



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Βελτιστοποίηση λογαριθμοπεριοδικών κεραιών

Αλέξανδρος Σ. Μιόγλου

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Βελτιστοποίηση λογαριθμοπεριοδικών κεραιών

Αλέξανδρος Σ. Μιόγλου

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2019.

.....

Νικόλαος Ουζούνογλου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Δήμητρα Κακλαμάνη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Ματσόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2019

.....  
Αλέξανδρος Σ. Μιόγλου

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

Copyright © Αλέξανδρος Σ. Μιόγλου, 2019

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.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η δυνατότητα κατασκευής στοιχειοκεραιών με στοιχεία σύνθετες κεραιές όπως είναι η λογαριθμική περιοδική με δίπολα. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στη θεωρία των κεραιών με ορισμούς και απαραίτητα θεωρήματα που εξηγούν τη λειτουργία τους. Στο σημείο αυτό παρέχονται και ορισμένα μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια για να περιγράψουν την κατασκευή των στοιχειοκεραιών. Ακολουθεί μια εισαγωγή στις κεραιές οι οποίες παρουσιάζουν ανεξαρτησία από τη συχνότητα και παρατίθενται οι αρχές που θα πρέπει να ικανοποιούνται για να έχουμε το συγκεκριμένο αποτέλεσμα, δηλαδή η αρχή του Rumsey. Μια περίπτωση κεραιάς που παρουσιάζει ανεξαρτησία από τη συχνότητα είναι η λογαριθμική περιοδική. Αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της.

Έπειτα, σχεδιάζεται μια λογαριθμική περιοδική κεραιά με δίπολα για το φάσμα 200 – 400 MHz. Παρουσιάζεται η μέθοδος του Carrel και οι διάφορες παραλλαγές της μαζί με τους πίνακες από την αρχική δημοσίευση. Τα αριθμητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνονται με χρήση του λογισμικού NEC, με τη βοήθεια του οποίου γίνονται προσομοιώσεις.

Η λογαριθμική περιοδική διάταξη που έχει δημιουργηθεί χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως στοιχείο συστοιχίας κεραιών με σκοπό τη βελτίωση του κέρδους της στοιχειοκεραιάς. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει και αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη.

## Λέξεις κλειδιά

ευρείας ζώνης, ανεξαρτησία από τη συχνότητα, λογαριθμική περιοδική κεραιά, στοιχειοκεραιές, πλευρικοί λοβοί, βελτίωση του κέρδους

## **Abstract**

The current diploma thesis deals with the subject of antenna arrays with complex elements such as the logarithmic periodic dipole array (LPDA). It begins with an introduction to the theory of antennas while definitions and necessary theorems are provided that will come in use in later chapters where the construction of antenna array elements happens.

An introduction to frequency independent antennas follows and the main principles that are needed for frequency independence are stated, such as Rumsey's principle. An interesting case of frequency independent antennas is the logarithmic periodic antenna. The principles of its design are described.

Next comes the design of a logarithmic periodic dipole array for frequencies between 200-400 MHz. Carrel's method is followed and a few variations while tables from the original papers are presented.

The logarithmic periodic dipole array (LPDA), that was designed, is now used as an antenna array element in order to improve the gain. Arithmetic results are tested with emulations performed with NEC software. Results and conclusions are displayed.

## **Keywords**

wideband, frequency independence, logarithmic periodic dipole array, antenna arrays, grating lobes, gain enhancement

**Αφιερώνεται στην οικογένεια μου**

## Πρόλογος

Τα τελευταία χρόνια η χρήση των κεραιών είναι αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας. Διάφορες υπηρεσίες και συσκευές κάνουν ολοένα και μεγαλύτερη χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων καθιστώντας το ένα πολύτιμο αγαθό. Η χρήση μεγάλου μέρους του φάσματος μπορεί να είναι απαραίτητη για την επίτευξη υψηλών ρυθμών μεταφοράς δεδομένων, για την εκμετάλλευση τεχνικών ευρέους φάσματος ή και για υπηρεσίες όπως η τηλεόραση, όπου πολλοί σταθμοί πρέπει να εξυπηρετηθούν. Για την εκμετάλλευση μεγάλου μέρους του φάσματος θα πρέπει τα χαρακτηριστικά μιας κεραίας να παραμένουν σχεδόν σταθερά για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της περιοχής. Καθίσταται λοιπόν αναγκαία η χρησιμοποίηση κεραιών ευρείας ζώνης.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η σχεδίαση μιας λογαριθμικής περιοδικής κεραίας για την περιοχή 200-400 MHz. Για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας εξετάζεται η κατασκευή στοιχειοκεραιών με λογαριθμικές περιοδικές κεραίες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που πρέπει να ικανοποιούνται.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι φυσικοί νόμοι που διέπουν τη λειτουργία των κεραιών, δηλαδή οι νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού, που δεν είναι άλλοι από τις εξισώσεις του Maxwell. Έπειτα αναλύονται οι διάφορες οπτικές από τις μπορεί κανείς να δει μια κεραία. Βασικά μεγέθη για την περιγραφή της λειτουργίας μιας κεραίας επεξηγούνται στη συνέχεια και δίνονται ορισμοί.

Οι ευρυζωνικές κεραίες, μέρος των οποίων είναι η λογαριθμική περιοδική, αποτελούν περίπτωση κεραιών ανεξάρτητων από τη συχνότητα. Δίνονται ορισμοί για τη λειτουργία κεραιών αυτών όπως είναι η βασική αρχή του Rumsey. Έπειτα εξετάζεται η λογαριθμική περιοδική κεραία με δίπολα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που πρέπει να ακολουθεί η κατασκευή περιγράφονται αναλυτικά καθώς και οι τρόποι τροφοδότησης των διπόλων.

Η βελτίωση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας όπως το κέρδος μελετάται στη συνέχεια. Για το σκοπό αυτό, διερευνάται η σύνθεση στοιχειοκεραιών με στοιχεία λογαριθμικές περιοδικές κεραίες με δίπολα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι φυσικοί περιορισμοί καθιστούν το παραπάνω πρόβλημα ενδιαφέρον.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ουζούνογλου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δεχόμενος να αναλάβει την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας και για την πολύτιμη στήριξη που μου προσέφερε κατά την εκπόνησή της. Επίσης, ευχαριστώ την οικογένειά μου που με στηρίζει αδιάκοπα όλα αυτά τα χρόνια.

# Περιεχόμενα

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>7</b>
<b>1. ΟΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ</b> .....	<b>10</b>
1.1 Εισαγωγή .....	10
1.2 Κυματική εξίσωση .....	11
1.3 Εξισώσεις του Maxwell.....	12
1.4 Μοντέλα κεραίας .....	14
1.4.1 Κυκλωματικό στοιχείο .....	14
1.4.2 Χωρικό φίλτρο .....	15
1.4.3 Φίλτρο συχνοτήτων.....	16
1.4.4 Συλλέκτης .....	17
1.4.5 Φίλτρο πόλωσης.....	18
1.5 Σύστημα συντεταγμένων .....	19
<b>2. ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ</b> .....	<b>21</b>
2.1 Εισαγωγή .....	21
2.2 Αρχή του Rumsey .....	21
2.3 Διατάξεις κεραιών.....	23
2.4 Λογαριθμική περιοδική διάταξη.....	24
2.5 Λογαριθμική περιοδική κεραία με δίπολα.....	25
2.6 Ενεργός περιοχή.....	26
2.7 Τρόποι σύνδεσης.....	27
2.8 Απόδοση.....	29
3.1 Παράμετροι σχεδίασης.....	31
3.2 Διάγραμμα του Carrel .....	32
3.3 Υπολογισμοί παραμέτρων .....	33



3.4 Σχεδίαση με το NEC.....	38
<b>4. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ .....</b>	<b>41</b>
4.1 Λύσεις που έχουν προταθεί .....	41
4.2 Στοιχειοκεραίες.....	42
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>54</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>55</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....</b>	<b>57</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....</b>	<b>58</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ .....</b>	<b>59</b>

# Κεφάλαιο 1

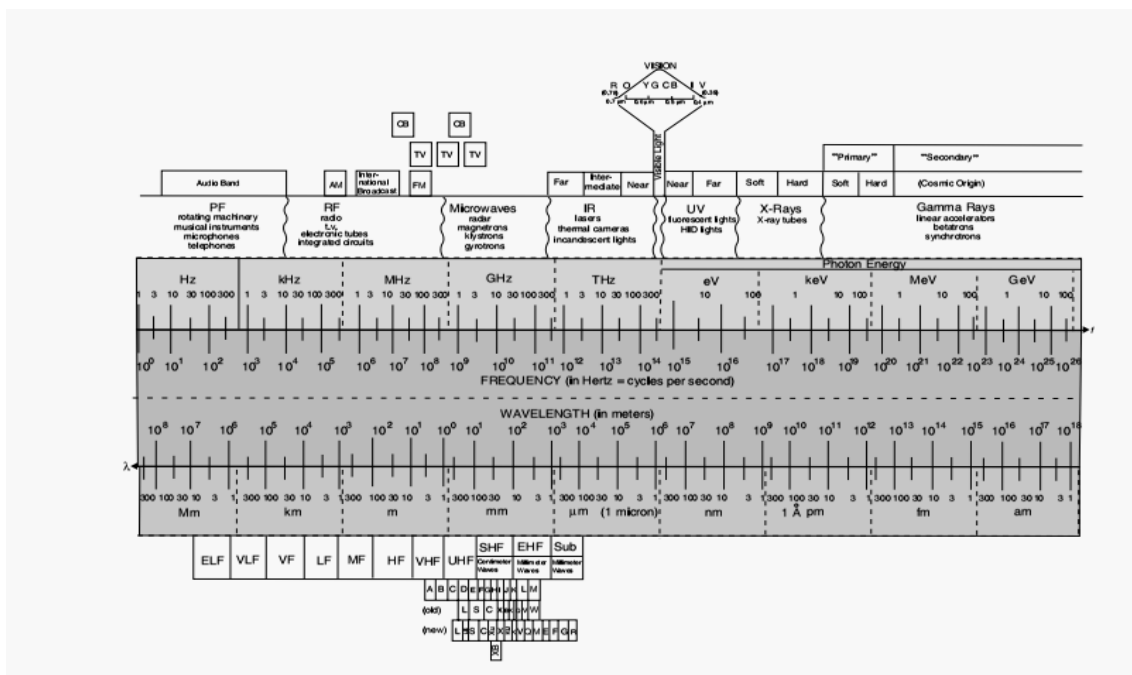
## 1. Οι φυσικές αρχές

### 1.1 Εισαγωγή

Προτού αναφερθούν περισσότερα για το θέμα της εργασίας, είναι αναγκαίο να παρουσιαστούν οι αρχές και οι νόμοι που διέπουν τη λειτουργία των κεραιών. Η κεραία είναι μια συσκευή ικανή να μεταδίδει και να λαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι διαδιδόμενη στο χώρο ακτινοβολία που μεταφέρει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Ένα κύμα χαρακτηρίζεται από τη συχνότητα,  $f$ , η οποία μετράται σε Hertz και το μήκος κύματος,  $\lambda$ , το οποίο δίνεται σε φυσικές διαστάσεις μήκους, δηλαδή σε m. Η σχέση μεταξύ μήκους κύματος και συχνότητας δίνεται από τον θεμελιώδη νόμο:

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

Εξερευνώντας το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συναντώνται διαφορετικές υπηρεσίες και διαφορετικά φυσικά φαινόμενα. Ακολουθεί ένας ενδεικτικός πίνακας συχνοτήτων και υπηρεσιών:



Εικόνα 1.1: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Whitaker (Ed.), 2005)

## 1.2 Κυματική εξίσωση

Στην κλασική φυσική ένα κύμα είναι μια μηχανική ή ηλεκτρομαγνητική διαταραχή η οποία διαδίδεται σε ένα μέσο χωρίς μεταφορά ύλης. Στη σύγχρονη φυσική μπορεί να είναι οποιοδήποτε στοιχείο σε κίνηση πχ. φωτόνιο, ηλεκτρόνιο, πρωτόνιο, νεutrίνο, κλπ. Γενικά, ένα κύμα χαρακτηρίζεται από μια βαθμωτή ή διανυσματική κυματική συνάρτηση  $u$ , η οποία εξαρτάται από χωρικές και χρονικές συντεταγμένες.

Στην μονοδιάστατη περίπτωση, και χωρίς παραμορφώσεις, η συνάρτηση αυτή θα ικανοποιεί την εξής αρχή. Μια διαταραχή στην πηγή,  $u_0 = f(t)$ , παράγει την ίδια διαταραχή στο σημείο  $x$ , με με χρονική καθυστέρηση  $x/v$ , δηλαδή  $u = f(t - \frac{x}{v})$ . Αυτή η κυματική συνάρτηση  $u$  ικανοποιεί την εξίσωση της διάδοσης, που καλείται εξίσωση του d'Alembert:

$$\delta_{xx}^2 u(x, t) - \frac{1}{v^2} \delta_t^2 u(x, t) = 0$$

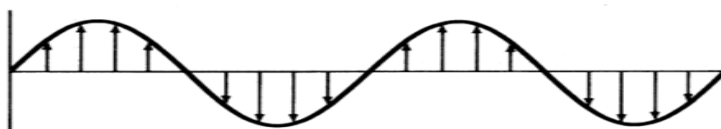
Αυτή η γραμμική, δεύτερης τάξης μερική διαφορική εξίσωση περιγράφει τη διάδοση πολλών τύπων κυμάτων σε ιδανικό μέσο στο οποίο δε χάνεται ενέργεια και δεν αλλάζει το σχήμα των κυμάτων. Η ταχύτητα,  $v$ , που παρουσιάζεται εδώ είναι η ταχύτητα μετάδοσης. Εύκολα μπορεί να επαληθεύσει κανείς πως η εξίσωση του d'Alembert δέχεται λύσεις της μορφής

$$u^+ = f\left(t - \frac{x}{v}\right) \text{ και } u^- = g\left(t + \frac{x}{v}\right)$$

Η πρώτη εκ των δύο λύσεων μετατοπίζεται προς τη μία κατεύθυνση ενώ η άλλη προς την αντίθετη. Εφόσον η αρχική εξίσωση είναι γραμμική, θα ικανοποιεί το θεώρημα της επαλληλίας και έτσι οι παραπάνω λύσεις  $u^+$  και  $u^-$  μπορούν να υπερτεθούν δίνοντας λύσεις της μορφής

$$u(x, t) = f\left(t - \frac{x}{v}\right) + g\left(t + \frac{x}{v}\right)$$

Μια διαταραχή σημαντική στην κυματική ανάλυση είναι η απλή αρμονική. Παράγεται από μια απλή αρμονική ταλάντωση στην πηγή,  $f(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$ . (Haupt, 2010)



Εικόνα 1.2: Πεδίο  $E$  κεραίας (Balanis, 2016)

### 1.3 Εξισώσεις του Maxwell

Οι νόμοι που διέπουν μια κεραία είναι αυτοί του ηλεκτρομαγνητισμού. Έχουν περιγραφεί από τις εξισώσεις του Maxwell. Είναι εξισώσεις γραμμένες με τη βοήθεια νόμων της διανυσματικής ανάλυσης και μπορούν να εκφραστούν σε διάφορες μορφές. Η ολοκληρωτική τους μορφή, που είναι και πιο εύκολη να κατανοηθεί διαισθητικά δίνεται αμέσως στο σύστημα **SI** (Singh, 2011).

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho_V dV$$

$$\oiint_{\partial\Omega} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{L} = \int_S (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

Δεν θα γίνει περαιτέρω ανάλυση τους στο συγκεκριμένο σημείο μα θα παρουσιαστούν και σε ακόμα μία μορφή. Αυτή είναι η διαφορική τους μορφή στην οποία μπορούμε να φθάσουμε χρησιμοποιώντας το θεώρημα της απόκλισης από τη διανυσματική ανάλυση. Αυτό παρουσιάζεται αμέσως δίχως επεξήγηση:

$$\iiint_V (\nabla \cdot \mathbf{F}) = \oiint_S (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) dS$$

Οπότε, προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Με τις παραπάνω εξισώσεις και το νόμο του Faraday για τη δύναμη Lorentz μπορούμε να εξηγήσουμε σε μακροσκοπική κλίμακα τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα. Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν και το χώρο αναφοράς μπορούν να προκύψουν διάφορες απλοποιήσεις οι οποίες δε θα αναφερθούν στο παρόν κείμενο.

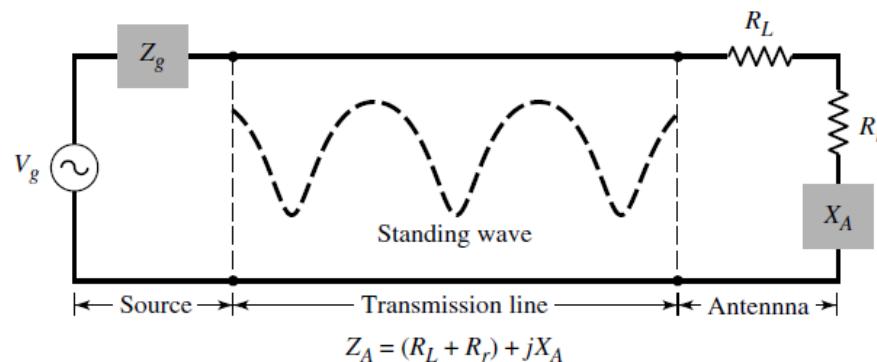
Οι εξισώσεις αυτές είναι απαραίτητες για να μελετηθεί η παρουσία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο χώρο. Καθώς γίνεται λόγος για κύματα θα γραφεί εκ νέου η κυματική εξίσωση, η οποία είναι μια μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη μετατόπιση:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u$$

## 1.4 Μοντέλα κεραίας

### 1.4.1 Κυκλωματικό στοιχείο

Η πορεία ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ξεκινά από την πηγή, διέρχεται μέσω γραμμής μεταφοράς και φθάνει στην κεραία από όπου συνεχίζει την πορεία του στο χώρο. Μόλις φθάσει στην πλευρά του δέκτη, η πορεία είναι αντίστροφη. Ένα σύστημα μετάδοσης, δηλαδή, αποτελείται από μια ταλαντευόμενη πηγή για να παραχθεί το σήμα, μια γραμμή μεταφοράς ή κυματοδηγό, και μια κεραία για τη μετατροπή του σήματος σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Οι γραμμές μεταφοράς και οι συνδέσεις μεταξύ της πηγής και της κεραίας γίνονται πιθανές αιτίες υποβάθμισης του σήματος εξαιτίας κακής προσαρμογής, απωλειών ακτινοβολίας και θερμικών απωλειών. (Haupt, 2010)



Εικόνα 3: Κυκλωματική αναπαράσταση κεραίας (Balanis, 2016)

Ένα οδηγούμενο κύμα κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς υπόκειται σε ανακλάσεις από κάθε ασυνέχεια, ή οποιοδήποτε σημείο στο οποίο η σύνθετη αντίσταση μεταβάλλεται. Αυτές οι ανακλάσεις δημιουργούν ένα στάσιμο κύμα στη γραμμή μεταφοράς το οποίο αποθηκεύει ενέργεια και κατά συνέπεια μειώνει τη συνολική ενέργεια που αποδίδεται στο φορτίο, το οποίο σε αυτή την περίπτωση είναι η κεραία. Κατά συνέπεια η λειτουργία της κεραίας υποβαθμίζεται σημαντικά. Ο λόγος στάσιμου κύματος (SWR) είναι ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή τάσης του στάσιμου κύματος που δημιουργείται λόγω των ανακλάσεων. Αποτελεί μια συνήθη μέτρηση για το ταίριασμα των διαφόρων στοιχείων και υπολογίζεται ως εξής:

$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|}$$

Τιμή του SWR ίση με 1 υποδεικνύει τέλειο ταίριασμα. Η ποσότητα  $\Gamma_L$  αντιπροσωπεύει το συντελεστή ανάκλασης στο σημείο ασυνέχειας. Ο συντελεστής ανάκλασης είναι ο λόγος των τάσεων στο σημείο ασυνέχειας:

$$\Gamma_L = \frac{V_{reflected}}{V_{incident}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

#### 1.4.2 Χωρικό φίλτρο

Οι κεραίες δεν ακτινοβολούν ενέργεια ιστροπικά, δηλαδή το ίδιο σε όλες τις κατευθύνσεις. Αντιθέτως, μια κεραία είναι ένα χωρικό φίλτρο το οποίο συγκεντρώνει ενέργεια σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις ενώ αντίστοιχα μειώνει την ακτινοβολούμενη ισχύ σε άλλες. Η πυκνότητα ισχύος ( $W/m^2$ ) που ακτινοβολείται από μία κεραία δίνεται ως:

$$S_r = \frac{1}{2\eta r^2} (E_\theta^2 + E_\phi^2)$$

Η κατευθυντικότητα μιας κεραίας είναι ένα μέγεθος το οποίο συγκρίνει την πυκνότητα ισχύος σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση προς τη συνολική πυκνότητα ισχύος. Εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά, εννοείται πως η μέγιστη τιμή κατευθυντικότητας δίνεται ως εξής:

$$D = \frac{4\pi S_{r,max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi S_r \sin\theta d\theta d\phi}$$

Το κέρδος μιας κεραίας είναι ο λόγος της ισχύος που ακτινοβολείται σε κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση προς την ισχύ που καταφθάνει στην κεραία. Το κέρδος είναι μέγεθος διαφορετικό από την κατευθυντικότητα εξαιτίας των απωλειών που περιλαμβάνονται. Ως εκ τούτου, η τιμή της κατευθυντικότητας είναι πάντα μεγαλύτερη ή ίση του κέρδους. Ο παρονομαστής της παραπάνω εξίσωσης που δίνει την κατευθυντικότητα μπορεί να αντικατασταθεί από την ισχύ που φθάνει στην κεραία, αποφεύγοντας έτσι τη διπλή ολοκλήρωση. Κέρδος και κατευθυντικότητα σχετίζονται μέσω της αποδοτικότητας,  $\delta_e$ . Ισχύει:

$$G(\theta, \varphi) = \delta_e \cdot D(\theta, \varphi)$$

Όποτε το κέρδος γράφεται χωρίς γωνιακή εξάρτηση, υπονοείται πως εκφράζεται στη διεύθυνση μέγιστου κέρδους. Καθώς το κέρδος είναι λόγος ισχύος, συχνά εκφράζεται σε decibels (dB) ως εξής:

$$G_{dB} = 10 \cdot \log_{10} G = 10 \cdot \log G$$

Ακόμα ένα σημαντικό μέγεθος σχετικό με το κέρδος μιας κεραίας είναι η ισοδύναμη ισότροπα ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP). Το μέγεθος αυτό είναι το κέρδος της ακτινοβολούμενης κεραίας πολλαπλασιασμένο με την ισχύ που παρέχεται στην είσοδο της κεραίας.

$$EIRP = P_t \cdot G$$

Η μεταδιδόμενη ισχύς καθορίζεται από το συνδυασμό πομπού και κεραίας. Το μέγεθος EIRP είναι ιδιαίτερα σημαντικό για δορυφορικές κεραίες όπου η ισχύς και το μέγεθος της κεραίας είναι ιδιαίτερα σημαντικές παράμετροι. (Haupt, 2010)

### 1.4.3 Φίλτρο συχνοτήτων

Οι κεραίες εκπέμπουν και λαμβάνουν συγκεκριμένες συχνότητες καλύτερα από άλλες, και έτσι μια κεραία λειτουργεί ως ένα φίλτρο συχνοτήτων. Οι κεραίες των οποίων η λειτουργία περιορίζεται σε ένα πολύ μικρό εύρος συχνοτήτων είναι γνωστές ως κεραίες στενής ζώνης. Αυτές των οποίων η λειτουργία εκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων είναι γνωστές ως κεραίες ευρείας ζώνης ή ευρυζωνικές κεραίες. Συνήθως μια κεραία στενής ζώνης είναι σχετικά απλή σχηματικά, όπως ένα δίπολο. Το απλό σχήμα επιτρέπει στο ρεύμα να ταλαντώνεται σε μια καλά καθορισμένη περιοχή. Από την άλλη, οι κεραίες ευρείας ζώνης έχουν πιο περίπλοκο σχήμα, όπως μια έλικα ή ένα σπирάλ. Το περίπλοκο σχήμα δίνει στην κεραία τη δυνατότητα να λειτουργεί σε πολλές διαφορετικές γειτονικές περιοχές.

Το εύρος ζώνης μιας κεραίας συνήθως διατυπώνεται με έναν από τους παρακάτω τρεις τρόπους:

$$BW = \frac{f_H - f_L}{f_{center}} \times 100$$

$$BW = \frac{f_H}{f_L}$$

$$BW = f_H - f_L$$

Μια κεραία ευρείας ζώνης είτε έχει bandwidth 10% ή μεγαλύτερο είτε λειτουργεί τουλάχιστον σε μια οκτάβα συχνοτήτων. Μια οκτάβα συχνοτήτων έχει την ιδιότητα  $\frac{f_H}{f_L} = 2$ . Οι υπερευρυζωνικές κεραίες έχουν εύρος ζώνης  $BW > 25\%$ .



Ο ορισμός των μεγεθών  $f_H$  και  $f_L$  δεν είναι εύκολος. Κάποιοι τρόποι με τους οποίους ορίζονται είναι οι εξής:

- Ως συνάρτηση του κέρδους της κεραίας.  $f_{center}$  είναι η συχνότητα που αντιστοιχείς το μεγαλύτερο κέρδος.  $f_H$  είναι η υψηλότερη συχνότητα για την οποία το κέρδος δεν έχει πέσει χαμηλότερα από -3dB, ενώ  $f_L$  είναι η χαμηλότερη συχνότητα για την οποία το κέρδος δεν έχει πέσει χαμηλότερα από -3dB.
- Ως συνάρτηση του SWR.  $f_{center}$  είναι η συχνότητα στην οποία γίνεται η βέλτιστη προσαρμογή της κεραίας.  $f_H$  είναι η υψηλότερη συχνότητα για την οποία ο λόγος στάσιμων είναι μικρότερος του 2, ενώ  $f_L$  είναι η μικρότερη συχνότητα για την οποία ο λόγος στάσιμων είναι μικρότερος του 2.
- Ως συνάρτηση κάποιου σημαντικού χαρακτηριστικού απόδοσης της κεραίας. Στη περίπτωση αυτή, τα όρια  $f_H$  και  $f_L$  ορίζουν το εύρος στο οποίο ο δείκτης απόδοσης βρίσκεται μεταξύ των αποδεκτών ορίων.

Το εύρος ζώνης μπορεί να αναφέρεται είτε στο στιγμιαίο εύρος ζώνης είτε στο λειτουργικό εύρος ζώνης. Το στιγμιαίο εύρος ζώνης είναι το εύρος ζώνης του σήματος στην κεραία, ενώ το λειτουργικό εύρος ζώνης είναι το εύρος ζώνης της κεραίας και είναι μεγαλύτερο του στιγμιαίου. (Haupt, 2010)

#### 1.4.4 Συλλέκτης

Μια κεραία λειτουργεί ως συλλέκτης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο το οποίο προσπίπτει στην κεραία προξενεί την ταλάντωση των φορτίων στην λαμβάνουσα κεραία. Αν τα φορτία ταλαντώνονται στον ίδιο ρυθμό με το προσπίπτον πεδίο, ένα μέρος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου επανεκπέμπεται σαν κύμα ίδιας συχνότητας με το προσπίπτον κύμα. Το υπόλοιπο είτε μετατρέπεται σε θερμότητα είτε αποδίδεται σε κάποιο φορτίο, όπως ένας δέκτης. Το συνολικό ρεύμα το οποίο επάγεται από το προσπίπτον κύμα μπορεί να παρασταθεί από μια πυκνότητα ρεύματος κατανεμημένη σε μια περιοχή που καλείται άνοιγμα συλλέκτη ( $A_c$ ). (Haupt, 2010)

Οι περιοχές γύρω από τις οποίες η συνολική ενέργεια φθάνει στο δέκτη, σκεδάζεται ή διαχέεται αντίστοιχα, αντιπροσωπεύονται από το ισοδύναμο άνοιγμα συλλέκτη ( $A_e$ ), το άνοιγμα σκέδασης ( $A_s$ ) και το άνοιγμα απωλειών ( $A_L$ ). Για τα μεγέθη αυτά ισχύει η απλή σχέση:

$$A_c = A_e + A_s + A_L$$

Όλα τα παραπάνω μεγέθη έχουν μονάδες περιοχής, όμως δεν είναι κατ' ανάγκη συσχετισμένα με την περιοχή της κεραίας. Η ισχύς που φθάνει στο άκρο μιας κεραίας λήψης είναι ίση με την πυκνότητα ισχύος του προσπίπτοντος κύματος πολλαπλασιασμένη με το ισοδύναμο άνοιγμα της κεραίας:

$$P_t = S_i \cdot A_e$$

Η παραπάνω σχέση είναι όμοια με τη σχέση που δίνει την ισοδύναμη ισότροπα ακτινοβολούμενη ισχύ (EIRP). Το ισοδύναμο άνοιγμα σχετίζεται με το κέρδος μέσω της σχέσης

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

Το ισοδύναμο άνοιγμα είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή κεραιών λήψης, ενώ το κέρδος είναι μέγεθος που περιγράφει κεραίες και εκπομπής αλλά και λήψης.

#### 1.4.5 Φίλτρο πόλωσης

Η πόλωση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος περιγράφει πως το πλάτος και ο προσανατολισμός του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου μεταβάλλεται χρονικά σε ένα δοθέν σημείο στο χώρο. Η πόλωση μιας κεραίας ορίζεται ως η πόλωση του κύματος που εκπέμπεται από την κεραία. Ο προσανατολισμός του χρονικά μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι σημαντικός επειδή καθορίζει τον προσανατολισμό του ρεύματος που επάγεται στο αντικείμενο. Υπενθυμίζεται πως το ρεύμα ρέει προς την ίδια κατεύθυνση με το ηλεκτρικό πεδίο. Ο προσανατολισμός μιας κεραίας εκπομπής, μιας κεραίας λήψης και οποιοδήποτε εμποδίου στη μεταξύ τους απόσταση, επηρεάζει την ποσότητα της λαμβανόμενης ισχύος. (Haupt, 2010)

Υποθέτοντας πως η κατεύθυνση διάδοσης του ηλεκτρικού πεδίου είναι στον άξονα z, το ηλεκτρικό πεδίο κείται στο επίπεδο x-y. Η αρμονική αναπαράσταση του πεδίου θα είναι:

$$\vec{E}(t) = E_{x0} \cdot \cos(\omega t - kz) \hat{x} + E_{y0} \cdot \cos(\omega t - kz + \Psi_y) \hat{y} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y}$$

Άρα,

$$E_x = E_{x0} \cdot \cos(\omega t)$$

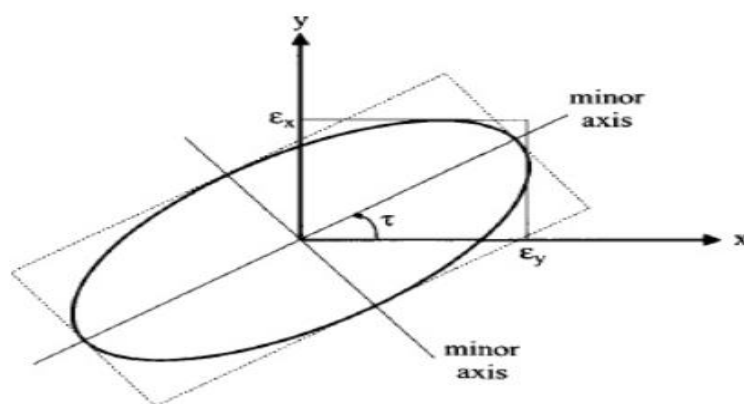
$$E_y = E_{y0} \cdot \cos(\omega t + \Psi_y)$$

Λύνοντας τις παραπάνω εξισώσεις, καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση η οποία περιγράφει τους ορθογώνιους συντελεστές του διαδιδόμενου επιφανειακού κύματος.

$$aE_x^2 - bE_xE_y + cE_y^2 = 1$$

$$\text{Όπου } a = \frac{1}{E_{x0}^2 \cdot \cos^2 \psi_y}, b = \frac{2 \sin \psi_y}{E_{x0} E_{y0} \cos^2 \psi_y}, c = \frac{1}{E_{y0}^2 \cdot \cos^2 \psi_y}$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι εξίσωση έλλειψης. Το σχήμα της φαίνεται αμέσως:



Εικόνα 4: Σχήμα έλλειψης (Haupt, 2010)

Μια έλλειψη χαρακτηρίζεται από (α) το λόγο αξόνων (AR), που ορίζεται ως ο λόγος των αξόνων της έλλειψης, (β) τον προσανατολισμό, που αντιπροσωπεύεται από τη γωνία του κύριου άξονα της έλλειψης με το άξονα x του συστήματος συντεταγμένων. Δύο ακραίες περιπτώσεις έχουμε όταν  $AR = \infty$  και όταν  $AR = 1$ .

Όταν  $AR = \infty$ , ο μικρότερος άξονας της έλλειψης είναι ίσος με μηδέν οπότε η τροχιά διαγράφει μια ευθεία γραμμή. Από την άλλη, όταν  $AR = 1$ , ο άξονας μεγίστου είναι ίσος σε μήκος με τον μικρότερο άξονα οπότε η τροχιά διαγράφει κύκλο.

Στην πράξη, η πόλωση της ακτινοβολούσας ενέργειας ποικίλει καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο της κεραίας, οπότε διαφορετικά μέρη μπορεί να έχουν διαφορετική πόλωση.

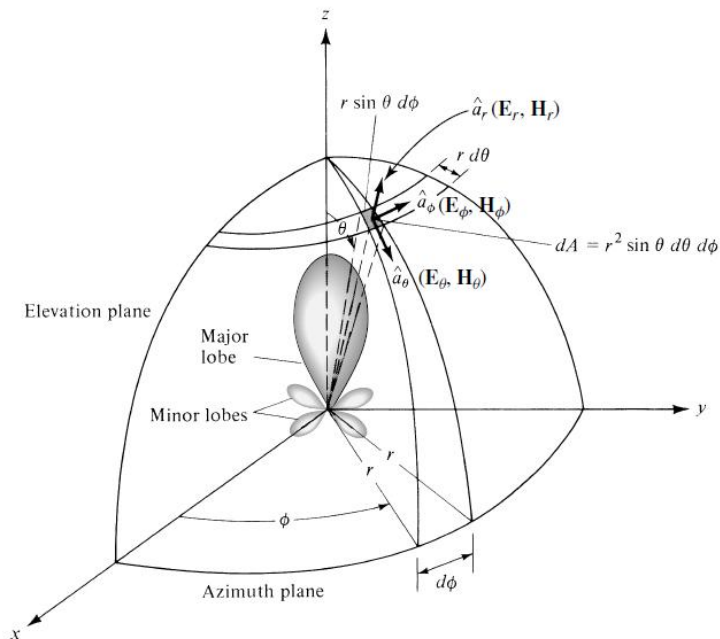
## 1.5 Σύστημα συντεταγμένων

Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται για να περιγραφεί μια κεραία είναι αυτό των σφαιρικών συντεταγμένων. Οι εξισώσεις που συνδέουν τις σφαιρικές συντεταγμένες με τις καρτεσιανές είναι:

$$x = r \cdot \cos\varphi$$

$$y = r \cdot \sin\varphi$$

Ένα σχεδιάγραμμα δίνεται αμέσως:



Εικόνα 5: Σύστημα συντεταγμένων για την ανάλυση κεραιών (Balanis, 2016)

Ο χώρος που περιβάλλει μια κεραία διακρίνεται σε τρεις περιοχές (Balanis, 2016):

- Την κοντινή περιοχή:

Στην περιοχή αυτή δεν ακτινοβολείται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Τα όρια της ορίζονται ως σφαίρα με ακτίνα

$$R = 0.62 \cdot \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

- Την περιοχή Fresnel:

Στην περιοχή αυτή που βρίσκεται μεταξύ κοντινής και μακρινής περιοχής ακτινοβολείται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μα οι συνιστώσες του πεδίου εμφανίζουν ακτινική εξάρτηση. Η εξωτερική ακτίνα της σφαίρας που την περιβάλλει είναι

$$R = 2 \cdot \frac{D^2}{\lambda}$$

- Τη μακρινή περιοχή:

Στην περιοχή αυτή που εκτείνεται μετά τις δύο πρώτες περιοχές, είναι χαρακτηριστικό πως οι εγκάρσιες συνιστώσες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ανεξάρτητες από την ακτινική συνιστώσα.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

---

### 2. Ανεξαρτησία από τη συχνότητα

#### 2.1 Εισαγωγή

Οι σύγχρονες τάσεις στον τομέα των τηλεπικοινωνιών έχουν καταστήσει γενικά τις κεραίες ένα πολύ σημαντικό θέμα. Οι κεραίες που διαθέτουν την ιδιότητα της ανεξαρτησίας από τη συχνότητα γίνονται ολοένα και πιο αναγκαίες δεδομένων των εξελίξεων. Οι εξελίξεις αυτές έχουν κάνει την πρόσβαση μεγάλου μέρους χρηστών σε πολύ εκτενή τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος καθημερινότητα. Ισοδύναμα, με την πάροδο του χρόνου ανακλύπουν συνεχώς νέες υπηρεσίες που με τη σειρά τους κάνουν χρήση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σε μεγάλο βαθμό.

Τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας μιας απλής κεραίας, πχ ενός διπόλου, είναι πολύ ευαίσθητα ως προς τη συχνότητα. Ο βαθμός κατά τον οποίο μεταβάλλονται ως συνάρτηση της συχνότητας εξαρτάται από το εύρος ζώνης της κεραίας. Εφαρμογές που απαιτούν τη χρήση μεγάλου μέρους του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, όπως η λήψη όλων των καναλιών της τηλεόρασης, χρειάζονται και ευρυζωνικές κεραίες. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές κατασκευές κεραιών που μπορούν να εκμεταλλευτούν ευρεία φάσματα.

#### 2.2 Αρχή του Rumsey

Υπάρχει μια κλάση κεραιών των οποίων το διάγραμμα ακτινοβολίας, όπως και η σύνθετη αντίσταση, είναι πρακτικά ανεξάρτητα από τη συχνότητα. Μια κεραία με εύρος ζώνης 10:1 ή μεγαλύτερο αναφέρεται ως ανεξάρτητη από τη συχνότητα. Ένα

σημαντικό χαρακτηριστικό που παρουσιάζει η συγκεκριμένη κατηγορία κεραιών είναι η ιδιότητα της αυτό-κλιμάκωσης (Rumsey, 1957).

Η μελέτη των κεραιών που εμφανίζουν την ιδιότητα της ανεξαρτησίας από τη συχνότητα έγινε από τον Rumsey γύρω στο 1950 (Rumsey, 1957). Η αρχή του Rumsey αναφέρει ότι η αντίσταση και τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας μιας κεραίας θα είναι ανεξάρτητα από τη συχνότητα εάν το σχήμα της κεραίας ορίζεται μόνο από γωνίες. Οι κεραίες αυτές εισήχθησαν από τον Rumsey και τον Dyson στα τέλη της δεκαετίας του '50.

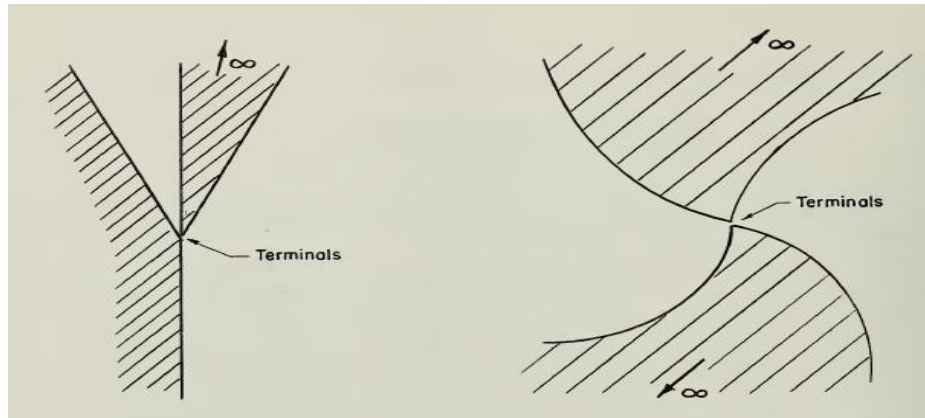
Η γενική εξίσωση για το σχήμα τους είναι:

$$r = e^{a(\varphi+\varphi_0)} \cdot F(\theta)$$

Οι μεταβλητές  $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  είναι οι συνήθεις σφαιρικές συντεταγμένες ενώ τα  $a$ ,  $\varphi_0$  είναι σταθερές και η  $F(\theta)$  οποιαδήποτε συνάρτηση του  $\theta$ . Για αυτές τις κεραίες μια αλλαγή στη συχνότητα ισοδυναμεί με μια περιστροφή στον άξονα  $\theta = 0$ .

Θεωρητικά, οι κεραίες αυτές έχουν χαρακτηριστικά όπως διάγραμμα ακτινοβολίας, αντίσταση εισόδου και πόλωση, τα οποία παραμένουν αναλλοίωτα για ένα σχεδόν άπειρο εύρος ζώνης. Αυτό έχει ως βάση την αρχή της κλιμάκωσης ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας. Πράγματι, είναι γνωστό πως με τη μείωση των διαστάσεων μιας ακτινοβόλου δομής κατά ένα παράγοντα  $k$ , η συχνότητα λειτουργίας θα αυξηθεί κατά τον ίδιο παράγοντα  $k$ , ενώ όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά θα παραμείνουν ως είχαν. Άρα, είναι αναγκαίο η κεραία να δημιουργηθεί από στοιχεία που μπορούν να προκύψουν το ένα από το άλλο με ομοιοθεσία. Η δομή της έτσι θα ορίζεται μόνο από γωνίες και έτσι θα είναι άπειρη. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που πρέπει να ικανοποιεί μια κεραία για να έχει το χαρακτηριστικό της ανεξαρτησίας από τη συχνότητα περιλαμβάνουν και την ιδιότητα της αυτό-ομοιότητας (Hohlfeld & Cohen, 2011).

Ομοιοθεσία είναι ο γεωμετρικός μετασχηματισμός στον οποίο υπάρχει ένα χαρακτηριστικό σημείο που λέγεται κέντρο της ομοιοθεσίας και ένας χαρακτηριστικός πραγματικός αριθμός που καλείται λόγος της ομοιοθεσίας. (Παμφίλος, 2019) Κάθε δiάνυσμα που ορίζεται με αρχή το κέντρο και πέρας ένα τελικό σημείο ισούται με το βαθμωτό γινόμενο του λόγου με το δiάνυσμα με αρχή το κέντρο και πέρας το αντίστοιχο αρχικό σημείο. Πρακτικά, η ομοιοθεσία είναι μεγέθυνση με ακίνητο κέντρο αν ο λόγος είναι μεγαλύτερος της μονάδας και σμίκρυνση αν ο λόγος είναι θετικός μικρότερος της μονάδας. Αν ο λόγος είναι αρνητικός, τότε το αποτέλεσμα είναι περιστροφή  $180^\circ$  γύρω από το κέντρο και έπειτα μεγέθυνση ή σμίκρυνση όπως παραπάνω.



Εικόνα 6: Κωνικές επιφάνειες (Rumsey, 1957)

### 2.3 Διατάξεις κεραιών

Η αρχή του Rumsey οδηγεί σε ενδιαφέρουσες διατάξεις κεραιών. Τα σχήματα που προκύπτουν όμως θα πρέπει να είναι άπειρα σε μέγεθος. Επειδή πρακτικά αυτό είναι αδύνατο, η αποκοπή σε κάποιο σημείο είναι αναπόφευκτη. Αυτό οδηγεί σε ανακλάσεις στο σημείο αποκοπής και έτσι έχουμε τροποποιημένη σύνθετη αντίσταση και χαρακτηριστικά ακτινοβολίας.

Ξεκινώντας, υποθέτουμε πως μια κεραία, της οποίας η γεωμετρία περιγράφεται καλύτερα με τη βοήθεια των σφαιρικών συντεταγμένων  $(r, \theta, \varphi)$ , έχει στελέχη δίπλα στην πηγή και είναι συμμετρικά διατεταγμένα κατά τους άξονες  $\theta = 0, \theta = \pi$ . Υποτίθεται ότι ο χώρος είναι ομογενής, ισότροπος, και η κεραία πλήρως αγωγίμη.

Έστω ότι η κεραία, είτε η περιβάλλουσα της, περιγράφεται από τη σχέση:

$$r = F(\theta, \varphi)$$

Αν η κεραία χρησιμοποιηθεί σε μια συχνότητα που είναι  $k$  φορές μικρότερη από την αρχική, οι φυσικές διαστάσεις θα πρέπει να αυξηθούν κατά τον παράγοντα  $k$  ώστε να διατηρηθούν τα ηλεκτρικά μεγέθη. Επομένως,

$$\acute{r} = k \cdot F(\theta, \varphi)$$

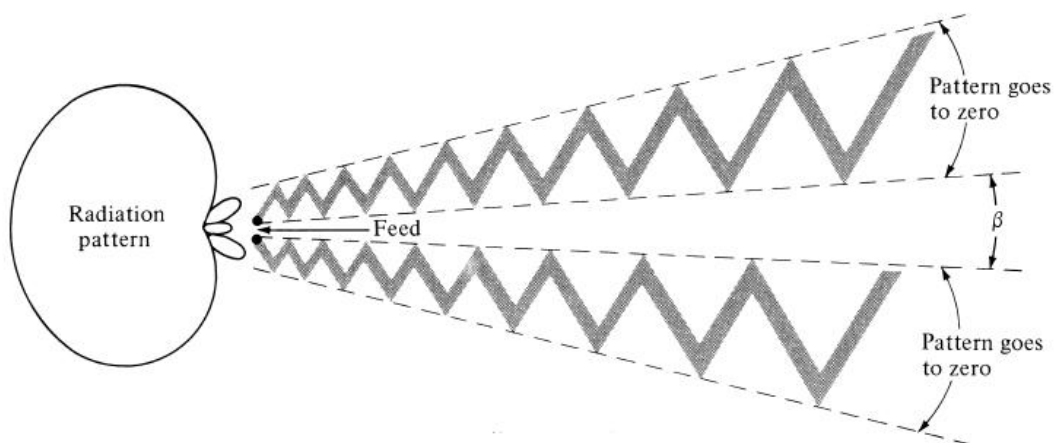
Οι δύο επιφάνειες είναι πανομοιότυπες, δηλαδή όχι απλώς όμοιες αλλά και ισόμορφες. Η λύση των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει μετά από παραγωγή και είναι όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω:

$$r = F(\theta, \varphi) = e^{a\varphi} f(\theta), \text{ όπου } a = \frac{1}{K} \cdot \frac{dK}{dC}$$

Επομένως, για να έχει μια κεραία χαρακτηριστικά που είναι ανεξάρτητα από τη συχνότητα θα πρέπει η επιφάνεια της να περιγράφεται από την παραπάνω εξίσωση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας είτε τη συνάρτηση  $f(\theta)$ , είτε τις παραγώγους της. Έτσι, προκύπτουν πολύ ενδιαφέροντες, πρακτικές και εξαιρετικά χρήσιμες διαρρυθμίσεις κεραιών. Σε αυτές συγκαταλέγονται κεραίες σπирάλ, κωνικές κεραίες, και λογαριθμικές περιοδικές κεραίες.

## 2.4 Λογαριθμική περιοδική διάταξη

Μια κατασκευή που παραλληλίζει πιστά την ιδέα της ανεξαρτησίας από τη συχνότητα εισήχθη από τους Isbell και DuHamel και είναι η λογαριθμική περιοδική διάταξη. Ολόκληρο το σχήμα της δεν μπορεί να περιγραφεί μόνο από γωνίες και για αυτό δεν είναι πραγματικά ανεξάρτητη. Ο Isbell (Isbell, 1959) αναφέρει χαρακτηριστικά πως για να είναι χρήσιμη η λογαριθμική περιοδική διάταξη σαν ένας πρακτικός, ευρείας ζώνης ακτινοβολητής πρέπει να είναι δυνατό να περικοπεί η διάταξη ώστε για όλες τις συχνότητες υπεράνω κάποιου κατώτερου ορίου η προκύπτουσα κεραία να συμπεριφέρεται όπως και η άπειρη διάταξη. Μια τυπική διάταξη παρουσιάζεται αμέσως:



Εικόνα 7: Τυπική διάταξη λογαριθμικής περιοδικής κεραίας (Balanis, 2016)

Το σχήμα της διάταξης μπορεί να περιγραφεί σε σφαιρικές συντεταγμένες από την εξίσωση:

$$\theta = \text{περιοδική συνάρτηση του } b \cdot \ln(r)$$

Ένα παράδειγμα τέτοιου σχήματος έχει ως εξίσωση:



$$\theta = \theta_0 \sin \left[ b \cdot \ln \left( \frac{r}{r_0} \right) \right]$$

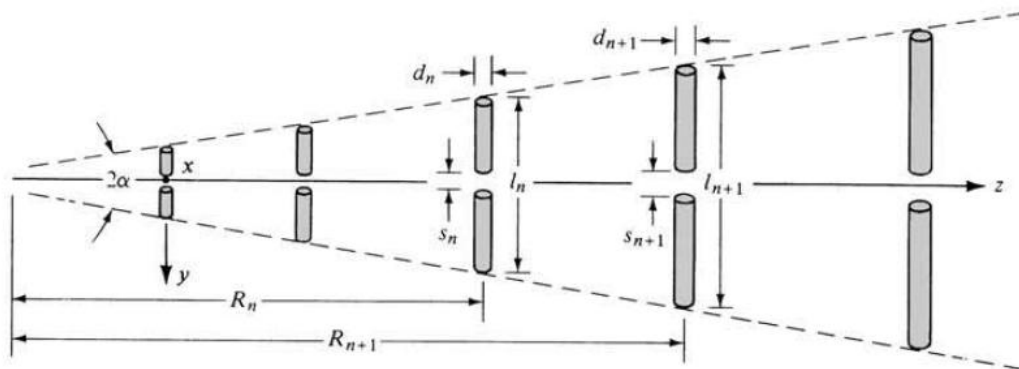
Είναι εμφανές πως οι τιμές του  $\theta$ , επαναλαμβάνονται όποτε ισχύει:

$$b \cdot \ln \left( \frac{r}{r_0} \right) = 2\pi$$

Έτσι, η επίδοση του συστήματος είναι πλέον συνάρτηση του λογάριθμου της συχνότητας και έτσι προκύπτει και το όνομα περιοδική λογαριθμική (Balanis, 2016). Μια τυπική διάταξη φαίνεται στο παραπάνω σχήμα και αποτελείται από δύο βραχίονες σε κοινό επίπεδο. Το διάγραμμα που προκύπτει είναι μονής κατεύθυνσης προς την κορυφή της γωνίας που σχηματίζουν οι δύο βραχίονες και είναι γραμμικά πολωμένο. Αν και τα χαρακτηριστικά αυτής της διάταξης αλλά και άλλων δεν είναι τελείως ανεξάρτητα από τη συχνότητα, οι αποκλίσεις είναι μικρές. Επομένως, πρακτικά μπορούμε να πούμε πως είναι ανεξάρτητες από τη συχνότητα.

## 2.5 Λογαριθμική περιοδική κεραία με δίπολα

Η πιο διαδεδομένη λογαριθμική περιοδική διάταξη είναι αυτή που εισήγαγε ο Isbell. Αποτελείται από μια σειρά παράλληλα διατεταγμένων γραμμικών διπόλων που σχηματίζουν μια επίπεδη συστοιχία.



Εικόνα 8: Λογαριθμική περιοδική κεραία με δίπολα (Balanis, 2016)

Τα μήκη των διπόλων αυξάνονται κατά μήκος της κεραίας, έτσι ώστε η περιεχόμενη γωνία  $\alpha$  να παραμένει σταθερή. Παράλληλα, τα μήκη  $l_n$ , οι διαμέτροι  $d_n$  και τα κενά  $s_n$  των διαδοχικών στοιχείων κατανέμονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να ισχύει:

$$\frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{s_{n+1}}{s_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \tau = \text{σταθερά}$$

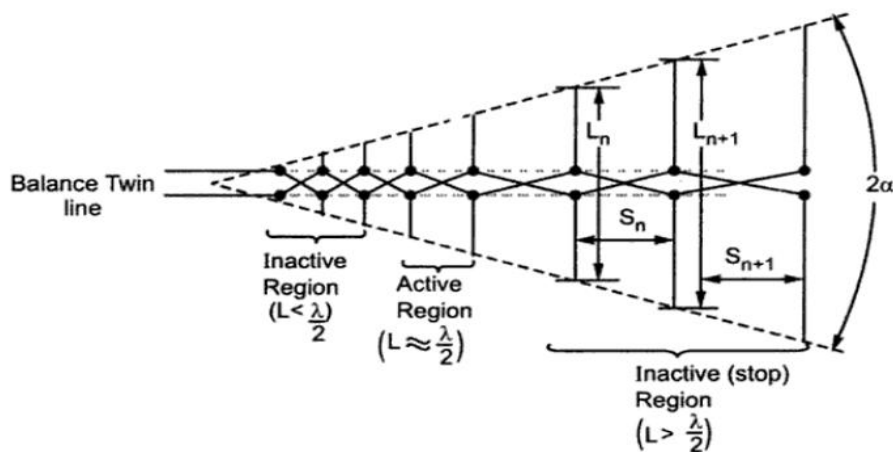
Η παραπάνω σχέση είναι γενική και ορίζεται βάση του λόγου των διαφορετικών συχνοτήτων. Έτσι, για δύο συχνότητες με διαφορά μιας περιόδου ισχύει:

$$\tau = \frac{f_1}{f_2}, \quad f_2 > f_1$$

Το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας, στις κεραίες που έχουν την ιδιότητα της ανεξαρτησίας από τη συχνότητα, προέρχεται από το μέρος στο οποίο το πλάτος είναι περίπου ίσο με το μισό του μήκους κύματος είτε η περιφέρεια είναι ίση με το μήκος κύματος. Αυτή η περιοχή ονομάζεται ενεργός περιοχή της κεραίας. Καθώς η συχνότητα μεταβάλλεται, η ενεργός περιοχή μετατοπίζεται στο τμήμα της κεραίας που έχει τα ανάλογα χαρακτηριστικά.

## 2.6 Ενεργός περιοχή

Για μήκη κύματος κοντά στο μέσον της περιοχής λειτουργίας η ακτινοβολία προκύπτει κυρίως από την κεντρική περιοχή της κεραίας. Τα στοιχεία αυτής της περιοχής έχουν μήκος περίπου ίσο με το ήμισυ του μήκους κύματος δηλαδή  $\frac{\lambda}{2}$ . Μια κεραία αυτού του τύπου, στην οποία φαίνονται οι περιοχές αυτές, απεικονίζεται αμέσως:



Εικόνα 9: Ενεργός περιοχή λογαριθμικής περιοδικής κεραίας (Bakshi, Bakshi, & Bakshi, 2009)

Τα στοιχεία 9, 10, 11 διαρρέονται από πολύ λίγο ρεύμα και έτσι ουσιαστικά η διάταξη είναι αποκομμένη στα δεξιά της ενεργής περιοχής. Αντίστοιχα, τα στοιχεία 1,

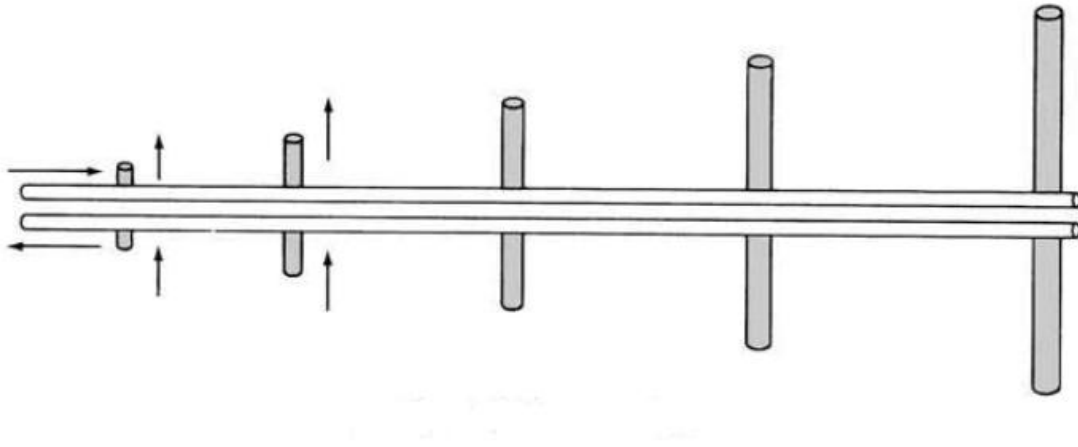
2, 3, κλπ έχουν μήκος μικρότερο του  $\frac{\lambda}{2}$  και παρουσιάζουν μια μεγάλη χωρητική αντίσταση στη γραμμή. Άρα, τα ρεύματα στις γραμμές αυτές είναι επίσης πολύ μικρά. Η εκπομπή ακτινοβολίας προκύπτει επομένως από το μέσον της διάταξης όπου τα στοιχεία είναι κοντά στο  $\lambda/2$ . Αύξηση του μήκους κύματος μετατοπίζει την περιοχή ακτινοβολίας δεξιά, ενώ μείωσή της τη μετατοπίζει προς τα αριστερά. Σε κάθε περίπτωση, πάντα χρησιμοποιείται ένα μέρος μόνο της διάταξης για την ακτινοβολία.

Η μετακίνηση της ενεργής περιοχής της κεραίας, και ως εκ τούτου του κέντρου φάσης της, είναι ένα ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό κατά τη σχεδίαση τροφοδοσίας για κεραίες ανακλαστήρες. Για το λόγο αυτό, οι λογαριθμικές περιοδικές διατάξεις δε χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό.

Στην παραπάνω εικόνα είναι εμφανής ένας τρόπος σύνδεσης των διπόλων διαφορετικός από τον αναμενόμενο. Ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ των διπόλων μπορεί να έχει τρεις μορφές, οι οποίες θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

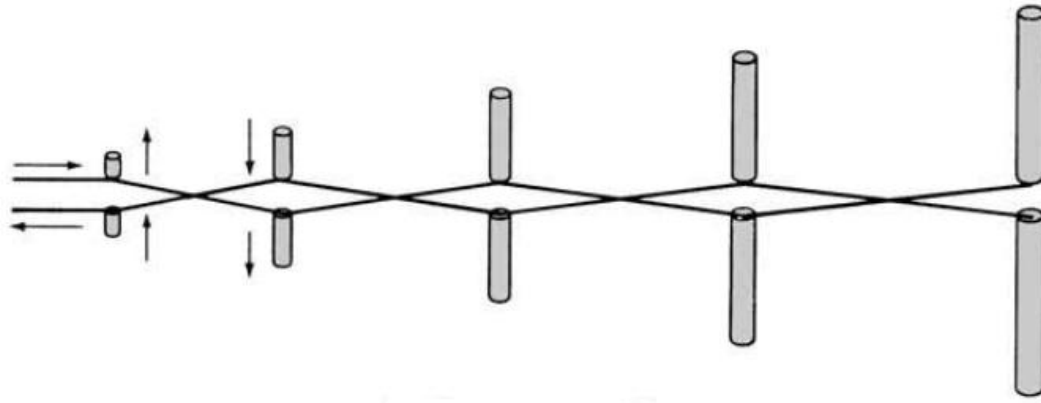
## 2.7 Τρόποι σύνδεσης

Η μέθοδος σύνδεσης των διπόλων μιας λογαριθμικής περιοδικής κεραίας μπορεί να γίνει με διαφορετικούς τρόπους. Κάθε ένας από αυτούς έχει ως αποτέλεσμα κάποια χαρακτηριστικά ακτινοβολίας. Αρχικά παρουσιάζεται η ευθεία σύνδεση:



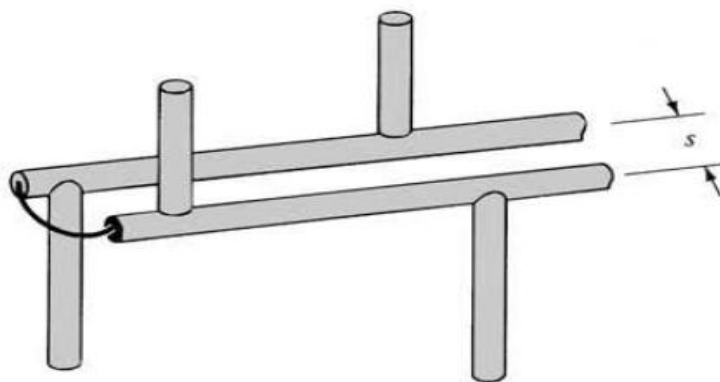
Εικόνα 10: Ευθεία σύνδεση (Balanis, 2016)

Ακόμη, μπορούμε να έχουμε χιαστί σύνδεση (ή crisscross):



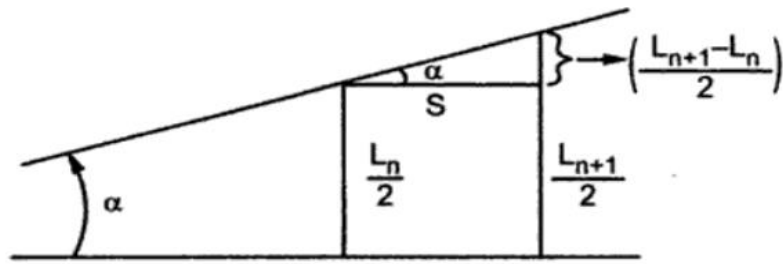
Εικόνα 11: Χιαστί σύνδεση (Balanis, 2016)

Τέλος, υπάρχει και η ομοαξονική σύνδεση:



Εικόνα 12: Ομοαξονική σύνδεση - balun (Balanis, 2016)

Η γεωμετρία της εκάστοτε διάταξης φαίνεται καλύτερα στην παρακάτω απεικόνιση:



Εικόνα 13: Γεωμετρία της λογαριθμικής περιοδικής κεραίας (Bakshi, Bakshi, & Bakshi, 2009)

Για την παραπάνω γεωμετρία θα ισχύει:

$$\tan \alpha = \frac{l_{n+1}/l_n}{2s} = \frac{[1 - (1/\tau)] \left( l_{n+1}/2 \right)}{s}$$

Από την προηγούμενη ανάλυση όμως προέκυψε ότι η ενεργός περιοχή θα αντιστοιχεί σε μήκη τα οποία βρίσκονται κοντά στο μισό του μήκος κύματος. Έτσι, μπορούμε να γράψουμε:

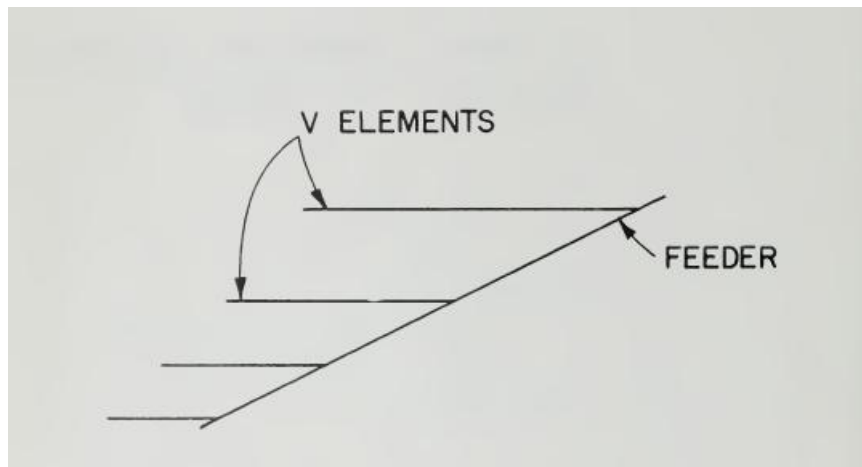
$$\tan \alpha = \frac{1 - \frac{1}{\tau}}{4 \cdot s_\lambda}$$

## 2.8 Απόδοση

Ένα μειονέκτημα των λογαριθμικών περιοδικών κατασκευών είναι πως εμφανίζουν χαμηλές τιμές κέρδους. Για να αντιμετωπίσουμε αυτή την πρόκληση, μπορούμε να ενώσουμε δύο ή και παραπάνω συστοιχίες. Η επιθυμητή ανεξαρτησία από τη συχνότητα επιβάλλει η τοποθεσία των στοιχείων να οριστεί μόνο από γωνίες και όχι από αποστάσεις. Αυτό σημαίνει πως οι δύο λογαριθμικές περιοδικές συστοιχίες θα έχουν κοινή κορυφή και τα στοιχεία τους θα κοιτάζουν σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Στην επόμενη ενότητα θα διερευνηθεί η δυνατότητα δημιουργίας στοιχειοκεραιών με στοιχεία λογαριθμικές περιοδικές κεραίες.

Για πολύ μεγάλο εύρος ζώνης η λογαριθμική περιοδική συστοιχία θα είναι πολύ μεγάλη σε διαστάσεις. Για δραστική μείωση των μεγεθών απαιτείται η κατασκευή σε σχήμα V. Η κατασκευή είναι ιδέα των Mayes και Carrel (Mayes & Carrel, 1960). Στις

χαμηλές περιοχές λειτουργίας, η λειτουργία της κεραίας έχει ήδη περιγραφεί με την εκάστοτε ενεργή περιοχή. Όμως, καθώς η συχνότητα αυξάνεται σε σημεία όπου τα μικρότερα στοιχεία καθίστανται πολύ μεγάλα σε μήκος για να έχουμε συντονισμό  $\lambda/2$ , τα μεγαλύτερα σε μήκος στοιχεία συντονίζονται σε μήκος κύματος  $3\lambda/2$ . Καθώς η συχνότητα λειτουργίας αυξάνεται περαιτέρω, η ενεργός περιοχή μετατοπίζεται περαιτέρω.



**Εικόνα 14:** Απεικόνιση συστοιχίας σε σχήμα V (Mayes & Carrel, 1960)

# Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

---

## 3.1 Παράμετροι σχεδίασης

Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής θα σχεδιασθεί μια λογαριθμική περιοδική κεραία για την κάλυψη των συχνοτήτων μεταξύ 200 MHz και 400 MHz. Η διαδικασία θα περιγραφεί από την αρχή και στο τέλος θα ακολουθήσει προσομοίωση με το πρόγραμμα NEC-2 για τη μελέτη των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας της κεραίας.

Το πρόγραμμα NEC-2 είναι ένα πρόγραμμα που λειτουργεί με «κάρτες», κατάλοιπο παλαιότερων χρόνων κατά τους οποίους ο προγραμματισμός των μηχανών γινόταν με διάτρητες κάρτες. Ένα μοντέλο στο πρόγραμμα NEC-2 περιγράφεται από ένα αρχείο γεωμετρίας με την κατάληξη «.nec». Λειτουργεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ροπών για να λύσει τις ολοκληρωτικές εξισώσεις που περιγράφουν το εκάστοτε ηλεκτρομαγνητικό πρόβλημα (Davidson, 2005).

Όπως έχει αναφερθεί και στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο υπάρχουν πολλοί ορισμοί για το εύρος ζώνης μιας κεραίας. Ο πιο απλός σχετίζει το άνω με το κάτω όριο του διαστήματος των συχνοτήτων. Η συγκεκριμένη κεραία καλύπτει 2 οκτάβες όπως προκύπτει άμεσα:

$$BW = \frac{f_H}{f_L} = \frac{400}{200} = 2$$

Ένας ακόμη ορισμός για το εύρος ζώνης μιας κεραίας κάνει χρήση της ανώτερης συχνότητας,  $f_H$ , της κατώτερης συχνότητας,  $f_L$ , καθώς και της μέσης συχνότητας,  $f_M$ , του επιθυμητού διαστήματος.

Στην περίπτωση αυτή:

$$BW = \frac{f_H - f_L}{f_M} \cdot 100\% = \frac{400 - 200}{300} \cdot 100\% = \frac{200}{300} \cdot 100\% = 66.7\%$$

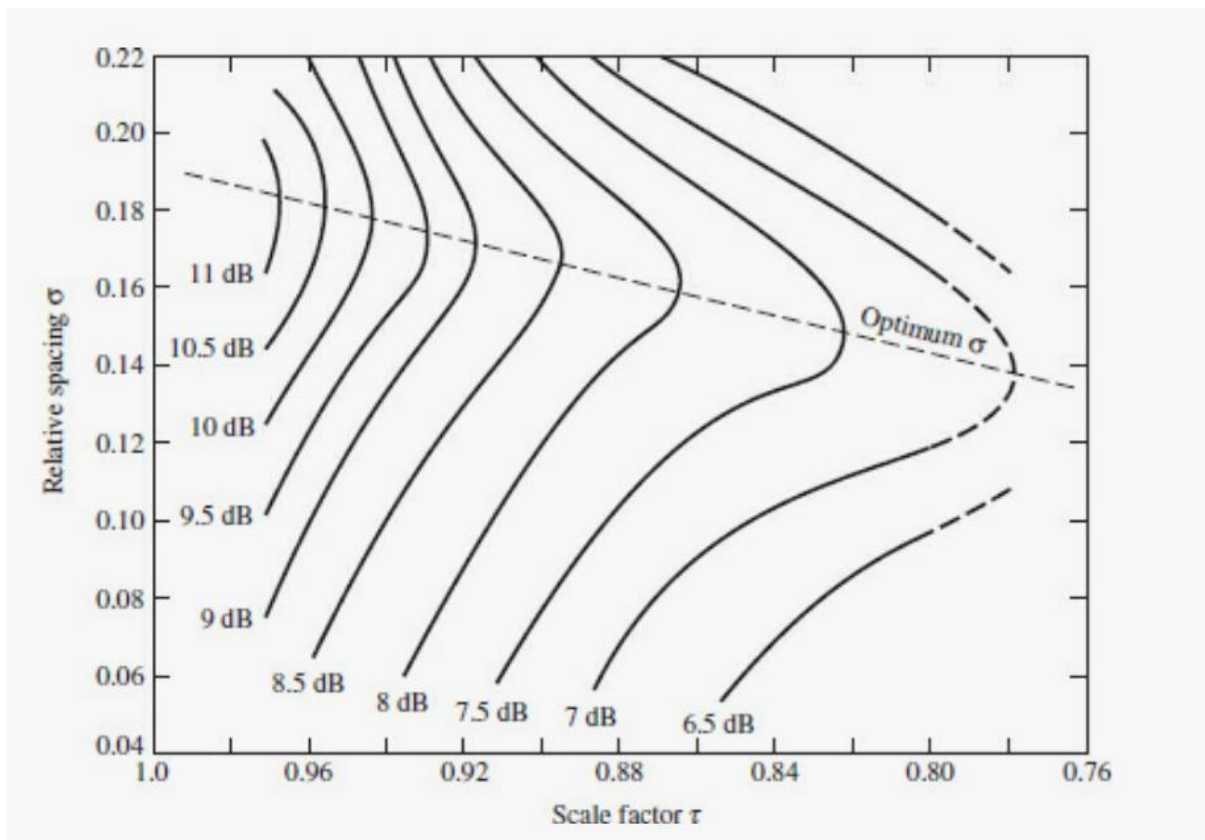
Και με τους δύο ορισμούς, η συγκεκριμένη κεραία κατατάσσεται στις ευρυζωνικές. Όλες οι παράμετροι μιας λογαριθμικής περιοδικής κεραίας επηρεάζουν με τον έναν ή άλλο τρόπο τις επιδόσεις της. Ο Carrel (Carrel, 1961) δίνει έναν πίνακα με τις παραμέτρους και την επίδραση που έχουν οι διάφορες μεταβολές τους στη λειτουργία της κεραίας.

Η πρακτική διαμόρφωση μιας λογαριθμικής περιοδικής κεραίας (LPDA) περιγράφεται από τις παραμέτρους  $\tau$ ,  $\alpha$  και  $\sigma$ . Ο προσδιορισμός δύο εξ αυτών επιτρέπει τον καθορισμό της 3<sup>ης</sup> παραμέτρου μέσω της σχέσης:

$$\alpha = \tan^{-1}\left[\frac{1 - \tau}{4\sigma}\right]$$

### 3.2 Διάγραμμα του Carrel

Για τη δική μας σχεδίαση θα ξεκινήσουμε από την τιμή της κατευθυντικότητας  $D$  η οποία θα μας επιτρέψει να προσδιορίσουμε τις τιμές για τις παραμέτρους  $\sigma$  και  $\tau$ , από το διάγραμμα του Carrel. Οι αρχικές εξισώσεις οδηγούν σε σχέδια των οποίων η κατευθυντικότητα προκύπτει ανώτερη της πραγματικής τους τιμής. Το λάθος έχει σημειωθεί από τους Butson και Thompson (Butson & Thompson, 1976) και τα διορθωμένα γραφήματα δίνουν για την κατευθυντικότητα τιμές μειωμένες κατά περίπου 1 dB.



Εικόνα 15: Καμπύλες σταθερής κατευθυντικότητας σε dB έναντι των παραμέτρων  $\tau$  και  $\sigma$  (Carrel, 1961)



Την παραπάνω εικόνα έχει δώσει ο Robert Carrel (Carrel, 1961) σε μια δημοσίευση του με τίτλο «The design of log-periodic dipole antennas». Στην ίδια δημοσίευση περιέχονται πολλά νομογραφήματα για διάφορα χαρακτηριστικά της διάταξης, ενώ δίνεται και ένας τύπος για τον υπολογισμό του κατευθυντικότητας:

$$D (\sigma \varepsilon \text{ dB}) = 10 \cdot \log \frac{41253}{(BW_E)(BW_H)}$$

### 3.3 Υπολογισμοί παραμέτρων

Επιλέγουμε να σχεδιάσουμε μια λογαριθμική περιοδική κεραία με κατευθυντικότητα ίση με 7 dB. Από το ανωτέρω σχήμα προκύπτουν οι τιμές για τις παραμέτρους  $\sigma$  και  $\tau$ , ως εξής:

$$\tau = 0.78$$

$$\sigma = 0.135$$

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει άμεσα:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{1 - \tau}{4\sigma} \right] = 22.167^\circ$$

Η παράμετρος  $\sigma$  προκύπτει από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{R_n - R_{n+1}}{2l_n}$$

Ο Carrel δίνει μια περίπου εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό του εύρους ζώνης της διάταξης:

$$B_{ar} = 1.1 + 7.7 * (1 - \tau)^2 * \cot \alpha = 2.0148$$

Πρακτικά σχεδιάζεται μια διάταξη για ελαφρώς μεγαλύτερο εύρος ζώνης  $B_s$ , το οποίο προκύπτει ως εξής (Balanis, 2016):

$$B_s = B * B_{ar} = \frac{400 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^6} \cdot B_{ar} = 4.0295$$

Ο αριθμός των στοιχείων που χρειάζονται για την εν λόγω διάταξη καθορίζεται από την εξίσωση:

$$N = 1 + \frac{\ln(B_s)}{\ln(\frac{1}{\tau})} = 6.6$$

Για το μέγιστο μήκος κύματος θα ισχύει:

$$\lambda_{max} = \frac{u}{f_{min}} = \frac{3 \cdot 10^8}{200 \cdot 10^6} = 1.5 \text{ m}$$

Το μήκος της διάταξης, μεταξύ του μικρότερου και μεγαλύτερου διπόλου, είναι:

$$L = \frac{1.5}{4} \left( 1 - \frac{1}{4.0295} \right) \cdot \cot(22.167^\circ) = 0.692 \text{ m}$$

Το μήκος μεταξύ των άκρων του μεγαλύτερου διπόλου, θα είναι:

$$l_{max} = \frac{\lambda_{max}}{2} = \frac{1.5}{2} = 0.75 \text{ m}$$

$$\sigma' = \frac{\sigma}{\sqrt{\tau}} = \frac{0.135}{\sqrt{0.78}} = 0.1529$$

$$Z_a = 120 * [\ln\left(\frac{l_n}{d_n}\right) - 2.25]$$

$$s = d * \cosh\left(\frac{Z_0}{120}\right)$$

Θα μπορούσε χωρίς βλάβη της γενικότητας να παραλειφθεί ο υπολογισμός των παραμέτρων αυτών και να οριστούν σαν σταθερές (Balanis, 2016). Η αντίσταση εισόδου δίνεται από τον τύπο:

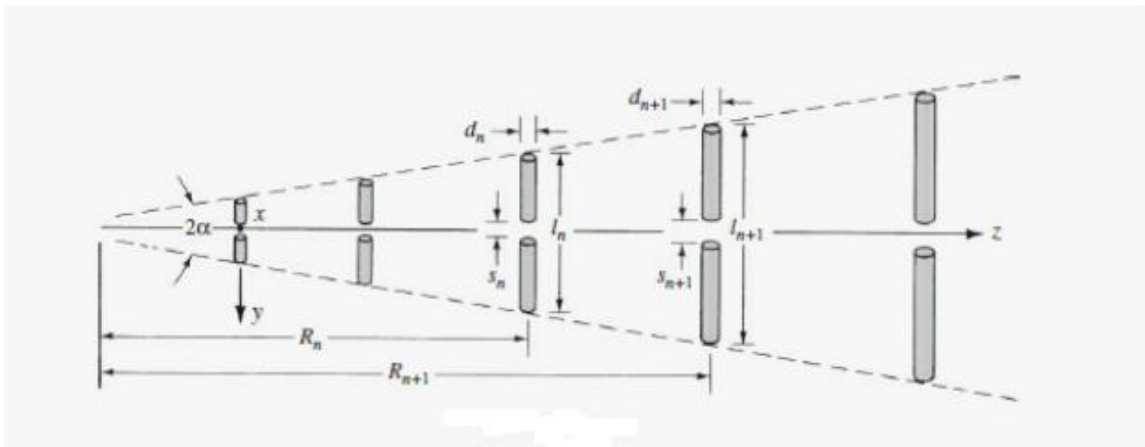
$$Z_0 = 1.2 * R_{in} = 1.2 * 50 = 60 \text{ Ohms}$$

Από την τιμή της γωνίας α και τα μήκη των στοιχείων αυτές προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l_n/2}{R_n}$$

$$s = d * \cosh\left(\frac{60}{120}\right)$$

Για διευκόλυνση της διαδικασίας υπενθυμίζεται το σχέδιο της κεραίας:



Εικόνα 16: Γεωμετρία της λογαριθμικής περιοδικής κεραίας με δίπολα (Balanis, 2016)

Ακολουθούν οι υπολογισμοί του μήκους των διπόλων:

$$l_6 = \frac{\lambda_{max}}{2} = \frac{u/F_{min}}{2} = 0.75 \text{ m}$$

$$l_5 = \tau \cdot l_6 = 0.5850 \text{ m}$$

$$l_4 = \tau \cdot l_5 = 0.4563 \text{ m}$$

$$l_3 = \tau \cdot l_4 = 0.3559 \text{ m}$$

$$l_2 = \tau \cdot l_3 = 0.2776 \text{ m}$$

$$l_1 = \tau \cdot l_2 = 0.2165 \text{ m}$$

Υποθέτουμε διατομή  $D_{max} = 0.75 \text{ cm}$  για το μεγαλύτερο δίπολο οπότε προκύπτει λόγος μήκους προς διατομή  $\frac{l}{D} = 100$ . Έτσι,

$$s_{max} = 0.75 \cdot \cosh(0.5) = 0.845 \cong 0.85 \text{ cm}$$

Η απόσταση από τη νοητή κορυφή της διάταξης (γωνία  $2\alpha$ ) δίνεται ως εξής:

$$R_n = \frac{2 \cdot l_n \cdot \sigma}{1 - \tau}$$

Το μήκος του μικρότερου διπόλου θα πρέπει να είναι:

$$l_{min} = \frac{\lambda_{min}}{2} = \frac{u}{2 \cdot F_{max}} = \frac{3 \cdot 10^8}{8 \cdot 10^8} = 0.375 \text{ m}$$

Επειδή οι τιμές για τα μήκη  $l_3, l_2, l_1$  είναι μικρότερες από  $\frac{\lambda_{min}}{2}$  μπορούμε να περιορίσουμε τη διάταξη και έτσι να γίνει με 4 μόλις δίπολα. Επομένως, θα έχουμε:

$$s_6 = 0.845 \text{ cm}$$

$$s_5 = 0.78 \cdot 0.845 = 0.6591 \text{ cm}$$

$$s_4 = 0.78 \cdot 0.6591 = 0.5141 \text{ cm}$$

$$s_3 = 0.78 \cdot 0.5141 = 0.4010 \text{ cm}$$

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τις διατομές:

$$d_6 = 0.75 \text{ cm}$$

$$d_5 = 0.78 \cdot 0.75 = 0.5850 \text{ cm}$$

$$d_4 = 0.78 \cdot 0.585 = 0.4563 \text{ cm}$$

$$d_3 = 0.78 \cdot 0.4563 = 0.3559 \text{ cm}$$

Και για τις αποστάσεις από την κορυφή της διάταξης:

$$R_6 = \frac{2 \cdot l_6 \cdot \sigma}{1 - \tau} = \frac{2 \cdot 0.75 \cdot 0.135}{1 - 0.78} = 0.9205 \text{ m}$$

$$R_5 = 0.78 \cdot 0.9205 = 0.7180 \text{ m}$$

$$R_4 = 0.78 \cdot 0.7180 = 0.5600 \text{ m}$$

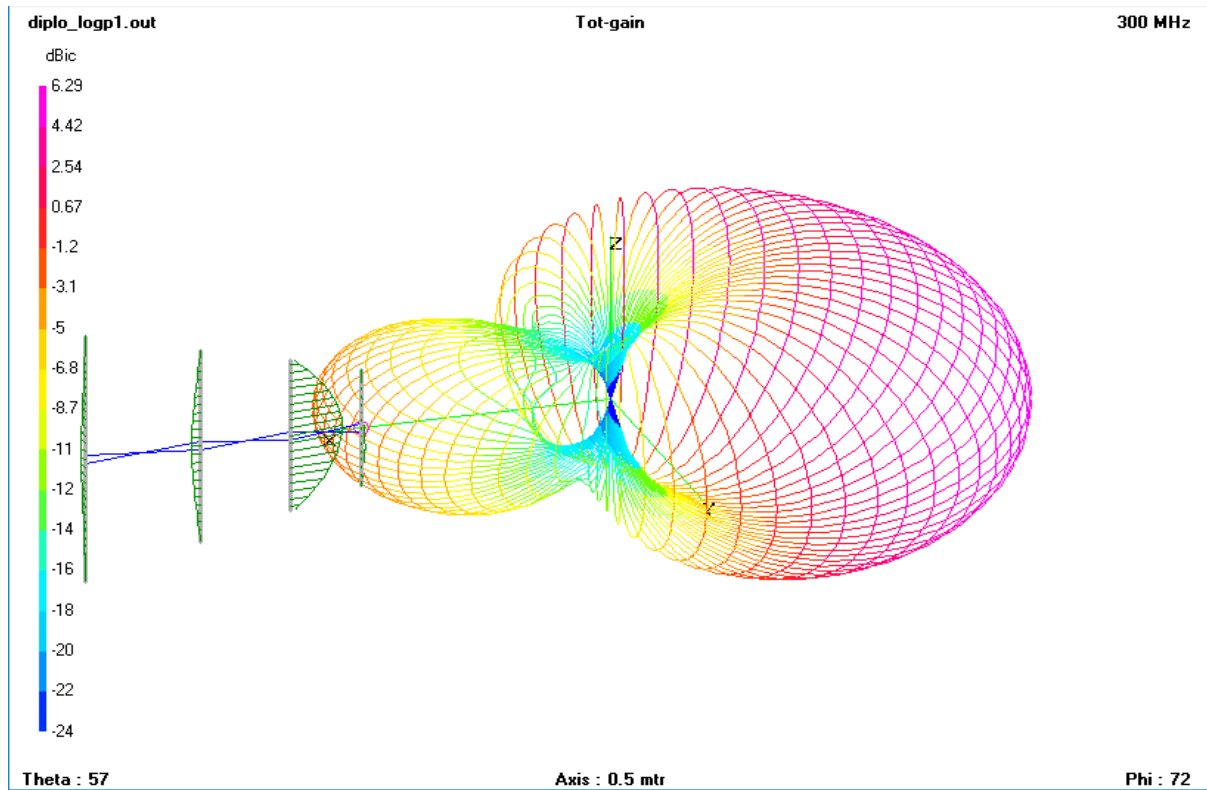
$$R_3 = 0.78 \cdot 0.56 = 0.4368 \text{ m}$$

Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα σε έναν πίνακα έχουμε:

$n$	$R$	$l$	$s$	$d$
6	0.9205 m	0.75 m	0.845 cm	0.75 cm
5	0.7180 m	0.585 m	0.6591 cm	0.585 cm
4	0.5600 m	0.4563 m	0.5141 cm	0.4563 cm
3	0.4368 m	0.3559 m	0.4010 cm	0.3559 cm

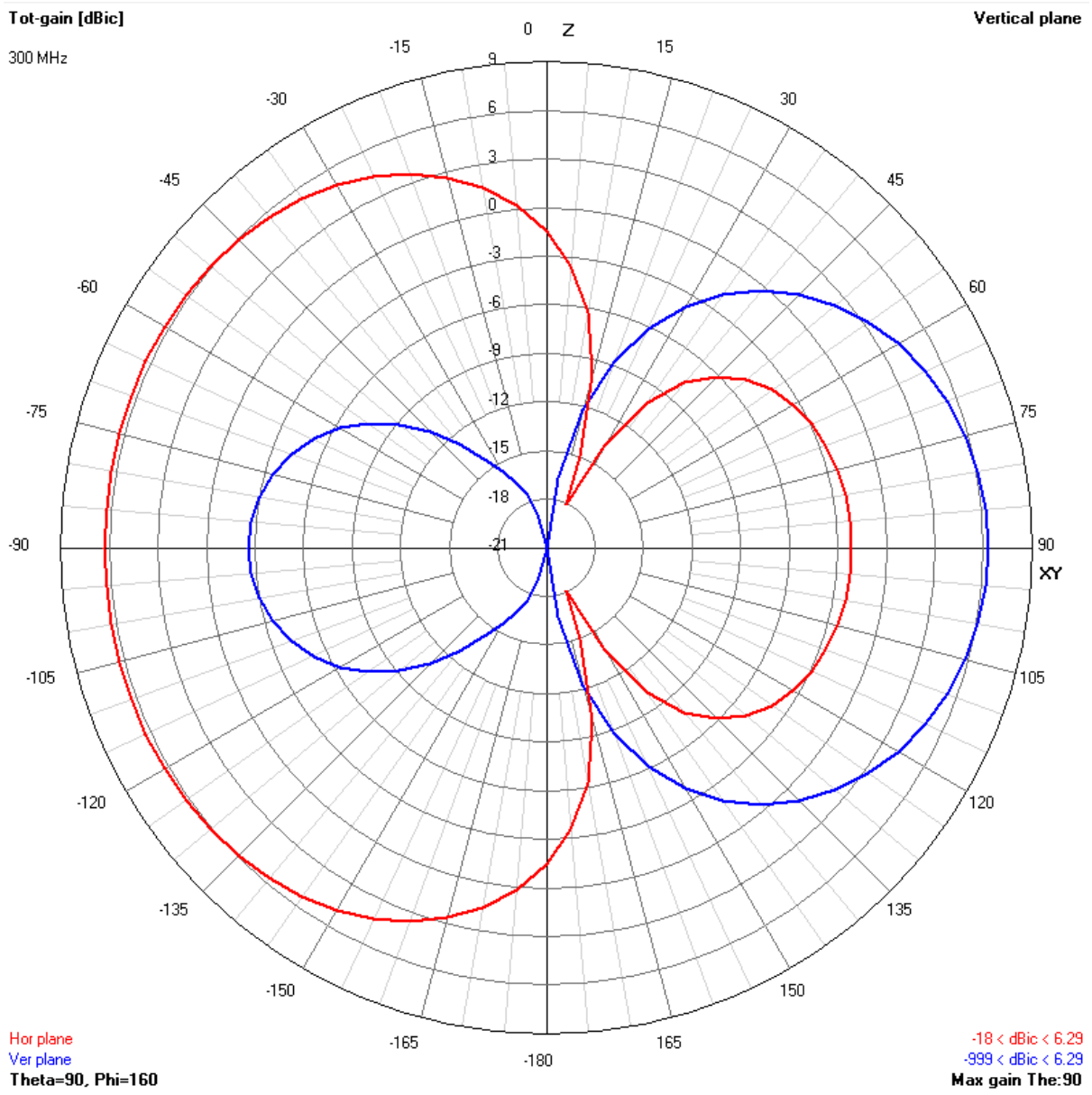
### 3.4 Σχεδίαση με το NEC

Εισάγουμε τα στοιχεία της κεραίας στο πρόγραμμα NEC-2 (το αρχείο δεδομένων για την Εικόνα 17 δίνεται στο Παράρτημα Α) και παίρνουμε τις εξής γραφικές:

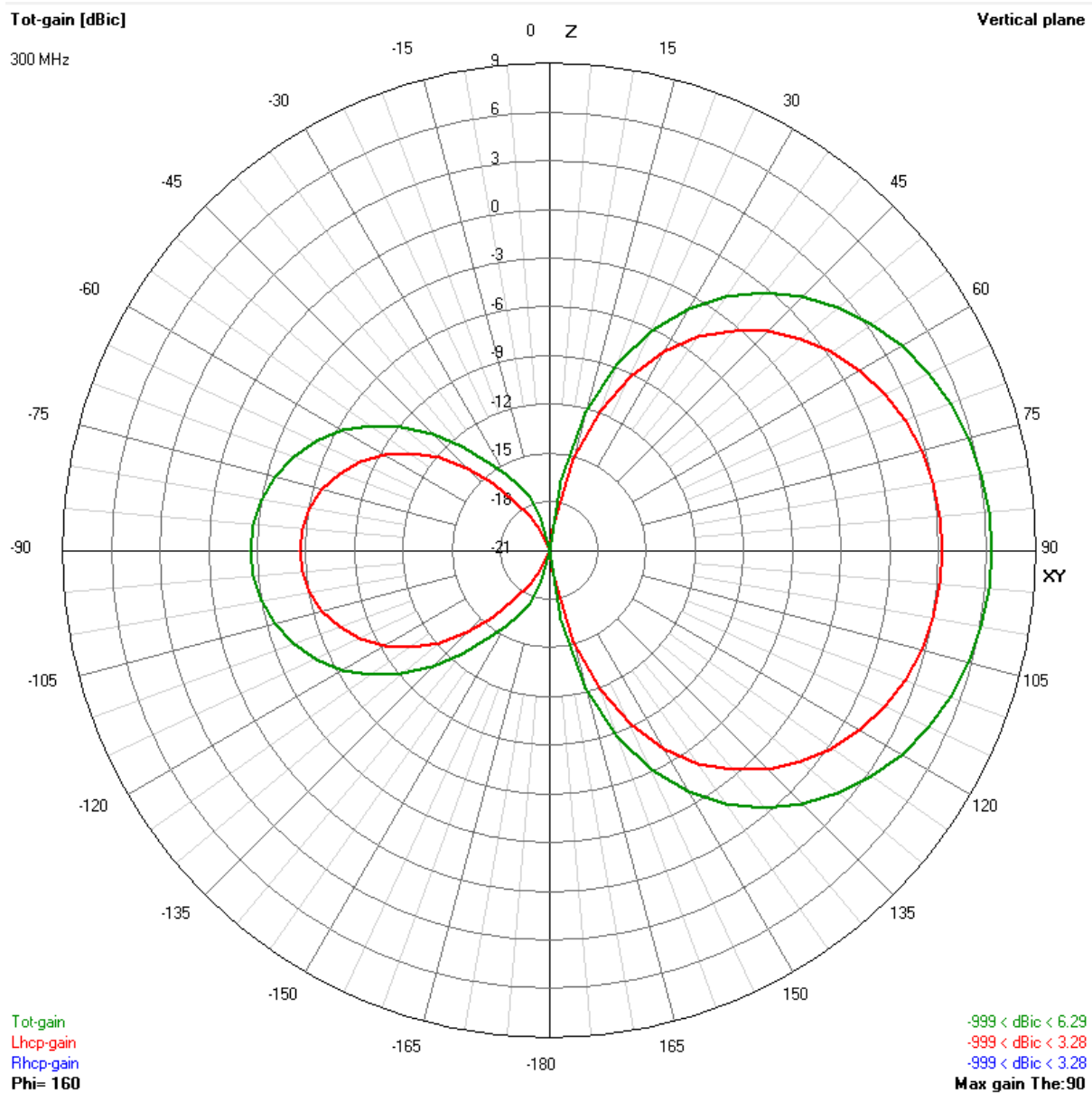


Εικόνα 17: Διάγραμμα ολικού κέρδους λογαριθμικής περιοδικής κεραίας

Ενώ στο οριζόντιο και κάθετο επίπεδο θα έχουμε:



**Εικόνα 18:** Διάγραμμα ολικού κέρδους στο κάθετο επίπεδο



Εικόνα 19: Διάγραμμα ολικού κέρδους στο οριζόντιο επίπεδο

Όπως αναμενόταν, η κεραία που σχεδιάστηκε είναι κατευθυντική και έχει τον κύριο λοβό ακτινοβολίας στη διεύθυνση του άξονά της. Η χιαστή σύνδεση παράγει endfire ακτινοβολία η οποία κατευθύνεται προς την κορυφή της διάταξης.. Το κέρδος της κεραίας αγγίζει τα 6.29 dBi στη διεύθυνση του μεγίστου και είναι υπολογισμένο στα 1000 m. Το συγκεκριμένο κέρδος είναι περίπου 4 φορές μεγαλύτερο της ιστροπικής κεραίας, και ως εκ τούτου είναι αρκετά χαμηλό.



# Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

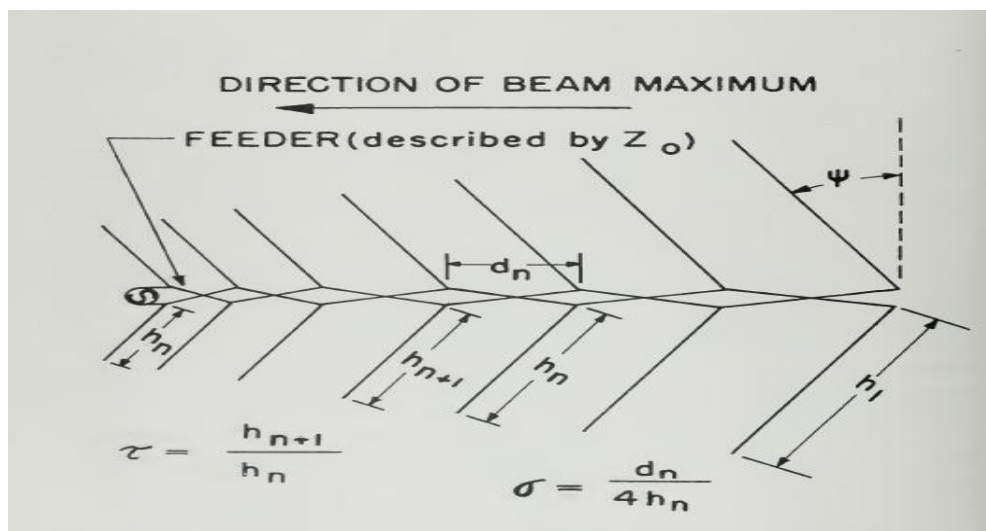
## 4. Βελτίωση του κέρδους

### 4.1 Λύσεις που έχουν προταθεί

Το πρόβλημα του χαμηλού κέρδους που παρουσιάζει η λογαριθμική περιοδική διάταξη είναι ευρέως γνωστό (Chen & Ishimaru, 1966). Ως εκ τούτου έχει απασχολήσει τη βιβλιογραφία και έχουν προταθεί διάφορες λύσεις. Αναζητώντας τρόπους να βελτιώσουμε το κέρδος μπορούμε να καταφύγουμε σε διάφορες τεχνικές.

Έχει παρατηρηθεί πως η αύξηση του πάχους των επιμέρους στοιχείων, δηλαδή των διπόλων, μιας λογαριθμικής περιοδικής κεραίας βελτιώνει το κέρδος της (Chen & Ishimaru, 1966). Αυτή είναι μια λύση που δεν είναι ιδιαίτερα πρακτική μιας και το περιθώριο αύξησης του πάχους των στοιχείων είναι σχετικά μικρό και έτσι δεν υπάρχει ευελιξία.

Ακόμη, οι Mayes και Carrel (Mayes & Carrel, 1960) έχουν προτείνει τη χρήση διατάξεων σε σχήμα V. Στο σχήμα φαίνεται η διάταξη αυτή:



Εικόνα 20: Διάταξη σε σχήμα V (Mayes & Carrel, 1960)

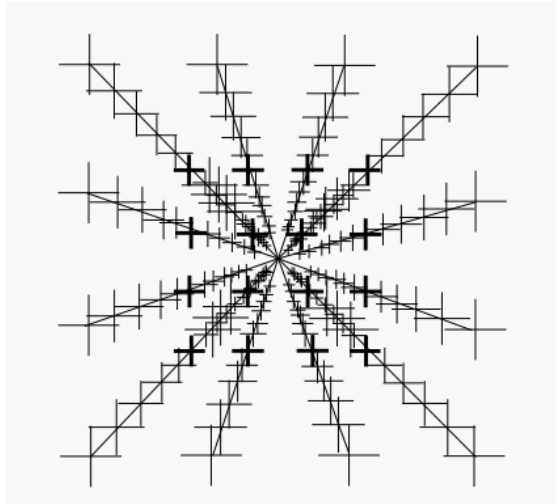
Οι Chen και Ishimaru από το University of Washington (Chen & Ishimaru, 1966) στη δημοσίευση τους με τίτλο «High gain log-periodic antennas» εξετάζουν τη δυνατότητα αύξησης του κέρδους μιας ευρείας ζώνης λογαριθμικής περιοδικής κεραίας η οποία θα παρουσιάζει επίσης υψηλό κέρδος. Καταλήγουν πως το κατευθυντικό κέρδος μιας λογαριθμικής περιοδικής κεραίας μπορεί να αυξηθεί εάν τα συντονισμένα στοιχεία είναι ηλεκτρομαγνητικά συζευγμένα με τη γραμμή μεταφοράς. Οι λόγοι που επιφέρουν υψηλότερο κέρδος σε αυτή τη διάταξη είναι:

- Η χρήση ασθενούς σύζευξης και η σταδιακή μείωση της διαμέτρου των ενεργών στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επέκταση της ενεργού περιοχής σε οποιοδήποτε επιθυμητό μήκος.
- Ανάλογα με το μέγεθος της διάταξης, δύο ή και περισσότερες ενεργές περιοχές μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα.

## 4.2 Στοιχειοκεραίες

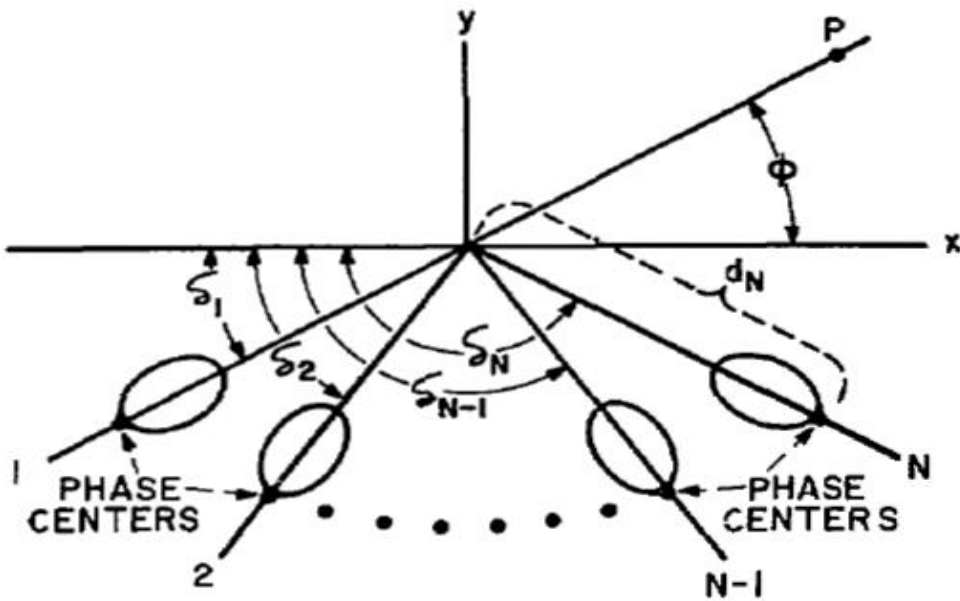
Η λογαριθμική περιοδική κεραία αν και λογίζεται σαν ξεχωριστή κεραία, εντούτοις είναι ουσιαστικά μια συστοιχία κεραιών (διπόλων) που κατέχει την ιδιότητα της λογαριθμικής κλιμάκωσης. Η συσσώρευση πολλών στοιχείων για τη δημιουργία μιας μεγαλύτερης διάταξης και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας είναι ένα πολύ παλιό θέμα. Όπως τα στοιχειώδη δίπολα διατάσσονται ώστε να προκύψει η λογαριθμική περιοδική διάταξη, έτσι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σαν στοιχείο μιας διάταξης την ίδια τη λογαριθμική περιοδική κεραία.

Οι DuHamel και Berry (DuHamel & Isbell, Broadband logarithmically periodic antenna structures, 1957) έχουν προτείνει τη δημιουργία μιας συστοιχίας λογαριθμικών κεραιών για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλες τιμές κέρδους/κατευθυντικότητας και μικρό εύρος δέσμης (όπως ραντάρ). Για να διατηρηθεί η ανεξάρτητη από τη συχνότητα λειτουργία, από τους κανόνες που εισήγαγε ο Rumsey, θα πρέπει η διάταξη να μπορεί να περιγραφεί μόνο με γωνίες. Αυτό σημαίνει πως οι άξονες των επιμέρους κεραιών θα πρέπει να συναντιούνται σε ένα κοινό σημείο. Τούτο μας οδηγεί σε ένα σχήμα που ξεφεύγει από την κλασική θεώρηση και τις γραμμικές συστοιχίες. Ο Breakall (Breakall, 1992) έχει προτείνει ένα τέτοιο σχήμα (3D-FIPA) και έχει κατατεθεί και αντίστοιχη πατέντα:



**Εικόνα 21: 4x4 3D-FIPA (Breakall, 1992)**

Η έννοια της κοινής κορυφής οδηγεί στη δημιουργία κυκλικής διάταξης με σταθερές γωνίες μεταξύ των στοιχείων (Taylor, 1994). Για να χρησιμοποιηθούν πολλές κεραιές η πόλωση θα πρέπει να είναι κάθετη σε κάθε στοιχείο. Η χρήση endfire κεραιών είδαμε πως δίνει διάγραμμα ακτινοβολίας με κύριο λοβό στην κατεύθυνση του άξονα της κεραιάς. Σε μια κυκλική διάταξη αυτό δημιουργεί πρόβλημα, καθώς όλα τα στοιχεία ακτινοβολούν προς το κέντρο του κύκλου και τα στοιχεία που θα βρίσκονται απέναντι θα μπλοκάρουν το ένα το άλλο. Ο Taylor (Taylor, 1994) προτείνει τη δημιουργία ημι-κυκλικής διάταξης με άνοιγμα το πολύ  $\pm 45^\circ$ . Το κέρδος στην περίπτωση αυτή περιορίζεται μόνο από την πολυπλοκότητα του συστήματος τροφοδοσίας. Το ίδιο αναφέρει και η Patricia R. Foster (Foster, 1992) σε δημοσίευση με τίτλο «Performance of ultrawideband antennas». Οι μέθοδοι διάταξης είναι δύο, ονομαστικά broadside και endfire. Και οι δύο διατάξεις αντιμετωπίζουν πρόβλημα με το χώρο.



Εικόνα 22: Γεωμετρία για συστοιχία endfire στοιχείων (DuHamel & Berry, Logarithmically periodic antenna arrays, 1958)

Τα επιμέρους στοιχεία πρέπει να έχουν κάθετη πόλωση και τις ίδιες τιμές παραμέτρων  $\tau$  και  $\alpha$ . Το πεδίο δίνεται από το άθροισμα των γινομένων των επιμέρους διεγέρσεων πολλαπλασιασμένων με τις αντίστοιχες φάσεις:

$$E(\varphi) = \sum_{n=1}^N A_n f(\varphi - \delta_n) e^{-j[\beta d \cos(\varphi - \delta_n) - \gamma_n]}$$

Για τη μελέτη της διάταξης θα ξεκινήσουμε από την απλούστερη περίπτωση που είναι η συστοιχία δύο κεραιών. Θα χρησιμοποιήσουμε στοιχεία από την κλασική θεωρία και θα εκμεταλλευτούμε τις συμμετρίες που σχηματίζονται.

Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας συστοιχίας δύο κεραιών δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} E(\varphi) &= A_1 \cdot f(\varphi - \delta_n) \cdot e^{-j[\cos(\varphi - \delta_n) - \gamma_n]} + A_2 \cdot f(\varphi - \delta'_n) \cdot e^{-j[\cos(\varphi - \delta'_n) - \gamma'_n]} \\ &= f(\varphi - \delta_n) * [A_1 \cdot e^{-j[\cos(\varphi - \delta_n) - \gamma_n]} + A_2 \cdot e^{-j[\cos(\varphi - \delta'_n) - \gamma'_n]}] \end{aligned}$$

Παρατηρούμε λοιπόν πως η συστοιχία ακολουθεί το γνωστό μοτίβο, κατά το οποίο:

$$E(\text{συνολικό}) = E[(\text{στοιχείου})] * [\text{παράγοντας διάταξης}]$$

Διαφορετικά, μπορεί να γραφεί (Foster, 1992):

$$E(\theta, \varphi) = E_{\text{element}}(\theta, \varphi) \cdot \sum_{i=1}^N A_i \exp(jk r_i \cos \psi_i)$$

Αντίστοιχη με την παραπάνω σχέση, που δίνει το διάγραμμα ακτινοβολίας του ζεύγους των δύο κεραιών, είναι και η σχέση που δίνει τη συνολική κατευθυντικότητα της διάταξης. Σε μια συστοιχία κεραιών, μια σειρά πανομοιότυπων κεραιών που λειτουργούν ως μία κεραία, η κατευθυντικότητα της συνολικής διάταξης δίνεται από το γινόμενο της κατευθυντικότητας ενός στοιχείου και μιας μαθηματικής έκφρασης που ονομάζεται παράγοντας διάταξης. Ο παράγοντας διάταξης εξαρτάται από τη θέση, τη διέγερση και τη φάση κάθε στοιχείου. Η συνολική κατευθυντικότητα, εφόσον η κατευθυντικότητα ενός στοιχείου είναι  $D(\theta, \varphi)$ , δίνεται από τη σχέση (Visser, Antenna theory and applications, 2012):

$$D_{\text{array}}(\theta, \varphi) = AF \times D(\theta, \varphi)$$

Ο παράγοντας διάταξης μιας ομοιόμορφης κυκλικής διάταξης κεραιών δίνεται ως εξής (Stutzman & Thiele, 2012):

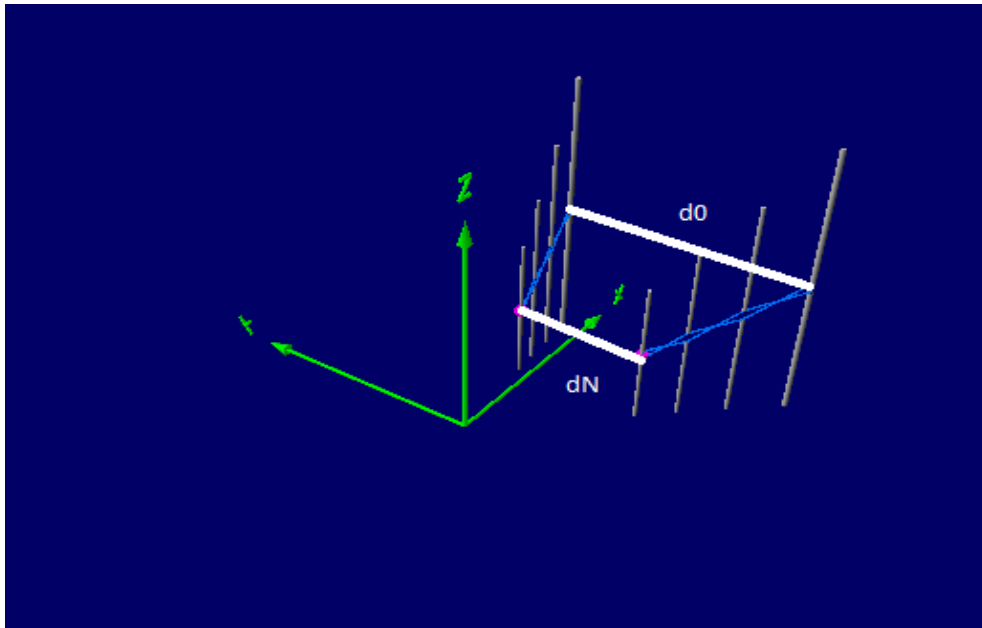
$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N a_n e^{jkr \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_0)}, \text{ όπου } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Στην περίπτωση που εξετάζεται στο παρόν κείμενο οι διεγέρσεις των κεραιών είναι όμοιες και οι αποστάσεις από το κέντρο της διάταξης κοινές. Επομένως, η συνολική ισχύς που απορρέει από την εκάστοτε διάταξη θα δίνεται στην κατεύθυνση του μεγίστου από το απλό άθροισμα των εκάστοτε στοιχείων:

$$P = \sum_{k=1}^N P_k$$

Έτσι σε κάθε στάδιο αναμένεται διπλασιασμός του κέρδους της συστοιχίας. Διπλασιασμός του κέρδους επιφέρει αύξηση σχεδόν +3dB σε κάθε διπλασιασμό της διάταξης.

Διατάσσονται 2 στοιχεία συμμετρικά ως προς κάποιον άξονα συντεταγμένων. Στην περίπτωση αυτή επιλέχτηκε ο άξονας των z όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι αποστάσεις μεταξύ των διπόλων των δύο κεραιών είναι καλά καθορισμένες.



Εικόνα 23: Στιγμιότυπο από την εκτέλεση της προσομοίωσης στο NEC-2

Από την κλασική θεωρία γνωρίζουμε πως για την αποφυγή πλευρικών λοβών οι αποστάσεις μεταξύ των στοιχειοκεραιών πρέπει να είναι μικρότερες ενός μήκος κύματος (Visser, Array and phased array antenna basics, 2005) και συγκεκριμένα ίσες με το μισό του μήκους κύματος:

$$d \leq \lambda$$

Στη συγκεκριμένη διάταξη λοιπόν, προκύπτει:

$$d_0 = \frac{\lambda_{max}}{2}$$

και

$$d_N = \frac{\lambda_{min}}{2}$$

Γνωρίζοντας τις αποστάσεις, προκύπτουν άμεσα δύο σχέσεις:

$$d = 2 \cdot R \cdot \sin \frac{\theta}{2}$$

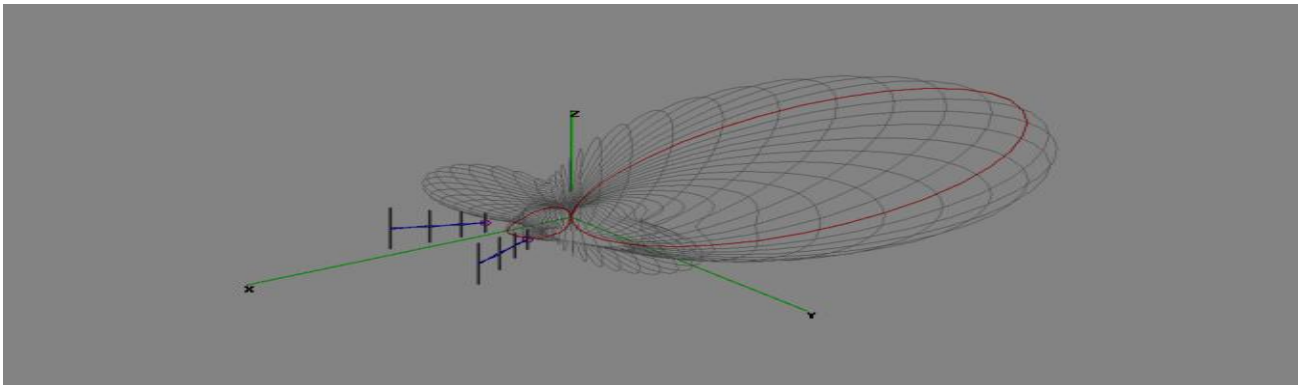
Ή αλλιώς:

$$\theta = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{d}{2R} = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{\lambda_{max}}{4R}$$

Για τη διάταξη που εξετάζουμε στο παρόν,

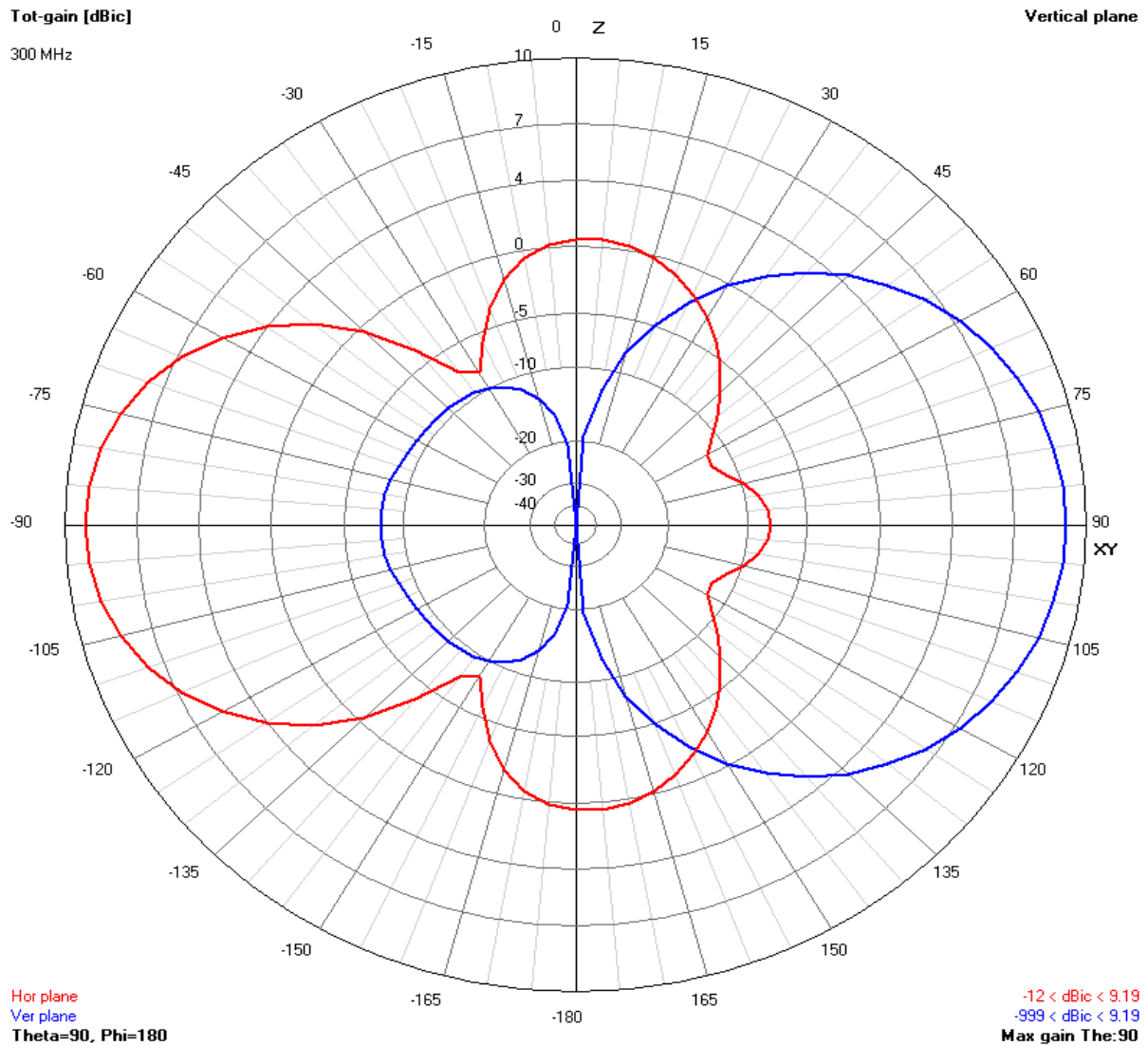
$$\theta = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{1.5}{4 \cdot 0.9205} = 48.08^\circ$$

Με τα στοιχεία αυτά, προχωρούμε στην προσομοίωση με τη συγκεκριμένη τιμή για τη γωνία της κορυφής. Παίρνουμε τα παρακάτω γραφήματα (το αρχείο δεδομένων για την Εικόνα 24 δίνεται στο Παράρτημα Β):



**Εικόνα 24:** Ολικό παραγόμενο πεδίο μαζί με τη συστοιχία των δύο κεραιών

Παρατηρούμε πως σχηματίζεται ένας κύριος λοβός στη διεύθυνση της διχοτόμου της γωνίας της διάταξης. Το γράφημα για το κέρδος είναι:



**Εικόνα 25:** Διάγραμμα ολικού κέρδους στο κάθετο επίπεδο

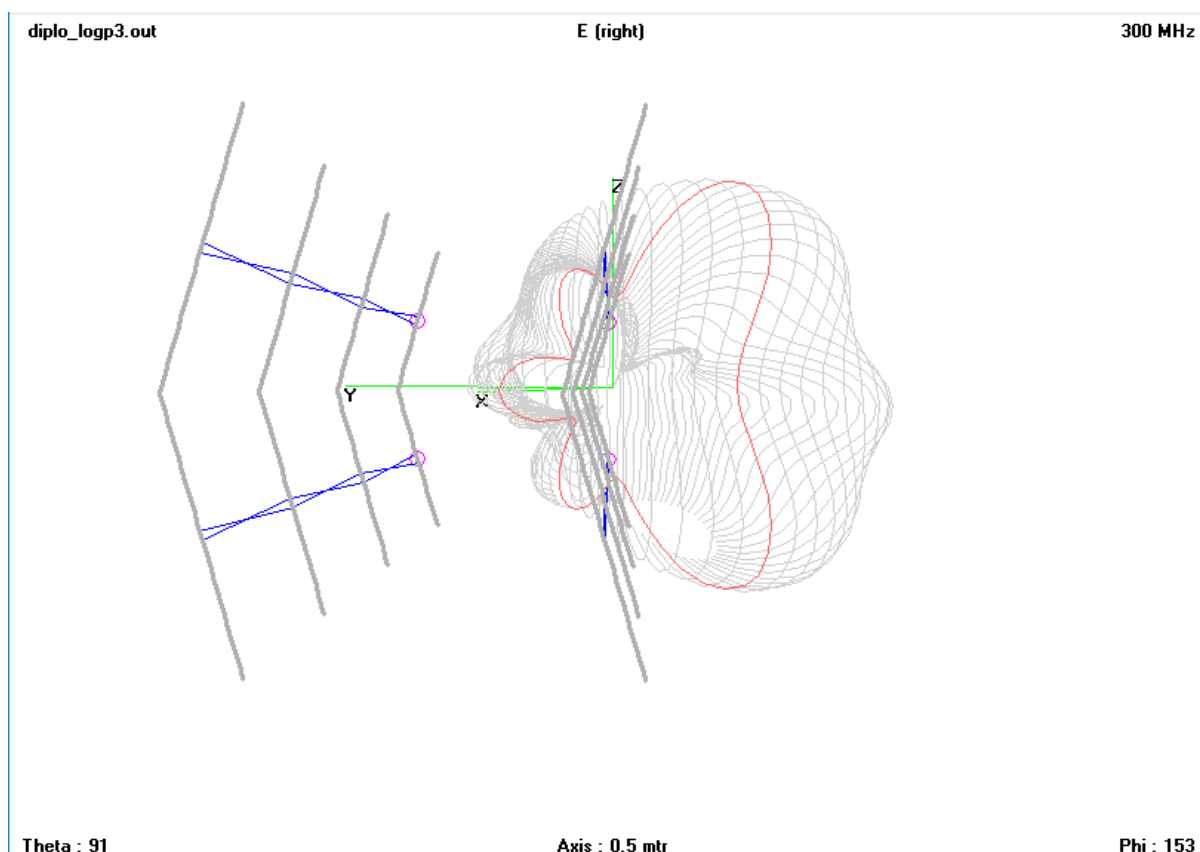
Άμεσα παρατηρούμε πως επιτυγχάνεται κέρδος περίπου +3 dB στη διεύθυνση του μέγιστου λοβού. Το κέρδος αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η διάταξη έχει κατασκευαστεί ώστε να εκμεταλλεύεται τη συμμετρία στο επίπεδο z. Ουσιαστικά, τα πεδία των δύο κεραιών συμβάλλουν αθροιστικά, οπότε στον άξονα συμμετρίας προκύπτει αύξηση ίση με περίπου 3dB, δηλαδή διπλασιασμός των μεγεθών.

Παρά τους υπολογισμούς, εύκολα μπορεί κανείς να επαληθεύσει πως το κέρδος δεν έχει γίνει μέγιστο με την τιμή της γωνίας που χρησιμοποιήθηκε. Αν γίνει χρησιμοποιηθεί γωνία ίση με  $\pm 45^\circ$ , τότε το κέρδος μεγιστοποιείται και φθάνει τα 9.56 dB. Όμως, αυτή η γωνία δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα για τη δημιουργία στοιχειοκεραιών.



Εφόσον έχει κατασκευαστεί η συστοιχία των δύο κεραιών, μπορούμε ακολούθως να χρησιμοποιήσουμε τη συστοιχία αυτή ως στοιχείο μιας μεγαλύτερης συστοιχίας. Η συμμετρία σε αυτή την περίπτωση θα είναι σφαιρική. Αναμένουμε όπως και στα προηγούμενα την αθροιστική συμβολή των πεδίων στον άξονα συμμετρίας, αλλά και περισσότερους πλευρικούς λοβούς κοντά το κέντρο της συστοιχίας.

Το διάγραμμα που προκύπτει δεν είναι το επιθυμητό, καθώς υπάρχει χωρικό πρόβλημα και με τις τιμές που έχουμε βρει για τις γωνίες τα στοιχεία τέμνουν το ένα το άλλο.



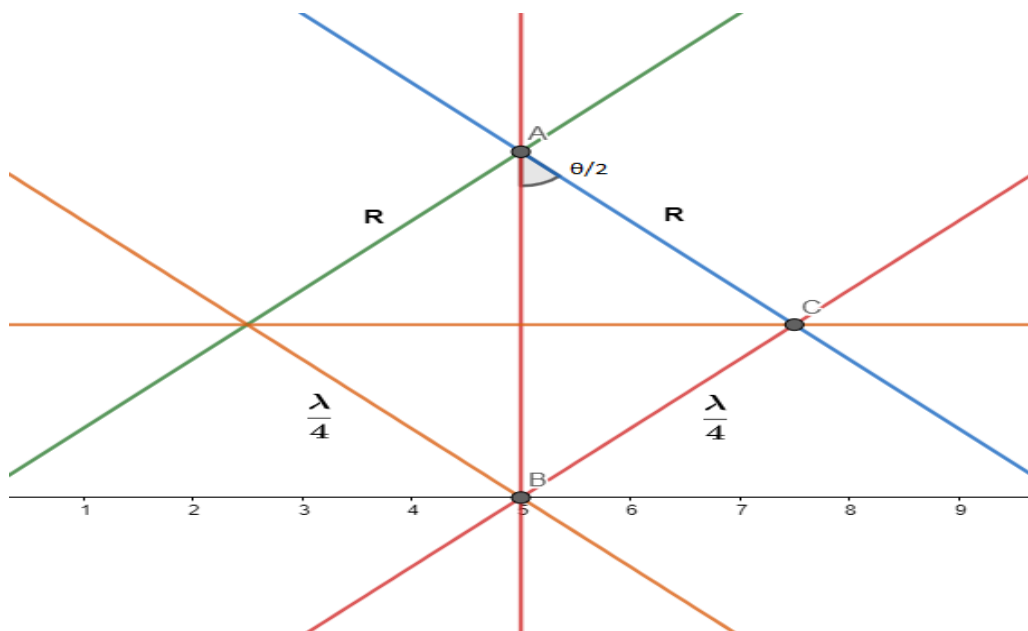
**Εικόνα 26:** Στιγμιότυπο από την εκτέλεση του κώδικα για συστοιχία 2x2

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος μπορεί να επιλεγεί μεγαλύτερη ακτίνα από την κορυφή της διάταξης. Με τον τρόπο αυτό, οι χωρικές αποστάσεις μεγαλώνουν και η ακτίνα της διάταξης παίζει τον ρόλο του παράγοντα κλιμάκωσης. Παράλληλα αναμένεται μικρότερη βελτίωση του κέρδους καθώς όσο αυξάνονται τα στοιχεία, αυξάνεται και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση.

Εφόσον έχει αλλάξει η απόσταση από το κέντρο της διάταξης θα πρέπει να υπολογιστούν εκ νέου οι γωνίες. Από προηγούμενη σχέση έχουμε:

$$\theta = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{\lambda/4}{2R} = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{\lambda_{max}}{4R}$$

Το πρόβλημα που προκύπτει μπορεί να περιγραφεί στο ακόλουθο σχήμα:



**Εικόνα 27:** Γεωμετρία του προβλήματος (με τη βοήθεια του GeoGebra)

Η μεσαία γραμμή είναι και διχοτόμος άρα και διάμεσος στο ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα κέντρα των δύο κεραιών. Προκύπτει άμεσα ότι η τιμή της γωνίας για την οποία υπάρχει πρόβλημα δίνεται ως εξής:

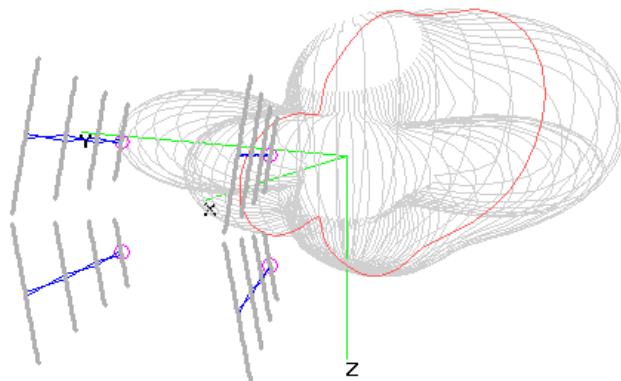
$$\frac{\theta}{2} = \sin^{-1} \frac{d}{2R} \rightarrow \theta = 2 \cdot \arcsin \frac{\lambda_{max}}{4R}$$

Όμως, αυτή είναι ακριβώς η γωνία που είχε υποδείξει η πρότερη θεωρητική ανάλυση της γεωμετρίας του προβλήματος. Συνεπώς, θα πρέπει να γίνει κάποιος συμβιβασμός με τιμή μεγαλύτερη από τη βέλτιστη, αναμένοντας παράλληλα κάποια υποβάθμιση της ποιότητας των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας. Χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη τιμή για την ακτίνα R, το πρόβλημα επιλύεται επιτυχώς με η επίδοση της διάταξης επηρεάζεται σημαντικά (τα δεδομένα δίνονται στο Παράρτημα Γ).

DIPLO\_LOGP3.out

Tot-gain

300 MHz



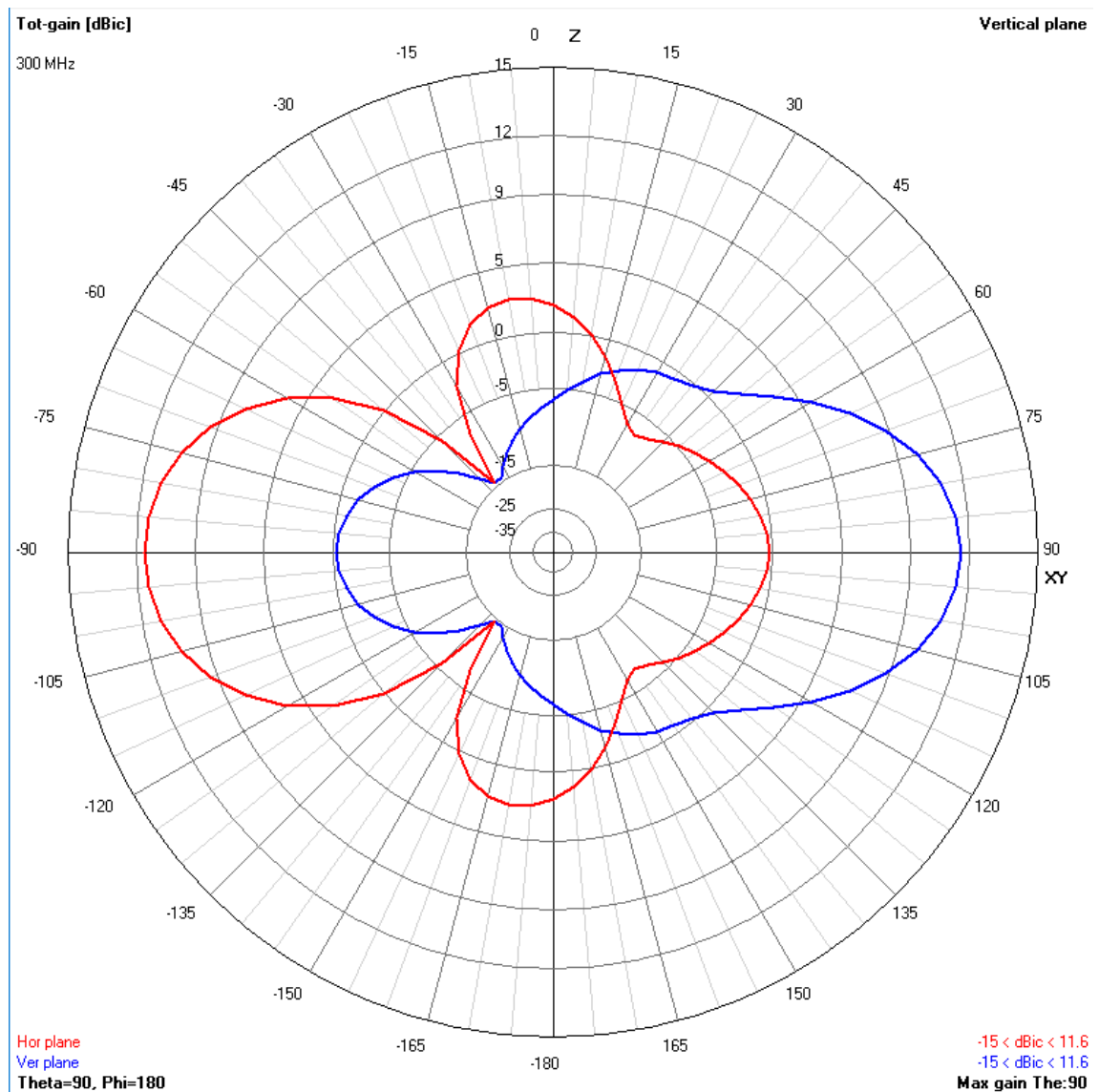
Theta : -104

Axis : 1 mtr

Phi : 152

**Εικόνα 28:** Διάγραμμα ολικού κέρδους μαζί με τη συστοιχία 2x2

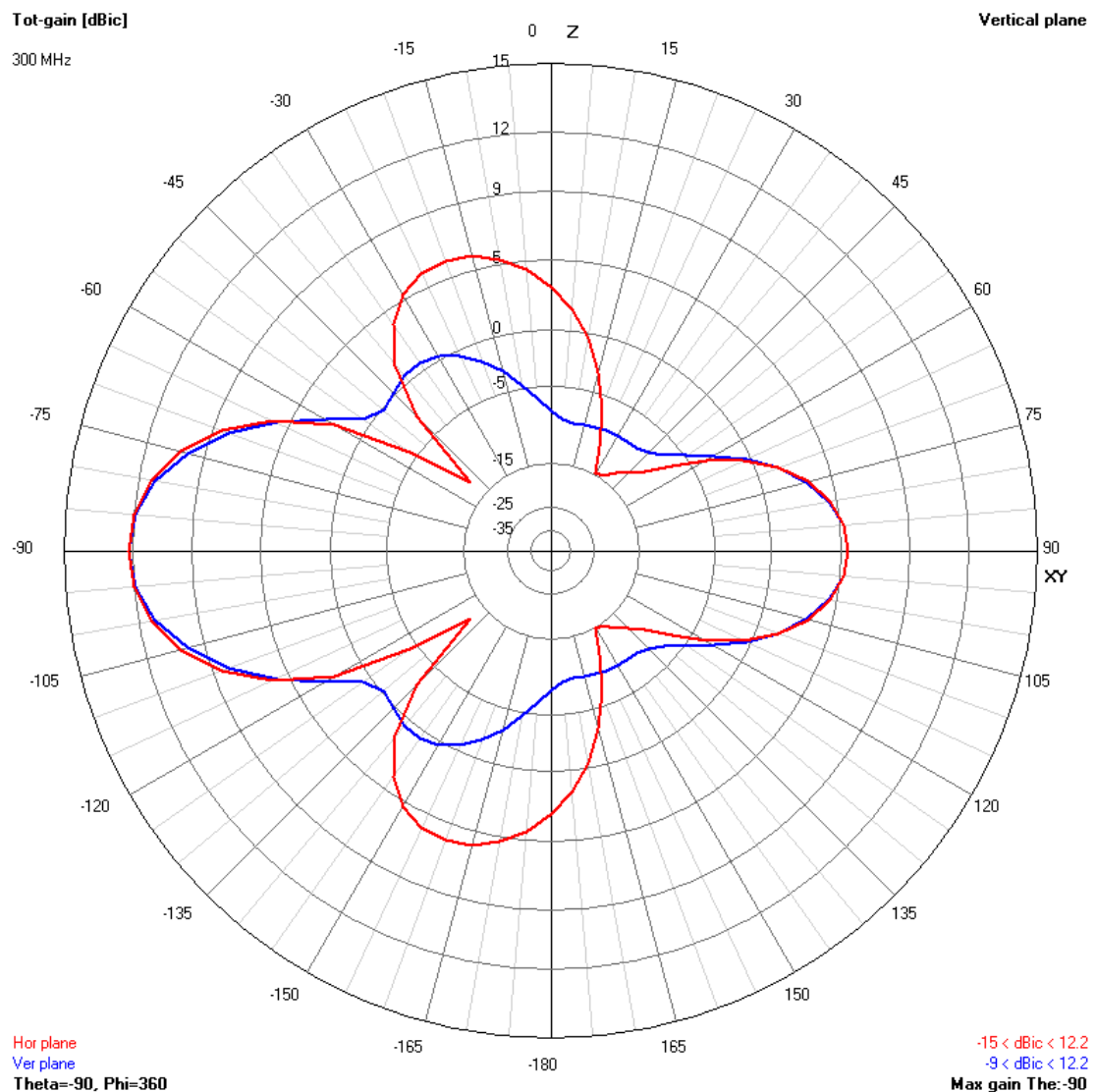
Το διάγραμμα για το κέρδος δίνεται ως εξής:



Εικόνα 29: Διάγραμμα ολικού κέρδους στο κάθετο επίπεδο

Παρατηρείται αύξηση του κέρδους κατά περίπου 2.4 dB το οποίο είναι εμφανώς μικρότερο από το αναμενόμενο, όμως έχει ήδη δικαιολογηθεί η απόκλιση στην απόδοση.

Ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές κέρδους μπορούν να επιτευχθούν με την περαιτέρω αύξηση της ακτίνας R από το κέντρο. Χαρακτηριστικά, παρατηρείται:



Εικόνα 30: Διάγραμμα ολικού κέρδους στο κάθετο επίπεδο

Το κέρδος της διάταξης φθάνει τα 12.2 dB. Παράλληλα, παρατηρείται αύξηση των πλευρικών και του οπίσθιου λοβού. Όπως έχει αναλυθεί ήδη στην αρχή του προηγούμενου κεφαλαίου, ο διπλασιασμός της εκάστοτε διάταξης επιφέρει αύξηση του κέρδους σχεδόν +3dB στην κατεύθυνση του μεγίστου. Αυτό είναι αποτέλεσμα της συμμετρίας που έχει επιλεγεί για τη συγκεκριμένη συστοιχία.

Λειτουργώντας κατά τον ίδιο τρόπο μπορούν να επιτευχθούν διατάξεις με  $4 \times 4$  και  $8 \times 8$  σειρές λογαριθμικών περιοδικών κεραιών.

## Συμπεράσματα

Η λογαριθμική περιοδική κεραία με δίπολα (Iprda) είναι μια διάταξη κεραίας με ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Ανήκει στο ευρύτερο σύνολο κεραιών που διαθέτουν το χαρακτηριστικό της ανεξαρτησίας από τη συχνότητα. Η σταθερότητα των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας μιας κεραίας σε ένα εκτενές διάστημα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι μια ιδιότητα πολύ ελκυστική και καθιστά τη συγκεκριμένη κεραία επιθυμητή στη χρήση. Οι ιδιότητές της έχουν αναλυθεί ενδελεχώς και έχει γίνει εκτενής έρευνα για την αποκάλυψη των μυστικών της.

Παρότι τα χαρακτηριστικά της είναι ελκυστικά, εντούτοις οι τιμές του κέρδους ακτινοβολίας που μπορεί να επιτύχει είναι σχετικά χαμηλές. Στη βιβλιογραφία προτείνονται διάφοροι τρόποι για τη βελτίωση του κέρδους της συγκεκριμένης διάταξης. Ένας από αυτούς είναι η διάταξη πολλών κεραιών με σκοπό την αθροιστική συμβολή τους. Στη συγκεκριμένη εργασία, εξετάστηκε το πρόβλημα της δημιουργίας στοιχειοκεραιών με στοιχεία λογαριθμικές περιοδικές κεραίες με δίπολα (Iprda). Αντλήθηκαν στοιχεία από τη βιβλιογραφία και έγιναν προσομοιώσεις με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Η δημιουργία των συγκεκριμένων στοιχειοκεραιών επιτάσσει να διατάξουμε τα στοιχεία ημικυκλικά. Αφού δημιουργήθηκε η στοιχειοκεραία δύο στοιχείων, χρησιμοποιήθηκε αυτή ως στοιχείο για τη δημιουργία μεγαλύτερων διατάξεων. Οι γεωμετρικοί περιορισμοί περιορίζουν τις επιδόσεις στις μεγάλες διατάξεις, όμως υπάρχει λύση παρότι εγκυμονεί τον κίνδυνο υποβάθμισης ορισμένων χαρακτηριστικών.

Η δημιουργία στοιχειοκεραιών με στοιχεία λογαριθμικές περιοδικές κεραίες με δίπολα δίνει λύση στο πρόβλημα του χαμηλού κέρδους ακτινοβολίας της κεραίας. Οι γενικοί κανόνες των στοιχειοκεραιών ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση και επιτρέπουν τη σώρευση πολλών κεραιών με σκοπό τη βελτίωση του κέρδους. Όμως, υπάρχουν διάφορα ζητήματα τα οποία θα πρέπει να προβληματίσουν. Αρχικά, υπάρχει το πρόβλημα της σταθερότητας καθώς γίνεται λόγος για τη διάταξη πολλών κεραιών που έχουν ήδη σχετικά μεγάλο μέγεθος. Η κλασική θεωρία που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή ο πολλαπλασιασμός της διάταξης, διαθέτει πολλούς περιορισμούς για παράδειγμα δεν μπορεί να αντιμετωπίσει τους μηδενισμούς του αρχικού διαγράμματος ακτινοβολίας. Επιπλέον, το ζήτημα της μετατόπισης του κέντρου φάσης των κεραιών δεν μελετήθηκε καθόλου καθώς η περικοπή των επιμέρους στοιχείων πρακτικά το κατέστησε αμελητέο.

Η μελέτη του συγκεκριμένου ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος είναι εξαιρετικά ενδιαφέρουσα και θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση και για μελλοντική μελέτη. Περισσότερο περίπλοκες προσομοιώσεις με λογισμικά όπως το FEKO, ή το HFSS, θα αποκαλύψουν περισσότερες πτυχές του ζητήματος.

## Βιβλιογραφία

- Bakshi, K. A., Bakshi, A. V., & Bakshi, U. A. (2009). *Antennas and wave propagation*. Technical Publications.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Breakall, J. K. (1992). Introduction to three-dimensional frequency-independent phased-array (3d-fipa), a new class of phased array design. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest* , σσ. 1414 - 1417 vol.3.
- Butson, P., & Thompson, G. (1976). A note on the calculation of the gain of log-periodic dipole antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , σσ. 105-106.
- Carrel, R. L. (1961, March). The dedign of log-periodic dipole antennas. *1958 IRE International Convention Record* , σσ. 61-75.
- Chen, Y. S., & Ishimaru, A. (1966, Dec. 5-7). High gain log-periodic antennas. *1966 Antennas and Propagation Society International Symposium* , σσ. 138-146.
- Davidson, D. D. (2005). *Computational electromagnetics for rf and microwave engineering*. Cambridge: Cambridge University Press.
- DuHamel, R., & Berry, D. (1958). Logarithmically periodic antenna arrays. *WESCON/58 Conference Record* (σσ. 161 - 174). IEEE Conferences.
- DuHamel, R., & Isbell, D. (1957). Broadband logarithmically periodic antenna structures. *1958 IRE International Convention Record* , σσ. 119-128.
- Foster, P. R. (1992). Performance of ultrawideband antennas. *Proceedings Volume 1631, Ultrawideband Radar* (σ. 1631). Los Angeles: Proc.SPIE.
- Haupt, R. L. (2010). *Antenna Arrays: A Computational Approach*. Wiley-IEEE Press.
- Hohlfeld, R., & Cohen, N. (2011, Νεοέμβριος). Self-similarity and the geometric requirements for frequency independence in antennae. *Fractals* .
- Isbell, D. E. (1959). *Log periodic dipole arrays*. Urbana: University of Illinois.
- Mayes, P. E., & Carrel, R. L. (1960). *Logarithmically periodic resonant-v arrays*. Urbana: University of Illinois.

Rumsey, V. H. (1957). *Frequency Independent Antennas*. Urbana: University of Illinois.

Singh, Y. (2011). *Electromagnetic Field Theory*. Pearson India.

Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). *Antenna Theory and Design*. John Wiley & Sons, Inc.

Taylor, J. D. (1994). *Introduction to ultra-wideband radar systems*. CRC Press.

Visser, H. J. (2012). *Antenna theory and applications*. John Wiley & Sons.

Visser, H. J. (2005). *Array and phased array antenna basics*. Wiley.

Whitaker (Ed.), J. C. (2005). *The Electronics Handbook*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Παμφίλος, Π. (2019, Ιανουάριος 10). *Homothety*. Ανάκτηση Ιανουάριος 10, 2019, από <http://users.math.uoc.gr/~pamfilos/gGallery/problems/Homothety.html>



## Παράρτημα Α

```
CM NEC Input File for log-periodic 50 ohms 200-400Mhz
CE
SY D4= .003559, D3= .004563, D2= .00585, D1= .0075
SY L4= .1779, L3= .2281, L2= .2925, L1= .375
SY R4= .4368, R3= .5600, R2= .7180, R1= .9205
,
GW 1 21 R4 0. L4 R4 0. -L4 D4
GW 2 21 R3 0. L3 R3 0. -L3 D3
GW 3 21 R2 0. L2 R2 0. -L2 D2
GW 4 21 R1 0. L1 R1 0. -L1 D1
GE 0
,
TL 1 11 2 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 2 11 3 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 3 11 4 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
FR 0 1 0 0 300
EX 0 1 11 0 1. 0
RP 0 100 100 1001 -90. 90. 5. 5. 1000.
EN
```

## Παράρτημα Β

```
CM NEC Input File for log-periodic 50 ohms 200-400Mhz
CE
SY D4= .003559, D3= .004563, D2= .00585, D1= .0075
SY L4= .1779, L3= .2281, L2= .2925, L1= .375
SY R4= .4368, R3= .5600, R2= .7180, R1= .9205
,
GW 1 21 R4 0. L4 R4 0. -L4 D4
GW 2 21 R3 0. L3 R3 0. -L3 D3
GW 3 21 R2 0. L2 R2 0. -L2 D2
GW 4 21 R1 0. L1 R1 0. -L1 D1
GM 4 0 0 0 24.0408 0
GM 4 1 0 0 -48.0816 0
GE 0
,
TL 5 11 6 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 6 11 7 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 7 11 8 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 8 11 9 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 9 11 10 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 10 11 11 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 11 11 12 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
FR 0 1 0 0 300
EX 0 5 11 0 1. 0
EX 0 9 11 0 1. 0
RP 0 100 100 1001 -90. 90. 5. 5. 1000.
EN
```

## Παράρτημα Γ

```
CM NEC Input File for log-periodic 50 ohms 200-400Mhz
CE
SY D4= .003559, D3= .004563, D2= .00585, D1= .0075
SY L4= .1779, L3= .2281, L2= .2925, L1= .375
SY R4= .4368, R3= .5600, R2= .7180, R1= .9205
,
GW 1 21 R4 0. L4 R4 0. -L4 D4
GW 2 21 R3 0. L3 R3 0. -L3 D3
GW 3 21 R2 0. L2 R2 0. -L2 D2
GW 4 21 R1 0. L1 R1 0. -L1 D1
GM 0 0 0 0 0 1 0 0
GM 4 0 0 0 14.2641 0
GM 4 1 0 0 -28.5282 0
GM 0 0 0 -14.2641 0 0
GM 10 1 0 28.5282 0 0
GE 0
,
TL 5 11 6 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 6 11 7 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 7 11 8 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 8 11 9 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 9 11 10 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 10 11 11 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 11 11 12 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
,
TL 15 11 16 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 16 11 17 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 17 11 18 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
,
TL 19 11 20 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 20 11 21 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
TL 21 11 22 11 -50. 0. 0. 0. 0. 0.
,
FR 0 1 0 0 300
,
EX 0 5 11 0 1. 0
EX 0 9 11 0 1. 0
EX 0 15 11 0 1. 0
EX 0 19 11 0 1. 0
RP 0 100 100 1001 -90. 90. 5. 5. 1000.
EN
```