \ll \lambda_0$ ).

$$BW = 3.771 \left[ \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} \right] \frac{h}{\lambda_0} \left( \frac{W}{L} \right) \quad (3.28)$$

### 3.4.2 Απόδοση ακτινοβολίας

Η απόδοση ακτινοβολίας μιας μικροταινιακής κεραίας ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού συντελεστή ποιότητας  $Q_t$  ως προς τον συντελεστή ποιότητας λόγω απωλειών ακτινοβολίας. Δηλαδή η απόδοση ακτινοβολίας μιας μικροταινιας καθορίζεται από τους συντελεστές ποιότητας. Η έκφραση για την απόδοση ακτινοβολίας είναι:

$$e_{cdsw} = \frac{Q_t}{Q_{rad}} \quad (3.29)$$

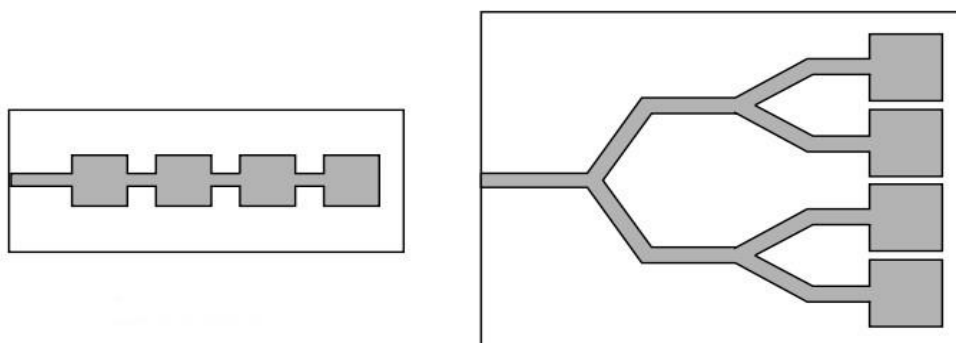
### 3.5 Δίκτυα τροφοδοσίας

Η μικροταινιακή κεραία είναι μια χρήσιμη διάταξη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να εξεταστεί ως μεμονωμένο στοιχείο και, περισσότερο σαν στοιχειοκεραία. Η τροφοδότηση των μικροκυματικών κεραίων μπορεί να γίνει είτε σε εν σειρά τροφοδοσία είτε με δίκτυο κατανεμημένης τροφοδοσίας.

Η κατασκευή της εν σειράς τροφοδοσίας σε μια στοιχειοκεραία όσον αναφορά τα στοιχεία και το κύκλωμα μπορεί να γίνει με φωτολιθογραφική μέθοδο. Η εν σειρά τροφοδοσία παρουσιάζει περιορισμούς χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή, ως προς

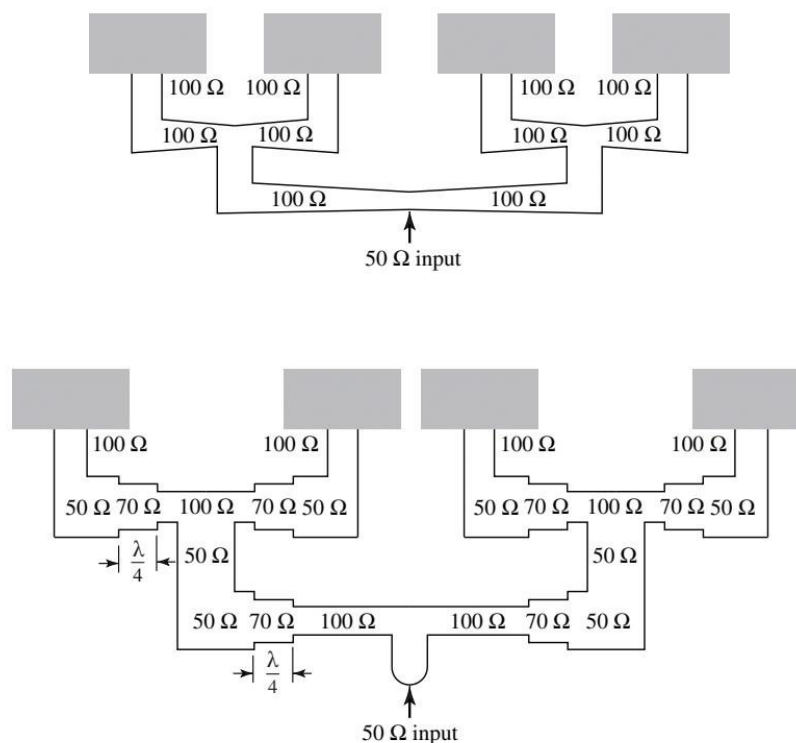
τις στοιχειοκεραίες σταθερής δέσμης ή σάρωσης, όμως μπορεί και βρίσκει εφαρμογή σε γραμμικές και επιπεδικές στοιχειοκεραίες. Επίσης λόγω της εν σειράς τροφοδοσίας οποιαδήποτε αλλαγή στοιχείων επηρεάζει την λειτουργία του κυκλώματος.

Το δίκτυο κατανεμημένης τροφοδοσίας έχει περισσότερη εφαρμογή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μπορεί να υπάρξει έλεγχος ως προς την τροφοδοσία κάθε στοιχείου μεμονωμένα, πράγμα που το κάνει ιδανικό σε στοιχειοκεραία σάρωσης. Επίση μπορεί και διοχετεύει την ισχύ σε  $2^n$  στοιχεία εφαρμόζοντας είτε μετασχηματιστές  $\lambda/4$ , είτε με προσαρμογή  $100\Omega$  σε  $50\Omega$  όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.11.



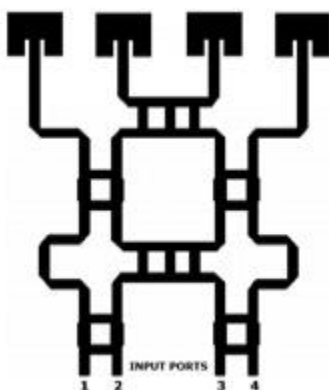
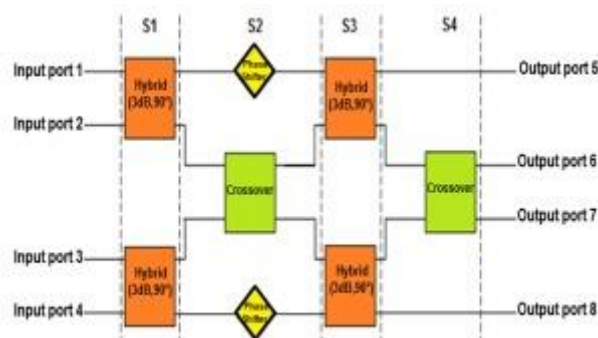
Σχήμα 3.10 Κύκλωμα τροφοδοσίας με εν σειρά και παράλληλα [1]





Σχήμα 3.11 Προσαρμογή 100Ω με 50Ω και χρησιμοποίηση μετασχηματιστών  $\lambda/4$  [1]

Επιπλέον ένα δημοφιλές δίκτυο τροφοδοσίας είναι το butler matrix 4x4. Το butler matrix 4x4 είναι ένα δίκτυο τροφοδοσίας αποτελούμενο από ένα συνδυασμό τεσσάρων υβριδικών συζευκτών  $90^\circ$ , στροφών φάσης, crossover. Εφαρμόζοντας ένα σήμα εισόδου σε μια θύρα, δημιουργείται με ίσο πλάτος και προοδευτική στροφή φάσης σε κάθε μια από τις θύρες εισόδου. Επιπλέον κάθε θύρα έχει συγκεκριμένη γωνία μεγίστου, πράγμα που σημαίνει ότι η συγκεκριμένη θύρα θα λαμβάνει και την μέγιστη ισχύ. Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή του δικτυώματος butler matrix.



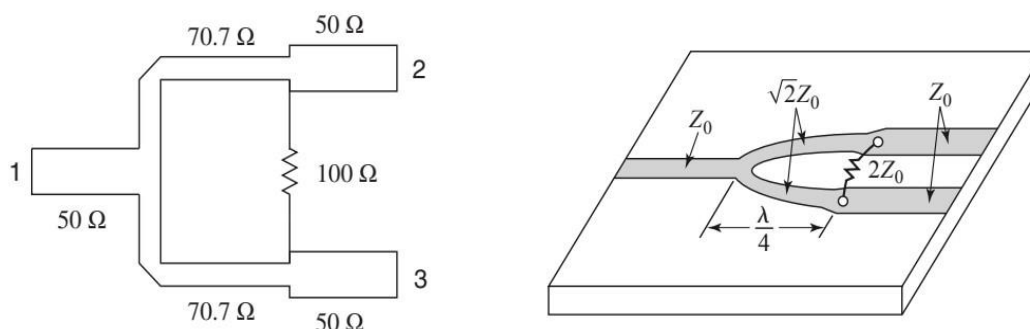
Σχήμα 3.12 Δομή δικτύωματος butler matrix 4x4 [10]

### 3.5.1 Διαιρέτης ισχύος wilkinson

Ο διαιρέτης ισχύος wilkinson είναι μια τρίθυρη διάταξη, που έχει την δυνατότητα όλες οι θύρες του να είναι προσαρμοσμένες, καθώς εξασφαλίζεται και η απομόνωση μεταξύ των θυρών εξόδου. Προσαρμόζοντας όλες τις θύρες αυτό συνεπάγεται πως δεν εμφανίζει απώλειες, πράγμα που σημαίνει ότι μόνο η ανακλώμενη ισχύ καταναλώνεται στις θύρες εξόδου. Η ισχύς που εφαρμόζεται στην είσοδο (θύρα 1), διαχωρίζεται στις δύο θύρες εξόδου (θύρα 2, θύρα 3), έχοντας το μισό της αρχικής

ισχύς. Επιπλέον μπορεί να γίνει οποιαδήποτε διαίρεση ισχύος, εξετάζεται όμως πρώτα η διαίρεση ίσης κατανομής 3dB. Κάθε θύρα πρέπει είναι προσαρμοσμένη σε 50Ω. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.13 η τιμή 70.7Ω του διαιρέτη ισχύος wilkinson δεν είναι τυχαία, καθώς παρεμβάλεται η γραμμή  $\lambda/4$  με την ιδιότητα ότι

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L}$$



Σχήμα 3.13 Διαιρέτης ισχύος Wilkinson [3]

### 3.5.2 Στροφείς φάσης και εξασθενητές

Στροφείς φάσης (phase shifters) και εξασθενητές (attenuators) είναι κυκλωματικά στοιχεία τα οποία εισάγονται πριν την κεραία. Ξεκινώντας με τους στροφείς φάσης, είναι αποτελούμενα από φερριτικά στοιχεία ή απο διόδους. Οι φερρίτες είναι δίθυρα στοιχεία που αποσκοπούν στην επίτευξη ολίσθησης φάσης με τον έλεγχο του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του φερρίτη, το οποίο εν συνεχεία ελέγχεται από την ποσότητα ρεύματος που διαρρέει τα συρματα που τυλίγονται στον φερρίτη. Οι στροφείς φάσης βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στις κεραίες σάρωσης, με κύριο λόγο την μέγιστη ακτινοβολία σε οποιοδήποτε σημείο στο χώρο.

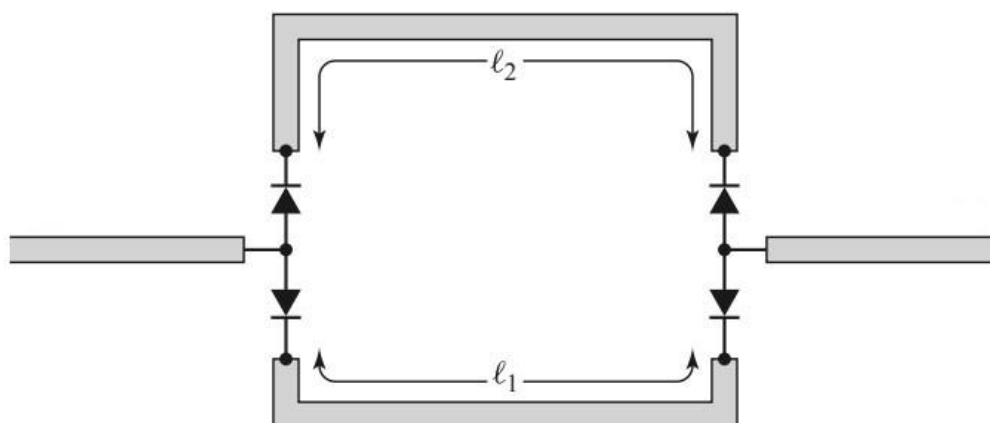
Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι στροφείς φάσης με διόδους PIN. Οι διόδοι PIN σε σύγκριση με τους phase shifters με φερρίτη έχουν πλεονεκτήματα, που είναι η

εύκολη υλοποίηση, η υψηλή ταχύτητα, μικρό μέγεθος. Η ισχύς των στροφών φάσης με διόδους είναι μεγαλύτερη σε σέεση με τους φερριτικούς. Οι διόδοι PIN χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες που είναι, διακοπτικά στοιχεία μεταβλητού μήκους, διακοπτικά με γραμμές μεταφοράς με φορτίο, τύπου ανάκλασης. Η δομή ενός phase shifter με διόδους PIN με γραμμές μεταβλητού μήκους παρουσιάζεται στην εικόνα 3.14. Η διάταξη μεταβλητού μήκου είναι η πιο απλή μορφή phase shifter. Χρησιμοποιεί δυο μονοπολικούς διακόπτες διπλής επαφής (SPTD singal-pole double-throw) για την δρομολόγηση της ροής του σήματος σε μια από τις δύο γραμμές. Η μεταγωγή των γραμμών γίνεται με τον έλεγχο της πόλωσης των διόδω PIN. Η μετατόπιση ολίσθηση φάσης προκύπτει από την σχέση :

$$\Delta\varphi = k(l_2 - l_1)$$

$\Delta\varphi$  είναι η διαφορά φάσης

$l_1, l_2$  είναι τα μήκη των γραμμών



Σχήμα 3.14 Κύκλωμα ολίσθησης φάσης, μεταβλητού μήκους γραμμής, διόδους επαφής [3]

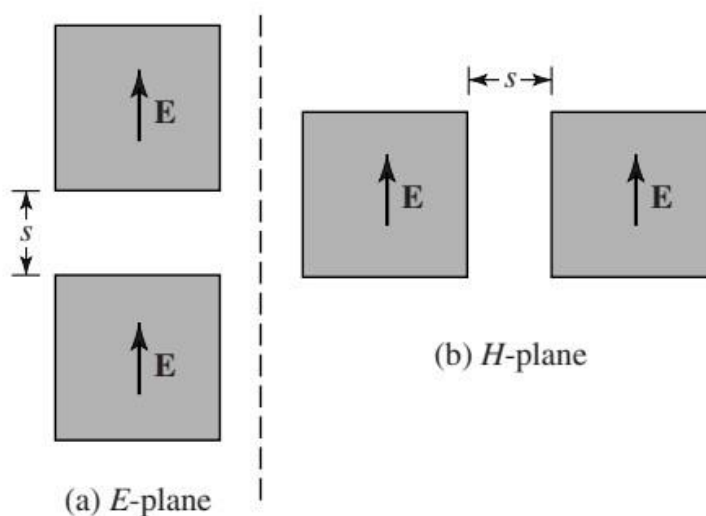
Σημείωση ότι τα κυκλώματα με διόδους PIN δεν μπορούν θεωρηθούν ιδανικοί διακόπτες, λόγω της πεπερασμένης αντίστασης και αντίδρασης που έχουν, πράγμα που οδηγεί σε απώλειες απολάβης.

Στην συνέχεια χρησιμοποιούνται κυκλωματικά στοιχεία εξασθενητών. Οι εξασθενητές με την σειρά τους είναι δίθυρα κυκλώματα που λαμβάνουν το σήμα το οποίο ταξιδεύει από την πηγή, μέσω των γραμμών μεταφοράς, που αποσκοπούν στην μείωση της ισχύος του σήματος ώστε να φτάνει σε κάθε μικροταινιακή κεραία ξεχωριστά το κατάλληλο ποσοστό ισχύος. Όπως και πριν τα κυκλωματικά στοιχεία των phase shifters και των attenuator θα πρέπει να εμφανίζουν εμπέδηση  $50\Omega$ .

### 3.6 Σύζευξη μικροταινιακών στοιχείων

Η σύζευξη δύο ή περισσότερων μικροταινιακών κεραιών αποτελεί συνάρτηση της απόστασης του ενός στοιχείου από το αλλό. Η σύζευξη παρουσιάζει μεγαλύτερες μεταβολές στην περίπτωση πλευρικής διάταξης. Έστω δύο ορθογωνικές μικροταινιακές κεραιές, όπου η πλευρική σύζευξη είναι συνάρτηση της σχετικής ευθυγράμμισης. Αυτό σημαίνει ότι όταν είναι συγγραμμικά ως προς το επίπεδο E η

σύζευξη θεωρείται επίπεδο E, ενώ αν είναι στο επίπεδο H θεωρείται σύζευξη επιπέδου H. Επιπλέον η απόσταση μεταξύ των στοιχείων, που παρουσιάζει μικρότερη απομόνωση για σύζευξη στο επίπεδο E είναι  $s < 0.10\lambda$  ενώ για το επίπεδο H είναι  $s > 0.10\lambda$ . Η σύζευξη οφείλεται κατα κύριο λόγο στα πεδία που υφίστανται στην διεπαφή αέρα διηλεκτρικού. Τα πεδία αυτά αναλύονται σε κύματα χώρου, κύματα δεύτερης τάξης, επιφανειακά κύματα, κύματα διαρροής. Τα δύο πρώτα επικρατούν σε μικρότερες αποστάσεις, ενώ τα επιφανειακά κύματα σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Σε μια ορθογώνια μικροταινία, στο επίπεδο E τα πεδία είναι TM, ενώ στο πεδίο H τα πεδία είναι TE (για τον κυρίαρχο ρυθμό). Στην περίπτωση όπου τα μικροταινιακά στοιχεία είναι συγγραμικά στο επίπεδο E και παρουσιάζουν πεδία TM, παρουσιάζεται ισχυρότερη σύζευξη μεταξύ των στοιχείων. Στην περίπτωση όπου είναι συγγραμικά στο επίπεδο H παρουσιάζονται πεδία TE και η σύζευξη μεταξύ των στοιχείων είναι μικρότερη.



Σχήμα 3.15 Μικροταινιακές κεραίες επιπέδου E και H [1]

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Ασύρματες επικοινωνίες και δίκτυα

Οι ασύρματες επικοινωνίες είναι ένα φαινόμενο το οποίο παρουσιάζει ραγδαία εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, καθώς η ασύρματη επικοινωνία έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι στην ζωή του ανθρώπου. Η συνεχής χρήση του κινητού τηλεφώνου, οι δορυφορικές επικοινωνίες, το 5G δίκτυο, το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), οδηγούν στην εξέλιξη της τεχνολογίας των ασυρμάτων επικοινωνιών και δικτύων που επιδιώκουν την αύξηση της χωριτηκότητας. Είναι μια επανάσταση που έχει επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα ως προς τον τρόπο και την διευκόλυνση της ζωής του ανθρώπου. Η ασύρματη δικτύωση αποσκοπεί στην ανάπτυξη των ασυρμάτων δικτύων WAN, WMANs, WLAN ή Wi-Fi, με το Wi-Fi να έχει τον πρωταγωνιστικό ρόλο, χωρίς να χρειάζονται εγκατάσταση καλωδίων. Συνεπώς η ασύρματη επικοινωνία είναι η μεταφορά πληροφορίας χωρίς την χρήση κάποιου φυσικού καλωδίου. Οι εφαρμογές των ασυρμάτων επικοινωνιών και δικτύων ποικίλουν, καθώς βρίσκονται συνεχώς καινοτόμες λύσεις για την απλούστευση και διευκόλυνση της επικοινωνίας, με την ασύρματη τεχνολογία να εξελίσσεται διαρκώς.

### 4.1 Ασύρματο κανάλι

Το ασύρματο κανάλι είναι ο χώρος στον οποίο μεταφέρεται η πληροφορία μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τον πομπό προς τον δέκτη. Η επικοινωνία μεταξύ πομπού – δέκτη, δεν είναι εύκολη υπόθεση διότι συμβάλουν αρκετοί παράγοντες που πρέπει να καθοριστούν, καθώς το κύμα ταξιδεύει προς τον δέκτη. Οι απώλειες στον ελεύθερο χώρο, η εξασθένιση, ο θόρυβος, η πολυδιαδρομική διάδοση είναι κάποιοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν εκτενώς την ασύρματη επικοινωνία, πράγμα που αποτελεί προϋπόθεση για την ανάπτυξη της τεχνολογίας ασύρματων κινητών επικοινωνιών.

Band	Frequency Range	Free-Space Wavelength Range	Propagation Characteristics	Typical Use
ELF (extremely low frequency)	30 to 300 Hz	10,000 to 1000 km	GW	Power line frequencies; used by some home control systems.
VF (voice frequency)	300 to 3000 Hz	1000 to 100 km	GW	Used by the telephone system for analog subscriber lines.
VLF (very low frequency)	3 to 30 kHz	100 to 10 km	GW; low attenuation day and night; high atmospheric noise level	Long-range navigation; submarine communication
LF (low frequency)	30 to 300 kHz	10 to 1 km	GW; slightly less reliable than VLF; absorption in daytime	Long-range navigation; marine communication radio beacons
MF (medium frequency)	300 to 3000 kHz	1000 to 100 m	GW and night SW; attenuation low at night, high in day; atmospheric noise	Maritime radio; direction finding; AM broadcasting.
HF (high frequency)	3 to 30 MHz	100 to 10 m	SW; quality varies with time of day, season, and frequency.	Amateur radio; international broadcasting, military communication; long-distance aircraft and ship communication
VHF (very high frequency)	30 to 300 MHz	10 to 1 m	LOS; scattering because of temperature inversion; cosmic noise	VHF television; FM broadcast and two-way radio, AM aircraft communication; aircraft navigational aids
UHF (ultra high frequency)	300 to 3000 MHz	100 to 10 cm	LOS; cosmic noise	UHF television; cellular telephone; radar; microwave links; personal communications systems
SHF (super high frequency)	3 to 30 GHz	10 to 1 cm	LOS; rainfall attenuation above 10 GHz; atmospheric attenuation due to oxygen and water vapor	Satellite communication; radar; terrestrial microwave links; wireless local loop
EHF (extremely high frequency)	30 to 300 GHz	10 to 1 mm	LOS; atmospheric attenuation due to oxygen and water vapor	Experimental; wireless local loop
Infrared	300 GHz to 400 THz	1 mm to 770 nm	LOS	Infrared LANs; consumer electronic applications
Visible light	400 THz to 900 THz	770 nm to 330 nm	LOS	Optical communication

Πίνακας 4.1 Ζώνες συχνοτήτων [6]

#### 4.1.1 Τρόποι διάδοσης και εξασθένιση σήματος

Όπως προαναφέρθηκε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο, μεταφέρει την πληροφορία από τον πομπό προς τον δέκτη. Παρόλα αυτά δεν είναι πάντα εφικτό να υπάρχει άμεση οπτική επαφή πομπού – δέκτη, διότι κατά την μετάδοση μπορεί να υπάρχει κάποιο φυσικό εμπόδιο όπως π.χ σε μεγάλες πόλεις τα κτήρια, ακόμα και οι καιρικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν την μετάδοση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος.

Για την μετάδοση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος υπάρχουν πέντε βασικοί τρόποι διάδοσης μεταφοράς πληροφορίας, που είναι οι εξής:

Είναι η διάδοση στον ελεύθερο χώρο όπου το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δεν συναντά καθόλου εμπόδια, δηλαδή ο πομπός και ο δέκτης έχουν άμεση οπτική επαφή, η μετάδοση καθώς το σήμα διαπερνά ένα μέσο ώστε να φτάσει στον δέκτη, η ανάκλαση που συμβαίνει καθώς το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε μεγάλες επιφάνειες σε



σχεση με το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού σήματος, η περίθλαση που συμβαίνει καθώς το σήμα προσκρούει σε αιχμηρές ακρές αντικειμένων, η σκέδαση που το σήμα αλληλεπιδρά με αντικείμενα τα οποία είναι μικρά σε σχέση με το μήκος του ηλεκτρομαγνητικού σήματος.

Εν συνεχεία η εξασθένηση του σήματος είναι ένας σημαντικός παράγοντας, κατά την εκπομπή και λήψη. Καθώς η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη αυξάνεται το σήμα εξασθενεί, πράγμα που οδηγεί σε προβλήματα μετάδοσης.

Τα προβλήματα μετάδοσης είναι ότι το σήμα θα πρέπει να έχει αρκετή ένταση έτσι ώστε ο δέκτης να μπορέσει να το ανιχνεύσει, θα πρέπει να έχει ένα επίπεδο μεγαλύτερο από του θορύβου, σε πιο υψηλές συχνότητες η εξασθένηση είναι μεγαλύτερη προκαλώντας παραμόρφωση, αφού τα σήματα περιλαμβάνουν πολλές συνιστώσες συχνότητες.

Τα παραπάνω δύο προβλήματα αντιμετωπίζονται χρησιμοποιώντας ενισχυτές, που αποσκοπούν στην ενίσχυση του σήματος έτσι ώστε ο δέκτης μπορεί να ανιχνεύσει το σήμα και να έχει υψηλότερη επίπεδο από αυτό του θορύβου, δεδομένου ότι σε μεγαλύτερες αποστάσεις η εξασθένηση είναι μεγάλη σε επίπεδα μη αποδεκτά. Το τρίτο πρόβλημα αντιμετωπίζεται πάλι με ενισχυτές αυξάνοντας από τις χαμηλές στις υψηλές συχνότητες. Αυτό γίνεται γιατί με την παραμόρφωση του σήματος λόγω της εξασθένησης, στον δέκτη οι συνιστώσες συχνοτήτων μπορεί να έχουν διαφορετικές σχετικές εντάσεις από αυτές του εκπεμπόμενου.

#### 4.1.2 Απώλειες διάδοσης στον ελεύθερο χώρο

Οι απώλειες στον ελεύθερο χώρο είναι η εξασθένηση του εκπεμπόμενου σήματος σε σχέση με την απόσταση καθώς το σήμα διασκορπίζεται σε όλο και μεγαλύτερο χώρο. Οι απώλειες διάδοσης ορίζονται ως ο λόγος της εκπεμπόμενης προς την λαμβανόμενη ισχύ.

$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi f d)^2}{c^2} \quad (4.1)$$

Η παραπάνω σχέση είναι για ιδανική ιστροπική κεραία. Επίσης η σχέση αυτή μπορεί να διατυπωθεί και σε μορφή dB ως:

$$L_{dB} = 20 \log(f) + 20 \log(d) - 147.56 \quad (4.2)$$

Σε περίπτωση άλλων κεραιών που δεν είναι ιστροπικές θα πρέπει να στον παρανομαστή να μούνε κε τα κέρδη των κεραιών. Όποτε η παραπάνω σχέση λαμβάνει την μορφή

$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{G_r G_t \lambda^2} = \frac{(cd)^2}{f^2 A_r A_t} \quad (4.3)$$

Τα  $A_r$ ,  $A_t$  είναι οι ενεργός επιφάνειες της κεραίας λήψης και εκπομπής αντίστοιχα. Οι ενεργός επιφάνειες συνδέονται άμεσα με το κέρδος και η εξίσωση είναι:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (4.4)$$

Η εξίσωση (4.3) μπορεί επίσης να γραφτεί σε μορφή dB

$$L_{dB} = -20 \log(f) + 20 \log(d) - 10 \log(A_t A_r) + 169.54 \quad (4.5)$$

### 4.1.3 Θόρυβος

Ο θόρυβος είναι ένα ανεπιθύμητο κομμάτι στις τηλεπικοινωνίες που μπορεί να δημιουργηθεί από τι διάφορες παραμορφώσεις που υφίσταται το σήμα καθώς φτάνει στην κεραία του δέκτη και, από τα ανεπιθύμητα σήματα που έρχονται από τους διάφορους τρόπου διάδοσης.

Ο πιο γνωστός θόρυβος είναι ο λευκός θόρυβος ή θερμικός θόρυβος, που κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το φάσμα συχνοτήτων. Είναι ένα κομμάτι το οποίο δεν μπορεί να εξαιρεθεί αλλά να θέσει ένα ανώτατο όριο στην απόδοση του συστήματος. Η εξίσωση του θερμικού θορύβου περιγράφεται:

$$N_0 = kT \left( \frac{W}{Hz} \right) \quad (4.6)$$

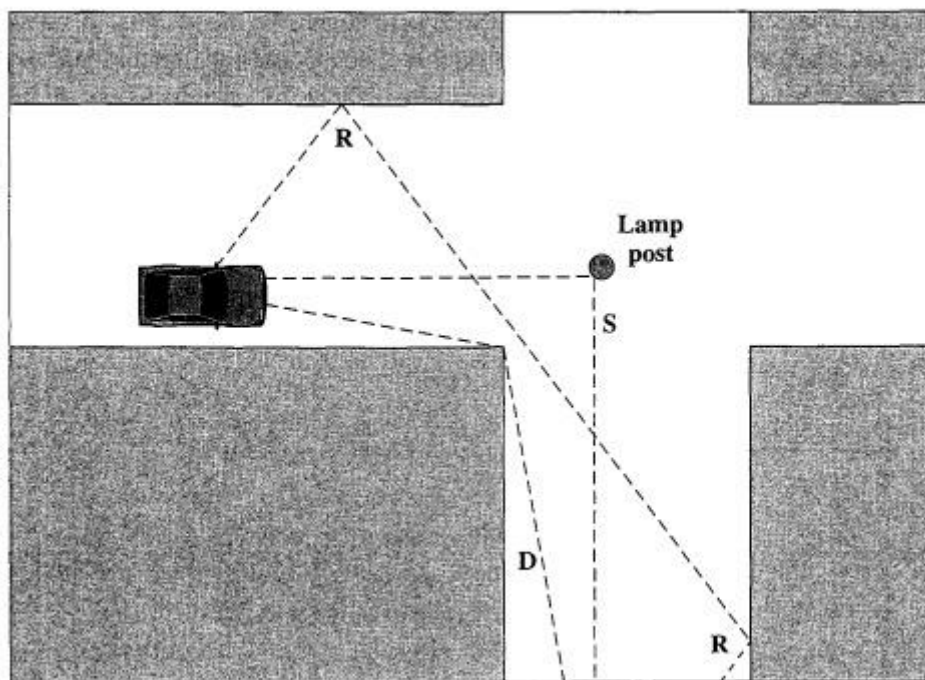
Ο όρος  $N_0$  είναι η πυκνότητα ισχύος θορύβου σε Watt ανά 1Hz

$k$  είναι η σταθερά Boltzmann  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K

$T$  είναι η θερμοκρασία σε Kelvin

### 4.1.4 Φαινόμενο πολυδιαδρομικής διάδοσης

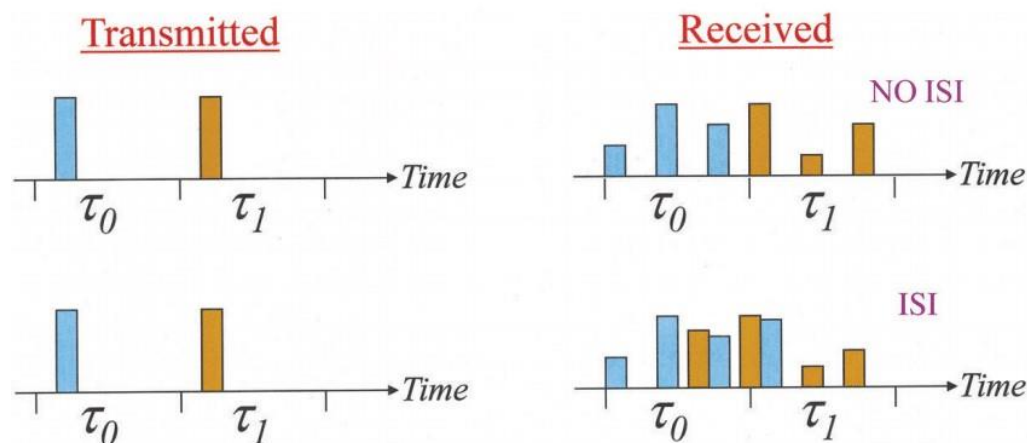
Το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης περιλαμβάνει τρεις από τους βασικούς τρόπου μετάδοσης που είναι η ανάκλαση, η περίθλαση και η σκέδαση. Τα τρία αυτά φαινόμενα συμβάλουν άμεσα στην απόδοση του συστήματος, καθώς σε μια κινητή μονάδα που δεν έχει άμεση οπτική επαφή με τον πομπό τα τρία αυτά φαινόμενα είναι βασικοί τρόποι λήψης στον δέκτη. Οι τρεις τρόποι παρουσιάζονται στην εικόνα 4.1.



Σχήμα 4.1 Πολυδιαδρομική διάδοση [6]

Οι συνέπειες της πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι ότι στον δέκτη λόγω ανάκλασης, περίθλασης, σκέδασης καταυθάνουν πολλά αντίγραφα του ίδου σήματος, τα οποία μπορεί να φτάσουν με διαφορετικές φάσεις το κάθε ένα. Αυτό έχει σαν συνέπεια η ισχύς να είναι 20 ή 30 dB μικρότερη, πράγμα που οδηγεί στην δυσκολία ώστε να το ανιχνεύσει ο δέκτης.

Μια άλλη συνέπεια της πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής (intersymbol interference ISI). Στην εικόνα 4.2 περιγράφεται το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής. Στην ουσία στέλνοντας δύο παλμούς σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ο δέκτης θα λάβει πρώτα το σήμα οπτικής επαφής και στην συνέχεια θα λάβει τα καθυστερημένα αντίγραφα σήματος λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης τα οποία μπορεί να φτάσουν την ίδια ή διαφορετική χρονική στιγμή σε σχέση με τον πρωτεύοντα παλμό. Αυτό έχει σαν συνέπεια να δρουν σαν μια μορφή θορύβου που δυσκολεύει την ανάκτηση της πληροφορίας.



Σχήμα 4.2 Φαινόμενο με διασυμβολική παρεμβολή και χωρίς [1]

#### 4.1.5 Χωρητικότητα καναλιού

Η χωρητικότητα καναλιού αναπτύχθηκε από τον μαθηματικό Claude Shannon, όπου εμπλέκει μέσα στην εξίσωση του τον σηματοθορυβικό λόγο. Η μέγιστη χωρητικότητα του καναλιού εκφράζεται ως εξής:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (\text{bits/sec}) \quad (4.7)$$

Όπου  $C$  είναι η χωρητικότητα του καναλιού σε bps,  $B$  είναι το εύρο ζώνης σε Hz, το  $SNR$  είναι ο σηματοθορυβικός λόγος.

Ο σηματοθορυβικός λόγος ( $SNR$ , signal noise ratio) είναι ο λόγος της ισχύς σήματος προς την ισχύ θορύβου. Είναι ένας σημαντικός παράγοντας καθώς μετρείται στον δέκτη όπου γίνεται η επεξεργασία σήματος και, σαν αποτέλεσμα έχοντας ανεπιθύμητο θόρυβο ο δέκτης να λαμβάνει εσφαλμένα bit πληροφορίας. Η εξίσωση του  $SNR$  εκφρασμένη σε dB είναι:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\text{ισχύς σήματος}}{\text{ισχύς θορύβου}} \text{ (dB)} \quad (4.8)$$

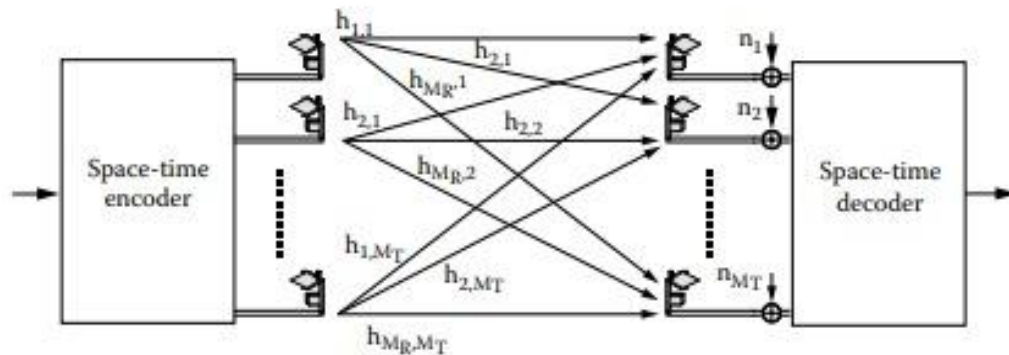
Έχοντας υψηλό SNR σημαίνει ότι το σήμα είναι υψηλής ποιότητας.

Ένα σημαντικό κομμάτι που πρέπει να αναφερθεί για την εξίσωση (4.7) είναι ότι αντιπροσωπεύει μόνο τον λευκό θόρυβο, χωρίς να λαμβάνει επιπλέον θορύβους, παραμόρφωση λόγω εξασθένησης ή καθυστέρησης. Έπιπλέον για δεδομένο επίπεδο θορύβου αυξάνοντας την ισχύ ή το εύρος ζώνης, αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης. Βέβαια αυξάνοντας την ισχύ συναπάγεται αύξηση επίδρασεις μη γραμμικότητας στο σύστημα, πράγμα που αυξάνει τον θόρυβο. Επίση αυξάνοντας το εύρος ζώνης και έχοντας την παρουσία λευκού θορύβου, τόσο ο θόρυβος ισχωρεί στο σύστημα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης τόσο να μειώνεται το SNR, πράγμα που οδηγεί σε κακή ποιότητα σήματος.

## 4.2 Συστήματα κεραιών MIMO

Ένα σύστημα MIMO αποτελείται από πολλαπλές κεραιές στον πομπό και πολλαπλές κεραιές στον δέκτη. Ο αριθμός των κεραιών δεν είναι αναγκαστικά ίσος και κάθε κεραιά έχει την δικιά του RF αλυσίδα. Λόγω του ότι οι ευρυζωνικές επικοινωνίες απαιτούν συνεχώς υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και υψηλή ποιότητα επικοινωνίας (QoS) η τεχνολογία MIMO σε συνδυασμό με τη τεχνική μετάδοσης OFDM που θα αναφερθεί παρακάτω έρχεται να δώσει την λύση σε αυτό το πρόβλημα.

Η δομή ενός ΜΙΜΟ συστήματος παρουσιάζεται στην εικόνα (4.3).



Σχήμα 4.3 Δομή ΜΙΜΟ συστήματος [7]

#### 4.2.1 Μήτρα καναλιού ΜΙΜΟ

Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα (4.3) η δομή του ΜΙΜΟ συστήματος είναι πολλαπλές κεραίες στον πομπό – πολλαπλές κεραίες στον δέκτη. Για την ακρίβεια υπάρχουν  $M$  κεραίες στον πομπό και  $N$  κεραίες στον δέκτη και εξίσωση εισόδου – εξόδου είναι:

$$y = Hx + n \quad (4.9)$$

Το  $y$  είναι το διάνυσμα των λαμβανόμενων σημάτων,  $x$  είναι το διάνυσμα των εκπεμπόμενων σημάτων,  $n$  είναι ο προσθετικός θόρυβος, το  $H$  είναι η μήτρα του καναλιού όπου είναι ένας πίνακας  $M \times N$  με  $M$  είναι ο αριθμός των γραμμών που αντιστοιχεί στα στοιχεία του δέκτη και  $N$  είναι ο αριθμός των στηλών που αντιστοιχεί στα στοιχεία του πομπού. Ο μήτρα  $H$  περιγράφεται με τα στοιχεία  $h_{NM}$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Οι συντελεστές καναλιού  $h_{NM}$  είναι μιγαδικοί αριθμοί και αναπαριστούν το πλάτος και την φάση του εκάστοτε καναλιού, καθώς δείχνει την διαδρομή από την κεραία εκπομπής στην κεραία λήψης.

#### 4.2.2 Χωρικός διαφορισμός και χωρική πολυπλεξία

Στον χωρικό διαφορισμό τα ίδια σύμβολα πληροφορίας  $N_t$  εκπέμπονται και αποκωδικοποιούνται στο δέκτη όπου συνδυάζει τα σύμβολα μέσω πολλαπλών κεραιών. Αυτό το φαινόμενο αυξάνει την ισχύ στο κανάλι πράγμα που βελτιώνει το SNR (signal noise ratio) για καλύτερη απόδοση. Επίσης είναι χρήσιμο γιατί βελτιώνει τις επιδόσεις απέναντι στην επίπεδη διάλειαση

Στην χωρική πολυπλεξία διαφορετικά σύμβολα πληροφορίας  $N_t$  εκπέμπονται από πολλαπλές κεραιές και ο δέκτης λαμβάνει όλα αυτά τα σύμβολα πληροφορίας και τα ανακτά. Είναι χρήσιμο ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα μετάδοσης, υπό της προϋπόθεση καλών συνθηκών στο κανάλι. Επίσης αξιοποιεί το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης.

#### 4.2.3 Τεχνική μετάδοσης OFDM

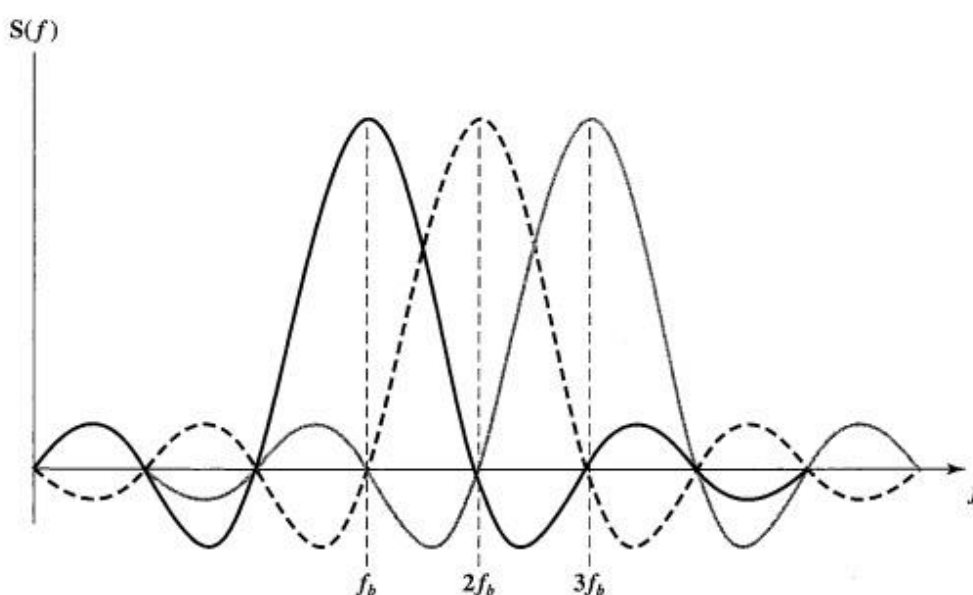
Η τεχνική μετάδοσης OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) χρησιμοποιεί πολλαπλά φέροντα σήματα σε διαφορετικές συχνότητες. Η αρχή της βασίζεται στην ορθογωνιότητα μεταξύ των υποφερουσών. Η ορθογωνιότητα εμφανίζεται όταν η τιμή κορυφής σήματος συμπίπτει με την τιμή μηδέν για τα υπόλοιπα σήματα. Τα υποκανάλια απέχουν μεταξύ τους κατά  $1/T_{sym}$  με  $T_{sym}$  η διάρκεια του συμβόλου, που είναι ο πολλαπλασιασμός αριθμός υποκαναλιών  $x$  διάρκεια αρχικού συμβόλου. Είναι μια τεχνική που μοιάζει με την FDM, όμως για την τεχνική FDM τα σήματα έπρεπε να τοποθετούνται επαρκώς μακριά για να μη υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των ζωνών συχνοτήτων και την παροχή επιπλέον



απόστασης guard band. Η OFDM με την ορθογωνιότητα που παρουσιάζει ξεπερνάει αυτό το πρόβλημα.

Η τεχνική μετάδοσης OFDM παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα όπως το ότι εκμεταλλεύεται το διαθέσιμο φάσμα, εγγυάται ότι τα υποκανάλια δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους, είναι ανθεκτικό στην επίπεδη διάλλειψη επηρεάζοντας μόνο ένα μικρό αριθμό υποκαναλιών, η χαμένη πληροφορία από αυτά τα υποκανάλια ανακτάτε χρησιμοποιώντας το κυκλικό πρόθεμα (CRC). Το μεγαλύτερο όμως πλεονέκτημα είναι ότι αντιμετωπίζει την διασυμβολική παρεμβολή που προκαλείται από την πολυδιαδρομική διάδοση.

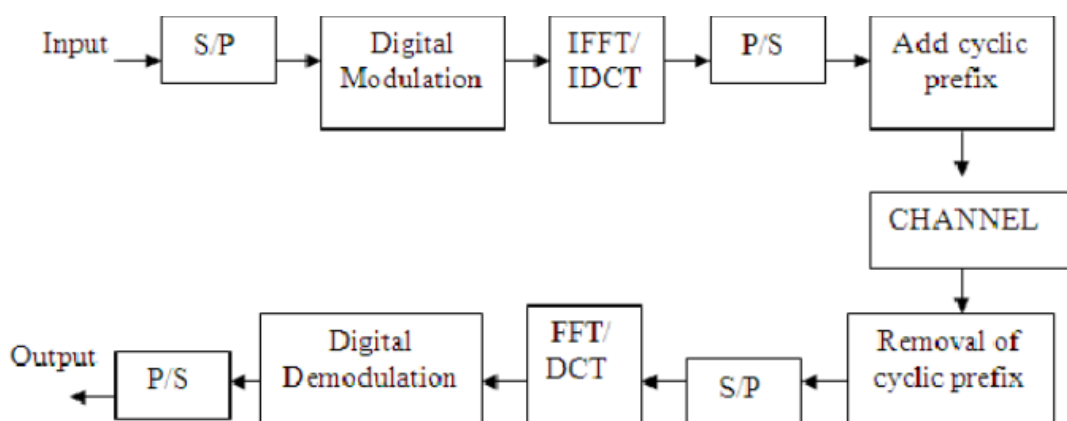
Παρόλα τα πλεονεκτήματα παρουσιάζει και μειονεκτήματα που είναι η διακαναλική παρεμβολή, λόγω του μεγάλου πλάτους κορυφής μπορεί να μειώσει την απόδοση του ενισχυτή πράγμα που μπορεί να οδηγήσει στην μη γραμμική συμπεριφορά και έτσι χάνεται η ορθογωνιότητα. Παρακάτω παρουσιάζεται η εικόνα 4.4 με την τεχνική μετάδοσης OFDM.



Σχήμα 4.4 Τεχνική μετάδοσης OFDM [6]

#### 4.2.4 Υλοποίηση OFDM

Η υλοποίηση OFDM οφείλεται στον ορθό και αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier. Στην ουσία μια ροή δεδομένων μετατρέπεται από σειριακή σε παράλληλη από την οποία δέχεται ένα σύνολο δειγμάτων που ονομάζεται σύμβολο OFDM. Στην συνέχεια ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier υπολογίζει τη ροή δεδομένων στο πεδίο του χρόνου. Γίνεται ξανά μετατροπή από παράλληλο σε σειριακό και μπαίνει και το κυκλικό πρόθεμα (CRC) για την εξάλειψη πλήρους διασυμβολικής παρεμβολής. Εν συνεχεία ο δέκτης κάνει ακριβώς την αντίστροφη διαδικασία βγάζοντας το κυκλικό πρόθεμα, από σειριακή σε παράλληλη, χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Fourier για την επαναφορά στο πεδίο συχνοτήτων και τέλος γίνεται από παράλληλη σε σειριακή.



Σχήμα 4.5 Υλοποίηση OFDM [6]

#### 4.3 Ευφυείς κεραιές

Οι ευφυείς ή προσαρμοσμένες κεραιές είναι μια ανακάλυψη από το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο καθώς χρησιμοποιούνταν σε αμυντικά συστήματα. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται άμεσα στις ασύρματες επικοινωνίες, καθώς χρησιμοποιεί

συστήματα ΜΙΜΟ, προσαρμοστικούς αλγορίθμους, αξιοποιεί αποτελεσματικά το περιβάλλον καταρίπτοντας τις διαλείψεις από πολυδιαδρομική διάδοση.

Τα κίνητρα που οδήγησαν στην ανάπτυξη των προσαρμοστικών κεραιών είναι η αύξηση των χρηστών, αυξημένες απαιτήσεις ρυθμών μετάδοσης, αύξηση της εμβέλειας σε δορυφορικά συστήματα. Τα παραπάνω κίνητρα έθεσαν ως στόχο την αύξηση της εμβέλειας και της ποιότητας υπηρεσίας σε περιοχές δύσκολης πρόσβασης, μείωση εκπεμπόμενης ισχύος και παρεμβολών, αύξηση της χωριτηκότητας του καναλιου που είναι το κύριο δεδομένο. Παρακάτω θα αναφερθεί και θα αναλυθεί το λειτουργικό σύστημα μιας προσαρμοστικής στοιχειοκεραίας καθώς και το σύστημα μεταγωγής δέσμης.

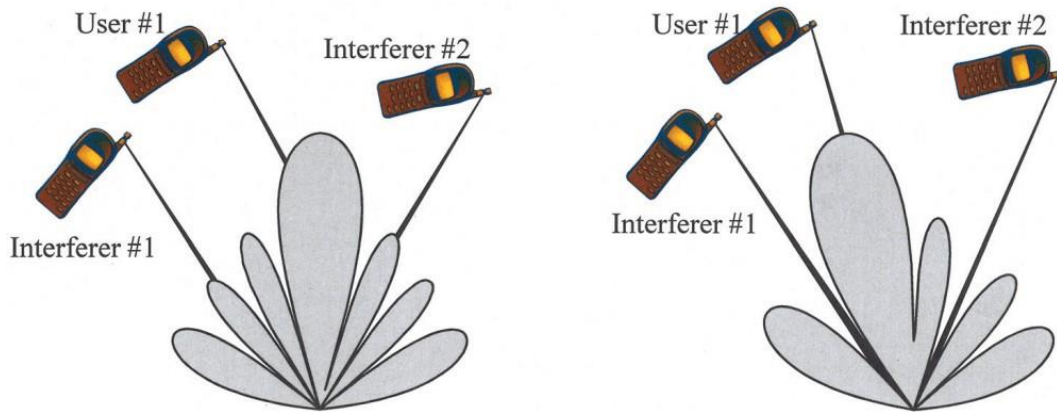
#### **4.3.1 Σύστημα ευφών κεραιών**

Οι ανάπτυξη συστημάτων ευφών κεραιών έχει καταφέρει την αύξηση της χωριτηκότητας, την μείωση σφάλματος, μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης, διάγραμμα ακτινοβολίας προς επιθυμητούς χρήστες. Αυτά τα συστήματα χωρίζονται σε συστήματα μεταγωγής δέσμης, σύστημα προσαρμοστικών στοιχειοκεραιών.

Το σύστημα μεταγωγής δέσμης αποτελεί επέκταση της τομεοποίησης κυψελών. Στόχος του συστήματος μεταγωγής δέσμης είναι η ανίχνευση έντασης του σήματος, η επιλογή κατάλληλου διαγράμματος ακτινοβολίας και η αύξηση κέρδους ανάλογα με την θέση του χρήστη.

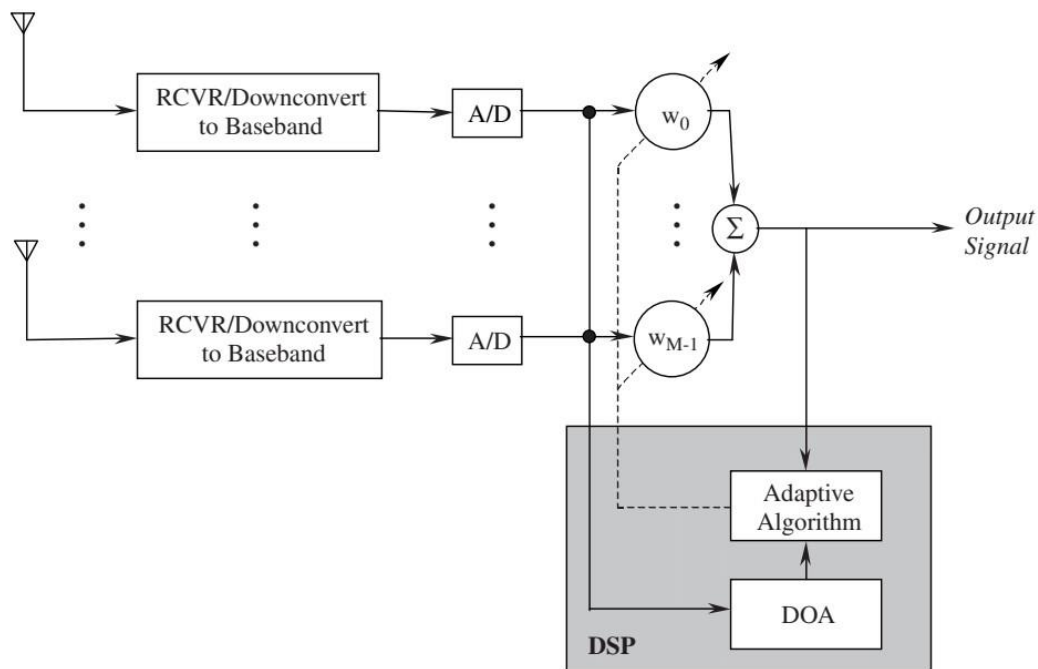
Το σύστημα προσαρμοστικών κεραιών έχει ως στόχο την δημιουργία διαγράμματος ακτινοβολίας για τον κάθε χρήστη απορρίπτοντας τα ανεπιθύμητα σήματα SNOI και κρατώντας τα σήματα ενδιαφέροντος SOI.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται και στην εικόνα 4.6, το σύστημα μεταγωγής δέσμης και το προσαρμοστικό σύστημα.



Σχήμα 4.6 Σύστημα μεταγωγής δέσμης και προσαρμοστικής κεραίας [1]

Όπως αναφέρθηκε το σύστημα προσαρμοστικώ κεραιών απορρίπτει τα σήματα SNOI και κρατάει το επιθυμητό σήμα SOI, δημιουργώντας για κάθε χρήστη το ιδανικό διάγραμμα ακτινοβολίας. Ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζεται στην εικόνα 4.7.

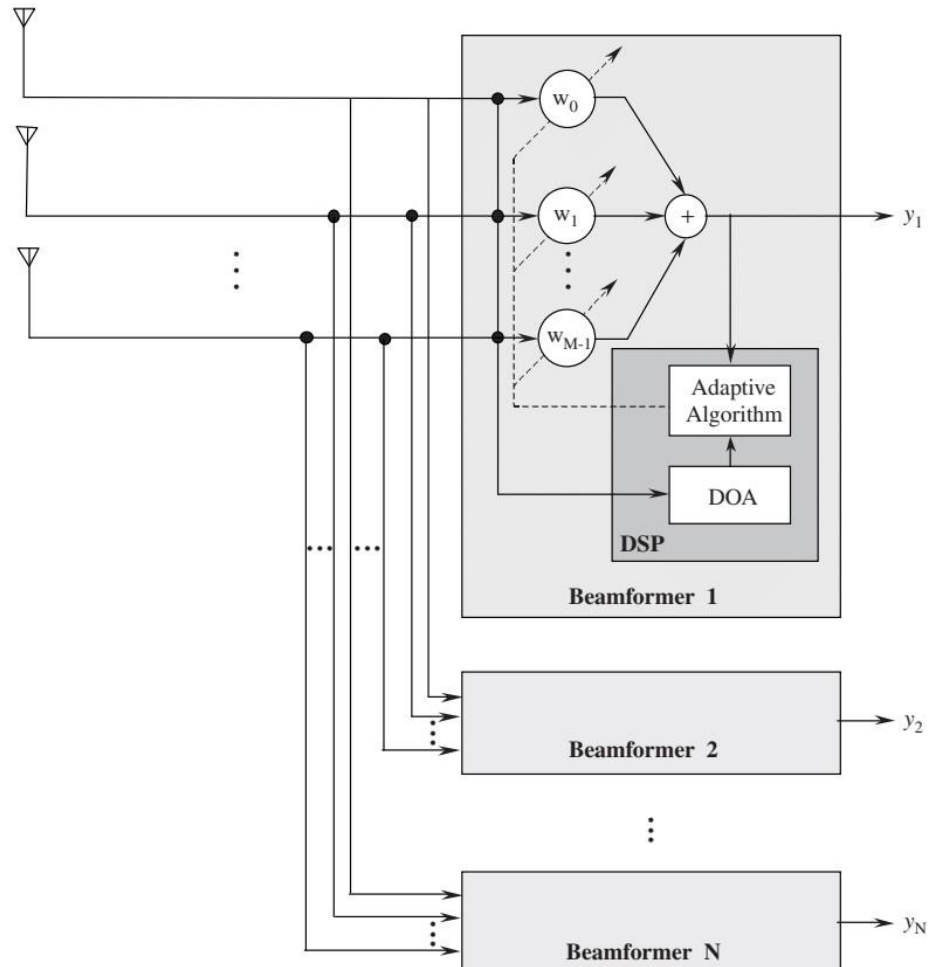


Σχήμα 4.7 Σύστημα προσαρμοστικής στοιχειοκεραίας [1]

Το παραπάνω σύστημα μετατρέπει τα λαμβανόμενα σήματα RF σε σήματα βασικής ζώνης, στην συνέχεια τα μετατρέπει απο αναλογικά σε ψηφιακά, στην συνέχεια μέσω του αλγορίθμου DOA ( direction of arrival) εκτίμηση διεύθυνσης άφησης εντοπίζει τα SOI και απορρίπτει τα SNOI και μέσω ενός προσαρμοστικού αλγορίθμου υπολογίζει τα βάρη ( πλάτος και φάση) όπου θα δώσει το κατάλληλο διάγραμμα ακτινοβολίας για τον χρήστη.

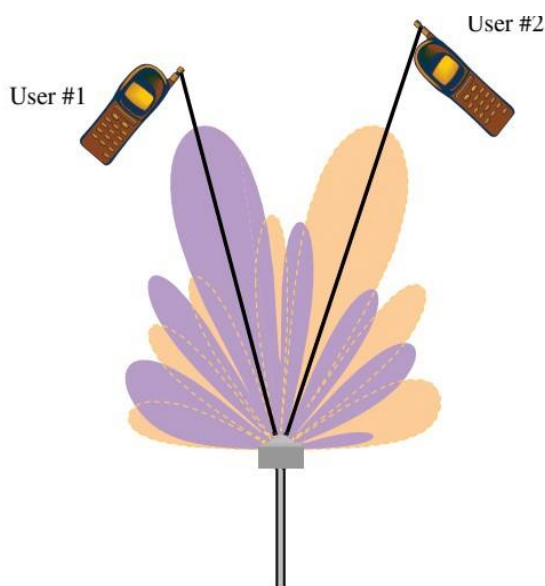
### 4.3.2 SDMA

Η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου SDMA ( spatial division multiple access) είναι μια σημαντική τεχνολογία, που βρίσκουν χρήση οι προσαρμοστικές κεραίες, καθώς δημιουργεί διαφορετική δέσμη για τον κάθε χρήστη. Στην ουσία το SDMA επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του ίδου καναλιού από πολλούς χρήστες. Η επιτεύξη του συστήματος παρουσιάζεται στην εικόνα 4.8 , καθώς και το διάγραμμα ακτινοβολίας εικόνα 4.9 δύο χρηστών. Σημαντική απαίτηση είναι ότι οι χρήστες θα πρέπει να έχουν ικανή γωνιακή απόσταση και κάθε διάγραμμα να παρουσιάζει μηδενισμό στην γωνία του άλλου χρήστη.



Σχήμα 4.8 Διάγραμμα συστήματος SDMA [1]

Όπως φαίνεται στο σχήμα τοποθετούνται παράλληλα υποσυστήματα μορφοποίησης δέσμης όπου το κάθε ένα από αυτά έχει το δικό του αλγόριθμο DOA, προσαρμοστικό αλγόριθμο. Η παραπάνω τεχνολογία αυξάνει την χωρητικότητα, μειώνει τις παρεμβολές καθώς προσφέρει και δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων.



Σχήμα 4.9 SDMA πολλαπλής δέσμης [1]

### 4.3.3 Διάδοση σήματος

Όπως έχει είδη αναφερθεί η διάδοση σήματος μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους όπως ανάκλαση, σκέδαση περίθλαση, διάθλαση. Αυτό ονομάζεται φαινόμενο πολυδιαδρομικής διάδοσης. Με το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης φτάνουν στον δέκτη πολλαπλά αντίγραφα του ίδου σήματος με καθυστέρηση λόγω των πολλαπλών διαδρομών πράγμα που προκαλεί το φαινόμενο των διαλείψεων (fading). Οι προσαρμοστικές κεραιές μπορούν και αξιοποιούν το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης και μπορούν να αξιοποιούν ή να απορρίπτουν τα ανακλώμενα σήματα, δέχοντας το σημαντικό κομμάτι πληροφορίας SOI και απορρίπτοντας τα σήματα SNOI.

#### 4.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ευφών κεραιών

Οι ευφείς κεραιές παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των μειονεκτημάτων. Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι αύξηση τη χωρητικότητας και η αύξηση του λόγου σήματος προς παρεμβολές SIR ( signal to interference ratio) καθώς αυξάνεται η στάθμη του σήματος και μειώνονται οι παρεμβολές. Επιπλέον λόγω της μεγάλης κατευθυντικότητας παρουσιάζουν αύξηση της εμβέλειας, καθώς οι σταθμοί βάσεις μπορούν να τοποθετούνται πιο μακριά. Επίσης οι προσαρμοστικές κεραιές όπως προαναφέρθηκε δημιουργείται για τον κάθε χρήστη το δικό του διάγραμμα ακτινοβολίας πράγμα που οδηγεί στο ότι η ενέργεια του σήματος αξιοποιείται πλήρως στους χρήστες.

Τα μειονεκτήματα των ευφών κεραιών παρουσιάζονται ως προς την υλοποίηση τους. Έχουν πολυποκότους πομποδέκτες καθώς χρειάζεται ξεχωριστό κύκλωμα για κάθε κεραία και ακριβέστερη ρύθμιση σε πραγματικό χρόνο. Ως προς το beamforming χρειάζονται αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις πράγμα που οδηγεί σε ισχυρούς ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος άρα και την αύξηση κόστους.

#### 4.4 Ανασκόπηση γραμμικής και επιπεδικής στοιχειοκεραίας

Όπως έχει είδη αναφερθεί απο το κεφάλαιο 2 για γραμμικές και επιπεδικές στοιχειοκεραίας γινόταν υπολογισμός του παράγοντα συστοιχίας και στην συνέχεια κανονικοποίηση της εξίσωσης.

Για μια γραμμική στοιχειοκεραία με άρτιο αριθμό στοιχείων και ισαπέχοντα μεταξύ τους είχε υπολογιστεί ότι ο παράγοντας συστοιχία είναι ο εξής:

$$(AF)_{2M} = \alpha_1 e^{j\left(\frac{1}{2}\right)kdcos\theta} + \alpha_2 e^{j\left(\frac{3}{2}\right)kdcos\theta} + \dots + \alpha_M e^{j(2M-1)kdcos\theta} + \alpha_1 e^{-j\left(\frac{1}{2}\right)kdcos\theta} + \alpha_2 e^{-j\left(\frac{3}{2}\right)kdcos\theta} + \dots + \alpha_M e^{-j(2M-1)kdcos\theta} \quad (4.11)$$

Η κανονικοπιήμενη μορφή της παραπάνω εξίσωσης είναι:



$$(AF)_{2M} = \sum_{n=1}^M a_n \cos\left[\frac{(2n-1)}{2} k d \cos\theta\right] \quad (4.12)$$

Ως προς τις επιπεδικές στοιχειοκεραίες που είναι ένα απο τα κυρίαρχα κομμάτια της διπλωματικής είχε υπολογιστεί στο κεφάλαιο 2 ο παράγοντας συστοιχείας και η κανονικοποιημένη μορφή. Παρακάτω θα αναφερθεί η επιπεδική στοιχειοκεραία με μικροταινιακά στοιχεία και στο κεφάλαιο 5 θα γίνουν οι υπολογισμοί και η δημιουργία στις μικροταινιακής στοιχειοκεραία.

Η εξίσωση του παράγοντα συστοιχεία για επιπεδική στοιχειοκεραία είναι:

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(k d_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(k d_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y)} \quad (4.13)$$

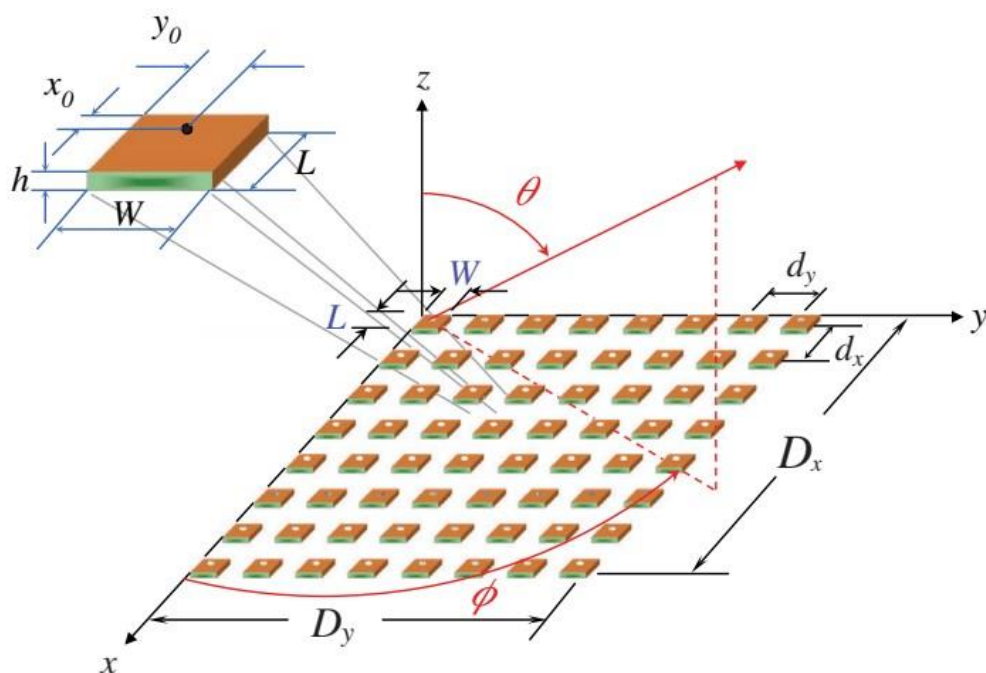
Η κανονικοποιημένη μορφή είναι

$$AF_n(\theta, \phi) = \left[ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right] \left[ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right] \quad (4.14)$$

Όλα τα παραπάνω αναφέρονται με περισσότερες λεπτομέρειες στο κεφάλαιο 2. Η γραμμική στοιχειοκεραία με άρτιο και περιττό αριθμό στοιχείων παρουσιάζεται στην εικόνα 2.6, η επιπεδική στοιχειοκεραία παρουσιάζεται στην εικόνα 2.7.

#### 4.5 Επιπεδική στοιχειοκεραία με μικροταινιακά στοιχεία

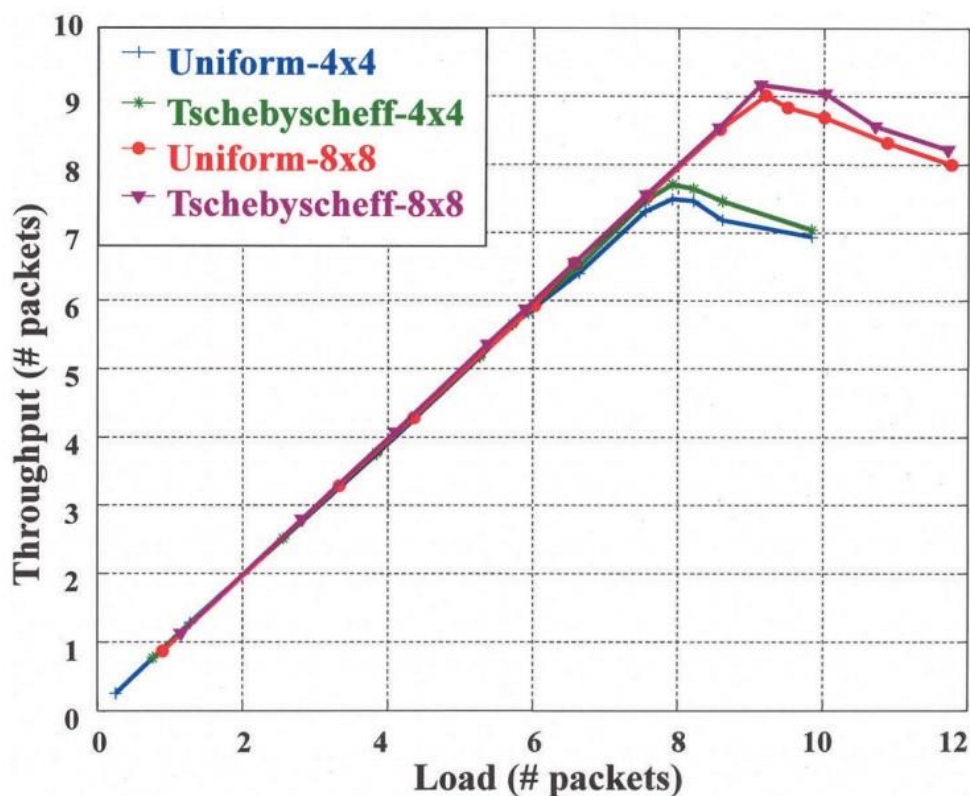
Στο κεφάλαιο 3 έχει γίνει ανάλυση των μικροταινιακών στοιχείων και τους διάφορους τρόπου τροφοδοσίας των patch. Όπως αναφέρεται στην διπλωματική εργασία η επιπεδική στοιχειοκεραία θα δημιουργηθεί με στοιχεία μικροταινιας. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το στοιχείο μικροταινιας είναι για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας που έχει. Οι υπολογισμοί και η υλοποίηση τους αναφέρεται στο κεφάλαιο 5.



Σχήμα 4.10 Επιπεδική στοιχειοκεραία 8x8 με μικροταινιακά στοιχεία [1]

Στην εικόνα 4.10 παρουσιάζεται η υλοποίηση μια επιπεδικής στοιχειοκραίας 8x8 δηλαδή με 64 μικροταινιακά στοιχεία.

Μια στοιχειοκεραία 8x8 σε σύγκριση με μια 4x4 είναι καταληλότερη διότι όσα περισσότερα στοιχεία υπάρχουν τόσο μικρότερο γίνεται το πλάτος της κύριας δέσμης, πράγμα που οδηγεί πιο εύκολα στον εντοπισμό των SOI και των SNOI. Επίσης λόγω του μικρού πλάτους δέσμης αυξάνεται η ρυθμοαπόδοση του δικτύου – φορτίου και αυτό φαίνεται στην εικόνα 4.11.



Σχήμα 4.11 Ρυθμοαπόδοση δικτύου συναρτηση φόρτου [1]

#### 4.6 Αμοιβαία σύζευξη και αποσύζευξη

Η αμοιβαία σύζευξη (mutual coupling) είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των κεραιών, καθώς τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας όπως το διάγραμμα ακτινοβολίας επηρεάζονται από τα υπόλοιπα στοιχεία. Η αμοιβαία σύζευξη συμβαίνει στην περίπτωση όπου τα στοιχεία της κεραίας βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους και όσο μειώνεται αυτή η απόσταση τόσο περισσότερο επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας. Ειδικά στο θέμα των ευφών κεραιών, λόγω των αλγορίθμων που χρησιμοποιούν, μπορούν να δώσουν λανθασμένα αποτελέσματα. Επιπλέον προκαλεί μετατόπιση των μεγίστων-μηδενισμών με αποτέλεσμα να μην δείχνει τους σωστούς μηδενισμούς και μέγιστα.

Παρόλο που η σύζευξη είναι ένα σημαντικό κομμάτι, υπάρχουν τρόποι αντιμετώπισης έτσι ώστε να επιτευχθεί η αποσύζευξη (decoupling) μεταξύ των στοιχείων. Ένας αρχικός τρόπος είναι η απομάκρυνση των στοιχείων μεταξύ τους. Άλλοι τρόποι

αντιμετώπισης της αμοιβαίας σύζευξης είναι με την χρησιμοποίηση μεταυλικών, μεταεπιφανειών, ηλεκτρομαγνητικά διάκενα EBG. Σαφώς υπάρχουν και άλλοι τρόποι πέρα από τον EBG, θα επικεντρωθούμε όμως σε αυτή τη μέθοδο. Η μέθοδος EBG είναι μια δομή που μπλοκάρει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην συγκεκριμένη συχνότητα, χρησιμοποιώντας αρκετά ηλεκτρομαγνητικά διάκενα, που οφείλεται στην δομή και τον συντονισμό των στοιχείων. Επιπλέον η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με μεταυλικά (MTM-EBG) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12 και προσφέρει αύξηση της απομόνωσης, η τοποθέτηση μιας τέτοιας δομής τοποθετείται ανάμεσα στα δύο στοιχεία κεραιών.

Σε μια μικροταινιακή διάταξη κεραιών, όπου είναι και το αντικείμενο της διπλωματικής, έχουν την δυνατότητα καταστολής επιφανειακών κυμάτων. Ειδικά στην περίπτωση αυτή η σύζευξη αποτελεί σημαντικό παράγοντα καθώς τα κύματα οδεύουν εντός του υποστρώματος, άρα περιορίζει την δυνατότητα σάρωσης δέσμης.



Σχήμα 4.12 Απομόνωση δύο στοιχείων μέσω MTM-EBG [11]

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Υλοποίηση μικροταινιακής στοιχειοκεραίας

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζεται η υλοποίηση της μικροταινιακής κεραίας MIMO, αρχικά ως μεμονωμένο στοιχείο και στην συνέχεια ως μια στοιχειοκεραία 4X4 για ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς. Για την δημιουργία και την προσομοίωση της στοιχειοκεραίας καθώς και για το δίκτυο τροφοδοσίας θα

χρησιμοποιηθεί το λογισμικό CST-STUDIO. Στην συνέχεια γίνονται η απαραίτητοι υπολογισμοί για της διαστάσης του patch μέσω προσεγγιστικών τύπων που έχουν ανεφερθεί στο κεφάλαιο 3, τους οποίους υπολογισμούς θα του δούμε παρακάτω. Η συχνότητα λειτουργείας της μικροταινιακής κεραίας θα είναι στα  $f=5\text{GHz}$ , το διηλεκτρικό που χρησιμοποιείται είναι το RO4350B της εταιρίας ROGERS με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r=3.66$ , συντελεστη απωλειών  $\tan\delta=0.0035$ , ύψος  $h=1.6\text{mm}$ , το patch και η γείωση δεν θα είναι απο PEC (Perfect Electric Conductor), αλλά από χαλκό.

## 5.1 Το λογισμικό CST-STUDIO

Το λογισμικό CST-STUDIO είναι ένα περιβάλλον προσομοιώσεις κεραίων, όπου θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια της διπλωματικής εργασίας. Είναι ένα λογισμικό με πολλές δυνατότητες, καθώς επιτρέπει την σχεδίαση διαφόρων ειδών κεραίων σε τρισδιάστατη μορφή. Στην συνέχεια ένα ακόμα σημαντικό μέρος όπου θα χρειαστεί να αναφερθεί στην διπλωματική εργασία είναι η S-παράμετροι καθώς και τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατα, δυσδιάστατα και σε πολική μορφή. Το λογισμικό CST-STUDIO είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την προσομείωση των κεραίων, διότι επιτρέπει την μαθηματική ή την γεωμετρική ανάλυση για την δημιουργία μιας στοιχειοκεραίας. Το θετικό στην πρώτη περίπτωση είναι ότι παρόλου που είναι αρκετά γρήγορο δεν περιλαμβάνει την σύζευξη που δημιουργείται μεταξύ των κεραίων. Στην δεύτερη περίπτωση είναι περισσότερο ακριβής ως προς τα αποτελέσματα γιατί περιλαμβάνει την σύζευξη που δημιουργείται μεταξύ των κεραίων, αλλά χρειάζεται περισσότερο χρόνο. Η γεωμετρική ανάλυση σαφώς και προτιμάτε γιατί δίνει ακριβέστερα τιμές, αλλά και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα.

## 5.2 Υπολογισμός διαστάσεων μικροταινιακής κεραίας

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνουν οι υπολογισμοί διαστάσεων της μικροταινιακής κεραίας σύμφωνα με τις εξισώσεις του κεφαλαίου 3. Οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν είναι 3.1 – 3.5.

Δεδομένου ότι γνωρίζουμε την συχνότητα λειτουργίας στην οποία θα συντονίζει η κεραία, την διηλεκτρική σταθερά, το ύψος του υποστρώματος, εύκολα υπολογίζονται οι διαστάσεις της μικροταινιακής κεραίας.

Παρακάτω φαίνονται οι υπολογισμοί:

$$W = \frac{u_o}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{30}{2 * 5} \sqrt{\frac{2}{3.66 + 1}} = 1.965cm = 19.65mm$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} = \frac{3.66 + 1}{2} + \frac{3.66 - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{0.16}{1.965} \right]^{-\frac{1}{2}} = 3.275$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} = 0.412 \frac{(3.275 + 0.3) \left( \frac{1.965}{0.16} + 0.264 \right)}{(3.275 - 0.258) \left( \frac{1.965}{0.16} + 0.8 \right)} * 0.16 = 0.075cm =$$

0.75mm

$$L = L_{eff} - 2\Delta L = \frac{30}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L = \frac{30}{2 * 5 \sqrt{3.275}} - 2 * 0.075 = 1.506cm = 15.06mm$$

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι οι διαστάσεις του patch. Στην συνέχεια θα υπολογιστούν οι διαστάσεις του ground μέσω προσεγγιστικών τύπων:

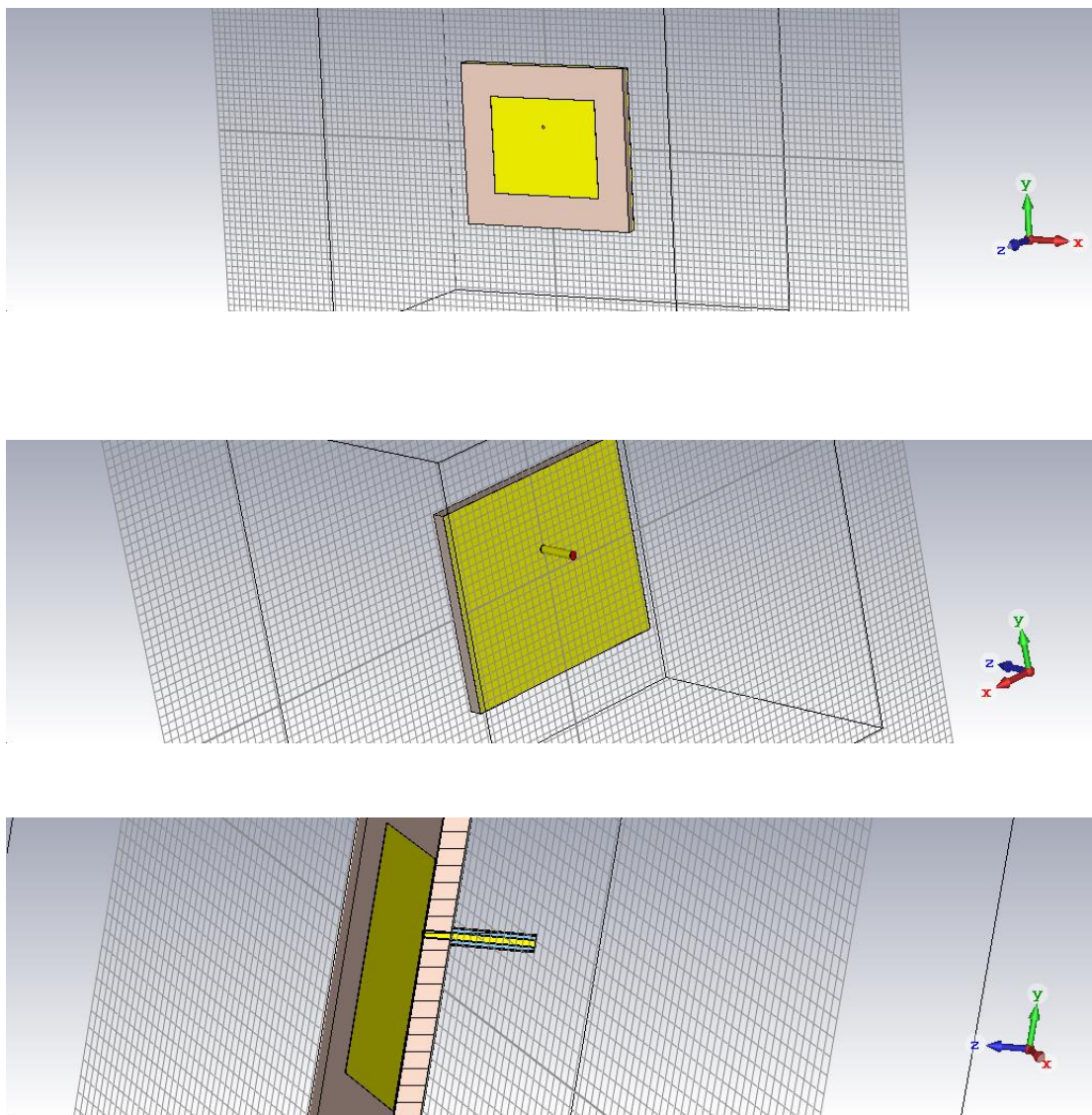
$$Wg = 6 * h + W = 6 * 0.16 + 1.965 = 2.925cm = 29.25mm$$

$$Lg = 6 * h + L = 6 * 0.16 + 1.506 = 2.466cm = 24.66mm$$

### 5.3 Προσομοίωση της μικροταινιακής κεραίας στο CST-STUDIO

Στο πρώτο σκέλος της προσομείωσης παρουσιάζεται η μικροταινιακή κεραία ως μεμονωμένο στοιχείο. Οι υπολογισμοί για τις διαστάσεις του patch έχουν γίνει στο

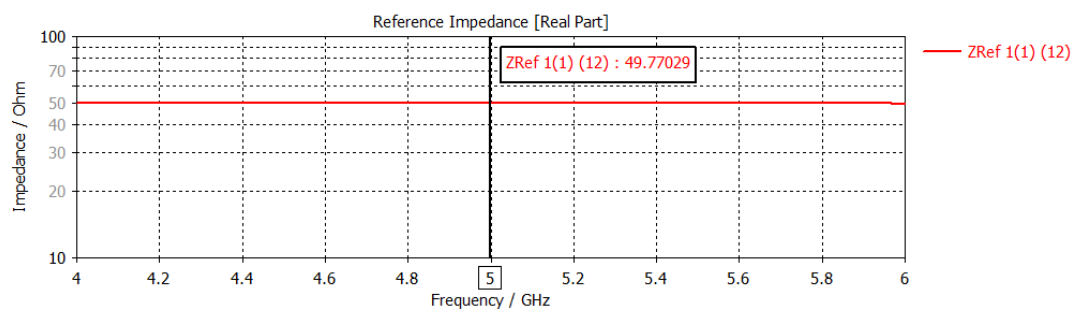
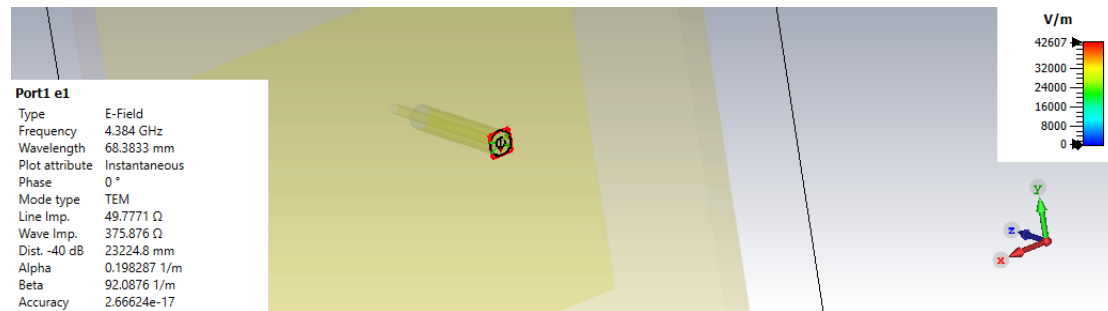
προηγούμενο υποκεφάλαιο 5.2. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η κεραία σχεδιασμένη με το πρόγραμμα CST-STUDIO ως μεμονωμένο στοιχείο.



Σχήμα 5.1 Σχεδιασμός μεμονωμένου στοιχείου μικροταινιακής κεραίας

Στο σχήμα 5.1 η κεραία είναι σχεδιασμένη με διηλεκτρικό υλικό RO4350B με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r = 3.66$ , η γείωση και το patch είναι από χαλκό και η τροφοδοσία είναι με ομοαξονικό σηματολήπτη.

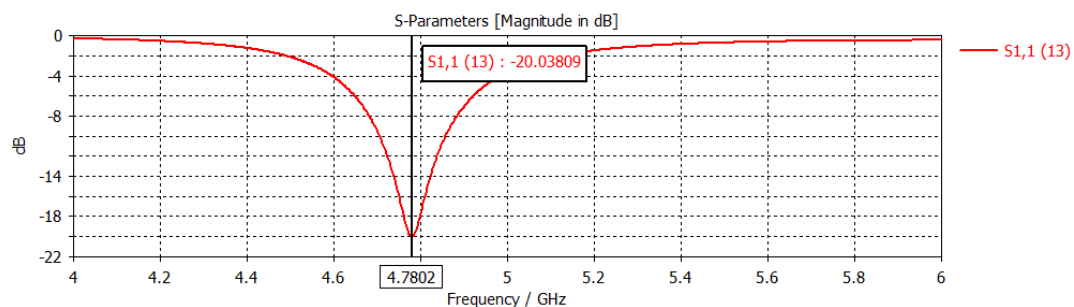
Ένα σημαντικό κομμάτι σε μια τέτοια είδους σχεδίαση που κάποιος πρέπει να ελέγξει, είναι να παρουσιάζει  $50\Omega$  αντίσταση ώστε να έχει προσαρμογή και δεύτερον την S-παραμέτρο.



Σχήμα 5.2 Προσαρμογή στα 5GHz

Παραπάνω φαίνονται οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου καθώς και η προσαρμογή με αντίσταση 49.77Ω, δηλαδή περίπου 50Ω. Επίσης η προσαρμογή φαίνεται και από το διάγραμμα του σχήματος 5.2

Το δεύτερο πράγμα που πρέπει κάποιος να παρατηρήσει είναι η S-παράμετρος.



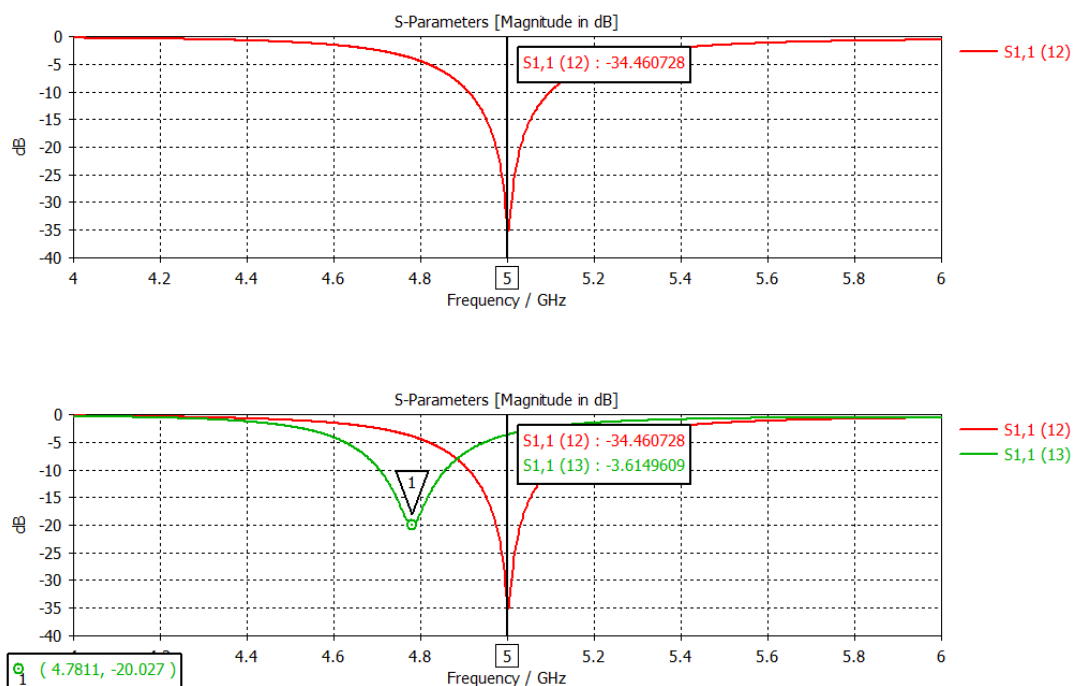
Σχήμα 5.3 S11-παράμετρος

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η S11 όμως δεν είναι συντονισμένη στα 5GHz. Αυτό συμβαίνει γιατί όπως έχει είδη αναφερθεί οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των



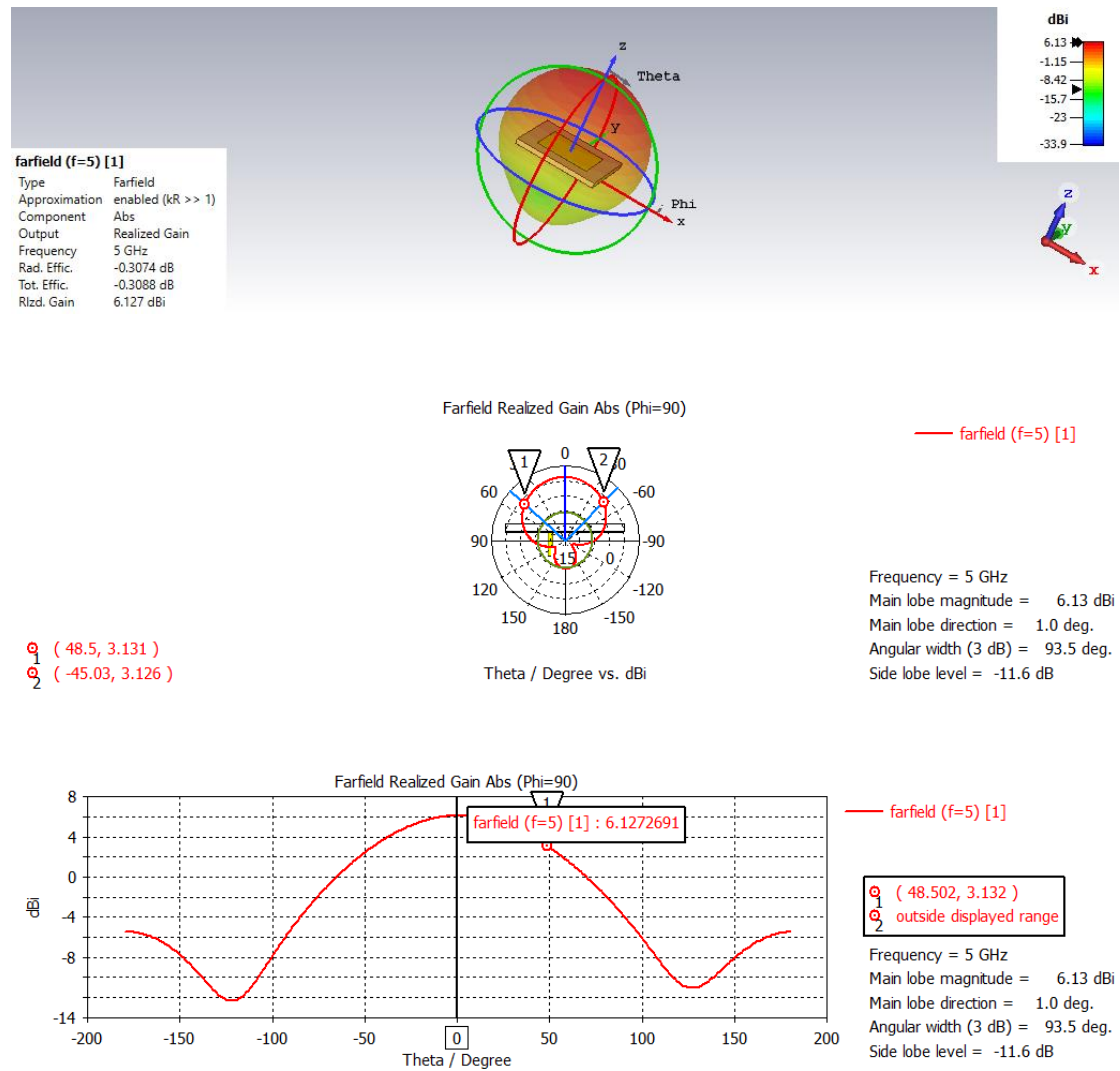
διαστάσεων του patch είναι προσεγγιστικοί. Για τον λόγο αυτό πρέπει να γίνουν κάποιες προσαρμογές ως προς τις διαστάσεις έτσι ώστε να συντονίζεται στην συχνότητα λειτουργίας τα 5GHz.

Αλλάζοντας το  $w_p=17.2$  και το  $l_p=14.46$  όχι μόνο συντονίζεται στα 5GHz αλλά και η  $S_{11}$  φτάνει τα  $-34.46\text{dB}$



Σχήμα 5.4 Συντονισμός στην συχνότητα λειτουργίας 5GHz

Εφόσον έχει γίνει η παραπάνω διαδικασία και η  $S_{11}$  συντονίζεται στην επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας 5GHz, σειρά έχει το διάγραμμα ακτινοβολίας. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατο, πολικό, καρτεσιανό σύστημα.



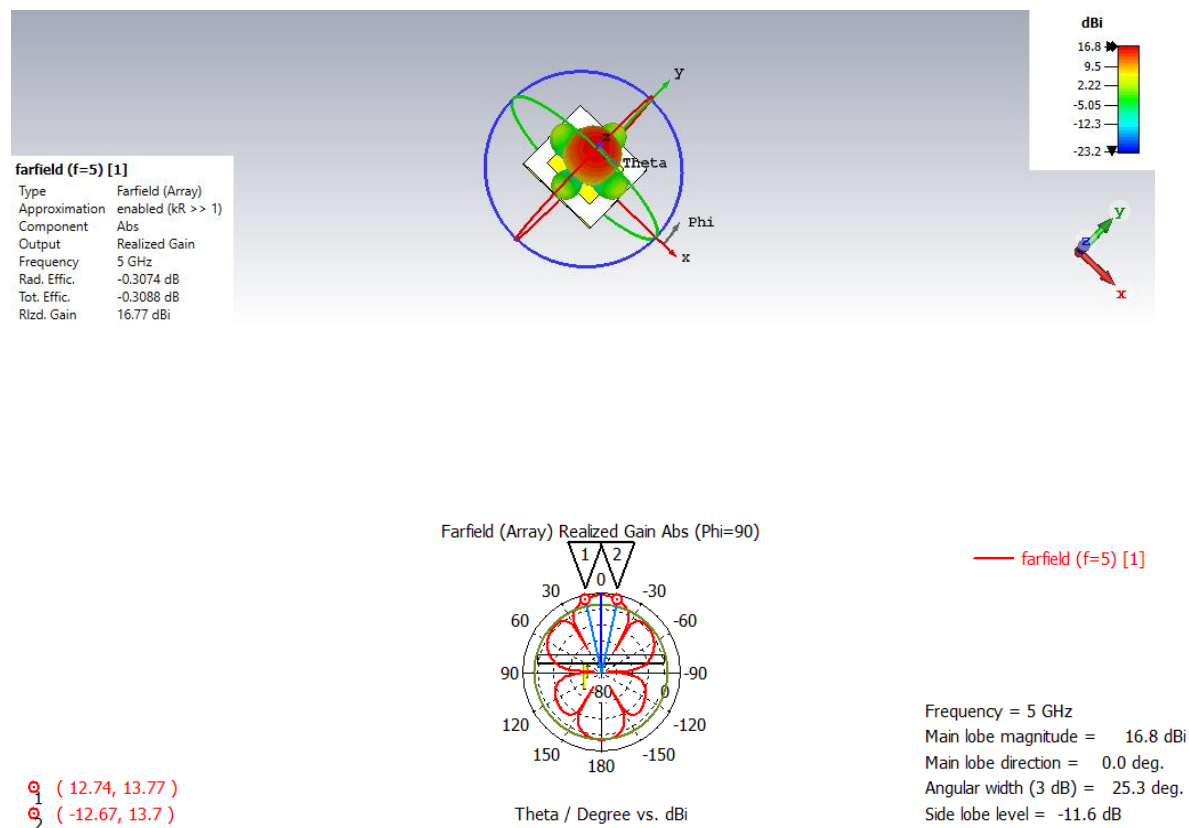
Σχήμα 5.5 Διαγράμματα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατο, πολικό, καρτεσιανό σύστημα

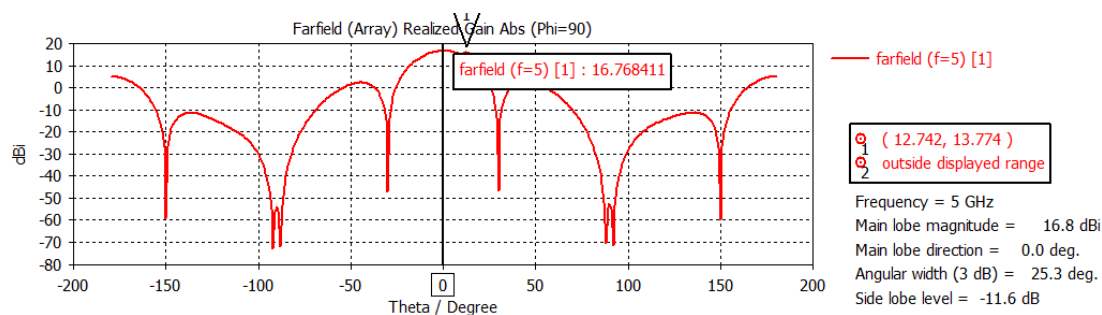
Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι το μέγιστο κέρδος είναι κάθετο στην επιφάνεια και είναι στα 6.127dBi (Το dBi είναι η ενίσχυση της κεραίας σε σχέση με μια ισοτροπική). Επίσης απο το πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας παρατηρείται η γωνία ημίσειας ισχύος που είναι στις 93.5° και ότι το μέγιστο του κύριου λοβού είναι στις 1°.

## 5.4 Δημιουργία στοιχειοκεραίας μέσω μαθηματικής ανάλυσης

Η μαθηματική ανάλυση έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πολύ γρηγορότερη η σχεδίαση στη στοιχειοκεραίας, σε σχέση με την γεωμετρική ανάλυση. Το μειονέκτημα είναι ότι δεν συμπεριλαμβάνει τον παράγοντα σύζευξης που υπάρχει μεταξύ των στοιχείων, πράγμα που σημαίνει ότι κάποιος χρησιμοποιώντας την μαθηματική ανάλυση είναι 95% ακριβής, ενώ με την γεωμετρική ανάλυση είναι 100% ακριβής γιατί συμπεριλαμβάνεται η σύζευξη που δημιουργείται μεταξύ των στοιχείων. Στην συνέχεια θα γίνει και η γεωμετρική ανάλυση και θα παρατηρηθεί ότι τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με της μαθηματικής ανάλυσης.

Εκτελώντας την μαθηματική ανάλυση και δημιουργώντας μια στοιχειοκεραία 4X4 και με  $\lambda=30\text{mm}$  μεταξύ των στοιχείων, παράγεται το εξής διάγραμμα ακτινοβολίας:

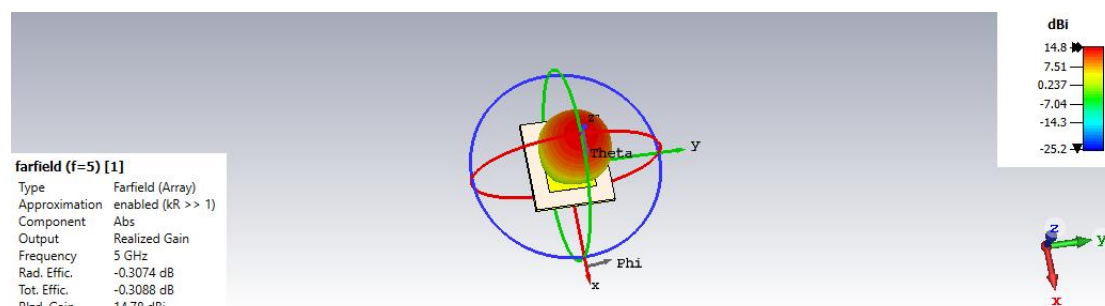


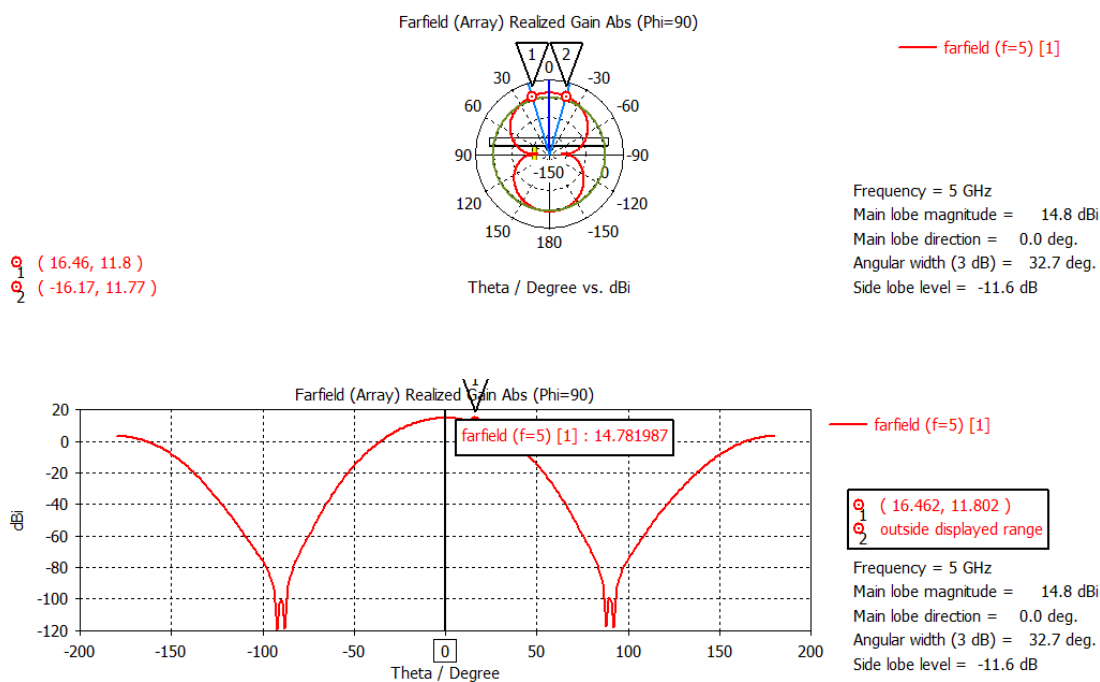


Σχήμα 5.6 Διαγράμματα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 4X4 σε τρισδιάστατο, πολικό, καρτεσιανό σύστημα

Στο τρισδιάστο διάγραμμα ακτινοβολίας παρατηρείται ότι το κέρδος έχει αυξηθεί σε σχέση με το μεμονωμένο στοιχείο πράγμα που είναι αναμενόμενο. Το κέρδος έχει ανέλθει στα 16.77dBi, στο πολικό διάγραμμα η γωνία ημίσειας ισχύος σε σχέση με το μεμονωμένο στοιχείο κεραίας παρουσιάζει μείωση και είναι στα  $25.3^\circ$  με το μέγιστο του κύριου λοβού στις  $0^\circ$ .

Στην συνέχεια της μαθηματικής ανάλυσης αυτό που παρατηρείται στο διάγραμμα ακτινοβολίας είναι ότι έχει εμφανίσει πλευρικούς λοβούς. Για την μείωση των πλευρικών λοβών, πρέπει να γίνει επηρεάζοντας το πλάτος κάθε κεραίας. Για τον τρόπο αυτό κρατούνται τα κεντρικά στοιχεία στο 1, τα διαγώνια στοιχεία στο 1/9, και τα υπόλοιπα στοιχεία στο 1/3. Τοποθετώντας τι διεγέρσεις στις αντίστοιχες κεραίες το διάγραμμα ακτινοβολίας που παρουσιάζεται είναι το εξής:





Σχήμα 5.7 Διαγράμματα ακτινοβολίας απαλλαγμένα από πλευρικούς λοβούς

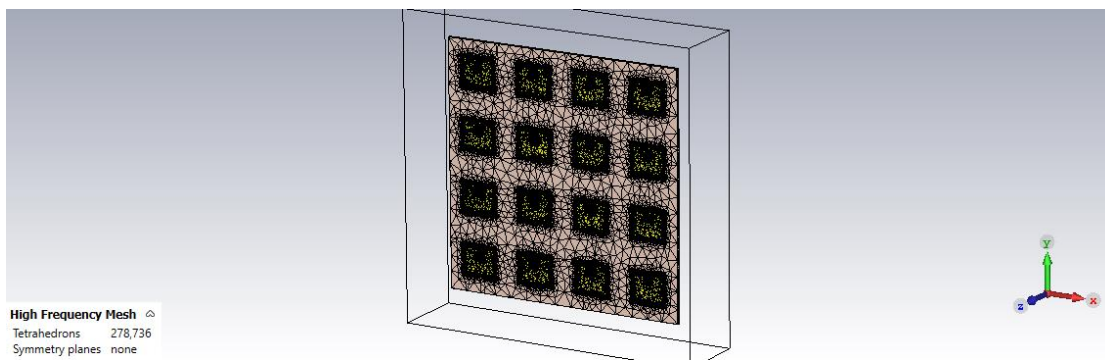
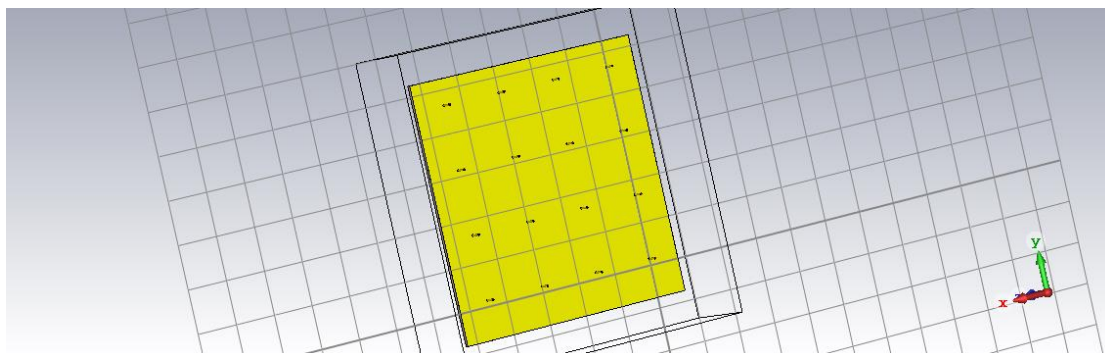
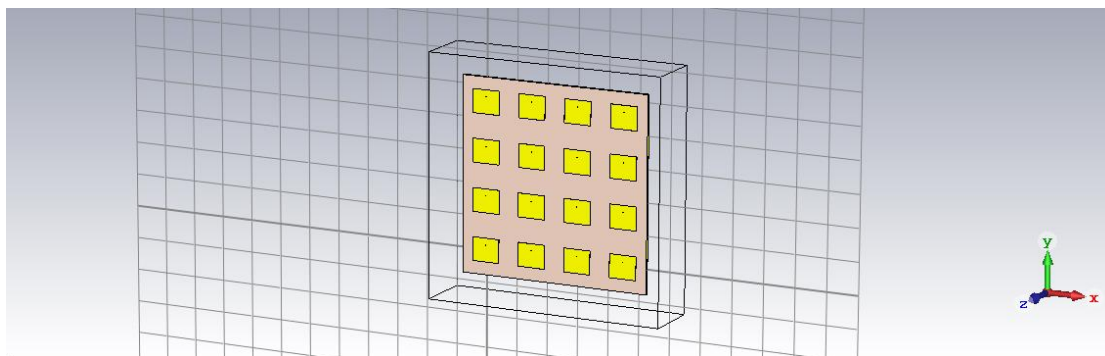
Παρακάτω θα γίνει η γεωμετρική ανάλυση της στοιχειοκεραίας, και στην συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί μέθοδος αποσύζευξης, που θα είναι η αύξηση της απόστασης μεταξύ των στοιχείων και στην συνέχεια θα ξαναγίνει η μαθηματική ανάλυση συμπεριλαμβάνοντας την αύξηση της απόστασης, άρα και την σύζευξη και θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

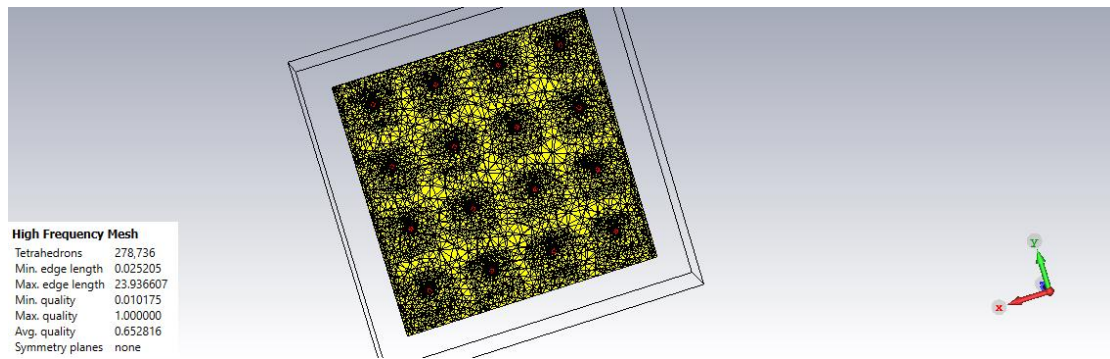
## 5.5 Δημιουργία στοιχειοκεραίας μέσω γεωμετρικής ανάλυσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μαθηματική ανάλυση για την δημιουργία της στοιχειοκεραίας σε σχέση με την γεωμετρική ανάλυση έχει το πλεονέκτημα της ταχύτητας, όμως υστερεί στο ότι δεν είναι 100% ακριβής. Για τον λόγο αυτό έχει γίνει η γεωμετρική ανάλυση της στοιχειοκεραίας 4X4 στο CST-STUDIO για να υπάρχει η πλήρης εικόνα και τα πλήρη στοιχεία για μια τέτοια είδους κατασκευή.

Επιπλέον έπρεπε να αυξηθεί το μέγεθος της γείωσης έτσι ώστε το ένα patch να αγγίζει μετο άλλο για να χρησιμοποιηθεί η εντολή translate και boolean add για να δημιουργηθεί μια εννοιά γείωση και δηλεκτρικό. Επίσης η απόσταση μεταξύ των στοιχείων είναι  $\lambda/2$ , πράγμα που δεν είναι τυχαίο καθώς σε αυτήν την απόσταση υπάρχουν μειωμένη πλευρικοί λοβοί. Αυξάνοντας την γείωση επηρεάζεται ελάχιστα ο συντονισμός, όμως μεγαλώνει το κέρδος της κεραίας.

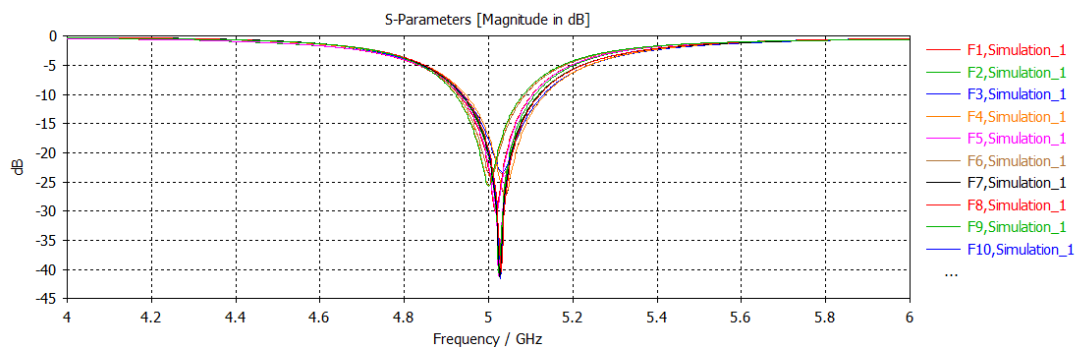
Παρακάτω στο σχήμα 5.8 φαίνεται η στοιξεοκεραία 4X4, με απόσταση στοιχείων  $\lambda/2$  δηλαδή 30mm.





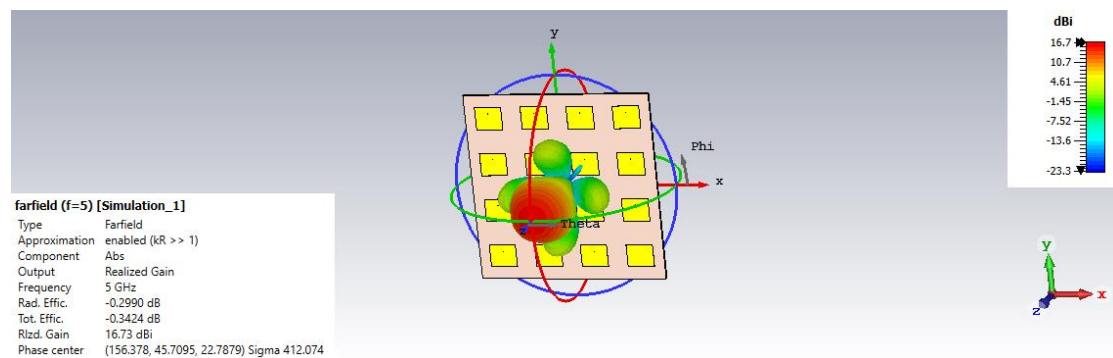
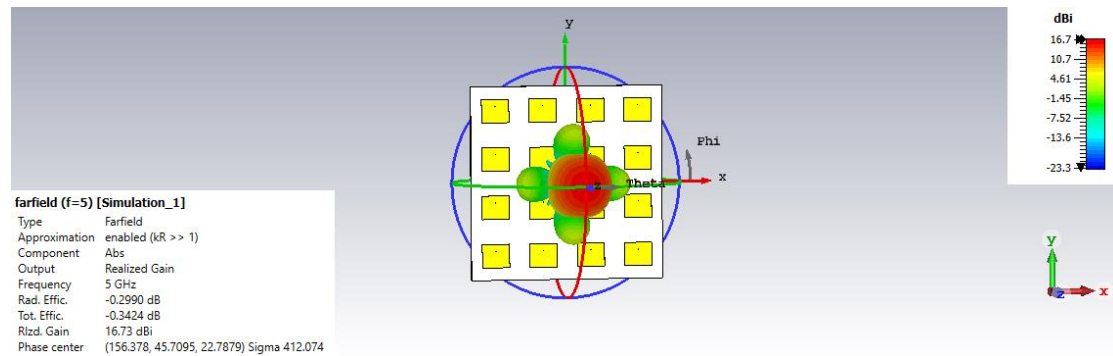
Σχήμα 5.8 Δημιουργία στοιχειοκεραίας 4X4, απόσταση  $\lambda/2$

Μετά την ανάλυση σειρά έχουν οι  $S$ -παράμετροι. Παρατηρείται ότι η  $S$ -παράμετροι είναι συντονισμένοι στην επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας των 5GHz με μια μικρή κλίση προς τα δεξιά και αυτό οφείλεται στην αύξηση της γείωσης και στα γειοτονικά στοιχεία.

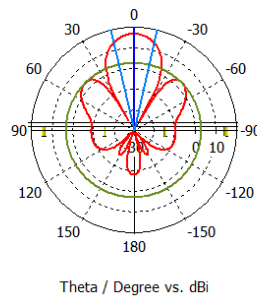


Σχήμα 5.9  $S$ -παράμετροι

Σειρά έχει το διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας. Το κέρδος είναι κάθετο στην επιφάνεια και έχει αυξηθεί στα 16.7dBi, εμφανίζονται μειωμένοι πλευρικοί λοβοί λόγω της απόστασης  $\lambda/2$ . Επίσης στο πολικό διάγραμμα η γωνία ημίσειας ισχύος είναι στις  $25.3^\circ$ , καθώς στις  $0^\circ$  βρίσκεται το μέγιστο κέρδος.

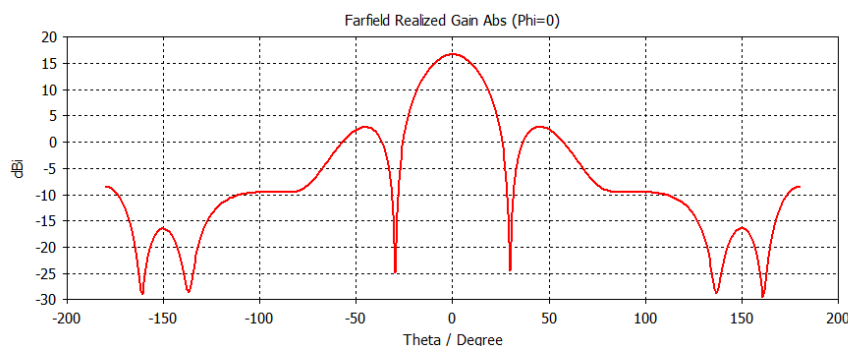


Farfield Realized Gain Abs (Phi=0)



— farfield (f=5) [Simulation\_1]

Frequency = 5 GHz  
 Main lobe magnitude = 16.7 dBi  
 Main lobe direction = 0.0 deg.  
 Angular width (3 dB) = 25.3 deg.  
 Side lobe level = -13.8 dB



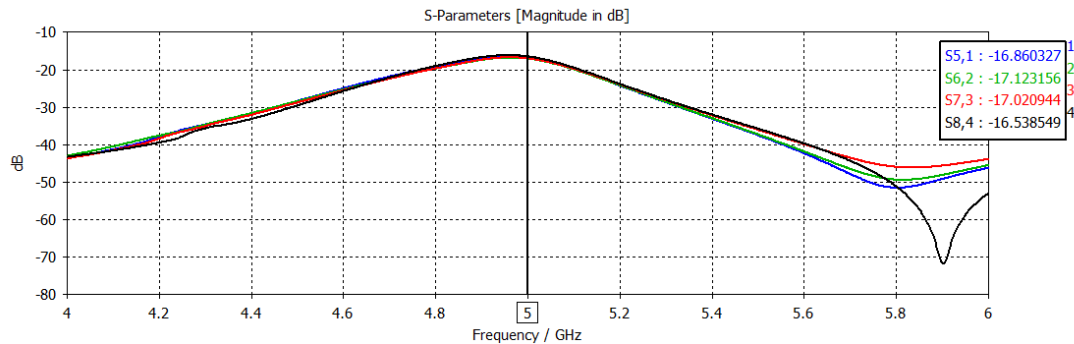
— farfield (f=5) [Simulation\_1]

Frequency = 5 GHz  
 Main lobe magnitude = 16.7 dBi  
 Main lobe direction = 0.0 deg.  
 Angular width (3 dB) = 25.3 deg.  
 Side lobe level = -13.8 dB

Σχήμα 5.10 Τρισδιάστατο, πολικό, καρτεσιανό διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας 4X4



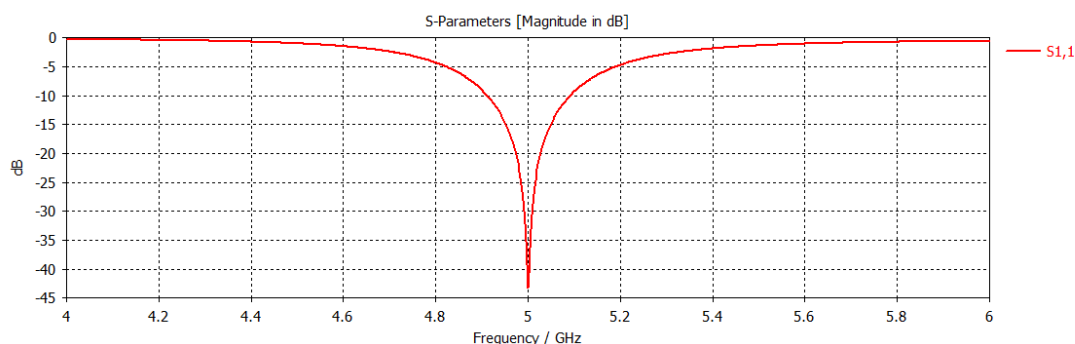
Επίσης ένα σημαντικό κομμάτι είναι η σύζευξη μεταξύ των στοιχείων. Αυτό μπορεί να βρεθεί κοιτώντας τις S-παραμέτρους όπου η απομόνωση μεταξύ των στοιχείων είναι στα -16.8dB. Ένας τρόπος που θα γίνει ώστε να διορθωθεί η σύζευξη θα είναι να αυξηθεί η απόσταση μεταξύ των στοιχείων που αναλύεται στο υποκεφάλαιο 5.5.2.



Σχήμα 5.11 S-παραμέτροι απομόνωσης

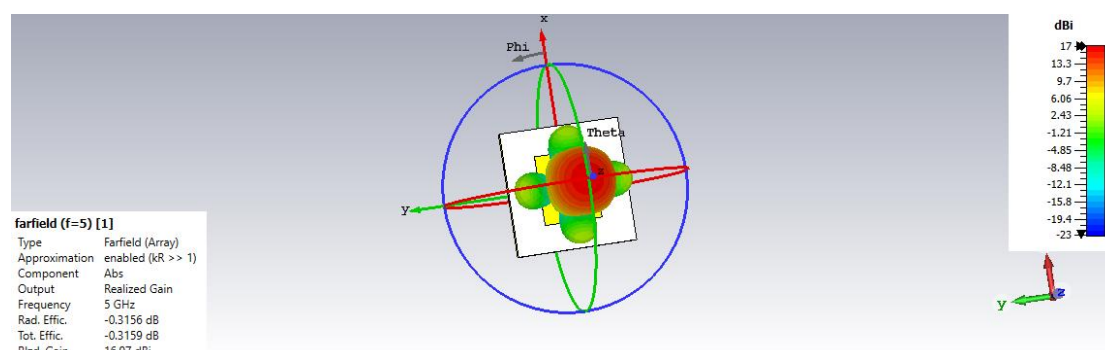
### 5.5.1 Μαθηματική ανάλυση με αυξημένη γείωση

Εφόσον έχει δημιουργηθεί η στοιχειοκεραία, θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της μαθηματικής ανάλυσης με την γεωμετρική ανάλυση. Αυξάνοντας την γείωση και κατά συνέπεια το διηλεκτρικό του μεμονωμένου patch παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα:



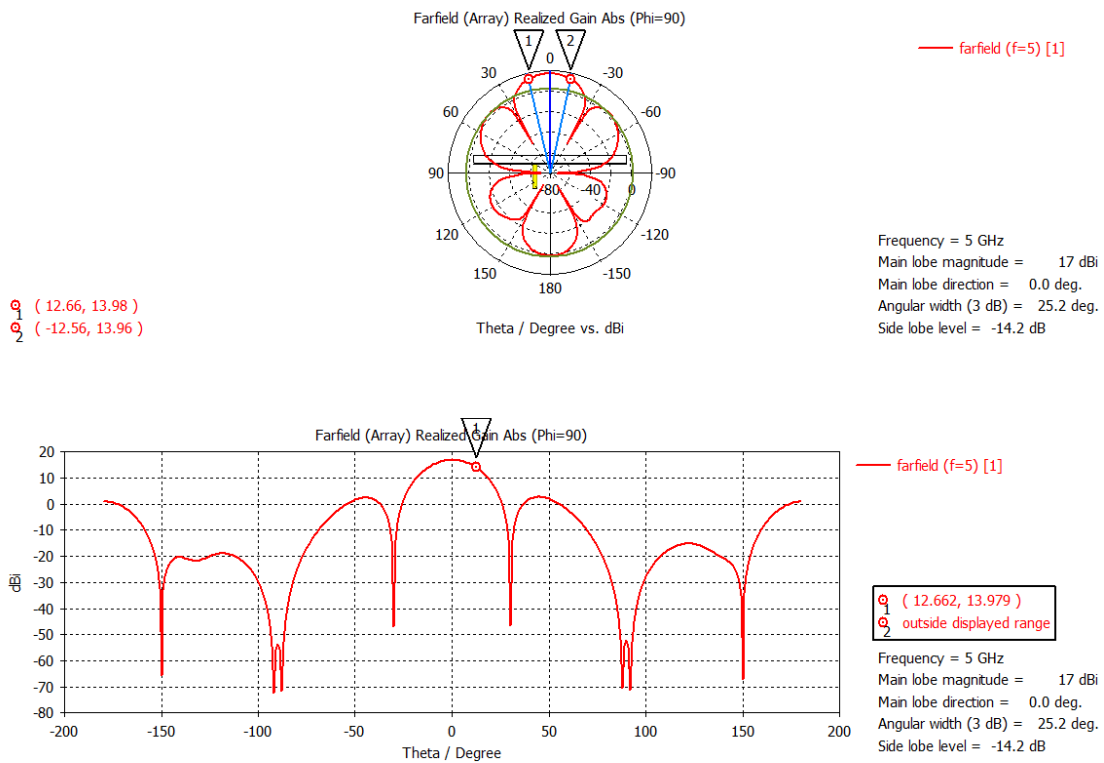
Σχήμα 5.12 S11 για κεραία με αυξημένη γείωση

Αρχικά όπως παρατηρείται υπάρχει συντονισμός στα 5GHz όπου είναι και η συχνότητα λειτουργίας. Εφόσον έχει γίνει ο έλεγχος ότι συντονίζεται, σειρά έχει δημιουργεία της στοιχειοκεραίας μέσω της μαθηματικής ανάλυσης. Κάνοντας την μαθηματική ανάλυση τα αποτελέσματα είναι τα εξής:



Σχήμα 5.13 Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας μαθηματική ανάλυση

Το μέγιστο κέρδος όπως σε όλες τις περιπτώσεις είναι κάθετο στην επιφάνεια, το κέρδος είναι στα 16.97dBi. Από το πολικό διάγραμμα η γωνία ημίσειας ισχύος είναι στις 25.2°.



Σχήμα 5.14 Πολικό και καρτεσιανό διάγραμμα μαθηματικής ανάλυσης

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μαθηματικής ανάλυσης με τα αποτελέσματα της γεωμετρικής, παρατηρείται ότι είναι παρόμοια μόνο που η γεωμετρική ανάλυση είναι περσοότερο ακριβής.

	Γεωμετρική ανάλυση	Μαθηματική ανάλυση
ΚΕΡΔΟΣ(dBi)	16.73	16.97
ΓΩΝΙΑ ΗΜΙΣΕΙΑΣ ΙΣΧΥΟΣ	25.3	25.2

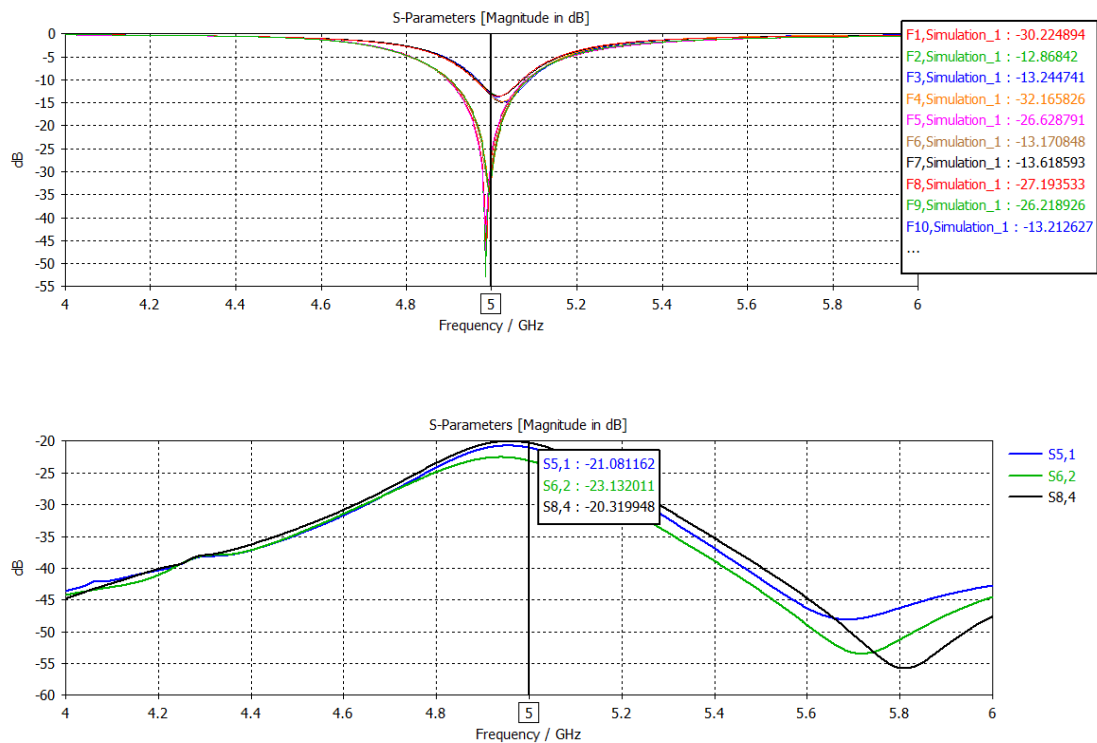
Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα μαθηματικής και γεωμετρικής ανάλυσης

### 5.5.2 Βελτίωση σύζευξης μεταξύ των στοιχείων

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι αντιμετώπισης της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων, που έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 4. Στην περίπτωση αυτή ο τρόπος

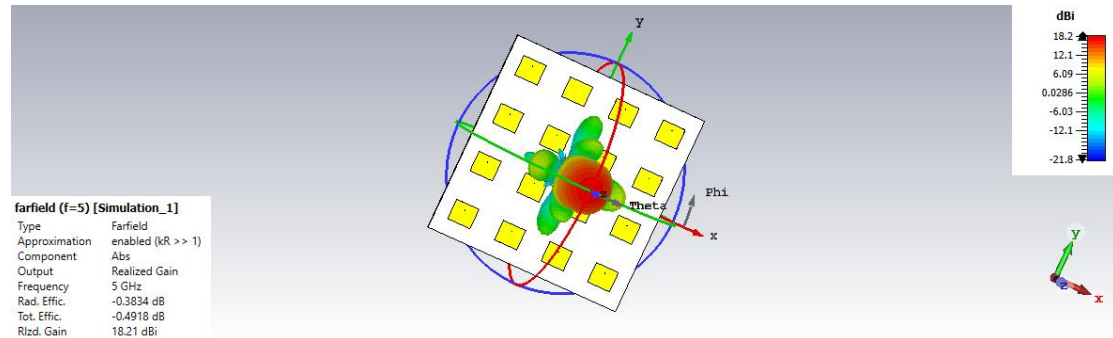
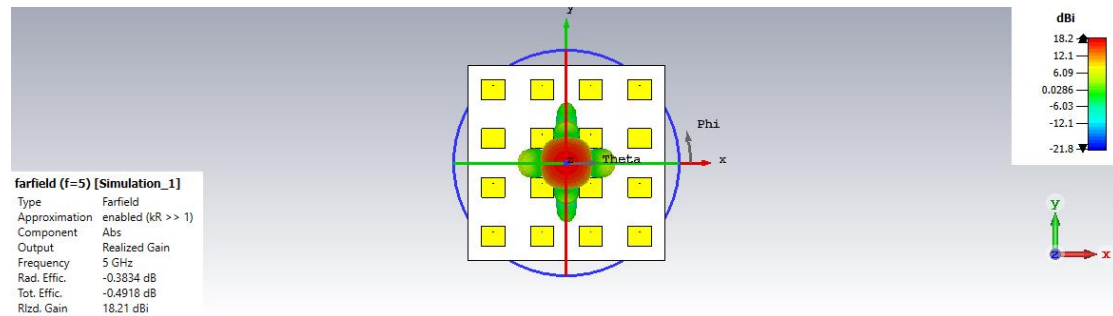
αντιμετώπισης της σύζευξης είναι η αύξηση της απόστασης των στοιχείων, όπου από 30mm έγινε αύξηση της απόστασης στα 36mm (μεγαλύτερο δηλαδή από  $\lambda/2$ ). Η αύξηση της απόστασης συμβάλει στο να μεγαλώσει το κέρδος, να αντιμετωπιστεί η σύζευξη, αλλά εμφανίζει ισχυρούς πλευρικούς λοβούς ακτινοβολίας και επιπλέον εφόσον μεγαλώνει και η γείωση μετακινείται ελάχιστα η συχνότητα συντονισμού.

Στο σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η απομόνωση μεταξύ των στοιχείων η οποία φτάνει τα -20dB, S-παράμετροι.



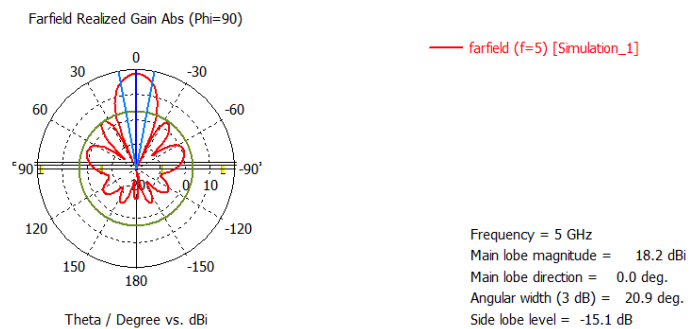
Σχήμα 5.15 Απομόνωση μεταξύ των στοιχείων, S-παράμετροι

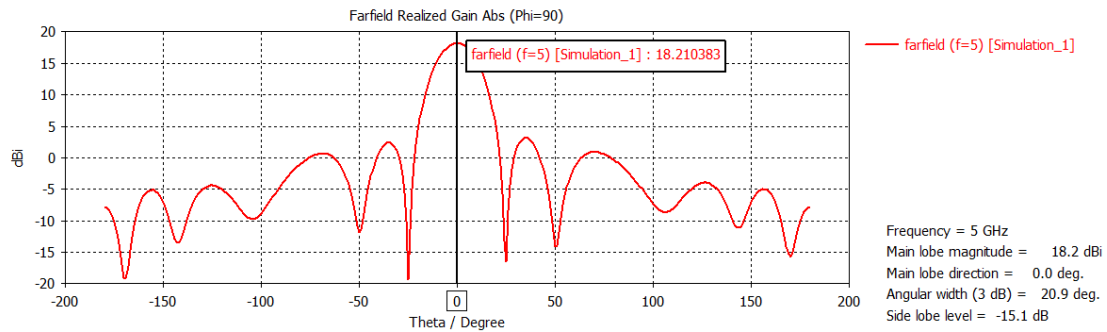
Στην συνέχεια στο σχήμα 5.16 από το διάγραμμα ακτινοβολίας παρατηρείται ότι έχουν εμφανισθεί ισχυροί πλευρικοί λοβοί ακτινοβολίας και το κέρδος έχει αυξηθεί στα 18.21dBi.



Σχήμα 5.16 Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας με αυξημένη απόσταση στοιχείων μεγαλύτερη  $\lambda/2$

Από το πολικό διάγραμμα η γωνία ημίσειας ισχύος είναι στις  $20.9^\circ$ , με κατεύθυνση του κύριου λοβού στις  $0^\circ$

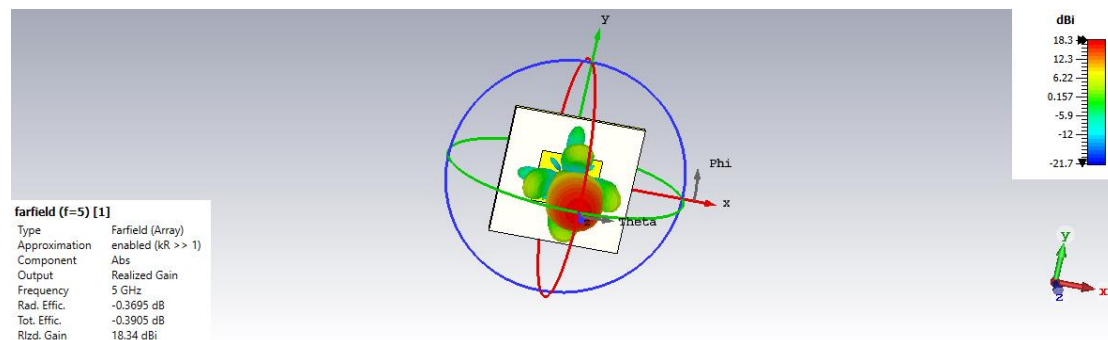




Σχήμα 5.17 Πολικό και καρτεσιανό διάγραμμα ακτινοβολίας

### 5.5.3 Μαθηματική ανάλυση με αυξημένη απόσταση στοιχείων

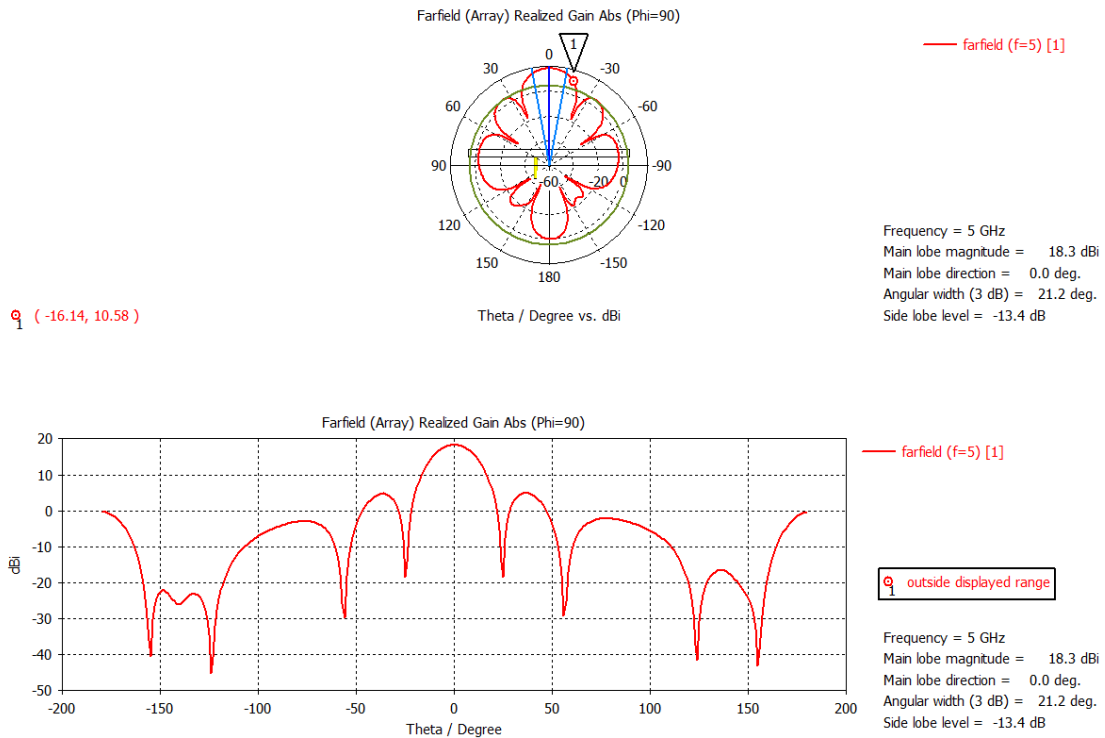
Κάνοντας την μαθηματική ανάλυση και δημιουργώντας τα διαγράμματα ακτινοβολίας θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ γεωμετρικής και μαθηματικής ανάλυσης. Τοποθετώντας τα στοιχεία στα 36mm το διάγραμμα ακτινοβολίας που έχει παραχθεί είναι το εξής:



Σχήμα 5.18 Διάγραμμα ακτινοβολίας μαθηματική ανάλυση, 36mm απόσταση στοιχείων

Το μέγιστο κέρδος είναι κάθετο στην επιφάνεια στα 18.34dBi.

Από το πολικό διάγραμμα η γωνία ημίσειας ισχύος είναι στις 21.2°, και η κατεύθυνση του κύριου λοβού στις 0°.



Σχήμα 5.19 Πολικό και καρτεσιανό διάγραμμα ακτινοβολίας μαθηματικής ανάλυσης

Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με την γεωμετρική ανάλυση και αυτό φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

	Γεωμετρική ανάλυση	Μαθηματική ανάλυση
ΚΕΡΔΟΣ(dBi)	18.21	18.34
ΓΩΝΙΑ ΗΜΙΣΕΙΑΣ ΙΣΧΥΟΣ	20.9	21.2

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα μαθηματικής και γεωμετρικής ανάλυσης, με 36mm απόσταση στοιχείων.

### 5.5.4 Περιστροφή του λοβού ακτινοβολίας

Εφόσον τα αποτελέσματα της γεωμετρικής ανάλυσης και της μαθηματικής ανάλυσης είναι παρόμοια, η περιστροφή του λοβού ακτινοβολίας θα γίνει μέσω της μαθηματικής ανάλυσης η οποία σαφώς είναι και πιο γρήγορη. Η επίτευξη περιστροφής του λοβού ακτινοβολίας επιτυγχάνεται βάζοντας τιμές στις γωνίες  $\varphi$ ,  $\theta$  και στην συνέχεια υπολογίζοντας την διαφορά φάσης  $\beta_x$ ,  $\beta_y$  από τις εξισώσεις του δεύτερου κεφαλαίου. Η περιστροφή του λοβού ακτινοβολίας είναι πολύ σημαντικό κομμάτι καθώς δείχνει πως σαρώνει η κεραία και στις τρεις διαστάσεις του χώρου.

Οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό φάσης είναι από το κεφάλαιο 2:

$$\beta_x = -kd_x \sin\theta_o \cos\varphi_o$$

$$\beta_y = -kd_y \sin\theta_o \sin\varphi_o$$

Για  $dx=dy=\lambda/2*1.2$ ,  $\varphi=90^\circ$ ,  $\theta$ =μεταβαλλόμενο,  $k=2\pi/\lambda$  δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας:

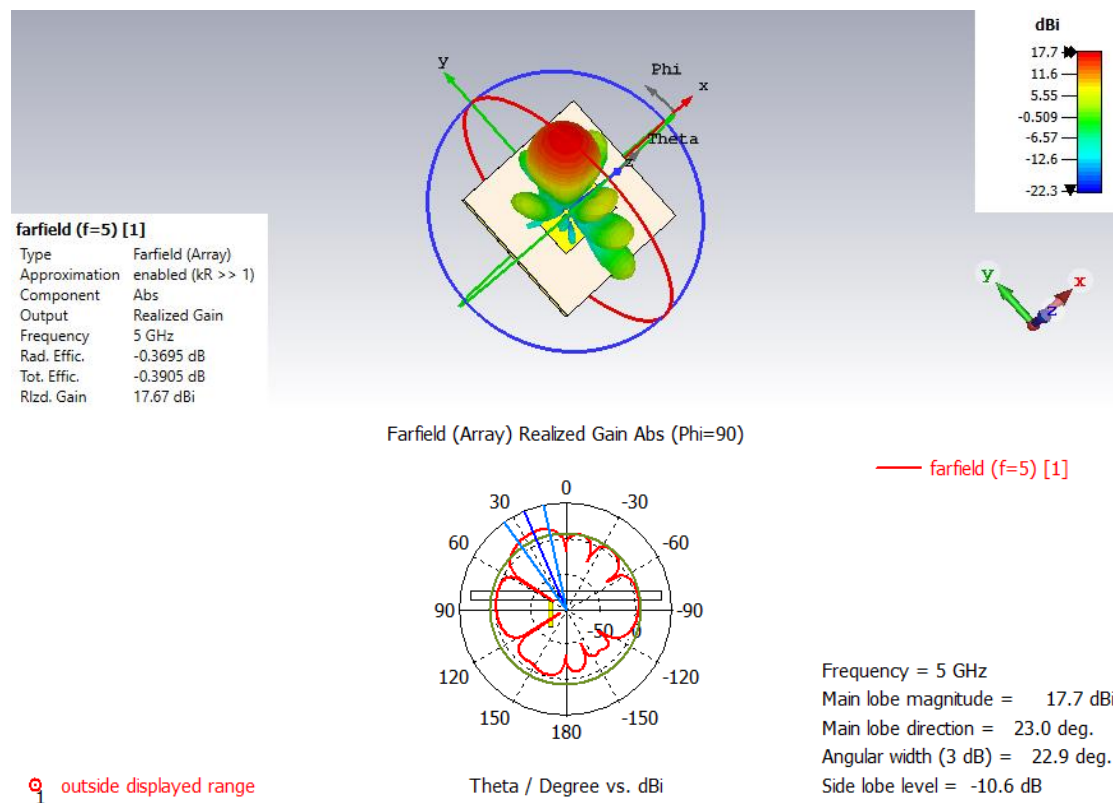
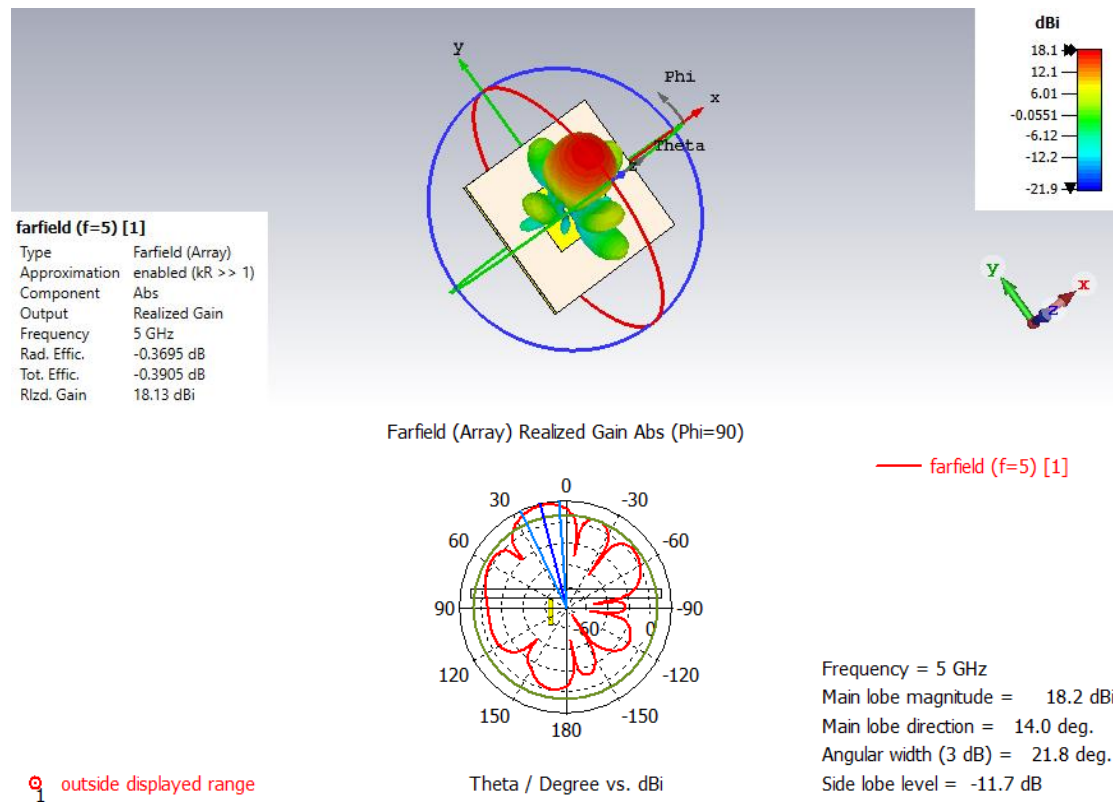
$\varphi$	$\theta$	$\beta_x$	$\beta_y$	Κέρδος(dBi)
90°	15°	0°	-55.90	18.13
90°	25°	0°	-91.28	17.67
90°	35°	0°	-123.89	16.48
90°	45°	0°	-152.73	14.91

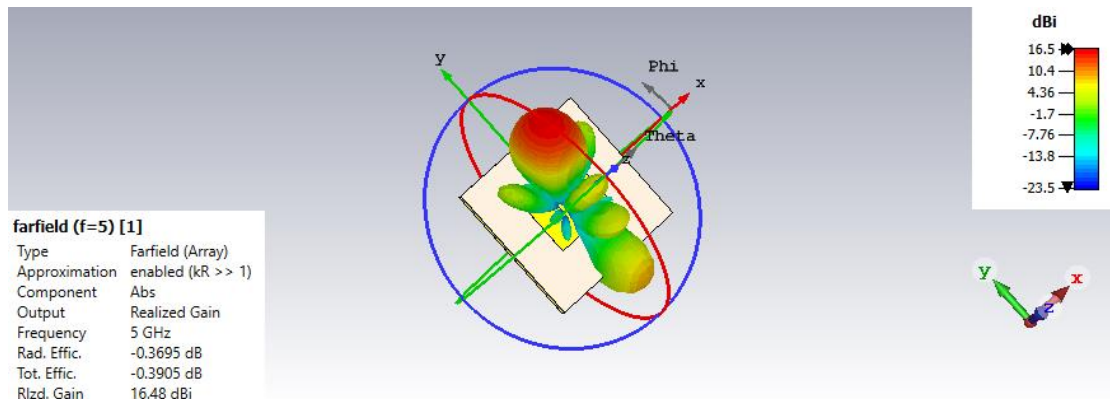
Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα  $\beta_x$ ,  $\beta_y$

$$\beta_x = -kd_x \sin\theta_o \cos\varphi_o = (-1.2\pi) * \sin(15) * \cos(90) = 0$$

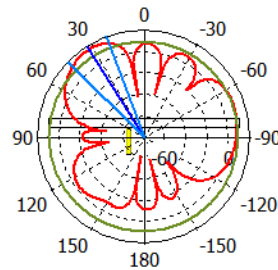
$$\beta_y = -kd_y \sin\theta_o \sin\varphi_o = (-1.2\pi) * \sin(15) * \sin(90) = -55.90$$







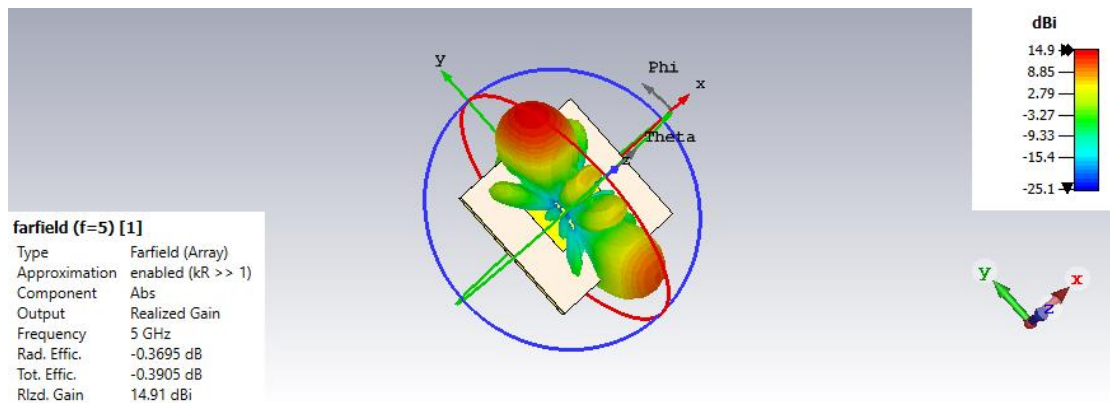
Farfield (Array) Realized Gain Abs (Phi=90)

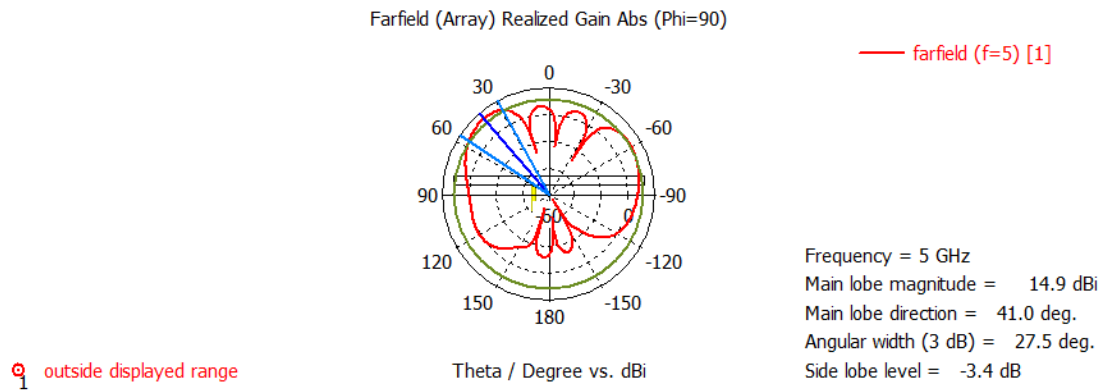


— farfield (f=5) [1]

Frequency = 5 GHz  
 Main lobe magnitude = 16.6 dBi  
 Main lobe direction = 32.0 deg.  
 Angular width (3 dB) = 24.8 deg.  
 Side lobe level = -7.3 dB

① outside displayed range





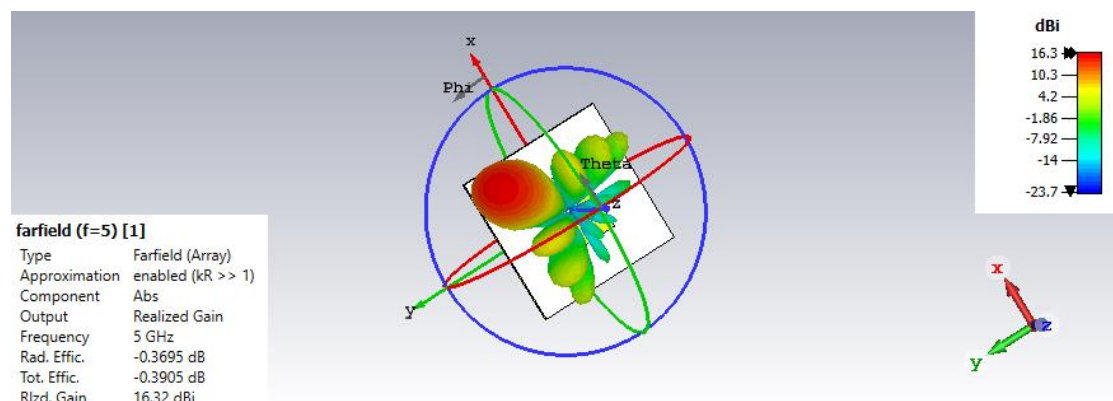
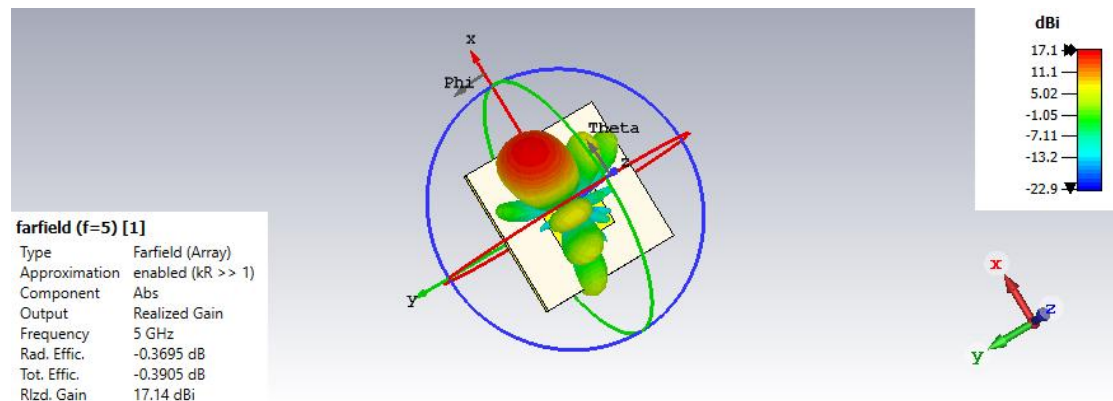
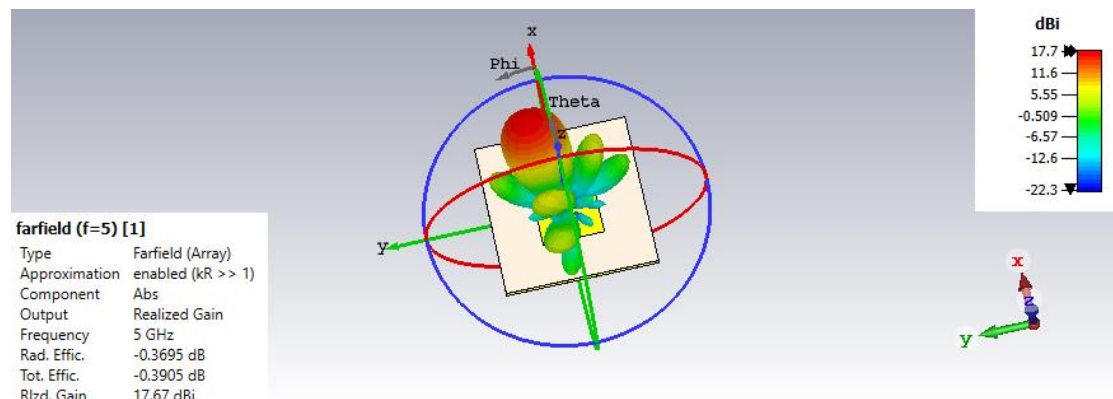
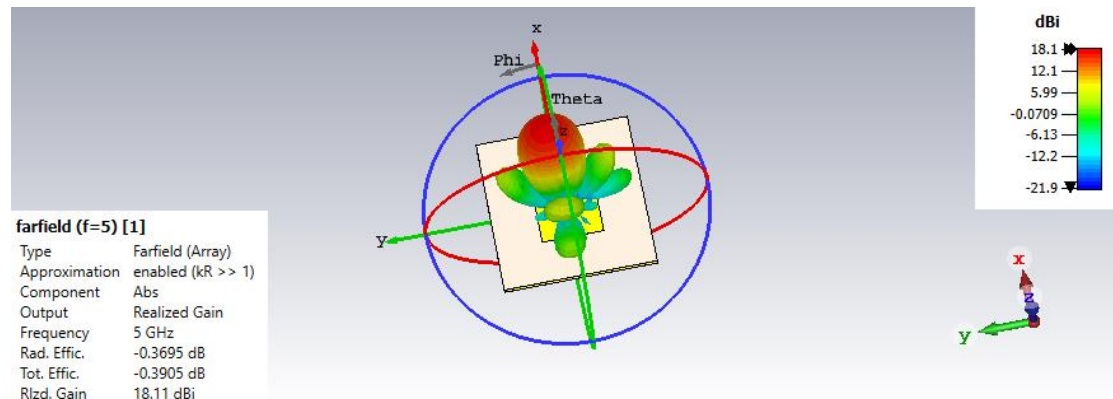
Σχήμα 5.20 Περιστροφή διαγράμματος ακτινοβολίας με  $\varphi=90^\circ$ ,  $\theta$ =μεταβαλλόμενο

Από τα διαγράμματα ακτινοβολίας αυτό που παρατηρείται είναι ότι καθώς μειώνεται η γωνία ανύψωσης, μειώνεται και το κέρδος της στοιχειοκεραίας. Επίσης μετά της  $35^\circ$  εμφανίζεται ένας δεύτερος πλευρικός λοβός με υψηλά επίπεδα κέρδους. Επιπλέον αυξάνεται και η γωνία ημίσειας ισχύος, που από την θεωρία είναι γνωστό ότι όσο η γωνία ισχύος μειώνεται τόσο πιο κατευθυντική είναι η κεραία.

Στην συνέχεια η περιστροφή του κύριου λοβού θα γίνει και αζιμουθιακά, ανυψωτικά αλλάζοντας την γωνία  $\varphi, \theta$ .

$\varphi$	$\theta$	$\beta\chi$	$\beta\gamma$	Κέρδος(dBi)
$15^\circ$	$15^\circ$	$-54^\circ$	$-14.46^\circ$	18.11
$25^\circ$	$25^\circ$	-82.73	$-38.57^\circ$	17.67
$35^\circ$	$35^\circ$	-101.48	$-71.06^\circ$	17.14
$45^\circ$	$45^\circ$	-108	$-108^\circ$	16.32

Πίνακας 5.4 Περιστοφή λοβού αζιμοθιακά, ανυψωτικά



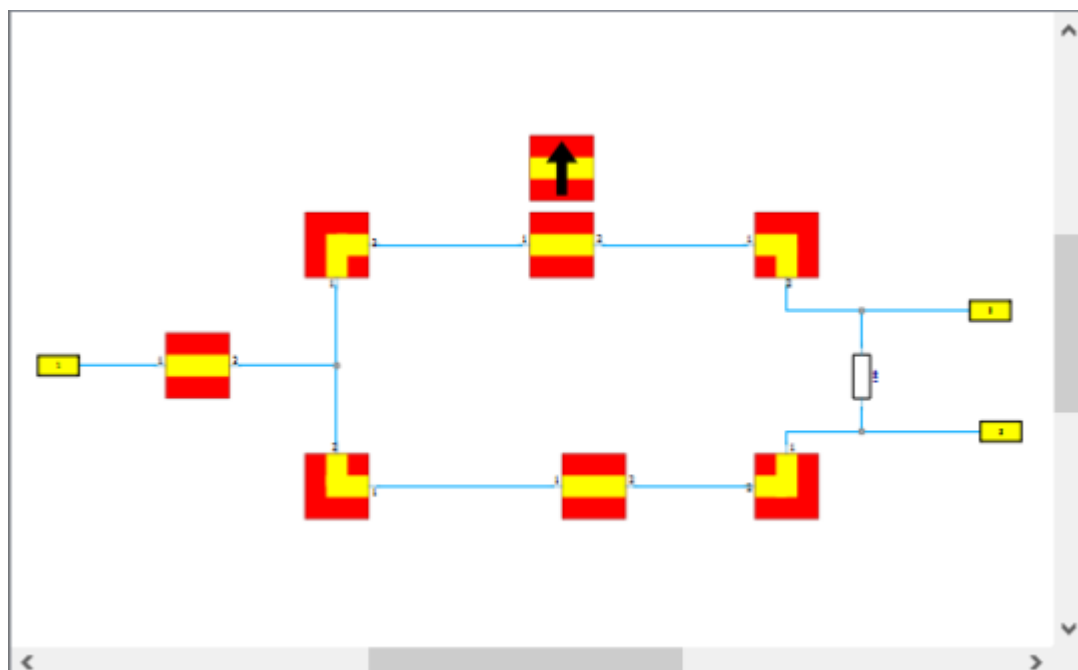
Σχήμα 5.21 Διαγράμματα ακτινοβολίας περιστροφής λοβού αζιμουθιακά, ανυψωτικά

Στα παραπάνω διαγράμματα ο λοβός ακτινοβολίας έχει περιστραφεί και αζυμουθιακά και ανυψωτικά έτσι ώστε να σαρώνει και στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Επίσης όσο η κύρια δέσμη απομακρύνεται από την αρχική της κατάσταση, το μέγιστο κέρδος της κεραίας μειώνεται.

## 5.6 Δίκτυο τροφοδοσίας Wilkinson

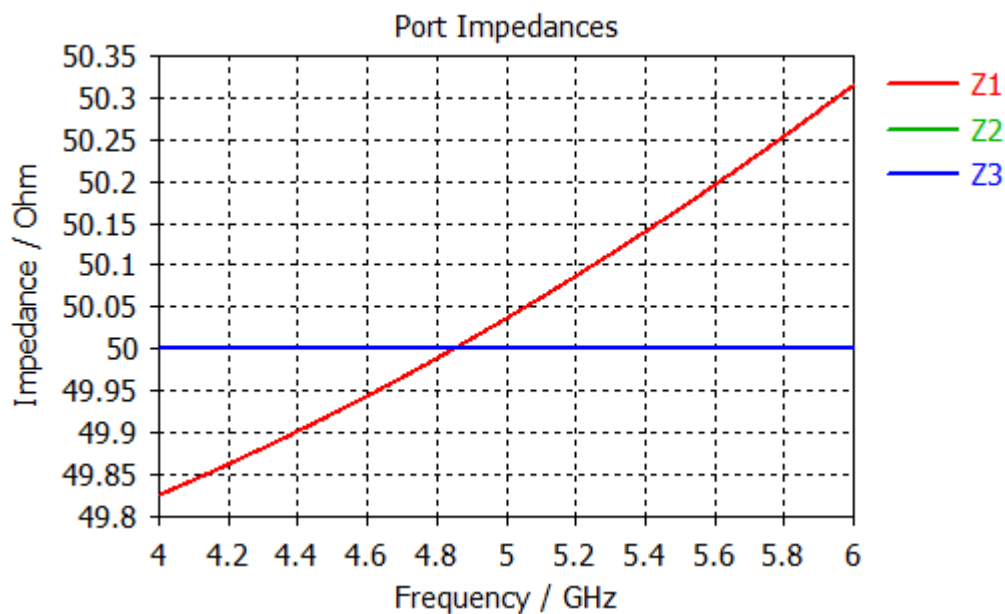
Σειρά έχει ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του δικτύου τροφοδοσίας της στοιχειοκεραίας. Το δίκτυο τροφοδοσίας αποτελείται από διαιρέτες ισχύος wilkinson. Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3, ο διαιρέτης ισχύος wilkinson είναι ένα τρίθυρο δικτύωμα το οποίο αποσκοπεί στην διαμέριση ίσης κατανομής ισχύος των 3dB σε κάθε μια από τις 2 εξόδους. Επιπλέον οι γραμμές μεταφοράς έχουν μήκος  $\lambda/4$  έτσι ώστε να επιτυγχάνεται προσαρμογή, καθώς υπάρχει και μια αντίσταση των 100Ω για απομόνωση των εξόδων του διαιρέτη ισχύος. Ο σχεδιασμός θα γίνει πάλι με το CST-STUDIO schematic.

Για να μπορέσει κάποιος να υλοποιήσει το διαιρέτη ισχύος wilkinson, θα πρέπει πρώτα να έχει κατανοήσει την θεωρία. Αρχικά μέσω του cst-studio, πηγαίνοντας στο schematic, block selection tree, Microstrip, θα πρέπει βήμα βήμα να κατασκευαστεί ο διαιρέτης wilkinson χρησιμοποιώντας το microstrip line, microstrip bends. Κάνοντας τα παραπάνω βήματα το σχηματικό που προκύπτει είναι το εξής:

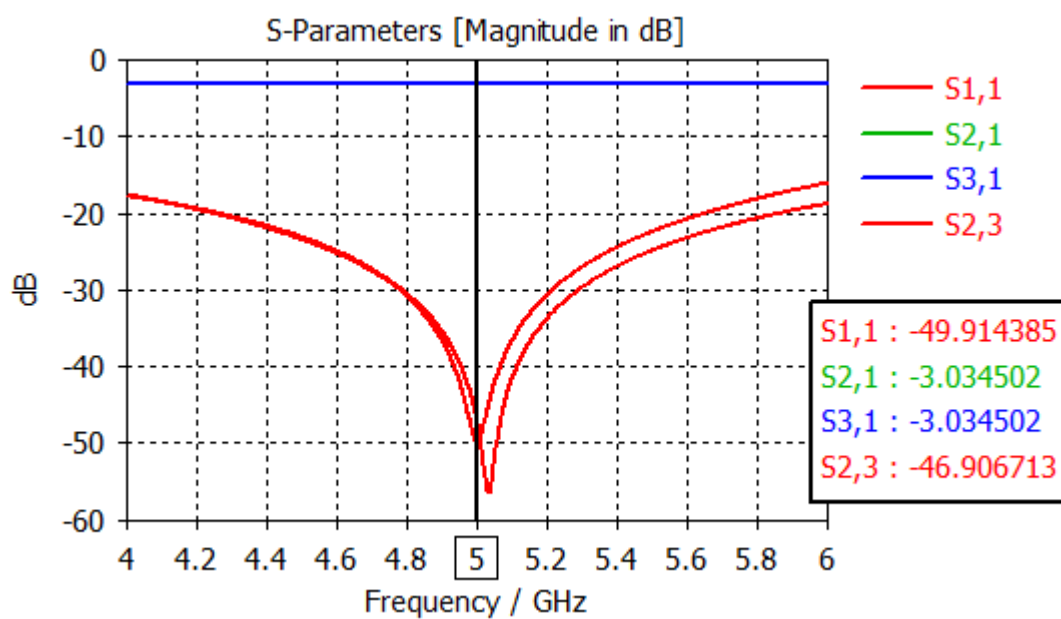


Σχήμα 5.22 Διαιρέτης ισχύος wilkinson

Στο παραπάνω σχήμα αρχικά θα πρέπει να τοποθετηθούν οι τιμές του διηλεκτρικού. Αυτό γίνεται πηγαίνοντας στο κουτί με το βέλος, και στην συνέχεια τοποθετούνται οι τιμές. Το δεύτερο πράγμα και κυριότερο που θα πρέπει να δει κάποιος είναι αν υπάρχει προσαρμογή  $50\Omega$ . Αυτό μπορεί να το παρατηρήσει κανείς από το port impedances. Επίσης είχε γίνει έλεγχος, για το αν οι δύο πόρτες εξόδου εμφάνιζαν  $70.7\Omega$  αντίσταση λόγω της γραμμής  $\lambda/4$ . Για την επίτευξη όλων αυτό θα πρέπει κάποιος να το εξετάσει βάζοντας τιμές στο πλάτος (width) και στο μήκος (length) έτσι ώστε να μπορέσει να πετύχει την προσαρμογή και κατα συνέπεια τον συντονισμό στην συχνότητα λειτουργίας. Ακόμα τοποθετείται και η αντίσταση των  $100\Omega$  για απομόνωση των εξόδων.



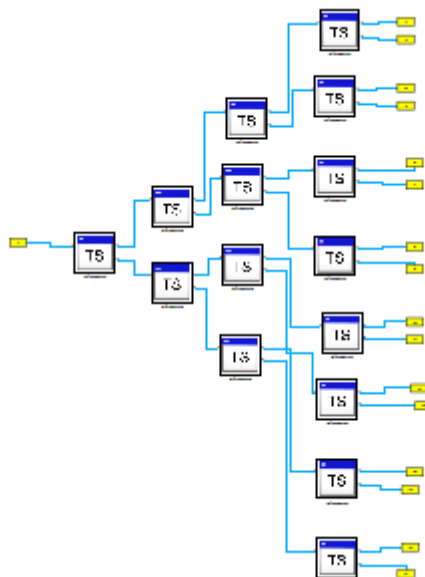
Σχήμα 5.23 Προσαρμογή 50Ω στα 5GHz



Σχήμα 5.24 S-παράμετροι διαιρέτη ισχύος wilkinson

Στο σχήμα 5.24 πράγματι η ισχύς μοιράζεται από την πόρτα 1-2, 1-3 στα  $-3.03\text{dB}$  όπως ακριβώς λέει η θεωρία. Επίσης η  $S_{11}$  είναι ακριβώς στα  $5\text{GHz}$  ΣΤΑ  $-49.91\text{dB}$ .

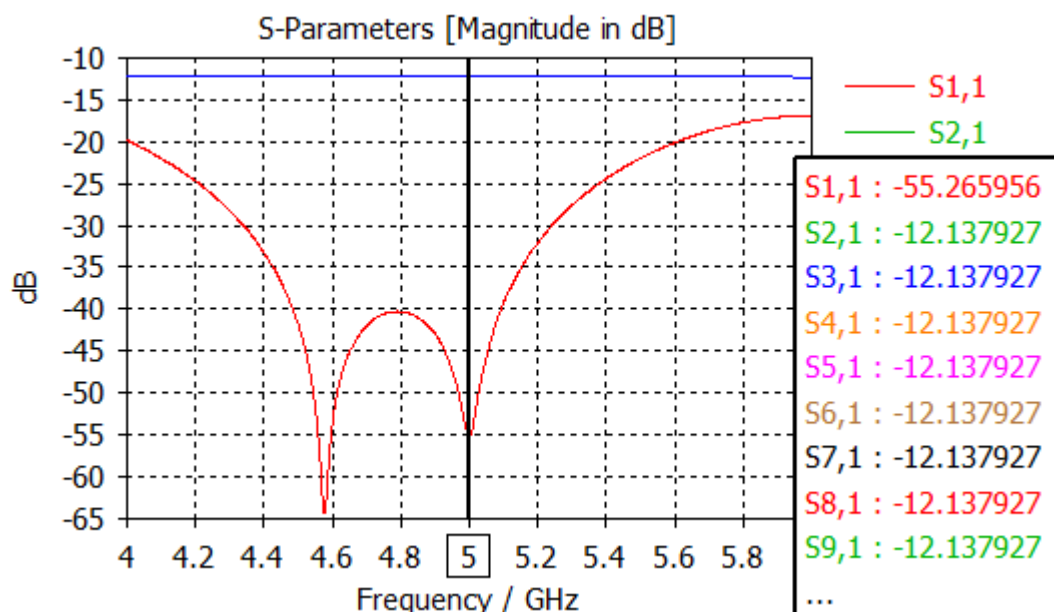
Εφόσον έχει αναλυθεί ως μεμονωμένος διαιρέτης ισχύος wilkinson σειρά έχει ο σχεδιασμός με 16 θύρες, έτσι ώστε να τροφοδοτήσει την στοιχειοκεραία και να παράξει τα διαγράμματα ακτινοβολίας. Για να γίνει αυτό το cst-studio έχει ένα εύκολο και χρήσιμο τρόπο. Αρχικά το μόνο που χρειάζεται είναι οι  $S$ -παράμετροι, και κάνοντας export, touchstone δημιουργεί ένα αρχείο όπου αντί να χρησιμοποιηθεί ολόκληρο το σχηματικό μπορεί να τοποθετηθεί ένα τέτοιο αρχείο όσες φορές χρειάζεται. Στο σχήμα 5.23 παρουσιάζεται ο διαιρέτης ισχύος wilkinson με 16 θύρες.



Σχήμα 5.25 Διαιρέτης ισχύος wilkinson με 16 θύρες εξόδου

Παρατηρώντας της  $S$ -παραμέτρους, ο συντονισμός κρατάται σε πολύ καλά επίπεδα που είναι στα  $-55.26\text{dB}$ , καθώς και ισχύς που φτάνει από την θύρα 1 έως 17 είναι στα  $-12.13\text{dB}$ , πράγμα που ισχύει διότι για κάθε διαιρέτη ισχύος ανεβαίνει  $3\text{dB}$ .

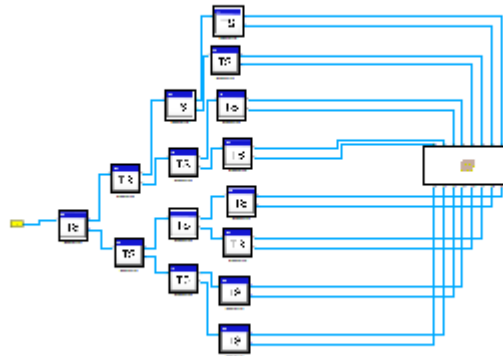




Σχήμα 5.26 S-παράμετροι διαιρέτη ισχύος wilkinson 16 θυρών

### 5.6.1 Στοιχειοκεραία και διαιρέτης ισχύος Wilkinson

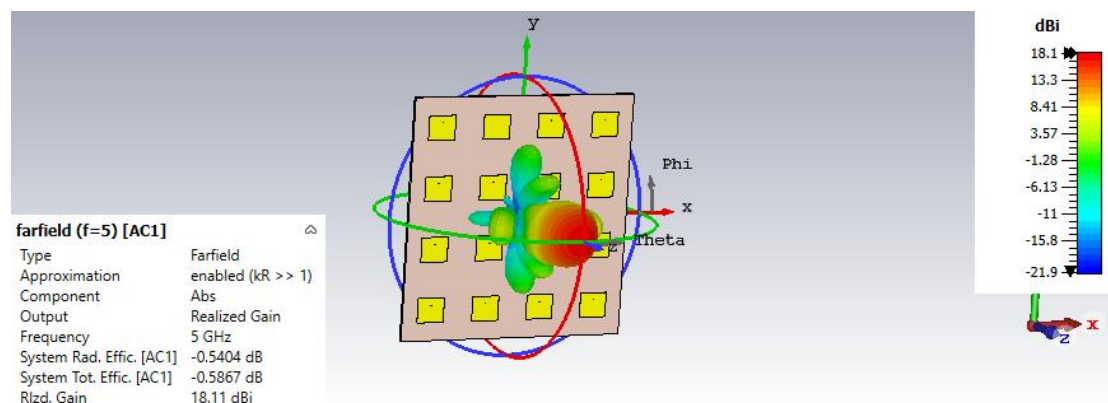
Το τελευταίο κομμάτι τη διπλωματικής εργασίας είναι η ένωση του δικτύου τροφοδοσίας (feed network) με την στοιχειοκεραία 4X4. Στο σχήμα 5.27 φαίνεται η στοιχειοκεραία σε συνδυασμό με τους διαιρέτες ισχύος wilkinson. Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση AC, όπου θα παραχθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας για την συχνότητα λειτουργίας 5GHz. Σημείωση οι φάκελοι TS περιλαμβάνουν το αρχείο των S-παραμέτρων του διαιρέτη ισχύος wilkinson.



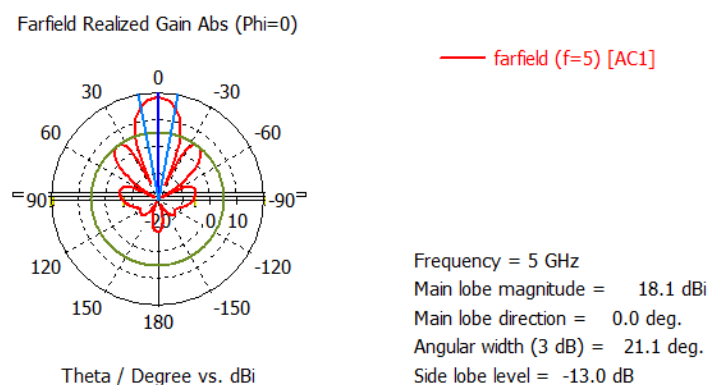
Σχήμα 5.27 Στοιχειοκεραία με διαιρέτες ισχύος wilkinson

Τρέχοντας την ανάλυση στο cst-studio παρατηρείται απο το διάγραμμα ακτινοβολίας ότι μέγιστο κέρδος είναι κάθετο στην επιφάνεια και βρίσκεται στα 18.11dBi. Από το πολικό διάγραμμα η γωνία ημίσειας ισχύος είναι στις 21.1°, η διεύθυνση του κύριου λοβού είναι στις 0°

Σε σχέση με την στοιχειοκεραία χωρίς το feed network το κέρδος ήταν στα 18.21dBi, όμως η πλευρικοί λοβοί ήταν στα 15dBi, και στην περίπτωση με το feed network το κέρδος των πλευρικών λοβών έχει πέσει στα 13dBi.

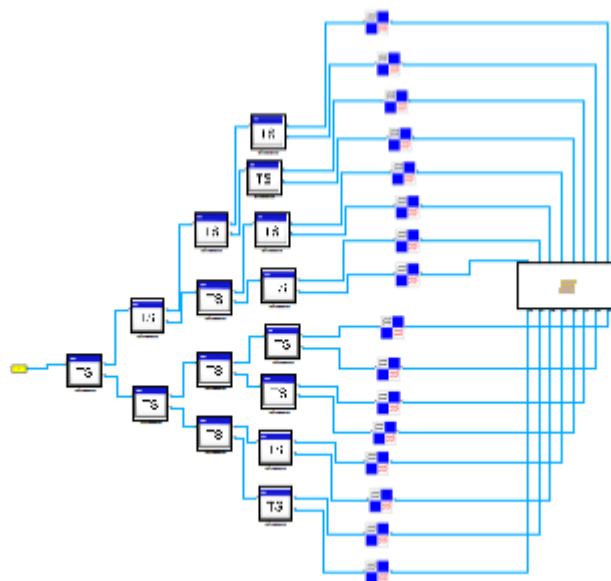


Σχήμα 5.28 Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας με το δίκτυο τροφοδοσίας

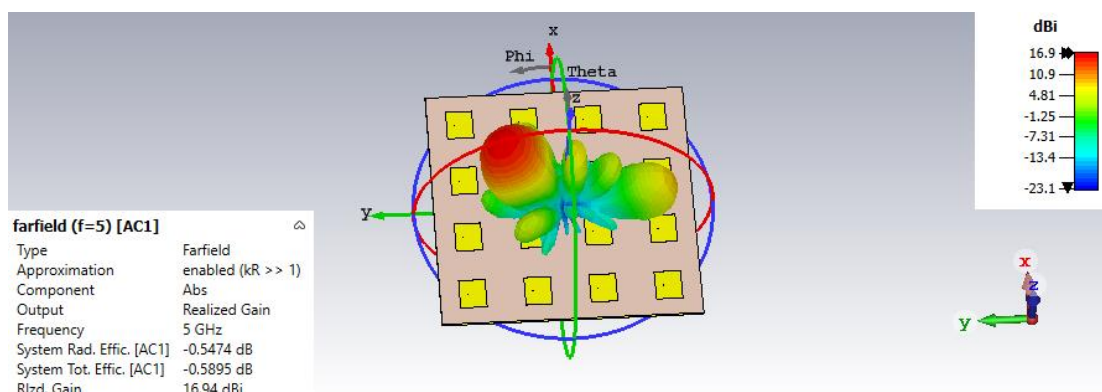


Σχήμα 5.29 Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας

Εφόσον έχει δημιουργηθεί το δίκτυο τροφοδοσίας με διαιρέτες ισχύος wilkinson, σειρά έχει η τοποθέτηση των phase shifters σε κάθε μια πόρτα των διαιρετών ισχύος. Η τοποθέτηση των Phase shifter έχουν σκοπό την περιστροφή του λοβού ακτινοβολίας, ανυψωτικά και αζυμουθιακά, καθώς η τιμές δεν είναι τυχαίες διότι για συγκεκριμένες γωνίες theta, phi υπολογίζονται οι ανάλογες διαφορές φάσης από τις εξισώσεις του δεύτερου κεφαλαίου για επιπεδικές στοιχειοκεραίες ( $\beta_x, \beta_y$ ). Αφού υπολογιστούν οι διαφορές φάσης συνέχεια έχει η φάση κάθε πόρτας για να γίνει σωστά η περιστροφή του λοβού ακτινοβολίας. Συνεπώς τοποθετώντας  $\theta=30^\circ$ ,  $\phi=90^\circ$  στις εξισώσεις (2.32-2.33) τα αποτελέσματα είναι  $\beta_x=0^\circ$ ,  $\beta_y=-108^\circ$ . Εφόσον έχουν υπολογιστεί οι διαφορές φάσης και η φάση κάθε πόρτας, είναι κανείς σε θέση να τοποθετήσει τους Phase shifters και να παράξει το διάγραμμα ακτινοβολίας με μετατοπισμένο τον λοβό και τότε η κατασκευή της στοιχειοκεραίας να θεωρηθεί MIMO. Παρακάτω φαίνεται η διάταξη της στοιχειοκεραίας με τους διαιρέτες ισχύος wilkinson και τους phase shifters, καθώς και το διάγραμμα ακτινοβολίας.



Σχήμα 5.30 Διαίρετες ισχύος Wilkinson και phase shifters



Σχήμα 5.31 Μετατόπιση του λοβού ακτινοβολίας για  $\theta=30^\circ$ ,  $\phi=90^\circ$

## 5.7 Σύνοψη του κεφαλαίου

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί εξολοκλήρου το κατασκευαστικό κομμάτι μιας στοιχειοκεραίας 4X4 με μικροταινιακά στοιχεία. Μέσω του προγράμματος CST-STUDIO κατασκευάστηκε και μελετήθηκε στην αρχή ως μεμονωμένο στοιχείο και στην συνέχεια ως στοιχειοκεραία αναπαράγοντας της S-παραμέτους και τα διαγράμματα ακτινοβολίας. Τέλος έγινε κατασκευή του δικτύου τροφοδοσίας με διαίρετες ισχύος Wilkinson και τοποθετήθηκαν phase shifters με σκοπό την μετατόπιση του λοβού ακτινοβολίας σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου.

## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1 Ολοκλήρωση μελέτης

Η μελέτη ολοκληρώνεται με την σχεδίαση της ΜΙΜΟ στοιχειοκεραίας 4X4 με μικροταινιακά στοιχεία, στην συχνότητα των 5GHz, ιδανική για αεροναυτιλιακά συστήματα. Η κατασκευή δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί χωρίς την βασική θεωρία καθώς αποτελεί το υπόβαθρο για να γίνει πράξη. Το κατασκευαστικό κομμάτι αποτελεί το σημαντικότερο κεφάλαιο τη διπλωματικής εργασίας, διότι μελετήθηκαν οι S-παράμετροι, τα διαγράμματα ακτινοβολίας, η περιστροφή του λοβού ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση στο χώρο που ήταν και το ζητούμενο της διπλωματικής εργασίας. Είναι εμφανές ότι μέσα από τους υπολογισμούς, έγιναν βελτιστοποιήσεις για να μπορέσει η κεραία να συντονίζει στην επιθυμητή συχνότητα των 5GHz. Επίσης κάθε κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί σημαντικό κομμάτι θεωρίας των κεραιών, αφού είναι η δομή για την κατασκευή της ΜΙΜΟ στοιχειοκεραίας. Τέλος οι τηλεπικοινωνίες θα συνεχίσουν παρουσιάζουν ραγδαία εξέλιξη, διότι οι απαιτήσεις των χρηστών συνεχώς αυξάνονται, επιθύμωντας όλο και μεγαλύτερες ταχύτητες. Για τον λόγο αυτό είναι βέβαιο ότι στο μέλλον θα ευφρευρεθούν καινοτόμες λύσεις και τεχνολογίες που θα αποσκοπούν σε μεγαλύτερες ταχύτητες και αύξηση της χωρητικότητας.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] Constantine A. Balanis-Antenna Theory\_ Analysis and Design-Wiley (2016)
- [2] RF Circuit Design, Bowick et al., (Newnes, 2008)
- [3] Pozar, David M - Microwave engineering-Wiley (2012)
- [4] Edwards, Terence Charles\_ Steer, Michael Bernard-Foundations for microstrip circuit design-John Wiley & Sons Inc (2016)
- [5] (Artech House microwave library) I. J. Bahl - Lumped Elements for RF and Microwave Circuits-Artech House (2003)
- [6] Cory Beard-William Stallings wireless communication networks and systems (2015)-Pearson
- [7] MIMO System Technology for Wireless Communications by George Tsoulos (2006)- CRC Press Taylor & Francis
- [8] Τραϊανός Β. Γιούλτσης- Εμμανουή Ε. Κριεζής Μικροκύματα, Θεωρία και εφαρμογές (2017)-TZIOΛΑ
- [9] A Review of Mutual Coupling in MIMO Systems-X chen, S Zhang, Q Li- iee Access (2018)-ieeexplore.ieee.org
- [10] Design and Implementation of a Technology Planar 4x4 Butler Matrix for Networks Application-M. Moubadir, H. Aziz, N. Amar Touhami, M. Aghoutane, K. Zeljami and A. Tazon (2015)- repositorio.unican.es
- [11] A Comprehensive Survey on ‘‘Various Decoupling Mechanisms With Focus on Metamaterial and Metasurface Principles Applicable to SAR and MIMO Antenna Systems’’- Mohamad Alibakshikenari, Fatemeh Babaeian, Bal S. Virdee, Sonia Aissa, Leyre Azpilicueta, Chang Hwang See, Ayman Abdulhadi Althuwayb, Isabelle Huynen, Raed A. ABD-Alhameed, Francisco Falcone and Ernesto Limiti (2020)- iee- ieeexplore.ieee.org
- [12] [https://www.researchgate.net/figure/The-ex-WWII-radar-antenna-at-Georges-Heights-field-station-that-was-used-for-solar\\_fig3\\_259431242](https://www.researchgate.net/figure/The-ex-WWII-radar-antenna-at-Georges-Heights-field-station-that-was-used-for-solar_fig3_259431242)
- [13] Analysis of Micro strip patch Antenna Using Coaxial feed and Micro strip line feed for wireless Application (2017)- MV Mokal, PSR Gagare, DPR Labade- IOSR Journal of Electronics-academia.edu
- [14] <https://amsp.cttc.es/areas-of-expertise/arrays-mimo-processing/beamforming-antenna-solutions-for-mmwave-applications/>