



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

Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση W-Espar Κεραίας με Χρήση του Προγράμματος HFSS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Δ. Μπέλλος

Επιβλέπων : **Χρήστος Καψάλης**

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2010



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

Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση W-Espar Κεραίας με Χρήση του Προγράμματος HFSS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Δ. Μπέλλος

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Ιουλίου 2010.

.....
Χ. Καψάλης

.....
Π.Κωττής

.....
Φ. Κωνσταντίνου

Αθήνα, Ιούλιος 2010

.....
Χρήστος Δ. Μπέλλος

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

Copyright © Χρήστος Δ. Μπέλλος, 2010.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι έξυπνες κεραίες αποτελούν μια από τις τελευταίες ευκαιρίες να αυξηθεί σημαντικά η χωρητικότητα των δικτύων καθώς τα σημερινά συστήματα “ασφυκτιούν” από την ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση φάσματος συχνοτήτων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι κεραίες ESPAR και W-ESPAR. Η δομή τους αποτελείται από ένα ενεργό και μερικά παρασιτικά μονόπολα πάνω από ένα επίπεδο που λειτουργεί ως “γη” και έχουν την ικανότητα, ελέγχοντας τις εμπεδήσεις στις βάσεις των μονοπόλων, να προσαρμόζουν το διάγραμμα ακτινοβολίας τους.

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η σχεδίαση μιας τέτοιας W-ESPAR κεραίας, η οποία θα λειτουργεί για όλο το φάσμα των UHF συχνοτήτων με σκοπό τη λήψη σήματος επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης, και η βελτιστοποίηση της με τη βοήθεια του λογισμικού HFSS. Στα πρώτα κεφάλαια γίνεται μια αναφορά στη θεωρία των κεραίων και στις βασικές παραμέτρους τους. Στη συνέχεια αναφέρεται ο τρόπος λειτουργίας του HFSS και η μέθοδος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί. Βασικό εργαλείο στη βελτιστοποίηση αυτή αποτελούν οι γενετικοί αλγόριθμοι.

Τέλος αναλύονται τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν για την βελτίωση της δομής της κεραίας και του διαγράμματος ακτινοβολίας της και παρουσιάζονται σχηματικά διαγράμματα ακτινοβολίας με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του προγράμματος.

Λέξεις Κλειδιά: ESPAR κεραία, W-ESPAR, στοιχειοκεραίες, μονόπολα, skirt, διάγραμμα ακτινοβολίας, HFSS, βελτιστοποίηση, Varactor

ABSTRACT

Smart antennas are one of the last opportunities to significantly increase the capacity of networks, as current systems "strangle" by the increasing demand for spectrum. ESPAR and W-ESPAR antennas belong to this category. Their structure consists of an active and some parasitic monopoles above a level that acts as a "ground", and are able, by controlling the impedance of single-pole bases, to adapt their radiation pattern.

The purpose of this thesis is the design of such a W-ESPAR antenna, which operates on the full range of UHF frequencies for receiving digital terrestrial television signal, and its optimization by using the HFSS software. The first chapters are referred to the theory of antennas and their basic parameters. Then the operation method of HFSS and its optimization method are indicated. A key tool in the optimization process is genetic algorithms.

Finally, we analyze the steps taken to improve the structure of the antenna and its radiation diagram and we present schematic radiation diagrams of the simulation results.

Keywords: ESPAR Antenna, W-ESPAR, arrays, monopoles, skirt, radiation pattern, HFSS, optimization, Varactor

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Σχημάτων	13
Ευρετήριο Πινάκων	15
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	17
1.1 Πρόλογος	17
1.2 Περίληψη Κεφαλαίων	18
Κεφάλαιο 2 : Θεωρία Κεραιών	19
2.1 Εισαγωγή	19
2.1.1 Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	20
2.1.2 Το στοιχειώδες δίπολο (Hertz Dipole)	22
2.2 Συρμάτινες κεραιές στο χώρο	23
2.2.1 Κατανομή τάσης και ρεύματος	23
2.2.2 Συντονισμένες κεραιές, διαγράμματα ακτινοβολίας.....	25
2.2.3 Μη συντονισμένες κεραιές (Directional Antennas)	27
2.3 Παράμετροι και Χαρακτηριστικά των Κεραιών	29
2.3.1 Κέρδος κεραιάς και Αποτελεσματική Ισχύς Εκπομπής	29
2.3.2 Μέτρηση εκπομπής και ένταση πεδίου	30
2.3.3 Αντίσταση ακτινοβολίας κεραιάς.....	31
2.3.4 Απώλειες και βαθμός απόδοσης.....	31
2.3.5 Εύρος ζώνης συχνοτήτων, Εύρος δέσμης και πολικότητα κεραιάς.....	32
2.4 Στοιχειοκεραίες	35
2.4.1 Στοιχειοκεραία δύο Στοιχείων.....	36
2.4.2 Στοιχειοκεραία Πολλών Στοιχείων	37
2.5 UHF και Μικροκυματικές Κεραιές.....	40
2.6 Μονόπολα	41
2.6.1 Εισαγωγή	41
2.6.2 Μονόπολα πάνω από πεπερασμένο, τέλεια αγώγιμο επίπεδο	42
Κεφάλαιο 3: Κεραιές ESPAR και W-ESPAR	45
3.1 Εισαγωγή	45
3.2 Κεραία ESPAR	47
3.2.1 Διάταξη Κεραιάς ESPAR.....	47
3.2.2 Πεδίο τιμών φανταστικών αντιστάσεων.....	50
3.2.3 Επίδραση φανταστικών αντιστάσεων στη κεραία.....	51
3.2.4 Ευαισθησία Συχνότητας	52

3.3 W- ESPAR Κεραία	53
Κεφάλαιο 4: Εισαγωγή στο HFSS.....	55
4.1 Γενικά.....	55
4.1.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method)	55
4.2.2 Διαδικασία Επίλυσης του HFSS	56
4.3.3 Πεδία ακτινοβολίας.....	56
4.4 Βελτιστοποίηση (Optimization).....	58
4.5 Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	58
4.5.1 Βιολογικές Έννοιες	58
4.5.2 Βασικός Γενετικός Αλγόριθμος.....	59
4.5.3 Πολλαπλά Βέλτιστα.....	61
4.5.4 Εφαρμογές των Γενετικών Αλγορίθμων.....	61
Κεφάλαιο 5: Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση Κεραίας W-ESPAR.....	63
5.1 Εισαγωγή	63
5.2 Σχεδίαση Δομής Κεραίας W-ESPAR.....	63
5.2.1 Φυσική Υπόσταση Κεραίας	63
5.2.2 Φανταστικές Αντιστάσεις Παρασιτικών Μονοπόλων.....	66
5.2.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Αρχικού Σταδίου.....	67
5.3 Βελτιστοποίηση Κεραίας W-ESPAR.....	71
5.3.1 Βελτιστοποίηση Ύψους Μονοπόλων	72
5.3.2 Βελτιστοποίηση Φανταστικών Αντιστάσεων Παρασιτικών Μονοπόλων.....	77
5.4 Προσθήκη Skirt.....	85
5.4.1 Σύνδεση Varactor	86
5.4.2 Γραμμή Μεταφοράς.....	87
5.5 Δυσκολίες στο HFSS.....	104
Βιβλιογραφία	107

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1	Μετάδοση Ενέργειας Μεταξύ Πομπού-Δέκτη	19
Σχήμα 2	(a) γραμμή μεταφοράς “ανοικτών άκρων” (b) conductors in line (c) δίπολο μισού κύματος (center-fed)	21
Σχήμα 3	Το διάγραμμα ακτινοβολίας του στοιχειώδους δίπολου (a) πλευρική άποψη (b) γωνία μέγιστης ακτινοβολίας (c) κατακόρυφη άποψη	22
Σχήμα 4	Κατανομή τάσης και ρεύματος κατά μήκος του δίπολου μισού κύματος	23
Σχήμα 5	Κατανομή ρεύματος κατά μήκος συντονισμένων διπόλων	24
Σχήμα 6	Το διάγραμμα ακτινοβολίας συντονισμένων δίπολων διαφορετικών μηκών	25
Σχήμα 7	Μη συντονισμένη κεραία (α) Διάταξη και κατανομή ρεύματος (b) διάγραμμα ακτινοβολίας	27
Σχήμα 8	Απεικόνιση του τρόπου σύνθεσης του διαγράμματος ακτινοβολίας συντονισμένης κεραίας (α) προερχόμενο από το forward κύμα (b) προερχόμενο από το ανακλώμενο κύμα (c) το τελικό διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας	28
Σχήμα 9	Το εύρος δέσμης συγκεκριμένης κεραίας	33
Σχήμα 10	Η πόλωση κεραίας (απεικονίζονται ευκρινώς το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο)	34
Σχήμα 11	Στοιχειοκεραία δύο Στοιχείων	36
Σχήμα 12	Εύρεση Παράγοντα Διάταξης	38
Σχήμα 13	Ιδανικό Μονόπολο	42
Σχήμα 14	Μέγιστη Κατευθυντικότητα Μονοπόλου	43
Σχήμα 15	Ιδανική Κεραία ESPAR με μονόπολα πάνω από άπειρο επίπεδο	47
Σχήμα 16	Πρακτική ESPAR Κεραία με αγώγιμο skirt	49
Σχήμα 17	Αρχική Κεραία Διπόλων	64
Σχήμα 18	Port ενεργού διπόλου στο μέσο του	65
Σχήμα 19	Κεραία με επίπεδο Συμμετρίας στο επίπεδο xy	65
Σχήμα 20	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471.25 MHz	67
Σχήμα 21	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 503.25 MHz	67
Σχήμα 22	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 543.25 MHz	68
Σχήμα 23	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 615.25 MHz	68
Σχήμα 24	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 687.25 MHz	69
Σχήμα 25	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 727.25 MHz	69
Σχήμα 26	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 767.25 MHz	70
Σχήμα 27	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 799.25 MHz	70
Σχήμα 28	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831.25 MHz	71
Σχήμα 29	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων	73
Σχήμα 30	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 503.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων	73
Σχήμα 31	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 543.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων	74
Σχήμα 32	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 615.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων	74
Σχήμα 33	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 687.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων	75
Σχήμα 34	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 727.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων	75
Σχήμα 35	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 767.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων	76
Σχήμα 36	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 799.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων	76
Σχήμα 37	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων	77
Σχήμα 38	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων	80
Σχήμα 39	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 503.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων	80

Σχήμα 40	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 543.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων -----	81
Σχήμα 41	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 615.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων -----	81
Σχήμα 42	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 687.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων -----	82
Σχήμα 43	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 727.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων -----	82
Σχήμα 44	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 767.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων -----	83
Σχήμα 45	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 799.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων -----	83
Σχήμα 46	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων -----	84
Σχήμα 47	Κεραία W-ESPAR με Skirt -----	85
Σχήμα 48	Βίδα στερέωσης μονοπόλων στο επίπεδο -----	86
Σχήμα 49	Σχεδίαση Γραμμής Μεταφοράς στο πρόγραμμα ADS -----	88
Σχήμα 50	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471.25 MHz με Skirt -----	90
Σχήμα 51	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 503.25 MHz με Skirt -----	91
Σχήμα 52	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 543.25 MHz με Skirt -----	91
Σχήμα 53	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 615.25 MHz με Skirt -----	92
Σχήμα 54	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 687.25 MHz με Skirt -----	92
Σχήμα 55	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 727.25 MHz με Skirt -----	93
Σχήμα 56	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 767.25 MHz με Skirt -----	93
Σχήμα 57	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 799.25 MHz με Skirt -----	94
Σχήμα 58	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831.25 MHz με Skirt -----	94
Σχήμα 59	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471.25 MHz με μεγαλύτερο Skirt -----	95
Σχήμα 60	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471,25 MHz με 50cm ακτίνα και 3cm ύψος skirt -----	96
Σχήμα 61	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471,25 MHz με 50cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt -----	97
Σχήμα 62	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471,25 MHz με 100cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt -----	97
Σχήμα 63	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471,25 MHz με 150cm ακτίνα και 3cm ύψος skirt -----	98
Σχήμα 64	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471,25 MHz με 150cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt -----	98
Σχήμα 65	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831,25 MHz με 50cm ακτίνα και 3cm ύψος skirt -----	99
Σχήμα 66	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831,25 MHz με 50cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt -----	99
Σχήμα 67	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831,25 MHz με 100cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt -----	100
Σχήμα 68	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831,25 MHz με 150cm ακτίνα και 3cm ύψος skirt -----	100
Σχήμα 69	Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831,25 MHz με 150cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt -----	101
Σχήμα 70	Διάγραμμα ακτινοβολίας για Βελτιστοποιημένο Ύψος skirt και Ακτίνα επιπέδου στα 471.25 MHz -----	103
Σχήμα 71	Διάγραμμα ακτινοβολίας για Βελτιστοποιημένο Ύψος skirt και Ακτίνα επιπέδου στα 831.25 MHz -----	104

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1	Αρχικά κατασκευαστικά στοιχεία κεραίας	64
Πίνακας 2	Αρχικές Τιμές Φανταστικών Αντιστάσεων	66
Πίνακας 3	Βελτιστοποιημένα Ύψη Μονοπόλων	72
Πίνακας 4	Βελτιστοποιημένες Τιμές Φανταστικών Αντιστάσεων	79
Πίνακας 5	Τιμές Φανταστικών Αντιστάσεων Μετά από Γραμμή Μεταφοράς	89
Πίνακας 6	Αποτελέσματα optimization για 471.25 MHz με skirt	102
Πίνακας 7	Αποτελέσματα optimization για 831.25 MHz με skirt	102

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Πρόλογος

Η τεχνολογία των έξυπνων κεραιών θα παίξει αποφασιστικό ρόλο στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα και συστήματα επικοινωνίας. Τα σημερινά συστήματα, είτε αυτά είναι κινητή τηλεφωνία είτε τοπικά δίκτυα υπολογιστών, αγωνίζονται να ανταπεξέλθουν στην ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση και στο περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων. Οι κοινές τεχνικές αύξησης της χωρητικότητας των συστημάτων, όπως το TDMA και το CDMA καθώς και η διαίρεση κυψελών, πλησιάζουν ταχύτατα τα όρια τους. Οι έξυπνες κεραίες προσφέρουν επιπλέον ποικιλία στο χωρικό πεδίο, και για το λόγο αυτό θεωρούνται από τις τελευταίες ευκαιρίες να αυξηθεί σημαντικά η χωρητικότητα των δικτύων.

Σε συνδυασμό με τη χωρική ποικιλομορφία, οι έξυπνες κεραίες προσφέρουν μια πληθώρα πλεονεκτημάτων και στις ασύρματες επικοινωνίες. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα, είναι ότι η κατευθυντική ακτινοβολία τους μπορεί να μειώσει τον αριθμό των διαδρομών της ενέργειας που χρειάζεται για να διασχίσει το κανάλι επικοινωνίας με αποτέλεσμα να μειώνονται σημαντικά τα σφάλματα από τις πολλαπλές διαδρομές και την εξάπλωση της καθυστέρησης. Επιπλέον το αυξημένο κέρδος λόγω της κατευθυντικής ακτινοβολίας μπορεί να επιμηκύνει την απόσταση της επικοινωνίας και να μειώσει τις απαιτήσεις για την ισχύ του πομπού, ελαφρύνοντας την πίεση στα αποθέματα ενέργειας των κινητών τερματικών.

Ο χαρακτηρισμός «έξυπνες» περιγράφει την ικανότητα των κεραιών να ρυθμίζουν τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας τους. Έτσι οι ακτινοβολούσες δομές από μόνες τους δε χαρακτηρίζονται έξυπνες, αλλά ο συνδυασμός της δομής, του ελέγχου των κυκλωμάτων και οι αλγόριθμοι σχηματισμού της δέσμης ακτινοβολίας αποτελούν τον ορισμό των έξυπνων κεραιών. Ως εκ τούτου, ένα ευρύ φάσμα κλάδων, συμπεριλαμβανομένων της μηχανικής κεραιών, solid-state και MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) συσκευών, και επεξεργασία σήματος απαιτούνται για

μια πλήρη σχεδίαση. Στην παρούσα εργασία εξετάζουμε κατασκευή με παρασιτικά στοιχεία.

Σύμμαχος στην σχεδίαση είναι εμπορικά προγράμματα επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων, ένα εκ των οποίων είναι και το πρόγραμμα HFSS, τα οποία είναι εφοδιασμένα με γενετικούς αλγόριθμους για την υλοποίηση χρήσιμων κεραιών με παρασιτικά μονόπολα.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση μιας κεραίας W-ESPAR για την επίγεια μετάδοση ψηφιακής τηλεόρασης καθώς επίσης και η βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της ούτως ώστε το διάγραμμα ακτινοβολίας της να παραμένει σχεδόν αναλλοίωτο για όλο το φάσμα των UHF καναλιών, δηλαδή για συχνότητες από 470 MHz έως 890 MHz.

1.2 Περίληψη Κεφαλαίων

Στο **κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται συνοπτικά η θεωρία των κεραιών και οι κατηγορίες τους (συντονισμένες, μη συντονισμένες). Παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους και οι παράμετροι που καθορίζουν μια κεραία. Ακόμα γίνεται αναφορά στις στοιχειοκεραίες καθώς και στα μονόπολα.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται οι κεραίες ESPAR καθώς και οι κεραίες W-ESPAR. Γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά τους, στον τρόπο λειτουργία τους και στις τεχνικές βελτίωσής τους.

Στο **κεφάλαιο 4** γίνεται αναφορά στο πρόγραμμα HFSS και της μεθόδου που χρησιμοποιεί για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Ακόμα δίνεται μια εισαγωγή στους γενετικούς αλγόριθμους.

Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα βήματα που έγιναν ώστε να επιτευχθεί η σχεδίαση και η βελτιστοποίηση της συγκεκριμένης κεραίας και δίνονται αποτελέσματα προσομοιώσεων σε μορφή διαγραμμάτων ακτινοβολίας.

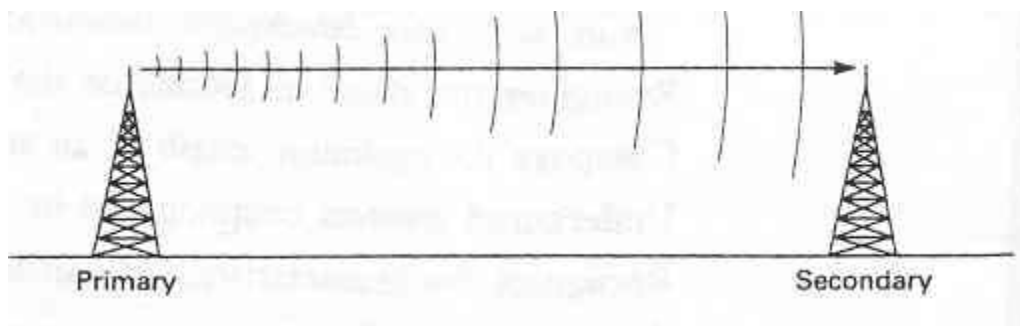
Κεφάλαιο 2 : Θεωρία Κεραιών

2.1 Εισαγωγή

Απαραίτητη προϋπόθεση για την αναλυτική μελέτη της θεωρίας των κεραιών αποτελεί η κατανόηση της θεωρίας των συντονισμένων κυκλωμάτων (*resonant circuits*) και επιπρόσθετα των φαινομένων προσαρμογής σύνθετης αντίστασης (*impedance matching*).

Η μέγιστη μεταφορά ισχύος κατά τη μετάδοσή της μέσω γραμμής μεταφοράς επιτυγχάνεται στην περίπτωση που η πηγή (πομπός) είναι προσαρμοσμένη στο φορτίο (*load*). Ως εκ τούτου η κεραία θα πρέπει να είναι προσαρμοσμένη τόσο στη γραμμή μεταφοράς (στην περίπτωση μας λογίζεται ως η πηγή) όσο και στο φορτίο (ως τέτοιο λογίζεται η ατμόσφαιρα-περιβάλλον χώρος)- στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι στις ραδιοκυματικές συχνότητες ένα απλό καλώδιο, αναλόγως του φυσικού μήκους του, μπορεί να αποτελέσει μία impedance-matching διάταξη.

Επιπρόσθετα, η διάταξη της κεραίας θα πρέπει να λειτουργεί κατά τρόπο παρόμοιο του τρόπου λειτουργίας των συντονισμένων κυκλωμάτων. Για παράδειγμα, θα πρέπει να εμφανίζει την ικανότητα μεταφοράς και εναλλαγής της ενέργειας από ηλεκτροστατική σε ηλεκτρομαγνητική και αντιστρόφως. Στην περίπτωση δε που η προσαρμογή της κεραίας στο υπόλοιπο κύκλωμα είναι άριστη, μέρος της μεταδιδόμενης ενέργειας εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα καθ' όμοιο τρόπο με τον αντίστοιχο με τον οποίο η ενέργεια μεταφέρεται από το πρωτεύον στο δευτερεύον πηνίο του μετασχηματιστή.



Σχήμα 1 Μετάδοση Ενέργειας Μεταξύ Πομπού-Δέκτη

Γενικά, η κεραία αποτελεί μία μεταλλική κατασκευή η λειτουργία της οποίας εστιάζεται στη μετατροπή των υψίσυχνων ρευμάτων σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα και αντίστροφα. Ανεξαρτήτως των διαφορετικών λειτουργιών τους, οι κεραίες λήψης και εκπομπής εμφανίζουν παρόμοια χαρακτηριστικά γεγονός που συνεπάγεται την ομοιότητα της συμπεριφορά τους .

Οι διαστάσεις, το μέγεθος και το σχήμα των κεραιών σχετίζεται άμεσα και εξαρτώνται από το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου σήματος πχ το μηχανικό μήκος (*mechanical length*) μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα της συχνότητας του κύματος αφού ως γνωστόν ισχύει η σχέση:

$$T = 1/f \text{ και } c = \lambda \cdot f \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου T : ο χρόνος

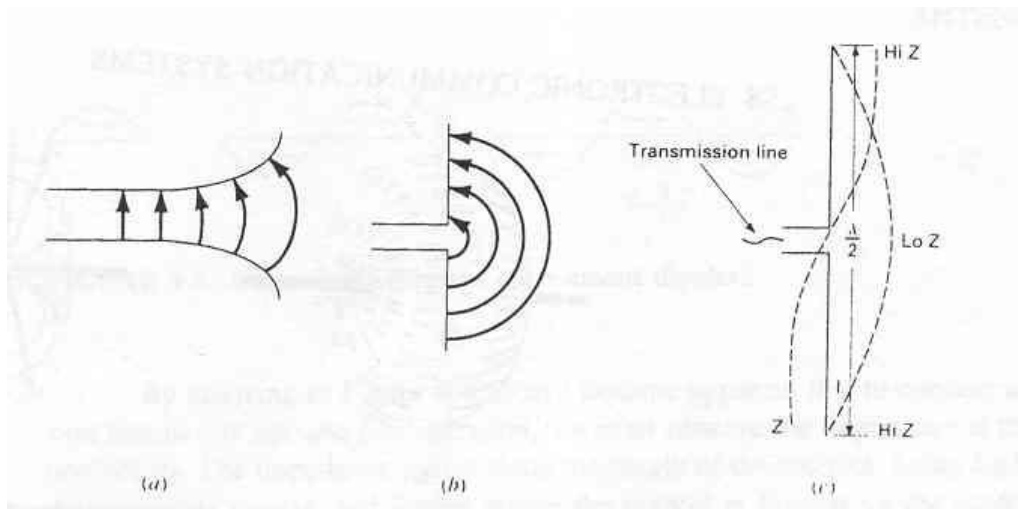
f : η συχνότητα

c : ταχύτητα διάδοσης στο κενό

λ : μήκος κύματος

2.1.1 Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Οποτεδήποτε RF ενέργεια διοχετεύεται σε **μη προσαρμοσμένη γραμμή μεταφοράς** (*mismatched transmission line*), δημιουργούνται στάσιμα κύματα, (*standing waves*) αποτέλεσμα των οποίων είναι η απώλεια ενέργειας ή η εκπομπή της στον περιβάλλοντα χώρο της γραμμής μεταφοράς. Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι η εν λόγω διαδικασία αποτελεί ανεπιθύμητο φαινόμενο κατά τη μετάδοση της ενέργειας. Μελετώντας λεπτομερέστερα την παραπάνω διαδικασία και εστιάζοντας στη γραμμή μεταφοράς (σχήμα 2) αγνοώντας τις διατάξεις που την πλαισιώνουν, παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη η ελεύθερη επιφάνειά της στο χώρο τόσο περισσότερο διευκολύνεται η διαδικασία ακτινοβολίας της ενέργειας οπότε και μεγαλύτερη ενέργεια εκπέμπεται στον περιβάλλοντα χώρο.



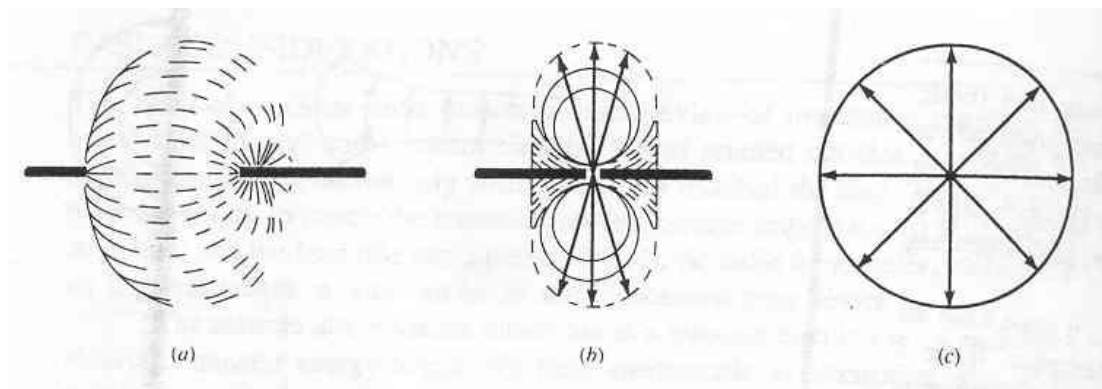
Σχήμα 2 (a) γραμμή μεταφοράς “ανοικτών άκρων” (b) conductors in line (c) δίπολο μισού κύματος (center-fed)

Έχει αποδειχθεί ότι η **απόδοση ακτινοβολίας** (*radiation efficiency*) της προαναφερθείσας διάταξης μεγιστοποιείται στην περίπτωση που τα άκρα της έχουν καμφθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να εμφανίζονται κάθετα στη γραμμή μεταφοράς (σχήμα 2b). Κατ’ αυτό τον τρόπο το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι πλήρως συζευγμένα (*fully coupled*) κατά τη διάδοσή τους στον περιβάλλοντα χώρο, οπότε και επιτυγχάνεται η μέγιστη ακτινοβολούμενη ενέργεια. Η εν λόγω διάταξη καλείται **δίπολο**. Στην περίπτωση δε, που το συνολικό μήκος των δύο καλωδίων είναι ίσο με το μισό του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου κύματος, η κεραία καλείται **δίπολο μισού κύματος** (*half-wave dipole*).

Η προαναφερθείσα διάταξη-διαμόρφωση εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά με την ισοδύναμη γραμμή μεταφοράς μήκους ίσου με $1/4\lambda$. Η τιμή της σύνθετης αντίστασης είναι μεγάλη στα άκρα της διάταξης (σχήμα 2c) ενώ αντιθέτως η σύνθετη αντίσταση λαμβάνει μικρή τιμή στο κέντρο της στο σημείο όπου πραγματοποιείται η σύνδεσή της με την γραμμή μεταφοράς. Ως εκ τούτου η ένταση του ρεύματος είναι μεγάλη (*large current nodes*) στο κέντρο της διάταξης και αντιθέτως μικρή στα άκρα της κεραίας, γεγονός που οδηγεί στη μέγιστη ακτινοβολούμενη ενέργεια.

2.1.2 Το στοιχειώδες δίπολο (Hertz Dipole)

Στην ουσία πρόκειται για μία θεωρητική κεραία της οποίας το μήκος δεν ξεπερνά το μήκος του εκπεμπόμενου κύματος (σχήμα 3α). Εξυπηρετεί στη θεωρητική μελέτη των κεραιών ως το πρότυπο βάσει του οποίου συγκρίνονται και ορίζονται τα χαρακτηριστικά όλων των κεραιών που χρησιμοποιούνται στην πράξη.



Σχήμα 3 Το διάγραμμα ακτινοβολίας του στοιχειώδους δίπολου (α) πλευρική άποψη (β) γωνία μέγιστης ακτινοβολίας (γ) κατακόρυφη άποψη

Η ισχύς του πεδίου (*field strength*) του δίπολου Hertz υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$E = \frac{(60 * \pi * L_e * \sin \theta)}{(\lambda * r)} \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

Όπου:

E: η ισχύς του μαγνητικού πεδίου

r: η απόσταση

L_e : το μήκος της κεραίας

I: η ένταση του ρεύματος

θ : γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα του καλωδίου και τη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας

Όπως εικονίζεται στο σχήμα 3b το διάγραμμα ακτινοβολίας του στοιχειώδους δίπολου εμφανίζει ομοιομορφία εκατέρωθεν του άξονα του δίπολου (συμμετρικοί κύκλοι) ενώ από το ίδιο σχήμα διαφαίνεται ότι η διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας του δίπολου είναι η κάθετη στον άξονά του.

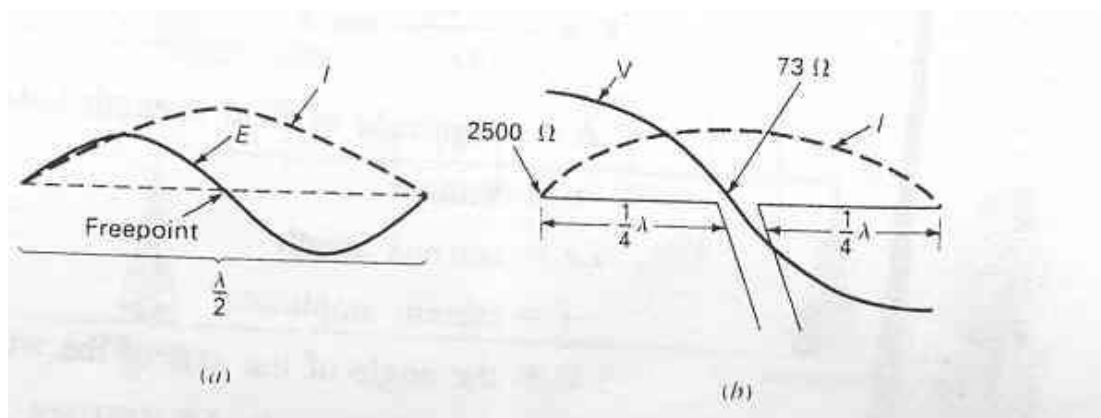
2.2 Συρμάτινες κεραιές στο χώρο

Στην παράγραφο που ακολουθεί περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των κεραιών υπό την προϋπόθεση ότι βρίσκονται τοποθετημένες μακριά από την επιφάνεια της γης. Η εν λόγω συνθήκη επιβάλλεται δεδομένου ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραιάς μεταβάλλεται-παραμορφώνεται από την ύπαρξη της γήινης επιφάνειας.

2.2.1 Κατανομή τάσης και ρεύματος

Οποτεδήποτε τάση υψίσυχνου (RF) σήματος εφαρμόζεται σε κάποιο σημείο της κεραιάς, στο εν λόγω σημείο αναπτύσσεται τάση και επάγεται ηλεκτρικό ρεύμα, με άμεσο αποτέλεσμα τη δημιουργία και διάδοση κυμάτων (*traveling waves*). Η εν λόγω διαδικασία πολλές φορές συνοδεύεται από τη δημιουργία στάσιμων κυμάτων, η ύπαρξη των οποίων αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι η τάση και η ένταση του ρεύματος είναι εκτός φάσης.

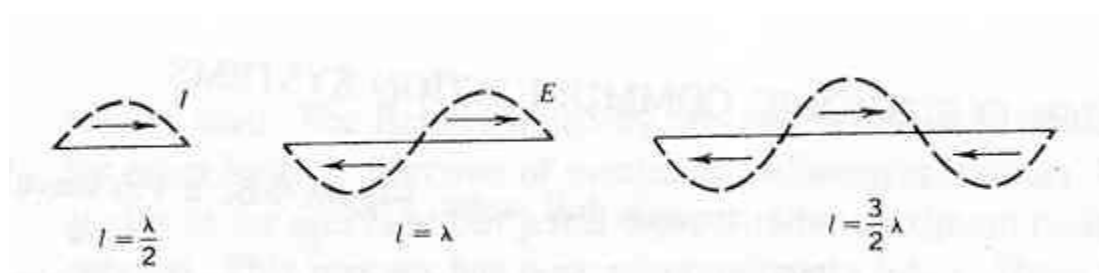
Το **διάγραμμα ακτινοβολίας** (*radiation pattern*) της κεραιάς εξαρτάται κατά βάση από το μήκος της μετρούμενο σε μήκη κύματος, τις πιθανές απώλειες ισχύος και από τα φορτία (*terminations*) που πιθανότατα είναι συνδεδεμένα στα δύο άκρα της. Επιπρόσθετα, το πάχος της κεραιάς αποτελεί παράγοντα εξέχουσας σημασίας στην διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας. Στην παρούσα παρουσίαση που επιχειρείται, οι κεραιές θεωρείται ότι δεν παρουσιάζουν απώλειες και επίσης ότι είναι κατασκευασμένες από καλώδια πολύ μικρής διατομής.



Σχήμα 4

Κατανομή τάσης και ρεύματος κατά μήκος του δίπολου μισού κύματος

Στο σχήμα 4 απεικονίζεται η αναπτυσσόμενη τάση και η κατανομή του ρεύματος κατά μήκος του δίπολου μισού κύματος. Από τη μελέτη του εν λόγω σχήματος και τη σύγκρισή του με το αντίστοιχο σχήμα 3b καθίσταται προφανής η ομοιότητα την οποία παρουσιάζει το διάγραμμα ακτινοβολίας της εν λόγω διάταξης με το αντίστοιχο διάγραμμα της γραμμής μεταφοράς μήκους $\lambda/4$ της οποίας τα άκρα εμφανίζουν τη μορφή του σχήματος 2b. Η μεταβολή της τάσης και της έντασης του ρεύματος είναι τέτοια ώστε οι χαρακτηριστικές καμπύλες τους επαναλαμβάνονται ανά μήκος $\lambda/2$ όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 5.



Σχήμα 5 Κατανομή ρεύματος κατά μήκος συντονισμένων διπόλων

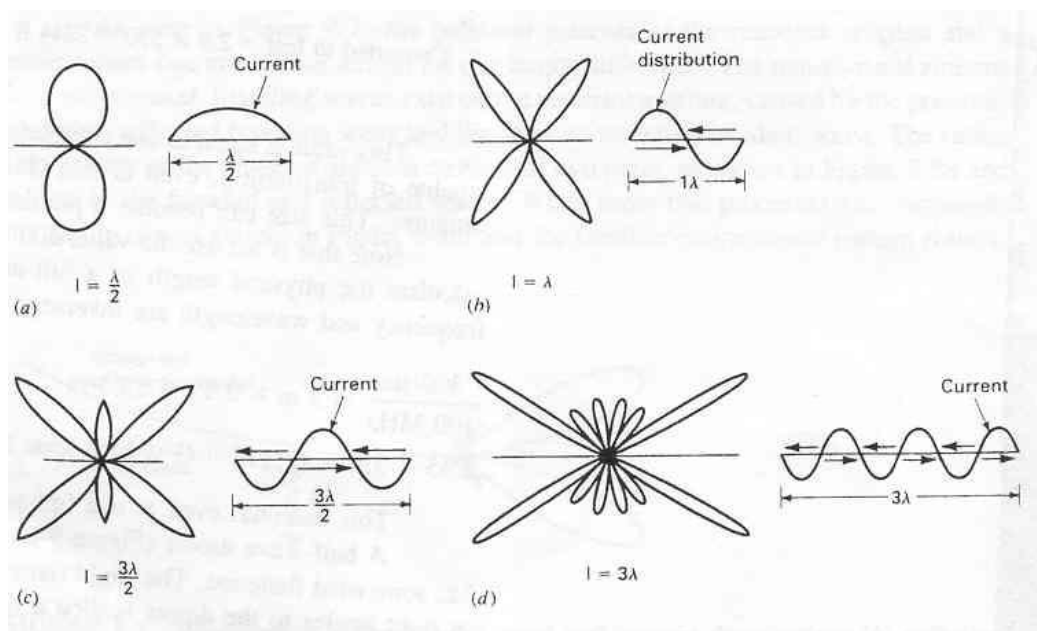
Αναφερόμενοι στο σχήμα 4 παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι για τη διασύνδεση της εν λόγω διάταξης κεραίας με μία γραμμή μεταφοράς, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά τη μέτρηση της εμπέδησης στα άκρα σύνδεσης προκειμένου να πραγματοποιηθεί η τέλεια προσαρμογή τους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η τιμή της εμπέδησης μεταβάλλεται κατά μήκος της κεραίας, εμφανίζοντας μέγιστη τιμή στα σημεία όπου η ένταση του ρεύματος είναι ελάχιστη ενώ αντίθετα η τιμή της εμπέδησης είναι ελάχιστη στο κέντρο της διάταξης όπου η τιμή του ρεύματος εμφανίζεται μέγιστη. Συγκεκριμένα στο κέντρο της κεραίας μισού κύματος η εμπέδηση εμφανίζει τιμή περί τα 73 Ωm η οποία και αυξάνεται σταδιακά μέχρι την τιμή των 2500 Ωm σε κάθε ένα εκ των δύο άκρων.

Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθεί η μέγιστη μεταφορά ενέργειας, από τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς που θα συνδεθεί στην εν λόγω κεραία θα πρέπει να είναι 73 Ωm . Η περιγραφόμενη μέθοδος διασύνδεσης της γραμμής μεταφοράς στην κεραία αναφέρεται ως *centre-current fed*.

2.2.2 Συντονισμένες κεραίες, διαγράμματα ακτινοβολίας

Ως γνωστόν, από τη θεωρία των συντονισμένων κυκλωμάτων ισχύει ότι ένα οποιοδήποτε συντονισμένο κύκλωμα υψηλής τιμής Q εμφανίζει πολύ μικρό εύρος ζώνης. Καθ' όμοιο τρόπο, οι **συντονισμένες κεραίες** (*resonant antennas*) εμφανίζουν πολύ μικρό εύρος ζώνης, ιδιότητα η οποία καθορίζει τα χρήσιμα όρια του κάθε τύπου ακτινοβολητή (*radiator*).

Το διάγραμμα ακτινοβολίας (στον ελεύθερο χώρο) ενός οποιουδήποτε ακτινοβολητή καλωδίου (*wire radiator*) εξαρτάται κυρίως από το μήκος του. Στο σχήμα 9.6 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά διαγράμματα κατανομής της έντασης του ρεύματος και τα αντίστοιχα διαγράμματα ακτινοβολίας στις περιπτώσεις όπου το μήκος της κεραίας είναι $l = \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2, 3\lambda$ αντίστοιχα.



Σχήμα 6 Το διάγραμμα ακτινοβολίας συντονισμένων δίπολων διαφορετικών μηκών.

Η κεραία μισού κύματος εμφανίζει κατανεμημένη χωρητική (*capacitance*) και επαγωγική αντίσταση (*inductance*) και ως εκ τούτου λειτουργεί ως συντονισμένο κύκλωμα, στο οποίο η τάση και η ένταση του ρεύματος είναι εκτός φάσης.

Τέλος, αναφορικά με το μήκος της κεραίας, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο υπολογισμός του βασίζεται στην εξίσωση 3 η οποία ακολουθεί:

$$L = vel/f \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

όπου:

vel: είναι η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρικού κύματος στο συγκεκριμένο μέσο

f: η συχνότητά του.

Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο εν λόγω μέσο προσδιορίζεται από τη σχέση

$$vel = c * V_f \quad (\text{Εξίσωση 3'})$$

όπου:

c: η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό.

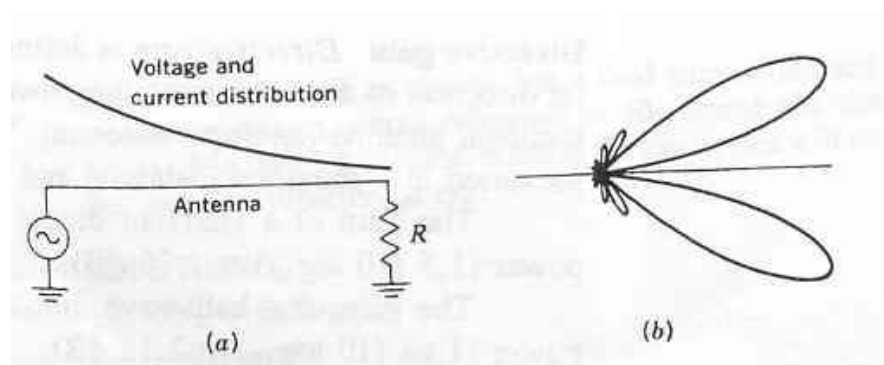
V_f : είναι ο **παράγοντας ταχύτητας** (*velocity factor*).

Επανερχόμενοι στο σχήμα 6 παρατηρούμε ότι εν τέλει, η αύξηση του μήκους της διπολικής κεραίας οδηγεί στην αύξηση του αριθμού των λοβών ακτινοβολίας. Έτσι λοιπόν στην περίπτωση της διπολικής κεραίας μήκους $3\lambda/2$ είναι προφανές ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας απαρτίζεται από έξι λοβούς. Οι δύο εξ' αυτών είναι **δευτερεύοντες λοβοί** (*minor lobes*) δεδομένου ότι η ακτινοβολούμενη ενέργεια κατά την διεύθυνσή τους είναι ασήμαντη ενώ οι υπόλοιποι τέσσερις είναι οι κύριοι λοβοί ακτινοβολίας. Συγκρίνοντας για παράδειγμα τα διαγράμματα ακτινοβολίας των σχημάτων 6b και 6c παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της διπολικής κεραίας μήκους $3\lambda/2$ η διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας εστιάζεται καλύτερα περίξ του άξονα του δίπολου. Τέλος, είναι προφανής η συμμετρία του διαγράμματος ακτινοβολίας των διπολικών κεραιών εκατέρωθεν του άξονα των. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι στη μεν περίπτωση της διπολικής κεραίας μήκους $3\lambda/2$ σε κάθε μία πλευρά του άξονα υπάρχουν 3 λοβοί ακτινοβολίας (αριθμός ίσος με τον συνολικό αριθμό λοβών ρεύματος κατά μήκος της κεραίας), στη δε περίπτωση της

διπολικής κεραίας μήκους 3λ έξι είναι οι λοβοί ακτινοβολίας στην κάθε μία πλευρά του άξονα της διάταξης (σχήμα 6d).

2.2.3 Μη συντονισμένες κεραίες (Directional Antennas)

Κατά μήκος μίας συντονισμένης κεραίας, όπως και στην περίπτωση της άριστα τερματισμένης (*properly terminated*) γραμμής μεταφοράς, δεν παράγονται στάσιμα κύματα. Η ύπαρξη κατάλληλης αντίστασης τερματισμού στα άκρα μη συντονισμένης κεραίας εξασφαλίζει τον μηδενισμό των στάσιμων κυμάτων διασφαλίζοντας παράλληλα τη μετάδοση των κυμάτων προς μία μόνο κατεύθυνση (*forward*). Επιπρόσθετα, η αντίσταση τερματισμού στα άκρα της κεραίας επιφέρει την εξασθένηση της εκπεμπόμενης ενέργειας έτσι ώστε τα δύο τρίτα της συνολικά μεταφερόμενης ενέργειας εκπέμπονται στον περιβάλλοντα χώρο της κεραίας (σχήμα 7α).

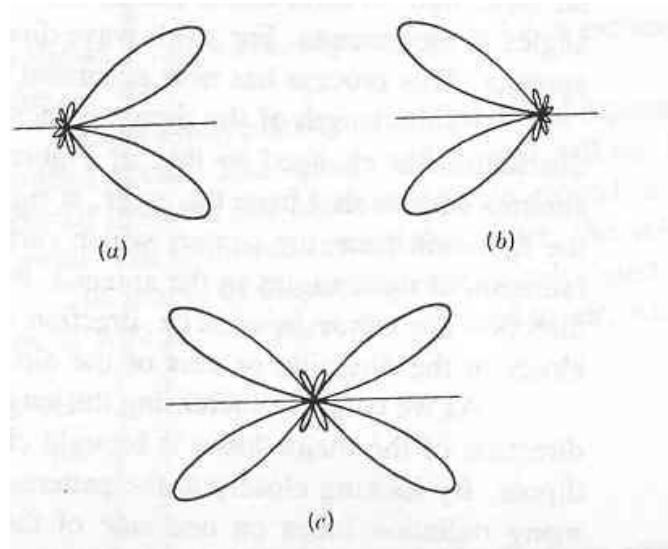


Σχήμα 7

Μη συντονισμένη κεραία (α) Διάταξη και κατανομή ρεύματος (b) διάγραμμα ακτινοβολίας

Συγκρίνοντας το σχήμα 7b με τα αντίστοιχα του σχήματος 6, παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας της μη συντονισμένης κεραίας εμφανίζει χαρακτηριστικές ομοιότητες με το διάγραμμα ακτινοβολίας της αντίστοιχης συντονισμένης κεραίας. Η ουσιαστική διαφορά τους έχει να κάνει με το γεγονός ότι οι μη συντονισμένες κεραίες είναι **μονοκατευθυντικές** (*unidirectional*). Το ερώτημα που γεννάται αφορά στη διευκρίνηση των αιτιών εξ' αιτίας των οποίων το διάγραμμα ακτινοβολίας των συντονισμένων κεραιών εμφανίζεται **πανκατευθυντικό** (*omnidirectional*). Πολύ απλά, στις συντονισμένες κεραίες η συνύπαρξη των ανακλώμενων (*reflected*) και ορθώς διαδιδόμενων (*forward travelling incident*) κυμάτων, έχει ως επακόλουθο τη

δημιουργία στάσιμων κυμάτων, η ύπαρξη των οποίων καθορίζει τη μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας. Αποτελείται λοιπόν από δύο τμήματα (σχήμα 8α και 8β) κάθε ένα εκ των οποίων οφείλεται στην ύπαρξη των *forward* και ανακλώμενων κυμάτων αντίστοιχα. Ο συνδυασμός επομένως των εν λόγω διαγραμμάτων ακτινοβολίας οδηγεί στο **δικατευθυντικό** (*bidirectional*) διάγραμμα ακτινοβολίας του σχήματος 8c.



Σχήμα 8 Απεικόνιση του τρόπου σύνθεσης του διαγράμματος ακτινοβολίας συντονισμένης κεραίας (α) προερχόμενο από το *forward* κύμα (b) προερχόμενο από το ανακλώμενο κύμα (c) το τελικό διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας.

2.3 Παράμετροι και Χαρακτηριστικά των Κεραιών

Από τα όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους κατέστη σαφές ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας μίας κεραίας-καλωδίου (*wire radiator*) είναι πολύπλοκο, και ως εκ τούτου θα πρέπει να βρεθεί ο τρόπος ώστε να περιγραφεί και να προσδιοριστεί με σαφήνεια. Συνεπώς πρέπει να οριστούν τα κατάλληλα μεγέθη με τη βοήθεια των οποίων θα περιγραφούν και καθοριστούν τα χαρακτηριστικά κάθε κεραίας. Ενδεικτικά αναφέρονται ως τέτοια, το κέρδος της κεραίας η κατευθυντικότητα της, το εύρος ζώνης, το εύρος δέσμης ακτινοβολίας κτλ.

2.3.1 Κέρδος κεραίας και Αποτελεσματική Ισχύς Εκπομπής

Συγκεκριμένοι τύποι κεραιών εστιάζουν το διάγραμμα ακτινοβολίας τους σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση συγκριτικά με τις πανκατευθυντικές κεραίες. Ένας διαφορετικός τρόπος περιγραφής της ικανότητας / χαρακτηριστικού της κεραίας να συγκεντρώνει την εκπεμπόμενη ακτινοβολία αποτελεί το μέγεθος του **κέρδους της κεραίας** (*antenna gain*) (μετρούμενο σε *decibels*)

Κατευθυντικό κέρδος (*directive gain*) ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας της εκπεμπόμενης ισχύος (*power density*) σε συγκεκριμένη κατεύθυνση προς την πυκνότητα ισχύος η οποία θα εκπεμπόταν από μία πανκατευθυντική κεραία (*omnidirectional-isotropic antenna*). Η πυκνότητα ισχύος αμφότερων των δύο τύπων κεραιών μετράται σε συγκεκριμένη κατεύθυνση και ως εκ τούτου ένας συγκριτικός λόγος υπολογίζεται.

Σε πραγματική βάση το κέρδος του δίπολου Hertz, αναφορικά πάντοτε με μία πανκατευθυντική κεραία υπολογίζεται 1.76dB, ενώ καθ' όμοιο τρόπο η αντίστοιχη τιμή του κέρδους της διπολικής κεραίας μισού κύματος υπολογίζεται 2.15dB.

Από την σύγκριση των παραπάνω τιμών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Κατά πρώτον, αυξανόμενου του μήκους της κεραίας αυξάνεται η τιμή του κέρδους της κεραίας. Κατά δεύτερον, συγκρίνοντας τα κέρδη των συντονισμένων κεραιών με

τα αντίστοιχα των μη συντονισμένων προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι μη συντονισμένες κεραίες παρουσιάζουν μεγαλύτερο κέρδος γεγονός αναμενόμενο.

Κατευθυντικότητα και κέρδος ισχύος (*directivity and power gain*)

Ένα επιπλέον μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του κέρδους μίας κεραίας είναι το **κέρδος ισχύος (*power gain*)**. Το εν λόγω μέγεθος στην πραγματικότητα αποτελεί μέτρο σύγκρισης της ισχύος εξόδου μίας συγκεκριμένης κεραίας σε συγκεκριμένη κατεύθυνση, σε σχέση με μία ιστροπική κεραία. Το κέρδος μίας κεραίας είναι ο λόγος ισχύος μεταξύ μίας πανκατευθυντικής και μία μονοκατευθυντικής κεραίας. Η μαθηματική έκφραση μέσω της οποίας εκφράζεται και υπολογίζεται είναι η ακόλουθη

$$A(dB) = 10 \log_{10} \left(P_2 / P_1 \right) \text{ (Εξίσωση 4)}$$

όπου:

A(dB): το κέρδος της κεραίας σε *decibels*

P₁: η εκπεμπόμενη ισχύς της μονοκατευθυντικής κεραίας

P₂: η εκπεμπόμενη ισχύς της ιστροπικής κεραίας

Ένας επιπρόσθετος όρος ο οποίος χρησιμοποιείται προκειμένου να περιγράψει την απόδοση του συστήματος εκπομπής είναι ο *effective radiated power (ERP)*.

2.3.2 Μέτρηση εκπομπής και ένταση πεδίου

Οι επαγόμενες τάσεις σε μία κεραία λήψεως είναι πολύ μικρές, της τάξεως των μικροβόλτ. Ως εκ τούτου οι λαμβανόμενες μετρήσεις της εντάσεως του πεδίου (*field strength*) θα είναι της τάξεως των mV/m

Ένταση πεδίου: Η ένταση του πεδίου, που δημιουργείται ως αποτέλεσμα της εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στον περιβάλλοντα χώρο, σε συγκεκριμένο σημείο ισοδυναμεί με την επαγόμενη τάση επί καλωδίου μήκους 1m το οποίο βρίσκεται στο συγκεκριμένο σημείο. Η τιμή της εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων αναφέροντας χαρακτηριστικά τη χρονική στιγμή της ημέρας που

πραγματοποιείται η εκπομπή της κεραίας, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες την απόσταση του καλωδίου από την κεραία κτλ.

2.3.3 Αντίσταση ακτινοβολίας κεραίας

Πρόκειται για ένα υποθετικό μέγεθος με θεωρητική μόνο σημασία. Ως **αντίσταση ακτινοβολίας** της κεραίας (*antenna radiation resistance*) ορίζεται η ωμική αντίσταση ενός κυκλώματος στην οποία θα απελευθερώνονταν το ίδιο ποσό ενέργειας με το αντίστοιχο ακτινοβολούμενο από την κεραία. Προσδιορίζεται δε από το λόγο της μέσης ακτινοβολούμενης ισχύος της κεραίας προς το τετράγωνο της έντασης του επαγόμενου ρεύματος που αναπτύσσεται σε συγκεκριμένο απομακρυσμένο σημείο (*feed point*).

2.3.4 Απώλειες και βαθμός απόδοσης

Πέραν της ενέργειας που εκπέμπεται από την κεραία, ένα σημαντικό μέγεθος, ο προσδιορισμός και περιορισμός του οποίου αποτελεί εξέχουσας σημασίας έργο, είναι οι απώλειες ισχύος. Παράγοντες που συμβάλλουν στην απώλεια ισχύος κατά την εκπομπή της κεραίας είναι μεταξύ των άλλων, η *ground resistance*, *corona effects*, *imperfect dielectric* στον περιβάλλοντα χώρο της κεραίας, επαγωγή eddy ρευμάτων σε μεταλλικά αντικείμενα τα οποία βρίσκονται κοντά στην κεραία, και τέλος σε θερμικές απώλειες κατά μήκος της κεραίας. Συνδυάζοντας λοιπόν όλα τα παραπάνω, προκύπτει η σχέση

$$P_{in} = P_d + P_{rad} \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

Όπου P_{in} : η συνολική ισχύς τροφοδοσίας της κεραίας

P_d : η απολεσθείσα ενέργεια

P_{rad} : η συνολικά ακτινοβολούμενη ενέργεια

Από την παραπάνω σχέση και αντικαθιστώντας καθ' έναν εκ των τριών όρων με τον αντίστοιχο $I^2 R$ όρο, προκύπτει η ισοδύναμη σχέση

$$R_{in} = R_d + R_{rad}$$

βασιζόμενοι στην οποία μπορούμε να ορίσουμε την παράμετρο του βαθμού απόδοσης (*efficiency*) της κεραίας ως εξής

$$n = \frac{R_{rad}}{(R_{rad} + R_d)} * 100\% \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

όπου R_d : η αντίσταση της κεραίας (*antenna resistance*)

R_{rad} : η αντίσταση ακτινοβολίας της κεραίας

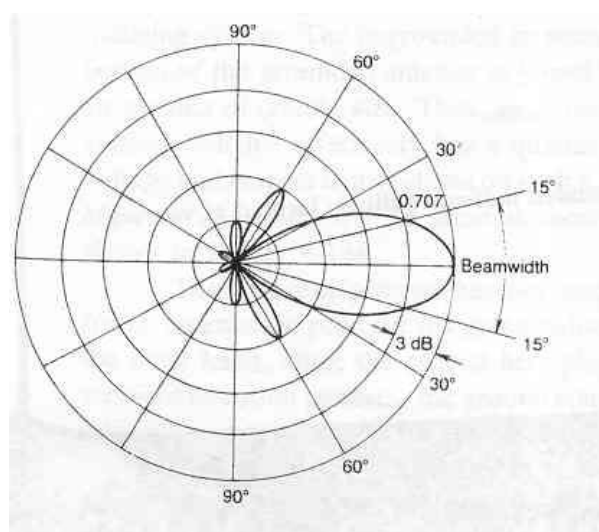
Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι ο βαθμός απόδοσης της κεραίας μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της ακτινοβολούμενης ισχύος από την κεραία προς τη συνολική ισχύ τροφοδοσίας της κεραίας

Οι LF (Low Frequency) και MF (Medium Frequency) κεραίες είναι οι λιγότερο αποδοτικές δεδομένων των δυσκολιών που απαντώνται στην επίτευξη του κατάλληλου μήκους τους. Συγκεκριμένα, ο βαθμός απόδοσης των εν λόγω κεραιών δεν ξεπερνά την τιμή 0.95 ενώ είναι δυνατό στη χειρότερη περίπτωση ο βαθμός απόδοσης τους να μην ξεπερνά την τιμή 0.75. Φυσικά, αυξανόμενης της συχνότητας εκπομπής της κεραίας, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσής τους έτσι που σε ορισμένες περιπτώσεις επιτυγχάνεται άριστη απόδοση πλησίον της μέγιστης τιμής 1. Η αντίσταση ακτινοβολίας είναι δυνατό να λαμβάνει τιμή σε ένα εύρος λίγων Ohm μέχρι αρκετές εκατοντάδες Ohm Παράγοντες όπως, η επιλογή του σημείου τροφοδοσίας, τα φυσικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της κεραίας, είναι ορισμένοι εκ των οποίων καθορίζουν την τιμή της αντίστασης ακτινοβολίας της κεραίας.

2.3.5 Εύρος ζώνης συχνοτήτων, Εύρος δέσμης και πολικότητα κεραίας

Από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην περιγραφή των χαρακτηριστικών των κεραιών είναι το **εύρος ζώνης συχνοτήτων** (*bandwidth*) στις οποίες λειτουργεί η κεραία, το **εύρος δέσμης** (*beam width*) της κεραίας που καθορίζει το βαθμό συρρίκνωσης /συγκέντρωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας, γύρω από τον κεντρικό άξονα και τέλος η **πολικότητα** (*polarity*) που περιγράφει τον προσανατολισμό (*space orientation*) των εκπεμπόμενων κυμάτων στο χώρο.

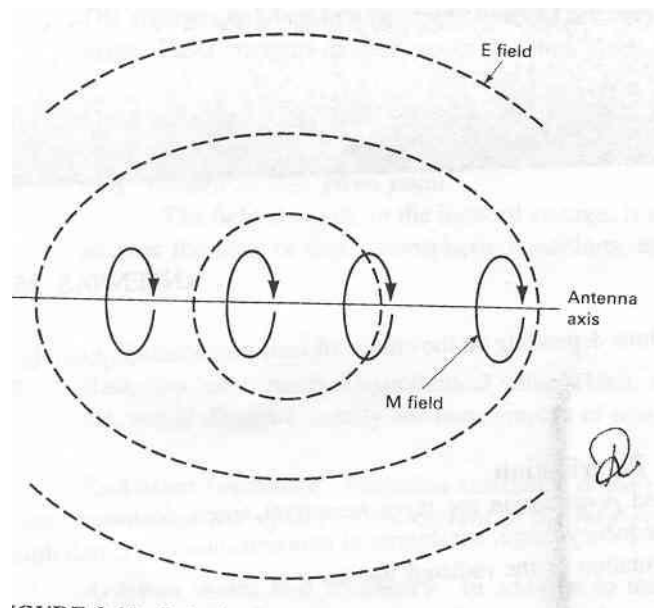
Συγκεκριμένα, ο όρος *bandwidth* προσδιορίζει το εύρος των συχνοτήτων (*frequency range*) στο οποίο η κεραία μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά, εννοώντας για παράδειγμα ότι η κεραία θα επιτυγχάνει ικανοποιητική απόδοση (*throughput*) στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Στο σημείο όπου η ισχύς της κεραίας μειώνεται στο μισό της μέγιστης τιμής της (3dB), το μέγιστο και ελάχιστο του συγκεκριμένου εύρους ζώνης συχνοτήτων στο οποίο λειτουργεί η κεραία έχει επιτευχθεί οπότε και η απόδοση της κεραίας μειώνεται σταδιακά. Στην περίπτωση δε των κεραιών που λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, προκειμένου να διατηρείται η απόδοση τους σε υψηλά επίπεδα, ενσωματώνονται κατάλληλα αντισταθμιστικά κυκλώματα (*compensating circuits*) έτσι ώστε ανά πάσα στιγμή να εξασφαλίζεται η προσαρμογή σύνθετης αντίστασης της κεραίας. Κατ' αυτό τον τρόπο, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα δημιουργίας στάσιμων κυμάτων, εξασφαλίζεται τρόπον τινά η “προστασία” του εκπεμπόμενου σήματος από αυτού του είδους τις παραμορφώσεις-υποβιβάσεις. Από την άλλη μεριά, το εύρος δέσμης της κεραίας προσδιορίζει την ικανότητα συρρίκνωσης ή όχι της ακτινοβολούμενης δέσμης γύρω από τον κύριο άξονα ακτινοβολίας. Περιγράφεται δε ως η γωνία που σχηματίζεται από τα **σημεία ημίσεως ισχύος** (*half power points*-σημεία στα οποία η ένταση του πεδίου της κεραίας μειώνεται στο 0.707 της μέγιστης τιμής της) του κυρίως λοβού του διαγράμματος ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, το εύρος δέσμης του διαγράμματος ακτινοβολίας του σχήματος 9 είναι 30° .



Σχήμα 9

Το εύρος δέσμης συγκεκριμένης κεραίας

Τέλος αναφορικά με την πολικότητα της κεραίας, πρόκειται για τη παράμετρο που προσδιορίζει τον προσανατολισμό (στο χώρο) των πεδίων του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος (σχήμα 10). Στον ελεύθερο χώρο, τον περιβάλλοντα την κεραία, το μαγνητικό πεδίο του κύματος είναι κάθετο στη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου και επιπλέον η διεύθυνση διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι κάθετη και στα δύο επαγόμενα πεδία. Η πολικότητα της κεραίας καθορίζεται από την πολικότητα του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Έτσι λοιπόν στην περίπτωση που η διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετη, η κεραία εμφανίζεται κάθετα πολωμένη ενώ αντιθέτως όποτε η διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου είναι οριζόντια η κεραία χαρακτηρίζεται ως οριζόντια πολωμένη. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι LF (*Low Frequency*) κεραίες εμφανίζουν κάθετη πολικότητα κατά το πλείστο τους, εξ' αιτίας τόσο της επιδράσεως της επιφάνειας της γης στα εκπεμπόμενα LF ηλεκτρομαγνητικά κύματα όσο και των μεθόδων κατασκευής τους. Από την άλλη μεριά, οι HF (*High Frequency*) κεραίες εμφανίζουν συνήθως οριζόντια πόλωση.



Σχήμα 10 Η πόλωση κεραίας (απεικονίζονται ευκρινώς το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο)

2.4 Στοιχειοκεραίες

Σε πολλές εφαρμογές κρίνεται απαραίτητος ο σχεδιασμός κεραιών με μεγάλη κατευθυντικότητα και πολύ υψηλά κέρδη για να ικανοποιήσουμε τις απαιτήσεις των απομακρυσμένων επικοινωνιών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας το ηλεκτρικό μέγεθος της κεραίας. Επίσης είναι απαραίτητη σε πολλές περιπτώσεις η ηλεκτρονική στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας των κεραιών, όπως και στην περίπτωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Αυξάνοντας τις διαστάσεις του κάθε στοιχείου οδηγούμαστε συχνά σε μεγαλύτερη κατευθυντικότητα. Εναλλακτικά μπορούμε να αυξήσουμε το μέγεθος της κεραίας χωρίς απαραίτητα να αλλάξουμε τις διαστάσεις των επιμέρους στοιχείων, δημιουργώντας μία ομάδα ακτινοβολητών με κατάλληλη γεωμετρία και ηλεκτρική τροφοδότηση. Η συγκεκριμένη μορφή κεραίας ονομάζεται **στοιχειοκεραία**.

Οι στοιχειοκεραίες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις χωρικά ομοιόμορφες και τις χωρικά ανομοιόμορφες. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται χωρικά ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες επειδή για αυτές υπάρχει πλήθος μεθόδων ανάλυσης και σύνθεσης. Επίσης στις περισσότερες περιπτώσεις οι ακτινοβολητές είναι όμοιοι, έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, ακτινοβολούν και λαμβάνουν ταυτοχρόνως. Αυτής της μορφής η διάταξη είναι πιο πρακτική και απλή. Με κατάλληλη επιλογή της ρευματικής διέγερσης επιτυγχάνονται βελτιωμένες ιδιότητες για την στοιχειοκεραία σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ενός απλού στοιχείου της, καθώς τα επιμέρους πεδία των στοιχείων της κεραίας, συμβάλουν στις επιθυμητές διευθύνσεις του χώρου, ενώ αντίθετα αλληλοαναιρούνται σε άλλες.

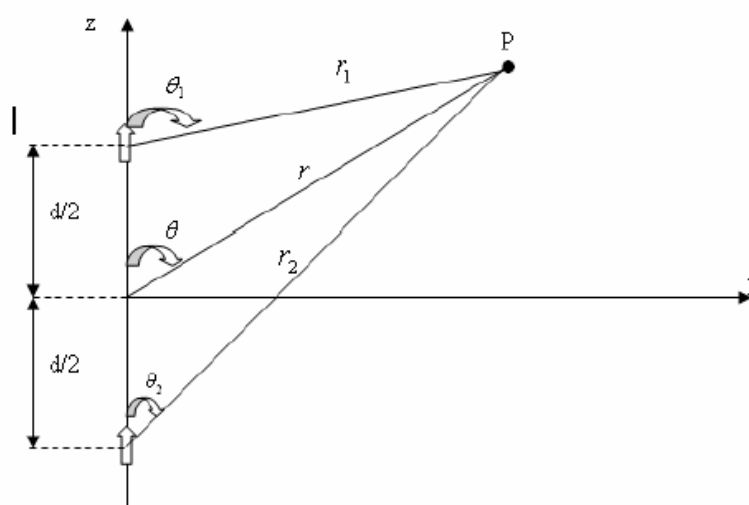
Το συνολικό πεδίο μιας στοιχειοκεραίας προσδιορίζεται από τη διανυσματική υπέρθεση των πεδίων των επιμέρους ακτινοβολητών που την αποτελούν, εφόσον βέβαια δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας. Συνεπώς η ρευματική κατανομή κάθε στοιχείου πρέπει να είναι η ίδια με την κατανομή που θα είχε το στοιχείο μόνο του στο χώρο, κάτι που επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της απόστασης μεταξύ των στοιχείων.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας είναι οι εξής:

- Η γεωμετρία της στοιχειοκεραίας (γραμμική, κυκλική, επίπεδη κ.τ.λ.)
- Η σχετική απόσταση μεταξύ των στοιχείων
- Το πλάτος της ρευματικής διέγερσης για κάθε στοιχείο
- Η φάση της ρευματικής διέγερσης για κάθε στοιχείο
- Η συχνότητα λειτουργίας
- Το πλήθος των στοιχείων της κεραίας

2.4.1 Στοιχειοκεραία δύο Στοιχείων

Η πιο απλή περίπτωση στοιχειοκεραίας είναι η περίπτωση κεραίας δύο στοιχείων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 11 Στοιχειοκεραία δύο Στοιχείων

Το συνολικό πεδίο που δημιουργούν τα δύο στοιχεία, εφόσον δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ τους δημιουργείται με υπέρθεση των πεδίων τους και αποδεικνύεται ότι ισούται με το πεδίο του ενός από τα δύο στοιχεία πολλαπλασιαζόμενο με ένα παράγοντα, ο οποίος ονομάζεται παράγοντας διάταξης (AF). Ο παράγοντας αυτός

περιγράφει τη γεωμετρία της διάταξης των δύο στοιχείων και λαμβάνει υπόψη του την διαφορά φάσης των ρευμάτων τροφοδότησης.

$$\vec{E}(r) = jn \frac{kIL}{4\pi} \left\{ \frac{\exp(-jkr)}{r} \sin \theta \left[2 \cos \frac{kd \cos \theta + \delta}{2} \right] \hat{\theta} \right\} \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

$$AF = 2 \cos \frac{kd \cos \theta + \delta}{2} \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

Όπου

δ = η διαφορά φάσης της τροφοδότησης των δύο διπόλων,

L = το μήκος των διπόλων

n = η κυματική αντίσταση

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

2.4.2 Στοιχειοκεραία Πολλών Στοιχείων

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα μπορούμε να επεκτείνουμε τη παραπάνω μελέτη σε στοιχειοκεραίες N στοιχείων. Θεωρούμε ότι όλα τα στοιχεία της κεραίας έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και εκπέμπουν ή λαμβάνουν ταυτόχρονα, ενώ το ρεύμα τροφοδοσίας κάθε στοιχείου μπορεί να διαφέρει κατά μέτρο ή και φάση. Οι κεραίες αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις χωρικά ομοιόμορφες και τις χωρικά ανομοιόμορφες.

Αν I_0 είναι ο φασιθέτης του ρεύματος διέγερσης του στοιχείου της στοιχειοκεραίας που θεωρείται ως στοιχείο αναφοράς, το ρεύμα διέγερσης οποιουδήποτε άλλου στοιχείου μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$I_m = c_m I_0 \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

$$c_m = \frac{I_m}{I_0}$$

όπου $m = 1, 2, \dots, N-1$ ή αλλιώς

Όπου c_m είναι ο ρευματικός συντελεστής του m στοιχείου και N το πλήθος των στοιχείων της κεραίας.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές για τη μακρινή περιοχή των κεραιών, η ένταση ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας δίνεται από τον τύπο:

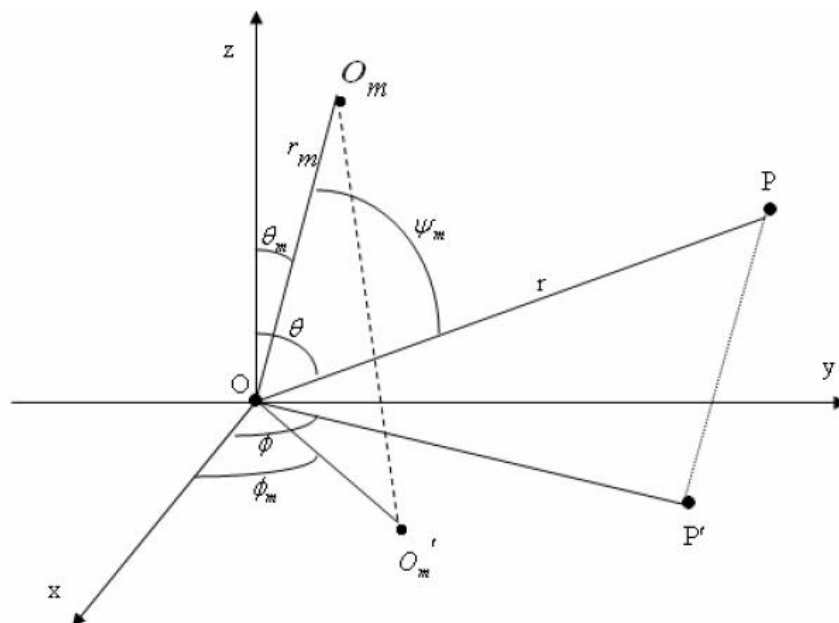
$$U(\theta, \phi) = U_0(\theta, \phi) |S(\theta, \phi)|^2 \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

όπου:

$U(\theta, \phi)$, η ένταση ακτινοβολίας της κεραίας

$U_0(\theta, \phi)$, η ένταση ακτινοβολίας του στοιχείου αναφοράς

$S(\theta, \phi)$, ο παράγοντας διάταξης της κεραίας ο οποίος διάταξης μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει των συντεταγμένων θέσης των στοιχείων ακτινοβολίας.



Σχήμα 12 Εύρεση Παράγοντα Διάταξης

Με βάση το σχήμα ο παράγοντας διάταξης υπολογίζεται:

$$S(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{N-1} c_m \exp(jkr_m \cos \psi_m)$$

$$\cos \psi_m = \cos \theta_m \cos \theta + \sin \theta_m \sin \theta \cos(\phi - \phi_m)$$

όπου,

k , κυματικός αριθμός του μέσου διάδοσης

θ_m , η γωνία που σχηματίζει η κεραία με τον z

θ , η γωνία που σχηματίζει το σημείο παρατήρησης με τον z

ϕ , η γωνία που σχηματίζει το σημείο παρατήρησης με τον x

ϕ_m , η γωνία που σχηματίζει η κεραία με τον x

Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι ο παράγοντας διάταξης εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας, τη γεωμετρική διάταξη, το πλήθος και τη σχετική διέγερση των στοιχείων. Ο παράγοντας διάταξης δεν εξαρτάται από το είδος των ακτινοβολητών που την αποτελούν και προσδιορίζεται αντικαθιστώντας τα στοιχεία ακτινοβολίας με ιστροπικούς ακτινοβολητές, τοποθετημένους στα κέντρα διέγερσης τους.

Επίσης, το μέτρο του παράγοντα διάταξης που αφορά τη μακρινή περιοχή, είναι ανεξάρτητο από την εκλογή του κέντρου των συντεταγμένων. Σε στοιχειοκεραίες με ορισμένο πλήθος στοιχείων, συγκεκριμένη γεωμετρική διάταξη και διέγερση, ο παράγοντας διάταξης έχει μοναδικό μέτρο το οποίο αποτελεί συνάρτηση της συχνότητας ανεξάρτητα από την επιλογή του κέντρου συντεταγμένων, η επιλογή του οποίου γίνεται με στόχο την ευκολία προσδιορισμού του και είναι συνήθως το γεωμετρικό κέντρο της κεραίας.

Το κατευθυντικό κέρδος της κεραίας δίνεται από τη σχέση:

$$D_s(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U_0(\theta, \phi) |S(\theta, \phi)|^2}{\oint\oint U_0(\theta, \phi) |S(\theta, \phi)|^2 d\Omega} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

ενώ το γεωμετρικό κατευθυντικό κέρδος από τη παρακάτω σχέση και εκφράζει το βαθμό στον οποίο επηρεάζει ο παράγοντας διάταξης την κατευθυντικότητα:

$$D_s(\theta, \phi) = 4\pi \frac{|S(\theta, \phi)|^2}{\oint\oint |S(\theta, \phi)|^2 d\Omega} \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

2.5 UHF και Μικροκυματικές Κεραίες

Οι κεραίες λήψης και εκπομπής που σχεδιάζονται για χρήση στην UHF (0.3-3 GHz) και στην μικροκυματική (1-100 GHz) ζώνη, είναι συνήθως (πολύ) κατευθυντικές. Οι διαστάσεις της κεραίας πρέπει γενικά να είναι της τάξης των αρκετών μηκών κύματος, ώστε η κεραία να έχει υψηλό κέρδος. Στις εν λόγω συχνότητες, οι κεραίες δε χρειάζεται να έχουν μεγάλες φυσικές διαστάσεις για να έχουν μέγεθος πολλών μηκών κύματος, και επομένως μπορούν να έχουν χαρακτηριστικά που δεν μπορούν να έχουν οι κεραίες στις μικρότερες συχνότητες. Πολλές από τις εφαρμογές στην VHF και την μικροκυματική ζώνη συχνοτήτων, όπως π.χ. τα radar, έχουν να κάνουν με προσδιορισμό της κατεύθυνσης και με μετρήσεις πεδίων, και άρα απαιτούν την χρήση κατευθυντικών κεραιών. Πολλές εφαρμογές, όπως οι μικροκυματικές τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις, είναι στην ουσία υπηρεσίες σημείου-προς-σημείο, συχνά σε περιοχές που πρέπει να αποφεύγονται οι παρεμβολές ανάμεσα σε διάφορες υπηρεσίες. Η χρήση κατευθυντικών κεραιών βοηθάει αρκετά σε αυτόν τον τομέα. Όσο οι συχνότητες αυξάνονται, η απόδοση των ενεργών συσκευών χειροτερεύει. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη ισχύς των συσκευών εξόδου πέφτει, ενώ αυξάνεται ο θόρυβος στις συσκευές λήψεως. Είναι προφανές ότι το να έχουμε υψηλού κέρδους (και άρα κατευθυντικές) κεραίες είναι ένας πολύ καλός τρόπος να ξεπεράσουμε αυτά τα προβλήματα.

Η VHF ζώνη συχνοτήτων, η οποία περιλαμβάνει και την περιοχή συχνοτήτων από 30 έως 300 MHz, παρουσιάζει επικαλύψεις με άλλες περιοχές. Ορισμένες UHF και μικροκυματικές κεραίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στην ζώνη αυτή.

2.6 Μονόπολα

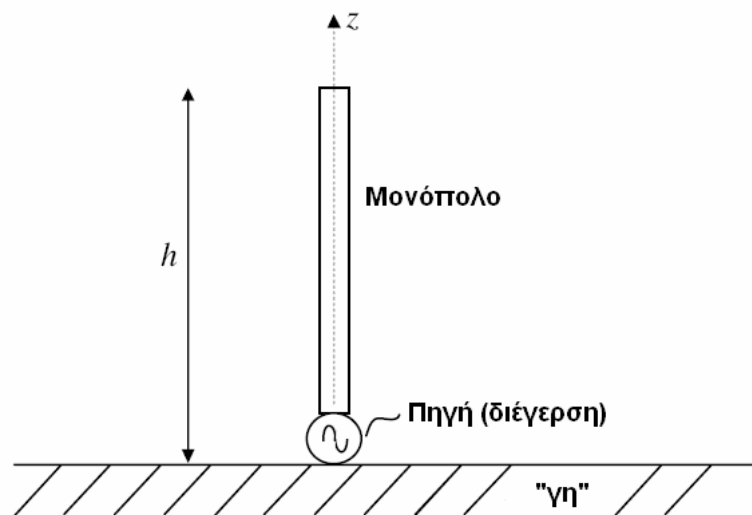
2.6.1 Εισαγωγή

Γενικά, οι στοιχειοκεραίες μελετώνται με την υπόθεση ότι αυτές αποτελούνται από δίπολα τοποθετημένα στον ελεύθερο χώρο ή μονόπολα τα οποία είναι τοποθετημένα πάνω από ένα άπειρο και τέλεια αγωγίμο επίπεδο. Οι δυο αυτές περιπτώσεις είναι ισοδύναμες αφού σύμφωνα με την θεωρία των ειδώλων, ένα μονόπολο πάνω από τέτοιο επίπεδο ισοδυναμεί με ένα δίπολο στον ελεύθερο χώρο. Όμως ένα τέτοιο απέραντο επίπεδο δεν είναι εφικτό και άρα η μελέτη της προσαρμογής τέτοιων στοιχειοκεραίων με μονόπολα πάνω από πεπερασμένο επίπεδο είναι πολύ σημαντική ώστε αυτές να καταστούν χρήσιμες σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Είναι γνωστό ότι τα μονόπολα πάνω από πεπερασμένο επίπεδο συμπεριφέρονται διαφορετικά από τα αντίστοιχα τους, πάνω από ένα άπειρο επίπεδο. Κατά κύριο λόγο η ακτινοβολία ανυψώνεται πάνω από τον ορίζοντα, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται η κάλυψη στον οριζόντιο άξονα. Όσο το επίπεδο που λειτουργεί σαν “γη” διευρύνεται, η ανύψωση αυτή μειώνεται αλλά τέτοια επίπεδα τα οποία μπορούν να παρέχουν την επιθυμητή μείωση της ανύψωσης της ακτινοβολίας μπορούν πολύ σπάνια να ενσωματωθούν σε κινητά τερματικά. Μια λύση για αυτό το πρόβλημα αποτελεί το “περικλειόμενο” μονόπολο. Το μονόπολο αυτό είναι τοποθετημένο πάνω σε μια κωνική ή κυλινδρική κατασκευή και παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά, ως προς την εκπεμπόμενη ακτινοβολία, με ένα δίπολο αν και το πλαϊνό επίπεδο έχει μήκος ενός κλάσματος του μήκους κύματος. Μια παρόμοια τεχνική έχει προταθεί και για τις στοιχειοκεραίες από μονόπολα. Με πειραματικές μεθόδους αποδεικνύεται ότι το κυλινδρικό αυτό κάλυμμα (**sleeve** ή **skirt**) μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να ελεγχθεί η γωνία ανύψωσης του κύριου λοβού με ελάχιστο ενδιαφέρον για τα υπόλοιπα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της κεραίας. Αν και το πλαϊνό επίπεδο δεν

εκτείνεται πιο πέρα από τα παρασιτικά στοιχεία, η ακτινοβολία μπορεί να ανακατευθυνθεί προς τον οριζόντιο άξονα.

2.6.2 Μονόπολα πάνω από πεπερασμένο, τέλεια αγωγίμο επίπεδο

Ένα ιδανικό μονόπολο ορίζεται σαν ένα τέλεια αγωγίμο σύρμα, κάθετο πάνω σε ένα επίσης τέλεια αγωγίμο γειωμένο επίπεδο με άπειρες διαστάσεις. Για μια συγκεκριμένη δομή εκπομπής σήματος ύψους $h = \lambda/4$ η διέγερση τοποθετείται στη βάση του μονοπόλου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα

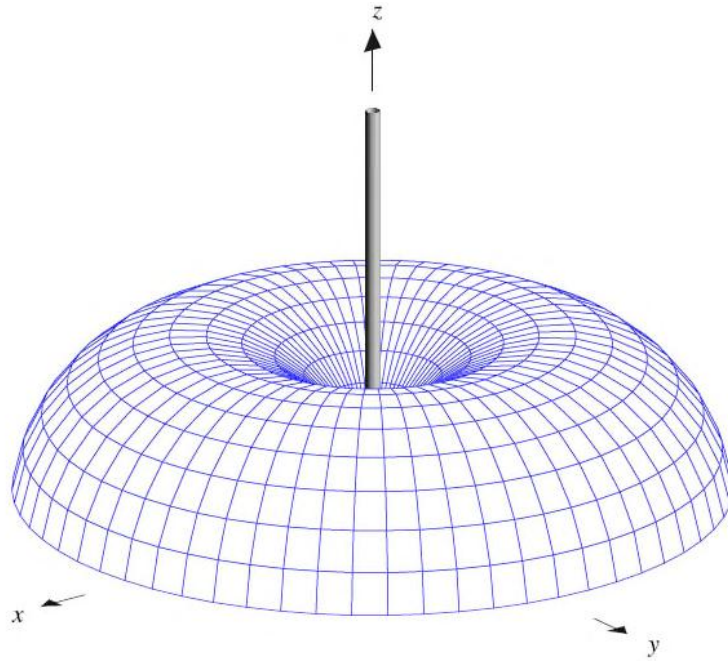


Σχήμα 13 Ιδανικό Μονόπολο

Είναι γνωστό ότι ένα τέτοιο μονόπολο που είναι προσανατολισμένο κατά τον z άξονα σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, ακτινοβολεί την τροφοδοτούμενη ενέργεια πολυκατευθυντικά στο επίπεδο xy με συνάρτηση για το διάγραμμα ακτινοβολίας στο κατακόρυφο άξονα:

$$F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \quad (\text{Εξίσωση 13})$$

για $\theta \leq 90^\circ$. Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η μέγιστη κατευθυντικότητα του μονοπόλου είναι προς την οριζόντια κατεύθυνση ($\theta = 90^\circ$) και έχει σχεδιασθεί στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 14 Μέγιστη Κατευθυντικότητα Μονοπόλου

Το ηλεκτρικά τέλεια αγωγίμο επίπεδο πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένο το μονόπολο, αντανακλά την ενέργεια που ακτινοβολείται από το μονόπολο σύμφωνα με το νόμο του Fresnel για την ανάκλαση ($\theta_i = \theta_r$). Αυτή είναι η βάση της θεωρίας των ειδώλων η οποία υποστηρίζει ότι ένα τέτοιο μονόπολο είναι ισοδύναμο με το ίδιο μονόπολο στον “ελεύθερο” (χωρίς την ύπαρξη του αγωγίμου επιπέδου) αέρα με ένα ανεστραμμένο εικονικό μονόπολο στη βάση του. Δηλαδή ένα δίπολο στον “ελεύθερο” χώρο με μισή αντίσταση εισόδου και διπλή κατευθυντικότητα. Συνεπώς, στοιχειοκεραίες αποτελούμενες από δίπολα, όπως για παράδειγμα η Yagi-Uda, μπορούν να κατασκευαστούν και με μονόπολα πάνω από ένα άπειρο αγωγίμο επίπεδο. Σε μια τέτοια περίπτωση, το επίπεδο αυτό δίνει το πλεονέκτημα της απομόνωσης της ακτινοβολούμενης κατασκευής από οποιοδήποτε ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου που βρίσκεται κάτω από αυτό. Δυστυχώς, η θεωρία των ειδώλων ισχύει μόνο για απεριόριστο αγωγίμο επίπεδο.

Όταν το επίπεδο αυτό περιοριστεί σε διαστάσεις, τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας του μονόπολου αλλάζουν. Η περίμετρος του πεπερασμένου αυτού επιπέδου, περιθλά την προσπίπτουσα ακτινοβολία και έτσι επέρχεται αλλαγή και στα ρεύματα του επιπέδου. Αυτά τα ρεύματα τότε, σε συνδυασμό με τα ρεύματα από τα μονόπολα, αλλοιώνουν την αντίσταση εισόδου της κεραίας αλλά και τα

χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της. Όσο το μέγεθος του επιπέδου μειώνεται, το φαινόμενο της περίθλασης γίνεται περισσότερο έντονο, έχοντας σαν αποτέλεσμα την ολοένα και μεγαλύτερη διαφοροποίηση από την ιδεατή περίπτωση.

Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν αρκετές αναλύσεις μονόπολων που είναι τοποθετημένα πάνω σε πεπερασμένο αγωγίμο επίπεδο. Έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Μια από αυτές είναι η γεωμετρική θεωρία της περίθλασης (GTO) που προέρχεται από τον ευρύτερο κλάδο της οπτικής. Στη μέθοδο αυτή όμως υπάρχει ο περιορισμός του ότι η δομή της κεραίας πρέπει να είναι ηλεκτρικά μεγάλη, ώστε τα φαινόμενα κοντινού πεδίου στη κεραία να είναι αμελητέα. Ακόμη μια μέθοδος είναι αυτή της προκαλούμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (EMF). Υπάρχει επίσης και η υβριδική μέθοδος που συνδυάζει την GTD και τη μέθοδο των στιγμών (MOM). Η τελευταία χρησιμοποιείται για ανάλυση ηλεκτρικά μικρών δομών, αφού οι υπολογιστικοί πόροι που είναι απαραίτητοι για μεγαλύτερες δομές, μειώνουν σημαντικά την αποδοτικότητα της μεθόδου και την καθιστούν μη πρακτική.

Κεφάλαιο 3: Κεραίες ESPAR και W-ESPAR

3.1 Εισαγωγή

Ο ακτινοβολητής – στοιχειοκεραία αποτελούμενος από παρασιτικά στοιχεία με ηλεκτρονικά στρεφόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας (Electronically Steerable Passive Array Radiator, ή αλλιώς ESPAR κεραία) αποτελεί μια στοιχειοκεραία με N θύρες. Στην πιο απλή της μορφή, ένα και μοναδικό ενεργό στοιχείο περικυκλώνεται από πολλαπλά παρασιτικά στοιχεία τα οποία φέρουν ως φορτία μεταβλητές εμπεδήσεις. Οι ελεγχόμενες εμπεδήσεις ρυθμίζουν τα ρεύματα που ρέουν τα παρασιτικά στοιχεία, επηρεάζοντας την χωρική πυκνότητα ακτινοβολίας και έτσι αποκτά προσαρμοστική ικανότητα η κεραία.

Συγκεκριμένα, η ESPAR κεραία, σχεδιάζεται για εφαρμογή σε ασύρματα ad-hoc δίκτυα. Αυτοδύναμα στη καλωδίωση και στην υποδομή του σταθμού βάσης, τα ασύρματα ad-hoc δίκτυα είναι μια φτηνή, απλή και δυναμική λύση σε σχέση με τις καλωδιωμένες και στατικές εναλλακτικές. Παρ' όλα αυτά, τα ασύρματα συστήματα είναι επιρρεπή σε σφάλματα σήματος τα οποία προκύπτουν από πολυδιαδρομική διάδοση και σήματα παρεμβολής από άλλους κόμβους. Εξαιτίας αυτής της διάδοσης της πληροφορίας από πολλούς "δρόμους", τα σφάλματα του σήματος ακόμη και μεταξύ λίγων μόνο ενδιάμεσων κόμβων μπορεί ενδεχομένως να έχουν καταστροφική επίδραση στην απόδοση ολόκληρου του δικτύου. Επιπροσθέτως, η ασύρματη μετάδοση μπορεί να αποτελέσει μια σημαντική απώλεια στην αποθηκευμένη ενέργεια του κόμβου. Η διάρκεια ζωής των αποθεμάτων ενέργειας της μπαταρίας του κόμβου μειώνεται αξιοσημείωτα αν απαιτείται μεγάλη ισχύς μετάδοσης για αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των κόμβων.

Εξαιτίας της ικανότητας της ESPAR κεραίας να κατευθύνει την ακτινοβολία στους αποδέκτες με τους οποίους σκοπεύει να επικοινωνήσει ο εκάστοτε κόμβος, και να στρέψει τα μηδενικά της ακτινοβολίας (τις κατευθύνσεις στις οποίες δεν εκπέμπεται ακτινοβολία από τη κεραία) προς τα σήματα που δημιουργούν παρεμβολές, τέτοιου είδους προβλήματα μειώνονται σημαντικά. Τα μηδενικά της ακτινοβολίας και το κέρδος του κυρίου λοβού, συμπληρώνουν το ένα το άλλο έτσι ώστε να

μεγιστοποιηθεί ο λόγος σήματος προς παρεμβολές του συστήματος. Ακόμη, το μεγάλο κέρδος του κύριου λοβού της κεραίας, μειώνει δραματικά την απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύ με δεδομένη βέβαια την διατήρηση των προδιαγραφών κατωφλίου του λόγου σήματος προς παρεμβολές στους ακροδέκτες της κεραίας.

Το ακρωνύμιο ESPAR επιτρέπει να θεωρηθεί οποιαδήποτε αυθαίρετη υποδομή για ακτινοβολία (patch, wire, aperture κλπ) και ουσιαστικά είναι συνώνυμο με ένα σύστημα N θυρών. Η ανάλυση τους για διασκορπισμό από γενικευμένα δίκτυα με N θύρες οδήγησε στην ανάπτυξη μιας στοιχειοκεραίας αποτελούμενης από δίπολα που αντί να είναι τροφοδοτούμενα, οδηγούνται από φορτία. Αυτό οδήγησε στην έρευνα για στοιχειοκεραίες μονοπόλων. Η ESPAR κεραία εξελίσσεται για μαζικές εμπορικές εφαρμογές.

Ένα ad-hoc δίκτυο αποτελείται από κινητά τερματικά. (π.χ. φορητοί υπολογιστές). Αν και η ESPAR κεραία προορίζεται για εξωτερική του κινητού τερματικού χρήση, με την εξέλιξη του σχεδιασμού της εικάζεται ότι τελικά θα γίνει πραγματικότητα μια ενσωματωμένη λύση. Όμως, ανεξάρτητα από τη θέση της κεραίας, ο σχεδιασμός της, θα πρέπει να κληρονομήσει παρόμοια κριτήρια λειτουργίας με το κινητό τερματικό. Μεγάλης σημασίας είναι οι περιορισμοί της κατανάλωσης ισχύος και του φυσικού όγκου της κεραίας. Το κριτήριο του όγκου, επιβάλλει τη μείωση σε μέγεθος της επίπεδης επιφάνεια που χρησιμοποιείται στη κεραία σαν γη, ώστε στη τελική μορφή της αυτή να αποτελείται από μονόπολα. Αυτό βέβαια έχει σαν αποτέλεσμα την συνολική μείωση του όγκου της κεραίας.

Υπάρχουν όμως πολλές δυσκολίες στην αντιμετώπιση μιας στοιχειοκεραίας αποτελούμενη από μονόπολα πάνω σε πεπερασμένη επιφάνεια που λειτουργεί σαν γη. Έτσι, η ESPAR κεραία είναι πιθανόν να έχει μεγάλη ευαισθησία υψηλών συχνοτήτων και έτσι η χρήση της να είναι δυνατή μόνο για μικρά επικοινωνιακά εύρη ζώνης.

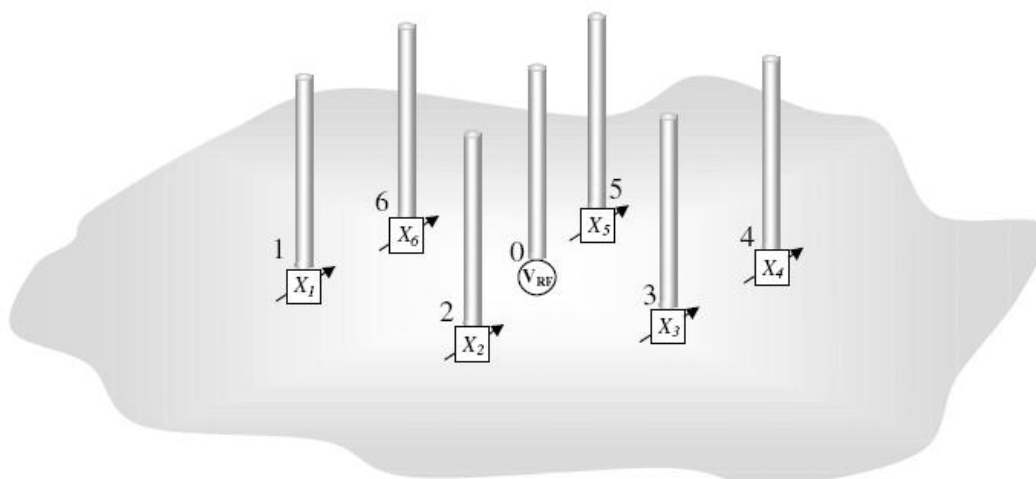
3.2 Κεραία ESPAR

3.2.1 Διάταξη Κεραίας ESPAR

Η διάταξη της κεραίας είναι παρόμοια με εκείνη της στοιχειοκεραίας από δίπολα του Harrington. Αποτελείται από ένα και μοναδικό ενεργό μονόπολο, το οποίο περιβάλλεται από διαφορετικό αριθμό μονοπόλων σε κάθε κεραία. Τα μονόπολα αυτά είναι παρασιτικά και ισαπέχοντα από το ενεργό, βρίσκονται δηλαδή στη περιφέρεια ενός κύκλου σταθερής ακτίνας και η γωνιακή τους διαφορά είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού τους (M) όπως φαίνεται από την επόμενη εξίσωση:

$$\varphi = 360/M \quad (\text{Εξίσωση 14})$$

Κάθε παρασιτικό στοιχείο περιέχει στη βάση του κάποια μεταβλητή άεργη αντίσταση, επαγωγική ή χωρητική, ενώ η όλη διάταξη έχει στηθεί πάνω σε μια άπειρη έκταση που λειτουργεί στη κεραία σαν “γη”, ώστε τα μονόπολα να λειτουργούν σαν δίπολα, σύμφωνα με τη θεωρία των ειδώλων. Όμως μια τέτοια περίπτωση με άπειρης έκτασης “γη” είναι ιδανική, αφού κατασκευαστικά είναι αδύνατη. Έτσι χρησιμοποιείται ένα πεπερασμένο επίπεδο σαν την “γη”.



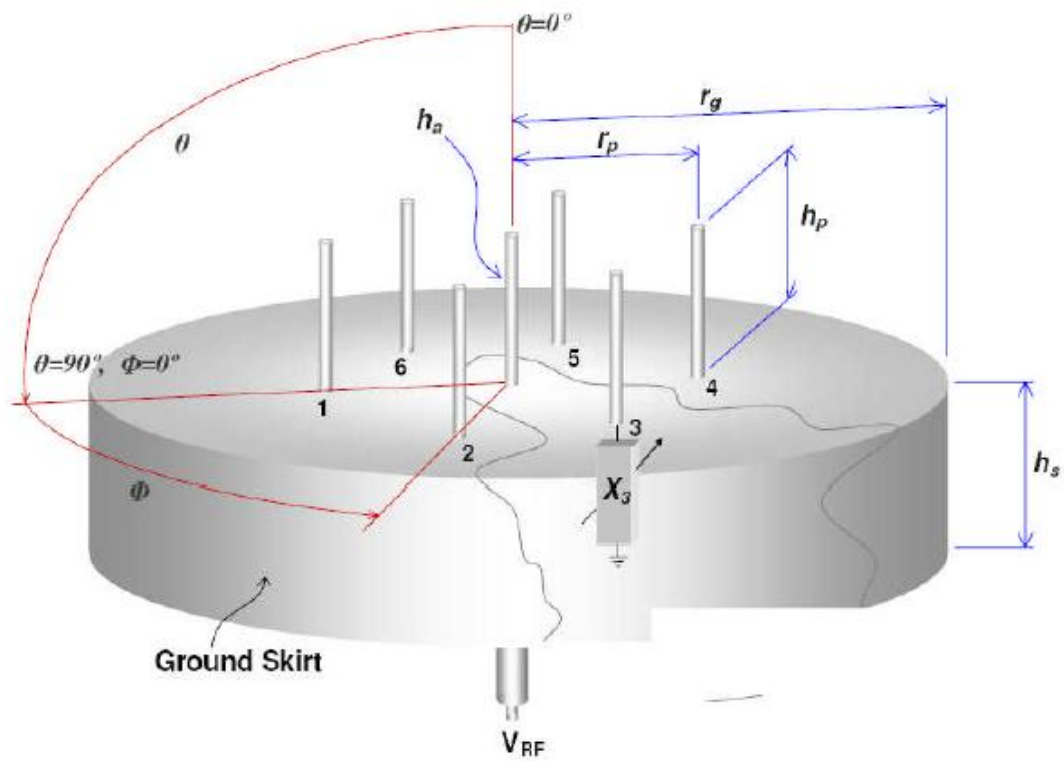
Σχήμα 15

Ιδανική Κεραία ESPAR με μονόπολα πάνω από άπειρο επίπεδο.

Τα φανταστικά φορτία των παρασιτικών μονοπόλων επηρεάζουν τα ρεύματα στη κεραία, με αποτέλεσμα να αλλάζουν και τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας. Έτσι ο έλεγχος αυτών των φορτίων, δίνει την δυνατότητα για την διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας, έτσι ώστε αυτή να εκπέμπει την ακτινοβολία της στην επιθυμητή κατεύθυνση και να έχει τα μηδενικά της στις κατευθύνσεις όπου αν εξέπεμπε ακτινοβολία, θα δημιουργούσε παρεμβολές σε άλλα επικοινωνιακά συστήματα. Για την υλοποίηση των φανταστικών αυτών φορτίων, προτείνεται η χρήση χωρητικών διόδων Varactor.

Η στοιχειοκεραία των μονόπολων προέρχεται από αυτήν των δίπολων σε ελεύθερο χώρο (χωρίς ανακλαστική επιφάνεια δηλαδή). Όμως η “γη” στη στοιχειοκεραία των μονόπολων επιτρέπει τη θωράκιση (ηλεκτρικά και σαν φυσική υπόσταση) του κυκλώματος ελέγχου, το οποίο μπορεί να τοποθετηθεί κάτω από το επίπεδο. Αυτοί είναι οι λόγοι για τους οποίους η αρχική ESPAR κεραία με τα δίπολα, αντικαταστάθηκε με την αντίστοιχη κεραία με τα μονόπολα.

Πρακτικά όμως, αυτή η κεραία δε μπορεί να κάνει χρήση ενός τέτοιου απέραντου επιπέδου. Για ενσωμάτωση σε κινητά τερματικά, το οριζόντιο επίπεδο πρέπει να γίνει όσο το δυνατόν μικρότερο. Τυπικά, η ακτινοβολία κατευθύνεται ψηλότερα από τον ορίζοντα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα επικοινωνίας στο αζιμούθιο. Μια λύση της μορφής ενός **αγωγίμου κυλινδρικού καλύμματος (skirt)** στη περίμετρο του πεπερασμένου επιπέδου προτείνεται ώστε να έχουμε αποτελέσματα παρόμοια με την περίπτωση του άπειρου επιπέδου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η στοιχειοκεραία όπως αυτή είναι στη πράξη.



Σχήμα 16

Πρακτική ESPAR Κεραία με αγωγίμο skirt

Στο παραπάνω σχήμα r_g είναι η ακτίνα του αγωγίμου επιπέδου που λειτουργεί σαν “γη”, r_p η ακτίνα του κύκλου πάνω στη περιφέρεια του οποίου βρίσκονται τα παρασιτικά στοιχεία, h_p το ύψος των παρασιτικών μονόπολων, h_a το ύψος του ενεργού και h_s το ύψος του κυλινδρικού καλύμματος. Για να έχει η κεραία ένα συγκεκριμένο διάγραμμα ακτινοβολίας, όλα τα φανταστικά φορτία πρέπει να πάρουν κάποιες τιμές, οι οποίες έχουν υπολογιστεί για συγκεκριμένη συχνότητα.

3.2.2 Πεδίο τιμών φανταστικών αντιστάσεων

Η φανταστική αντίσταση των Varactors, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση των μονόπολων, θα αντιστοιχούν στην αντίσταση εισόδου του μονόπολου. καθώς οι Varactors είναι καθαρά χωρητικά φορτία, μόνο αρνητικές φανταστικές αντιστάσεις μπορούν να παραχθούν οι οποίες ορίζονται από την χωρητικότητα C

$$jX = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}, X = -\frac{1}{\omega C} \quad (\text{Εξίσωση 15})$$

Επειδή το πεδίο τιμών που μπορεί να παράγει ένας Varactor είναι περιορισμένο, οι δυνατότητες μορφοποίησης του λοβού ακτινοβολίας μειώνονται. Για να διευρυνθεί το πεδίο δυνατών τιμών των Varactors, και μαζί του και οι δυνατότητες μορφοποίησης του λοβού στο διάγραμμα ακτινοβολίας, πρέπει να συμπεριληφθούν και γραμμές μεταφοράς. Ειδικά στις μεγάλες συχνότητες, όπου το μήκος κύματος είναι μικρό, μια μικρή γραμμή μεταφοράς μπορεί να ισοδυναμεί με μια μεγάλη τιμή επαγωγικότητας.

Μια γραμμή μεταφοράς μήκους l και χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης Z_0 που τερματίζεται με μια σύνθετη αντίσταση Z_L θα έχει σαν αντίσταση εισόδου την

$$Z_i = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh \gamma l}{Z_0 + Z_L \tanh \gamma l} \quad (\text{Εξίσωση 16})$$

Όπου η σταθερά διάδοσης της γραμμής ορίζεται ως $\gamma = \alpha + j\beta$. Ο αριθμός α αντιπροσωπεύει τις απώλειες γραμμής ανά μονάδα μήκους σε Neper ενώ ο β την στροφή σε ακτίνια ανά μονάδα μήκους και ονομάζεται σταθερά φάσης ή διάδοσης.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας μια γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες

($\alpha = 0, Z_0 = \text{Re}(Z_0) = R_0$) και κάνοντας χρήση της τριγωνομετρικής σχέσης

$$\tanh jx = j \tan x \quad (\text{Εξίσωση 17})$$

Η εξίσωση 16 γίνεται:

$$Z_i = R_0 \frac{Z_L + R_0 \tanh \beta l}{R_0 + Z_L \tanh \beta l} \quad (\text{Εξίσωση 18})$$

Varactors χωρίς απώλειες θα παράγουν μια καθαρά φανταστική αντίσταση φορτίου $Z_L = jX_L$ και έτσι η εξίσωση 18 μπορεί να γραφτεί:

$$Z_i = R_0 \frac{jX_L + jR_0 \tan \beta l}{R_0 - X_L \tan \beta l} \quad \text{ή αλλιώς}$$

$$Z_i = j \left(R_0 \frac{X_L + R_0 \tan \beta l}{R_0 - X_L \tan \beta l} \right) \quad (\text{Εξίσωση 19})$$

Η εξίσωση 19 δηλώνει ότι μια γραμμή μεταφοράς επαγωγικά τερματισμένη θα έχει μια καθαρά επαγωγική αντίσταση εισόδου της οποίας το μέτρο εξαρτάται από το μήκος της γραμμής μεταφοράς l . Με άλλα λόγια, μια γραμμή μεταφοράς τερματισμένη με έναν Varactor, θα δημιουργήσει ένα φορτίο στη βάση του μονόπολου με διαφορετικό πεδίο τιμών για τη σύνθετη αντίσταση σε σχέση με το αντίστοιχο πεδίο τιμών ενός μόνο Varactor.

3.2.3 Επίδραση φανταστικών αντιστάσεων στη κεραία

Με την κατανόηση του πως τα φανταστικά φορτία επηρεάζουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της κεραίας οδηγεί στη κατανόηση της ευαισθησίας συχνότητας της κεραίας. Στη φυσική υπόσταση της κεραίας, στη βάση των παρασιτικών μονόπολων υπάρχουν γραμμές μεταφοράς που είναι συνδεδεμένες με γειωμένα φορτία ($Z_L = R_L + jX_L$). Το σήμα που παράγεται στο παρασιτικό στοιχείο οδηγείται από τη γραμμή μεταφοράς και ανακλάται με ορισμένη ολίσθηση φάσης. Η συνολική ολίσθηση φάσης (στη βάση του μονοπόλου) επηρεάζει τα ρεύματα στο μονόπολο και προσδιορίζεται από το φανταστικό φορτίο Z_L , την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς Z_0 και το μήκος της γραμμής μεταφοράς. Η θεωρία των γραμμών μεταφοράς εκφράζει ότι ο συντελεστής ανάκλασης Γ μιας τερματισμένης γραμμής μεταφοράς είναι:

$$\Gamma_\phi = \arctan \frac{\Gamma_i}{\Gamma_r} = \arctan \frac{2X_L}{X_L^2 - 1} \quad (\text{Εξίσωση 20})$$

Το X_L είναι η φανταστική αντίσταση του φορτίου κανονικοποιημένη ως προς την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς. Η σχέση είναι γνωστή και γίνεται πιο αντιληπτή όταν απεικονίζεται σε έναν χάρτη Smith. Όταν το $|X_L|$ αυξάνεται, η επιρροή στο Γ_ϕ μειώνεται επειδή το $\partial \Gamma_\phi / \partial X_L$ είναι μικρό. Έτσι για μεγάλες τιμές του X_L , μικρές διακυμάνσεις στο X_L θα έχουν σαν αποτέλεσμα μια μηδαμινή διαφορά φάσης και έτσι μια ασήμαντη επιρροή στη κεραία. Αντίθετα, για μικρά X_L , αντίστοιχες διακυμάνσεις θα επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στο Γ_ϕ και έτσι μεγάλη αλλαγή στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας.

Η εξίσωση 20 είναι σημαντική όταν μελετάμε την απόκριση συχνότητας ενός φορτίου L ή C . Η σχέση χωρητικότητας και επαγωγικότητας είναι γραμμική:

$$jX_L = j\omega L \quad (\text{Εξίσωση 21})$$

Κάθε μεταβολή στη συχνότητα θα δημιουργήσει μια αντίστοιχη αλλαγή στην φανταστική αντίσταση. Αν θεωρήσουμε ένα εύρος ζώνης λειτουργίας περίπου 10%, όλες οι φανταστικές αντιστάσεις θα ποικίλουν κατά περίπου 5% από τη συχνότητα συντονισμού. Αν στο σύνολο των Varactors υπάρχουν και χωρητικά και επαγωγικά φορτία, τότε το μέτρο των χωρητικοτήτων θα μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα, ενώ αντίστροφα το μέτρο των επαγωγικών φορτίων αυξάνεται. Η απόκριση της κεραίας ως προς τη συχνότητα θα έπρεπε να είναι μόνο συνάρτηση της δομής της όλης διάταξης. Όμως, επειδή οι ελεγχόμενες φανταστικές αντιστάσεις είναι επίσης εξαρτώμενες από την συχνότητα, το διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να μην είναι μέσα στις προδιαγραφές της κεραίας για όλο το απαιτούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Τέτοια επίδραση γίνεται πιο φανερή για μικρά φανταστικά φορτία, όπου αλλαγές στο X_L επιφέρουν μεγαλύτερες αλλαγές στο Γ_ϕ .

3.2.4 Ευαισθησία Συχνότητας

Η ηλεκτρική ευαισθησία της κεραίας είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την πρακτικότητα της κεραίας. Τυπικά, μια κεραία έχει σχεδιασθεί για να λειτουργεί γραμμικά για κάποιο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Σε μια απλή κεραία, η δομή της είναι αυτή που παίζει το κύριο ρόλο στην ηλεκτρική της ευαισθησία γύρω από τη συχνότητα συντονισμού, ενώ στην ESPAR κεραία, επειδή αυτή φέρει φανταστικά φορτία, έχουμε μια πρόσθετη εξάρτηση από την συχνότητα. Οι αλλαγές στη συχνότητα μπορεί να επιδράσουν στις φανταστικές αντιστάσεις με αποτέλεσμα η κεραία να λειτουργεί σε μη γραμμική περιοχή. Γι' αυτό είναι σημαντικό να επιβεβαιώσουμε ότι τα χαρακτηριστικά της κεραίας δεν θα υποβαθμιστούν πέρα από τα όρια που έχουν επιβληθεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Θα ήταν αδύνατο να ελεγχθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί φανταστικών αντιστάσεων. Αυτό δεν έχει και νόημα από την άποψη ότι οι περισσότεροι συνδυασμοί δεν επιφέρουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά στη κεραία και άρα δεν είναι χρήσιμοι. Άρα, αφού

πρώτα βελτιστοποιηθεί η κεραία κάνοντας χρήση διαφόρων αλγόριθμων, μετά πρέπει να εξετασθεί και ο συνδυασμός των φανταστικών αντιστάσεων, ώστε τελικά η κεραία να λειτουργεί σωστά σε ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων.

3.3 W- ESPAR Κεραία

Η ESPAR κεραία έχει σχεδιασθεί για να χρησιμοποιείται σε κινητά τερματικά, με κύρια δυνατότητα της να στρίβει τον κύριο λοβό ακτινοβολίας της. Αυτό λαμβάνει χώρα με ολίσθηση των τιμών των φανταστικών αντιστάσεων στη βάση του κάθε μονόπολου. Η στροφή αυτή είναι $360^\circ/M$ μοίρες όπου M ο αριθμός των παρασιτικών μονόπολων. Έτσι έστω οι τιμές των αντιστάσεων αυτών ότι είναι $[10j, 20j, 30j, 40j, 50j, 60j]$ όπου η πρώτη τιμή είναι η φανταστική αντίσταση του πρώτου μονόπολου κλπ. Αν ολισθήσουμε τις τιμές αυτές κατά μια θέση δηλαδή αν γίνουν τώρα $[20j, 30j, 40j, 50j, 60j, 10j]$ τότε το διάγραμμα ακτινοβολίας θα έχει στρίψει κατά $\frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$. Και βέβαια όλα αυτά έχουν νόημα για μια μόνο συχνότητα συντονισμού της κεραίας. Αποτελεί δηλαδή μια narrowband κεραία με δυνατότητες μορφοποίησης του διαγράμματος ακτινοβολίας.

Η W-ESPAR κεραία ή αλλιώς Wideband-ESPAR κεραία, αποτελεί μια κεραία η οποία είναι ικανή να διατηρήσει αναλλοίωτο το διάγραμμα ακτινοβολίας σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Αυτό γίνεται με την αλλαγή των τιμών των φανταστικών αντιστάσεων στη βάση των διπόλων ή των μονόπολων, κάθε φορά που η κεραία συντονίζεται σε διαφορετική συχνότητα. Δηλαδή, μπορεί κάτω από τη κεραία να υπάρχει ένα κύκλωμα ελέγχου, το οποίο με αναγνώριση της συχνότητας συντονισμού της κεραίας, θα διαβάζει από ένα πίνακα ποια πρέπει να είναι η τιμή της κάθε φανταστικής αντίστασης και να δίνει εντολή στους Varactors (μέσω επιβαλλόμενης DC τάσης) ώστε αυτοί να αποκτούν την αντίστοιχη τιμή. Βέβαια, οι τιμές των Varactors θα είναι τέτοιες ώστε όχι μόνο να μην αλλάζει το διάγραμμα ακτινοβολίας, αλλά και να μην αλλάζουν ούτε τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κεραίας, όπως είναι η αντίσταση εισόδου, ο συντελεστής ανάκλασης και το κέρδος ως προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Μια τέτοια κεραία είναι πολύ σημαντική,

γιατί εκτός από το ελάχιστο κόστος της, προσφέρει μεγάλες δυνατότητες μορφοποίησης για μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Κεφάλαιο 4: Εισαγωγή στο HFSS

4.1 Γενικά

Το πρόγραμμα HFSS είναι το πρότυπο βιομηχανικό εργαλείο για προσομοίωση τρισδιάστατων πλήρους κύματος ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Η επιτυχία του HFSS ως ένα εργαλείο τεχνικού σχεδιασμού έγκειται στην αυτοματοποιημένη διαδικασία λύσης του. Οι χρήστες χρειάζεται μόνο να προσδιορίσουν τη γεωμετρία, τις ιδιότητες των υλικών και την επιθυμητή έξοδο. Από αυτό το σημείο και μετά το HFSS θα δημιουργήσει αυτόματα το πιο κατάλληλο, πιο αποτελεσματικό και ακριβή σύμπλεγμα για να λύσει το πρόβλημα χρησιμοποιώντας την αποδεδειγμένη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Με το HFSS η φυσική καθορίζει το σύμπλεγμα και όχι το σύμπλεγμα τη φυσική. Οι μηχανικοί βασίζονται στην ακρίβεια, τη χωρητικότητα και τις επιδόσεις του HFSS για το σχεδιασμό κατασκευαστικών στοιχείων υψηλής ταχύτητας, συμπεριλαμβανομένων ενσωματωμένων on-chip παθητικών στοιχείων, IC πακέτα, PCB διασυνδέσεις καθώς και στοιχεία υψηλής συχνότητας όπως κεραίες, RF/μικροκυματικά στοιχεία και συσκευές βιοϊατρικής.

4.1.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για να παράγει τη λύση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, το HFSS χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος αυτή χωρίζει ολόκληρο τον χώρο του προβλήματος σε χιλιάδες μικρότερες περιοχές και αναπαριστά το πεδίο σε κάθε υπό-περιοχή (στοιχείο) με μια τοπική συνάρτηση. Στο HFSS το γεωμετρικό μοντέλο χωρίζεται αυτόματα σε ένα μεγάλο αριθμό τετράεδρων, όπου κάθε τετράεδρο είναι μια τετράπλευρη πυραμίδα. Αυτό το σύνολο από τετράεδρα αναφέρεται ως σύμπλεγμα πεπερασμένων στοιχείων.

4.2.2 Διαδικασία Επίλυσης του HFSS

Για τον υπολογισμό της μήτρας-S που συνδέεται με μια δομή με ports, το HFSS ακολουθεί την εξής διαδικασία:

- Διαιρεί τη δομή σε ένα πεπερασμένο πλέγμα στοιχείων.
- Υπολογίζει τις φάσεις για κάθε port της δομής που υποστηρίζονται από μια γραμμή μεταφοράς η οποία έχει την ίδια διατομή με το port
- Υπολογίζει το πλήρες σχέδιο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μέσα στη δομή, με την παραδοχή ότι εξετάζεται ένα κομμάτι τη φορά.
- Υπολογίζει τη γενικευμένη μήτρα-S από την ποσότητα της μετάδοσης και της αντανάκλασης που υφίσταται.

Η προκύπτουσα μήτρα-S επιτρέπει το μέγεθος του μεταδιδόμενου και ανακλώμενου σήματος να υπολογίζεται απευθείας από ένα δεδομένο σύνολο σημάτων εισόδου, μειώνοντας την πλήρη τρισδιάστατη ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά της δομής, σε ένα σύνολο παραμέτρων κυκλώματος υψηλής συχνότητας.

4.3.3 Πεδία ακτινοβολίας

Όταν το HFSS υπολογίζει τα πεδία ακτινοβολίας, οι τιμές των πεδίων πάνω στην ακτινοβολούσα επιφάνεια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των πεδίων στο χώρο που περιβάλλει τη συσκευή. Ο χώρος αυτός συνήθως χωρίζεται σε δυο περιοχές – την περιοχή κοντινού πεδίου και την περιοχή μακρινού πεδίου. Η περιοχή κοντινού πεδίου είναι η περιοχή που βρίσκεται πλησιέστερα στη πηγή. Σε γενικές γραμμές το ηλεκτρικό πεδίο $E_{(x,y,z)}$ εκτός της περιοχής που οριοθετείται από μια κλειστή επιφάνεια μπορεί να γραφτεί ως:

$$E_{(x,y,z)} = \int_S (\langle j\omega\mu_0 H_{tan} \rangle G + \langle E_{tan} \times \nabla G \rangle + \langle E_{normal} \nabla G \rangle) ds \quad (\text{Εξίσωση 22})$$

Όπου: S αντιπροσωπεύει το σύνορο στην επιφάνεια ακτινοβολίας

j η μιγαδική σταθερά

ω η κυκλική συχνότητα

μ_0 η σχετική διαπερατότητα του κενού

H_{tan} είναι η συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου που εφάπτεται με την επιφάνεια

E_{normal} είναι η συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου που είναι κάθετη προς την επιφάνεια

E_{tan} είναι η συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου που εφάπτεται με την επιφάνεια

G είναι η συνάρτηση Green που δίνεται από τον τύπο

$$G = \frac{e^{-jk_0|r-r'|}}{|r-r'|} \quad (\text{Εξίσωση 23})$$

Όπου: k_0 η κυματική σταθερά του κενού

r και r' αντιπροσωπεύουν τα σημεία πεδίου και πηγής αντίστοιχα.

Στο μακρινό πεδίο όπου $r \gg r'$ (και συνήθως $r \gg \lambda_0$) η συνάρτηση Green μπορεί να προσεγγιστεί από:

$$G \approx \frac{e^{-jk_0r} e^{jk_0\hat{r}r'}}{r} \quad (\text{Εξίσωση 24})$$

Η εξάρτηση από το r είναι χαρακτηριστική ενός σφαιρικού κύματος, βασικό χαρακτηριστικό των μακρινών πεδίων. Το μακρινό πεδίο είναι ένα σφαιρικό TEM κύμα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$E = n_0 H \times \hat{r} \quad (\text{Εξίσωση 25})$$

όπου n_0 η εγγενής εμπίεση του ελεύθερου χώρου.

4.4 Βελτιστοποίηση (Optimization)

Βασικό εργαλείο του προγράμματος HFSS είναι η βελτιστοποίηση. Βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία εντοπισμού του ελαχίστου μιας καθορισμένης από το χρήστη συνάρτησης κόστους. Η μέθοδος τροποποιεί τις τιμές των μεταβλητών μέχρι το ελάχιστο να επιτευχθεί με ικανοποιητική ακρίβεια. Η όλη διαδικασία χρησιμοποιεί διάφορους αλγόριθμους όπως είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι, ο αλγόριθμος Quasi Newton και άλλοι. Στην εργασία αυτή θα χρησιμοποιηθούν ως επί το πλείστον οι γενετικοί αλγόριθμοι. Μια σύντομη παρουσίαση τους ακολουθεί στην επόμενη παράγραφο.

4.5 Γενετικοί Αλγόριθμοι

4.5.1 Βιολογικές Έννοιες

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τις βασικές βιολογικές έννοιες, οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση των “γενετικών αλγορίθμων” που εφαρμόζονται σε επιστημονικά και τεχνολογικά προβλήματα. Οι έννοιες αυτές χρησιμοποιούνται ακολουθώντας την αναλογία με τη πραγματική βιολογία.

Όλοι οι ζώντες οργανισμοί αποτελούνται από κύτταρα και κάθε κύτταρο περιέχει το ίδιο σύνολο από ένα ή περισσότερα χρωμοσώματα (αλυσίδες από DNA) που χρησιμεύουν ως “φωτογραφικό σχεδιάγραμμα” για τον οργανισμό. Ένα χρωμόσωμα μπορεί εννοιολογικά να χωρισθεί σε γονίδια, δηλαδή λειτουργικές ομάδες από DNA κάθε μια από τις οποίες κωδικοποιεί μια συγκεκριμένη πρωτεΐνη. Πολύ χονδρικά, μπορεί κανείς να θεωρήσει ότι ένα γονίδιο κωδικοποιεί ένα χαρακτηριστικό όπως για παράδειγμα το χρώμα των ματιών. Οι διάφορες δυνατές “τακτοποιήσεις” για ένα χαρακτηριστικό ονομάζονται αλληλόμορφα.

Στους εξελικτικούς – γενετικούς αλγόριθμους, ο όρος χρωμόσωμα αναφέρεται τυπικά σε μια υποψήφια λύση του προβλήματος, η οποία συχνά κωδικοποιείται

(παριστάνεται) με μια ακολουθία (αλυσίδα) από δυαδικά ψηφία (bits). Τα “γονίδια” είναι είτε απλά ψηφία ή μικρές αλυσίδες γειτονικών ψηφίων που κωδικοποιούν ένα συγκεκριμένο στοιχείο της υποψήφιας λύσης. Ένα αλληλόμορφο σε μια αλυσίδα από δυαδικά ψηφία είναι “1” ή “0”. Για μεγαλύτερα αλφάβητα, σε κάθε θέση του γονιδίου μπορεί να υπάρχουν περισσότερα από ένα αλληλόμορφα. Η διασταύρωση συνίσταται τυπικά στην ανταλλαγή γενετικού υλικού μεταξύ των δυο απλοειδών (μονο - χρωμοσωματικών) γονέων. Η μετάλλαξη συνίσταται στο “πέταγμα” του δυαδικού ψηφίου μιας τυχαίας επιλεγείσας θέσης με ένα επίσης τυχαία επιλεγμένο σύμβολο. Οι περισσότερες εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων χρησιμοποιούν απλοειδή άτομα (δηλαδή άτομα με απλά –και όχι διπλά- χρωμοσώματα). Ο γονότυπος κάθε ατόμου σε ένα γενετικό αλγόριθμο που χρησιμοποιεί αλυσίδες δυαδικών ψηφίων είναι απλά η διάταξη των ψηφίων στο χρωμόσωμα του ατόμου.

4.5.2 Βασικός Γενετικός Αλγόριθμος

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) βασίζονται στην έννοια του πληθυσμού ατόμων (χρωμοσωμάτων) στα οποία εφαρμόζονται οι γενετικοί τελεστές (πράξεις) της διασταύρωσης, μετάλλαξης και αντιστροφής. Ο ΓΑ δεν επιλύει το πρόβλημα με μαθηματικό τρόπο αλλά με βιολογικό. Οι ΓΑ υποθέτουν ότι κάθε υποψήφια λύση κάποιου προβλήματος είναι ένα άτομο το οποίο μπορεί να παρασταθεί (κωδικοποιηθεί) με ένα σύνολο παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί θεωρούνται ότι είναι τα γονίδια ενός χρωμοσώματος και μπορούν να δομηθούν ως ακολουθίες δυαδικών αριθμών. Η “τιμή προσαρμογής” αντανακλά το πόσο “καλό” είναι το χρωμόσωμα για το πρόβλημα. Μέσω της γενετικής εξέλιξης, το προσαρμόζον χρωμόσωμα (fitter) τείνει να παράγει υψηλής ποιότητας απόγονο που σημαίνει καλύτερη λύση στο πρόβλημα. Σε μια πρακτική εφαρμογή ΓΑ, πρέπει να εγκαταστήσουμε μια δεξαμενή (πληθυσμό) χρωμοσωμάτων, των οποίων η αρχική επιλογή είναι τυχαία. Σε κάθε κύκλο της γενετικής λειτουργίας παράγεται μια επόμενη γενιά από τα χρωμοσώματα της παρούσας γενιάς. Τα γονίδια των γονέων ανακατεύονται και ανασυνδυάζονται (διασταυρώνονται) για την παραγωγή απογόνων στην επόμενη γενιά. Αναμένεται ότι από αυτήν την εξελικτική διαδικασία (χειρισμό γονιδίων) το “καλύτερο” χρωμόσωμα θα παράγει μεγαλύτερο αριθμό

απογόνων και συνεπώς έχει μεγαλύτερη πιθανότητα επιβίωσης στις ακόλουθες γενιές, απομιμούμενο το φυσικό μηχανισμό της επιβίωσης του ισχυρότερου (επικρατέστερου) προσαρμοστή. Η απλούστερη μορφή γενετικού αλγορίθμου (γενετικού κύκλου) περιλαμβάνει τρεις τελεστές: *Επιλογή*, *διασταύρωση* και *μετάλλαξη*.

Επιλογή

Ο τελεστής αυτός επιλέγει χρωμοσώματα στον πληθυσμό προς αναπαραγωγή. Όσο περισσότερο προσαρμόζει το χρωμόσωμα, τόσο είναι πιο πιθανό να επιλεγεί προς αναπαραγωγή περισσότερες φορές.

Διασταύρωση

Ο τελεστής αυτός επιλέγει τυχαία έναν τόπο και ανταλλάσει τις υπό-ακολουθίες πριν και μετά από αυτόν τον τόπο μεταξύ δυο χρωμοσωμάτων για να παράγει δυο απογόνους. Για παράδειγμα, οι ακολουθίες 10000100 και 11111111 μπορούν να διασταυρωθούν μετά την τρίτη θέση κάθε μιας και να δώσουν τους δυο απογόνους: 10011111 και 11100100. Ο τελεστής διασταύρωσης μιμείται χονδρικά το βιολογικό ανασυνδυασμό μεταξύ δυο απλοειδών οργανισμών.

Μετάλλαξη

Ο τελεστής αυτός (που εφαρμόζεται μετά τη διασταύρωση) αλλάζει τυχαία μερικά από τα ψηφία ενός χρωμοσώματος. Για παράδειγμα, η ακολουθία 0000100 θα μπορούσε να μεταλλαγεί στη δεύτερη θέση οπότε το αποτέλεσμα θα ήταν 01000100. Η μετάλλαξη μπορεί να λάβει χώρα σε κάθε θέση του χρωμοσώματος με κάποια πιθανότητα, που είναι συνήθων πολύ μικρή (π.χ. 0,001)

Ο εξελικτικός κύκλος επαναλαμβάνεται μέχρις ότου φθάσουμε σε κάποιο επιθυμητό όριο (κριτήριο) τερματισμού. Το όριο αυτό μπορεί να είναι ο αριθμός των εξελικτικών κύκλων (υπολογιστικών τρεξιμάτων) ή το πλήθος των μεταβολών των ατόμων ανάμεσα στις διάφορες γενιές, ή τέλος μια προκαθορισμένη τιμή της συνάρτησης προσαρμογής.

4.5.3 Πολλαπλά Βέλτιστα

Η σημαντικότερη ιδιότητα των ΓΑ είναι ότι μπορούν να επιλύσουν προβλήματα βελτιστοποίησης με πολλά τοπικά ελάχιστα (μέγιστα) και να βρουν (σχεδόν πάντα) το ολικό (ή σχεδόν ολικό) ελάχιστο (μέγιστο). Η ικανότητα των ΓΑ να προσδιορίζουν το ολικό βέλτιστο επηρεάζεται γενικά από τους ακόλουθους τρεις παράγοντες:

- ✓ Αναζήτηση από ένα πληθυσμό λύσεων (όχι μόνο από μια)
- ✓ Χρήση πληροφορίας για την προσαρμογή και όχι παραγώγους ή άλλη βοηθητική πληροφορία
- ✓ Χρήση τυχαίων (στοχαστικών) τελεστών και όχι καθορισμένων (ντετερμινιστικών) τελεστών.

Βεβαίως πρέπει να τονιστεί ότι οι ΓΑ έχουν την τάση να βρίσκουν το ολικό βέλτιστο χωρίς να εξασφαλίζουν ότι πάντοτε θα το βρουν. Η δυνατότητα επιτυχίας μειώνεται όταν υπάρχει απώλεια ποικιλίας στον πληθυσμό. Γενικά, ένας ΓΑ έχει την τάση να ψάχνει για ένα υπό-βέλτιστο σημείο και ο πληθυσμός μπορεί να συγκλίνει σ' αυτήν την τιμή με πρόωρη σύγκλιση. Το ολικό βέλτιστο βρίσκεται σίγουρα με διερεύνηση της μετάλλαξης τις γενετικές πράξεις. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως “γενετική ολίσθηση” και μπορεί να συμβεί εύκολα σε πληθυσμούς μικρού μεγέθους.

4.5.4 Εφαρμογές των Γενετικών Αλγορίθμων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι με διάφορες παραλλαγές και τροποποιήσεις έχουν εφαρμοστεί σε πλήθος πρακτικών εφαρμογών. Μερικές από αυτές είναι οι ακόλουθες:

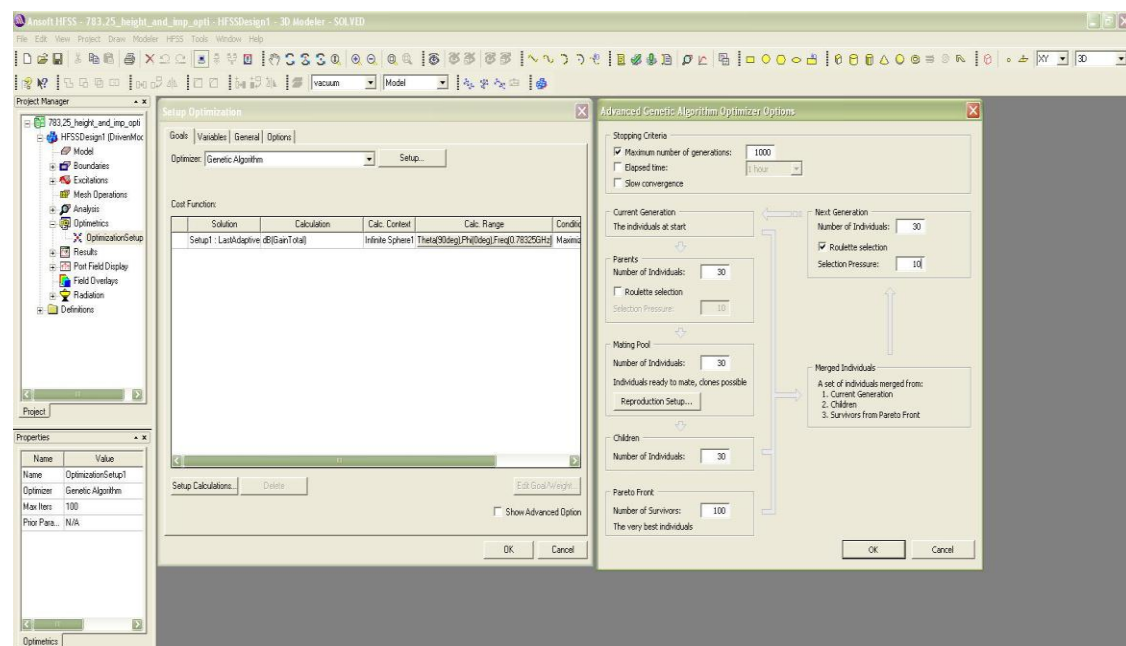
Βελτιστοποίηση: Προβλήματα βελτιστοποίησης που περιλαμβάνουν αριθμητική βελτιστοποίηση και συνδυαστική βελτιστοποίηση σε εφαρμογές όπως σχεδίαση κυκλωμάτων, χρονοπρογραμματισμός εργασιών, οργάνωσης και λειτουργίας αποθηκών, κλπ.

Αυτόματος Προγραμματισμός: Προβλήματα εξέλιξης υπολογιστικών προγραμμάτων για ειδικές εργασίες και σχεδίαση άλλων υπολογιστικών δομών όπως κυτταρικά αυτόματα και δίκτυα κατάταξης.

Μάθηση Μηχανής: Προβλήματα μηχανικής μάθησης για εργασίες όπως ταξινόμηση, σύντηξη σημάτων, εκτίμηση και πρόβλεψη. Επίσης προβλήματα βέλτιστης επιλογής παραμέτρων βιομηχανικών ελεγκτών, ρομποτικών συστημάτων, νευρωνικών δικτύων ασαφών συστημάτων, κοκ.

Τεχνολογικά Συστήματα: Συστήματα οργάνωσης, επίβλεψης και ελέγχου βιομηχανικών συστημάτων συνεχούς και διακριτής παραγωγής, ρομποτικά συστήματα κατασκευής και υπηρεσιών (σχεδιασμός τροχιών και καθηκόντων, παρακολούθηση δρόμου), συστήματα παραγωγής και διανομής ενέργειας, αεροναυπηγικά συστήματα, συστήματα μεταφορών και επικοινωνιών, κλπ.

Το περιβάλλον ρυθμίσεων των παραμέτρων του γενετικού αλγόριθμου στο optimization του προγράμματος HFSS φαίνεται παρακάτω.



Κεφάλαιο 5: Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση Κεραίας W-ESPAR

5.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, σκοπός της εργασίας αυτής είναι η σχεδίαση μιας κεραίας W-ESPAR για την επίγεια μετάδοση ψηφιακής τηλεόρασης καθώς και η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της με σκοπό την “ανοσία” του διαγράμματος ακτινοβολίας της στις μεταβολές της συχνότητας για όλο το φάσμα των UHF συχνοτήτων. Βασιζόμενος στα δεδομένα δημοσιευμένου άρθρου (Tsiafakis, Sotiriou, Petropoulos, Psarropoulos, Nanou, & Capsalis, 2009), ξεκινάμε τη σχεδίαση της κεραίας και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα HFSS και τα εργαλεία που μας παρέχει (όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι) συνεχίζουμε με τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της.

5.2 Σχεδίαση Δομής Κεραίας W-ESPAR

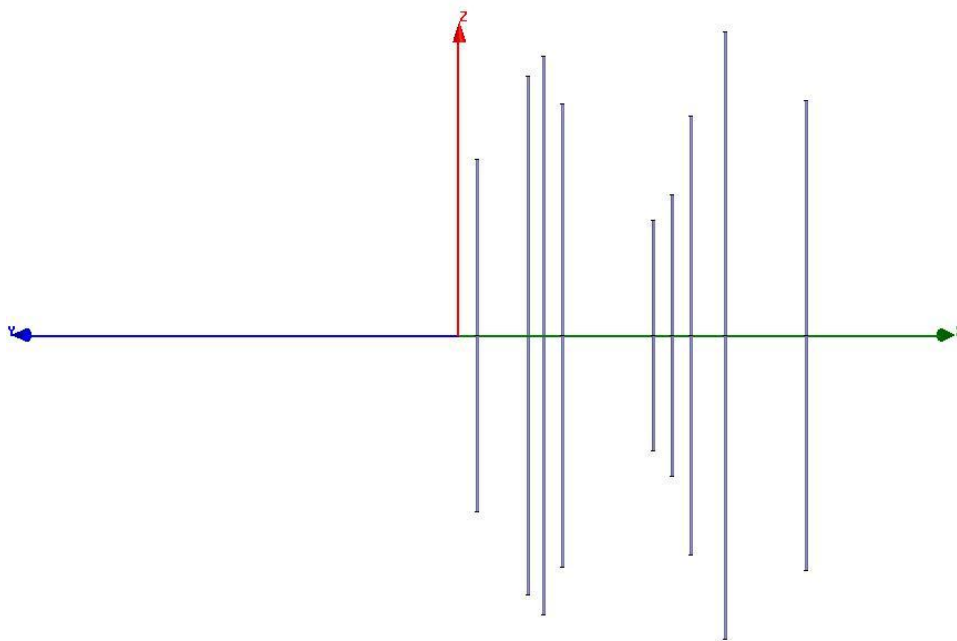
5.2.1 Φυσική Υπόσταση Κεραίας

Στο αρχικό της στάδιο η κεραία αποτελείται από 9 μονόπολα. Από αυτά το ένα είναι το ενεργό μονόπολο και τα υπόλοιπα αποτελούν τα παρασιτικά μονόπολα γύρω από το ενεργό. Κάθε μονόπολο έχει ακτίνα $r = 0.002\text{m}$ και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1 Αρχικά κατασκευαστικά στοιχεία κεραίας

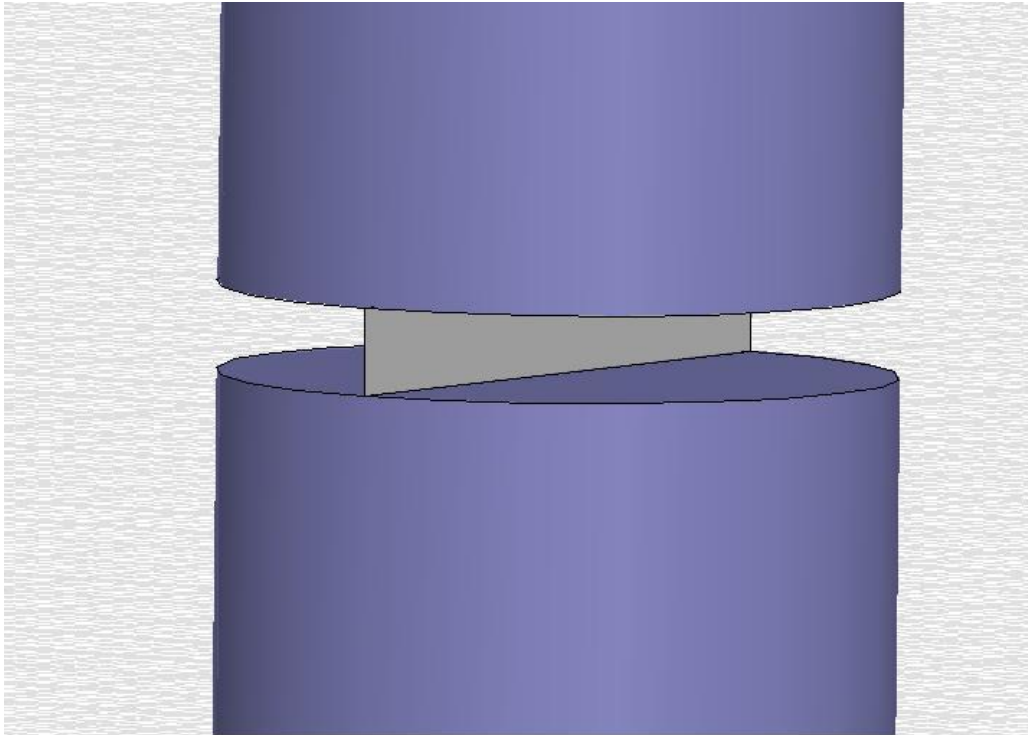
Element	Element Radius (m)	Element Length (m)	Position	
			x	y
#1	0,002	0,25261	0,29441	-0,09581
#2	0,002	0,26690	0,15156	-0,02453
#3	0,002	0,16159	0,27550	-0,08404
#4	0,002	0,26995	0,29922	-0,26796
#5	0,002	0,29781	0,21579	0,08535
#6	0,002	0,20220	-0,07384	-0,09320
#7	0,002	0,34936	0,17811	-0,25096
#8	0,002	0,13269	0,25410	-0,07396
#9	0,002	0,32100	0,29808	0,13437

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τα εργαλεία σχεδίασης του HFSS σχεδιάζουμε της κεραία ως κεραία διπόλων με ενεργό το δίπολο #1 και παρασιτικά τα υπόλοιπα δίπολα. Κάθε δίπολο θεωρούμε ότι έχει μήκος ίσο με το διπλάσιο του μήκους του αντίστοιχου μονόπολου. Η κεραία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



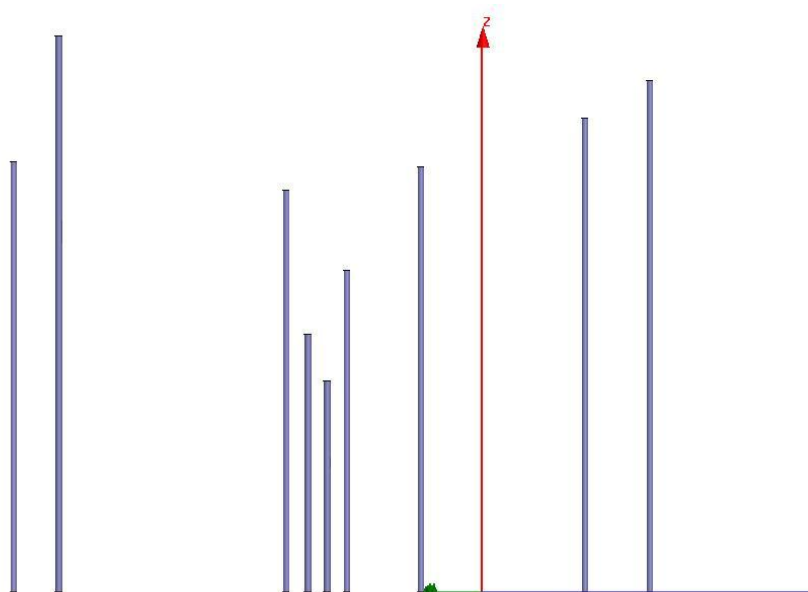
Σχήμα 17 Αρχική Κεραία Διπόλων

Η κεραία μας λοιπόν αποτελείται από 9 δίπολα τα οποία ακτινοβολούν στο κενό. Στο μέσο κάθε διπόλου έχουμε βάλει ένα μικρό κομμάτι μετάλλου το οποίο λειτουργεί σαν port για το ενεργό δίπολο και σαν φανταστική αντίσταση (impedance) για τα παρασιτικά και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 18 Port ενεργού διπόλου στο μέσο του.

Τέλος για διευκόλυνση τόσο στο χρόνο προσομοιώσεων όσο και στα δεδομένα που επεξεργάζεται το ίδιο το πρόγραμμα, και αφού πρώτα παρατηρούμε ότι η αρχική κεραία είναι συμμετρική ως προς το *επίπεδο xy*, δημιουργούμε ένα «σύνορο» συμμετρίας (symmetry boundary) σε αυτό το επίπεδο. Πλέον η κεραία αποτελείται από μονόπολα όπως φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 19 Κεραία με επίπεδο Συμμετρίας στο επίπεδο *xy*

5.2.2 Φανταστικές Αντιστάσεις Παρασιτικών Μονοπόλων

Σύμφωνα πάντα με τη μελέτη, οι αρχικές τιμές των φανταστικών αντιστάσεων που θα εφαρμοστούν στην βάση κάθε μονοπόλου δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

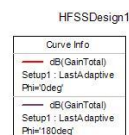
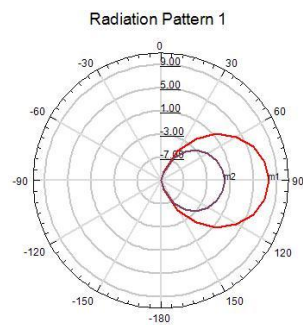
Πίνακας 2 Αρχικές Τιμές Φανταστικών Αντιστάσεων

Συχνότητα (MHz)	Va1	Va2	Va3	Va4	Va5	Va6	Va7	Va8
471,25	55	290	174	-2	212	-122	39	152
479,25	35	280	299	-2	207	-130	137	-125
487,25	14	277	288	-12	209	-130	141	-101
495,25	14	245	290	-32	185	-169	261	-238
503,25	-6	267	294	-43	205	-149	154	-100
511,25	-18	285	284	-55	191	-166	-296	-112
519,25	-40	266	299	-62	177	-188	121	-150
527,25	-51	275	299	-76	168	-105	76	-161
535,25	-60	271	255	-89	151	-226	120	-191
543,25	-96	-291	286	-99	154	-248	-297	-202
551,25	-91	-146	295	-120	138	-256	-63	-205
559,25	-108	76	290	-131	124	-288	-178	-240
567,25	-140	85	294	-149	131	-294	234	-230
575,25	-157	130	290	-157	117	-296	279	-266
583,25	-178	144	206	-177	105	-297	250	-290
591,25	-213	136	296	-191	105	-298	252	-290
599,25	-237	131	296	-213	94	-299	254	-298
607,25	-251	143	161	-249	86	-295	185	-299
615,25	-194	146	188	-263	59	-298	180	299
623,25	-223	139	153	-282	52	-299	193	291
631,25	-231	136	188	-299	40	-299	181	294
639,25	-222	134	299	-296	25	-295	147	297
647,25	-110	-299	211	-45	159	-299	207	-23
655,25	-32	106	137	-147	72	-299	131	-78
663,25	-75	105	178	-65	76	-299	259	-35
671,25	-172	120	166	295	-69	-298	194	-84
679,25	-127	99	121	-69	56	-294	196	-82
687,25	-203	96	151	298	-16	-299	178	112
695,25	-175	91	121	-25	39	-297	182	-107
703,25	-191	86	77	-11	28	-277	188	-101
711,25	-249	83	89	297	-87	-295	169	-137
719,25	-215	77	66	50	1	-292	171	-73
727,25	-233	71	52	62	-5	-299	172	-105
735,25	-268	71	109	68	-13	-286	162	-132
743,25	-272	59	48	104	-7	-291	186	-104
751,25	-285	60	61	169	-41	-299	155	-156
759,25	-291	55	50	212	-59	-298	152	-173
767,25	-299	52	42	173	-64	-292	147	-135
775,25	-297	42	11	135	-81	-289	158	-143
783,25	-299	42	-29	58	-130	-287	148	-298
791,25	-296	35	-7	78	-110	-299	147	-9
799,25	-299	29	-37	25	-133	-299	147	-40
807,25	-281	31	-39	4	-143	-281	132	56
815,25	-299	30	-29	167	-160	-299	123	21
823,25	-300	22	-55	-1	-188	-299	126	79
831,25	-300	20	-65	21	-212	-299	120	127

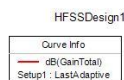
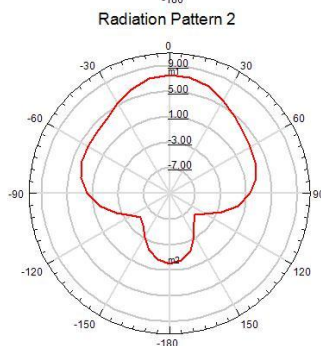
5.2.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Αρχικού Σταδίου

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για αυτά τα δεδομένα φαίνονται στη συνέχεια για διάφορες συχνότητες.

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	7.6139
m2	90.0000	90.0000	0.0021



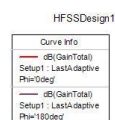
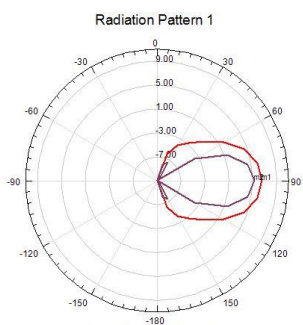
Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	7.6139
m2	180.0000	180.0000	0.0021



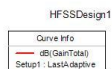
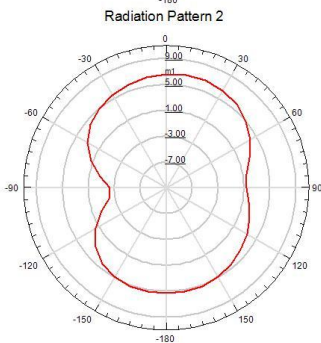
Σχήμα 20

Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471.25 MHz

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	6.6210
m2	90.0000	90.0000	5.3082



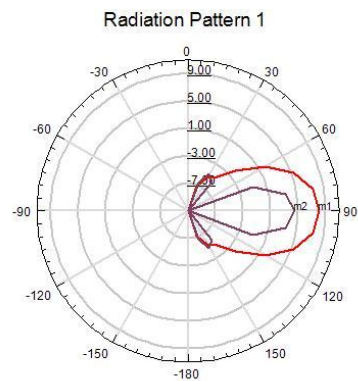
Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	6.6210



Σχήμα 21

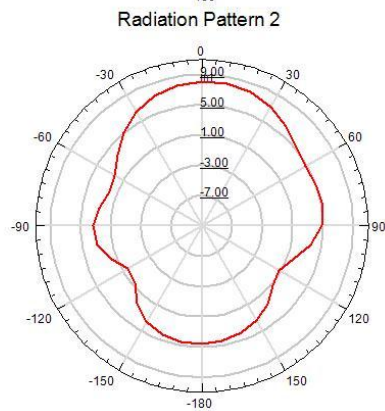
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 503.25 MHz

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	8.1451
m2	90.0000	90.0000	4.6006



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	8.1451

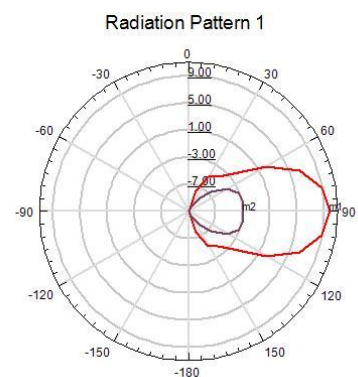


Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 22

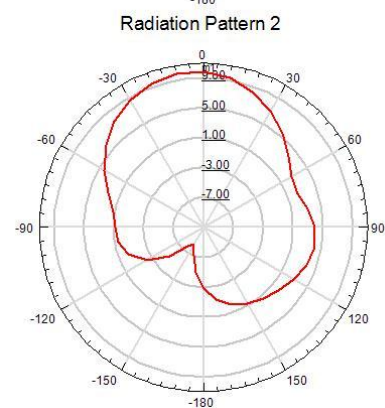
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 543.25 MHz

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	9.8466
m2	90.0000	90.0000	-2.8268



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	9.8466

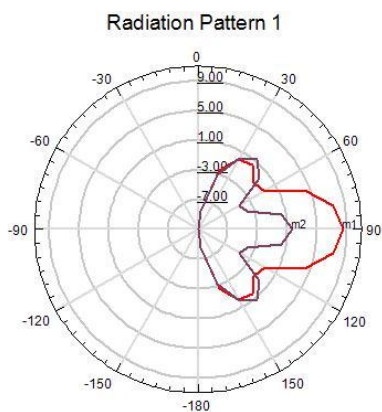


Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 23

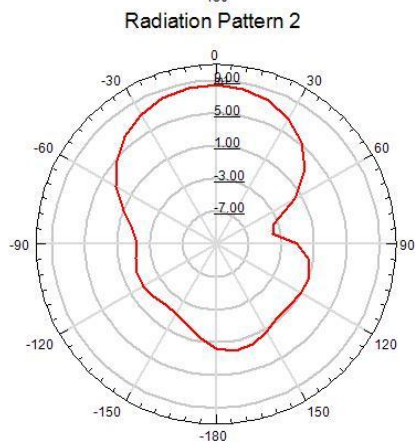
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 615.25 MHz

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	8.5074
m2	90.0000	90.0000	1.7363



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	8.5074

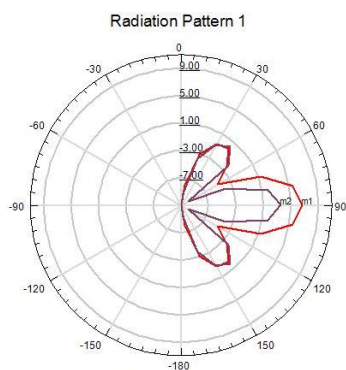


HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	

Σχήμα 24

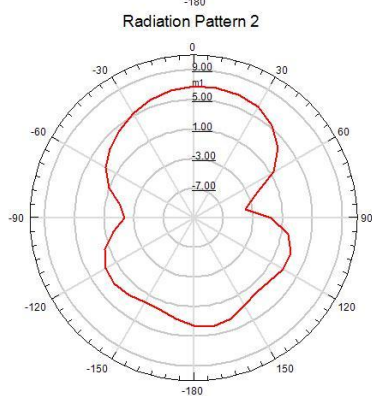
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 687.25 MHz

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	6.7444
m2	90.0000	90.0000	3.5824



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	6.7444

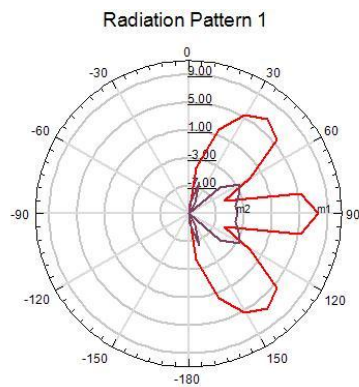


HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	

Σχήμα 25

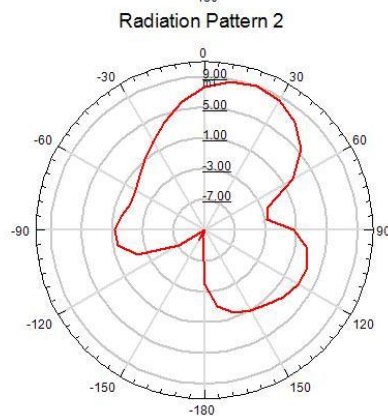
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 727.25 MHz

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	7.6357
m2	90.0000	90.0000	-3.9693



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive Phi=0deg
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive Phi=180deg

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	7.6357

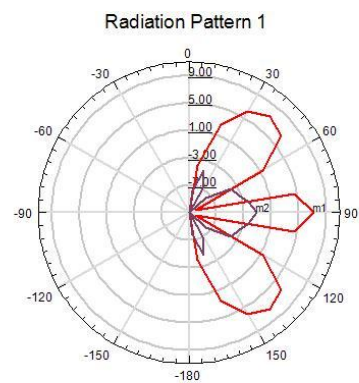


HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 26

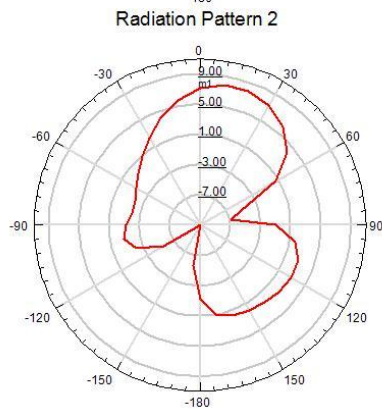
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 767.25 MHz

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	7.1596
m2	90.0000	90.0000	-1.1761



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive Phi=0deg
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive Phi=180deg

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	7.1596



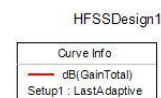
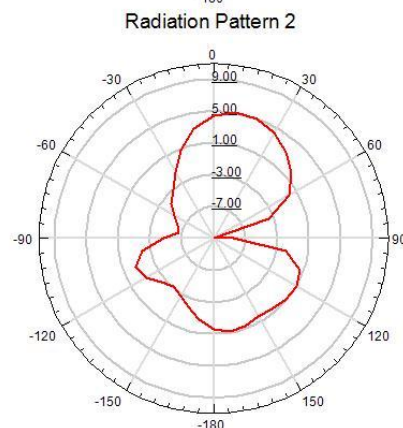
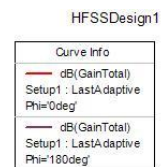
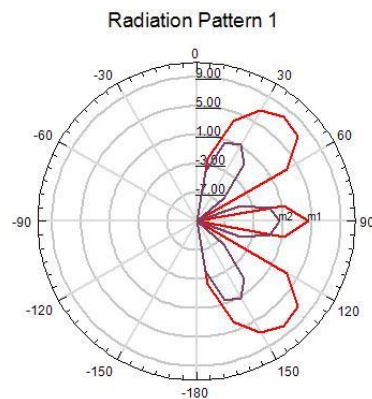
HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 27

Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 799.25 MHz

Name	Theta	Ang	Meg
m1	90.0000	90.0000	4.5100
m2	90.0000	90.0000	0.4466

Ansoft Corporation



Σχήμα 28 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831.25 MHz

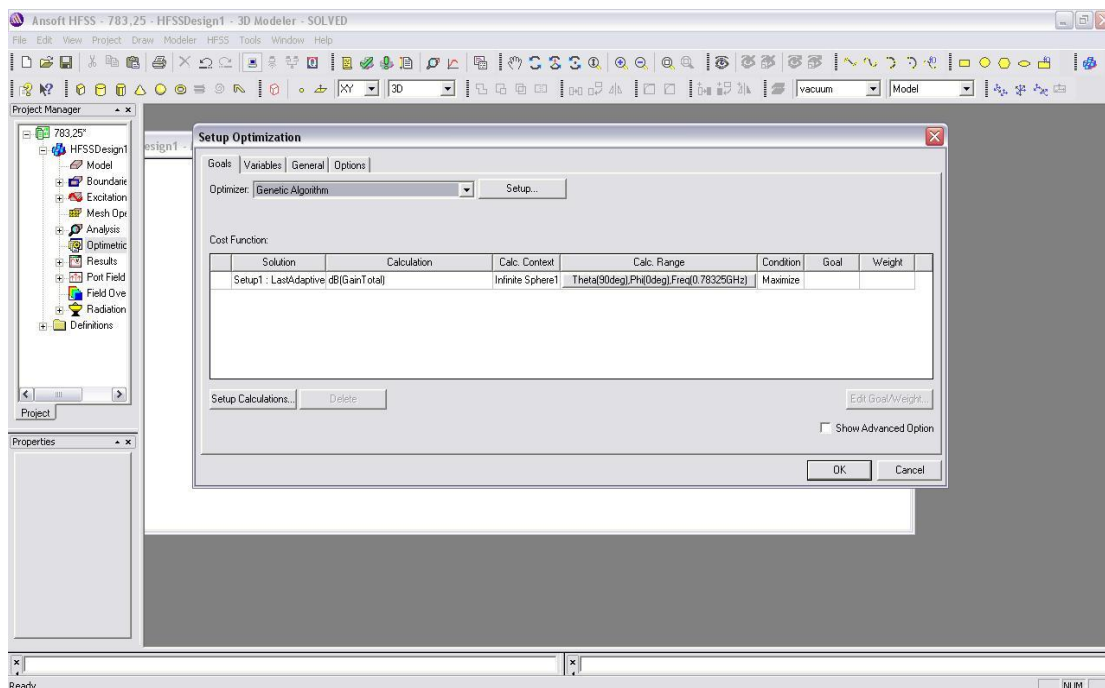
Παρατηρούμε ότι για τις υψηλές συχνότητες υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας. Έτσι στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να βελτιώσουμε τη κεραία για να επιτύχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ανοσία.

5.3 Βελτιστοποίηση Κεραίας W-ESPAR

Βασικό εργαλείο στη προσπάθεια βελτιστοποίησης θα είναι η επιλογή **optimization** του προγράμματος HFSS. Η επιλογή optimization βασίζεται στους γενετικούς αλγόριθμους. Κάθε φορά χρειάζεται να ορίσουμε ποιες παραμέτρους θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε, τη δεξαμενή τιμών τους καθώς και τη συνάρτηση κόστους ώστε το πρόγραμμα να βρει τη βέλτιστη λύση. Τέλος όταν τελειώσει η γενετική διαδικασία επιλέγουμε τη λύση με το ελάχιστο κόστος.

5.3.1 Βελτιστοποίηση Ύψους Μονοπόλων

Αρχικά επιχειρούμε να βελτιστοποιήσουμε το ύψους των μονοπόλων αφού όπως είδαμε στη παράγραφο 2.3.1, αυξάνοντας το ύψος της κεραίας αυξάνεται και το κέρδος της. Χρησιμοποιούμε λοιπόν την επιλογή optimization του προγράμματος HFSS και θέτουμε ως παραμέτρους του τα ύψη των μονοπόλων και ως “goal” του optimization τη μεγιστοποίηση του κέρδους ακτινοβολίας. Το παράθυρο του optimization φαίνεται παρακάτω.



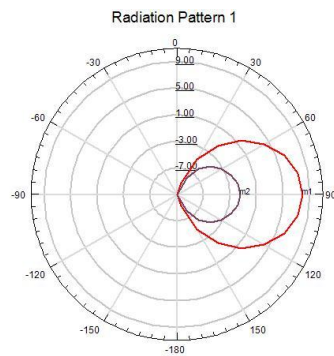
Δοκιμάζοντας διάφορες συχνότητες και κυρίως συχνότητες κοντά στα 800 MHz όπου όπως είδαμε πιο πάνω παρουσιάζεται διαφοροποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας καταλήγουμε στις νέες τιμές για τα ύψη των μονοπόλων.

Πίνακας 3 Βελτιστοποιημένα Ύψη Μονοπόλων

Element	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Element Length (m)	0,23462	0,18715	0,08085	0,34931	0,26513	0,15475	0,34936	0,12541	0,46050

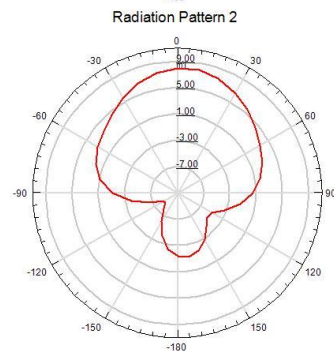
Τα διαγράμματα ακτινοβολίας για τα νέα αυτά ύψη δίνονται παρακάτω.

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	7.9626
m2	90.0000	90.0000	-1.3839



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg	

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	7.9626

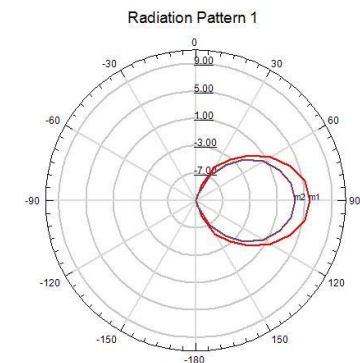


HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 29

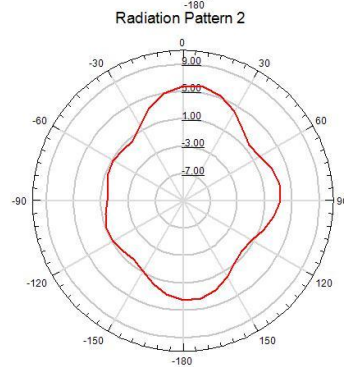
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	5.8232
m2	90.0000	90.0000	3.5686



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg	

Ansolt Corporation

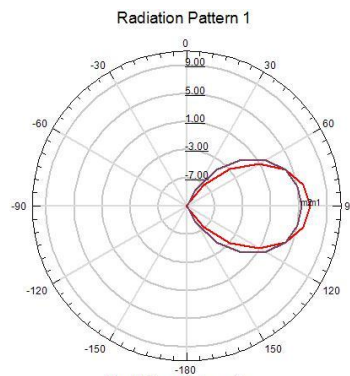


HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 30

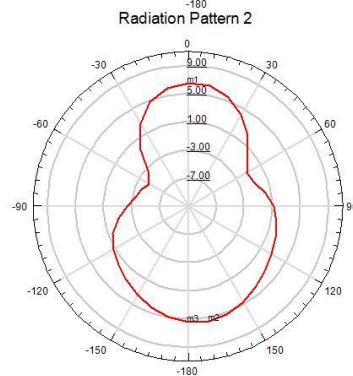
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 503.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	6.5616
m2	90.0000	90.0000	5.4674



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

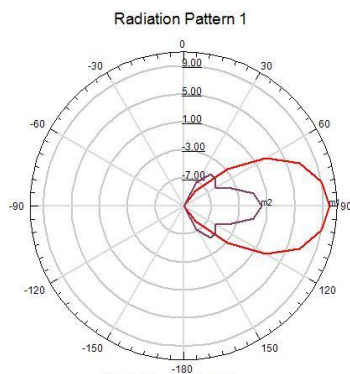
Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	6.5616
m2	170.0000	170.0000	5.5663
m3	180.0000	180.0000	5.4674



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

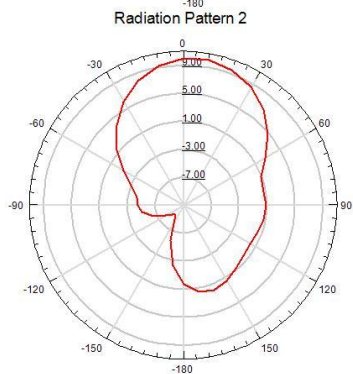
Σχήμα 31 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 543.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	9.9240
m2	90.0000	90.0000	0.2432



Curve Info
dB(DirTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(DirTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

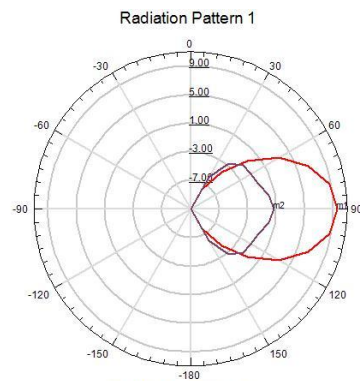
Ansoft Corporation



Curve Info
dB(DirTotal)
Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 32 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 615.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων

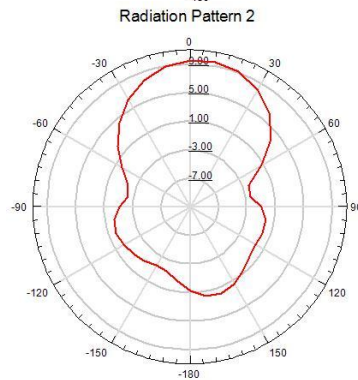
Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	9.5619
m2	90.0000	90.0000	0.7442



HFSSDesign1

Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Ansoft Corporation



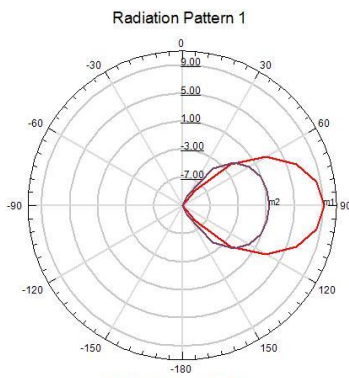
HFSSDesign1

Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 33

Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 687.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων

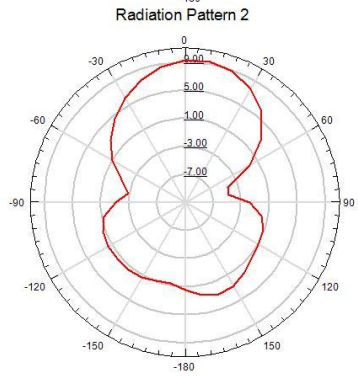
Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	9.2716
m2	90.0000	90.0000	1.4566



HFSSDesign1

Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Ansoft Corporation



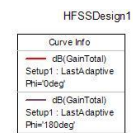
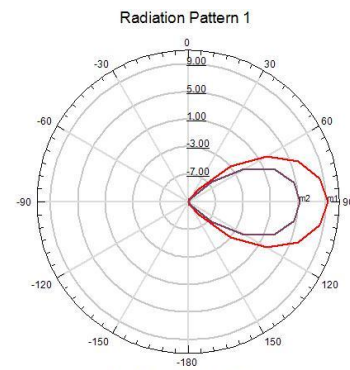
HFSSDesign1

Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive

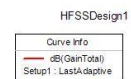
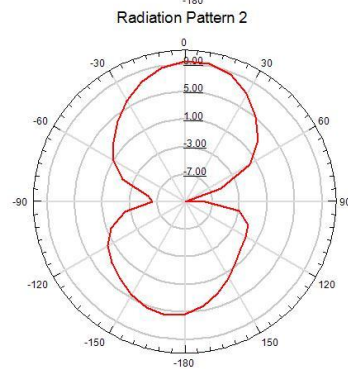
Σχήμα 34

Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 727.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	9.3818
m2	90.0000	90.0000	5.2991



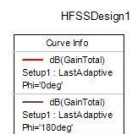
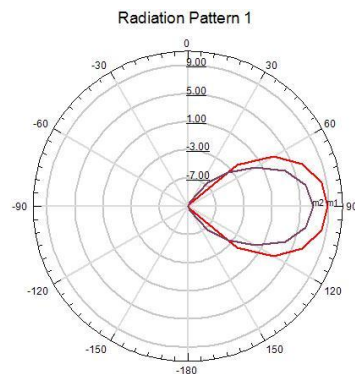
Ansoft Corporation



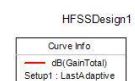
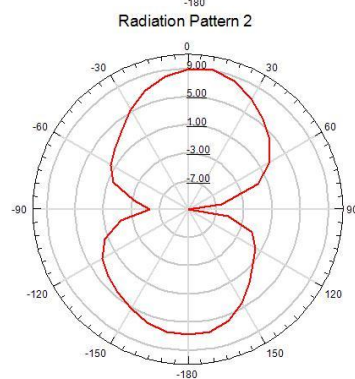
Σχήμα 35

Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 767.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	8.9463
m2	90.0000	90.0000	6.8140



Ansoft Corporation

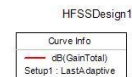
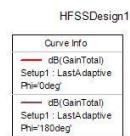
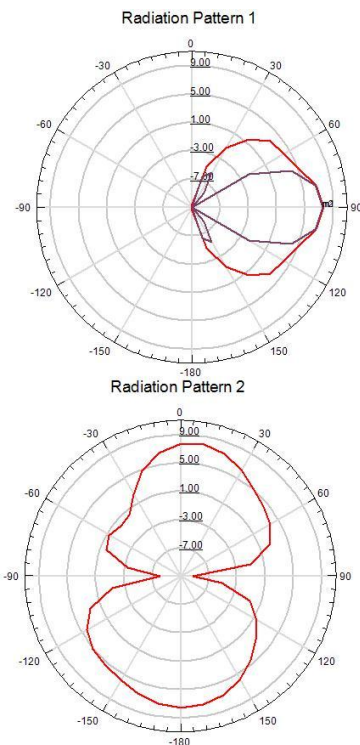


Σχήμα 36

Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 799.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	7.7436
m2	90.0000	90.0000	7.6392

Ansoft Corporation



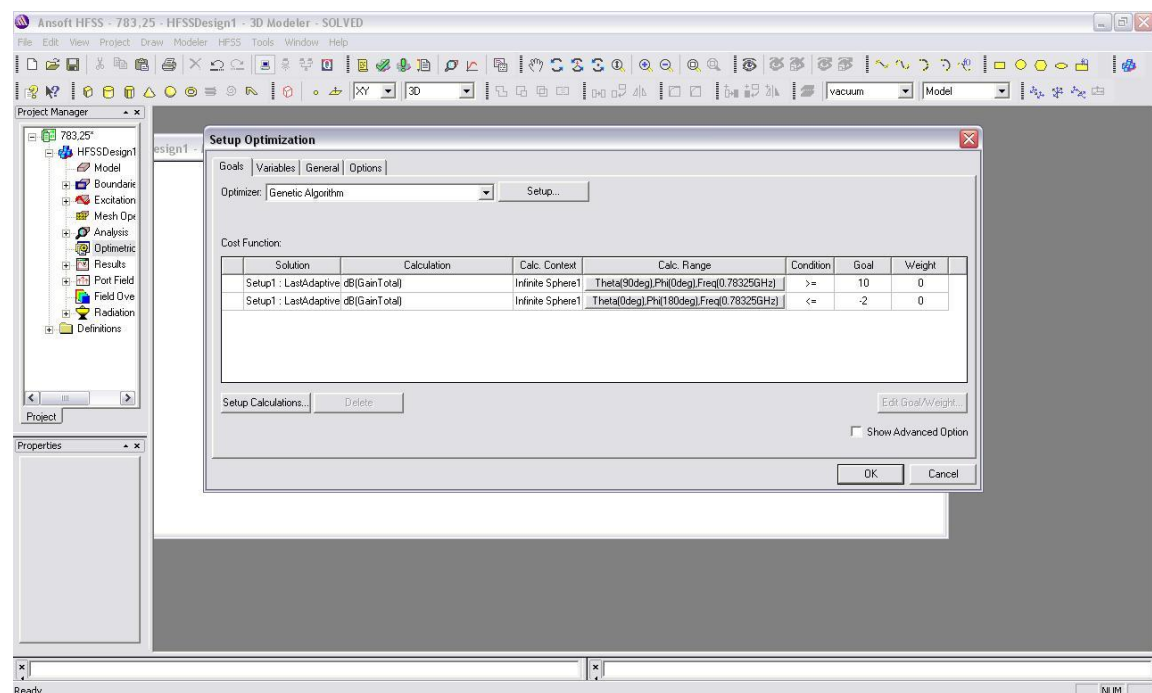
Σχήμα 37 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831.25 MHz με βελτιστοποιημένο ύψος μονοπόλων

Παρατηρούμε ότι ενώ σε κάποιες συχνότητες το διάγραμμα ακτινοβολίας βελτιώνεται αισθητά, σε κάποιες άλλες παραμένει το ίδιο ή χειροτερεύει λίγο. Επομένως απαιτείται περαιτέρω βελτιστοποίηση.

5.3.2 Βελτιστοποίηση Φανταστικών Αντιστάσεων Παρασιτικών Μονοπόλων

Όπως είδαμε στη παράγραφο 3.2.3 το διάγραμμα ακτινοβολίας θα έπρεπε να επηρεάζεται μόνο από τη φυσική διάταξη της κεραίας. Όμως, επειδή οι ελεγχόμενες φανταστικές αντιστάσεις είναι επίσης εξαρτώμενες από την συχνότητα, το διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να μην είναι μέσα στις προδιαγραφές της κεραίας για όλο το απαιτούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Έτσι επόμενο βήμα είναι να προσδιορίσουμε το βέλτιστο συνδυασμό φανταστικών αντιστάσεων στη βάση κάθε μονοπόλου ώστε να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Χρησιμοποιούμε πάλι

την επιλογή optimization με παραμέτρους τις τιμές των 8 varactor (impedance) και θέτουμε ως “goal” όρια για το κέρδος της κεραίας στο κύριο και τον οπίσθιο λοβό, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Για κάθε συχνότητα και κυρίως για τις υψηλές συχνότητες θέτουμε διαφορετικά όρια, καθώς υψηλά κέρδη που επιτυγχάνονται εύκολα για χαμηλές συχνότητες είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν στις υψηλές. Σε περίπτωση που τα όρια που θέτουμε επιτυγχάνονται εύκολα (παρουσιάζονται δηλαδή πολλές λύσεις ακόμα και στα πρώτα στάδια της διαδικασίας) τα αυξάνουμε ώστε να επιτύχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα. Στο συγκεκριμένο optimization δε χρησιμοποιούμε την επιλογή για βελτιστοποίηση (maximize ή minimize) πρώτον γιατί δε επιτρέπει το πρόγραμμα δυο βελτιστοποιήσεις (maximize για κύριο λοβό, minimize για οπίσθιο λοβό) και δεύτερον διότι αν επιλέξουμε μια από τις δυο βελτιστοποιήσεις επηρεάζεται και το άλλο στοιχείο.



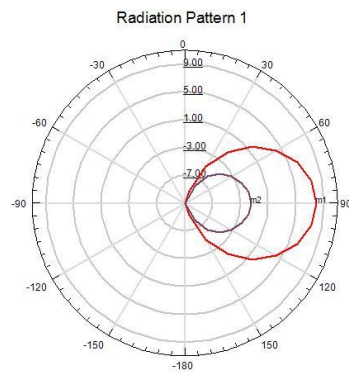
Τα αποτελέσματα για κάθε συχνότητα δίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4 Βελτιστοποιημένες Τιμές Φανταστικών Αντιστάσεων

Συχνότητα (MHz)	var1	var2	var3	var4	var5	var6	var7	var8
471,25	55,000	290,000	174,000	-2,000	212,000	-122,000	39,000	152,000
479,25	35,000	280,000	299,000	-2,000	207,000	-130,000	137,000	-125,000
487,25	-273,671	224,312	-271,072	-191,847	265,608	199,103	-133,851	128,924
495,25	125,551	-44,209	91,896	114,613	160,270	182,076	-299,489	-245,950
503,25	258,505	-190,236	-223,325	-107,993	-213,353	209,113	-218,694	-144,424
511,25	-49,410	285,000	172,508	-156,729	76,526	228,889	-95,725	266,982
519,25	-256,291	-141,700	274,895	-247,996	16,214	208,005	-234,135	133,369
527,25	-238,075	168,468	28,018	250,384	-297,404	216,547	291,962	99,782
535,25	14,096	-114,322	-41,905	56,646	237,490	-290,057	294,657	-142,597
543,25	-171,940	184,835	-228,706	224,799	-269,306	30,813	228,293	-137,360
551,25	-248,747	78,573	-234,617	32,881	71,016	62,467	299,737	-282,269
559,25	264,883	-69,578	10,931	288,067	59,225	75,531	224,204	-299,213
567,25	-140,000	85,000	294,000	-149,000	131,000	-294,000	234,000	-230,000
575,25	-157,000	130,000	290,000	-157,000	117,000	-296,000	279,000	-266,000
583,25	-178,000	144,000	206,000	-177,000	105,000	-297,000	250,000	-290,000
591,25	-213,000	136,000	296,000	-191,000	105,000	-298,000	252,000	-290,000
599,25	-237,000	131,000	296,000	-213,000	94,000	-299,000	254,000	-298,000
607,25	-251,000	143,000	161,000	-249,000	86,000	-295,000	185,000	-299,000
615,25	-194,000	146,000	188,000	-263,000	59,000	-298,000	180,000	299,000
623,25	-233,000	139,000	153,000	-282,000	52,000	-299,000	193,000	291,000
631,25	-231,000	136,000	188,000	-299,000	40,000	-299,000	181,000	294,000
639,25	-222,000	134,000	299,000	-296,000	25,000	-295,000	147,000	297,000
647,25	-110,000	-299,000	211,000	-45,000	159,000	-299,000	207,000	-23,000
655,25	-32,000	106,000	137,000	-147,000	72,000	-299,000	131,000	-78,000
663,25	-75,000	105,000	178,000	-65,000	76,000	-299,000	259,000	-35,000
671,25	-172,000	120,000	166,000	295,000	-69,000	-298,000	194,000	-84,000
679,25	-127,000	99,000	121,000	-69,000	56,000	-294,000	196,000	-82,000
687,25	-203,000	96,000	151,000	298,000	-16,000	-299,000	178,000	112,000
695,25	-175,000	91,000	121,000	-25,000	39,000	-297,000	182,000	-107,000
703,25	-191,000	86,000	77,000	-11,000	28,000	-277,000	188,000	-101,000
711,25	-249,000	83,000	89,000	297,000	-87,000	-295,000	169,000	-137,000
719,25	-215,000	77,000	66,000	50,000	1,000	-292,000	171,000	-73,000
727,25	-233,000	71,000	52,000	62,000	-5,000	-299,000	172,000	-105,000
735,25	-268,000	71,000	109,000	68,000	-13,000	-286,000	162,000	-132,000
743,25	-272,000	59,000	48,000	104,000	-7,000	-291,000	186,000	-104,000
751,25	-148,607	-93,918	-198,112	85,477	211,331	-207,466	-199,233	-112,360
759,25	127,822	-245,430	-69,627	6,603	210,113	241,025	-101,480	210,130
767,25	37,982	-88,514	156,417	-284,649	-174,684	236,567	-95,553	214,057
775,25	45,165	-283,244	-8,494	-9,276	-266,788	16,914	-295,449	148,640
783,25	157,347	-148,955	183,248	-294,472	98,066	-56,197	142,986	39,901
791,25	80,310	177,746	-203,345	-144,081	235,400	-261,389	1,147	-203,735
799,25	89,550	38,884	-187,899	203,391	272,588	-291,668	-145,985	209,433
807,25	-282,011	153,204	-47,175	-228,696	292,558	229,654	-253,640	-222,593
815,25	-213,297	-235,893	261,766	-247,649	210,514	-295,495	-57,836	-5,045
823,25	-74,988	-189,926	-180,090	-184,607	175,063	74,790	-134,000	-163,512
831,25	-269,051	67,871	51,943	244,820	217,841	210,415	-64,863	242,009

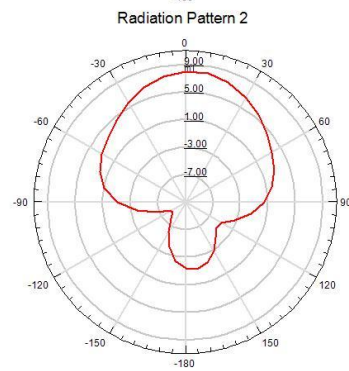
Τα νέα διαγράμματα ακτινοβολίας δίνονται παρακάτω.

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	7.9626
m2	90.0000	90.0000	-1.3839



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

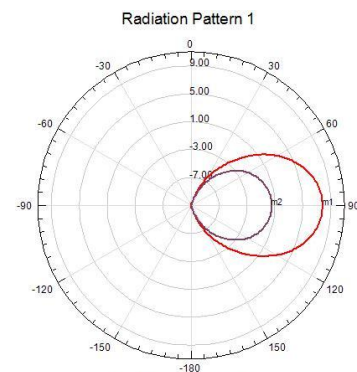
Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	7.9626



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive

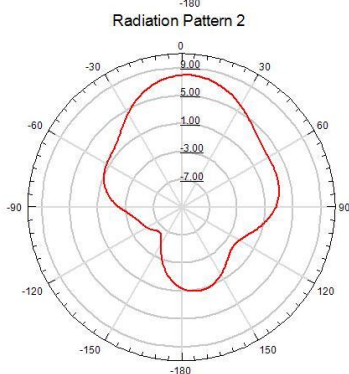
Σχήμα 38 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	7.9066
m2	90.0000	90.0000	0.6363



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

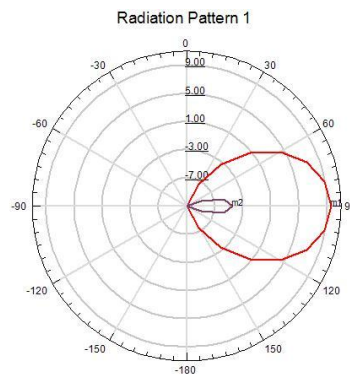
Ansoft Corporation



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive

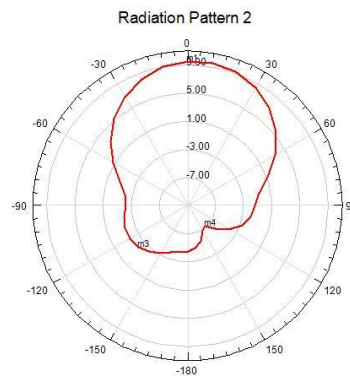
Σχήμα 39 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 503.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	9.6581
m2	90.0000	90.0000	-4.4414



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	9.6581
m3	230.0000	-130.0000	-1.8729
m4	140.0000	140.0000	-7.1246

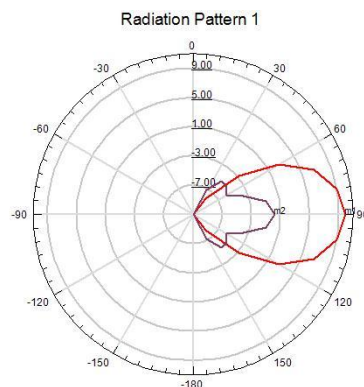


Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Σχήμα 40

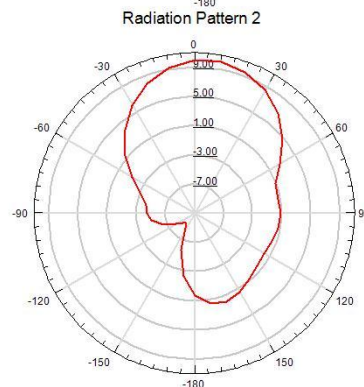
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 543.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	9.9240
m2	90.0000	90.0000	0.2432



Curve Info
dB(DrTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(DrTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Ansoft Corporation

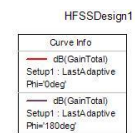
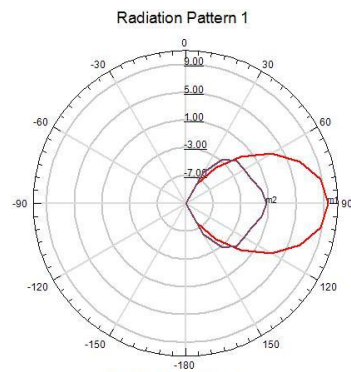


Curve Info
dB(DrTotal)
Setup1 : LastAdaptive

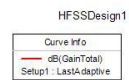
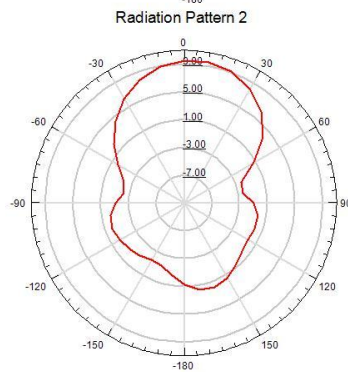
Σχήμα 41

Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 615.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	9.6619
m2	90.0000	90.0000	0.7442



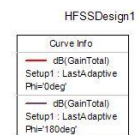
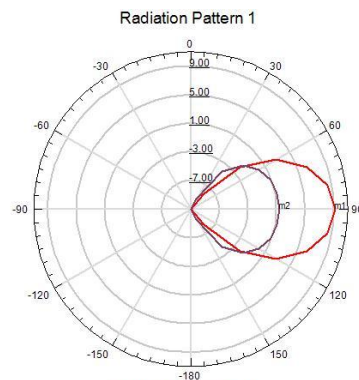
Ansoft Corporation



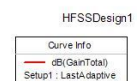
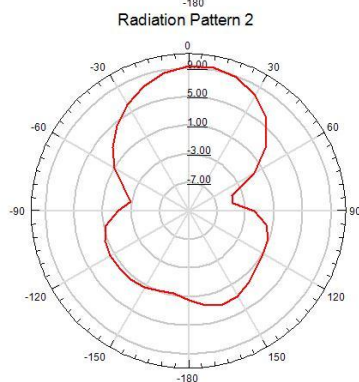
Σχήμα 42

Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 687.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	9.2716
m2	90.0000	90.0000	1.4506



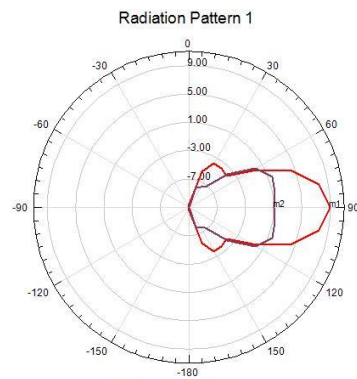
Ansoft Corporation



Σχήμα 43

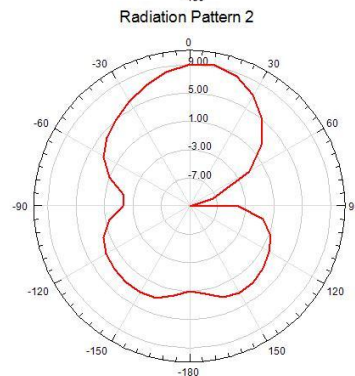
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 727.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	9.0462
m2	90.0000	90.0000	1.0646



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Ansoft Corporation

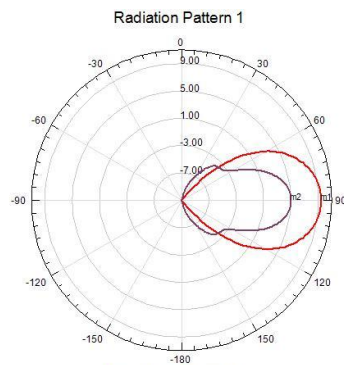


Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Σχήμα 44

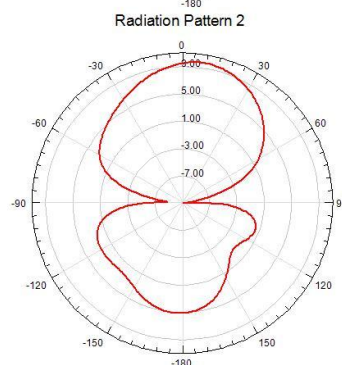
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 767.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	9.4985
m2	90.0000	90.0000	5.0996



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Ansoft Corporation



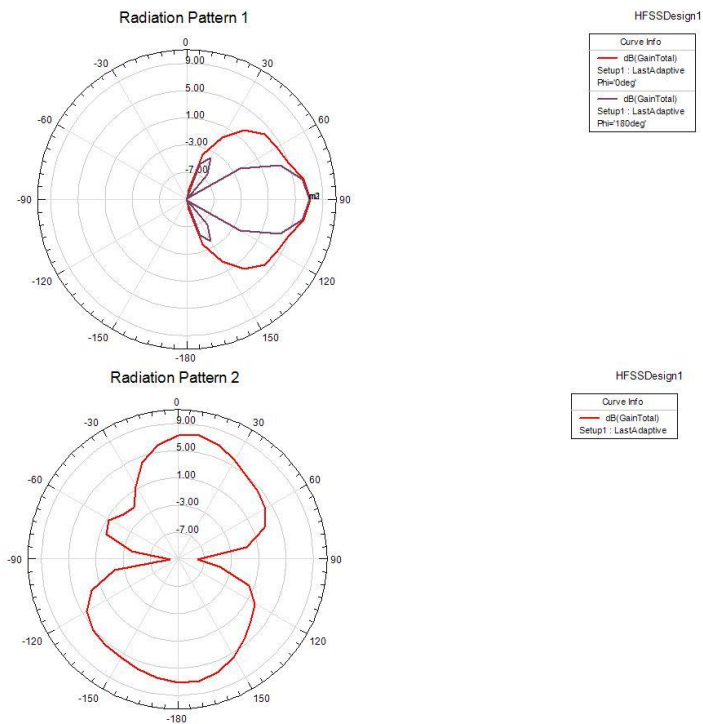
Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Σχήμα 45

Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 799.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων

Name	Theta	Ang	Mag
m1	90.0000	90.0000	7.2286
m2	90.0000	90.0000	7.0734

Ansoft Corporation

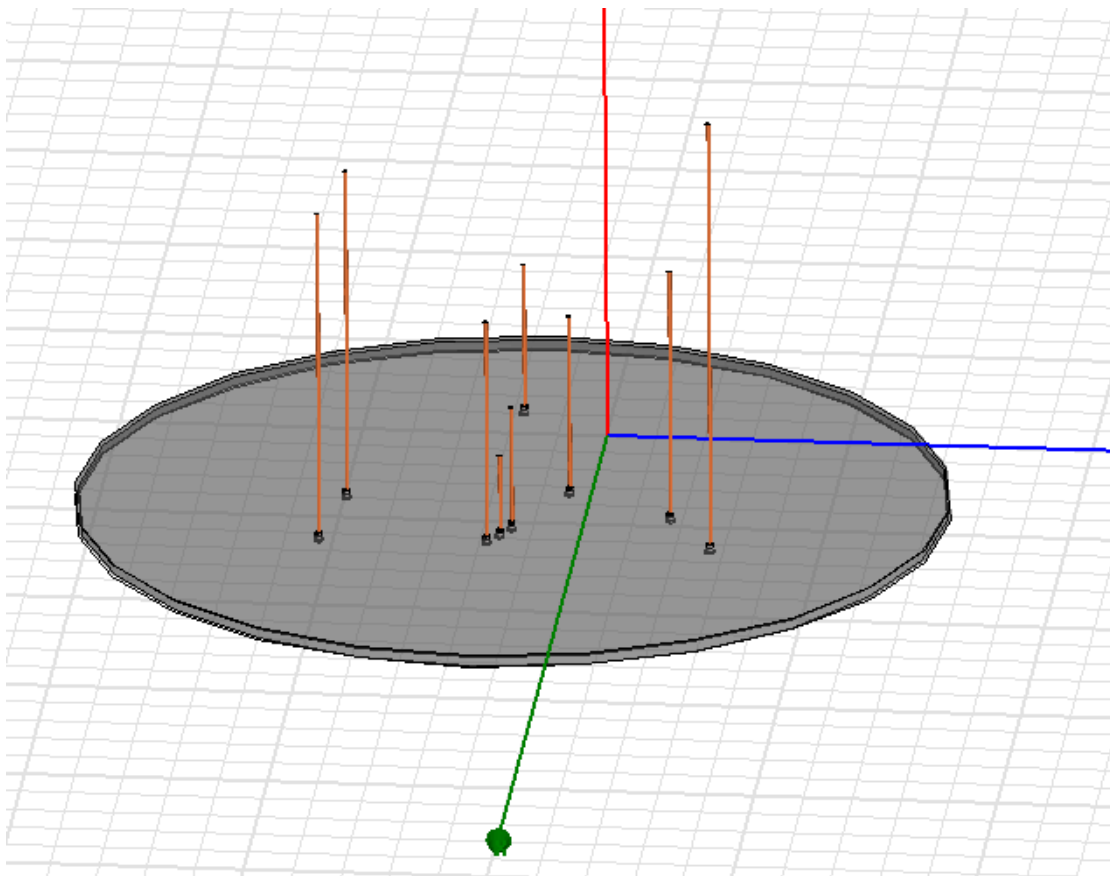


Σχήμα 46 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831.25 MHz με βελτιστοποιημένα το ύψος μονοπόλων και τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων

Παρατηρούμε από τον πίνακα 4 καθώς επίσης και από τα διαγράμματα ότι στις κεντρικές συχνότητες δεν έχει γίνει βελτιστοποίηση καθώς δε θεωρήθηκε σκόπιμο αφού τα αποτελέσματα ήταν ήδη ικανοποιητικά και πολλές φορές συνέπιπταν με αυτά της βελτιστοποίησης. Στις υψηλές συχνότητες παρατηρούμε μια κάποια βελτίωση, όσο όμως πλησιάζουμε στη συχνότητα 831.25 MHz βλέπουμε ότι η βελτίωση είναι μηδαμινή.

5.4 Προσθήκη Skirt

Τελικό στάδιο της σχεδίασης της κεραίας είναι η προσθήκη skirt. Όπως αναφέρθηκε στη παράγραφο 3.2.1, πρακτικά η κεραία δε μπορεί να κάνει χρήση ενός απέραντου επιπέδου με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να κατευθύνεται ψηλότερα από τον ορίζοντα με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα επικοινωνίας στο αζιμούθιο. Το πρόβλημα αυτό λύνεται ενσωματώνοντας ένα αγωγίμο κυλινδρικό κάλυμμα (skirt). Η κεραία W-ESPAR με το κάλυμμα αυτό και με βελτιστοποιημένα ύψη των μονοπόλων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



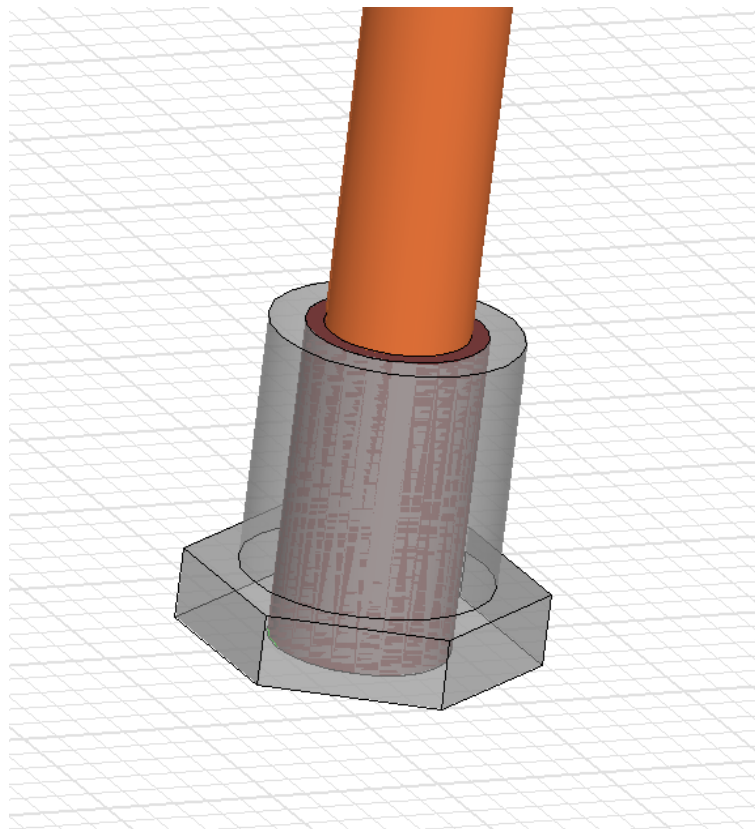
Σχήμα 47 Κεραία W-ESPAR με Skirt

Όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα του επιπέδου τόσο μειώνεται η ανύψωση του διαγράμματος ακτινοβολίας και το μέγιστο πλησιάζει το οριζόντιο επίπεδο. Ακόμα το ύψος του skirt επηρεάζει και αυτό με τη σειρά του το διάγραμμα ακτινοβολίας αφού αυξάνοντας το ισοδυναμεί με αύξηση του απέραντου επιπέδου. Παράλληλα όμως, το skirt χρησιμεύει και ως προστατευτικό για τα κυκλώματα των Varactors που βρίσκονται στη βάση των μονοπόλων. Βέβαια δε συνίσταται ανεξέλεγκτη

αύξηση των διαστάσεων του skirt καθώς έτσι μεγαλώνει σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος της κεραίας.

5.4.1 Σύνδεση Varactor

Για να μπορέσουμε να συνδέσουμε τους Varactors στα μονόπολα χρησιμοποιούμε μια δομή σε μορφή βίδας ώστε να στερεωθούν και τα μονόπολα στο επίπεδο. Η βίδα φαίνεται στο παρακάτω σχέδιο.



Σχήμα 48 **Βίδα στερέωσης μονοπόλων στο επίπεδο**

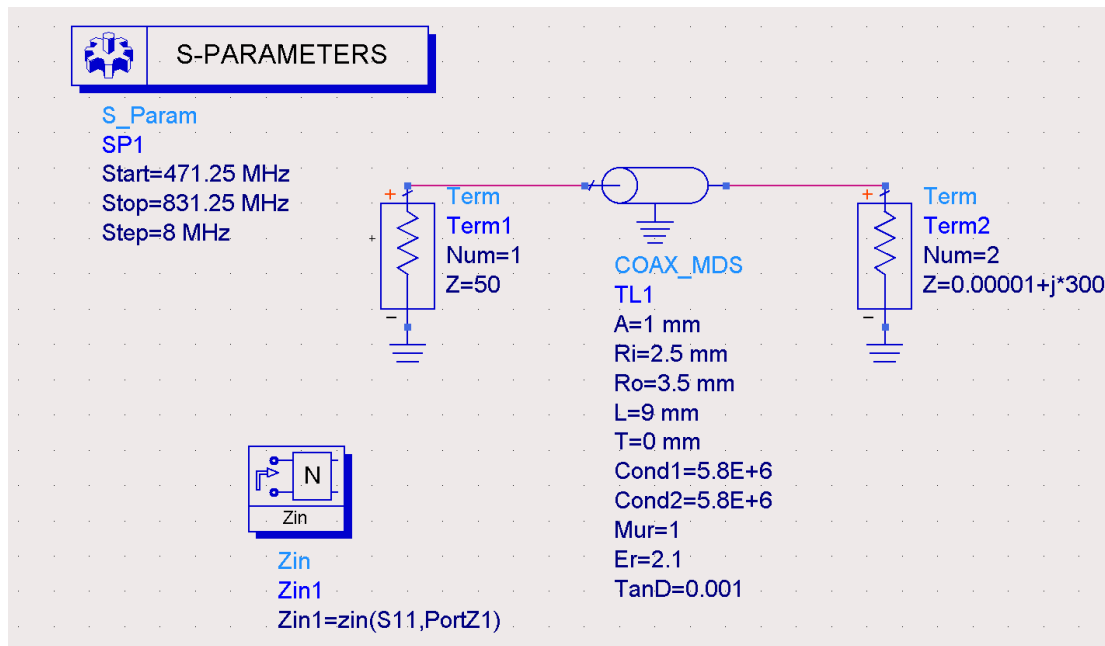
Το πάνω μέρος της βίδας στερεώνεται στο επίπεδο ενώ στο κάτω μέρος της βρίσκεται ο Varactor. Μεταξύ του μετάλλου της βίδας και του μονοπόλου χρησιμοποιείται τεφλόν για μεγαλύτερη σταθερότητα.

5.4.2 Γραμμή Μεταφοράς

Με τη χρήση αυτής της βίδας και για να μπορέσει να συνδεθεί ο Varactor με το μονόπολο απαιτείται η προέκταση του μονοπόλου κάτω από το επίπεδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μήκους των μονοπόλων κατά ένα κομμάτι ίσο με το ύψος της βίδας. Επομένως οι τιμές για τις φανταστικές αντιστάσεις που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 5.3.2 και δίνονται στο πίνακα 4 δεν είναι οι βέλτιστες και πρέπει να υπολογιστούν νέες. Όμως παρατηρούμε ότι αυτό το νέο κομμάτι στην ουσία λειτουργεί σαν γραμμή μεταφοράς. Επομένως για τον υπολογισμό των νέων τιμών των φανταστικών αντιστάσεων χρειάζεται μόνο να δούμε πως μετασχηματίζονται οι παλιές τιμές μέσω αυτής της γραμμής μεταφοράς. Για τον υπολογισμό αυτό γίνεται χρήση του προγράμματος ADS (Advanced Design System) της εταιρίας Agilent Technologies.

Το ADS είναι ένα λογισμικό το οποίο παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον σχεδίασης για σχεδιαστές RF ηλεκτρονικών προϊόντων, όπως τα κινητά τηλέφωνα, συσκευές τηλεεξιδιοποίησης, ασύρματα δίκτυα, δορυφορικές επικοινωνίες, συστήματα ραντάρ καθώς και συνδέσεις υψηλής ταχύτητας δεδομένων. Το ADS υποστηρίζει σε κάθε βήμα της διαδικασίας σχεδιασμού – σχηματική σύλληψη, τη διάταξη, προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας και ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση, επιτρέποντας στο μηχανικό τον πλήρη χαρακτηρισμό και πλήρη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού RF χωρίς αλλαγή εργαλείων.

Επομένως μπορούμε να προσομοιώσουμε τη διάταξη (νέα φανταστική αντίσταση)-(τμήμα μονοπόλου)-(παλιά φανταστική αντίσταση) ως μια ομοαξονική (coaxial) γραμμή μεταφοράς με δυο φορτία στα δυο άκρα της. Το σχηματικό διάγραμμα της σχεδίασης στο πρόγραμμα ADS δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 49 Σχεδίαση Γραμμής Μεταφοράς στο πρόγραμμα ADS

Ως φορτίο στην έξοδο θεωρούμε τις τιμές των φανταστικών αντιστάσεων που δίνονται στον πίνακα 4 και έχουμε ως ζητούμενο την αντίσταση που “βλέπει” η γραμμή μεταφοράς στην είσοδο της. Οι παράμετροι του ομοαξονικού αγωγού που φαίνονται στο παραπάνω σχήμα είναι οι εξής:

A: ακτίνα εσωτερικού αγωγού

R_i : εσωτερική ακτίνα εξωτερικού αγωγού

R_o : Εξωτερική ακτίνα εξωτερικού αγωγού

L: μήκος

T: πάχος επιμετάλλωσης

Cond1: αγωγιμότητα επιμετάλλωσης

Cond2: αγωγιμότητα βασικού μετάλλου

Mur: σχετική διαπερατότητα διηλεκτρικού

Er: σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα

TanD: απώλειες διηλεκτρικού

Οι προσομοιώσεις έγιναν για μήκος γραμμής μεταφοράς (και άρα τμήματος μονοπόλου, ή αλλιώς ύψος βίδας) 9mm και τα αποτελέσματα τους δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5 Τμές Φανταστικών Αντιστάσεων Μετά από Γραμμή Μεταφοράς

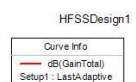
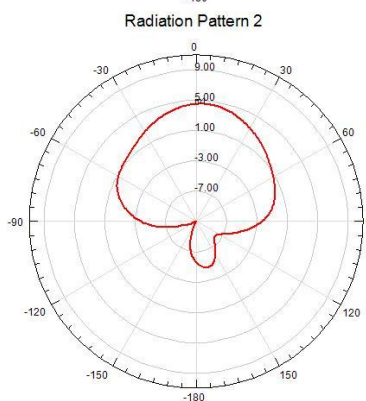
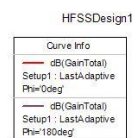
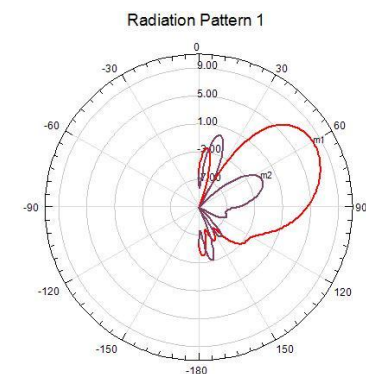
(MHz)	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8
471,25	73,819	31884,386	44,321	2,927	787,055	-82,615	50,704	326,531
479,25	45,576	10591,460	-7757,662	3,011	755,683	-86,078	271,124	83,635
487,25	-136,516	1107,018	-135,829	-111,280	4415,313	689,138	-87,393	246,234
495,25	238,204	-33,661	144,958	203,694	390,108	541,544	-141,755	-127,808
503,25	4707,031	-109,136	-120,098	-73,659	-116,951	906,969	-118,652	-91,095
511,25	-37,216	-5049,111	494,227	-95,703	114,373	1554,307	-66,673	28717,199
519,25	-127,584	-88,810	-7743,873	-125,358	23,080	988,409	-121,474	279,163
527,25	-121,656	490,068	37,590	6166,657	-136,479	1298,633	-2527,535	170,421
535,25	20,865	-75,254	-31,198	79,855	3163,225	-133,693	-2065,481	-88,125
543,25	-99,035	704,092	-117,212	2041,173	-127,791	41,579	2360,248	-85,374
551,25	-121,704	123,111	-117,970	44,543	107,343	91,039	-1523,989	-129,768
559,25	-3537,745	-49,656	17,593	-1721,505	85,744	117,472	2590,561	-132,368
567,25	-84,980	140,049	-1413,398	-88,601	297,842	-130,201	6817,286	-114,987
575,25	-91,118	298,163	-1390,684	-91,118	240,961	-129,559	-1708,145	-123,053
583,25	-97,729	385,730	1680,139	-97,595	200,374	-128,716	-4241,239	-127,291
591,25	-107,419	342,614	-1107,003	-101,447	202,801	-127,883	-3081,837	-126,281
599,25	-113,457	320,175	-1040,484	-107,169	169,964	-127,058	-2422,939	-126,864
607,25	-115,970	405,900	580,201	-115,506	149,033	-125,281	1049,017	-126,051
615,25	-100,341	440,518	1230,572	-117,786	88,994	-124,870	961,893	-900,878
623,25	-110,063	394,236	521,962	-120,821	76,652	-124,080	1606,938	-928,320
631,25	-108,803	380,639	1434,337	-123,115	57,161	-123,115	1117,715	-855,034
639,25	-105,243	374,307	-779,164	-121,621	35,917	-121,438	487,350	-792,886
647,25	-67,935	-121,227	42753,973	-31,494	662,996	-121,227	8995,390	-14,595
655,25	-21,766	228,669	416,269	-82,308	120,260	-120,302	368,379	-51,797
663,25	-49,907	227,501	1328,097	-44,135	131,214	-119,391	-1053,876	-23,953
671,25	-89,535	308,007	923,516	-680,254	-46,287	-118,321	3992,325	-54,508
679,25	-73,551	208,383	320,039	-46,081	87,422	-116,755	7031,859	-53,214
687,25	-97,003	199,096	651,773	-617,480	-8,099	-116,729	1724,652	272,035
695,25	-88,803	182,705	332,480	-15,674	57,770	-115,537	2475,771	-64,592
703,25	-92,685	167,289	139,621	-3,385	41,371	-111,295	5616,193	-61,622
711,25	-105,300	159,100	179,480	-561,141	-54,749	-113,530	1444,447	-75,654
719,25	-97,389	142,075	112,666	78,119	8,642	-112,226	1758,520	-47,272
727,25	-100,669	126,358	82,473	103,923	2,614	-112,525	2089,638	-62,463
735,25	-106,640	127,369	281,904	119,406	-4,889	-109,669	1312,033	-72,675
743,25	-106,590	98,408	75,568	257,237	0,825	-109,687	-17805,677	-61,427
751,25	-77,244	-56,711	-91,055	176,147	-1360,649	-93,239	-91,322	-64,560
759,25	468,463	-100,454	-44,418	15,190	-1305,344	-735,071	-59,763	-1304,790
767,25	58,595	-53,705	1351,557	-106,429	-84,089	-745,272	-56,905	-1100,281
775,25	71,764	-105,481	-0,277	-1,019	-102,854	27,785	-107,311	1002,622
783,25	1689,480	-75,856	-3750,168	-106,427	243,086	-36,229	840,962	62,494
791,25	165,922	-6147,099	-89,491	-73,948	-668,965	-100,599	9,589	-89,577
799,25	206,113	61,312	-85,426	-1108,078	-471,211	-104,573	-74,135	-961,695
807,25	-102,468	1730,488	-30,194	-93,549	-411,846	-663,692	-98,002	-92,373
815,25	-89,957	-94,291	-478,770	-96,359	-848,052	-103,692	-36,557	3,490
823,25	-45,608	-84,401	-82,091	-83,168	-3216,394	152,298	-69,243	-77,884
831,25	-98,537	130,855	88,933	-514,240	-689,611	-773,626	-40,160	-526,855

Παρατηρούμε ότι υπάρχει πολύ μεγάλη διακύμανση των τιμών σε σχέση με τον πίνακα 4.

Αυτό οφείλεται στη γραμμή μεταφοράς και στο ποσοστό του μήκους της σε σχέση με το μήκος κύματος της κάθε συχνότητας. Πολλές από αυτές τις τιμές δεν είναι εφικτό να υπάρξουν σε πραγματικούς Varactors. Έτσι ο εκάστοτε κατασκευαστής θα πρέπει να χρησιμοποιεί διαφορετικά μήκη γραμμών μεταφοράς, ούτως ώστε οι τροποποιημένες τιμές των φανταστικών αντιστάσεων να βρίσκονται μέσα στα όρια τιμών των Varactors που κυκλοφορούν στο εμπόριο.

Name	Theta	Ang	Mag
m1	61.0000	61.0000	7.8962
m2	66.0000	66.0000	-1.1205

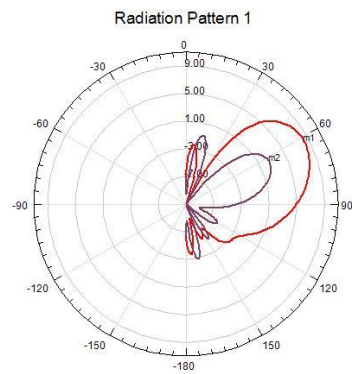
Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	4.4964



Σχήμα 50

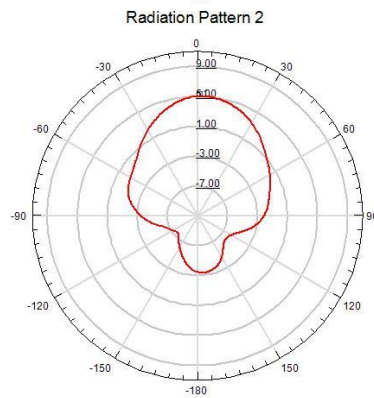
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471.25 MHz με Skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	62.0000	62.0000	8.3846
m2	63.0000	63.0000	2.5065



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg	

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	4.9985

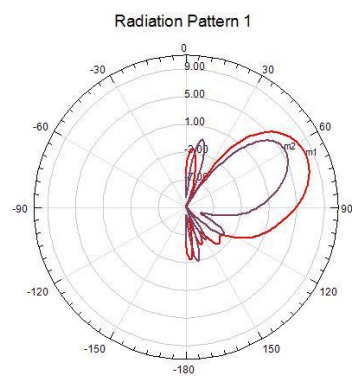


HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 51

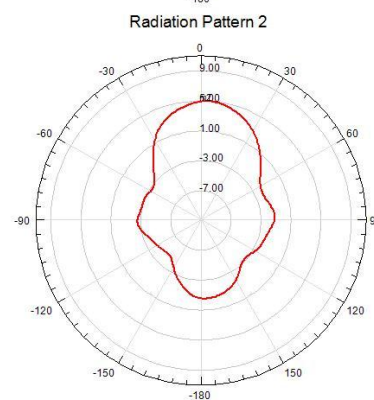
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 503.25 MHz με Skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	67.0000	67.0000	7.9361
m2	60.0000	60.0000	5.5626



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg	

Name	Phi	Ang	Mag
m2	0.0000	0.0000	4.9206

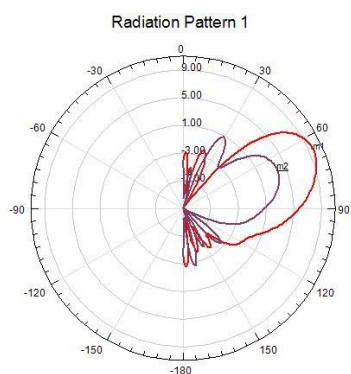


HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 52

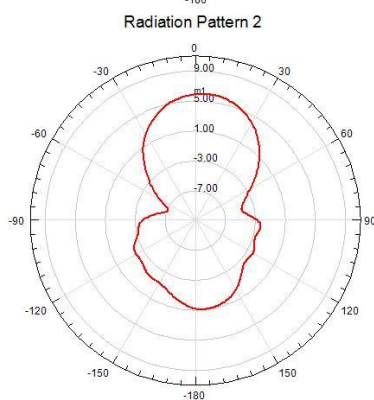
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 543.25 MHz με Skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	86.0000	86.0000	9.6816
m2	88.0000	88.0000	3.7422



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	
Phi=0deg	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	
Phi=180deg	

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	5.8692

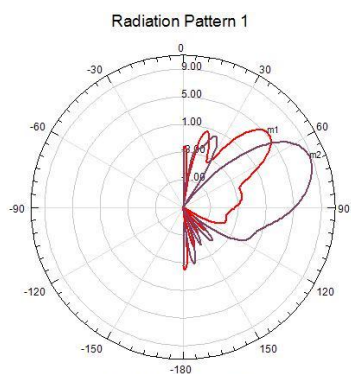


HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	

Σχήμα 53

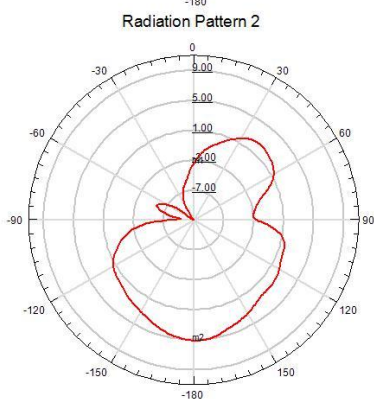
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 615.25 MHz με Skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	49.0000	49.0000	5.3084
m2	69.0000	69.0000	8.7191



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	
Phi=0deg	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	
Phi=180deg	

Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	-3.4275
m2	180.0000	180.0000	5.1315

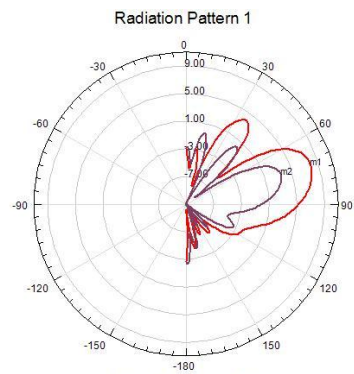


HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	

Σχήμα 54

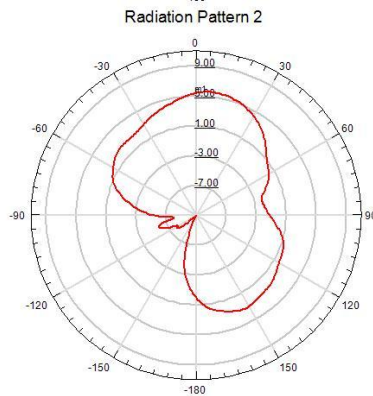
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 687.25 MHz με Skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	73.0000	73.0000	7.9281
m2	73.0000	73.0000	3.3783



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg	

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	5.3713

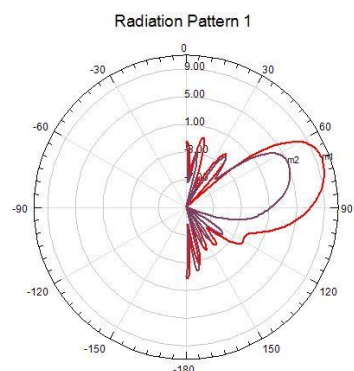


HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 55

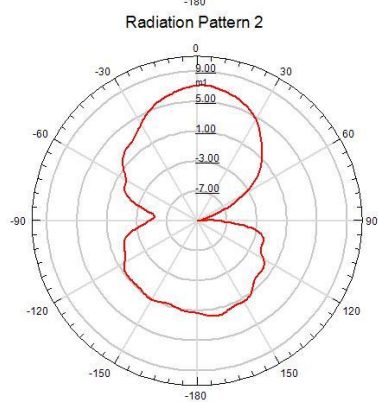
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 727.25 MHz με Skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	71.0000	71.0000	9.9043
m2	67.0000	67.0000	5.1153



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg	

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	7.0644

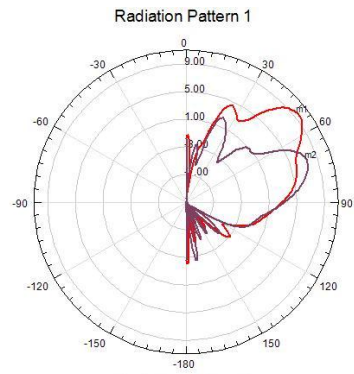


HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 56

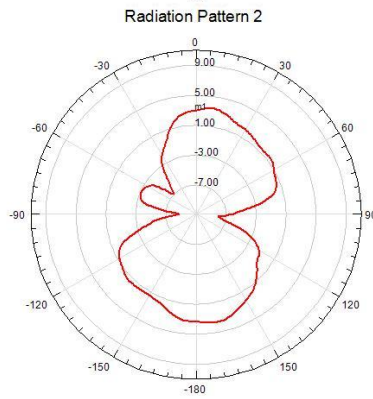
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 767.25 MHz με Skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	51.0000	51.0000	9.6922
m2	70.0000	70.0000	7.4688



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	2.9889

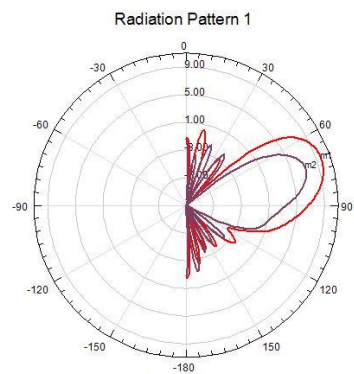


HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg

Σχήμα 57

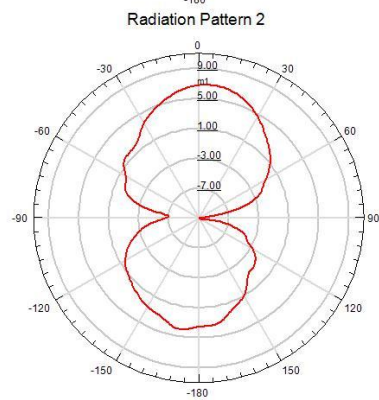
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 799.25 MHz με Skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	71.0000	71.0000	9.7043
m2	73.0000	73.0000	7.1410



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	6.7397

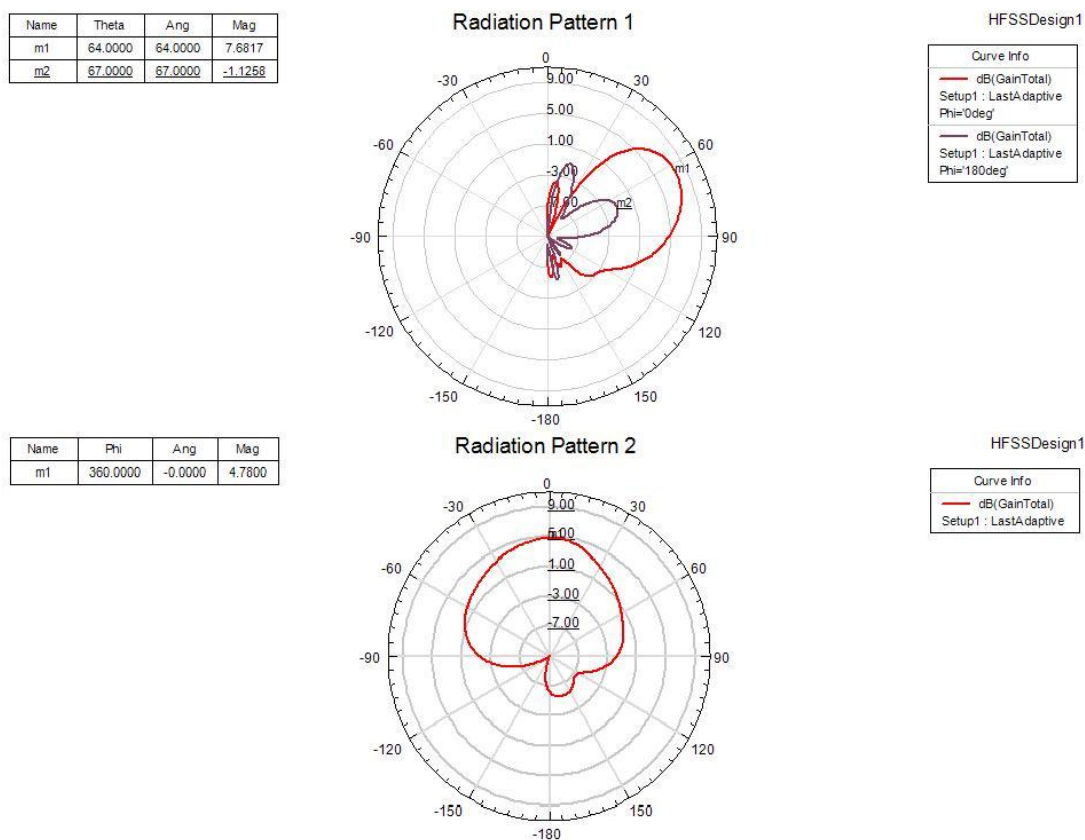


HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg

Σχήμα 58

Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831.25 MHz με Skirt

Οι παραπάνω προσομοιώσεις έγιναν για ακτίνα επιπέδου ίση με 100cm και ύψος skirt ίσο με 3cm. Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας παρουσιάζει μια ανύψωση με το μέγιστο να εμφανίζεται γύρω στις 60° περίπου. Η ανύψωση αυτή είναι αναμενόμενη λόγω της προσθήκης του επιπέδου κάτω από τα μονόπολα. Το κατά πόσο ανυψώνεται το διάγραμμα ακτινοβολίας εξαρτάται από το ύψος του skirt. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα μεγαλώνοντας το ύψος του skirt μειώνεται η ανύψωση και αυξάνεται το κέρδος της κεραίας στο οριζόντιο επίπεδο.

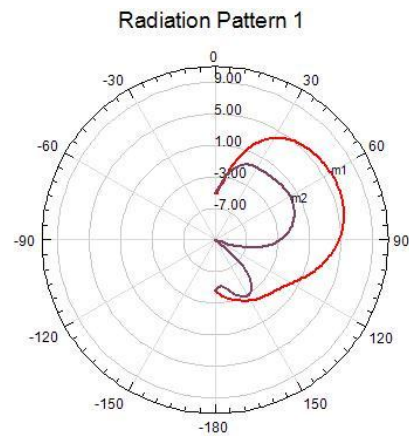


Σχήμα 59 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471.25 MHz με μεγαλύτερο Skirt

Η τελευταία αυτή προσομοίωση έγινε με ύψος skirt ίσο με 10cm. Αν συγκρίνουμε τα 2 διαγράμματα για συχνότητα 471,25 MHz φαίνεται ότι το μέγιστο μετατοπίζεται από τις 61° στις 64° και συγχρόνως μειώνεται κατά 0,2db ενώ στο οριζόντιο επίπεδο βλέπουμε ότι αυξάνεται κατά 0,3 db περίπου.

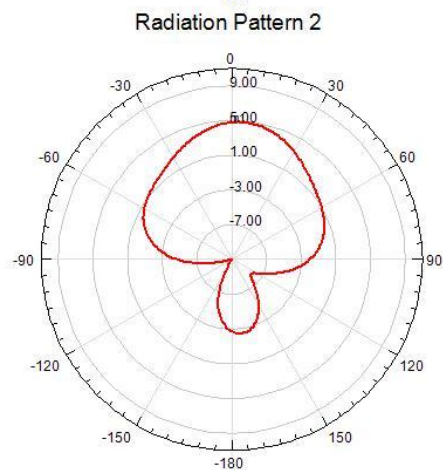
Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα ακτινοβολίας για διάφορες ακτίνες επιπέδου και διάφορα ύψη skirt.

Name	Theta	Ang	Mag
m1	61.0000	61.0000	6.0279
m2	65.0000	65.0000	-0.0125



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	4.7655

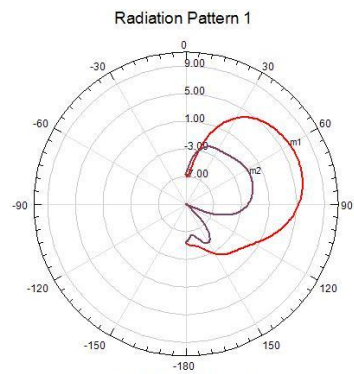


HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	

Σχήμα 60

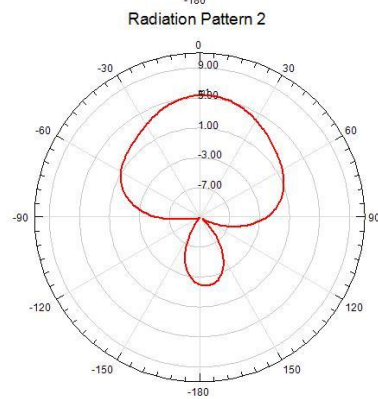
Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471,25 MHz με 50cm ακτίνα και 3cm ύψος skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	61.0000	61.0000	6.3237
m2	65.0000	65.0000	-0.7799



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

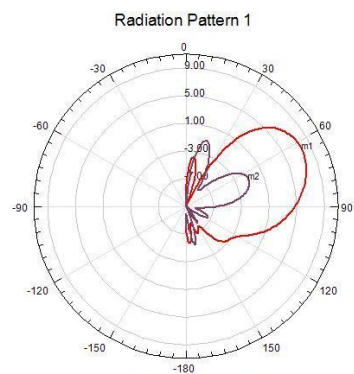
Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	5.3501



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg

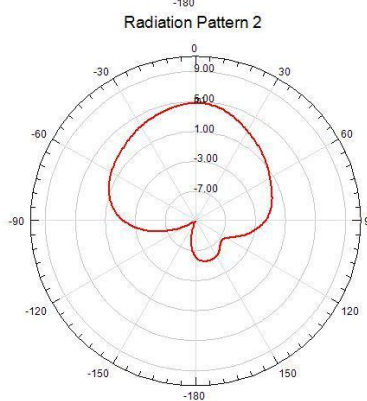
Σχήμα 61 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471,25 MHz με 50cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	64.0000	64.0000	7.6817
m2	67.0000	67.0000	-1.1268



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

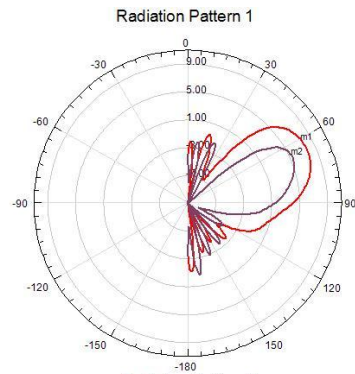
Name	Phi	Ang	Mag
m1	360.0000	-0.0000	4.7800



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg

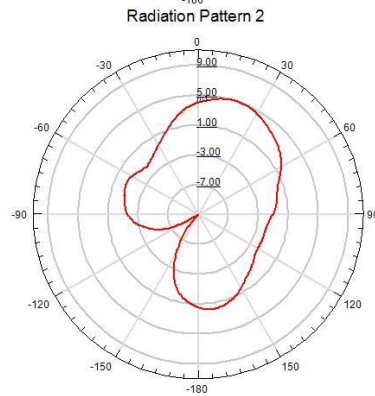
Σχήμα 62 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471,25 MHz με 100cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	61.0000	61.0000	7.6186
m2	65.0000	65.0000	8.4010



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

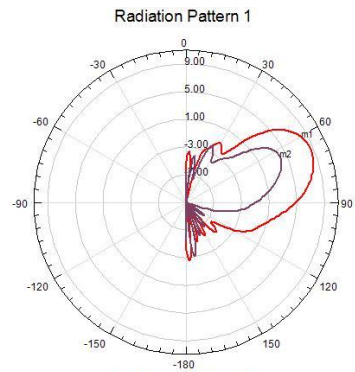
Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	3.9883



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

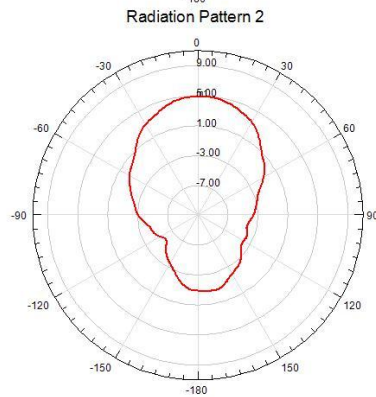
Σχήμα 63 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471,25 MHz με 150cm ακτίνα και 3cm ύψος skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	61.0000	61.0000	8.2394
m2	65.0000	65.0000	4.1277



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

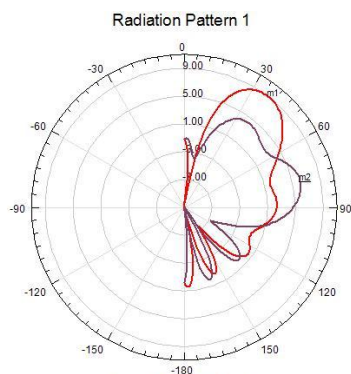
Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	4.8812



HFSSDesign1	
Curve Info	
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive
dB(GainTotal)	Setup1 : LastAdaptive

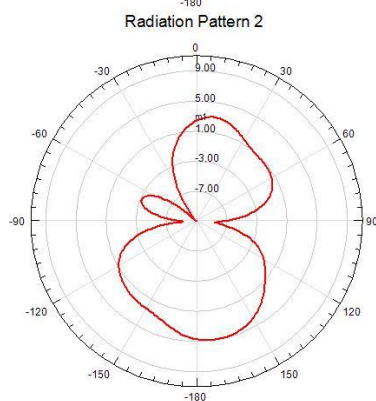
Σχήμα 64 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 471,25 MHz με 150cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	37.0000	37.0000	9.0299
m2	77.0000	77.0000	6.1695



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

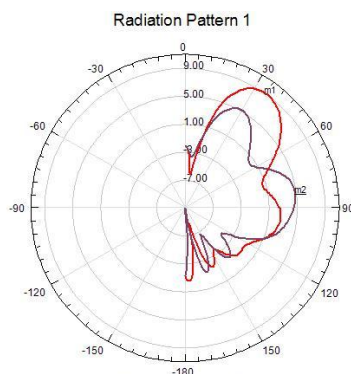
Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	2.3897



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

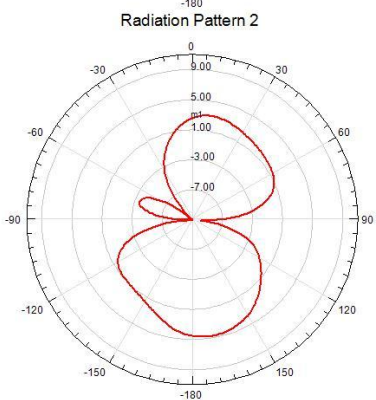
Σχήμα 65 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831,25 MHz με 50cm ακτίνα και 3cm ύψος skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	35.0000	35.0000	9.0243
m2	82.0000	82.0000	5.8990



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

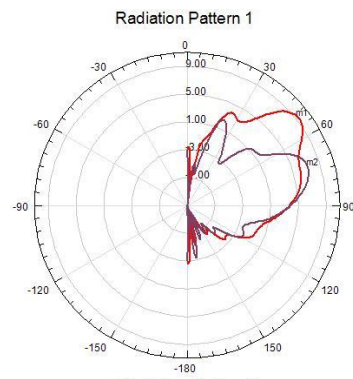
Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	2.5271



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

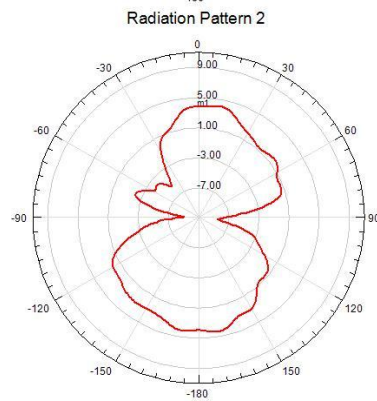
Σχήμα 66 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831,25 MHz με 50cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	51.0000	51.0000	9.4007
m2	72.0000	72.0000	7.2608



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

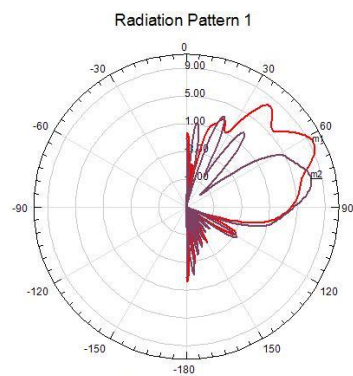
Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	3.7746



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg

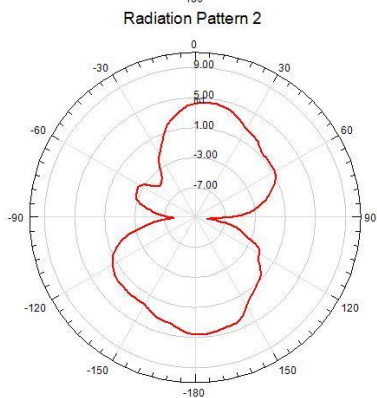
Σχήμα 67 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831,25 MHz με 100cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	83.0000	83.0000	9.5802
m2	77.0000	77.0000	7.4767



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=180deg

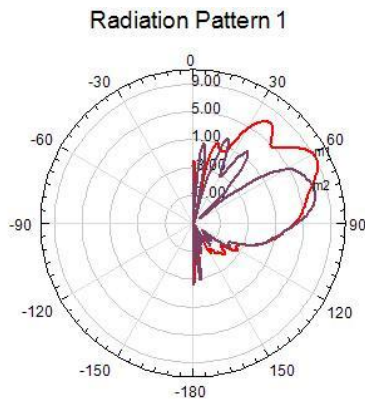
Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	4.1925



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	Phi=0deg

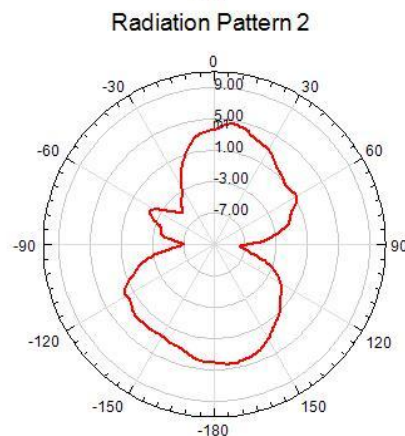
Σχήμα 68 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831,25 MHz με 150cm ακτίνα και 3cm ύψος skirt

Name	Theta	Ang	Mag
m1	62.0000	62.0000	9.2178
m2	75.0000	75.0000	7.2561



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	
Phi=0deg	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	
Phi=180deg	

Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	3.6881



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	

Σχήμα 69 Διάγραμμα Ακτινοβολίας για 831,25 MHz με 150cm ακτίνα και 10cm ύψος skirt

Παρατηρούμε ότι ανάλογα με τις τιμές για την ακτίνα του επιπέδου και το ύψος του skirt υπάρχουν εμφανείς διαφοροποιήσεις. Επομένως για πιο ασφαλή συμπεράσματα “τρέχουμε” ένα optimization με το HFSS. Ως παραμέτρους αυτή τη φορά θα δηλώσουμε την ακτίνα και το ύψος. Τα όρια που θέτουμε είναι

$$3 \leq h_s \leq 15 \text{ και } 50 \leq r_s \leq 150$$

και ως goal της βελτιστοποίησης θέτουμε τη μεγιστοποίηση του κέρδους σε γωνία 70°. Η γωνία των 70° επιλέχτηκε αφενός γιατί από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν μέγιστα γύρω στις 60° στις περισσότερες περιπτώσεις και αφετέρου γιατί επιθυμούμε να μειώσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο την ανύψωση που παρουσιάζει το διάγραμμα ακτινοβολίας. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζουμε ότι η γωνία θ (theta) είναι 0° για το κατακόρυφο επίπεδο και 90° για το οριζόντιο. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις βέλτιστες λύσεις (λύσεις με το μικρότερο κόστος στη συνάρτηση κόστους) φαίνονται

παρακάτω. Ακόμα δίνονται και οι πίνακες με τα αποτελέσματα για τις “καλύτερες” λύσεις ώστε να φανούν πιθανοί συνδυασμοί των τιμών των παραμέτρων.

Πίνακας 6 **Αποτελέσματα optimization για 471.25 MHz με skirt**

Iteration	hs	rs	Cost
3	10.9023407696768cm	132.335886715293cm	-9,0247
42	10.147911129107cm	126.133853640092cm	-9,0028
83	3.32888154082978cm	123.656322379624cm	-8,9292
38	8.3964303575272cm	131.802284624012cm	-8,7653
82	7.24836987501566cm	149.037291202583cm	-8,7007
74	8.24595143947742cm	135.313468328247cm	-8,5958
67	7.8041573362121cm	122.959012028447cm	-8,5787
71	12.6974213207138cm	137.559409105344cm	-8,5333
20	9.50373138557619cm	121.780166706697cm	-8,5277
96	9.8863824889482cm	92.3058818732394cm	-8,4096
40	9.29584344272966cm	98.3260936286652cm	-8,4081
68	7.93694214221706cm	147.597193483862cm	-8,3715
80	11.0379727371841cm	128.26873543763cm	-8,3510
70	9.02047979893988cm	125.780294503662cm	-8,3027
53	12.2486003315965cm	100.471034120249cm	-8,2728

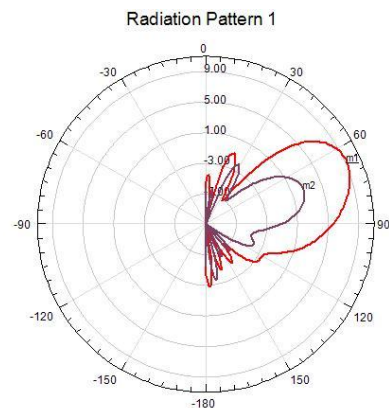
Πίνακας 7 **Αποτελέσματα optimization για 831.25 MHz με skirt**

Iteration	hs	rs	Cost
4	7.02413194526364cm	108.097060336582cm	-6,8415
3	10.9023407696768cm	132.335886715293cm	-6,1493
2	7.83779412213508cm	91.3495284890286cm	-5,9613
1	13.5439008758812cm	90.8703878902554cm	-4,6854
62	3.10514243122885cm	141.85238652329cm	-3,6062
14	12.2844170305122cm	145.745399934275cm	-3,0394
10	12.8228216693378cm	144.896381553767cm	-3,0212
74	14.0271511580591cm	146.466578170075cm	-2,7847
6	9.38624616406336cm	139.656347422326cm	-2,7720
9	5.21604533222739cm	145.337626258143cm	-2,2793
5	9.94241404675735cm	144.299543386006cm	-1,2746
37	13.6048398026864cm	115.62550960498cm	-1,1295
44	7.95098236592987cm	140.352877629543cm	-0,8908
16	7.81315456301276cm	118.995408191814cm	-0,7884
78	5.42511115816682cm	111.208504035192cm	-0,7045

Παρατηρούμε ότι στις περισσότερες λύσεις η ακτίνα του επιπέδου είναι στο διάστημα των 120 με 130 cm ενώ το ύψος του skirt γύρω στα 10cm. Για την ακρίβεια η βέλτιστη λύση στα 471.25 MHz είναι 10.902cm για το ύψος του skirt και 132.335cm για την ακτίνα του επιπέδου. Η λύση αυτή είναι η δεύτερη καλύτερη και

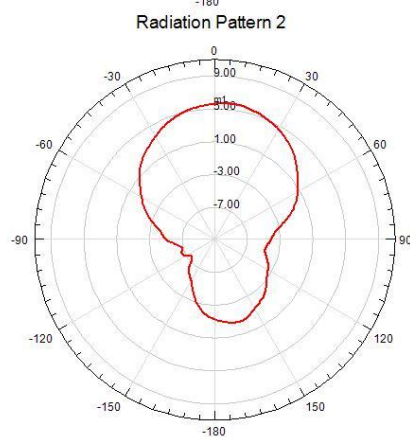
για τη συχνότητα των 831.25 MHz. Έτσι οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι μια κατασκευή με αυτές τις τιμές θα λειτουργεί ικανοποιητικά τόσο στις χαμηλές όσο και στις υψηλές συχνότητες. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας για τις δυο συχνότητες και για αυτές τις τιμές δίνονται παρακάτω.

Name	Theta	Ang	Mag
m1	66.0000	66.0000	9.1887
m2	70.0000	70.0000	2.6084



Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=0deg
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive
Phi=180deg

Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	5.6937

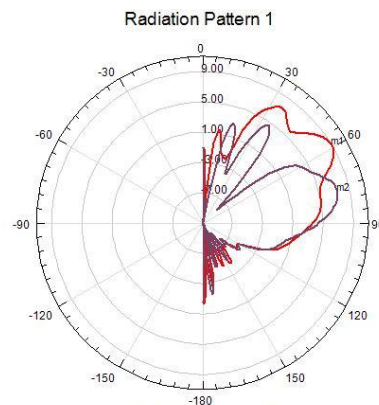


Curve Info
dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive

Σχήμα 70

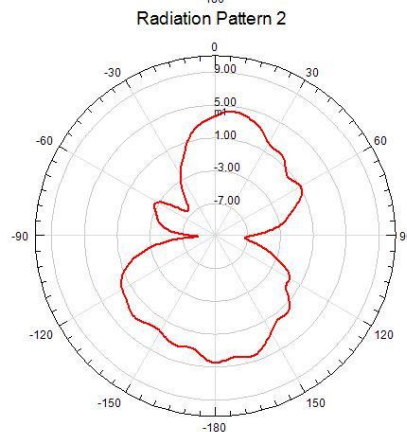
Διάγραμμα ακτινοβολίας για Βελτιστοποιημένο Ύψος skirt και Ακτίνα επιπέδου στα 471.25 MHz

Name	Theta	Ang	Mag
m1	59.0000	59.0000	9.0494
m2	77.0000	77.0000	7.4133



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	
Phi=0deg	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	
Phi=180deg	

Name	Phi	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	3.7239



HFSSDesign1	
Curve Info	
—	dB(GainTotal)
Setup1 : LastAdaptive	

Σχήμα 71 Διάγραμμα ακτινοβολίας για Βελτιστοποιημένο Ύψος skirt και Ακτίνα επιπέδου στα 831.25 MHz

5.5 Δυσκολίες στο HFSS

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους, το HFSS φαίνεται το ιδανικό εργαλείο σχεδίασης. Ο χρήστης χρειάζεται μόνο να σχεδιάσει τη φυσική διάταξη και στη συνέχεια με μια καλή παραμετροποίηση και μια βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων μπορεί να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η αλήθεια όμως διαφέρει αρκετά. Το HFSS είναι ένα πολύ απαιτητικό λογισμικό τόσο σε hardware όσο και σε χρόνο. Όσο μεγαλύτερη και πιο πολύπλοκη είναι η φυσική διάταξη μιας κεραίας, τόσο αυξάνεται ο χρόνος προσομοίωσης αφού αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός των τετραέδρων που χρησιμοποιούνται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμα σημαντικό παράγοντα αποτελεί ο εκάστοτε υπολογιστής που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση του προγράμματος. Η μνήμη RAM, τυπικές τιμές της οποίας είναι η τάξη των 3GB, πολλές φορές δεν είναι αρκετή με αποτέλεσμα το πρόγραμμα να υπερφορτώνεται και να δίνονται

μηνύματα λάθους. Ακόμα πολύ σημαντικός είναι και ο αριθμός των επεξεργασιών που έχει το κάθε σύστημα αφού το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας.

Στις περιπτώσεις που το πρόγραμμα “έτρεχε” κανονικά και για την απλή μορφή των σχεδίων (δίπολα ή μονόπολα με επίπεδο συμμετρίας) ένας μέσος όρος χρόνου που απαιτούνταν για κάθε προσομοίωση άγγιζε τη 1 ώρα. Σε περίπτωση που η διάταξη γινόταν πιο πολύπλοκη (προσθήκη επιπέδου με skirt) ο χρόνος αυτός διπλασιαζόταν ή και τριπλασιαζόταν. Παρατηρήθηκε επίσης ότι οι προσομοιώσεις στις μικρές συχνότητες εκτελούνταν ταχύτερα από εκείνες στις υψηλές συχνότητες.

Σε περίπτωση που γινόταν κάποια βελτιστοποίηση ο απαιτούμενος χρόνος πολλαπλασιαζόταν. Ένας μέσος όρος για κάθε συχνότητα του σταδίου 5.3.1 και 5.3.2 άγγιζε τις 8-10 ώρες με τα επόμενα στάδια, όπου η διάταξη είναι πιο πολύπλοκη, να απαιτείται ακόμα περισσότερος χρόνος. Όπως γίνεται αντιληπτό η όλη διαδικασία είναι εξαιρετικά χρονοβόρα καθώς όπως προαναφέρθηκε παρουσιάζονταν και προβλήματα που κατά κύριο λόγο οφείλονται στις υψηλές απαιτήσεις hardware. Υπήρξαν αρκετές περιπτώσεις προσομοιώσεων όπου “έτρεχαν” για αρκετές ώρες μέχρι τελικά το πρόγραμμα να βγάλει κάποιο μήνυμα λάθους.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν γύρω στις 200 προσομοιώσεις με τις μισές από αυτές να είναι βελτιστοποιήσεις, με το μέγεθος των αποτελεσμάτων (τα απαραίτητα αρχεία που αποθηκεύει το πρόγραμμα μετά από κάθε προσομοίωση) να ξεπερνάει τα 150 GB.

Από τα παραπάνω προκύπτει η δυσκολία της ολοκλήρωσης της παρούσας εργασίας δεδομένων των πεπερασμένων ικανοτήτων του υλικού και του χρόνου.

Βιβλιογραφία

- Finite element method.* (n.d.). Ανάκτηση από http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method
- HFSS: 3D Full-wave Electromagnetic Field Simulation.* (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
- OJIRO, Y., KAWAKAMI, H., GYODA, K., & OHIRA, T. (2008). *Improvement of Elevation Directivity for ESPAR Antennas with Finite Ground Plane.* Japan.
- Schlub, R. W. (2004). *Practical Realization of Switched and Adaptive Parasitic Monopole Radiating Structures.* Ανάκτηση από <http://www4.gu.edu.au:8080/adt-root/public/adt-QGU20040610.112148/>
- Schlub, R., Lu, J., & Ohira, T. (2003). Seven-Element Ground Skirt Monopole ESPAR Antenna Design From a Genetic Algorithm and the Finite Element Method. *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL 51.*
- Tsiafakis, V. G., Sotiriou, A. I., Petropoulos, Y. I., Psarropoulos, E. S., Nanou, E. D., & Capsalis, C. N. (2009). Design Of A Wideband ESPAR Antenna For DVB-T Reception. *Progress In Electromagnetics Research B Vol 12.*
- Αλεξίου, Γ. (n.d.). *Αρχές Ασύρματης Επικοινωνίας Δεδομένων.* Ανάκτηση από <http://www.ceid.upatras.gr/faculty/alexiou/ahts/>
- Καψάλης, Χ., & Κωττής, Π. (2003). *Δορυφορικές Επικοινωνίες.* Τζιόλας.
- Καψάλης, Χ., & Κωττής, Π. (2005). *Κεραίες - Ασύρματες Ζεύξεις.* Τζιόλας.
- Ουζούνoglou, Ν. Κ. (1994). *Εισαγωγή στα Μικροκύματα.* Παπασωτηρίου.
- Τζαφέστας, Σ. Γ. (2008). *Υπολογιστική Νουμοσύνη.* ΕΜΠ.
- Ψαρρόπουλος, Ε. (2006). *Σχεδίαση και προσομοίωση κεραιών ESPAR και W-ESPAR με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Matlab. Βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών των κεραιών αυτών με τη βοήθεια γενετικών αλγορίθμων.* ΕΜΠ.