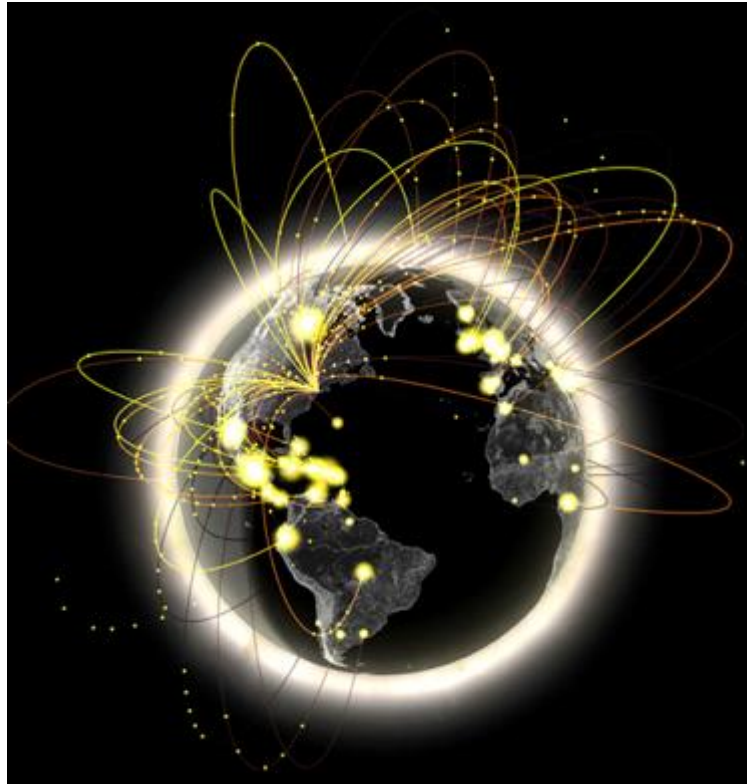


**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ
ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1638



Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία και Γραμμές Μετάδοσης

Σπουδαστής :Μαρκόπουλος Άγγελος

ΕΠΟΠΤΕΥΟΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δροσόπουλος Αναστάσιος

ΠΑΤΡΑ 2017

©2017 - All rights reserved
©2017, Copyright από Μαρκόπουλο Άγγελο

Πρόλογος/Περίληψη

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η εισαγωγή και μια ανάλυση στο τομέα της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας όσο και των Εφαρμογών της στις Γραμμές Μετάδοσης η οποία θα εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τεχνολογικής Εκπαίδευσης του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας .Αρχικά θα παρουσιαστεί η θεωρητική προσέγγιση σημαντικών εννοιών που απαρτίζουν το σύνολο της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας ενώ συγχρόνως θα αναλυθούν το θεωρητικό υπόβαθρο και το μοντέλο των γραμμών μεταφοράς και μετάδοσης. Ειδικότερα θα παρουσιαστούν το βασικό στέλεχος της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας δηλαδή οι 4 εξισώσεις Maxwell οι οποίες σε συνδυασμό με την δύναμη Lorentz είναι η βάση του κλασσικού ηλεκτρομαγνητισμού ,της οπτικής και των ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Επιπρόσθετα θα τονιστούν οι απαραίτητες προαπαιτούμενες μαθηματικές σχέσεις που μοντελοποιούν τις εξισώσεις αυτές και τη θεωρία των γραμμών μεταφοράς και μετάδοσης όπως είναι οι ηλεκτρομαγνητική κυματική εξίσωση, μαθηματικοί ορισμοί διαφορικών εξισώσεων και διανυσματικών τελεστών για τις εξισώσεις Maxwell. Παράλληλα με την εννοιολογική περιγραφή των παραπάνω θα διατυπωθούν τα θεωρητικά θεμέλια για τις γραμμές μεταφοράς και μετάδοσης όπως π.χ οι εξισώσεις του τηλεγράφου και τα απαραίτητα στοιχεία για την μοντελοποίησή τους. Παράλληλα θα αναλυθούν και τα ειδικά εξαρτήματα σε τέτοιες γραμμές όπως είναι οι κεραίες και οι πομποδέκτες σε συνδυασμό με το θεωρητικό υπόβαθρο τους και συγχρόνως τις πρακτικές εφαρμογές και σκοπιμότητες τους . Στη συνέχεια έπειτα από τη θεωρητική προσέγγιση και ανάλυση των παραπάνω θα εξεταστούν η χρησιμότητα και οι πρακτικές εφαρμογές τους. Ταυτόχρονα θα γίνει και μια μικρή αναφορά στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και τους κανονισμούς που διέπουν τέτοια συστήματα περί προστασίας από ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ακτινοβολία.

Τελικός στόχος της παρούσας πτυχιακής είναι η αποτύπωση και η στοιχειώδη εμβάθυνση στις έννοιες του Ηλεκτρομαγνητισμού και των Γραμμών Μετάδοσης και Μεταφοράς αλλά και ένας πρακτικός προσανατολισμός της χρησιμότητα και χρηστικότητας αυτών.

Ευχαριστήρια

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε

τρόπο στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας αλλά και ταυτόχρονης φοιτητικής μου πορείας στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε του τμήματος Τει Δυτικής Ελλάδας. Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Αναστάσιο Δροσόπουλο για την επίβλεψη, την καθοδήγηση και την υποστήριξη καθ' όλη την διάρκεια της παρούσας πτυχιακής εργασίας και περαιτέρω φοιτητικής διδασκαλίας και παρακολούθησης . Ήταν πάντα διαθέσιμος να μου προσφέρει τις γνώσεις του και τον ευχαριστώ για την εποικοδομητική συνεργασία μας καθ όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου σπουδών.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα όλο το διδακτικό προσωπικό του παραπάνω τμήματος για την αδιάκοπη πνευματική παρακίνηση και όρεξη για ενασχόληση και αγάπη για το παρόν αντικείμενο.

Τέλος τα περισσότερα ευχαριστήρια τα καταθέτω στην οικογένεια μου για τη συνεχή στήριξη, κατανόηση, εμπιστοσύνη και αγάπη κατά τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας

Άγγελος Μαρκόπουλος

Σεπτέμβριος 2018

Περιεχόμενα

1	Κεφάλαιο 1: Στοιχεία Μαθηματικής Ανάλυσης και Λογισμού.....	10
1.1	Συστήματα συντεταγμένων	10
1.1.1	Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων	11
1.1.2	Κυλινδρικό Σύστημα Συντεταγμένων.....	11
1.1.3	Σφαιρικό Σύστημα Συντεταγμένων.....	12
1.2	Διανύσματα.....	13
1.2.1	Πράξεις μεταξύ διανυσμάτων	14
1.2.2	Πολλαπλασιασμός μεταξύ διανυσμάτων	14
1.3	Συνάρτηση	16
1.4	Απειροστικός Λογισμός	16
1.4.1	Όρια.....	16
1.5	Διαφορικός Λογισμός.....	17
1.5.1	Παράγωγος	17
1.5.2	Μερικές Παράγωγοι.....	17
1.5.3	Διαφορική Εξίσωση	17
1.6	Ολοκληρωτικός Λογισμός.....	18
1.6.1	Ολοκλήρωμα	18
1.6.2	Επικαμπύλιο Ολοκλήρωμα (Line Integral).....	19
1.6.3	Ολοκλήρωμα Επιφάνειας.....	19
1.6.4	Ολοκλήρωμα Όγκου	20
1.7	Τελεστής Ανάδελτα	20
1.7.1	Κλίση βαθμωτού πεδίου.....	21
1.7.2	Απόκλιση Διανύσματος.....	22
1.7.3	Στροβιλισμός.....	23

2	Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στη Θεωρία του Ηλεκτρομαγνητισμού.....	24
2.1	Γενικά στοιχεία Ηλεκτρομαγνητικής Αλληλεπίδρασης.....	24
2.2	Πηγές Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων.....	24
2.3	Βασικές Έννοιες και Ορισμοί Ηλεκτρισμού και Μαγνητισμού.....	25
2.3.1	Ηλεκτρικό Φορτίο.....	25
2.3.2	Ηλεκτρικό Ρεύμα.....	27
2.3.3	Νόμος Διατήρησης Φορτίου.....	29
2.3.4	Ηλεκτρικό πεδίο και Δύναμη Coulomb.....	30
2.3.5	Μαγνητικό Πεδίο.....	31
2.3.6	Δύναμη Lorentz.....	32
2.3.7	Δύναμη Laplace.....	33
2.3.8	Νόμος Ampere.....	34
2.3.9	Νόμος των Biot-Savart.....	34
2.3.10	Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.....	35
3	Κεφάλαιο 3: Εξισώσεις Maxwell.....	36
3.1	Εισαγωγή.....	36
3.2	1 ^η Εξίσωση-Νόμος του Gauss.....	39
3.2.1	Σημασία Νόμου Gauss.....	39
3.2.2	Εφαρμογές Νόμου Gauss.....	40
3.3	2 ^η Εξίσωση-Νόμος του Gauss για μαγνητισμό.....	41
3.4	3η Εξίσωση-Εξίσωση Maxwell-Faraday.....	42
3.4.1	Ανάπτυξη Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης εξ' Επαγωγής.....	42
3.4.2	Κανόνας Lenz.....	42
3.5	4η Εξίσωση-Κλιμακωτός Νόμος Ampere(με Maxwell).....	43
3.5.1	Εισαγωγικά στοιχεία.....	43
3.5.2	Διόρθωση Νόμου Ampere με την προσθήκη του Maxwell.....	43
3.6	Πρόλογος Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας.....	44

3.6.1	Σύντομη επισκόπηση κυματικών εξισώσεων.....	46
3.6.2	Προεπισκόπηση Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	46
3.6.3	Μαθηματική Περιγραφή Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ακτινοβολίας.....	46
3.7	Ενημερωτικά στοιχεία περί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.....	47
3.7.1	Ταξινόμηση κατά την οδηγία περί ΗΜΣ	47
3.7.2	Υποχρέωση και έλεγχος.....	48
3.7.3	Ηλεκτρομαγνητική περιβαλλοντική συμβατότητα(EMVU).....	48
4	Κεφάλαιο 4:Γραμμές Μεταφοράς και Μετάδοσης.....	50
4.1	Εισαγωγή	50
4.2	Γενική Κατηγοριοποίηση	50
4.2.1	Ειδική Αναφορά στις Οπτικές Ίνες.....	51
4.3	Σύντομη Αναφορά Κατηγοριών	59
4.3.1	Παράλληλες Γραμμές.....	59
4.3.2	Συνεστραμμένου Ζεύγους.....	60
4.3.3	Θωρακισμένα Ζεύγη Καλωδίων	61
4.3.4	Ομοαξονικές Γραμμές.....	61
4.3.5	Κυματοδηγοί.....	63
4.4	Απώλειες στις Γραμμές Μεταφοράς	63
4.4.1	Απώλειες Χαλκού	63
4.4.2	Επιδερμικό Φαινόμενο	63
4.4.3	Απώλειες Διηλεκτρικού	64
4.4.4	Απώλειες Επαγωγής και Ακτινοβολίας.....	64
4.5	Μήκος Γραμμών Μεταφοράς.....	64
4.6	Παράμετροι Γραμμών Μεταφοράς.....	65
4.7	Χαρακτηριστικά υλικών σε Γραμμές Μεταφοράς	66
4.8	Εξισώσεις στις Γραμμές Μεταφοράς	68

4.8.1	Χαρακτηριστική Αντίσταση της Γραμμής.....	70
4.8.2	Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου	72
4.8.3	Καθυστέρηση Διάδοσης Κύματος σε Γραμμές Μεταφοράς.....	74
4.8.4	Ανακλάσεις σε Γραμμές Μεταφοράς.....	75
4.8.5	Στάσιμα Κύματα σε Γραμμές Μεταφοράς.....	79
4.8.6	Διάγραμμα Smith και οι Εφαρμογές του	87
4.9	Εξαρτήματα Γραμμών Μεταφοράς	95
4.10	Κυματοδηγοί(Waveguides).....	101
4.11	Κεραίες(Antennas).....	106
4.11.1	Δίπολο Hertizan (Hertizan Dipole).....	113
4.11.2	Δίπολο Μισού Κύματος (Half-way Dipole).....	117
4.11.3	Κεραία Μονόπολο ενός τέταρτου κύματος(Quarter Wave Monopole Antenna).....	120
4.11.4	Κεραία Μικρού Βρόγχου (Small Loop Antenna).....	121
4.11.5	Κεραία Συντονισμού(Resonant Antenna)	123
4.11.6	Κατανομή Ρεύματος και Τάσης σε Κεραίες.....	124
4.11.7	Ηλεκτρικά Σύντομες Κεραίες.....	125
4.11.8	Συστοιχίες και Ανακλαστήρες.....	125
4.12	Χαρακτηριστικά Κεραιών.....	138
4.12.1	Πυκνότητα Ισχύος Ακτινοβολίας	140
4.12.2	Περίγραμμα Κεραίας.....	142
4.12.3	Ένταση Ακτινοβολίας(Radiation Intensity)	145
4.12.4	Κέρδος Ισχύος (Power Gain)'	145
4.12.5	Κατευθυντικό Κέρδος (Directive Gain)	147
4.12.6	Αποτελεσματική Περιοχή και Μήκος Κεραίας.....	148
4.12.7	Πόλωση	151
4.12.8	Εύρος Ζώνης.....	152

4.12.9	Συντελεστής Κεραίας	152
4.13	Η Κεραία ως Στοιχείο Κυκλωμάτων	153
4.13.1	Η λειτουργία της κεραίας κατά τη λήψη	156
4.13.2	Η αρχή της αβεβαιότητας για κεραίες	157
4.13.3	Ανάλυση ισολογισμού ισχύος. Μέγιστη κατευθυντικότητα– ενεργός επιφάνεια σε κεραίες	158
4.13.4	Ίδια και αμοιβαία σύνθετος αντίσταση	161
4.14	Γραμμική κεραία μεγάλου μήκους	165
4.15	Κεραίες οδεύοντας κύματος	168
4.16	Πομπός(Transmitter).....	171
4.17	Δέκτης(Receiver)	174
5	Κεφάλαιο 5: Συμπέρασμα	182
6	Βιβλιογραφία.....	183

1 Κεφάλαιο 1: Στοιχεία Μαθηματικής Ανάλυσης και Λογισμού

1.1 Συστήματα συντεταγμένων

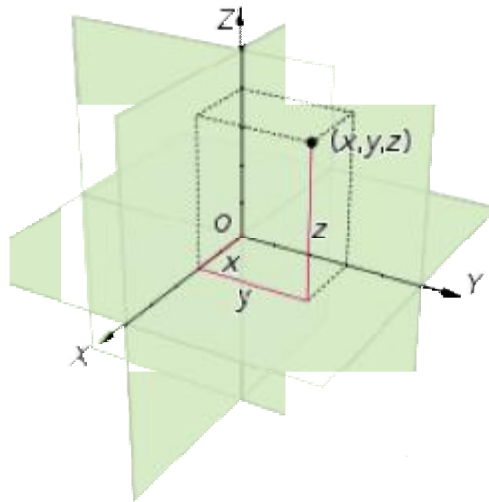
Σύστημα συντεταγμένων είναι το σύνολο των παραδοχών και ορισμών που οριοθετούν ένα χώρο και αποσκοπούν στην περιγραφή της θέσης ενός αντικειμένου στο χώρο αυτό με αριθμητικές τιμές. Στην ουσία, ένα σύστημα συντεταγμένων είναι πάντα σχετικό ως προς κάποιο σταθερό σημείο και οριοθετείται με συγκεκριμένες παραδοχές που επιτρέπουν την υλοποίησή του. Για οποιοδήποτε σημείο στον χώρο αντιστοιχεί σε κάθε σύστημα μια τριάδα αριθμών (οι τρεις συντεταγμένες του σημείου). Για τον καθορισμό της θέσης ενός σημείου στον τρισδιάστατο χώρο, υπάρχουν, στα Μαθηματικά, αρκετά συστήματα συντεταγμένων όπως είναι :

- Γεωγραφικές Συντεταγμένες
- Καμπυλόγραμμα Σύστημα Συντεταγμένων
- Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων
- Κυλινδρικό Σύστημα Συντεταγμένων
- Οριζόντιες Συντεταγμένες
- Ουράνιες Συντεταγμένες
- Παραμετρικό Σύστημα Συντεταγμένων
- Πολικό Σύστημα Συντεταγμένων
- Σφαιρικό Σύστημα Συντεταγμένων

Από το μεγάλο πλήθος των συστημάτων που αναφέρθηκαν τα πλέον πιο χρησιμοποιούμενα είναι το Καρτεσιανό, το Κυλινδρικό και το Σφαιρικό σύστημα

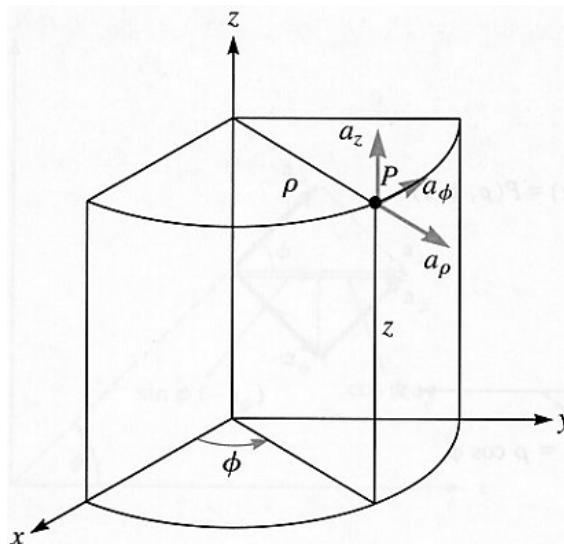
1.1.1 Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων

Τα 3 μοναδιαία διανύσματα είναι τα $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ και σε τυχόν σημείο στο χώρο, αντιστοιχούν οι συντεταγμένες (x, y, z) . Αντίστοιχα όπως φαίνεται παρακάτω:



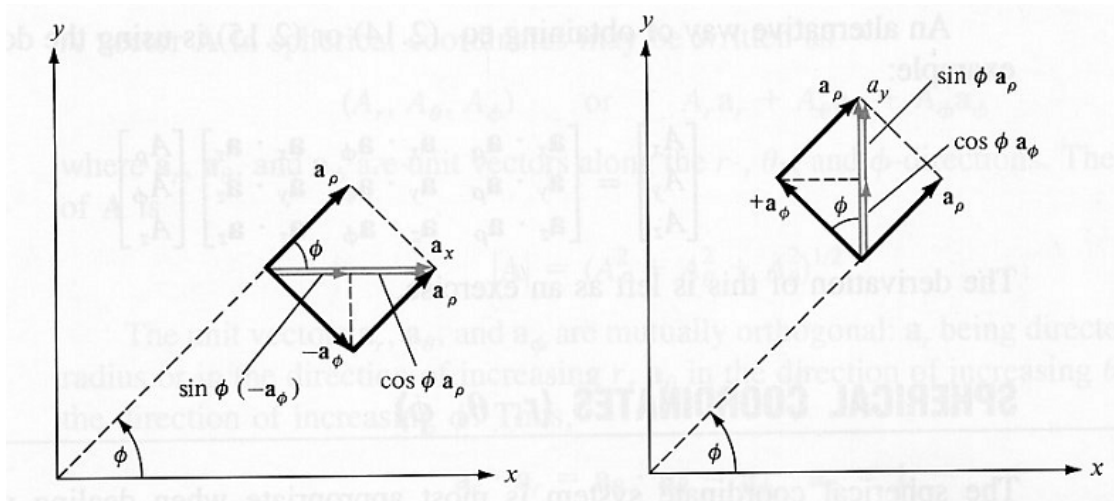
1.1.2 Κυλινδρικό Σύστημα Συντεταγμένων

Τα 3 μοναδιαία διανύσματα είναι τα $\hat{r}, \hat{\phi}, \hat{z}$ και σε τυχόν σημείο στο χώρο, αντιστοιχούν οι συντεταγμένες (ρ, ϕ, z) . Αντίστοιχα όπως φαίνεται παρακάτω:



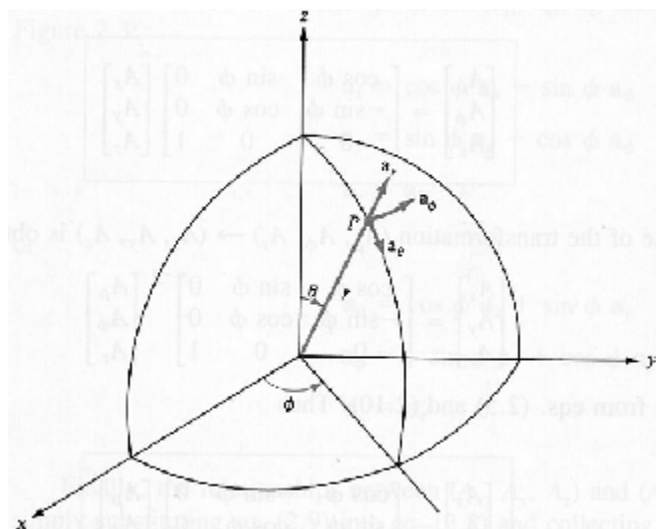
Η σχέση μεταξύ των μεταβλητών (x, y, z) του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων και του κυλινδρικού συστήματος (ρ, ϕ, z) είναι:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \phi = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad x = r \cos \phi \quad y = r \sin \phi$$



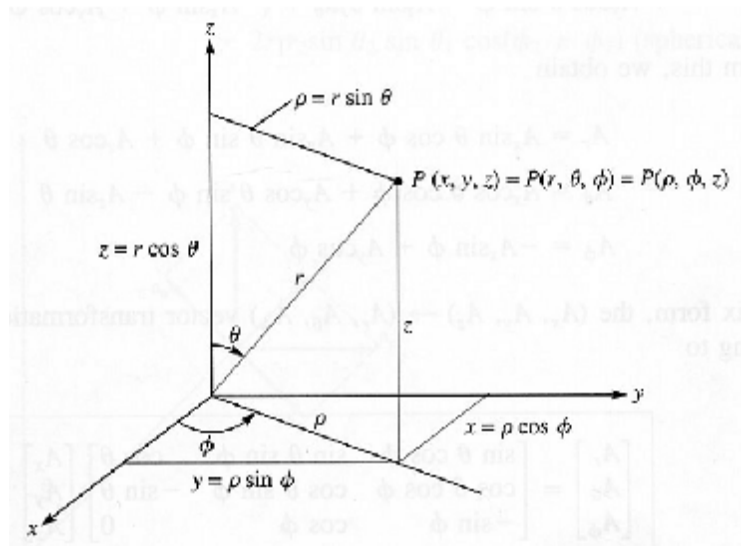
1.1.3 Σφαιρικό Σύστημα Συντεταγμένων

Ένα σημείο μπορεί να γραφτεί ως (r, θ, ϕ) όπως φαίνεται πιο κάτω σχήμα. Από το σχήμα βλέπουμε ότι το r είναι η απόσταση από το σημείο αναφοράς στο σημείο P, το θ είναι η γωνία μεταξύ του άξονα z και το διάνυσμα θέσης του σημείου και το ϕ είναι η γωνία που μετριέται από τον άξονα x στο επίπεδο xy. Αντίστοιχα όπως φαίνεται παρακάτω:



Η σχέση μεταξύ των μεταβλητών (x, y, z) του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων και του σφαιρικού συστήματος (ρ, θ, ϕ) είναι:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad \phi = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad x = r \sin \theta \cos \phi \quad y = r \sin \theta \sin \phi \quad z = r \cos \theta$$

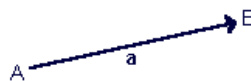


1.2 Διανύσματα

Βαθμωτό λέγεται κάθε φυσικό μέγεθος που καθορίζεται τελείως όταν είναι γνωστή η αριθμητική του τιμή και η μονάδα μετρήσεως.

Διανυσματικό λέγεται το φυσικό μέγεθος που για τον καθορισμό του χρειάζονται εκτός από το μέτρο δύο επιπλέον στοιχεία, η κατεύθυνση και η φορά (ταχύτητα, μετατόπιση, ένταση ηλεκτρικών πεδίων)

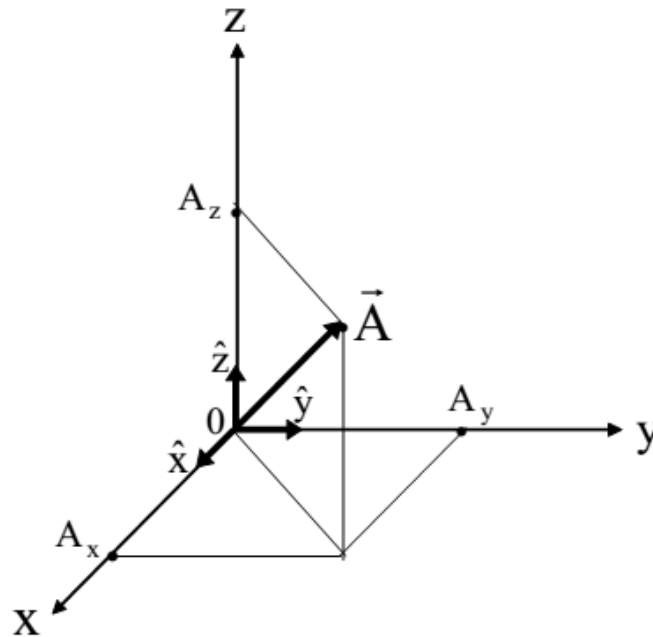
Στη γεωμετρία το διάνυσμα ορίζεται ως ένα προσανατολισμένο ευθύγραμμο τμήμα με το πρώτο άκρο να ονομάζεται *αρχή* του διανύσματος ή *σημείο εφαρμογής* και το δεύτερο *πέρας* του διανύσματος. Ένα διάνυσμα με αρχή το A και πέρας το B συμβολίζεται με \vec{AB} και παριστάνεται με ένα βέλος που ξεκινά από το A και καταλήγει στο B .



Μέτρο ή **μήκος** ενός διανύσματος \vec{AB} ονομάζεται η απόσταση μεταξύ των άκρων του A και B , δηλαδή το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB .

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες το διάνυσμα \vec{A} θα γράφεται:

$$\vec{A} = A_x \hat{i} + A_y \hat{j} + A_z \hat{k} \quad \text{και το μέτρο του θα είναι} \quad |\vec{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$



1.2.1 Πράξεις μεταξύ διανυσμάτων

1.2.1.1 Πρόσθεση και αφαίρεση διανυσμάτων

Δύο διανύσματα \mathbf{A} και \mathbf{B} μπορούν να προστεθούν και να δώσουν ένα άλλο διάνυσμα $\mathbf{\Gamma}$ όπου $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$. Η πράξη γίνεται συνιστώσα με συνιστώσα π.χ.

αν $A = (A_x + A_y + A_z)$ και $B = (B_x + B_y + B_z)$ τότε :

$$\mathbf{G} = (A_x + B_x)\mathbf{a}_x + (A_y + B_y)\mathbf{a}_y + (A_z + B_z)\mathbf{a}_z.$$

Η ίδια διαδικασία ισχύει και για την αφαίρεση διανυσμάτων.

1.2.2 Πολλαπλασιασμός μεταξύ διανυσμάτων

Όταν πολλαπλασιάζουμε δύο διανύσματα \mathbf{A} και \mathbf{B} το αποτέλεσμα είναι είτε βαθμωτό είτε διάνυσμα, εξαρτώμενο πάντα από τον τρόπο που γίνεται ο πολλαπλασιασμός. Οι δύο τρόποι για πολλαπλασιασμό διανυσμάτων είναι:

a) **Εσωτερικό γινόμενο (dot product)**

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = |\mathbf{u}| |\mathbf{v}| \cos(\theta_{AB})$$

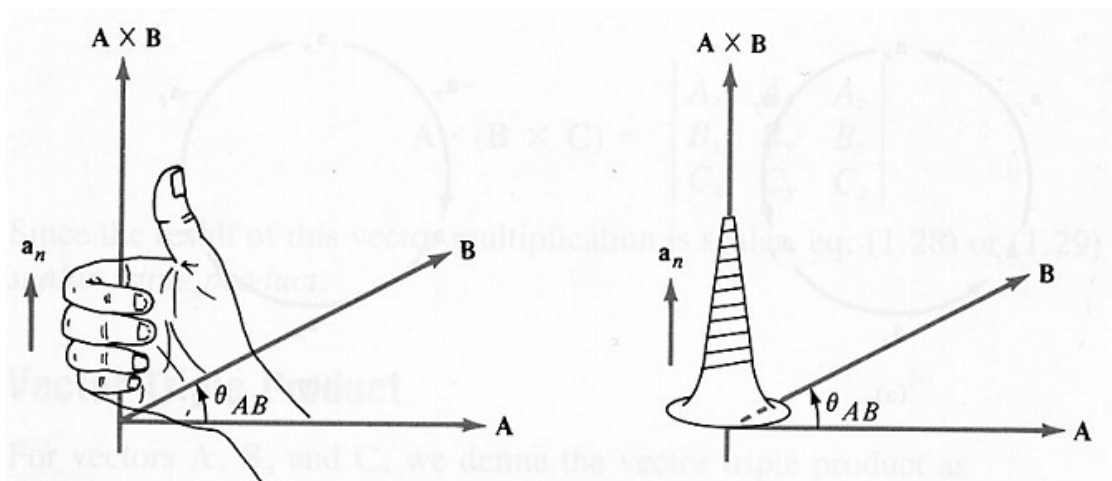
Όπου $|\mathbf{u}|$ και $|\mathbf{v}|$ τα μέτρα των δύο διανυσμάτων και θ_{AB} η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στα δύο αυτά διανύσματα. Είναι φανερό πως το εσωτερικό γινόμενο δύο διανυσμάτων θα είναι πάντα ένας αριθμός και όχι ένα νέο διάνυσμα όπως στην πρόσθεση και την αφαίρεση διανυσμάτων.

b) **Εξωτερικό γινόμενο (cross product)**

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = |\mathbf{A}| |\mathbf{B}| \sin(\theta_{AB}) \mathbf{a}_K$$

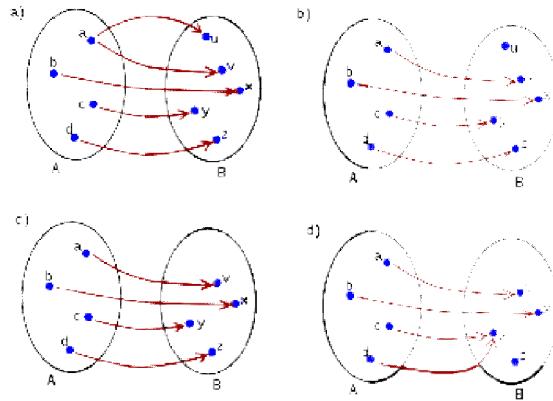
$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} \mathbf{a}_x & \mathbf{a}_y & \mathbf{a}_z \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

Όπου ομοίως $|\mathbf{A}|$ και $|\mathbf{B}|$ τα μέτρα των δύο διανυσμάτων και θ_{AB} η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στα δύο αυτά διανύσματα \mathbf{a}_K είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στο επίπεδο που περιλαμβάνει τα σημεία A, B και το σημείο αναφοράς όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



1.3 Συνάρτηση

Στα μαθηματικά, συνάρτηση, ή απεικόνιση όπως ονομάζεται διαφορετικά, είναι μια αντιστοίχιση μεταξύ δύο συνόλων, που καλούνται σύνολο ορισμού και σύνολο τιμών, κατά την οποία κάθε ένα στοιχείο του πεδίου ορισμού αντιστοιχίζεται σε ένα και μόνο στοιχείο του πεδίου τιμών. Αν η f είναι μια συνάρτηση από ένα σύνολο A σε ένα σύνολο B , γράφουμε $f : A \rightarrow B$.



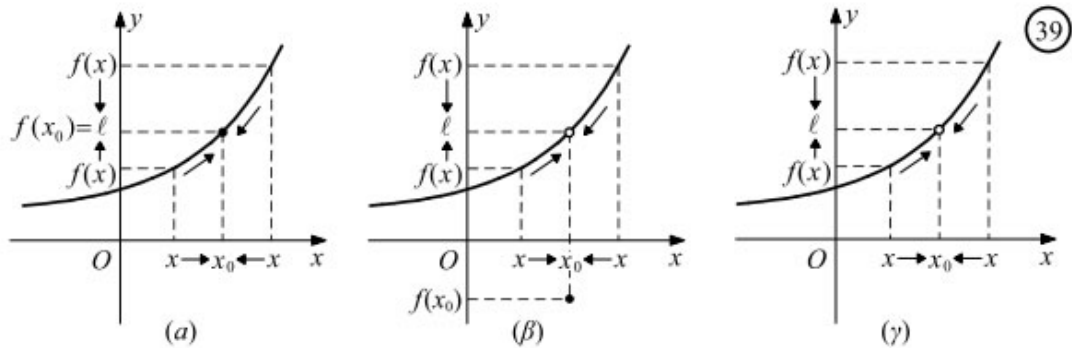
1.4 Απειροστικός Λογισμός

1.4.1 Όρια

Αν έχουμε μία συνάρτηση f , τις περισσότερες φορές αναζητούμε την τιμή που πλησιάζουν, προσεγγίζουν οι τιμές της συνάρτησης, όταν το $x \rightarrow x_0$

Αν πράγματι υπάρχει τέτοια τιμή και έστω ότι είναι L τότε γράφουμε:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = L$$



1.5 Διαφορικός Λογισμός

1.5.1 Παράγωγος

Η παράγωγος μιας συνάρτησης με πραγματική μεταβλητή είναι ένα μέτρο που εκφράζει τη μεταβολή της τιμής της συνάρτησης (μια συνάρτηση ή εξαρτημένη μεταβλητή) η οποία προσδιορίζεται από μια άλλη ποσότητα (η ανεξάρτητη μεταβλητή). Έστω μια συνάρτηση f με πεδίο ορισμού το A , και B το σύνολο των $x \in A$ στα οποία η f είναι παραγωγίσιμη. Τότε ορίζεται μια νέα συνάρτηση, με την οποία κάθε $x \in B$ αντιστοιχίζεται στο $f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$. Η συνάρτηση αυτή λέγεται (πρώτη) παράγωγος (derivative) της f και συμβολίζεται με f' .

1.5.2 Μερικές Παράγωγοι

Για να υπολογίσουμε τις μερικές παραγώγους μιας συνάρτησης παραγωγίζουμε τη συνάρτηση μερικά ως προς μία μεταβλητή της, θεωρώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες. Η μερική παράγωγος μιας συνάρτησης f συμβολίζεται με ένα σύμβολο ∇ . Ο θεωρητικός υπολογισμός είναι ο εξής:

$$f'(x) = \frac{\nabla f(x, y)}{\nabla x} = \lim_{Dx \rightarrow 0} \frac{f(x + Dx, y) - f(x, y)}{Dx}$$

$$f'(y) = \frac{\nabla f(x, y)}{\nabla y} = \lim_{Dy \rightarrow 0} \frac{f(x, y + Dy) - f(x, y)}{Dy}$$

1.5.3 Διαφορική Εξίσωση

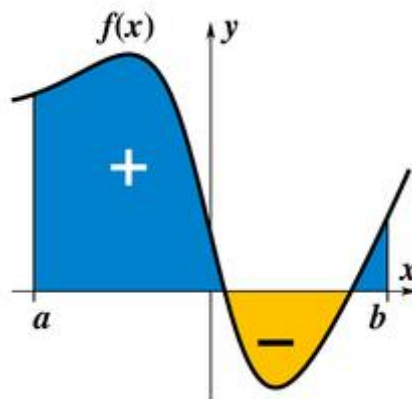
Διαφορική εξίσωση είναι η μαθηματική εξίσωση η οποία συσχετίζει τις τιμές μιας άγνωστης συνάρτησης μιας ή περισσότερων μεταβλητών και των παραγώγων της πρώτου, δεύτερου ή ανώτερου βαθμού. Οι εφαρμογές των διαφορικών εξισώσεων που θα μας απασχολήσουν είναι στον τομέα της Ηλεκτροδυναμικής και συγκεκριμένα τις εξισώσεις Maxwell. Εκτενής αναφορά και ανάλυση για τις εξισώσεις Maxwell θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο μιας και είναι σημαντικό απόσπασμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

1.6 Ολοκληρωτικός Λογισμός

1.6.1 Ολοκλήρωμα

Η ολοκλήρωση είναι στοιχειώδης έννοια των προχωρημένων μαθηματικών. Έστω μια συνάρτηση f με ανεξάρτητη μεταβλητή την x . Έστω υποσύνολο D του πεδίου ορισμού της συνάρτησης. Έστω (μεταβλητή) διαμέριση P , n στοιχείων, του συνόλου D . Με απλά λόγια διαμέριση λέγεται οποιοσδήποτε τρόπος κομματιάζει το D σε n κομμάτια, ενώ η λεπτότητα δείχνει πόσο μεγάλο είναι το μεγαλύτερο κομμάτι της διαμέρισης. Ένα κομμάτι της διαμέρισης συμβολίζεται με δx . Σε κάθε στοιχείο δx_i της διαμέρισης (δηλαδή σε κάθε κομμάτι) επιλέγεται ένα σημείο x_i και υπολογίζεται η $f(x_i)$. Το ορισμένο ολοκλήρωμα ορίζεται ως:

$$\int_P f(x) dx \stackrel{\circ}{=} \lim_{\|P\| \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n (f(x_i) \delta x_i)$$



Το ολοκλήρωμα της συνάρτησης $f(x)$ από το a στο b είναι η επιφάνεια πάνω από τον άξονα x και κάτω από την καμπύλη $y = f(x)$, μείον την επιφάνεια κάτω από τον άξονα x και πάνω από την καμπύλη, για x στο διάστημα $[a, b]$.

Το θεμελιώδες θεώρημα του απειροστικού λογισμού δηλώνει ότι η ολοκλήρωση και η παραγωγή είναι αντίστροφες πράξεις. Τότε ισχύει:

$$\int_a^b f(t) dt = F(b) - F(a). \text{ Με την } F \text{ να ονομάζεται αρχική ή αντιπαράγωγος}$$

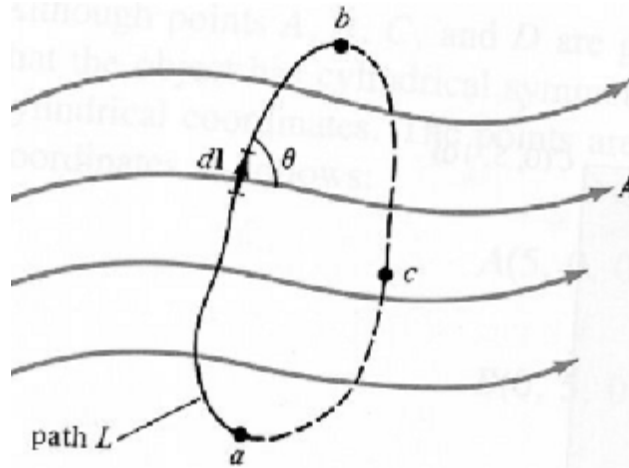
της f .

1.6.2 Επικαμπύλιο Ολοκλήρωμα (Line Integral)

Δίνεται το διανυσματικό πεδίο \mathbf{A} και η καμπύλη L , καθορίζουμε το

ολοκλήρωμα:
$$\oint_L \mathbf{A} d\mathbf{l} = \oint_a^b |\mathbf{A}| \cos \varphi dl$$

ως το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα (line integral) του \mathbf{A} γύρω από την L .



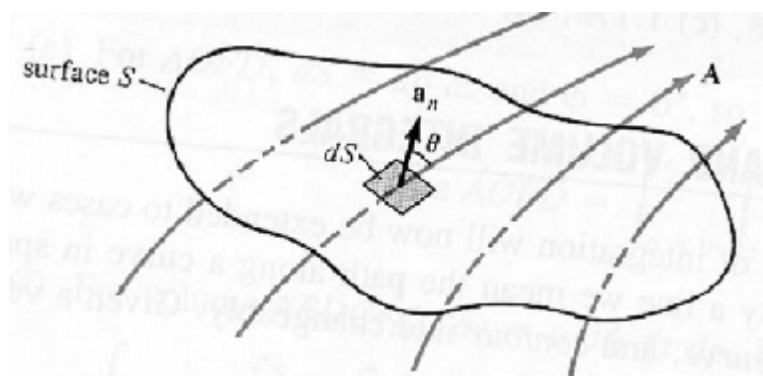
Αν η πορεία του ολοκληρώματος είναι μία κλειστή καμπύλη η πιο πάνω εξίσωση γίνεται:
$$\oint_L \mathbf{A} d\mathbf{l} = \oint_a^b |\mathbf{A}| \cos \varphi dl$$
 όπου ονομάζεται **η κυκλοφορία**

(circulation) του \mathbf{A} γύρω από την L

1.6.3 Ολοκλήρωμα Επιφάνειας

Δίνεται το διανυσματικό πεδίο \mathbf{A} , σε μια περιοχή που περιέχει την επιφάνεια S . Καθορίζουμε το ολοκλήρωμα επιφάνειας (surface integral) ως:

$$Y = \oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \oint_S A_n dS$$



1.6.4 Ολοκλήρωμα Όγκου

Επίσης καθορίζουμε το ολοκλήρωμα: $\oint_V dv$ ως το **ολοκλήρωμα**

όγκου (volume integral) του βαθμωτού ρ_n γύρω από τον όγκο V .

1.7 Τελεστής Ανάδελτα

Ο τελεστής στα μαθηματικά ορίζεται γενικά ως μια συνάρτηση που δρα πάνω σε κάποια άλλη συνάρτηση, μετασχηματίζοντάς την κατά ένα καθορισμένο τρόπο. Μπορεί να θεωρηθεί γενίκευση της έννοιας της συνάρτησης, καθώς οι συναρτήσεις δρουν συνήθως πάνω σε μεμονωμένα «αντικείμενα», ενώ ένας τελεστής μπορεί να δράσει πάνω στη «μορφή» μιας συνάρτησης ως σύνολο και να δώσει μια άλλη συνάρτηση. **Ανάδελτα** είναι διανυσματικός διαφορικός τελεστής των μερικών παραγώγων μιας συνάρτησης ως προς τις τρεις διαστάσεις του χώρου. Γενικά, δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται ένα μέγεθος στο χώρο. Γράφεται \tilde{N} και είναι διανυσματικός διαφορικός τελεστής και ορίζεται ως εξής.

Έστω μια συνάρτηση ως προς τις τρεις διαστάσεις του χώρου $f(\vec{r}) = f(x, y, z)$ τότε έχουμε ότι:

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες ο τελεστής Ανάδελτα (Del operator) γράφεται:

$$\tilde{N} = \frac{\partial}{\partial x} a_x + \frac{\partial}{\partial y} a_y + \frac{\partial}{\partial z} a_z$$

Σε κυλινδρικές συντεταγμένες ο τελεστής Ανάδελτα (Del operator) γράφεται:

$$\tilde{N} = \frac{\partial}{\partial r} a_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} a_\phi + \frac{\partial}{\partial z} a_z$$

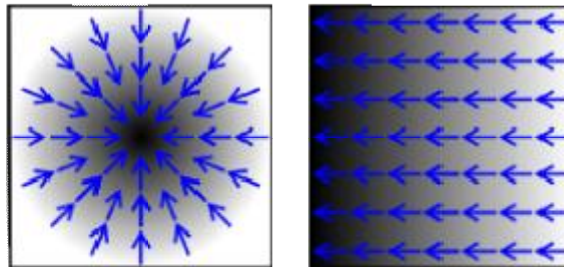
Σε σφαιρικές συντεταγμένες ο τελεστής Ανάδελτα (Del operator) γράφεται:

$$\tilde{N} = \frac{\partial}{\partial r} a_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} a_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} a_\phi$$

1.7.1 Κλίση βαθμωτού πεδίου

Εξ ορισμού, η κλίση ενός βαθμωτού πεδίου F είναι ένα διάνυσμα που αντιπροσωπεύει και το μέγεθος και την κατεύθυνση του μέγιστου ποσοστού αύξησης του F στο χώρο.

$$\text{Σε καρτεσιανές συντεταγμένες: } \text{grad}F = \tilde{\mathbf{N}}^*F = \frac{\partial F}{\partial x}a_x + \frac{\partial F}{\partial y}a_y + \frac{\partial F}{\partial z}a_z$$



Παραπάνω φαίνεται η γραφική απεικόνιση πραγματικής συνάρτησης f και της κλίσης της $\tilde{\mathbf{N}}^*F$ η οποία είναι διανυσματική. Η συνάρτηση αναπαρίσταται χρωματικά, όσο πιο μαύρο είναι ένα σημείο, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της συνάρτησης. Παρατηρήστε ότι η κλίση δείχνει προς την κατεύθυνση αύξησης των τιμών.

$$\text{Σε κυλινδρικές συντεταγμένες: } \tilde{\mathbf{N}}^*F = \frac{\partial F}{\partial r}a_r + \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta}a_\theta + \frac{\partial F}{\partial z}a_z$$

$$\text{Σε σφαιρικές συντεταγμένες: } \tilde{\mathbf{N}}^*F = \frac{\partial F}{\partial r}a_r + \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \varphi}a_\varphi + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial F}{\partial \theta}a_\theta$$

1.7.2 Απόκλιση Διανύσματος

Καθορίζουμε την απόκλιση της \mathbf{F} ($\text{div } \mathbf{F}$) ως την καθαρή εκροή προς τα έξω για κάθε μονάδα όγκου όταν ο όγκος τείνει στο 0.

Δηλαδή έχουμε:

$$\text{div } \mathbf{F} = \tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{F} = \lim_{DV \rightarrow 0} \frac{\oint_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S}}{DV} \quad \text{όπου } \Delta V \text{ είναι ο εσωκλειόμενος όγκος από την}$$

κλειστή επιφάνεια S .

Η απόκλιση της \mathbf{F} σε ένα σημείο τυχαίο σημείο με (x_0, y_0, z_0) σε καρτεσιανές συντεταγμένες: $\tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$

$$\text{Για κυλινδρικές συντεταγμένες: } \tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{r} \frac{\partial (r F_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial F_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

Για σφαιρικές συντεταγμένες:

$$\tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 F_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial (F_\varphi \sin \varphi)}{\partial \varphi} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial F_\theta}{\partial \theta}$$

Θεώρημα απόκλισης: $\oint_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{F} \, dV$

1.7.3 Στροβιλισμός

Στον διανυσματικό λογισμό, ο στροβιλισμός είναι ένας διανυσματικός τελεστής ο οποίος περιγράφει την διαφορική περιστροφή ενός τρισδιάστατου διανυσματικού πεδίου. Σε κάθε σημείο του πεδίου, ο στροβιλισμός αυτού του πεδίου αναπαριστάται από ένα διάνυσμα. Οι ιδιότητες αυτού του διανύσματος (μέτρο και κατεύθυνση) χαρακτηρίζουν την περιστροφή σε αυτό το σημείο. Καθορίζουμε την περιστροφή (Curl) της F ως αξονικό διάνυσμα του οποίου το μέγεθος είναι η μέγιστη κυκλοφορία της F ανά μονάδα εμβαδού καθώς το εμβαδόν τείνει στο μηδέν και η κατεύθυνση του είναι η κάθετη κατεύθυνση του εμβαδού όταν το εμβαδόν είναι προσανατολισμένο έτσι ώστε να γίνει η κυκλοφορία μέγιστη.

$$\text{Έτσι έχουμε: } \text{curl} F = \tilde{N}_x F = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\oint_{\Delta S} F \cdot d\mathbf{l}}{\Delta S} \hat{\mathbf{n}} \quad \text{όπου } \Delta S \text{ είναι το εμβαδόν που}$$

καθορίζεται από την καμπύλη L και $\hat{\mathbf{n}}$ το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια ΔS .

$$\text{Σε καρτεσιανές συντεταγμένες έχουμε: } \tilde{N}_x F = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \\ \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$$\text{Σε κυλινδρικές συντεταγμένες έχουμε: } \tilde{N}_x F = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} \frac{\partial F_z}{\partial \phi} - \frac{\partial F_\phi}{\partial z} \\ \frac{\partial F_r}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial r} \\ \frac{\partial F_\phi}{\partial r} - r \frac{\partial F_r}{\partial \phi} \end{pmatrix}$$

$$\text{Σε κυλινδρικές συντεταγμένες έχουμε: } \tilde{N}_x F = \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \begin{pmatrix} \frac{\partial F_z}{\partial \theta} - \frac{\partial F_\theta}{\partial z} \\ \frac{\partial F_r}{\partial \theta} - r \frac{\partial F_\theta}{\partial r} \\ \frac{\partial F_\phi}{\partial r} - r \frac{\partial F_r}{\partial \phi} \end{pmatrix}$$

2 Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στη Θεωρία του Ηλεκτρομαγνητισμού

2.1 Γενικά στοιχεία Ηλεκτρομαγνητικής Αλληλεπίδρασης

Ο ηλεκτρομαγνητισμός ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση είναι μία από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις της φυσικής που περιγράφονται από το καθιερωμένο πρότυπο, και μελετά τα φαινόμενα που απορρέουν από το ηλεκτρικό φορτίο των σωματιδίων και από την αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών με τα μαγνητικά πεδία. Η θεμελιώδης αυτή δύναμη επιτρέπει την κατανόηση πολλών φυσικών φαινομένων όπως ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός, και το φως, και αποτελεί το πρώτο δείγμα ενοποίησης δύο διαφορετικών δυνάμεων -του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού- στη φυσική.

2.2 Πηγές Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων

Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαρακτηρίζουν τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις με τις οποίες αλληλεπιδρούν τα ηλεκτρικά φορτισμένα, στοιχειώδη σωματίδια της ύλης, τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια. Όπως είναι η εμφάνιση των κεραυνών κατά τη διάρκεια των καταιγίδων και η απόκλιση του δείκτη της μαγνητικής πυξίδας. Τα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται από τις διατάξεις ηλεκτρικής ενέργειας σχετίζονται με το μέγεθος της τάσης των ηλεκτροφόρων αγωγών, καθώς και τη γεωμετρία της διάταξης. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η τάση, τόσο μεγαλύτερα τα ηλεκτρικά πεδία. Τα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται από οποιαδήποτε πηγή εξασθενούν, καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή. Τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τις διατάξεις ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται από το μέγεθος της μεταφερόμενης ενέργειας στους αγωγούς, καθώς και τη γεωμετρία της διάταξης. Για δεδομένη τάση, το μέγεθος του ρεύματος στους αγωγούς καθορίζει την ποσότητα της ενέργειας που μεταφέρει η διάταξη. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα, τόσο μεγαλύτερα και τα μαγνητικά πεδία.. Τα μαγνητικά πεδία, όπως και τα ηλεκτρικά, εξασθενούν με την αύξηση της απόστασης από την πηγή τους.

2.3 Βασικές Έννοιες και Ορισμοί Ηλεκτρισμού και Μαγνητισμού

Ο ηλεκτρισμός είναι ένας «γενικός» όρος. Περιλαμβάνει τα «ηλεκτρικά φαινόμενα», δηλαδή ένα σύνολο από φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με την παρουσία και τη ροή ηλεκτρικού φορτίου. Ο όρος ηλεκτρισμός περικλείει πολλά επί μέρους θέματα, τα οποία εξηγούνται καλύτερα με πιο ακριβείς όρους. Τέτοιοι όροι συνοπτικά είναι οι παρακάτω:

- Ηλεκτρικό φορτίο
- Ηλεκτρικό ρεύμα
- Ηλεκτρικό πεδίο
- Ηλεκτρικό Δυναμικό

2.3.1 Ηλεκτρικό Φορτίο

Με τον όρο ηλεκτρικό φορτίο εννοούμε μια ιδιότητα ορισμένων σωματιδίων(πρωτόνιο, το νετρόνιο και το ηλεκτρόνιο), η οποία καθορίζει τις μεταξύ τους ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις. Ένα υλικό σώμα που έχει ηλεκτρικό φορτίο, επηρεάζεται και δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το φορτίο διατηρείται, δηλαδή το συνολικό φορτίο Q που υπάρχει μέσα σε μια κλειστή περιοχή του χώρου παραμένει πάντοτε σταθερό. Επομένως δεν είναι δυνατή η εξαφάνιση φορτίου ούτε και η παραγωγή φορτίου από το πουθενά. Το φορτίο είναι κβαντισμένο μέγεθος, δηλαδή οποιαδήποτε τιμή φορτίου στη φύση είναι ακέραιο πολλαπλάσιο μιας στοιχειώδους ποσότητας η οποία είναι ίση με την απόλυτο τιμή του φορτίου που φέρει ένα ηλεκτρόνιο δηλαδή:

$$|qe| = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$$

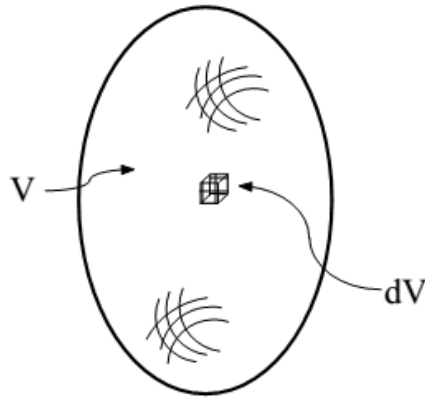
2.3.1.1 Κατανομές Ηλεκτρικού φορτίου

Μακροσκοπικά το ηλεκτρικό φορτίο κατανέμεται σε όγκους, επιφάνειες και γραμμές. Για την μαθηματική απλοποίηση των εκάστοτε φαινομένων εισάγεται η έννοια των σημειακών φορτίων δίχως να υφίσταται η ύπαρξη τους σε μακροσκοπικό επίπεδο.

Κατανομή φορτίου σε όγκο (χωρική κατανομή)

Έστω dV ο στοιχειώδης όγκος, μέσα στον οποίο περιέχεται φορτίο dq , τότε

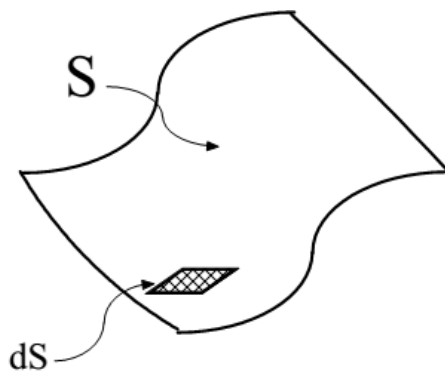
ορίζεται η χωρική πυκνότητα φορτίου ρ ως: $\rho = \frac{dq}{dV}$ $\frac{C \cdot b}{\xi m^3} \frac{\ddot{o}}{\varnothing}$



Κατανομή φορτίου σε επιφάνεια (επιφανειακή κατανομή)

Έστω dS στοιχειώδης επιφάνεια, μέσα στην οποία περιέχεται φορτίο dq , τότε

ορίζεται η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου σ ως: $\sigma = \frac{dq}{dS}$ $\frac{C \cdot b}{\xi m^2} \frac{\ddot{o}}{\varnothing}$



Κατανομή φορτίου σε γραμμή (γραμμική κατανομή)

Έστω dl στοιχειώδης μήκος, μέσα στο οποίο περιέχεται φορτίο dq , τότε

ορίζεται η γραμμική πυκνότητα φορτίου λ ως: $\lambda = \frac{dq}{dl}$ $\frac{C \cdot b}{\xi m} \frac{\ddot{o}}{\varnothing}$



Τονίζεται εδώ ότι η επιφανειακή και η γραμμική πυκνότητα φορτίου είναι μαθηματικές εξιδανικεύσεις και στην πράξη υπάρχουν μόνο χωρικές κατανομές φορτίου

2.3.2 Ηλεκτρικό Ρεύμα

Ως **Ηλεκτρικό ρεύμα** ορίζεται η προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων ή φορέων ηλεκτρικού φορτίου, κατά μήκος ενός ηλεκτροφόρου αγωγού, Σαν συμβατική φορά ρεύματος λαμβάνεται η φορά κίνησης των θετικών φορτίων. Αίτιο για την προσανατολισμένη κίνηση των φορέων, δηλαδή κάποιο ηλεκτρικό πεδίο. Το μέγεθος που μετρά το ηλεκτρικό ρεύμα είναι η **ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος**, που ορίζεται ως: $I = \frac{dQ}{dt} = \frac{eC}{s} = A \frac{\ddot{\theta}}{\theta}$ Μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα μονάδων(S.I) είναι το A. Δηλαδή ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ο ρυθμός διέλευσης του ηλεκτρικού φορτίου από τη διατομή ενός αγωγού.

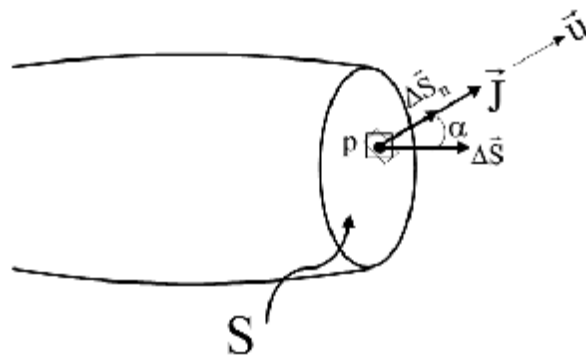


Αναπαράσταση διατομής αγωγού και των φορτίων που ρέουν. Η ένταση εκφράζει το ρυθμό διέλευσής τους.

2.3.2.1 Πυκνότητα ρεύματος

Στην θεωρία των Η/Μ πεδίων, εκτός από την ένταση ρεύματος χρησιμοποιείται και το διανυσματικό μέγεθος πυκνότητα ρεύματος. Διακρίνουμε δύο είδη πυκνοτήτων ρεύματος, ανάλογα με τον τρόπο ροής.

- ο Χωρική πυκνότητα ρεύματος



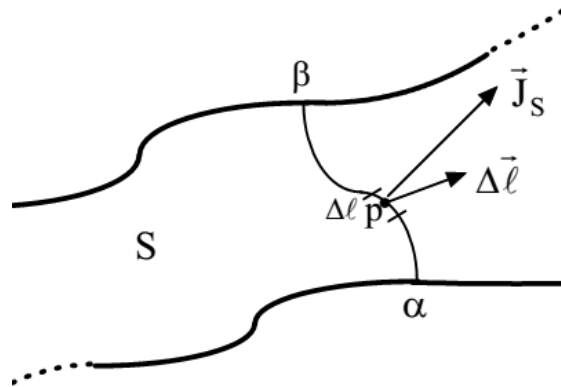
Αν το ρεύμα για όλα τα σημεία μιας εγκάρσιας διατομής εμβαδού S είναι το ίδιο

η πυκνότητα ορίζεται από τη σχέση:

$$J = \frac{I}{DS} \quad \frac{\text{A}}{\text{C} \cdot \text{m}^2}$$

Η φορά του διανύσματος J , σε κάθε σημείο της επιφάνειας S , είναι η ίδια με αυτήν του διανύσματος u της ταχύτητας των φορέων στο ίδιο σημείο. Γενικά για το ολικό ρεύμα I που διέρχεται από την S μπορούμε να γράψουμε: $I = \oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$

- ο Επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος



Θεωρητικά είναι δυνατή η περίπτωση ροής ρεύματος σε επιφάνεια S. Στην περίπτωση αυτή

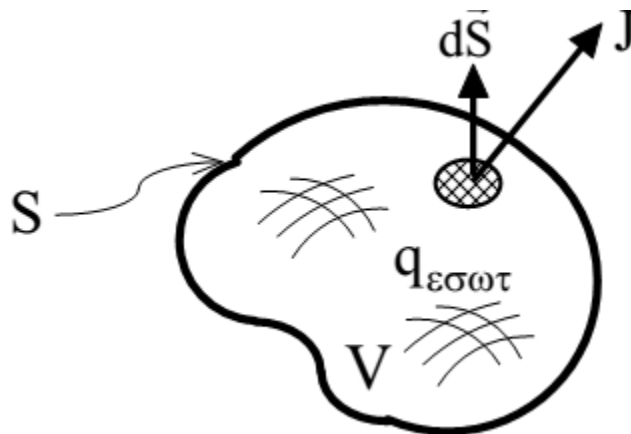
ορίζεται η επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος ως: $J = \frac{I}{\Delta l} \frac{\partial A}{\partial m} \frac{\partial}{\partial t}$

Ομοίως με πριν ισχύουν τα ίδια για τη φορά του διανύσματος J και το ολικό ρεύμα I δίνεται αντίστοιχα από τη σχέση $I = \oint_{\alpha}^{\beta} J * dl$ αλλά όμως το ευθύγραμμο τμήμα με μήκος Δl είναι **κάθετο** στο διάνυσμα J

2.3.3 Νόμος Διατήρησης Φορτίου

Αποδεικνύεται ότι η μαθηματική σχέση για τη διατήρηση του φορτίου είναι:

$$\oint_S \vec{J} * d\vec{S} = - \frac{d}{dt} \oint_V \rho * dV$$



2.3.4 Ηλεκτρικό πεδίο και Δύναμη Coulomb

Πεδίο ονομάζεται ένας χώρος που ασκούνται δυνάμεις στη φυσική, ο χώρος που περιβάλλει ένα ηλεκτρικό φορτίο έχει μια ιδιότητα που καλείται ηλεκτρικό πεδίο. Ένταση E σε ένα σημείο ηλεκτρικού πεδίου, ονομάζουμε το φυσικό διανυσματικό μέγεθος που έχει μέτρο ίσο με το πηλίκο του μέτρου της δύναμης F που ασκείται σε φορτίο q που βρίσκεται σε αυτό το σημείο προς το φορτίο αυτό.

$$\text{Έτσι ισχύει: } E = \frac{\mathbf{F}}{|q|}$$

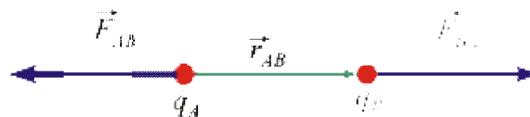
Μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων που βρίσκονται ακίνητα (ή σχεδόν ακίνητα), αναπτύσσονται ηλεκτρικές δυνάμεις που προκαλούνται από αυτά και ονομάζονται ηλεκτροστατικές. Η ηλεκτροστατική δύναμη μεταξύ φορτίων με το ίδιο πρόσημο είναι απωστική, ενώ μεταξύ φορτίων με αντίθετο πρόσημο είναι ελκτική. Οπότε προέκυψε ότι το μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης, την οποία ένα σωματίδιο q_1 ασκεί σε ένα άλλο q_2 , είναι ευθέως ανάλογο προς το γινόμενο των φορτίων τους, και αντιστρόφως ανάλογο προς το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης r .

Η μαθηματική διατύπωση του παραπάνω νόμου του είναι η εξής:

$$F_c = k \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \text{ όπου } k \text{ συμβολίζεται η σταθερά αναλογίας η οποία ονομάζεται και}$$

$$\text{ηλεκτροστατική σταθερά και ισούται με } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \gg 8.9875 \cdot 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Cb}^{-2} \text{ Και}$$

πήρε το όνομα του από τον Γάλλο φυσικό Coulomb. Κάθε φορτισμένο σώμα είναι η αιτία που δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο στο χώρο γύρω από αυτό.



Με βάση τα προηγούμενα αποδεικνύεται ότι:

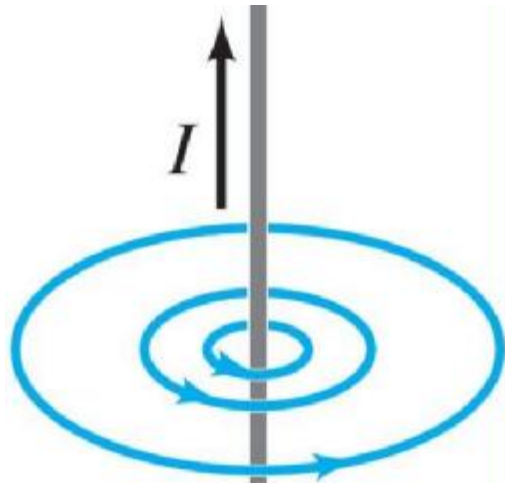
$$\frac{\mathbf{r}}{E} = \frac{\mathbf{F}}{|q|} \Rightarrow E = \frac{k \frac{|Q| \cdot |q|}{r^2}}{|q|} \Rightarrow E = k \frac{|Q|}{r^2}$$

2.3.5 Μαγνητικό Πεδίο

Μαγνητικό πεδίο ονομάζεται γενικά ο χώρος μέσα στον οποίο ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις. Το μαγνητικό πεδίο περιβάλλει τον μαγνήτη(υλικό ή σώμα που δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο) και χαρακτηρίζεται ασθενές ή ισχυρό, και ομοιόμορφο ή ανομοιόμορφο, αν οι μαγνητικές γραμμές του είναι παράλληλες ή όχι. Οφείλεται σε κινούμενα ηλεκτρικά φορτία και σχηματίζεται γύρω από ρευματοφόρους αγωγούς.

Το μαγνητικό πεδίο ενός ευθύγραμμου καλωδίου είναι αντιστρόφως ανάλογο

της απόστασης $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ Η σταθερά μ_0 ονομάζεται διαπερατότητα του κενού και έχει τιμή $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} T \cdot m / A$



Όσο πιο πυκνές είναι οι μαγνητικές γραμμές ενός πεδίου, τόσο πιο ισχυρό είναι το πεδίο. Το μέγεθος που δείχνει, πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο, ονομάζεται μαγνητική επαγωγή και συμβολίζεται με B και μετράται σε T (Tesla). Το χαρακτηριστικό μέγεθος του μαγνητικού πεδίου είναι η μαγνητική ροή. Όπου μαγνητική ροή χαρακτηρίζεται ο αριθμός των μαγνητικών δυναμικών γραμμών που διέρχονται από μια επιφάνεια τοποθετημένη κάθετα προς αυτές. Η δυναμική αυτή μαγνητική ροή είναι ίση με το γινόμενο της πυκνότητας μαγνητικής ροής επί την επιφάνεια. Η μαγνητική ροή είναι ένα ποσοτικό μέσο του μαγνητισμού και εκφράζεται από τη σχέση $F_m = \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$ όπου F_m είναι η μαγνητική ροή \mathbf{B} είναι η πυκνότητα της μαγνητικής ροής και \mathbf{S} είναι η επιφάνεια. Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι 1 Wb.

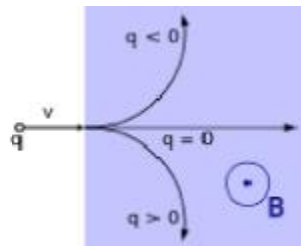
2.3.6 Δύναμη Lorentz

Η δύναμη Lorentz ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο q όταν αυτό κινείται με ταχύτητα u μέσω ενός ηλεκτρικού E και μαγνητικού πεδίου B .

Θα ισχύει ότι $F = qE + qu \times B$. όπου:

F είναι η δύναμη (σε Νιούτον), E είναι το ηλεκτρικό πεδίο (σε Βολτς προς μέτρα), B είναι το μαγνητικό πεδίο (σε Βέμπερς προς μέτρα στο τετράγωνο, ή ισοδύναμα, Τέσλα), q είναι το ηλεκτρικό φορτίο του σωματιδίου (σε Κουλόμπ), u είναι η στιγμιαία ταχύτητα του σωματιδίου (σε μέτρα προς δευτερόλεπτα).

Κατά συνέπεια, ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο θα επιταχυνθεί στην ίδια διεύθυνση με το πεδίο E , αλλά η τροχιά του θα καμπυλωθεί κάθετα και στο πεδίο B και στο διάνυσμα της στιγμιαίας ταχύτητας v , σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Το παραπάνω συμπέρασμα φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα



Μερικές επιγραμματικά εφαρμογές της Δύναμης Lorentz είναι:

- Όργανο κινητού πηνίου
- Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικής γεννήτριας
- Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικού κινητήρα
- Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικής πέδης
- Φαινόμενο Hall

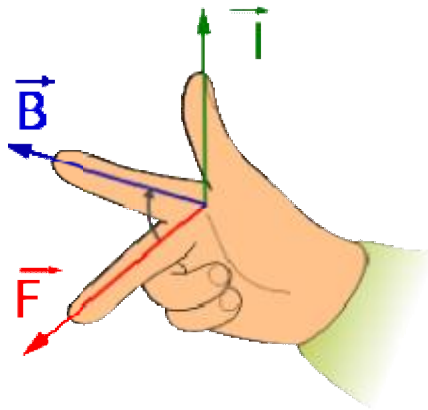
2.3.7 Δύναμη Laplace

Όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τότε ασκείται σε αυτόν η λεγόμενη **δύναμη Laplace**

$$\vec{F}_L = I \vec{l} \times \vec{B} \text{ ή πιο απλά } F_L = I * l * B * \sin \varphi$$

Με φ η γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών. l το μήκος του ρευματοφόρου αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο και I η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

Η δύναμη Laplace αποτελεί την συνισταμένη των δυνάμεων Lorentz πάνω στα φορτία του αγωγού. Η φορά της δύναμης βρίσκεται με τον μνημονικό κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού.



Περιπτώσεις της δύναμης Laplace:

- ✓ Στην περίπτωση που ο ρευματοφόρος αγωγός είναι παράλληλος στο μαγνητικό πεδίο, δηλαδή $\varphi=0^\circ$ ή $\varphi=180^\circ$, δε δέχεται δύναμη από αυτό διότι $F_L = I * l * B * \sin 0^\circ = 0$ ή $F_L = I * l * B * \sin 180^\circ = 0$

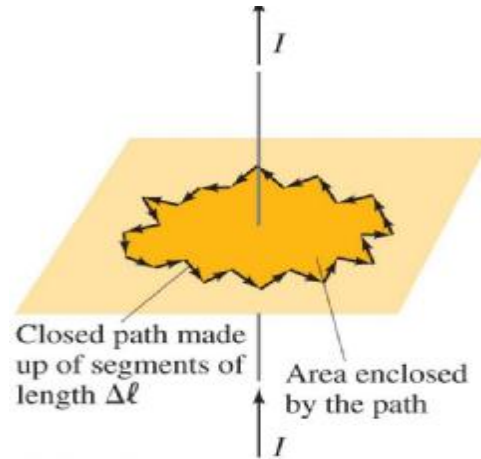
- ✓ Στην περίπτωση που ο ρευματοφόρος αγωγός είναι παράλληλος στο μαγνητικό πεδίο, δηλαδή $\varphi=90^\circ$, η δύναμη που δέχεται από το πεδίο παίρνει τη μέγιστη τιμή της επειδή

$$F_L = I * l * B * \sin 90^\circ = I * l * B$$

2.3.8 Νόμος Ampere

Ο νόμος του Ampère συνδέει το ρεύμα ενός βρόχου με το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο:

$$\oint \vec{B} * d\vec{l} = \mu_0 * I$$

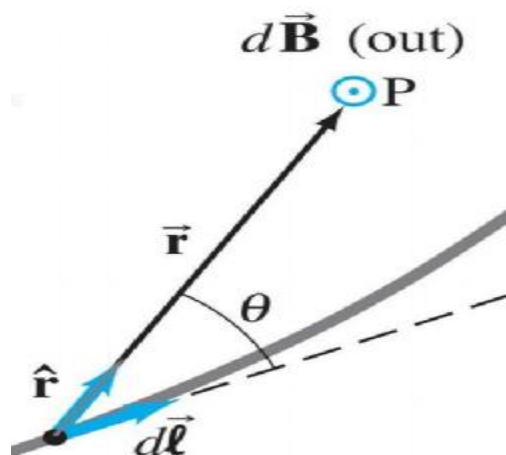


Χρησιμοποιούμε το νόμο του Ampère για να βρούμε το μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου καλωδίου.

2.3.9 Νόμος των Biot-Savart

Ο νόμος των Biot-Savart συνδέει τη μεταβολή στο ρεύμα με τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου:

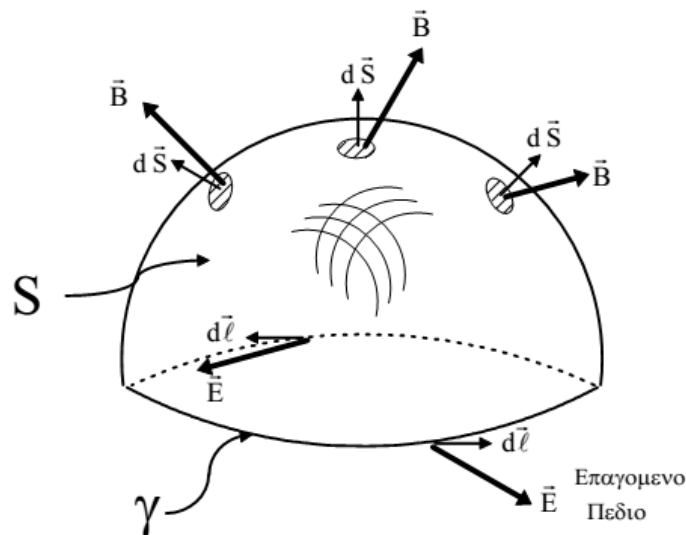
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$



Ολοκληρώνοντας τη σχέση αυτή για συγκεκριμένες γεωμετρίες βρίσκουμε το μαγνητικό πεδίο.

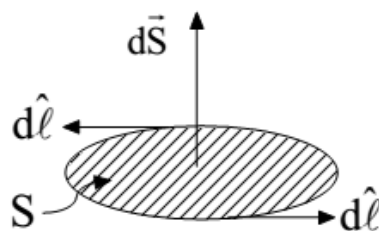
2.3.10 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή ονομάζεται η εμφάνιση ηλεκτρισμού εξαιτίας μαγνητικού πεδίου. Συγκεκριμένα είναι το φαινόμενο της ανάπτυξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού, η οποία λαμβάνει χώρα όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που ο συγκεκριμένος αγωγός ορίζει. Έτσι, η διαταραχή του μαγνητικού πεδίου προκαλεί διαταραχή του ηλεκτρικού πεδίου. Έστω μια ανοικτή επιφάνεια S η οποία καταλήγει στην κλειστή καμπύλη γ . Θεωρούμε ότι στον χώρο που βρίσκεται η S επικρατεί ένα μαγνητικό πεδίο με μαγνητική επαγωγή B . Το πεδίο αυτό δημιουργεί δια της επιφάνειας S μια μαγνητική ροή Φ .



Το αναπτυσσόμενο ηλεκτρικό πεδίο συνδέεται με το B και με το Φ με την εξής μαθηματική σχέση: $\oint_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = - \frac{d\Phi}{dt}$ (Νόμος Faraday)

Για τον σωστό υπολογισμό των παραπάνω ολοκληρωμάτων πρέπει να καθοριστούν των διανύσματα $d\vec{l}$ και $d\vec{S}$. Τα δυο αυτά διανύσματα πρέπει να συνδέονται με τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλίου.



3 Κεφάλαιο 3: Εξισώσεις Maxwell

3.1 Εισαγωγή

Οι εξισώσεις Maxwell αποτελούν τη βάση όλης της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας και παρουσιάστηκαν από τον Βρετανό Φυσικό και Μαθηματικό, καθηγητή του Πανεπιστημίου του Cambridge James Clerk Maxwell (1831 – 1879), στο βιβλίο του “A Treatise on Electricity and Magnetism” που εκδόθηκε στην Οξφόρδη το 1873. Ο Maxwell επεξεργάστηκε τους νόμους του Ηλεκτρισμού και Μαγνητισμού που είχαν διατυπωθεί στα προηγούμενα χρόνια από τον Oersted, Ampere, Faraday και πολλούς άλλους ερευνητές και κατάφερε να παρουσιάσει ένα σύνολο τεσσάρων εξισώσεων που περιγράφουν όλα τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα και έτσι θεωρείται ο θεμελιωτής της Επιστήμης του Ηλεκτρομαγνητισμού. Ο Maxwell διατύπωσε για πρώτη φορά την υπόθεση ότι ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο παράγει ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η ιστορική παρατήρηση του Maxwell ήταν πως αν επιχειρηθεί ο συνδυασμός, ανά δυο, των κλασικών νόμων του Ηλεκτρομαγνητισμού, οι νόμοι αυτοί αποδεικνύονται ασυμβίβαστοι μεταξύ τους. Τη μόνη απόκλιση από τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσίασε ο νόμος του Ampere. Και αυτό γιατί παρότι ο νόμος του Ampere προϋποθέτει την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου μόνο σε περιοχές του χώρου, όπου οι κλειστές καμπύλες (αμπεριανοί βρόχοι) περικλείουν ρεύμα αγωγιμότητας I , ο Maxwell διαπίστωσε την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου στο χώρο μεταξύ των οπλισμών ενός πυκνωτή, όπου δεν υπάρχει ρεύμα αγωγιμότητας. Έτσι απέδειξε ότι η πηγή δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου στα σημεία αυτά είναι η χρονική μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και αυτό το έκφρασε μέσω της υποθετικής ποσότητας του **ρεύματος μετατόπισης I_d**

$$I_d = e_0 \frac{dF_E}{dt} = e_0 \oint_S \frac{\mathbf{u}}{\epsilon_0} \cdot d\mathbf{S} \quad \text{και προκύπτει από την διπλανή σχέση ότι η}$$

πυκνότητα του ρεύματος μετατόπισης J_D ορίζεται ως $J_D = e_0 \frac{\mathbf{u}}{\epsilon_0} \cdot \frac{\mathbf{E}}{t}$

Όνομα	Ολοκληρωτικές Εξισώσεις	Διαφορικές Εξισώσεις
Νόμος Gauss	$\oint_{\mathcal{V}} \vec{E}^* \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_{\mathcal{V}} \rho \, dV$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
Νόμος Gauss για μαγνητισμό	$\oint_{\mathcal{V}} \vec{B}^* \cdot d\vec{S} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Εξίσωση Maxwell-Faraday (Νόμος επαγωγής Faraday)	$\oint_{\mathcal{S}} \vec{E}^* \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \iint_{\mathcal{S}} \vec{B}^* \cdot d\vec{S}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Κλιμακωτός Νόμος Ampere (με την προσθήκη Maxwell)	$\oint_{\mathcal{S}} \vec{B}^* \cdot d\vec{l} = \mu_0 \iint_{\mathcal{S}} \vec{J}^* \cdot d\vec{S} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_{\mathcal{S}} \vec{E}^* \cdot d\vec{S}$	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$

Όπου :

- \vec{E} είναι το ηλεκτρικό πεδίο ,
- \vec{B} είναι το μαγνητικό πεδίο ,
- \vec{J} είναι η πυκνότητα ρεύματος ,
- ρ είναι η συνολική πυκνότητα φορτίου ,
- ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά (permittivity) του κενού ,
- μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα (permeability) του κενού.

και στις ολοκληρωτικές εξισώσεις,

- Ω δηλώνει έναν όγκο , και $\partial \Omega$ είναι η κλειστή επιφάνεια που τον περικλείει, με την κανονική κατεύθυνση από μέσα προς τα έξω
- dV δηλώνει ένα διαφορικό στοιχείο όγκου του Ω ,
- Σ δηλώνει μία μη-κλειστή επιφάνεια (με την υπόθεση ότι είναι ανεξάρτητη του χρόνου),
- $d\vec{S}$ δηλώνει ένα διαφορικό διανυσματικής περιοχής στοιχείο του $\partial \Omega$ ή Σ , παράλληλο προς την κανονική επιφάνεια, και
- $\partial \Sigma$ είναι ο κλειστός βρόχος που κυκλοφορούν γύρω από την Σ , αριστερόστροφα (σύμφωνα με το $d\vec{S}$).

Οι παγκόσμιες σταθερές που εμφανίζονται στις εξισώσεις είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού ϵ_0 και η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, ένα γενικό χαρακτηριστικό των θεμελιωδών επίπεδων εξισώσεων. Στις διαφορικές εξισώσεις, μια τοπική περιγραφή των πεδίων είναι η εξής: το σύμβολο ανάδελα ∇ δηλώνει το τρισδιάστατο διάνυσμα κλίσης, και από αυτό $\nabla \cdot$ υποδηλώνεται ο τελεστής απόκλισης και από το $\nabla \times$ δηλώνεται το διάνυσμα στροφή. Οι πηγές μπορούν να θεωρηθούν ως τοπικές πυκνότητες φορτίου και ρεύματος.

Στις παρακάτω εξισώσεις ολοκληρωμάτων που περιγράφουν πεδία σε μια περιοχή του χώρου: Ω είναι οποιοδήποτε σταθερός όγκος με επιφάνεια-σύνορο $\partial\Omega$, και το Σ είναι οποιαδήποτε σταθερή ανοικτή επιφάνεια με σύνορο $\partial\Sigma$. Εδώ "σταθερή" σημαίνει ο όγκος ή η επιφάνεια δεν αλλάζουν στο χρόνο. Οι πηγές στις οποίες αντιστοιχούν οι συνολικές ποσότητες φορτίου και το ρεύματος στο εσωτερικό αυτών των όγκων και επιφανειών, βρέθηκαν από την ολοκλήρωση. Το τριπλό ολοκλήρωμα - όγκος της συνολικής πυκνότητας φορτίου ρ ορισμένο σε οποιοδήποτε όγκο Ω είναι το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που περιέχεται στο Ω : $Q = \iiint_{\Omega} \rho dV$

Το καθαρό ηλεκτρικό ρεύμα είναι το διπλό ολοκλήρωμα του ηλεκτρικού ρεύματος πυκνότητας \mathbf{J} , δια μέσου οποιασδήποτε ανοικτής σταθερής επιφάνειας Σ :

$$I = \iint_{\Sigma} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \text{ όπου } d\mathbf{S} \text{ δηλώνει το διαφορικό διάνυσμα-στοιχείο της επιφάνειας } S$$

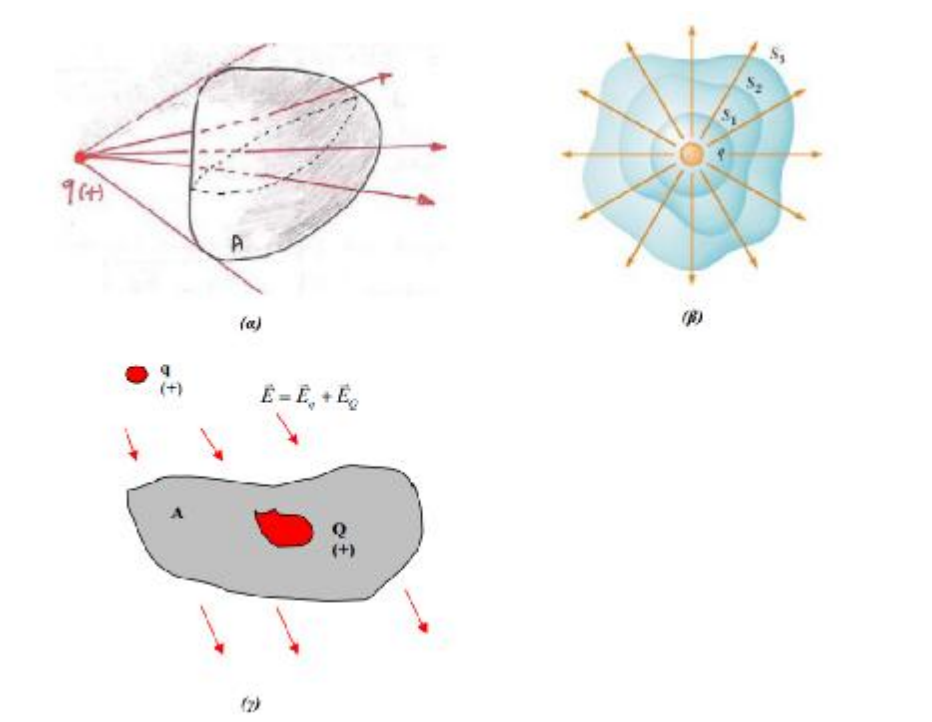
κάθετο (normal) προς την επιφάνεια Σ .

3.2 1^η Εξίσωση-Νόμος του Gauss

Ο νόμος του Gauss περιγράφει τη σχέση ανάμεσα σε ένα στατικό ηλεκτρικό πεδίο και τα ηλεκτρικά φορτία που το προκαλούν: Τα στατικά ηλεκτρικά πεδία κατευθύνονται από τα θετικά φορτία προς τα αρνητικά φορτία. Στο πεδίο της γραμμικής περιγραφής, οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου ξεκινούν μόνο από θετικά ηλεκτρικά φορτία και τελειώνουν μόνο σε αρνητικά φορτία. Επομένως «μετρώντας» τον αριθμό των δυναμικών γραμμών που διέρχονται μέσω μιας κλειστής επιφάνειας παίρνουμε το συνολικό φορτίο που περικλείεται από την επιφάνεια αυτή δια της διαπερατότητας του ελεύθερου χώρου (της διηλεκτρικής σταθεράς του κενού). Πιο τεχνικά, ο νόμος του Gauss εκφράζει τη σχέση που έχει η ηλεκτρική ροή μέσα από κάθε υποθετική κλειστή "Γκαουσιανή επιφάνεια" με το περικλειόμενο στην επιφάνεια ηλεκτρικό φορτίο.

3.2.1 Σημασία Νόμου Gauss

Η ολοκληρωτική μορφή του νόμου δηλώνει ρητά ότι η καθαρή ηλεκτρική ροή διαμέσου μίας κλειστής επιφάνειας οφείλεται αποκλειστικά στα φορτία που αυτή περικλείει. Κανένα εξωτερικό φορτίο δεν συνεισφέρει σε καθαρή ροή διαμέσου αυτής. Παράλληλα η διαφορική μορφή του νόμου αναδεικνύει πληρέστερα και το φυσικό του περιεχόμενο συνδέοντας άμεσα το ηλεκτρικό πεδίο με την πηγή του Η απόκλιση του πεδίου είναι ανάλογη της πυκνότητας φορτίου που το παράγει.



3.2.2 Εφαρμογές Νόμου Gauss

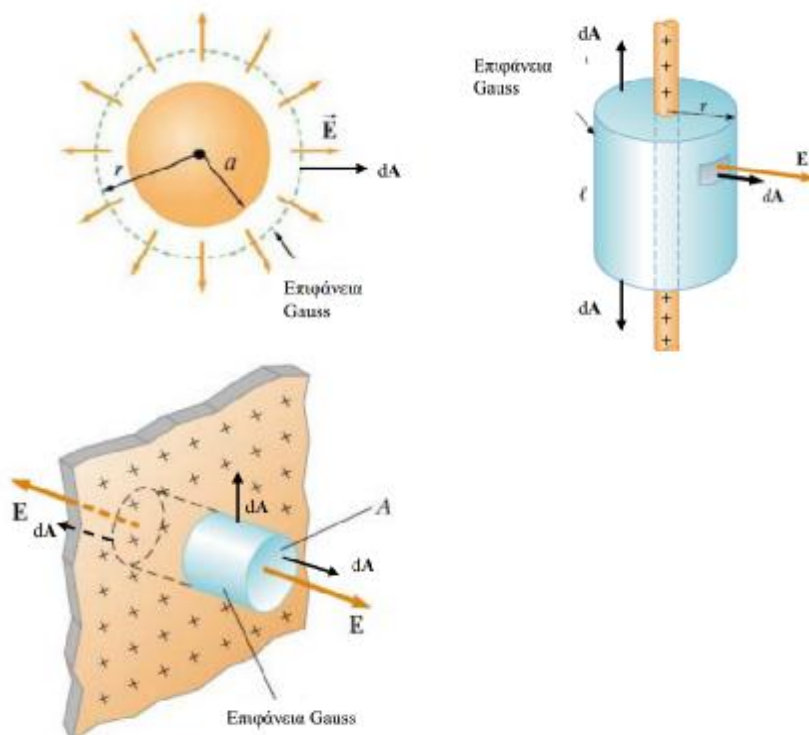
Ο νόμος του Gauss με την μαθηματική απλότητα που τον χαρακτηρίζει αποτελεί ένα πανίσχυρο εργαλείο για τον εύκολο υπολογισμό ηλεκτρικών πεδίων που προέρχονται από πηγές που παρουσιάζουν σφαιρική, κυλινδρική ή συμμετρία επιπέδου. Στην περίπτωση αυτή η γενική μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η εξής:

∅ Θεωρούμε μια φανταστική κλειστή επιφάνεια που περιβάλλει την πηγή του πεδίου και έχει την ίδια συμμετρία με αυτήν. Η νοητή αυτή επιφάνεια ονομάζεται επιφάνεια Gauss και είναι :

- § Σφαίρα στην περίπτωση σφαιρικής συμμετρίας της πηγής
- § Κύλινδρος στην περίπτωση κυλινδρικής συμμετρίας της πηγής
- § Παραλληλεπίπεδο ή κύλινδρος που τέμνει το επίπεδο στην περίπτωση συμμετρίας επιπέδου.

∅ Εφαρμόζουμε τον νόμο του Gauss στην υποθετική κλειστή επιφάνεια που περιβάλλει την πηγή. Λόγω της συμμετρίας της πηγής η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε όλα τα σημεία της επιφάνειας Gauss θα έχει το ίδιο μέτρο και κατά συνέπεια βγαίνει έξω από το αντίστοιχο επιφανειακό ολοκλήρωμα σαν σταθερά που

αναζητείται. Δηλαδή $\oint_{\text{κλειστή επιφάνεια Gauss}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0}$ ή $\pm E \oint_{\text{κλειστή επιφάνεια Gauss}} dA = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0}$

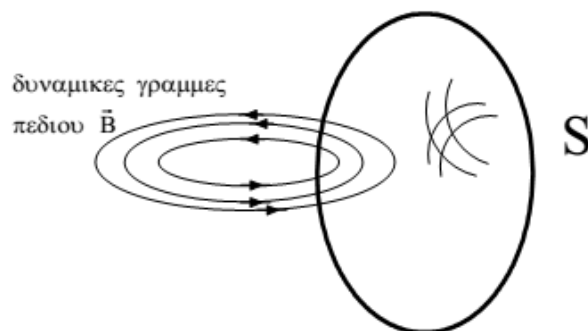


3.3 2^η Εξίσωση-Νόμος του Gauss για μαγνητισμό

Ο νόμος του Gauss για το μαγνητισμό δηλώνει ότι δεν υπάρχουν «μαγνητικά φορτία» (που ονομάζονται επίσης και μαγνητικά μονόπολα), ανάλογα με τα ηλεκτρικά φορτία. Αντ' αυτού, το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στα υλικά που παράγεται από μια διάταξη που ονομάζεται δίπολο. Τα μαγνητικά δίπολα εκπροσωπούνται καλύτερα ως βρόχοι ρεύματος, αλλά μοιάζουν με θετικά και αρνητικά «μαγνητικά φορτία», άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους, που δεν έχουν καθαρό «μαγνητικό φορτίο». Από άποψη των δυναμικών γραμμών, αυτή η εξίσωση δηλώνει ότι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου δεν αρχίζουν ούτε τελειώνουν, αλλά κάνουν βρόχους ή επεκτείνονται στο άπειρο και γυρνάνε πάλι πίσω. Με άλλα λόγια, κάθε γραμμή μαγνητικού πεδίου που εισέρχεται σε ένα δεδομένο όγκο πρέπει από κάπου να βγει από αυτόν τον όγκο. Ισοδύναμες τεχνικές καταστάσεις είναι το ότι το συνολικό άθροισμα της μαγνητικής ροής μέσω οποιασδήποτε Gaussian επιφάνειας είναι μηδέν, ή ότι το μαγνητικό πεδίο είναι ένα σωληνοειδές διανυσματικό πεδίο. Ο παραπάνω νόμος διατυπώνεται ως εξής:

Η συνολική μαγνητική ροή που διέρχεται από μία κλειστή επιφάνεια είναι πάντοτε ίση με το μηδέν (δηλ. όση ροή εισέρχεται ακριβώς ίση εξέρχεται)

Μαθηματικά διατυπώνεται ως εξής: $\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$ γύρω από μια επιφάνεια S.



3.4 3η Εξίσωση-Εξίσωση Maxwell-Faraday

Μια εκτενή αναφορά στην εξίσωση Maxwell-Faraday(Νόμος Faraday) έγινε στο κεφάλαιο 2 και συγκεκριμένα στο 2.3.10 με την επισήμανση της έννοιας της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

3.4.1 Ανάπτυξη Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης εξ' Επαγωγής

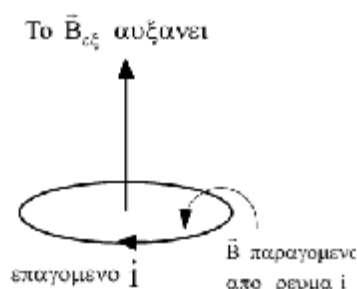
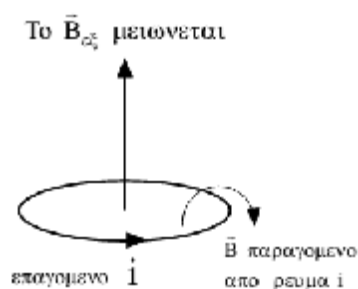
Όταν ο κλειστός βρόχος στον οποίο υπολογίζεται το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του επαγόμενου πεδίου E_r είναι αγωγίμος τότε προκαλείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο βρόχο αυτό. Η ροή ηλεκτρικού ρεύματος απαιτεί, όπως είναι γνωστό, την παρουσία ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Η.Ε.Δ) e . Η Η.Ε.Δ αυτή, που ονομάζεται και Η.Ε.Δ εξ επαγωγής, οφείλει την ύπαρξή της ακριβώς στο επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο E_r , και είναι ίση με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα:

$$e = \oint \vec{E} * d\vec{l}$$

Για να ευσταθεί ο ορισμός της Η.Ε.Δ εξ' επαγωγής θα πρέπει να ισχύει ότι ο ρυθμός μεταβολής (ή η συχνότητα) της μαγνητικής ροής να είναι αρκετά αργός, ώστε το μήκος κύματος $\lambda = c / f$ να είναι πολύ μεγαλύτερο από το συνολικό μήκος της κλειστής καμπύλης .Σε διαφορετική περίπτωση δεν ορίζεται Η.Ε.Δ. και πρέπει να χρησιμοποιηθεί η κυματική θεωρία.

3.4.2 Κανόνας Lenz

Το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται από μια Η.Ε.Δ. εξ' επαγωγής (επαγόμενο ρεύμα) προφανώς παράγει ένα μαγνητικό πεδίο άρα και μια μαγνητική ροή. Στη διατύπωση του νόμου του Faraday η μαγνητική ροή Φ είναι η ολική μαγνητική ροή, δηλαδή η ροή που προκαλεί ένα εξωτερικό πεδίο και η ροή που προκαλεί το επαγόμενο ρεύμα. Το αρνητικό πρόσημο στο νόμο Faraday, εκφράζει τον κανόνα του Lenz. Σύμφωνα με αυτόν το επαγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα , παράγει ένα μαγνητικό πεδίο που προσπαθεί να «αναιρέσει» κάθε μεταβολή στη ροή.

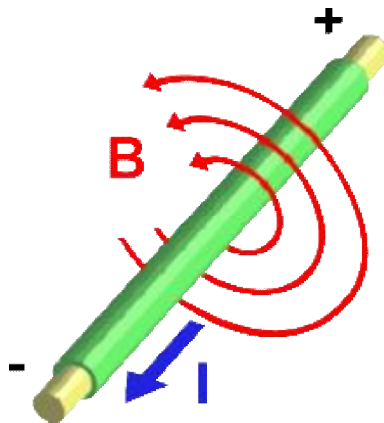


3.5 4η Εξίσωση-Κλιμακωτός Νόμος Ampere(με Maxwell)

3.5.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Ο νόμος του Ampere με την προσθήκη του Maxwell δηλώνει ότι τα μαγνητικά πεδία μπορούν να δημιουργηθούν με δύο τρόπους: με ηλεκτρικό ρεύμα (αυτός ήταν ο αρχικός «νόμος του Ampere») και με μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία (αυτήν ήταν η "προσθήκη του Maxwell"). Η προσθήκη του Maxwell στον νόμο του Ampere είναι ιδιαίτερα σημαντική: δείχνει ότι όχι μόνο ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί ένα ηλεκτρικό πεδίο, αλλά και ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί ένα μαγνητικό πεδίο. Ως εκ τούτου, αυτές οι εξισώσεις επιτρέπουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα να ταξιδέψουν στο κενό χώρο. Η ταχύτητα που υπολογίζεται για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, η οποία θα μπορούσε να προβλεφθεί από πειράματα σχετικά με τα φορτία και τα ρεύματα, ταιριάζει ακριβώς με την ταχύτητα του φωτός. Αναφορά στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο. Στην αρχική του μορφή, ο νόμος του Αμπέρ συσχετίζει το μαγνητικό πεδίο \mathbf{H} με την πηγή του, την πυκνότητα ρεύματος \mathbf{J} :
$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = I$$
 Δηλαδή το

επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του μαγνητικού πεδίου σε κλειστή καμπύλη στην οποία καταλήγει μια επιφάνεια \mathbf{S} , είναι ίσο με το συνολικό ηλεκτρικό ρεύμα \mathbf{I} που διέρχεται από την ανοικτή επιφάνεια \mathbf{S} όπου \mathbf{H} είναι το μαγνητικό πεδίο, \mathbf{J} είναι η πυκνότητα ρεύματος (σε A/m^2) μέσα από την επιφάνεια \mathbf{S} και \mathbf{I} είναι το ρεύμα που διέρχεται μέσα από την καμπύλη C , ή αλλιώς, το ρεύμα που διαπερνά την επιφάνεια \mathbf{S} . Το μαγνητικό πεδίο \mathbf{H} σε γραμμικά μέσα σχετίζεται με τη πυκνότητα μαγνητικής ροής μέσω της σχέσης $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ όπου μ είναι η διαπερατότητα του μέσου, η οποία εξ ορισμού είναι $4\pi \cdot 10^{-7}$ στο κενό.



3.5.2 Διόρθωση Νόμου Ampere με την προσθήκη του Maxwell

. Ο γενικευμένος νόμος, διορθωμένος από τον Μάξγουελ, παίρνει την

ακόλουθη ολοκληρωτική μορφή:
$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \iint_S \epsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt} \cdot d\mathbf{S}$$
 Με

την προσθήκη του ρεύματος μετατόπισης, ο Μάξγουελ μπόρεσε σωστά να προβλέψει πως το φως είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

3.6 Πρόλογος Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ονομάζεται το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο. Με βάση κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες. Αυτές είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, η υπέρυθρη ακτινοβολία, η ορατή ακτινοβολία (φως), η υπεριώδης ακτινοβολία, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γ.

Περιοχή του φάσματος	Περιοχή συχνοτήτων
<u>Ραδιοκύματα</u>	0-300 <u>MHz</u>
<u>Μικροκύματα</u>	300 <u>MHz</u> - 300 <u>GHz</u>
<u>Υπέρυθρη ακτινοβολία</u>	300 <u>GHz</u> - 400 <u>THz</u>
<u>Ορατή ακτινοβολία</u>	400-800 <u>THz</u>
<u>Υπεριώδης ακτινοβολία</u>	800 <u>THz</u> - $3 \cdot 10^{17}$ <u>Hz</u>
<u>Ακτίνες X</u>	$3 \cdot 10^{17}$ <u>Hz</u> - $5 \cdot 10^{19}$ <u>Hz</u>
<u>Ακτίνες γ</u>	$5 \cdot 10^{19}$ <u>Hz</u> - $3 \cdot 10^{22}$ <u>Hz</u>
<u>Κοσμικές ακτίνες</u>	$3 \cdot 10^{22}$ <u>Hz</u>

Συνδυάζοντας κατάλληλα τις εξισώσεις του Μάξγουελ καταλήγουμε στη δημιουργία κυμάτων ηλεκτρομαγνητικής φύσης. Αυτές οι κυματικές εξισώσεις που παίρνουμε για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο καταδεικνύουν ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν ταχύτητα ίση με αυτήν της ταχύτητας του φωτός.

Δηλαδή: $\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \frac{1}{\epsilon_0} \nabla^2 \vec{E} = 0$ $\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \vec{B} = 0$ με $(c=299.792.458 \text{ m/s})$ Η κυματική

εξίσωση που έβγαίνει από τις εξισώσεις του Μάξγουελ δεν ικανοποιούσε την Γαλιλαϊκή συμμετρία, δηλαδή τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου (Οι Μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου είναι εξισώσεις που μετασχηματίζουν την κίνηση ενός σώματος όπως αυτή γίνεται σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς 1 έτσι ώστε να περιγράφεται όπως αυτή γίνεται σε ένα άλλο αδρανειακό σύστημα 1' το οποίο είναι κινούμενο ως προς το αρχικό (με σταθερή ταχύτητα). Η ανάγκη εύρεσης ενός μετασχηματισμού που θα ικανοποιεί τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα οδήγησε στην εύρεση των λεγόμενων μετασχηματισμών Λόρεντζ (Κάτω από τους μετασχηματισμούς αυτούς, η ταχύτητα του φωτός είναι η ίδια σε όλα τα συστήματα).

Το ραδιοφάσμα είναι το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 3 Hz έως 3000 GHz (3 THz). Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων, που ονομάζονται ραδιοκύματα, χρησιμοποιούνται εξαιρετικά ευρέως στη σύγχρονη τεχνολογία, ιδιαίτερα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών χρηστών, η παραγωγή και μετάδοση ραδιοκυμάτων ρυθμίζεται αυστηρά από εθνικούς νόμους, που συντονίζονται από διεθνή οργανισμό, τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU).

Διάφορα τμήματα του ραδιοφάσματος κατανέμονται από την ITU για διάφορες τεχνολογίες και εφαρμογές ραδιομετάδοσης. Περίπου 40 υπηρεσίες ραδιοεπικοινωνιών καθορίζονται στους κανονισμούς ραδιοεπικοινωνιών (RR) της ITU. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ορισμένα τμήματα του ραδιοφάσματος πωλούνται ή αδειοδοτούνται σε φορείς εκμετάλλευσης ιδιωτικών υπηρεσιών ραδιομετάδοσης (για παράδειγμα, κυψελοειδείς τηλεφωνητές ή ραδιοτηλεοπτικοί σταθμοί). Τα πεδία των καταναμημένων συχνοτήτων αναφέρονται συχνά από τη χρήση τους (π.χ. κυψελοειδές φάσμα ή τηλεοπτικό φάσμα).

Band	Frequency range	Wavelength range
Extremely low frequency (ELF)	< 3 kHz	>100 km
Very low frequency (VLF)	3 - 30 Hz	10 - 100 km
Low frequency(LF)	30 - 300 kHz	1 - 10 km
Medium frequency (MF)	300 kHz - 3 MHz	100m - 1km
High frequency (HF)	3 - 30 MHz	10 - 100m
Very high frequency (VHF)	30 - 300 MHz	1 - 10m
Ultra high frequency (UHF)	300 MHz - 3 GHz	10cm - 1m
Super high frequency (SHF)	3 - 30 GHz	1 - 10cm
Extremely high frequency (EHF)	30 - 300 GHz	1mm - 1cm

3.6.1 Σύντομη επισκόπηση κυματικών εξισώσεων

Η κυματική εξίσωση είναι μια σημαντική γραμμική δεύτερης τάξης μερική διαφορική εξίσωση η οποία χρησιμοποιείται για να περιγραφούν κύματα – όπως παρουσιάζονται στη φυσική. Αφορά συνήθως μια μεταβλητή χρόνου t , μία ή περισσότερες χωρικές μεταβλητές x , και μία βαθμωτή συνάρτηση $u = u(x, t)$, τιμές της οποίας θα μπορούσαν να διαμορφώσουν την μετατόπιση ενός κύματος.

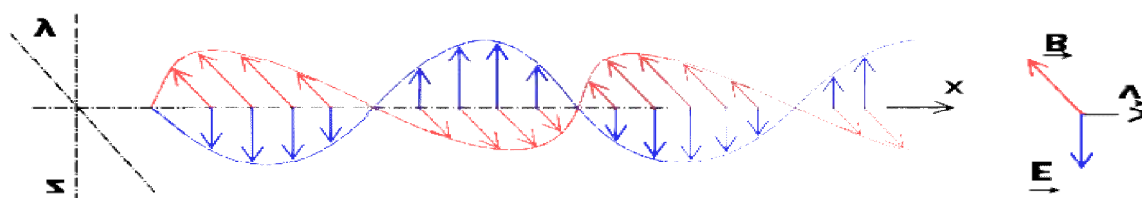
Η κυματική εξίσωση για το u είναι: $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \cdot \tilde{N}^2 \cdot u$ όπου c σταθερά και \tilde{N}

τελεστής ανάδελτα. Η κυματική εξίσωση σε μία διάσταση χώρου μπορεί να

γραφτεί ως εξής: $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$

3.6.2 Προεπισκόπηση Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι συγχρονισμένα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία ταλαντώνονται σε κάθετα επίπεδα μεταξύ τους και κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης. Διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός αλλά και μέσα στην ύλη με ταχύτητα λίγο μικρότερη .



3.6.3 Μαθηματική Περιγραφή Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ακτινοβολίας

Από τις εξισώσεις Maxwell και με κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία και διαχωρισμό του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, προκύπτουν οι σχέσεις:

$\tilde{N}^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$ και $\tilde{N}^2 \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$ οι οποίες έχουν τη μορφή κυματικής

εξίσωσης, και περιγράφουν κύματα που κινούνται με ταχύτητα $u = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8$

m/s. Τιμή που ισούται ακριβώς με την ταχύτητα του φωτός. Οι βασικοί νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού προβλέπουν δηλαδή την ύπαρξη κυμάτων που κινούνται με την ταχύτητα του φωτός.

3.7 Ενημερωτικά στοιχεία περί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφούν οι επιδράσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και οι απαιτήσεις των αντίστοιχων οδηγιών της Ε.Ε. όσον αφορά στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (ΗΜΣ) σε σχέση με τις παρεμβολές από ηλεκτρικές συσκευές και την ηλεκτρομαγνητική περιβαλλοντική συμβατότητα (EMVU) από συσκευές σε σχέση με την επιρροή των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων τους στο περιβάλλον και ιδιαίτερα στους ανθρώπους). Κάθε ηλεκτρική συσκευή σε λειτουργία περιβάλλεται πάντα από το δικό της ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και μπορεί έτσι να επηρεάσει και άλλες ηλεκτρικές συσκευές. Αυτές οι παρεμβολές ενδέχεται επίσης να μεταδοθούν μέσω της πρίζας στα καλώδια. Η ΗΜΣ προσδιορίζει την ικανότητα μιας συσκευής να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον χωρίς να προκαλεί ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, οι οποίες δεν είναι αποδεκτές από τις άλλες συσκευές που βρίσκονται στο ίδιο περιβάλλον. Για να μπορούν λοιπόν να λειτουργούν μαζί πολλές ηλεκτρικές συσκευές, δεν πρέπει από τη μία πλευρά να εκπέμπουν υπερβολικά υψηλές παρεμβολές (εκπομπή παρεμβολών), ενώ από την άλλη πρέπει να είναι ανθεκτικές σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο παρεμβολών (αντίσταση σε παρεμβολές). Οι σχετικές προβλεπόμενες, υποχρεωτικές απαιτήσεις για τις συσκευές παρατίθενται στην οδηγία περί ΗΜΣ (2004/108/EK & Νόμος περί ΗΜΣ).

3.7.1 Ταξινόμηση κατά την οδηγία περί ΗΜΣ

Προκειμένου να ανταποκριθούν στις διάφορες απαιτήσεις, οι συσκευές διαίρονται στις ακόλουθες μεταξύ άλλων κατηγορίες βάσει της λειτουργίας και του χώρου λειτουργίας τους:

- Χώρος οικίας:

Για συσκευές εντός του χώρου της οικίας προβλέπονται υψηλές απαιτήσεις ως προς την εκπομπή παρεμβολών. Επιτρέπεται μόνο ελάχιστη εκπομπή ακτινοβολίας. Αντιθέτως, οι απαιτήσεις ως προς την αντίσταση σε παρεμβολές είναι λιγότερες. Παράδειγμα: Οικιακές συσκευές (πλυντήριο, ηλεκτρική σκούπα, τηλεόραση, ραδιόφωνο)

- Βιομηχανία ή/και συστήματα μετάδοσης:

Για τη λειτουργία εδώ επιτρέπονται και είναι απαραίτητες οι υψηλές ακτινοβολούμενες ή/και αγωγίμες εκπομπές. Γι' αυτό, σε αυτό το περιβάλλον ισχυρότερων παρεμβολών, τίθενται αυξημένες απαιτήσεις ως προς την αντίσταση στις παρεμβολές. Παράδειγμα: Ραδιόφωνο, κινητή τηλεφωνία(κινητό) ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις και κεντρικοί μετατροπείς

3.7.2 Υποχρέωση και έλεγχος



Με την υποχρέωση σήμανσης η Ε.Ε. καθορίζει με τρόπο ομοιόμορφο όλες τις απαιτήσεις περί ΗΜΣ. Στην Ελλάδα οι Νομαρχιακές Αυτοδιοικήσεις και η κεντρική υπηρεσία του Υπουργείου Μεταφορών και Επικοινωνιών θα συνεχίσουν να επιβλέπουν στενά την εφαρμογή της νέας οδηγίας 2004/108/ΕΚ, προσβλέποντας στην ανάπτυξη και στην πρόοδο του τομέα αυτού επ' ωφελεία του κοινωνικού συνόλου. Για περισσότερες πληροφορίες για τις νέες οδηγίες της Ε.Ε και άλλες ερωτήσεις ακολουθήστε τον σύνδεσμο <http://www.yme.gr/index.php?getwhat=1&oid=212&id=&tid=212>

3.7.3 Ηλεκτρομαγνητική περιβαλλοντική συμβατότητα(EMVU)

Η ηλεκτρομαγνητική περιβαλλοντική συμβατότητα προσδιορίζει την επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στο περιβάλλον και ιδιαίτερα στους ανθρώπους. Οι αρνητικές επιπτώσεις είναι γνωστές στην καθομιλουμένη ως ηλεκτρονικό νέφος. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία των ηλεκτρικών συσκευών και των ζώντων οργανισμών μπορεί να έχουν τόσο θετικές όσο και αρνητικές επιδράσεις. Σε περίπτωση θεραπείας με ρεύμα διέγερσης, για παράδειγμα, το ρεύμα προάγει τη θεραπεία ή/και την ανάπτυξη μυϊκών κυττάρων.

Στο ηλεκτροεγκεφαλογράφημα ή το ηλεκτροκαρδιογράφημα καταγράφονται τα εγκεφαλικά κύματα ή η δραστηριότητα των καρδιακών μυών με ηλεκτρόδια. Επιπλέον, είμαστε διαρκώς εκτεθειμένοι σε φυσικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, όπως το γήινο μαγνητικό πεδίο ή την ηλεκτροστατικά φορτισμένη ατμόσφαιρα. Επειδή τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μειώνονται δραστικά, όταν απομακρυνόμαστε από την πηγή τους, οι πηγές που χρησιμοποιούνται κοντά στο σώμα (κινητό, θέρμανση καθισμάτων) παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο επιπτώσεων για την υγεία μας. Στη από 12 Ιουλίου 1999 σύσταση του Συμβουλίου, η οδηγία της Ε.Ε. "περί περιορισμού της έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (0Hz-300GHz)" ορίζει το εξής: "Επιβάλλεται η προστασία του ευρύτερου κοινού στην Κοινότητα από αποδεδειγμένες βλάβες για την υγεία που ενδεχομένως οφείλονται στην έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία". Κρίσιμος παράγοντας για έναν ενδεχόμενο κίνδυνο υγείας είναι ο διαχωρισμός της ακτινοβολίας.

Ιοντίζουσα ακτινοβολία	Μη ιοντίζουσα ακτινοβολία
Αυτή αλλοιώνει (μεταλλάσσει) ή καταστρέφει τα κύτταρα του σώματος και συγκεκριμένα τους πυρήνες των κυττάρων. Αυτό συνεπάγεται υψηλό κίνδυνο καρκινογένεσης.	Η μη ιοντίζουσα ακτινοβολία από την άλλη δεν μπορεί να προκαλέσει καρκίνο, να ευνοήσει ή να αποτρέψει την ανάπτυξη καρκίνου που έχει ήδη εμφανιστεί. Σημαντικό είναι το εύρος της συχνότητας που πρέπει να είναι στα 300Ghz
Παραδείγματα: <ul style="list-style-type: none"> • Ακτινοβολία UV-C (ήλιος) • Ακτίνες X (επίσης οι παλιοί καθοδικοί σωλήνες) • ραδιενεργή ακτινοβολία • κοσμική ακτινοβολία 	Παραδείγματα: <ul style="list-style-type: none"> • Φούρνος μικροκυμάτων • Κινητό • Ραδιόφωνο • Θέρμανση καθισμάτων

4 Κεφάλαιο 4:Γραμμές Μεταφοράς και Μετάδοσης

4.1 Εισαγωγή

Οι γραμμές μεταφοράς είναι είδος κυματοδηγών με δύο ή περισσότερους αγωγούς που χρησιμοποιούνται στη «οδήγηση» (μεταφορά) ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δυο σημείων. Ένα παράδειγμα είναι το ομοαξονικό καλώδιο που συνδέει το δέκτη τηλεόρασης με την αντίστοιχη κεραία. Άλλο παράδειγμα, η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από έναν ηλεκτρικό υποσταθμό στο σπίτι μας ή ακόμα και οι οπτικές ίνες. Στόχος της γραμμής μεταφοράς είναι η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από κάποιο πομπό σε κάποιο δέκτη με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες. Αυτή η μεταφορά εξαρτάται από τη συχνότητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που μεταφέρουν την ενέργεια και τα φυσικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των συστημάτων μεταφοράς/οδήγησης ενώ ακόμα υπάρχει το ενδεχόμενο να υπάρχουν διάφορα υλικά στο χώρο των αγωγών. Στη γενική αυτή περίπτωση η διάδοση είναι πολύπλοκη λόγω ύπαρξης πολλών ταχυτήτων διάδοσης εμφανίζεται το φαινόμενο σύζευξης των σημάτων.. Σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα διάδοσης είναι μια, αυτή της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο συγκεκριμένο υλικό.

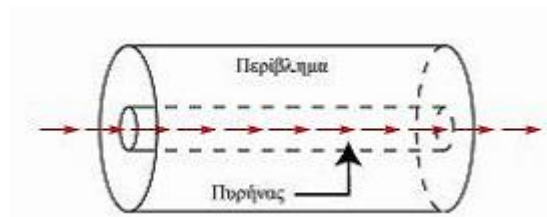
4.2 Γενική Κατηγοριοποίηση

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία γραμμών μεταφοράς με διαφορετικά χαρακτηριστικά και εφαρμογές. Ανάλογα με αυτά χωρίζονται σε: εύκαμπτες ή άκαμπτες, θωρακισμένες ή όχι από παρεμβολές και υγρασία και παρουσία συγκεκριμένου διηλεκτρικού(αέρας ή κάτι άλλο).Αυτά ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά. Όσον αφορά τις ιδιότητες διακρίνονται με άξονα την ικανότητα μεταφοράς υψηλής συχνότητας και ισχύος. Τέλος κατηγοριοποιούνται σε:

- ¾ παράλληλες γραμμές (χαμηλές συχνότητες)
- ¾ κυματοδηγοί (πάνω από 1GHz)
- ¾ ομοαξονικές γραμμές (κάτω από 18GHz)
- ¾ οπτικές ίνες

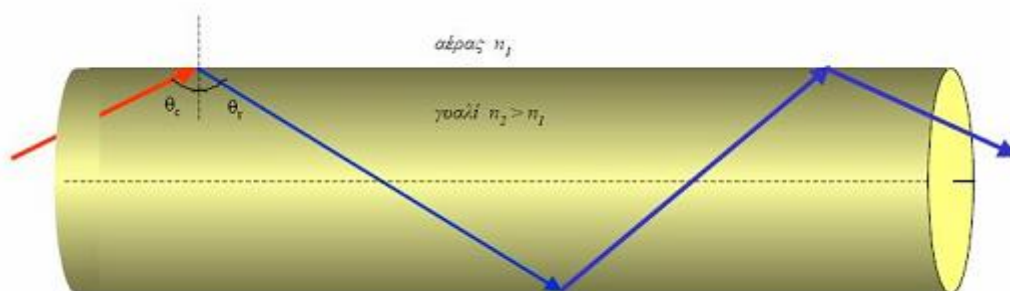
4.2.1 Ειδική Αναφορά στις Οπτικές Ίνες

Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτά νήματα από πλαστικό ή γυαλί, με διάμετρο μικρότερη των $8\mu\text{m}$ όπου από μέσα τους, μεταδίδονται ψηφιακά δεδομένα, υπό μορφή φωτός. Συνήθως τις συναντάμε συγκεντρωμένες σε δέσμες, που σχηματίζουν τα λεγόμενα οπτικά καλώδια. Ένα καλώδιο οπτικών ινών περιέχει μέσα του δεκάδες ή και εκατοντάδες πολύ λεπτές τέτοιες οπτικές ίνες, με διάμετρο μικρότερη και από μία τρίχα. Με τις ακτίνες λέιζερ, ένα σήμα μπορεί να μεταδοθεί δια μέσου οπτικών ινών σε μεγάλη απόσταση.



Για τις βασικές αρχές στη διάδοση του οπτικού σήματος μέσω της οπτικής ίνας θα χρησιμοποιήσουμε τη γεωμετρική οπτική (σωματιδιακή προσέγγιση) όπου θεωρούμε το φως ως ακτίνες που διαδίδονται ευθύγραμμα. Τα δύο φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μια τέτοια προσέγγιση είναι η **ανάκλαση** και η **διάθλαση** του φωτός. Αντίθετα για μια βαθύτερη ανάλυση της διάδοσης του φωτός στις οπτικές ίνες απαιτείται η αντιμετώπιση του φωτός ως H/M κύμα.

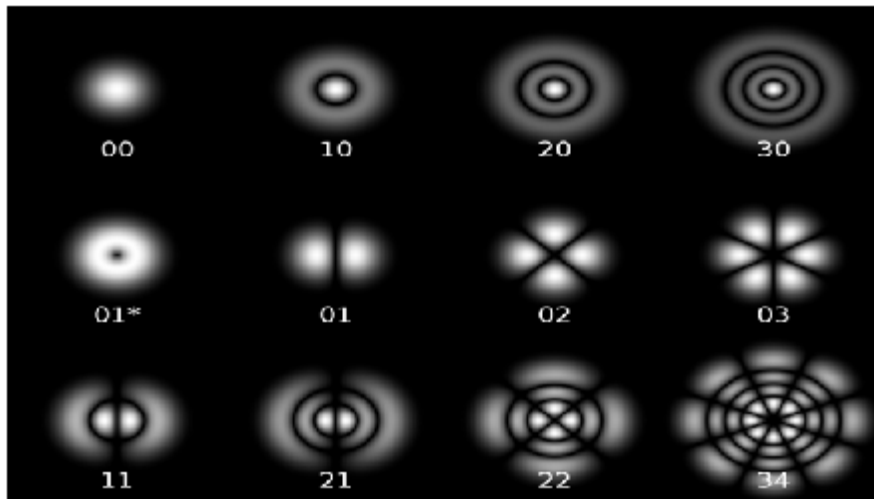
Η αρχή λειτουργίας των οπτικών ινών φαίνεται παρακάτω εκτενής ανάλυση στο θεωρητικό μέρος δεν θα γίνει διότι ξεφεύγει από το θέμα της παρούσας πτυχιακής.



Στην Ηλεκτρομαγνητική θεώρηση δεν έχουμε ακτίνες, αλλά ηλεκτρομαγνητικό κύμα, με διαφορετικές κατανομές ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η μελέτη γίνεται με τις εξισώσεις του Maxwell και τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής.

$$\tilde{N}^2 \nabla^2 E + \frac{\partial \tilde{N}^2}{\partial z} \frac{\partial E}{\partial z} = 0$$

Η μαθηματική περιγραφή τους γίνεται με τον συνδυασμό μιας Gaussian κατανομής της έντασης του πεδίου με τα πολυώνυμα Laguerre. Οι κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου για διάφορους ρυθμούς-τρόπους διάδοσης σε μια πολύτροπη ίνα.



Παράγοντες απωλειών-Γραμμικά φαινόμενα.

- ✓ **Εξασθένιση**
- ✓ **Απορρόφηση** (absorption).
- ✓ **Σκέδαση** (Scattering).

Παράγοντες απωλειών-Μη Γραμμικά φαινόμενα.

Όταν το φως διαδίδεται σε ένα διαφανές μέσο, λόγω του ηλεκτρικού του πεδίου, προκαλεί την ηλεκτρική πόλωση **P** των μορίων του μέσου. Ο όρος ηλεκτρική πόλωση συσχετίζεται με την αλλαγή στον προσανατολισμό των μορίων του μέσου. Η ηλεκτρική πόλωση «διαδίδεται» μαζί με το φως στο μέσο και επηρεάζει τη διάδοση του γιατί ο δείκτης διάθλασης σχετίζεται με αυτήν.

Όταν η ένταση του φωτός που διαδίδεται είναι μικρή, η P είναι ανάλογη με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E και τα φαινόμενα που οφείλονται ή επηρεάζονται από αυτήν είναι γνωστά ως γραμμικά φαινόμενα. Η σχέση που συνδέει το διάνυσμα της πόλωση \mathbf{P} με το διάνυσμα της έντασης \mathbf{E} του ηλεκτρικού πεδίου για ένα ομογενές και ισότροπο μέσο είναι: $P = \epsilon_0 \chi E$ Όπου ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά και χ η ηλεκτρική επιδεκτικότητα η οποία εξαρτάται από το μέσο. Αν το μέσο δεν είναι ομογενές και ισότροπο, δηλαδή αν δεν αλληλεπιδρά με τον ίδιο τρόπο σε όλη του την έκταση ή προς κάθε του κατεύθυνση τότε έχουμε: $P = \overset{\circ}{\mathbf{a}} \epsilon_0 \mathbf{c}_j E_j$ όπου P_i και E_j οι συνιστώσες της \mathbf{P} και \mathbf{E} ενώ χ_{ij} ο

τανυστής της ηλεκτρικής επιδεκτικότητας. Αν η ένταση του φωτός που διαδίδεται στο μέσο μετάδοσης είναι πολύ μεγάλη τότε η P παύει να είναι ανάλογη της E και περιγράφεται από το ανάπτυγμα της σειράς Taylor:

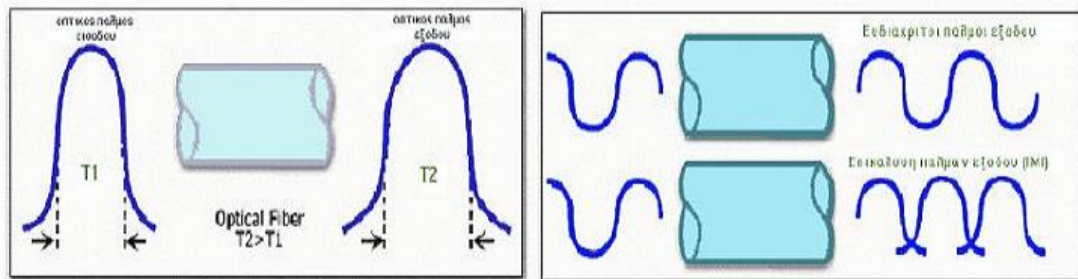
$$P_i j \epsilon_0 = \overset{\circ}{\mathbf{a}}_j x_{ij} E_j + \overset{\circ}{\mathbf{a}}_{jk} x_{ijk} E_j E_k + \overset{\circ}{\mathbf{a}}_{jkl} x_{ijkl} E_j E_k E_l + \dots$$

Όταν χρησιμοποιούνται πηγές laser με σχετικά μεγάλη ισχύ. Λόγω της μεγάλης ισχύος αλλά και της μικρής διατομής του πυρήνα της ίνας στην οποία κατανέμεται αυτή η ισχύς, η ένταση της ακτινοβολίας I είναι υψηλή. Ο δεύτερος και ο τρίτος όρος του αναπτύγματος είναι γνωστοί και ως μη γραμμικότητες δεύτερης και τρίτης τάξης αντίστοιχα. Για την ακρίβεια ο δεύτερος όρος υπάρχει μόνο σε κάποιους κρυστάλλους με ειδική δομή. Ο τρίτος όρος όμως του αναπτύγματος, η μη γραμμικότητα τρίτης τάξης δηλαδή, εμφανίζεται σε όλα τα μέσα αν φυσικά η E είναι μεγάλη. Επηρεάζει τον δείκτη διάθλασης του υλικού και κατ' επέκταση και τη διάδοση του φωτός στο μέσο και δημιουργεί τα μη γραμμικά φαινόμενα που εμφανίζονται και στις οπτικές ίνες.

Διασπορά και διεύρυνση οπτικών παλμών

Οι διάφοροι μηχανισμοί διασποράς στην οπτική ίνα έχουν σαν τελικό αποτέλεσμα τη διεύρυνση του πλάτους των φωτεινών παλμών καθώς αυτοί ταξιδεύουν στην ίνα. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα όπου παρατηρούμε ότι καθώς διευρύνεται το πλάτος ενός παλμού, κάποια στιγμή αλληλεπικαλύπτεται με γειτονικούς παλμούς και γίνεται δυσδιάκριτος στο δέκτη (Intersymbol Interference).

Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση του ρυθμού των λαθών. Έτσι λοιπόν η διασπορά των παλμών του σήματος περιορίζει το ρυθμό διακίνησης πληροφορίας (Bit Rate) στην οπτική ίνα, δηλαδή το εύρος ζώνης της ίνας που μπορεί να αξιοποιηθεί.



Επιγραμματικά αναφέρουμε ότι οι κυριότεροι μηχανισμοί είναι η χρωματική διασπορά, η διασπορά των τρόπων διάδοσης και η διασπορά των τρόπων πόλωση.

Είδη οπτικών ινών

Για όλους τους τύπους των οπτικών ινών υπάρχουν διεθνή πρότυπα στα οποία προδιαγράφονται τα χαρακτηριστικά μετάδοσης καθώς και τα γεωμετρικά, μηχανικά και άλλα χαρακτηριστικά αυτών ανάλογα τις απαιτήσεις διαφόρων εφαρμογών.

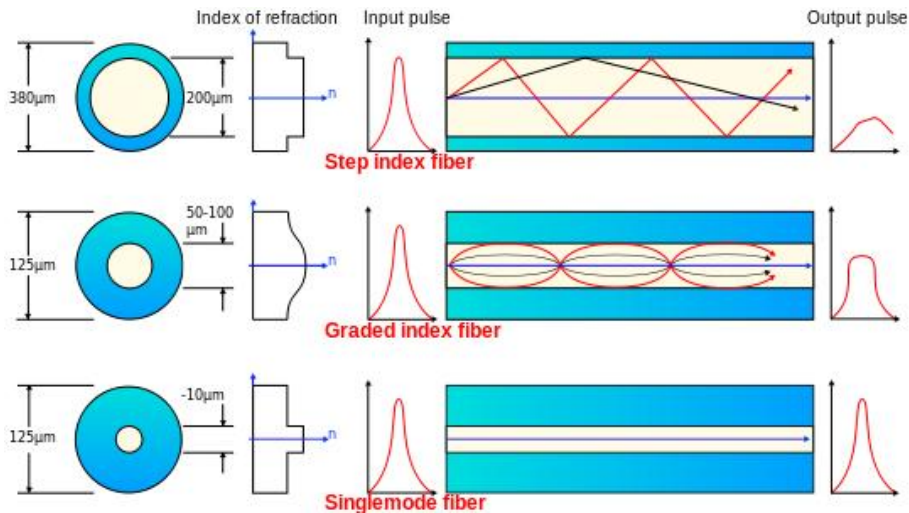
Απλού τύπου (Single mode)

Οι οπτικές ίνες απλού τύπου ή μονοτροπικές ίνες έχουν διαστάσεις μέχρι 10μm. Τα κύματα φωτός ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή και μπορούμε να στείλουμε δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις. Η μικρή αυτή διάμετρος του πυρήνα επιτρέπει τη διέλευση σε ένα περιορισμένο πλήθος ακτινών, ουσιαστικά μόνο σε ακτίνες που προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια της διατομής των οπτικών ινών.

Πολλαπλού τύπου (Multi mode)

Οι οπτικές ίνες πολλαπλού τύπου ή πολυτροπικές ίνες έχουν διαστάσεις από 50 – 100 μm, είναι πιο "χοντρές" από τις απλού τύπου, αλλά μπορούν να στείλουν παράλληλα πολλά κύματα φωτός. Το κάθε κύμα φωτός, εισέρχεται στην οπτική ίνα υπό ελαφρώς διαφορετική γωνία σε σχέση με τα άλλα, και ακολουθεί το δικό του μονοπάτι μέσα της, μέσω των διαδοχικών ανακλάσεων στο περίβλημα.

Αυτό συμβαίνει παράλληλα με πολλά κύματα φωτός (όλα σε διαφορετική γωνία σε σχέση με τα άλλα) κι έτσι μπορούμε να στείλουμε παράλληλα, τεράστιο όγκο δεδομένων.



Στην πράξη συναντάμε δέσμη οπτικών ινών. Αν οι ίνες αποτελούνταν μόνο από ένα υλικό, τότε το φως που “ταξιδεύει” στο εσωτερικό τους θα περνούσε, όταν θα έρχονταν σε επαφή, από την μια ίνα στην άλλη. Για αυτό κάθε ίνα επικαλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα υλικού μικρότερου δείκτη διάθλασης ή με πολλά λεπτά στρώματα, έτσι ώστε κάθε επόμενο στρώμα να έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον προηγούμενο. Επίσης στο σύστημα της γυάλινης ίνας τοποθετείται ένα περίβλημα που την προστατεύει και την κάνει πιο ανθεκτική σε μηχανικές καταπονήσεις.

Κάθε οπτική ίνα αποτελείται από:

- § Την κεντρική γυάλινη οπτική ίνα που ονομάζεται πυρήνας και είναι το τμήμα στο οποίο διαδίδεται το φως.
- § Την επικάλυψη (απλή ή πολλαπλή), που είναι ένας ομόκεντρος με τον πυρήνα κύλινδρος. Έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα λόγω της διαφορετικότητας του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο, ώστε να κρατάει τα κύματα φωτός, με ολικές ανακλάσεις, μέσα στον πυρήνα και να συνεχίζουν το ταξίδι τους μέσω αυτού. Η επικάλυψη αυτή ονομάζεται μανδύας.
- § Το περίβλημα, που είναι ένα αδιαφανές πλαστικό.

Στις οπτικές ίνες που απαρτίζουν ένα οπτικό καλώδιο, ουσιαστικά υπάρχει και ένα τέταρτο, εξωτερικό, στρώμα που είναι το έγχρωμο μελάνι που εφαρμόζεται για την αναγνώριση των ινών. Αντίστοιχα η δομή ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι τέτοια, ώστε να αποτρέπει τις εξωτερικές φθορές, αλλά και την απώλεια σήματος, που θα προέκυπτε κατά τη διαρροή της φωτεινής ακτινοβολίας στο εξωτερικό του. Τα τμήματα¹ ενός καλωδίου οπτικών ινών από το κέντρο προς το εξωτερικό του, είναι τα εξής:

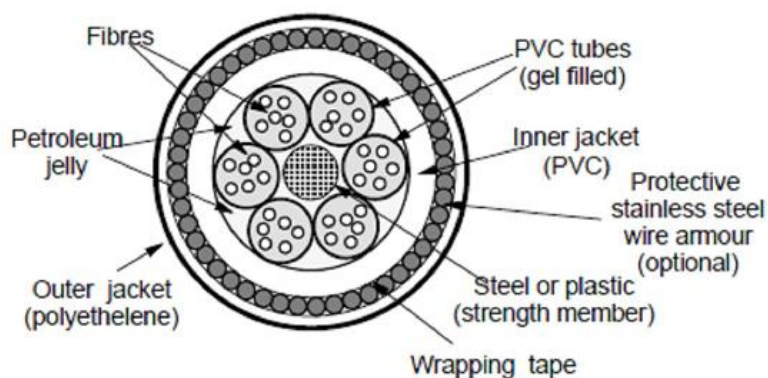
Πυρήνας: Βρίσκεται στο κέντρο του καλωδίου. Αποτελείται από μία δέσμη οπτικών ινών, που αναλαμβάνουν τη μετάδοση των φωτεινών σημάτων.

Εσωτερική επένδυση: Είναι το υλικό που αντανακλά εσωτερικά το φως, εκμηδενίζοντας παράλληλα το ποσοστό διαφυγής του στο εξωτερικό του καλωδίου.

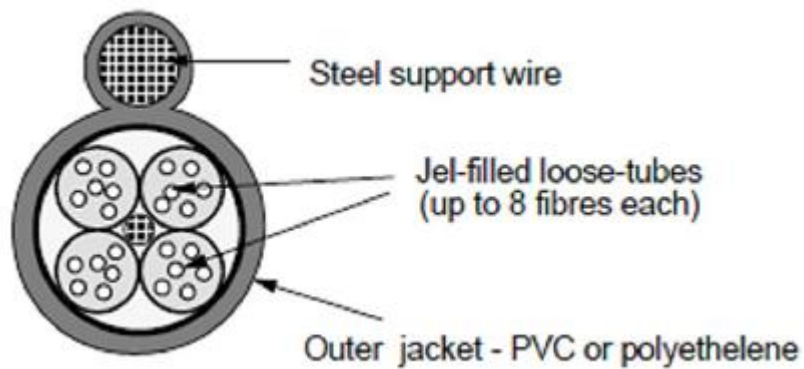
Εξωτερική επένδυση: Ανθεκτικό υλικό, που αποτελείται από καουτσούκ για μικρά καλώδια οικιακής χρήσης, ή από ατσάλι για μεγαλύτερα, που χρησιμοποιούνται σε εξωτερικό περιβάλλον. Προστατεύει το καλώδιο από ζημιές που θα προέκυπταν από τους διάφορους εξωτερικούς παράγοντες.

Ανάλογα λοιπόν με το περιβάλλον στο οποίο προορίζονται να εγκατασταθούν τα καλώδια των οπτικών ινών κατηγοριοποιούνται σε :

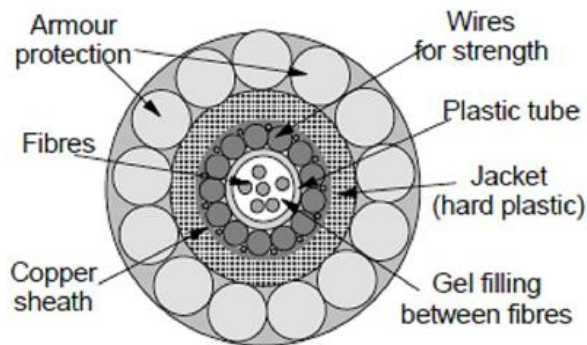
Υπόγεια καλώδια εξωτερικού χώρου



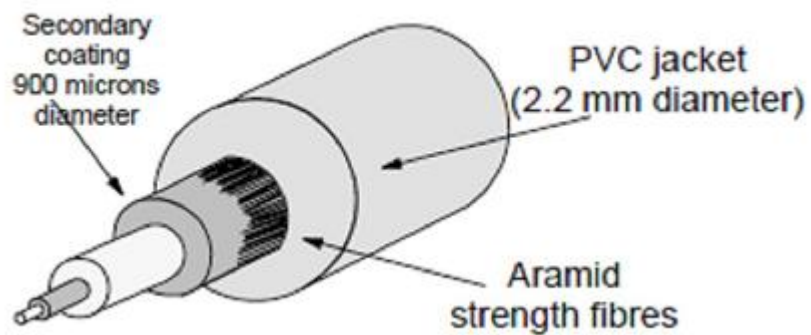
Υπέργεια καλώδια εξωτερικού χώρου.



Υποβρύχια καλώδια.



Καλώδια εσωτερικού χώρου.



Καλώδια ειδικών χρήσεων.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

- a) Μεγάλη χωρητικότητα πληροφορίας
- b) Μικρό κόστος πρώτης ύλης(γυαλί)
- c) Χαμηλό βάρος και μικρό μέγεθος της οπτικής ίνας
- d) Αναισθησία στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- e) Ασφάλεια.

Είναι πλέον φανερό ότι όσον αφορά τα μέσα μετάδοσης οι οπτικές ίνες είναι η μόνη τεχνολογία ώστε να προσφέρει λύση ικανοποιώντας την συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για εύρος ζώνης. Στην περίπτωση των οπτικών ινών υπάρχει αφθονία πρώτης ύλης αντίθετα με το χαλκό και τα άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται . Λόγω της πολύ μικρής εξασθένησης που παρουσιάζουν τα σήματα καλύπτουν πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις ενώ επιτρέπουν και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, έναντι των υπολοίπων, αφού παρέχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Πράγματι το εύρος ζώνης μιας οπτικής ίνας ανέρχεται περίπου στα 25 THz. Με τις οπτικές ίνες επιτυγχάνουμε μικρούς ρυθμούς σφαλμάτων. Τυπικές τιμές του μέσου ρυθμού σφαλμάτων(BER) για μετάδοση μέσω οπτικής ίνας είναι της τάξης του 10^{-9} , την στιγμή που οι αντίστοιχοι ρυθμοί για χάλκινο μέσο είναι της τάξης του 10^{-5} . Έτσι οι μικροί ρυθμοί σφαλμάτων στις οπτικές ίνες επιτυγχάνονται δίχως να απαιτείται η χρήση πολύπλοκων μεθόδων κωδικοποίησης ή διαμόρφωσης. Είναι λοιπόν βέβαιο ότι τέτοια οπτικά συστήματα σύντομα θα έχουν τον πρώτο λόγο στις τηλεπικοινωνίες, όχι μόνο στις ζεύξεις σημείου προς σημείο, αλλά και στα δίκτυα μεγάλης χωρητικότητας όπου απαιτείται διακίνηση όλο και μεγαλύτερου όγκου πληροφορίας.

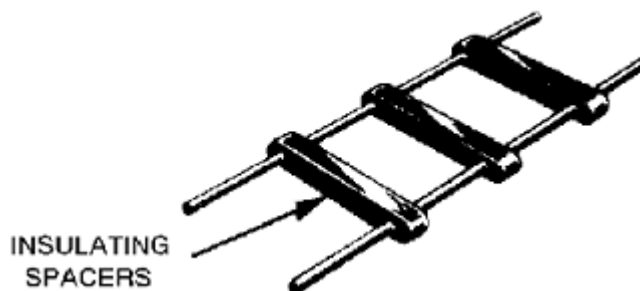
ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

- a. Ακριβότερο κόστος από τα χάλκινα καλώδια μαζί με το κόστος των ηλεκτρονικών και οπτικοηλεκτρονικών διατάξεων
- b. Δυσκολία στην εγκατάσταση
- c. Ευθραυστότητα
- d. Δεν είναι αρκετά ευλύγιστες

4.3 Σύντομη Αναφορά Κατηγοριών

4.3.1 Παράλληλες Γραμμές

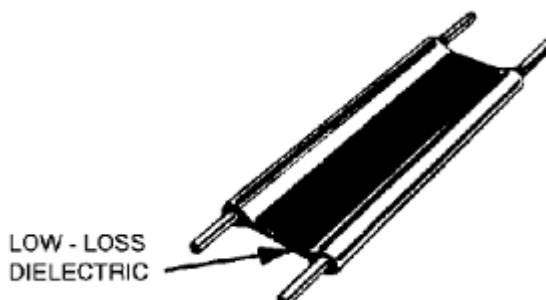
Δύο αγωγοί σε απόσταση μερικών εκατοστών μεταξύ τους οι οποίοι συγκρατούνται με μονωτικό υλικό όπως φαίνεται παρακάτω:



Τέτοια είδη γραμμών έχουν εφαρμογή στη μεταφορά ισχύος για στις υπαίθριες τηλεφωνικές γραμμές. Πλεονέκτημα τους είναι η απλότητα στην κατασκευή όπως διακρίνεται ενώ αντίθετα έχουμε απώλειες λόγω ακτινοβολίας και εμφάνιση ανεπιθύμητου θορύβου. Τέλος παρουσιάζει παρεμβολές λόγω έλλειψης απαραίτητης θωράκισης.

Παράλληλες Γραμμές Ανοιχτού Τύπου

Η διαφορά με την προηγούμενη κατηγορία έγκειται στο γεγονός ότι έχει προστεθεί διηλεκτρικό μέσο (πολυαιθυλένιο) με μικρές απώλειες. Πρακτική εφαρμογή του συναντάται στην Αμερική όπου την κεραία με τον δέκτη της τηλεόρασης.



4.3.2 Συνεστραμμένου Ζεύγους

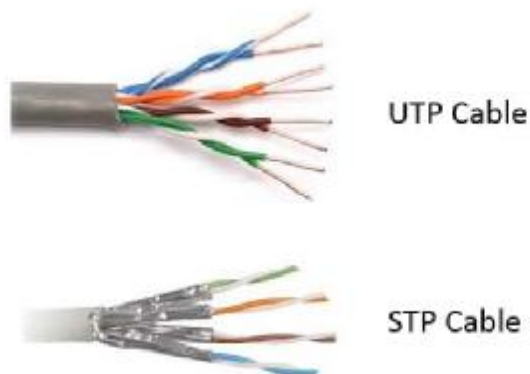
Δύο σύρματα χαλκού που περιβάλλονται από μονωτικό υλικό και είναι περιστρεμμένα μεταξύ τους το μήκος και ο τρόπος πλέξης επηρεάζουν την απόδοση.



Το πλεονέκτημα τους είναι το χαμηλό κόστος τους όπως φαίνεται αλλά δεν ενδείκνυται για υψηλές συχνότητες και εμφανίζονται απώλειες του μονωτικού λόγω υγρασίας. Συναντάται στην πράξη σε ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων, δίκτυα υπολογιστών, τηλεφωνικά δίκτυα κ.α.

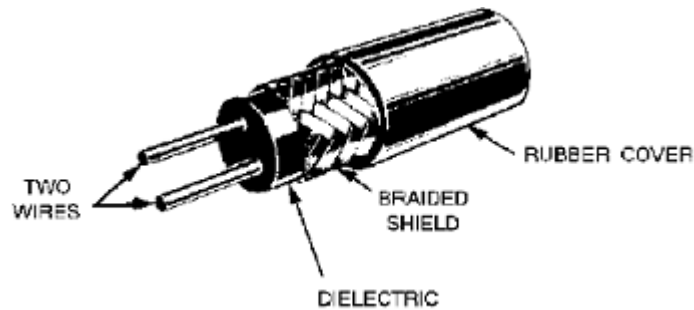
Συνήθως ενώνονται πολλά ζεύγη μονωμένα και σχηματίζουν μία δέσμη σε προστατευτικό περίβλημα. Η πλέξη μειώνει την παρεμβολή μεταξύ των ζευγών. Το εύρος ζώνης εξαρτάται από το πάχος και την καλυπτόμενη απόσταση συγχρόνως όμως λειτουργούν ως χαμηλοπερατά φίλτρα. Διακρίνονται σε :

- Ø Αθωράκιστο (UTP: Unshielded Twisted Pair)
- Ø Θωρακισμένο (STP: Shielded Twisted Pair)



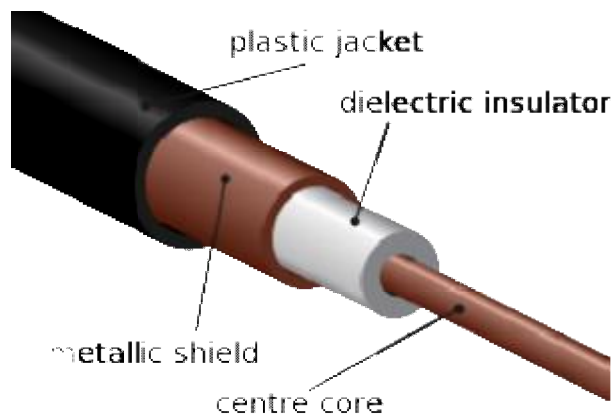
4.3.3 Θωρακισμένα Ζεύγη Καλωδίων

Δύο παράλληλοι αγωγοί με στερεό διηλεκτρικό και χάλκινο πλέγμα για προστασία από τυχόν διπλανά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Περιέχει εύκαμπτο λαστιχένιο περίβλημα για προστασία από υγρασία και μηχανικές καταπονήσεις.



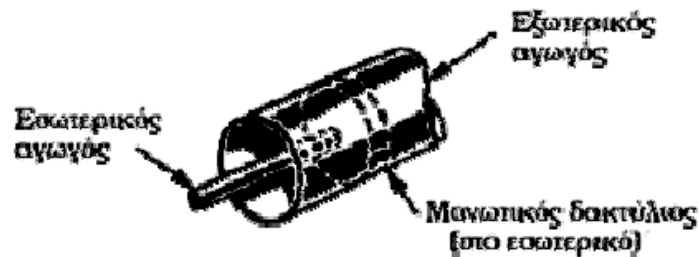
4.3.4 Ομοαξονικές Γραμμές

Δύο ομόκεντροι αγωγοί τους οποίους χωρίζει κάποιο διηλεκτρικό. Γενικά πλεονεκτήματα έναντι παράλληλων γραμμών είναι η καλύτερη θωράκιση, η κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων και οι υψηλότερες ταχύτητες



Άκαμπτες Ομοαξονικές Γραμμές

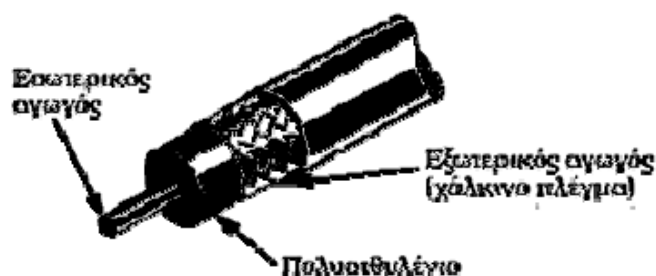
Ο εσωτερικός αγωγός βρίσκεται μέσα σε σωληνοειδή εξωτερικό αγωγό ο οποίος αγωγός μπορεί να είναι επίσης σωληνοειδής. Περιέχει διηλεκτρικό αέρα και πλαστικό περίβλημα με μονωτικούς δακτυλίους ανά διαστήματα.



Σε αυτές τις γραμμές συναντάμε ελάχιστες απώλειες ακτινοβολίας, προστασία από παρεμβολές συγχρόνως τα Η/Μ πεδία της γραμμής περιορίζονται στο εσωτερικό της. Από την αντίθετη πλευρά η κατασκευή είναι ακριβή σε συνδυασμό με την εμφάνιση ακαμψίας του αγωγού συν το γεγονός ότι ο αέρας ως διηλεκτρικό μπορεί να παρουσιάσει διαρροές λόγω υγρασίας (πολλές φορές εισάγεται αέριο υπό πίεση για να μείνει ο χώρος στεγνός). Τέλος στις υψηλές συχνότητες το μήκος της γραμμής είναι περιορισμένο.

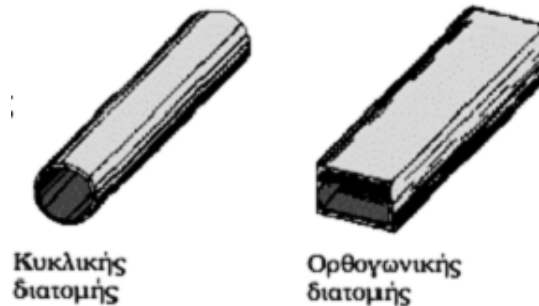
Εύκαμπτες Ομοαξονικές Γραμμές

Σε αυτή την περίπτωση τώρα ο εξωτερικός αγωγός είναι χάλκινο πλέγμα που προσδίδει ελαστικότητα. Έχουμε δηλαδή ότι οι δύο αγωγοί διαχωρίζονται από πολυαιθυλένιο ως διηλεκτρικό με όλα τα στερεά διηλεκτρικά να έχουν μεγαλύτερες απώλειες από τον αέρα ενώ το πολυαιθυλένιο έχει γενικά καλές ιδιότητες.



4.3.5 Κυματοδηγοί

Αποτελούνται από μεταλλικούς σωλήνες ορθογώνιας, ελλειπτικής ή κυκλικής διατομής. Ισχύουν αρκετά διαφορετικά φαινόμενα σε σχέση με τις άλλες γραμμές μεταφοράς τα οποία θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Πλεονεκτούν ως προς τις υψηλές συχνότητες (εφαρμογές μικροκυμάτων) και τη μεγάλη ισχύ (δεκάδες kW).Εκτενής αναφορά θα γίνει σε επόμενη παράγραφο.



4.4 Απώλειες στις Γραμμές Μεταφοράς

4.4.1 Απώλειες Χαλκού

Αυτές του είδους τις απώλειες εμφανίζονται λόγω του χαλκού που τον συναντάμε στα καλώδια και τις αντιστάσεις των γραμμών μας. Προέλευση του είναι οι συγκρούσεις των ηλεκτρονίων που γίνονται σε μικροσκοπικό επίπεδο και παράγεται θερμότητα(Νόμος Joule) με τιμή $Q = I^2 R t$.Η αντίσταση του χαλκού R υπολογίζεται από τον τύπο: $R = \frac{\rho l}{A}$ με ρ :ειδική αντίσταση, l :μήκος αγωγού και A :επιφάνεια διατομής αγωγού.

4.4.2 Επιδερμικό Φαινόμενο

Όταν σε μεταλλικό αγωγό κυκλοφορεί συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα θεωρούμε ότι οι φορείς του ρεύματος, τα ηλεκτρόνια, κινούνται ομοιόμορφα μέσα στον αγωγό από το ψηλό δυναμικό στο χαμηλό (συμβατική φορά).Αντίθετα στο εναλλασσόμενο τα φορτία ταλαντώνονται με τέτοια συχνότητα ίδια του μαγνητικού πεδίου που τα δημιουργεί. Έτσι οι αυξήσεις και μειώσεις στα πλάτη των ταλαντώσεων δημιουργούν φαινόμενα αυτεπαγωγής μεταξύ των φορτίων με αποτέλεσμα την επιβράδυνση των κινήσεών τους. Οπότε τελικά η ροή παύει στο κέντρο και τα ηλεκτρόνια κινούνται στην επιφάνεια.

4.4.3 Απώλειες Διηλεκτρικού

Η αιτία εμφάνισης τέτοιων απωλειών σε γραμμές μεταφοράς είναι η θέρμανση του ίδιου του διηλεκτρικού είτε είναι αέρας είτε οτιδήποτε άλλο αέριο ή ακόμα στερεό και υγρό. Παράγοντες που επεμβαίνουν στην εμφάνιση των παραπάνω απωλειών είναι η διαφορά δυναμικού (τάση) των αγωγών και η συχνότητα (επιδερμικό φαινόμενο, συχνότητες < 18GHz). Πιο συνηθισμένα διηλεκτρικά είναι ο αέρας όπου σε αυτόν έχουμε αμελητέες απώλειες αλλά περιπτώσεις σπινθηρισμού και τα στερεά διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται για ελαστικότητα τα οποία έχουν μεγάλη διηλεκτρική σταθερά αλλά αντίθετα έχουν αυξημένες απώλειες.

4.4.4 Απώλειες Επαγωγής και Ακτινοβολίας

Σχετίζονται με τα ΗΜ πεδία του αγωγού και οδηγούν σε απώλεια ισχύος

- Απώλειες Επαγωγής

Το Η/Μ πεδίο του αγωγού επάγει ρεύμα σε κοντινά μεταλλικά αντικείμενα με συνέπεια την απώλεια στην ισχύ

- Ø Απώλειες Ακτινοβολίας

Όταν η γραμμή έχει κατάλληλες διαστάσεις μπορεί να λειτουργήσει ως κεραία δηλαδή αντί να μεταφέρει την ΗΜ συχνότητα, την ακτινοβολεί μερικώς στο χώρο με συνέπεια την απώλεια ισχύος και σε αυτή την περίπτωση.

4.5 Μήκος Γραμμών Μεταφοράς

Ένα μέτρο για να αντιληφθούμε το φυσικό μήκος μιας γραμμής προσδιορίζεται με τη βοήθεια του τύπου $u = \frac{l}{f}$ όπου λ: μήκος κύματος ,f: συχνότητα διάδοσης και u: ταχύτητα διάδοσης και γίνεται σύγκριση με το ¼ του μήκους κύματος της συχνότητας που μεταφέρει. Έτσι έχουμε:

▼ Γραμμή Μικρού Ηλεκτρικού Μήκους

Το φυσικό μήκος $< \lambda/4$ με την ωμική αντίσταση και την ισχύ να μεταφέρεται σχεδόν ολόκληρη στο φορτίο. Ισχύουν οι νόμοι του Ohm και έχουμε συγκεντρωμένα χαρακτηριστικά

▼ Γραμμή Μεγάλου Ηλεκτρικού Μήκους

Το φυσικό μήκος $> \lambda/4$ και να εμφανίζει σύνθετη αντίσταση (επαγωγή και χωρητικότητα). Σε αυτή την περίπτωση τα χαρακτηριστικά της γραμμής είναι κατανεμημένα δηλαδή οι τιμές των μεγεθών εκφράζονται **ανά μονάδα μήκους**.

4.6 Παράμετροι Γραμμών Μεταφοράς

Είναι συνηθισμένο και βολικό να περιγράψουμε μια γραμμή μεταφοράς με βάση τις παραμέτρους της γραμμής της, που είναι η αντίσταση ανά μονάδα μήκους R , η επαγωγή (inductance) ανά μονάδα μήκους L , η χωρητικότητα (capacitance) ανά μονάδα μήκους C και η αγωγιμότητα ανά μονάδα μήκους G . Παραδείγματα γραμμών μεταφοράς φαίνονται πιο κάτω. Η γραμμή μεταφοράς έχει επαγωγική συμπεριφορά με κατανεμημένη επαγωγή L και μετράται σε Henry/m. Συγχρόνως οι δύο αγωγοί συμπεριφέρονται σαν τις δύο πλάκες ενός πυκνωτή με το ενδιάμεσο υλικό δρα ως το διηλεκτρικό του πυκνωτή. Έτσι με τη σειρά της η γραμμή μεταφοράς έχει χωρητική συμπεριφορά με κατανεμημένη χωρητικότητα C και μετράται σε Farad/m. Στη συνέχεια ο αγωγός εμφανίζει και συγκεκριμένη αντίσταση και με τη σειρά της η γραμμή μεταφοράς έχει ωμική συμπεριφορά με κατανεμημένη αντίσταση R και μετράται σε Ohms/m. Τέλος διότι το διηλεκτρικό μεταξύ των δύο αγωγών δεν είναι τέλειος μονωτής υπάρχει ένα μικρό ρεύμα διαρροής μεταξύ των αγωγών. Αυτό αντιστοιχεί σε μια αντίσταση μεταξύ των αγωγών που εμφανίζεται σε παράλληλη σύνδεση κατά μήκος του αγωγού και καλείται αγωγιμότητα. Ομοίως με πριν στη γραμμή μας έχουμε εμφάνιση κατανεμημένης αγωγιμότητας G . Όπου ισχύει γενικά ότι είναι το αντίστροφο της αντίστασης και μετράται σε Ohms⁻¹/m ή Siemens/m (S/m).

4.7 Χαρακτηριστικά υλικών σε Γραμμές Μεταφοράς

Ø Ηλεκτρική διαπερατότητα: ϵ (F/m)

Όπου ηλεκτρική διαπερατότητα ορίζουμε ένα μέτρο αντίστασης κατά τον σχηματισμό ενός ηλεκτρικού πεδίου σε ένα συγκεκριμένο μέσο(αέρας, κενό κ.α.)Ισχύει ότι $\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r$ με ϵ_0 :διαπερατότητα κενού και ϵ_r :σχετική διαπερατότητα. Για τον αέρα το $\epsilon = 8.85 * 10^{-12}$ F/m. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει τόσο λιγότερο ηλεκτρικό πεδίο επάγεται και τόση λιγότερη πόλωση υπάρχει. Με τον όρο **πόλωση** περικλείουμε μια συνοπτική ονομασία φαινομένων που συνδέονται με τον προσανατολισμό κυμάτων κυρίως εγκάρσιων ηλεκτρομαγνητικών ως προς τον άξονα διάδοσής τους.

Ø Μαγνητική διαπερατότητα: μ (H/m)

Στον ηλεκτρομαγνητισμό μαγνητική διαπερατότητα ορίζουμε το μέγεθος την ικανότητας ενός υλικού να σχηματίσει μαγνητικό πεδίο γύρω από τον εαυτό του. Ισχύει ότι $\mu = \mu_0 * \mu_r$ με μ_0 :μαγνητική διαπερατότητα κενού και μ_r :σχετική διαπερατότητα. Για τον αέρα το $\mu = 4\pi * 10^{-7}$ H/m. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει τόσο περισσότερο διατηρούνται οι μαγνητικές ιδιότητες του υλικού με την κατάργηση του μαγνητικού πεδίου.

Ø Αγωγιμότητα σ (S/m)

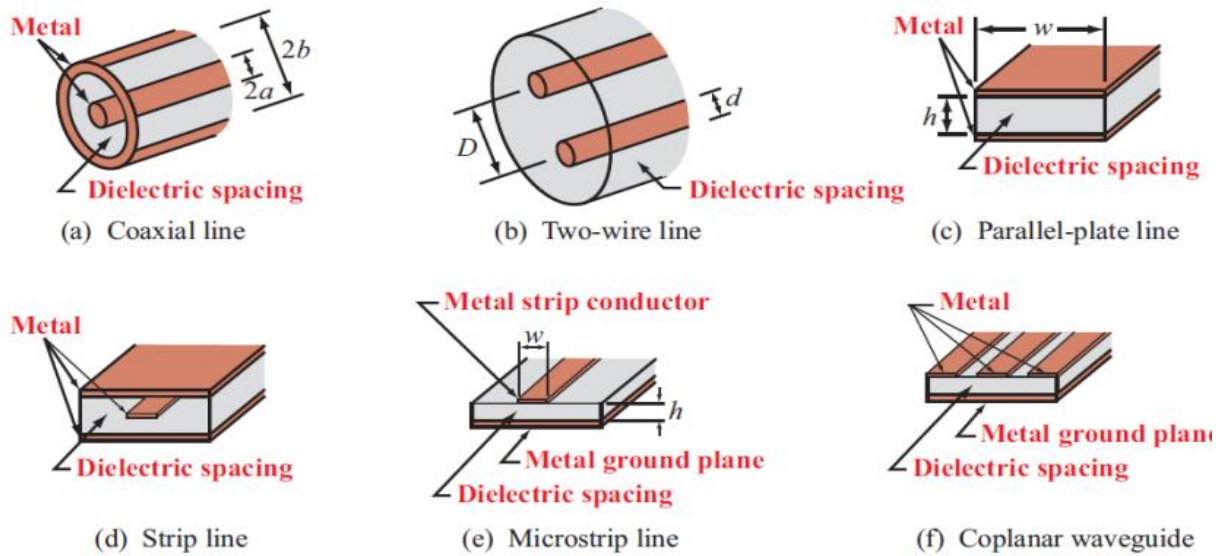
$\sigma = \infty$ ® Ιδανικός αγωγός

$\sigma = 0$ ® Ιδανικός μονωτής

Παρακάτω παραθέτεται ένας πολύ χρήσιμος σύνδεσμος για ειδικών τύπων καλωδίων κ.α. όπως αυτά που αναφέρθηκαν με πολυάριθμες σημαντικές πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά τους.

<http://www.elsewedyelectric.com/FE/Common/ProductDivisions.aspx>

Εικόνα κατηγοριών Γραμμών Μεταφοράς



TEM Transmission Lines

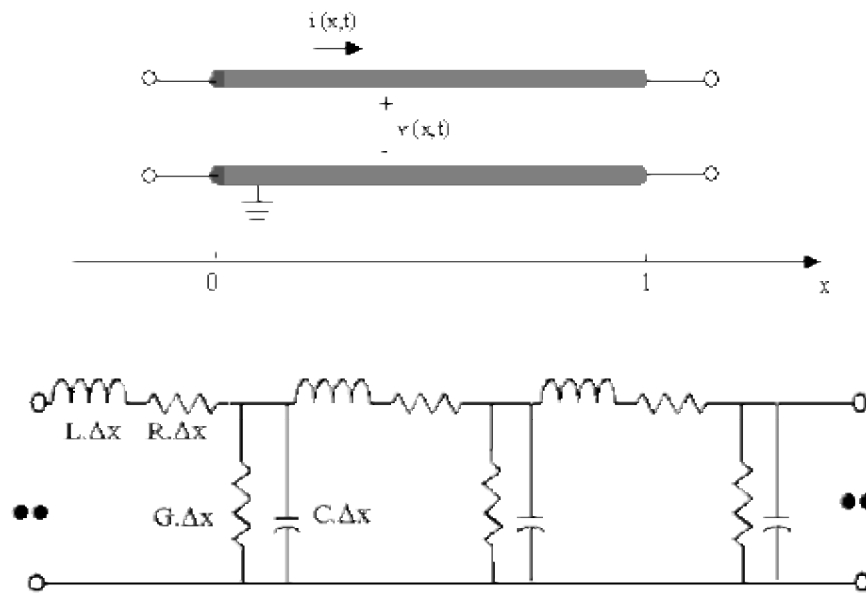
Παράμετροι Γραμμών Μετάδοσης για τρεις τύπους.

Παράμετρος	Ομοαξονικό	Δύο Γραμμών	Παράλληλων Πλακών	Μονάδα α Μέτρησης
R	$\frac{R_s}{2p} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$	$\frac{2R_s}{pd}$	$\frac{2R_s}{w}$	Ω/m
L	$\frac{m}{2p} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$	$\frac{m}{2p} \ln \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \left(\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1} \right)$	$\frac{mh}{w}$	H/m
C	$\frac{2pe}{\ln(b/a)}$	$\frac{pe}{\ln \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \left(\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1} \right)}$	$\frac{eh}{w}$	F/m
G	$\frac{2ps}{\ln(b/a)}$	$\frac{ps}{\ln \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \left(\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1} \right)}$	$\frac{sh}{w}$	S/m

Σημείωση ότι $R_s = \sqrt{\rho f \mu_c / s_c}$ με μ_c και s_c να σχετίζονται οι τιμές του με το είδος του αγωγού. Εάν $(D/d)^2 \gg 1$ τότε $\ln \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \left(\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1} \right) \approx \ln(2D/d)$.

4.8 Εξισώσεις στις Γραμμές Μεταφοράς

Έστω το παρακάτω μοντέλο μιας γραμμής μεταφοράς



Ο νόμος των κόμβων του Kirchhoff δίνει ότι :

$$\frac{\nabla^2 i(z,t)}{\nabla z^2} - L_i C_i \frac{\nabla^2 i(z,t)}{\nabla z^2} - (C_i R_i + G_i L_i) \frac{\nabla i(z,t)}{\nabla t} - i(z,t) G_i R_i = 0 \text{ και}$$

$$\frac{\nabla^2 u(z,t)}{\nabla z^2} - L_i C_i \frac{\nabla^2 u(z,t)}{\nabla z^2} - (C_i R_i + G_i L_i) \frac{\nabla u(z,t)}{\nabla t} - u(z,t) G_i R_i = 0$$

Έτσι καταλήγουμε σε δυο ίδιες κυματικές εξισώσεις με απόσβεση, για το ρεύμα και την τάση. Ας σημειωθεί ότι τα Cl , Rl , Gl και Ll μπορεί, γενικώς, να εξαρτώνται από τη συχνότητα. Αν δεν υπάρχουν απώλειες έχουμε $Rl=0$, $Gl=0$ οπότε καταλήγουμε στις κυματικές εξισώσεις χωρίς απόσβεση:

$$\frac{\nabla^2 i(z,t)}{\nabla z^2} - L_i C_i \frac{\nabla^2 i(z,t)}{\nabla z^2} = 0 \quad \text{και} \quad \frac{\nabla^2 u(z,t)}{\nabla z^2} - L_i C_i \frac{\nabla^2 u(z,t)}{\nabla z^2} = 0$$

Έπειτα από μαθηματική ανάλυση η οποία θα παραληφθεί αποδεικνύονται οι παρακάτω διαφορικές εξισώσεις για την τάση V : $\frac{d^2 V}{dz^2} - g^2 V = 0$ και για το ρεύμα

$$I: \frac{d^2 I}{dz^2} - g^2 I = 0 \text{ όπου } g = a + jb = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

Το γ στις πιο πάνω εξισώσεις είναι η σταθερά διάδοσης (propagation constant) και μετριέται ανά μέτρο, το α είναι η σταθερά εξασθένησης (attenuation constant) και μετριέται σε dB/m και το β είναι η σταθερά φάσης (phase constant) που μετριέται σε radians/m. \mathbf{V} και \mathbf{I} ορίζονται ως οι φάσορες της τάσης και ρεύματος αντίστοιχα. Το μήκος κύματος λ και η ταχύτητα του κύματος u δίνονται από: $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$ και $u = \frac{\omega}{\beta}$ αντίστοιχα.

Σταθερά Διάδοσης

Η σταθερά διάδοσης ενός ημιτονοειδούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι ένα μέτρο της αλλαγής που υφίσταται το εύρος και η φάση του κύματος καθώς μεταδίδεται σε μια δεδομένη κατεύθυνση. Η ποσότητα που μετράται μπορεί να είναι η τάση ή το ρεύμα σε ένα κύκλωμα ή σε ένα πεδίο πεδίου όπως η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ή η πυκνότητα ροής. Η ίδια η σταθερά διάδοσης μετρά την αλλαγή ανά μονάδα μήκους αλλά είναι σαν ποσότητα αδιάστατη. Η σταθερά διάδοσης εκφράζεται λογαριθμικά, σχεδόν καθολικά στη βάση e , και όχι στην πιο συνηθισμένη βάση 10 που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες σε άλλες καταστάσεις. Η μετρούμενη ποσότητα, όπως η τάση, εκφράζεται ως ημιτονοειδής φάση. Η φάση του ημιτονοειδούς κυμαίνεται ανάλογα με την απόσταση, με αποτέλεσμα η σταθερά διάδοσης να είναι ένας πολύπλοκος αριθμός, το φανταστικό μέρος που προκαλείται από την αλλαγή φάσης.

Η σταθερά διάδοσης, το σύμβολο γ , για ένα δεδομένο σύστημα ορίζεται από την αναλογία του σύνθετου πλάτους στην πηγή του κύματος προς το σύνθετο εύρος σε κάποια απόσταση x . Δηλαδή $e^{\gamma x} = \frac{A_0}{A_x}$. Εφόσον η σταθερά διάδοσης είναι σταθερή ποσότητα μπορούμε να γράψουμε $\gamma = \alpha + i\beta$ όπου α :σταθερά εξασθένησης και β :σταθερά φάσης.

Η λύση των γραμμικών διαφορικών εξισώσεων

$$\frac{d^2V}{dz^2} - \gamma^2 V = 0 \text{ και } \frac{d^2I}{dz^2} - \gamma^2 I = 0$$

δίνεται από
$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \quad \text{και} \quad I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z}$$

Όπου V_0^+ , V_0^- , I_0^+ και I_0^- είναι τα πλάτη της τάσης και ρεύματος και τα σύμβολα + και - αντιπροσωπεύουν την κατεύθυνση που ταξιδεύει το κύμα στις κατευθύνσεις +z και -z. Έτσι βρίσκουμε τη στιγμιαία έκφραση της τάσης (instantaneous expression for voltage) που είναι:

$$V(z,t) = \text{Re}(V(z)e^{-j\omega t}) \quad V(z,t) = V_0^+ e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) + V_0^- e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z)$$

4.8.1 Χαρακτηριστική Αντίσταση της Γραμμής

Ορίζουμε ως **χαρακτηριστική αντίσταση Z_o της γραμμής** την αναλογία του θετικού κύματος τάσης (positive traveling voltage wave) που ταξιδεύει με το κύμα ρεύματος σε κάθε σημείο στη γραμμή. Το Z_o είναι ανάλογο του η , της εγγενούς αντίστασης (intrinsic impedance) του μέσου που διαδίδεται

το κύμα. Το Z_o δίνεται από τη σχέση : $Z_o = \frac{V_o^+}{I_o^+} = -\frac{V_o^-}{I_o^-} = \frac{R + j\omega L}{G + j\omega C} = \frac{g}{G + j\omega C}$ ή

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = R_o + jX_o \text{ όπου } R_o \text{ (σε Ohms) και } X_o \text{ (σε Ohms) είναι το}$$

πραγματικό και φανταστικό μέρος του Z_o αντίστοιχα. Το γ και η Z_o είναι πολύ σημαντικές ιδιότητες της γραμμής γιατί εξαρτώνται από τις παραμέτρους της γραμμής R, L, G, C και τη συχνότητα.

Γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες(Lossless line)

Για να είναι μια γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες πρέπει οι αγωγοί της γραμμής να είναι τέλειοι και το διηλεκτρικό υλικό που χωρίζει τους δύο αγωγούς να μην έχει απώλειες ($\sigma = 0$). Για μια τέτοια γραμμή ισχύει $R=G=0$. Σύμφωνα με

τα παραπάνω τελικά προκύπτει ότι: $a = 0, \gamma = j\beta = j\omega\sqrt{LC}, u = \frac{w}{b} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = f\lambda$

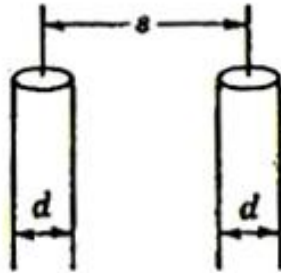
$$C_o = 0, Z_o = R_o = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Περίπτωση	Σταθερά διάδοσης (Propagation constant) $\gamma = \alpha + j\beta$	Χαρακτηριστική αντίσταση (Characteristic impedance) $Z_o = R_o + jX_o$
Γενική	$\sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$	$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$
Χωρίς Απώλειες	$0 + j\omega\sqrt{LC}$	$\sqrt{\frac{L}{C}} + j0$

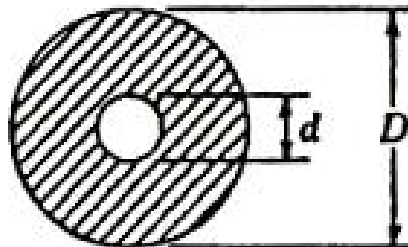
Τύποι Χαρακτηριστικής Αντίστασης Z_o

∅ Παράλληλη γραμμή: k : διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r)

$$Z_o = \frac{276}{\sqrt{k}} \log 2s/d \quad \text{με τιμές : } 150\Omega < Z_o < 600\Omega$$

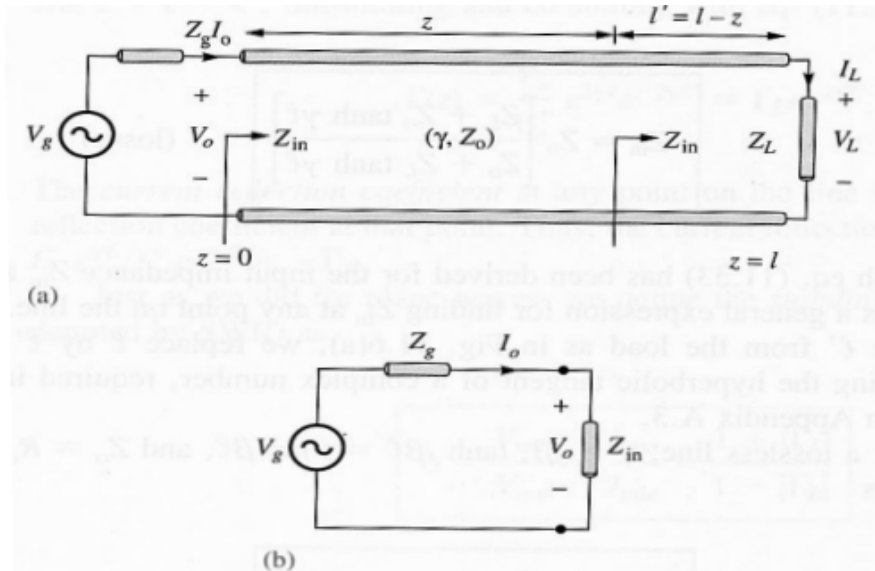


∅ Ομοαξονική Γραμμή: $Z_o = \frac{138}{\sqrt{k}} \log D/d$ με τιμές $40\Omega < Z_o < 150\Omega$



4.8.2 Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου

Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε μια γραμμή μεταφοράς μήκους l , που χαρακτηρίζεται από το γ και το Z_0 όπως φαίνεται παρακάτω :



Κοιτάζοντας μέσα από τη γραμμή, η γεννήτρια βλέπει τη γραμμή με το φορτίο ως τη σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} . Σκοπός μας είναι να μπορούμε να υπολογίσουμε αυτή την αντίσταση όπως και την αναλογία στάσιμου κύματος και την ισχύ στη γραμμή. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε τη γραμμή μεταφοράς που επεκτείνεται από το $z=0$ στη γεννήτρια μέχρι το $z=l$ στο φορτίο. Πρώτα χρειαζόμαστε το V_o^+ και το I_o^+ . Από τις εξισώσεις $V(z) = V_o^+ e^{-\gamma z} + V_o^- e^{\gamma z}$ και

$$I(z) = \frac{V_o^+}{Z_0} e^{-\gamma z} - \frac{V_o^-}{Z_0} e^{\gamma z} \quad \text{και με συνθήκες ότι } V_o = V(z=0), I_o = I(z=0)$$

καταλήγουμε στις σχέσεις: $V_o^+ = \frac{1}{2} (V_o + Z_0 I_o)$ και $V_o^- = \frac{1}{2} (V_o - Z_0 I_o)$. Αν η

σύνθετη αντίσταση εισόδου στα τερματικά (terminals) εισόδου είναι

Z_{in} , τότε η τάση εισόδου V_o και το ρεύμα εισόδου I_o εύκολα μπορούν να

υπολογιστούν από το πιο πάνω σχήμα $V_o = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_g} V_g$ και $I_o = \frac{V_g}{Z_{in} + Z_g}$. Αν

θεωρήσουμε ότι $V_L = V(z=l), I_L = I(z=l)$ τότε ομοίως με πριν θα έχουμε:

$$V_o^+ = \frac{1}{2} (V_L + Z_o * I_L) e^{gl} \text{ και } V_o^- = \frac{1}{2} (V_L - Z_o * I_L) e^{gl}$$

Μετά υπολογίζουμε τη σύνθετη αντίσταση εισόδου $Z_{in} = \frac{V_s(z)}{I_s(z)}$ σε

οποιοδήποτε σημείο της γραμμής. Για παράδειγμα στη γεννήτρια

$$Z_{in} = \frac{V_s(z)}{I_s(z)} = \frac{Z_o (V_o^+ + V_o^-)}{V_o^+ + V_o^-} \text{ και αντικαθιστώντας στις προηγούμενες σχέσεις}$$

ξέροντας επίσης ότι $\tanh(gl) = \frac{\sinh(gl)}{\cosh(gl)} = \frac{e^{gl} - e^{-gl}}{e^{gl} + e^{-gl}}$ καταλήγουμε στο

$$Z_{in} = Z_o \frac{\hat{e}Z_L + Z_o \tanh(gl)}{\hat{e}Z_o + Z_L \tanh(gl)} \hat{u} \text{ (με την προϋπόθεση ότι έχουμε απώλειες)}$$

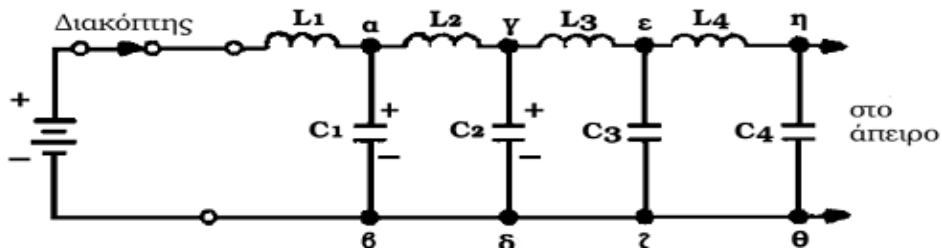
Αν και η πιο πάνω εξίσωση έχει παραχθεί για τη σύνθετη αντίσταση εισόδου στη γεννήτρια, είναι μια γενική εξίσωση για να βρίσκουμε το Z_{in} σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής. Για γραμμή χωρίς απώλειες έχουμε $g = jb$, $\tanh(jb l) = j \tanh(bl)$ και $Z_o = R_o$ η παραπάνω σχέση παίρνει την μορφή

$$Z_{in} = Z_o \frac{\hat{e}Z_L + jZ_o \tanh(bl)}{\hat{e}Z_o + jZ_L \tanh(bl)} \hat{u} \text{ (με την προϋπόθεση ότι δεν έχουμε απώλειες)}$$

Με αυτό τον τρόπο δείχνουμε ότι η σύνθετη αντίσταση εισόδου αλλάζει περιοδικά με την απόσταση l από το φορτίο. Η ποσότητα bl ονομάζεται ηλεκτρικό μήκος (electrical length) της γραμμής και μετριέται σε degrees ή radians.

4.8.3 Καθυστέρηση Διάδοσης Κύματος σε Γραμμές Μεταφοράς

Παρομοιάζουμε τη γραμμή μεταφοράς με το παρακάτω ηλεκτρικό κύκλωμα



1. Χρονική στιγμή $t=0$: Ο διακόπτης κλείνει, η γραμμή είναι αρχικά αφόρτιστη, οι πυκνωτές δρουν ως βραχυκύκλωμα ενώ τα πηνία αντιστέκονται στην αύξηση του ρεύματος
2. Χρονική στιγμή $t=0+$: Ο C1 φορτίζεται μετά την διέλευση του ρεύματος από την επαγωγική αντίσταση. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης τα α-β και α-γ έχουν την ίδια διαφορά δυναμικού
3. Όταν ο C1 φορτιστεί πλήρως δρα ως ανοιχτοκύκλωμα και το ρεύμα διαρρέει το L_2 .

$$V_c = \frac{Q_c}{C} = \frac{I \cdot t}{C}, \quad V_L = L \cdot \frac{dI}{dt} = L \cdot \frac{I}{t} \quad \Rightarrow \quad v_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Παρομοιάζουμε τώρα τη γραμμή μεταφοράς ως μέσο διάδοσης Η/Μ κυμάτων

∅ Ταχύτητα διάδοσης Η/Μ σε ένα μέσο διηλεκτρικού κ: $u_p = \frac{u_c}{\sqrt{k}}$

∅ Παράγοντας ταχύτητας u_f για ένα διηλεκτρικό μέσο είναι ο λόγος μείωσης της ταχύτητας σε σχέση με την ταχύτητα διάδοσης στο κενό

$$u_f = \frac{u_p}{u_c} = \frac{1}{\sqrt{k}} \text{ με } k=1.2-2.8 \Rightarrow u_f=(60\%-90\%)u_c$$

∅ Το μήκος κύματος της συχνότητας f σε μια γραμμή μεταφοράς

μειώνεται σε $\frac{1}{\sqrt{k}}$

4.8.4 Ανακλάσεις σε Γραμμές Μεταφοράς

Μια γραμμή μεταφοράς (είτε σαν ηλεκτρικό κύκλωμα είτε σαν μέσο διάδοσης Η/Μ κυμάτων) η τάση παρομοιάζει το ηλεκτρικό πεδίο και το ρεύμα αντίστοιχα το μαγνητικό πεδίο. Όταν ένα «κύκλωμα» συνδέεται σε ένα άλλο, τότε μπορούν να εμφανιστούν ανακλάσεις, όπως εμφανίζονται στα Η/Μ κύματα.. Το πεδίο (ρεύμα/τάση) που μεταφέρει η γραμμή ονομάζεται **Προσπίπτον Η/Μ** ενώ το πεδίο που περνά στο φορτίο λέγεται **Μεταδιδόμενο Η/Μ** και τέλος το πεδίο το οποίο επιστρέφει στη γραμμή αποκαλείται **Ανακλώμενο Η/Μ**. Η ανάκλαση εξαρτάται από τις εμπεδήσεις Z_0 της γραμμής και Z_L του φορτίου και ανάλογα με την τιμή τους διαχωρίζουμε τις παρακάτω δύο περιπτώσεις:

- 1) $Z_L = Z_0$ τότε η γραμμή είναι **προσαρμοσμένη (matched)** στο φορτίο, μη-συντονισμένη (non-resonant) ή επίπεδη (flat) με βέλτιστη μεταφορά ισχύος από τη γραμμή στο φορτίο χωρίς εμφάνιση ανακλάσεων.
- 2) $Z_L \neq Z_0$ τότε έχουμε **συντονισμένη (resonant)** γραμμή όπου μέρος της τάσης/ρεύματος που μεταφέρεται (προσπίπτον) μεταδίδεται και στο φορτίο (μεταδιδόμενο) ενώ αντίθετα ένα μέρος ανακλάται (ανακλώμενο). Μέρος της ισχύος δε μεταφέρεται στο φορτίο λόγω ανακλάσεων και στη γραμμή μεταφοράς το άθροισμα του προσπίπτοντος κύματος και των ανακλάσεών του.

Λόγος Ανάκλασης Τάσεων

Γενικά είναι μιγαδικός αριθμός με τιμές $0 \leq |\rho| \leq 1$ και περιπτώσεις: $\rho=0$ δεν υπάρχει ανάκλαση, $|\rho|=1$, υπάρχει πλήρης ανάκλαση, $\rho < 0$ υπάρχει αλλαγή φάσης

$$G = \rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Λόγος Ανάκλασης Ρεύματος

$$T = \frac{I_r}{I_i} = -G$$

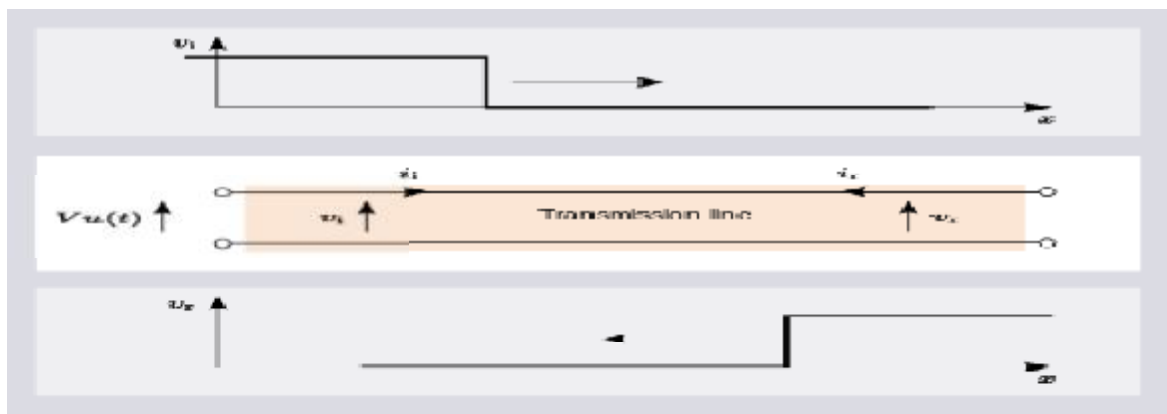
Λόγος Ανάκλασης Ισχύος

$$R = \frac{P_r}{P_i} = |G|^2$$

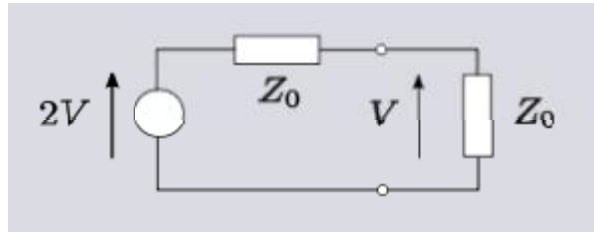
Ανάκλαση DC σε Ανοικτό Κύκλωμα

Το προσπιπτούμενο κύμα που κινείται στη γραμμή δεν επηρεάζεται από το ανοικτό κύκλωμα στο τέλος της γραμμής. Δεν υπάρχει κάποιο αποτέλεσμα μέχρι το αίτιο του κύματος φτάσει στο τέλος της γραμμής. Το σήμα δεν μπορεί να ξέρει τι ακριβώς γίνεται στο τέλος της γραμμής και επηρεάζεται από το χαρακτηριστικά της γραμμής. Παρόλα αυτά λόγω του μήκους της γραμμής το σήμα μας θα φτάσει στο ανοικτό κύκλωμα της γραμμής μετά από κάποιο χρόνο όπου το ρεύμα είναι μηδέν διότι το τέλος της γραμμής είναι ανοικτοκυκλωμένο. Δεδομένου ότι η φόρτιση συνεχίζει να φθάνει στο τέλος της γραμμής μέσω του προσπίπτοντος ρεύματος, αλλά κανένα ρεύμα δεν φεύγει από τη γραμμή, τότε η διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου απαιτεί να υπάρχει ένα ίσο και αντίθετο ρεύμα στο τέλος της γραμμής. Ουσιαστικά, αυτός είναι ο ισχύων νόμος του Kirchhoff. Αυτό το ίσο και αντίθετο ρεύμα είναι το ανακλώμενο ρεύμα $I_r = \frac{V_r}{Z_0}$. Έτσι πρέπει επίσης να υπάρχει μια ανακλώμενη τάση

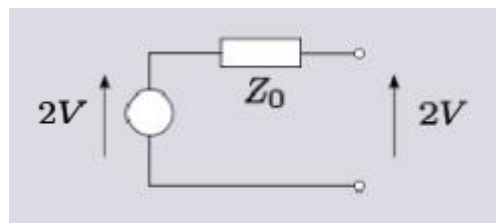
V_r για να οδηγήσει το ανακλώμενο ρεύμα κατά μήκος της γραμμής. Αυτή η τάση που αντικατοπτρίζεται πρέπει να υπάρχει λόγω της διατήρησης της ενέργειας. Η πηγή παρέχει ισχύ με ρυθμό $V * I$. Η ενέργεια αυτή δεν διαχέεται στη γραμμή ή τον τερματισμό της και πρέπει να πάει κάπου. Η μόνη διαθέσιμη κατεύθυνση είναι πάλι πίσω στη γραμμή. Δεδομένου ότι το ανακλώμενο ρεύμα είναι ίσο σε μέγεθος με το ρεύμα προσπίπτουσας, πρέπει επίσης $V_i = V_r$. Αυτές οι δύο τάσεις θα προστεθούν μεταξύ τους έτσι ώστε μετά τον κατοπτρισμό τους θα εμφανιστεί διπλάσια τάση στο τέλος της γραμμής. Καθώς η αντανάκλαση προωθεί την γραμμή, η ανακλώμενη τάση συνεχίζει να προσθέτει στην προσπίπτουσα τάση και το ανακλώμενο ρεύμα συνεχίζει να αφαιρείται από το προσπίπτον ρεύμα. Το ανακλώμενο μέρος της τάσης φτάνει στο τέλος της γεννήτριας και η κατάσταση της διπλής τάσης και του μηδενικού ρεύματος θα ανήκει εκεί επίσης και σε όλο το μήκος της γραμμής. Εάν η γεννήτρια αντιστοιχεί στη γραμμή με σύνθετη αντίσταση Z_0 το μεταβατικό κομμάτι της τάσης θα απορροφηθεί στην εσωτερική σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας και δεν θα υπάρξουν περαιτέρω ανακλάσεις. Έστω ότι έχουμε βηματική τάση στην είσοδο της τότε σχηματικά έχουμε:



Αυτός ο διπλασιασμός τάσης μπορεί να γίνει σαφέστερος αν ληφθούν υπόψη οι τάσεις του κυκλώματος όταν η γραμμή είναι τόσο μικρή που μπορεί να αγνοηθεί για τους σκοπούς της ανάλυσης. Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας γεννήτριας που ταιριάζει με ένα φορτίο Z_0 το οποίο παράγει τάση V φαίνεται παρακάτω. Δηλαδή, η γεννήτρια μπορεί να αναπαρασταθεί σαν μια ιδανική γεννήτρια τάσης διπλάσιας τάσης που πρόκειται να τροφοδοτήσει ένα φορτίο Z_0



Εντούτοις, αν η γεννήτρια είναι ανοιχτό κύκλωμα, εμφανίζεται μια τάση $2V$ στο τέλος της γραμμής. Η ίδια κατάσταση ισχύει αν εισέλθει μια πολύ μικρή γραμμή μεταφοράς μεταξύ της γεννήτριας και του ανοικτού κυκλώματος. Αν, ωστόσο, έχουμε μεγαλύτερη γραμμή με χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση Z_0 παρατηρείται σημαντική καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, όπου η γεννήτρια αρχικά προσαρμόζεται στην αντίσταση της γραμμής με τάση V στα άκρα της. Μετά από κάποιο χρόνο μια αντανakλώμενη μεταβατική επιστροφή θα επιστρέψει από το τέλος της γραμμής με την "πληροφορία" για το τι τελείωσε η γραμμή με τάση $2V$.



Ανάκλαση DC σε Βραχυκύκλωμα

Η αντανάκλαση από μια γραμμή βραχυκυκλώματος μπορεί να περιγραφεί με όρους παρόμοιους με εκείνους από μια ανοικτή γραμμή. Ακριβώς όπως στην περίπτωση ανοικτού κυκλώματος, το ρεύμα πρέπει να είναι μηδέν στο τέλος της γραμμής, στην περίπτωση βραχυκυκλώματος η τάση πρέπει να είναι μηδενική δεδομένου ότι δεν μπορεί να υπάρξει βολτ σε ένα βραχυκύκλωμα. Και πάλι, όλη η ενέργεια πρέπει να αντανakλάται πίσω στη γραμμή και η ανακλώμενη τάση πρέπει να είναι ίση και αντίθετη προς την τάση προσπίπτουσας από τον νόμο τάσης του

Kirchhoff:

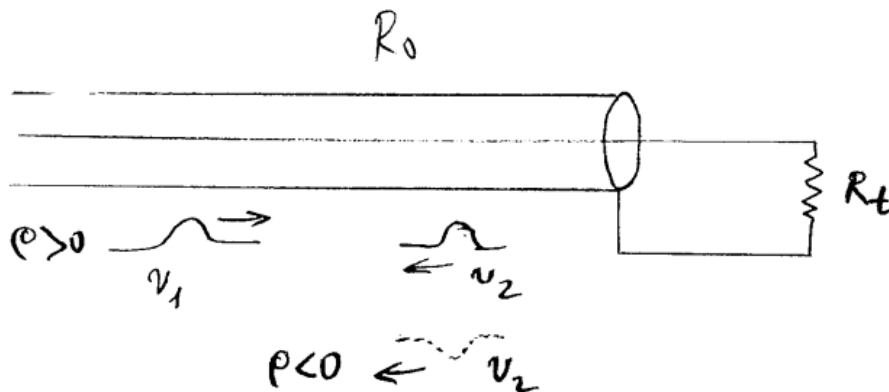
$$V_r = -V_i$$

$$I_r = -I_i$$

Καθώς η αντανάκλαση επιστρέφει στη γραμμή, οι δύο τάσεις αφαιρούνται και ακυρώνονται, ενώ τα ρεύματα θα προσθέσουν (η ανάκλαση είναι διπλή αρνητική - αρνητικό ρεύμα που κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση),

Τελικά ανάλογα με το φόρτο στο τέρμα της γραμμής μεταφοράς αλλά και ανάλογα με την εμπέδηση στην τροφοδοσία της, δημιουργούνται ανακλάσεις των σημάτων που μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Στις γραμμές μεταφοράς ισχύος μπορεί να δημιουργηθούν υπερτάσεις και να καταστραφούν μετασχηματιστές του δικτύου. Έστω ότι έχουμε γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες με χαρακτηριστική αντίσταση R_0 , αν παλμός τάσης u_1 οδεύει προς το τέρμα της γραμμής, ισχύει η

$$\text{σχέση } R_0 = \frac{u_i}{i_i}.$$



Αν $G = \Gamma_t = \frac{R_t - R_0}{R_t + R_0} > 0$ δημιουργείται ανακλώμενος παλμός τάσης $u_2 = \Gamma u_1$ που

κινείται προς την αρχή της γραμμής ο οποίος έχει την ίδια πολικότητα με τον προσπίπτοντα. Για τους αντίστοιχους παλμούς ρεύματος ισχύουν $i_2 = -\Gamma i_1$. Αν $G < 0$ τότε ο ανακλώμενος παλμός τάσης έχει αντίθετο πρόσημο από αυτό του προσπίπτοντα. Προφανώς αν η γραμμή είναι προσαρμοσμένη οπότε $R_t = R_0, \Gamma = 0$, τότε δεν υπάρχει ανακλώμενος παλμός. Αν $R_t = \infty$ (ανοιχτή γραμμή) τότε $G = 1$ οπότε $u_2 = u_1, i_t = 2i_1$ κατά την επικάλυψη στο τέρμα της γραμμής, Αν $R_t = 0$ (γραμμή βραχυκυκλωμένη) τότε $G = -1$ οπότε $u_2 = -u_1, i_t = 0$ κατά την επικάλυψη στο τέρμα της γραμμής. Γενικώς κατά την επικάλυψη στο τέρμα της γραμμής ισχύουν

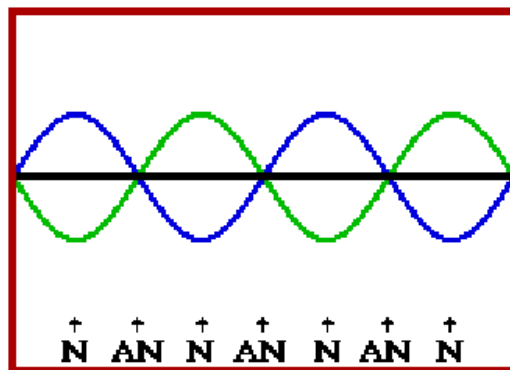
$$u_t = u_1 + u_2 = (1 + G)u_1 = \Gamma_t u_1$$

$$i_t = i_1 + i_2 = i_1 + (-\Gamma_t i_1) = (1 - G)i_1$$

Ο συντελεστής $\Gamma_t = 1 + G$ λέγεται συντελεστής μεταφοράς

4.8.5 Στάσιμα Κύματα σε Γραμμές Μεταφοράς

Για μια γραμμή μεταφοράς που φέρει ημιτονοειδή κύματα, η φάση του ανακλώμενου κύματος μεταβάλλεται διαρκώς με απόσταση, σε σχέση με το προσπίπτον κύμα, καθώς προχωράει προς τα κάτω στη γραμμή. Λόγω αυτής της συνεχούς αλλαγής υπάρχουν ορισμένα σημεία στη γραμμή όπου το ανακλώμενο κύμα θα είναι σε φάση με το προσπίπτον κύμα και το πλάτος των δύο κυμάτων θα προστεθεί. Επίσης θα υπάρχουν και άλλα σημεία όπου τα δύο κύματα βρίσκονται σε αντίθετη φασική φάση και κατά συνέπεια θα αφαιρούνται. Στα τελευταία αυτά σημεία το πλάτος είναι στο ελάχιστο και είναι γνωστά ως κόμβοι. Εάν το κύμα προσπίπτοντος έχει πλήρως αντικατοπτριστεί και η γραμμή είναι χωρίς απώλειες, θα υπάρξει πλήρης ακύρωση στους κόμβους με μηδενικό σήμα που υπάρχει εκεί παρά την συνεχιζόμενη μετάδοση των κυμάτων και στις δύο κατευθύνσεις. Τα σημεία όπου τα κύματα είναι σε φάση είναι αντι-κόμβοι και αντιπροσωπεύουν μια κορυφή στο πλάτος. Οι κόμβοι και οι αντι-κόμβοι εναλλάσσονται κατά μήκος της γραμμής και το συνδυασμένο εύρος κύματος μεταβάλλεται συνεχώς μεταξύ τους. Αν στα άκρα μιας γραμμής μεταφοράς εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση, τότε αυτή μεταδίδεται κατά τρόπο αντίστοιχο της DC κατά μήκος της. Σε κάθε σημείο της γραμμής, η τάση μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο και αν «παγώσω» το χρόνο και δω την τάση κατά μήκος της γραμμής είναι επίσης ημιτονοειδής. Είναι δηλαδή ένα κύμα που μεταδίδεται στη γραμμή με μια ταχύτητα μετάδοσης μικρότερη από αυτή του φωτός. Στο άκρο της γραμμής συμβαίνουν ανακλάσεις με τους ίδιους κανόνες όπως και στην περίπτωση DC. Τελικά, πάνω στη γραμμή υπάρχουν δύο ημιτονοειδή κύματα:– **προσπίπτον**: από την πηγή προς το φορτίο– **ανακλώμενο**: από το φορτίο προς την πηγή. Η τελική τάση είναι το άθροισμα τους που είναι **στάσιμο κύμα**. Το συνδυασμένο κύμα φαίνεται ότι στέκεται ακόμα στη γραμμή και καλείται στάσιμο κύμα.



Το προσπίπτον κύμα μπορεί να χαρακτηριστεί σύμφωνα με τη σταθερά μετάδοσης, την τάση της πηγής V και την απόσταση x από αυτή την τάση σύμφωνα με τη σχέση $V_i = V * e^{-\gamma x}$. Ωστόσο, είναι συχνά πιο βολικό να εργαζόμαστε σε σχέση με την απόσταση από το φορτίο x (με $x = l - x'$) και τη δεδομένη τάση V_{iL} που είναι σε αυτό το σημείο. Έτσι προκύπτει ο τύπος $V_i = V_{iL} * e^{-\gamma x}$. Όπως βλέπουμε ο εκθέτης είναι θετικός επειδή το x μετριέται στην αντίστροφη κατεύθυνση πίσω από τη γραμμή και η τάση αυξάνεται πλησιέστερα προς την πηγή. Ομοίως, η ανακλώμενη τάση δίνεται από $V_G = \Gamma V_{iL} * e^{-\gamma x}$. Άρα η συνολική τάση στη γραμμή αναγράφεται $V_T = V_i + V_G = V_{iL} (e^{\gamma x} + \Gamma e^{-\gamma x})$.

Συχνά η προηγούμενη σχέση βολεύει να εκφραστεί με τη χρήση υπερβολικών συναρτήσεων. Οπότε τελικά θα ισχύει ότι η τάση είναι

$$V_T = V_{iL} \left[(1+G) \cosh(gx) + (1-G) \sinh(gx) \right] \dot{\epsilon}$$

Όμοια για το ρεύμα θα έχουμε ότι:

$$I_T = I_{iL} \left[(1-G) \cosh(gx) + (1+G) \sinh(gx) \right] \dot{\epsilon}$$

Οι κόμβοι εμφανίζονται όταν $\frac{\partial V_T}{\partial x} = 0$

Αυτό δεν έχει εύκολη αναλυτική λύση στη γενική περίπτωση, αλλά στην περίπτωση γραμμών χωρίς απώλειες (ή γραμμών που είναι αρκετά μικρές ώστε να θεωρούνται τέτοιες) η σταθερά διάδοσης γ αντικαθιστάται με το $i\beta$ όπου εκφράζει τη σταθερά φάσης. Τελικά η τάση θα ισούται με $V_T = V_{iL} \left[(1+G) \cosh(\beta x) + i(1-G) \sinh(\beta x) \right] \dot{\epsilon}$

Έπειτα από μαθηματική ανάλυση για $R_L < R_0$ εμφανίζονται κόμβοι ενώ για $R_L > R_0$ το πρώτο σημείο είναι ένας αντι-κόμβος και από εκεί και πέρα θα εναλλάσσονται. Για απολήξεις που δεν είναι καθαρά ανθεκτικές, η απόσταση και η εναλλαγή παραμένουν οι ίδιες, αλλά ολόκληρο το σχέδιο μετατοπίζεται κατά μήκος της γραμμής με σταθερή ποσότητα που σχετίζεται με τη φάση G .

Ανάκλαση AC σε Ανοικτό Κύκλωμα

Όπως και στην περίπτωση DC, η τάση ανακλάται με την ίδια πολικότητα. Το άθροισμα των δύο κυμάτων δημιουργεί ένα στάσιμο κύμα τάσης:

- μεγιστοποιείται στο σημείο τερματισμού
- μηδενίζεται σε απόσταση $\lambda/4$ από τον τερματισμό
- το μοτίβο επαναλαμβάνεται ανά $\lambda/2$

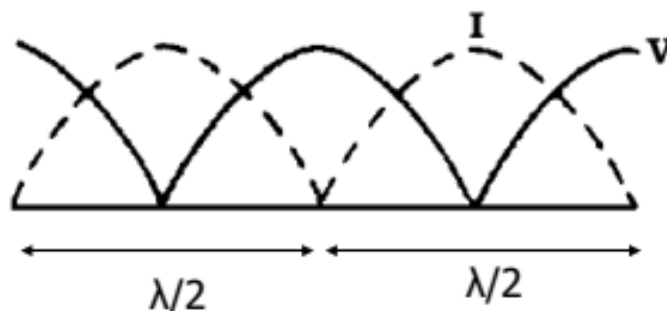
Η ανάκλαση του ρεύματος γίνεται με αντίθετη πολικότητα. Στον τερματισμού το ολικό ρεύμα είναι πάντοτε μηδενικό (λόγω ανοιχτού κυκλώματος). Το άθροισμα των δύο κυμάτων δημιουργεί ένα στάσιμο κύμα ρεύματος:

- μηδενίζεται στο σημείο τερματισμού
- μεγιστοποιείται σε απόσταση $\lambda/4$ από τον τερματισμό
- το μοτίβο επαναλαμβάνεται ανά $\lambda/2$



Στάσιμο Κύμα σε Ανοικτό Κύκλωμα

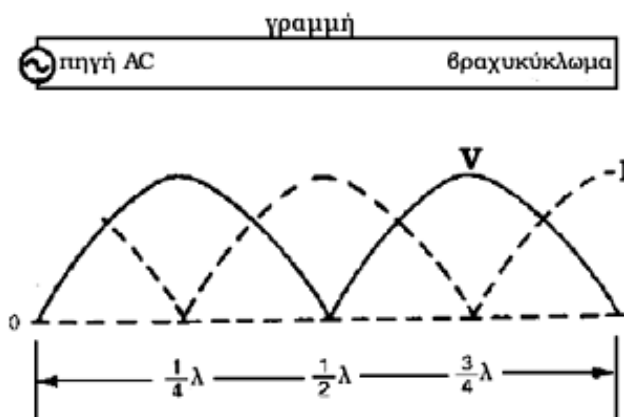
Κατά την μελέτη των στάσιμων κυμάτων, μας ενδιαφέρουν οι μέγιστες απόλυτες τιμές των μεγεθών τάσης και ρεύματος



Όπως παρατηρούμε συναντάμε μέγιστο τάσης στον τερματισμό ενώ επαναλαμβάνεται μηδενισμός τάσης σε $\lambda/4$ και μέγιστο ρεύματος σε $\lambda/4$ ενώ έχουμε μηδενισμός ρεύματος στον τερματισμό με περιοδικότητα $\lambda/2$.

Στάσιμο Κύμα σε Βραχυκύκλωμα

Συμβαίνουν αντίθετα από ότι στο ανοικτό κύκλωμα



Δηλαδή έχουμε μηδενισμό τάσης στον τερματισμό(βραχυκύκλωμα) ενώ επαναλαμβάνεται μέγιστο τάσης σε $\lambda/4$ και μέγιστο ρεύματος στον τερματισμό(βραχυκύκλωμα). Τέλος έχουμε μηδενισμός ρεύματος σε $\lambda/4$ και περιοδικότητα $\lambda/2$.

Αναλογία Τάσης Στάσιμου Κύματος(Voltage Standing Wave Ratio)

Ισχύει ότι $VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$ για μια γραμμή χωρίς απώλειες. Το VSWR προσεγγίζει

ασυμπτωτικά την ενότητα με την απόσταση από τον τερματισμό ή την ασυνέχεια. Το VSWR και οι θέσεις των κόμβων είναι παράμετροι που μπορούν να μετρηθούν με ένα όργανο. Αυτό το όργανο χρησιμοποιεί το φαινόμενο της αντανάκλασης για να κάνει πολλές διαφορετικές μετρήσεις σε συχνότητες μικροκυμάτων. Μία χρήση είναι ότι η VSWR και η θέση κόμβου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης ενός εξαρτήματος δοκιμής που τερματίζει τη σχισμή. Αυτή είναι μια χρήσιμη μέθοδος επειδή η μέτρηση των αντιστάσεων με απευθείας μέτρηση τάσεων και ρευμάτων είναι δύσκολη σε αυτές τις συχνότητες. Έτσι έχουμε ότι το VSWR είναι μέτρο αντιστοίχισης της αντίστασης φορτίων με τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση μιας γραμμής μεταφοράς ή ενός κυματοδηγού. Το SWR συνήθως θεωρείται από την άποψη της μέγιστης και της ελάχιστης εναλλασσόμενης τάσης κατά μήκος της γραμμής μετάδοσης, που ονομάζεται λόγος τάσης κύματος τάσης ή VSWR. Για παράδειγμα, η τιμή VSWR 1,2: 1 δηλώνει μια τάση εναλλασσόμενου ρεύματος λόγω των σταθερών κυμάτων κατά μήκος της γραμμής μετάδοσης που φτάνει μια τιμή αιχμής 1,2 φορές εκείνη της ελάχιστης τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος κατά μήκος αυτής της γραμμής. Το SWR μπορεί επίσης να οριστεί ως ο λόγος του μέγιστου εύρους προς το ελάχιστο εύρος των ρευμάτων της γραμμής μεταφοράς, της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ή της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Το SWR μετράται συνήθως χρησιμοποιώντας ένα ειδικό όργανο που ονομάζεται μετρητής SWR. Ένας δεδομένος μετρητής SWR μπορεί να ερμηνεύσει μόνο τη σύνθετη αντίσταση από άποψη SWR. Το SWR χρησιμοποιείται ως μέτρο αντιστοίχισης εμπέδησης ενός φορτίου με τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση μιας γραμμής μετάδοσης που μεταφέρει σήματα ραδιοσυχνότητας (RF) (σύνδεση με ραδιοπομπούς και δέκτες με τις κεραίες τους, καλωδιακές τηλεοπτικές συνδέσεις με τηλεοπτικούς δέκτες και ενισχυτές διανομής. Η αντιστοίχιση εμπέδησης επιτυγχάνεται όταν η σύνθετη αντίσταση πηγής είναι η πολύπλοκη σύζευξη της εμπέδησης φορτίου. Ο ευκολότερος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό και ο τρόπος με τον οποίο ελαχιστοποιούνται οι απώλειες κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς είναι τόσο για την πηγή όσο και για το φορτίο να είναι πραγματικές, δηλαδή καθαρές αντιστάσεις, ίσες με τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς. Όταν υπάρχει αναντιστοιχία μεταξύ της αντίστασης φορτίου και της γραμμής μετάδοσης, μέρος του εμπρόσθιου κύματος που αποστέλλεται προς το φορτίο ανακλάται πίσω κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς προς την πηγή. Η πηγή βλέπει στη συνέχεια μια διαφορετική αντίσταση από αυτήν που αναμένεται, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη (ή σε ορισμένες περιπτώσεις, περισσότερη) ισχύ που παρέχεται από αυτήν, το αποτέλεσμα είναι πολύ ευαίσθητο στο ηλεκτρικό μήκος της γραμμής μεταφοράς. Μια τέτοια αναντιστοιχία είναι συνήθως ανεπιθύμητη και οδηγεί σε στάσιμα κύματα κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς τα οποία μεγεθύνουν τις απώλειες γραμμής μεταφοράς (σημαντικές σε υψηλότερες συχνότητες και για μεγαλύτερα καλώδια). Το SWR είναι ένα μέτρο του βάθους αυτών των σταθερών κυμάτων και είναι συνεπώς ένα μέτρο της αντιστοίχισης του φορτίου με τη γραμμή μεταφοράς. Ένα αντιστοιχισμένο φορτίο θα είχε ως αποτέλεσμα ένα SWR 1: 1 που δεν συνεπάγεται κανένα ανακλώμενο κύμα. Ένα άπειρο SWR αντιπροσωπεύει πλήρη αντανάκλαση από ένα φορτίο που δεν μπορεί να απορροφήσει την ηλεκτρική ενέργεια, με όλη την προσπίπτουσα ισχύ να ανακλάται προς την πηγή.

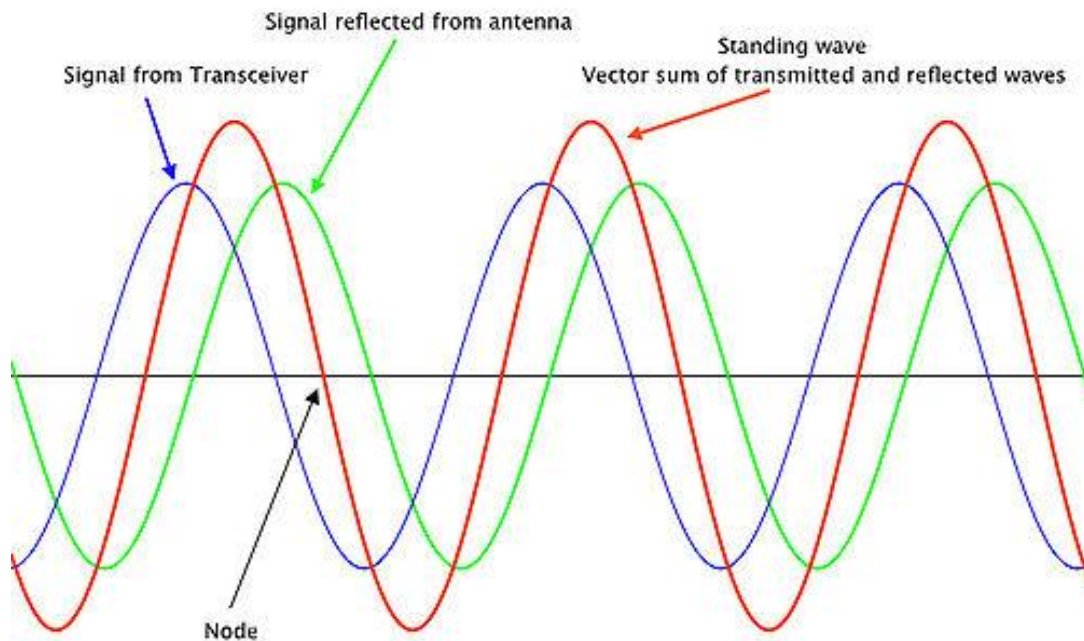
Αναλογία Τάσης Στάσιμου Κύματος και σχέση με τον Συντελεστή Αντανάκλασης

Ένα κύμα αντανάκλαται εν μέρει όταν μια γραμμή μετάδοσης τερματίζεται με διαφορετική καθαρή αντίσταση ίση με τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της.

Ορίζουμε $G = \frac{V_f}{V_r}$ με V_f :τάση του τρέχων κύματος και V_r : τάση του ανακλώμενου

κύματος, G :συντελεστής ανάκλασης. Το G είναι ένας σύνθετος αριθμός που περιγράφει τόσο το μέγεθος όσο και τη μετατόπιση φάσης της αντανάκλασης. Διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- ✓ $G = -1$ Πλήρης αρνητική ανάκλαση, όταν η γραμμή βραχυκυκλώνεται.
- ✓ $G = 0$ Καμία αντανάκλαση, όταν η γραμμή ταιριάζει απόλυτα στο φορτίο
- ✓ $G = 1$ Πλήρης θετική ανάκλαση, όταν η γραμμή είναι ανοικτοκυκλωμένη.



The voltage at the node is the median voltage compared to ground

Το SWR αντιστοιχεί άμεσα στο μέγεθος του Γ . Σε ορισμένα σημεία κατά μήκος της γραμμής, τα εμπρόσθια και τα ανακλώμενα κύματα αλληλεπιδρούν εποικοδομητικά, ακριβώς στη φάση, με το προκύπτον πλάτος V_{\max} που δίδεται από το άθροισμα των μεγεθών αυτών των κυμάτων. Έτσι προκύπτει:

$$|V_{\max}| = |V_f| + |V_r| = |V_f| + |\Gamma V_f| = (1 + |\Gamma|) |V_f|$$

Σε άλλα σημεία, τα κύματα παρεμβαίνουν κατά 180° εκτός φάσης με το πλάτος να ακυρώνεται εν μέρει και ομοίως να ισχύει:

$$|V_{\min}| = |V_f| - |V_r| = |V_f| - |\Gamma V_f| = (1 - |\Gamma|) |V_f|$$

Τελικά το VSWR ισούται με: $VSWR = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$. Δεδομένου ότι το μέγεθος του

Γ εμπίπτει πάντα στο εύρος $[0,1]$, το SWR είναι πάντα μεγαλύτερο ή ίσο με την μονάδα. Σημειώστε ότι η φάση των V_f και V_r διαφέρει κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς σε αντίθετες κατευθύνσεις μεταξύ τους. Επομένως, ο σύνθετος συντελεστής απόσπασης Γ ποικίλει μόνο σε φάση. Όταν το SWR εξαρτάται μόνο από το πολύπλοκο μέγεθος του Γ μπορεί να φανεί ότι το SWR που μετράται σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της γραμμής μετάδοσης (παραλείποντας τις απώλειες). Δεδομένου ότι η ισχύς των εμπρόσθιων και ανακλώμενων κυμάτων είναι ανάλογη προς το τετράγωνο των συστατικών τάσης που οφείλεται σε κάθε κύμα, το SWR μπορεί να εκφραστεί ως προς την εμπρόσθια και την ανακλώμενη ισχύ ως εξής:

$$SWR = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_r}{P_f}}}{1 - \sqrt{\frac{P_r}{P_f}}}$$

Με τη δειγματοληψία της σύνθετης τάσης και ρεύματος στο σημείο

εισαγωγής, ένας μετρητής SWR είναι σε θέση να υπολογίσει τις αποτελεσματικές προς τα εμπρός και ανακλώμενες τάσεις στη γραμμή μεταφοράς για τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση για την οποία έχει σχεδιαστεί ο μετρητής SWR. Δεδομένου ότι η εμπρόσθια και η ανακλώμενη ισχύς σχετίζεται με το τετράγωνο της προς τα εμπρός και της ανακλώμενης τάσης, μερικοί μετρητές SWR εμφανίζουν επίσης την εμπρόσθια και την ανακλώμενη ισχύ. Στην ειδική περίπτωση ενός φορτίου R_1 το οποίο είναι καθαρά αντίσταση αλλά δεν είναι σύμφωνο με τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής μετάδοσης Z_0 , το SWR δίδεται απλά με τον λόγο:

$$SWR = \frac{\Re\{Z_1\} + \Im\{Z_1\}^2}{\Re\{Z_0\}}$$

Με το ± 1 που επιλέγεται για να αποκτήσει μια τιμή μεγαλύτερη

από την μονάδα.

Αντίσταση εισόδου

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου που κοιτάζει μια γραμμή μετάδοσης που δεν τελειώνει με τη χαρακτηριστική σύνθεσή της στο άλλο άκρο θα είναι κάτι διαφορετικό από το Z_0 και θα είναι συνάρτηση του Μήκος της γραμμής. Η τιμή αυτής της σύνθετης αντίστασης μπορεί να βρεθεί διαιρώντας την έκφραση για την ολική τάση με την έκφραση για το συνολικό ρεύμα που δίνεται παραπάνω. Έτσι προκύπτει

$$Z_{in} = \frac{V_T}{I_T} = Z_0 \frac{\Gamma(1 + \Gamma) \cosh(\gamma x) + (1 - \Gamma) \sinh(\gamma x)}{\Gamma(1 - \Gamma) \cosh(\gamma x) + (1 + \Gamma) \sinh(\gamma x)}$$

Αντικαθιστώντας όπου $x = l$ μήκος της γραμμής και διαιρώντας με $(1 + \Gamma) \cosh(\gamma l)$ μειώνει τη παραπάνω σχέση σε $Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\gamma l)}{Z_0 + Z_L \tanh(\gamma l)}$. Όπως και στο παρελθόν, όταν εξετάζουμε μόνο μικρά

κομμάτια γραμμής μετάδοσης το γ μπορεί να αντικατασταθεί από $j\beta$ και η έκφραση μειώνεται τριγωνομετρικές συναρτήσεις με $Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 j \tanh(\beta l)}{Z_0 + Z_L j \tanh(\beta l)}$

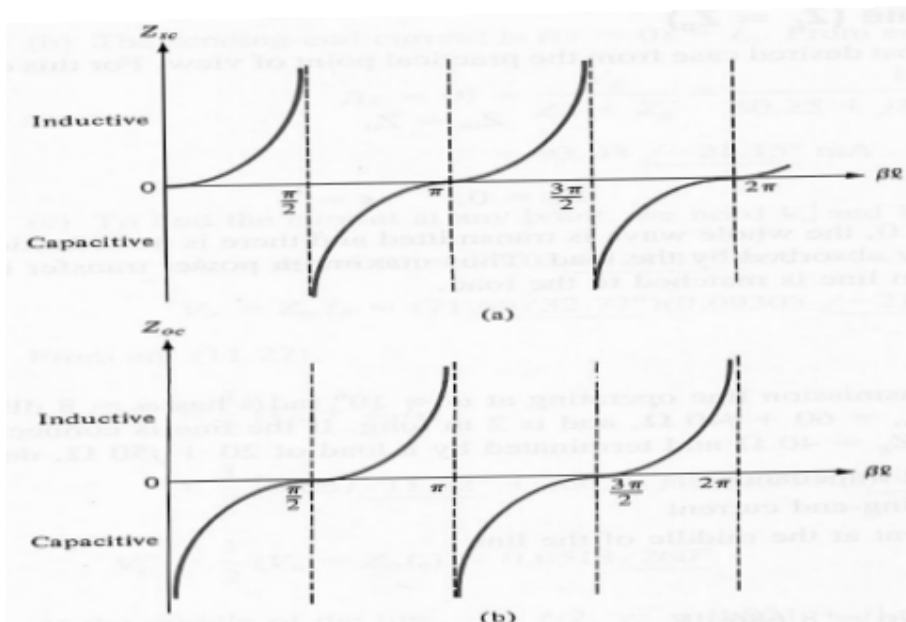
Βραχυκυκλωμένη γραμμή $Z_L = 0$ (Shorted line)

Σε αυτή τη περίπτωση $Z_{sc} = Z_{in} = jZ_0 \tan \beta l$. Ακόμα $G_L = -1$ και $s = \infty$

Γραμμή με ανοιχτό κύκλωμα $Z_L = \infty$ (Open circuited line)

Σε αυτή τη περίπτωση $Z_{oc} = \lim_{Z_L \rightarrow \infty} Z_{in} = \frac{Z_0}{j \tan \beta l}$ και $G_L = 1$, $s = \infty$

Επίσης έχουμε το $Z_{sc} Z_{oc} = Z_0^2$



Προσαρμοσμένες γραμμές $Z_L = Z_0$ (Matched line)

Αυτή είναι η πιο επιθυμητή περίπτωση για πρακτικούς λόγους. Σε αυτή την περίπτωση $Z_{in} = Z_0$ και $G_L = 0, s = 1$. Όλο το κύμα μεταφέρεται και δεν υπάρχει αντανάκλαση. Η εισερχόμενη ισχύς απορροφάται τελείως από το φορτίο. Έτσι επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ισχύς σε μια γραμμή μεταφοράς με φορτίο.

Εφαρμογές

Υπάρχουν δύο δομές που έχουν ιδιαίτερη σημασία οι οποίες χρησιμοποιούν ανακλώμενα κύματα για την τροποποίηση της σύνθετης αντίστασης. Το ένα είναι το στέλεχος που είναι ένα μικρό μήκος γραμμής που τερματίζεται σε βραχυκύκλωμα (ή μπορεί να είναι ανοικτό κύκλωμα). Παράγει μια καθαρά φανταστική αντίσταση στην είσοδό του, δηλαδή μια αντίδραση με τιμή:

$$C_{in} = Z_0 \tan(bl)$$

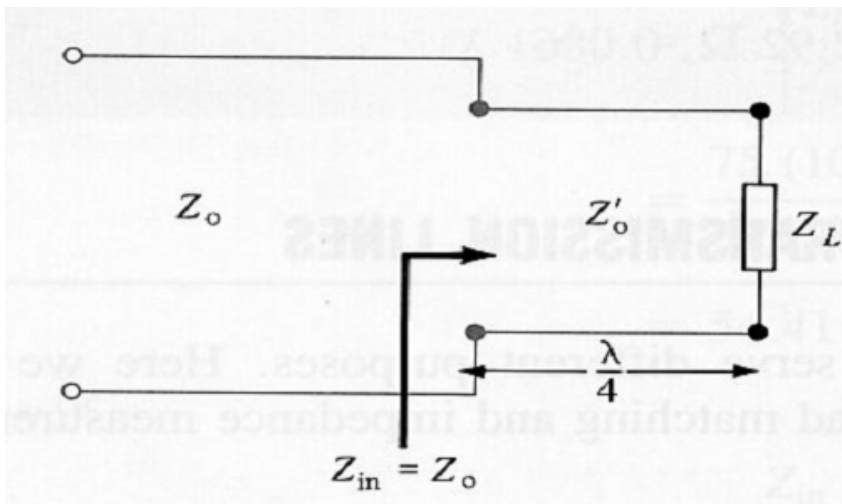
Με την κατάλληλη επιλογή του μήκους, το στέλεχος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση ενός πυκνωτή, μιας επαγωγής ή ενός κυκλώματος συντονισμού.

Η άλλη δομή είναι ο μετατροπέας ενός τετάρτου του κύματος για μέγιστη μεταφορά ισχύς, όπως είπαμε και προηγουμένως, πρέπει η γραμμή να είναι προσαρμοσμένη στο φορτίο ($Z_0 = Z_L$) έτσι ώστε να μην υπάρχει αντανάκλαση. Η προσαρμογή επιτυγχάνεται με το να χρησιμοποιούμε μικρότερα κομμάτια των

γραμμών μεταφοράς. Όταν έχουμε $l = \frac{\lambda}{4}$ ή $bl = (2\pi/\lambda)(\lambda/4) = \pi/2$ τότε

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 j \tanh(\pi/2)}{Z_0 + Z_L j \tanh(\pi/2)} = \frac{Z_0^2}{Z_L} \text{ το οποίο σημαίνει } \frac{Z_{in}}{Z_0} = \frac{Z_0}{Z_L} \text{ έτσι με το να}$$

προσθέτουμε μια γραμμή μήκους $\lambda/4$, μπορούμε να έχουμε την αγωγιμότητα εισόδου που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη αντίσταση. Ακόμα όταν δεν υπάρχει προσαρμογή της γραμμής με το φορτίο, το φορτίο Z_L μπορεί να προσαρμοστεί στη γραμμή με το να βάλουμε, πριν το φορτίο, μιαν άλλη γραμμή μεταφοράς μήκους $\lambda/4$ με χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα



Το $\lambda/4$ κομμάτι της γραμμής ονομάζεται μετατροπέας ενός τετάρτου του κύματος (quarter-wave transformer) και χρησιμοποιείται για προσαρμογές γραμμής φορτίου. Το Z_0' το διαλέγουμε έτσι ώστε: $Z_0' = \sqrt{Z_0 Z_L}$. Το κύριο μειονέκτημα του μετατροπέα είναι η ευαισθησία που έχει στη συχνότητα.

4.8.6 Διάγραμμα Smith και οι Εφαρμογές του

Οι διάφορες ιδιότητες των γραμμών μεταφοράς μπορούν να αναπαρασταθούν γραφικά σε οποιοδήποτε από ένα μεγάλο πλήθος διαγραμμάτων. Οι πλέον χρήσιμες αναπαραστάσεις είναι εκείνες οι οποίες δίνουν σχέσεις αντίστασης κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς για διαφορετικά φορτία. Το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο διάγραμμα για τέτοιου είδους υπολογισμούς είναι το διάγραμμα Smith.

Αρχές του διαγράμματος Smith

Το πολικών συντεταγμένων διάγραμμα αντίστασης ή διάγραμμα Smith όπως είναι ευρύτερα γνωστό, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Αποτελείται από δυο σύνολα κύκλων, ή καλύτερα τόξων κύκλων, τα οποία είναι έτσι διατεταγμένα ώστε διάφορες σημαντικές ποσότητες σχετιζόμενες με μη-ταιριασμένες γραμμές μεταφοράς μπορούν να σχεδιαστούν και να υπολογιστούν σχετικά εύκολα. Οι ολόκληροι κύκλοι, τα κέντρα των οποίων ανήκουν στην μοναδική ευθεία γραμμή του διαγράμματος, αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές της κανονικοποιημένης αντίστασης $r = R/Z_0$ κατά μήκος της γραμμής.

Με τον όρο κανονικοποιημένη αντίσταση εννοούμε να κανονικοποιείται η αντίσταση σε σχέση με την γραμμή με την οποία συνδέεται, δηλαδή να διαιρείται η αντίσταση με την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, ως εξής: $z_L = \frac{Z_L}{Z_0}$

Έτσι προκύπτει η κανονικοποιημένη αντίσταση. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο γιατί η συμπεριφορά της γραμμής εξαρτάται όχι από την απόλυτη τιμή της αντίστασης φορτίου αλλά από την τιμή του σε σχέση με το Z_0 . Τα τόξα των κύκλων, παραπλεύρως της ευθείας γραμμής του διαγράμματος, αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές για την $jx = \frac{jX}{Z_0}$ κανονικοποιημένη αντίσταση.

Με μια προσεκτική ματιά στο διάγραμμα Smith παρατηρούμε πως οι παραπάνω κύκλοι τέμνονται πάντα κάθετα. Αυτό σημαίνει πως αν σχεδιάσουμε τις εφαπτόμενες ευθείες των κύκλων στα σημεία τομής, αυτές θα είναι κάθετες μεταξύ τους. Οι διάφοροι κύκλοι και συντεταγμένες έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι συνθήκες μιας γραμμής με δοσμένο φορτίο (σταθερό SWR) αντιστοιχούν σε έναν κύκλο τον οποίο σχεδιάζουμε πάνω στο διάγραμμα Smith με το κέντρο του στο κέντρο του διαγράμματος. Πιο σωστά, η παραπάνω πρόταση ισχύει μόνο για γραμμές μεταφοράς χωρίς απώλειες. Στην αρκετά σπάνια περίπτωση μιας RF γραμμής μεταφοράς με απώλειες, αντί για κύκλο θα πρέπει να σχεδιάσουμε ένα σπινάλ το οποίο θα πλησιάζει στο κέντρο του διαγράμματος με τη βοήθεια του κανόνα ο οποίος υπάρχει στο κάτω μέρος του διαγράμματος. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά περίπλοκη και δεν θα μας απασχολήσει στη συνέχεια. Αν το φορτίο είναι καθαρά ωμικό, το R/Z_0 αποτελεί τόσο την κανονικοποιημένη αντίστασή του όσο και το standing wave ratio όπως δείχνει η

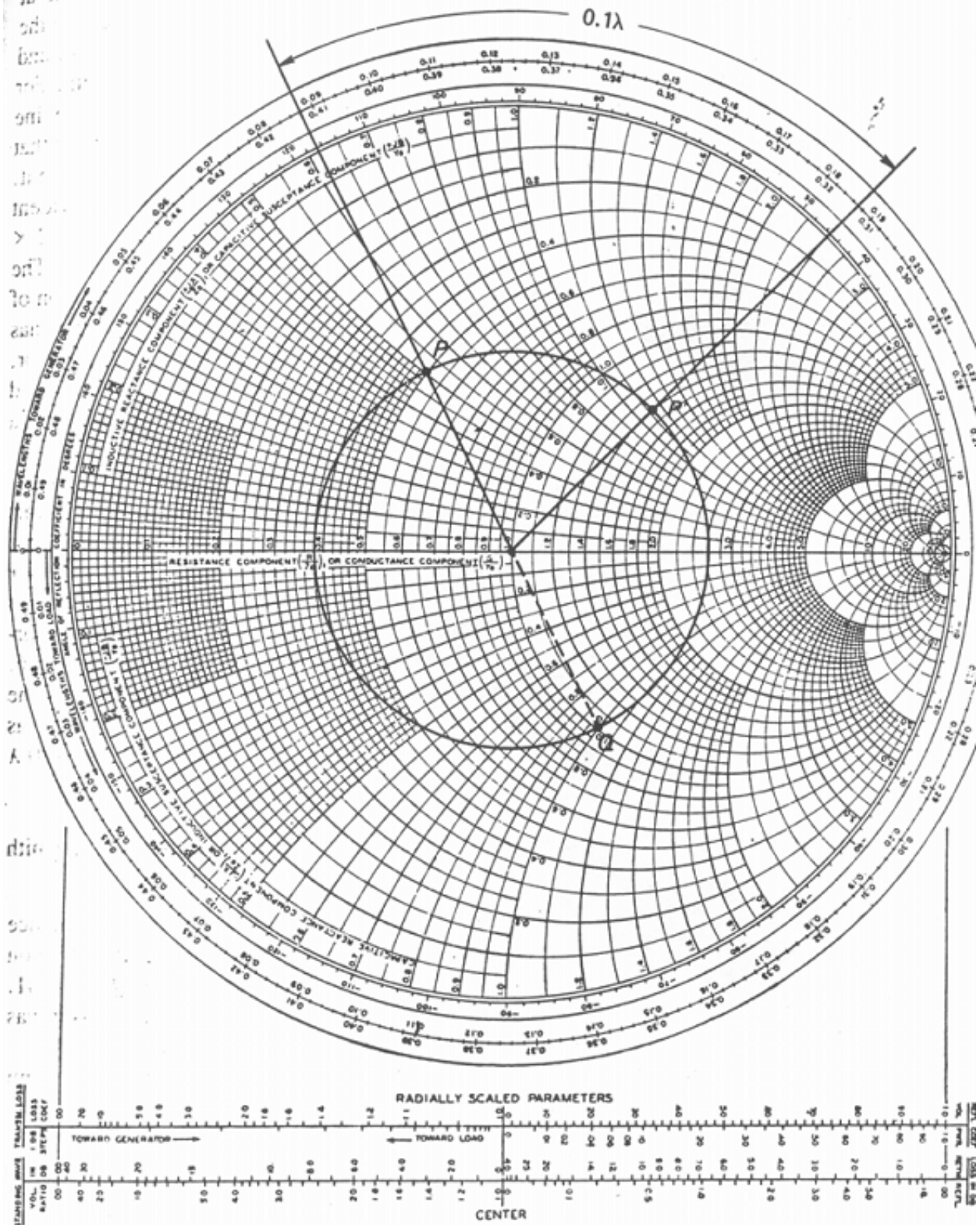
εξίσωση $SWR = \frac{R/Z_0 + 1}{R/Z_0 - 1}$. Έτσι, όταν ένας κύκλος έχει σχεδιαστεί στο διάγραμμα

Smith, η τιμή του SWR η οποία αντιστοιχεί στη γραμμή μεταφοράς μπορεί να διαβαστεί από το σημείο στο οποίο ο κύκλος τέμνει την ευθεία γραμμή του διαγράμματος στα δεξιά του κέντρου του διαγράμματος Smith. Η τιμή αυτή για το SWR θα είναι ίση με $r + j0$ στο σημείο αυτό. Το σημείο τομής στα αριστερά του διαγράμματος θα αντιστοιχεί στο σημείο $1/r$ και θα ήταν χρήσιμο μόνο αν είχε αποφασιστεί πάντα να χρησιμοποιούμε τιμές για το SWR μικρότερες από 1.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του διαγράμματος Smith είναι πως η εξέταση μιας γραμμής μεταφοράς κατά μήκος της αντιστοιχεί στην εξέταση κατά μήκος ενός σωστά σχεδιασμένου κύκλου πάνω στο διάγραμμα ο οποίος να αντιστοιχεί σε σταθερό SWR. Από μια λεπτομερή εξήγηση των αξόνων του διαγράμματος Smith θα φανεί πως έχει σχεδιαστεί για χρήση με κανονικοποιημένες σύνθετες αντιστάσεις και σύνθετες αγωγιμότητες. πως έχει ήδη αναφερθεί, το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να μην χρειαζόμαστε διαφορετικά διαγράμματα Smith για οποιαδήποτε δυνατή τιμή χαρακτηριστικής αντίστασης της κάθε γραμμής μεταφοράς.

Επίσης, παρατηρούμε πως το διάγραμμα μας επιτρέπει να εξετάσουμε τις γραμμές μεταφοράς μόνο σε διάστημα μήκους $\lambda/2$, αφού οι συνθήκες επαναλαμβάνονται περιοδικά σε διαστήματα μήκους $\lambda/2$ αν πρόκειται για γραμμές μεταφοράς χωρίς απώλειες. Με βάση όσα προαναφέραμε, βλέπουμε πως η σύνθετη αντίσταση η οποία συναντάται σε διαδοχικά σημεία κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από το διάγραμμα Smith. Τα σημεία αυτά διαβάζονται από τα σημεία ενός σωστά σχεδιασμένου κύκλου (σταθερού SWR) τον οποίο ο χρήστης σχεδιάζει πάνω στο διάγραμμα Smith. Η απόσταση κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς αντιστοιχεί σε (γωνιακή) απόσταση γύρω από το διάγραμμα και μπορεί να προκύψει από την περιφέρεια του διαγράμματος ως κλάσμα του μήκους κύματος. Με τα παραπάνω γίνεται φανερό πως η διεύθυνση κίνησης πάνω στο διάγραμμα Smith κατά μήκος ενός κύκλου σταθερού SWR είναι σημαντική. Το διάγραμμα Smith έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η κίνηση κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού να αντιστοιχεί σε απομάκρυνση από το φορτίο, δηλαδή προς την γεννήτρια. Παρόμοια, κίνηση με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού αντιστοιχεί σε κίνηση προς το φορτίο. Για οποιοδήποτε δοσμένο φορτίο, ένας σωστός κύκλος σταθερού SWR μπορεί να σχεδιαστεί πάνω στο διάγραμμα Smith από το χρήστη. Αρχικά υπολογίζουμε την κανονικοποιημένη σύνθετη αντίσταση του φορτίου, στην συνέχεια την σχεδιάζουμε (ένα σημείο) πάνω στο διάγραμμα και τέλος διαγράφουμε τον κύκλο (με κέντρο το κέντρο του διαγράμματος) που περνάει από το σημείο που σχεδιάσαμε.

IMPEDANCE OR ADMITTANCE COORDINATES



Εφαρμογές

1. Υπολογισμοί σύνθετης αγωγιμότητας.

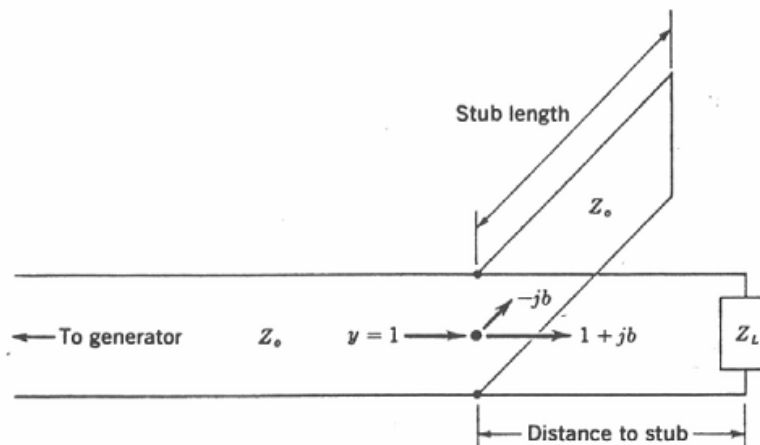
Η εφαρμογή αυτή στηρίζεται στην ακόλουθη ιδιότητα: Η σύνθετη αντίσταση στο σημείο Q ισούται με την σύνθετη αγωγιμότητα στο σημείο P αν τα σημεία P και Q απέχουν απόσταση $\lambda/4$ και ανήκουν στον ίδιο SWR κύκλο. Αφού ολόκληρος ο κύκλος στο διάγραμμα Smith αντιστοιχεί σε μήκος $\lambda/2$, κάθε ημικύκλιο θα αντιστοιχεί σε απόσταση ίση με $\lambda/4$. Έτσι, όταν απαιτείται υπολογισμός αντίστασης και αναζητούμε το σημείο το οποίο απέχει απόσταση $\lambda/4$ από ένα δοσμένο σημείο, δεν έχουμε παρά να βρούμε το αντιδιαμετρικό σημείο σχεδιάζοντας την ευθεία που συνδέει το αρχικό σημείο και το κέντρο του κύκλου

2. Υπολογισμός σύνθετη αντίστασης ή σύνθετης αγωγιμότητας σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής μεταφοράς, για οποιοδήποτε φορτίο και ταυτόχρονος, υπολογισμός του λόγου στάσιμων κυμάτων της γραμμής μεταφοράς. Η εργασία αυτή μπορεί να γίνει τόσο για γραμμές χωρίς απώλειες όσο και για γραμμές με απώλειες, ωστόσο η πρώτη περίπτωση είναι σημαντικά απλούστερη.

3. Υπολογισμός του μήκους που απαιτείται να έχει μια βραχυκυκλωμένη γραμμή μεταφοράς έτσι ώστε να εμφανίζει συγκεκριμένη χωρητική ή επαγωγική αντίσταση. Η εργασία αυτή μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του διαγράμματος Smith ξεκινώντας από το σημείο $0 + 0j$ στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος και προχωρώντας προς την γεννήτρια μέχρι να συναντήσουμε τη σωστή τιμή αντίστασης. Εναλλακτικά, αν θέλουμε να πετύχουμε μια δεδομένη τιμή μαγνητικής επιδεκτικότητας μπορούμε να ξεκινήσουμε από το σημείο $\infty + \infty j$ στα δεξιά του διαγράμματος και να κινηθούμε πάλι με την ίδια φορά. Ο υπολογισμός γίνεται πάντα σε σχέση με βραχυκυκλωμένους κλαδωτές (stubs)

Επίλυση Προβλημάτων

· **Προσαρμογή φορτίου σε γραμμή με βραχυκυκλωμένο κλαδωτή**. Ένας κλαδωτής είναι ένα τμήμα μιας γραμμής μεταφοράς το οποίο είναι βραχυκυκλωμένο στο απομακρυσμένο άκρο του. Σπανιότερα μπορεί να είναι ανοικτοκυκλωμένος, αλλά σε κάθε περίπτωση η αντίστασή του είναι καθαρά ωμική. Για να είμαστε πιο ακριβείς, ένας τέτοιου είδους κλαδωτής εμφανίζει αγωγιμότητα εισόδου η οποία είναι καθαρά μαγνητική επιδεκτικότητα, και η οποία χρησιμοποιείται για να ακυρώσει την συνιστώσα μαγνητικής επιδεκτικότητας της αγωγιμότητας της γραμμής μεταφοράς σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο. Σημειώνουμε ότι οι βραχυκυκλωμένοι κλαδωτές προτιμούνται επειδή οι ανοικτοκυκλωμένοι τείνουν να εκπέμπουν από το ανοιχτό άκρο τους. Όπως παρουσιάζεται και παρακάτω ένας κλαδωτής κατασκευάζεται από την ίδια γραμμή μεταφοράς όπως αυτή στην οποία συνδέεται. Πλεονεκτεί επομένως σε σχέση με τον μετασχηματιστή $\lambda/4$, ο οποίος θα πρέπει να σχεδιαστεί κατά περίπτωση. Επιπροσθέτως, ο κλαδωτής μπορεί να είναι άκαμπτος και προσαρμοζόμενος. Έτσι, ο κλαδωτής χρησιμοποιείται συχνά σε υψηλές συχνότητες, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ποικιλία φορτίων και για μεγάλο εύρος συχνοτήτων.



Διαδικασία Προσαρμογής

1. Κανονικοποίηση της αντίστασης του φορτίου σε σχέση με την αντίσταση γραμμής μεταφοράς, και σχεδιασμός του σημείου στο διάγραμμα Smith.
2. Σχεδιασμός του κύκλου ο οποίος περνάει από αυτό το σημείο και εύρεση της αγωγιμότητας του φορτίου με βάση τη μέθοδο εύρεσης του αντιδιαμετρικού σημείου. Αφού ο κλαδωτής τοποθετείται παράλληλα σε σχέση με τη γραμμή μεταφοράς, είναι απαραίτητο να δουλεύουμε με αγωγιμότητες όταν πραγματοποιούμε υπολογισμούς με κλαδωτές.
3. Ξεκινώντας τώρα από το νέο αυτό σημείο και χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Smith ως διάγραμμα αγωγιμοτήτων, βρίσκουμε το πλησιέστερο στο φορτίο σημείο το οποίο έχει αγωγιμότητα ίση με $1 \pm bj$. Το σημείο αυτό είναι το σημείο στο οποίο ο κύκλος, τον οποίο έχουμε σχεδιάσει τέμνει τον κύκλο με $r=1$, ο οποίος είναι ο μόνος κύκλος του διαγράμματος που περνάει από το κέντρο του διαγράμματος. Αυτό είναι το σημείο στο οποίο θα πρέπει να τοποθετηθεί ο κλαδωτής προκειμένου να ακυρώσει τη συνιστώσα $\pm bj$. Από την περιφέρεια του διαγράμματος μετράμε την ζητούμενη απόσταση.
4. Για να βρούμε το μήκος του βραχυκυκλωμένου κλαδωτή, ξεκινάμε από το σημείο $\infty + \infty j$ στα δεξιά του διαγράμματος, μια και αυτή είναι η αγωγιμότητα του βραχυκυκλώματος.
5. Κινούμενοι με τη φορά των δεικτών του ρολογιού πάνω στην περιφέρεια του διαγράμματος, βρίσκουμε το σημείο στο οποίο η μαγνητική επιδεκτικότητα ακυρώνει τη $\pm bj$ μαγνητική επιδεκτικότητα της γραμμής στο σημείο στο οποίο συνδέεται ο κλαδωτής.
6. Διαβάζουμε την απόσταση σε μήκη κύματος από το σημείο στο καινούριο σημείο. Η απόσταση αυτή είναι το απαιτούμενο μήκος του κλαδωτή.

Επιπτώσεις λόγω διακύμανσης της συχνότητας

Ένας κλαδωτής θα προσαρμόσει ένα φορτίο σε μια γραμμή μεταφοράς μόνο στην συχνότητα για την οποία σχεδιάστηκε να το κάνει. Το παραπάνω ισχύει και για τους $\lambda/4$ μετασχηματιστές. Η σύνθετη αντίσταση του φορτίου, όμως, μπορεί να μεταβάλλεται με τη συχνότητα, με αποτέλεσμα η προσαρμογή να παύει να ισχύει. Ωστόσο, ο κλαδωτής δεν είναι δυνατό να παρέχει τέλεια προσαρμογή σε άλλη συχνότητα, από αυτήν για την οποία σχεδιάστηκε, ακόμα και αν η σύνθετη αντίσταση του φορτίου παραμένει αμετάβλητη. Συχνά απαιτείται η προσαρμογή ενός φορτίου σε μια γραμμή μεταφοράς για μια συγκεκριμένη συχνότητα, ενώ παράλληλα είναι απαραίτητη η αποδοτική (χωρίς απώλειες) συμπεριφορά του συστήματος σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Επομένως, απαιτείται η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του SWR μιας γραμμής μεταφοράς σε μια συχνότητα f' , ενώ η προσαρμογή του φορτίου στη γραμμή είχε γίνει για μια άλλη συχνότητα f . Στη συνέχεια παρουσιάζουμε μια μεθοδολογία για την αντιμετώπιση της προσαρμογής φορτίου-γραμμής με την χρήση βραχυκυκλωμένων κλαδωτών. Η περίπτωση στην οποία η προσαρμογή γίνεται με τη βοήθεια των μετασχηματιστών $\lambda/4$ είναι ανάλογη.

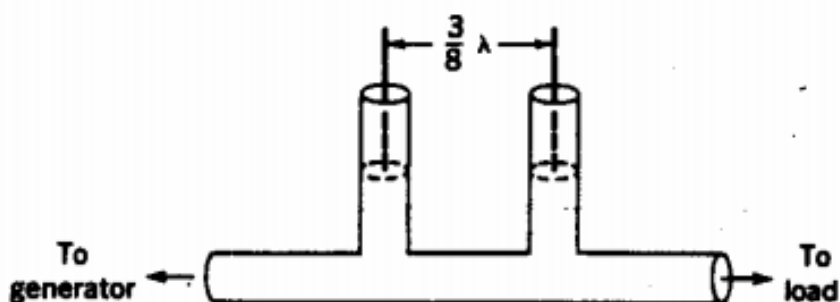
4.9 Εξαρτήματα Γραμμών Μεταφοράς

Σε πολλές περιπτώσεις, σχετικές με τις γραμμές μεταφοράς, χρειαζόμαστε εξαρτήματα τα οποία είναι ευκολότερο να τα αγοράσουμε και να τα χρησιμοποιήσουμε έτοιμα παρά να τα κατασκευάσουμε αυθόρμητα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ανάγκη χρησιμοποίησης ενός προσαρμοζόμενου stub το οποίο να μπορεί να εργάζεται καλά για αλλαγές της συχνότητας ή της εμπέδησης του φορτίου, και να συνεχίζει να δημιουργεί επαρκές ταίριασμα. Σε πολλές περιπτώσεις, σχετικές με τις γραμμές μεταφοράς, χρειαζόμαστε εξαρτήματα τα οποία είναι ευκολότερο να τα αγοράσουμε και να τα χρησιμοποιήσουμε έτοιμα παρά να τα κατασκευάσουμε αυθόρμητα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ανάγκη χρησιμοποίησης ενός προσαρμοζόμενου stub το οποίο να μπορεί να εργάζεται καλά για αλλαγές της συχνότητας ή της εμπέδησης του φορτίου, και να συνεχίζει να δημιουργεί επαρκές ταίριασμα.

1. Το διπλό stub

Στην περίπτωση όπου θέλουμε να κατασκευάσουμε μια συσκευή ταιριάσματος για γραμμές μεταφοράς η οποία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών και για διαφορετικές συνθήκες, γίνεται αντιληπτό πως η συσκευή αυτή θα πρέπει να έχει τόσες ρυθμιζόμενες παραμέτρους ή βαθμούς ελευθερίας όσες έχει και το pattern των στάσιμων κυμάτων. Για το pattern των στάσιμων κυμάτων γνωρίζουμε πως έχει 2 βαθμούς ελευθερίας αφού καθορίζεται ακριβώς από το λόγο SWR και τη θέση ενός μέγιστου. Άρα μια τέτοια συσκευή σαν αυτή θα πρέπει να έχει 2 ρυθμιζόμενες παραμέτρους. Για παράδειγμα, ένα stub με μεταβλητή θέση και μήκος) μπορεί να πετύχει ταίριασμα σε πολλές και διαφορετικές περιπτώσεις, αρκεί η συχνότητα ενδιαφέροντος να είναι μικρότερη από τις συχνότητες των μικροκυμάτων. Ωστόσο, σε τόσο υψηλές συχνότητες υπάρχουν πολλά κατασκευαστικά προβλήματα. Για να παρέχουμε έτσι το δεύτερο βαθμό ελευθερίας (ο πρώτος είναι το μήκος του stub) ένα δεύτερο stub μεταβλητού μήκους προστίθεται στη γραμμή μεταφοράς. Κανονικά, τα δυο stubs τοποθετούνται σε μεταξύ τους απόσταση ίση με 0.375λ όπου λ το μήκος κύματος της κεντρικής συχνότητας ενδιαφέροντος, αφού έχει διαπιστωθεί πως αυτή είναι η βέλτιστη απόστασή τους.

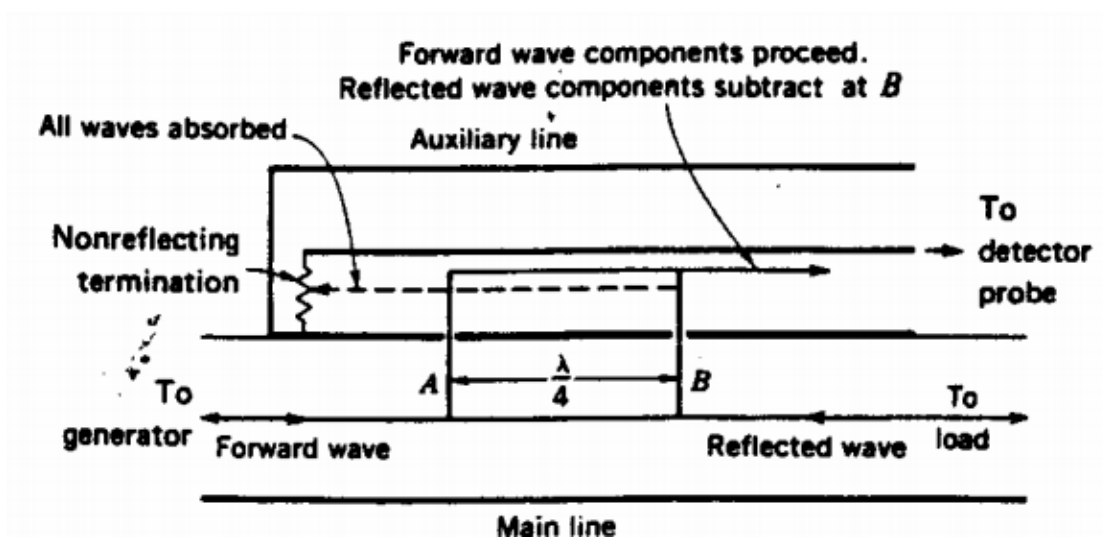
Με τον τρόπο αυτό έχουμε τους 2 βαθμούς ελευθερίας που επιθυμούσαμε και μπορούμε να πετύχουμε πολύ καλό ταίριασμα. Ωστόσο, δεν είναι δυνατό να πετύχουμε ταίριασμα για οποιοδήποτε δυνατό φορτίο αφού το να έχουμε 2 μεταβλητού μήκους stub δεν είναι το ίδιο με το να έχουμε ένα stub μεταβλητού μήκους και θέσης. Μια τέτοιου είδους συσκευή κανονικά συνδέεται ανάμεσα στο φορτίο και τη γραμμή μεταφοράς για να έχουμε το ελάχιστο μήκος για την αταίριαστη γραμμή μεταφοράς. Συνήθως έχει την ίδια χαρακτηριστική αντίσταση με αυτήν της γραμμής μεταφοράς και κάθε μεταβλητό stub μπορεί να μεταβάλλει το μήκος του σε διάστημα κάπως μεγαλύτερο από μισό μήκος κύματος. Η μέθοδος ταιριάσματος με χρήση της συσκευής αυτής απαιτεί πειραματισμό με τις μεταβλητές παραμέτρους και μπορεί είτε να έχει προηγηθεί κάποιου είδους υπολογισμός είτε όχι. Συνήθως η διαδικασία που ακολουθείται είναι το εξαντλητικό ψάξιμο, θέτοντας το stub κοντύτερα στο φορτίο σε κάποια θέση και για τη θέση αυτή εξετάζουμε κάθε πιθανή του δεύτερου stub κ.ο.κ. Εννοείται πως σε κάθε πιθανή θέση μετρούμε το SWR που πετυχαίνει η συγκεκριμένη ρύθμιση και έτσι καταλήγουμε στη βέλτιστη δυνατή ρύθμιση. Με τη συσκευή αυτή μπορούμε να πετύχουμε λόγο στάσιμων κυμάτων το ελάχιστο ίσο με 1.2. Στην περίπτωση όπου επιθυμούμε σχεδόν τέλει ταίριασμα με το φορτίο κάτω από όλες τις δυνατές συνθήκες, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα τριπλό μεταβλητό stub. Στην περίπτωση αυτή τα τρία stub τοποθετούνται σε απόσταση 0.124λ μεταξύ τους η οποία έχει διαπιστωθεί πως είναι η βέλτιστη μεταξύ τους απόσταση.



Σχήμα 7-17 Double stub matcher

2. Κατευθυντήριος συζευκτήρας (Directional Coupler)

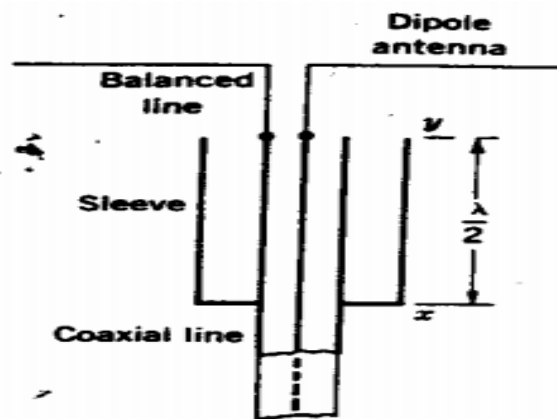
Όπως μπορούμε να δούμε από το παρακάτω σχήμα ο κατευθυντήριος συζευκτήρας δυο οπών αποτελείται από ένα τμήμα γραμμής μεταφοράς η οποία συνδέεται σε σειρά με την κεντρική και μια επιπλέον βοηθητική γραμμή η οποία συνδέεται με την κεντρική γραμμή με τη βοήθεια δυο probes τα οποία περνάνε από οπές οι οποίες έχουν δημιουργηθεί στις ομοαξονικές γραμμές. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, τα probes δεν ακουμπούν στον εσωτερικό αγωγό της βοηθητικής γραμμής. Αντιθέτως, επάγουν αρκετή ενέργεια στον αγωγό αυτό αφού είναι αρκετά κοντά του. Στην περίπτωση όπου ακουμπούσαν στον εσωτερικό αγωγό της βοηθητικής γραμμής, ένα μεγάλο μέρος της ισχύος θα έμπαινε στη βοηθητική γραμμή ενώ στην ουσία ένα μέρος της ισχύος είναι αρκετό. Τα probes επάγουν ενέργεια στη βοηθητική γραμμή η οποία έχει την ίδια διεύθυνση με την κεντρική γραμμή μεταφοράς και έχει δημιουργηθεί μια ειδική διάταξη έτσι ώστε να αποσβένονται τα κύματα τα οποία υπάρχουν στην κεντρική γραμμή διαδίδονται με την αντίθετη φορά. Η διάταξη αυτή δεν είναι τίποτα άλλο από την αντίσταση τερματισμού της βοηθητικής γραμμής η οποία ονομάζεται και τερματιστής μη-αντανάκλασης (nonreflecting termination). Η απόσταση ανάμεσα στα probes είναι $\lambda/4$ αλλά θα μπορούσε να είναι οποιοδήποτε πολλαπλάσιο του $\lambda/4$. Ο κεντρικός αγωγός της βοηθητικής γραμμής οδηγείται στη διάταξη μέτρησης της ισχύος. Παρακάτω βλέπουμε ένα ομοαξονικό κατευθυντήριο συζευκτήρας δύο οπών.



Οποιοδήποτε κύμα επαχθεί στη βοηθητική γραμμή με φορά από δεξιά προς τα αριστερά θα οδηγηθεί στην αντίσταση τερματισμού και έτσι δεν θα μετρηθεί. Ένα εμπρός κύμα το οποίο ταξιδεύει στην κεντρική γραμμή και εισέρχεται στη βοηθητική γραμμή από το σημείο A, συνεχίζει να ταξιδεύει προς τη διάταξη μέτρησης και συναντά στο B ένα άλλο στιγμιότυπο του ίδιου εμπρός κύματος. Και τα δυο κύματα έχουν διανύσει την ίδια απόσταση (είναι σε φάση) και έτσι προστίθενται και συνεχίζουν προς τη διάταξη μέτρησης. Τυχόν πίσω κύματα τα οποία διαδίδονται από τα δεξιά προς τα αριστερά υπάρχει περίπτωση να περάσουν από τα probes και να διαδοθούν στην βοηθητική γραμμή αντίθετα. Τα κύματα αυτά είναι ανεπιθύμητα και πρέπει να ακυρωθούν. Ακριβώς επειδή διάφορες μηχανικές ατέλειες είναι δυνατό να υπάρχουν και να αποτρέπουν την ιδανική λειτουργία του συζευκτήρα που περιγράψαμε, ένα μικρό μέρος του πίσω κύματος πάντα φτάνει στη διάταξη μέτρησης και επομένως συνεκτιμάτε στον υπολογισμό της ισχύος. Αν θεωρήσουμε πως εμπρός και πίσω κύματα εισέρχονται στη βοηθητική γραμμή μεταφοράς με ίση ισχύ και έστω πως η διάταξη μέτρησης της ισχύος δίνει μια εκτίμηση του λόγου της ισχύος των εμπρός κυμάτων προς τα πίσω κύματα ίση με 30 dB. Τότε λέμε πως ο συζευκτήρας μας έχει κατευθυντικότητα ίση με 30 dB. Τέτοιες τιμές κατευθυντικότητας είναι αρκετά συνηθισμένες στην πράξη. Μια άλλη σημαντική ποσότητα η οποία συνδέεται με τους κατευθυντήριους συζευκτήρες είναι η σύζευξη κατευθυντικότητας. Η παράμετρος αυτή ορίζεται ως ο λόγος των εμπρός κυμάτων στην κεντρική γραμμή μεταφοράς προς τα εμπρός κύματα στην βοηθητική γραμμή. Τυπικές τιμές για την παράμετρο αυτή είναι 20 dB (1:100)

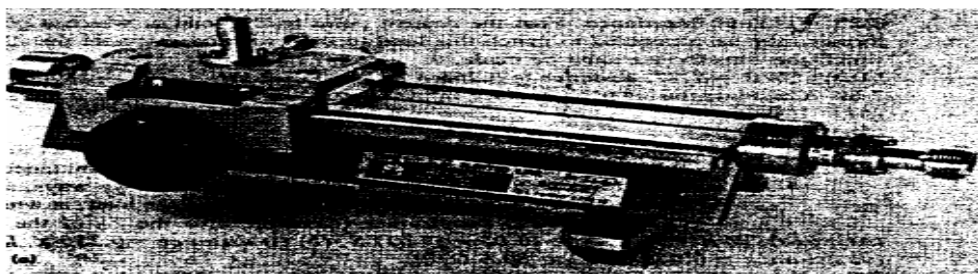
3. Baluns

Ένα balun, ή *balanced to unbalanced* μετασχηματιστής (transformer), είναι ένα κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται για τη σύνδεση μιας *balanced* γραμμής σε μια *unbalanced* γραμμή ή κεραία. Ακόμα, συχνά χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μιας *unbalanced* γραμμής σε μια *balanced* κεραία κ.α. Σε αρκετά χαμηλές συχνότητες αν είναι εφικτό κάτι τέτοιο, ένας κοινός ρυθμιζόμενος μετασχηματιστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ένας τέτοιος μετασχηματιστής θα πρέπει να έχει *unbalanced* πρωτεύουσα και *center-tapped* δευτερεύουσα περιέλιξη η οποία θα συνδέεται στην κεραία. Ο μετασχηματιστής θα πρέπει να έχει ηλεκτροστατική θωράκιση συνδεδεμένη στη γείωση έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις των παρασιτικών χωρητικότητων. Για μεγαλύτερες συχνότητες υπάρχουν διάφορα είδη baluns για διαφορετικούς σκοπούς και εφαρμογές. Το balun αυτό είναι γνωστό με τα ονόματα *choke*, *sleeve* ή *bazooka balun*. Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε πως ένα κυλινδρικό περίβλημα περιβάλλει την ομοαξονική γραμμή μεταφοράς και συνδέεται με τον εξωτερικό αγωγό της γραμμής στο σημείο *x*. Σε οποιοδήποτε σημείο *y* τότε του περιβλήματος, $\lambda/4$ μακριά από το σημείο *x*, η εμπέδηση που βλέπουμε κοιτώντας προς τη γραμμή μεταφοράς η οποία δημιουργείται από το περίβλημα και από τον εξωτερικό αγωγό της γραμμής μεταφοράς είναι άπειρη. Με άλλα λόγια, ο εξωτερικός αγωγός της γραμμής παύει να έχει μηδενική αγωγιμότητα προς τη γείωση στο σημείο *y*. Έτσι, ένα από τα καλώδια της *balanced* γραμμής μπορεί να συνδεθεί εκεί χωρίς φόβο βραχυκυκλώματος προς τη γείωση. Το δεύτερο καλώδιο της γραμμής μεταφοράς συνδέεται στον κεντρικό αγωγό της γραμμής. Έτσι οποιοδήποτε *balanced* φορτίο μπορεί να συνδεθεί στη συνέχεια.



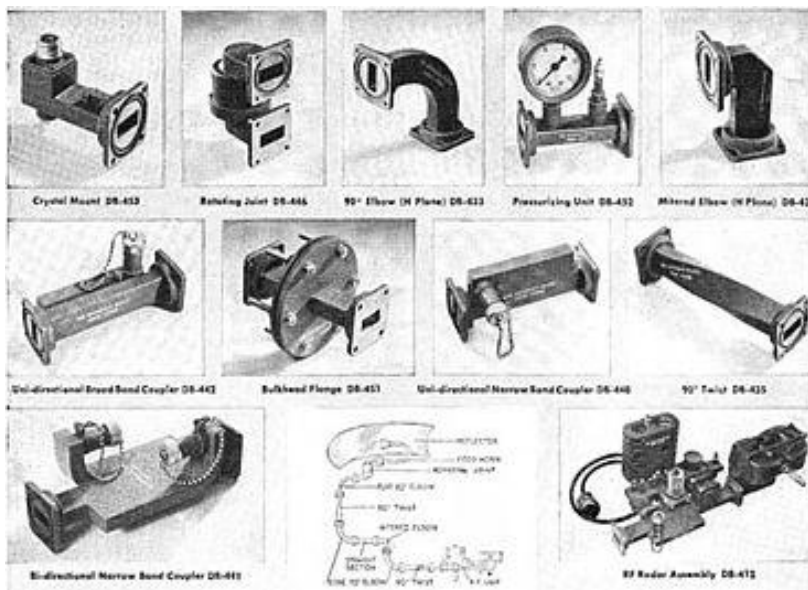
4. Γραμμή με σχισμή (Slotted Line)

Εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε πως ένα τμήμα μιας γραμμής μεταφοράς κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να μετράμε την τάση ή το ρεύμα που το διαρρέει σε διάφορα σημεία κατά μήκος του, θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμο. Σε σχετικά χαμηλές συχνότητες (έως 100 MHz) ένα ζεύγος παράλληλων καλωδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το οποίο να έχει ανάμεσα στα δυο καλώδια μια μετακινούμενη συσκευή μέτρησης. Μια τέτοια συσκευή μπορεί να μετακινείται εύκολα και μπορεί με συγκεκριμένες διατάξεις να μετρά την απόσταση του από τα άκρα των αγωγών. Ένα τέτοιο εξάρτημα ονομάζεται Lecher line ενώ για τις υψηλότερες συχνότητες ονομάζεται slotted line ή γραμμή με σχισμή. Η γραμμή αυτή αποτελείται από έναν ομοαξονικό αγωγό κατά μήκος του οποίου υπάρχει μια σχισμή η οποία κόβει τον εξωτερικό αγωγό και έχει βάθος τόσο ώστε να πλησιάζει τον κεντρικό αγωγό της γραμμής. Ένα επίπεδο πιάτο εφάπτεται στον εξωτερικό αγωγό. Στο πλάι της συσκευής υπάρχει ένας κανόνας ώστε να μετράται η απόσταση του αισθητήρα από τα άκρα της συσκευής. Μέσα στη σχισμή μετακινείται ένα μεταλλικό στέλεχος το οποίο πλησιάζει αλλά δεν ακουμπά τον κεντρικό αγωγό της γραμμής. Με τον τρόπο αυτό, το στέλεχος και ο εσωτερικός αγωγός βρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη για να γίνει μέτρηση χωρίς να επηρεάζεται η γραμμή μεταφοράς. Ένα τέτοιο εξάρτημα θα πρέπει να συνδέεται σε σειρά με γραμμές μεταφοράς ίδιας χαρακτηριστικής αντίστασης. Ακόμα θα πρέπει να έχει μήκος κατά λίγο μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της ελάχιστης συχνότητας στην οποία θα θέλουμε να κάνουμε μετρήσεις. Η βασική χρήση της γραμμής με σχισμή είναι η εύρεση της θέσης και της τάσης κόμβων δυναμικού χωρίς να επηρεάζει σημαντικά το μετρούμενο σύστημα. Επιπροσθέτως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις: εμπέδησης φορτίου, SWR, συχνότητας πομποδέκτη.



4.10 Κυματοδηγοί(Waveguides)

Η γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιείται για τη καθοδήγηση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από ένα σημείο (γεννήτρια) σε ένα άλλο(φορτίο). Ο κυματοδηγός είναι ακόμα ένα μέσο για να επιτευχθεί ο ίδιος σκοπός. Αν και ο κυματοδηγός διαφέρει από μια γραμμή μεταφοράς μπορούμε να τον πάρουμε ως μια ειδική περίπτωση γραμμής μεταφοράς. Η γραμμή μεταφοράς μπορεί να έχει μόνο εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα (TEM - Transverse Electromagnetic Waves) όμως ο κυματοδηγός μπορεί να έχει και άλλες πιθανές διαμορφώσεις πεδίων. Επίσης σε συχνότητες μικροκυμάτων (3-300GHz), η γραμμή μεταφοράς γίνεται ανεπαρκής λόγω του επιδερμικού φαινομένου (skin effect) και απώλειες του διηλεκτρικού μέσου πράγμα που δεν παθαίνει ο κυματοδηγός. Ακόμα μια γραμμή μεταφοράς μπορεί να λειτουργεί από dc ($f = 0$) μέχρι και σε πολύ μεγάλη συχνότητα, ο κυματοδηγός όμως λειτουργεί πάνω από μια συγκεκριμένη συχνότητα που ονομάζεται συχνότητα αποκοπής (cutoff frequency).



Ανάλογα με τη συχνότητα, οι κυματοδηγοί μπορούν να κατασκευαστούν είτε από αγωγία είτε διηλεκτρικά υλικά. Γενικά, όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα που πρέπει να περάσει, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κυματοδηγός. Για παράδειγμα, ο φυσικός κυματοδηγός οι μορφές γης που δίδονται από τις διαστάσεις μεταξύ της αγωγίμης ιονόσφαιρας και του εδάφους καθώς και η περιφέρεια στο διάμεσο υψόμετρο της Γης είναι συντονισμένη στα 7.83 Hz. Αυτό είναι γνωστό ως απήχηση Schumann. Από την άλλη πλευρά, οι κυματοδηγοί που χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες εξαιρετικά υψηλής συχνότητας (EHF) μπορεί να έχουν πλάτος μικρότερο από ένα χιλιοστόμετρο.

Μαθηματική Ανάλυση Κυματοδηγού

Οι ηλεκτρομαγνητικοί κυματοδηγοί αναλύονται με την επίλυση των εξισώσεων Maxwell ή της μειωμένης μορφής τους, της εξίσωσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με οριακές συνθήκες που καθορίζονται από τις ιδιότητες των υλικών και τις διεπαφές τους. Αυτές οι εξισώσεις έχουν πολλαπλές λύσεις ή τρόπους, οι οποίοι είναι ιδιοσυστατικές λειτουργίες του συστήματος εξισώσεων ανάλυση που θα παραλειφθεί από την παρούσα πτυχιακή. Κάθε λειτουργία χαρακτηρίζεται από μια συχνότητα αποκοπής κάτω από την οποία ο τρόπος λειτουργίας δεν μπορεί να υπάρξει στον οδηγό. Οι τρόποι διάδοσης του κυματοδηγού εξαρτώνται από το μήκος κύματος λειτουργίας και την πόλωση και το σχήμα και το μέγεθος του οδηγού. Ο διαμήκης τρόπος κυματοδηγού είναι ένα συγκεκριμένο πρότυπο κυματισμού που σχηματίζεται από κύματα περιορισμένα στην κοιλότητα. Οι εγκάρσιοι τρόποι ταξινομούνται σε διαφορετικούς τύπους:

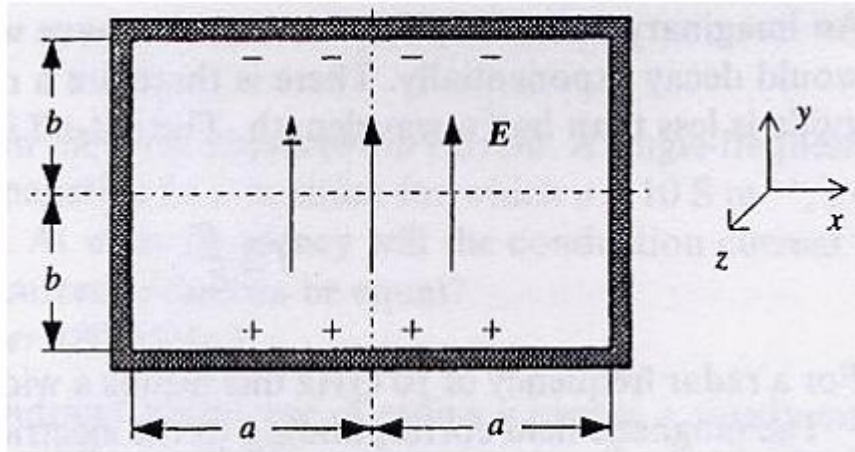
- TE mode (εγκάρσια ηλεκτρική) δεν έχουν ηλεκτρικό πεδίο προς την κατεύθυνση της διάδοσης.
- TM mode (εγκάρσια μαγνητική) δεν έχουν μαγνητικό πεδίο προς την κατεύθυνση της διάδοσης.
- TEM mode (εγκάρσια ηλεκτρομαγνητική) δεν έχουν ούτε ηλεκτρικό ούτε μαγνητικό πεδίο προς την κατεύθυνση της διάδοσης.
- Οι υβριδικοί τρόποι λειτουργίας έχουν τόσο ηλεκτρικά όσο και μαγνητικά πεδία προς την κατεύθυνση της διάδοσης.

Στους κενούς κυματοδηγούς (μονός αγωγός), τα TEM κύματα δεν είναι δυνατά, δεδομένου ότι οι εξισώσεις Maxwell θα δώσουν ότι το ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να έχει μηδενική απόκλιση και μηδέν κύρτωση και να είναι ίσο με το μηδέν στα όρια, με αποτέλεσμα ένα μηδενικό πεδίο $\vec{\nabla}^2 F = 0$ με οριακές συνθήκες που εγγυώνται μόνο την ασήμαντη λύση). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις γραμμές αγωγού δύο αγωγών που χρησιμοποιούνται σε χαμηλότερες συχνότητες. Ομοαξονικό καλώδιο, παράλληλη γραμμή καλωδίου και ταινία ταινίας, στην οποία είναι δυνατή η λειτουργία TEM. Επιπροσθέτως, οι τρόποι πολλαπλασιασμού (δηλ. TE και TM) εντός του κυματοδηγού μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά ως η υπέρθεση των κυμάτων TEM. Η λειτουργία με τη χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής ονομάζεται κυρίαρχη λειτουργία του οδηγού. Είναι κοινό να επιλέγεται το μέγεθος του οδηγού έτσι ώστε μόνο αυτή η λειτουργία να μπορεί να υπάρχει στη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα κυματοδηγό με ορθογώνια διατομή, όπως φαίνεται πιο κάτω και θέλουμε ένα ηλεκτρικό πεδίο που μεταβάλλεται στη κατεύθυνση y . Μπορεί να αποδειχτεί ότι ένα τέτοιο κύμα μπορεί να διαδοθεί

στη κατεύθυνση z δεδομένου ότι η πιο κάτω σχέση ικανοποιείται $f \ll \frac{c}{4a}$ Όπου c

είναι η ταχύτητα του φωτός στο μέσο διάδοσης και η παράμετρος (a) φαίνεται στο σχήμα πιο κάτω. Η συχνότητα (f) ονομάζεται συχνότητα αποκοπής (cutoff frequency) του συγκεκριμένου κύματος σε ένα κυματοδηγό ορθογώνιας διατομής.



Το αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο για τη διατομή πιο πάνω θα έχει συνιστώσες στις κατευθύνσεις x και z . Αφού υπάρχει συνιστώσα του \mathbf{H} στη κατεύθυνση της διάδοσης τότε δεν είναι εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα (TEM), αλλά είναι **εγκάρσιο ηλεκτρικό κύμα (Transverse electric wave, TE)**. Υπάρχουν και άλλοι ρυθμοί (modes) λειτουργίας. Μπορεί να δημιουργηθεί εγκάρσιος ηλεκτρικός (TE) ρυθμός λειτουργίας που έχει συνιστώσες E_x και E_y . Ακόμα μπορεί να δημιουργηθεί **εγκάρσιος μαγνητικός (TM)** ρυθμός λειτουργίας που έχει συντελεστές H_x και H_y . Γενικά οι ρυθμοί λειτουργίας ταξινομούνται ως TE_{mn} και TM_{mn} . Ο ρυθμός λειτουργίας που είδαμε πιο πάνω ήταν

TE_{10} . Οι γενικές συνθήκες για αποκοπή (cut-off) γίνονται $\frac{m^2}{4a^2} + \frac{n^2}{4b^2} = \frac{4}{\lambda^2}$

Κυματοδηγοί στην πράξη

Στην πράξη, οι κυματοδηγοί δρουν ως ισοδύναμα των καλωδίων για τα συστήματα υψηλής συχνότητας (SHF). Για τέτοιες εφαρμογές, είναι επιθυμητό να λειτουργούν κυματοδηγοί με μόνο ένα τρόπο διάδοσης μέσω του κυματοδηγού. Με τους ορθογώνιους κυματοδηγούς είναι δυνατόν να σχεδιαστεί ο κυματοδηγός έτσι ώστε η ζώνη συχνοτήτων πάνω από την οποία μόνο ένας τρόπος μεταδίδεται να είναι τόσο υψηλή όσο 2: 1 (δηλ. Ο λόγος του άκρου της άνω ζώνης με την κάτω άκρη της ταινίας είναι δύο). Η σχέση μεταξύ των διαστάσεων του κυματοδηγού και της χαμηλότερης συχνότητας είναι απλή εάν W είναι η μεγαλύτερη από τις δύο διαστάσεις της, τότε το μεγαλύτερο μήκος κύματος που θα διαδοθεί είναι $\lambda = 2W$ και η χαμηλότερη συχνότητα είναι $f = c/\lambda = c/2W$. Με κυκλικούς κυματοδηγούς, το υψηλότερο δυνατό εύρος ζώνης που επιτρέπει μόνο ένα μόνο τρόπο να διαδοθεί είναι μόνο 1.3601: 1. Επειδή οι ορθογώνιοι κυματοδηγοί έχουν ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης πάνω από το οποίο μπορεί να διαδοθεί μόνο ένας τρόπος λειτουργίας, ισχύουν πρότυπα για ορθογώνια κυματοδηγούς, αλλά όχι για κυκλικούς κυματοδηγούς. Σε γενικές γραμμές (αλλά όχι πάντα), οι τυποποιημένοι κυματοδηγοί είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε:

- ✓ Μια ζώνη ξεκινάει όπου τελειώνει μια άλλη ζώνη, με μια άλλη μπάντα που επικαλύπτει τις δύο ζώνες
- ✓ Το κάτω άκρο της ζώνης είναι περίπου 30% υψηλότερο από τη συχνότητα αποκοπής του κυματοδηγού
- ✓ Η ανώτερη άκρη της ζώνης είναι περίπου 5% χαμηλότερη από τη συχνότητα αποκοπής της επόμενης υψηλότερης τάξης
- ✓ Το ύψος του κυματοδηγού είναι το ήμισυ του πλάτους του κυματοδηγού

Η πρώτη προϋπόθεση είναι να επιτρέπονται εφαρμογές κοντά στις άκρες των ταινιών. Η δεύτερη προϋπόθεση περιορίζει τη διασπορά, ένα φαινόμενο στο οποίο η ταχύτητα της διάδοσης είναι συνάρτηση της συχνότητας. Περιορίζει επίσης την απώλεια ανά μονάδα μήκους. Η τρίτη προϋπόθεση είναι να αποφευχθεί η σύζευξη φαινομενικών κυμάτων μέσω τρόπων υψηλότερης τάξης. Η τέταρτη προϋπόθεση είναι αυτή που επιτρέπει ένα εύρος ζώνης λειτουργίας 2: 1. Αν και είναι δυνατό να υπάρχει εύρος ζώνης λειτουργίας 2: 1 όταν το ύψος είναι μικρότερο από το ήμισυ του πλάτους, έχοντας το ύψος ακριβώς το ήμισυ του πλάτους μεγιστοποιεί την ισχύ που μπορεί να μεταδοθεί μέσα στον κυματοδηγό πριν από την διηλεκτρική βλάβη.

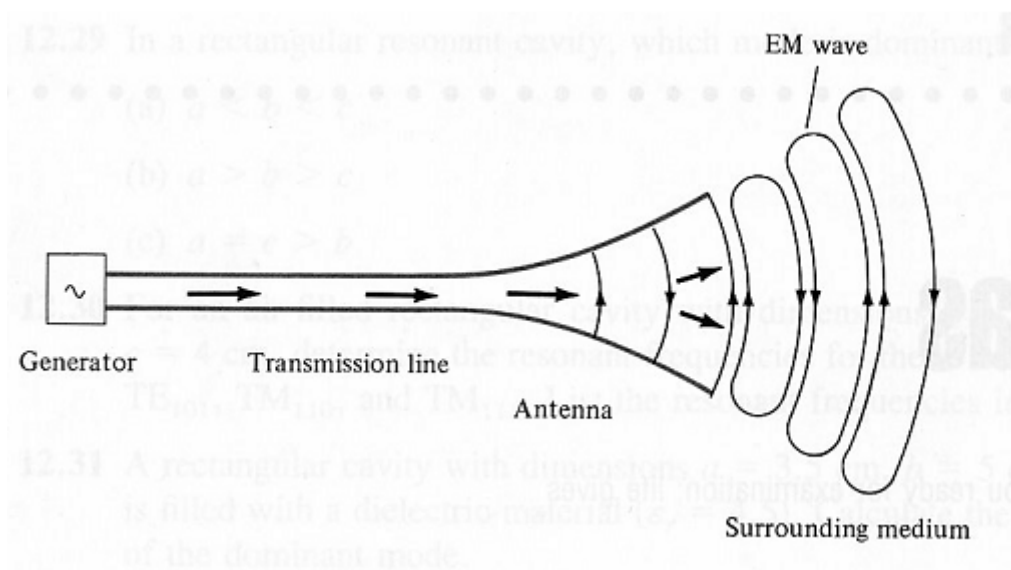
Παρακάτω είναι ένας πίνακας τυπικών κυματοδηγών. Το όνομα του κυματοδηγού WR σημαίνει ορθογώνιο κυματοδηγό και ο αριθμός είναι το πλάτος της εσωτερικής διάστασης του κυματοδηγού σε εκατοστά της ίντσας (0,01 ίντσες = 0,254 mm) στρογγυλεμένο στο πλησιέστερο εκατοστό της ίντσας.

Frequency Band	Waveguide Standard	Frequency Limits (GHz)	Inside Dimensions (inches)	Inside Dimensions (mm)
	WR-2300	0.32 - 0.49	23.000 x 11.500	584.2 x 292.1
	WR-2100	0.35 - 0.53	21.000 x 10.500	533.4 x 266.7
	WR-1800	0.43 - 0.62	18.000 x 9.000	457.2 x 288.6
	WR-1500	0.49 - 0.74	15.000 x 7.500	381.0 x 190.5
	WR-1150	0.64 - 0.96	11.500 x 5.750	292.1 x 146.05
	WR-1000	0.75 - 1.1	9.975 x 4.875	253.365 x 126.6825
	WR-770	0.96 - 1.5	7.700 x 3.385	195.58 x 97.79
	WR-650	1.12 to 1.70	6.500 x 3.250	165.1 x 82.55
R band	WR-430	1.70 to 2.60	4.300 x 2.150	109.22 x 54.61
D band	WR-340	2.20 to 3.30	3.400 x 1.700	86.36 x 43.18
S band	WR-284	2.60 to 3.95	2.840 x 1.340	72.136 x 34.036
E band	WR-229	3.30 to 4.90	2.290 x 1.150	58.166 x 29.21
G band	WR-187	3.95 to 5.85	1.872 x 0.872	47.5488 x 22.1488
F band	WR-159	4.90 to 7.05	1.590 x 0.795	40.386 x 20.193
C band	WR-137	5.85 to 8.20	1.372 x 0.622	34.8488 x 15.7988
H band	WR-112	7.05 to 10.00	1.122 x 0.497	28.4988 x 12.6238
X band	WR-90	8.2 to 12.4	0.900 x 0.400	22.86 x 10.16
X-Ku band	WR-75	10.0 to 15.0	0.750 x 0.375	19.05 x 9.525
Ku band	WR-62	12.4 to 18.0	0.622 x 0.311	15.7988 x 7.8994
K band	WR-51	15.0 to 22.0	0.510 x 0.255	12.954 x 6.477
K band	WR-42	18.0 to 26.5	0.420 x 0.170	10.668 x 4.318
Ka band	WR-28	26.5 to 40.0	0.280 x 0.140	7.112 x 3.556
Q band	WR-22	33 to 50	0.224 x 0.112	5.6896 x 2.8448
U band	WR-19	40 to 60	0.188 x 0.094	4.7752 x 2.3876
V band	WR-15	50 to 75	0.148 x 0.074	3.7592 x 1.8796
E band	WR-12	60 to 90	0.122 x 0.061	3.0988 x 1.5494
W band	WR-10	75 to 110	0.100 x 0.050	2.54 x 1.27
F band	WR-8	90 to 140	0.080 x 0.040	2.032 x 1.016
D band	WR-6	110 to 170	0.0650 x 0.0325	1.651 x 0.8255
G band	WR-5	140 to 220	0.0510 x 0.0255	1.2954 x 0.6477
	WR-4	170 to 260	0.0430 x 0.0215	1.0922 x 0.5461
	WR-3	220 to 325	0.0340 x 0.0170	0.8636 x 0.4318
Y-band	WR-2	325 to 500	0.0200 x 0.0100	0.508 x 0.254
	WR-1.5	500 to 750	0.0150 x 0.0075	0.381 x 0.1905
	WR-1	750 to 1100	0.0100 x 0.0050	0.254 x 0.127

Για τις συχνότητες στον παραπάνω πίνακα, το κύριο πλεονέκτημα των κυματοδηγών πάνω από τα ομοαξονικά καλώδια είναι ότι οι κυματοδηγοί υποστηρίζουν τη διάδοση με μικρότερη απώλεια. Για χαμηλότερες συχνότητες, οι διαστάσεις του κυματοδηγού καθίστανται υπερβολικά μεγάλες και για τις υψηλότερες συχνότητες οι διαστάσεις καθίστανται υπερβολικά μικρές.

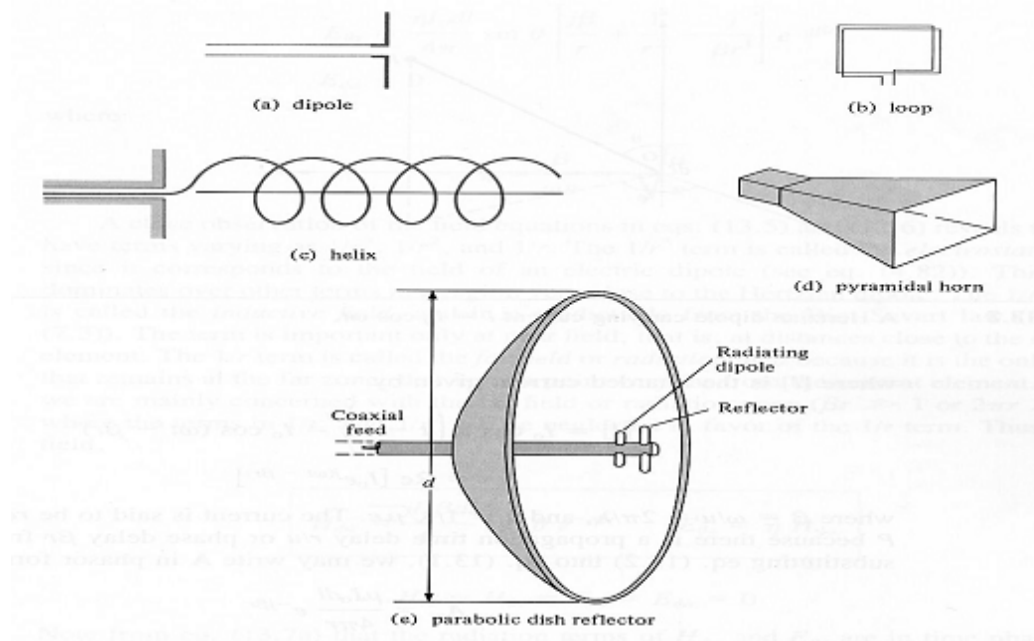
4.11 Κεραίες(Antennas)

Μέχρι τώρα δεν αναρωτηθήκαμε πώς παράγονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ας θυμηθούμε ότι το ηλεκτρικό φορτίο είναι η πηγή των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Αν η πηγή αλλάζει με το χρόνο (time-varying) τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται μακριά από τη πηγή και έτσι έχουμε **ακτινοβολία**. Την ακτινοβολία μπορούμε να τη σκεφτούμε ως τη διαδικασία μεταφοράς ενέργειας και επιτυγχάνεται με τη βοήθεια αγωγίων ή διηλεκτρικών κατασκευασμάτων που ονομάζονται **κεραίες**. Μπορούμε ακόμα να δούμε τη κεραία σαν μετατροπέα, που χρησιμοποιείτε για ταίριασμα της γραμμής μεταφοράς ή του κυματοδηγού με το περιβάλλον ή το αντίθετο. Το πιο κάτω σχήμα δείχνει πως χρησιμοποιείτε μια κεραία για να κάνει το ταίριασμα μιας κεραίας ή κυματοδηγού και του μέσου.



Η κεραία χρησιμοποιείτε για δύο κύριους λόγους: αποδοτική ακτινοβολία και ταίριασμα αντιστάσεων κυμάτων έτσι ώστε να μειωθεί η αντανάκλαση. Η κεραία χρησιμοποιεί τάση και ρεύμα από τη γραμμή μεταφοράς για να φέρει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο μέσο. Η κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για διαβίβαση αλλά και για λήψη ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

Τυπικές κεραιές φαίνονται στο πιο κάτω σχήμα



Το φαινόμενο της **ακτινοβολίας** είναι κάπως περίπλοκο, για αυτό σκόπιμα δεν το μελετήσαμε πιο νωρίς. Δεν θα μπούμε σε βάθος στη θεωρία των κεραιών. Θα περιοριστούμε στους βασικούς τύπους κεραιών όπως είναι το δίπολο **Hertzian**, το **δίπολο μισού κύματος (half-wave dipole)**, το **μονόπολο ενός τετάρτου κύματος (the quarter wave monopole)** και το **μικρό βρόχος (small loop)**.

Για κάθε ένα από αυτούς τους τύπους θα καθορίσουμε τα πεδία ακτινοβολίας κάνοντας τα ακόλουθα βήματα:

- Διαλέγουμε το κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων και καθορίζουμε το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό \mathbf{A} .
- Βρίσκουμε το \mathbf{H} από την $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$
- Καθορίζουμε το \mathbf{E} από την $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ ή $\mathbf{E} = \eta \mathbf{H} \times \mathbf{a}_k$ θεωρώντας ότι

έχουμε μέσο χωρίς απώλειες.

- Βρίσκουμε το **μακρινό πεδίο (far field)** και καθορίζουμε τη μέση ισχύ (time-average power) που ακτινοβολεί χρησιμοποιώντας

$$P_{rad} = \oint \tilde{\mathbf{A}}_{ave} dS \quad \text{όπου} \quad \tilde{\mathbf{A}}_{ave} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E}_s \times \mathbf{H}_s^*)$$

Παρακάτω θα γίνει μια μικρή μαθηματική ανάλυση όσον αφορά μαθηματικές έννοιες του μακρινού πεδίου και των συναρτήσεων Weierstrass

Στα μαθηματικά, οι ελλειπτικές συναρτήσεις του Weierstrass είναι ελλειπτικές συναρτήσεις που λαμβάνουν μια ιδιαίτερα απλή μορφή. Αυτή η κατηγορία λειτουργιών αναφέρεται επίσης ως συναρτήσεις p και γενικά γράφεται χρησιμοποιώντας το σύμβολο \wp . Η ελλειπτική συνάρτηση Weierstrass μπορεί να οριστεί με τρεις στενά συσχετισμένους τρόπους, καθένας από τους οποίους διαθέτει ορισμένα πλεονεκτήματα. Το ένα είναι ως συνάρτηση μιας σύνθετης μεταβλητής z και ενός πλέγματος Λ στο σύνθετο επίπεδο. Ένας άλλος είναι από την άποψη του z και δύο σύνθετους αριθμούς ω_1 και ω_2 που ορίζουν ένα ζεύγος γεννητριών ή περιόδων για το πλέγμα. Η τρίτη είναι από την άποψη του z και ενός συντελεστή τ στο άνω μισό επίπεδο. Αυτό σχετίζεται με τον προηγούμενο ορισμό με $\tau = \omega_2 / \omega_1$, το οποίο με τη συμβατική επιλογή για το ζεύγος περιόδων βρίσκεται στο άνω μισό επίπεδο. Χρησιμοποιώντας αυτή την προσέγγιση, για σταθερές z οι λειτουργίες Weierstrass γίνονται αρθρωτές συναρτήσεις του τ .

Όσον αφορά τις δύο περιόδους, η ελλειπτική λειτουργία του Weierstrass είναι μια ελλειπτική συνάρτηση με τις περιόδους ω_1 και ω_2 που ορίζονται ως:

$$\tilde{A}(z; \omega_1, \omega_2) = \frac{1}{z^2} + \sum_{m, n \in \mathbb{Z}}' \frac{1}{(z + m\omega_1 + n\omega_2)^2} - \frac{1}{(m\omega_1 + n\omega_2)^2}$$

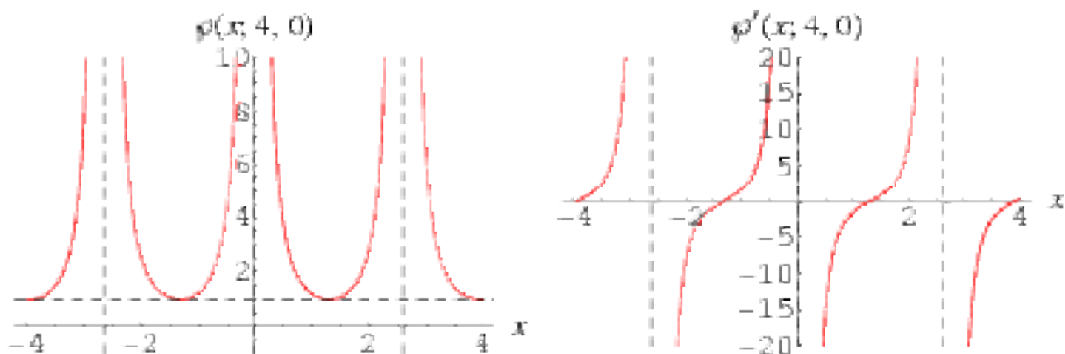
Επειτα $L = \{m\omega_1 + n\omega_2 : m, n \in \mathbb{Z}\}$ Είναι τα σημεία της περιόδου πλέγματος, έτσι ώστε $\tilde{A}(z; L) = \tilde{A}(z; \omega_1, \omega_2)$ Για οποιοδήποτε ζεύγος γεννητριών του πλέγματος ορίζει τη συνάρτηση Weierstrass ως συνάρτηση μιας σύνθετης μεταβλητής και ενός πλέγματος.

Εάν το τ είναι ένας σύνθετος αριθμός στο άνω μισό επίπεδο, τότε:

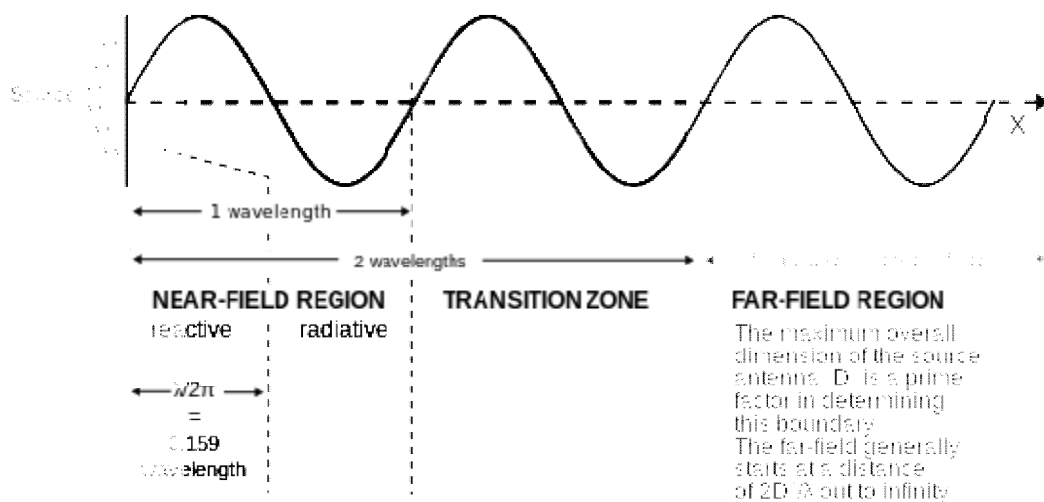
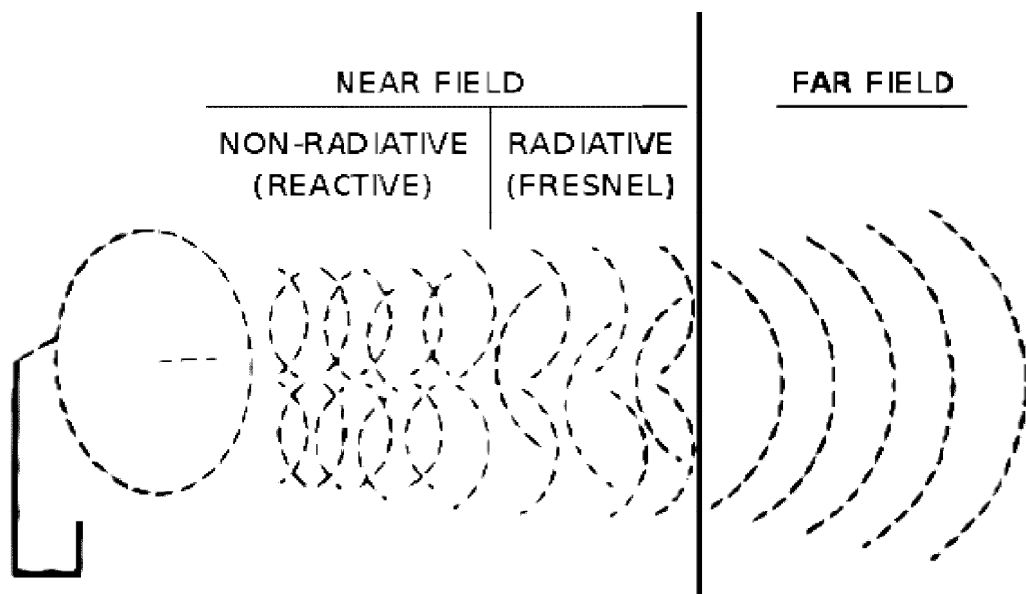
$$\tilde{A}(z; \tau) = \tilde{A}(z; 1, \tau) = \frac{1}{z^2} + \sum_{m, n \in \mathbb{Z}}' \frac{1}{(z + m + n\tau)^2} - \frac{1}{(m + n\tau)^2}$$

Το παραπάνω ποσό είναι ομοιογενές του βαθμού μείον δύο, από το οποίο μπορούμε να ορίσουμε τη συνάρτηση Weierstrass for για οποιοδήποτε ζεύγος

περιόδων, όπως $\tilde{A}(z; \omega_1, \omega_2) = \frac{\tilde{A}\left(\frac{z}{\omega_1}; \frac{\omega_2}{\omega_1}\right)}{\omega_1^2}$.



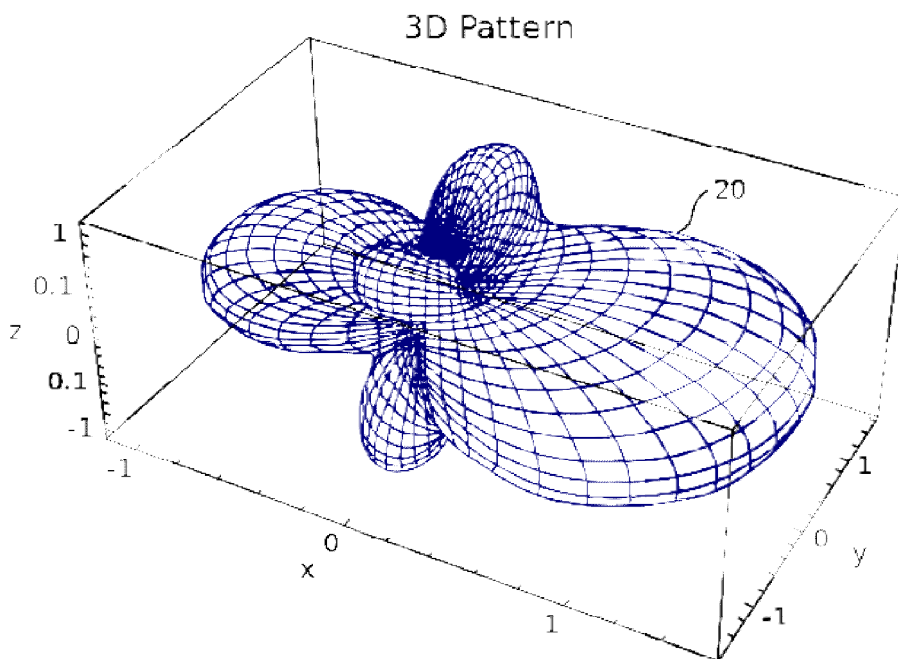
Επίσης ορίζουμε το πλησίον πεδίο και το μακρινό πεδίο είναι περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου γύρω από ένα αντικείμενο, όπως μια κεραία μετάδοσης ή το αποτέλεσμα της σκέδασης ακτινοβολίας από ένα αντικείμενο. Οι μη-ακτινοβολουμένες συμπεριφορές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων πλησίον του πεδίου κυριαρχούν κοντά στην κεραία ή το αντικείμενο σκέδασης, ενώ οι συμπεριφορές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κυριαρχούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Η ισχύς πεδίου E και B του μακρού πεδίου μειώνεται αντίστροφα με την απόσταση από την πηγή, με αποτέλεσμα ένα αντίστροφο τετράγωνο νόμο για την ακτινοβολουμένη ένταση ισχύος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αντίθετα, η ισχύς E και B κοντά στο πεδίο μειώνεται πιο γρήγορα με την απόσταση (με τετραγωνική ανάστροφη τετραγωνική απόσταση ή τετραγωνική), με αποτέλεσμα τη σχετική έλλειψη ενεργειών κοντά στο πεδίο μέσα σε λίγα μήκη κύματος του ψυγείου.



Το μακρινό πεδίο είναι η περιοχή στην οποία το πεδίο λειτουργεί ως "κανονική" ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Στην περιοχή αυτή κυριαρχείται από ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία με ηλεκτρικά δίπολα χαρακτηριστικά. Το κοντινό πεδίο διέπεται από πεδία πολλών πόλων, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως συλλογές διπόλων με σταθερή σχέση φάσης. Το όριο μεταξύ των δύο περιοχών ορίζεται μόνο αόριστα και εξαρτάται από το κύριο μήκος κύματος (λ) που εκπέμπεται από την πηγή.

Στην περιοχή μακράς περιοχής μιας κεραίας, η ακτινοβολία μειώνεται ως το τετράγωνο της απόστασης και η απορρόφηση της ακτινοβολίας δεν τροφοδοτεί τον πομπό. Ωστόσο, στην περιοχή κοντά στο πεδίο, η απορρόφηση της ακτινοβολίας επηρεάζει το φορτίο του πομπού. Η μαγνητική επαγωγή (για παράδειγμα, σε έναν μετασχηματιστή) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πολύ απλό μοντέλο αυτού του τύπου ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης κοντά στο πεδίο.

Στην περιοχή του μακρινού πεδίου, κάθε τμήμα του πεδίου EM (ηλεκτρικό και μαγνητικό) "παράγεται από" (ή σχετίζεται με) μια αλλαγή στο άλλο μέρος και ο λόγος των εντάσεων ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι απλά η αντίσταση κύματος. Ωστόσο, στην περιοχή κοντά στο πεδίο, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία μπορούν να υπάρχουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και ένας τύπος πεδίου μπορεί να κυριαρχεί στον άλλο.



Ένα "πρότυπο ακτινοβολίας" για μια κεραία, εξ ορισμού που δείχνει μόνο το μακρινό πεδίο.

Κοντινό και Μακρινό Πεδίο (Near and Far Fields)

Πιο συγκεκριμένα ορίζουμε το όριο μεταξύ το κοντινού πεδίου (near field) με του μακρινού (far-field) με τη τιμή του r που δίνεται από $r = \frac{2d^2}{\lambda}$ όπου d είναι η πιο μεγάλη διάσταση της κεραίας.

Αν παρατηρήσουμε τις εξισώσεις των πεδίων πιο πάνω βλέπουμε ότι έχουμε όρους που μεταβάλλονται με $1/r^3, 1/r^2, 1/r$.

Ο όρος $1/r^3$ ονομάζεται το **ηλεκτροστατικό πεδίο** αφού αντιστοιχεί στο πεδίο ενός ηλεκτρικού δίπολου. Αυτός ο όρος επηρεάζει περισσότερο από τους άλλους σε περιοχές πολύ κοντά στο δίπολο Hertzian.

Ο όρος $1/r^2$ ονομάζεται **επαγωγικό πεδίο (inductive field)** και βγαίνει από το νόμο του Biot-Savart. Αυτός ο όρος επηρεάζει περισσότερο από τους άλλους σε **κοντινά πεδία (near fields)**.

Όπως βλέπουμε πιο πάνω στο μακρινό πεδίο έχουμε μόνο τη λύση που αντιστοιχεί στο ρεύμα μετατόπισης και έτσι έχουμε τη χαρακτηριστική

σύνθετη αντίσταση του υλικού $h = \frac{E_{qs}}{H_{js}} = \frac{\omega \mu_0}{\epsilon_0}^{1/2}$ η οποία είναι 377Ω για τον ελεύθερο χώρο.

Έτσι φαίνεται καθαρά ότι η διάδοση στο μακρινό πεδίο είναι πολύ παρόμοια με τη διάδοση κυμάτων στον ελεύθερο χώρο.

Ο όρος $1/r$ ονομάζεται **το μακρινό πεδίο (far field)** επειδή είναι ο μόνος όρος που μένει σε μακρινή απόσταση από το στοιχείο του ρεύματος. Εδώ εμείς ενδιαφερόμαστε για τις μακρινές αποστάσεις (far field) και έτσι τους άλλους δύο όρους μπορούμε να τους αγνοήσουμε. Έτσι σε μακρινό πεδίο (far field)

$$H_{js} = \frac{j b I_0 dl}{4 \pi r} \sin \alpha e^{-j b r} \quad E_{qs} = h H_{js}$$
$$H_{rs} = H_{qs} = E_{rs} = E_{js} = 0$$

Μέση Πυκνότητα Ισχύς και Αντίσταση Ακτινοβολίας

Η μέση πυκνότητα της ισχύς (time-average power density) δίνεται από

$$\tilde{A}_{ave} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(E_s \times H_s^*) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(E_{qs} H_{js}^* a_r) = \frac{1}{2} h |H_{js}|^2 a_r$$

Χρησιμοποιώντας τις πιο πάνω εξισώσεις μπορούμε να βρούμε τη μέση ακτινοβολούμενη ισχύ (time-average radiated power)

$$P_{rad} = \oint \tilde{A}_{ave} \cdot dS = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \frac{I_0^2 n b^2 dl^2}{32 p^2 r^2} \sin^2 \theta r^2 \sin \theta d\theta d\phi = \frac{I_0^2 n b^2 dl^2}{32 p^2} 2\pi \int_0^{\pi} \sin^3 \theta d\theta$$

Όμως

$$\int_0^{\pi} \sin^3 \theta d\theta = \int_0^{\pi} (1 - \cos^2 \theta) d(-\cos \theta) = \left. \frac{\cos^3 \theta}{3} - \cos \theta \right|_0^{\pi} = \frac{4}{3}$$

$$\text{Και } b^2 = 4p^2 / l^2$$

$$\text{Έτσι το } P_{rad} \text{ γίνεται } P_{rad} = \frac{I_0^2 p h}{3} \frac{dl}{l} \frac{\dot{I}}{I}$$

Αν το μέσο της διάδοσης είναι ο ελεύθερος χώρος τότε $\eta = 120\pi$ και

$$P_{rad} = 40p^2 \frac{dl}{l} \frac{\dot{I}^2}{I_0^2}$$

Αυτή η ισχύς είναι ισοδύναμη με την ισχύ που καταναλώθηκε από την αντίσταση R_{rad} με ρεύμα I_0 δηλαδή $P_{rad} = \frac{1}{2} I_0^2 R_{rad}$ και $P_{rad} = 80p^2 \frac{dl}{l} \frac{\dot{I}^2}{I_0^2}$

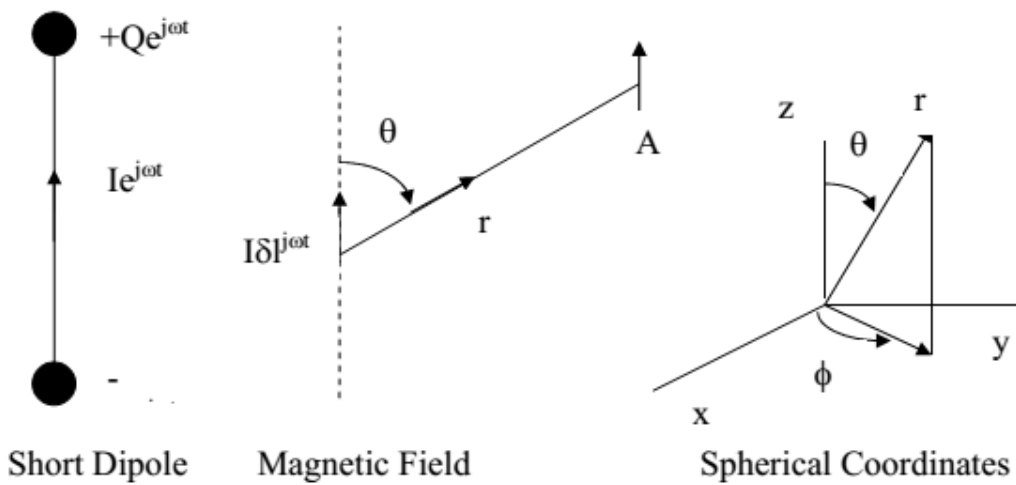
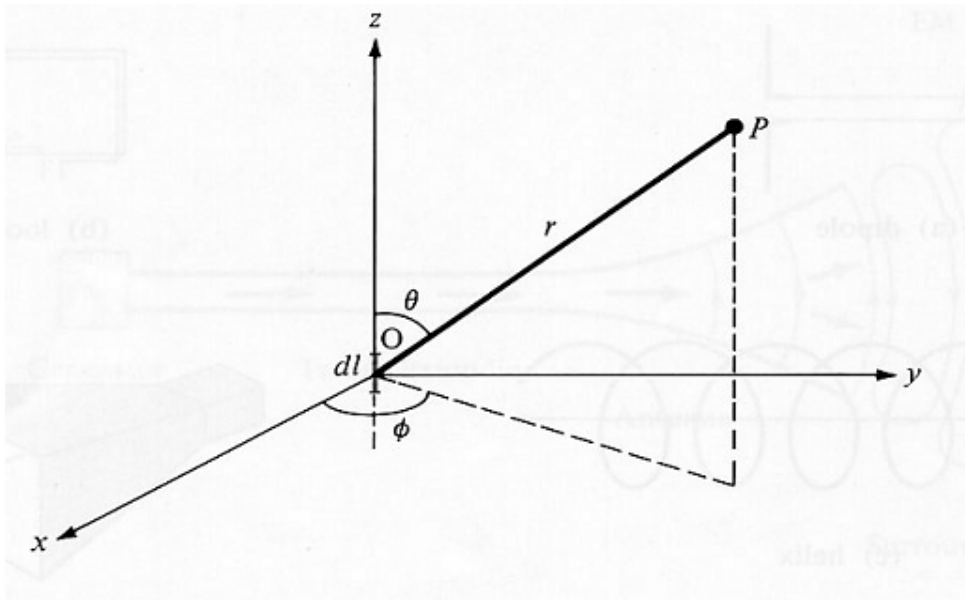
Αυτή η αντίσταση, R_{rad} , είναι χαρακτηριστικό του δίπολου Hertzian και ονομάζεται **αντίσταση ακτινοβολίας (radiation resistance)**.

Να σημειώσουμε ότι για το δίπολο Hertzian θεωρήσαμε ότι είναι απειροελάχιστο. Έτσι η αντίσταση ακτινοβολίας του είναι πολύ μικρή και για αυτό είναι δύσκολο να το ταιριάσουμε με πραγματική γραμμική μεταφοράς. Εντούτοις η ανάλυση που κάναμε θα χρησιμοποιηθεί σαν σωστή προσέγγιση για μια κεραία με $dl \leq \lambda/10$. Μια πιο πρακτική και πιθανόν πιο σημαντική κεραία είναι το δίπολο μισού κύματος (half-wave dipole) που θα δούμε παρακάτω

4.11.1 Δίπολο Hertzian (Hertzian Dipole)

Με δίπολο Hertzian εννοούμε ένα απειροελάχιστο στοιχείο ρεύματος $I dl$. Αν και τέτοιο στοιχείο ρεύματος δεν υπάρχει στη πραγματική ζωή, μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε ως βάση από την οποία το πεδίο μιας πρακτικής κεραίας μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωμα.

Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε το δίπολο Hertzian όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα



Θεωρούμε ότι βρίσκεται στο σημείο αναφοράς του συστήματος συντεταγμένων και ότι έχει ομοιόμορφο ρεύμα $I = I_0 \cos \omega t$

Ακόμα έχουμε την εξίσωση για το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό \mathbf{A} στο σημείο P που είναι: $A = \frac{\mu_0 [I] dl}{4\pi r} a_z$ όπου [I] είναι το ρεύμα που δίνεται από:

$$[I] = I_0 \cos \omega(t - \frac{r}{u}) = I_0 \cos(\omega t - \beta r) = \operatorname{Re} \{ \hat{e}_r I_0 e^{j(\omega t - \beta r)} \}$$

όπου $\beta = \omega / u$ και $u = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ Αυτό το ρεύμα λέγεται **καθυστερημένο (retarded)**

στο σημείο P γιατί υπάρχει μια καθυστέρηση διάδοσης r/u από το O στο P. Αντικαθιστώντας την εξίσωση

$$[I] = I_0 \cos \omega(t - \frac{r}{u}) = I_0 \cos(\omega t - \beta r) = \operatorname{Re} \{ \hat{e}_r I_0 e^{j(\omega t - \beta r)} \}$$
 στην εξίσωση

$A = \frac{\mu_0 [I] dl}{4\pi r} a_z$ μπορούμε να γράψουμε το \mathbf{A} σε μορφή φάσορα (phasor form) που

είναι $A = \frac{\mu_0 dl}{4\pi r} e^{-j\beta r}$ Μετατρέποντας το προηγούμενο διάνυσμα από καρτεσιανές

σε σφαιρικές συντεταγμένες καταλήγουμε $A_s = (A_{rs}, A_{qs}, A_{js})$ όπου

$A_{rs} = A_{zs} \cos \alpha$, $A_{qs} = -A_{zs} \sin \alpha$, $A_{js} = 0$ Όμως $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ έτσι το H

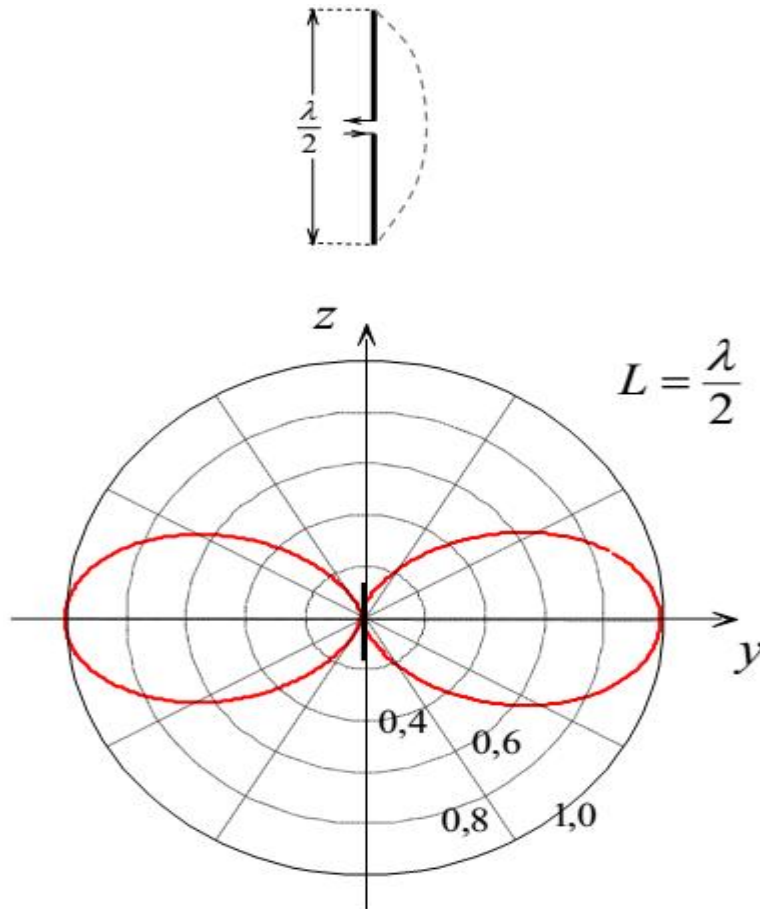
προκύπτει ότι ισούται με $H_{js} = \frac{\mu_0 dl}{4\pi} \sin \alpha \frac{j\beta}{r} \hat{e}_r + \frac{1}{r^2} \hat{e}_r e^{-j\beta r}$, $H_{rs} = H_{qs} = 0$

Βρίσκουμε το πεδίο \mathbf{E} χρησιμοποιώντας το $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ και έτσι

$$E_{rs} = \frac{n I_0 dl}{4\pi} \cos \alpha \frac{\hat{e}_r}{r} + \frac{j}{b r^3} \hat{e}_r e^{-j\beta r}, E_{qs} = \frac{n I_0 dl}{4\pi} \sin \alpha \frac{j\beta}{r} \hat{e}_r + \frac{1}{r^2} - \frac{j}{b r^3} \hat{e}_r e^{-j\beta r}, E_{js} = 0 \text{ όπου } \eta = \frac{b}{\omega \epsilon} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας διπόλου Hertzian(οι παρακάτω έννοιες θα αναλυθούν παρακάτω απλά γίνεται μια συγκεντρωτική αναφορά των χαρακτηριστικών μεγεθών για το δίπολο Hertzian)

Η ένταση ακτινοβολίας του διπόλου είναι $U(\vartheta) = r^2 P(r, \vartheta) = \frac{nk^2 I^2 L^2}{32\pi^2} \sin^2(\vartheta)$



Κατακόρυφο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας της κεραίας Hertz.

Το δίπολο εκπέμπει ομοιοκατευθυντικά ως προς την γωνία φ. Το μέγιστο της ακτινοβολίας παρατηρείται για $\theta = 90^\circ$, ενώ για γωνίες 0° και 180° παρατηρείται μηδενική ένταση ακτινοβολίας.

Η συνολική ισχύς που ακτινοβολεί το δίπολο είναι

$$P_{\text{akt}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi = 40\rho^2 I^2 \frac{L^2}{l^2}$$

Η αντίσταση ακτινοβολίας του διπόλου είναι

$$R_{\text{akt}} = \frac{P_{\text{akt}}}{(I/\sqrt{2})^2} = 80\rho^2 \frac{L^2}{l^2}$$

Η συνάρτηση κατευθυντικού κέρδους του διπόλου είναι

$$D_g(\varphi) = 4\rho \frac{U(\varphi)}{P_{\text{akt}}} = \frac{3}{2} \sin^2(\varphi)$$

Η κατευθυντικότητα του διπόλου είναι

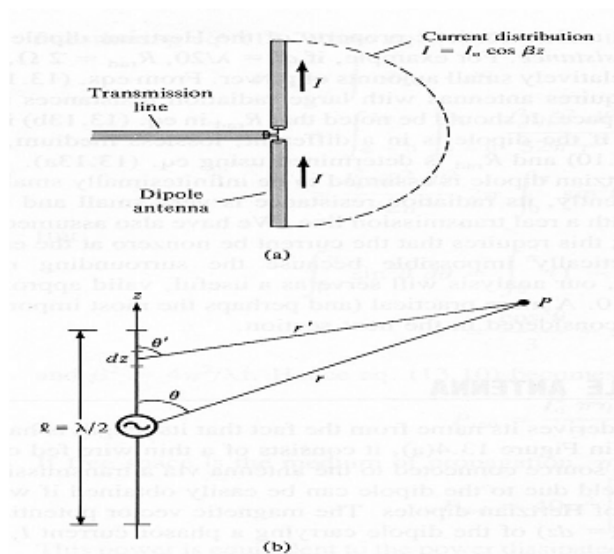
$$D_{\text{max}} = 3/2 = 1,5 \square 1.76dB$$

Η μέγιστη ενεργός επιφάνεια του διπόλου είναι

$$A_{e\text{max}} = \frac{l^2}{4\rho} D_{\text{max}} = \frac{3l^2}{8\rho}$$

4.11.2 Δίπολο Μισού Κύματος (Half-way Dipole)

Το δίπολο μισού κύματος παίρνει το όνομά του από το γεγονός ότι έχει μήκος το μισό του μήκους κύματος ($l = \lambda/2$). Όπως φαίνεται και στο πιο κάτω σχήμα, αποτελείται από λεπτό καλώδιο του οποίου βάζουμε τάση στη μέση του και αυτή η τάση είναι ενωμένη με γραμμή μεταφοράς.



Το πεδίο λόγω του δίπολου μπορεί να βρεθεί εύκολα αν θεωρήσουμε ότι αποτελείται από μια σειρά με δίπολα Hertzian. Το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό στο σημείο P, λόγω ενός διαφορικού μήκους dz του δίπολου που

$$\text{έχει ρεύμα } I_s = I_0 \cos \beta z \text{ είναι } dA_{zs} = \frac{\mu_0 \cos \beta z dz}{4\pi r} e^{-j\beta r}$$

Να προσέξουμε ότι έχουμε θεωρήσει ότι το ρεύμα που έχουμε είναι ημιτονοειδές και αυτό είναι υπόθεση που γίνεται συχνά στη θεωρία κεραιών.

Αν το $r \gg l$, τότε $r - r' = z \cos \theta$ ή $r' = r - z \cos \theta$ έτσι μπορούμε να υποθέσουμε ότι το $r \approx r'$.

Με τα πιο πάνω συνεχίζουμε και

$$A_{zs} = \frac{\mu_0}{4\pi r} \int_{-l/4}^{l/4} e^{-j\beta(r-z\cos\theta)} \cos \beta z dz = \frac{\mu_0}{4\pi r} e^{-j\beta r} \int_{-l/4}^{l/4} e^{j\beta z \cos \theta} \cos \beta z dz$$

Στη προηγούμενη εξίσωση χρησιμοποιήσαμε το $r \approx r'$ για τον παρονομαστή και για τη φάση χρησιμοποιήσαμε το $r' = r - z \cos \theta$ αφού η διαφορά του βr και του $\beta r'$ είναι σημαντική. Λύνοντας το πιο πάνω ολοκλήρωμα καταλήγουμε στο

$$A_{zs} = \frac{mI_0 e^{-jbr} e^{jbz \cos \varphi}}{4\pi r} \frac{(jb \cos \varphi \cos b z + b \sin b z)}{-b^2 \cos^2 \varphi + b^2} \Big|_{-1/4}^{1/4}$$

Αφού $b = 2\pi / \lambda$, $-\cos^2 \varphi + 1 = \sin^2 \varphi$ και $e^{jx} + e^{-jx} = 2 \cos x$ η παραπάνω

εξίσωση γίνεται $A_{zs} = \frac{mI_0 e^{-jbr} \cos(\rho / 2 \cos \varphi)}{2\pi r b \sin^2 \varphi}$

Χρησιμοποιώντας τα πιο πάνω και τις εξισώσεις

$B_s = mH_s = \tilde{N} \times A$ και $\tilde{N} \times H = j\omega \epsilon E_s$ μπορούμε να βρούμε το μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο σε μακρινό πεδίο (αγνοώντας τους παράγοντες $1/r^3, 1/r^2$)

που είναι $H_{js} = \frac{jI_0 e^{-jbr} \cos(\rho / 2 \cos \varphi)}{2\pi r \sin \varphi}$ $E_{qs} = \eta H_{js}$

Μπορούμε ακόμα να βρούμε τη πυκνότητα μέσης ισχύς (time-average power density) που είναι $\tilde{A}_{ave} = \frac{1}{2} \eta H^2 a_r = \frac{\eta I_0^2 \cos^2(\rho / 2 \cos \varphi)}{8\pi^2 r^2 \sin^2 \varphi} a_r$

Η μέση ισχύς που ακτινοβολείται (time-average power) είναι

$$P_{rad} = \oint_{\tilde{A}_{ave}} dS \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} \frac{\eta I_0^2 \cos^2(\frac{\rho}{2} \cos \varphi)}{8\pi^2 r^2 \sin^2 \varphi} r^2 \sin \varphi d\varphi d\vartheta = 30 I_0^2 \int_0^{\pi/2} \frac{\cos^2(\frac{\rho}{2} \cos \varphi)}{\sin \varphi} d\varphi$$

όπου $\eta = 120\pi$ θεωρώντας το μέσο είναι ελεύθερος χώρος.

Για να λύσουμε το ολοκλήρωμα πιο πάνω, ξέρουμε ότι

$$\int_0^{\pi/2} \frac{\cos^2(\frac{\rho}{2} \cos \varphi)}{\sin \varphi} d\varphi = \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{\cos^2(\frac{\rho}{2} \cos \varphi)}{\sin \varphi} d\varphi \text{ έτσι } P_{rad} = 60 I_0^2 \int_0^{\pi/2} \frac{\cos^2(\frac{\rho}{2} \cos \varphi)}{\sin \varphi} d\varphi$$

αλλάζοντας τους μεταβλητούς με $u = \cos \theta$

$$P_{rad} = 30 I_0^2 \int_{\hat{e}_0}^{\hat{e}_1} \frac{\cos^2(\frac{\rho}{2} u)}{1+u} du + \int_0^{\hat{e}_1} \frac{\cos^2(\frac{\rho}{2} u)}{1-u} du$$

Αντικαθιστώντας $1+u=v$ στο πρώτο ολοκλήρωμα και $1-u=v$ στο δεύτερο

$$P_{rad} = 30I_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin^2(\frac{p}{2}v)}{v} dv$$

Αλλάζοντας μεταβλητούς με $w = \pi v$ καταλήγουμε

$$P_{rad} = 151I_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1 - \cos w}{w} dw = 151I_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{w^2}{2!} - \frac{w^4}{4!} + \frac{w^6}{6!} - \dots \right) dw$$

$$\text{Αφού } \cos w = \frac{w^2}{2!} - \frac{w^4}{4!} + \frac{w^6}{6!} - \dots$$

Ολοκληρώνοντας κάθε όρο ξεχωριστά και βάζοντας τα όρια καταλήγουμε

$$P_{rad} \approx 36.56I_0^2$$

Η αντίσταση ακτινοβολίας για το δίπολο μισού κύματος

$$P_{rad} = \frac{2P_{rad}}{I_0^2} = 73W$$

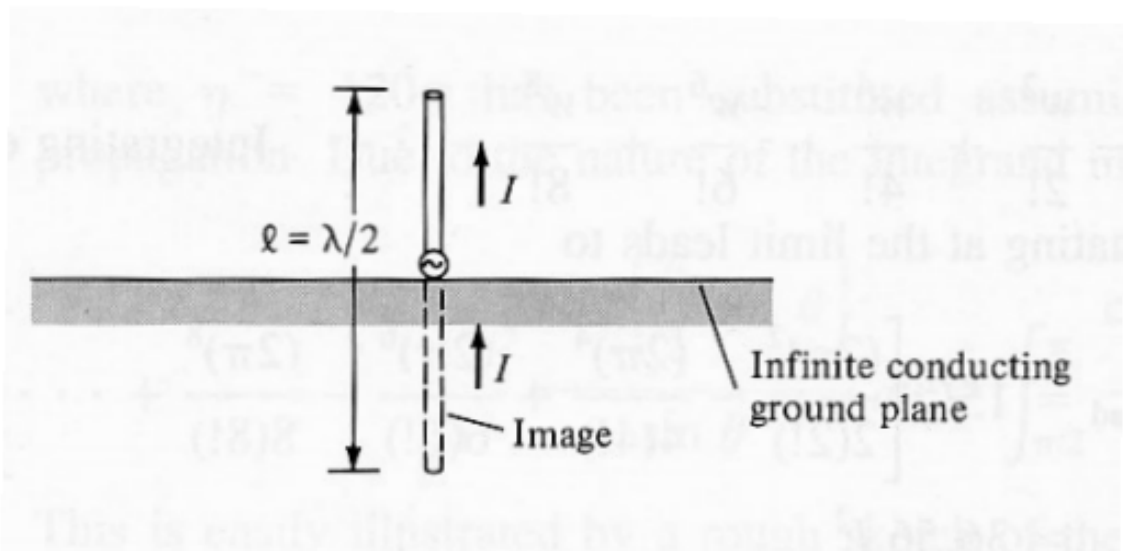
Βλέπουμε τη διαφορά αντίστασης της ακτινοβολίας για το δίπολο Hertzian και για το δίπολο μισού κύματος. Για αυτό το λόγο το δίπολο μισού κύματος είναι ικανό στο να παραδίδει μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας από το δίπολο Hertzian.

Η συνολική αντίσταση εισόδου (input impedance) Z_{in} μιας κεραίας είναι η αντίσταση στα τερματικά της εισόδου που δίνεται από $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ όπου $R_{in} = R_{rad}$ για κεραία χωρίς απώλειες. Η τιμή του X_{in} είναι 42.5Ω

Έτσι $Z_{in} = 73 + j42.5\Omega$ για ένα δίπολο μήκους $l = \lambda/2$. Το X_{in} μειώνεται απότομα όταν το δίπολο μειωθεί πολύ λίγο. Έτσι, πρακτικά, ένα δίπολο $\lambda/2$ είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε το $X_{in} = 0$ και το $Z_{in} = 73\Omega$. Ακόμα αυτή η τιμή είναι εύκολο να ταιριαστεί με γραμμή μεταφοράς

4.11.3 Κεραία Μονόπολο ενός τέταρτου κύματος (Quarter Wave Monopole Antenna)

Βασικά, η κεραία μονόπολο ενός τέταρτου κύματος αποτελείται από μισή κεραία δίπολου μισού κύματος σε ένα αγώγιμο εδάφος όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Ανταλλάζουμε το άπειρο, αγώγιμο έδαφος με το είδωλο του μονοπόλου. Το πεδίο που παράγεται στη περιοχή πάνω από το έδαφος λόγω του $\lambda/4$ μονοπόλου με το είδωλο (image) του, είναι το ίδιο με το πεδίο που παράγεται λόγω του $\lambda/2$ δίπολου. Η διαφορά είναι ότι το μονόπολο ακτινοβολεί μόνο τη μισή ισχύ που ακτινοβολεί το δίπολο με το ίδιο ρεύμα.

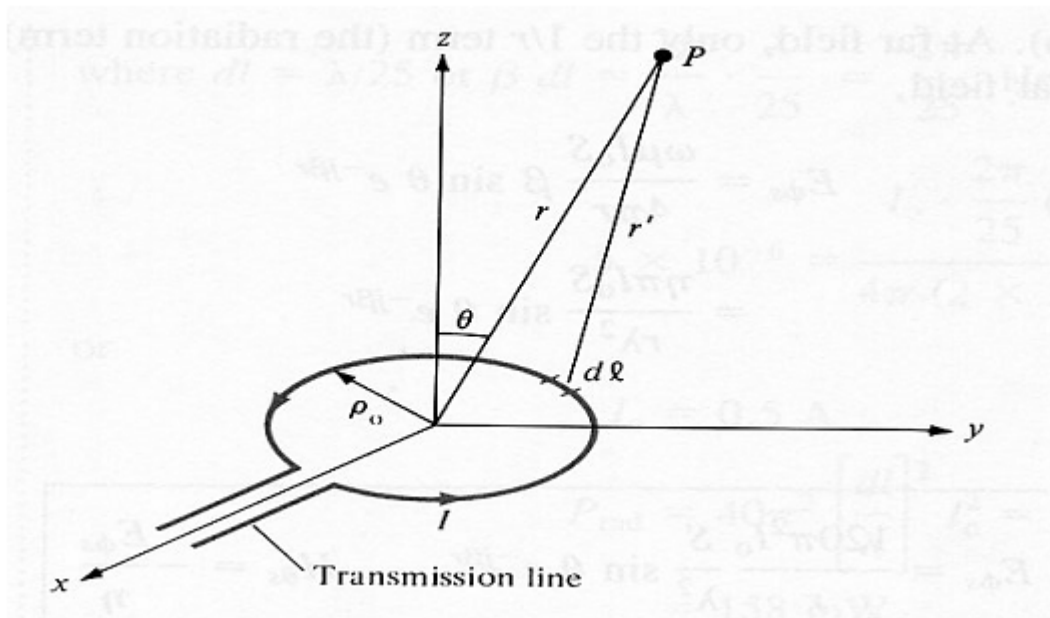
$$\text{Έτσι για ένα } \lambda/4 \text{ μονόπολο } P_{rad} \approx 18.28 I_0^2 \quad R_{rad} = \frac{2P_{rad}}{I_0^2} = 36,5 \Omega$$

Με την ίδια διαδικασία με πριν καταλήγουμε ότι η αντίσταση εισόδου του $\lambda/4$ μονοπόλου είναι $Z_{in} = 36.5 + j21.25 \Omega$

4.11.4 Κεραία Μικρού Βρόγχου (Small Loop Antenna)

Η κεραία μικρού βρόγχου είναι πολύ σημαντική για πρακτικούς λόγους. Χρησιμοποιείται ως ραδιογωνιόμετρο (directional finder) στην ανίχνευση ακτινοβολίας και ως κεραία τηλεόρασης για πολύ μεγάλες συχνότητες. Το ότι ονομάζεται μικρή είναι γιατί οι διαστάσεις του βρόγχου είναι πολύ πιο μικρές από το λ .

Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα νηματώδη (filamentary) μικρό κυκλικό βρόγχο με ακτίνα ρ_0 και με ομοιόμορφο ρεύμα $I_0 \cos \omega t$ να το διαρρέει όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Ο βρόγχος μπορεί να θεωρηθεί ως στοιχειώδες μαγνητικό δίπολο. Το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό στο σημείο P λόγω του βρόγχου είναι

$$A = \oint_L \frac{\mu [I] dl}{4\pi r} \quad \text{όπου} \quad [I] = I_0 \cos(\omega t - br) = \text{Re}(I_0 e^{j(\omega t - br)})$$

Με τα πιο πάνω καταλήγουμε στη μορφή φάσορα του \mathbf{A} που είναι

$$\mathbf{A} = \frac{\mathbf{m}I_0}{4\pi} \int_L \frac{e^{-jbr'}}{r'} d\mathbf{l}$$

Η λύση αυτού του ολοκληρώματος χρειάζεται μεγάλη διαδικασία. Μπορεί να αποδειχτεί ότι για ένα μικρό βρόγχο ($\rho_0 \ll \lambda$), το r' μπορεί να αντικατασταθεί από το r , στο παρονομαστή και ότι το A_s έχει μόνο

$$\text{συνιστώσα } \varphi \text{ που δίνεται από } A_s = \frac{\mathbf{m}I_0 S}{4\pi r^2} (1 + jbr) e^{-jbr} \sin\varphi$$

Όπου $S = N\pi r^2$ για ένα βρόγχο με N περιστροφές. Χρησιμοποιώντας τα πιο πάνω και τις εξισώσεις $\mathbf{B}_s = \mathbf{m}H_s = \tilde{\mathbf{N}} \times \mathbf{A}$ και $\tilde{\mathbf{N}} \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E}_s$ μπορούμε να βρούμε το μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο που είναι

$$E_{j_s} = \frac{-j\omega\mathbf{m}I_0 S}{4\pi} \sin\varphi \frac{e^{-jbr}}{r} + \frac{1}{r^2} \dot{e}^{-jbr}$$

$$H_{rs} = \frac{j\omega\mathbf{m}I_0 S}{2\pi n} \cos\varphi \frac{e^{-jbr}}{r^2} - \frac{j}{br^3} \dot{e}^{-jbr}$$

$$H_{qs} = \frac{-j\omega\mathbf{m}I_0 S}{4\pi n} \sin\varphi \frac{e^{-jbr}}{r} + \frac{1}{r^2} - \frac{j}{br^3} \dot{e}^{-jbr}$$

$$E_{rs} = E_{qs} = H_{j_s} = 0$$

Σε μακρινό πεδίο (far field), μόνο ο όρος $1/r$ μένει όπου καταλήγουμε στην εξίσωση $E_{j_s} = \frac{120\pi^2 I_0 S}{r} \sin\varphi e^{-jbr}$ $H_{qs} = -\frac{E_{j_s}}{h}$ και $E_{rs} = E_{qs} = H_{j_s} = H_{rs} = 0$

Όπου $h = 120\pi$ για ελεύθερο χώρο έχει θεωρηθεί.

Ακόμα η αντίσταση ακτινοβολίας για μια μικρή κεραία βρόγχου είναι

$$R_{rad} = \frac{320\pi^4 S^2}{l^4}$$

4.11.5 Κεραία Συντονισμού(Resonant Antenna)

Η πλειοψηφία των σχεδίων κεραίας βασίζεται στην αρχή συντονισμού. Αυτό βασίζεται στη συμπεριφορά των κινούμενων ηλεκτρονίων, που αντανακλούν τις επιφάνειες όπου η διηλεκτρική σταθερά αλλάζει, με τρόπο παρόμοιο με τον τρόπο που το φως αντανακλά όταν αλλάζουν οι οπτικές ιδιότητες. Σε αυτά τα σχέδια, η ανακλαστική επιφάνεια δημιουργείται από το άκρο ενός αγωγού, συνήθως ενός λεπτού μεταλλικού σύρματος ή ράβδου, το οποίο στην απλούστερη περίπτωση έχει ένα σημείο τροφοδοσίας στο ένα άκρο όπου συνδέεται με μια γραμμή μεταφοράς. Ο αγωγός ή το στοιχείο ευθυγραμμίζεται με το ηλεκτρικό πεδίο του επιθυμητού σήματος, που κανονικά σημαίνει ότι είναι κάθετο στη γραμμή από την κεραία στην πηγή .

Το ηλεκτρικό στοιχείο του ραδιοσήματος προκαλεί τάση στον αγωγό. Αυτό αναγκάζει ένα ηλεκτρικό ρεύμα να αρχίσει να ρέει προς την κατεύθυνση του στιγμιαίου πεδίου του σήματος. Όταν το ρεύμα που προκύπτει φθάνει στο άκρο του αγωγού, αυτό αντανακλά, το οποίο ισοδυναμεί με αλλαγή φάσης 180 μοιρών. Εάν ο αγωγός είναι 1/4 μήκους κύματος, το ρεύμα από το σημείο τροφοδοσίας θα υποβληθεί σε αλλαγή φάσης 90 μοιρών από τη στιγμή που θα φτάσει στο τέλος του αγωγού, θα αντανακλάται κατά 180 μοίρες και στη συνέχεια κατά 90 μοίρες καθώς θα ταξιδέψει πίσω. Αυτό σημαίνει ότι έχει υποστεί συνολική αλλαγή φάσης 360 μοιρών, επιστρέφοντάς το στο αρχικό σήμα. Το ρεύμα στο στοιχείο προσθέτει έτσι στο ρεύμα που δημιουργείται από την πηγή εκείνη τη στιγμή. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί ένα σταθερό κύμα στον αγωγό, με το μέγιστο ρεύμα στην τροφοδοσία.

Το συνηθισμένο δίπολο μισού κύματος είναι ίσως το πιο διαδεδομένο σχέδιο κεραίας. Αυτό αποτελείται από δύο στοιχεία μήκους κύματος 1/4, διατεταγμένα από άκρο σε άκρο και ευρισκόμενα κατά μήκος κατ 'ουσίαν στον ίδιο άξονα (ή σε περιστροφικό άξονα), κάθε ένα από τα οποία τροφοδοτεί μία πλευρά ενός διηλεκτρικού σύρματος μετάδοσης. Η φυσική διάταξη των δύο στοιχείων τις τοποθετεί 180 μοίρες από τη φάση, πράγμα που σημαίνει ότι σε κάθε δεδομένη στιγμή ένα από τα στοιχεία οδηγεί ρεύμα στη γραμμή μετάδοσης ενώ το άλλο τραβάει έξω. Η μονοπολική κεραία είναι ουσιαστικά το ήμισυ του διπολικού μισού κύματος, ένα μόνο στοιχείο μήκους κύματος 1/4 με την άλλη πλευρά συνδεδεμένη με το έδαφος ή με ισοδύναμο επίπεδο γείωσης (ή αντιστροφή). Τα μονόπολα, τα οποία είναι το ένα μισό του μεγέθους ενός διπόλου, είναι κοινά για ραδιοσήματα μεγάλου μήκους κύματος, όπου ένα δίπολο θα ήταν υπερβολικά μεγάλο. Ένας άλλος κοινός σχεδιασμός είναι το διπλωμένο δίπολο, το οποίο είναι ουσιαστικά δύο δίπολα τοποθετημένα δίπλα-δίπλα και συνδεδεμένα στα άκρα τους για να σχηματίσουν μία μονή κεραία μήκους ενός μήκους κύματος.

Το σχήμα στάσιμου κύματος με αυτό το επιθυμητό σχέδιο στη συχνότητα σχεδίασης, f_0 , και οι κεραίες είναι συνήθως σχεδιασμένες να είναι αυτού του μεγέθους. Ωστόσο, η τροφοδοσία αυτού του στοιχείου με $3f_0$ (του οποίου το μήκος κύματος είναι το 1/3 αυτής του f_0) θα οδηγήσει επίσης σε ένα μοτίβο στάσιμων κυμάτων. Έτσι, ένα στοιχείο κεραίας είναι επίσης συντονισμένο όταν το μήκος του είναι 3/4 ενός μήκους κύματος. Αυτό ισχύει για όλα τα περιεργα πολλαπλάσια μήκους κύματος 1/4. Αυτό επιτρέπει κάποια ευελιξία σχεδιασμού όσον αφορά τα μήκη κεραίας και τα σημεία τροφοδοσίας. Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται με τέτοιο τρόπο είναι γνωστό ότι λειτουργούν αρμονικά.

4.11.6 Κατανομή Ρεύματος και Τάσης σε Κεραίες

Τα στοιχεία των τετραγωνικών κυμάτων μιμούνται ένα ηλεκτρικό στοιχείο σειράς συντονισμού λόγω του συνεχούς κύματος που υπάρχει κατά μήκος του αγωγού. Στη συχνότητα συντονισμού, το όρθιο κύμα έχει έναν τρέχοντα κόμβο κορυφής και τάσης (ελάχιστο) στην τροφοδοσία. Από ηλεκτρική άποψη, αυτό σημαίνει ότι το στοιχείο έχει ελάχιστη αντίδραση, δημιουργώντας το μέγιστο ρεύμα για την ελάχιστη τάση. Αυτή είναι η ιδανική κατάσταση, επειδή παράγει τη μέγιστη απόδοση για την ελάχιστη είσοδο, παράγοντας την υψηλότερη δυνατή απόδοση. Σε αντίθεση με ένα ιδανικό (χωρίς απώλειες) κύκλωμα συντονισμού σειράς, παραμένει μια πεπερασμένη αντίσταση (που αντιστοιχεί στη σχετικά μικρή τάση στο σημείο τροφοδοσίας) λόγω της αντοχής στην ακτινοβολία της κεραίας καθώς και τυχόν πραγματικών ηλεκτρικών απωλειών.

Προκειμένου να αποσταλεί αποτελεσματικά το σήμα στη γραμμή μετάδοσης, είναι σημαντικό η γραμμή μεταφοράς να έχει την ίδια αντίσταση με τα στοιχεία, διαφορετικά μέρος του σήματος θα ανακλάται πίσω στην κεραία. Αυτό οδηγεί στην ιδέα της αντιστοίχισης εμπέδησης, στο σχεδιασμό του συνολικού συστήματος κεραίας και γραμμής μετάδοσης έτσι ώστε η σύνθετη αντίσταση να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά, μειώνοντας έτσι αυτές τις απώλειες. Η αντιστοίχιση εμπέδησης ανάμεσα στις κεραίες και τις γραμμές μεταφοράς γίνεται συνήθως μέσω της χρήσης ενός balun, αν και άλλες λύσεις χρησιμοποιούνται επίσης σε ορισμένους ρόλους. Ένα σημαντικό μέτρο αυτής της βασικής ιδέας είναι ο λόγος μόνιμων κυμάτων, ο οποίος μετρά το μέγεθος του ανακλώμενου σήματος.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι η συντονισμένη κεραία τροφοδοτεί αποτελεσματικά ένα σήμα στη γραμμή μετάδοσης μόνο όταν η συχνότητα του πηγαίου σήματος είναι κοντά στη συχνότητα σχεδιασμού της κεραίας ή σε ένα από τα πολλαπλάσια συντονισμού. Αυτό κάνει τα σχέδια συντονισμένης κεραίας εγγενώς στενής ζώνης και χρησιμοποιούνται συχνότερα με ένα μόνο σήμα στόχου. Είναι ιδιαίτερα κοινά σε συστήματα ραντάρ, όπου η ίδια κεραία χρησιμοποιείται τόσο για εκπομπή όσο και για λήψη ή για ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές εκπομπές, όπου η κεραία λειτουργεί με μία μόνο συχνότητα. Χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά για λήψη όπου υπάρχουν πολλαπλά κανάλια, οπότε χρησιμοποιούνται πρόσθετες τροποποιήσεις για την αύξηση του εύρους ζώνης ή χρησιμοποιούνται εντελώς διαφορετικοί σχεδιασμοί κεραίας.

4.11.7 Ηλεκτρικά Σύντομες Κεραίες

Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν έννοιες απλής αντιστοίχισης της σύνθετης αντίστασης ώστε να επιτρέπεται η χρήση μονοπολικών ή διπολικών κεραιών σημαντικά μικρότερων από το μήκος κύματος $\frac{1}{4}$ ή $\frac{1}{2}$, αντίστοιχα, στο οποίο είναι συντονισμένα. Καθώς αυτές οι κεραίες γίνονται συντομότερες (για μια δεδομένη συχνότητα), η σύνθετη αντίσταση τους κυριαρχείται από μια σειρά χωρητικής (αρνητικής) αντίστασης. Με την προσθήκη μιας επαγωγικής σειράς με την αντίθετη (θετική) αντίδραση - ένα λεγόμενο πηνίο φόρτισης - η αντίδραση της κεραίας μπορεί να ακυρωθεί αφήνοντας μόνο μια καθαρή αντίσταση. Μερικές φορές η προκύπτουσα (χαμηλότερη) ηλεκτρική συντονιστική συχνότητα ενός τέτοιου συστήματος (κεραία συν δίκτυο αντιστοίχισης) περιγράφεται χρησιμοποιώντας την έννοια του ηλεκτρικού μήκους, οπότε μια κεραία που χρησιμοποιείται σε χαμηλότερη συχνότητα από τη συχνότητα συντονισμού της, ονομάζεται ηλεκτρικά σύντομη κεραία.

4.11.8 Συστοιχίες και Ανακλαστήρες

Η ποσότητα του σήματος που λαμβάνεται από μια μακρινή πηγή μετάδοσης είναι ουσιαστικά γεωμετρική λόγω του αντιστρόφου τετραγωνικού νόμου και αυτό οδηγεί στην έννοια της αποτελεσματικής περιοχής. Αυτό μετράει την απόδοση μιας κεραίας συγκρίνοντας την ποσότητα ισχύος που παράγει με την ποσότητα ισχύος στο αρχικό σήμα, μετρούμενη ως προς την πυκνότητα ισχύος του σήματος σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο. Ένα δίπολο μισού κύματος έχει μια αποτελεσματική περιοχή 0,13 λ. Εάν απαιτείται μεγαλύτερη απόδοση, δεν μπορεί κανείς απλά να κάνει την κεραία μεγαλύτερη. Αν και αυτό θα παρεμπόδιζε περισσότερη ενέργεια από το σήμα, λόγω των παραπάνω σκέψεων, θα μειώσει σημαντικά την έξοδο λόγω της απομάκρυνσης από το μήκος συντονισμού. Σε ρόλους όπου απαιτούνται υψηλότερες επιδόσεις, οι σχεδιαστές συχνά χρησιμοποιούν πολλαπλά στοιχεία σε συνδυασμό. Επιστρέφοντας στη βασική ιδέα των ροών ρεύματος σε έναν αγωγό, σκεφτείτε τι συμβαίνει εάν ένα δίπολο μισού κύματος δεν είναι συνδεδεμένο με ένα σημείο τροφοδοσίας, αλλά αντίθετα βραχυκυκλωμένο. Ηλεκτρικά αυτό σχηματίζει ένα μοναδικό στοιχείο μήκους κύματος $1/2$. Αλλά το συνολικό τρέχον πρότυπο είναι το ίδιο. Το ρεύμα θα είναι μηδέν στις δύο άκρες και θα φτάσει στο μέγιστο στο κέντρο. Έτσι, τα σήματα κοντά στη συχνότητα σχεδίασης θα συνεχίσουν να δημιουργούν ένα στάσιμο κύμα. Οποιοδήποτε μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, όπως το σταθερό κύμα στο στοιχείο, θα ακτινοβολεί ένα σήμα. Στην περίπτωση αυτή, εκτός από τις απώλειες αντίστασης στο στοιχείο, το σήμα αναμετάδοσης θα είναι σημαντικά παρόμοιο με το αρχικό σήμα τόσο σε μέγεθος όσο και σε σχήμα. Εάν τοποθετηθεί αυτό το στοιχείο έτσι ώστε το σήμα του να φτάσει στο κύριο δίπολο σε φάση, θα ενισχύσει το αρχικό σήμα και θα αυξήσει το ρεύμα στο δίπολο. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται με αυτόν τον τρόπο είναι γνωστά ως παθητικά στοιχεία. Μια διάταξη Yagi-Uda χρησιμοποιεί παθητικά στοιχεία για να αυξήσει σημαντικά το κέρδος. Είναι χτισμένο κατά μήκος ενός βραχίονα στήριξης που κατευθύνεται προς το σήμα και έτσι δεν βλέπει κανένα επαγόμενο σήμα και δεν συμβάλλει στη λειτουργία της κεραίας. Το τέλος πιο κοντά στην πηγή αναφέρεται ως μπροστά. Κοντά στο πίσω μέρος υπάρχει ένα μόνο ενεργό στοιχείο, τυπικά δίπολο μισού κύματος ή πτυσσόμενο δίπολο. Τα παθητικά στοιχεία είναι διατεταγμένα μπροστά (διευθυντές) και πίσω (ανακλαστήρες) το ενεργό στοιχείο κατά μήκος του βραχίονα.



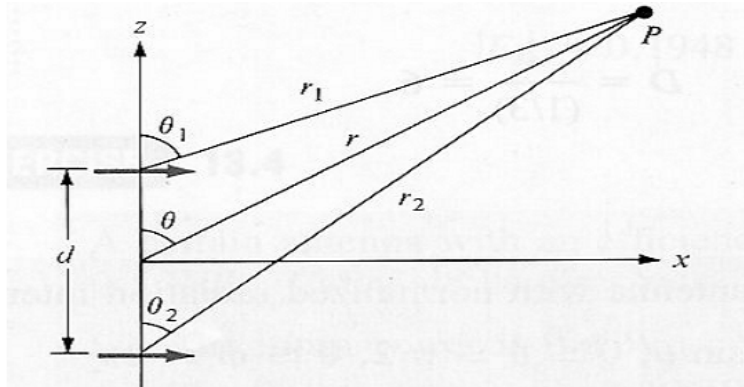
Είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιηθούν πολλαπλά ενεργά στοιχεία και να συνδυαστούν μαζί με τις γραμμές μεταφοράς για την παραγωγή ενός παρόμοιου συστήματος όπου οι φάσεις προστίθενται για να ενισχυθεί η έξοδος. Η συστοιχία κεραίας και η πολύ παρόμοια κεραία ανακλαστικής συστοιχίας αποτελείται από πολλαπλά στοιχεία, συχνά διπολικά μισού κύματος, τοποθετημένα σε ένα επίπεδο και συρματωμένα μαζί με γραμμές μεταφοράς με συγκεκριμένα μήκη φάσεων για να παράγουν ένα μοναδικό σήμα σε φάση στην έξοδο. Η ημερολογιακή περιοδική κεραία είναι ένα πιο πολύπλοκο σχέδιο που χρησιμοποιεί πολλαπλά in-line στοιχεία παρόμοια στην εμφάνιση με το Yagi-Uda αλλά χρησιμοποιώντας γραμμές μετάδοσης μεταξύ των στοιχείων για την παραγωγή της εξόδου.

Η αντανάκλαση του αρχικού σήματος συμβαίνει επίσης όταν επεκτείνεται σε μια εκτεταμένη αγωγίμη επιφάνεια, με τρόπο παρόμοιο με έναν καθρέφτη. Αυτό το φαινόμενο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση του σήματος μέσω της χρήσης ενός ανακλαστήρα, κανονικά τοποθετημένου πίσω από το ενεργό στοιχείο και σε απόσταση, έτσι ώστε το ανακλώμενο σήμα να φτάσει στο στοιχείο σε φάση. Γενικά ο ανακλαστήρας θα παραμείνει ιδιαίτερα ανακλαστικός ακόμη και αν δεν είναι στερεός. Κενά μικρότερα από $1/10 \lambda$ έχουν γενικά μικρή επίδραση στο αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό, οι ανακλαστήρες συχνά λαμβάνουν τη μορφή συρματινών ματιών ή σειρών παθητικών στοιχείων, τα οποία τα καθιστούν ελαφρύτερα και λιγότερο επιρρεπή σε φαινόμενα φορτίου αέρος, ιδιαίτερης σημασίας όταν τοποθετούνται σε υψηλότερες ανυψώσεις σε σχέση με τις γύρω δομές. Ο παραβολικός ανακλαστήρας είναι ίσως το πιο γνωστό παράδειγμα κεραίας με βάση τον ανακλαστήρα, το οποίο έχει μια αποτελεσματική περιοχή πολύ μεγαλύτερη από το ενεργό στοιχείο μόνο του.

Κεραία συστοιχίας

Μια συστοιχία κεραίας (ή κεραία συστοιχίας) είναι ένα σύνολο πολλαπλών συνδεδεμένων κεραιών που λειτουργούν μαζί ως μία κεραία για τη μετάδοση ή λήψη ραδιοκυμάτων. Τα μεμονωμένα στοιχεία κεραίας συνδέονται με έναν μόνο δέκτη ή πομπό μέσω γραμμών τροφοδοσίας που τροφοδοτούν την ισχύ των στοιχείων σε μια συγκεκριμένη σχέση φάσης. Τα ραδιοκύματα που ακτινοβολούνται από κάθε μεμονωμένη κεραία συνδυάζονται και υπερκαλύπτονται, προσθέτοντας (δημιουργώντας παρεμβολές) για να ενισχύσουν την ισχύ που ακτινοβολείται στις επιθυμητές κατευθύνσεις και ακυρώνοντας (καταστροφικά) τη μείωση της ισχύος που ακτινοβολείται σε άλλες κατευθύνσεις.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια κεραία που περιέχει δύο δίπολα Hertzian τοποθετημένα στον ελεύθερο χώρο στη κατεύθυνση του άξονα z αλλά προσανατολισμένα παράλληλα με τον άξονα x όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Θεωρούμε ότι το δίπολο στο σημείο $(0, 0, d/2)$ έχει ρεύμα $I_1s = I_0 \angle \alpha_0$ και το δίπολο στο σημείο $(0, 0, -d/2)$ έχει ρεύμα $I_2s = I_0 \angle \alpha_0$, όπου α είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ρευμάτων. Αλλάζοντας την απόσταση d και τη διαφορά φάσης α , τα πεδία από τη σειρά μπορούν να παρεμβαίνουν το ένα στο άλλο έτσι ώστε να προστείνονται σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις και να αφαιρούνται (να μηδενίζονται) σε άλλες. Το ολικό ηλεκτρικό πεδίο σε ένα σημείο P είναι η διανυσματική πρόσθεση των πεδίων λόγω των ατομικών στοιχείων. Αν το P είναι σε μακρινή περιοχή (far field zone) βρίσκουμε το ολικό ηλεκτρικό πεδίο στο P ως

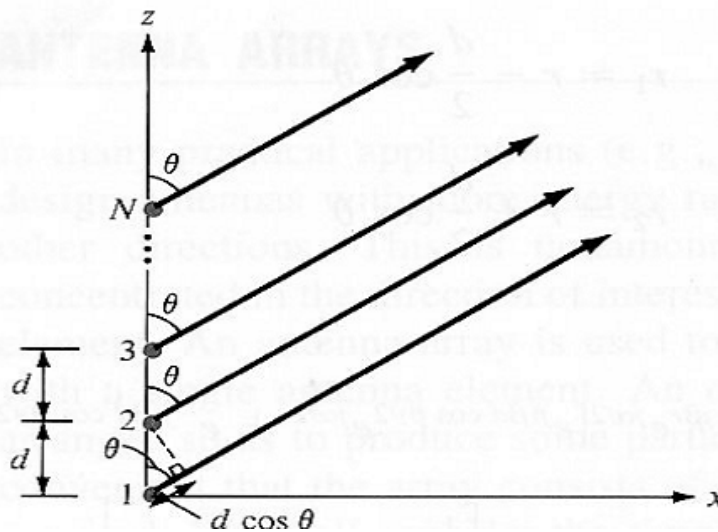
$$E_s = E_{1s} + E_{2s} = \frac{jnbI_0dl}{4\pi} \frac{\hat{e}}{\hat{e}} \cos\alpha_1 \frac{e^{-jbr_1}}{r_1} e^{ja} a_{\alpha_1} + \cos\alpha_2 \frac{e^{-jbr_2}}{r_2} e^{ja} a_{\alpha_2} \hat{u}$$

Αφού το P είναι μακριά από τη σειρά το $\theta_1 \approx \theta \approx \theta_2$ και $\alpha\theta_1 \approx \alpha\theta \approx \alpha\theta_2$. Για το μήκος κύματος μπορούμε να πούμε ότι $r_1 \approx r \approx r_2$ και για τη φάση χρησιμοποιούμε τις $r_1 \gg r - \frac{d}{2} \cos\alpha$ και $r_2 \gg r - \frac{d}{2} \cos\alpha$

Με τα πιο πάνω μπορούμε να δείξουμε ότι το συνολικό πεδίο μιας σειράς είναι ίσο με το πεδίο ενός στοιχείου που βρίσκεται στο σημείο αναφοράς πολλαπλασιασμένο με ένα παράγοντα σειράς (array factor) που δίνεται από

$$AF = 2 \cos \frac{\beta}{2} (bd \cos\alpha + a) \dot{u} e^{j\alpha/2}$$

Ας επεκτείνουμε τώρα το αποτέλεσμα της σειράς με δύο στοιχεία στη γενική περίπτωση με N στοιχεία όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα



Θεωρούμε ότι η σειρά είναι γραμμική και τα στοιχεία βρίσκονται στη κατεύθυνση του άξονα z. Επίσης θεωρούμε ότι η σειρά είναι ομοιόμορφη έτσι ώστε κάθε στοιχείο έχει το ίδιο ρεύμα με αυξανόμενη φάση α , δηλαδή $I_1 = I_0 \angle 0$, $I_2 = I_0 \angle \alpha$, $I_3 = I_0 \angle 2\alpha$, Κυρίως ενδιαφερόμαστε στο να βρούμε το παράγοντα της σειράς αφού το πεδίο σε μακρινή (far field) απόσταση μπορούμε να το βρούμε εύκολα με το παράγοντα σειράς. Ο παράγοντας σειράς είναι η πρόσθεση της συνεισφοράς όλων των στοιχείων έτσι $AF = 1 + e^{j\alpha} + e^{j2\alpha} + \dots + e^{j(N-1)\alpha}$ όπου

$\alpha = bd \cos\alpha + a$ και $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ Η δεξιά πλευρά της πιο πάνω εξίσωσης είναι γεωμετρική

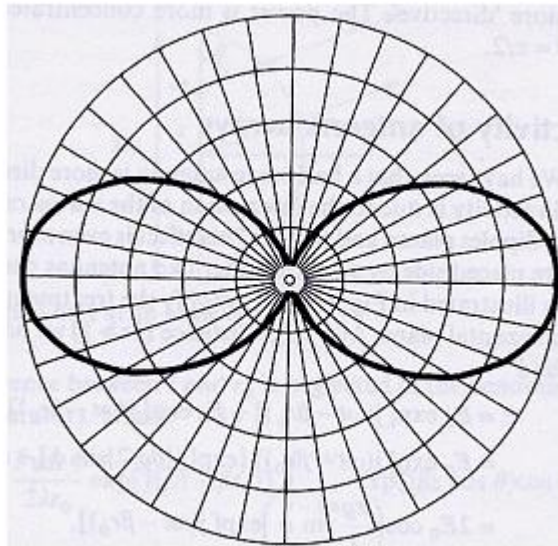
σειρά έτσι μπορούμε να γράψουμε

$$AF = \frac{e^{jN\alpha} - 1}{e^{j\alpha} - 1} = \frac{e^{jN\alpha/2} - e^{-jN\alpha/2}}{e^{j\alpha/2} - e^{-j\alpha/2}} = e^{j(N-1)\alpha/2} \frac{\sin(N\alpha/2)}{\sin(\alpha/2)}$$

Ο παράγοντας $e^{j(N-1)\alpha/2}$ μπορεί να αποφευχθεί αν η σειρά έχει κέντρο το

σημείο αναφοράς έτσι $AF = \frac{\sin(N\alpha/2)}{\sin(\alpha/2)}$

Βλέπουμε τέλος ότι ο παράγοντας σειράς μειώνει το πεδίο σε ορισμένες κατευθύνσεις. Πιο κάτω φαίνεται η επίδραση μιας σειράς κεραιών με 2 στοιχεία με μια απόσταση $\lambda/2$ μεταξύ τους.



Μια συστοιχία κεραιάς μπορεί να επιτύχει υψηλότερο κέρδος (κατευθυντικότητα), δηλαδή μια στενότερη δέσμη ραδιοκυμάτων, από ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί με μία μόνο κεραιά. Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων στοιχείων κεραιάς, τόσο υψηλότερο είναι το κέρδος και η στενότερη είναι η δέσμη. Ορισμένες συστοιχίες κεραιάς (όπως τα στρατιωτικά ραντάρ σταδιακής συστοιχίας) αποτελούνται από χιλιάδες μεμονωμένες κεραιές. Οι πίνακες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί υψηλότερο κέρδος, για να δοθεί ποικιλία μονοπατιού (που ονομάζεται επίσης MIMO), η οποία αυξάνει την αξιοπιστία της επικοινωνίας, να ακυρώνει τις παρεμβολές από συγκεκριμένες κατευθύνσεις, να κατευθύνει τη ραδιοσυχνική ακτίνα ηλεκτρονικά για να δείχνει προς διαφορετικές κατευθύνσεις, (RDF)



Ο όρος συστοιχία κεραιών συνήθως σημαίνει μια κινητή συστοιχία αποτελούμενη από πολλαπλά πανομοιότυπα κινούμενα στοιχεία που όλα συνδέονται με τον δέκτη ή τον πομπό, συχνά δίπολα μισών κυμάτων που τροφοδοτούνται σε φάση. Μια παρασιτική συστοιχία αποτελείται από ένα μόνο κινούμενο στοιχείο που συνδέεται με την γραμμή τροφοδοσίας, και άλλα στοιχεία που δεν είναι, που ονομάζονται παρασιτικά στοιχεία. Συνήθως είναι ένα άλλο όνομα για μια κεραία Yagi-Uda. Μια φάση συστοιχία συνήθως σημαίνει μια ηλεκτρονικά σαρωμένη σειρά? Μια κεραία συστοιχίας στην οποία κάθε μεμονωμένο στοιχείο συνδέεται στον πομπό ή τον δέκτη μέσω ενός ρυθμιστή φάσης που ελέγχεται από έναν υπολογιστή. Η ακτίνα ραδιοκυμάτων μπορεί να κατευθύνεται ηλεκτρονικά για να δείχνει στιγμιαία σε οποιαδήποτε κατεύθυνση σε ευρεία γωνία, χωρίς να μετακινεί τις κεραιές. Ωστόσο, ο όρος "φάση συστοιχίας" χρησιμοποιείται μερικές φορές για να σημαίνει μια συνηθισμένη κεραία συστοιχίας



Οι κεραιές συστοιχιών μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες με βάση τον τρόπο με τον οποίο ο άξονας των μελών της κεραίας σχετίζεται με την κατεύθυνση της ακτινοβολίας.

- Μια ευρεία διάταξη είναι ένας πίνακας ενός ή δύο διαστάσεων στον οποίο η κατεύθυνση της ακτινοβολίας (κύριος λοβός) είναι κάθετη προς το επίπεδο των κεραιών.
- Μια συστοιχία endfire είναι μια γραμμική διάταξη στην οποία η κατεύθυνση της ακτινοβολίας είναι κατά μήκος της γραμμής των κεραιών.

Driven arrays (Καθοδηγούμενες συστοιχίες). Αυτές είναι συστοιχίες στις οποίες κινούνται όλες οι επιμέρους κεραίες - συνδεδεμένες με τον πομπό ή τον δέκτη. Οι μεμονωμένες κεραίες, οι οποίες είναι συνήθως πανομοιότυπες, συχνά αποτελούνται από μονόκλινα στοιχεία, όπως δίπολα μισού κύματος, αλλά μπορούν επίσης να είναι σύνθετες κεραίες όπως κεραίες Yagi ή κεραίες περιστροφής.

- Collinear antenna array(Συνευθυιακή Συστοιχία)
 - Batwing array(Αντίστροφη Συστοιχία)



- Planar array(Επίπεδη Συστοιχία)

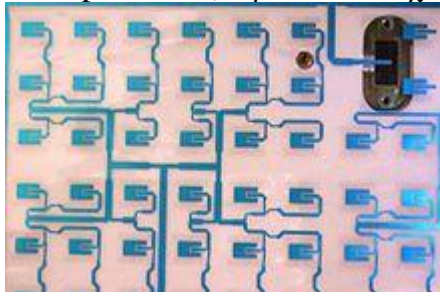
- Reflective array(Ανακλώμενη Συστοιχία)



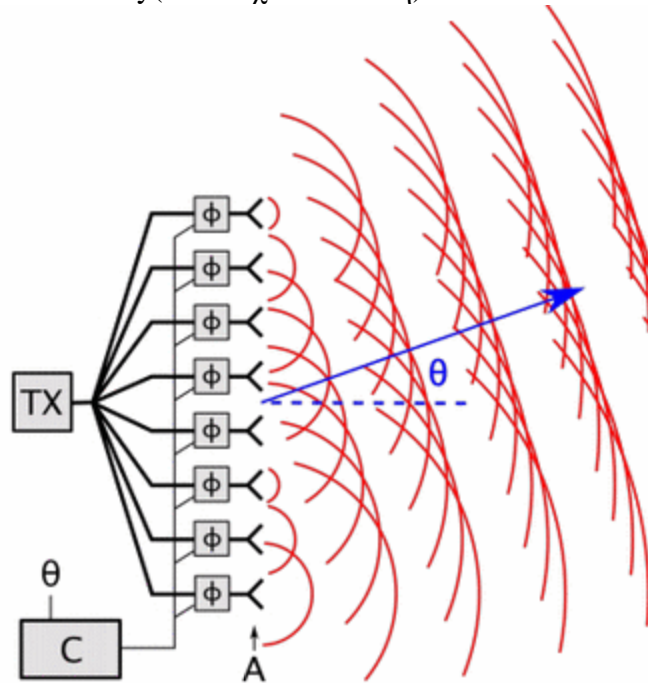
- Curtain array(Συστοιχία Κουρτίνα)



- Microstrip antenna(Κεραία Συστοιχίας Μικροταινία)



Phased array(Συστοιχία σε Φάση)



Passive electronically scanned array (Παθητική ηλεκτρονικά σαρωμένη Συστοιχία)

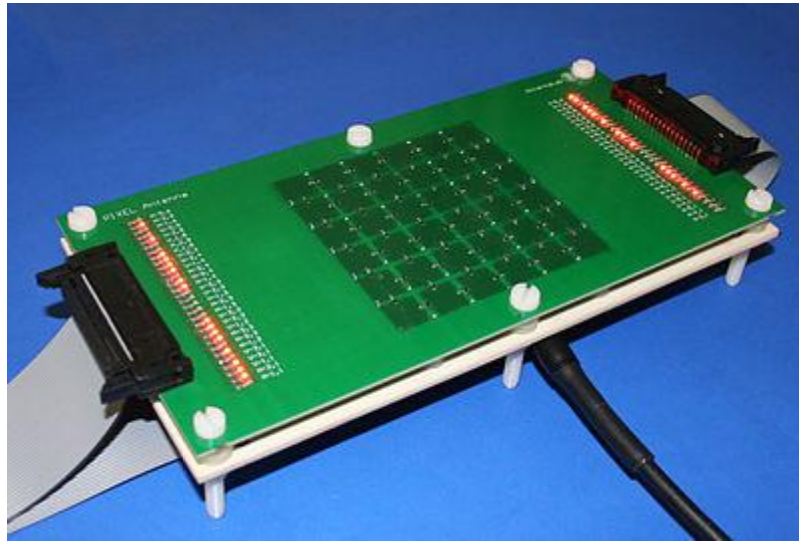


Active electronically scanned array (Ενεργά ηλεκτρονικά σαρωμένη Συστοιχία)



Conformal antenna(Συμμορφωμένη Κεραία)

- Reconfigurable antenna(Επαναδιαμορφώσιμη Κεραία)



- Log-Period antenna(Περιοδική Κεραία)



Parasitic arrays (Παρασιτικές Συστοιχίες). Πρόκειται για συστοιχίες endfire που αποτελούνται από πολλαπλά στοιχεία κεραίας σε μια γραμμή της οποίας μόνο ένα, το κινητήριο στοιχείο, συνδέεται με τον πομπό ή τον δέκτη, ενώ τα άλλα στοιχεία, που ονομάζονται παρασιτικά στοιχεία, δεν είναι. Τα παρασιτικά στοιχεία λειτουργούν ως συντονιστές, απορροφώντας ραδιοκύματα από το κινούμενο στοιχείο και ξαναδοκιμάζοντας τα με διαφορετική φάση, για να τροποποιήσουν το μοτίβο ακτινοβολίας της κεραίας, αυξάνοντας την ισχύ που ακτινοβολείται στην επιθυμητή κατεύθυνση. Δεδομένου ότι αυτά έχουν μόνο ένα κινητήριο στοιχείο, ονομάζονται συχνά "κεραίες" αντί "συστοιχιών".

- Yadi-Uda Antenna(Υadi-Uda Κεραία)

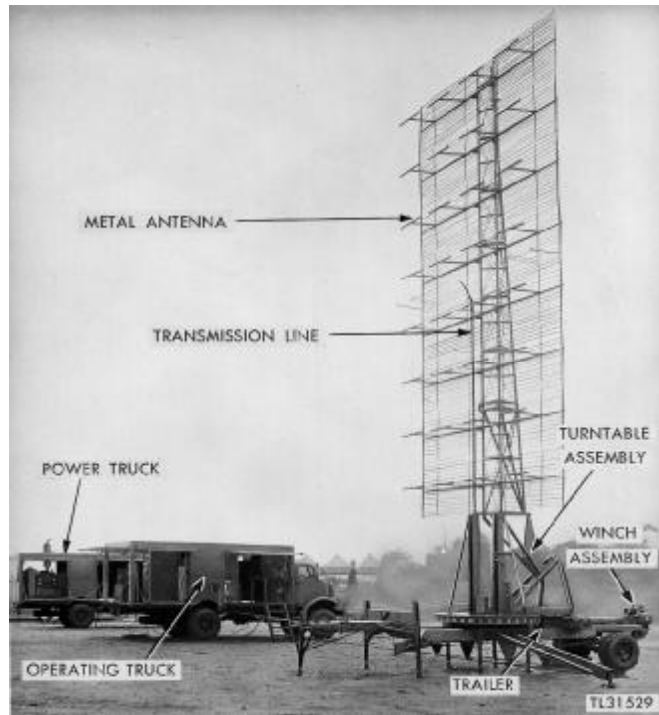


- Quad Antenna(Τετραπλή Κεραία)



Αντανεκλαστική κεραία συστοιχίας

Στις τηλεπικοινωνίες και τα ραντάρ, μια ανακλαστική κεραία συστοιχίας είναι μια κατηγορία κατευθυντικών κεραιών στα οποία πολλαπλά κινητά στοιχεία είναι τοποθετημένα μπροστά από μια επίπεδη επιφάνεια σχεδιασμένη να αντανεκλά τα ραδιοκύματα σε μια επιθυμητή κατεύθυνση. Πρόκειται για έναν τύπο συστοιχίας κεραίας. Συχνά χρησιμοποιούνται στις ζώνες συχνοτήτων VHF και UHF. Τα παραδείγματα VHF είναι γενικά μεγάλα και μοιάζουν με πινακίδα αυτοκινητοδρόμων, επομένως καλούνται μερικές φορές κεραίες πινακίδας ή σε κεραίες αποθηκών της Βρετανίας. Άλλα ονόματα είναι συστοιχίες bedspring και bowtie array ανάλογα με τον τύπο των στοιχείων που αποτελούν την κεραία. Η συστοιχία κουρτινών είναι μια μεγαλύτερη έκδοση που χρησιμοποιείται από σταθμούς ραδιοφωνικής μετάδοσης μικρού μήκους. Οι αντανεκλαστικές κεραίες συστοιχίας έχουν συνήθως ένα αριθμό πανομοιότυπων κινούμενων στοιχείων, τροφοδοτούμενα σε φάση, μπροστά από μια επίπεδη, ηλεκτρικά μεγάλη ανακλαστική επιφάνεια για να παράγουν μια μονοκατευθυντική δέσμη ραδιοκυμάτων, αυξάνοντας το κέρδος της κεραίας και μειώνοντας την ακτινοβολία σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται, τόσο υψηλότερο είναι το κέρδος. Όσο μικρότερη είναι η ακτίνα και όσο μικρότερες είναι οι πλευρικοί τοίχοι. Τα μεμονωμένα στοιχεία είναι συνήθως δίπολα μισών κυμάτων, αν και μερικές φορές περιέχουν παρασιτικά στοιχεία καθώς και οδηγημένα στοιχεία. Ο ανακλαστήρας μπορεί να είναι ένα μεταλλικό φύλλο ή συνήθως ένα καλώδιο. Μια μεταλλική οθόνη αντανεκλά τα ραδιοκύματα καθώς και ένα στερεό μεταλλικό φύλλο όσο οι οπές στην οθόνη είναι μικρότερες από περίπου το ένα δέκατο του μήκους κύματος, έτσι ώστε οι οθόνες χρησιμοποιούνται συχνά για να μειώσουν το φορτίο βάρους και ανέμου στην κεραία. Συνήθως αποτελούνται από μια σχάρα παράλληλων συρμάτων ή ράβδων, προσανατολισμένων παράλληλα προς τον άξονα των διπολικών στοιχείων.



Ραδιοσήματα

Όταν ένα ραδιοσήμα διέρχεται από έναν αγωγό, προκαλεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα μέσα του. Δεδομένου ότι το ραδιοσήμα γεμίζει χώρο και ο αγωγός έχει ένα πεπερασμένο μέγεθος, τα επαγόμενα ρεύματα αυξάνουν ή ακυρώνουν καθώς κινούνται κατά μήκος του αγωγού. Ένας βασικός στόχος του σχεδιασμού της κεραίας είναι να κάνει τα ρεύματα να φτάσουν στο μέγιστο στο σημείο όπου η ενέργεια αποσύρεται. Για να γίνει αυτό, τα στοιχεία της κεραίας έχουν μέγεθος σε σχέση με το μήκος κύματος του ραδιοφωνικού σήματος, με στόχο την τοποθέτηση σταθερών κυμάτων ρεύματος τα οποία μεγιστοποιούνται στο σημείο τροφοδοσίας.

Αυτό σημαίνει ότι μια κεραία σχεδιασμένη να δέχεται ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος έχει ένα φυσικό μέγεθος. Για να βελτιωθεί η λήψη, δεν μπορεί κανείς απλά να κάνει την κεραία μεγαλύτερη. Αυτό θα βελτιώσει την ποσότητα σήματος που παρεμποδίζεται από την κεραία, η οποία είναι σε μεγάλο βαθμό συνάρτηση της περιοχής, αλλά θα μειώσει την αποδοτικότητα της λήψης (σε ένα δεδομένο μήκος κύματος). Έτσι, προκειμένου να βελτιωθεί η λήψη, οι σχεδιαστές κεραίας συχνά χρησιμοποιούν πολλαπλά στοιχεία, συνδυάζοντάς τα έτσι ώστε τα σήματα τους να συσσωρεύονται. Αυτά είναι γνωστά ως συστοιχίες κεραίας.

Φάση συστοιχίας

Για να προστεθούν μαζί τα σήματα, πρέπει να φτάσουν σε φάση. Εξετάστε δύο δίπολες κεραίες που είναι τοποθετημένες σε μια γραμμή από άκρο σε άκρο. Εάν η προκύπτουσα διάταξη εντοπίζεται κατευθείαν στο σήμα πηγής, αμφότερα τα δίπολα θα δουν το ίδιο στιγμιαίο σήμα και έτσι η λήψη τους θα είναι σε φάση.

Ωστόσο, αν κάποιος έπρεπε να περιστρέψει την κεραία έτσι ώστε να είναι υπό γωνία προς το σήμα, η επιπλέον διαδρομή από το σήμα προς το πιο απομακρυσμένο δίπολο σημαίνει ότι λαμβάνει το σήμα ελαφρώς εκτός φάσης. Όταν τα δύο σήματα προστίθενται στη συνέχεια, δεν ενισχύονται αυστηρά μεταξύ τους και η έξοδος πέφτει. Αυτό κάνει την συστοιχία πιο ευαίσθητη οριζόντια, ενώ η στοίβα των διπόλων παράλληλα στενεύει το σχέδιο κατακόρυφα. Αυτό επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσαρμόσει το σχέδιο λήψης, και έτσι το κέρδος, μετακινώντας τα στοιχεία γύρω.

Εάν η κεραία ευθυγραμμιστεί σωστά με το σήμα, σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή, όλα τα στοιχεία μιας συστοιχίας θα λάβουν το ίδιο σήμα και θα είναι σε φάση. Ωστόσο, η έξοδος από κάθε στοιχείο πρέπει να συγκεντρωθεί σε ένα μόνο σημείο τροφοδοσίας, και καθώς τα σήματα κινούνται κατά μήκος της κεραίας μέχρι το σημείο αυτό, αλλάζει η φάση τους. Σε έναν πίνακα δύο στοιχείων αυτό δεν είναι πρόβλημα, επειδή το σημείο τροφοδοσίας μπορεί να τοποθετηθεί μεταξύ τους. Κάθε μετατόπιση φάσης που λαμβάνει χώρα στις γραμμές μεταφοράς είναι ίση και για τα δύο στοιχεία. Ωστόσο, εάν επεκταθεί αυτό σε μια συστοιχία τεσσάρων στοιχείων, αυτή η προσέγγιση δεν λειτουργεί πλέον, καθώς το σήμα από το εξωτερικό ζεύγος πρέπει να ταξιδέψει περαιτέρω και έτσι θα βρίσκεται σε διαφορετική φάση από το εσωτερικό ζεύγος όταν φτάσει στο κέντρο. Για να διασφαλιστεί ότι όλοι φτάνουν με την ίδια φάση, είναι συνηθισμένο να βλέπεις πρόσθετο καλώδιο μετάδοσης που έχει εισαχθεί στη διαδρομή του σήματος ή να διασταυρωθεί η γραμμή μετάδοσης για να αναστραφεί η φάση αν η διαφορά είναι μεγαλύτερη από το $1/2$ του μήκους κύματος.

Ανακλαστήρες

Το κέρδος μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με την προσθήκη ενός ανακλαστήρα. Γενικά, οποιοσδήποτε αγωγός σε ένα επίπεδο φύλλο θα ενεργεί με έναν καθρέφτη τρόπο για ραδιοσήματα, αλλά αυτό ισχύει και για τις μη συνεχείς επιφάνειες, εφόσον τα κενά μεταξύ των αγωγών είναι μικρότερα από περίπου το $1/10$ του μήκους κύματος στόχου. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν συρματοπλέγμα ή ακόμα και παράλληλα σύρματα ή μεταλλικές ράβδοι, το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο τόσο για τη μείωση της συνολικής ποσότητας υλικού όσο και για τη μείωση των φορτίων ανέμου.

Λόγω της αλλαγής στην κατεύθυνση διάδοσης του σήματος στην αντανάκλαση, το σήμα υφίσταται μια αντιστροφή της φάσης. Για να προσθέσει ο ανακλαστήρας στο σήμα εξόδου, πρέπει να φθάσει στα στοιχεία σε φάση. Γενικά, αυτό θα απαιτούσε το ανακλαστήρα να τοποθετηθεί στο $1/2$ του μήκους κύματος πίσω από τα στοιχεία, και αυτό μπορεί να φανεί σε πολλές κοινές συστοιχίες ανακλαστήρα όπως οι τηλεοπτικές κεραίες. Ωστόσο, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που μπορούν να αλλάξουν αυτή την απόσταση και η πραγματική τοποθέτηση του ανακλαστήρα ποικίλλει.

Οι ανακλαστήρες έχουν επίσης το πλεονέκτημα ότι μειώνουν το σήμα που λαμβάνεται από το πίσω μέρος της κεραίας. Τα σήματα που λαμβάνονται από το πίσω μέρος και μεταδίδονται εκ νέου από τον ανακλαστήρα δεν έχουν υποστεί αλλαγή φάσης και δεν προσθέτουν στο σήμα από το μέτωπο. Αυτό βελτιώνει σημαντικά την αναλογία εμπρός προς τα πίσω της κεραίας, καθιστώντας την πιο κατευθυντική. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο όταν επιθυμείτε ένα πιο κατευθυντικό σήμα ή υπάρχουν ανεπιθύμητα σήματα.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου αυτό δεν είναι επιθυμητό, και παρόλο που οι ανακλαστές εμφανίζονται συνήθως σε συστοιχίες κεραιών, δεν είναι καθολικές. Για παράδειγμα, ενώ οι κεραιές τηλεόρασης UHF χρησιμοποιούν συχνά μια σειρά από κεραιές bowtie με ανακλαστήρα, μια συστοιχία bowtie χωρίς ανακλαστήρα είναι ένας σχετικά κοινός σχεδιασμός στην περιοχή μικροκυμάτων.



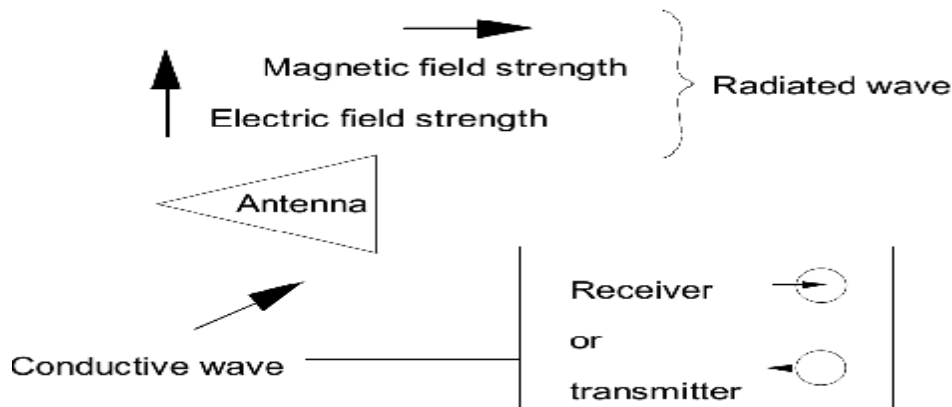
4.12 Χαρακτηριστικά Κεραιών

Οι κεραιές χαρακτηρίζονται από μια σειρά από μέτρα επιδόσεων τα οποία ο χρήστης θα ασχοληθεί με την επιλογή ή το σχεδιασμό μιας κεραιάς για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι επικεφαλής μεταξύ αυτών σχετίζονται με τα κατευθυντήρια χαρακτηριστικά το κέρδος που προκύπτει. Ακόμη και σε κεραιές απευθείας (ή ασθενώς κατευθυνόμενες), το κέρδος μπορεί συχνά να αυξηθεί συγκεντρώνοντας περισσότερη δύναμη στις οριζόντιες κατευθύνσεις, θυσιάζοντας την ισχύ που εκπέμπεται προς τον ουρανό και το έδαφος. Το κέρδος της κεραιάς λαμβάνει επίσης υπόψη την απόδοση της κεραιάς και είναι συχνά ο πρωταρχικός αριθμός των αξιών.

Οι συντονισμένες κεραιές αναμένεται να χρησιμοποιηθούν γύρω από μια συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού. Μια κεραιά πρέπει να κατασκευαστεί ή να παραγγελθεί ώστε να ταιριάζει με την περιοχή συχνοτήτων της προβλεπόμενης εφαρμογής.

Ένα συγκεκριμένο σχέδιο κεραιάς θα παρουσιάσει μια συγκεκριμένη σύνθετη αντίσταση. Αν και αυτό μπορεί να επηρεάσει την επιλογή μιας κεραιάς, η αντίσταση της κεραιάς μπορεί επίσης να προσαρμοστεί στο επιθυμητό επίπεδο σύνθετης αντίστασης ενός συστήματος που χρησιμοποιεί ένα αντίστοιχο δίκτυο διατηρώντας παράλληλα τα άλλα χαρακτηριστικά (εκτός από μια πιθανή απώλεια απόδοσης). Αν και αυτές οι παράμετροι μπορούν να μετρηθούν καταρχήν, τέτοιες μετρήσεις είναι δύσκολες και απαιτούν πολύ εξειδικευμένο εξοπλισμό. Πέρα από το συντονισμό μιας κεραιάς μετάδοσης χρησιμοποιώντας ένα μετρητή SWR, ο τυπικός χρήστης θα εξαρτηθεί από τις θεωρητικές προβλέψεις που βασίζονται στο σχεδιασμό της κεραιάς ή στις αξιώσεις ενός πωλητή.

Μια κεραία μεταδίδει και δέχεται ραδιοκύματα με μια συγκεκριμένη πόλωση η οποία μπορεί να αναπροσανατολιστεί με κλίση του άξονα της κεραίας σε πολλές (αλλά όχι όλες) περιπτώσεις. Το φυσικό μέγεθος μιας κεραίας είναι συχνά ένα πρακτικό ζήτημα, ιδιαίτερα σε χαμηλότερες συχνότητες (μεγαλύτερα μήκη κύματος). Οι πολύ κατευθυντήριες κεραίες πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος. Οι συντονιστές κεραίες συνήθως χρησιμοποιούν γραμμικό αγωγό (ή στοιχείο) ή ζεύγος από αυτά τα στοιχεία, καθένα από τα οποία είναι περίπου το ένα τέταρτο του μήκους κύματος σε μήκος (ένα περίεργο πολλαπλάσιο των τετάρτων μηκών κύματος θα είναι επίσης συντονισμένο). Οι κεραίες που πρέπει να είναι μικρές σε σύγκριση με την απόδοση θυσίας μήκους κύματος και δεν μπορούν να είναι πολύ κατευθυντήριες. Ευτυχώς σε υψηλότερες συχνότητες (UHF, μικροκύματα), η διαπραγμάτευση των επιδόσεων για την επίτευξη μικρότερου φυσικού μεγέθους συνήθως δεν απαιτείται.

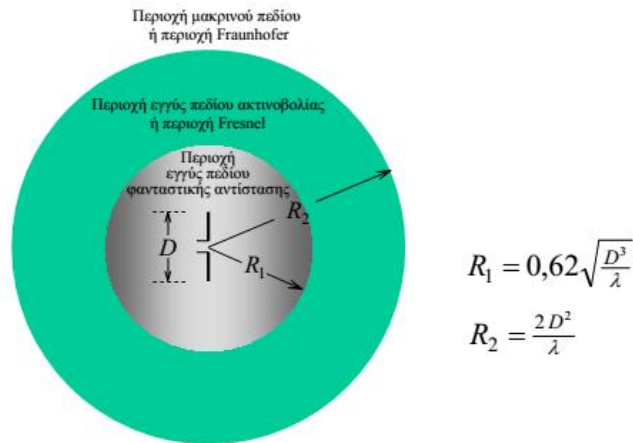


Ένα **ισοτροπικό** στοιχείο ακτινοβολίας ορίζεται ως μία υποθετική κεραία, χωρίς απώλειες, με την ίδια ακτινοβολία σε όλες τις κατευθύνσεις. **Κατευθυντική** είναι η κεραία που έχει ιδιότητα να εκπέμπει ή να λαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά κύματα με περισσότερη αποτελεσματικότητα σε ορισμένες διευθύνσεις παρά σε άλλες. **Ομοιοκατευθυντική** είναι η κεραία που είναι μη κατευθυντική σε ένα επίπεδο και κατευθυντική σε οποιοδήποτε κάθετο επίπεδο. **Λοβός** είναι τμήματα του διαγράμματος ακτινοβολίας που περιορίζεται από περιοχές σχετικά μικρής έντασης ακτινοβολίας και διακρίνονται σε **κύριους** ή **μέγιστους** σε **πλευρικούς** και σε **οπίσθιους**.

Περιοχές ακτινοβολίας κεραιών

- **Περιοχή εγγύς πεδίου φανταστικής αντίστασης** είναι η περιοχή η οποία περιβάλλει άμεσα την κεραία και όπου επικρατεί το πεδίο φανταστικής αντίστασης, δηλαδή, δεν ακτινοβολείται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Η περιοχή αυτή περιορίζεται χωρικά στο εσωτερικό σφαίρας με ακτίνα R_1 .

- Περιοχή εγγύς πεδίου ακτινοβολίας ή περιοχή **Fresnel** είναι η περιοχή στην οποία επικρατούν τα πεδία ακτινοβολίας και όπου η γωνιακή κατανομή του πεδίου εξαρτάται από την απόσταση από την κεραία. Η περιοχή Fresnel εκτείνεται στο χώρο που περιορίζεται από τις σφαίρες με ακτίνες R_1 και R_2 .



- Περιοχή μακρινού πεδίου περιοχή **Fraunhofer** είναι η περιοχή στην οποία η γωνιακή κατανομή του πεδίου είναι ανεξάρτητη από την απόσταση από την κεραία. Η περιοχή αυτή εμφανίζεται σε αποστάσεις από την κεραία μεγαλύτερες της R_2

4.12.1 Πυκνότητα Ισχύος Ακτινοβολίας

Το μέγεθος που περιγράφει την ισχύ που μεταφέρεται κατά τη μετάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος συνδέεται με το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο μέσο μετάδοσης μέσω του **διανύσματος Poynting**.

Το διάνυσμα Poynting ορίζεται ως το εξωτερικό γινόμενο των εντάσεων E και H ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου $\dot{P}(\vec{r}, t) = \dot{E}(\vec{r}, t) \times \dot{H}(\vec{r}, t)$

Το μέτρο του διανύσματος Poynting P εκφράζει τη διερχόμενη ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού

κύματος $F = \frac{dP}{dS} = \frac{\text{στοίχειώδη ισχύ}}{\text{στοίχειώδη επιφάνεια}}$ και έχει μονάδα μέτρησης W/m^2 .

Η συνολική στιγμιαία ισχύς που ακτινοβολείται από μία κεραία προκύπτει ολοκληρώνοντας την κάθετη συνιστώσα του $P(r, t)$ πάνω σε μία κλειστή επιφάνεια S που περιβάλλει την κεραία $P_{\text{ολ}}(t) = \oint_S \mathbf{\hat{r}} \cdot \mathbf{P}(r, t) dS$

Για την περίπτωση ημιτονοειδών μεταβαλλόμενων πηγών και πεδίων το διάνυσμα Poynting γράφεται ως

$$\mathbf{P}(r, t) = \mathbf{E}(r, t) \times \mathbf{H}(r, t) = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \mathbf{\hat{r}} \cdot \left(\mathbf{E}(r) \times \mathbf{H}(r)^* \right) \right\} + \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \mathbf{\hat{r}} \cdot \left(\mathbf{E}(r) \times \mathbf{H}(r) \right) e^{j2\omega t} \right\}$$

Όπου $E(r)$ και $H(r)$ είναι οι φασιθέτες της έντασης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα, δηλαδή

$$\mathbf{E}(r, t) = \text{Re} \left\{ \mathbf{E}(r) e^{j\omega t} \right\} \quad \text{και} \quad \mathbf{H}(r, t) = \text{Re} \left\{ \mathbf{H}(r) e^{j\omega t} \right\}$$

Ο πρώτος όρος στο δεξιό σκέλος είναι πραγματικός και χρονικά σταθερός και εκφράζει τη μέση τιμή της πυκνότητας πραγματικής ισχύος που ακτινοβολείται, ο αντίστοιχος δεύτερος όρος εκφράζει την άεργη ισχύ που καταναλώνεται περί την κεραία.

Όταν τα πεδία είναι χρονομεταβλητά, πιο επιθυμητή είναι η εύρεση της μέσης πυκνότητας ισχύος που προκύπτει με ολοκλήρωση του στιγμιαίου διανύσματος Poynting μέσα σε μία περίοδο και διαίρεση με την περίοδο

$$\mathbf{P}_{\text{msh}}(r) = \frac{1}{T} \oint_S \mathbf{P}(r, t) dt = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \mathbf{\hat{r}} \cdot \left(\mathbf{E}(r) \times \mathbf{H}(r)^* \right) \right\} \quad (\text{Watt/m}^2)$$

είναι η μέση χρονική τιμή του διανύσματος Poynting συναρτήσει των φασιθετών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου που προκύπτουν με βάση τις μέγιστες τιμές τους. Αν χρησιμοποιηθούν οι ενεργές τιμές, πρέπει να παραληφθεί ο παράγοντας $1/2$.

Η μέση ισχύς που ακτινοβολείται από μία κεραία δίνεται από την

$$P_{\text{akt}} = \oint_S \mathbf{P}_{\text{msh}}(r) dS = \frac{1}{2} \oint_S \text{Re} \left\{ \mathbf{\hat{r}} \cdot \left(\mathbf{E}(r) \times \mathbf{H}(r)^* \right) \right\} dS$$

Ισοτροπικό στοιχείο ακτινοβολίας είναι μία ιδανική πηγή που ακτινοβολεί ισομερώς σε όλες τις διευθύνσεις. Αν και στη πράξη δεν υπάρχει, αποτελεί μία βολική αναφορά για τη σύγκριση με άλλες κεραίες.

Λόγω της συμμετρικής του ακτινοβολίας, το αντίστοιχο διάνυσμα Poynting δεν θα είναι συνάρτηση των γωνιών των σφαιρικών συντεταγμένων θ και ϕ

$$P_{\text{akt}} = \int_S \mathbf{P}_0(\mathbf{r}) dS = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} [\hat{a}_r P_0(r)] * \hat{a}_r r^2 \sin\alpha d\alpha d\beta = P_0 4\pi r^2$$

$$\dot{\eta} P_{\text{akt}} = \int_S \mathbf{P}_0(\mathbf{r}) dS = P_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \hat{a}_r r^2 \sin\alpha d\alpha d\beta = P_0 4\pi r^2$$

και η πυκνότητα ισχύος είναι

$$\mathbf{P}_0(\mathbf{r}) = \hat{a}_r P_0(r) = \hat{a}_r \frac{P_{\text{akt}}}{4\pi r^2} \text{ (Watt / m}^2\text{)}$$

$$\dot{\eta} P_0 = F_0 = \frac{P_{\text{akt}}}{4\pi r^2}$$

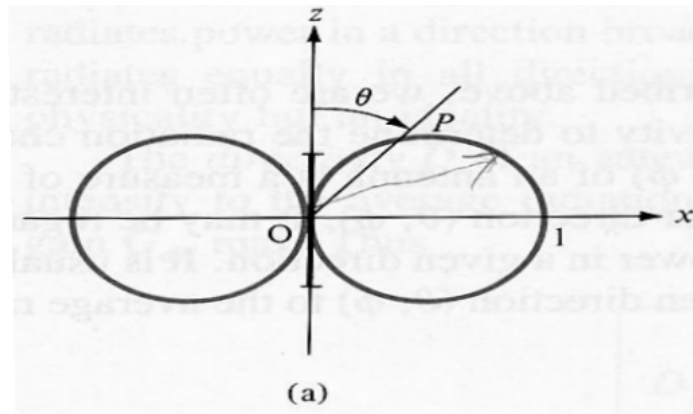
4.12.2 Περίγραμμα Κεραίας

Ένα περίγραμμα κεραίας ή ακτινοβολίας είναι μια τρισδιάστατη γραφική παράσταση της ακτινοβολίας σε μακρινό πεδίο. Όταν το πλάτος συγκεκριμένης συνιστώσας του πεδίου \mathbf{E} σχεδιαστεί (plotted), ονομάζεται περίγραμμα πεδίου (field pattern) ή περίγραμμα τάσης (voltage pattern). Όταν σχεδιασθεί το τετράγωνο του \mathbf{E} τότε ονομάζεται περίγραμμα ισχύς (power pattern). Η τρισδιάστατη γραφική παράσταση ενός περιγράμματος κεραίας αποφεύγεται με το να σχεδιασθεί ξεχωριστά το κανονικοποιημένο (normalized) E_s σε σχέση με το θ για σταθερό ϕ (αυτό ονομάζεται περίγραμμα πεδίου E) και το κανονικοποιημένο E_s σε σχέση με το ϕ για $\theta = \pi/2$ (αυτό ονομάζεται περίγραμμα πεδίου H).

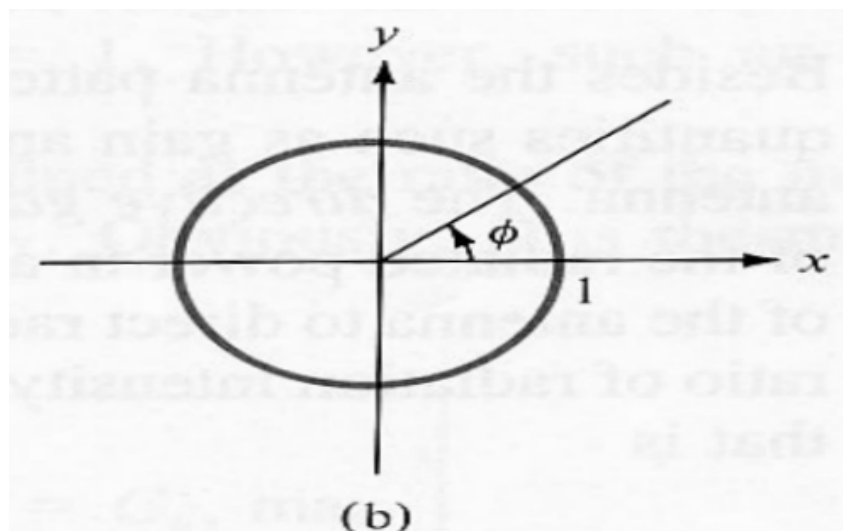
Για το δίπολο Hertzian, για παράδειγμα, το κανονικοποιημένο E_s το βρίσκουμε από τις εξισώσεις $H_{j_s} = \frac{jI_0 \mathbf{b} dl}{4\pi r} \sin\alpha e^{-j\beta r}$ και $E_{q_s} = \eta H_{j_s}$ όπου

$f(\alpha) = |\sin\alpha|$ το οποίο είναι ανεξάρτητο από το ϕ .

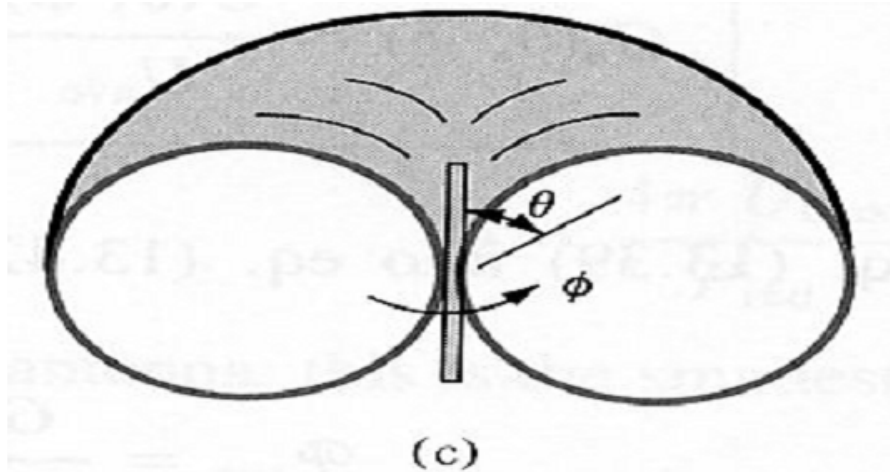
Από την προηγούμενη εξίσωση μπορούμε να βρούμε το περίγραμμα πεδίου E (E-plane pattern) ως τη γραφική παράσταση του $f(\theta)$ και με το θ να κυμαίνεται από το 0° στους 180° . Το αποτέλεσμα φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



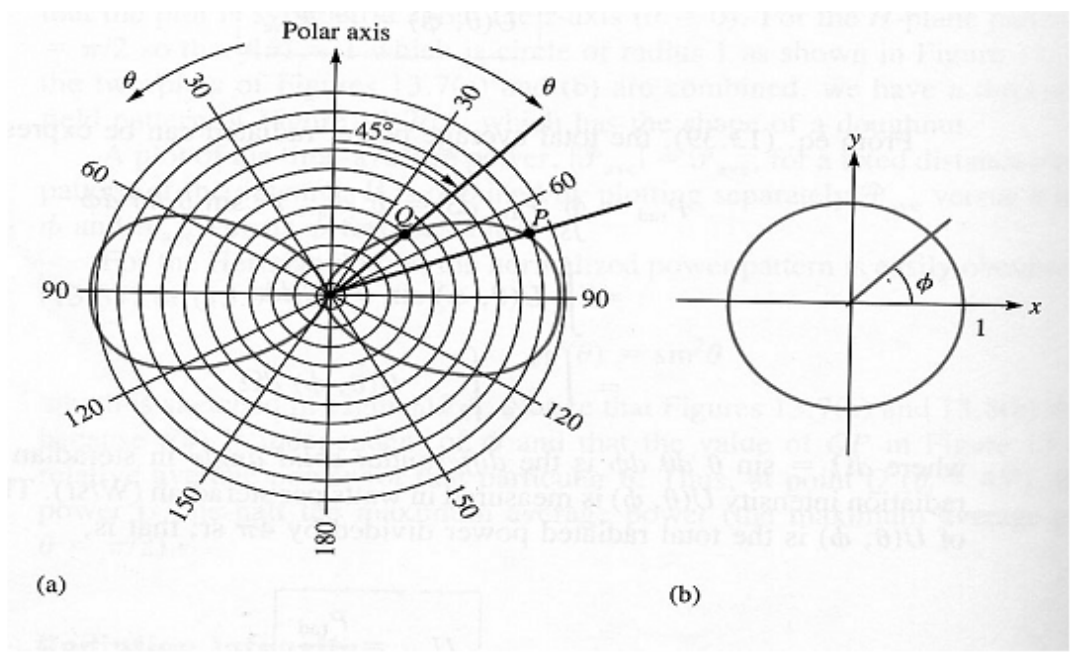
Για το περίγραμμα πεδίου H (H-plane pattern), βάζουμε το $\theta = \pi/2$ έτσι ώστε $f(\theta) = 1$ το οποίο είναι ένας κύκλος με ακτίνα 1 όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Όταν ενώσουμε αυτές τις δύο γραφικές παραστάσεις, έχουμε ένα τρισδιάστατο σχεδιάγραμμα πεδίου (field pattern) όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Η γραφική παράσταση της μέσης ισχύος-χρόνου, $\rho_{ave} = \rho_{ave}$, για μια σταθερή απόσταση r είναι το περίγραμμα ισχύος (power pattern) για τη κεραία. Το βρίσκουμε με το να σχεδιάσουμε ξεχωριστά το ρ_{ave} σε σχέση με το θ για σταθερό ϕ και το ρ_{ave} σε σχέση με το ϕ για σταθερό θ



Για μια πλήρη και ακριβή περιγραφή των χωρικών χαρακτηριστικών ακτινοβολίας μιας κεραίας. Πρέπει να καθοριστούν τα ακόλουθα

- Θ συνιστώσα της ισχύος του πεδίου ως συνάρτηση των γωνιών θ και ϕ
- Φ συνιστώσα της ισχύος του πεδίου ως συνάρτηση των γωνιών θ και ϕ

Από άποψη μεγέθους και φάσης.

Σε πολλές περιπτώσεις αρκεί να υποδεικνύεται το μέγεθος της ισχύος του πεδίου για την επιθυμητή κατεύθυνση πόλωσης, η οποία συνήθως εξομαλύνεται με την ισχύ του

$$\text{ανώτατο ορίου του πεδίου: } C(\mathbf{q}, j) = \frac{E(\mathbf{q}, j)}{E_{\max}(\mathbf{q}, j)} = \frac{H(\mathbf{q}, j)}{H_{\max}(\mathbf{q}, j)}$$

4.12.3 Ένταση Ακτινοβολίας (Radiation Intensity)

Η ένταση ακτινοβολίας μιας κεραίας ορίζεται ως $U(\mathbf{q}, j) = r^2 \tilde{A}_{ave}$

Από αυτή την εξίσωση η συνολική μέση ισχύς (total average power) που ακτινοβολείται μπορεί να εκφραστεί ως

$$P_{rad} = \oint_S \tilde{A}_{ave} dS = \oint_S \tilde{A}_{ave} r^2 \sin \varphi d\varphi dj = \oint_S U(\mathbf{q}, j) \sin \varphi d\varphi dj = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{j=0}^{\rho} U(\mathbf{q}, j) dW$$

όπου $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ είναι η διαφορική στερεά γωνία (differential solid angle) και μετριέται σε steradian(sr). Έτσι η ένταση της ακτινοβολίας μετριέται σε watts/steradian(W/sr). Η μέση τιμή του $U(\theta, \varphi)$ είναι η συνολική

ισχύς που ακτινοβολήθηκε δια 4π sr, που είναι $U_{ave} = \frac{P_{rad}}{4\pi}$

4.12.4 Κέρδος Ισχύος (Power Gain)

Το κέρδος ισχύος G αποτελεί ένα μέτρο για τον προσδιορισμό του πόσο αποδοτικά ακτινοβολεί μία κεραία και ορίζεται από τη σχέση

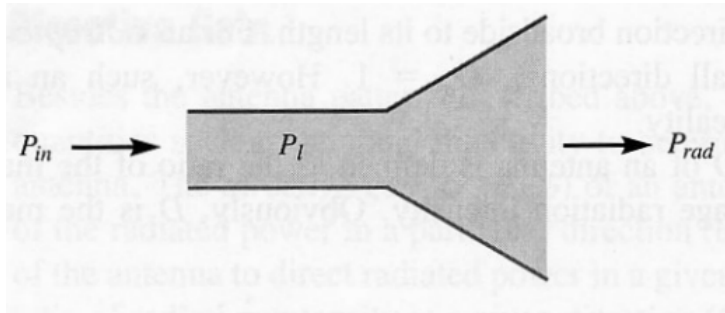
$$G = \frac{\text{μέγιστη ένταση ακτινοβολίας}}{\text{μέγιστη ένταση ακτινοβολίας από κεραία αναφοράς με την ίδια ισχύ εισόδου}}$$

Ο ορισμός που δώσαμε για την κατευθυντικότητα δεν περιλαμβάνει τις ωμικές απώλειες ισχύος P_l της κεραίας. Η P_l είναι λόγω του ότι η κεραία αποτελείται από αγωγούς και έχει συγκεκριμένη αγωγιμότητα. Όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα, αν το P_{in} είναι η συνολική εισερχόμενη ισχύς

στη κεραία $P_{in} = P_l + P_{rad} = \frac{1}{2} |I_{in}|^2 (R_l + P_{rad})$ όπου I_{in} είναι το ρεύμα στα

τερματικά στην είσοδο και το R_l είναι οι απώλειες ή η ωμική αντίσταση της κεραίας.

Με άλλα λόγια η P_{in} είναι η ισχύς που λαμβάνει η κεραία και το P_{rad} είναι η ισχύς που ακτινοβολεί. Η διαφορά τους είναι η P_l όπου είναι η ισχύς που χάνεται στη κεραία.



Ορίζουμε το κέρδος ισχύς $G_p(\theta, \varphi)$ της κεραίας ως $G_p(\theta, \varphi) = \frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{P_{in}}$

Η ισχύς ακτινοβολίας, που είναι άλλωστε και το μέγεθος που ενδιαφέρει πρακτικά, δεν εξαρτάται μόνο από τις ωμικές απώλειες και από τις απώλειες διηλεκτρικού που περιγράφονται μέσω του συντελεστή απόδοσης, αλλά και από το κλάσμα της ισχύος που ανακλάται από την κεραία προς την πηγή τροφοδοσίας λόγω μη επίτευξης προσαρμογής.

Αν P_{pros} είναι η ισχύς που φτάνει στην είσοδο της κεραίας, η ισχύς ακτινοβολίας λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες και την ανάκλαση ισχύος είναι

$$P_{akt} = n_r (1 - |\Gamma|^2) P_{pros}$$

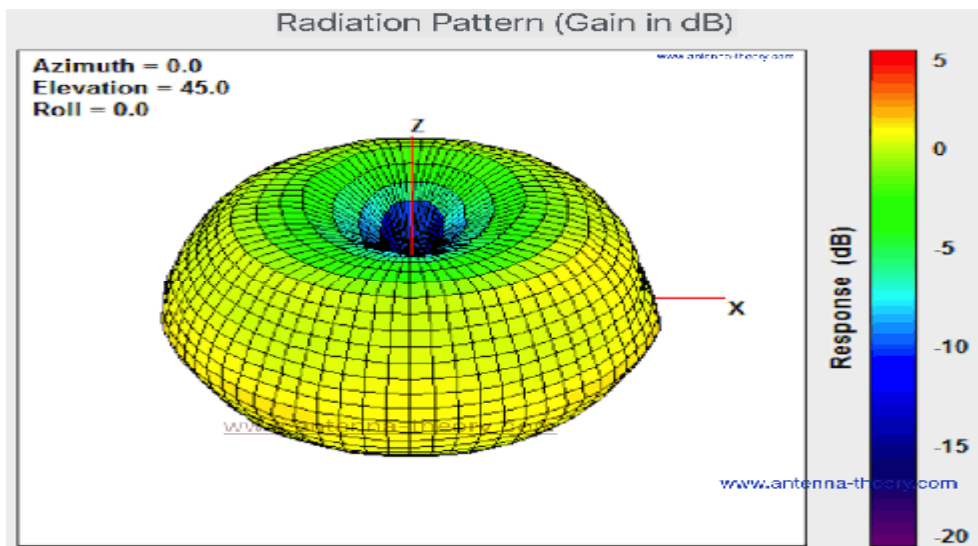
Όπου $\Gamma = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0}$ είναι ο **συντελεστής ανάκλασης** στην είσοδο της κεραίας, Z_a

η **αντίσταση εισόδου της κεραίας** και Z_0 η **χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς** που τροφοδοτεί την κεραία.

Η αναλογία του κέρδους ισχύς σε οποιαδήποτε καθορισμένη κατεύθυνση προς το κατευθυντικό κέρδος σε αυτή την κατεύθυνση ονομάζεται **αποτελεσματικότητα ακτινοβολίας (radiation efficiency)** η_r της κεραίας, η

οποία γράφεται ως $n_r = \frac{G_p}{G_d} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_l}$ Για πολλές κεραιές το n_r είναι κοντά στο 100% έτσι ώστε $G_p = G_d$.

Συνηθίζεται να εκφράζουμε την κατευθυντικότητα και το κέρδος σε decibels (dB). Έτσι $D(dB) = 10 \log_{10} D$, $G(dB) = 10 \log_{10} G$ Πρέπει να αναφερθεί ότι τα περιγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών συνήθως μετρούνται σε μακρινή απόσταση από τη κεραία, για παράδειγμα $r \gg r_{min}$, $r_{min} = \frac{2d^2}{\lambda}$ όπου d είναι η μεγαλύτερη διάσταση της κεραιάς.



4.12.5 Κατευθυντικό Κέρδος (Directive Gain)

Συχνά ενδιαφερόμαστε για παραμέτρους που μετρούνται όπως είναι το κέρδος και η κατευθυντικότητα. Το κατευθυντικό κέρδος (directive gain) $G_d(\theta, \phi)$ μιας κεραιάς, είναι μέτρο της περιεκτικότητας της ακτινοβολούμενης ισχύος σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση (θ, ϕ) . Μπορούμε να το πάρουμε ως την ικανότητα τις κεραιάς να ακτινοβολεί ενέργεια ευθέως σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Συνήθως λέμε ότι είναι η αναλογία της έντασης της ακτινοβολίας, σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση (θ, ϕ) προς τη μέση ένταση ακτινοβολίας και γράφεται:

$$G_d(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{ave}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}}$$

Ακόμα μπορούμε να πούμε ότι $\tilde{A}_{ave} = \frac{G_d}{4\pi r^2} P_{rad}$

Το κατευθυντικό κέρδος $G_d(\theta, \phi)$ εξαρτάται από το περίγραμμα της κεραιάς.

Για το δίπολο Hertzian (όπως και το $\lambda/2$ δίπολο και το $\lambda/4$ μονόπολο), παρατηρούμε από το προηγούμενο σχήμα ότι το ρ_{ave} είναι μέγιστο στο $\theta = \pi/2$ και ελάχιστο (μηδέν) στο $\theta = 0$ ή π . Έτσι το δίπολο Hertzian ακτινοβολεί ενέργεια σε μια κατεύθυνση ολόπλευρα στο μήκος του. Για μία ισοτροπική κεραία (κεραία που ακτινοβολεί ισοδύναμα σε όλες τις κατευθύνσεις), το $G_d = 1$. Όμως μια τέτοια κεραία δεν υπάρχει στη πραγματικότητα. Η κατευθυντικότητα D μιας κεραίας ορίζεται ως η αναλογία της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας προς τη μέση ένταση ακτινοβολίας. Προφανώς, το D ,

$$\text{είναι το μέγιστο } G_d \text{ έτσι } D = \frac{U_{max}}{U_{ave}} = G_{d, max} \text{ ή } D = \frac{4\rho U_{max}}{P_{rad}}$$

Για μια ισοτροπική κεραία το $D = 1$. Για ένα δίπολο Hertzian

$$G_d(\alpha, \beta) = 1.5 \sin^2 \alpha, D = 1.5 \quad \text{Για ένα δίπολο } \lambda/2 \quad G_d(\alpha, \beta) = \frac{h}{\rho P_{rad}} f^2(\alpha), D = 1.64$$

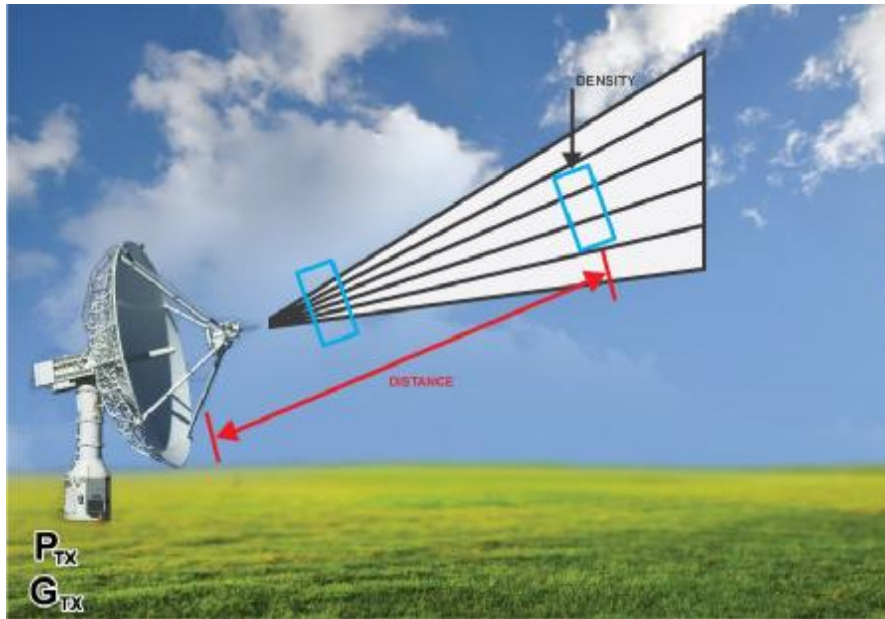
$$\mu_e h = 120\rho, R_{rad} = 73W \text{ και } f(\alpha) = \frac{\cos(\frac{\rho}{2} \cos \alpha)}{\sin \alpha}$$



Περίγραμμα πεδίου αντένας $\lambda/2$

4.12.6 Αποτελεσματική Περιοχή και Μήκος Κεραίας

Η αποτελεσματική περιοχή A_w της κεραίας είναι μια παράμετρος ειδικά καθορισμένη για τις κεραίες λήψης. Είναι ένα μέτρο για τη μέγιστη λήψη ενέργειας P_r που μια κεραία μπορεί να πάρει από ένα επίπεδο κύμα με πυκνότητα ισχύος P_d : $P_{max} = P_d * A_w$. Με πυκνότητα P_d ορίζουμε το μέτρο της ισχύος από μια κεραία σε μια ορισμένη απόσταση D . Αυτό προϋποθέτει ότι μια κεραία εκπέμπει ισχύ σε όλες τις κατευθύνσεις. Αυτή η αριθμομηχανή υπολογίζει για την τιμή της πυκνότητας ισχύος εάν δίνεται η ισχύς εξόδου και το κέρδος. Με P_d να ισούται με $P_d = \frac{P_{out} G}{4\rho D^2}$

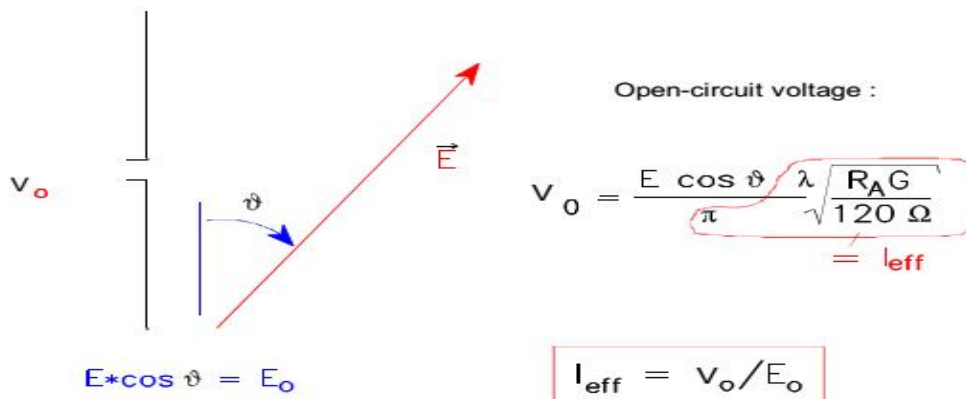


Αν και η πραγματική περιοχή μιας κεραίας μπορεί να θεωρηθεί ως μια πραγματική περιοχή κάθετη προς την κατεύθυνση της διάδοσης του προσπίπτοντος κύματος, δεν είναι απαραίτητα ταυτόσημη με την γεωμετρική περιοχή A_g της κεραίας. Η σχέση μεταξύ των πραγματικών και γεωμετρικών περιοχών περιγράφεται από την απόδοση του ανοίγματος $q = A_w / A_g$. Η πραγματική περιοχή μιας κεραίας μπορεί να

μετατραπεί στο κέρδος και το αντίστροφο με τη βοήθεια του τύπου $A_w = \frac{1}{4\pi} G$

Αποτελεσματικό μήκος κεραίας

Ανάλογα με την αποτελεσματική περιοχή της κεραίας, το πραγματικό μήκος της κεραίας (συχρά αναφέρεται επίσης ως αποτελεσματικό ύψος κεραίας) είναι το πηλίκο της μέγιστης τάσης ανοικτού κυκλώματος V_0 στην κεραία των ακροδεκτών και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E του προσπίπτοντος, γραμμικώς πολωμένου κύματος που λαμβάνεται με την κεραία ευθυγραμμισμένη $V_0 = h_{eff} E_0 = I_{eff} E_0$

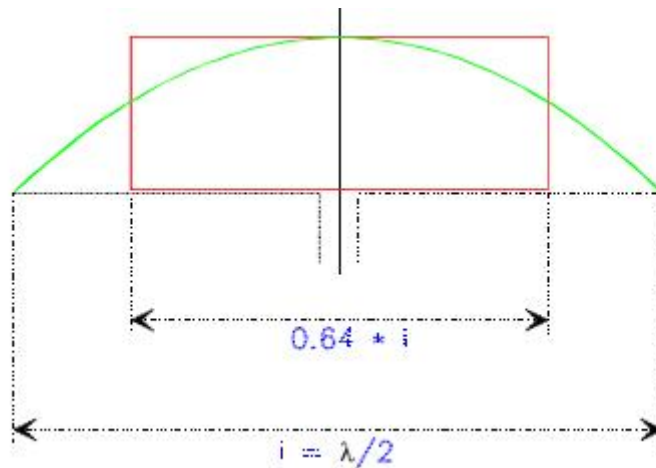


Το πραγματικό μήκος κεραίας δεν είναι το ίδιο με το γεωμετρικό μήκος κεραίας . Το πραγματικό μήκος μπορεί να υπολογιστεί από το γεωμετρικό μήκος l_g της κεραίας και του ρεύματος κατανομής $I_{z,q}$ στην κεραία κατά τη διάρκεια της μετάδοσης

λύνοντας το ολοκλήρωμα $l_{eff} = \int_0^{l_g} \frac{I_{z,q}}{I_A} dz_q$ Για ένα πολύ λεπτό δίπολο μισού κύματος,

για παράδειγμα, λαμβάνεται $l_{eff} = 0,64 \times l$. Από αυτό, το πραγματικό μήκος μπορεί να απεικονισθεί καλά: το πραγματικό μήκος μιας κεραίας είναι το μήκος που απαιτείται για ένα δίπολο στο οποίο το ομοιογενές ρεύμα σημείου τροφοδοσίας I_A εφαρμόζεται για να παράγει την ίδια ισχύ πεδίου στην κύρια κατεύθυνση της ακτινοβολίας ως ένα μέσο ακτινοβολίας στο οποίο εφαρμόζεται το πραγματικό ρεύμα. Για να μετατρέψετε την αναφερόμενη ενέργεια σε ποσότητες που αναφέρονται σε τάση, ο

τύπος είναι $l_{eff} = 2 \sqrt{\frac{R_A A_w}{120 \rho W}}$ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν είναι γνωστή η εμπέδηση σημείου τροφοδοσίας R_A της κεραίας.



Αποτελεσματικό μήκος κεραίας για δίπολο μισού κύματος

Έχουμε ότι $c = l \nu$ όπου c : ταχύτητα του φωτός, λ : μήκος κύματος και ν : συχνότητα. Επίσης ισχύει ομοίως ότι $l = \frac{vel}{\nu}$ όπου $vel = c \cdot V_f$ με V_f : συντελεστής ταχύτητας που συνήθως θα δίνεται και εξαρτάται από το υλικό της κεραίας

4.12.7 Πόλωση

Η πόλωση μιας κεραίας αναφέρεται στον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου (E-επίπεδο) του ραδιοκυμάτων σε σχέση με την επιφάνεια της Γης και καθορίζεται από τη φυσική δομή της κεραίας και από τον προσανατολισμό της. Σημειώστε ότι αυτή η ονομασία είναι εντελώς διαφορετική από την κατεύθυνση της κεραίας. Έτσι, μια απλή κεραία κενού καλωδίου θα έχει μία πόλωση όταν είναι τοποθετημένη κατακόρυφα και μια διαφορετική πόλωση όταν είναι τοποθετημένη οριζόντια. Ως εγκάρσιο κύμα, το μαγνητικό πεδίο ενός ραδιοκυμάτων είναι σε ορθή γωνία με εκείνο του ηλεκτρικού πεδίου, αλλά συμβατικά, ο όρος "πόλωση" της κεραίας θεωρείται ότι αναφέρεται στην κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου.

Οι ανακλάσεις γενικά επηρεάζουν την πόλωση. Για ραδιοκύματα, ένας σημαντικός ανακλαστήρας είναι η ιονόσφαιρα που μπορεί να αλλάξει την πόλωση του κύματος. Έτσι για τα σήματα που λαμβάνονται μετά την ανάκλαση από την ιονόσφαιρα (ουρανός κύμα), δεν μπορεί να αναμένεται συνεχής πόλωση. Για επικοινωνίες γραμμής όρασης ή διάδοση εδάφους κύματος, οι οριζόντια ή κάθετα πολωμένες μεταδόσεις γενικά παραμένουν περίπου στην ίδια κατάσταση πόλωσης στη θέση λήψης. Η αντιστοίχιση της πόλωσης της κεραίας λήψης με αυτήν του πομπού μπορεί να κάνει μια πολύ σημαντική διαφορά στην ισχύ του σήματος λήψης.

Η πόλωση είναι προβλέψιμη από τη γεωμετρία της κεραίας, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι καθόλου εμφανής (όπως για την τετραπλή κεραία). Η γραμμική πόλωση μιας κεραίας είναι γενικά κατά μήκος της κατεύθυνσης (όπως φαίνεται από τη θέση λήψης) των ρευμάτων της κεραίας όταν μπορεί να οριστεί μια τέτοια κατεύθυνση. Για παράδειγμα, μια κεραία κάθετης μίστιγας ή κεραία Wi-Fi κάθετα προσανατολισμένη θα μεταδίδει και θα λαμβάνει στην κατακόρυφη πόλωση. Η πόλωση μιας εμπορικής κεραίας αποτελεί βασική προδιαγραφή.

Η πόλωση είναι το άθροισμα των προσανατολισμών του E-επίπεδο με την πάροδο του χρόνου που προβάλλονται σε ένα φανταστικό επίπεδο κάθετο προς την κατεύθυνση κίνησης του ραδιοκυμάτων. Στην πιο γενική περίπτωση, η πόλωση είναι ελλειπτική, που σημαίνει ότι η πόλωση των ραδιοκυμάτων ποικίλει με την πάροδο του χρόνου. Δύο ειδικές περιπτώσεις είναι η γραμμική πόλωση (η έλλειψη καταρρέει σε μια γραμμή) όπως συζητήθηκε παραπάνω, και την κυκλική πόλωση (στην οποία οι δύο άξονες της έλλειψης είναι ίσοι). Σε γραμμική πόλωση το ηλεκτρικό πεδίο του ραδιοκυματικού κυματισμού κυλάει εμπρός και πίσω κατά μήκος μιας κατεύθυνσης. Αυτό μπορεί να επηρεαστεί από την τοποθέτηση της κεραίας, αλλά συνήθως η επιθυμητή κατεύθυνση είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη πόλωση. Στην κυκλική πόλωση, το ηλεκτρικό πεδίο (και το μαγνητικό πεδίο) του ραδιοκύματος περιστρέφεται κυκλικά γύρω από τον άξονα διάδοσης στην ραδιοσυχνότητα. Τα κυκλικά ή ελλειπτικά πολωμένα ραδιοκύματα χαρακτηρίζονται ως δεξιόστροφα ή αριστερόχειρα χρησιμοποιώντας τον κανόνα "αντίχειρα προς την κατεύθυνση του πολλαπλασιασμού". Σημειώστε ότι για την κυκλική πόλωση, οι οπτικοί ερευνητές χρησιμοποιούν τον κανόνα του δεξιού χεριού από αυτόν που χρησιμοποιούν οι ραδιομηχανικοί.

Είναι καλύτερο για την κεραία λήψης να ταιριάζει με την πόλωση του μεταδιδόμενου κύματος για βέλτιστη λήψη. Οι ενδιάμεσες αντιστοιχίες θα χάσουν κάποια ισχύ σήματος, αλλά όχι τόσο πλήρες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια κυκλικά πολωμένη κεραία για την ομοιόμορφη αντιστοίχιση κάθετων ή οριζόντιων γραμμικών πόλωσης. Η μετάδοση από μια κυκλικά πολωμένη κεραία που λαμβάνεται από μια γραμμικά πολωμένη κεραία (ή αντίστροφα) συνεπάγεται μείωση του λόγου σήματος προς θόρυβο κατά 3 dB, καθώς η λαμβανόμενη ισχύς έχει κοπεί κατά το ήμισυ.

4.12.8 Εύρος Ζώνης

Το εύρος ζώνης μιας κεραίας αναφέρεται στο φάσμα των συχνοτήτων πάνω από τις οποίες η κεραία μπορεί να λειτουργεί σωστά. Το εύρος ζώνης της κεραίας είναι ο αριθμός των Hz για το οποίο η κεραία θα παρουσιάσει ένα SWR μικρότερο από 2: 1.

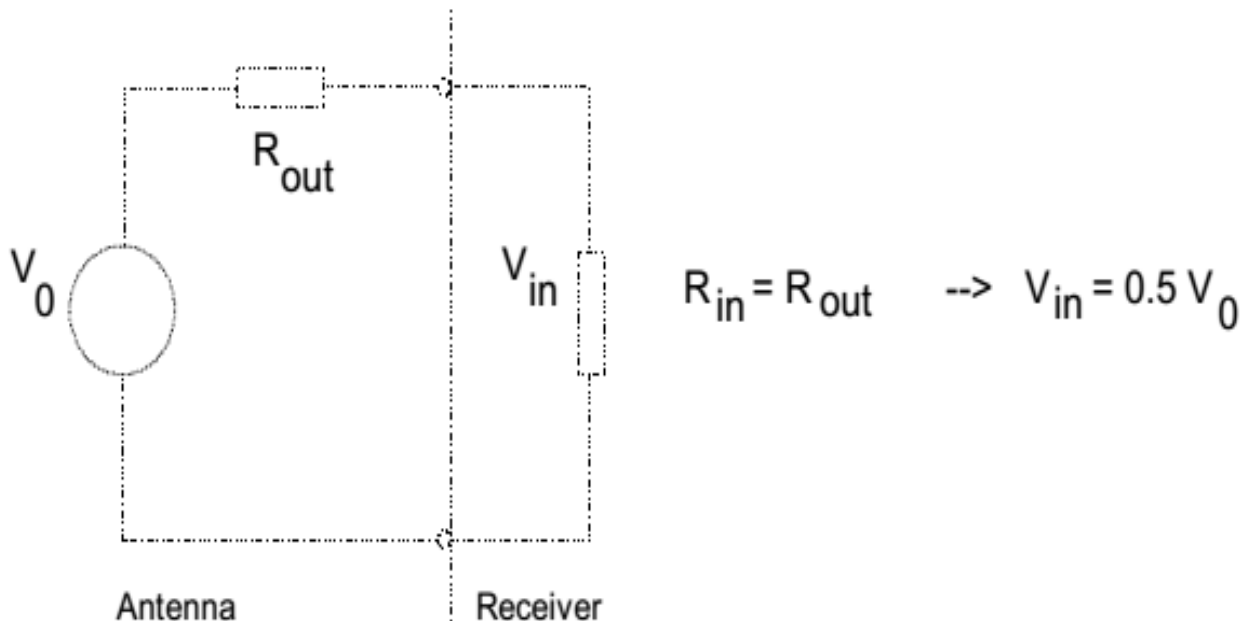
Το εύρος ζώνης μπορεί επίσης να περιγραφεί ως ποσοστό της κεντρικής συχνότητας του εύρους. $BW = 100 \frac{f_h - f_l}{f_c}$ Όπου f_h είναι η υψηλότερη συχνότητα στη

ζώνη, το f_l είναι η χαμηλότερη συχνότητα στη ζώνη, και f_c είναι η κεντρική συχνότητα στη ζώνη. Με αυτόν τον τρόπο, το εύρος ζώνης είναι σταθερό σε σχέση με τη συχνότητα. Εάν το εύρος ζώνης εκφράστηκε σε απόλυτες μονάδες συχνότητας, θα ήταν διαφορετική ανάλογα με την κεντρική συχνότητα. Διαφορετικοί τύποι κεραιών έχουν διαφορετικούς περιορισμούς εύρους ζώνης.

4.12.9 Συντελεστής Κεραίας

Ο συντελεστής κεραίας K είναι το πηλίκο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E και του V_{in} που υπάρχει στην είσοδο αντιστοιχισμένου δέκτη

$$K = \frac{I_{sc} \delta V_{hl} \text{ ekt} \rho \text{ i} \text{ k} \rho \text{ u} \text{ p} \epsilon \text{ d} \rho \text{ i} \text{ u}}{T \acute{\alpha} \sigma \eta \text{ e} \chi \acute{o} \delta \text{ o} \text{ u} \text{ s} \epsilon \text{ 50 } W}$$



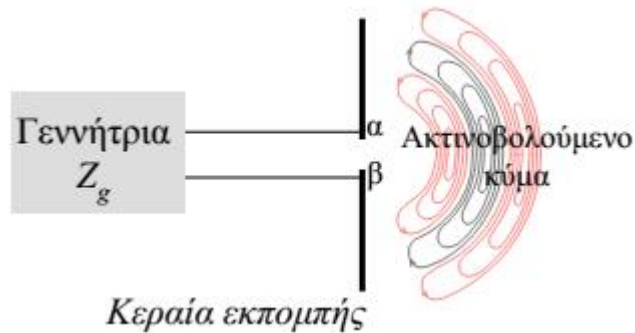
4.13 Η Κεραία ως Στοιχείο Κυκλωμάτων

Η κεραία ως στοιχείο κυκλώματος περιγράφεται μέσω της αντίστασης εισόδου της $Z_a = R_a + jX_a = (R_{akt} + R_{apwl}) + jX_a$

Η αντίσταση ακτινοβολίας R_{akt} ορίζεται ως η ωμική αντίσταση που αν διαρρεόταν με το ρεύμα εισόδου της κεραίας θα κατανάλωνε τη

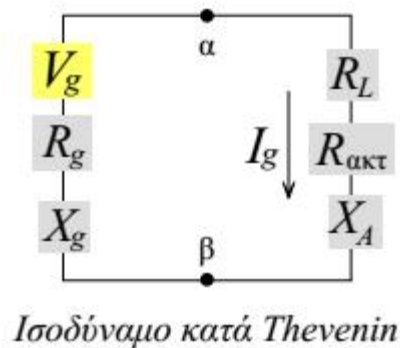
μέση ισχύ ακτινοβολίας $R_{akt} = \frac{P_{akt}}{I_{ener}^2}$ όπου I_{ener} είναι η ενεργός ένταση ρεύματος

στην είσοδο της κεραίας $I_{energ} = I_0 / \sqrt{2}$



Αν υποθεθεί ότι η κεραία συνδέεται με μία γεννήτρια εσωτερικής σύνθετης αντίστασης $Z_g = R_g + jX_g$

Το σύστημα κεραία γεννήτρια αποδίδεται από το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin.



Το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου σχετίζεται με την άεργη ισχύ στην κοντινή περιοχή της κεραίας. Μεγάλες τιμές του $|X_a(\omega)|$ απαιτούν πολύ υψηλή τάση τροφοδοσίας ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ισχύς ακτινοβολίας.

Η διαδικασία μέσω της οποίας το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου μηδενίζεται σε μία ορισμένη συχνότητα ω_0 ονομάζεται **συντονισμός της κεραίας**

Για το εύρος συχνοτήτων $\omega_0 - \Delta\omega/2$ έως $\omega_0 + \Delta\omega/2$, για το οποίο η $|X_a(\omega)|$ είναι σχετικά μικρή, η κεραία πρακτικά θεωρείται συντονισμένη. Το εύρος $\Delta\omega$ καλείται συνήθως **εύρος ζώνης της κεραίας**.

Το ρεύμα που διαρρέει το βρόχο είναι

$$I_g = \frac{V_g}{Z_{\text{ολ ikh}}} = \frac{V_g}{Z_A + Z_g} = \frac{V_g}{(R_{\text{akt}} + R_L + R_g) + j(X_A + X_g)} \text{ σε A}$$

Όπου V_g είναι το πλάτος της τάσης της γεννήτριας. Το μέτρο της έντασης του ρεύματος είναι $|I_g| = \frac{|V_g|}{\sqrt{(R_{\text{akt}} + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2}}$

Η ισχύς που προσφέρεται στην κεραία για ακτινοβολία είναι

$$P_{\text{akt}} = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_{\text{akt}} = \frac{1}{2} \frac{|V_g|^2 R_{\text{akt}}}{(R_{\text{akt}} + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \text{ σε Watts}$$

Η ισχύς που καταναλώνεται σε θερμότητα είναι

$$P_L = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L = \frac{1}{2} \frac{|V_g|^2 R_L}{(R_{\text{akt}} + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \text{ σε Watts}$$

Η υπόλοιπη ισχύς καταναλώνεται σε θερμότητα στην εσωτερική αντίσταση της πηγής

$$P_g = \frac{1}{2} \frac{|V_g|^2 R_g}{(R_{\text{akt}} + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \text{ σε Watts}$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα που αναφέρθηκε περιγράφει τη λειτουργία κεραίας εκπομπής που βρίσκεται μόνη στον ελεύθερο χώρο χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον τους ή η παρουσία άλλων κεραιών.

Στην πράξη, επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της ισχύος που η κεραία λαμβάνει από το κύκλωμα τροφοδότησης. Μέγιστη ισχύς προσφέρεται στη κεραία όταν οι μιγαδικές αντιστάσεις Z_a και Z_g είναι συζυγείς, δηλαδή, $R_{akt} + R_L = R_g$ και $X_a = -X_g$. Στην περίπτωση αυτή έχουμε **συζυγή προσαρμογή** της κεραίας προς το κύκλωμα τροφοδότησης.

Στην περίπτωση που η κεραία βρίσκεται σε συζυγή προσαρμογή προς το κύκλωμα τροφοδότησης, η ισχύς που προσφέρεται για ακτινοβολία είναι

$$P_{akt} = \frac{|V_g|^2}{2} \frac{R_{akt}}{4(R_{akt} + R_L)^2} = \frac{|V_g|^2}{8} \frac{R_{akt}}{(R_{akt} + R_L)^2}$$

η ισχύς που καταναλώνεται σε θερμότητα είναι

$$P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \frac{R_L}{(R_{akt} + R_L)^2}$$

η ισχύς καταναλώνεται σε θερμότητα στην εσωτερική αντίσταση της πηγής

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{8} \frac{R_g}{(R_{akt} + R_L)^2} = \frac{|V_g|^2}{8} \frac{1}{(R_{akt} + R_L)} = \frac{|V_g|^2}{8R_g}$$

Παρατηρούμε ότι $P_g = P_{akt} + P_L$. Η ισχύς που παρέχεται από τη γεννήτρια στην κεραία στην περίπτωση συζυγούς προσαρμογής είναι

$$P_s = \frac{1}{2} V_g I_g^* = \frac{1}{2} V_g \frac{V_g^*}{2(R_{akt} + R_L)} = \frac{|V_g|^2}{4} \frac{1}{R_{akt} + R_L} = \frac{|V_g|^2}{4R_g}$$

Η μισή ισχύς της πηγής P_s καταναλώνεται υπό μορφή θερμικών απωλειών P_g στην εσωτερική της αντίσταση και η υπόλοιπη μισή P_a προσφέρεται στην κεραία.

Από την ισχύ P_a που προσφέρεται στην κεραία ένα μέρος ακτινοβολείται P_{akt} και το υπόλοιπο χάνεται υπό μορφή θερμικών κυρίως απωλειών P_L . Ο **συντελεστής**

απόδοσης της κεραίας είναι ίσος με $n_r = \frac{R_{akt}}{R_{akt} + R_L}$

Στην πράξη η πηγή συνδέεται με την κεραία μέσω γραμμής μεταφοράς, τότε το Z_g αντιπροσωπεύει την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας μεταφερόμενη στους ακροδέκτες εισόδου της κεραίας με τη βοήθεια της εξίσωσης μεταφοράς σύνθετης αντίστασης.

4.13.1 Η λειτουργία της κεραίας κατά τη λήψη

Καθώς το κύμα προσπίπτει στην κεραία, επάγει μία τάση V_T που αποτελεί και την πηγή τάσης για το ισοδύναμο κύκλωμα της κεραίας λήψης.



Σε συνθήκες συζυγούς προσαρμογής ($R_{\text{ακτ}} + R_L = R_T$ και $X_a = -X_T$) οι ισχύεις που αποδίδονται στις $R_{\text{ακτ}}$, R_L και R_T , είναι

$$P_{\text{ακτ}} = \frac{|V_T|^2}{2} \frac{R_{\text{ακτ}}}{4(R_{\text{ακτ}} + R_L)^2} = \frac{|V_T|^2}{8} \frac{R_{\text{ακτ}}}{(R_{\text{ακτ}} + R_L)^2}$$

$$P_L = \frac{|V_T|^2}{8} \frac{R_{\text{ακτ}}}{(R_{\text{ακτ}} + R_L)^2}$$

$$P_T = \frac{|V_T|^2}{8} \frac{R_{\text{ακτ}}}{(R_{\text{ακτ}} + R_L)^2} = \frac{|V_T|^2}{8} \frac{1}{(R_{\text{ακτ}} + R_L)} = \frac{|V_T|^2}{8R_g}$$

Η ισχύς που επάγεται (συλλέγεται ή συλλαμβάνεται) P_C ονομάζεται **ισχύς συλλογής** και είναι $P_C = P_T + P_{\text{ακτ}} + P_L$

Όπου P_T είναι η ισχύς που τελικά παραλαμβάνεται από τη συσκευή του δέκτη, P_L είναι η ισχύς απωλειών της κεραίας λήψης και η ισχύς $P_{\text{ακτ}}$ η οποία επανακτινοβολείται από την κεραία λήψης και λέγεται **σκεδαζόμενη (scattered)**, ή **επανακτινοβολούμενη** ισχύς.

$$\text{Η ισχύς } P_C \text{ είναι } P_C = \frac{1}{2} V_T I_T^* = \frac{1}{2} V_T \frac{V_T^*}{2(R_{\text{ακτ}} + R_L)} = \frac{|V_T|^2}{4} \frac{1}{R_{\text{ακτ}} + R_L} = \frac{|V_T|^2}{4R_g}$$

Υπό συνθήκες συζυγούς προσαρμογής, το μισό της ολικής ισχύος συλλογής P_C , μεταφέρεται στο φορτίο R_T ενώ το άλλο μισό επανακτινοβολείται από την κεραία μέσω της $R_{\text{ακτ}}$ ή καταναλώνεται ως θερμότητα στην R_L .

Ο μηχανισμός επανεκπομπής, αν και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ανεπιθύμητος αφού οδηγεί σε μείωση της ισχύος P_T , χρησιμεύει για τη δημιουργία στοιχειοκεραίων.

4.13.2 Η αρχή της αβεβαιότητας για κεραίες

Η **αρχή της αμοιβαιότητας** προβλέπει ότι οι κατευθυντικές ιδιότητες μίας κεραίας όταν χρησιμοποιείται για εκπομπή ταυτίζονται με τις ιδιότητές της όταν χρησιμοποιείται για λήψη. Έτσι κάθε κεραία εμφανίζει την ίδια συνάρτηση κατευθυντικότητας είτε χρησιμοποιείται για εκπομπή είτε χρησιμοποιείται για λήψη, υπό την προϋπόθεση ότι το προσπίπτων έχει την ίδια πόλωση.

Όταν μία κεραία λειτουργεί για λήψη, η ικανότητά της να συλλέξει ηλεκτρομαγνητική ισχύ περιγράφεται από την **ενεργό επιφάνεια** A_{ener} .

$$\text{Όπου } A_{\text{ener}} = \frac{P_T}{P_{\text{msh}}} = \frac{Isc \nu V \text{ που μεταδίδει στο φορτίο (W)}}{M \acute{e}sh \text{ πυκνότητα ισχύος (W/m}^2\text{)}}$$

Η ενεργός επιφάνεια είναι η επιφάνεια που αν πολλαπλασιαστεί με την προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος, δίνει την ισχύ που αποδίδεται στο φόρτο. Γενικά η έννοια της ενεργού επιφάνειας δεν ταυτίζεται με το φυσικό άνοιγμα της κεραίας.

Η ενεργός επιφάνεια εξαρτάται από τον προσανατολισμό της κεραίας καθώς και από το συσχετισμό της πόλωσης της κεραίας και του προσπίπτοντος κύματος. Η ενεργός επιφάνεια σε συνάρτηση με το στοιχείο του ισοδύναμου κυκλώματος

$$\text{δίνεται από την } A_{\text{ener}} = \frac{|V_T|^2}{2P_{\text{msh}}} \frac{R_T}{(R_{\text{akt}} + R_L + R_T)^2 + (X_a + X_T)^2} \text{ σε m}^2$$

Εφόσον υπάρχει συζυγής τερματισμός της κεραίας ως προς το κύκλωμα το οποίο τροφοδοτεί, η ενεργός επιφάνεια λαμβάνει τη μέγιστή της τιμή που ονομάζεται **μέγιστη ενεργός επιφάνεια** A_{emax}

$$A_{\text{ener}} = \frac{|V_T|^2}{8P_{\text{msh}}} \frac{1}{R_{\text{akt}} + R_L}$$

Η **επιφάνεια σκέδασης** (*scattering area*) ορίζεται ως η ισοδύναμη εκείνη επιφάνεια που όταν πολλαπλασιαστεί με την προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος, δίνει την σκεδαζόμενη ή επανακτινοβολούμενη ισχύ. Υπό συνθήκες συζυγούς προσαρμογής

$$\text{είναι } A_{\text{scat}} = \frac{|V_T|^2}{8P_{\text{msh}}} \frac{R_{\text{akt}}}{(R_{\text{akt}} + R_L)^2}$$

Η **επιφάνεια απωλειών** (*loss area*) ορίζεται ως η ισοδύναμη εκείνη επιφάνεια που όταν πολλαπλασιαστεί με την προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος, δίδει την ισχύ που καταναλώνεται υπό μορφή θερμότητας στην R_L . Υπό συνθήκες συζυγούς

προσαρμογής είναι
$$A_L = \frac{|V_T|^2}{8P_{msh}} \frac{R_L}{(R_{akt} + R_L)^2}$$

Η **επιφάνεια σύλληψης** (*capture area*) ορίζεται ως η ισοδύναμη εκείνη επιφάνεια που όταν πολλαπλασιαστεί με την προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος, δίδει την ολική συλλεγόμενη ισχύ. Υπό συνθήκες συζυγούς προσαρμογής είναι

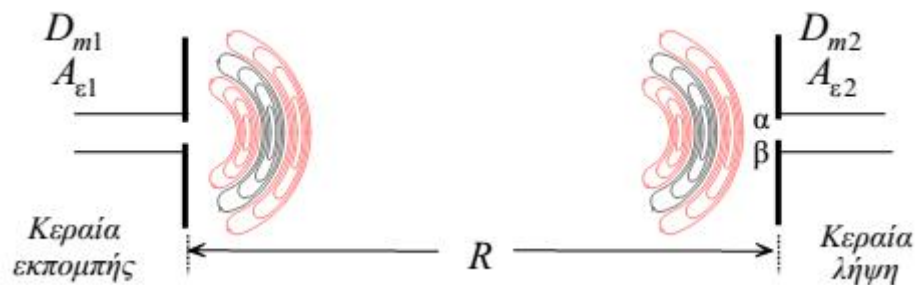
$$A_C = \frac{|V_T|^2}{8P_{msh}} \frac{R_T + R_{akt} + R_L}{(R_{akt} + R_L)^2}$$

και ισχύει **Επιφάνεια σύλληψης = Ενεργός επιφάνεια + Επιφάνεια σκέδασης + Επιφάνεια απωλειών.**

Η **απόδοση ανοίγματος** (*aperture efficiency*) μιας κεραίας ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ενεργού επιφάνειας $A_{εmax}$ της κεραίας προς τη φυσική της επιφάνεια A , δηλαδή,

$$a_{ap} = \frac{A_{εmax}}{A_p} = \frac{\text{Μέγιστη ενεργός επιφάνεια}}{\text{Φυσική ή επιφάνεια}}$$

4.13.3 Ανάλυση ισολογισμού ισχύος. Μέγιστη κατευθυντικότητα– ενεργός επιφάνεια σε κεραίες



Υποθέτουμε ότι μια κεραία εκπομπής ακτινοβολεί ισοτροπικά στον ελεύθερο χώρο με ισχύ P_T σε Watts. Η πυκνότητα ισχύος σε απόσταση R από την κεραία

είναι
$$P_0 = \frac{P_T}{4\pi R^2} \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2}$$

Εάν η κεραία εκπομπής έχει κατευθυντικότητα προς μία ορισμένη κατεύθυνση, η πυκνότητα ισχύος στην κατεύθυνση αυτή αυξάνει κατά τον παράγοντα κέρδους της κεραίας εκπομπής G_T , έτσι η πυκνότητα ισχύος σε απόσταση R προς την

$$\text{κατεύθυνση αυτή είναι } P_t = P_0 D_{m1} = \frac{P_T}{4\pi R^2} D_{m1}$$

Το γινόμενο $P_T G_T$ συνήθως καλείται **ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς** (*effective isotropically radiated power*– EIRP), η οποία ουσιαστικά είναι η ακτινοβολούμενη ισχύς σχετικά με μία ιστροπική κεραία για την οποία $G_T = 1$.

Μία κεραία λήψης προσανατολισμένη στην κατεύθυνση ακτινοβολίας ισχύος, συλλέγει μέρος της ισχύος, το οποίο είναι ανάλογο του εμβαδού της εγκάρσιας διατομής της. Επομένως, η λαμβανόμενη ισχύς που εξάγεται από την κεραία

$$\text{εκφράζεται ως } P_R = A_{\text{ener } 2} P_t = \frac{P_T}{4\pi R^2} D_{m1} A_{\text{ener } 2} \text{ ή } D_{m1} A_{\text{ener } 2} = \frac{P_R}{P_T} (4\pi R^2) \text{ όπου}$$

$A_{\text{ener } 2}$ είναι η ενεργός επιφάνεια της κεραίας λήψης.

Αν το προηγούμενο πείραμα επαναληφθεί αντιστρέφοντας τους ρόλους πομπού και δέκτη, υποθέτοντας ότι το μέσο διάδοσης είναι γραμμικό και

ισότροπο έχουμε $D_{m2} A_{\text{ener } 1} = \frac{P_R}{P_T} (4\pi R^2)$ από τις τελευταίες σχέσεις προκύπτει η

$$\text{θεμελιώδης σχέση } \frac{D_{m1}}{A_{\text{ener } 1}} = \frac{D_{m2}}{A_{\text{ener } 2}}$$

Μέσω της σχέσης αυτής εκφράζεται η θεμελιώδης ιδιότητα των κεραιών ότι η κατευθυντικότητα μιας κεραίας συνδέεται κατά μονοσήμαντο τρόπο με τη μέγιστη ενεργό επιφάνειά της.

Αποδεικνύεται ότι η κατευθυντικότητα και η ενεργός επιφάνεια ενός διπόλου Hertz δίδονται από τις σχέσεις $D_{\max \text{ Hertz}} = 1.5 A_{e \max \text{ Hertz}} = \frac{3|I|^2}{8\rho}$ και η ενεργός επιφάνεια ενός ιστροπικού ακτινοβολητή είναι ίση με $A_{e \max i} = \frac{|I|^2}{4\rho}$

Επομένως, η σχέση αναλογίας μεταξύ κατευθυντικότητας και μέγιστης ενεργού επιφάνειας κάθε κεραίας είναι $A_{e \max} = \frac{|I|^2}{4\rho} D_{\max}$

Οι ενδεχόμενες απώλειες της κεραίας τροποποιούν την τελευταία σχέση ως $A_{e \max} = \frac{|I|^2}{4\rho} n_r D_{\max} = \frac{|I|^2}{4\rho} G_{\max}$

Οι σχέσεις συσχετίζουν τη μέγιστη ενεργό επιφάνεια με την κατευθυντικότητα ή το κέρδος μιας κεραίας. Αν όμως υπάρχουν απώλειες αναπροσαρμογής και αποπόλωσης, τότε η μέγιστη ενεργός επιφάνεια τροποποιείται ως

$$A_{e \max} = \frac{|I|^2}{4\rho} e_{cd} (1 - |r|^2) D_0 |r_w r_a|^2$$

Επομένως, η λαμβανόμενη ισχύς που εξάγεται από την κεραία εκφράζεται ως $P_R = \frac{P_T}{4\rho R^2} D_{T1} A_{e \max} = \frac{P_T}{4\rho R^2} D_{T1} \frac{D_{R1} |I|^2}{4\rho}$ ή $P_R = P_T \left(\frac{|I|}{4\rho R}\right)^2 D_{T1} D_{R1} = P_T \frac{D_{T1} D_{R1}}{L_S}$

Όπου $\left(\frac{4\rho R}{|I|}\right)^2 = L_S$ είναι η **απώλεια διάδοσης ελεύθερου χώρου**.

Άλλες απώλειες, όπως οι ατμοσφαιρικές, οι οποίες μπορεί να συναντώνται κατά τη μετάδοση του σήματος, λαμβάνονται υπόψη εισάγοντας έναν επιπλέον παράγοντα απωλειών L_a . Έτσι, η λαμβανόμενη ισχύς μπορεί να εκφραστεί ως

$$P_R = P_T \frac{D_{T1} D_{R1}}{L_S L_a} \text{ ή, ισοδύναμα, } P_{R \text{ dBw}} = P_{T \text{ dBw}} + D_{T \text{ dBw}} + D_{R \text{ dBw}} - L_{S \text{ dBw}} - L_{a \text{ dBw}}$$

4.13.4 Ίδια και αμοιβαία σύνθετος αντίσταση



Η κεραία ως στοιχείο κυκλώματος περιγράφεται μέσω της **σύνθετου αντίστασης εισόδου** της, δηλαδή, την σύνθετη αντίσταση την οποία μπορούμε να θεωρήσουμε στο τέλος της γραμμής μεταφοράς έτσι ώστε να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα.

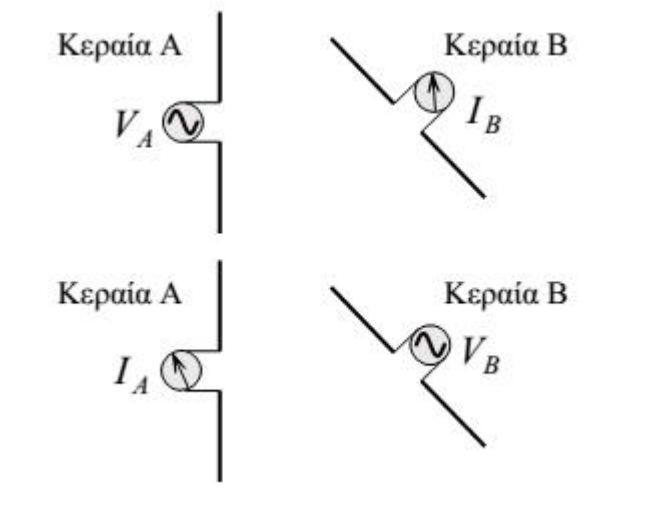
Στην περίπτωση που η κεραία είναι μεμονωμένη στον χώρο και δεν παρουσιάζει θερμικές απώλειες η αντίσταση αυτή ονομάζεται **ίδια σύνθετος αντίσταση** Z_{11} .

$Z_{11} = R_{11} + jX_{11}$ όπου R_{11} είναι η **ίδια ωμική αντίσταση** και ταυτίζεται με την αντίσταση ακτινοβολία και X_{11} η **ίδια μη ωμική αντίσταση**.

Στην πράξη όμως χρησιμοποιούνται συνήθως συστήματα ακτινοβολίας τα οποία περιέχουν περισσότερες κεραίες οι οποίες τοποθετούνται κατάλληλα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται επιθυμητή μορφή διαγράμματος ακτινοβολίας, δηλαδή, μεγάλη ακτινοβολία προς ορισμένη διεύθυνση και κατάργηση της προς άλλες.

Η προσέγγιση κεραίας 2 έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της σύνθετης αντίστασης εισόδου της κεραίας 1. Η τιμή της νέας αντίστασης εισόδου θα εξαρτάται εκτός από την Z_{11} και από την **αμοιβαία σύνθετη αντίστασης** Z_{12} η οποία προέρχεται από την σύζευξη μεταξύ των δύο κεραιών.

Θεώρημα της αντιστοιχίας



Αν στην είσοδο κεραία A εφαρμοστεί τάση V_A , τότε η κεραία B, η οποία βρίσκεται σε σύζευξη με την κεραία A, διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα I_B .

Τότε ίσο ρεύμα κατά μέτρο $I_A=I_B$ και φάση θα δημιουργηθεί στην κεραία A αν στην κεραία B εφαρμοστεί τάση $V_A=V_B$. Άμεσο συμπέρασμα του θεωρήματος είναι ότι το διάγραμμα εκπομπής μιας κεραίας είναι το ίδιο με το διάγραμμα λήψης της.

Η ανοιγμένη σύνθετος αντίσταση Z_{AB} είναι ίση

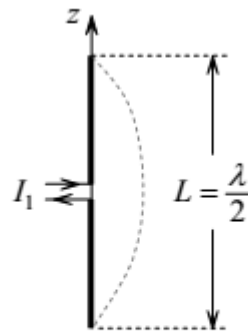
$$Z_{AB} = \frac{\text{η ΗΕΔ που εφαρμόζεται στην κεραία A}}{\text{η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την κεραία B}} = \frac{V_A}{I_B}$$

Σύμφωνα με το θεώρημα της αντιστοιχίας όταν $V_B=V_A$ είναι $I_B=I_A$ έπεται ότι

$$Z_{AB} = Z_{BA} \text{ και } \frac{V_A}{I_B} = \frac{V_B}{I_A}$$

Ίδια σύνθετη αντίσταση λεπτής γραμμικής κεραίας

Δίπολο $\lambda/2$ τροφοδοτείται από διπλή γραμμή στο μέσο του. Θεωρούμε ότι η κεραία είναι μεμονωμένη και δεν παρουσιάζει απώλειες. Η κεραία τροφοδοτείται από τάση V_{11} και διαρρέεται από ρεύμα I_1 .



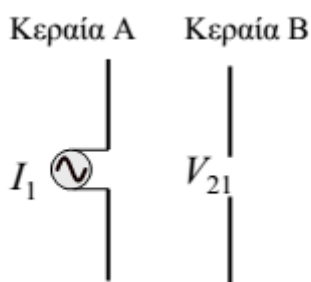
Κεραία $\lambda/2$ τροφοδοτούμενη στο κέντρο

Αποδεικνύεται ότι η ίδια σύνθετος αντίσταση της κεραίας είναι

$$Z_{11} = \frac{V_{11}}{I_1} = R_{11} + jX_{11} = 73 + j42,5 \Omega$$

Αμοιβαία σύνθετη αντίσταση μεταξύ κεραιών

Για δύο κεραιές που βρίσκονται σε σύζευξη



ορίζεται η αμοιβαία σύνθετος αντίσταση

$$Z_{AB} = - \frac{\text{η επαγωγική τάση στα άκρα της κεραίας 2}}{\text{η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την κεραία 1}} = - \frac{V_{21}}{I_1}$$

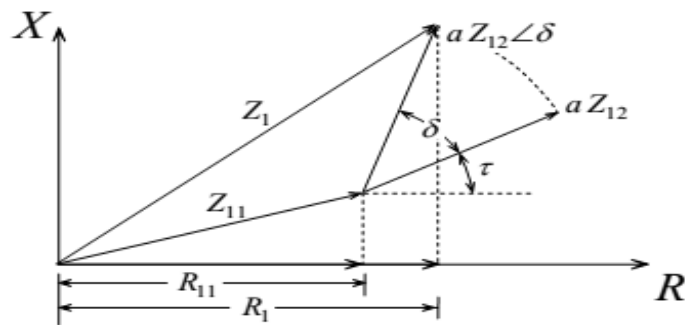
Η αντίσταση εισόδου Z_1 μιας κεραίας η οποία διαρρέεται από ρεύμα έντασης I_1 , όταν πλησίον αυτής υπάρχει κεραία 2 η οποία διαρρέεται από ρεύμα $I_2 = \alpha I_1$ $\angle \delta$ βρίσκεται ως

Αν V_1 είναι η εφαρμοζόμενη τάση στην κεραία 1 και V_{12} είναι η τάση από επαγωγή στην κεραία 1 λόγω του ρεύματος που διαρρέει την 2 με εφαρμογή του δεύτερου κανόνα του Kirchhoff έχουμε διαδοχικά

$$V_1 + V_{12} = I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12} \quad V_1 = I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12}$$

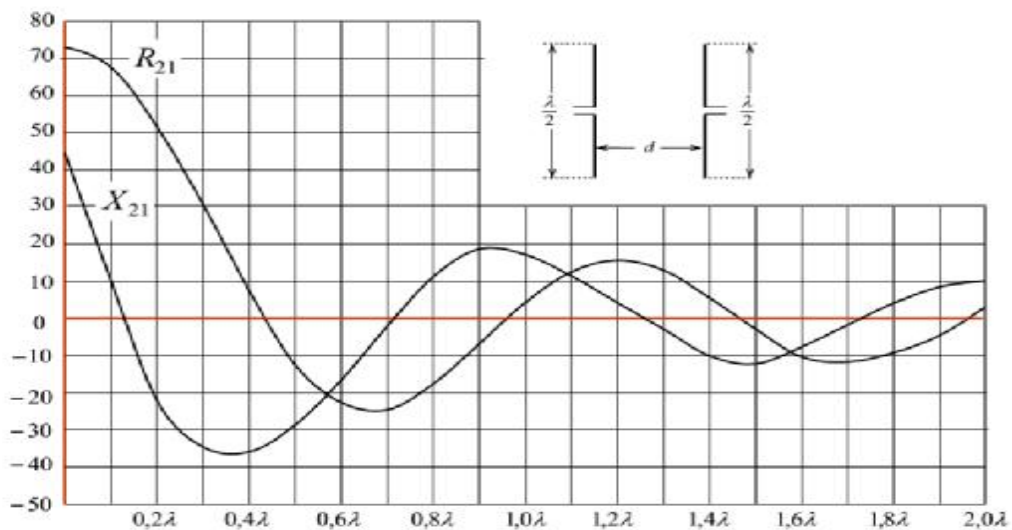
$$V_1 = I_1 Z_{11} + a I_1 |d| Z_{12}$$

Η αντίσταση εισόδου είναι $Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = Z_{11} + a Z_{12} |d|$



Διανυσματικό διάγραμμα σύνθετων αντιστάσεων

Για το ωμικό μέρος, δηλαδή, για την αντίσταση ακτινοβολίας της κεραίας 1 έχουμε $R_1 = R_{11} + a |Z_{12}| \cos(\tau + d)$ όπου τ το όρισμα της Z_{12} .



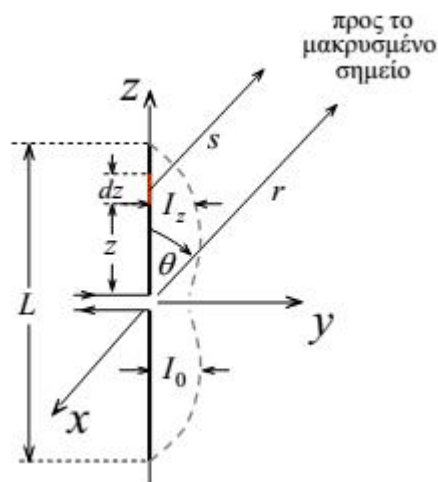
Καμπύλες της αμοιβαίας ωμικής αντίστασης R_{12} και της μη ωμικής αντίστασης X_{21} δύο παραλλήλων διπόλων $\lambda/2$ αναφορής της μεταξύ τους απόστασης d .

Η κεραία ως στοιχείο κυκλώματος 1-64

4.14 Γραμμική κεραία μεγάλου μήκους

Το δίπολο Hertz αποτελεί κεραία που χρησιμοποιείται σε χαμηλές κυρίως συχνότητες. Επειδή όμως έχει πολύ μικρή αντίσταση ακτινοβολίας χρειάζεται να τροφοδοτείται από πολύ μεγάλες τιμές έντασης ρεύματος για να ακτινοβολεί. Για το λόγο αυτό στις περισσότερες εφαρμογές οι χρησιμοποιούμενες γραμμικές κεραίες έχουν μήκη συγκρίσιμα με το μήκος κύματος ($\lambda/2$, $3\lambda/4$, κλπ).

Λεπτή ευθύγραμμη κεραία με μήκος L τροφοδοτείται στη μέση της από διπλή γραμμή, η κατανομή του ρεύματος φαίνεται στο σχήμα. Η κεραία βρίσκεται στο κέντρο του συστήματος συντεταγμένων.



Προκειμένου να περιγράψουμε τον τρόπο ακτινοβολίας της κεραίας, θεωρούμε το πεδίο που δημιουργείται σε μακροσμένο σημείο (r, θ, ϕ) του χώρου από το στοιχειώδες τμήμα dz της κεραίας και στη συνέχεια με ολοκλήρωση σε όλη την κεραία βρίσκουμε την ένταση.

Η στιγμιαία ένταση του ρεύματος στο στοιχειώδες τμήμα dz με αναγωγή στο σημείο παρατήρησης Σ είναι $i(t) = I_z e^{j\omega(t - \frac{s}{c})}$ Όπου I_z είναι το πλάτος του ρεύματος στο τμήμα dz .

Αφού δεχτούμε ότι η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την κεραία έχει ημιτονοειδή κατανομή έχουμε $I = I_0 \sin \frac{\epsilon_2 p}{\epsilon_1} (\frac{L}{2} \pm z) \hat{u}_z$

Αποδεικνύεται ότι η ένταση E_θ στο σημείο παρατήρησης Σ δίδεται από τη

$$E_\theta = nH_\phi = \frac{jnI_m}{2\rho r} \frac{\cos[(k_0 L \cos(\alpha))/2] - \cos(k_0 L/2)}{\sin(\alpha)} e^{-jk_0 r}$$

Στη μακρινή περιοχή το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετα μεταξύ τους και επιπλέον είναι κάθετα στην κατεύθυνση μετάδοσης της ενέργειας, όπως και στην περίπτωση του βραχέος δίπολου. Επιπλέον το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι σε φάση και ο λόγος τους ισούται με την αντίσταση κενού χώρου $n = 120\pi$ Ohms.

Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας

Το διάνυσμα Poynting για τη γραμμική κεραία μεγάλου μήκους προκύπτει από

$$\text{την } \mathbf{P}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \mathbf{H}(\mathbf{r})^* \right\} + \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) e^{j2\omega t} \right\} \text{ και}$$

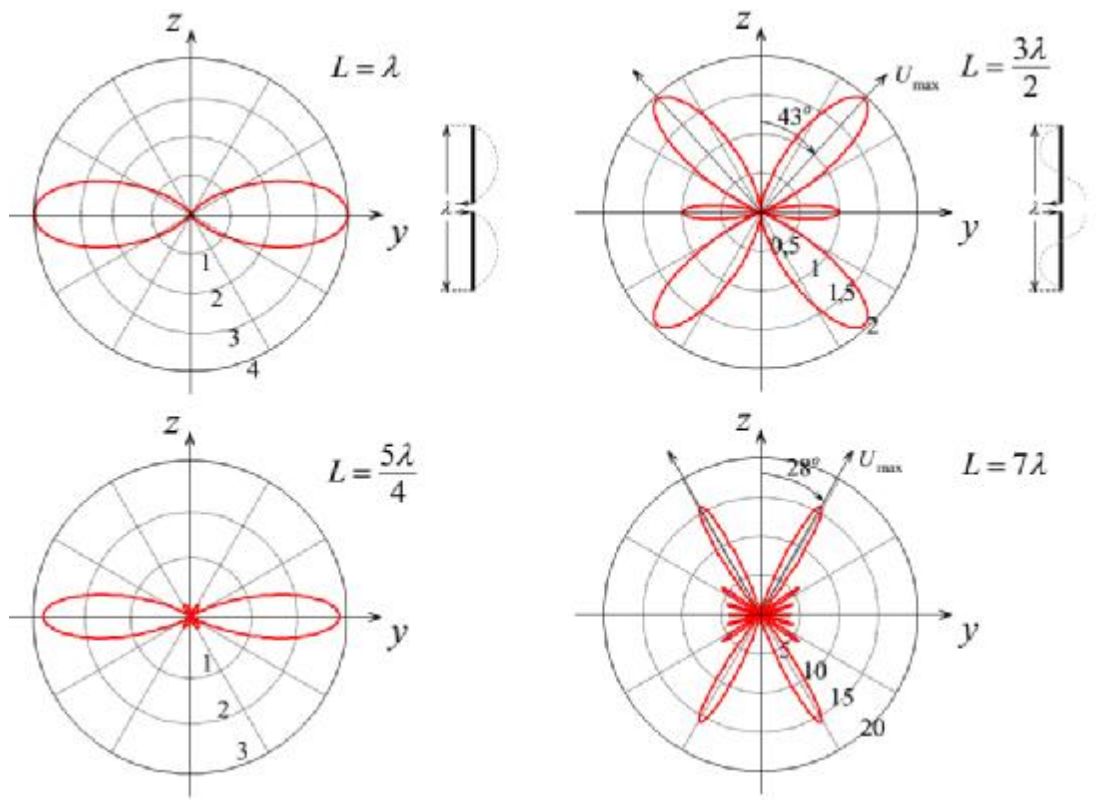
$$\text{είναι } P_r = |P_{\text{msh}}(r)| = \frac{nI_m^2}{8\rho^2 r^2} \frac{\cos^2[(k_0 L \cos(\alpha))/2] - \cos^2(k_0 L/2)}{\sin^2(\alpha)}$$

η ένταση ακτινοβολίας είναι

$$U(\alpha) = r^2 P_r(r, \alpha) = \frac{nI_m^2}{8\rho^2} \frac{\cos^2[(k_0 L \cos(\alpha))/2] - \cos^2(k_0 L/2)}{\sin^2(\alpha)}$$

η ισχύς ακτινοβολίας της γραμμικής κεραίας είναι

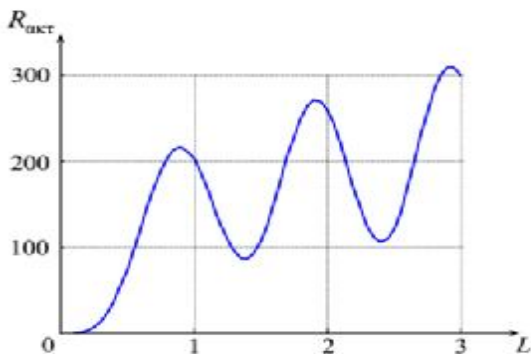
$$P_{\text{akt}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\alpha) \sin(\alpha) d\alpha = \frac{nI_m^2}{4\rho} \int_0^\pi \frac{\cos^2[(k_0 L \cos(\alpha))/2] - \cos^2(k_0 L/2)}{\sin^2(\alpha)} d\alpha$$



Αντίσταση ακτινοβολίας, κατευθυντικότητα και κέρδος γραμμικής κεραίας

Για το ορισμό της αντίστασης ακτινοβολίας, χρησιμοποιείται η μέγιστη τιμή της ρευματικής κατανομής I_m , ανεξάρτητα από το σημείο στο οποίο υφίσταται,

$$\text{έτσι } R_{\text{akt}} = \frac{2P_{\text{akt}}}{I_m^2} = \frac{nI_m^2 \int_0^\pi \frac{\cos^2(k_0 L \cos(\varphi)/2) - \cos^2(k_0 L/2)}{\sin^3(\varphi)} d\varphi}{2\rho_0}$$



Η γραφική παράσταση της αντίστασης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το μήκος του δίπολου σε μήκη κύματος.

Κατευθυντικό κέρδος και κατευθυντικότητα

Το κατευθυντικό κέρδος υπολογίζεται από την ένταση ακτινοβολίας και την ισχύ ακτινοβολίας ως

$$D_g(\varphi) = 4\pi \frac{U(\varphi)}{P_{akt}} = \frac{\frac{nI_m^2 \cos^2(k_0 L \cos(\varphi) / 2) \sin^2(k_0 L / 2)}{2\pi \epsilon_0 c^3} \frac{d\Omega}{\sin(\varphi)}}{\frac{nI_m^2 \cos^2(k_0 L \cos(\varphi) / 2) \sin^2(k_0 L / 2)}{4\pi \epsilon_0 c^3} \frac{d\Omega}{\sin(\varphi)}}$$

Η κατευθυντικότητα D_m γραμμικής κεραίας αυθαίρετου μήκους προκύπτει ως η τιμή του κατευθυντικού κέρδους κατά την διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας,

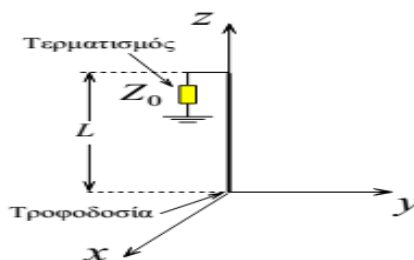
δηλαδή $D_m = D_g(\varphi)_{max}$ και η μέγιστη ενεργός επιφάνεια είναι $A_{e,max} = \frac{l^2}{4\pi} D_m$.

4.15 Κεραίες οδεύοντα κύματος

Μελετήθηκε η ακτινοβολία από γραμμικές κεραίες με ημιτονοειδή χωρική κατανομή ρεύματος που αντιστοιχεί σε στάσιμο κύμα το οποίο ως γνωστό αποτελεί υπέρθεση δύο οδεύοντων κατά αντίθετες κατευθύνσεις κυμάτων του ίδιου πλάτους. Όταν η κατανομή του ρεύματος στην γραμμική κεραία είναι ένα οδεύον κύμα σταθερού πλάτους και φάσης που μεταβάλλεται γραμμικά με την απόσταση από το σημείο τροφοδότησης της κεραίας, η γραμμική κεραία ονομάζεται **κεραία οδεύοντος κύματος**.

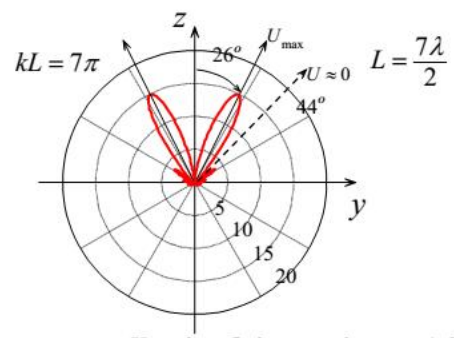
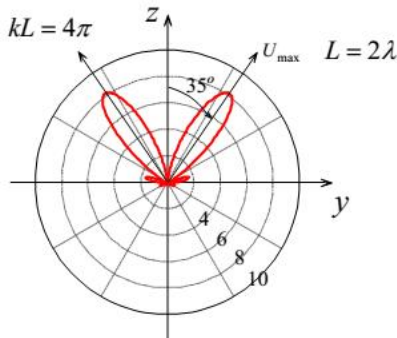
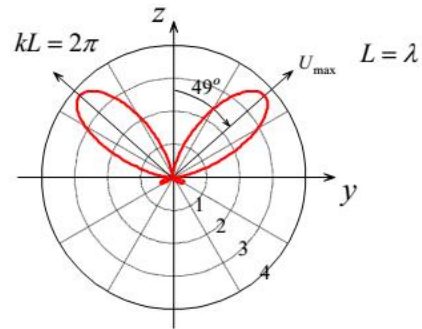
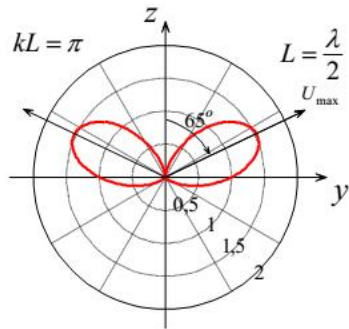
Η κεραία οδεύοντος κύματος είναι κεραία σύρματος που τερματίζεται στη χαρακτηριστική του αντίσταση.

Αν I είναι η ένταση του ρεύματος στο σημείο τροφοδότησης ο φασιθέτης του ρεύματος κατά μήκος της είναι $I(z) = Ie^{-jkz}$. Οι απώλειες της γραμμής θεωρούνται αμελητέες και η ταχύτητα φάσης του κύματος ρεύματος είναι $(\mu\epsilon)^{-1/2}$.



Η ένταση ακτινοβολίας της κεραίας αποδεικνύεται ότι είναι

$$U(\varphi) = I^2 \frac{15 \pi^2 \sin^2 \theta}{\rho \zeta} \frac{\int_0^{\pi} \frac{\sin^2 \theta' (kL \sin^2(\varphi/2) \cos^2(\varphi/2))}{\sin^2(\varphi/2)} d\theta'}{\sin^2(\varphi/2)}$$



Η ισχύς ακτινοβολίας της κεραίας αποδεικνύεται ότι είναι

$$P_{\text{akt}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi = 30 I^2 \int_0^{\pi} \frac{\sin^2 \theta' (kL \sin^2(\varphi/2) \cos^2(\varphi/2))}{\sin^2(\varphi/2)} \sin \varphi d\varphi$$

Για τον υπολογισμό της αντίστασης ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη τιμή της ρευματικής κατανομής I στο σημείο τροφοδότησής της και είναι

$$R_{\text{akt}} = \frac{2P_{\text{akt}}}{I_m^2} = 60 \int_0^{\pi} \frac{\sin^2 \theta' (kL \sin^2(\varphi/2) \cos^2(\varphi/2))}{\sin^2(\varphi/2)} \sin \varphi d\varphi$$

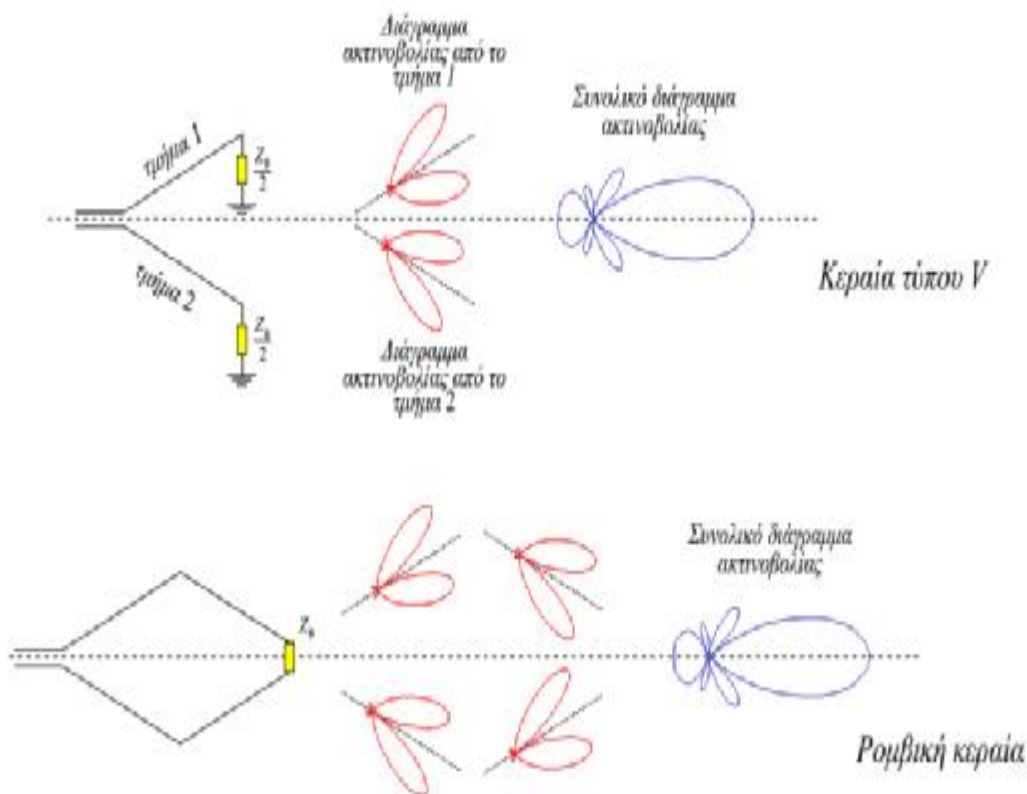
Το κατευθυντικό κέρδος υπολογίζεται από την ένταση ακτινοβολίας και την ισχύ ακτινοβολίας ως $D_g(\varphi) = 4\pi \frac{U(\varphi)}{P_{\text{akt}}}$

Η κατευθυντικότητα D_m γραμμικής κεραίας αυθαίρετου μήκους προκύπτει ως η τιμή του κατευθυντικού κέρδους κατά την διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας, δηλαδή $D_m = D_g(\varphi)_{\max}$.

$$\text{Η μέγιστη ενεργός επιφάνεια είναι } A_{e \max} = \frac{l^2}{4\rho} D_m$$

Η αντίσταση ακτινοβολίας αυξάνει βραδέως καθώς αυξάνεται η συχνότητα (και συνεπώς ο όρος kL), ιδίως στην περιοχή $kL > 2\pi$. Το γεγονός αυτό προσδίδει στις κεραίες οδεύοντος κύματος αξιοσημείωτες ιδιότητες ευρείας ζώνης.

Ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων κεραιών οδεύοντος κύματος οδηγεί σε διατάξεις με μεγαλύτερη κατευθυντικότητα. Οι συνηθέστερες διατάξεις αυτού του τύπου είναι η κεραία V και η ρομβική κεραία.



4.16 Πομπός(Transmitter)

Στα ηλεκτρονικά και στις τηλεπικοινωνίες ένας πομπός ή ραδιοπομπός είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που παράγει ραδιοκύματα με μια κεραία. Ο ίδιος ο πομπός παράγει ένα εναλλασσόμενο ρεύμα ραδιοσυχνοτήτων, το οποίο εφαρμόζεται στην κεραία. Όταν διεγείρεται από αυτό το εναλλασσόμενο ρεύμα, η κεραία ακτινοβολεί ραδιοκύματα.

Ένας πομπός μπορεί να είναι ένα ξεχωριστό κομμάτι ηλεκτρονικού εξοπλισμού ή ένα ηλεκτρικό κύκλωμα μέσα σε μια άλλη ηλεκτρονική συσκευή. Ένας πομπός και ένας δέκτης που συνδυάζονται σε μία μονάδα ονομάζεται πομποδέκτης. Ο όρος πομπός συχνά συντομεύεται ως "XMTR" ή "TX" στα τεχνικά έγγραφα. Ο σκοπός των περισσότερων πομπών είναι η ραδιοεπικοινωνία των πληροφοριών σε απόσταση. Οι πληροφορίες παρέχονται στον πομπό με τη μορφή ηλεκτρονικού σήματος, όπως είναι ένα ηχητικό σήμα από ένα μικρόφωνο, ένα σήμα βίντεο (TV) από μια βιντεοκάμερα ή σε συσκευές ασύρματης δικτύωσης ένα ψηφιακό σήμα από έναν υπολογιστή. Ο πομπός συνδυάζει το σήμα πληροφοριών που πρόκειται να μεταφερθεί με το σήμα ραδιοσυχνότητας το οποίο παράγει τα ραδιοκύματα, το οποίο ονομάζεται φέρων σήμα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται διαμόρφωση. Οι πληροφορίες μπορούν να προστεθούν στον φορέα με διάφορους τρόπους, σε διαφορετικούς τύπους πομπών. Σε έναν πομπό διαμόρφωσης πλάτους (AM), οι πληροφορίες προστίθενται στο ραδιοφωνικό σήμα μεταβάλλοντας το εύρος του. Σε έναν πομπό διαμόρφωσης συχνότητας (FM), προστίθεται μεταβάλλοντας ελαφρά τη συχνότητα του ραδιοφωνικού σήματος. Χρησιμοποιούνται πολλοί άλλοι τύποι διαμόρφωσης. Το ραδιοσήμα από τον πομπό εφαρμόζεται στην κεραία, η οποία εκπέμπει την ενέργεια ως ραδιοκύματα. Η κεραία μπορεί να περικλείεται μέσα στη θήκη ή να συνδέεται στο εξωτερικό του πομπού. Σε πιο ισχυρούς πομπούς, η κεραία μπορεί να βρίσκεται πάνω από ένα κτίριο ή σε ξεχωριστό πύργο και να συνδέεται με τον πομπό μέσω μιας γραμμής τροφοδοσίας, δηλαδή μιας γραμμής μεταφοράς.

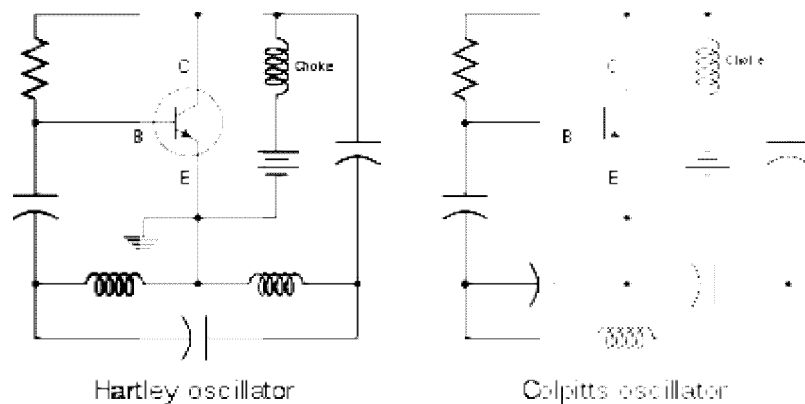


Λειτουργία

Ένας ραδιοπομπός είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια από μια μπαταρία ή το ηλεκτρικό δίκτυο σε ένα εναλλασσόμενο ρεύμα ραδιοσυχνοτήτων, το οποίο αναστρέφει εκατομμύρια κατευθύνσεις σε δεσεκατομμύρια φορές ανά δευτερόλεπτο. Η ενέργεια σε ένα τέτοιο ρεύμα ταχείας αναστροφής μπορεί να εκπέμψει έναν αγωγό (την κεραία) ως ηλεκτρομαγνητικά κύματα (ραδιοκύματα). Ο πομπός εντυπωσιάζει επίσης πληροφορίες όπως ένα σήμα ήχου ή εικόνας στο ρεύμα ραδιοσυχνοτήτων που πρόκειται να μεταφερθεί από τα ραδιοκύματα. Όταν χτυπούν την κεραία ενός ραδιοφωνικού δέκτη, τα κύματα διεγείρουν παρόμοια (αλλά λιγότερο ισχυρά) ρεύματα ραδιοσυχνοτήτων σε αυτό. Ο ραδιοφωνικός δέκτης εξάγει τις πληροφορίες από τα λαμβανόμενα κύματα.

Ένας πρακτικός ραδιοπομπός αποτελείται συνήθως από αυτά τα μέρη:

- Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Για να μετατρέψει την ηλεκτρική ισχύ εισόδου στις υψηλότερες τάσεις που απαιτούνται για την παραγωγή της απαιτούμενης ισχύος.
- Ένα κύκλωμα ηλεκτρονικού ταλαντωτή για τη δημιουργία του σήματος ραδιοσυχνότητας. Αυτό συνήθως δημιουργεί ένα ημιτονοειδές κύμα σταθερού εύρους, το οποίο συχνά ονομάζεται κύμα φορέα, επειδή χρησιμεύει για τη «μεταφορά» των πληροφοριών μέσω του διαστήματος. Στους περισσότερους σύγχρονους πομπούς, αυτός είναι ένας κρυσταλλικός ταλαντωτής στον οποίο η συχνότητα ελέγχεται με ακρίβεια από τις δονήσεις ενός κρυστάλλου χαλαζία.



- Ένα κύκλωμα διαμορφωτή για να προσθέσει τις πληροφορίες που πρέπει να μεταδοθούν στο φέρον κύμα που παράγεται από τον ταλαντωτή. Αυτό γίνεται με τη μεταβολή κάποιας πλευράς του φέροντος κύματος. Οι πληροφορίες παρέχονται στον πομπό είτε με τη μορφή ενός ηχητικού σήματος, το οποίο αντιπροσωπεύει ήχο, ένα σήμα βίντεο, είτε για δεδομένα με τη μορφή ενός δυαδικού ψηφιακού σήματος.

Σε έναν πομπό AM (διαμόρφωση πλάτους) το πλάτος (αντοχή) του κύματος του φορέα μεταβάλλεται ανάλογα με το σήμα διαμόρφωσης.

Σε έναν πομπό FM (διαμόρφωση συχνότητας) η συχνότητα του φορέα μεταβάλλεται από το σήμα διαμόρφωσης.

Σε έναν πομπό FSK (keying shift keying), ο οποίος μεταδίδει ψηφιακά δεδομένα, η συχνότητα του φορέα μετατοπίζεται μεταξύ δύο συχνοτήτων που αντιπροσωπεύουν τα δύο δυαδικά ψηφία, 0 και 1.

Χρησιμοποιούνται επίσης πολλοί άλλοι τύποι διαμόρφωσης. Σε μεγάλους πομπούς ο ταλαντωτής και ο διαμορφωτής μαζί αναφέρονται συχνά ως ο διεγέρτης.

- Ένας ενισχυτής RF για να αυξήσει την ισχύ του σήματος, για να αυξήσει την εμβέλεια των ραδιοκυμάτων.
- Ένα κύκλωμα αντιστοίχισης αντιστάθμισης (δέκτη κεραίας) που ταιριάζει με την αντίσταση του πομπού στην αντίσταση της κεραίας (ή της γραμμής μετάδοσης στην κεραία), για να μεταφέρει αποτελεσματικά την ισχύ στην κεραία. Αν αυτές οι σύνθετες αντιστάσεις δεν είναι ίσες, προκαλεί μια κατάσταση που ονομάζεται διαρκές κύμα, όπου η ισχύς ανακλάται από την κεραία προς τον πομπό, σπαταλάει την ισχύ και μερικές φορές υπερθερμαίνει τον πομπό.

Σε πομπούς υψηλότερης συχνότητας, στην κλίμακα UHF και μικροκυμάτων, οι ελεύθεροι ταλαντωτές είναι ασταθής στη συχνότητα εξόδου. Τα παλαιότερα σχέδια χρησιμοποίησαν έναν ταλαντωτή σε χαμηλότερη συχνότητα, ο οποίος πολλαπλασιάστηκε με πολλαπλασιαστές συχνότητας για να πάρει ένα σήμα στην επιθυμητή συχνότητα. Τα σύγχρονα σχέδια συχνότερα χρησιμοποιούν έναν ταλαντωτή στη συχνότητα λειτουργίας, ο οποίος σταθεροποιείται με κλείδωμα φάσης σε μια πολύ σταθερή αναφορά χαμηλότερης συχνότητας, συνήθως έναν ταλαντωτή κρυστάλλου.

Νομικοί περιορισμοί

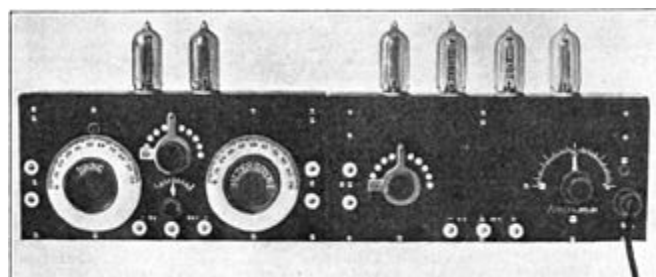
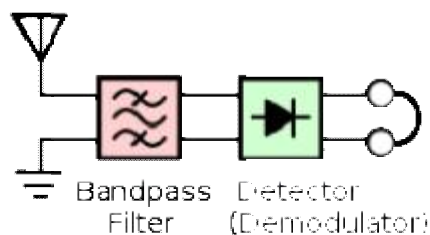
Στα περισσότερα μέρη του κόσμου, η χρήση πομπών ελέγχεται αυστηρά από το νόμο λόγω της πιθανότητας επικίνδυνων παρεμβολών με άλλες ραδιοφωνικές μεταδόσεις (για παράδειγμα στις επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης). Οι πομποί πρέπει να διαθέτουν άδεια από κυβερνήσεις, σε διάφορες κατηγορίες αδειών ανάλογα με τη χρήση όπως ραδιοφωνική μετάδοση, θαλάσσιο ραδιόφωνο κ.α. και περιορίζονται σε ορισμένες συχνότητες και επίπεδα ισχύος. Ένας οργανισμός που ονομάζεται Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) κατανέμει τις ζώνες συχνοτήτων στο ραδιοφάσμα σε διάφορες κατηγορίες χρηστών. Σε μερικές τάξεις σε κάθε πομπό δίνεται ένα μοναδικό διακριτικό κλήσης που αποτελείται από μια σειρά γραμμάτων και αριθμών που πρέπει να χρησιμοποιούνται ως αναγνωριστικό στις μεταδόσεις. Ο φορέας εκμετάλλευσης του πομπού πρέπει συνήθως να κατέχει μια κυβερνητική άδεια, όπως μια γενική άδεια χειριστή ραδιοτηλεφώνων, η οποία επιτυγχάνεται επιτυχώς με δοκιμή που αποδεικνύει επαρκείς τεχνικές και νομικές γνώσεις σχετικά με την ασφαλή λειτουργία του ραδιοφώνου. Εκτελείται εξαίρεση που επιτρέπει τη μη εξουσιοδοτημένη χρήση πομπών μικρής εμβέλειας σε συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, ασύρματα τηλέφωνα, ασύρματα μικρόφωνα, συσκευές Wi-Fi και Bluetooth. Στις ΗΠΑ, αυτές υπάγονται στο Μέρος 15 των κανονισμών της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών (FCC). Παρόλο που μπορούν να λειτουργούν χωρίς άδεια, αυτές οι συσκευές πρέπει γενικά να είναι εγκεκριμένες πριν από την πώληση.

4.17 Δέκτης(Receiver)

Στις ραδιοεπικοινωνίες, ένας ραδιοφωνικός δέκτης (ραδιόφωνο) είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που λαμβάνει ραδιοκύματα και μετατρέπει τις πληροφορίες που μεταφέρονται από αυτές σε μια χρήσιμη μορφή. Χρησιμοποιείται με κεραία. Η κεραία αναστέλλει ραδιοκύματα (ηλεκτρομαγνητικά κύματα) και τα μετατρέπει σε μικροσκοπικά εναλλασσόμενα ρεύματα που εφαρμόζονται στον δέκτη και ο δέκτης αποσπά τις επιθυμητές πληροφορίες. Ο δέκτης χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά φίλτρα για να διαχωρίσει το επιθυμητό σήμα ραδιοσυχνοτήτων από όλα τα άλλα σήματα που συλλέγει η κεραία, έναν ηλεκτρονικό ενισχυτή για να αυξήσει την ισχύ του σήματος για περαιτέρω επεξεργασία και τελικά ανακτά τις επιθυμητές πληροφορίες μέσω αποδιαμόρφωσης. Οι πληροφορίες που παράγει ο παραλήπτης μπορεί να έχουν τη μορφή ήχου, εικόνων ή δεδομένων. Ένας ραδιοφωνικός δέκτης μπορεί να είναι ένα ξεχωριστό κομμάτι ηλεκτρονικού εξοπλισμού ή ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα μέσα σε μια άλλη συσκευή. Οι ραδιοφωνικοί δέκτες είναι συστατικά στοιχεία επικοινωνιών, εκπομπής, τηλεχειρισμού και δικτύων. Στις ηλεκτρονικές συσκευές ευρείας κατανάλωσης, οι όροι ραδιοφωνικός και ραδιοφωνικός δέκτης χρησιμοποιούνται συχνά ειδικά για δέκτες σχεδιασμένους να αναπαράγουν ήχο που μεταδίδεται από ραδιοφωνικούς σταθμούς, ιστορικά την πρώτη εμπορική ραδιοφωνική εφαρμογή μαζικής αγοράς.

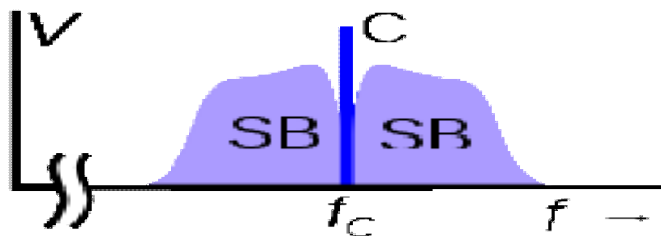
Λειτουργία

Ένας ραδιοφωνικός δέκτης συνδέεται με μια κεραία η οποία μετατρέπει μέρος της ενέργειας από το εισερχόμενα ραδιοκύματα σε μια μικρή τάση εναλλασσόμενου ρεύματος ραδιοσυχνοτήτων που εφαρμόζεται στην είσοδο του δέκτη. Μια κεραία τυπικά αποτελείται από μια διάταξη μεταλλικών αγωγών. Τα ταλαντευόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία του ραδιοφωνικού κύματος ωθούν τα ηλεκτρόνια στην κεραία προς τα εμπρός και προς τα πίσω, δημιουργώντας μια ταλαντευόμενη τάση. Η κεραία μπορεί να περικλείεται μέσα στην θήκη του δέκτη, όπως συμβαίνει με τις κεραίες βρόχου φερριτή των ραδιόφωνων AM και την επίπεδη ανεστραμμένη κεραία F των κινητών τηλεφώνων. που συνδέονται με το εξωτερικό του δέκτη, όπως με τις κεραίες μαστιγας που χρησιμοποιούνται στα ραδιόφωνα FM ή τοποθετούνται ξεχωριστά και συνδέονται με το δέκτη με καλώδιο, όπως για τις κεραίες τηλεόρασης στην στέγη και τα δορυφορικά πιάτα.

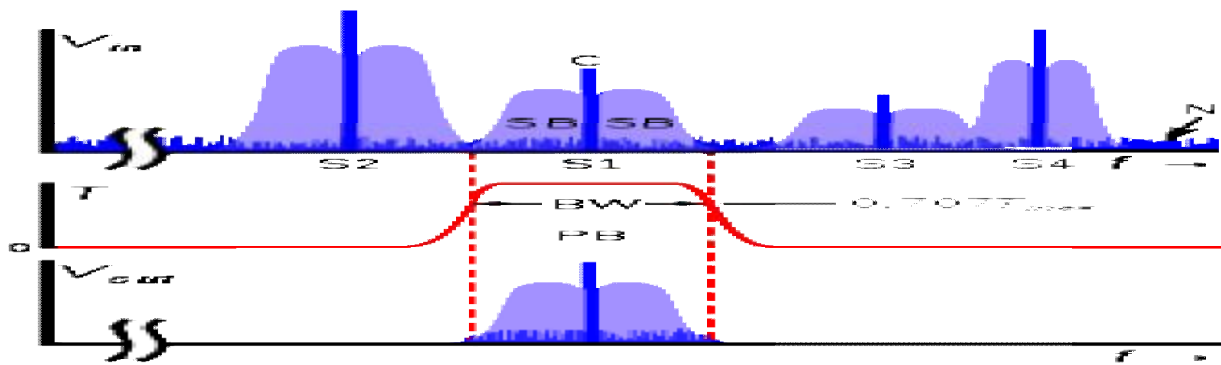


Οι πρακτικοί ραδιοφωνικοί δέκτες εκτελούν τρεις βασικές λειτουργίες στο σήμα από την κεραία: φιλτράρισμα, ενίσχυση και αποδιαμόρφωση.

- **Φιλτράρισμα ζώνης:** Τα ραδιοκύματα από πολλούς πομπούς περνούν ταυτόχρονα στον αέρα χωρίς να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτά μπορούν να διαχωριστούν στον δέκτη επειδή έχουν διαφορετικές συχνότητες. Για να διαχωρίσετε το επιθυμητό ασύρματο σήμα, το φίλτρο ζώνης διέλευσης επιτρέπει τη διέλευση της συχνότητας της ραδιοφωνικής μετάδοσης και αποκλείει τα σήματα σε όλες τις άλλες συχνότητες. Το φίλτρο ζώνης διέλευσης αποτελείται από ένα ή περισσότερα κυκλώματα συντονισμού (συντονισμένα κυκλώματα). Όταν το εισερχόμενο ραδιοφωνικό σήμα βρίσκεται στη συχνότητα συντονισμού, το ραδιοφωνικό σήμα από τον επιθυμητό σταθμό μεταδίδεται στα ακόλουθα στάδια του δέκτη. Σε όλες τις άλλες συχνότητες το συντονισμένο κύκλωμα έχει χαμηλή αντίσταση, επομένως τα σήματα σε αυτές τις συχνότητες δεν μεταδίδονται.
- **Εύρος ζώνης και επιλεκτικότητα:** Δείτε γραφήματα. Η πληροφορία (διαμόρφωση) σε μια ραδιοφωνική μετάδοση περιέχεται σε δύο στενές ζώνες συχνοτήτων που ονομάζονται πλευρικές ζώνες (SB) σε κάθε πλευρά της φέρουσας συχνότητας (C), έτσι ώστε το φίλτρο πρέπει να περάσει μια ζώνη συχνοτήτων, όχι μόνο μία μόνο συχνότητα. Η ζώνη συχνοτήτων που λαμβάνεται από τον δέκτη καλείται ζώνη διέλευσης (PB) και το πλάτος της ζώνης διέλευσης σε kilohertz ονομάζεται εύρος ζώνης (BW). Το εύρος ζώνης του φίλτρου πρέπει να είναι αρκετά ευρύ ώστε να επιτρέπει τις πλευρικές λωρίδες να περνούν χωρίς παραμόρφωση, αλλά αρκετά στενές ώστε να εμποδίζουν τυχόν παρεμβολές στις παρακείμενες συχνότητες (όπως το S2 στο διάγραμμα). Η δυνατότητα του δέκτη να απορρίπτει τους ανεπιθύμητους ραδιοφωνικούς σταθμούς κοντά στη συχνότητα στον επιθυμητό σταθμό είναι μια σημαντική παράμετρος που ονομάζεται εκλεκτικότητα που καθορίζεται από το φίλτρο. Στους σύγχρονους δέκτες χρησιμοποιούνται συχνά φίλτρα χαλαζία, κεραμικά, ή ακουστικά κύματα (SAW) τα οποία έχουν πιο έντονη επιλεκτικότητα σε σύγκριση με τα δίκτυα κυκλωμάτων συντονισμένου πυκνωτή.



Το φάσμα συχνοτήτων ενός τυπικού ραδιοσήματος από πομπό ραδιοφώνου AM ή FM. Αποτελείται από ένα ισχυρό στοιχείο (C) στη συχνότητα κύματος φορέα f_c , με τη διαμόρφωση που περιέχεται σε ζώνες στενής συχνότητας που ονομάζονται πλευρικές ζώνες (SB) ακριβώς πάνω και κάτω από τον φορέα.



Πώς το φίλτρο ζώνης διέλευσης επιλέγει ένα μόνο ραδιοφωνικό σήμα S1 από όλα τα ραδιοσήματα που λαμβάνει η κεραία. Από τα πάνω, τα γραφήματα δείχνουν την τάση από την κεραία που εφαρμόζεται στο φίλτρο V_{in} , τη λειτουργία μεταφοράς του φίλτρου T και την τάση στην έξοδο του φίλτρου V_{out} ως συνάρτηση της συχνότητας f . Η συνάρτηση μεταφοράς T είναι η ποσότητα σήματος που περνάει από το φίλτρο σε κάθε μία συχνότητα $V_{out}(f) = T(f)V_{in}(f)$

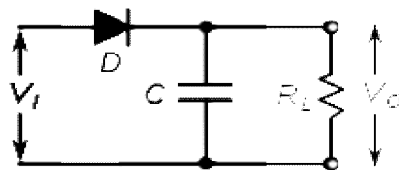
- **Ρύθμιση:** Για να επιλέξετε ένα συγκεκριμένο σταθμό, το ραδιόφωνο "συντονίζεται" στη συχνότητα του επιθυμητού πομπού. Το ραδιόφωνο διαθέτει dial ή ψηφιακή οθόνη που δείχνει τη συχνότητα με την οποία συντονίζεται. Ο συντονισμός ρυθμίζει τη συχνότητα της ζώνης διέλευσης του δέκτη στη συχνότητα του επιθυμητού ραδιοπομπού. Με το γύρισμα του κουμπιού συντονισμού αλλάζει η συντονισμένη συχνότητα του συντονισμένου κυκλώματος. Όταν η συχνότητα συντονισμού είναι ίση με τη συχνότητα του ραδιοφωνικού πομπού, το συντονισμένο κύκλωμα ταλαντώνεται με συμπάθεια, μεταδίδοντας το σήμα στον υπόλοιπο δέκτη.
- **Ενίσχυση:** Η ισχύς των ραδιοκυμάτων που λαμβάνεται από μια κεραία λήψης μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης από την κεραία μετάδοσης. Ακόμη και με τους ισχυρούς πομπούς που χρησιμοποιούνται αν ο δέκτης απέχει περισσότερο από λίγα μίλια από τον πομπό, η ισχύς που παρεμποδίζεται από την κεραία του δέκτη είναι πολύ μικρή, ίσως τόσο χαμηλή όσο και τα picowatts. Για να αυξηθεί η ισχύς του ανακτηθέντος σήματος, ένας ενισχυτής μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ένα αντίγραφο του αρχικού σήματος. Οι δέκτες έχουν συνήθως διάφορα στάδια ενίσχυσης: το σήμα ραδιοσυχνοτήτων από το φίλτρο ζώνης διέλευσης ενισχύεται για να το καταστήσει αρκετά ισχυρό για να οδηγήσει τον αποδιαμορφωτή, κατόπιν το ηχητικό σήμα από τον αποδιαμορφωτή ενισχύεται ώστε να το κάνει αρκετά ισχυρό για να λειτουργήσει το ηχείο. Ο βαθμός ενίσχυσης ενός ραδιοφωνικού δέκτη μετράται με μια παράμετρο που ονομάζεται ευαισθησία, η οποία είναι η ελάχιστη ισχύς σήματος ενός σταθμού στην κεραία, μετρούμενη σε μικροσκόπια, που είναι απαραίτητη για την λήψη του σήματος με σαφήνεια, με έναν ορισμένο λόγο σήματος προς θόρυβο. Δεδομένου ότι είναι εύκολο να ενισχυθεί ένα σήμα σε οποιοδήποτε επιθυμητό βαθμό, το όριο ευαισθησίας πολλών σύγχρονων δεκτών δεν είναι ο βαθμός ενίσχυσης, αλλά ο τυχαίος ηλεκτρονικός θόρυβος που υπάρχει στο κύκλωμα, ο οποίος μπορεί να πνίξει ένα αδύναμο ραδιοσήμα.

- **Αποδιαμόρφωση:** Αφού το ραδιοφωνικό σήμα φιλτραριστεί και ενισχυθεί, ο δέκτης πρέπει να αποσπάσει το σήμα διαμόρφωσης που φέρει πληροφορίες από το μεταβαλλόμενο κύμα φορέα ραδιοσυχνοτήτων. Αυτό γίνεται από ένα κύκλωμα που ονομάζεται αποδιαμορφωτής (ανιχνευτής). Κάθε τύπος διαμόρφωσης χρησιμοποιεί έναν αντίστοιχο τύπο ανιχνευτή για βέλτιστα αποτελέσματα. Το FM, για παράδειγμα, λειτουργεί ελάχιστα με έναν ανιχνευτή AM. Πολλοί άλλοι τύποι διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται επίσης για εξειδικευμένους σκοπούς. Αυτοί οι διαφορετικοί τύποι διαμόρφωσης απαιτούν διαφορετικά κυκλώματα αποδιαμόρφωσης.

Το σήμα σήματος διαμόρφωσης που εξάγεται από τον αποδιαμορφωτή ενισχύεται συνήθως για να αυξήσει τη δύναμή του, κατόπιν η πληροφορία μετατρέπεται πίσω σε μια ανθρώπινη μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάποιον τύπο μετατροπέα.

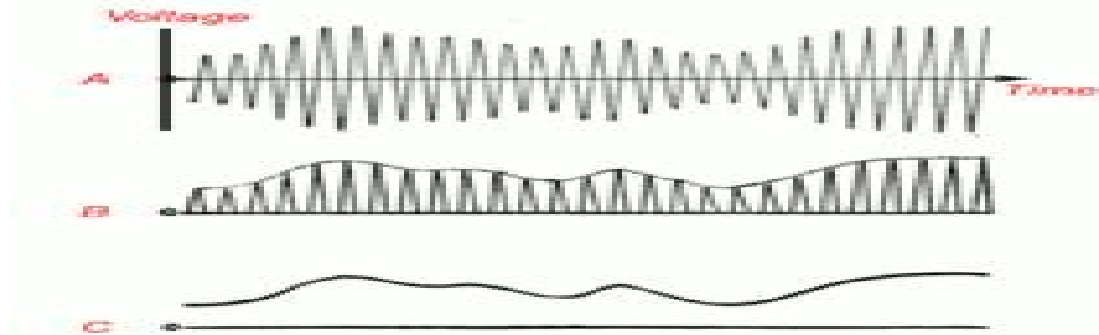
AM αποδιαμόρφωση

Ο ευκολότερος τύπος αποδιαμόρφωσης για κατανόηση είναι η αποδιαμόρφωση AM, που χρησιμοποιείται στα ραδιόφωνα AM για να ανακτήσει το σήμα διαμόρφωσης ήχου, το οποίο αντιπροσωπεύει ήχο και μετατρέπεται σε ηχητικά κύματα από το ηχείο του ραδιοφώνου. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα κύκλωμα που ονομάζεται ανιχνευτής φακέλων (βλ. Κύκλωμα), που αποτελείται από μια δίοδο (D) με έναν πυκνωτή παράκαμψης (C) σε όλη την έξοδο του.



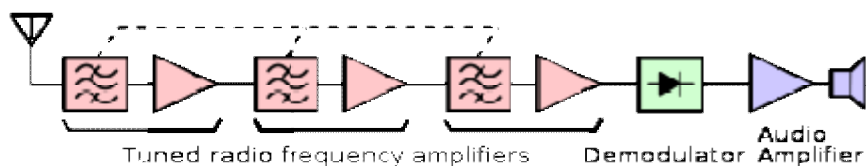
Το διαμορφωμένο με πλάτος ραδιοσήμα από το συντονισμένο κύκλωμα εμφανίζεται στο (Α). Οι ταχείες ταλαντώσεις είναι το φέρον κύμα ραδιοσυχνοτήτων. Το ηχητικό σήμα (ο ήχος) περιέχεται στις αργές παραλλαγές (διαμόρφωση) του εύρους (μεγέθους) των κυμάτων. Εάν εφαρμοζόταν απευθείας στο ηχείο, αυτό το σήμα δεν μπορεί να μετατραπεί σε ήχο, διότι οι εκτροπές ήχου είναι οι ίδιες και στις δύο πλευρές του άξονα, με μέσο όρο προς το μηδέν, πράγμα που δεν θα είχε ως αποτέλεσμα καθόλου κίνηση του διαφράγματος του ηχείου. (Β) Όταν το σήμα αυτό εφαρμόζεται ως είσοδος V_I στον ανιχνευτή, η δίοδος (D) διεξάγει ρεύμα σε μία κατεύθυνση αλλά όχι προς την αντίθετη κατεύθυνση, επιτρέποντας έτσι τη διέλευση παλμών ρεύματος σε μία μόνο πλευρά του σήματος.

Με άλλα λόγια, διορθώνει το ρεύμα εναλλασσόμενου ρεύματος σε παλλόμενο ρεύμα συνεχούς ρεύματος. Η προκύπτουσα τάση V_O που εφαρμόζεται στο φορτίο R_L δεν είναι πλέον μέσος όρος μηδέν. η μέγιστη τιμή του είναι ανάλογη προς το ηχητικό σήμα. (C) Ο πυκνωτής παράκαμψης (C) φορτίζεται από τους παλμούς ρεύματος από τη δίοδο και η τάση του ακολουθεί τις κορυφές των παλμών, το φάκελο του ακουστικού κύματος. Εκτελεί μια λειτουργία εξομάλυνσης (χαμηλής διέλευσης φιλτραρίσματος), αφαιρώντας τους παλμούς φορέα ραδιοσυχνοτήτων, αφήνοντας το ηχητικό σήμα χαμηλής συχνότητας να περάσει μέσα από το φορτίο R_L . Το ηχητικό σήμα ενισχύεται και εφαρμόζεται σε ακουστικά ή ηχείο.



Συντονισμένος δέκτης ραδιοσυχνοτήτων (TRF)

Στον απλούστερο τύπο δέκτη ραδιοσυχνοτήτων, που ονομάζεται δέκτης ραδιοσυχνότητας (TRF), οι τρεις παραπάνω λειτουργίες εκτελούνται διαδοχικά: (1) το μίγμα ραδιοφωνικών σημάτων από την κεραία διηθείται για να εξαχθεί το σήμα του επιθυμητού πομπού. (2) αυτή η ταλαντευόμενη τάση αποστέλλεται μέσω ενός ενισχυτή ραδιοσυχνοτήτων (RF) για να αυξήσει την αντοχή του σε ένα επίπεδο επαρκές για την οδήγηση του αποδιαμορφωτή. (3) ο αποδιαμορφωτής ανακτά το σήμα διαμόρφωσης (το οποίο σε δέκτες εκπομπής είναι ένα ηχητικό σήμα, μια τάση που ταλαντώνεται σε ένα ρυθμό ακουστικής συχνότητας που αντιπροσωπεύει τα ηχητικά κύματα) από το διαμορφωμένο κύμα ραδιοφωνικού φορέα. (4) το σήμα διαμόρφωσης ενισχύεται περαιτέρω σε έναν ενισχυτή ήχου, στη συνέχεια εφαρμόζεται σε ένα μεγάφωνο ή ακουστικό για να το μετατρέψει σε ηχητικά κύματα. Παρόλο που ο δέκτης TRF χρησιμοποιείται σε μερικές εφαρμογές, έχει πρακτικά μειονεκτήματα τα οποία τον καθιστούν κατώτερο από τον δέκτη υπερετεροδυναμικό κατώτερο, ο οποίος χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές. Τα μειονεκτήματα πηγάζουν από το γεγονός ότι στην TRF το φιλτράρισμα, η ενίσχυση και η αποδιαμόρφωση γίνονται με την υψηλή συχνότητα του εισερχόμενου ραδιοφωνικού σήματος. Το εύρος ζώνης ενός φίλτρου αυξάνεται με την κεντρική του συχνότητα, έτσι ώστε όσο ο δέκτης TRF συντονίζεται σε διαφορετικές συχνότητες, το εύρος ζώνης του ποικίλλει. Το πιο σημαντικό, η αυξανόμενη συμφόρηση του ραδιοφάσματος απαιτεί τα ραδιοφωνικά κανάλια να απέχουν πολύ κοντά σε συχνότητα. Είναι εξαιρετικά δύσκολο να δημιουργηθούν φίλτρα που λειτουργούν σε ραδιοσυχνότητες που έχουν αρκετά στενό εύρος ζώνης για να διαχωρίζουν τους ραδιοσταθμούς που βρίσκονται σε στενή απόσταση. Οι δέκτες TRF τυπικά πρέπει να έχουν πολλά κλιμακωτά στάδια συντονισμού για να επιτύχουν επαρκή επιλεκτικότητα. Το τμήμα Πλεονεκτήματα που ακολουθεί περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο ο δέκτης υπερετεροδυναμίας υπερνικά αυτά τα προβλήματα.



Ο σχεδιασμός υπερετεροδυναμίας

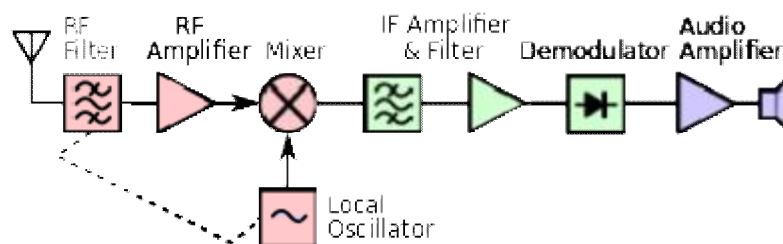
Στην υπερετεροδυναμία, το σήμα ραδιοσυχνότητας από την κεραία μετατοπίζεται προς τα κάτω σε μια χαμηλότερη "ενδιάμεση συχνότητα" (IF), προτού υποβληθεί σε επεξεργασία. Το εισερχόμενο σήμα ραδιοσυχνότητας από την κεραία αναμειγνύεται με ένα μη διαμορφωμένο σήμα που παράγεται από έναν τοπικό ταλαντωτή (LO) στον δέκτη. Η ανάμιξη γίνεται σε ένα μη γραμμικό κύκλωμα που ονομάζεται "μίξερ". Το αποτέλεσμα στην έξοδο του μίκτη είναι μια ετεροδωτική ή συχνότητα κτύπων στη διαφορά μεταξύ αυτών των δύο συχνοτήτων. Η διαδικασία είναι παρόμοια με τον τρόπο που δύο μουσικές νότες σε διαφορετικές συχνότητες που παίζονται μαζί παράγουν ένα κτύπημα σημείωμα. Αυτή η χαμηλότερη συχνότητα ονομάζεται ενδιάμεση συχνότητα (IF). Το σήμα IF έχει επίσης όλες τις πληροφορίες που υπήρχαν στο αρχικό σήμα RF. Το σήμα IF περνάει από τα στάδια του φίλτρου και του ενισχυτή, στη συνέχεια αποδιαμορφώνεται σε έναν ανιχνευτή, ανακτώντας την αρχική διαμόρφωση.

Ο δέκτης είναι εύκολος να συντονιστείτε. για να λάβετε διαφορετική συχνότητα, είναι απαραίτητο μόνο να αλλάξετε τη συχνότητα τοπικού ταλαντωτή. Τα στάδια του δέκτη μετά το μίξερ λειτουργούν στη σταθερή ενδιάμεση συχνότητα (IF), έτσι ώστε το φίλτρο ζώνης IF δεν χρειάζεται να ρυθμιστεί σε διαφορετικές συχνότητες. Η σταθερή συχνότητα επιτρέπει στους σύγχρονους δέκτες να χρησιμοποιούν εξελιγμένα φίλτρα κρυστάλλου χαλαζία, κεραμικού συντονιστή ή ακουστικού κύματος επιφάνειας (SAW) IF, τα οποία έχουν πολύ υψηλούς συντελεστές Q, για να βελτιώσουν την επιλεκτικότητα. Στη φυσική και στη μηχανική, ο συντελεστής ποιότητας ή ο συντελεστής Q είναι μια αδιάστατη παράμετρος που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο υποβιβάζεται ένας ταλαντωτής ή συντονιστής και χαρακτηρίζει το εύρος ζώνης του αντηχείου σε σχέση με την κεντρική συχνότητα του. Το υψηλότερο Q υποδεικνύει χαμηλότερο ρυθμό απώλειας ενέργειας σε σχέση με την αποθηκευμένη ενέργεια του αντηχείου. οι ταλαντώσεις πεθαίνουν πιο αργά. Οι συντονιστές με παράγοντες υψηλής ποιότητας έχουν χαμηλή απόσβεση, έτσι ώστε να κουνούνται ή να δονούν περισσότερο. Το φίλτρο RF στο μπροστινό άκρο του δέκτη είναι απαραίτητο για να αποφευχθεί η παρεμβολή από οποιαδήποτε ραδιοσήματα στη συχνότητα της εικόνας. Χωρίς φίλτρο εισόδου, ο δέκτης μπορεί να λαμβάνει εισερχόμενα σήματα ραδιοσυχνοτήτων σε δύο διαφορετικές συχνότητες. Ο δέκτης μπορεί να σχεδιαστεί για να δέχεται οποιαδήποτε από αυτές τις δύο συχνότητες. εάν ο δέκτης έχει σχεδιαστεί για να δέχεται σε ένα, οποιοσδήποτε άλλος ραδιοφωνικός σταθμός ή ραδιοφωνικός θόρυβος στην άλλη συχνότητα μπορεί να περάσει και να παρεμποδίσει το επιθυμητό σήμα. Ένα μόνο συντονιστικό στάδιο φίλτρου RF απορρίπτει τη συχνότητα της εικόνας. επειδή είναι σχετικά μακριά από την επιθυμητή συχνότητα, ένα απλό φίλτρο παρέχει επαρκή απόρριψη. Η απόρριψη των παρεμβαλλόμενων σημάτων πολύ πιο κοντά στη συχνότητα στο επιθυμητό σήμα αντιμετωπίζεται από τα πολλαπλά συντονισμένα στάδια των ενδιάμεσων ενισχυτών συχνότητας, τα οποία δεν χρειάζεται να αλλάξουν συντονισμό τους. Αυτό το φίλτρο δεν χρειάζεται μεγάλη επιλεκτικότητα, αλλά καθώς ο δέκτης συντονίζεται σε διαφορετικές συχνότητες, πρέπει να «παρακολουθεί» σε συνδυασμό με τον τοπικό ταλαντωτή. Το φίλτρο RF χρησιμεύει επίσης για τον περιορισμό του εύρους ζώνης που εφαρμόζεται στον ενισχυτή RF, αποτρέποντάς του από την υπερβολική φόρτιση από ισχυρά σήματα εκτός ζώνης.

Για να επιτευχθεί τόσο καλή απόρριψη εικόνας όσο και επιλεκτικότητα, πολλοί σύγχρονοι δέκτες superhet χρησιμοποιούν δύο ενδιάμεσες συχνότητες. αυτό ονομάζεται superheterodyne διπλής μετατροπής ή διπλής μετατροπής. Το εισερχόμενο σήμα RF αναμειγνύεται αρχικά με ένα τοπικό σήμα ταλαντωτή στον πρώτο αναμικτήρα για να το μετατρέψει σε υψηλή συχνότητα IF για να επιτρέψει αποτελεσματικό φιλτράρισμα εκτός της συχνότητας εικόνας, τότε αυτό το πρώτο IF αναμειγνύεται με ένα δεύτερο τοπικό σήμα ταλαντωτή σε ένα δεύτερο αναμικτήρα για να το μετατρέψει σε μια χαμηλή συχνότητα IF για καλό φιλτράρισμα ζώνης. Ορισμένοι δέκτες χρησιμοποιούν ακόμη και τριπλή μετατροπή.

Με το κόστος των επιπρόσθετων σταδίων, ο δέκτης υπερετεροδυναμίας παρέχει το πλεονέκτημα μεγαλύτερης επιλεκτικότητας από ότι μπορεί να επιτευχθεί με ένα σχέδιο TRF. Όπου χρησιμοποιούνται πολύ υψηλές συχνότητες, μόνο το αρχικό στάδιο του δέκτη πρέπει να λειτουργεί στις υψηλότερες συχνότητες. τα υπόλοιπα στάδια μπορούν να παρέχουν μεγάλο μέρος του κέρδους του δέκτη σε χαμηλότερες συχνότητες, οι οποίες μπορεί να είναι ευκολότερες στη διαχείριση. Ο συντονισμός απλοποιείται σε σύγκριση με τον σχεδιασμό TRF πολλαπλών σταδίων και μόνο δύο στάδια πρέπει να παρακολουθούν το εύρος ρύθμισης. Η συνολική ενίσχυση του δέκτη διαιρείται μεταξύ τριών ενισχυτών σε διαφορετικές συχνότητες, τον ενισχυτή RF, IF και ήχου. Αυτό μειώνει τα προβλήματα με την ανατροφοδότηση και τις παρασιτικές ταλαντώσεις που απαντώνται σε δέκτες όπου τα περισσότερα στάδια ενισχυτή λειτουργούν με την ίδια συχνότητα όπως και στον δέκτη TRF.

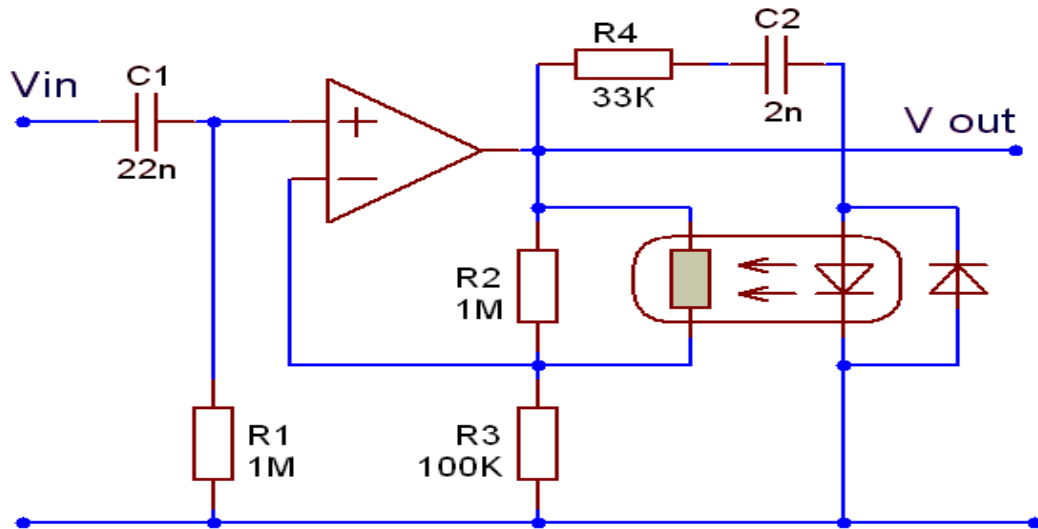
Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη επιλεκτικότητα κάνοντας το φιλτράρισμα στη χαμηλότερη ενδιάμεση συχνότητα. Μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους ενός δέκτη είναι το εύρος ζώνης του, η ζώνη συχνοτήτων που δέχεται. Για να απορρίψετε τους σταθμούς παρεμβολής ή τον θόρυβο που βρίσκονται κοντά, απαιτείται ένα στενό εύρος ζώνης. Σε όλες τις γνωστές τεχνικές φιλτραρίσματος, το εύρος ζώνης του φίλτρου αυξάνεται αναλογικά με τη συχνότητα, οπότε με την εκτέλεση του φιλτραρίσματος στο κατώτερο f_{if} αντί για τη συχνότητα του αρχικού ραδιοσήματος f_{RF} ένα στενότερο εύρος ζώνης είναι εφικτό να παραχθεί. Οι σύγχρονες εκπομπές FM και τηλεόρασης, τα κινητά τηλέφωνα και άλλες υπηρεσίες επικοινωνιών, με τα στενά πλάτη των καναλιών τους, θα ήταν αδύνατο χωρίς την υπερετεροδυναμία.



Αυτόματος έλεγχος κέρδους (AGC)

Η ένταση του σήματος (πλάτος) του ραδιοσήματος από την κεραία του δέκτη ποικίλλει δραστικά, κατά τάξεις μεγέθους, ανάλογα με το πόσο μακριά είναι ο ραδιοπομπός, πόσο ισχυρό είναι και τις συνθήκες διάδοσης κατά μήκος της διαδρομής των ραδιοκυμάτων.

Η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται από έναν δεδομένο πομπό ποικίλλει ανάλογα με το χρόνο λόγω των μεταβαλλόμενων συνθηκών διάδοσης της διαδρομής μέσω της οποίας περνά το ραδιοκύμα, όπως η παρεμβολή πολλαπλών διαδρομών. αυτό ονομάζεται ξεθώριασμα. Σε ένα δέκτη AM το πλάτος του ακουστικού σήματος από τον ανιχνευτή και η ένταση του ήχου είναι ανάλογο με το πλάτος του ραδιοσήματος, οπότε η εξασθένιση προκαλεί διακυμάνσεις της έντασης. Επιπλέον, καθώς ο δέκτης συντονίζεται μεταξύ ισχυρών και αδύναμων σταθμών, η ένταση του ήχου από το ηχείο θα ποικίλει δραστικά. Χωρίς αυτόματο σύστημα για να το χειριστεί, σε έναν δέκτη AM απαιτείται σταθερή ρύθμιση του ρυθμιστή έντασης.

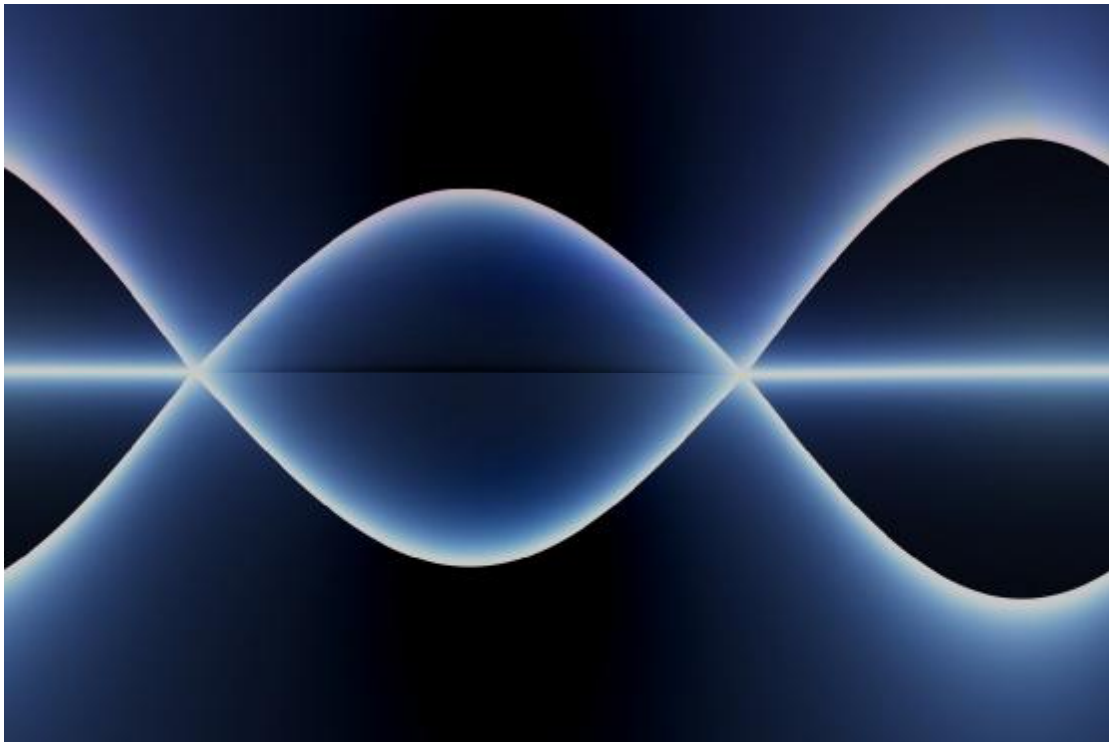


Σχήμα ενός AGC που χρησιμοποιείται στο αναλογικό τηλεφωνικό δίκτυο. η ανάδραση από το επίπεδο εξόδου στο κέρδος πραγματοποιείται μέσω ενός οπτικού απομονωτή Vactrol.

Σε όλους τους τύπους διαμόρφωσης ο αποδιαμορφωτής απαιτεί να λειτουργήσει σωστά ένα ορισμένο εύρος πλάτους σήματος. Το ανεπαρκές πλάτος σήματος θα προκαλέσει αύξηση του θορύβου στον αποδιαμορφωτή, ενώ το υπερβολικό πλάτος σήματος θα προκαλέσει υπερφόρτωση (κορεσμό) στα στάδια του ενισχυτή, προκαλώντας παραμόρφωση (αποκοπή) του σήματος. Επομένως, σχεδόν όλοι οι σύγχρονοι δέκτες περιλαμβάνουν ένα σύστημα ελέγχου ανατροφοδότησης το οποίο παρακολουθεί το μέσο επίπεδο του ραδιοσήματος στον ανιχνευτή και ρυθμίζει το κέρδος των ενισχυτών για να δώσει το βέλτιστο σήμα για αποδιαμόρφωση. Αυτό ονομάζεται αυτόματος έλεγχος κέρδους (AGC). Το AGC μπορεί να συγκριθεί με το σκοτεινό μηχανισμό προσαρμογής στο ανθρώπινο μάτι. Στην απλούστερη μορφή του, ένα σύστημα AGC αποτελείται από έναν ανορθωτή ο οποίος μετατρέπει το σήμα RF σε ένα μεταβαλλόμενο επίπεδο συνεχούς ρεύματος, ένα φίλτρο lowpass για να εξομαλύνει τις παραλλαγές και να παράγει ένα μέσο επίπεδο. Αυτό εφαρμόζεται ως σήμα ελέγχου σε προηγούμενο στάδιο ενισχυτή, για τον έλεγχο του κέρδους του. Σε ένα δέκτη υπερετεροδυναμικό, η AGC εφαρμόζεται συνήθως στον ενισχυτή IF και μπορεί να υπάρχει ένας δεύτερος βρόχος AGC για τον έλεγχο του κέρδους του ενισχυτή RF για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του.

5 Κεφάλαιο 5: Συμπέρασμα

Όπως τονίστηκε στον πρόλογο της παρούσας πτυχιακής εργασίας ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η εισαγωγή και μια ανάλυση στο τομέα της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας όσο και των Εφαρμογών της στις Γραμμές Μετάδοσης. Ο στόχος αυτός θεωρώ επιτεύχθηκε σε μεγάλο αριθμό διότι η αποτύπωση και η στοιχειώδη εμβάθυνση που πραγματοποιήθηκε στις έννοιες του Ηλεκτρομαγνητισμού και των Γραμμών Μετάδοσης και Μεταφοράς αλλά και ο πρακτικός προσανατολισμός για τη χρησιμότητα και χρηστικότητα αυτών ολοκληρώθηκε με την παρούσα εργασία. Έτσι με την εκτενή μελέτη της επιτυγχάνεται μια ικανοποιητική εμβάθυνση στις παραπάνω θεωρητικές έννοιες και πρακτικές εφαρμογές τους όπως ακριβώς αναλύονται κατά την πορεία της πτυχιακής εργασίας με σκοπό την μελέτη και πιθανή καθοδήγηση τελειόφοιτων φοιτητών συναφών τμημάτων σε θέματα μελέτης έρευνας και βοήθειας παντός χρήσης για το αντικείμενο της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας και των Εφαρμογών της στις Γραμμές Μετάδοσης. .



6 Βιβλιογραφία

- 1) <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CE%BB%CE%BF%CE%BA%CE%BB%CE%AE%CF%81%CF%89%CE%BC%CE%B1>
- 2) <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83%CF%84%CE%AE%CF%82>
- 3) <http://users.sch.gr/kassetas/ed0ASEP008c.htm>
- 4) http://users.ntua.gr/eglytsis/EM_A/Typologio_Vomvoridi.pdf
- 5) <http://users.sch.gr/jblack/autosch/iware/files/Chap06.pdf>
- 6) <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C100/493/3202,13008/>
- 7) https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CE%BE%CE%AF%CF%83%CF%89%CF%83%CE%B7
- 8) http://eclass.opencourses.teicm.gr/eclass/modules/document/file.php/TMJ102/%CE%9C%CE%B1%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AC%202_02.pdf
- 9) <http://fourier.math.uoc.gr/~papadim/calculus1.pdf>
- 10) <https://www.britannica.com/science/Lorentz-force>
- 11) <https://www.ucy.ac.cy/phy/documents/physics/phys102/lecture18.pdf>
- 12) <http://physiclessons.blogspot.gr/2013/03/laplace.html>

- 13) http://pmoiras.weebly.com/uploads/4/2/4/0/42405031/%CE%95%CE%BE%CE%B9%CF%83%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82_%CE%9Caxwell.pdf
- 14) http://www.physics.upatras.gr/UploadedFiles/course_106_3327.pdf
- 15) http://files.sma.de/dl/7418/EMV_SB-UGR093610.pdf
- 16) <http://www.yme.gr/?tid=212&aid=0>
- 17) <http://physics.ntua.gr/~dris/grammesmetaf.pdf>
- 18) <http://www.alljntuworld.in/download/electromagnetic-waves-transmission-lines-emtl-materials-notes/>
- 19) https://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-013-electromagnetics-and-applications-spring-2009/readings/MIT6_013S09_notes.pdf
- 20) <http://xanthippi.ceid.upatras.gr/courses/its/Presentations/transmission-lines.pdf>
- 21) http://www.eng.ucy.ac.cy/ece331/notes/notes_05_sv.pdf
- 22) http://elap.teiwest.gr/drosop/%CE%95%CF%80%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%B9%CE%BD%CF%89%CE%BD%CE%AF%CE%B5%CF%82_%CE%9C%CE%AD%CF%83%CF%89_%CE%93%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%BC%CF%8E%CE%BD_%CE%A4%CE%AC%CF%83%CE%B7%CF%82_%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1/emgt.html
- 23) <http://www.elsewedyelectric.com/Catalogs/Special%20Cables%20Catalogue.pdf>

- 24) https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%80%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%AF%CE%BD%CE%B1
- 25) http://web.cecs.pdx.edu/~greenwd/xmsnLine_notes.pdf
- 26) https://en.wikipedia.org/wiki/Reflections_of_signals_on_conducting_lines
- 27) https://en.wikipedia.org/wiki/Standing_wave_ratio
- 28) [https://en.wikipedia.org/wiki/Waveguide_\(electromagnetism\)#Principle_of_operation](https://en.wikipedia.org/wiki/Waveguide_(electromagnetism)#Principle_of_operation)
- 29) <https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/alexiou/ahts/notes/kef07.pdf>
- 30) [https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_\(radio\)#Overview](https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_(radio)#Overview)
- 31) http://skara.di.uoa.gr/communication_systems/transparency/antenna_chapter_1_2011_final.pdf
- 32) <https://en.wikipedia.org/wiki/Transmitter>