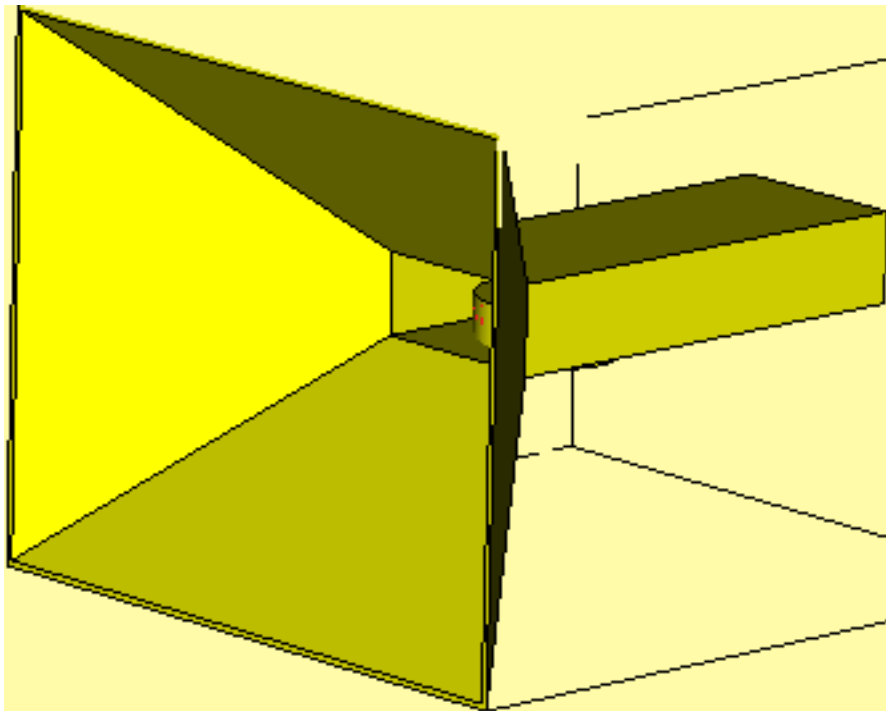




ΑΝΩΤΑΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ ΗΠΕΙΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:  
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ  
ΚΕΡΑΙΑΣ ΧΟΑΝΗΣ**



**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
ΒΟΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΑΝΑΣΤΑΣΑΚΗ ΟΛΥΜΠΙΑ  
ΑΜ.:10012**

**ΑΡΤΑ 2014**

**ΑΦΙΕΡΩΣΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ**

*Στους γονείς μου και στη αδερφή μου για την αμέριστη βοήθεια όλα αυτά τα χρόνια της φοιτητικής μου ζωής αλλά και στον αρραβωνιαστικό μου όπως και στην οικογένεια του αλλά και στους φίλους για την αμέριστη συμπαράσταση τους ως το πέρας της εργασίας αυτής.*

**Ευχαριστώ πολύ**

## ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΛΟΓΟΥ ΚΛΟΠΗΣ

*«Δηλώνω ότι η παρούσα εργασία αποτελεί προϊόν προσωπικής μελέτης και εργασίας. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται σαφώς στη βιβλιογραφία και στο κείμενο ενώ κάθε εξωτερική βοήθεια αν υπήρξε αναγνωρίζεται ρητά. Γνωρίζω πως η λογοκλοπή αποτελεί σοβαρότατο παράπτωμα και είμαι ενήμερη για την επέλευση των νόμιμων συνεπειών.»*

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

*Ολοκληρώνοντας μια προσπάθεια πολλών χρόνων θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου Κ. Βότη Κωνσταντίνο, που μου εμπιστεύθηκε το ενδιαφέρον αυτό θέμα. Όπου υπήρξε άριστος επιστημονικός επιβλέπων καθώς με τις συμβουλές του έφερα εις πέρας την εργασία αυτή.*

*Καθώς και τους καθηγητές οι οποίοι με οδήγησαν καθόλη τη διάρκεια της φοίτησης μου. Οι γνώσεις που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια αποτελούν βασικό εφόδιο στην επιτυχία μου αλλά και στην αγορά εργασίας ειδικά στις δύσκολες εποχές που διανύουμε. Αλλά και το διοικητικό και διδακτικό προσωπικό του τμήματος που με βοήθησαν σε αρκετές δύσκολες στιγμές κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.*

*Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου οι οποίοι έκαναν όλα αυτά τα χρόνια που πέρασαν μια αξέχαστη εμπειρία. Όπως και τον Σιγανό Ζαχάρη ο οποίος συντέλεσε στην εργασία αυτή με τις συμβουλές του. Επίσης ευχαριστώ θερμά την αδερφή μου και τον αρραβωνιαστικό μου αλλά και την οικογένειά του οι οποίοι μου συμπαραστάθηκαν και με ενθάρρυναν κατά την προσπάθειά πραγματοποίησης των στόχων μου.*

*Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου οι οποίοι με στήριξαν ηθικά και οικονομικά έτσι ώστε να τελειώσω τις σπουδές μου χωρίς δυσκολία, σε ένα άνετο περιβάλλον χωρίς καμία στέρηση.*

# Έγγραφο Έγκρισης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή  
Άρτα,... ../...../ 2014

## ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

### 1. Ονοματεπώνυμο Υπογραφή

.....

### 2. Ονοματεπώνυμο Υπογραφή

.....

### 3. Ονοματεπώνυμο Υπογραφή

.....

# ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ ΧΟΑΝΗΣ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με τη θεωρητική έρευνα και μελέτη αλλά και με την ανάλυση της κεραίας χοάνης. Σκοπός της εργασίας είναι να κατασκευαστεί θεωρητικά η κεραία και να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά της, η γεωμετρία της αλλά και οι ιδιότητές της.

Ειδικότερα στοχεύει στην ανάλυση της κεραίας χοάνης η οποία έχει μεγάλη απολαβή, μικρό βάρος και μεγάλο εύρος συχνοτήτων καθώς χρησιμοποιείται από 300MHz και φτάνει στα 17GHz. Χρησιμοποιείται σε ραντάρ, ραδιόμετρα σε φούρνους μικροκυμάτων αλλά κυρίως σε διαστημικές εφαρμογές όπως δορυφορικές επικοινωνίες κ.α. Επίσης είναι εύκολη στην κατασκευή της και εύκολα προσαρμόσιμη στα κυκλώματα εκπομπής - λήψης.

Στο πρώτο κεφάλαιο θα μιλήσουμε για τα κύματα και θα εστιάσουμε στα ηλεκτρομαγνητικά, αναλύοντας και τα στάσιμα κύματα καθώς επιδρούν στην απόδοση των κεραιοσυστημάτων γενικά.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα ορίσουμε βασικές έννοιες και τα χαρακτηριστικά των κεραιών όπως και θα μιλήσουμε για την ιστορία τους η οποία είναι πολύ μεγάλη καθώς από τα μηνύματα με τη φωτιά περάσαμε στο διαδίκτυο και στη σημερινή εποχή η οποία έχουμε συνεχή εξέλιξη στην τεχνολογία.

Στο τελευταίο κεφάλαιο θα αναλύσουμε την πυραμιδοειδή κεραία χοάνη δηλαδή θα αναφέρουμε τα στάδια σχεδιασμού ώστε να φτάσουμε στα επιθυμητά αποτελέσματα με μετρήσεις που ικανοποιούν τις προσδοκίες μας.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** κεραίες, κεραία ανοίγματος, χοάνη, συχνότητες, λόγος στάσιμου κύματος-vswr ηλεκτρομαγνητικά κύματα, στάσιμα κύματα.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Αφιέρωση πτυχιακής εργασίας .....	2
Δήλωση περί Λογοκλοπής .....	3
Ευχαριστίες.....	4
Έγγραφο έγκρισης πτυχιακής εργασίας.....	5
Περίληψη.....	6
 <i>ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ.....</i>	 11

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΚΥΜΑΤΑ**

1.1 Ορισμός κύματος .....	16
1.2 Μεγέθη κύματος .....	17
1.3 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα .....	21
1.3.1 Εξίσωση ηλεκτρομαγνητικού κύματος .....	21
1.3.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα .....	22
1.3.3 Ανάκλαση ηλεκτρομαγνητικού κύματος .....	25
1.3.4 Ιδιότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων .....	26
1.3.5 Η διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος .....	27

1.3.6 Έννοιες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων .....	28
1.4 Στάσιμα κύματα .....	30
1.4.1 Εξίσωση στάσιμου κύματος .....	31
1.4.2 Λόγος στάσιμου κύματος .....	31

## ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΕΡΑΙΩΝ***

2.1 Εισαγωγή .....	33
2.2 Ορισμοί κεραίας.....	34
2.3 Βασικές θεωρητικές έννοιες.....	34
2.4 Διάγραμμα ακτινοβολίας.....	38
2.5 Παράμετροι σκέδασης.....	40
2.6 Είδη κεραιών .....	40

## ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ ΧΟΑΝΗΣ***

3.1 Μελέτη κεραίας .....	46
3.2 Υλοποίηση κεραίας.....	48
Συμπεράσματα.....	60
Επίλογος .....	61



## ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΩΝ

Γραφική παράσταση 1 .....	49
Γραφική παράσταση 2 .....	51
Γραφική παράσταση 3 .....	53
Γραφική παράσταση 4 .....	55
Γραφική παράσταση 5 .....	57
Γραφική παράσταση 6 .....	58

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 .....	25
Πίνακας 3.1.....	46
Πίνακας 3.2.....	46
Πίνακας 3.3.....	46
Πίνακας 3.4.....	48
Πίνακας 3.5.....	48
Πίνακας 3.6.....	48
Πίνακας 3.7.....	50
Πίνακας 3.8.....	50
Πίνακας 3.9.....	52
Πίνακας 3.10.....	54
Πίνακας 3.11.....	56
Πίνακας 3.12.....	58

**ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**

Διάγραμμα 1 .....	50
Διάγραμμα2 .....	52
Διάγραμμα 3 .....	53
Διάγραμμα 4 .....	55
Διάγραμμα 5 .....	57
Διάγραμμα 6 .....	59
Βιβλιογραφία .....	62

## ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

[3],[5], [26], [30], [46]

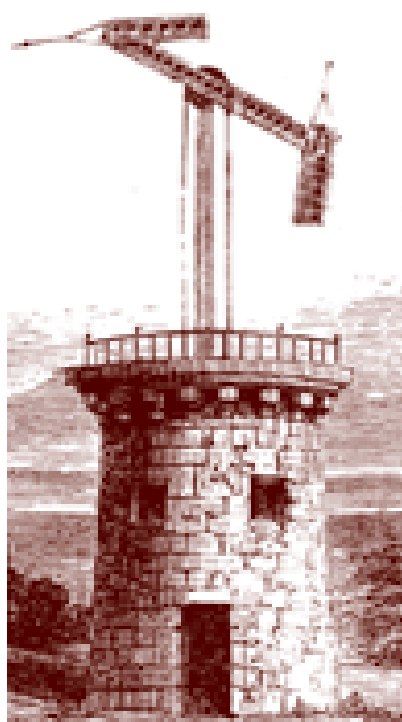
Η ιστορία των τηλεπικοινωνιών ξεκινάει από την αρχαιότητα καθώς η ανάγκη της επικοινωνίας τους οδήγησε στην πρώτη ανακάλυψη. Το 1195-1184 πΧ, κατάφεραν να επικοινωνούν με οπτικά σήματα ή κάτοπτρα τη μέρα και όταν έπεφτε το σκοτάδι με τη φωτιά.

Τον 5<sup>ο</sup> αιώνα βρίσκουν τη λύση στα ταχυδρομικά περιστέρια. Σε αυτό το είδος επικοινωνίας έγραφες το μήνυμα και το έδενες στο πόδι του περιστεριού και το έστελνες. Είχε όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα, ότι κάποιες φορές το μήνυμα δεν έφτανε ποτέ στον παραλήπτη καθώς είτε από τις καιρικές συνθήκες είτε από άλλους παράγοντες το περιστέρι δεν μπορούσε να φέρει εις πέρας τη δουλειά του.

Η ανάγκη του ανθρώπου για γρηγορότερη επικοινωνία μας φέρνει στην εποχή των Ρωμαίων και των Βυζαντινών όπου από τα περιστέρια περνάμε στον αγγελιοφόρο. Έτσι μεταβίβαζαν το μήνυμα στον άνθρωπο-αγγελιοφόρο και αυτός το μετέδιδε στον προορισμό του. Η απόσταση που συνήθως έκαναν καλυπτόταν με τα πόδια, με αποτέλεσμα όταν ο παραλήπτης ήταν μακριά ο αγγελιοφόρος για να το μεταδώσει έπρεπε να διανύσει πολλά χιλιόμετρα. Με αποτέλεσμα το μήνυμα να κάνει μεγάλα χρονικά διαστήματα για να μεταδοθεί.

Έτσι καθώς περνούσαν τα χρόνια ο άνθρωπος έψαχνε για καινούριους τρόπους μετάδοσης μηνυμάτων καθώς οι προηγούμενοι μέθοδοι ήταν πολύ χρονοβόροι. Έτσι έρχεται το 1792 ο Claude Charpe όπου ανακαλύπτει τον τηλεγράφο.

Ο τηλεγράφος αποτελούνταν από ένα ιστό όπου τοποθετούνταν σε ορατό σημείο και πάνω στον ιστό αυτό, βρίσκονταν ράβδοι οι οποίοι κινούνταν με σχοινιά και μοχλούς, έτσι μεταδιδόταν το μήνυμα για αυτό ονομάστηκε οπτικός τηλεγράφος.

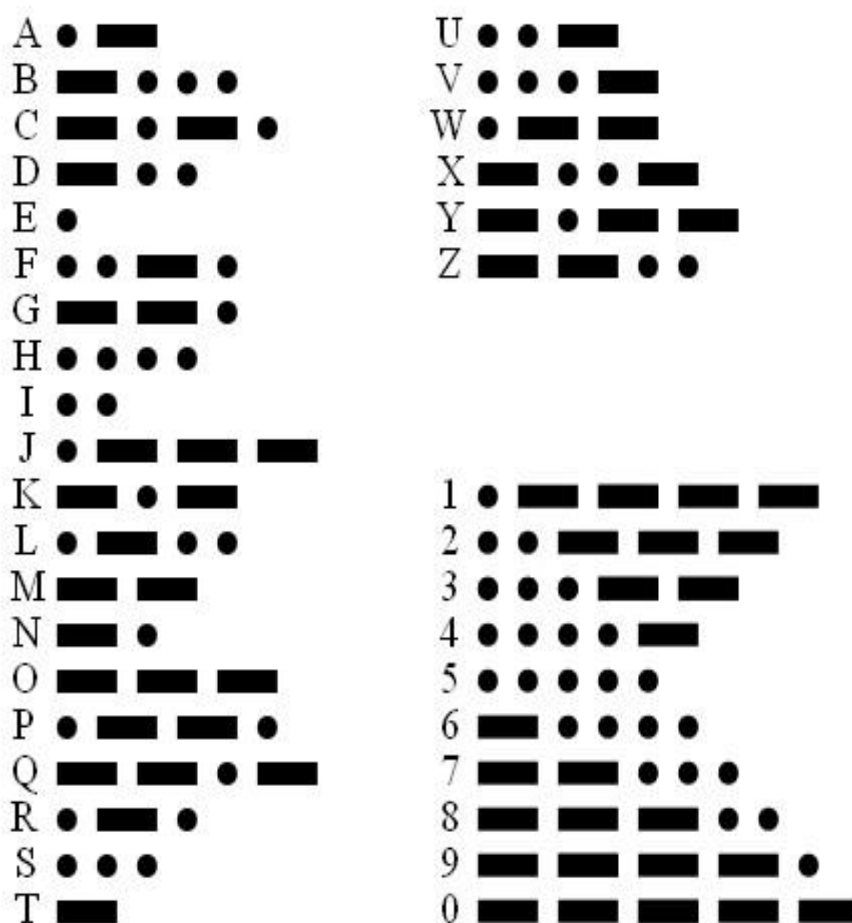


Εικόνα 1: Τηλέγραφος Chappe<sub>[27]</sub>

Βλέπουμε ότι υπάρχει μία μεγάλη πρόοδο όπου τα μηνύματα τα οποία ταξίδευαν μέσω του ανθρώπου, τώρα πλέον περνάνε σε ένα μηχάνημα το οποίο διευκολύνει την καθημερινότητα καθώς μπορεί να μεταδώσει ένα μήνυμα σε πολύ λίγο χρόνο, που αν χρησιμοποιούσαμε τον άνθρωπο θα έπαιρνε πολλές μέρες ακόμα και μήνες.

Οι ανάγκες συνεχώς μεγαλώνουν έτσι το 1830 ο Joseph Henry ανακαλύπτει τον ηλεκτρομαγνητισμό και πως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε η επικοινωνία του ανθρώπου να γίνει ευκολότερη.

Στη συνέχεια ο Samuel Morse το 1837 παίρνει τον τηλέγραφο και τον ηλεκτρομαγνητισμό και ενώνοντας αυτά τα δύο δημιουργεί τον ηλεκτρικό τηλέγραφο Morse. Έτσι προκύπτει όμως και μια νέα ανάγκη για την επικοινωνία των μηχανών που τον οδήγησε στη δημιουργία του γνωστού κώδικα Morse όπου περιέχει το αλφάβητο, τους 10 αραβικούς αριθμούς αλλά και τα σημεία στίξης. Το αλφάβητο αποτελούνταν από ένα συνδυασμό γραμμών και τελειών για κάθε χαρακτήρα. Με τον ασύρματο Morse μπορούν να στείλουν μηνύματα τα οποία γράφονταν με το παραπάνω αλφάβητο

Εικόνα 2: Κώδικας Morse<sub>[14]</sub>

Το 1873 ο James Clerk Maxwell αναλύει μαθηματικά τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω του χώρου. Καθώς παρατηρεί ότι τόσο το ηλεκτρικό πεδίο όσο και το μαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρούν και δημιουργούν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, αυτό δημιουργείται με την επιταχυνόμενη κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων.



*James Clerk Maxwell*

Εικόνα 3: James Clerk Maxwell<sup>[52]</sup>

Το 1874 ο Αλεξάντερ Γκράχαμ Μπελ ανακαλύπτει την αρχή λειτουργίας του τηλεφώνου και ένα χρόνο αργότερα γίνεται η πρώτη του δοκιμή. Έτσι βρισκόμαστε στην ανακάλυψη του τηλεφώνου όπου εκμηδενίζεται η απόσταση και ο ήχος της φωνής μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα.

Καθώς περνάει ο καιρός ο άνθρωπος αποκτά όλο και περισσότερες ανάγκες έτσι το 1878 δημιουργείται το πρώτο τηλεφωνικό κέντρο στον κόσμο, ένα χρόνο αργότερα για την καλύτερη εξυπηρέτηση των χειριστών των τηλεφωνικών κέντρων ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται οι τηλεφωνικοί αριθμοί.

Το 1894 ο Alexander Popov κατασκευάζει ένα δέκτη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και επιτυγχάνει τη μετάδοση ραδιοκυμάτων μεταξύ 2 σημείων. Έτσι στη Βουδαπέστη ξεκινάει ένας σταθμός όπου μπορεί εκπέμπει σε πάνω από 220μίλια τηλεφωνικών γραμμών και να εξυπηρετεί 6000 συνδρομητές.

Το 1895 ο Marconi ανακαλύπτει τον ασύρματο όπου στέλνεται και το πρώτο μήνυμα από τον Ατλαντικό ωκεανό.



Εικόνα 4: Γουλιέλμο Μαρκόνι<sup>[28]</sup>

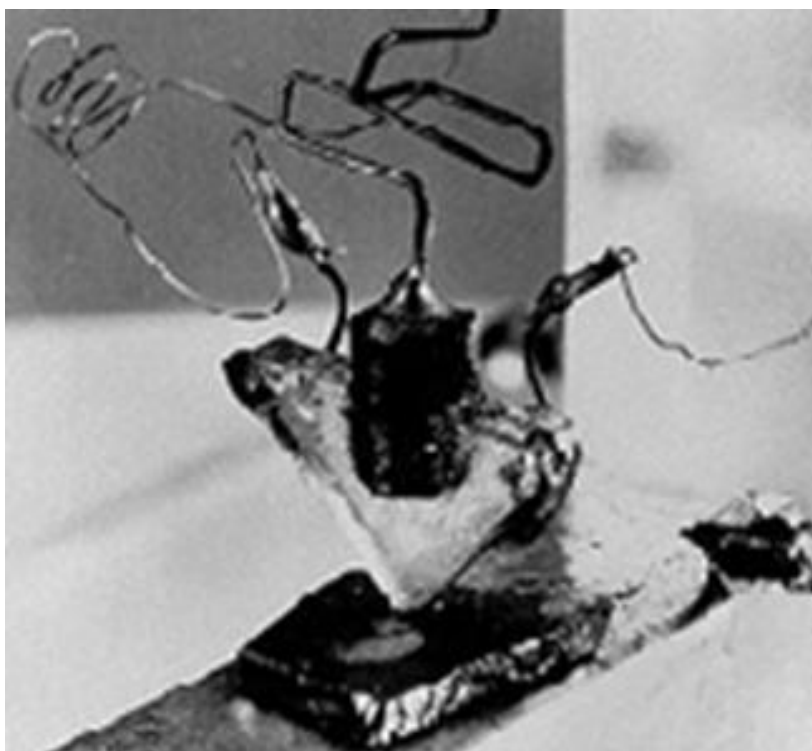
Αυτό επιτεύχθηκε καθώς κατάφερα με απλές συσκευές όπως πηνία και πρόχειρους αναμεταδότες να δημιουργήσει τον πομπό, ο οποίος είναι ένα συνεχώς διακοπτόμενο κύκλωμα που παράγει σπινθήρες ενώ ο δέκτης του λαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά κύματα και αυτός όμως έκλεινε με έναν διακόπτη. Στο τέλος του πειράματος αυτού ο Μαρκόνι έβαλε το ένα άκρο του διακοπτόμενου κυκλώματος σε μία κεραία και το άλλο άκρο στη γη και έτσι δημιουργείτε ο πρώτος ασύρματος αναμεταδότης.

Βλέπουμε ότι ο άνθρωπος με αργά βήματα από τα ενσύρματα μέσα περνάει στα ασύρματα. Έτσι το 1907 οι ΗΠΑ ξεκινούν τη ρύθμιση των τηλεπικοινωνιών και εγκαθίστανται οι πρώτες υπερατλαντικές ασύρματες υπηρεσίες.

Το 1914 γίνεται η πρώτη διηπειρωτική τηλεφωνική κλήση.

Οι Atanasoff και Berry κατασκευάζουν το 1942 τον πρώτο ηλεκτρονικό – ψηφιακό υπολογιστή ο οποίος υπολογιστής δεν ήταν προγραμματιζόμενος.

Το 1947 κατασκευάζεται το τρανζίστορ. Θεωρείται μια από τις μεγαλύτερες εφευρέσεις καθώς είναι το κυριότερο συστατικό όλων των σύγχρονων ηλεκτρονικών κατασκευών. Καθώς είναι μικρό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιαδήποτε τεχνολογία.



Εικόνα 5: Το πρώτο τρανζίστορ<sup>[29]</sup>

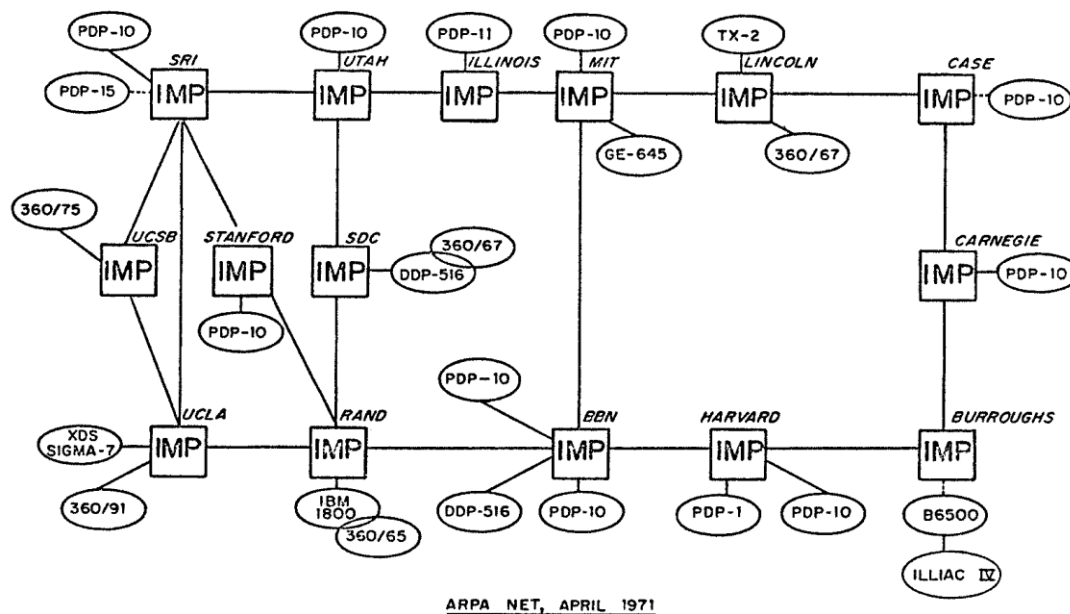
Το 1960 εκτοξεύονται δορυφόροι στο διάστημα με αποτέλεσμα το 1962 να έχουμε τις πρώτες τηλεφωνικές κλήσεις και εικόνες μέσω δορυφόρων, όπως και τον πρώτο μίνι υπολογιστή.

Το 1969 δημιουργείται μια νέα τεχνολογία το internet(Διαδίκτυο), καθώς εγκαθίστανται σε τέσσερα πανεπιστήμια το σύστημα ARPANET όπου μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, αλλά και να έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς αρχείων.

Όσο περνάνε τα χρόνια παρατηρούμε ότι ο άνθρωπος εφευρίσκει νέες τεχνολογίες που ενισχύουν τις δυνατότητες επικοινωνίας. Έτσι βλέπουμε ότι από τα

μηνύματα τα οποία τυπώνονταν στο χαρτί και η διαδικασία τους ήταν χρονοβόρα, πλέον μπορεί να τα στέλνει μέσω διαδικτύου πατώντας ένα κουμπί μονάχα.

Το 1973 αναπτύσσεται περισσότερο το διαδίκτυο καθώς ο Bob Metcalfe σκιαγραφεί το Ethernet και με τη βοήθεια της Xerox καταφέρνει να το εφαρμόζει σε ορισμένα μοντέλα υπολογιστών και το ονομάζει Alto Aloha System.



Εικόνα 6: Το πρώτο σύστημα ARPA NET<sup>[31]</sup>

Συγχρόνως όμως ο Vinton Cerf σχεδιάζει τις gateway του δικτύου. Επίσης ο Cerf μαζί με τον Kahn δημοσιοποιούν το πρωτόκολλο TCP (Transmission Control Protocol) το οποίο θα ολοκληρωθεί το 1978. Ένα χρόνο μετά το 1979 δημιουργείται στην Ιαπωνία το πρώτο κυβελωτό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας.

Το 1986-1989 δημιουργείται το NSFNET για να συνδέσει πέντε υπερυπολογιστές και να γίνει το δίκτυο κορμού του διαδικτύου. Μερικές χώρες οι οποίες συνδέθηκαν ήταν η Ιταλία (IT), η Νέα Ζηλανδία (NZ) κ.α. Επίσης επινοείται από τον Tim Berners-Lee το παγκόσμιο πλέγμα πληροφοριών (WWW).

Τη δεκαετία του 1990 βλέπουμε ότι το διαδίκτυο είναι στο επίκεντρο καθώς δημιουργείτε από τον John Romkey η πρώτη συσκευή που έχει τη δυνατότητα να συνδέεται με το διαδίκτυο και είναι η internet toaster. Εισάγεται το πρωτόκολλο Internet protocol v4 ώστε να γίνονται οι μεταφορές δεδομένων μέσω διαδικτύου πιο αξιόπιστες σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο TCP.

Τέλος φτάνουμε στον 21<sup>ο</sup> αιώνα όπου η συνεχής εξέλιξη και οι ανάγκες για επικοινωνία που προκύπτουν από την καθημερινότητα, μας έχουν ωθήσει να ανακαλύπτουμε όλο και περισσότερες τεχνολογίες είτε σχετικά με το διαδίκτυο, είτε με την τηλεφωνία καθώς χρειαζόμαστε την επικοινωνία, είτε να στείλουμε κάποια μηνύματα είτε για τις κλήσεις βλέπουμε τη ραγδαία εξέλιξη στο διαδίκτυο καθώς δοκιμάζεται και το Internet Protocol v6, επίσης έχουμε την πρώτη ασυμπίεστη μετάδοση μεγάλης έκτασης βασισμένων στο πρωτόκολλο IP (HDTV). Ακόμα έχουμε το πρωτόκολλο Voice over internet (VoIP), όπου είναι η ομάδα η οποία ενώνει όλες τις τεχνολογίες μαζί καθώς χρησιμοποιεί την τηλεφωνία μέσω διαδικτύου, έτσι μπορούμε να λαμβάνουμε κλήσεις, μηνύματα, κ.α. μέσω διαδικτύου.

# ΚΥΜΑΤΑ

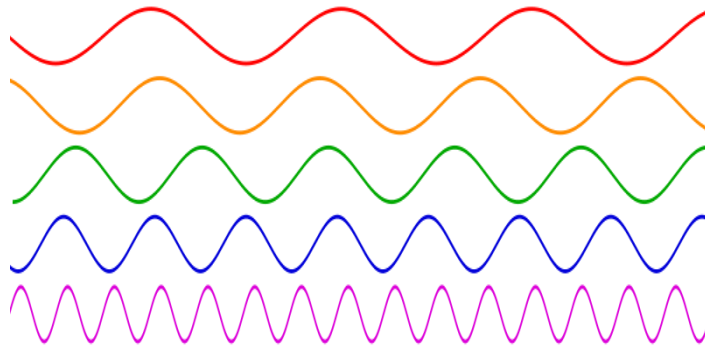
## 1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ [12], [22], [25]

Κύμα ονομάζεται η διάδοση μιας διαταραχής όπου μεταφέρει ενέργεια και ορμή με σταθερή ταχύτητα, μεταφέρεται από το ένα σημείο του μέσου στο άλλο χωρίς όμως να περιλαμβάνει ύλη.

Για τη δημιουργία ενός κύματος απαιτείται η πηγή του κύματος όπου είναι η αφετηρία της διαταραχής, και το μέσο διάδοσης το οποίο είναι ο χώρος που θα διαδοθεί η διαταραχή.

Το κύμα εκπορεύεται από μία πηγή (ένας ταλαντωτής σε ελεύθερη ή εξαναγκασμένη ταλάντωση) και διαδίδεται σε κάποιο μέσο(αέρας, κενό),έτσι ανιχνεύεται από ένα δέκτη(ένας ταλαντωτής όπου ενεργοποιείται από αυτό).

Το κύμα χωρίζεται σε κατηγορίες οι οποίες είναι ανάλογες με το μηχανισμό διάδοσης τους και είναι οι εξής:



Εικόνα 7: Ημιτονοειδή κύματα διαφόρων συχνοτήτων<sub>[12]</sub>

➤ Ηλεκτρομαγνητικά (φωτεινά κύματα, ραδιοκύματα ακτίνες X, κ.α.): Διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα  $c=3 \cdot 10^8 \text{m/s}$  και η διάδοση τους γίνεται μέσω της ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής.

➤ Μηχανικά (σεισμικά, υδάτινα, ηχητικά): Χρειάζονται μέσο διάδοσης καθώς η διάδοση της διαταραχής γίνεται μόνο σε υλικά σώματα τα οποία έχουν τη δυνατότητα να δέχονται και να μεταβιβάζουν προσωρινές παραμορφώσεις.

➤ Στάσιμα: Η διάδοση της διαταραχής αφήνει τη φάση του κύματος σταθερή.

Όλα τα παραπάνω κύματα για να διαδοθούν έχουν τις εξής ιδιότητες:

- Γραμμική: η διάδοση τους γίνεται σε μία μόνο κατεύθυνση.
- Επιφανειακά: διαδίδονται μόνο στην επιφάνεια ενός υλικού.



- Όγκου: η διάδοση τους γίνεται προς όλες τις διευθύνσεις ενός υλικού μέσου
- Εγκάρσια: τα μόρια του μέσου ταλαντώνονται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του μέσου σε αντίθεση με τα
  - Διαμήκη τα οποία ταλαντώνονται παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης του μέσου.
  - Τρέχοντα: η διάδοση τους μετακινεί τη φάση του κύματος από το ένα σημείο του μέσου στο άλλο.

## 1.2 ΜΕΓΕΘΗ ΚΥΜΑΤΟΣ [4], [12], [33],[42], [44]

### **ΠΕΡΙΟΔΟΣ(T):**

Είναι το μέγεθος που χαρακτηρίζει τα φυσικά φαινόμενα τα οποία έχουν την ιδιότητα να επαναλαμβάνονται μετά από έναν συγκεκριμένο χρόνο, έτσι η περίοδος κύματος είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών διαταραχών δηλαδή το χρονικό διάστημα διέλευσης δύο κορυφών του κύματος από ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου και συμβολίζεται με T και μετριέται σε δευτερόλεπτα(s).

Έχει τύπο:

$$T = \frac{\Delta t}{N}$$

Όπου T η περίοδος

$\Delta t$  το χρονικό διάστημα και

N είναι ο αριθμός των διαταραχών που πέρασαν σε χρονική περίοδο  $\Delta t$

### **ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ(f):**

Είναι ο αριθμός των επαναλήψεων ενός γεγονότος στη μονάδα χρόνου, η συχνότητα χαρακτηρίζει οποιοδήποτε φυσικό μέγεθος μεταβάλλεται περιοδικά σε σχέση με το χρόνο. Η συχνότητα εκφράζει περιοδικές κινήσεις.

Άρα συχνότητα κύματος είναι το μέγεθος που μεταβάλλεται περιοδικά με το χρόνο έτσι θα έχουμε :

- Στα μηχανικά κύματα να αλλάζει η θέση των στοιχειωδών σωματιδίων από τη θέση ισορροπίας τους
- Στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα να μεταβάλλεται το ηλεκτρικό αλλά παράλληλα και το μαγνητικό πεδίο

Έτσι η συχνότητα μεταβάλλεται περιοδικά με το χρόνο αλλά και με την απόσταση ώστε να έχουμε τη συχνότητα ανάλογη της ταχύτητας  $v$  και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος  $\lambda$ .

Έχει τύπο:

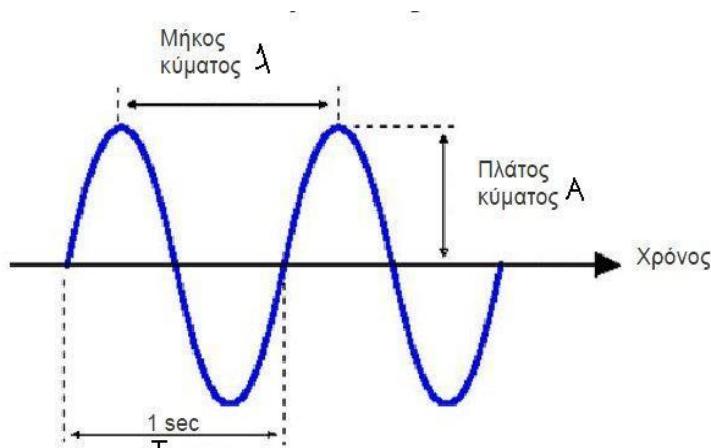
$$f = \frac{v}{\lambda}$$

Αλλά σε περίπτωση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπου διαδίδονται στο κενό έχουμε το  $v=c$  έτσι:

Ο τύπος γίνεται:

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

Όπου  $c$  είναι η ταχύτητα φωτός και μετριέται σε  $3 \cdot 10^8$  m/s  
Έχει μονάδα μέτρησης το Hz.



Εικόνα 8: Μεγέθη κύματος(περίοδος  $T$ , μήκος κύματος  $\lambda$ , πλάτος κύματος  $A$ )<sub>[32]</sub>

### **ΦΑΣΗ ( $\varphi$ ):**

Είναι το μέγεθος που εκφράζει την απομάκρυνση ενός σώματος που εκτελεί ταλάντωση από τη θέση ισορροπίας του σε ορισμένο χρόνο και είναι γραμμικό. Με αυτό το μέγεθος μπορούμε να μελετήσουμε τα κύματα, με βάση τις τριγωνικές συναρτήσεις, καθώς η φάση του κύματος είναι το βασικό μέγεθος των συναρτήσεων αυτών. Συμβολίζεται με  $\varphi$  και μετριέται σε rad.

Ισχύουν οι παρακάτω τύποι:

$$a = A\eta\mu(\varphi(x, t))$$

εξίσωση κύματος σε σχέση με τη φάση( $\varphi(x,t)$ )

όπου

$a$ =το μέγεθος που διαταράσσετε

$A$ = το πλάτος του κύματος

$\varphi(x,t)$ =η φάση σε συνάρτηση με τη θέση  $x$  τη χρονική στιγμή  $t$

$$\varphi = at + \beta x$$

αυτή είναι η γραμμική συνάρτηση της φάσης σε σχέση με το χρόνο.

Η φάση κύματος χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

→ Συμφασικά όταν δύο κύματα βρίσκονται στο ίδιο σημείο της διαταραχής τότε έχουμε  $\varphi_1 = \varphi_2 + 2k\pi$  και το τελικό κύμα θα έχει πλάτος το άθροισμα των πλατών των 2 κυμάτων.

→ Αντίθεση φάσης όταν τα 2 κύματα συμπεριφέρονται αντίθετα και έχουν μια διαφορά μισού μήκος κύματος τότε γίνεται  $\varphi_1 = \varphi_2 + 2k\pi + \pi$  έτσι το τελικό κύμα έχει πλάτος τη διαφορά των πλατών, (όπου  $\varphi_1$  η φάση του ενός κύματος και  $\varphi_2$  η φάση του δεύτερου κύματος).

### **ΠΛΑΤΟΣ(A):**

Είναι η μετατόπιση κατά ύψος ενός σημείου, δηλαδή το σημείο ισορροπίας κατά τη διέλευση ενός κύματος. Επίσης είναι περιοδικό φαινόμενο καθώς λαμβάνει μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή και για μέσο έχει το μηδέν. Με αυτό καταφέρνουμε να έχουμε την απόλυτη τιμή του ελάχιστου πλάτους να είναι ίση με το μέγιστο πλάτος έτσι δημιουργείτε το πλάτος του κύματος, όπου συμβολίζεται με  $A$  και μετριέται σε  $m$ . Είναι ανάλογο με τη φάση αλλά και με το χρόνο, όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος ενός σημείου του κύματος τόσο μεγαλύτερη ενέργεια μεταφέρεται.

### **ΤΑΧΥΤΗΤΑ $v$ :**

Είναι το μέγεθος με το οποίο διαδίδεται ένα κύμα και αφορά το πόσο γρήγορα μπορεί να μεταφερθεί η ενέργεια, συμβολίζεται με  $v$  και μετριέται σε  $m/s$ , και έχει τύπο:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Όπου

$$T = \frac{1}{f}$$

και η κυματική εξίσωση της ταχύτητας με τους παραπάνω τύπους γίνεται:

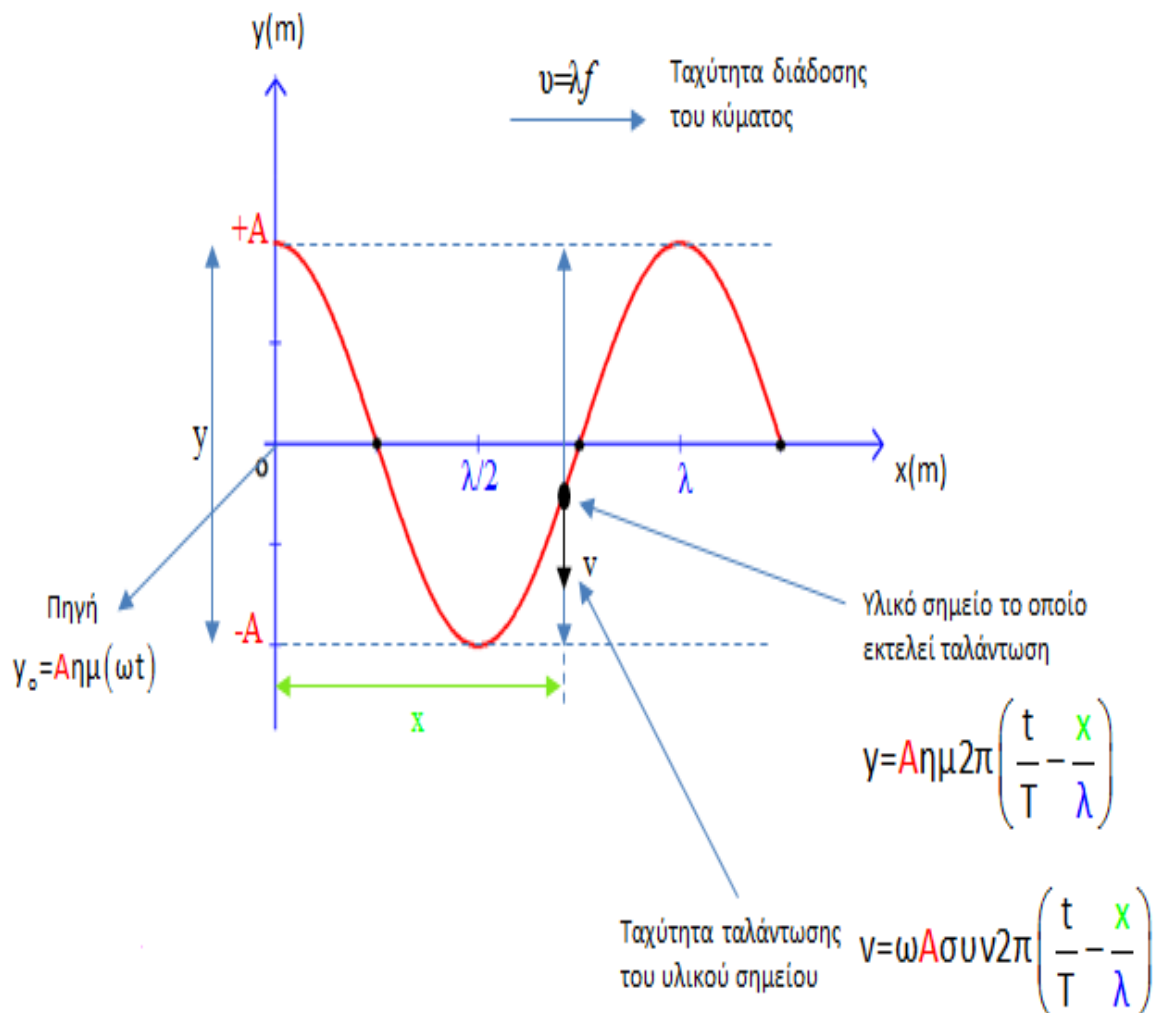
$$v = \lambda * f$$

### ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ( $\lambda$ ):

Είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών όπου διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου, συμβολίζεται με  $\lambda$  και μετριέται σε μέτρα(m). Επίσης το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας του ίδιου κύματος και ανάλογο της ταχύτητας διάδοσης, οπότε όσο πιο μικρή είναι η συχνότητα τόσο πιο μεγάλο είναι το μήκος κύματος και αυτό φαίνεται από τον παρακάτω τύπο:

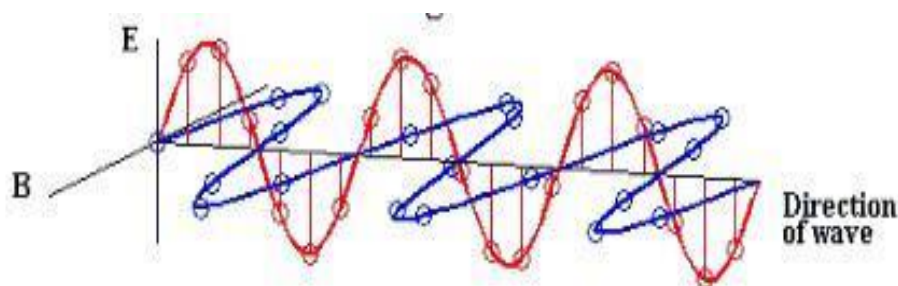
$$f = \frac{v}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f}$$

Όπου  $f$  η συχνότητα  $v$  η ταχύτητα διάδοσης και  $\lambda$  το μήκος κύματος



Εικόνα 9: Ταχύτητα και μήκος κύματος<sub>[16]</sub>

## 1.3 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ<sub>[6],[9],[11],[23]</sub>



Εικόνα 10: Ηλεκτρομαγνητικό κύμα<sub>[35]</sub>

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα ανακάλυψε ο James Clerk Maxwell το 1873 καθώς παρατήρησε ότι τόσο το μαγνητικό όσο και το ηλεκτρικό πεδίο από μόνα τους δε μπορούν να αντιδράσουν, ενώ όταν ενωθούν το ένα(μαγνητικό)θα προκαλέσει αλλαγή στο άλλο(ηλεκτρικό) με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, αυτό δημιουργείται με την επιταχυνόμενη κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι η ταυτόχρονη διάδοση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Το κύμα έχει τη δυνατότητα να διαδίδεται και στο κενό με σταθερά ταχύτητας(φωτός)  $c=3 \cdot 10^8$  m/s, ενώ στα άλλα μέσα διαδίδεται με μικρότερη ταχύτητα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι ίδια με αυτά της θάλασσας η διαφορά τους είναι ότι ενώ τα πρώτα είναι εγκάρσια τα άλλα διαμηκή. Όταν ένα κύμα είναι εγκάρσιο όπως αναφέραμε και παραπάνω τότε είναι κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης του, έτσι το διάνυσμα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος όπως βλέπουμε και στην παρακάτω εικόνα, αυτό φυσικά το βλέπουμε μόνο θεωρητικά καθώς δεν είναι ορατά στο μάτι.

### 1.3.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ<sub>[42],[44]</sub>

Οι εξισώσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι οι εξής:

Ο λόγος των μέτρων των εντάσεων τόσο του μαγνητικού όσο και του ηλεκτρικού πεδίου είναι ίσος με την ταχύτητα διάδοσης τους  $c$  για το κενό και  $v$  για όλα τα άλλα μέσα.

$$v = \frac{E}{B} \quad \text{ή} \quad c = \frac{E}{B}$$

Όπου  $E$  το ηλεκτρικό πεδίο

$B$  το μαγνητικό πεδίο

$v, c$  η ταχύτητα διάδοσης στο χώρο και στο κενό αντίστοιχα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υπακούουν στη αρχή της επαλληλίας και ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$E = E_{max} \cdot \eta \mu 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

ηλεκτρικό πεδίο με  $E_{max}$  η μέγιστη τιμή της έντασης

$$B = B_{max} \cdot \eta \mu 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

μαγνητικό πεδίο με  $B_{max}$  η μέγιστη τιμή της έντασης

Η παρακάτω εξίσωση (Θεμελιώδης εξίσωση κυματικής) συνδέει το μήκος κύματος με τη συχνότητα όταν αυτό διαδίδεται στο κενό  $c$ :

$$c = \lambda \cdot f$$

### 1.3.2 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ<sub>[11],[44],[46]</sub>

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χρησιμοποιούνται πάρα πολύ στις μέρες μας αλλά και στην καθημερινότητα. παρακάτω θα δούμε σε ποιες κατηγορίες χωρίζονται:

#### ○ **Ραδιοκύματα:**

Τα οποία μελετήθηκαν από τον Hertz με συχνότητα από 10nm-10<sup>9</sup>nm χρησιμοποιούνται στη ραδιοφωνία και στην τηλεόραση από ηλεκτρονικά κυκλώματα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κυκλώματα τα οποία χρησιμοποιούν τα ραδιοκύματα λειτουργούν σε ραδιοφωνική συχνότητα για τη μετάδοση ήχου σε RF(Radio Frequency) και οι μεταδόσεις τους λέγονται ραδιοσυχνότητες ή μεταδόσεις RF. Για να μεταδοθούν τα ραδιοκύματα δε χρειάζεται άμεση φυσική σύνδεση καθώς μεταδίδονται από κεραία σε κεραία(πομπός-δέκτης) και μπορούν να μεταδοθούν και στο κενό, οι οποίες η κάθε κεραία έχει μέγεθος ανάλογο με την εμβέλεια την οποία εκπέμπει.

#### ○ **Μικροκύματα:**

Από 10<sup>9</sup>m-10<sup>12</sup>m, χρησιμοποιούνται σε ραντάρ, στην ιατρική, στους φούρνους μικροκυμάτων όπως και στην τηλεφωνία και παράγονται από ηλεκτρονικές διατάξεις. Ταξιδεύουν στον αέρα και λαμβάνονται από κεραίες πιάτου καθώς δε μπορούν να ληφθούν και να εκπέμψουν σε μεταλλικές συσκευές. Για να γίνει η σωστή διάδοση του κύματος θα πρέπει να υπάρχει ανοικτή διαδρομή από τον πομπό στο δέκτη. Για αυτό το λόγο οι κεραίες των μικροκυμάτων πρέπει να κτίζονται στα υψηλότερα σημεία έτσι ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα μετάδοσης.

○ **Υπέρυθρη ακτινοβολία:**

Αποτελείται από το μήκος κύματος που είναι 1mm-700nm, τη χρησιμοποιούν για τη φωτογραφία αλλά κυρίως για τους ανιχνευτές της υπέρυθρης ακτινοβολίας καθώς εφαρμόζεται σε θερμά σώματα και αφού τα σώματα της γης και τα ουράνια σώματα εκπέμπουν αυτή την ακτινοβολία, έτσι είναι εύκολο να μεταδώσουν το σήμα στα κατάλληλα μηχανήματα είτε αυτά είναι δορυφόροι είτε σε απλές εφαρμογές ακόμα και στο μηχάνημα του αλκοτέστ καθώς μεταδίδεται μέσω του ξηρού αέρα και όχι μέσα από υδρατμούς.

Επίσης εκτός από το να ακτινοβολείται απορροφάται από τα σώματα με αποτέλεσμα τα σωματίδια να αυξάνονται και με επίπτωση να αυξάνεται και η θερμοκρασία του σώματος.

○ **Ορατή ακτινοβολία(φως)**

Από 700nm-400nm χρησιμοποιείται στην όραση και εφαρμόζεται από το ανθρώπινο μάτι, καθώς το ορατό φως παράγεται από την ανακατανομή των ηλεκτρονίων στα άτομα και τα μόρια έτσι προκαλείται η αίσθηση κάποιου συγκεκριμένου χρώματος όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΕ nm	ΧΡΩΜΑΤΑ
700-360	Κόκκινο
630-590	Πορτοκαλί
590-560	Κίτρινο
560-480	Πράσινο
480-440	Κυανό
440-400	Ιώδες

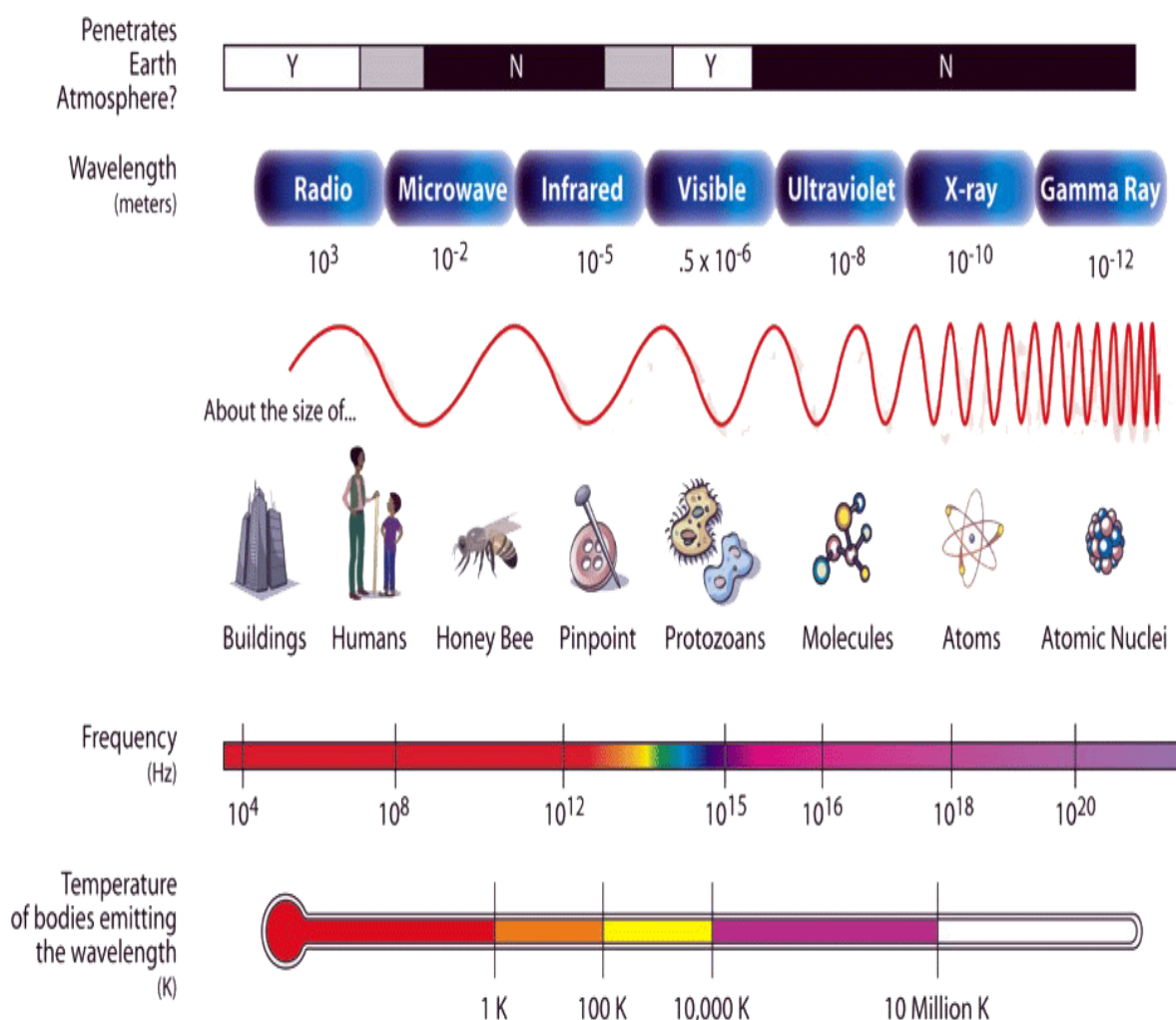
Πίνακας1:Το μήκος κύματος των χρωμάτων στην ορατή ακτινοβολία(ορατό φως)<sub>[51]</sub>

○ **Ακτίνες X:**

Ξεκινούν από το μήκος κύματος  $10^{-8}\text{m}-10^{-13}\text{m}$ . Ανακαλύφθηκαν από τον Roentgen και χρησιμοποιούνται κυρίως στην ιατρική αλλά και στη μελέτη κρυσταλλικών δομών. Εφαρμόζονται σε μεταλλικό στόχο με τη επιβράδυνση των ηλεκτρονίων να προσκρούει πάνω στο μέταλλο. Στην ιατρική χρησιμοποιούνται περισσότερο, καθώς μπορούν να περάσουν μέσα από αδιαφανή σώματα καθώς έχουν πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας με αποτέλεσμα να περνούν μέσα από μαλακό ιστό(ανθρώπινο σώμα) και να απορροφώνται από μεγαλύτερης πυκνότητας υλικά, όπως είναι τα οστά αλλά και τα μέταλλα, για αυτό τα λόγο δεν πρέπει να γίνεται εκτεταμένη χρήση της ακτινοβολίας αυτής, καθώς είναι επιβλαβής για τον ανθρώπινο οργανισμό.

### ο Ακτίνες γάμα:

Είναι στο φάσμα από  $10^{-10}\text{m}$ - $10^{-14}\text{m}$ , χρησιμοποιούνται και αυτές στην ιατρική όπως επίσης και στη μεταλλουργία και τη βιολογία, είναι πολύ επιβλαβές για τον ανθρώπινο οργανισμό καθώς η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκπέμπεται από συγκεκριμένους ραδιενεργούς πυρήνες οι οποίοι μεταφέρουν ενέργεια 10.000.000 φορές περισσότερη ενέργεια από μια αντίστοιχη ομάδα κυμάτων ορατού φως. Οι ακτίνες γάμα παράγονται κατά τη διάσπαση των πυρήνων των ραδιενεργών στοιχείων καθώς διασπών τις ουσίες των κυττάρων επίσης έχουν τη δυνατότητα της διάσπασης του DNA



Εικόνα 11: Κυματα και ακτινοβολίες που βρίσκονται στο Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα<sup>[17]</sup>



### 1.3.3 ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ<sub>[20],[44]</sub>

Είναι η ενέργεια η οποία μεταφέρεται από το κύμα και αλλάζει κατεύθυνση διάδοσης καθώς βρίσκει αντίσταση σε μια επιφάνεια, δηλαδή όταν το κύμα φτάσει σε μια ασυνέχεια του μέσου στο οποίο διαδίδεται, μέρος του κύματος ή ολόκληρο το κύμα θα ανακλαστεί και θα αλλάξει πορεία στο ίδιο του το μέσο. Η ανάκλαση ξεκινάει από ένα σημείο και διασπάται σε περισσότερα (πρόσπτωση) σε αντίθεση με τη διάθλαση η οποία ξεκινάει από ένα σημείο και καταλήγει σε μοναδικό σημείο όπως θα δούμε και παρακάτω.

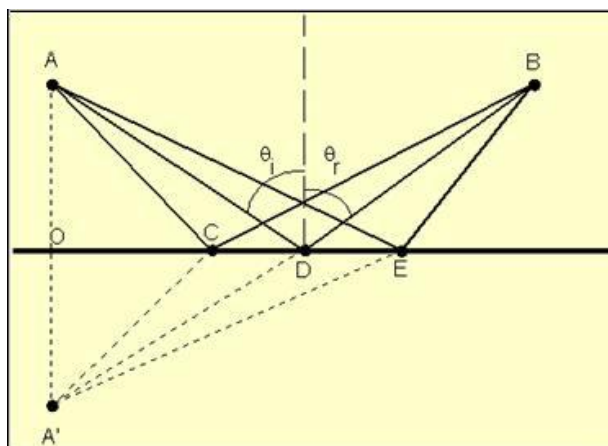
Επίσης υπάρχει και ο συντελεστής ανάκλασης ο οποίος συμβολίζεται με  $\Gamma$  και είναι ο λόγος της τάσης του ανακλώμενου κύματος προς την τάση του προσπίπτοντος κύματος και ορίζεται ως εξής:

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i}$$

Όπου  $\Gamma$  ο συντελεστής ανάκλασης

$V_r$  η τάση του ανακλώμενου κύματος

$V_i$  η τάση του προσπίπτοντος κύματος



Εικόνα 13: Ανάκλαση<sub>[20]</sub>

### 1.3.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

#### ΔΙΑΘΛΑΣΗ<sub>[19],[44]</sub>

Είναι η ιδιότητα η οποία εμφανίζεται όταν γίνεται η αλλαγή πυκνότητας από το ένα μέσο στο άλλο, δηλαδή όταν έχουμε δύο σώματα με διαφορετική πυκνότητα στο μέσο τότε η διεύθυνση διάδοσης και η ταχύτητα διάδοσης αλλάζουν. Αυτό συμβαίνει όταν το κύμα συναντήσει στην πορεία του ένα μέσο διάδοσης διαφορετικής πυκνότητας από αυτή που έχει, έτσι αλλάζει το μέσο διάδοσης οπότε θα αλλάξει και η πορεία του κύματος όπως και η ταχύτητα του.

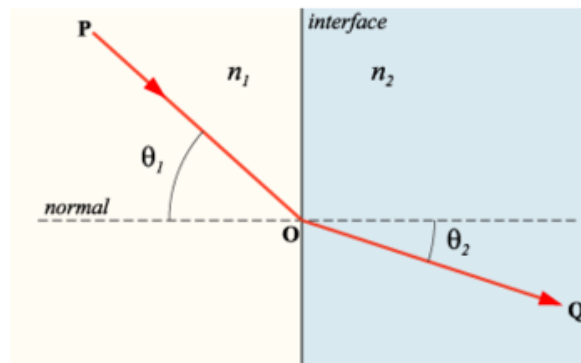
Ακόμα έχει το συντελεστή διάθλασης ο οποίος συμβολίζεται με  $n$  και είναι ο λόγος των ημιτόνων της γωνιάς πρόσπτωσης με της γωνιάς διάθλασης, όπου είναι ίσως με το λόγο των ταχυτήτων του φωτός στα δύο διαφανή μέσα.

Ο τύπος είναι:

$$n = \frac{\eta\mu\pi}{\eta\mu\delta} = \frac{c^1}{c^2}$$

Όπου  $n$  είναι ο συντελεστής διάθλασης  
 $\eta\mu\pi$  το ημίτονο της γωνιάς πρόσπτωσης  
 $\eta\mu\delta$  το ημίτονο της γωνιάς διάθλασης  
 $c^1, c^2$  είναι οι ταχύτητες φωτός

Επίσης από τη διάθλαση έχουμε τα φαινόμενα της ατμοσφαιρικής διάθλασης καθώς και τη φαινομενική ανύψωση. Στην πρώτη περίπτωση η πυκνότητα της ατμόσφαιρας είναι διαφορετική σε κάθε ύψος καθώς στα ψηλά στρώματα είναι μικρότερη ενώ στα χαμηλότερα ύψη είναι μεγαλύτερη. Με την πρώτη περίπτωση μπορούμε να αντιληφθούμε τον ατμοσφαιρικό αντικατοπτρισμό. Τώρα για τη φαινομενική ανύψωση την καταλαβαίνουμε και όταν βλέπουμε ένα αντικείμενο μέσα στο νερό. Διακρίνουμε τη θέση του αντικειμένου πιο ψηλά από τι είναι στην πραγματικότητα



Εικόνα 14: Διάθλαση<sub>[20]</sub>

## ΣΥΜΒΟΛΗ<sub>[56]</sub>

Είναι το φαινόμενο στο οποίο δύο ή περισσότερα κύματα εκπέμπονται συγχρόνως σε ένα σημείο, από αυτό προκύπτει ένα σύνθετο κύμα το οποίο έχει δύο περιπτώσεις:

- i. Η πρώτη περίπτωση είναι όταν φτάνουν την ίδια χρονική στιγμή, τότε τα πλάτη προστίθενται και βγαίνει το συνολικό πλάτος.
- ii. Ενώ η δεύτερη είναι όταν τα πλάτη φτάσουν σε διαφορετική χρονική στιγμή, τότε αλληλοαναιρούνται και έχουμε απόσβεση κύματος, όπως θα δούμε και παρακάτω στη διάδοση. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται αντίθεση φάσης.

### 1.3.5 Η ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ<sub>[5], [40]</sub>

Η διάδοση (εκπομπή-λήψη) των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εξαρτάται από τις ιδιότητες τους αλλά και από τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, καθώς εξαρτάται από τη συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Γενικά έχει να κάνει με το μέσο στο οποίο διαδίδετε, κενό ή όχι.

Εάν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα μεταδίδεται από την επιφάνεια τη Γης ακολουθεί δύο διαδρομές και είναι οι εξής:

1. Διαδίδεται κατά μήκος της επιφάνειας της γης και ονομάζεται **κύμα εδάφους**. Κύματα τα οποία διαδίδονται με κύμα εδάφους είναι τα μακρά και τα μεσαία κύματα. Το κύμα εδάφους εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους αλλά και από τη συχνότητα  $f$  του εκπεμπόμενου σήματος και χωρίζεται σε δύο αποστάσεις διάδοσης:

- ❖ Όταν η συχνότητα  $f$  είναι μεγάλη και το μήκος κύματος  $\lambda$  μικρό τότε έχουμε μεγαλύτερες απώλειες καθώς απορροφάται από το έδαφος.
- ❖ Όταν η συχνότητα  $f$  είναι μικρή και το μήκος κύματος  $\lambda$  είναι μεγαλύτερο τότε ακολουθούν την καμπυλότητα της γης, έτσι στις μικρότερες συχνότητες διαδίδονται τα σήματα σε μεγαλύτερες αποστάσεις και έχουμε λιγότερες απώλειες

2. Και η άλλη διαδρομή είναι ότι ανακλάται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας(ιονόσφαιρα, τροπόσφαιρα) και ονομάζεται **κύμα χώρου**. Κύματα τα οποία διαδίδονται με το κύμα χώρου είναι τα βραχέα και τα υπερβραχέα.

Όταν η απόσταση είναι μεγάλη η μετάδοση γίνεται με τα κύματα χώρου τα οποία ανακλώνται στην ιονόσφαιρα και επιστρέφουν στη γη με την κατάλληλη συχνότητα.

Υπάρχει η πιθανότητα το κύμα του χώρου να μεταδοθεί συγχρόνως με το κύμα εδάφους, έτσι θα υπάρξουν αυξομειώσεις στη λήψη του σήματος καθώς όταν φτάσουν συγχρόνως τότε προσθέτονται, ενώ στην περίπτωση που θα φτάσουν με

διαφορά φάσης  $180^\circ$  τότε αφαιρούνται. Αυτές οι αυξομειώσεις που γίνονται ονομάζονται *διαλείψεις*.

### 1.3.6 ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

#### ΠΟΛΩΣΗ: [6], [9],[45]

Είναι το φαινόμενο του προσανατολισμού των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ως προς τον άξονα διάδοσης, δηλαδή καθορίζεται από τη διεύθυνση της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου με αναφορά το επίπεδο έδαφος.

Χωρίζεται στις εξής περιπτώσεις

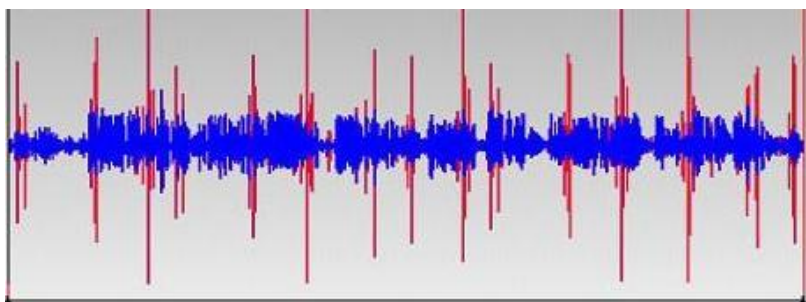
a) η γραμμική πόλωση δημιουργείται όταν το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο του ηλεκτρομαγνητικού κύματος βρίσκονται σε σταθερά επίπεδα, τότε το κύμα είναι επίπεδα πολωμένο. Έτσι δημιουργείται η γραμμική πόλωση η οποία διαδίδεται κάθετα και σε μία διεύθυνση μόνο. Δηλαδή η κατεύθυνση της κεραίας είναι ίδια με την κατεύθυνση της πόλωσης, έτσι οι **κατακόρυφες κεραίες ακτινοβολούν κατακόρυφα** και οι **οριζόντιες ακτινοβολούν οριζόντια** πολωμένα κύματα.

b) Η τυχαία πόλωση η οποία εκπέμπει τυχαία, καθώς τα πεδία είναι κατανομημένα τυχαία και έχει κάθετη και οριζόντια κατεύθυνση, ακόμα έχουμε και αυτή που είναι κυκλική αλλά και την ελλειπτική.

**Στην κυκλική η κάθετη και η οριζόντια κατεύθυνση είναι ίσες** ενώ στην **ελλειπτική είναι άνισες**, επίσης είναι είτε δεξιόστροφο είτε αριστερόστροφο. Για να είναι δεξιόστροφη θα πρέπει ο παρατηρητής, να κοιτάζει προς τη διεύθυνση διάδοσης και το πεδίο να περιστρέφεται με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, τότε λέμε ότι το κύμα είναι δεξιόστροφα ελλειπτικά πολωμένο, στην αντίθετη περίπτωση λέγεται αριστερόστροφο ελλειπτικά πολωμένο.

Τα χαρακτηριστικά πόλωσης μιας κεραίας είναι σταθερά ή μεταβάλλονται ελάχιστα προς την κατεύθυνση του λοβού, η κεραία λήψης γίνεται πιο αποδοτική όταν το κύμα που δέχεται έχει τα ίδια χαρακτηριστικά πόλωσης με την κεραία, στην περίπτωση που είναι διαφορετική τότε έχουμε απώλεια λόγω πολωτικής μη προσαρμογής.

#### ΘΟΡΥΒΟΣ: [41]



Εικόνα15 : Ο θόρυβος μέσα στο σήμα του κύματος<sub>[34]</sub>

Είναι το φαινόμενο το οποίο δημιουργεί προβλήματα στο σήμα του κύματος, καθώς αποτελείται από ανεπιθύμητα σήματα τα οποία δημιουργούνται από τις διάφορες συνθήκες της ατμόσφαιρας όπως είναι οι καιρικές συνθήκες ή άλλες αιτίες, και δυσχεράνουν την ανάκτηση του σήματος στο δέκτη. Ανάλογα με τις συνθήκες χωρίζουν τον θόρυβο στις εξής κατηγορίες.:

- i. **Θερμικός:** υπάρχει σε όλες τις ηλεκτρονικές συσκευές και τα μέσα μετάδοσης και δημιουργείται από τα ηλεκτρόνια. Ο θόρυβος αυτός κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το φάσμα συχνοτήτων και ονομάζεται λευκός θόρυβος, ο οποίος είναι πολύ σημαντικός για τις δορυφορικές επικοινωνίες.
- ii. **Ενδοδιαμόρφωσης:** παράγει σήματα σε συχνότητα η οποία είναι είτε πολλαπλάσιο, είτε άθροισμα, είτε διαφορά δύο συχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει όταν δεν υπάρχει γραμμικότητα σε πομπό ή δέκτη και προκαλείται από τη δυσλειτουργία κάποιου εξαρτήματος της κεραίας.
- iii. **Συνακρόαση:** προκαλείται από τη σύζευξη των σημάτων διαφορετικών διαδρομών ή από τη σύζευξη καλωδίων, καθώς και όταν λαμβάνονται ανεπιθύμητα σήματα από μικροκύματα.
- iv. **Παλμικός:** παράγεται από ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές, όπως οι κεραυνοί και οι βλάβες των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, είναι μη συνεχής παλμός ο οποίος στο αναλογικό σήμα δεν το επηρεάζει τόσο πολύ όσο το ψηφιακό καθώς είναι ο κύριος παράγοντάς του για τα σφάλματα που αντιμετωπίζει.

## ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑ<sub>[7]</sub>

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν εκπέμπονται ομοιόμορφα σε καμία κεραία καθώς υπάρχουν και άλλοι παράγοντες οι οποίοι τα εμποδίζουν (όπως είναι ο τύπος της κεραίας ). Έτσι η ένταση ακτινοβολίας είναι σε άλλα σημεία μεγαλύτερη και σε άλλα μικρότερη, οπότε ορίζουμε έτσι την κατευθυντικότητα  $D$ .

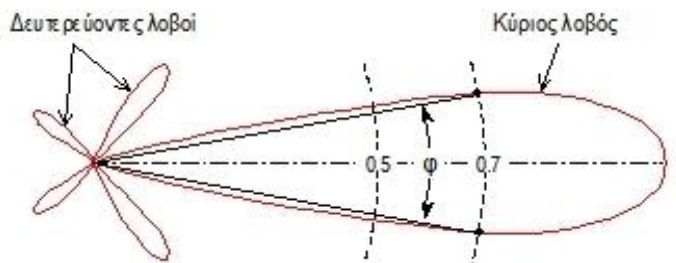
$$D = \frac{P_{max}}{P_0}$$

Όπου  $D$  η κατευθυντικότητα

$P_{max}$  η μέγιστη πυκνότητα ισχύος

$P_0$  η μέση πυκνότητα ισχύος

Για να ορίσουμε την κατευθυντικότητα μιας κεραίας έχουμε το διάγραμμά της το οποίο είναι μια γραφική παράσταση η οποία απεικονίζει την ένταση της ακτινοβολίας σε διάφορες κατευθύνσεις. Το διάγραμμα αυτό αναπαράγεται από τον υπολογισμό του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η κεραία είναι τοποθετημένη στο κέντρο του διαγράμματος με τον κεντρικό λοβό και έχει και μικρότερους λοβούς οι οποίοι είναι εκεί για να μας δείξουν πως κατανέμεται η ακτινοβολία της κεραίας.

Εικόνα 16: Κατευθυντικότητα κεραίας<sup>[53]</sup>

Ο λοβός που αντιστοιχεί στην κεραία είναι ο **κύριος λοβός** και παίρνει την τιμή 1 οι υπόλοιποι λοβοί αντιστοιχούν σε μικρότερες εντάσεις.

Έχει τύπο ο οποίος συνδέει την κατευθυντικότητα με το κέρδος της κεραίας και είναι:

$$G = \kappa * D$$

όπου  $G$  το κέρδος,  
 $\kappa$  είναι ο λόγος της συνολικής ενέργειας που εκπέμπεται προς τη συνολική ενέργεια που εισάγεται  
 $D$  Κατευθυντικότητα

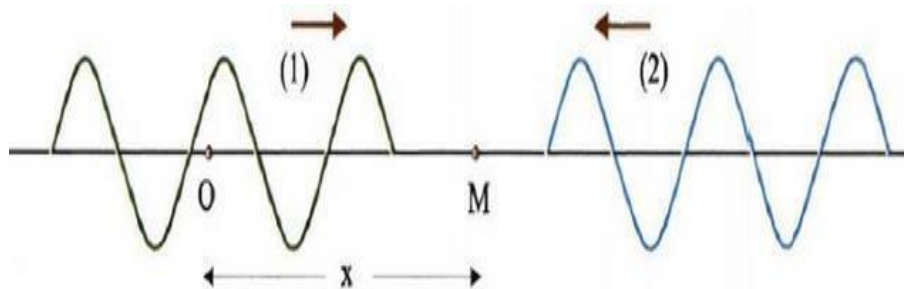
Ο παραπάνω τύπος ισχύει όταν η απόδοση της κεραίας δεν είναι 100%, τότε το κέρδος είναι μικρότερο από την κατευθυντικότητα

## 1.4 ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ <sup>[13],[23], [46]</sup>

Στάσιμο κύμα ονομάζεται το αποτέλεσμα της συμβολής δύο κυμάτων τα οποία και τα δύο έχουν ίδια συχνότητα και ίδιο πλάτος, όπως επίσης διαδίδονται στο ίδιο μέσο με την ίδια ταχύτητα αλλά με διαφορετική κατεύθυνση.

Τα στάσιμα κύματα έχουν δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές η μία είναι όταν τα σημεία μένουν ήρεμα τότε η χρονική στιγμή αυτή ονομάζεται **δεσμός**, ενώ όταν ταλαντώνονται με μέγιστο πλάτος τότε τα σημεία βρίσκονται στο μέσο της απόστασης δύο διαδοχικών στιγμών και ονομάζεται **κοιλία** του στάσιμου κύματος.

Η απόσταση ανάμεσα σε 2 δεσμούς ή κοιλίες είναι  $\lambda/2$ , ενώ η απόσταση ανάμεσα σε μια κοιλία και ένα δεσμό είναι  $\lambda/4$ . Το σημείο στο οποίο βρίσκεται η κοιλία του στάσιμου κύματος είναι πιο επικίνδυνο σημείο, καθώς έχει περισσότερη δύναμη από το σημείο όπου βρίσκεται ένας δεσμός.

Εικόνα17: Στάσιμο κύμα στο ίδιο μέσο από διαφορετική κατεύθυνση<sup>[13]</sup>

### 1.4.1 ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ<sub>[22], [25]</sub>

Για να έχουμε ένα στάσιμο κύμα πρέπει να συμβάλουν 2 κύματα έτσι έχουμε

$$y_1 = A\eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad \text{από δεξιά και}$$

$$y_2 = A\eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right) \quad \text{από αριστερά}$$

και με την αρχή της επαλληλίας έχουμε

$$y = A\left[\eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right)\right] \quad (\alpha)$$

και από την τριγωνομετρική σχέση

$$\eta\mu\alpha + \eta\mu\beta = \frac{2\sigma\upsilon\nu(\alpha - \beta)}{2\eta\mu(\alpha + \beta)} / 2 \quad (\beta)$$

Από τις σχέσεις(α) και (β) έχουμε

$$y = 2A\sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{x}{\lambda} * 2\pi\eta\mu \frac{2\pi}{T} t \quad \text{και}$$

$$A = 2A\sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{x}{\lambda},$$

όπου το  $\chi$  είναι σταθερό άρα θα έχουμε σαν αποτέλεσμα

$$y = A\eta\mu \frac{2\pi}{T} t$$

### 1.4.2 ΛΟΓΟΣ ΣΤΑΣΙΜΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)<sub>[6], [23],[50]</sub>

Είναι το μέγεθος εκείνο που περιγράφεται από το λόγο του μέγιστου ρεύματος προς το ελάχιστο ρεύμα κατά μήκος της γραμμής ή με το λόγο της μέγιστης ισχύς με την ελάχιστη, αυτοί οι λόγοι ονομάζονται VSWR (voltage standing wave ratio) και μας δείχνουν πόση ισχύς έχει χαθεί από τη γραμμή μεταφοράς. Οι τύποι που το χαρακτηρίζουν είναι οι εξής:



$$VSWR = \frac{I_{max}}{I_{min}} = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

Το VSWR είναι η ποσότητα όπου υπολογίζεται για ένα συγκεκριμένο φορτίο. Επίσης είναι και το μέτρο της κακής προσαρμογής ανάμεσα στο φορτίο και τη γραμμή. Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις για το VSWR και είναι οι παρακάτω:

- Η ιδανική κατάσταση επιτυγχάνεται όταν ο συντελεστής VSWR ισούται με 1 ( $\Gamma=1$ ) τότε δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα καθώς δε χάνεται καθόλου ποσότητα ισχύος. Αυτή είναι η ιδανική περίπτωση που θα έχει.
- Μία άλλη περίπτωση είναι όταν ο λόγος να ισούται με ωμικό φορτίο τότε ισχύει ο παρακάτω τύπος

$$VSWR = \frac{Z_0}{RL} \quad \text{ή} \quad VSWR = \frac{RL}{Z_0}$$

όπου RL είναι το ωμικό φορτίο.

Ισχύουν και οι δύο τύποι καθώς κάθε φορά βάζουμε στον αριθμητή τη μεγαλύτερη ποσότητα έτσι ώστε να μην υπάρξει πρόβλημα σύγχυσης.

- Η τελευταία περίπτωση είναι όταν υπάρξει κάποιο βραχυκύκλωμα ή κάποιο ανοικτό κύκλωμα ( $\Gamma=-1$ ) τότε το VSWR τείνει στο **άπειρο**.

Όσο πιο μεγάλο είναι το VSWR τόσο μεγαλύτερη απώλεια ισχύος έχουμε, έτσι στη πράξη το επιθυμητό VSWR θέλουμε να έχει μικρή τιμή έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλη απώλεια ισχύος.

Ο λόγος στάσιμων κυμάτων είναι το μέτρο κακής προσαρμογής ανάμεσα στο φορτίο (κεραία) και τη γραμμή (κυματοδηγός). Ο λόγος της μέγιστης τάσης προς την μικρότερη τάση είναι ο λόγος που συνδέει το συντελεστή ανάκλασης μέσω της τάσης, καθώς ο συντελεστής ανάκλασης περιγράφει τη δύναμη που ανακλάται από την κεραία με τους εξής τύπους:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{|1 + \Gamma|}{|1 - \Gamma|} \quad |\Gamma| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$$

Όπου ο συντελεστής ανάκλασης  $\Gamma$  αναφέρετε και σαν παράμετρο σκέδασης S11 που θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

# ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΕΡΑΙΑΣ

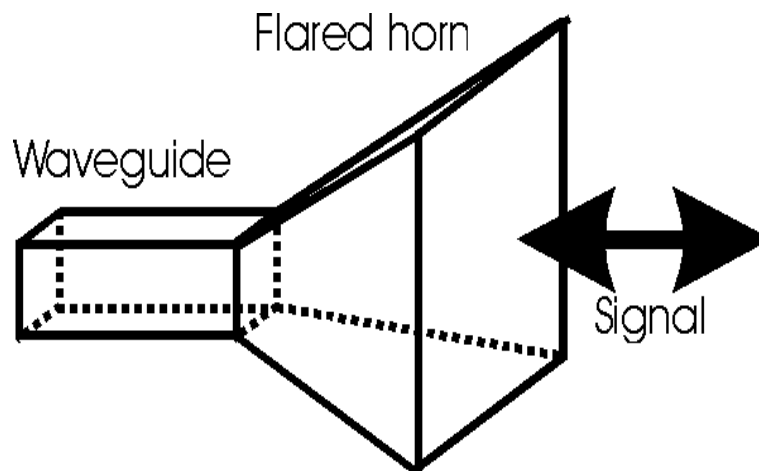
## 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι ευρέως γνωστό ότι στον αιώνα που ζούμε η ενοποίηση των τεχνολογιών πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών μας έχει οδηγήσει στην παγκόσμια εξέλιξη του σύγχρονου τρόπου ζωής.

Έτσι φτάσαμε στη σημερινή εποχή όπου μπορούμε να έχουμε σε καθημερινή βάση την τηλεόραση, το διαδίκτυο, το τηλέφωνο και άλλα μέσα τα οποία χρησιμοποιούμε καθημερινά και μας έχουν γίνει απαραίτητα καθώς μας διευκολύνουν τη ζωή. Για να γίνουν όλα τα παραπάνω χρειάστηκε να υλοποιηθεί ένα μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων όπως και πολύπλοκα σύγχρονα δίκτυα προσπέλασης. Για να έχουμε όλα τα παραπάνω στην καθημερινότητα μας χρειαζόμαστε τις κεραίες καθώς χωρίς αυτές δε θα μπορούσαμε να έχουμε τίποτα από τα παραπάνω καθώς όλα λειτουργούν με τον ηλεκτρομαγνητισμό και τα κύματα όπως αναφέραμε και στο πρώτο κεφάλαιο.

Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι υπάρχει μία τεράστια γκάμα από κεραίες οι οποίες λειτουργούν πάντα με τις ίδιες βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού.

Εμείς συγκεκριμένα θα ερευνήσουμε την κεραία ανοίγματος όπου ονομάζεται πυραμιδοειδή χοάνη. Το όνομα χοάνη το πήρε από το σχήμα της, όπως φαίνεται και παρακάτω.



Εικόνα 18:Κεραία Χοάνης<sup>[54]</sup>

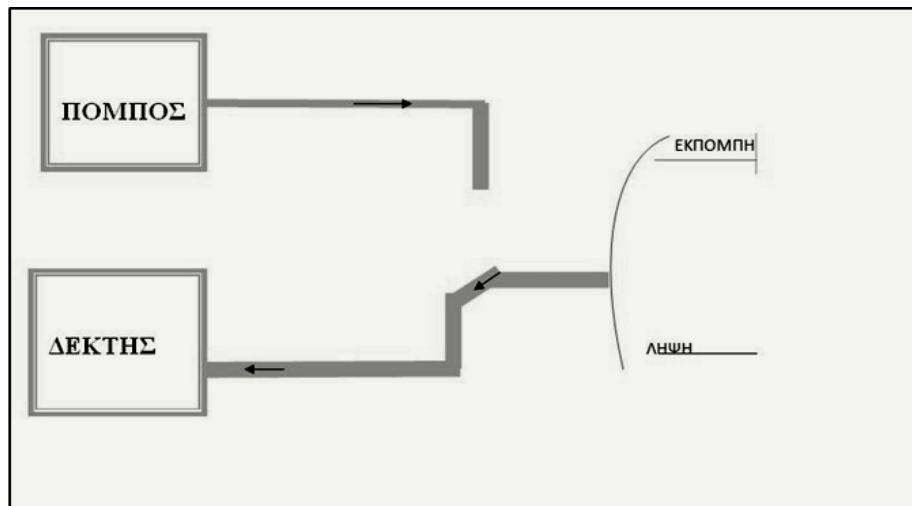
Η κεραία αυτού του τύπου παρέχει βέλτιστη απόδοση, υψηλή αξιοπιστία στη μετάδοση, ευκολία στην επιλογή συχνότητας (από 300 MHz - 17000MHz). Έχει πλήρη εναρμόνιση με τις διεθνείς συστάσεις και χρησιμοποιείται για μετάδοση από σημείο

σε σημείο (point-to-point). Το χαμηλό VSWR και το μικρό βάρος είναι σημαντικά πλεονεκτήματα.

## 2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ<sub>[1],[11]</sub>

Η κεραία είναι η διάταξη η οποία ακτινοβολεί ή δέχεται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Οι κεραίες οι οποίες είτε εκπέμπουν είτε λαμβάνουν σε ένα συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων έχουν κοινά χαρακτηριστικά. Θεωρείται ως η διάταξη μεταξύ της ακτινοβολουμένης ενέργειας στο ελεύθερο πεδίο και της ελεγχόμενης ενέργειας μέσα στο σύστημα και αντίστροφα.

Όταν μία κεραία εκπέμπει, τότε μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο χώρο. Ενώ όταν λαμβάνει τότε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που υπάρχει στο χώρο λαμβάνεται από την κεραία και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια καθώς το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο του κύματος προκαλεί ρεύμα. Οι κεραίες ενός συστήματος λήψης-εκπομπής έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά και μπορούν να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και για εκπομπή όσο και για λήψη.



Εικόνα 19: Η κεραία μπορεί να χρησιμοποιείται σαν πομπός αλλά και σαν δέκτης

## 2.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ<sub>[1], [6], [9]</sub>

### **ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ:**

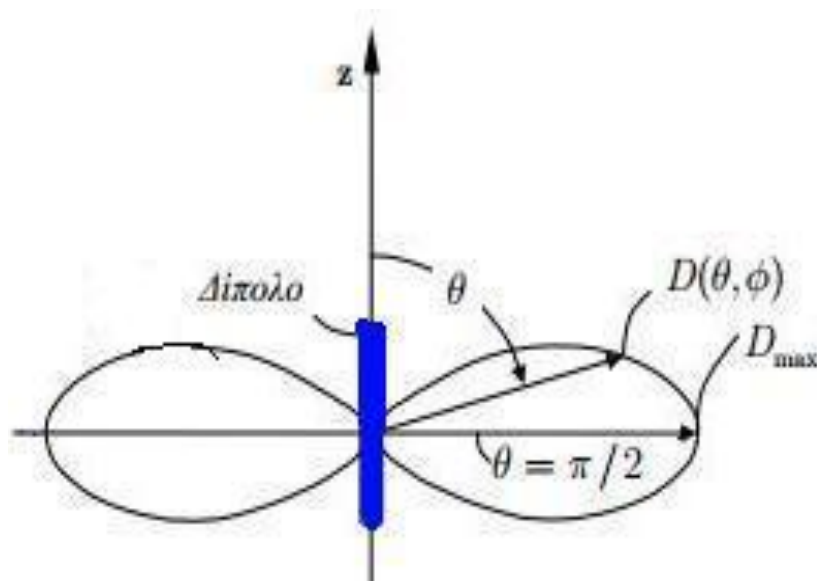
Είναι το μέγεθος το οποίο ορίζει το φάσμα των συχνοτήτων, ώστε η κεραία να λειτουργεί αποτελεσματικά. Δηλαδή είναι η διαφορά της μεγαλύτερης συχνότητας μείον της μικρότερης του φάσματος της συχνότητας. Εκφράζεται σε Hz

$$BW = fh - fl$$

Όπου BW το εύρος ζώνης  
 fh η υψηλή συχνότητα  
 fl η χαμηλή συχνότητα

### ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑ<sub>[7]</sub>

Η κεραία δεν ακτινοβολεί ομοιόμορφα σε όλες τις κατευθύνσεις, αλλά η ακτινοβολουμένη ισχύς συγκεντρώνεται στις στερεές γωνίες(λοβοί), όπου έχουν κοινή κορυφή την κεραία. Έτσι η κατευθυντικότητα είναι ο λόγος της ακτινοβολουμένης ισχύος ανά μονάδα στερεάς γωνίας δια την ακτινοβολουμένη συνολική μέση ισχύ.



Εικόνα 20: Κατευθυντικότητα ενός διπόλου  $\lambda/2$

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0}$$

Και έχουμε για

$$U(\theta, \varphi) = r^2 P_r \quad (1) \text{ και για}$$

$$U_0 = \frac{W_a}{4\pi} \quad (2)$$

Όπου  $P_r$  είναι η πυκνότητα ισχύος και  $r$  η απόσταση από την κεραία, επίσης  
 $W_a$  είναι η συνολική ισχύς

Επίσης η  $D(\theta, \varphi)$  είναι η γωνία της ισχύος η οποία πέφτει στο μισό της μέγιστης

Από τις (1) και (2) έχουμε:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0} = \frac{U(\theta, \varphi)}{\frac{W\alpha}{4\pi}} = \frac{4\pi r^2 Pr}{W\alpha}$$

Όσο πιο μικρή είναι η γωνία δέσμης ( $\theta, \varphi$ ) τόσο πιο μεγάλη είναι η κατευθυντικότητα. Επίσης μας δείχνει πόσο αποτελεσματική είναι μία κεραία ώστε να έχει τη δυνατότητα να μαζέψει σε ένα σημείο την ακτινοβολούμενη ισχύ. Η κατευθυντικότητα εκφράζεται σε dBi.

### **ΚΕΡΑΙΟΣ**<sub>[4], [41]:</sub>

Είναι το μέγεθος που εκφράζει τη μεταβολή στάθμης της ισχύς ή της τάσης μεταξύ εισόδου και εξόδου ενός κυκλώματος, υπολογίζεται ως το πηλίκο του μεγέθους της εξόδου προς το αντίστοιχο μέγεθος της εισόδου, μετριέται σε dB. και συμβολίζεται με G, έχει τύπο:

Για την ισχύ:

$$G = \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

Για την τάση

$$G = \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

Επίσης είναι ο λόγος της έντασης της ακτινοβολίας προς την ισχύ τροφοδοσίας και ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$G = \frac{I_{ακτ}}{P_0}$$

### **ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ**<sub>[1]:</sub>

Είναι ένα μέγεθος που λαμβάνει υπόψη τις απώλειες στους ακροδέκτες και στη δομή της κεραίας.

Ορίζεται ως

$$e_0 = e_r * e_c * e_d$$

Όπου:  $e_0$  είναι η συνολική απόδοση

$e_r$  είναι η προσαρμογή απόδοση

$e_c$  είναι η αγωγιμότητα απόδοση

$e_d$  είναι η διηλεκτρική απόδοση

Καθώς σε μία κεραία το  $e_c, e_d$  είναι δύσκολο να ξεχωρίσουν οι τιμές τους έχουμε:

$$\epsilon_0 = \epsilon_r * \epsilon_{cd}$$

Το  $\epsilon_{cd}$  συσχετίζει την κατευθυντικότητα με την απολαβή.

### **ΠΟΛΩΣΗ**<sub>[11],[39],[47]:</sub>

Περιγράφει τον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  σε σχέση με τη μέγιστη ακτινοβολία της κεραίας.

Η πόλωση έχει τρία είδη:

- ❖ Γραμμική (οριζόντια, κάθετη), όταν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση.
- ❖ Κυκλική, η διεύθυνση περιστρέφεται στο κάθετο επίπεδο διεύθυνση της διάδοσης.
- ❖ Ελλειπτική, η διεύθυνση περιστρέφεται στο κάθετο επίπεδο διεύθυνση της διάδοσης

Η γραμμική και κυκλική είναι ειδικές κατηγορίες της ελλειπτικής πόλωσης. Αναλυτικότερα θα δούμε στο δεύτερο κεφάλαιο.

### **ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ**<sub>[1],[4]:</sub>

Είναι ένα μέτρο απωλειών της κεραίας, το οποίο διαχωρίζει τις απώλειες διηλεκτρικού, ακτινοβολίας, αγωγιμότητας και επιφανειακών κυμάτων και ορίζεται:

$$Q_{tot} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}}$$

Και είναι αντιστρόφως ανάλογο του κέρδους:

$$Q_{tot} = \frac{fc}{\Delta f} = \frac{1}{BW}$$

### **ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΚΕΡΑΙΑΣ**<sub>[1],[4]:</sub>

Είναι το μέτρο το οποίο περιγράφει τη γεωμετρία διάταξης της κεραίας και ορίζεται ως ο λόγος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  (v/m) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος προς την τάση  $V$  (v) που αναπτύσσεται στα άκρα της κεραίας και έχει τύπο:

$$AF = \frac{E}{V} \text{ και μετριέται σε } 1/m \text{ ή } dBm^{-1}$$

Και για  $AF$  έχουμε:  $AF(dBm^{-1}) = 20 \log AF$

Όπου η ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συνδέεται με την πυκνότητα ισχύος και είναι:

$$P = \frac{E^2}{\eta_0}$$

Και έχουμε για  $\eta_0=120\pi$  όπου είναι η χαρακτηριστική αντίσταση του ελεύθερου χώρου σε  $\Omega$ .

Η τάση  $V$  που αναπτύσσεται στους ακροδέκτες της κεραίας συνδέεται με την ισχύ μέσω της σχέσης:

$$W_r = \frac{V^2}{Z_0}$$

Όπου  $W_r$ , είναι η λαμβανόμενη ισχύ  
Και  $Z_0$ , χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση

Το κέρδος συνδέεται με τον παράγοντα κεραίας:

$$AF = \frac{\sqrt{4\pi\eta}}{\lambda\sqrt{G}}$$

Άρα από τα παραπάνω καταλήγουμε και για αντίσταση  $Z_0=50\Omega$  έχουμε

$$AF = \frac{9.73}{\lambda\sqrt{G}}$$

## 2.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΙΑΣ ΚΕΡΑΙΑΣ<sub>[2], [7], [9]:</sub>

Περιγράφει πως κατανέμεται η ισχύς που ακτινοβολείται από την κεραία στο χώρο. Είναι η γραφική παράσταση η οποία απεικονίζει τις ιδιότητες της ακτινοβολίας του μακρινού πεδίου μιας κεραίας.

Μπορεί να παριστάνει τη γωνιακή κατανομή:

- Στο μέτρο της έντασης του πεδίου.
- Στην πυκνότητα ισχύος.
- Στην ένταση ακτινοβολίας.

Η σχεδίαση πραγματοποιείται με κανονικοποίηση προς τη μέγιστη τιμή για ορισμένη απόσταση  $r$ .

*Διάγραμμα ακτινοβολίας επιπέδου E:* ονομάζεται το διάγραμμα το οποίο διέρχεται από τον άξονα  $Z$  σε οποιοδήποτε επίπεδο. Το επίπεδο  $E$  περιλαμβάνει το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου.

Διάγραμμα ακτινοβολίας επιπέδου  $H$ : είναι το διάγραμμα το οποίο λαμβάνεται σε επίπεδο κάθετο σε σχέση με τον άξονα  $Z$  και περιλαμβάνει το μαγνητικό πεδίο.

Χρησιμοποιείται είτε για μια μαθηματική συνάρτηση είτε για μια γραφική απεικόνιση της ακτινοβολουμένης ισχύς στο χώρο και ορίζεται ως εξής:

$$S(r, \theta, \varphi) = E * H = f(\theta, \varphi) * \frac{1}{r^2 r^2}$$

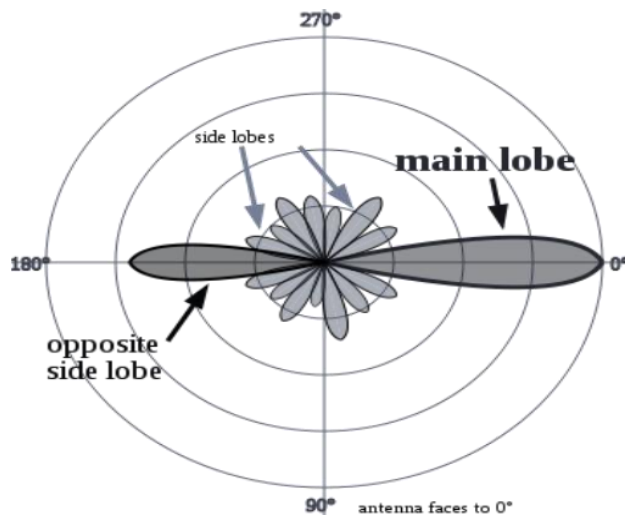
Όπου:

$r$  είναι η απόσταση

$E_{(r,\theta,\varphi)}$  και  $H_{(r,\theta,\varphi)}$  είναι τα επίπεδα  $E$  και  $H$

$f_{(\theta,\varphi)}$ , είναι η γωνιακή εξάρτηση

Το διάγραμμα ακτινοβολίας λαμβάνεται στο μακρινό πεδίο και αναπαριστάται ως συνάρτηση των σφαιρικών συντεταγμένων  $\theta, \varphi$  και εκφράζεται σε dB.



Εικόνα 21: Διάγραμμα λοβών<sub>[15]</sub>

Το διάγραμμα ακτινοβολίας έχει επίσης:

⊕ **ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ:** η ισχύς εκπέμπεται σε όλες τις κατευθύνσεις με γωνιακή εξάρτηση  $f_{(\theta,\varphi)}=1$ . Το ισοτροπικό διάγραμμα χρησιμοποιείται μόνο θεωρητικά καθώς πρακτικά δε μπορεί να υλοποιηθεί και χρησιμοποιείται για τη σύγκριση πραγματικών κεραιών.

⊕ **ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ:** Είναι όταν η ισχύς που εκπέμπεται εμφανίζει μεγαλύτερη συγκέντρωση σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση.

## ΛΟΒΟΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ:

Είναι τα τοπικά μέγιστα του διαγράμματος, ο κύριος λοβός είναι ο μεγαλύτερος και έχει  $f_{\max}$  αλλά υπάρχουν και μικρότεροι λοβοί οι οποίοι είναι οι πλευρικοί λοβοί του διαγράμματος.

## 2.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΚΕΔΑΣΗΣ S:

Είναι ένα σύνολο παραμέτρων οι οποίοι περιγράφουν τη σκέδαση και τη διάδοση των κυμάτων, όταν εισέρχονται σε μια γραμμή μεταφοράς. Χρησιμοποιούνται σε υψηλές συχνότητες και υπολογίζονται σε dB, όπου  $20\log(S_{i,j})$ .

Έτσι περιγράφονται τα δίκτυα με ν-θύρες, για μια γραμμή μεταφοράς που αποτελείται από 2 θύρες ισχύει:

- $S_{11}$ : Είναι ο συντελεστής ανάκλασης εισόδου με προσαρμοσμένη έξοδο
- $S_{12}$ : Είναι ο συντελεστής ανάστροφης εισόδου με προσαρμοσμένη είσοδο
- $S_{21}$ : Είναι ο συντελεστής ορθής μετάδοσης με προσαρμοσμένη έξοδο
- $S_{22}$ : Είναι ο συντελεστής ανάκλασης εισόδου με προσαρμοσμένη είσοδο

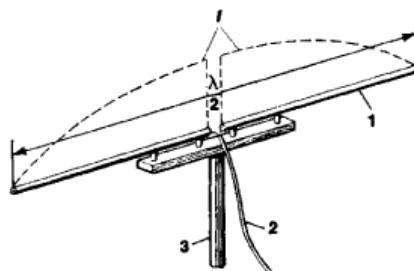
Για μία μόνο θύρα δεν υπάρχει πίνακας S-παραμέτρων αλλά υπάρχει ο τύπος:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

## 2.6 ΕΙΔΗ ΚΕΡΑΙΩΝ<sup>[4]</sup>,

### ΜΙΣΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ( $\lambda/2$ ) ΚΕΡΑΙΑ<sup>[24],[43]</sup>:

Είναι μια απλή αλλά και σημαντική κεραία καθώς χάρις αυτήν μπορούμε να κατανοήσουμε τις πιο πολύπλοκες κεραίες. Λέγεται διπολική επειδή αποτελείται από δύο ίδια αγώγιμα στοιχεία και είναι συμμετρικά όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 22:  $\lambda/2$  διπολική κεραία<sup>[36]</sup>

Το μήκος κύματος του διπόλου θα πρέπει να έχει μήκος μικρότερο από το μισό του ελευθέρου χώρου, δηλαδή:



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

όπου  $\lambda$ , είναι το μήκος κύματος του ελευθέρου χώρου

$c=300 \cdot 10^6 \text{ m/s}$

$f$ , είναι η συχνότητα σε Hertz

Από τα παραπάνω το μήκος κύματος του μισού διπόλου μετριέται σε μέτρα

### **ΔΙΠΛΩΜΕΝΟ ΔΙΠΟΛΟ**<sub>[43]</sub>:

Είναι ένα διπλωμένο δίπολο, έχει το ίδιο μήκος με το δίπολο μισού μήκους κύματος. Αυτό το δίπολο έχει δύο παράλληλους αγωγούς όπου ενώνονται στα δύο άκρα και χωρίζονται από μια απόσταση η οποία είναι μικρότερη από το μήκος της κεραίας, ένας από τους αγωγούς όπου είναι στο κέντρο και συνδέονται με μια ισορροπημένη γραμμή τροφοδοσίας, αποτελείται από δύο καλώδια τα οποία είναι ίσα με  $\lambda/4$  του μήκους κύματος το κάθε ένα και είναι μονωμένα το ένα με το άλλο. Το δίπολο αυτό έχει ένα ευρύτερο εύρος ζώνης για αυτό πολλές φορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μόνο του σαν κεραία.



Εικόνα 23: Διπλωμένο δίπολο<sub>[46]</sub>

### **ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΗ ΚΕΡΑΙΑ**<sub>[43]</sub>:

Είναι πολυκατευθυντική καθώς εκπέμπει σε όλες τις κατευθύνσεις ομοιόμορφα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται θεωρητικά ώστε να συγκρίνει τα στοιχεία των κεραιών μεταξύ τους, όπως είναι το εύρος και η κατευθυντικότητα τους, αυτό υλοποιείται επειδή τα χαρακτηριστικά της ισοτροπικής κεραίας είναι απλά και εύκολα να βρεθούν.

Η ακτινοβολία σε όλα τα πεδία είναι κυκλική, έτσι έχουμε μια πηγή η οποία έχει για κέντρο  $O$  και για ακτίνα  $r$ . Έτσι έχουμε την ακτίνα

$$r=4\pi r^2 \quad (1)$$

και για την ισχύ

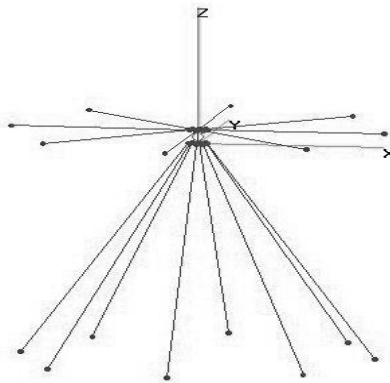
$$P_a = \frac{P}{r} \quad (2)$$

Έτσι από τις (1) και (2) έχουμε :

$$Pa = \frac{P}{4\pi r^2}$$

### **DISCONE ΚΕΡΑΙΑ<sub>[48]</sub>:**

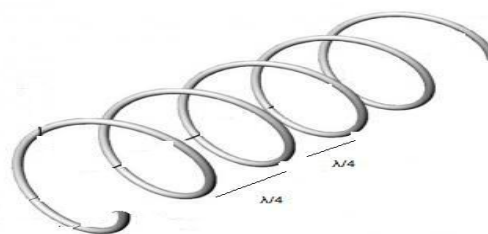
Χαρακτηρίζεται από ένα ευρύτερο εύρος ζώνης που καλύπτει περίπου 10:1 φάσμα συχνοτήτων. Το σήμα είναι κατακόρυφα πολωμένο και το κέρδος είναι σαν του διπόλου, η σύνθετη αντίσταση είναι το σημείο τροφοδοσίας που ισούται με 50Ω και βρίσκεται στην τομή του δίσκου με του κώνου. Ο συνδυασμός δίσκου –κώνου είναι σαν μετασχηματιστής. Το μήκος κύματος της κεραίας μετριέται κατά μήκος της επιφάνειας του κώνου και είναι το  $\frac{1}{4} \lambda$  ως η κατώτατη συχνότητα λειτουργίας. Χρησιμοποιείται για τη γενική λήψη στις περιοχές VHF και UHF.



Εικόνα 24: Disccone κεραία<sub>[38]</sub>

### **ΕΛΙΚΟΕΙΔΗΣ ΚΕΡΑΙΑ<sub>[24],[48]</sub>:**

Είναι μια σπειροειδή κεραία, όπου έχει αρκετό μήκος, η κάθε της στροφή έχει περίπου  $\frac{1}{4} \lambda$ .



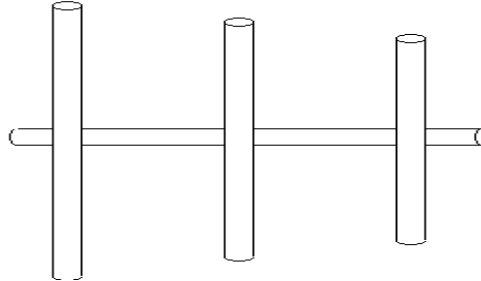
Εικόνα 25: Ελικοειδή κεραία

Παράγει κυκλικά πολωμένα κύματα ακόμα μπορούν να λάβουν επίπεδο πολωμένο κύμα με την πόλωση σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Το κέρδος της κεραίας είναι ανάλογο με τον αριθμό των στροφών, δηλαδή:

$$G = \frac{15NS(\pi D)^2}{(\lambda)^3}$$

## YAGI-UDA ΚΕΡΑΙΑ<sub>[37],[55]</sub>:

Είναι κατευθυντική κεραία κατασκευάστηκε το 1926 από τον Uda και δύο χρόνια αργότερα ο Yagi την ανέλυσε θεωρητικά. Είναι η κεραία η οποία αποτελείται από παράλληλα δίπολα.



Εικόνα 26: Yagi-uda με τρία δίπολα<sub>[37]</sub>

Το αρχικό πείραμα που έγινε ώστε να μελετηθεί η κεραία ήταν με τρία δίπολα τα οποία το ένα ήταν ενεργό και τα δύο παρασιτικά. Όταν το μήκος του παρασιτικού δίπολου είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο του ενεργού τότε ονομάζεται ανακλαστήρας στην αντίθετη περίπτωση ονομάζεται κατευθυντήρας. Έχει τιμή κατευθυντικότητας 9dB.

## ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗ ΚΕΡΑΙΑ<sub>[43]</sub>:

Είναι για χαμηλού προφίλ κεραίες (LRF), αποτελείται από μία ορθογώνια μεταλλική πλάκα η οποία βρίσκεται πάνω σε ένα διηλεκτρικό όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

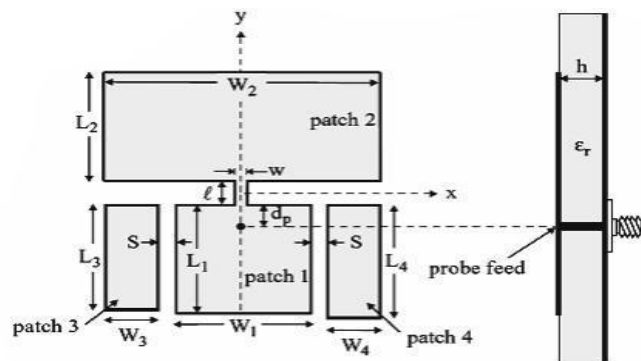
Για να βρούμε το εύρος χρησιμοποιούμε :

$$BW = f^2 * t$$

Όπου  $BW$  το εύρος ζώνης

$f$  η συχνότητα λειτουργίας

$t$  το πάχος σε ιντσες



Εικόνα 27: Μικροταινιακή κεραία

## ΚΕΡΑΙΑ ΧΟΑΝΗΣ-HORN<sup>[5], [8], [10],[48], [57]</sup>:

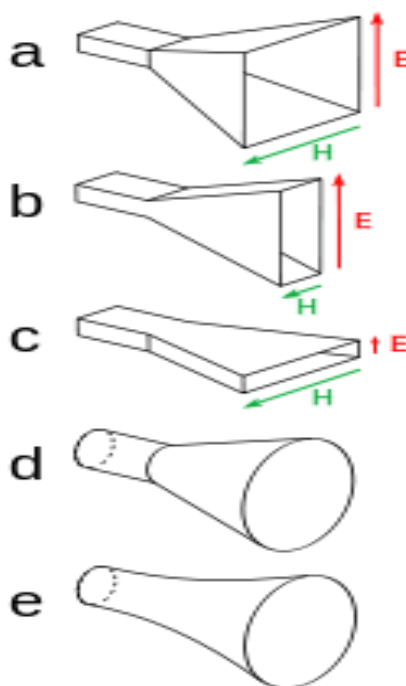
Η πρώτη κεραία κέρατο δημιουργήθηκε το 1897 από τον Jagdish Chandra Bose, όπου στην αρχή τη δοκίμασε σε φούρνο μικροκυμάτων.

Το 1936-1939 οι Barrow, Chu και Southworth την ανέλυσαν θεωρητικά και πειραματικά.

Την περίοδο του δεύτερου παγκόσμιου πολέμου η ιδέα της κεραίας αναπτύσσεται καθώς χρησιμοποιείται στα ραντάρ.

Πέρα από τα ραντάρ και τους φούρνους μικροκυμάτων η κεραία χρησιμοποιείται και σε δορυφορικά πιάτα όπως και ραδιοτηλεσκόπια. Οι κεραίες αυτές συναντώνται στην περιοχή από 1-17GHz, έχουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων, μικρό βάρος, μεγάλη απολαβή και χαμηλό VSWR, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες την κωνική και την πυραμιδοειδή όπου η πυραμιδοειδή έχει δύο επίπεδα το Η-επίπεδο και το Ε-επίπεδο, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Το κέρδος και η κατευθυντικότητα εξαρτώνται από τις διαστάσεις των Ε-επίπεδο και Η-επίπεδο, το διάγραμμα ακτινοβολίας έχει υψηλό κέρδος, το τυπικό κέρδος που μπορεί να φτάσει μία κεραία μεσαίας συχνότητας είναι 10-20dB η μέγιστη που μπορεί να φτάσει είναι στα 25dB. Το  $S_{11}$  και το VSWR έχουν χαμηλές τιμές καθώς η αντίσταση εισόδου μεταβάλλεται πολύ αργά στο ευρύ φάσμα συχνοτήτων για αυτό στην ανάλυση της κεραίας πυραμιδοειδούς κεραίας θα σταθούμε και εμείς σε αυτές τις δύο παραμέτρους.



Εικόνα 28:Κεραίες Χοάνης<sup>[28]</sup>

Και για τα επίπεδα:

$$\theta_H = \frac{70 * \lambda}{d_H}$$

$$\theta_E = \frac{70 * \lambda}{d_E}$$

Όπου

$\theta_H$  η γωνία του επιπέδου H

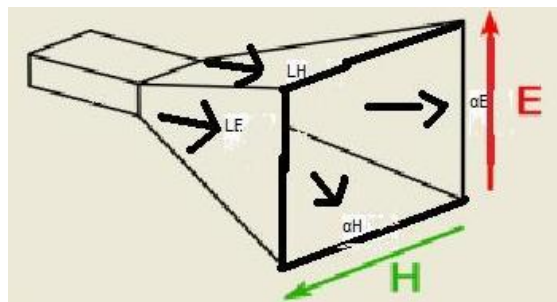
$\theta_E$  η γωνία του επιπέδου E

Επίσης έχουμε  $a_E = \sqrt{2\lambda L_E}$        $a_H = \sqrt{3\lambda L_H}$

Όπου

$L_E$  το μήκος της κεκλιμένης πλευράς του E επιπέδου

$L_H$  το μήκος της κεκλιμένης πλευράς του H επιπέδου



Εικόνα 29: πυραμιδοειδή κεραία

Η κεραία αποτελείται από ένα μικρού μήκους ορθογώνιο κυματοδηγό κλειστό στο ένα άκρο και στο άλλο έχει άνοιγμα πυραμιδοειδές. Το σήμα εισχωρεί στον κυματοδηγό μέσω μιας γραμμής μεταφοράς (πχ ενός ομοαξονικού καλωδίου) το οποίο ενώνεται με τον κυματοδηγό μέσω ενός διεγέρτη.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>**

## ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΥΡΑΜΙΔΟΕΙΔΟΥΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΧΟΑΝΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα κατασκευάσουμε και θα μελετήσουμε την πυραμιδοειδή κεραία χοάνης. Θα αναφερθούμε τόσο στις διαστάσεις και γενικά στη γεωμετρία της κεραίας καθώς θα παρατηρήσουμε και το διάγραμμα S11.

Οι διαστάσεις του ανοίγματος που θα χρησιμοποιηθούν υπολογίστηκαν από τους τύπους του κεφάλαιο 2 και είναι οι εξής:

$$a_E = \sqrt{2\lambda L_E} \quad (3.1) \quad a_H = \sqrt{3\lambda L_H} \quad (3.2)$$

$$(3.3) \quad \theta_H = \frac{70 \cdot \lambda}{d_H} \quad \theta_E = \frac{70 \cdot \lambda}{d_E} \quad (3.4)$$

### 3.1 ΜΕΛΕΤΗ ΚΕΡΑΙΑΣ

Καθότι ο υπολογισμός και γενικά ο σχεδιασμός κεραιών είναι πολύπλοκος η εργασία αυτή κάνει τη χρήση υπολογιστών αναγκαία. Έτσι τα παρακάτω αποτελέσματα είναι προσεγγιστικά από διάφορα τέτοια προγράμματα.

Αρχίζοντας, ορίζουμε ένα φάσμα διαστάσεων του κυματοδηγού και του ανοίγματος που θα έχει η κεραία καθώς και το μέταλλο που θα χρησιμοποιηθεί. Εδώ θα ορίσουμε τον χαλκό σαν μέταλλο αφού τα χαρακτηριστικά του είναι πλησίον των ιδανικών. Έτσι οι παράμετροι αυτοί είναι που καθορίζουν την κεραία την οποία θα μελετήσουμε

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ
$X_{\max}$ cm
$X_{\min}$ cm
$Y_{\max}$ cm
$Y_{\min}$ cm
$Z_{\max}$ cm (κυματοδηγός)
$Z_{\min}$ cm

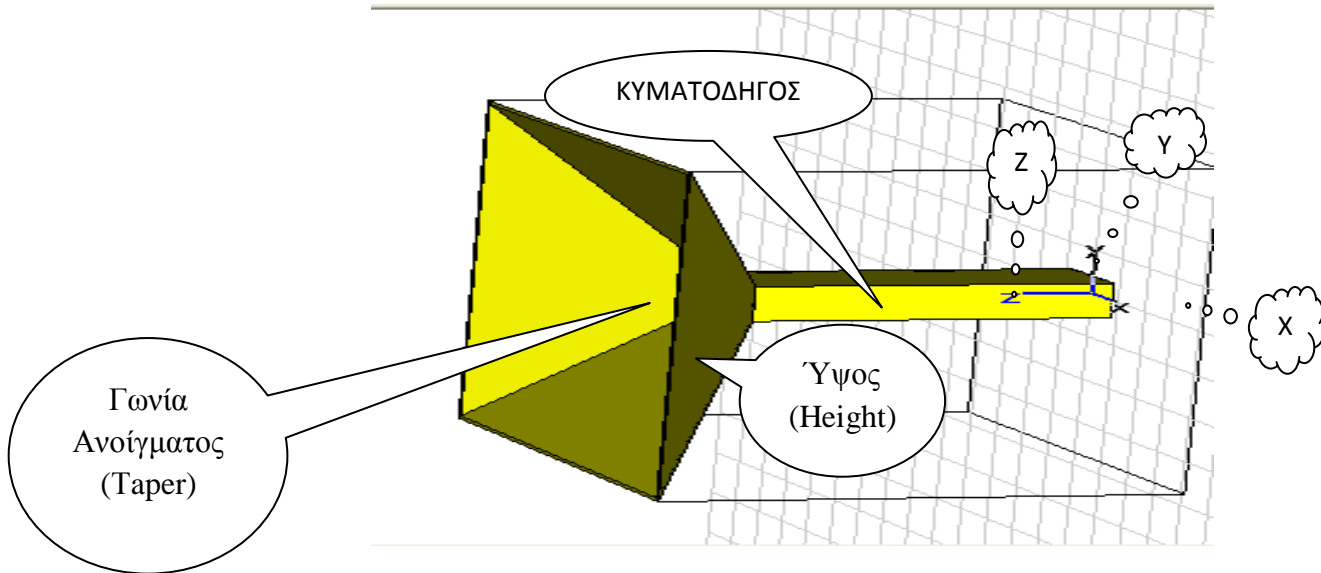
Πίνακας 3.1

ΑΝΟΙΓΜΑ
Height cm
Taper deg

Πίνακας 3.2

ΔΙΕΓΕΡΤΗΣ
Outer radius cm
Zcenter cm
$Y_{\min}$ cm

Πίνακας 3.3



Εικόνα 30 : Κατασκευή κεραίας

Όπου για το άνοιγμα έχουμε:

- Το Height είναι το ύψος που θα έχει το άνοιγμα
- και το Taper το οποίο μετρείται σε μοίρες (deg) είναι το άνοιγμα.

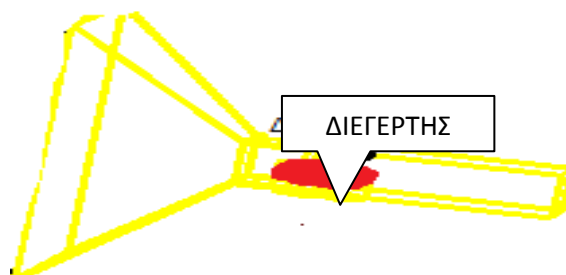
Στην κεραία χοάνη παίζει πολύ σημαντικό ρόλο το άνοιγμα όπως και ο διεγέρτης. Ακόμα σημαντικό ρόλο παίζουν η θέση του, η διατομή του καθώς όταν μεταβάλλονται αλλάζουν και τα αποτελέσματα που μας δίνει η κεραία.

Έτσι ακολούθως ορίζουμε και τα χαρακτηριστικά του διεγέρτη από τον πίνακα 3.3.

- Outer radius είναι η εξωτερική ακτίνα του διεγέρτη
- Z center είναι το θέση διεγέρτη
- Y max είναι το ύψος του.

Στην τιμή outer radius, η οποία είναι η εξωτερική ακτίνα θα ορίζουμε το μέγεθος του διεγέρτη, και με το Z θα ορίζουμε τη θέση του, με το Y θα ορίζουμε το ύψος του.

Και η αντίσταση φορτίου προκειμένου να έχουμε μέγιστη προσαρμογή ορίζεται στα  $50\Omega$ .



Εικόνα 31: Δημιουργία διεγέρτη

Τέλος ορίζουμε τη συχνότητα λειτουργίας η οποία θα είναι από 1GHz-4GHz.

### 3.2 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Θα παρουσιάσουμε και θα συγκρίνουμε τα στοιχεία της κεραίας, όπως και τη γραφική παράσταση S11 με τη συχνότητα f. Επίσης θα δούμε και το VSWR σε σχέση με το S11. Η παρακάτω σχέση συνδυάζει τον συντελεστή ανάκλασης  $\Gamma$  (S11) με το λόγο του στάσιμου κύματος, έτσι θα αναλύσουμε την κεραία σε σχέση με το **VSWI**

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{|1+\Gamma|}{|1-\Gamma|} \quad (3.5)$$

Σε όλα τα παραδείγματα που θα αναφέρουμε κρατάμε σταθερά τις 2 διαστάσεις του κυματοδηγού της κεραίας, δηλαδή τα  $X_{max}$ ,  $X_{min}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Y_{min}$  (παραθύρο κυματοδηγού) και τη συχνότητα. Όμως μεταβάλλουμε τις τιμές στα  $Z_{max}$ ,  $Z_{min}$  (μήκος κυματοδηγού) οι οποίες είναι οι τιμές που ορίζουν την απόσταση από το άνοιγμα της κεραίας, το ίδιο θα κάνουμε και για τον διεγέρτη και το άνοιγμα της κεραίας.

Οι τιμές που θα μείνουν σταθερές φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΑΡΑΘΥΡΟΥ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ	ΤΙΜΕΣ
$X_{max}$ cm	40
$X_{min}$ cm	-40
$Y_{max}$ cm	20
$Y_{min}$ cm	-20

Πίνακας 3.4: Τιμές βάσεις της κεραίας

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΕΣ
$f_{min}$ GHz	1
$f_{max}$ GHz	4

Πίνακας 3.5: Τιμές συχνότητας που θα χρησιμοποιηθούν

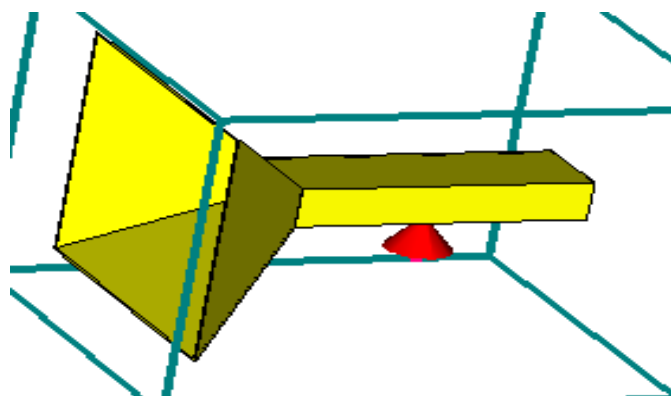
Ορίζουμε τα όρια των τιμών και είναι τα εξής:

ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ	ΤΙΜΕΣ	ΑΝΟΙΓΜΑ	ΤΙΜΕΣ	ΔΙΕΓΕΡΤΗΣ	ΤΙΜΕΣ
$Z_{max}$ cm	250	Height <sub>cm</sub>	112	Outer radius <sub>cm</sub>	20
$Z_{min}$ cm	20	Taper <sub>deg</sub>	41	Zcenter <sub>cm</sub>	120
				$Y_{min}$ cm	-20

Πίνακας 3.6: Διαστάσεις κεραίας (Βάση, Άνοιγμα, Διεγέρτη)

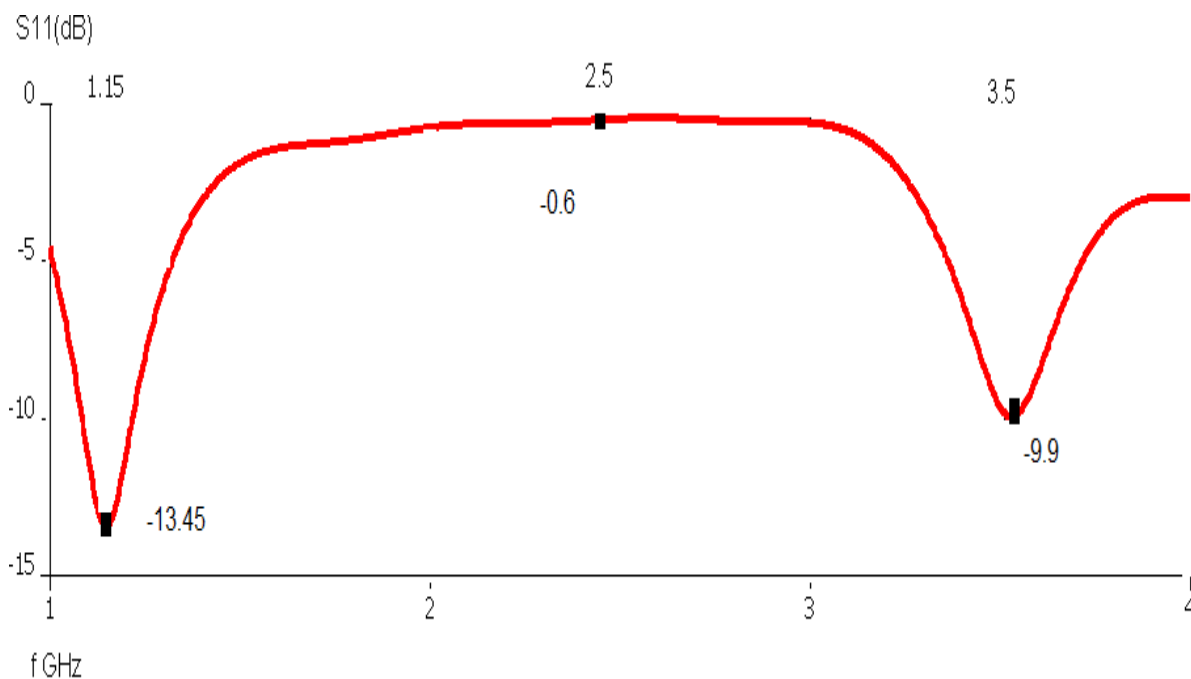
:





Εικόνα 32: Η κεραία με τις παραπάνω μετρήσεις (μακρύ κυματοδηγό)

Από την παραπάνω κεραία προκύπτει η γραφική παράσταση που ακολουθεί, όπου βλέπουμε ότι έχει δύο σημεία συντονισμού για συχνότητες  $f = 1.15\text{GHz}$  με  $S_{11} = -13.4\text{dB}$  και για  $f = 3.5\text{GHz}$  έχει  $S_{11} = -9.9\text{dB}$ .



Γραφική παράσταση 1

Η συχνότητα αποκοπής είναι στα 2.5 GHz με  $S_{11} = -0.6\text{dB}$ .

Όσο για το VSWR, σύμφωνα με τον τύπο 3.5, θα έχουμε τις εξής αντίστοιχες τιμές

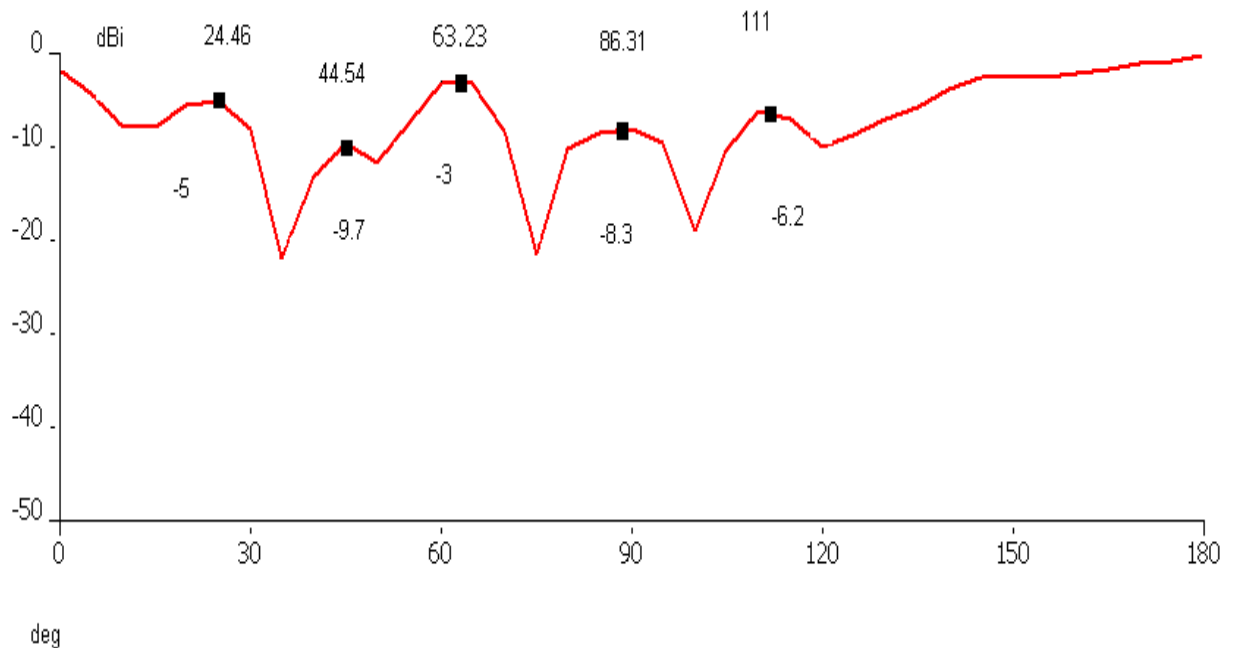
- στην πρώτη περίπτωση συντονισμού θα είναι 1.16:1,
- στη δεύτερη 1.22:1
- ενώ στη συχνότητα αποκοπής ο λόγος είναι 4:1.

Μια πρακτική μέθοδο ελέγχου ποιότητας της παράμετρο σκέδασης  $S_{11}$  αποτελεί βάση στατιστικών ο παρακάτω πίνακας, και τον χρησιμοποιούμε για να ελέγχουμε τις απώλειες που έχει .

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ	VSWR	ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΙΣΧΥΟΣ%
Οριακή	3.00:1	25
Καλή	2.00:1	11.1
Πολύ καλή	1.50:1	4
Άριστη	1.22:1	1

Πίνακας 3.7: Χαρακτηρισμός τυπικών τιμών του VSWR και τις αντίστοιχες απώλειες ισχύος<sub>[1]</sub>

Έτσι σύμφωνα με τον άνω πίνακα 3.7, βλέπουμε ότι η κεραία με τιμές 112 cm και 41deg είναι μη αποδοτική.



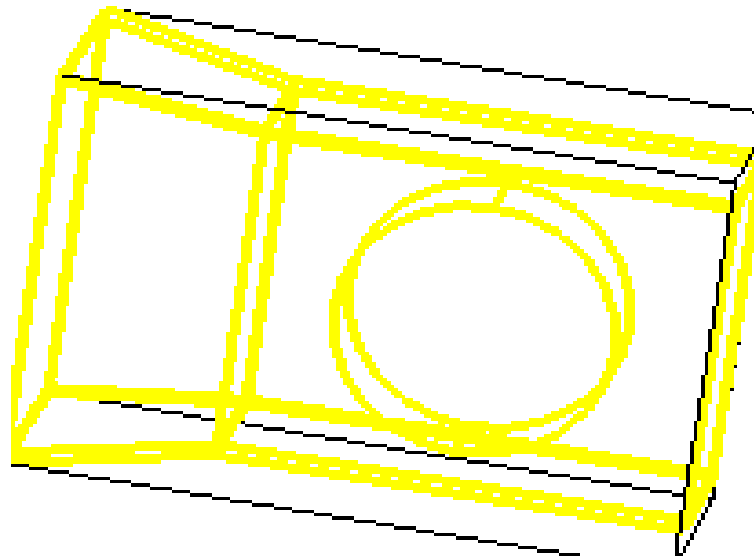
Διάγραμμα ακτινοβολίας<sub>1</sub>

Στο παραπάνω διάγραμμα ακτινοβολίας μπορούμε να δούμε ότι για μέγιστο λοβό είναι στα -3dBi με 63,23 deg

Αλλάζοντας στη συνέχεια τις διαστάσεις τις κεραίας ώστε να την κάνουμε μικρότερη (μικρότερο άνοιγμα και κυματοδηγός), καθώς μεγαλώνουμε το διεγέρτη (παράμετρο Outer radius, διατομή) και αλλάζοντας και τη θέση του μέσα στον κυματοδηγό (παράμετρο Zcenter) έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

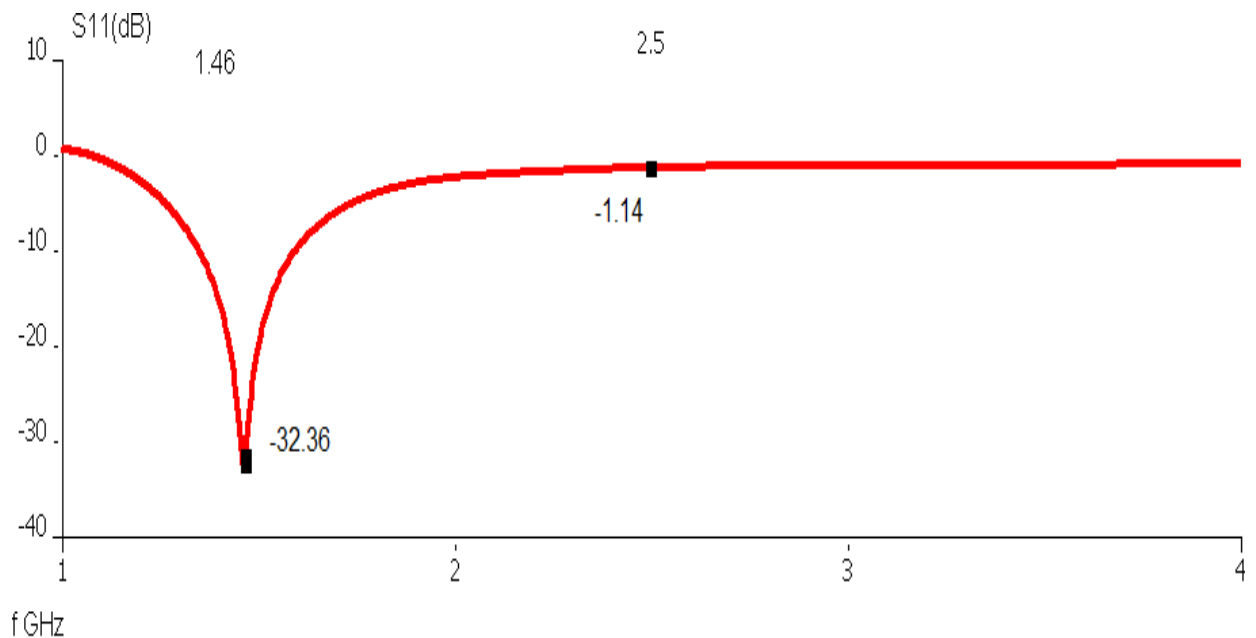
ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ	ΤΙΜΕΣ	ΑΝΟΙΓΜΑ	ΤΙΜΕΣ	ΔΙΕΓΕΡΤΗΣ	ΤΙΜΕΣ
Z <sub>max</sub> cm	100	Height <sub>cm</sub>	43	Outer radius <sub>cm</sub>	30
Z <sub>min</sub> cm	10	Taper <sub>deg</sub>	10	Zcenter <sub>cm</sub>	50
				Y <sub>min</sub> cm	-20

Πίνακας 3.8: Διαστάσεις κεραίας



Εικόνα 33:Κεραία με μικρό άνοιγμα και μεγάλο πλάτος διεγέρτη

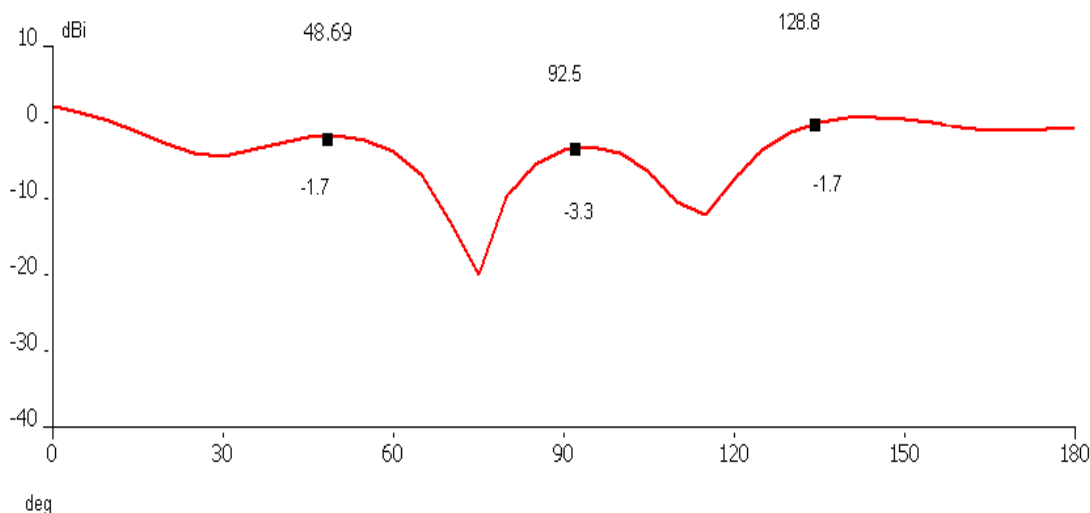
Από την παραπάνω κεραία έχουμε την εξής γραφική παράσταση 2



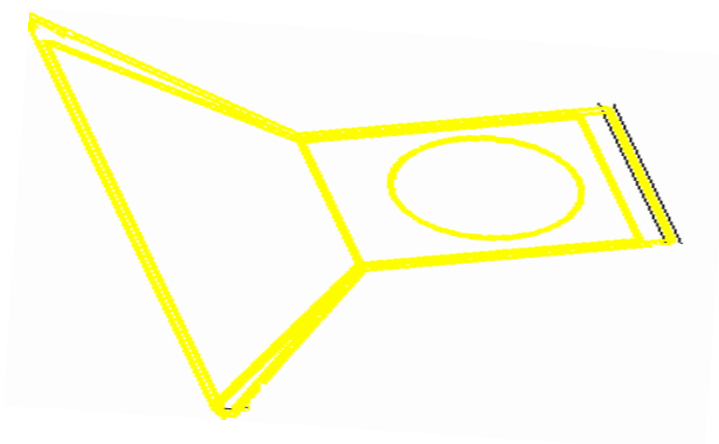
Γραφική παράσταση 2

Βλέπουμε ότι η συχνότητα αποκοπής είναι στα  $f_c=2.5$  GHz με  $S_{11}=-1.14$  dB επίσης έχει και συντονισμό για συχνότητα  $f=1.46$  GHz με  $S_{11}=-32.36$  dB.

Με τον τύπο 3.5 θα βρούμε το VSWR και θα είναι για τη συχνότητα αποκοπής 15:1 και για το συντονισμό θα είναι 1.063:1 συγκρίνοντάς τις τιμές με τον πίνακα 3.7 βλέπουμε ότι ούτε όταν μικρύνουμε την κεραία αλλά μεγαλώσαμε τη διατομή του διεγέρτη καταφέραμε να φτάσουμε στην επιθυμητή τιμή του VSWR η οποία είναι ίση με 1.



Διάγραμμα ακτινοβολίας 2

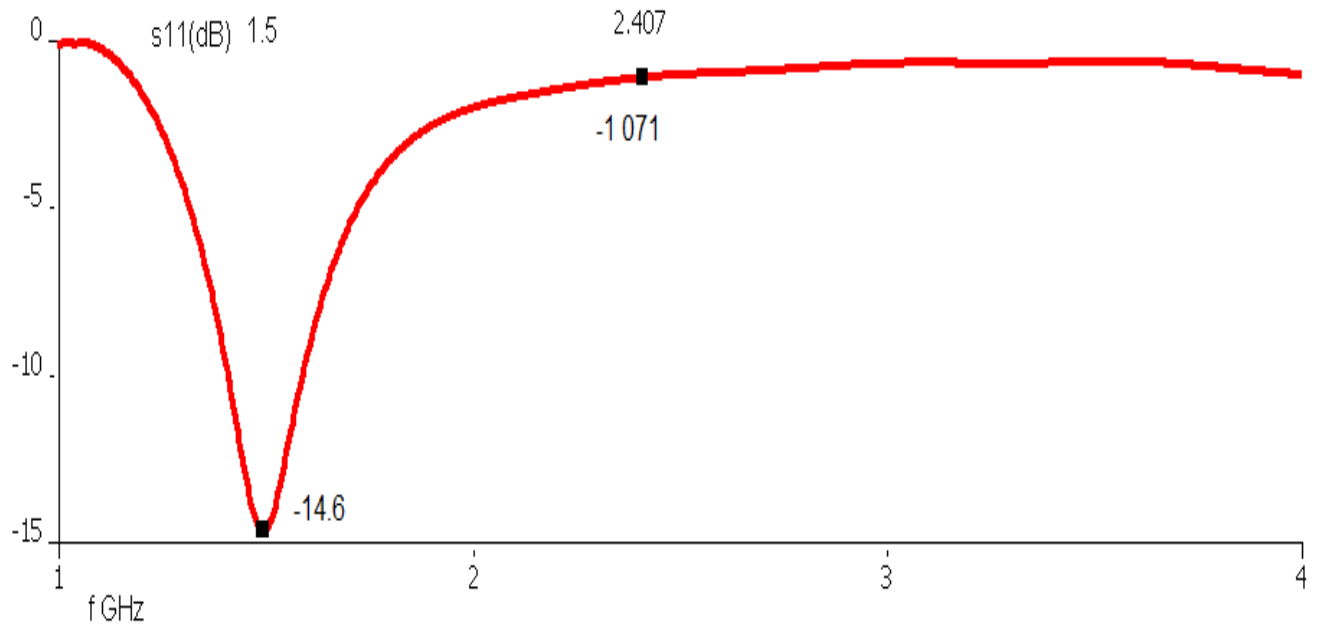


Εικόνα 34: κεραία με μεγάλο άνοιγμα και σταθερά όλα τα άλλα μεγέθη

Στην επόμενη κεραία κρατάμε σταθερά τη θέση του διεγέρτη και τη διατομή του, όπως και τον κυματοδηγό, έτσι μεγαλώνουμε το άνοιγμα της κεραίας και της διαστάσεις της χοάνης, όπως βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα και έχουμε τις εξής τιμές.

ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ	ΤΙΜΕΣ	ΑΝΟΙΓΜΑ	ΤΙΜΕΣ	ΔΙΕΓΕΡΤΗΣ	ΤΙΜΕΣ
$Z_{max}$ cm	100	Height cm	66	Outer radius cm	30
$Z_{min}$ cm	10	Taper deg	50	Zcenter cm	50
				$Y_{min}$ cm	-20

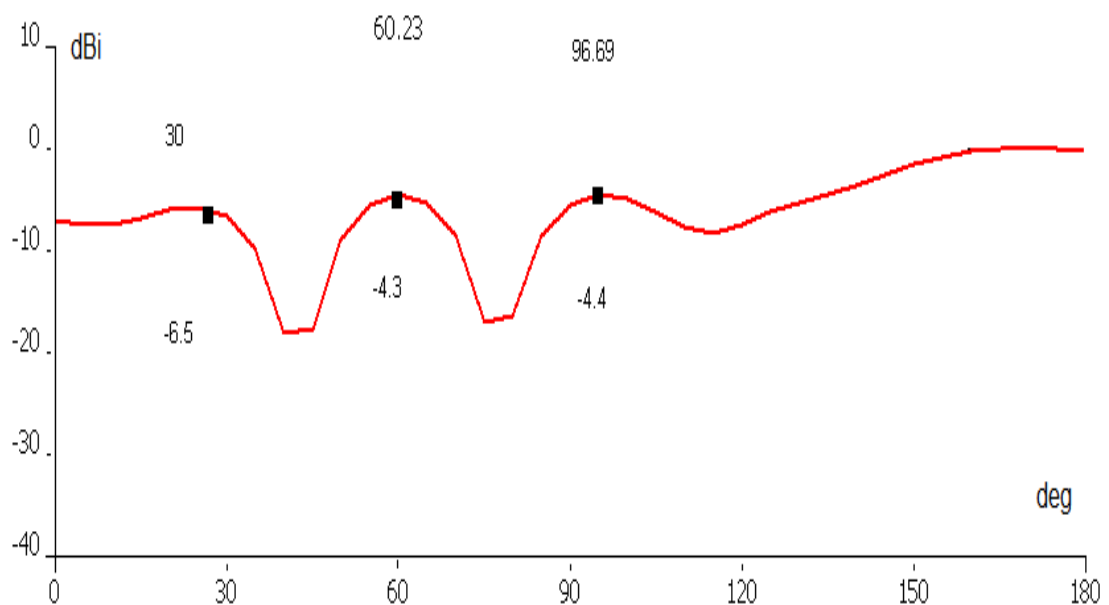
Πίνακας 3.9: Διαστάσεις κεραίας



Γραφική παράσταση 3

Με τις μετρήσεις της παραπάνω κεραίας καταλήγουμε στη γραφική παράσταση 3 στην οποία διακρίνουμε την συχνότητα αποκοπής  $f_c=2.4$  GHz με  $S_{11}=-1.07$ dB και έχει συντονισμό για  $f=1.5$ GHz με  $S_{11}=-14.6$ dB.

Προσαρμόζοντας τις τιμές με τον τύπο (3.5) του κεφαλαίου αυτού θα βρούμε το VSWR. Για την πρώτη συχνότητα 34.3:1 ενώ για τον συντονισμό θα έχουμε 1.14:1. Συγκρίνουμε τις τιμές με τον πίνακα 3.7 και βλέπουμε ότι μεγαλώνοντας το άνοιγμα της κεραίας και κρατώντας σταθερό το διεγέρτη δεν καταφέραμε να φτάσουμε στην επιθυμητή τιμή.

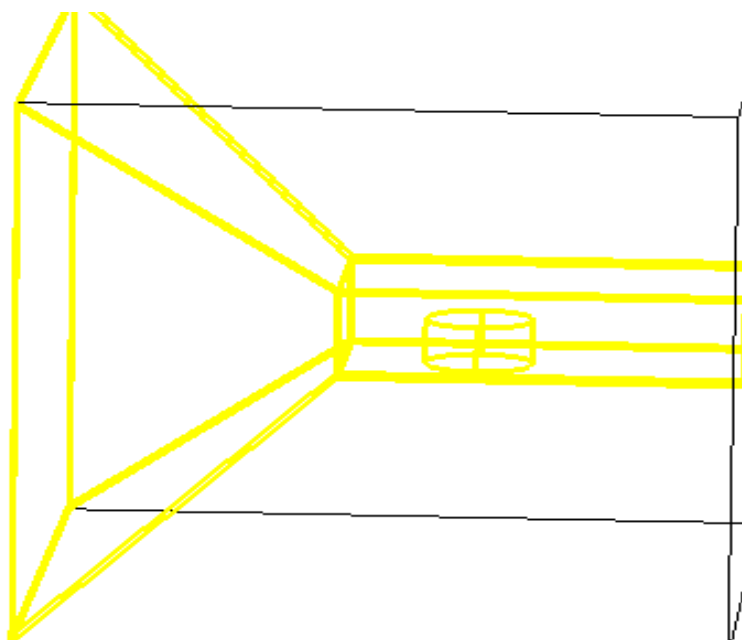


Διάγραμμα ακτινοβολίας 3

Συνεχίζοντας, αφήνουμε σταθερό το άνοιγμα και θα πειραματιστούμε μόνο με το διεγέρτη. Όπως είναι η θέση του (πιο κοντά στη χοάνη), και το μήκος του το οποίο θα μειώσουμε όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

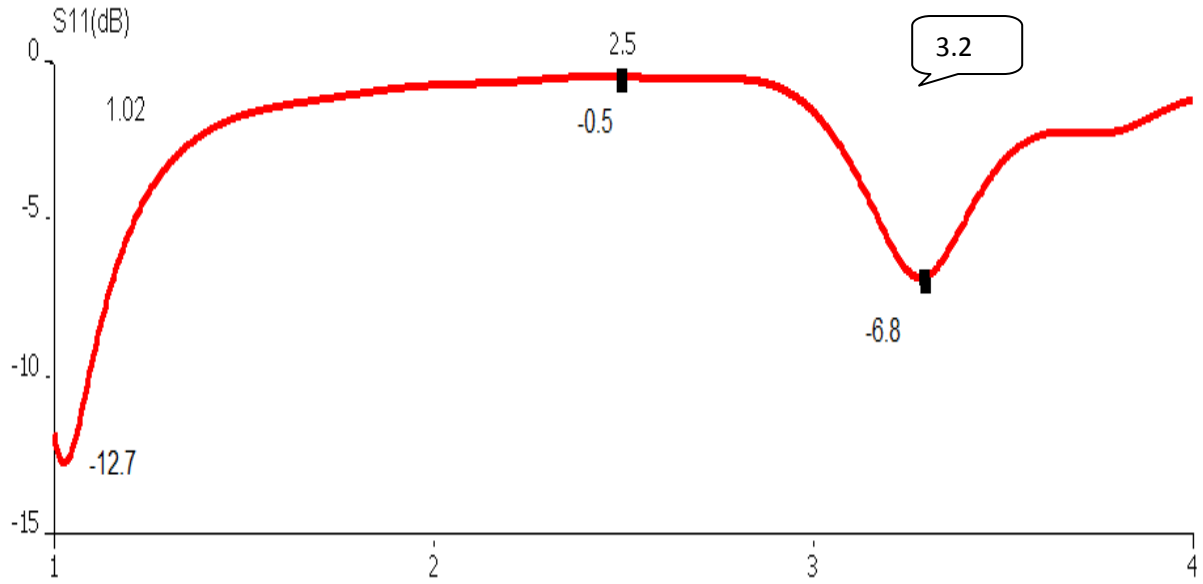
ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ	ΤΙΜΕΣ	ΑΝΟΙΓΜΑ	ΤΙΜΕΣ	ΔΙΕΓΕΡΤΗΣ	ΤΙΜΕΣ
$Z_{\max}$ cm	150	Height <sub>cm</sub>	112	Outer radius <sub>cm</sub>	20
$Z_{\min}$ cm	50	Taper <sub>deg</sub>	42	Zcenter <sub>cm</sub>	100
				$Y_{\min}$ cm	-20

Πίνακας 3.10 :Διαστάσεις κεραίας



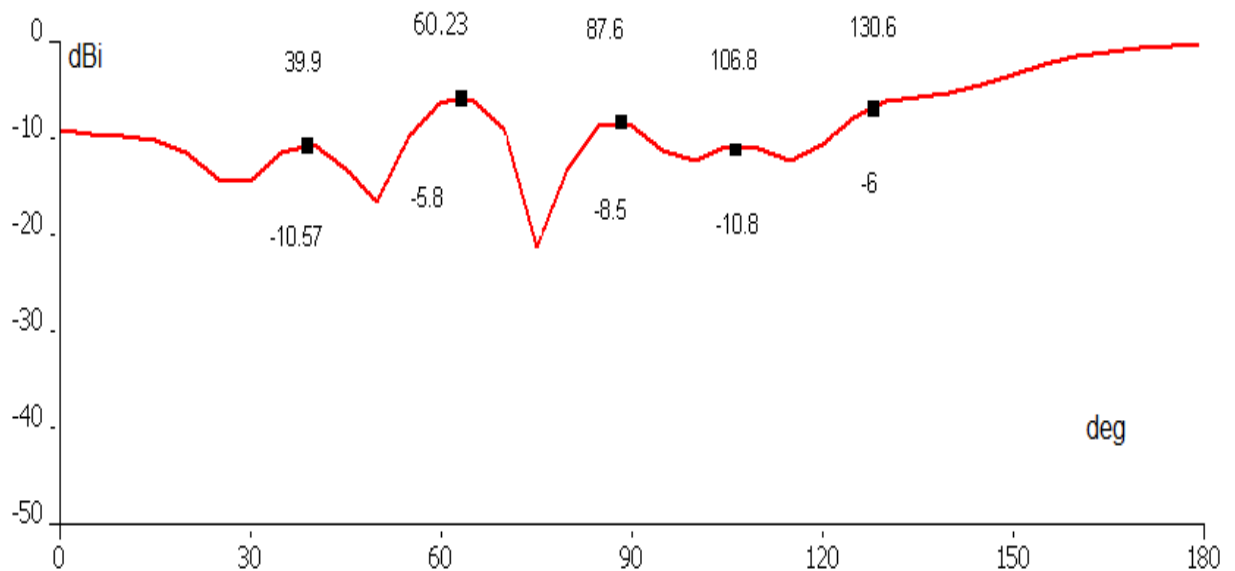
Εικόνα 35: Κεραία με σταθερό άνοιγμα και μικρότερο διεγέρτη

Από τα παραπάνω δημιουργείται η γραφική παράσταση 4 στην οποία μπορούμε να διακρίνουμε ότι για  $f_c=2.5$  GHz το  $S_{11}=0.5$  dB ενώ για  $f=3.2$ GHz όπου φαίνεται και ο συντονισμός της κεραίας έχει  $S_{11}= - 6.84$ dB και  $f=1.02$  GHz με  $S_{11}=12.7$  dB. Τώρα για να βρούμε το  $v_{swr}$  από τον τύπο (3.5) θα βρούμε τις τιμές οι οποίες αντιστοιχούν σε κάθε συχνότητα και θα είναι οι εξής στα σημεία του συντονισμού θα έχουμε 1.34:1 και 1.17:1 και για την συχνότητα αποκοπής είναι 3:1.



Γραφική παράσταση 4

Και πάλι συγκρίνοντας την τιμή με τον πίνακα 3.7 δεν φτάσαμε ούτε τώρα στο επιθυμητό αποτέλεσμα, καθώς η συγκεκριμένη κεραία εκπέμπει 3:1 η οποία εκπέμπει οριακά..

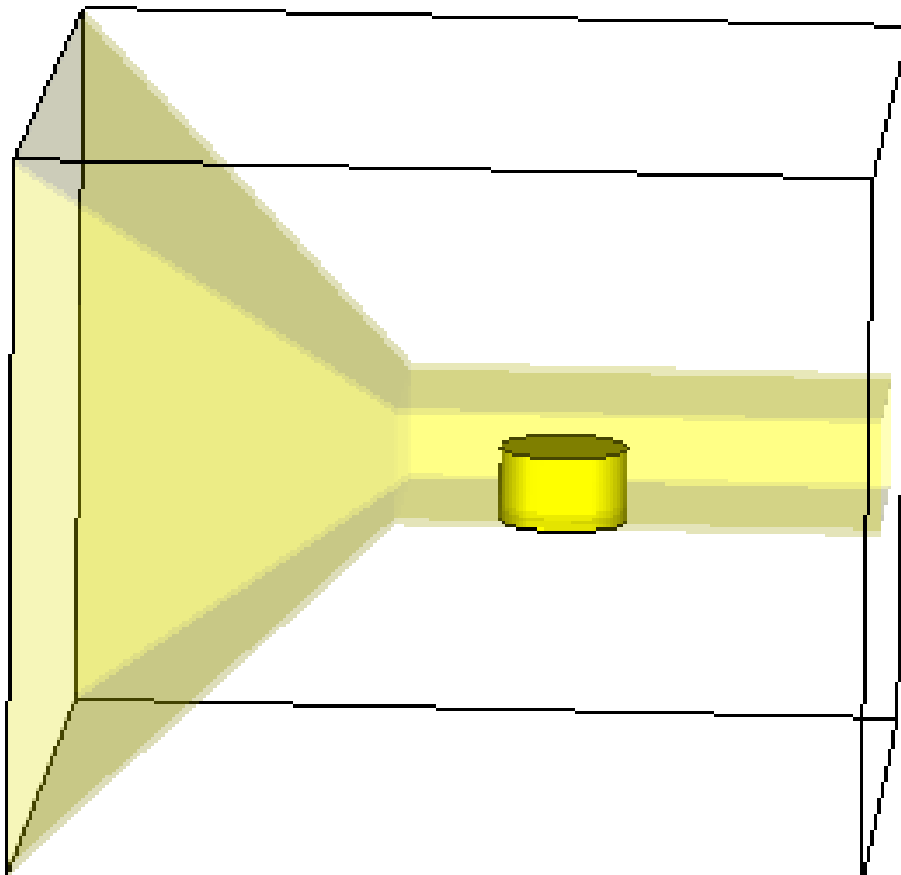


Διάγραμμα ακτινοβολίας 4

Οπότε εν συνεχεία θα μεγαλώσουμε τη διατομή του διεγέρτη και το ύψος του και θα αφήσουμε σταθερή τη θέση όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Επίσης θα αφήσουμε το άνοιγμα σταθερό όπως και το μήκος και τη συχνότητα από τους πίνακες 3.4 και 3.5.

ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ	ΤΙΜΕΣ	ΑΝΟΙΓΜΑ	ΤΙΜΕΣ	ΔΙΕΓΕΡΤΗΣ	ΤΙΜΕΣ
$Z_{\max}$ cm	150	Height <sub>cm</sub>	112	Outer radius <sub>cm</sub>	30
$Z_{\min}$ cm	50	Taper <sub>deg</sub>	42	Zcenter <sub>cm</sub>	100
				$Y_{\min}$ cm	-25

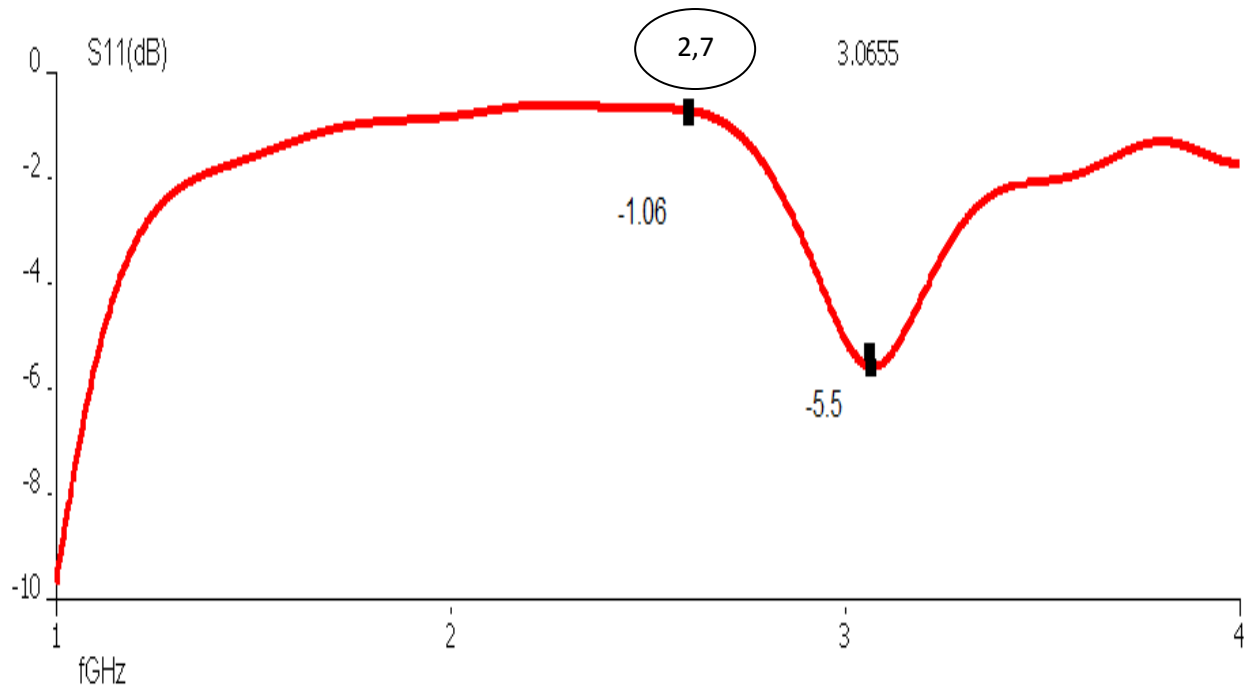
Πίνακας 3.11: Διαστάσεις κεραίας



Εικόνα 36: Η κεραία με μεγαλύτερο ύψος διεγέρτης

Από τα προηγούμενα προκύπτει η επόμενη γραφική παράσταση 5.



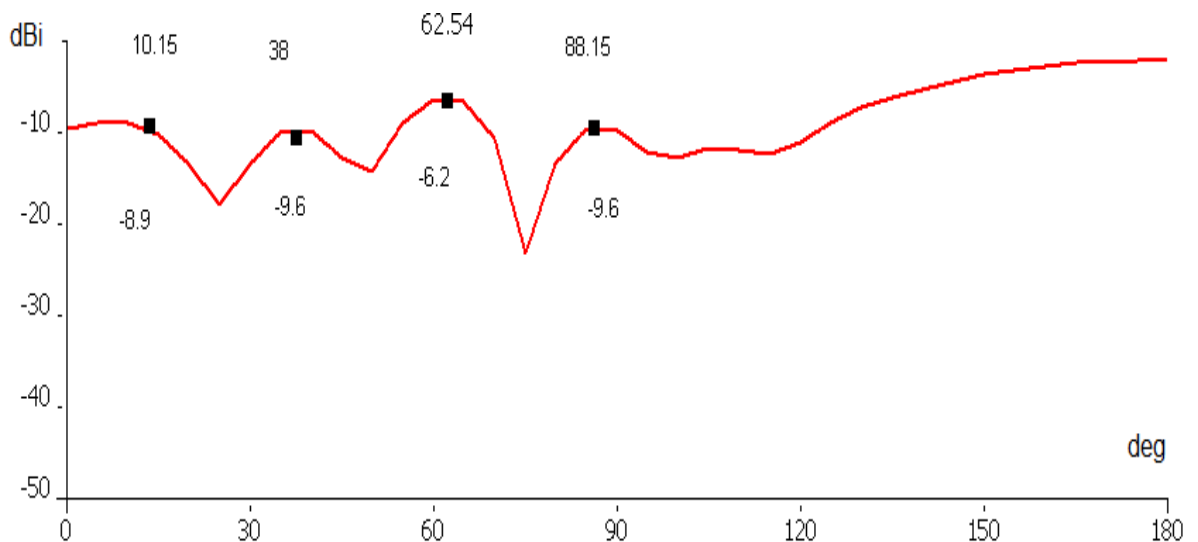


Γραφική παράσταση 5

Μπορούμε να διακρίνουμε ότι για συχνότητα αποκοπής  $f_c=2.7$  GHz έχει  $S_{11}=-1.67$ dB όσο για το σημείο του συντονισμού η συχνότητα είναι  $f=3$  GHz έχει  $S_{11}=-5.6$ dB.

Τώρα για το  $v_{swr}$  από τον τύπο 3.5 θα έχουμε για τη συχνότητα αποκοπής 3.9:1 για το σημείο του συντονισμού έχουμε 1.43:1.

Συγκρίνουμε τις τιμές με τον πίνακα 3.7, βλέπουμε ότι και πάλι δεν έχουμε φτάσει στο στόχο μας.



Διάγραμμα ακτινοβολίας 5

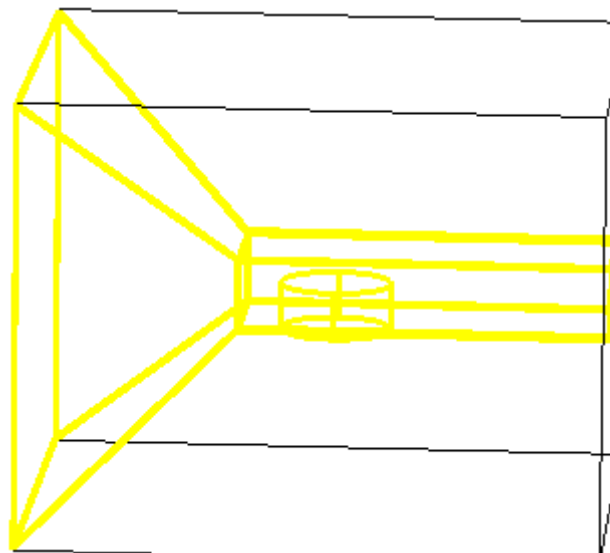
Παρατηρούμε ωστόσο ότι όσο έχουμε σταθερό το άνοιγμα της κεραίας και πειραματιζόμαστε με το διεγέρτη και τη θέση του, τόσο πιο κοντά ερχόμαστε στο στόχο μας. Έτσι στην επόμενη προσομοίωση θα πλησιάσουμε κι άλλο τη θέση του

διεγέρτη κοντά στη χοάνη και θα μεγαλώσουμε το μήκος του κυματοδηγού, θα αφήσουμε σταθερό το ύψος και τη διατομή του. Όπως στην προηγούμενη κεραία, ακόμα θα αφήσουμε σταθερά το άνοιγμα, και τη συχνότητα.

Συνοψίζοντας θα έχουμε την εξής κεραία στην παρακάτω εικόνα όπως και τον αντίστοιχο πίνακα 3.9.

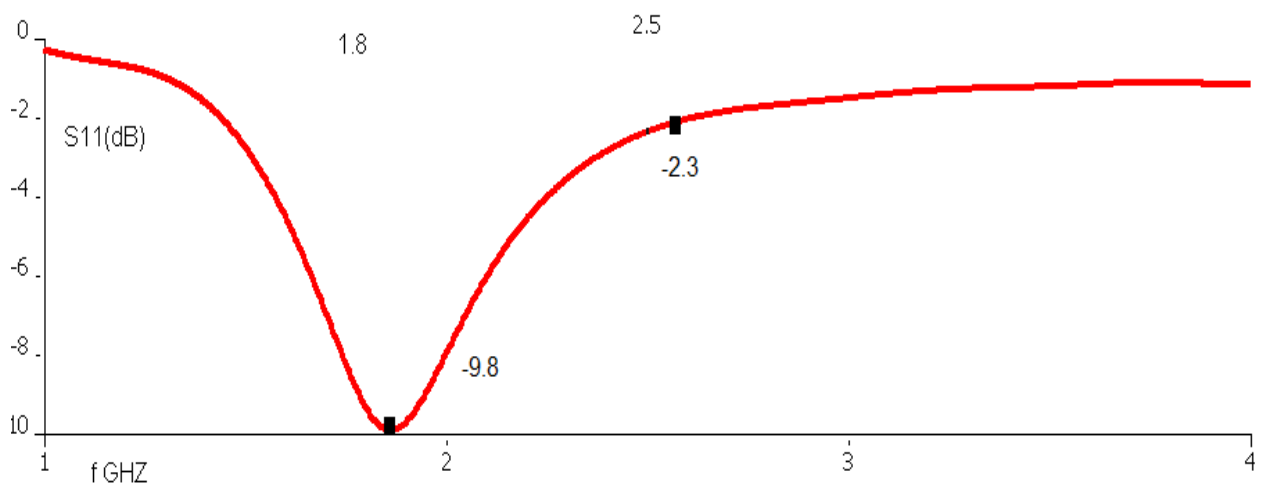
ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΥ	ΤΙΜΕΣ	ΑΝΟΙΓΜΑ	ΤΙΜΕΣ	ΔΙΕΓΕΡΤΗΣ	ΤΙΜΕΣ
$Z_{\max}$ cm	200	Height <sub>cm</sub>	112	Outer radius <sub>cm</sub>	30
$Z_{\min}$ cm	160	Taper <sub>deg</sub>	42	Zcenter <sub>cm</sub>	150
				$Y_{\min}$ cm	-25

Πίνακας 3.12 :Διαστάσεις κεραίας



Εικόνα 37:Αύξηση διεγέρτη και πόρτας

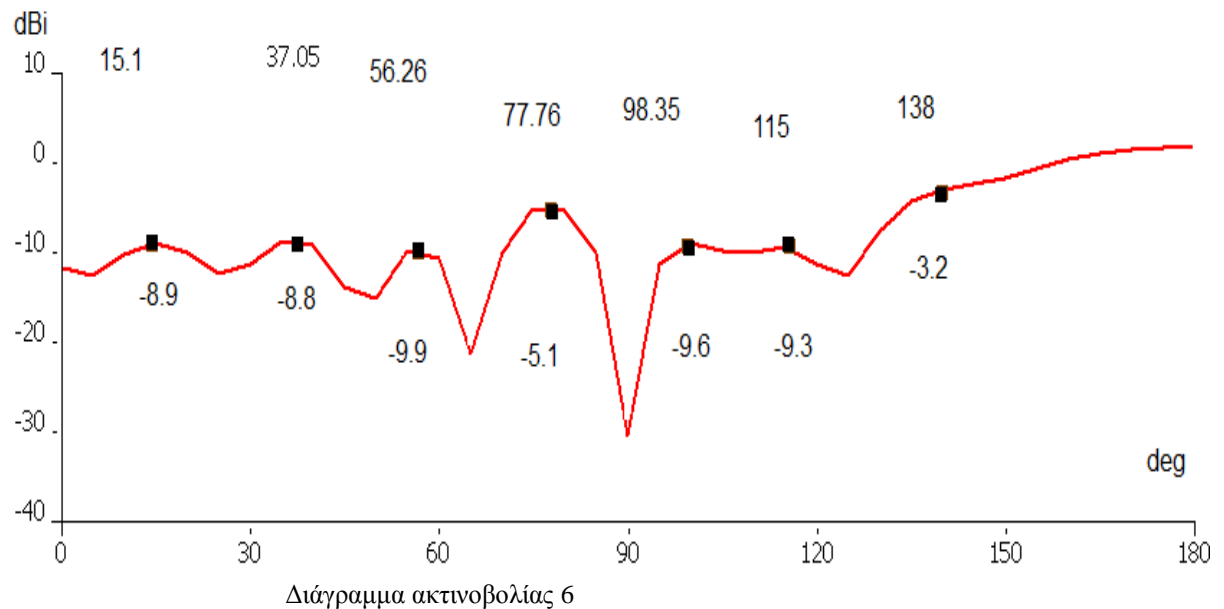
Από την παραπάνω κεραία προκύπτει η γραφική παράσταση 6 :



Γραφική παράσταση 6

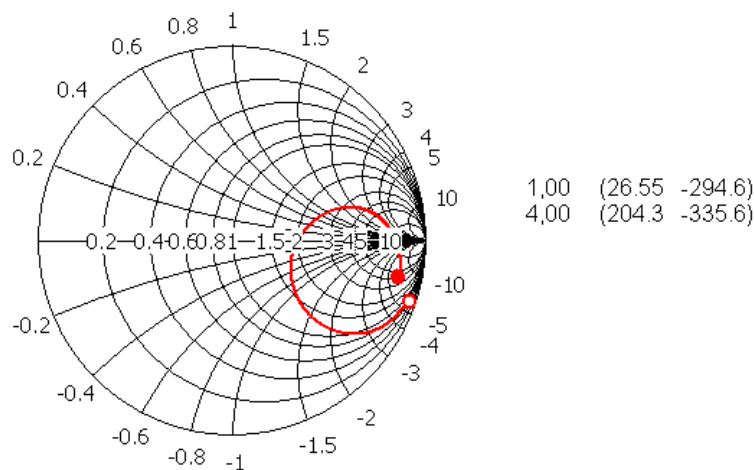
Στη γραφική παράσταση 6 βλέπουμε για συχνότητα αποκοπής  $f_c=2.52$  GHz με συντελεστή ανάκλασης  $S_{11}=-2.3$ dB και στο σημείο συντονισμού  $f=1.8$ GHz με  $S_{11}=-9.8$ dB. Από τον τύπο (3.5) του κεφαλαίου αυτού θα βρούμε το  $v_{swr}$ , το λόγο του στάσιμου κύματος, όπου η κάθε τιμή που θα βρούμε θα είναι αντίστοιχη της συχνότητας. Έτσι έχουμε 2.5:1 για τη συχνότητα αποκοπής και στο σημείο συντονισμού 3.2:1 αν συγκρίνουμε τις τιμές με τον πίνακα 3.7 θα δούμε ότι η κεραία μας είναι καλή. Δηλαδή εκπέμπει ικανοποιητικά

Επίσης έχουμε το εξής διάγραμμα ακτινοβολίας όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Παραπάνω βλέπουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας, υπολογίζεται μόνο και εφόσον υπάρχουν οι διαστάσεις της κεραίας και η κατανομή του πεδίου στο άνοιγμα της χοάνης. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα θα διανύσουν μεγαλύτερη απόσταση μέχρι να φτάσουν στα άκρα της εξωτερικής διατομής, από ότι θα χρειαστεί σχετικά με το κέντρο (διεγέρτης).

Παρατηρούμε ότι ο μέγιστος λοβός είναι στα  $-5.1$  dBi με  $77.76$ deg



Χάρτης SMITH

Εικόνα 39: Χάρτης Smith

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι όταν αλλάζαμε μόνο τις τιμές του Ανοίγματος, δε βλέπαμε βελτίωση για την κεραία μας ούτε αν αλλάζαμε τον διεγέρτη, το ίδιο συνέβαινε και όταν αφήναμε ένα από τα δύο σταθερά και μεταβάλαμε το άλλο, και πάλι δε βλέπαμε κάποια διαφορά. Καθώς το vswr ήταν παρά πολύ μεγάλο.

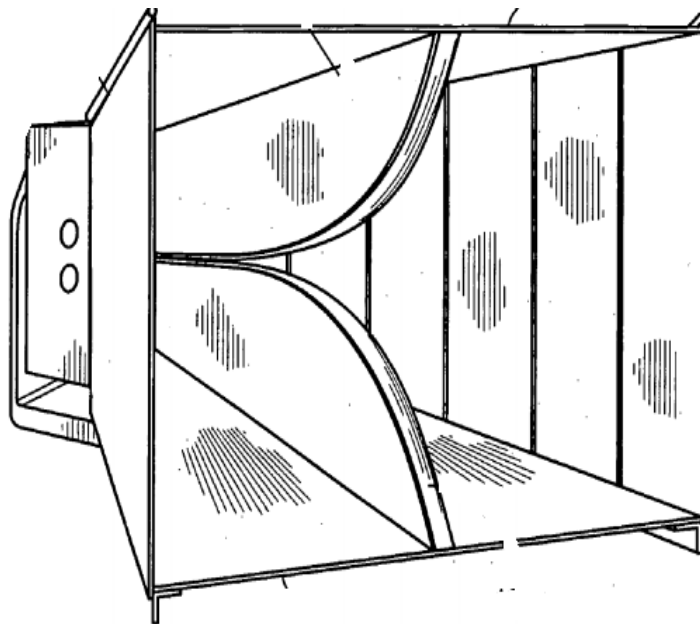
Έτσι από τις παραπάνω εφαρμογές της πυραμιδοειδούς κεραίας χοάνης συμπεραίνουμε ότι η ιδανικότερη κεραία για το φάσμα των συχνοτήτων που επιλέξαμε από 1-4GHz, θα πρέπει να είναι εκείνη με διατάσεις ύψους 112cm και άνοιγμα 42deg, με μήκος κυματοδηγού από 160 cm -200 cm ,όσο για το διεγέρτη θα πρέπει να έχει διατομή 30 και ύψος -25 καθώς βρίσκεται στον αρνητικό άξονα Y και η θέση του διεγέρτη να είναι κοντά στη χοάνη, δηλαδή προς το τέλος του κυματοδηγού.

Παρόλα αυτά διαπιστώνουμε ότι η κεραία μας έχει απώλειες, καθώς έχει για vswr 2.6:1 και εκπέμπει μέτρια όπως μπορούμε να διακρίνουμε από τον πίνακα 3.7.

Θα μπορούσαμε να τη βελτιώναμε αν προσθέταμε εσωτερικά πτερύγια οδηγών όπως στο παρακάτω σχήμα, προκειμένου να βελτιωθούν το κέρδος και ο λόγος του στάσιμου κύματος, με μόνη επιφύλαξη το μέγεθός τους να μην υπερβαίνει το μέτρο του  $\lambda/2$ .

$$G = \frac{7.5 * \alpha_E * \alpha_H}{\lambda^2}$$

Από τον παραπάνω τύπο μπορούμε να βρούμε το κέρδος της κεραίας.

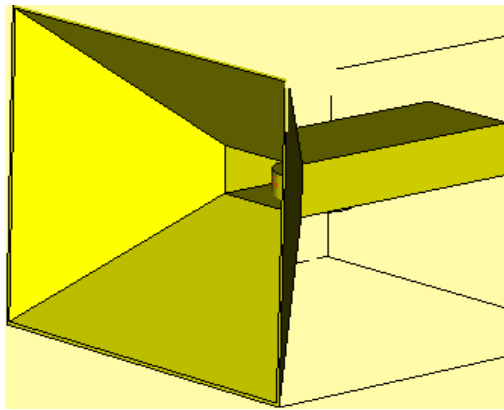


Εικόνα 40: Κεραία χοάνης με πτερύγια<sub>[49]</sub>

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Κλείνοντας θα ήθελα να αναφέρω ότι με την υλοποίηση της κεραίας αυτής, έμαθα πολλά πράγματα σε σχέση με τις κεραίες και τα κύματα. Καθώς ήταν διασκεδαστική η διερεύνηση του σχεδιασμού της πυραμιδοειδούς κεραίας χοάνης κάνοντας χρήση σε εφαρμογές με τον υπολογιστή.

Έτσι με το να χρησιμοποιούμε προγράμματα κατασκευής κεραίας γλυτώνουμε χρόνο, αυξάνουμε την ποιότητα και μειώνεται το κόστος σχεδιασμού της.



### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τζαφέρη Κ, »Σχεδίαση τυπωμένων υπερερυζωνικών κεραιών για δίκτυα προσωπικού χώρου», [διπλωματική εργασία] Πανεπιστήμιον Πατρών, τμήμα Ηλεκτρολόγων μηχανικών και τεχνολογίας υπολογιστών, 2009, Πάτρα.
2. Ψυχογιού Δ. »Σχεδίαση τυπωμένων κεραιών για ασύρματα συστήματα επικοινωνιών» [διπλωματική εργασία] Πανεπιστήμιον Πατρών, τμήμα Ηλεκτρολόγων μηχανικών και τεχνολογίας υπολογιστών, 2008, Πάτρα.
3. Σταμάτης Β. «Σχεδίαση και ανάπτυξη μικροκομματικών φίλτρων και στοιχειοκεραίων για τηλεπικοινωνιακές και ιατρικές εφαρμογές» [Διπλωματική εργασία], Πανεπιστήμιο Πειραιώς, τμήμα Ψηφιακών συστημάτων, 2012, Πειραιάς.
4. Χατζηαναγνώστου Ε. »Εργαστηριακές μετρήσεις κεραιών σε ανηχοϊκό θάλαμο» [Διπλωματική εργασία], Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, τμήμα ηλεκτρονικών μηχανικών και μηχανικών υπολογιστικών, 2012, Θεσσαλονίκη.
5. Γουδέλη Ε. «Κινητό τερματικό για αυτοκίνητα μικρού μεγέθους χρησιμοποιώντας δορυφόρο ζώνης Ku (11/14GHz)» [Διπλωματική εργασία] Μετσόβιο Πολυτεχνείο, τμήμα ηλεκτρολόγων μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών, 2005, Αθήνα.
6. Αποστολοπούλου Α. «Μελέτη και κατασκευή περιοδικής λογαριθμικής κεραιάς με δίπολα», ΤΕΙ Κρήτης-Χανιά, 2005, Χανιά.
7. Αμανατιάδης Σ. »Προσομοιωτική ανάλυση της πυραμιδικής λογαριθμικής-περιοδικής κεραιάς διπλής πόλωσης» Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, τμήμα Ηλεκτρολόγων μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών, 2010, Θεσσαλονίκη.
8. Haslett C. «Essentials of radio wave propagation» [Απόσπασμα], Cambridge University Press, 2008, Αγγλία.
9. Βότης Κ. »Ασύρματες Τηλεπικοινωνίες κεραιές-2» [Σημειώσεις].
10. <http://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/horn.php>, 20/1/2014.
11. Νεοφύτου Μ., Νικόλα Θ. »Δίκτυα δημόσιας χρήσης και διασύνδεση δικτύων», Πανεπιστήμιο Πάτρας, τμήμα Μηχανικών Η/Υ και πληροφορικής πολυτεχνική, 2007, Πάτρα.
12. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%8D%CE%BC%CE%B1>, 15/2/2014.
13. <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C108/141/1021,3657/>, 15/2/2014.
14. <http://www.voustros.com/sv6jhg/?p=147>, 20/3/2014
15. <http://www.amateur-radio-wiki.net/index.php?title=Nulls>, 20/3/2014
16. [http://www.g-physics.com/2012/11/blog-post\\_18.html](http://www.g-physics.com/2012/11/blog-post_18.html), 15/2/2014
17. [http://3sek-a-athin.att.sch.gr/tomplir/elect\\_spec.htm](http://3sek-a-athin.att.sch.gr/tomplir/elect_spec.htm), 30/5/2014
18. <http://www.tovima.gr/science/article/?aid=376210>, 30/5/2014
19. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%B8%CE%BB%CE%B1%CF%83%CE%B7>, 15/2/2014
20. <http://users.sch.gr/kassetas/zzzzzzzOpticsFermat.htm> 20/10/2014
21. [http://en.wikipedia.org/wiki/Horn\\_antenna](http://en.wikipedia.org/wiki/Horn_antenna), 30/5/2014
22. Ιωάννου Α., Ντάνος Γ., Πήττας Α., Ράπτης Σ. (2006) »Φυσική θετικής και τεχνολογικής κατεύθυνσης Γ' τάξης λυκείου», Έκδοση ΣΤ', Αθήνα: Οργανισμός εκδόσεων διδακτικών βιβλίων.
23. Βότης Κ. »Ασύρματες τηλεπικοινωνίες Η/Μ κύμα-Γραμμές μεταφοράς» [Σημειώσεις].
24. Βότης Κ. »Ασύρματες Τηλεπικοινωνίες κεραιές-1» [Σημειώσεις].
25. Αλεξιάκης Ν, Αμπατζής Σ., Γκουγκούσης Γ, Κουντούρης Β, Μοσχοβίτης Ν, Οβαδίας Σ, Πετρόχειλος Κ, Σαμπράκος Μ, Ψαλίδας Α. (2005) »Φυσική Β' λυκείου» Έκδοση ΣΤ, Αθήνα: Οργανισμός εκδόσεων διδακτικών βιβλίων,
26. <http://cgi.di.uoa.gr/~std03134/telcomhist/telcomhist.htm>, 15/2/2014
27. <http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/images/history/chappe.html>
28. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guglielmo\\_Marconi.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guglielmo_Marconi.jpg), 30/5/2014
29. <http://gym-peram.reth.sch.gr/pchistory.htm>, 20/5/2014
30. Πανταζάτου Κ. »Ηλεκτρομαγνητική μελέτη και υλοποίηση διαύλου επικοινωνίας δορυφορικού καναλιού» [Διπλωματική εργασία] Πανεπιστήμιο Πατρών, τμήμα ηλεκτρολόγων μηχανικών και τεχνολογίας υπολογιστών, 2009, Πάτρα.
31. [http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/m.dodge/cybergeography/atlas/arpanet\\_april1971\\_large.gif](http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/m.dodge/cybergeography/atlas/arpanet_april1971_large.gif), 5/6/2014
32. [http://mdoumeni2012.blogspot.gr/p/blog-page\\_17.html](http://mdoumeni2012.blogspot.gr/p/blog-page_17.html), 15/3/2014
33. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%8D%CE%BC%CE%B1>, 29/1/2014
34. <http://www.akoustikavarikoias.gr/Content.php?PageId=92>, 20/5/2014
35. [http://vmarousis.blogspot.gr/2012/01/blog-post\\_17.html](http://vmarousis.blogspot.gr/2012/01/blog-post_17.html), 29/1/2014

36. <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Half-Wave+Dipole>, 15/3/2014
37. <http://raylcross.net/asap/asapexam/thinwire/yagboom.html> 20/5/2014
38. <http://www.digitalhome.ca/forum/showthread.php?t=156562&page=3>, 15/3/2014
39. <http://users.auth.gr/vanidhis/pdf/speckle/4-0-%CE%A0%CE%9F%CE%9B%CE%A9%CE%A3%CE%97-4-1.pdf>, 15/3/2014
40. Κορφιάτης Ε. «*Επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα*» [πρόχειρες σημειώσεις].
41. Παπαπέτρου Ε, «*Ασύρματα δίκτυα-ασύρματη διάδοση*», [σημειώσεις], Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, τμήμα μηχανικών υπολογιστών και πληροφορικής, Ιωάννινα
42. Μπενάκης Μ, (2006) «*Φυσική θετικής και τεχνολογικής κατεύθυνσης Γ' τάξης λυκείου*», Κύματα, Έκδοση ΣΤ', Αθήνα: Οργανισμός εκδόσεων διδακτικών βιβλίων.
43. [http://www.qsl.net/va3iul/Antenna/Small\\_Antennas\\_for\\_High\\_Frequencies/Small\\_Antennas\\_for\\_High\\_Frequencies.pdf](http://www.qsl.net/va3iul/Antenna/Small_Antennas_for_High_Frequencies/Small_Antennas_for_High_Frequencies.pdf), 15/3/2014
44. Καραδημητρίου Μ., «*Βιβλίο Γ' Λυκείου*», [πρόχειρες σημειώσεις], 2012.
45. <https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/alexiou/ahts/notes/kef08.pdf>, 20/5/2014
46. Σαρηγιαννίδου Α., *Πρακτική κατασκευή πομποδέκτη ραδιοφωνικού τύπου και μελέτη του θεωρητικού του υπόβαθρου*, [πτυχιακή εργασία], ΤΕΙ Λάρισας, τμήμα τεχνολογίας πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών, 2012, Λάρισα.
47. Βαρζάκας Π., «*Θεωρία ασύρματες ζεύξεις-διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων*», [Σημειώσεις], ΤΕΙ Λαμίας, τμήμα ηλεκτρονικής.
48. Blake, «*Wireless Communication Technology*», κεφάλαιο 8.
49. <http://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20050078044.pdf>, 30/11/2013
50. <http://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php#vswrtable>, 20/5/2014
51. <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C108/141/1021,3660/>, 20/5/2014
52. <http://www.madrimasd.org/blogs/CienciayPoesia/2014/06/10/85435>, 5/6/2014
53. [https://www.google.gr/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&docid=qUP2yAMj3LSBHM&tbid=s5WzVRn5hcyd9M:&ved=0CAUQjRw&url=http%3A%2F%2Fusers.sch.gr%2Fkgiannaras%2Findex.php%2Fel%2Fmathimata%2Ffilektronikes%2Fepikoinonies%2Fi-ennoia-tis%2Fkeraias&ei=2wKnU9\\_bCcf2O7LOgfAG&bvm=bv.69411363,d.d2k&psig=AFQjCNEE4huQdafqF-NbjMwhuTK-178sJQ&ust=1403540567209288](https://www.google.gr/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&docid=qUP2yAMj3LSBHM&tbid=s5WzVRn5hcyd9M:&ved=0CAUQjRw&url=http%3A%2F%2Fusers.sch.gr%2Fkgiannaras%2Findex.php%2Fel%2Fmathimata%2Ffilektronikes%2Fepikoinonies%2Fi-ennoia-tis%2Fkeraias&ei=2wKnU9_bCcf2O7LOgfAG&bvm=bv.69411363,d.d2k&psig=AFQjCNEE4huQdafqF-NbjMwhuTK-178sJQ&ust=1403540567209288)
54. [http://www.radio-electronics.com/info/antennas/horn\\_antenna/horn\\_antenna.php](http://www.radio-electronics.com/info/antennas/horn_antenna/horn_antenna.php)
55. [http://en.wikipedia.org/wiki/Yagi-Uda\\_antenna](http://en.wikipedia.org/wiki/Yagi-Uda_antenna)
56. [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%85%CE%BC%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AE\\_\(%CF%86%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE\)](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%85%CE%BC%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AE_(%CF%86%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE))