

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ &
ΔΙΚΤΥΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θ Ε Μ Α : “ Μέτρηση μετάδοσης πληροφορίας ενός
κυματοδηγού”

Καναβός Αθανάσιος Α.Μ.0709

Επιβλέποντες Καθηγητές: Λούβρος Σπυρίδων
Ασαρίδης Ηλίας

ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΝΑΥΠΙΑΚΤΟΣ 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι αφ' ενός μεν να παρουσιασθούν οι διάφοροι τύποι κυματοδηγών και αφ' ετέρου να μετρήσουμε την μετάδοση πληροφορίας ενός κυματοδηγού μέσω του προσδιορισμού του μήκους κύματος (λ). Για την εκτέλεση των μετρήσεων (πειραματικό μέρος) κατασκευάσαμε ένα κυματοδηγό με βάση τις οδηγίες του εγχειριδίου ORITEL, "Experimentation manual", της Chauvin Arnoux.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μία θεωρητική αναφορά στις βασικές έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, στις εξισώσεις του Maxwell αλλά και στις επιπτώσεις της ακτινοβολίας αυτής στον άνθρωπο.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται η έννοια, οι τύποι και οι απώλειες στις γραμμές μεταφοράς, καθώς και τα κατανεμημένα χαρακτηριστικά, η χαρακτηριστική αντίσταση, η καθυστέρηση διάδοσης, τα στάσιμα κύματα και οι εφαρμογές.

Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύονται οι έννοιες διάφορων κυματοδηγών που χρησιμοποιούνται για τις οπτικές επικοινωνίες.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφονται βασικές έννοιες της θεωρίας κεραιών.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η κατασκευή του κυματοδηγού, ο προσδιορισμός του μήκους κύματος (λ) και τα αποτελέσματά του.

Λέξεις - κλειδιά

- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία
- Εξισώσεις του Maxwell
- Γραμμές Μεταφοράς
- Στάσιμα κύματα
- Κυματοδηγός
- Κεραία

ABSTRACT

The aim of this dissertation is on the one hand to present the various types of waveguides and on the other hand to measure the transmission of information through a waveguide via determination of length of wave (λ). For the implementation of measurements (experimental part) we manufactured a waveguide with the directives of handbook ORITEL, "Experimentation manual", by Chauvin Arnoux.

The 1st chapter is a theoretical reference to the basic concepts of electromagnetic radiation, the Maxwell's equations and the effects of this radiation on humans.

In the 2nd chapter are presented the significance, the types and the losses in the transmission lines, as well as the distributed characteristics, the characteristic resistance, the delay of distribution, the standing waves and the applications.

The 3rd chapter analyzes the different concepts of waveguides used for optical communications.

The 4th chapter describes the basic concepts of antenna theory.

In the 5th chapter are presented the construction of the waveguide, the definition of the wavelength (λ) and its results.

Key - words

- Electromagnetic radiation
- Maxwell's equations
- Transmission lines
- Standing waves
- Waveguide
- Antenna

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο της Ηλεκτρονικής. Το θέμα που πραγματεύεται είναι η μέτρηση πληροφορίας ενός κυματοδηγού. Η κατασκευή του κυματοδηγού αποτέλεσε ένα αντικείμενο που μου κέντρισε το ενδιαφέρον.

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές μου κ. Σπυρίδων Λούβρο και κ. Ηλία Ασαρίδη για την ευκαιρία που μου έδωσαν να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας στο κενό.....	8
1.1 Γενικά.....	11
1.2 Τι είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.....	11
1.3 Βασικές έννοιες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	14
1.4 Κύματα στον ελεύθερο χώρο.....	15
1.5 Εξισώσεις του Maxwell.....	18
Κεφάλαιο 2. Γραμμές Μεταφοράς.....	19
2.1 Γενικά.....	19
2.2 Τύποι Γραμμών Μεταφοράς.....	19
2.2.1 Παράλληλες Γραμμές.....	19
2.2.2 Συνεστραμμένου Ζεύγους.....	20
2.2.3 Θωρακισμένα Ζεύγη Καλωδίων.....	22
2.2.4 Ομοαξονικές Γραμμές.....	22
2.2.5 Κυματοδηγοί.....	24
2.3 Απώλειες στις Γραμμές Μεταφοράς.....	24
2.3.1 Απώλειες του Χαλκού.....	24
2.3.2 Απώλειες Διηλεκτρικού.....	25
2.3.3 Απώλειες Επαγωγής & Ακτινοβολίας.....	25
2.4 Κατανεμημένα Χαρακτηριστικά.....	26
2.4.1 Μήκος Γραμμής.....	26
2.4.2 Επαγωγή.....	27
2.4.3 Χωρητικότητα.....	27
2.4.4 Αντίσταση.....	27
2.4.5 Αγωγιμότητα.....	27
2.4.6 Ισοδύναμη Αναπαράσταση.....	28
2.5 Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Γύρω από Γραμμές Μεταφοράς.....	29
2.6 Χαρακτηριστική Αντίσταση.....	30
2.6.1 Ορισμός & Βασικές Ιδιότητες.....	30
2.6.2 Υπολογισμός.....	31
2.7 Καθυστέρηση Διάδοσης.....	33
2.7.1 Ταχύτητα Διάδοσης.....	33
2.7.2 Παράγοντας ταχύτητας.....	34
2.8 Ανακλάσεις σε Γραμμές Μεταφοράς.....	35
2.8.1 Ανάκλαση Τάσης DC σε Ανοιχτό Κύκλωμα.....	35
2.8.2 Ανάκλαση Τάσης DC σε Βραχυκύκλωμα.....	36

2.8.3	Ανάκλαση Τάσης AC σε Ανοιχτό Κύκλωμα	37
2.8.4	Ανάκλαση Τάσης AC σε Βραχυκύκλωμα	39
2.9	Αντίσταση Εισόδου σε Απόσταση l από τον Τερματισμό	40
2.10	Στάσιμα Κύματα	43
2.10.1	Τερματισμός στη Χαρακτηριστική Αντίσταση	45
2.10.2	Τερματισμός σε Ανοιχτό Κύκλωμα	45
2.10.3	Τερματισμός σε Βραχυκύκλωμα	46
2.10.4	Τερματισμός σε Ωμική Αντίσταση	46
2.10.5	Τερματισμός σε Άεργο Φορτίο	47
2.10.6	Τερματισμός σε Μιγαδικό Φορτίο	48
2.10.7	Η Επίδραση της Προσαρμογής	48
2.11	Εφαρμογές	49
2.11.1	Εξομοίωση Συγκεντρωμένων Κυκλωμάτων	49
2.11.2	Φίλτρα	50
2.11.3	Μετατροπείς Baluns	51
Κεφάλαιο 3. Κυματοδηγός		52
3.1	Ορισμός	52
3.2	Ορθογώνιοι Κυματοδηγοί	53
3.2.1	Εισαγωγή	53
3.2.2	Εφαρμογές	54
3.2.3	Πλεονεκτήματα	56
3.2.4	Ανακλάσεις κυμάτων από ένα αγωγίμο πλέγμα	56
3.2.5	Κυματοδηγός παράλληλων επιπέδων	59
3.2.6	Modes	64
3.3	Κυκλικοί και άλλοι Κυματοδηγοί	67
3.3.1	Κυκλικοί Κυματοδηγοί	67
3.3.2	Άλλοι Κυματοδηγοί	69
Κεφάλαιο 4. Κεραίες		71
4.1	Ορισμός	71
4.2	Βασικά Μεγέθη Θεωρίας Κεραιών	72
4.2.1	Εύρος Ζώνης (Bandwidth)	72
4.2.2	Εμπέδηση Εισόδου	72
4.2.3	Λόγος Στάσιμων Κυμάτων Τάσης (VSWR)	73
4.2.4	Παραμόρφωση Φάσης και Καθυστέρηση Διαδρομής Ομάδος	73
4.2.5	Κατευθυντικότητα (Directivity)	74
4.2.6	Απόδοση της Κεραίας (Antenna Efficiency)	74
4.2.7	Απολαβή ή Κέρδος (Gain)	75

4.2.8	Διάγραμμα Ακτινοβολίας	75
4.2.9	Παράγοντας Ποιότητας.....	76
4.2.10	Πόλωση (Polarization).....	76
4.3	Κατευθυντικές Κεραίες Υψηλής Συχνότητας.....	77
4.3.1	Στοιχειοκεραία Διπόλων	77
4.3.2	Αναδιπλωμένο Δίπολο και Εφαρμογές.....	80
4.4	Κεραίες Χοάνης	83
4.4.1	Βασικές Χοάνες	83
4.4.2	Ειδικές Χοάνες.....	84
Κεφάλαιο 5. Πειραματικό Μέρος.....		87
5.1	Κατασκευή Κυματοδηγού.....	87
5.2	Τροφοδοτικό.....	89
5.3	Παλμογράφος.....	90
5.4	Προσδιορισμός του μήκους κύματος (λ)	92
5.5	Μελέτη τεχνητής εξασθένησης σήματος (κοιλία)	93
5.6	Μελέτη τεχνητής εξασθένησης σήματος (δεσμός)	95
5.7	Τελικά Συμπεράσματα	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		97

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 - Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Διακρίνεται η θέση της ιονίζουσας και μη ιονίζουσας ακτινοβολίας.....	12
Εικόνα 1.2 - Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Επισημαίνονται λεπτομέρειες σχετικά με τα μήκη κύματος και τα χρώματα του ορατού φάσματος.....	13
Εικόνα 1.3 - Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος.....	14
Εικόνα 1.4 - Ημιτονική αναπαράσταση κύματος	15
Εικόνα 1.5 - Σφαιρική διάδοση του κύματος.....	15
Εικόνα 2.1 - Δισύρματη γραμμή ανοιχτού τύπου	20
Εικόνα 2.2 - Δισύρματη γραμμή τύπου ταινίας.....	20
Εικόνα 2.3 - Συνεστραμμένο ζεύγος.....	21
Εικόνα 2.4 - Θωρακισμένα ζεύγη καλωδίων	22
Εικόνα 2.5 - Άκαμπτη ομοαξονική γραμμή.....	23
Εικόνα 2.6 - Εύκαμπτη ομοαξονική γραμμή	23
Εικόνα 2.7 – Κυματοδηγοί.....	24
Εικόνα 2.8 – Χωρητικότητα	27
Εικόνα 2.9 - Αγωγιμότητα	28
Εικόνα 2.10 - Ισοδύναμη αναπαράσταση κυκλώματος.....	28
Εικόνα 2.11 - Ισοδύναμη αναπαράσταση κυκλώματος.....	28
Εικόνα 2.12 - Ηλεκτρομαγνητικά πεδία γύρω από γραμμές μεταφοράς.....	29
Εικόνα 2.13 - Γραμμή άπειρου μήκους	30
Εικόνα 2.14 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς για τον υπολογισμό της Z_0	32
Εικόνα 2.15 - Δισύρματη γραμμή άπειρου μήκους	33
Εικόνα 2.16 - Ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή σε τροφοδοσία τάσης DC	35
Εικόνα 2.17 - Βραχυκυκλωμένη γραμμή σε μια τροφοδοσία τάσης DC	36
Εικόνα 2.18 - Ανάκλαση τάσης AC σε ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή.....	38
Εικόνα 2.19 - Συμβατική μορφή απεικόνισης στάσιμων κυμάτων	39
Εικόνα 2.20 - Ανάκλαση τάσης AC σε βραχυκυκλωμένη γραμμή	39
Εικόνα 2.21 - Τάση, ρεύμα και σύνθετη αντίσταση σε ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή	41
Εικόνα 2.22 - Τάση, ρεύμα και σύνθετη αντίσταση σε βραχυκυκλωμένη γραμμή.....	43
Εικόνα 2.23 - Τερματισμός σε ανοιχτό κύκλωμα	46
Εικόνα 2.24 - Τερματισμός σε βραχυκύκλωμα	46
Εικόνα 2.25 - Τερματισμός σε ωμική αντίσταση	47
Εικόνα 2.26 - Τερματισμός σε άεργο φορτίο	47
Εικόνα 2.27 - Παράδειγμα προσαρμογής με χρήση μετασχηματιστή $\lambda/4$	49

Εικόνα 2.28 - Μήκη γραμμών και ισοδύναμα συγκεντρωμένα κυκλώματα	50
Εικόνα 2.29 - Φίλτρο $\lambda/4$	50
Εικόνα 2.30 – Balun.....	51
Εικόνα 3.1 - SOI επίπεδος κυματοδηγός	52
Εικόνα 3.2 - α) Ακτίνες φωτός διαθλώμενες και αντανακλώμενες στη διεπαφή δύο μέσων και β) Συνολική εσωτερική αντανάκλαση σε δύο διεπαφές που καταδεικνύουν την έννοια ενός κυματοδηγού.....	53
Εικόνα 3.3 - Κυματοδηγοί (α) Ορθογώνιοι (b) Κυκλικοί.....	54
Εικόνα 3.4 - Αντανάκλαση από αγωγή επιφάνεια.....	57
Εικόνα 3.5 - Επίπεδα κύματα (Plane Waves) σε αγωγή επιφάνεια	58
Εικόνα 3.6 - Στάσιμα κύματα κατά μήκος βραχυκυκλωμένης γραμμής μεταφοράς	60
Εικόνα 3.7 - Placement on second short circuit on transmission line.....	60
Εικόνα 3.8 - Ανακλάσεις κατά μήκος ενός κυματοδηγού παράλληλου επιπέδου...	61
Εικόνα 3.9 - Ο ρυθμός $TE_{1,0}$ κατά μήκος ορθογώνιου κυματοδηγού.....	64
Εικόνα 3.10 - Πρότυπα κοινών τύπου πεδίων σε κυκλικούς κυματοδηγούς.....	68
Εικόνα 3.11 - Πτυχωτοί κυματοδηγοί (α) Μονή πτυχή, (b) Διπλή πτυχή.....	70
Εικόνα 4.1 - Η κεραία ως συσκευή μετατροπής σημάτων σε ραδιοκύματα	71
Εικόνα 4.2 - (α) Διεγειρόμενο και παρασιτικά στοιχεία στοιχειοκεραίας και (b) οριζόντιο περιστροφικό δίπολο, διάγραμμα ακτινοβολίας και στοιχειοκεραία	77
Εικόνα 4.3 - (α) Ευρύπλευρη στοιχειοκεραία και (b) διάγραμμα ακτινοβολίας	78
Εικόνα 4.4 - (α) Ακροπυροδοτική στοιχειοκεραία και (b) διάγραμμα ακτινοβολίας	79
Εικόνα 4.5 - Αναδιπλωμένο δίπολο.....	81
Εικόνα 4.6 - Yagi κεραία (α) Κεραία και διάγραμμα ακτινοβολίας (b) οπτικό ισοδύναμο	82
Εικόνα 4.7 - Κεραίες Χοάνης (α) Τομέας, (b) πυραμοειδής, (c) κωνική	83
Εικόνα 4.8 - Cass-horn κεραία (α) Cass-horn κεραία για δορυφορικές επικοινωνίες (Courtesy of Overseas Telecommunications Commission, Australia), (b) τροφοδότηση της Cass-horn κεραίας	85
Εικόνα 4.9 - Τοξοειδής χοάνη (α) Όψη, (b) διαδρομές ακτινών	86
Εικόνα 5.1 - Κυματοδηγός.....	88
Εικόνα 5.2 – Κυματοδηγός (2)	88
Εικόνα 5.3 - Τροφοδοτικό	89
Εικόνα 5.4 – Παλμογράφος	90
Εικόνα 5.5 - Παλμογράφος, Κυματοδηγός, Τροφοδοτικό.....	91

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 - Επιλεγμένοι Ορθογώνιοι Κυματοδηγοί	55
Πίνακας 3.2 - Τιμές του (k_T) για τις Κύριες Διαμορφώσεις Κυκλικών Κυματοδηγών	67
Πίνακας 4.1 - Χαρακτηρισμός τυπικών τιμών του VSWR και αντίστοιχες απώλειες ισχύος	73

Κεφάλαιο 1. Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας στο κενό

1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία [1] και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον πολλών επιστημόνων. Η ακτινοβολία αυτή που χρησιμοποιείται κατά κόρον στις τηλεπικοινωνίες και σε χιλιάδες άλλες συσκευές της καθημερινότητάς μας, έχει αποτελέσει πολλές φορές μήλον της έριδος. Αν και σχεδόν όλοι γνωρίζουν τις αρνητικές επιπτώσεις που έχει η ακτινοβολία αυτή στην υγεία – κυρίως – των ανθρώπων, η διευκόλυνση κυρίως της επικοινωνίας, τους κάνει να αγνοούν τους κινδύνους που κρύβει αυτή η, κατά τα άλλα, χρήσιμη μορφή ακτινοβολίας.

1.2 Τι είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία [2] αποτελείται από κύματα ηλεκτρικής και μαγνητικής ενέργειας, τα οποία διαδίδονται (ακτινοβολούνται) στον ελεύθερο χώρο. Η περιοχή στην οποία αναπτύσσονται τα κύματα αυτά ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εμφανίζονται με πολλές διαφορετικές μορφές (για παράδειγμα, τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, το ορατό φως αλλά και οι ακτίνες X αποτελούν μορφές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων).

Η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αναπτύχθηκε από τον Άγγλο Φυσικό James Clerk Maxwell το 1857 και τελειοποιήθηκε το 1873. Αποτελεί βασική μαθηματική εξήγηση της συμπεριφοράς των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός. Τα δύο πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων κυμάτων είναι:

- Το μήκος κύματος (λ), δηλαδή η απόσταση που καλύπτεται από ένα κύκλο του κύματος, και
- Η συχνότητα του κύματος (f), δηλαδή ο αριθμός των κυμάτων που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο ανά δευτερόλεπτο.

Οι σημαντικότερες διαφορές των διαφορετικών τύπων κυμάτων σχετίζονται με τη συχνότητα. Για οποιοδήποτε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το γινόμενο του μήκους κύματος και της συχνότητας ισούται με την ταχύτητα του φωτός. Η συχνότητα ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος εκφράζεται συνήθως σε μονάδες Hertz (Hz).

Ενδεικτικά:

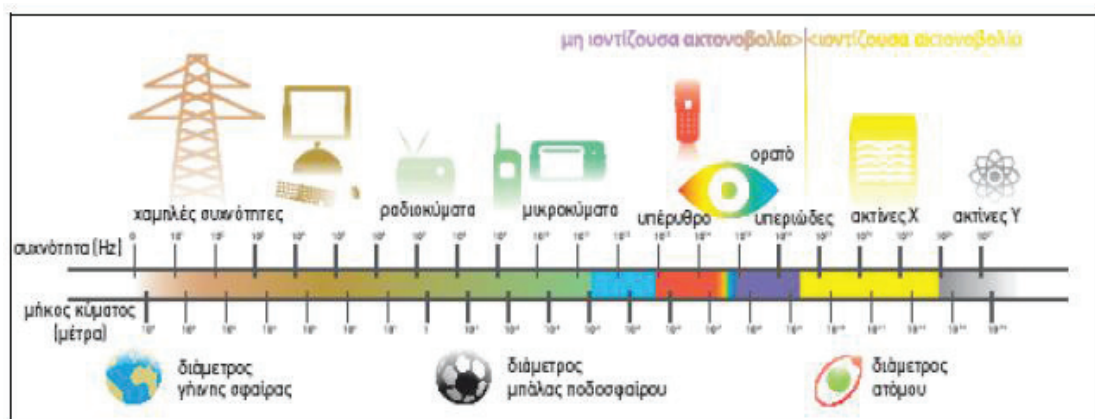
- Ένα Hz ισούται με ένα κύμα ανά δευτερόλεπτο.
- Ένα Kilohertz (KHz) ισούται με χίλια κύματα ανά δευτερόλεπτο,
- Ένα Megahertz (MHz) ισούται με ένα εκατομμύριο κύματα ανά δευτερόλεπτο και
- Ένα Gigahertz (GHz) ισούται με 1 δισεκατομμύριο κύματα ανά δευτερόλεπτο.

Το σύνολο αυτών των συχνοτήτων συνιστά το λεγόμενο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μπορεί να διαιρεθεί στα χαμηλής συχνότητας ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία (γραμμές μεταφοράς, ηλεκτρικές συσκευές οικιακής χρήσης, ηλεκτρονικοί υπολογιστές) και στα υψηλής συχνότητας πεδία ή πεδία ραδιοσυχνοτήτων (ραντάρ, εγκαταστάσεις ραδιοφωνικής και τηλεοπτικής μετάδοσης,

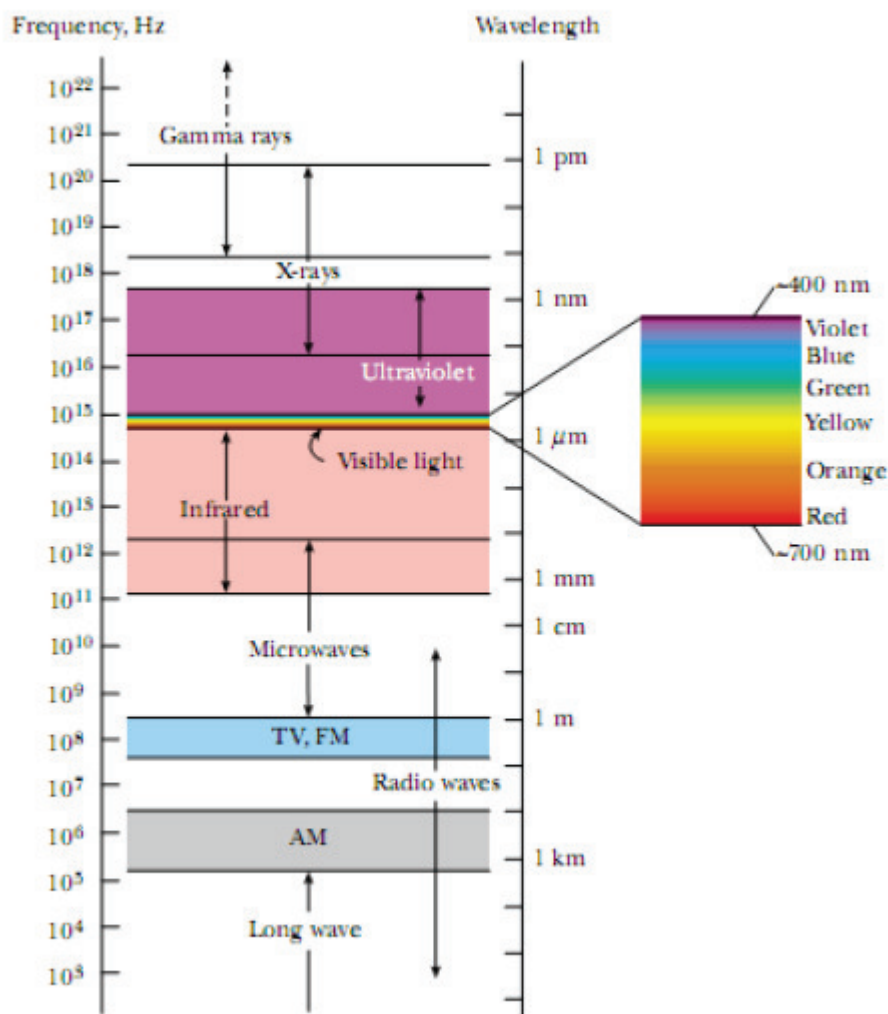
κινητά τηλέφωνα και σταθμοί βάσης κινητών επικοινωνιών, συστήματα επαγωγικής θέρμανσης και αντικλεπτικά συστήματα). Σε αντίθεση με την ιονίζουσα ακτινοβολία (όπως οι ακτίνες γ που εκπέμπονται από ραδιενεργά υλικά, η κοσμική ακτινοβολία και οι ακτίνες X), η οποία εντοπίζεται στο υψηλότερο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων η κβαντική ενέργεια δεν είναι αρκετά ισχυρή ώστε να διασπάσει τους δεσμούς που συγκρατούν μεταξύ τους τα μόρια μέσα στα κύτταρα και, συνεπώς, δεν μπορεί να προκαλέσει ιονισμό. Για το λόγο αυτό, η χαμηλότερη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος χαρακτηρίζεται ως «μη ιονίζουσα».

Στην Εικόνα 1.1 φαίνεται η σχετική θέση της μη ιονίζουσας περιοχής στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.



Εικόνα 1.1 - Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Διακρίνεται η θέση της ιονίζουσας και μη ιονίζουσας ακτινοβολίας

Η αίσθηση της όρασης επιτρέπει στον άνθρωπο με γυμνό οφθαλμό να ανιχνεύει μόνο ένα πολύ μικρό τμήμα αυτού του φάσματος. Την περιοχή αυτή ονομάζουμε ορατό φως. Το μήκος κύματος του ορατού φωτός κυμαίνεται από **400 – 700nm** με αντίστοιχες συχνότητες από **750 – 430THz**. Κάθε υποπεριοχή του ορατού φάσματος προκαλεί στον άνθρωπο την αίσθηση κάποιου συγκεκριμένου χρώματος (ιώδες, κυανό, πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί, ερυθρό).



Εικόνα 1.2 - Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Επισημαίνονται λεπτομέρειες σχετικά με τα μήκη κύματος και τα χρώματα του ορατού φάσματος

Από μαθηματικής πλευράς το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα περιγράφεται με όρους ενέργειας, μήκους κύματος ή συχνότητας. Στην περίπτωση αυτή ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

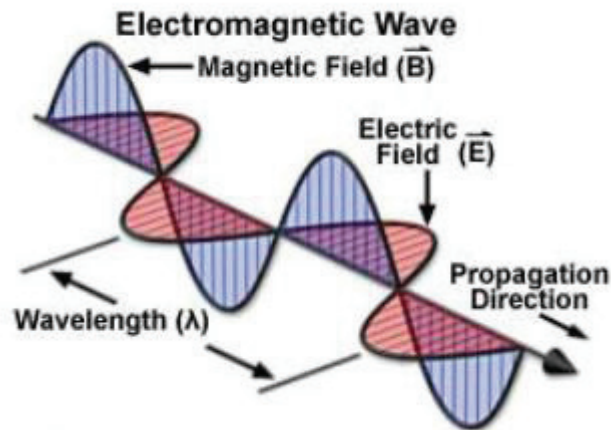
- $\lambda = \frac{c}{f}$ όπου λ μήκος κύματος, c ταχύτητα του φωτός, f συχνότητα
- $E = hf$ όπου E είναι το ποσό της μεταφερόμενης ενέργειας, h είναι η σταθερά του Planck ($6,626 \times 10^{-27}$ erg sec onds), f είναι η συχνότητα.

1.3 Βασικές έννοιες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα [3] είναι ταλαντώσεις που μεταδίδονται στον ελεύθερο χώρο με την ταχύτητα του φωτός ($c = 299.792.500 \pm 300 \text{ m/sec}$, για τις περισσότερες εφαρμογές $c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$).

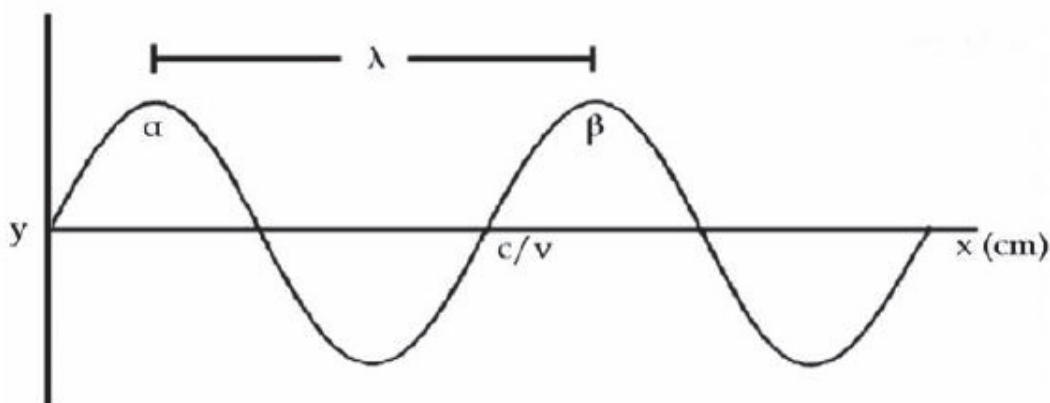
Με τον όρο ελεύθερο χώρο εννοούμε έναν χώρο στον οποίο δεν υπάρχουν μαγνητικά πεδία και πεδία βαρύτητας, χωρίς συμπαγή σώματα και ιονισμένα σωματίδια. Γενικά, ο όρος ελεύθερος χώρος αναφέρεται σε κάτι το ιδανικό, σε κάτι το οποίο στην πραγματικότητα δεν υφίσταται. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιείται πάρα πολύ αφού καθιστά πιο κατανοητό και απλό το φαινόμενο της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έχει πολλές ομοιότητες με την διάδοση των κυμάτων που δημιουργούνται στο νερό όταν μια πέτρα διαταράξει την ισορροπία του. Ωστόσο, η βασική τους διαφορά είναι ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια ενώ τα κύματα στο νερό διαμήκη. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι κάθετα μεταξύ τους (Εικόνα 1.3). Αυτή είναι μια θεώρηση που πρακτικά δεν μπορεί να ελεγχθεί αφού τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι μη ορατά. Ωστόσο η θεώρηση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κυμάτων κατά τα φαινόμενα της ανάκλασης, της διάθλασης και της περίθλασης.



Εικόνα 1.3 - Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Στην Εικόνα 1.4 δείχνεται η ημιτονική αναπαράσταση του κύματος

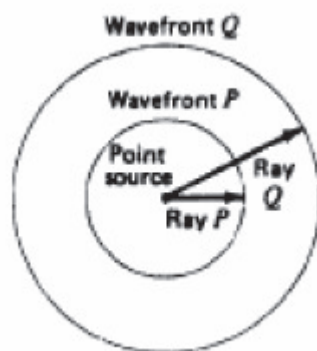


Εικόνα 1.4 - Ημιτονική αναπαράσταση κύματος

1.4 Κύματα στον ελεύθερο χώρο

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα [4] που εκπέμπεται από μια σημειακή πηγή διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η διάδοση του κύματος είναι σφαιρική. Για να γίνει κατανοητή η έννοια της διάδοσης, φανταζόμαστε ακτίνες που εκπέμπονται από την σημειακή πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις.

Σε απόσταση P από την σημειακή πηγή το κύμα έχει μια συγκεκριμένη φάση. Η ακτίνα αφήνει την σημειακή πηγή όταν η τάση και το ρεύμα είναι μέγιστα σε ένα κύκλωμα το οποίο τροφοδοτεί την σημειακή πηγή π.χ. σε ένα μέγιστο του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 1.5 - Σφαιρική διάδοση του κύματος

Όλα τα σημεία εκείνα τα οποία έχουν την ίδια φάση σχηματίζουν ένα επίπεδο το οποίο ονομάζεται μέτωπο κύματος. Αν το μήκος της ακτίνας Q είναι διπλάσιο του P τότε η νέα σφαίρα που δημιουργείται έχει επιφάνεια 4 φορές μεγαλύτερη της σφαίρας ακτίνας P . Αποδεικνύεται, ότι η συνολική ισχύς της σημειακής πηγής «εξαπλώνεται» καλύπτοντας τετραπλάσια περιοχή (σφαιρική) για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Έτσι, αν ορίσουμε την πυκνότητα ισχύος σαν ακτινοβολούμενη ισχύς ανά μονάδα

επιφάνειας, τότε η πυκνότητα ισχύος ελαττώνεται στο $1/4$ της τιμής της όταν η απόσταση από την πηγή διπλασιάζεται.

Έχει αποδειχθεί ότι η πυκνότητα ισχύος είναι αντιστρόφος ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή. Ο νόμος αυτός ονομάζεται Νόμος του Αντίστροφου Τετραγώνου και ισχύει για κάθε μορφή διάδοσης στον ελεύθερο χώρο. Έτσι έχουμε:

$$P = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (1.1)$$

όπου P = πυκνότητα ισχύος σε απόσταση r από την ισοτροπική πηγή

P_t = ακτινοβολούμενη ισχύς

Με τον όρο ισοτροπική πηγή εννοούμε μια πηγή η οποία ακτινοβολεί ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις στον χώρο. Αν και στην πραγματικότητα δεν υπάρχει ισοτροπική πηγή, η έννοια της ισοτροπικής ακτινοβολίας είναι πολύ χρήσιμη και πολύ συχνά χρησιμοποιούμενη. Αποδεικνύεται ότι ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου ισχύει ακόμα και όταν η πηγή δεν είναι ισοτροπική. Ωστόσο, για σφαιρικά κύματα η ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας πρέπει να είναι σταθερή σε όλα τα σημεία του χώρου (όπως είναι για παράδειγμα στον ελεύθερο χώρο). Ένας χώρος για τον οποίο ισχύει το παραπάνω κατά την διάδοση των σφαιρικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ονομάζεται ισοτροπικός.

Οι εντάσεις του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι επίσης σημαντικές. Οι δύο αυτές ποσότητες αντιπροσωπεύουν την τάση και το ρεύμα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα και οι μονάδες τους αντίστοιχα είναι Volt/m και A/m. Για ένα ηλεκτρικό κύκλωμα έχουμε

$$V=ZI \quad (1.2)$$

ενώ για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ισχύει:

$$\varepsilon = fH \quad (1.3)$$

όπου ε = ενεργός τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

H = ενεργός τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου

f = χαρακτηριστική αντίσταση του μέσου (Ω)

Η χαρακτηριστική αντίσταση του μέσου δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (1.4)$$

όπου μ = μαγνητική διαπερατότητα του μέσου

ε = διηλεκτρική σταθερά του μέσου

Για το κενό ισχύουν:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \\ \mu &= 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}\end{aligned}\tag{1.5}$$

Θυμίζουμε ότι η διαπερατότητα είναι ισοδύναμη της επαγωγής και η διηλεκτρική σταθερά είναι το ισοδύναμο της χωρητικότητας στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Μπορούμε τώρα από την παραπάνω σχέση να υπολογίσουμε την χαρακτηριστική αντίσταση του κενού.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = 120\pi = 377\Omega \tag{1.6}$$

Γνωρίζοντας την χαρακτηριστική αντίσταση, είναι δυνατό να υπολογιστεί η ένταση του πεδίου σε απόσταση r από την ισοτροπική πηγή. Όπως στα ηλεκτρικά κυκλώματα ισχύει $P = V^2/Z$, για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ισχύει $P = \varepsilon^2/Z$. Από την τελευταία εξίσωση και τις εξισώσεις (1.1) και (1.6) προκύπτει:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= P \times Z = \frac{P_t}{4\pi r^2} \times 120\pi = \frac{30P_t}{r^2} \\ \varepsilon &= \frac{\sqrt{30P_t}}{r^2}\end{aligned}\tag{1.7}$$

Από την εξίσωση (1.7) είναι φανερό ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι αντιστρόφος ανάλογη της απόστασης από την πηγή και ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της πυκνότητας ισχύος.

Όπως προαναφέρθηκε, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι σφαιρικό αν το μέσο είναι ισοτροπικό. Σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή κάθε μικρή περιοχή του κύματος μπορεί να ληφθεί σαν επίπεδο κύμα. Αυτό είναι φανερό από την γεωμετρία του κύματος αλλά και από την καθημερινή εμπειρία (ενώ η γη είναι σφαιρική θεωρούμε ένα γήπεδο ποδοσφαίρου επίπεδο). Η προσέγγιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σαν επίπεδα είναι πολύ χρήσιμη διότι απλοποιεί ορισμένα φαινόμενα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπως η διάθλαση και η περίθλαση.

1.5 Εξισώσεις του Maxwell

Οι βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού [5] μπορούν να διατυπωθούν με τέσσερις εξισώσεις, τις οποίες τις ονομάζουμε εξισώσεις του Maxwell. Οι τέσσερις αυτές εξισώσεις είναι

1. Νόμος του Gauss για τα ηλεκτρικά πεδία: $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$
2. Νόμος του Gauss για τα μαγνητικά πεδία: $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$
3. Νόμος του Ampere : $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left(I_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$
4. Νόμος του Faraday : $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία στο κενό. Όταν υπάρχει κάποιο υλικό αντικαθιστούμε την ηλεκτρική επιτρεπτότητα ϵ_0 και τη μαγνητική διαπερατότητα μ_0 του κενού με την ηλεκτρική επιτρεπτότητα ϵ και την μαγνητική διαπερατότητα μ του υλικού.

Κεφάλαιο 2. Γραμμές Μεταφοράς

2.1 Γενικά

Ο όρος γραμμή μεταφοράς [6] αναφέρεται στο υλικό μέσο που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση δύο σημείων μεταξύ τους με σκοπό τη μεταφορά ισχύος. Ουσιαστικά, με τον όρο γραμμή μεταφοράς εννοούμε κάθε είδους καλωδίωση που χρησιμοποιείται ανάμεσα σε μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος (π.χ. γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, μπαταρία τροφοδοσίας DC) και ένα φορτίο (μία κεραία, μια ηλεκτρική συσκευή, ένα στοιχείο με σύνθετη αντίσταση Z_L). Επομένως, σε κάθε ηλεκτρική ή ηλεκτρονική διάταξη υπάρχουν γραμμές μεταφοράς. Ωστόσο, η μελέτη της συμπεριφοράς μιας γραμμής μεταφοράς είναι αναγκαία μόνο όταν ο χρόνος διάδοσης της τάσης από την πηγή στο φορτίο κατά μήκος της γραμμής γίνεται συγκρίσιμος με το ρυθμό μεταβολής της τάσης της πηγής. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται ιδιαίτερα φαινόμενα που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη μετάδοση του ηλεκτρικού σήματος (τάσης) από το ένα σημείο στο άλλο.

2.2 Τύποι Γραμμών Μεταφοράς

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία γραμμών μεταφοράς με διαφορετικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και περιορισμούς, άρα και εφαρμογές. Ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά, μπορούμε να βρούμε γραμμές μεταφοράς εύκαμπτες ή άκαμπτες, θωρακισμένες από παρεμβολές και υγρασία ή όχι, που χρησιμοποιούν κάποιο διηλεκτρικό ή απλά τον αέρα. Από την άλλη, δύο βασικά κριτήρια χρήσης μιας γραμμής μεταφοράς είναι η ικανότητα μεταφοράς υψηλής ισχύος και η ικανότητα μεταφοράς υψηλών συχνοτήτων. Γενικά, θα μπορούσαμε να εντοπίσουμε τρεις κατηγορίες γραμμών: (1) τις παράλληλες γραμμές που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλών σχετικά συχνοτήτων, (2) τις ομοαξονικές γραμμές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι τα **18 GHz** και (3) τους κυματοδηγούς που χρησιμοποιούνται πάνω από το **1 GHz**. Στη συνέχεια, αναφερόμαστε αναλυτικά στις μορφές που μπορούν να πάρουν οι κατηγορίες αυτές.

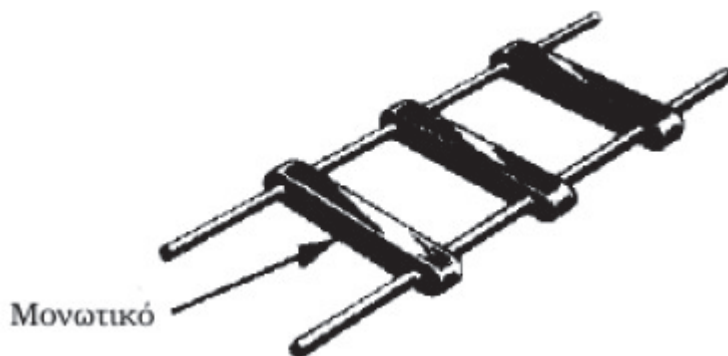
2.2.1 Παράλληλες Γραμμές

Ένας τύπος παράλληλων γραμμών μεταφοράς είναι οι δισύρματες γραμμές που φαίνονται στις Εικόνες 2.1 και 2.2. Στη γενική τους μορφή αποτελούνται από δύο αγωγούς οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους μερικά εκατοστά.

2.2.1.1 Δισύρματες Γραμμές Ανοιχτού Τύπου

Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται κυρίως σε γραμμές μεταφοράς ισχύος, καθώς και σε υπαίθριες τηλεφωνικές γραμμές, αγροτικών κυρίως περιοχών. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι η απλότητα της κατασκευής τους. Τα μειονεκτήματά τους είναι πολλά ειδικά όταν πρόκειται για μεταφορά ραδιοσυχνοτήτων: χαρακτηρίζονται από υψηλές απώλειες ακτινοβολίας, ηλεκτρικό θόρυβο και παρεμβολές λόγω της έλλειψης θωράκισης. Συγκεκριμένα, οι απώλειες ακτινοβολίας οφείλονται στο γεγονός ότι η γραμμή συμπεριφέρεται ως κεραία και ένα μέρος της ισχύος που μεταφέρει ακτινοβολείται, με αποτέλεσμα την απώλεια ισχύος. Η δισύρματη γραμμή

μεταφοράς ανοιχτού τύπου, που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1 αποτελείται από τμήματα μονωτικού υλικού τοποθετημένα ανά τακτά διαστήματα, τα οποία εξασφαλίζουν σταθερή απόσταση μεταξύ των δύο αγωγών.



Εικόνα 2.1 - Δισύρματη γραμμή ανοιχτού τύπου

2.2.1.2 Δισύρματες Γραμμές Τύπου Ταινίας

Στην Εικόνα 2.2 απεικονίζεται ένα άλλο είδος δισύρματης γραμμής τύπου ταινίας. Στην περίπτωση αυτή, το διηλεκτρικό (συνήθως πολυαιθυλένιο) καλύπτει και τους δύο αγωγούς κατά μήκος της γραμμής. Συνεπώς, σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση της ανοιχτής γραμμής, εδώ το διηλεκτρικό μέσο δεν είναι μόνο ο αέρας, αλλά και το πολυαιθυλένιο. Αυτός ο τύπος γραμμής μεταφοράς χρησιμοποιείται πολλές φορές για τη σύνδεση της κεραίας με το δέκτη της τηλεόρασης.



Εικόνα 2.2 - Δισύρματη γραμμή τύπου ταινίας

2.2.2 Συνεστραμμένου Ζεύγους

Αν δύο ασύρματα σύρματα χαλκού, τα οποία περιβάλλονται από μονωτικό υλικό συστραφούν το ένα γύρω από το άλλο, ώστε να πάρουν ελικοειδές σχήμα, δημιουργούν ένα συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.3. Ένα καλώδιο μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα τέτοια ζεύγη, τα οποία περιβάλλονται από μονωτικό υλικό. Το μήκος και ο τρόπος της πλέξης, ειδικά

όταν πρόκειται για περισσότερα από ένα ζεύγη, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του καλωδίου όσον αφορά την προστασία έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Δεν ενδείκνυται για υψηλές συχνότητες εξαιτίας των μεγάλων απωλειών που προκαλεί το μονωτικό υλικό ειδικά στην περίπτωση που είναι βρεγμένο (π.χ. λόγω βροχής). Τα χάλκινα συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων είναι το συχνότερο χρησιμοποιούμενο μέσο επίτευξης επικοινωνιακών ζεύξεων λόγω του χαμηλού κόστους και χρησιμοποιούνται ευρέως στο τηλεφωνικό δίκτυο.



Εικόνα 2.3 - Συνεστραμμένο ζεύγος

Τα τηλέφωνα μπορεί να συνδέονται με τα κέντρα της τηλεφωνικής εταιρείας με ένα καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους. Τα καλώδια αυτά μπορούν να εκτείνονται για αρκετά χιλιόμετρα χωρίς ενίσχυση, αλλά για μεγαλύτερες αποστάσεις χρειάζονται επαναλήπτες (repeaters). Όταν πολλά τέτοια καλώδια κινούνται παράλληλα για αρκετή απόσταση, όπως τα καλώδια που προέρχονται από μια πολυκατοικία με κατεύθυνση το κέντρο της τηλεφωνικής εταιρείας, συνδυάζονται όλα μαζί σε μια δέσμη και καλύπτονται από ένα προστατευτικό περίβλημα. Τα ζεύγη των δεσμών αυτών θα προκαλούσαν παρεμβολές το ένα στο άλλο αν δεν ήταν συνεστραμμένα.

Τα συνεστραμμένα ζεύγη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση είτε αναλογικών είτε ψηφιακών σημάτων. Το εύρος ζώνης εξαρτάται από το πάχος του σύρματος και την καλυπτόμενη απόσταση. Σε πολλές περιπτώσεις πάντως μπορεί να επιτευχθεί εύρος πολλών Mbps για λίγα χιλιόμετρα. Λόγω της καλής απόδοσής τους και του χαμηλού τους κόστους τα καλώδια συνεστραμμένου ζεύγους χρησιμοποιούνται ευρύτατα.

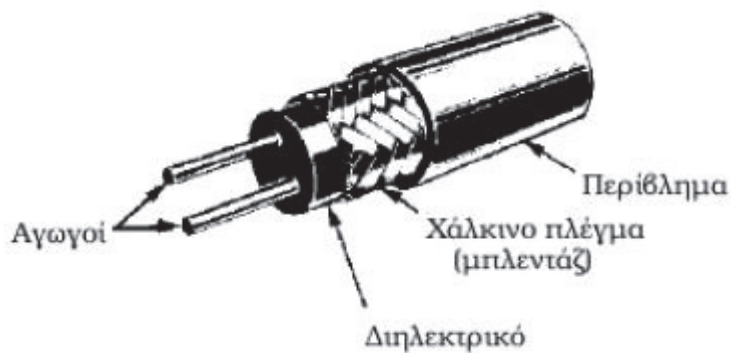
Γενικότερα υπάρχουν δύο μορφές τέτοιων καλωδίων: το αθωράκιστο καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους (UTP: Unshielded Twisted Pair), συνηθισμένο στα τηλεφωνικά δίκτυα και το θωρακισμένο καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους (STP: Shielded Twisted Pair), που παρέχει προστασία από θόρυβο ή παρεμβολές.

Το καλώδιο UTP είναι γνωστό από τη χρήση του στα δίκτυα υπολογιστών. Το ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο είναι εκείνο της κατηγορίας 5 (CAT5) το οποίο επιτρέπει ρυθμούς μεταφοράς μέχρι **100 Mbps** σε απόσταση έως **100m**. Το καλώδιο CAT5 αποτελείται από 4 συνεστραμμένα ζεύγη και πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές όσον αφορά τις απώλειες λόγω απόσβεσης και παρεμβολής των γειτονικών καλωδίων που το ίδιο περιλαμβάνει. Συγκεκριμένα, η παρεμβολή που προαναφέρθηκε, γνωστή και ως crosstalk αποτελεί μια εσωτερική παρεμβολή και οφείλεται στην επαγόμενη τάση από ένα καλώδιο σε ένα γειτονικό του, εξαιτίας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τη ροή ρεύματος. Μια τέτοιου είδους παρεμβολή μπορεί να παρατηρηθεί σε ένα τηλεφωνικό δίκτυο όταν κατά τη

διάρκεια ενός τηλεφωνήματος, ακούγεται ταυτόχρονα αλλά εξασθενημένα μια άλλη συνομιλία.

2.2.3 Θωρακισμένα Ζεύγη Καλωδίων

Το θωρακισμένο ζεύγος καλωδίων (Εικόνα 2.4), αποτελείται από δύο παράλληλους αγωγούς οι οποίοι περιβάλλονται από ένα στερεό διηλεκτρικό. Τους αγωγούς και το διηλεκτρικό περιβάλλει ένα χάλκινο πλέγμα που ενεργεί ως ηλεκτρική ασπίδα. Η διάταξη καλύπτεται με ένα λαστιχένιο και γενικά εύκαμπτο περίβλημα που προστατεύει τη γραμμή από την υγρασία και τις μηχανικές καταπονήσεις. Η θωράκιση του πλέγματος χαλκού απομονώνει τους αγωγούς από τα μαγνητικά πεδία που μπορεί να υπάρχουν στο χώρο.



Εικόνα 2.4 - Θωρακισμένα ζεύγη καλωδίων

2.2.4 Ομοαξονικές Γραμμές

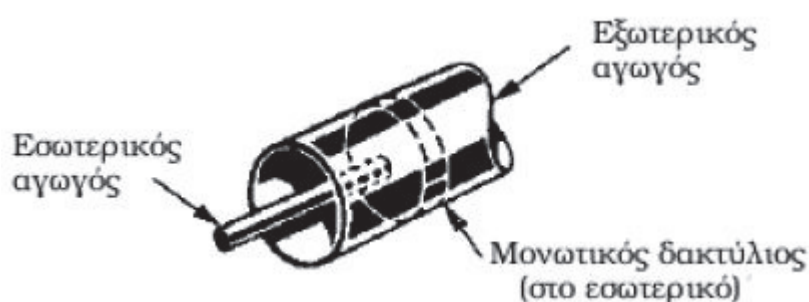
Υπάρχουν δύο τύποι ομοαξονικών γραμμών: (α) οι άκαμπτες ομοαξονικές γραμμές και (β) οι εύκαμπτες ομοαξονικές γραμμές. Και στις δύο περιπτώσεις, αποτελούνται από δύο ομόκεντρους αγωγούς τους οποίους χωρίζει κάποιο διηλεκτρικό. Έχουν καλύτερη θωράκιση από τα συνεστραμμένα ζεύγη, οπότε μπορούν να καλύπτουν μεγαλύτερες αποστάσεις σε υψηλότερες ταχύτητες.

2.2.4.1 Άκαμπτες Ομοαξονικές Γραμμές

Η άκαμπτη ομοαξονική γραμμή αποτελείται από ένα κεντρικό, μονωμένο καλώδιο (εσωτερικός αγωγός) που τοποθετείται μέσα σε έναν σωληνοειδή εξωτερικό αγωγό. Ο εξωτερικός αγωγός καλύπτεται από ένα πλαστικό προστατευτικό περίβλημα. Η ομοαξονική γραμμή απεικονίζεται στην Εικόνα 2.5. Σε μερικές εφαρμογές, ο εσωτερικός αγωγός μονώνεται από τον εξωτερικό αγωγό με την τοποθέτηση σε τακτές αποστάσεις μονωτικών δακτυλίων με καλά χαρακτηριστικά μόνωσης και χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες στις υψηλές συχνότητες. Το κύριο πλεονέκτημα της άκαμπτης γραμμής είναι η δυνατότητά της να ελαχιστοποιεί τις απώλειες ακτινοβολίας. Όπως αναφέραμε και στα προηγούμενα, τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται σε μια δυσύρματη παράλληλη γραμμή έχουν ως αποτέλεσμα απώλειες ακτινοβολίας. Εντούτοις, σε μια ομοαξονική γραμμή δε δημιουργούνται ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία έξω από τον εξωτερικό αγωγό. Τα

πεδία είναι περιορισμένα στο χώρο μεταξύ των δύο αγωγών, με αποτέλεσμα να έχουμε μια τέλεια προστατευμένη ομοαξονική γραμμή. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι περιορίζεται και η παρεμβολή από άλλες γραμμές.

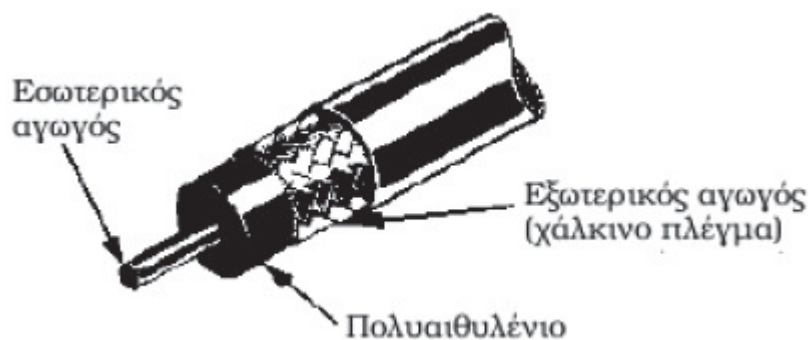
Η άκαμπτη γραμμή έχει τα ακόλουθα μειονεκτήματα: (α) είναι ακριβή κατασκευαστικά, (β) πρέπει να διατηρηθεί στεγνός ο χώρος μεταξύ των αγωγών ώστε να αποφευχθεί τυχόν διαρροή μεταξύ των δύο αγωγών και (γ) αν και οι απώλειες στις υψηλές συχνότητες είναι κάπως μικρότερες απ' ό,τι στις προηγούμενες γραμμές μεταφοράς, είναι αρκετές ώστε να περιορίζουν και πάλι το μέγιστο πρακτικό μήκος της γραμμής. Η διαρροή που προκαλείται από την υγρασία αποτρέπει σε μερικές εφαρμογές άκαμπτων γραμμών με την χρήση ενός αδρανούς αερίου, όπως το άζωτο, το ήλιο, ή το αργό, που εισάγεται στο εσωτερικό της γραμμής ώστε να διατηρεί στεγνό το χώρο μεταξύ των δύο αγωγών.



Εικόνα 2.5 - Άκαμπτη ομοαξονική γραμμή

2.2.4.2 Εύκαμπτες Ομοαξονικές Γραμμές

Οι εύκαμπτες ομοαξονικές γραμμές (Εικόνα 2.6) περιλαμβάνουν έναν εσωτερικό αγωγό από εύκαμπτο καλώδιο που μονώνεται από τον εξωτερικό αγωγό με ένα στερεό και εύκαμπτο μονωτικό υλικό. Ο εξωτερικός αγωγός αποτελείται από ένα μεταλλικό διχτυωτό πλέγμα (μπλεντάζ), το οποίο δίνει επίσης ευκαμψία στη γραμμή.



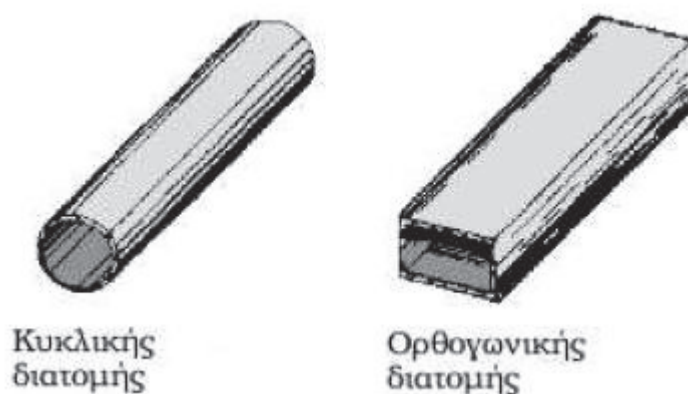
Εικόνα 2.6 - Εύκαμπτη ομοαξονική γραμμή

Λόγω των απωλειών που οφείλονταν στους λαστιχένιους μονωτές που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά μεταξύ των δύο αγωγών, χρησιμοποιήθηκε τελικά

πολυαιθυλένιο. Το πλαστικό πολυαιθυλενίου είναι μια στερεά ουσία που παραμένει εύκαμπτη σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Η χρήση του πολυαιθυλενίου οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες από ότι η χρήση του αέρα ως μονωτή. Όμως αυτές οι απώλειες είναι μικρότερες από τις απώλειες που συνδέονται με τα περισσότερα άλλα στερεά διηλεκτρικά υλικά.

2.2.5 Κυματοδηγοί

Οι κυματοδηγοί είναι μεταλλικοί σωλήνες ορθογωνικής συνήθως διατομής αλλά, σε ορισμένες περιπτώσεις και ελλειπτικής ή κυκλικής. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικροκυματικές εφαρμογές λόγω της ιδιότητάς τους να επιτρέπουν τη μετάδοση ισχύος με τιμές που κυμαίνονται από μερικά **mW** έως και δεκάδες **kW**. Αν και κατατάσσονται στις γραμμές μεταφοράς, ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η μετάδοση στο εσωτερικό τους διαφέρει από τις συμβατικές μεθόδους. Σε αρκετές εφαρμογές το εσωτερικό του κυματοδηγού πληρώνεται με κατάλληλο διηλεκτρικό πολύ χαμηλής αγωγιμότητας με στόχο τη βελτίωση των χαρακτηριστικών διάδοσης του κυματοδηγού χωρίς να προσαυξάνονται σημαντικά οι απώλειες μετάδοσης.



Εικόνα 2.7 – Κυματοδηγοί

2.3 Απώλειες στις Γραμμές Μεταφοράς

Σε πρακτικές περιπτώσεις δε μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι γραμμές μεταφοράς δεν εισάγουν απώλειες. Σε πραγματικές συνθήκες, οι απώλειες μπορεί να είναι τριών ειδών: (α) απώλειες χαλκού, (β) απώλειες διηλεκτρικού και (γ) απώλειες λόγω επαγωγής και ακτινοβολίας.

2.3.1 Απώλειες του Χαλκού

Με τον όρο απώλειες χαλκού εννοούμε τις απώλειες που οφείλονται στην αντίσταση των αγωγών των γραμμών μεταφοράς. Η αντίσταση των αγωγών δεν είναι ποτέ μηδενική με αποτέλεσμα να υπάρχουν πάντα απώλειες υπό την μορφή θερμικής ενέργειας, λόγω της θέρμανσης των αγωγών κατά την κίνηση των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό τους. Η αντίσταση ενός αγωγού είναι ανάλογη του μήκους και αντιστρόφως ανάλογη της επιφάνειας διατομής του αγωγού. Συνεπώς μακρύτερα και

μικρής διατομής χάλκινα καλώδια παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση και συνεπώς περισσότερες απώλειες.

Στις υψηλότερες συχνότητες οι απώλειες χαλκού οφείλονται κυρίως στο επιδερμικό φαινόμενο. Στη μηδενική συχνότητα (μόνο συνιστώσα DC) η ροή του ρεύματος κατά μήκος ενός αγωγού είναι ομοιόμορφη. Η κατάσταση είναι διαφορετική όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα: η ροή του ρεύματος μειώνεται στο κέντρο του αγωγού και αυξάνεται στην επιφάνειά του. Το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο με την αύξηση της συχνότητας. Αν για παράδειγμα η συχνότητα είναι της τάξης των **100 MHz**, η ροή των ηλεκτρονίων στο κέντρο είναι τόσο μικρή που το κεντρικό μέρος του καλωδίου θα μπορούσε να αφαιρεθεί, κάτι που γίνεται σε αρκετές περιπτώσεις για εξοικονόμηση χαλκού. Μάλιστα, οι απώλειες χαλκού μπορούν να ελαχιστοποιηθούν και να αυξηθεί η αγωγιμότητα ενός αγωγού εάν επιστρώσουμε την επιφάνειά του με ασήμι. Δεδομένου ότι το ασήμι είναι καλύτερος αγωγός από το χαλκό, το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος θα διατρέξει την επίστρωση από ασήμι. Ο χαλκός χρησιμεύει έπειτα κυρίως ως μηχανική υποστήριξη.

2.3.2 Απώλειες Διηλεκτρικού

Οι απώλειες λόγω του διηλεκτρικού οφείλονται στη θέρμανση του διηλεκτρικού υλικού μεταξύ των αγωγών. Η θερμότητα που παράγεται διαχέεται στο περιβάλλον μέσο. Οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο αγωγών. Αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας και σε συνδυασμό με το επιδερμικό φαινόμενο, περιορίζουν τη μέγιστη χρησιμοποιήσιμη συχνότητα στα **18 GHz**. Οι απώλειες είναι μικρότερες και σχεδόν αμελητέες όταν χρησιμοποιείται ως διηλεκτρικό ο αέρας. Παρόλα αυτά, σε πολλές εφαρμογές, όπως στην περίπτωση που πρέπει να χρησιμοποιηθεί εύκαμπτο ομοαξονικό καλώδιο, χρησιμοποιείται κάποιο διηλεκτρικό με μικρή διηλεκτρική σταθερά. Το πολυαιθυλένιο ως διηλεκτρικό, ευνοεί την κατασκευή εύκαμπτων γραμμών με χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες.

2.3.3 Απώλειες Επαγωγής & Ακτινοβολίας

Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας και επαγωγής είναι παρόμοιες δεδομένου ότι και οι δύο προκαλούνται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που περιβάλλουν τους αγωγούς. Οι απώλειες επαγωγής εμφανίζονται όταν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από έναν αγωγό επάγει ρεύματα σε κοντινά μεταλλικά αντικείμενα. Κατά συνέπεια, μέρος της ισχύος απορροφάται από το αντικείμενο και χάνεται. Οι απώλειες ακτινοβολίας έχουν ως αποτέλεσμα την ακτινοβολήση του αγωγού με τρόπο παρόμοιο με εκείνον της κεραίας. Το αποτέλεσμα και σε αυτήν την περίπτωση είναι η απώλεια ισχύος. Οι απώλειες ακτινοβολίας και επαγωγής είναι δυνατόν να περιοριστούν με το σωστό τερματισμό και τη θωράκιση της γραμμής. Κατάλληλη θωράκιση προσφέρουν τα ομοαξονικά καλώδια όταν γειώσουμε τον εξωτερικό αγωγό. Στην περίπτωση των παράλληλων γραμμών οι απώλειες αυτές είναι αναπόφευκτες.

2.4 Κατανεμημένα Χαρακτηριστικά

Στα συμβατικά ηλεκτρικά κυκλώματα, κάθε στοιχείο (για παράδειγμα μια αντίσταση, ένας πυκνωτής ή ένα πηνίο) εντοπίζεται και σημειώνεται σε συγκεκριμένο σημείο της συνδεσμολογίας του κυκλώματος. Αντίθετα, στις γραμμές μεταφοράς, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους βρίσκονται ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλο το μήκος της γραμμής λόγω της συμμετρίας της κατασκευής. Αυτό σημαίνει ότι ένα κομμάτι ομοαξονικού καλωδίου εμφανίζει ωμικά, χωρητικά και επαγωγικά χαρακτηριστικά σε όλο το μήκος του. Άρα, κατά την ανάλυσή του δε μπορούμε να εντοπίσουμε σε συγκεκριμένο σημείο μια ωμική αντίσταση των **50 Ω**. Αντίθετα, η ωμική αντίστασή του είναι κατανεμημένη ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του αγωγού και μετράται ανά μονάδα μήκους, π.χ. **50 Ω/m**. Ωστόσο, για να διευκολύνουμε την ανάλυση και τη μελέτη των γραμμών μεταφοράς, θεωρούμε ότι η γραμμή μεταφοράς περιλαμβάνει συγκεντρωμένα στοιχεία εμπέδησης που αντιστοιχούν σε τμήματα της γραμμής απειροελάχιστου μήκους **dx**.

2.4.1 Μήκος Γραμμής

Μια γραμμή μεταφοράς θεωρείται μικρού ηλεκτρικού μήκους, όταν το φυσικό της μήκος είναι μικρό συγκριτικά με το ένα τέταρτο του μήκους κύματος του σήματος που μεταφέρει. Αντίστοιχα μια γραμμή μεταφοράς θεωρείται μεγάλου ηλεκτρικού μήκους, όταν το φυσικό της μήκος είναι μεγάλο σε σχέση με το **$\lambda/4$** του σήματος που μεταφέρει. Επομένως, οι όροι ‘μικρού μήκους’ και ‘μεγάλου μήκους’ εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας κάθε γραμμής. Παραδείγματος χάριν, μια γραμμή που έχει φυσικό μήκος 3 μέτρων είναι μικρού ηλεκτρικού μήκους εάν μεταφέρει μια ραδιοσυχνότητα των **30 kHz** (**$\lambda = 10.000 \text{ m}$**). Από την άλλη, η ίδια γραμμή θεωρείται ηλεκτρικά μεγάλου μήκους εάν μεταφέρει μια συχνότητα των **30.000 MHz** (**$\lambda = 0,01\text{m}$**).

Η ισχύς που μεταφέρει μια γραμμή μικρού μήκους, φθάνει πρακτικά ολόκληρη στο φορτίο στο τέλος της γραμμής μεταφοράς. Αυτή η γραμμή μεταφοράς θεωρείται ότι παρουσιάζει μόνο κάποια ωμική αντίσταση και κανένα άλλο ηλεκτρικό χαρακτηριστικό. Εντούτοις, η εικόνα αλλάζει αρκετά όταν χρησιμοποιείται μια γραμμή μεγάλου ηλεκτρικού μήκους. Δεδομένου ότι οι περισσότερες γραμμές μεταφοράς στις τηλεπικοινωνίες είναι μεγάλου μήκους (λόγω υψηλών συχνοτήτων), οι ιδιότητες αυτών των γραμμών πρέπει να εξεταστούν ξεχωριστά.

Στις γραμμές μικρού μήκους χρησιμοποιούνται οι νόμοι του Ohm και τα στοιχεία της γραμμής θεωρούνται συγκεντρωμένα. Στην περίπτωση των γραμμών μεταφοράς, μας ενδιαφέρουν τα κατανεμημένα χαρακτηριστικά της γραμμής. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά όπως η επαγωγή, η χωρητικότητα και η αντίσταση που παρουσιάζει τέτοια γραμμή εξαρτώνται από το μήκος της γραμμής, το μέγεθος των αγωγών, τη μεταξύ τους απόσταση, καθώς και από το είδος του διηλεκτρικού που βρίσκονται ανάμεσά τους. Λόγω της εξάρτησής τους από το μήκος της γραμμής τα χαρακτηριστικά αυτά ονομάζονται κατανεμημένα και μελετώνται αναλυτικά παρακάτω.

2.4.2 Επαγωγή

Όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα, δημιουργούνται δυναμικές μαγνητικές γραμμές γύρω από αυτόν. Καθώς το πλάτος του ρεύματος αυξομειώνεται, δημιουργείται ή καταρρέει, αντίστοιχα, το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αγωγό. Η ενέργεια που παράγεται καθώς οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές καταρρέουν επιστρέφοντας πίσω στον αγωγό, τείνει να διατηρεί τη ροή του ρεύματος στην ίδια κατεύθυνση. Η επαγωγή (L) μετράται σε Henry ανά μονάδα μήκους.

2.4.3 Χωρητικότητα

Μεταξύ των δύο αγωγών μιας γραμμής μεταφοράς εμφανίζεται επίσης κάποια χωρητικότητα C , όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8. Οι δύο παράλληλοι αγωγοί που φαίνονται στο σχήμα συμπεριφέρονται σαν τις δύο παράλληλες πλάκες ενός πυκνωτή και ο αέρας που υπάρχει μεταξύ τους δρα ως διηλεκτρικό. Η χωρητικότητα μεταξύ των αγωγών εκφράζεται σε Farad ανά μονάδα μήκους.



Εικόνα 2.8 – Χωρητικότητα

2.4.4 Αντίσταση

Κάθε αγωγός χαρακτηρίζεται από κάποια συγκεκριμένη αντίσταση R . Μονάδα μέτρησης στην περίπτωση της κατανεμημένης αντίστασης είναι τα Ohm ανά μονάδα μήκους. Η αντίσταση εξαρτάται από το μήκος, τη διατομή και το είδος του αγωγού.

2.4.5 Αγωγιμότητα

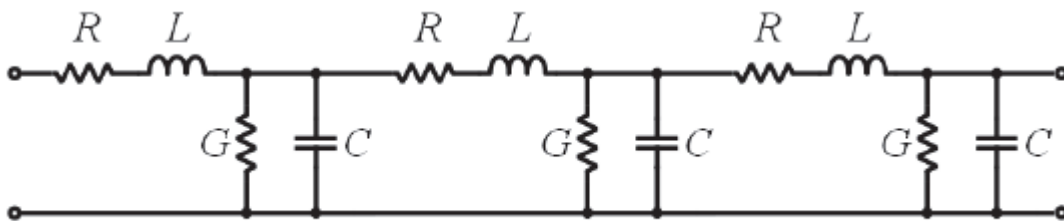
Εφόσον κανένα διηλεκτρικό (ούτε ο αέρας) δεν είναι τέλειος μονωτής, ένα μικρό ρεύμα γνωστό ως ρεύμα διαρροής ρέει μεταξύ των δύο αγωγών. Στην πραγματικότητα, ο μονωτής ενεργεί ως μια αντίσταση, επιτρέποντας ένα μικρό ρεύμα να διαρρέει μεταξύ των δύο καλωδίων. Η Εικόνα 2.9 παρουσιάζει αυτήν τη διαρροή με τη μορφή αντιστάσεων παράλληλα συνδεδεμένων μεταξύ των δύο γραμμών. Αυτό το ηλεκτρικό χαρακτηριστικό καλείται αγωγιμότητα G και είναι το αντίστροφο της αντίστασης. Η αγωγιμότητα στις γραμμές μεταφοράς μετράται σε mhos (αναγραμματισμός του ohms) ή siemens ανά μονάδα μήκους.



Εικόνα 2.9 - Αγωγιμότητα

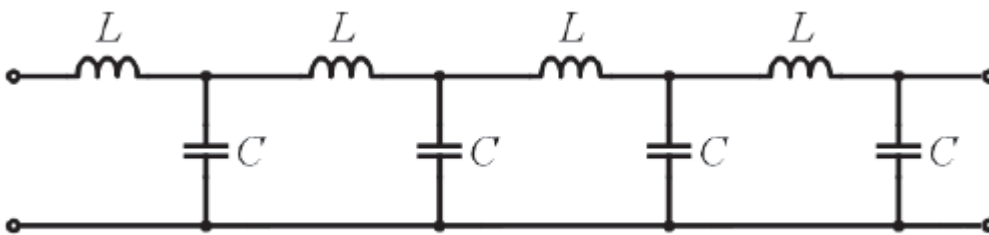
2.4.6 Ισοδύναμη Αναπαράσταση

Συγκεντρώνοντας όλα τα παραπάνω κατανεμημένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, μια γραμμή μεταφοράς έχει την ισοδύναμη αναπαράσταση κυκλώματος της Εικόνας 2.10.



Εικόνα 2.10 - Ισοδύναμη αναπαράσταση κυκλώματος

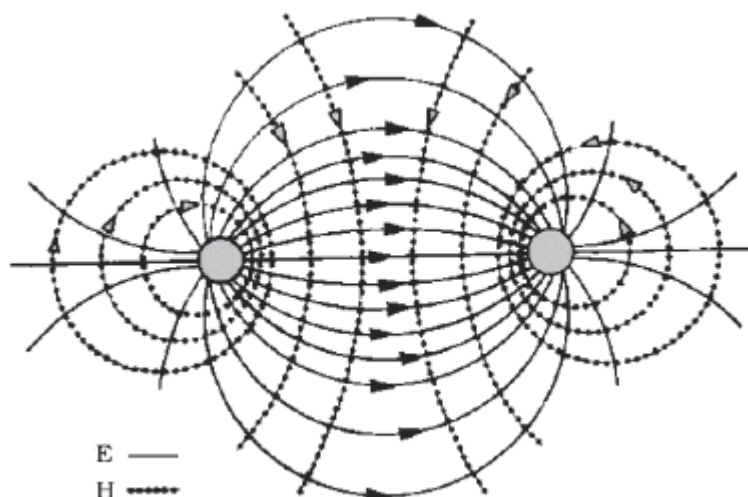
Στις ραδιοσυχνότητες (μεγάλες τιμές του ω), η επαγωγική αντίδραση ωL είναι πολύ μεγαλύτερη από την ωμική αντίσταση R . Επίσης, η χωρητική δεκτικότητα ωC είναι πολύ μεγαλύτερη από την παράλληλη αγωγιμότητα G . Για το λόγο αυτό, μπορούμε να αγνοήσουμε τα R και G , οπότε προκύπτει μια γραμμή χωρίς απώλειες που αποτελεί καλή προσέγγιση κατά τους υπολογισμούς RF. Το ισοδύναμο κύκλωμα της απλοποιημένης γραμμής παίρνει τη μορφή της Εικόνας 2.11.



Εικόνα 2.11 - Ισοδύναμη αναπαράσταση κυκλώματος

2.5 Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Γύρω από Γραμμές Μεταφοράς

Τα κατανεμημένα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς που περιγράψαμε υφίστανται είτε υπάρχει, είτε δεν υπάρχει ροή ρεύματος στους αγωγούς. Όταν όμως εφαρμοστεί μια τάση, και το ρεύμα αρχίσει να διαρρέει τους αγωγούς έχουμε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο χώρο γύρω από τους αγωγούς.



Εικόνα 2.12 - Ηλεκτρομαγνητικά πεδία γύρω από γραμμές μεταφοράς

Αν και οι δυναμικές γραμμές του πεδίου που δημιουργείται δεν είναι ορατές, είναι πολύ σημαντικό να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο ένα ηλεκτρόνιο δέχεται δυνάμεις όταν βρίσκεται μέσα σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Υπάρχουν δύο πεδία στο χώρο γύρω από τους αγωγούς. Το ένα συνδέεται με την τάση και το άλλο με το ρεύμα. Το πεδίο που συνδέεται με την τάση καλείται ηλεκτρικό πεδίο (**E**) και ασκεί δύναμη σε οποιοδήποτε ηλεκτρικό φορτίο βρίσκεται μέσα του. Το πεδίο που συνδέεται με το ρεύμα καλείται μαγνητικό πεδίο (**H**), το οποίο επίσης ασκεί δύναμη σε οποιοδήποτε κινούμενο φορτίο βρεθεί μέσα του. Η Εικόνα 2.12 επεξηγεί τον τρόπο με τον οποίο τα πεδία **E** και **H** τείνουν να προσανατολίζονται μεταξύ των αγωγών μιας τυπικής δισύρματης γραμμής μεταφοράς. Η εικόνα παρουσιάζει μια διατομή των αγωγών της συγκεκριμένης γραμμής μεταφοράς απεικονίζοντας κάποιες από τις δυναμικές γραμμές. Το πεδίο **E** αντιπροσωπεύεται από τις συνεχείς γραμμές και το πεδίο **H** από τις διακεκομμένες. Και τα δύο πεδία συνυπάρχουν και αποτελούν το γνωστό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου ξεκινούν από το θετικά φορτισμένο και καταλήγουν στον αρνητικά φορτισμένο αγωγό, ενώ οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου ακολουθούν τον κανόνα του δεξιού χεριού για την κατεύθυνση του **H**. Συγκεκριμένα, εάν ο αντίχειρας του δεξιού χεριού δείχνει προς την κατεύθυνση του ρεύματος, τα υπόλοιπα δάχτυλα λυγισμένα, δείχνουν προς την κατεύθυνση του **H**.

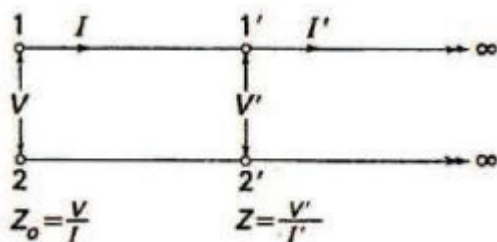
2.6 Χαρακτηριστική Αντίσταση

2.6.1 Ορισμός & Βασικές Ιδιότητες

Οποιοδήποτε κύκλωμα περιέχει σύνθετες αντιστάσεις σε σειρά και σε διακλαδώσεις πρέπει να έχει μια σύνθετη αντίσταση εισόδου. Στην περίπτωση της γραμμής μεταφοράς η σύνθετη αντίσταση εισόδου (εμπέδηση) εξαρτάται από τον τύπο της γραμμής, το μήκος της και τον τρόπο με τον οποίο τερματίζεται. Θα δούμε στα επόμενα ότι ο τερματισμός της γραμμής με το κατάλληλο φορτίο είναι πολύ σημαντικός όσον αφορά τη μέγιστη μεταφορά ισχύος από το ένα άκρο της γραμμής στο άλλο.

Για λόγους περιγραφής και υπολογισμών, η σύνθετη αντίσταση εισόδου λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς και ονομάζεται χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Εξ ορισμού, χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 μιας γραμμής μεταφοράς είναι η σύνθετη αντίσταση που μετράται στην είσοδο της γραμμής όταν αυτή έχει άπειρο μήκος. Υπό αυτές τις υποθέσεις, ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο τερματισμός της γραμμής μεταφοράς δεν ασκεί επίδραση στον υπολογισμό και για αυτό δεν αναφέρεται σαν ορισμό.

Όπως περιγράψαμε και στην ισοδύναμη αναπαράσταση του κυκλώματος μιας γραμμής μεταφοράς, τα κατανεμημένα χαρακτηριστικά αφορούν ένα μικρό τμήμα της γραμμής, με την υπόθεση ότι αυτά κατανέμονται ομοιόμορφα κατά το μήκος της, κάτι που σε γενικές γραμμές ισχύει και στην πράξη. Στην περίπτωση λοιπόν, μιας γραμμής άπειρου μήκους το ισοδύναμο κύκλωμα θα αποτελείται από άπειρα τέτοια τμήματα συνδεδεμένα παράλληλα. Αν εφαρμόσουμε στα άκρα της γραμμής αυτής μια τάση και με κάποιο τρόπο μετρήσουμε το ρεύμα που τη διαρρέει, ο υπολογισμός της χαρακτηριστικής αντίστασης Z_0 γίνεται εύκολα χρησιμοποιώντας το νόμο του Ohm.



Εικόνα 2.13 - Γραμμή άπειρου μήκους

Αν μετρούσαμε και πάλι, της σύνθετη αντίσταση σε κάποιο σημείο του κυκλώματος θα βρίσκαμε το ίδιο αποτέλεσμα. Αυτό εξηγείται ως εξής: Υποθέστε τη γραμμή άπειρου μήκους της Εικόνας 2.13. Τα σημεία 1'-2' της Εικόνας 2.13 είναι τόσο μακριά από το τέλος αυτής της γραμμής, όσο είναι και τα σημεία 1-2. Επομένως, η σύνθετη αντίσταση στα 1'-2' (κοιτώντας προς τα δεξιά) είναι επίσης Z_0 , αν και το ρεύμα και η τάση έχουν μικρότερη τιμή από ότι στα 1-2. Μπορούμε λοιπόν να θεωρήσουμε ότι τα τερματικά εισόδου 'βλέπουν' ένα τμήμα της γραμμής ως τα σημεία 1'-2', που ακολουθείται από ένα κύκλωμα που έχει αντίσταση εισόδου ίση με Z_0 . Δεν έχει σημασία από τι αποτελείται το κύκλωμα δεξιά των 1'-2', εφόσον έχει

αντίσταση εισόδου ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Άρα, η Z_0 θα μετρηθεί στην είσοδο της γραμμής μεταφοράς αν η έξοδος τερματίζεται στην Z_0 .

2.6.2 Υπολογισμός

Στη γενική περίπτωση, η σύνθετη αντίσταση που μετράται σε κάποιο σημείο μιας γραμμής μεταφοράς ισούται με τον λόγο

$$Z = \frac{V}{I}, \quad (2.1)$$

όπου V , I , η τάση και το ρεύμα, αντίστοιχα, στο συγκεκριμένο σημείο της γραμμής. Αποδεικνύεται ότι η χαρακτηριστική αντίσταση μιας γραμμής δίνεται ως:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}, \quad (2.2)$$

όπου R η ωμική αντίσταση, ωL η επαγωγική αντίδραση, G η αγωγιμότητα και ωC η χωρητική δεκτικότητα της γραμμής.

Υποθέτοντας $R = 0$ και $G = 0$, κάτι που όπως είπαμε προσεγγίζει την πραγματικότητα στην περίπτωση των ραδιοσυχνοτήτων, καταλήγουμε στη σχέση

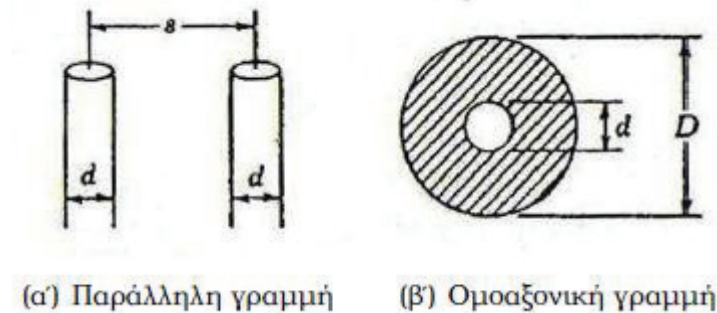
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2.3)$$

Παρατηρήστε ότι στην εξίσωση (2.3) η χαρακτηριστική αντίσταση είναι ανεξάρτητη της συχνότητας και εξαρτάται από το λόγο της κατανεμημένης επαγωγής προς την κατανεμημένη χωρητικότητα της γραμμής μεταφοράς. Μια αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο αγωγών, συνεπάγεται αύξηση της επαγωγής και μείωση της χωρητικότητας. Η αύξηση της επαγωγής οφείλεται στο γεγονός ότι τώρα υπάρχει μεγαλύτερη μαγνητική ροή στο χώρο μεταξύ των αγωγών (τα μαγνητικά πεδία των δύο παράλληλων αγωγών δε μπορούν να ακυρωθούν λόγω της μεγαλύτερης απόστασης). Η εξάρτηση της χωρητικότητας από την απόσταση των αγωγών στην περίπτωση των γραμμών μεταφοράς είναι αντίστοιχη με την εξάρτηση της χωρητικότητας από την απόσταση των πλακών (οπλισμών) στην περίπτωση του πυκνωτή. Μικρότερη απόσταση συνεπάγεται μεγαλύτερη χωρητικότητα και αντιστρόφως. Βλέπουμε λοιπόν ότι η αύξηση της απόστασης μεταξύ των αγωγών οδηγεί σε μεγαλύτερη τιμή της Z_0 .

Το μέγεθος των αγωγών επηρεάζει επίσης την τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης. Το μέγεθος των αγωγών επηρεάζει περισσότερο τη χωρητικότητα παρά την επαγωγή. Και πάλι σε αντιστοιχία με τη λειτουργία του πυκνωτή, μεγαλύτερη διατομή συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση. Το είδος του διηλεκτρικού παίζει επίσης σημαντικό ρόλο. Διαφορετικό διηλεκτρικό συνεπάγεται διαφορετική τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης.

Η τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης στην περίπτωση της παράλληλης δισύρματης γραμμής δίνεται από τη σχέση

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{k}} \log_{10} \frac{2s}{d}, \quad (2.4)$$



Εικόνα 2.14 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς για τον υπολογισμό της Z_0

όπου s η απόσταση των αγωγών, d η διάμετρος του ενός αγωγού (βλ. Εικόνα 2.14(α')) και k η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού που στην περίπτωση του αέρα ισούται με τη μονάδα (δισύρματες γραμμές ανοιχτού τύπου).

Στην περίπτωση των ομοαξονικών γραμμών η χαρακτηριστική αντίσταση δίνεται ως

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{k}} \log_{10} \frac{D}{d}, \quad (2.5)$$

όπου D η εσωτερική διάμετρος του εξωτερικού αγωγού, d η εξωτερική διάμετρος του εσωτερικού αγωγού (βλ. Εικόνα 2.14(β')) και k η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού. Στην περίπτωση του πολυαιθυλενίου $k = 2,3$.

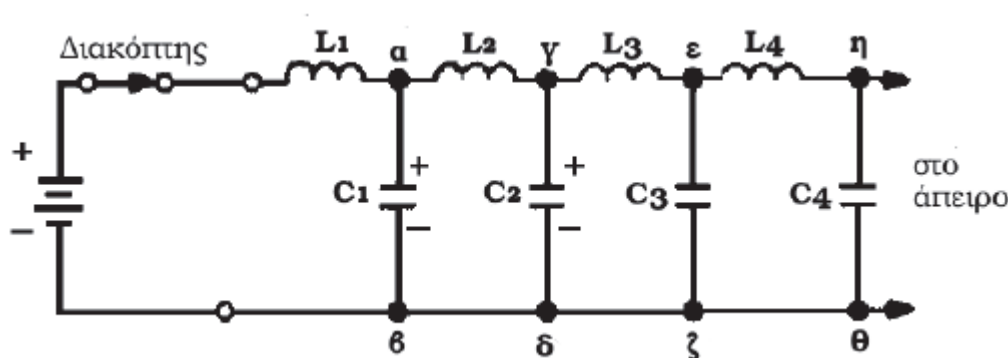
Η συνήθης περιοχή τιμών Z_0 κυμαίνεται από 150 έως 600Ω για τις παράλληλες γραμμές και από 40 έως 150Ω για τις ομοαξονικές.

2.7 Καθυστέρηση Διάδοσης

2.7.1 Ταχύτητα Διάδοσης

Ένα εύλογο ερώτημα που μπορεί να δημιουργηθεί, είναι το πόσο γρήγορα προωθείται κατά μήκος της γραμμής μια τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της. Δηλαδή, μετά από πόσο χρόνο θα μετρηθεί η ίδια τάση σε ένα άλλο σημείο της. Αν εφαρμόσουμε μια διαφορά δυναμικού στα άκρα μιας γραμμής μεταφοράς, οι αγωγοί θα αρχίσουν να διαρρέονται από κάποιο ρεύμα. Ωστόσο, αυτή η αλλαγή της διαφοράς δυναμικού και της έντασης ρεύματος δε μπορεί να μεταδίδεται αστραπιαία μέχρι το άλλο άκρο της γραμμής. Σίγουρα είναι μικρότερη ή ίση της ταχύτητας διάδοσης του φωτός στο κενό. Επιπλέον, όπως είδαμε παραπάνω, μια γραμμή μεταφοράς έχει κατανομημένη επαγωγή παράλληλα συνδεδεμένη με κατανομημένη χωρητικότητα, στοιχεία που καθυστερούν τη διάδοση του ρεύματος.

Θα αποδείξουμε λοιπόν ότι η ταχύτητα διάδοσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά L και C των αγωγών. Ας θεωρήσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα μιας γραμμής που συνδέεται με πηγή συνεχούς τάσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.15.



Εικόνα 2.15 - Δισύρματη γραμμή άπειρου μήκους

Αρχικά, η γραμμή είναι αφόρτιστη και τη χρονική στιγμή $t = 0$, κλείνει ο διακόπτης. Όλοι οι πυκνωτές αρχικά συμπεριφέρονται ως βραχυκύκλωμα, ενώ τα πηνία αντιστέκονται στην αύξηση του ρεύματος. Μετά την αντίσταση του πηνίου L_1 , ξεκινά η φόρτιση του πυκνωτή C_1 . Μέχρι να φορτιστεί πλήρως ο C_1 και να λειτουργήσει ως ανοιχτό κύκλωμα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο C_2 λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα. Επομένως, κατά τη διάρκεια φόρτισης του C_1 , τα ζεύγη σημείων α-β και α-γ έχουν ίδια διαφορά δυναμικού.

Η τάση στα άκρα του C_1 δίνεται ως $V_c = Q/C$ όπου Q το συνολικό φορτίο που τροφοδότησε η πηγή στη γραμμή. Αν I είναι η ένταση του ρεύματος, τότε το συνολικό φορτίο από τη χρονική στιγμή $t = 0$ δίνεται ως $Q = It$.

Επομένως, η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι

$$V_c = \frac{Q}{C} = \frac{It}{C} \quad (2.6)$$

Η τάση στα άκρα του πηνίου L_2 δίνεται ως

$$V_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \frac{I}{t} \quad (2.7)$$

Εξισώνοντας τις δύο τάσεις, προκύπτει ότι ο χρόνος που χρειάστηκε για να φορτιστεί ένα στοιχειώδες τμήμα της γραμμής είναι

$$t = \sqrt{LC} \quad (2.8)$$

όπου τα L και C είναι κατανεμημένα χαρακτηριστικά, οπότε και ο χρόνος t δίνεται ανά μονάδα μήκους. Άρα, η ταχύτητα διάδοσης U_p δίνεται ως

$$U_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.9)$$

2.7.2 Παράγοντας ταχύτητας

Αναλύσαμε την καθυστέρηση διάδοσης της τάσης-ρεύματος στη γραμμή μεταφοράς μελετώντας τη ως ηλεκτρικό κύκλωμα. Ωστόσο, αυτή μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα μέσο στο οποίο διαδίδονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Όπως γνωρίζουμε, η ταχύτητα του φωτός και όλων των ηλεκτρομαγνητικών κύματων εξαρτάται από το μέσο στο οποίο διαδίδονται. Είναι πολύ κοντά στα 3×10^8 m/s στο κενό και μικρότερη σε όλα τα άλλα μέσα. Η ταχύτητα του φωτός σε ένα μέσο δίνεται ως:

$$U_p = \frac{U_c}{\sqrt{\kappa}} \quad (2.10)$$

όπου U_p η ταχύτητα διάδοσης στο μέσο, U_c η ταχύτητα του φωτός στο κενό και κ η διηλεκτρική σταθερά του μέσου (1 για το κενό και περίπου 1 για τον αέρα).

Ο παράγοντας ταχύτητας (U_f) για ένα διηλεκτρικό μέσο είναι ο λόγος μείωσης της ταχύτητας σε σχέση με την ταχύτητα στο κενό

$$U_f = \frac{U_p}{U_c} = \frac{1}{\sqrt{\kappa}} \quad (2.11)$$

Επειδή τα διηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στις γραμμές μεταφοράς έχουν $\kappa = 1,2 - 2,8$, η ταχύτητα διάδοσης σε αυτές μπορεί να είναι **60 – 90%** του U_c . Δεδομένης της βασικής κυματικής σχέσης $u = f \times \lambda$ και εφόσον η συχνότητα παραμένει σταθερή, ο παράγοντας ταχύτητας επιδρά στο μήκος κύματος. Με άλλα λόγια, ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ή μια τάση μεταδίδεται πιο αργά μέσα σε μια γραμμή μεταφοράς σε σχέση με το κενό. Επομένως, σε χρόνο $1/f$ το κύμα

καλύπτει μικρότερη απόσταση, οπότε το μήκος κύματος της συχνότητας f μέσα σε μια γραμμή μεταφοράς μειώνεται από λ σε λ/\sqrt{k} .

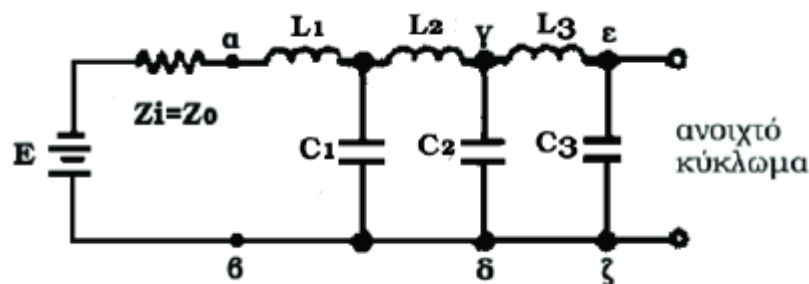
2.8 Ανακλάσεις σε Γραμμές Μεταφοράς

Αποδεικνύεται ότι σε μια γραμμή μεταφοράς επιτυγχάνεται η μέγιστη μεταφορά ισχύος όταν η γραμμή τερματίζεται σε φορτίο με σύνθετη αντίσταση ίση με τη χαρακτηριστική της. Τότε, όλη η ενέργεια της πηγής μεταφέρεται στο φορτίο και δεν υπάρχουν ανακλάσεις.

Ωστόσο, μια γραμμή μεταφοράς είναι δυνατό να μην τερματίζεται πάντοτε στη χαρακτηριστική της αντίσταση. Μπορεί είτε να είναι βραχυκυκλωμένη, να αποτελεί ανοιχτό κύκλωμα, να τερματίζεται σε φορτίο μικρότερης, μεγαλύτερης, ή διαφορετικής γενικά σύνθετης αντίστασης. Στη γενική περίπτωση, μέρος της ενέργειας δεν απορροφάται από το φορτίο, αλλά ανακλάται πίσω στην ίδια γραμμή. Στα επόμενα θα αναλύσουμε δύο ειδικές περιπτώσεις τερματισμού μιας γραμμής μεταφοράς: (α) την ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή και (β) το βραχυκύκλωμα. Αν και μας ενδιαφέρει βασικά η συμπεριφορά της γραμμής σε τροφοδοσία εναλλασσόμενης τάσης (AC), για πληρέστερη κατανόηση των ανακλάσεων θα μελετήσουμε αρχικά την περίπτωση τροφοδοσίας συνεχούς τάσης (DC).

2.8.1 Ανάκλαση Τάσης DC σε Ανοιχτό Κύκλωμα

Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας γραμμής μεταφοράς με ανοιχτοκυκλωμένη έξοδο φαίνεται στην Εικόνα 2.16, όπου στην είσοδο είναι συνδεδεμένη μια πηγή συνεχούς τάσης με εσωτερική αντίσταση Z_i ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής Z_0 . Η ανοιχτοκυκλωμένη έξοδος ισοδυναμεί θεωρητικά με τερματικό φορτίο άπειρης σύνθετης αντίστασης. Εφόσον η σύνθετη εσωτερική αντίσταση της πηγής ισούται με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς Z_0 , η εφαρμοζόμενη τάση (E) από την πηγή μοιράζεται εξίσου στην εσωτερική της αντίσταση και στα άκρα α, β της γραμμής και ισούται με $E/2$.



Εικόνα 2.16 - Ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή σε τροφοδοσία τάσης DC

Όταν συνδέσουμε την πηγή συνεχούς τάσης στη γραμμή μεταφοράς, κάποιο ρεύμα θα αρχίσει να διαρρέει το κύκλωμα, με αποτέλεσμα τη διαδοχική φόρτιση των πυκνωτών μέσω των πηνίων που προηγούνται. Καθώς φορτίζεται κάθε πυκνωτής, η τάση $E/2$ εμφανίζεται κατά μήκος του κυκλώματος, προχωρώντας μέχρι το τέλος της γραμμής. Όταν φορτιστεί και ο τελευταίος πυκνωτής, η τάση στα άκρα του θα γίνει

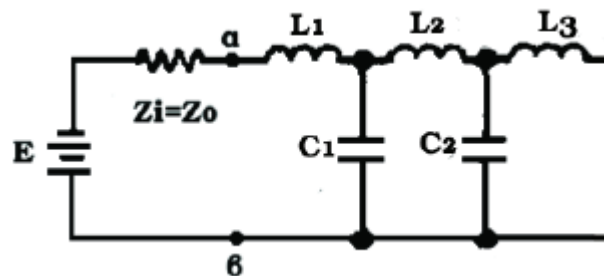
ίση με την τάση στα άκρα κάθε άλλου πυκνωτή, και η διαφορά δυναμικού των σημείων γ και ϵ θα είναι μηδενική. Συνεπώς, το πηνίο L_3 που συνδέεται μεταξύ των σημείων γ , ϵ δε θα διαρρέεται πια από ρεύμα. Παρόλα αυτά, το πηνίο τείνει να διατηρεί τη ροή του ρεύματος προς την ίδια κατεύθυνση, λόγω του μαγνητικού του πεδίου που καταρρέει. Δεδομένου ότι η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου ισοδυναμεί με την αποθηκευμένη ενέργεια του πυκνωτή, το συνολικό του φορτίο θα διπλασιαστεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω φόρτιση του πυκνωτή C_3 έως ότου η σιαφορά στα άκρα του γίνει ίση με E . Η ίδια διαδικασία λαμβάνει χώρα σε κάθε πηνίο και πυκνωτή διαδοχικά με κατεύθυνση προς την πηγή, με αποτέλεσμα τη διαδοχική φόρτιση κάθε πυκνωτή μέχρι η τάση στα άκρα τους να γίνει ίση με E .

Την παραπάνω διαδικασία μπορούμε να την εφαρμόσουμε πρακτικά ως εξής: Η εφαρμοζόμενη τάση κινείται κατά μήκος της γραμμής μέχρι να συναντήσει την ανοιχτοκυκλωμένη έξοδο, όπου αλλάζει κατεύθυνση και επιστρέφει προς την είσοδο. Η κίνηση αυτή της τάσης, καθώς προσπίπτει στην ανοιχτοκυκλωμένη έξοδο νομάζεται ανάκλαση. Πρέπει να τονίσουμε ότι όταν η τάση επιστρέφει στην πηγή, η παραπάνω διαδικασία σταματά καθώς οι τάσεις ακυρώνονται και δεν έχουμε επιπρόσθετη ανάκλαση προς την έξοδο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η σύνθετη αντίσταση Z_i της πηγής είναι ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 της γραμμής.

2.8.2 Ανάκλαση Τάσης DC σε Βραχυκύκλωμα

Στην περίπτωση που η έξοδος της γραμμής μεταφοράς είναι βραχυκυκλωμένη, η τάση στα άκρα του βραχυκυκλώματος είναι προφανώς μηδενική και συνεπώς δεν υπάρχει απορρόφηση ενέργειας. Το ισοδύναμο κύκλωμα για την περίπτωση αυτή παρατίθεται στην Εικόνα 2.17 όπου και πάλι υποθέτουμε ότι η εσωτερική αντίσταση Z_i της πηγής συνεχούς τάσης, είναι ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής Z_0 .

Ο τρόπος με τον οποίο η τάση εφαρμόζεται διαδοχικά στα άκρα των πυκνωτών, κινούμενη κατά μήκος της γραμμής προς την έξοδο, είναι ο ίδιος με αυτόν που περιγράψαμε στα προηγούμενα για την περίπτωση της ανοιχτοκυκλωμένης γραμμής. Τα πράγματα αλλάζουν όταν η τάση φτάσει στα άκρα της γραμμής όπου



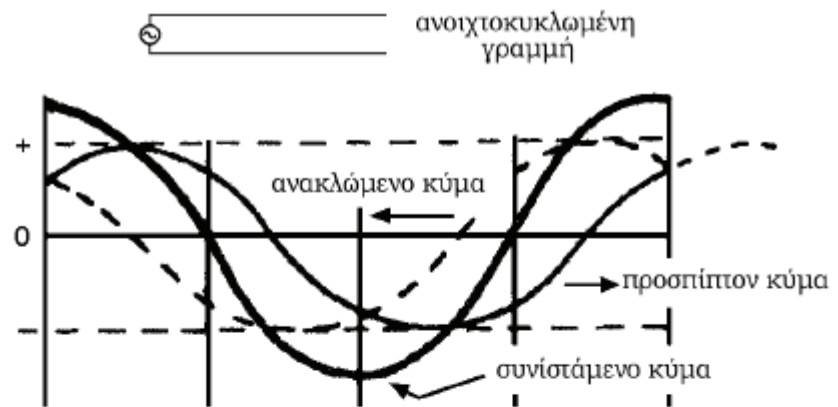
Εικόνα 2.17 - Βραχυκυκλωμένη γραμμή σε μια τροφοδοσία τάσης DC

δεν υπάρχει άλλος πυκνωτής προς φόρτιση. Η αποθηκευμένη ενέργεια του τελευταίου πηνίου δεν απορροφάται από κάποιον πυκνωτή, αλλά τροφοδοτείται προς τα πίσω στο κύκλωμα με τη μορφή τάσης αντίθετης πολικότητας. Το πηνίο στην

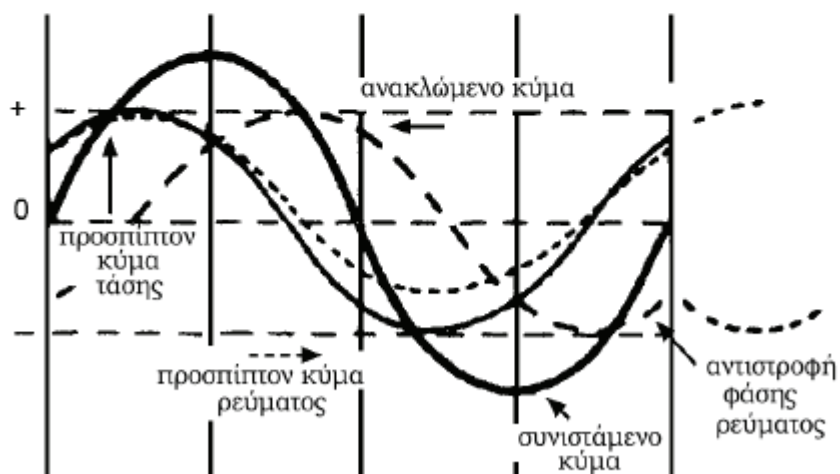
περίπτωση αυτή δρα ως πηγή συνεχούς τάσης που τροφοδοτεί το κύκλωμα προς τα πίσω. Η αντίθετη πολικότητα της τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη διαδοχική αποφόρτιση των πυκνωτών μέσω των πηνίων. Καθώς κάθε πυκνωτής αποκτά μηδενικό φορτίο, το επόμενο (προς την πηγή) πηνίο δρα με τη σειρά του ως πηγή τάσης, αποφορτίζοντας τον πυκνωτή που προηγείται. Η διαφορά σε σχέση με την ανάκλαση της ανοιχτοκυκλωμένης γραμμής είναι ότι στην περίπτωση αυτή, η τάση ανακλάται με φάση αντίθετη της προσπίπτουσας, ενώ το ανακλώμενο ρεύμα διατηρεί τη φάση του. Προφανώς και στην περίπτωση αυτή τα πλάτη του ανακλώμενου ρεύματος και της τάσης παραμένουν ίδια εφόσον έχουμε υποθέσει γραμμή χωρίς απώλειες ($\mathbf{R} = \mathbf{G} = \mathbf{0}$).

2.8.3 Ανάκλαση Τάσης AC σε Ανοιχτό Κύκλωμα

Στις περιπτώσεις που οι γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ραδιοσυχνότητων, στο ισοδύναμο κύκλωμα που περιγράψαμε στις προηγούμενες περιπτώσεις, η πηγή συνεχούς τάσης αντικαθίσταται από μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης. Η συμπεριφορά της γραμμής στην περίπτωση αυτή συμπίπτει με τη συμπεριφορά της γραμμής όταν εφαρμόσαμε συνεχή τάση στα άκρα της. Εδώ η τάση και το ρεύμα είναι κυματικής μορφής και αποτελούνται από δύο οδεύοντα κύματα. Το πρώτο οδεύον κύμα διαδίδεται με κατεύθυνση από την πηγή προς τον τερματισμό και ονομάζεται προσπίπτον κύμα. Το δεύτερο οδεύον κύμα στην αντίθετη κατεύθυνση και ονομάζεται ανακλώμενο. Το προσπίπτον κύμα οφείλεται στη διέγερση της γραμμής από την πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ενώ το ανακλώμενο παράγεται δευτερογενώς λόγω της ανάκλασης μέρους ή όλου του προσπίπτοντος κύματος από τον τερματισμό. Στην περίπτωση της ανοιχτοκυκλωμένης γραμμής, όλη η ενέργεια του κύματος που προσπίπτει στον τερματισμό ανακλάται λόγω της μη ύπαρξης κάποιου φορτίου. Όπως και στην περίπτωση της συνεχούς τάσης σε ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή, η τάση διατηρεί τη φάση της μετά την ανάκλαση σε αντίθεση με το ρεύμα, το οποίο υφίσταται στροφή φάσης 180° μετά την ανάκλαση. Στη περίπτωση που η σύνθετη αντίσταση της πηγής είναι ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής δεν υπάρχει ανάκλαση.



(α') Προσπίπτον και ανακλώμενο κύμα τάσης



(β') Προσπίπτον και ανακλώμενο κύμα ρεύματος

Εικόνα 2.18 - Ανάκλαση τάσης AC σε ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή

Στην Εικόνα 2.18 φαίνονται τα προσπίπτοντα κύματα με συνεχείς γραμμές και τα ανακλώμενα με διακεκομμένες. Συγκεκριμένα στην Εικόνα 2.18(α') απεικονίζονται οι τιμές της τάσης μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή όπου ο άξονας x αντιπροσωπεύει την απόσταση, ενώ αντίστοιχα η Εικόνα 2.18(β') απεικονίζει τις τιμές του ρεύματος την ίδια χρονική στιγμή. Αν με κάποιον τρόπο (π.χ. με ένα παλμογράφο) μετρούσαμε την τάση σε μία συγκεκριμένη θέση, η τιμή που θα παίρναμε θα ήταν το αλγεβρικό άθροισμα των τιμών της τάσης του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος στη συγκεκριμένη θέση. Στις Εικ. 2.18(α') και Εικ. 2.18(β'), το συνιστώμενο κύμα απεικονίζεται με την έντονη μαύρη γραμμή για τις περιπτώσεις της τάσης και του ρεύματος, αντίστοιχα. Όπως παρατηρούμε, το κύμα αυτό παρουσιάζει μέγιστο στο τέλος της γραμμής στην περίπτωση της τάσης, ενώ έχει μηδενική τιμή στην περίπτωση του ρεύματος. Αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη εφόσον πρόκειται για ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή. Η υπέρθεση του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος δημιουργεί στη γραμμή το λεγόμενο στάσιμο κύμα.

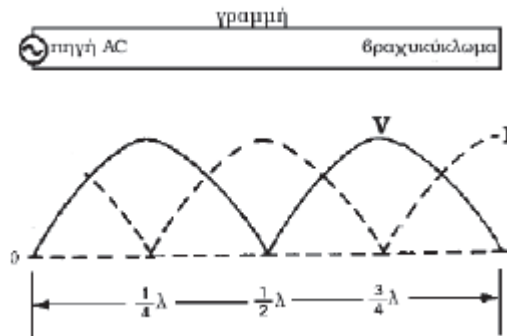


Εικόνα 2.19 - Συμβατική μορφή απεικόνισης στάσιμων κυμάτων

Η συμβατική μορφή απεικόνισης των στάσιμων κυμάτων είναι αυτή της Εικόνας 2.19, όπου ο άξονας y αντιστοιχεί στην απόλυτη τιμή των V και I , αντίστοιχα, για την περίπτωση της ανοιχτοκυκλωμένης γραμμής. Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε τους μηδενισμούς των $|V|$ και $|I|$. Σε απόσταση $\lambda/4$ από την πηγή έχουμε μηδενισμό της τάσης, ενώ το ρεύμα παρουσιάζει μέγιστο.

2.8.4 Ανάκλαση Τάσης AC σε Βραχυκύκλωμα

Όταν μια γραμμή μεταφοράς τερματίζεται σε βραχυκύκλωμα, λαμβάνει χώρα και πάλι ο μηχανισμός της ανάκλασης, με τον τρόπο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Όλη η ενέργεια του προσπίπτοντος κύματος ανακλάται και επιστρέφει στην πηγή. Η διαφορά στην περίπτωση της βραχυκυκλωμένης γραμμής, είναι ότι τώρα το κύμα της τάσης διατηρεί τη φάση του μετά την ανάκλασή του από τον τερματισμό, ενώ το κύμα του ρεύματος υφίσταται στροφή φάσης 180° . Τα στάσιμα κύματα της τάσης και του ρεύματος απεικονίζεται στην Εικόνα 2.20. Η τάση είναι μηδενική στον τερματισμό και το ρεύμα μέγιστο. Καθώς απομακρυνόμαστε από τον τερματισμό, οι μηδενισμοί και τα μέγιστα του στάσιμου κύματος εναλλάσσονται ανά $\lambda/4$, ενώ κάθε κυματομορφή εμφανίζει περιοδικότητα $\lambda/2$.



Εικόνα 2.20 - Ανάκλαση τάσης AC σε βραχυκυκλωμένη γραμμή

2.9 Αντίσταση Εισόδου σε Απόσταση l από τον Τερματισμό

Πολλές φορές είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη σύνθετη αντίσταση μιας γραμμής σε κάποια απόσταση από το φορτίο τερματισμού. Εν προκειμένω, λέγοντας αντίσταση εισόδου εννοούμε τη σύνθετη αντίσταση που ‘βλέπουμε’ προς τα δεξιά σε κάποια απόσταση από τον τερματισμό. Η τιμή της σύνθετης αντίστασης παίρνει διαφορετικές τιμές κατά μήκος της γραμμής. Όπως αναφέραμε και στα προηγούμενα, σε μια γραμμή μεταφοράς τα στάσιμα κύματα της τάσης και του ρεύματος παίρνουν διάφορες τιμές καθώς κινούμαστε κατά μήκος της και επαναλαμβάνεται με περίοδο $\lambda/2$. Συνεπώς, είναι της μορφής $V(\mathbf{x})$ και $I(\mathbf{x})$, όπου x ο άξονας της διεύθυνσης της γραμμής. Στις γραμμές μεταφοράς μπορούμε να θεωρήσουμε, χωρίς βλάβη της γενικότητας και των αποτελεσμάτων, ότι το $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ αντιστοιχεί στον τερματισμό. Κάνοντας χρήση και της εξίσωσης (2.1) προκύπτει ότι

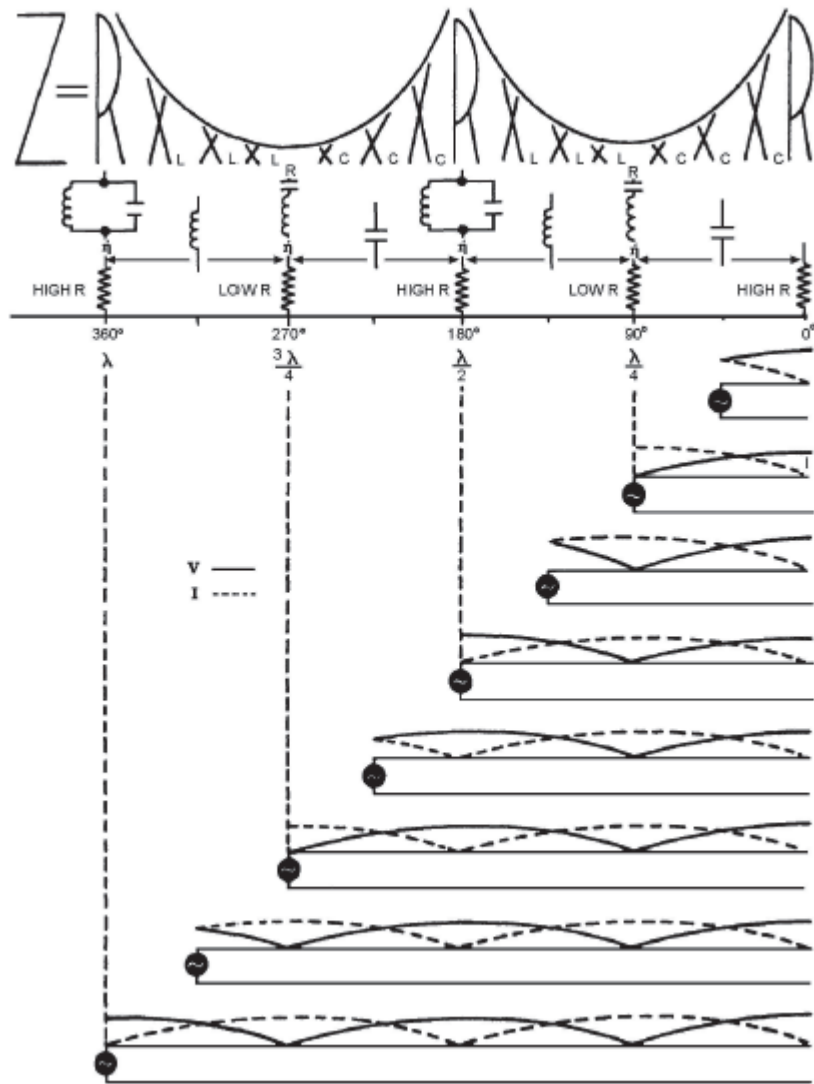
$$Z_{in}(l) = \frac{V(\mathbf{x})}{I(\mathbf{x})} \Big|_{x=-l} \quad (2.12)$$

όπου $Z_{in}(l)$ η σύνθετη αντίσταση εισόδου σε απόσταση l από τον τερματισμό. Σε μια γραμμή χωρίς απώλειες η τιμή της σε οποιαδήποτε απόσταση l από το φορτίο δίνεται ως

$$Z_{in}(l) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (2.13)$$

όπου $Z_{in}(l)$ η σύνθετη αντίσταση εισόδου σε απόσταση l από το φορτίο, Z_L η σύνθετη αντίσταση του φορτίου, Z_0 η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής και $\beta = 2\pi/\lambda$. Σημειώνεται ότι γράφοντας λ εννοούμε τη μειωμένη τιμή του μήκους κύματος της συχνότητας λόγω μετάδοσης μέσα στη γραμμή (λ/\sqrt{k}).

Οι Εικόνες 2.21 και 2.22 επεξηγούν παραστατικά την παραπάνω συμπεριφορά για τις ειδικές περιπτώσεις ανοιχτοκυκλωμένων και βραχυκυκλωμένων γραμμών, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα για διάφορα πολλαπλάσια του $\lambda/4$ παρατίθενται ταυτόχρονα και τα αντίστοιχα συγκεντρωμένα στοιχεία που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη συμπεριφορά της γραμμής. Επίσης, για κάθε μήκος γραμμής απεικονίζονται και τα αντίστοιχα στάσιμα κύματα που δημιουργούνται.



Εικόνα 2.21 - Τάση, ρεύμα και σύνθετη αντίσταση σε ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή

Παρατηρούμε ότι όταν η τάση είναι μέγιστη και το ρεύμα μηδενικό, η σύνθετη αντίσταση είναι πραγματική και μέγιστη (θεωρητικά άπειρη), και προσομοιώνεται με ένα παράλληλο κύκλωμα LC. Αυτό συμβαίνει στις περιπτώσεις:

- της ανοιχτοκυκλωμένης γραμμής στις θέσεις $v\lambda/2$ και
- της βραχυκυκλωμένης γραμμής στις θέσεις $v\lambda/2 + \lambda/4$ από τον τερματισμό,

όπου v είναι ακέραιος.

Αντίθετα, όταν η τάση είναι μηδενική και το ρεύμα μέγιστο, η σύνθετη αντίσταση έχει μια πολύ μικρή πραγματική τιμή (θεωρητικά μηδενική) και προσομοιώνεται με ένα κύκλωμα LC σε σειρά. Αυτό συμβαίνει στις περιπτώσεις:

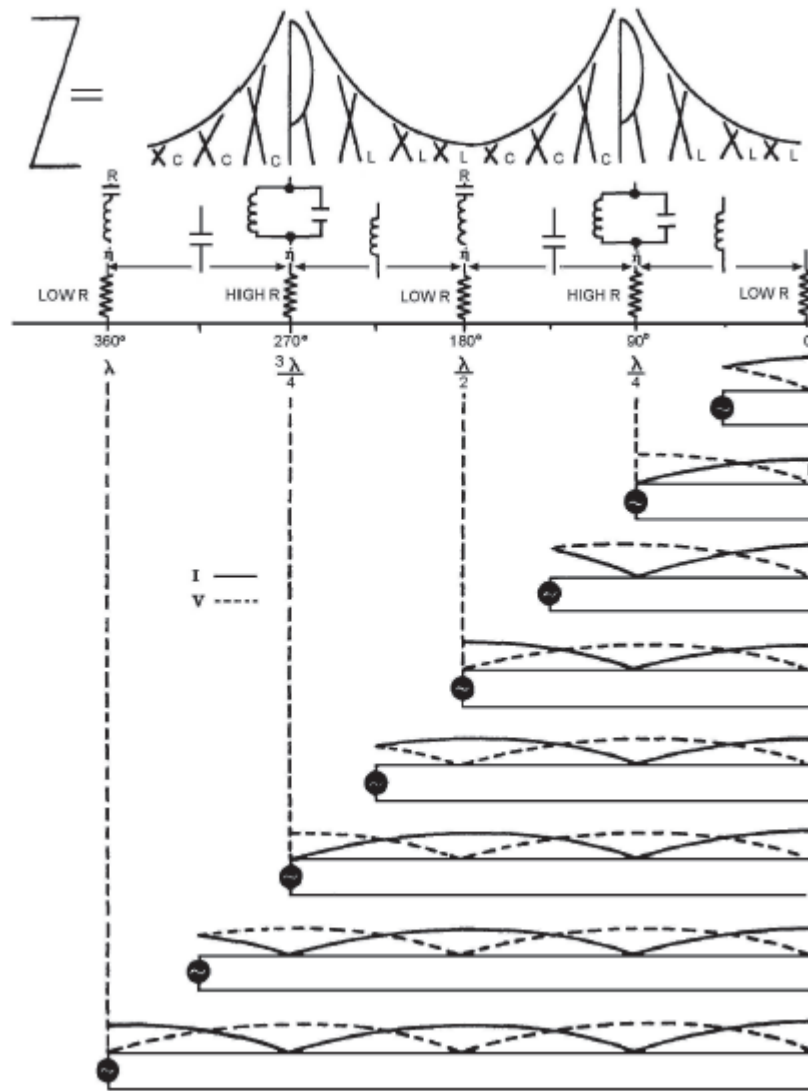
- της ανοιχτοκυκλωμένης γραμμής στις θέσεις $v\lambda/2 + \lambda/4$ και
- της βραχυκυκλωμένης γραμμής στις θέσεις $v\lambda/2$.

Σε πραγματικές συνθήκες η σύνθετη αντίσταση δε μηδενίζεται, ούτε απειρίζεται, λόγω της ύπαρξης κάποιων μικρών απωλειών στη γραμμή.

Ανάμεσα στα δύο ακραία σημεία υψηλής και χαμηλής πραγματικής αντίστασης που αναφέραμε παραπάνω, συναντάμε περιπτώσεις χωρητικής ή επαγωγικής συμπεριφοράς. Κατά αναλογία με ένα κύκλωμα συντονιστή (resonator) LC, όταν απομακρυνόμαστε από τις πιο πάνω θέσεις είναι σαν να ξεφεύγουμε από τη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος. Αυτό σημαίνει ότι το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μειώνεται (για το παράλληλο κύκλωμα LC) ή αυξάνεται (για το κύκλωμα LC σε σειρά) σημαντικά. Η σύνθετη εμπέδηση έχει φανταστικό μέρος και το κύκλωμα συμπεριφέρεται είτε ως πυκνωτής, είτε ως πηνίο.

Η παραπάνω ανάλυση είναι πολύ σημαντική γιατί μας δείχνει έναν εύκολο τρόπο να προσομοιώσουμε διάφορα χαρακτηριστικά (χωρητικότητες, επαγωγές, παράλληλα ή σε σειρά κύκλωμα LC) με την επιλογή γραμμών κατάλληλου μήκους.

Λόγω της πολυπλοκότητας της εξίσωσης (2.13), έχουν προταθεί διάφορες γραφικές μέθοδοι για την απλοποίηση των πράξεων. Η μέθοδος που έχει επικρατήσει είναι εκείνη του χάρτη Smith που ξεφεύγει από τους στόχους του παρόντος συγγράματος.



Εικόνα 2.22 - Τάση, ρεύμα και σύνθετη αντίσταση σε βραχυκυκλωμένη γραμμή

2.10 Στάσιμα Κύματα

Μια περιγραφή της κατάστασης που επικρατεί σε μια γραμμή παρέχεται με την έννοια του συντελεστή ανάκλασης τάσης ρ ,

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.14)$$

όπου V_r η τιμή της τάσης του ανακλώμενου (reflected) κύματος και V_i η τιμή της τάσης του προσπίπτοντος (incident) κύματος στον τερματισμό. Αρνητική τιμή του συντελεστή ανάκλασης σημαίνει στροφή φάσης κατά 180° . Όταν μια γραμμή είναι τερματισμένη σε ανοιχτό κύκλωμα, σε βραχυκύκλωμα ή σε άεργο φορτίο (χωρητική ή επαγωγική αντίδραση), δεν υπάρχει απορρόφηση ενέργειας από το φορτίο και συνεπώς όλη η προσπίπτουσα ενέργεια ανακλάται. Το ανακλώμενο κύμα ισούται με το προσπίπτον και συνεπώς $|\rho| = 1$. Ο συντελεστής ανάκλασης μπορεί να εκφραστεί

συναρτήσει των σύνθετων αντιστάσεων του φορτίου Z_L και της γραμμής Z_0 . Συγκεκριμένα,

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.15)$$

και παίρνει τιμές στο διάστημα $0 \leq |\rho| \leq 1$.

Αντίστοιχα με την (2.14) ορίζεται και ο συντελεστής ανάκλασης ρεύματος

$$T = \frac{I_r}{I_i} = -\rho \quad (2.16)$$

όπου I_r η τιμή της έντασης του ρεύματος του ανακλώμενου κύματος και I_i η τιμή της έντασης του ρεύματος του προσπίπτοντος κύματος στον τερματισμό.

Μπορούμε πλέον να ορίσουμε το συντελεστή ανάκλασης ισχύος

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{|V_r I_r|}{|V_i I_i|} = |\rho|^2 \quad (2.17)$$

που εκφράζει το ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας P_i η οποία ανακλάστηκε P_r .

Η εμφάνιση ανακλάσεων είναι ανεπιθύμητη κατά τη λειτουργία μιας γραμμής μεταφοράς. Προκειμένου να μειώσουμε τις ανακλάσεις, μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε το συντελεστή ανάκλασης ισχύος R ως προς τη σύνθετη αντίσταση του φορτίου Z_L . Αποδεικνύεται ότι ο συντελεστής ελαχιστοποιείται (για την ακρίβεια μηδενίζεται), όταν

$$Z_L^* = \arg \min_{Z_L} R = Z_0^* \quad (2.18)$$

Αυτό σημαίνει ότι η εμπέδηση του φορτίου θα πρέπει να είναι η συζυγής ποσότητα της χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής.

Όταν η Z_0 είναι πραγματική (καθαρά ωμική), τότε η προσαρμογή επιτυγχάνεται με ωμικό φορτίο $Z_L = Z_0$. Όταν η χαρακτηριστική αντίσταση είναι μιγαδική, τότε το φορτίο θα πρέπει να έχει: (1) ωμική αντίσταση ίση με την ωμική αντίσταση της γραμμής και (2) άεργη εμπέδηση αντίθετη από αυτήν της γραμμής. Αν δηλαδή η γραμμή εμφανίζει χωρητική συμπεριφορά, το φορτίο θα πρέπει να έχει επαγωγική συμπεριφορά και το αντίστροφο. Σε κάθε περίπτωση προσαρμογής, δεν εμφανίζονται ανακλάσεις και στάσιμα κύματα και όλη η προσπίπτουσα ενέργεια στο σημείο τερματισμού μεταδίδεται στο φορτίο.

Όταν η τερματική αντίσταση είναι διαφορετική της χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής, τότε εμφανίζεται στάσιμο κύμα. Η μελέτη του στάσιμου κύματος σε μια γραμμή μεταφοράς παρέχει πολύ σημαντικές πληροφορίες για διάφορα μεγέθη, όπως η συχνότητα λειτουργίας, ο συντελεστής ανάκλασης, η τερματική αντίσταση.

Ο λόγος

$$SWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (2.19)$$

όπου V_{\max} , V_{\min} η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της τάσης του στάσιμου κύματος αντίστοιχα, ονομάζεται λόγος στάσιμου κύματος. Μπορεί επίσης να εκφραστεί συναρτήσει του συντελεστή ανάκλασης ρ ως

$$SWR = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \quad (2.20)$$

Δεδομένου του λόγου στάσιμου κύματος μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή ανάκλασης. Λύνοντας ως προς ρ παίρνουμε

$$|\rho| = \frac{SWR-1}{SWR+1} \quad (2.21)$$

Για $0 \leq |\rho| \leq 1$, ο λόγος στάσιμου κύματος παίρνει τιμές στο διάστημα $1 \leq |SWR| \leq \infty$. Όταν δεν υπάρχει ανάκλαση, δηλαδή $\rho = 0$, τότε $SWR = 1$, ενώ όταν έχουμε πλήρη ανάκλαση $|\rho| = 1$ και συνεπώς $|SWR| \rightarrow \infty$. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε διάφορες περιπτώσεις τερματισμού μιας γραμμής μεταφοράς χωρίς απώλειες.

2.10.1 Τερματισμός στη Χαρακτηριστική Αντίσταση

Όταν η γραμμή μεταφοράς τερματίζεται σε φορτίο σύνθετης αντίστασης $Z_L = Z_0$, τότε έχουμε προσαρμογή φορτίου και η γραμμή ονομάζεται προσαρμοσμένη (matched). Όλη η ισχύς που προσπίπτει στον τερματισμό απορροφάται από αυτόν. Τότε, $\rho = 0$, $SWR = 1$ και η αντίσταση εισόδου σε κάθε σημείο της γραμμής είναι ίση προς Z_0 .

2.10.2 Τερματισμός σε Ανοιχτό Κύκλωμα

Εφόσον το ανοιχτό κύκλωμα έχει $Z_L \rightarrow \infty$, προκύπτει ότι $\rho = 1$, και $SWR \rightarrow \infty$. Η μορφή του στάσιμου κύματος είναι αυτή της Εικόνας 2.23. Όπως και στην περίπτωση της βραχυκυκλωμένης γραμμής, έτσι και σε ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή όλη η ισχύς που προσπίπτει στον τερματισμό ανακλάται. Στο σημείο τερματισμού η τάση είναι μέγιστη και το ρεύμα μηδενικό.



Εικόνα 2.23 - Τερματισμός σε ανοιχτό κύκλωμα

2.10.3 Τερματισμός σε Βραχυκύκλωμα

Στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος ισχύει $Z_L = 0$, οπότε $\rho = -1$, $|\rho| = 1$ και $SWR \rightarrow \infty$. Η εικόνα που εμφανίζει το στάσιμο κύμα της γραμμής είναι η Εικόνα 2.24. Ολόκληρη η ισχύς που προσπίπτει στον τερματισμό, ανακλάται. Το ρεύμα είναι μέγιστο στον τερματισμό και η τάση μηδενική.

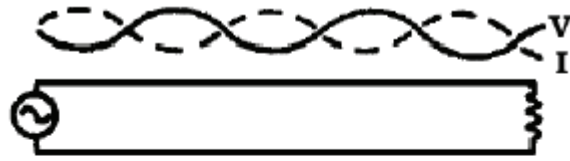


Εικόνα 2.24 - Τερματισμός σε βραχυκύκλωμα

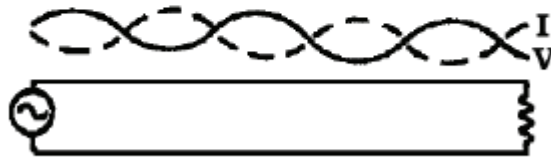
2.10.4 Τερματισμός σε Ωμική Αντίσταση

Στην περίπτωση αυτή $Z_L \in \mathbf{R}$ και διακρίνονται δύο υποπεριπτώσεις:

- i. $Z_L > Z_0$: Τότε, $\rho > 0$ και στον τερματισμό εμφανίζεται μέγιστο τάσης. Από την εξίσωση (2.21), προκύπτει ότι $SWR = Z_L/Z_0$. Η μορφή του στάσιμου κύματος απεικονίζεται στην Εικόνα 2.25(α').
- ii. $Z_L < Z_0$: Τότε, $\rho < 0$ και στον τερματισμό εμφανίζεται ελάχιστο τάσης. Από την εξίσωση (2.21), προκύπτει ότι $SWR = Z_0/Z_L$. Η μορφή του στάσιμου κύματος απεικονίζεται στην Εικόνα 2.25(β').



(α) $R > Z_0$

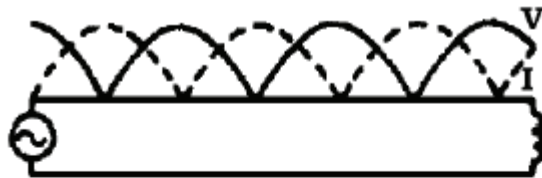


(β) $R < Z_0$

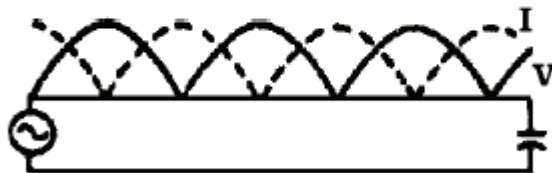
Εικόνα 2.25 - Τερματισμός σε ωμική αντίσταση

2.10.5 Τερματισμός σε Άεργο Φορτίο

Μια γραμμή μπορεί να είναι τερματισμένη σε φορτίο είτε επαγωγικής, είτε χωρητικής εμπέδησης δηλαδή $Z_L = jX$. Σε κάθε περίπτωση, $|\rho| = 1$ και $SWR \rightarrow \infty$, δηλαδή όλη η ισχύς που προσπίπτει στον τερματισμό ανακλάται. Οι θέσεις των ελαχίστων και των μεγίστων της τάσης και του ρεύματος ποικίλουν και εξαρτώνται από την τιμή του X . Σε περίπτωση προσαρμογής ($Z_0 = jX$), αυτά εμφανίζονται σε απόσταση $\lambda/8$ από τον τερματισμό (βλ. Εικόνα 2.26(α'), 2.26(β')). Συγκεκριμένα, έχουμε μέγιστο για την τάση στην περίπτωση επαγωγικής αντίδρασης ($X = \omega L$), ενώ έχουμε μέγιστο για το ρεύμα στην περίπτωση χωρητικής αντίδρασης ($X = -1/\omega C$).



(α') Τερματισμός σε επαγωγική αντίδραση jX_L



(β') Τερματισμός σε χωρητική αντίδραση jX_C

Εικόνα 2.26 - Τερματισμός σε άεργο φορτίο

2.10.6 Τερματισμός σε Μιγαδικό Φορτίο

Έστω $Z_L = R_L + jX$ όπου $Z_L \neq Z_0$. Εδώ $0 < |\rho| < 1$ και $SWR > 1$. Μέρος της ισχύος που προσπίπτει στον τερματισμό ανακλάται. Οι ελάχιστες τιμές της τάσης είναι μη μηδενικές.

2.10.7 Η Επίδραση της Προσαρμογής

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, σε μία γραμμή πεπερασμένου μήκους η ύπαρξη στάσιμων κυμάτων οφείλεται στις ανακλάσεις που προκαλούνται από το φορτίο του τερματισμού. Στην περίπτωση της προσαρμογής, το τερματικό φορτίο της γραμμής είναι καθαρά ωμικό και ισούται με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Τότε δεν εμφανίζονται ανακλάσεις και η ισχύς απορροφάται πλήρως από το φορτίο. Στην αντίθετη περίπτωση της μη προσαρμοσμένης γραμμής, εμφανίζονται ανακλώμενα κύματα και μπορεί να προκαλέσουν δυσλειτουργία ή ακόμη και βλάβη της γεννήτριας. Από την άλλη, η υπέρθεση του προσπίπτοντος με τα ανακλώμενα κύματα παράγει ένα στάσιμο κύμα με μέγιστη τιμή τάσης ενδεχομένως πέρα από της προδιαγραφές της γραμμής. Σε πρακτικές περιπτώσεις όπου το μήκος της γραμμής είναι μεγάλο, το πρόβλημα της κακής προσαρμογής είναι εντονότερο λόγω των μεγαλύτερων απωλειών χαλκού που οφείλονται και στο ανακλώμενο κύμα. Επιπρόσθετα, υψηλή τιμή SWR συνεπάγεται και εντονότερα προβλήματα θορύβου. Ένα φαινόμενο που μπορεί επίσης να παρουσιαστεί είναι το φαινόμενο του “ghosting” στα τηλεοπτικά σήματα.

Για την επίτευξη προσαρμογής μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες προσαρμοστικές διατάξεις, όπως για παράδειγμα ο μετασχηματιστής $\lambda/4$ που περιγράφεται στη συνέχεια.

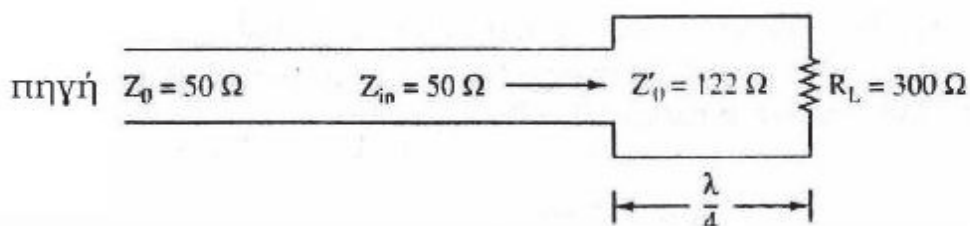
Μετασχηματιστής $\lambda/4$

Ένας τρόπος για να πετύχουμε την προσαρμογή ενός ωμικού φορτίου σε μια γραμμή είναι η χρήση του μετασχηματιστή $\lambda/4$. Κατά την προσαρμογή με μετασχηματιστή $\lambda/4$, πριν συνδεθεί το φορτίο στη γραμμή μεταφοράς, παρεμβάλλεται άλλη γραμμή μεταφοράς μήκους $L = \lambda/4$ για την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας. Υποθέτουμε και πάλι γραμμές χωρίς απώλειες. Από την εξίσωση (2.13), προκύπτει για $l = \lambda/4$:

$$Z_{in}(\lambda/4) = \frac{(Z_0')^2}{Z_L} \quad (2.22)$$

όπου Z_0' η χαρακτηριστική αντίσταση του μετασχηματιστή και Z_{in} η σύνθετη αντίσταση εισόδου του μετασχηματιστή, όταν είναι συνδεδεμένος με το φορτίο. Για να επιτευχθεί προσαρμογή θα πρέπει να ισχύει

$$\frac{(Z_0')^2}{Z_L} = Z_0 \Leftrightarrow Z_0' = \sqrt{Z_0 Z_L} \quad (2.23)$$



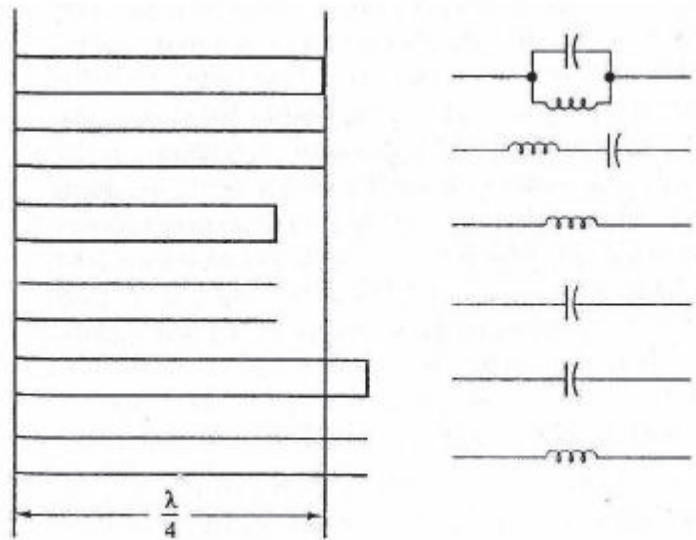
Εικόνα 2.27 - Παράδειγμα προσαρμογής με χρήση μετασχηματιστή $\lambda/4$

Η παραπάνω εξίσωση μας δίνει την τιμή που θα πρέπει να έχει η χαρακτηριστική αντίσταση του μετασχηματιστή $\lambda/4$ στην περίπτωση που το φορτίο είναι ωμικό. Ας θεωρήσουμε την περίπτωση της Εικόνας 2.27, όπου επιθυμούμε να πετύχουμε προσαρμογή του φορτίου $R_L = 300\Omega$ σε γραμμή χαρακτηριστικής αντίστασης $Z_0 = 50\Omega$. Σύμφωνα με την εξίσωση (2.23), η χαρακτηριστική αντίσταση του μετασχηματιστή $\lambda/4$ που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί προκύπτει ίση με $Z'_0 = \sqrt{50 \times 300} = 122\Omega$.

2.11 Εφαρμογές

2.11.1 Εξομοίωση Συγκεντρωμένων Κυκλωμάτων

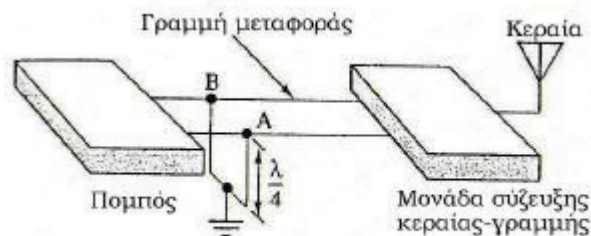
Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 2.8, τμήματα γραμμών μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξομοίωση πηνίων, πυκνωτών και κυκλωμάτων LC. Η Εικόνα 2.28 συνοψίζει τις παραπάνω περιπτώσεις για ανοιχτοκυκλωμένα και βραχυκυκλωμένα τμήματα γραμμών. Για παράδειγμα, μια βραχυκυκλωμένη γραμμή με μήκος μικρότερο από $\lambda/4$ αντιστοιχεί σε καθαρά επαγωγική συμπεριφορά, ενώ μήκος μεγαλύτερο του $\lambda/4$ συνεπάγεται καθαρά χωρητική συμπεριφορά. Τα αντίστροφα ισχύουν για την περίπτωση ανοιχτοκυκλωμένης γραμμής. Αν και οι ανοιχτοκυκλωμένες γραμμές μπορούν να επιτύχουν θεωρητικά αντίστοιχη συμπεριφορά με τις βραχυκυκλωμένες, σπάνια χρησιμοποιούνται στην πράξη γιατί ακτινοβολούν μεγάλο ποσό ενέργειας και για το λόγο αυτό δεν επιτυγχάνεται πλήρης ανάκλαση. Τέτοιου είδους απώλειες δεν υπάρχουν στις βραχυκυκλωμένες γραμμές, οι οποίες μάλιστα εμφανίζουν πολύ καλύτερη συμπεριφορά σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, απ' ότι αν χρησιμοποιούσαμε τα αντίστοιχα συγκεντρωμένα στοιχεία.



Εικόνα 2.28 - Μήκη γραμμών και ισοδύναμα συγκεντρωμένα κυκλώματα

2.11.2 Φίλτρα

Ένα τμήμα γραμμής μεταφοράς μήκους $\lambda/4$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φίλτρο με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιούνται τα φίλτρα LC με συγκεντρωμένα στοιχεία. Για παράδειγμα μια βραχυκυκλωμένη γραμμή μήκους $\lambda/4$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταστολή των άρτιων αρμονικών μιας συχνότητας με τον τρόπο που φαίνεται στην Εικόνα 2.29. Ένα παράλληλο φίλτρο LC παρουσιάζει μέγιστη σύνθετη αντίσταση στη συχνότητα συντονισμού, συμπεριφορά που ισχύει και στην περίπτωση της βραχυκυκλωμένης γραμμής $\lambda/4$. Διπλασιάζοντας τη συχνότητα, το τμήμα της γραμμής αντιστοιχεί πια σε ηλεκτρικό μήκος $\lambda_2/2$ όπου λ_2 το μήκος κύματος στην περίπτωση της διπλάσιας συχνότητας. Όπως γνωρίζουμε σε απόσταση μισού μήκους κύματος από τον τερματισμό μιας βραχυκυκλωμένης γραμμής έχουμε μηδενισμό της σύνθετης περίπτωσης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα, ο μηδενισμός της σύνθετης αντίστασης του στελέχους στη διπλάσια συχνότητα συνεπάγεται καταστολή της συγκεκριμένης συχνότητας δεδομένου ότι το βραχυκυκλωμένο στέλεχος είναι γειωμένο. Η ίδια συμπεριφορά εμφανίζεται σε όλες τις συχνότητες που είναι άρτια πολλαπλάσια της αρχικής και δικαιολογείται από την περιοδικότητα που εμφανίζει η σύνθετη αντίσταση της γραμμής ανά $\lambda/2$.



Εικόνα 2.29 - Φίλτρο $\lambda/4$

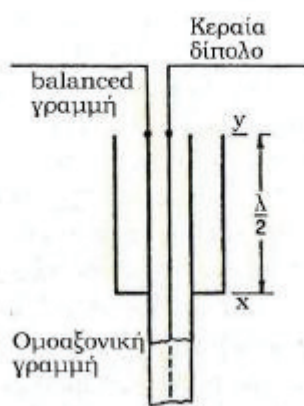
2.11.3 Μετατροπείς Baluns

Μια δισύρματη γραμμή μεταφοράς στη γενική της μορφή μεταφέρει δύο σήματα με διαφορά φάσης 180° αναφορικά με το έδαφος. Μια τέτοια γραμμή ονομάζεται ισορροπημένη (balanced). Από την άλλη, μη ισορροπημένη (unbalanced), ονομάζεται μια γραμμή της οποίας ο ένας αγωγός μεταφέρει το σήμα και ο άλλος είναι γειωμένος (π.χ. ομοαξονικό καλώδιο).

Ένας μετασχηματιστής balun, ή μετασχηματιστής balanced to unbalanced, 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 (ομοαξονικής) σε μια balanced κεραία, όπως είναι ένα δίπολο.

Υπάρχουν διάφορα είδη baluns για διαφορετικούς σκοπούς και για εφαρμογές ευρέως ή στενού φάσματος. Στην παράγραφο αυτή, θα περιγράψουμε το πιο συνηθισμένο balun στενού φάσματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.30.

Από την εικόνα αυτή 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 του περιβλήματος, σε απόσταση $\lambda/2$ από το σημείο x, η σύνθετη αντίσταση 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 σύνθετη



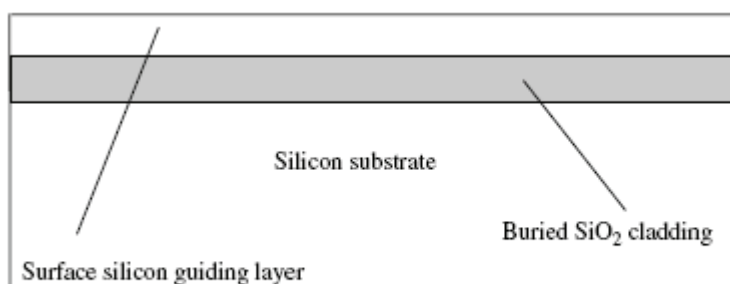
Εικόνα 2.30 – Balun

αντίσταση προς τη γείωση στο σημείο y. Έτσι, ένας από τους αγωγούς της balanced γραμμής μπορεί να συνδεθεί εκεί χωρίς φόβο βραχυκυκλώματος με τη γείωση. Το δεύτερο καλώδιο της γραμμής μεταφοράς συνδέεται στον κεντρικό αγωγό της ομοαξονικής γραμμής. Συνεπώς, στη συνέχεια μπορεί να συνδεθεί οποιοδήποτε balanced φορτίο, όπως μια απλή διπολική κεραία.

Κεφάλαιο 3. Κυματοδηγός

3.1 Ορισμός

Ένας κυματοδηγός είναι μια δομή που καθοδηγεί κύματα, όπως ηλεκτρομαγνητικά ή ηχητικά κύματα. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι κυματοδηγών για κάθε τύπο κύματος (π.χ. βλ. Εικόνα 3.1). Η αρχική και πιο κοινή έννοια είναι ένας κοίλος αγωγίμος σωλήνας μετάλλων που χρησιμοποιείται για να φέρει τα ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας και ιδιαίτερα τα μικροκύματα. Οι κυματοδηγοί διαφέρουν ως προς τη γεωμετρία τους που μπορεί να περιορίσει την ενέργεια σε μια διάσταση σε μια διάσταση (π.χ. κυματοδηγοί πλακών) ή σε δύο διαστάσεις (π.χ. κυματοδηγοί ινών ή καναλιών). Επιπλέον, διαφορετικοί κυματοδηγοί απαιτούνται για να καθοδηγήσουν διαφορετικές συχνότητες. Για παράδειγμα, μια οπτική ίνα που καθοδηγεί φως (υψηλή συχνότητα) δεν θα καθοδηγήσει τα μικροκύματα (που έχουν μια πολύ χαμηλότερη συχνότητα). Εμπειρικά, το πλάτος ενός κυματοδηγού πρέπει να είναι του ίδιου μεγέθους με το μήκος κύματος του καθοδηγημένου κύματος. Όταν συζητάμε για οπτικούς κυματοδηγούς και όχι για οπτικές ίνες, η συζήτηση περιορίζεται στη θεωρητική δομή τριών στρωμάτων που αποτελείται από τον πυρήνα και δύο επιστρώσεις εξωτερικού τοιχώματος. Η στρώση πυριτίου είναι λίγα μικρόμετρα σε πυκνότητα, και το θαμμένο διοξείδιο του πυριτίου είναι περίπου μισό μικρόμετρο. Ο σκοπός της θαμμένης στρώσης οξειδίου είναι να συμπεριφέρεται ως η χαμηλή επίστρωση εξωτερικού τοιχώματος και συνεπώς να εμποδίζει το πεδίο που σχετίζεται με τους οπτικούς ρυθμούς ώστε να μη διαπεράσει το υπόστρωμα πυριτίου από κάτω.

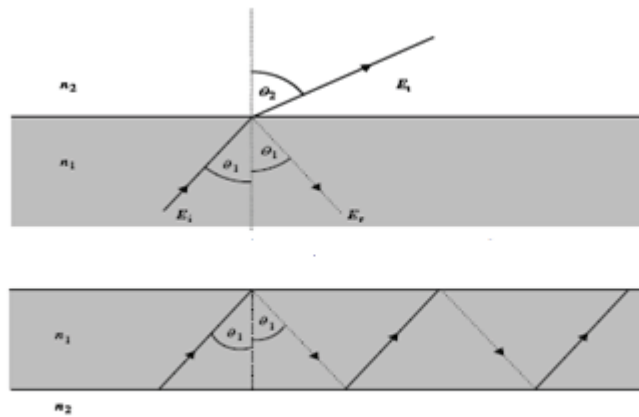


Εικόνα 3.1 - SOI επίπεδος κυματοδηγός

Ο νόμος του Snell ορίζει ότι

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

όπου θ_1 η γωνία πρόσπτωσης, θ_2 η γωνία ανάκλασης, n_1 ο δείκτης διάθλασης του υλικού 1, n_2 ο δείκτης διάθλασης του υλικού 2 (βλ. Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2 - α) Ακτίνες φωτός διαθλώμενες και αντανακλώμενες στη διεπαφή δύο μέσων και β) Συνολική εσωτερική αντανάκλαση σε δύο διεπαφές που καταδεικνύουν την έννοια ενός κυματοδηγού

3.2 Ορθογώνιοι Κυματοδηγοί

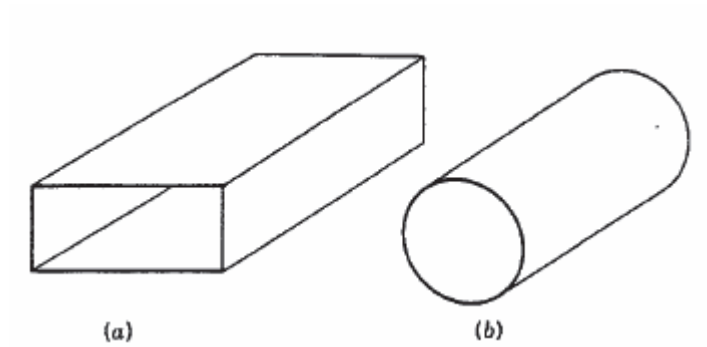
Οι ορθογώνιοι κυματοδηγοί [7] είναι οι πρώτοι με τους οποίους ασχολούμαστε, εν μέρει επειδή είναι πολύ συνηθισμένοι και εν μέρει επειδή η μετάδοση σε αυτούς είναι πιο εύκολα αναπαραστάσιμη και υπολογίσιμη.

Οι κυματοδηγοί με σταθερή ορθογώνια ή κυκλική διατομή, είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται συνήθως, αν και διάφορα άλλα σχήματα χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις. Όπως και στις γραμμές μεταφοράς, τα απλούστερα σχήματα είναι αυτά που είναι πιο εύκολο να κατασκευαστούν και να εκτιμηθούν οι ιδιότητες που έχουν.

3.2.1 Εισαγωγή

Ένας ορθογώνιος κυματοδηγός φαίνεται στην Εικόνα 3.3, όπως και ένας κυκλικός κυματοδηγός για λόγους σύγκρισης. Σε μια τυπική χρήση, υπάρχει μια κεραία στο ένα άκρο του κυματοδηγού και κάποιος μορφή φορτίο στο άλλο άκρο. Η κεραία δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ταξιδεύουν κατά μήκος του κυματοδηγού για να ληφθούν από το φορτίο. Είναι φανερό πως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα πραγματικά καθοδηγούνται.

Τα τοιχώματα του κυματοδηγού είναι αγωγοί ηλεκτρικού ρεύματος. Πρέπει να γίνει κατανοητό πως η μεταγωγή της ενέργειας συμβαίνει όχι διαμέσου των τοιχωμάτων, των οποίων ο ρόλος είναι να περιορίσουν την ενέργεια, αλλά μέσω του διηλεκτρικού που γεμίζει τον κυματοδηγό, το οποίο είναι συνήθως αέρας. Στην ανάλυση της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων των κυματοδηγών, είναι απαραίτητο να μιλήσουμε για ηλεκτρικά και μαγνητικά κύματα, για την διάδοση κύματος, σε αντίθεση με τις τάσεις και τα ρεύματα που εμφανίζονται στις γραμμές μεταφοράς. Αυτή είναι η μόνη δυνατή προσέγγιση, αλλά κάνει την συμπεριφορά των κυματοδηγών πιο δύσκολη στην κατανόηση.



Εικόνα 3.3 - Κυματοδηγοί (α) Ορθογώνιοι (β) Κυκλικοί

3.2.2 Εφαρμογές

Επειδή οι διατμηματικές (cross-sectional) διαστάσεις ενός κυματοδηγού πρέπει να είναι της τάξης του μήκους κύματος, η χρήση στην μετάδοση συχνοτήτων κάτω του **1 GHz** δεν προτιμάται, εκτός και αν ειδικές περιστάσεις το επιβάλλουν. Μερικά επιλεγμένα μεγέθη κυματοδηγών, μαζί με τις συχνότητες λειτουργίας τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Ο πίνακας δείχνει πως οι διαστάσεις των κυματοδηγών μειώνονται καθώς η συχνότητα αυξάνει (και επομένως το μήκος κύματος μειώνεται). Δεν δείχνει αρκετούς κυματοδηγούς μεγαλύτερους από τον WR650, ούτε δείχνει αρκετούς κυματοδηγούς με επικαλυπτόμενα μεγέθη οι οποίοι επίσης κατασκευάζονται. Να σημειωθεί πως ο λόγος για τα ασυνήθιστα μεγέθη είναι πως αρχικά οι κυματοδηγοί κατασκευάζονταν για μεγάλα μεγέθη (όπως **3,00 × 1,50 in**) και στην συνέχεια άλλαξε η ονομασία τους, αντί να επανακατασκευαστούν με πιο στρογγυλές τιμές σε χιλιοστά. Είναι φανερό πως οι κυματοδηγοί καλύπτουν το φάσμα **3 – 100 GHz** και είναι ασύμφοροι εκτός αυτού του φάσματος. Σε αυτό το φάσμα, οι κυματοδηγοί είναι γενικά ανώτεροι των ομοαξονικών γραμμών μεταφοράς για ένα μεγάλο φάσμα μικροκυματικών εφαρμογών, είτε για μεγάλης ή για μικρής ισχύος σήματα.

Πίνακας 3.1 - Επιλεγμένοι Ορθογώνιοι Κυματοδηγοί

TABLE 10-1 Selected Rectangular Waveguides

USEFUL FREQUENCY RANGE, GHz	OUTSIDE DIMENSIONS, mm	WALL THICKNESS, mm	RETMA* DESIGNATION	JANT TYPE NO.	THEORETICAL AVERAGE ATTENUATION, dB/m	THEORETICAL AVERAGE (CW) POWER RATING, kW
1.12-1.70	169 x 86.6	2.0	WR650	RG-69/U	0.0052	14,600
1.70-2.60	113 x 58.7	2.0	WR430	RG-104/U	0.0097	6400
2.60-3.95	76.2 x 38.1	2.0	WR284	RG-48/U	0.019	2700
3.95-5.85	50.8 x 25.4	1.6	WR187	RG-49/U	0.036	1700
5.85-8.20	38.1 x 19.1	1.6	WR137	RG-50/U	0.058	635
8.20-12.40	25.4 x 12.7	1.3	WR90	RG-52/U	0.110	245
12.40-18.00	17.8 x 9.9	1.0	WR62	RG-91/U	0.176	140
18.0-26.5	12.7 x 6.4	1.0	WR42	RG-53/U	0.37	51
26.5-40.0	9.1 x 5.6	1.0	WR28	RG-96/U	0.58	27
40.0-60.0	6.8 x 4.4	1.0	WR19	—	0.95 [†]	13
60.0-90.0	5.1 x 3.6	1.0	WR12	RG-99/U	1.50 [‡]	5.1
90.0-140	4.0 (diam.) [‡]	2.0 x 1.0 [§]	WR8	RG-138/U	2.60 [‡]	2.2
140-220	4.0 (diam.)	1.3 x 0.64	WR5	RG-135/U	5.20 [‡]	0.9
220-325	4.0 (diam.)	0.86 x 0.43	WR3	RG-139/U	8.80 [‡]	0.4

* Radio-Electronic-Television Manufacturers' Association.
 † Joint Army-Navy (JAN) numbers are shown for copper waveguides (there are also aluminum waveguides with identical dimensions but different US military numbers and somewhat lower attenuations), except for the last five numbers, which are for silver waveguides. Where no number is given, none exists.
 ‡ Waveguides of this size or smaller are circular on the outside.
 § Internal dimensions given instead of wall thickness for this waveguide and the smaller ones.
 ¶ Approximate measurements.

Τόσο οι κυματοδηγοί, όσο και οι γραμμές μεταφοράς μπορούν να μεταφέρουν αρκετά σήματα ταυτόχρονα, αλλά στους κυματοδηγούς είναι αρκετό να μεταδίδονται σε διαφορετικά modes όπως θα εξηγήσουμε στην συνέχεια. Δεν είναι απαραίτητο να είναι αυτά τα σήματα διαφορετικών συχνοτήτων. Πάλι, ένας αριθμός από στοιχεία κυματοδηγών είναι παρόμοια, αν όχι πανομοιότυπα με τα αντίστοιχα στοιχεία σε ομοαξονικές γραμμές μεταφοράς. Αυτά τα στοιχεία περιλαμβάνουν stubs, quarter-wave transformers, κατευθυνόμενους couplers και taper sections. Πράγματι, η λειτουργία μεγάλου αριθμού στοιχείων κυματοδηγών μπορεί να γίνει κατανοητή κοιτάζοντας πρώτα τα αντίστοιχα στοιχεία στις γραμμές μεταφοράς.

3.2.3 Πλεονεκτήματα

Το πρώτο πράγμα το οποίο έρχεται στο νου κάποιου ο οποίος βλέπει ένα κυκλικό κυματοδηγό, είναι πως μοιάζει με ένα ομοαξονικό αγωγό στον οποίο έχει αφαιρεθεί το εσωτερικό. Αυτό φανερώνει τα πλεονεκτήματα ενός κυματοδηγού. Εάν είναι πιο εύκολο να αφήσουμε κενό το εσωτερικό ενός αγωγού από το να το προσθέσουμε, τότε οι κυματοδηγοί είναι πιο εύκολοι στην κατασκευή από τις ομοαξονικές γραμμές. Παρόμοια, επειδή δεν υπάρχει ούτε ο εσωτερικός αγωγός, ούτε το διηλεκτρικό υποστήριξης, το flashover είναι λιγότερο πιθανό. Επομένως, η ικανότητα διατήρησης της ισχύος σε ένα κυματοδηγό είναι βελτιωμένη και είναι 10 φορές περίπου υψηλότερη για ομοαξονικό αέρα-διηλεκτρικού δύσκαμπτου καλωδίου παρόμοιας διάστασης (πού περισσότερο εάν συγκριθεί με εύκαμπτο στερεό διηλεκτρικό καλώδιο).

Επιπλέον, επειδή δεν χρειάζεται τίποτα άλλο στο εσωτερικό ενός κυματοδηγού από αέρα, σε συνδυασμό με το γεγονός πως η ενέργεια δεν μεταδίδεται μέσω των τοιχωμάτων αλλά από ανακλάσεις, η απώλεια ισχύος στους κυματοδηγούς είναι πολύ μικρότερη συγκρινόμενη με τις γραμμές μεταφοράς. Για παράδειγμα, ένα καλώδιο 41 χιλιοστών αέρα-διηλεκτρικού έχει απώλεια **4db/100m** στην συχνότητα των **3 GHz** (το οποίο είναι πολύ καλό για ομοαξονικό αγωγό), το οποίο ανεβαίνει στα **10,8db/100m** για ευέλικτο καλώδιο με αφρώδες διηλεκτρικό, ενώ ο χάλκινος κυματοδηγός WR284 έχει μόνο **1,9db/100m**.

Εάν όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά είναι ίδια, οι κυματοδηγοί πλεονεκτούν σε σχέση με τις ομοαξονικές γραμμές μεταφοράς έχοντας καλύτερη μηχανική απλότητα και μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας (**325 GHz** σε σχέση με **18 GHz**) εξαιτίας της διαφορετικής μεθόδου μετάδοσης.

3.2.4 Ανακλάσεις κυμάτων από ένα αγωγίμο πλέγμα

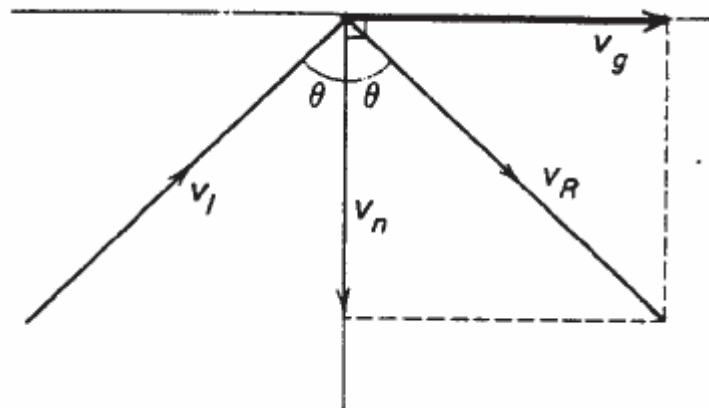
Για να δούμε τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται τα σήματα μέσα σε ένα κυματοδηγό, είναι απαραίτητο να σκεφτούμε τι συμβαίνει στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα όταν αυτά συναντήσουν μια αγωγίμη επιφάνεια.

3.2.4.1 Βασική Συμπεριφορά

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα στον χώρο έχει το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο και την διεύθυνση μετάδοσης κάθετα μεταξύ τους ανά δύο. Εάν ένα τέτοιο κύμα σταθεί κατευθείαν κατά μήκος ενός κυματοδηγού, δεν θα μπορούσε να μεταδοθεί κατά μήκος του, αν και κανείς θα το θεωρούσε λογικό. Αυτό οφείλεται στο ότι το ηλεκτρικό πεδίο (ανεξαρτήτως της κατεύθυνσής του) θα βραχυκυκλώνεται από τα τοιχώματα, μιας και αυτά υποθέτουμε πως είναι τέλει αγωγοί και δεν μπορεί να εμφανιστεί δυναμικό στο μήκος τους. Αυτό που πρέπει να αναζητήσουμε είναι μια μέθοδο διάδοσης η οποία δεν στηρίζεται στην εμφάνιση κάποιου ηλεκτρικού πεδίου κοντά στα τοιχώματα και ταυτόχρονα να είναι παράλληλα σε αυτά. Αυτό επιτυγχάνεται στέλνοντας το κύμα κατά μήκος του κυματοδηγού με μια τεθλασμένη διαδρομή, με ανακλάσεις πάνω στα τοιχώματα, σχηματίζοντας ένα ηλεκτρικό πεδίο με μηδενική ένταση στα τοιχώματα και μέγιστη ένταση κοντά στο κέντρο του κυματοδηγού. Στην περίπτωση αυτή τα τοιχώματα δεν έχουν τίποτα να βραχυκυκλώσουν και επομένως δεν παρεμβαίνουν στην μορφή του κύματος ανάμεσά τους και κατά συνέπεια η διάδοση δεν εμποδίζεται.

Δύο κύριες συνέπειες της τεθλασμένης μετάδοσης είναι προφανείς. Η πρώτη είναι πως η ταχύτητα μετάδοσης είναι μικρότερη από αυτή που εμφανίζεται στο κενό, η δεύτερη είναι πως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν μπορούν να είναι πλέον με κάθετη μορφή ηλεκτρικού και μαγνητικού κύματος. Το δεύτερο προκύπτει επειδή η διάδοση με ανάκλαση απαιτεί όχι μόνο μία κανονική συνιστώσα, αλλά και μια συνιστώσα κατά μήκος της διεύθυνσης μετάδοσης (όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4) τόσο για το ηλεκτρικό όσο και για το μαγνητικό πεδίο, εξαρτώμενο από τον τρόπο με τον οποίο τα κύματα στέλνονται μέσα στον κυματοδηγό. Αυτή η επιπλέον συνιστώσα κατά μήκος της διάδοσης είναι αυτή που κάνει τα ηλεκτρικά και μαγνητικά κύματα μεταξύ τους να μην είναι κάθετα.

Εφόσον υπάρχουν δύο διαφορετικές βασικές μέθοδοι για μετάδοση, πρέπει να δοθούν ονόματα στα κύματα που προκύπτουν για να διαχωριστούν μεταξύ τους. Δυστυχώς, η νομεκλατούρα αυτών των modes υπήρξε πάντα ένα δυσάρεστο ερώτημα. Το αμερικάνικο σύστημα ονομάζει τα modes ανάλογα με την συμπεριφορά του στοιχείου στο κενό. Επομένως, modes τα οποία δεν παρουσιάζουν ηλεκτρικό πεδίο στην κατεύθυνση της μετάδοσης ονομάζονται ανάστροφα ηλεκτρικά (transverse electric (TE)) modes και ανάστροφα μαγνητικά για εκείνα που δεν παρουσιάζουν μαγνητικό πεδίο. Στο αντίστοιχο ευρωπαϊκό σύστημα τα modes ονομάζονται H και M αντίστοιχα. Εδώ χρησιμοποιούμε αποκλειστικά το αμερικάνικο σύστημα.



Εικόνα 3.4 - Αντανάκλαση από αγωγική επιφάνεια

3.2.4.2 Επίπεδα κύματα (Plane Waves) σε αγωγή επιφάνεια

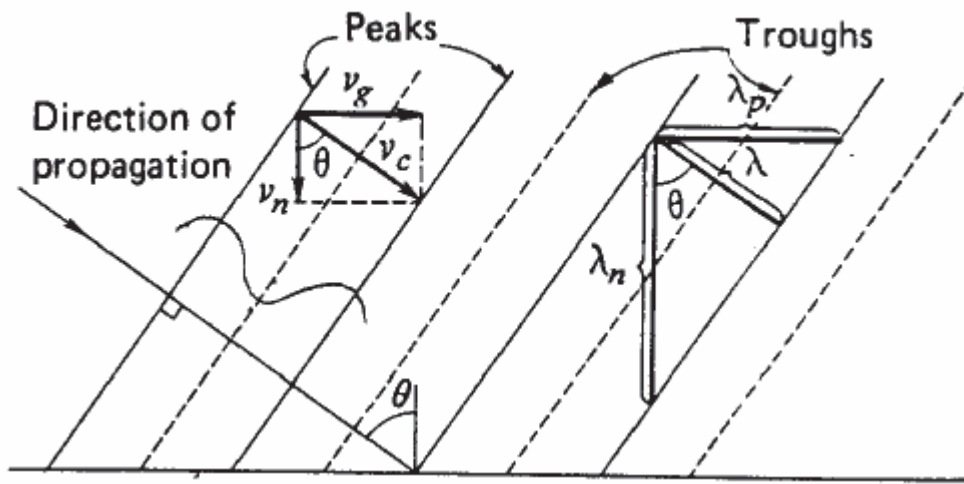
Στην Εικόνα 3.5 δείχνει μέτωπα κύματος που προσπίπτουν σε ένα τέλει επίπεδο αγωγό (για απλότητα δεν εμφανίζεται η ανάκλαση). Τα κύματα ταξιδεύουν διαγώνια από αριστερά προς τα δεξιά, όπως φαίνεται και έχουν γωνία πρόσπτωσης θ .

Εάν η πραγματική ταχύτητα των κυμάτων είναι V_c , με απλή τριγωνομετρία φαίνεται πως η ταχύτητα παράλληλη στον τοίχο V_g και η ταχύτητα κάθετη στον τοίχο V_n δίνονται από τις εξισώσεις

$$V_g = V_c \sin \theta \quad (3.1)$$

$$V_n = V_c \cos \theta \quad (3.2)$$

Όπως είναι φανερό, τα κύματα στον κυματοδηγό, ταξιδεύουν πολύ πιο αργά από ότι στο απόλυτο κενό.



Εικόνα 3.5 - Επίπεδα κύματα (Plane Waves) σε αγωγή επιφάνεια

3.2.4.3 Παράλληλο και κανονικό μήκος κύματος

Η σύλληψη του μήκους κύματος έχει διάφορες περιγραφές ή ορισμούς, όλοι εννοούν την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ίδιων σημείων του κύματος, όπως δύο διαδοχικές κορυφές. Σε αυτό πρέπει τώρα να προσθέσουμε «προς την κατεύθυνση μέτρησης» γιατί μέχρι τώρα μετρούσαμε στην κατεύθυνση που έχει η διάδοση (κάτι το οποίο δεν αναφερόταν). Δεν υπάρχει κάτι που να μας εμποδίζει να μετράμε το μήκος κύματος προς μια άλλη κατεύθυνση, αλλά δεν υπήρχε εφαρμογή για αυτό μέχρι τώρα. Άλλες πρακτικές εφαρμογές υπάρχουν, όπως η κοπή corrugated υλικών οροφής σε μια γωνία ώστε να συναντώνται με άλλα τμήματα corrugated υλικών.

Εάν συμβουλευτούμε πάλι την Εικόνα 3.5, βλέπουμε πως το μήκος κύματος προς την κατεύθυνση μετάδοσης είναι λ , δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών. Η απόσταση μεταξύ δύο κορυφών παράλληλα στον κυματοδηγό είναι λ_p ενώ το μήκος κύματος κάθετα στον κυματοδηγό είναι λ_n . Με απλούς υπολογισμούς έχουμε

$$\lambda_p = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad (3.3)$$

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{\cos \theta} \quad (3.4)$$

Αυτό δείχνει ότι το μήκος κύματος εξαρτάται από την κατεύθυνση στην οποία μετράται αλλά και ότι είναι μεγαλύτερο όταν μετράται σε μία κατεύθυνση διαφορετική από την κατεύθυνση διάδοσης.

3.2.4.4 Ταχύτητα φάσεως

Κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει δύο ταχύτητες: Η μία είναι η ταχύτητα διάδοσης και η άλλη είναι η ταχύτητα με την οποία αλλάζει φάση. Στο κενό, αυτές οι ταχύτητες είναι οι ίδιες, και αποκαλούνται «η ταχύτητα του φωτός» V_c όπου V_c είναι το γινόμενο μεταξύ της απόστασης δύο διαδοχικών κορυφών και ο αριθμός των κορυφών ανά δευτερόλεπτο. Πιο τυπικά, είναι το γινόμενο του μήκους κύματος και συχνότητάς του, επομένως

$$V_c = f\lambda = 3 * 10^8 \text{ m/sec στο κενό διάστημα} \quad (3.5)$$

Για την Εικόνα 2.16 φάνηκε πως ισχύει ότι η ταχύτητα μετάδοσης είναι $V_g = V_c \sin \theta$.

Εάν f είναι η συχνότητα εναλλαγής φάσης, θα ισχύει

$$V_p = \frac{f\lambda_p}{\sin \theta} \quad (3.6)$$

$$= \frac{V_c}{\sin \theta} \quad (3.7)$$

όπου V_p είναι η ταχύτητα φάσης.

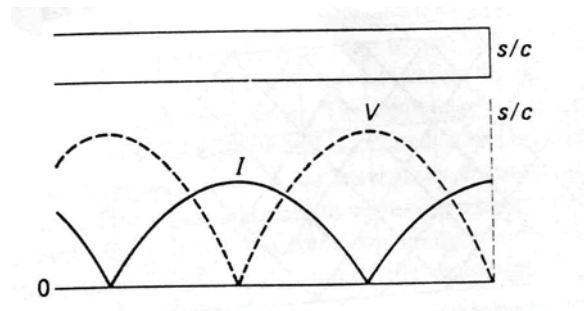
Ένα πολύ εντυπωσιακό αποτέλεσμα είναι πως υπάρχει μια έμμεση ταχύτητα που σχετίζεται με ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα σε ένα φράγμα, η οποία είναι ακόμα μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης σε αυτή την κατεύθυνση V_g ή V_c στο κενό. Πρέπει να αναφέρουμε εδώ πως αυτό δεν συνιστά παραβίαση της θεωρίας της σχετικότητας, καθώς ούτε μάζα ούτε ενέργεια, ούτε σήμα μπορεί να ταξιδέψει σε αυτή την ταχύτητα. Είναι απλώς η ταχύτητα με την οποία ένα κύμα αλλάζει φάση σε ένα επίπεδο όριο. Ένα σύνολο από άλλες έμμεσες ταχύτητες υπάρχουν στην φύση, όπως ένα θαλάσσιο κύμα σε μια ακτή που την πλησιάζει υπό γωνία. Το ενδιαφέρον φαινόμενο που συνοδεύει αυτό το γεγονός είναι πως η άκρη του κύματος φαίνεται να ταξιδεύει πιο γρήγορα στο μήκος της ακτής από το ίδιο το κύμα προς αυτή. Αυτό που παρατηρούμε είναι την ταχύτητα φάσεως που παρέχει αυτό το φαινόμενο.

3.2.5 Κυματοδηγός παράλληλων επιπέδων

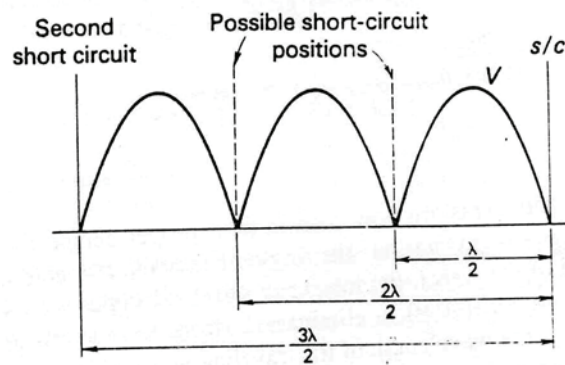
Ένας ορθογώνιος κυματοδηγός έχει δύο ζεύγη τοιχωμάτων, και θα σκεφτούμε την πρόσθεσή τους μία φορά για κάθε ζεύγος. Είναι αυτή την στιγμή απαραίτητο να μελετήσουμε εάν ο δεύτερος τοίχος σε ένα ζεύγος μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε απόσταση από τον πρώτο, ή προτιμώνται κάποιες αποστάσεις και εάν ναι, με ποια κριτήρια αυτές εκλέγονται. Τα ισοδύναμα των γραμμών μεταφοράς θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται, γιατί σίγουρα βοηθούν στο να εξηγήσουν την περίπτωση.

3.2.5.1 Πρόσθεση του δεύτερου τοιχώματος

Εάν ένα δεύτερο βραχυκύκλωμα προστεθεί στην Εικόνα 3.6, πρέπει να φροντίσουμε πως δεν θα διαταράσσει την υπάρχουσα μορφή του κύματος (η πηγή τροφοδοσίας πρέπει κάπως να τοποθετηθεί ανάμεσα στις δύο βραχυκυκλωμένες άκρες). Τρεις κατάλληλες θέσεις για το δεύτερο βραχυκύκλωμα φαίνονται στην Εικόνα 3.7. Φαίνεται πως κάθε μία από αυτές είναι ένα σημείο στο οποίο υπάρχει μηδενική τάση στην γραμμή και κάθε ένα είναι τοποθετημένο σε μία απόσταση από το πρώτο βραχυκύκλωμα σε ένα πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος.

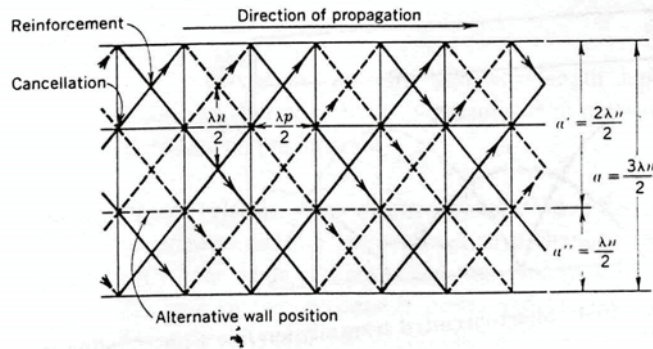


Εικόνα 3.6 - Στάσιμα κύματα κατά μήκος βραχυκυκλωμένης γραμμής μεταφοράς



Εικόνα 3.7 - Placement on second short circuit on transmission line

Η παρουσία ενός ηλεκτρομαγνητικού τοιχώματος κάνει για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αυτό που κάνει και η παρουσία βραχυκυκλώματος στις γραμμές μεταφοράς. Ένα σχήμα υπάρχει και θα καταστραφεί, εκτός και αν το δεύτερο τοίχωμα τοποθετηθεί στην σωστή θέση. Η συμπεριφορά αυτή φαίνεται στην Εικόνα 3.8, το οποίο δείχνει το δεύτερο τοίχωμα τοποθετημένο σε απόσταση τριών μισών του μήκους κύματος και το προκύπτων σχήμα κυμάτων ανάμεσα στα δύο τοιχώματα.



Εικόνα 3.8 - Ανακλάσεις κατά μήκος ενός κυματοδηγού παράλληλου επιπέδου

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ της συμπεριφοράς των γραμμών μεταφοράς και των κυματοδηγών, είναι πως στους κυματοδηγούς το μήκος κύματος δεν είναι το ίδιο με εκείνο στο κενό αλλά έχουμε $\alpha = 3\lambda_n/2$ όπως φαίνεται. Άλλη μια σημαντική διαφορά είναι πως αντί να λέμε πως «ο δεύτερος τοίχος τοποθετείται σε απόσταση που είναι πολλαπλάσια μισού μήκους κύματος» θα πρέπει να λέμε ότι «το σήμα διατάσσεται με τέτοιο τρόπο όταν οι αποστάσεις μεταξύ των τοιχωμάτων είναι πολλαπλάσιες του μισού μήκους κύματος», εάν κάτι τέτοιο είναι εφικτό. Η διάταξη αυτή επιτυγχάνεται από μια αλλαγή στην γωνία πρόσπτωσης, αρκεί να μην απαιτείται να έχουμε γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη από 90 μοίρες. Πριν αρχίσουμε την μαθηματική ανάλυση, πρέπει να τονίσουμε πως το δεύτερο τοίχωμα θα μπορούσε να τοποθετηθεί σε απόσταση τέτοια ώστε $\alpha' = 2\lambda_n/2$ ή $\alpha = \lambda_n/2$, χωρίς να διαταράσσουμε την εικόνα του κύματος που δημιουργείται από τον πρώτο τοίχο.

3.2.5.2 Μήκος κύματος αποκοπής

Εάν ένα δεύτερο τοίχωμα προστεθεί από το πρώτο σε μία απόσταση a από αυτό, τότε πρέπει να τοποθετηθεί σε ένα σημείο όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου λόγω του πρώτου τοιχώματος να είναι μηδέν, το οποίο συμβαίνει σε αποστάσεις που είναι ακέραια πολλαπλάσια μισού μήκους κύματος. Η μαθηματική έκφραση αυτού του πράγματος είναι

$$\alpha = \frac{m\lambda_n}{2} \quad (3.8)$$

όπου a είναι η απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων

λ_n είναι το μήκος κύματος σε διεύθυνση κάθετη στα δύο τοιχώματα
 m ένας ακέραιος αριθμός που συμβολίζει το πολλαπλάσια μεταξύ των δύο αποστάσεων που πρέπει να τοποθετηθούν τα δύο τοιχώματα.

Αντικαθιστώντας την τιμή του λ_n έχουμε

$$a = \frac{m(\lambda/\cos\theta)}{2} = \frac{m\lambda}{2\cos\theta} \Rightarrow \cos\theta = \frac{m\lambda}{2a} \quad (3.9)$$

Οι προηγούμενες δηλώσεις τώρα τοποθετούνται σε σωστή προοπτική. Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι για μια δεδομένη απόσταση τοιχωμάτων, η γωνία πρόσπτωσης καθορίζεται από το μήκος κύματος στο κενό του σήματος, τον ακέραιο m και την απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων. Χρησιμοποιώντας τώρα την εξίσωση 3.9 μπορούμε να έχουμε μια πιο χρήσιμη έκφραση για το λ_p που είναι το μήκος κύματος του σήματος που διαδίδεται κατά μήκος του κυματοδηγού. Τότε έχουμε

$$\lambda_p = \frac{\lambda}{\sin \theta} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (m\lambda/2a)^2}} \quad (3.10)$$

Από την εξίσωση (3.10) είναι εύκολο να δει κανείς πως καθώς το μήκος κύματος στο κενό αυξάνει, υπάρχει ένα σημείο πέρα από το οποίο το κύμα δεν μπορεί πλέον να διαδοθεί στον κυματοδηγό με σταθερά a και m . Το μήκος κύματος στο κενό για το οποίο συμβαίνει αυτό ονομάζεται μήκος κύματος αποκοπής και ορίζεται ως το μικρότερο μήκος κύματος στο κενό που αδυνατεί να μεταδοθεί κάτω από δοσμένες συνθήκες. Αυτό υπονοεί πως οποιοδήποτε κύμα μεγαλύτερου μήκους δεν μπορεί να διαδοθεί. Από την εξίσωση (3.10) μπορούμε να πάρουμε το μήκος κύματος αποκοπής για το οποίο το λ_p γίνεται άπειρο και ο παρανομαστής γίνεται ίσος με μηδέν

$$1 - \left(\frac{m\lambda_0}{2a}\right)^2 = 0 \Rightarrow \frac{m\lambda_0}{2a} = 1 \Rightarrow \lambda_0 = \frac{2a}{m} \quad (3.11)$$

όπου λ_0 είναι το μήκος κύματος αποκοπής

Η μεγαλύτερη τιμή που μπορεί να πάρει το λ_0 είναι ίση με $2a$ για $m = 1$. Αυτό σημαίνει πως το μεγαλύτερο μήκος κύματος στο κενό που μπορεί να έχει ένα σήμα και να διαδίδεται μέσα στον κυματοδηγό είναι μικρότερο από το διπλάσιο της απόστασης των τοιχωμάτων. Επιπλέον, όταν ένας κυματοδηγός αποτυγχάνει να διαδώσει ένα σήμα, αυτό συμβαίνει γιατί το μήκος κύματος είναι πολύ μεγάλο. Εάν αυτό το σήμα πρέπει να διαδοθεί, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα mode με μεγαλύτερο μήκος κύματος αποκοπής. Αυτό σημαίνει πως το m πρέπει να γίνει μικρότερο και εάν είναι ήδη 1, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί κυματοδηγός με μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων.

Τέλος, η εξίσωση (3.11) μπορεί να αντικατασταθεί στην εξίσωση (3.10) για να μας δώσει μια πολύ καθολική εξίσωση για το φέρων μήκος κύματος το οποίο δεν εξαρτάται ούτε από την γεωμετρία του κυματοδηγού, ούτε από το mode (τιμή του m) που χρησιμοποιήθηκε. Το φέρων μήκος κύματος εκφράζεται σαν συνάρτηση του μήκους κύματος στο κενό και του μήκους κύματος αποκοπής

$$\lambda_p = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - [\lambda(m/2a)]^2}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - [\lambda(1/\lambda_0)]^2}} \quad (3.12)$$

$$\lambda_p = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_0)^2}}$$

3.2.5.3 Ταχύτητα διάδοσης και φάσης στον κυματοδηγό

Όπως έχουμε ήδη δείξει, ένα κύμα που ανακλάται από ένα αγωγίμο τοίχωμα, έχει δύο ταχύτητες, την ταχύτητα διάδοσης και την ταχύτητα φάσης. Η πρώτη είχε αναπαρασταθεί σαν V_g στην εξίσωση (3.1) και η δεύτερη σαν V_p στις εξισώσεις (3.6) και (3.7). Οι δύο αυτές εξισώσεις έχουν ακριβώς το ίδιο νόημα στον κυματοδηγό παραλλήλων τοιχωμάτων και πρέπει να αναλυθούν ακόμα περισσότερο.

Εάν οι εξισώσεις (3.1) και (3.7) πολλαπλασιαστούν μαζί παίρνουμε

$$V_g V_p = V_c \sin \theta \frac{V_c}{\sin \theta} \Rightarrow V_g V_p = V_c^2 \quad (3.13)$$

Επομένως το γινόμενο των δύο ταχυτήτων είναι ίσο με το τετράγωνο της ταχύτητας του φωτός στο κενό. Να σημειωθεί πως στο κενό, υπάρχουν οι ταχύτητες διάδοσης και εναλλαγής φάσης, αλλά τότε είναι ίσες. Είναι τώρα δυνατό να υπολογίσουμε τις δύο ταχύτητες με το μήκος κύματος αποκοπής, παίρνοντας ξανά καθολικές εξισώσεις. Από την εξίσωση (2.6) έχουμε

$$V_p = f \lambda_p = f \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_0)^2}} \quad (3.14)$$

Με αντικατάσταση στην (3.13) με την (3.14) έχουμε

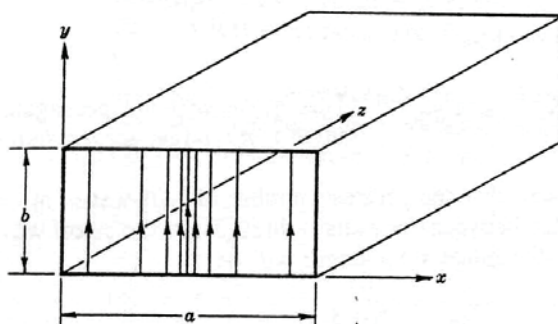
$$V_g = \frac{V_c^2}{V_p} = V_c^2 \frac{1}{V_p} = V_c^2 \frac{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_0)^2}}{V_c} \Rightarrow V_g = V_c \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2} \quad (3.15)$$

Η εξίσωση (3.15) είναι πολύ σημαντική και δείχνει πως η ταχύτητα διάδοσης είναι σημαντικά μικρότερη από την ταχύτητα διάδοσης στο κενό. Επίσης, όπως επισημάναμε και προηγουμένως, η ταχύτητα διάδοσης μειώνεται καθώς το μήκος κύματος στο κενό πλησιάζει το μήκος κύματος αποκοπής, φτάνοντας τελικά σε μηδενική ταχύτητα διάδοσης, γεγονός που αντιστοιχεί σε γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη από 90 μοίρες, και το κύμα ανακλάται πίσω στον αποστολέα. Δεν υπάρχει κάτι ισοδύναμο στις γραμμές μεταφοράς, θα μπορούσαμε όμως να δούμε τον κυματοδηγό σαν ένα υπερατό φίλτρο που δεν έχει καθόλου εξασθένιση στην ζώνη διάβασης (για μήκη κύματος μικρότερα από λ_0 αλλά πολύ υψηλή εξασθένιση στην ζώνη αποκοπής).

3.2.6 Modes

Έχουμε ήδη δει πως ένα κύμα μπορεί να ταξιδέψει μέσα σε ένα κυματοδηγό με ένα σύνολο από διαφορετικές ρυθμίσεις. Μέχρι τώρα, αυτό σήμαινε πως για ένα δοθέν σήμα, ο αριθμός μισών μηκών κύματος μεταξύ δύο τοιχωμάτων μπορεί να ρυθμιστεί για να καλύψει τις απαιτήσεις. Όταν δύο επιπλέον τοιχώματα προσθέτονται, μεταξύ των οποίων επίσης να υπάρχει απόσταση πολλαπλάσια του μήκους κύματος, κάποιο σύστημα πρέπει να καθιερωθεί για να γίνει καθολικά κατανοητή η περιγραφή οποιουδήποτε mode μετάδοσης. Η περίπτωση ήταν μπερδεμένη, αλλά μετά το 1955 το Ινστιτούτο Ραδιομηχανικών (Institute of Radio Engineers) Προτύπων εκδόθηκε, και σταδιακά επήλθε η τάξη. Τα modes σε ορθογώνιους κυματοδηγούς ονομάζονται $TE_{m,n}$ εάν πρόκειται για ανάστροφα ηλεκτρικά, ή $TM_{m,n}$ αν πρόκειται για ανάστροφα μαγνητικά. Σε κάθε περίπτωση m και n είναι ακέραιοι που δείχνουν τον αριθμό μισών μηκών κύματος (ηλεκτρικού για TE mode ή μαγνητικών για TM modes) ανάμεσα σε κάθε ζεύγος κυμάτων, το m μετράται κατά μήκος του άξονα X του κυματοδηγού (για την διάσταση a), ενώ το n κατά μήκος του άλλου άξονα. Και τα δύο φαίνονται στην Εικόνα 3.9.

Η ρύθμιση του ηλεκτρικού πεδίου φαίνεται στο $TE_{1,0}$ της Εικόνας 3.9. Το μαγνητικό πεδίο παραλείπεται για λόγους απλότητας αλλά θα εμφανίζεται σε ακόλουθα σχήματα. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πως το ηλεκτρικό πεδίο εκτείνεται προς μία κατεύθυνση αλλά αλλαγές στο πεδίο συμβαίνουν σε κατάλληλες γωνίες προς αυτή την κατεύθυνση. Αυτό είναι παρόμοιο με μια λεωφόρο πολλών λωρίδων με σταδιακές λωρίδες ταχύτητας. Όλα τα αμάξια ταξιδεύουν στην ίδια κατεύθυνση, αλλά με διαφορετικές ταχύτητες στις παράλληλες γραμμές. Παρόλο που όλα τα αμάξια σε μια λωρίδα ταξιδεύουν με μεγάλες ταχύτητες, σε αυτή την λωρίδα δεν παρατηρούνται αλλαγές στην ταχύτητα. Αντίθετα, αλλαγές στην ταχύτητα παρατηρούνται καθώς κάποιος μετακινείται από μια λωρίδα στην επόμενη. Με τον ίδιο τρόπο, το ηλεκτρικό πεδίο για το $TE_{1,0}$ mode επεκτείνεται στον άξονα Y αλλά είναι σταθερό σε αυτή την κατεύθυνση, ενώ αλλάζει η έντασή του στην κατεύθυνση X . Σαν αποτέλεσμα $m = 1$, $n = 0$, και το mode είναι $TE_{1,0}$.



Εικόνα 3.9 - Ο ρυθμός $TE_{1,0}$ κατά μήκος ορθογώνιου κυματοδηγού

3.2.6.1 Τα $TE_{m,0}$ modes

Εφόσον τα $TE_{m,0}$ modes, δεν χρησιμοποιούν τα τοιχώματα με το μεγαλύτερο πλάτος (η ανάκλαση γίνεται μεταξύ των στενότερων τοιχωμάτων), δεν επηρεάζονται από την προσθήκη του δεύτερου ζεύγους τοιχωμάτων. Συνεπώς, όλες οι εξισώσεις που έχουν εξαχθεί μέχρι τώρα για τον κυματοδηγό παραλλήλων επιπέδων, ισχύουν για τον κυματοδηγό με διαμόρφωση $TE_{m,0}$ χωρίς καμία αλλαγή. Οι πιο σημαντικές είναι οι εξισώσεις (3.11), (3.12), (3.14) και (3.15) από τις οποίες όλες εκτός από την πρώτη είναι καθολικές. Σε αυτές τις εξισώσεις πρέπει να προσθέσουμε τώρα και μία νέα. Αυτή είναι η εξίσωση για την χαρακτηριστική αντίσταση κύματος στον κυματοδηγό. Αυτή προφανώς σχετίζεται με το Z_0 , την χαρακτηριστική αντίσταση του κενού και δίνεται από

$$Z_0 = \frac{Z}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_0)^2}} \quad (3.16)$$

όπου Z_0 η χαρακτηριστική αντίσταση του κυματοδηγού
 $Z = 120\pi = 377\Omega$

Θα φανεί από την εξίσωση (3.16) πως η χαρακτηριστική αντίσταση κύματος ενός κυματοδηγού, πλησιάζει το μήκος κύματος αποκοπής για αυτή τη διαμόρφωση. Αυτό συνιστά το ηλεκτρικό ανάλογο της εξίσωσης (3.15) η οποία δηλώνει πως κάτω από αυτές τις συνθήκες η ταχύτητα διάδοσης μειώνεται. Στην πραγματικότητα είναι προφανές πως $V_g = 0$ και $Z_0 = \text{άπειρο}$, όχι μόνο συμβαίνουν ταυτόχρονα, όταν $\lambda = \lambda_0$ αλλά είναι δύο τρόποι για να πούμε το ίδιο πράγμα: ότι οι διαστάσεις του κυματοδηγού είναι πολύ μικρές για να επιτρέψουν σε αυτό το κύμα να διαδοθεί.

Μια ματιά στην εξίσωση (3.11) υπενθυμίζει πως διαφορετικές διαμορφώσεις $TE_{m,0}$ έχουν διαφορετικά μήκη κύματος αποκοπής, επομένως έχουν διαφορετικές χαρακτηριστικές αντιστάσεις κύματος. Επομένως, ένα σήμα θα συναντήσει μια τιμή Z_0 όταν μεταδοθεί σε διαμόρφωση $TE_{m,0}$ και άλλη όταν μεταδοθεί σε διαμόρφωση $TE_{2,0}$. Αυτός είναι και ο λόγος για την έκφραση «χαρακτηριστική αντίσταση κύματος». Φανερά, η τιμή της εξαρτάται από την διαμόρφωση της διάδοσης, καθώς και στις διαστάσεις του οδηγού.

3.2.6.2 Οι διαμορφώσεις $TE_{m,n}$

Οι διαμορφώσεις $TE_{m,n}$ δεν χρησιμοποιούνται στην πράξη τόσο συχνά όσο οι διαμορφώσεις $TE_{m,0}$ (με την πιθανή εξαίρεση της διαμόρφωσης $TE_{1,1}$ για ορισμένες πρακτικές εφαρμογές). Όλες οι εξισώσεις μέχρι τώρα εφαρμόζονται σε αυτές, με εξαίρεση την εξίσωση για το μήκος κύματος αποκοπής, η οποία τώρα πρέπει να είναι διαφορετική, μιας και χρησιμοποιούμε και το δεύτερο ζεύγος τοιχωμάτων. Το μήκος κύματος αποκοπής για διαμορφώσεις $TE_{m,n}$ δίνεται από την σχέση

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}} \quad (3.17)$$

Για άλλη μια φορά, η εξαγωγή της εξίσωσης αυτής είναι πολύ πολύπλοκη για να τοποθετηθεί εδώ, αλλά η επάρκειά της φαίνεται από το γεγονός πως αυτή είναι η καθολική εξίσωση για το μήκος κύματος αποκοπής ορθογώνιων κυματοδηγών, και εφαρμόζεται εξίσου σε όλες τις διαμορφώσεις συμπεριλαμβανομένης της $\mathbf{TE}_{m,0}$. Στη διαμόρφωση $\mathbf{TE}_{m,0}$ έχουμε $\mathbf{n} = \mathbf{0}$ και η εξίσωση (3.17) γράφεται

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (0/b)^2}} = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2}} = \frac{2}{m/a} = \frac{2a}{m}$$

Επειδή αυτό είναι ταυτόσημο με την εξίσωση (3.11), φαίνεται πως η εξίσωση (3.17) είναι συνεπής. Για να κάνουμε υπολογισμούς για την διαμόρφωση $\mathbf{TE}_{m,n}$ υπολογίζουμε με την εξίσωση (3.17) το μήκος κύματος αποκοπής και στην συνέχεια χρησιμοποιούμε τις ίδιες εξισώσεις που χρησιμοποιήσαμε και για τους άλλους υπολογισμούς, όπως χρησιμοποιήσαμε και για την διαμόρφωση $\mathbf{TE}_{m,0}$.

3.2.6.3 Οι διαμορφώσεις $\mathbf{TM}_{m,n}$

Η προφανής διαφορά μεταξύ της διαμόρφωσης $\mathbf{TE}_{m,n}$ και με αυτές που περιγράφηκαν μέχρι τώρα είναι ότι μόνο το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο πλέον, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο έχει την διεύθυνση της διάδοσης. Αυτό προφανώς απαιτεί μια διαφορετική διάταξη κεραίας για την λήψη ή την αποστολή τέτοιων διαμορφώσεων. Αν και οι περισσότερες συμπεριφορές που επιδεικνύουν αυτές οι διαμορφώσεις είναι όμοιες με τις διαμορφώσεις TE, υπάρχει ένα σύνολο διαφορών. Μια πρώτη διαφορά είναι εξαιτίας του γεγονότος πως οι μαγνητικές δυνάμεις είναι κλειστοί βρόγχοι. Κατά συνέπεια, εάν υπάρχει ένα μαγνητικό πεδίο και αλλάζει κατά την διεύθυνση x, πρέπει να υπάρχει και ένα κατά την διεύθυνση y. Επομένως δεν μπορεί να υπάρξουν διαμορφώσεις $\mathbf{TM}_{m,0}$ (σε ορθογώνιους κυματοδηγούς). Οι διαμορφώσεις TM περιγράφονται από σχέσεις παρόμοιες με αυτές που καθορίζουν τις διαμορφώσεις $\mathbf{TE}_{m,n}$ με την διαφορά πως η χαρακτηριστική εμπέδηση κύματος αντιστρέφεται και τείνει στο μηδέν καθώς το μήκος κύματος στο κενό πλησιάζει το μήκος κύματος αποκοπής (ενώ έτεινε προς το άπειρο στις διαμορφώσεις TE). Η περίπτωση αυτή είναι ανάλογη με το ρεύμα και την τάση τροφοδοσίας σε κεραίες. Ο τύπος για την χαρακτηριστική αντίσταση κύματος στις διαμορφώσεις TM είναι

$$Z_0 = Z \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2} \quad (3.18)$$

Η εξίσωση (3.18) δίνει τιμές αντίστασης που είναι πάντα μικρότερες από 377Ω και αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούμε μερικές φορές διαμόρφωση TM και ειδικά $\mathbf{TM}_{1,1}$. Μερικές φορές είναι προτιμότερο να τροφοδοτήσουμε ένα κυματοδηγό κατευθείαν από μια ομοαξονική γραμμή μεταφοράς. Στην περίπτωση

αυτή όμως, θα πρέπει να έχουμε αντίσταση εισόδου του κυματοδηγού μικρότερη από 377Ω .

Όπως και το $TE_{1,1}$ είναι η θεμελιώδης διαμόρφωση $TE_{m,n}$ έτσι και η κύρια διαμόρφωση TM είναι η $TM_{1,1}$.

3.3 Κυκλικοί και άλλοι Κυματοδηγοί

3.3.1 Κυκλικοί Κυματοδηγοί

Θα πρέπει να σημειωθεί πως σε γενικές γραμμές η συμπεριφορά των κυκλικών κυματοδηγών είναι η ίδια με αυτή των ορθογώνιων κυματοδηγών. Ωστόσο, επειδή οι κυκλικοί κυματοδηγοί έχουν μια διαφορετική γεωμετρία και μερικές διαφορετικές εφαρμογές, είναι απαραίτητη μία ξεχωριστή έρευνα για αυτούς.

3.3.1.1 Ανάλυση συμπεριφοράς

Οι νόμοι που καθορίζουν την διάδοση κυμάτων σε κυματοδηγούς, είναι ανεξάρτητοι του σχήματος διατομής και των διαστάσεων του κυματοδηγού. Σαν αποτέλεσμα, όλοι οι παράμετροι και ορισμοί που προέκυψαν για τους ορθογώνιους κυματοδηγούς ισχύουν και για τους κυκλικούς κυματοδηγούς, με την μικρή διαφορά πως αλλάζει η ονοματολογία των διαμορφώσεων. Όλες οι εξισώσεις επίσης ισχύουν εδώ, εκτός, προφανώς, από τον τύπο για το μήκος κύματος αποκοπής. Αυτός είναι διαφορετικός λόγω του διαφορετικού σχήματος διατομής και δίνεται από

$$\lambda_0 = \frac{2\pi r}{(kr)} \quad (3.19)$$

όπου r = η εσωτερική ακτίνα του κυματοδηγού
 (kr) = η λύση μιας εξίσωσης Bessel

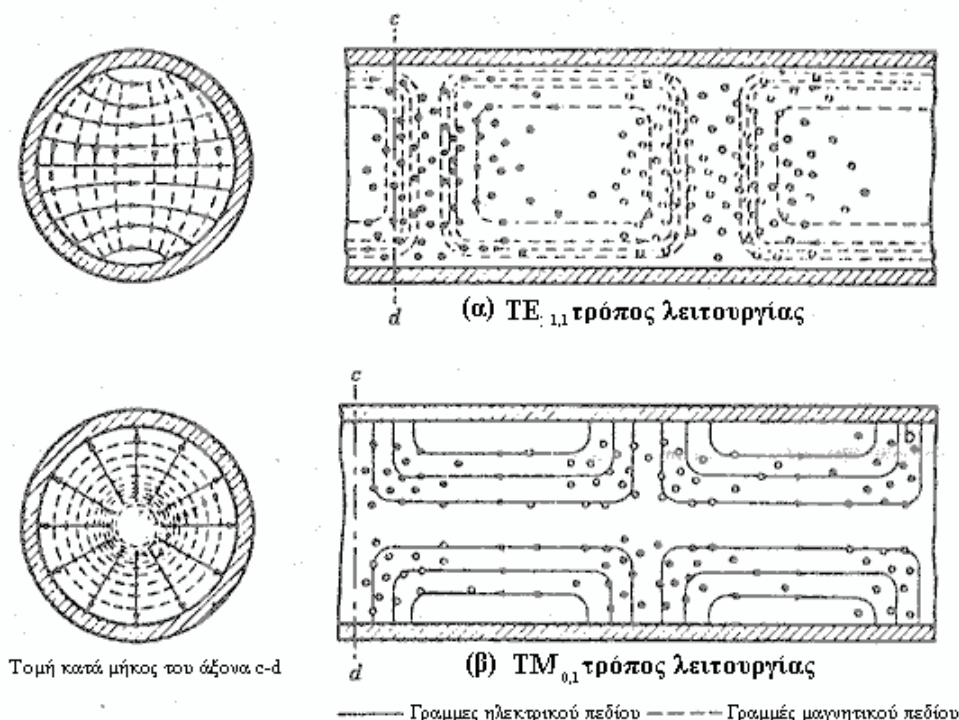
Για να δείξουμε ορισμένους υπολογισμούς για κυκλικούς κυματοδηγούς, τιμές του (kr) φαίνονται στον Πίνακα 3.2 για κυκλικές διαμορφώσεις κυματοδηγών που είναι πιο πιθανό να συναντήσει κανείς.

Πίνακας 3.2 - Τιμές του (kr) για τις Κύριες Διαμορφώσεις Κυκλικών Κυματοδηγών

<i>TE</i>				<i>TM</i>			
MODE	(kr)	MODE	(kr)	MODE	(kr)	MODE	(kr)
TE _{0,1}	3.83	TE _{0,2}	7.02	TM _{0,1}	2.40	TM _{0,2}	5.52
TE _{1,1}	1.84	TE _{1,2}	5.33	TM _{1,1}	3.83	TM _{1,2}	7.02
TE _{2,1}	3.05	TE _{2,1}	6.71	TM _{2,1}	5.14	TM _{2,2}	8.42

3.3.1.2 Διαγράμματα πεδίων

Η Εικόνα 3.10 δείχνει τα διαγράμματα έντασης των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων σε κυκλικούς κυματοδηγούς για τις δύο πιο συνηθισμένες διαμορφώσεις. Οι ίδιοι γενικοί κανόνες εφαρμόζονται όπως και στους ορθογώνιους κυματοδηγούς. Έχουν υιοθετηθεί οι ίδιες συμβάσεις, εκτός από το ότι τώρα χρησιμοποιούμε μικρούς άδειους κύκλους για να δείξουμε γραμμές, (ηλεκτρικές ή μαγνητικές εξαρτάται από την διαμόρφωση) που βγαίνουν από την σελίδα, και γεμάτες τελείες για γραμμές που μπαίνουν μέσα στην σελίδα.



Εικόνα 3.10 - Πρότυπα κοινών τύπων πεδίων σε κυκλικούς κυματοδηγούς

3.3.1.3 Μειονεκτήματα

Το πρώτο μειονέκτημα που σχετίζεται με ένα κυκλικό κυματοδηγό είναι πως η διατομή του κυκλικού οδηγού πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη σε επιφάνεια για να μεταφέρει το ίδιο σήμα.

Ένα άλλο πρόβλημα με τους κυκλικούς κυματοδηγούς είναι πως είναι δυνατόν για το επίπεδο της πολικότητας να περιστραφεί κατά την διάδοση του κύματος μέσα στον κυματοδηγό. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω ανωμαλιών ή ασυνεχειών στα τοιχώματα. Στην διαμόρφωση $TE_{1,1}$ για παράδειγμα, φαίνεται πως το ηλεκτρικό πεδίο συνήθως αρχίζει οριζόντια άρα και ο μηχανισμός λήψης θα τοποθετηθεί με αυτόν τον τρόπο. Εάν η πολικότητα τώρα αλλάξει απρόσμενα πριν το κύμα φτάσει το άκρο όπως θα έπρεπε, το σήμα θα ανακλαστεί πίσω αντί να λαμβάνεται, με τις προφανείς συνέπειες. Αυτό συνιστά ενάντια στην χρήση της διαμόρφωσης $TE_{1,1}$.

3.3.1.4 Πλεονεκτήματα και ειδικές εφαρμογές

Οι κυκλικοί κυματοδηγοί είναι ευκολότεροι στην κατασκευή από τους ορθογώνιους. Είναι επίσης πιο εύκολοι στην συνένωση, χρησιμοποιώντας γνωστές τεχνικές. Επιπλέον, το πρόβλημα της περιστροφής της πόλωσης μπορεί να ξεπεραστεί με χρήση διαμορφώσεων που είναι συμμετρικές ως προς την περιστροφή. Η $TM_{0,1}$ είναι πολύ πιθανό να προτιμηθεί από την $TE_{0,1}$ μια και χρειάζεται μικρότερο διάμετρο για το ίδιο μήκος κύματος αποκοπής.

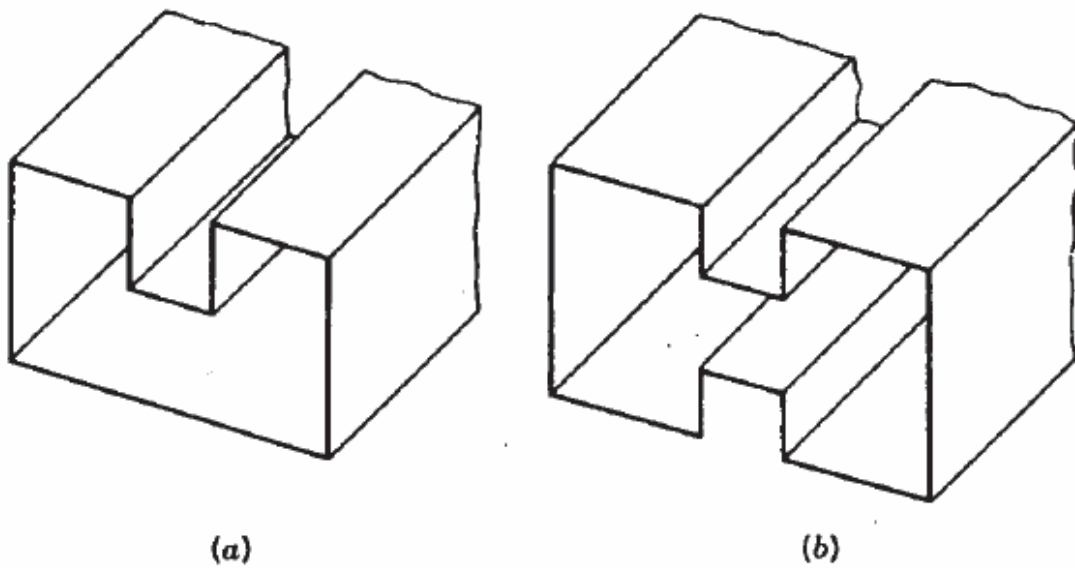
Ωστόσο, η διαμόρφωση $TE_{0,1}$ μπορεί να έχει μια πρακτική εφαρμογή, αν και είναι μόνο πειραματική αυτή την στιγμή. Μπορεί να δείχτεί πως, ειδικά σε συχνότητες μεγαλύτερες από **10 GHz**, αυτή είναι η διαμόρφωση με την μικρότερη εξασθένηση ανά μονάδα μήκους του κυματοδηγού. Αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχει διαμόρφωση είτε σε ορθογώνιο, ή σε κυκλικό κυματοδηγό με μικρότερη εξασθένηση. Αν και αυτή η ιδιότητα δεν είναι σημαντική για αποστάσεις μερικών μέτρων, γίνεται πολύ σημαντική εάν σκεφτούμε μετάδοση με κυματοδηγό σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

3.3.2 Άλλοι Κυματοδηγοί

Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες είναι επιθυμητές ιδιότητες οι οποίες δεν υπάρχουν ούτε στους ορθογώνιους ούτε στους κυκλικούς κυματοδηγούς. Για αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται πτυχωτοί ή ευέλικτοι κυματοδηγοί οι οποίοι περιγράφονται στην συνέχεια.

3.3.2.1 Πτυχωτοί κυματοδηγοί

Οι ορθογώνιοι κυματοδηγοί μερικές φορές φτιάχνονται με μονές ή διπλές πτυχές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.11. Η βασική επίδραση αυτών των πτυχώσεων είναι να μειώσουν την τιμή του μήκους κύματος αποκοπής. Συμπερασματικά, αυτό επιτρέπει να έχουμε έναν κυματοδηγό με μικρότερες διαστάσεις για χρήση με κάθε δεδομένη συχνότητα. Ένα άλλο όφελος των πτυχών σε ένα κυματοδηγό είναι πως αυξάνουν το χρήσιμο εύρος συχνοτήτων του. Μπορεί να δείχτεί πως η επικρατούσα διαμόρφωση είναι η μόνη που μπορεί να επιτύχει διάδοση μέσα σε ένα κυματοδηγό με πτυχές, σε μεγαλύτερο εύρος περιοχής από οποιοδήποτε κυματοδηγό. Επομένως, ο κυματοδηγός με πτυχές έχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, από τον αντίστοιχο ορθογώνιο. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να τονιστεί πως οι κυματοδηγοί με πτυχές έχουν μεγαλύτερη εξασθένηση ανά μονάδα μήκους από τους ορθογώνιους κυματοδηγούς, και επομένως δεν χρησιμοποιούνται σε μεγάλα μήκη για τυπικές εφαρμογές.



Εικόνα 3.11 - Πτυχωτοί κυματοδηγοί (α) Μονή πτυχή, (β) Διπλή πτυχή

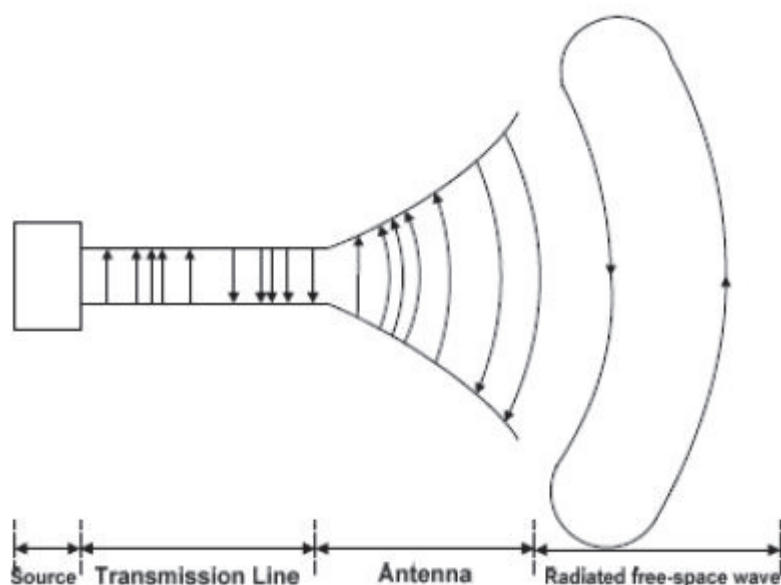
3.3.2.2 Ευέλικτοι κυματοδηγοί

Μερικές φορές είναι απαραίτητο να έχουμε ένα κομμάτι κυματοδηγού που να είναι ικανό να κινηθεί. Αυτό μπορεί να σημαίνει κάμψη, στρέψη, έκταση ή ταλάντωση, ενδεχομένως συνέχεια, ενώ ταυτόχρονα δεν πρέπει να προκαλεί μεγάλη πτώση στην απόδοση. Εφαρμογές σαν αυτές απαιτούν ευέλικτους κυματοδηγούς, όπου υπάρχουν διαφόρων τύπων. Ανάμεσα στους πιο δημοφιλείς είναι οι σωλήνες αλουμινίου ή χαλκού που έχουν ελλειπτική διατομή, μικρές transverse corrugation και μεταβάσεις σε ορθογώνιους κυματοδηγούς στα δύο άκρα. Αυτοί μετατρέπουν στον ευέλικτο κυματοδηγό από διαμόρφωση $TE_{1,1}$ σε διαμόρφωση $TE_{1,0}$ στα άκρα τους. Αυτός ο κυματοδηγός έχει συνεχή κατασκευή και επομένως δεν χρειάζονται συνενώσεις και ειδικές κάμψεις. Έχει συνήθως ένα εξωτερικό περίβλημα από πολυαιθυλένιο ή λάστιχο και λυγίζει εύκολα αλλά δεν μπορεί να στριφτεί. Η ικανότητα για διαχείριση υψηλών ενεργειών και το SWR είναι παρόμοια με έναν ορθογώνιο κυματοδηγό του ίδιου μεγέθους, αλλά η εξασθένηση σε dB/m είναι περίπου πέντε φορές μεγαλύτερη.

Κεφάλαιο 4. Κεραίες

4.1 Ορισμός

Η κεραία [8] αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων και σύμφωνα με το «The IEEE Standard Definitions of terms of Antennas», κεραία είναι «ένα μέσο ακτινοβολίας και λήψης ραδιοκυμάτων». Με άλλα λόγια, η κεραία εκπομπής μετατρέπει τα σήματα της γραμμής μεταφοράς σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία μεταδίδει στον ελεύθερο χώρο. Η κεραία λήψης αντίθετα μετατρέπει τα προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε σήματα.



Εικόνα 4.1 - Η κεραία ως συσκευή μετατροπής σημάτων σε ραδιοκύματα

Η λειτουργία μιας κεραίας μπορεί να εξετασθεί από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Για παράδειγμα μια κεραία θα πρέπει να υποστηρίζει την ομαλή μετάβαση από την εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς (π.χ. των 50Ω) στην εμπέδηση του ελεύθερου χώρου των 377Ω . Παράλληλα στα ασύρματα συστήματα υπάρχει η απαίτηση για επίτευξη συγκεκριμένων προδιαγραφών λειτουργίας της κεραίας. Οι απαιτήσεις αυτές σχετίζονται, με τα διαγράμματα ακτινοβολίας, την απόδοση, την κατευθυντικότητα και άλλα χαρακτηριστικά, η σωστή επιλογή των οποίων δύναται να βελτιώσει την εν γένει συμπεριφορά του συστήματος.

4.2 Βασικά Μεγέθη Θεωρίας Κεραιών

Παρακάτω δίνονται ορισμένα σημαντικά μεγέθη της θεωρίας κεραιών:

4.2.1 Εύρος Ζώνης (Bandwidth)

Ως εύρος ζώνης ορίζεται, το εύρος των συχνοτήτων στο οποίο μια κεραία πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές, οι οποίες καθορίζονται από την εκάστοτε εφαρμογή. Το εύρος ζώνης επομένως θα ισούται με:

$$BW = f_h - f_i$$

Υπάρχουν διάφοροι ακόμη τρόποι για να εκφράσουμε το εύρος ζώνης μιας κεραίας και ενός συστήματος γενικότερα. Για παράδειγμα μπορούμε να πάρουμε τον λόγο της μέγιστης προς την ελάχιστη συχνότητα.

$$\frac{f_h}{f_i} = f_h / f_i : 1$$

Αλλά και το κλασματικό εύρος ζώνης (bw), που ορίζεται ως ο λόγος του εύρους ζώνης προς την κεντρική συχνότητα του συστήματος, με τα f_h και f_i να συμβολίζουν την μέγιστη και την ελάχιστη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος αντιστοίχως.

$$bw = \frac{BW}{f_c} = \frac{f_h - f_i}{f_c} = 2 \frac{f_h - f_i}{f_h + f_i}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι, τον πιο διαδεδομένο περιοριστικό παράγοντα του εύρους ζώνης μιας κεραίας, αποτελεί ο λόγος στάσιμων κυμάτων τάσης που δημιουργούνται εξαιτίας της έλλειψης προσαρμογής στους ακροδέκτες της κεραίας.

4.2.2 Εμπέδηση Εισόδου

Η εμπέδηση εισόδου μετράται στους ακροδέκτες εισόδου της κεραίας και αποτελεί μιγαδικό μέγεθος. Τόσο το πραγματικό όσο και το φανταστικό μέρος της μεταβάλλονται με την συχνότητα. Προκειμένου να ελαχιστοποιήσουμε τα στάσιμα κύματα κατά μήκος της γραμμής καθώς και τις απώλειες ανακλάσεων θα πρέπει η εμπέδηση εισόδου να μην παρουσιάζει μεγάλη διαφοροποίηση από την κυματική αντίσταση της γραμμής στις συχνότητες ενδιαφέροντος.

4.2.3 Λόγος Στάσιμων Κυμάτων Τάσης (VSWR)

Ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή της τάσης ενός στάσιμου κύματος κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς και προκαλείται από την ασυνέχεια της εμπέδησης σε κάποιο σημείο:

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

Οι τιμές που λαμβάνει κυμαίνονται από $VSWR = 1$ σε περίπτωση τέλει προσαρμογής ($\Gamma = 0$), έως $VSWR = \infty$ σε περίπτωση που η γραμμή είναι ανοιχτοκυκλωμένη ή βραχυκυκλωμένη ($\Gamma = 1, \Gamma = -1$). Στον Πίνακα 4.1 δίνονται τυπικές τιμές του λόγου στάσιμων κυμάτων τάσης της κεραίας, σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες απώλειες ισχύος και το πώς χαρακτηρίζουμε την κεραία σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 4.1 - Χαρακτηρισμός τυπικών τιμών του VSWR και αντίστοιχες απώλειες ισχύος

Προσαρμογή	VSWR	Απώλειες Ισχύος(%)
Οριακή	3.00:1	25.0
Καλή	2.00:1	11.1
Πολύ Καλή	1.50:1	4.0
Εξαιρετική	1.22:1	1.0

4.2.4 Παραμόρφωση Φάσης και Καθυστέρηση Διαδρομής Ομάδος

Όταν η γωνία μετάδοσης του συστήματος δεν μεταβάλλεται γραμμικά με την συχνότητα τότε, ο ολικός χρόνος διαδρομής ομάδος δεν είναι σταθερός. Ως συνέπεια έχουμε την εμφάνιση παραμόρφωσης φάσης:

Όταν $b(\omega) \neq c \cdot \omega$, όπου $c = \text{σταθερά}$

$$\text{Τότε } t_g = -\frac{db(\omega)}{d\omega} \neq \text{σταθερό}$$

όπου,

ω : γωνιακή συχνότητα

$b(\omega)$: γωνία μετάδοσης ως συνάρτηση της συχνότητας

$t_g(\omega)$: καθυστέρηση διαδρομής ομάδος

Βλέπουμε, επομένως ότι για να είναι η καθυστέρηση ομάδος μια θετική σταθερά ποσότητα που είναι και το επιθυμητό, θα πρέπει η απόκριση φάσης να είναι γραμμική ως συνάρτηση της συχνότητας και να έχει αρνητική κλίση. Η μεταβολή της καθυστέρησης ομάδος με την συχνότητα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία διασποράς που οδηγεί στην παραμόρφωση του σήματος.

4.2.5 Κατευθυντικότητα (Directivity)

Η κατευθυντικότητα μιας κεραίας ορίζεται ως «ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας σε δοσμένη κατεύθυνση, προς την μέση ένταση ακτινοβολίας σε όλες τις κατευθύνσεις». Η μέση ένταση ακτινοβολίας ισούται με την συνολική ακτινοβολούμενη ισχύ διαιρούμενη με 4π (συνολική στερεά γωνία). Αξίζει να σημειωθεί ότι, όταν δεν καθορίζεται η κατεύθυνση, υπονοείται η κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Σε μαθηματική μορφή η κατευθυντικότητα γράφεται:

$$D = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{av}} = \frac{U(\theta, \varphi) * 4\pi}{P_{rad}}$$

Η κατευθυντικότητα είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που δείχνει πόσο εστιάζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας σε μία δεδομένη κατεύθυνση, συγκρινόμενο συνήθως με αυτό της ισοτροπικής κεραίας. Θεωρητικά, ένα στοιχείο το οποίο δεν έχει απώλειες, αναφέρεται ως ισοτροπικό, όταν έχει **1 dBi** κατευθυντικό κέρδος προς όλες τις κατευθύνσεις. Για να επιτευχθεί υψηλότερο κατευθυντικό κέρδος, οι κεραίες σχεδιάζονται για να εστιάζουν ή να συγκεντρώνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας τους μόνο στη διεύθυνση της ραδιοζεύξης. Η κατευθυντικότητα κάθε πηγής, εκτός της ισοτροπικής είναι πάντα μεγαλύτερη από την μονάδα.

4.2.6 Απόδοση της Κεραίας (Antenna Efficiency)

Ένας αριθμός αποδόσεων συσχετίζεται με την κεραία. Η απόδοση της κεραίας είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που λαμβάνει υπ' όψιν της τις απώλειες στους ακροδέκτες καθώς και τις απώλειες στην δομή της κεραίας. Γενικά η συνολική απόδοση της κεραίας μπορεί να γραφεί ως:

$$e_0 = e_r \cdot e_c \cdot e_d$$

όπου,

e_0 = συνολική απόδοση

e_r = απόδοση προσαρμογής = $(1 - |\Gamma|^2)$

e_c = απόδοση αγωγιμότητας

e_d = απόδοση διηλεκτρικού

Συνήθως οι \mathbf{e}_c , \mathbf{e}_d είναι δύσκολο να υπολογιστούν και όταν εξάγονται από μετρήσεις δεν είναι δυνατό να διαχωριστούν, για αυτόν τον λόγο γράφουμε:

$$\mathbf{e}_0 = \mathbf{e}_r \cdot \mathbf{e}_{cd}$$

όπου \mathbf{e}_{cd} = απόδοση ακτινοβολίας και χρησιμοποιείται για να συσχετίσει την κατευθυντικότητα με την απολαβή της κεραίας.

4.2.7 Απολαβή ή Κέρδος (Gain)

Η απολαβή μιας κεραίας είναι ένα μέτρο τόσο της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας όσο και των κατευθυντικών της ιδιοτήτων. Το κέρδος της κεραίας σε δοσμένη κατεύθυνση ορίζεται ως «ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας σε συγκεκριμένη κατεύθυνση, προς την ένταση ακτινοβολίας που θα είχαμε εάν η κεραία ακτινοβολούσε όλη την ισχύ που λαμβάνει ισοτροπικά». Σε μορφή εξίσωσης η απολαβή εκφράζεται όπως παρακάτω:

$$\text{Gain} = 4\pi \frac{\text{Ένταση Ακτινοβολίας}}{\text{Συνολική Λαμβανόμενη Ισχύς}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}}$$

Η απολαβή της κεραίας είναι επίσης ένα αδιάστατο μέγεθος, ενώ όταν η κατεύθυνση δεν διευκρινίζεται λαμβάνουμε την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Η απολαβή συσχετίζεται με την κατευθυντικότητα μέσω της απόδοσης της κεραίας:

$$P_{rad} = \mathbf{e}_{cd} \cdot P_{in} \Rightarrow G(\theta, \varphi) = \mathbf{e}_{cd} \cdot D(\theta, \varphi)$$

Βλέπουμε επομένως ότι το κέρδος θα είναι πάντα μικρότερο, ιδανικά ίσο, της κατευθυντικότητας της κεραίας και επίσης ότι το κέρδος είναι ανεξάρτητο των απωλειών ανακλάσεων.

4.2.8 Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Ως διάγραμμα ακτινοβολίας ορίζεται, μια «μαθηματική συνάρτηση, ή μια γραφική αναπαράσταση των ιδιοτήτων ακτινοβολίας της κεραίας ως συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων της. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα διαγράμματα ακτινοβολίας λαμβάνονται στο μακρινό πεδίο και αναπαρίστανται ως συνάρτηση των δύο σφαιρικών συντεταγμένων θ και φ ». Τα διαγράμματα μπορούν να αναπαρασταθούν τόσο σε καρτεσιανές όσο και σε πολικές συντεταγμένες. Επιπλέον, μπορούν να διακριθούν σε διαγράμματα πεδίων και σε διαγράμματα ισχύος, συχνά κανονικοποιούνται ως προς την μέγιστη τιμή τους ενώ είναι προτιμότερο να εκφράζονται σε dB.

Η απόδοση των γραμμικά πολωμένων κεραιών συχνά περιγράφεται από τα θεμελιώδη διαγράμματα E-επιπέδου και H-επιπέδου. Το E-επίπεδο ορίζεται ως «το επίπεδο που εμπεριέχει το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου και την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας», ενώ το H-επίπεδο ως «το επίπεδο που εμπεριέχει το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου και την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας».

4.2.9 Παράγοντας Ποιότητας

Ο παράγοντας ποιότητας αποτελεί ένα μέτρο των απωλειών της κεραίας. Στις τυπωμένες κεραίες, μπορούμε να διαχωρίσουμε τις απώλειες σε ακτινοβολίας, αγωγιμότητας, διηλεκτρικού και επιφανειακών κυμάτων. Επομένως και ο παράγοντας ποιότητας μπορεί να αναλυθεί σε όρους που εκφράζουν όλες τις παραπάνω απώλειες και να γραφεί ως:

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

Επιπλέον ο παράγοντας ποιότητας είναι αντιστρόφως ανάλογος του κλασματικού εύρους ζώνης της κεραίας και ισχύει:

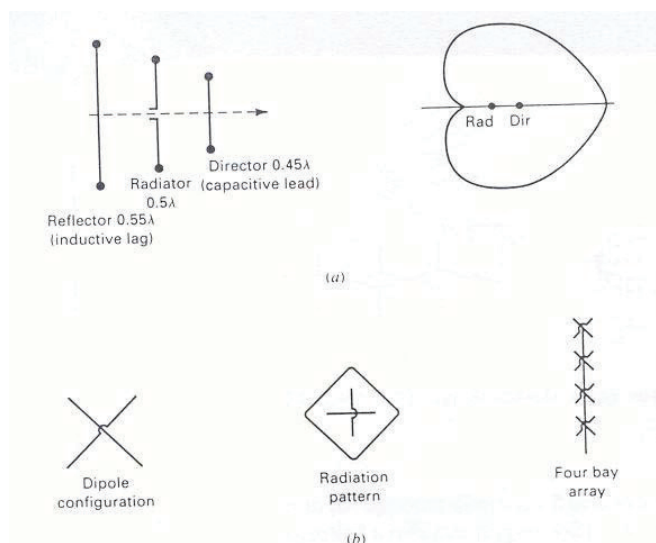
$$Q_{\text{tot}} = \frac{f_c}{\Delta f} = \frac{1}{bw}$$

4.2.10 Πόλωση (Polarization)

Η πόλωση της κεραίας μας δείχνει την πόλωση του ακτινοβοληθέντος σήματος στο μακρινό πεδίο. Είναι μια ιδιότητα των κυμάτων που περιγράφει την μεταβαλλόμενη κατεύθυνση και το σχετικό εύρος του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου, ως προς ένα σταθερό σημείο στον χώρο. Συνήθως μετράται στην κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες πολωμένων κεραιών. Αυτές που παρουσιάζουν α) γραμμική πόλωση, β) κυκλική πόλωση και γ) ελλειπτική πόλωση. Επιπλέον η γραμμική και η κυκλική πόλωση μπορούν αν θεωρηθούν ως ειδικές κατηγορίες της ελλειπτικής. Τέλος, όταν μελετάμε την εξίσωση μετάδοσης του Friis, θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας τις απώλειες προσαρμογής της πόλωσης (PML-Polarization Mismatch Loss).

4.3 Κατευθυντικές Κεραίες Υψηλής Συχνότητας

Οι κεραίες υψηλής συχνότητας (High Frequency/ HF) [9] είναι πιθανό να διαφέρουν από τις κεραίες χαμηλής συχνότητας για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι οι απαιτήσεις μετάδοσης/ λήψης στις υψηλές συχνότητες και ο δεύτερος η δυνατότητα επίτευξής τους. Δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος της επικοινωνίας HF είναι πιθανό να είναι από σημείο σε σημείο, απαιτούνται αρκετά συγκεντρωμένες δέσμες ακτινοβολίας αντί της μη κατευθυντικής μετάδοσης. Τέτοιας μορφής διαγράμματα ακτινοβολίας είναι εφικτά στις υψηλές συχνότητες, λόγω των μικρότερων μηκών κύματος. Οι κεραίες μπορούν να κατασκευαστούν σε διαστάσεις αρκετών μηκών κύματος, διατηρώντας παράλληλα ένα εύχρηστο μέγεθος.



Εικόνα 4.2 - (α) Διεγερμένο και παρασιτικά στοιχεία στοιχειοκεραίας και (β) οριζόντιο περιστροφικό δίπολο, διάγραμμα ακτινοβολίας και στοιχειοκεραία

4.3.1 Στοιχειοκεραία Διπόλων

Μια στοιχειοκεραία είναι ένα σύστημα ακτινοβολίας που αποτελείται από ένα σύνολο ακτινοβολητών ή στοιχεία (Εικόνα 4.2). Αυτοί είναι τοποθετημένοι σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, ούτως ώστε να είναι ο ένας μέσα στο πεδίο επαγωγής του άλλου. Επομένως αλληλεπιδρούν ο ένας με τον άλλον, παράγοντας ένα διάγραμμα ακτινοβολίας που ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των επιμέρους εκπομπών τους. Η ύπαρξη ενίσχυσης ή εξασθένησης σε οποιαδήποτε δεδομένη κατεύθυνση, καθορίζεται όχι μόνο από τα επιμέρους χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου, αλλά και από την απόσταση μεταξύ των στοιχείων, μετρούμενη σε μήκη κύματος, και από την (ενδεχόμενη) διαφορά φάσης ανάμεσα στα διάφορα σημεία τροφοδοσίας. Με την κατάλληλη τοποθέτηση των στοιχείων στη διάταξη, μπορούμε να δημιουργήσουμε ακυρώσεις και ενισχύσεις ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα η στοιχειοκεραία να εμφανίζει εξαιρετικά χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας. Κέρδη πολύ πάνω από 50 δεν είναι ασυνήθιστα, ειδικά στο άνω όριο της ζώνης υψηλών συχνοτήτων. Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε μία στοιχειοκεραία για να επιτύχουμε ένα μη κατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, όπως με τις περιστροφικές (turnstile) στοιχειοκεραίες (Εικόνα 4.2(b)) που χρησιμοποιούνται στην εκπομπή τηλεόρασης. Γενικά πάντως οι HF στοιχειοκεραίες είναι πιο πιθανό να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί κατευθυντική συμπεριφορά παρά για τη δημιουργία μη κατευθυντικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας.

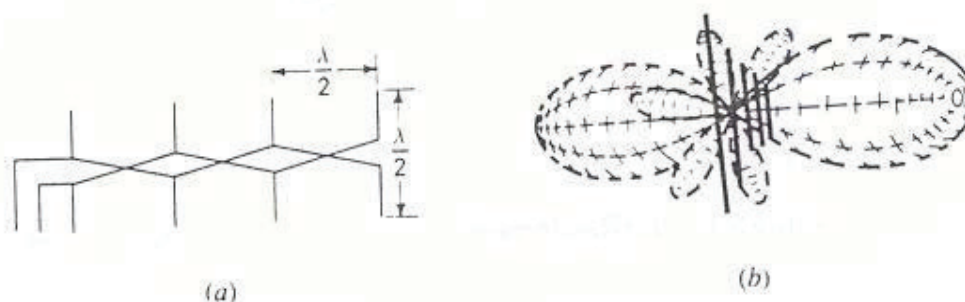
4.3.1.1 Παρασιτικά Στοιχεία

Δεν είναι απαραίτητο όλα τα στοιχεία μιας διάταξης διπόλων να συνδέονται με την έξοδο του πομπού, αν και παρατηρείται σε ένα αρκετά μεγάλο αριθμό στοιχειοκεραιών. Ένα στοιχείο που συνδέεται με τον πομπό ονομάζεται διεγερόμενο (driven) στοιχείο, ενώ ένα στοιχείο που δεν συνδέεται με τον πομπό ονομάζεται παρασιτικό (parasitic). Τα παρασιτικά στοιχεία λαμβάνουν ενέργεια μέσω του πεδίου επαγωγής που δημιουργείται από ένα διεγερόμενο στοιχείο, και όχι μέσω της απευθείας σύνδεσης στη γραμμή μεταφοράς. Γενικά, ένα παρασιτικό στοιχείο μεγαλύτερο από το διεγερόμενο και τοποθετημένο κοντά σε αυτό, μειώνει την ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος προς την κατεύθυνσή του και την αυξάνει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Συμπεριφέρεται παρόμοια με έναν κοίλο οπτικό καθρέφτη και ονομάζεται ανακλαστήρας (Εικόνα 4.2). Ένα παρασιτικό στοιχείο μικρότερο από το αντίστοιχο διεγερόμενο, από το οποίο λαμβάνει ενέργεια, τείνει να αυξήσει την ακτινοβολία προς την κατεύθυνσή του. Επομένως συμπεριφέρεται όπως ένας συγκλίνων κυρτός φακός και ονομάζεται κατευθυντήρας (director). Τα παραπάνω απεικονίζονται στην Εικόνα 4.2.

Το μεγαλύτερο μέρος των στοιχειοκεραιών αποτελείται συνήθως από δίπολα, σε συγκεκριμένα φυσικά σχήματα και διεγερόμενα με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τις απαιτήσεις.

4.3.1.2 Ευρύπλευρες ή Μετωπικές Στοιχειοκεραίες

Ενδεχομένως το απλούστερο είδος στοιχειοκεραίας είναι αυτή η οποία αποτελείται από διάφορα δίπολα ίσου μεγέθους, τοποθετημένα σε ίσα διαστήματα πάνω σε μια ευθεία γραμμή (collinear), με όλα τα δίπολα να τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή και με την ίδια φάση. Αυτή η διάταξη είναι γνωστή ως ευρύπλευρη ή μετωπική στοιχειοκεραία (broadside array) και απεικονίζεται στην Εικόνα 4.3, μαζί με το διάγραμμα ακτινοβολίας της.



Εικόνα 4.3 - (α) Ευρύπλευρη στοιχειοκεραία και (β) διάγραμμα ακτινοβολίας

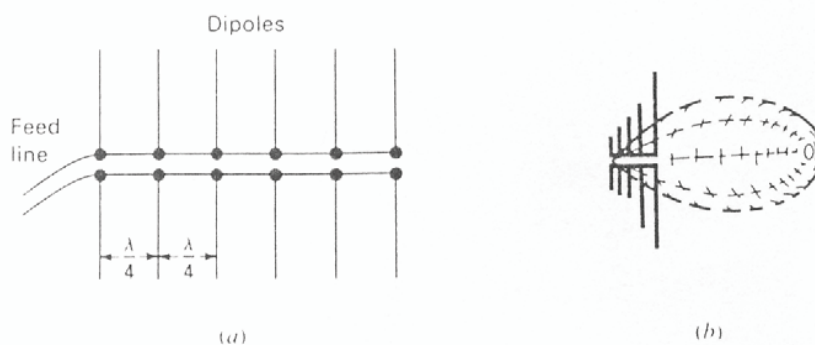
Οι ευρύπλευρες ή μετωπικές στοιχειοκεραίες είναι ισχυρά κατευθυντικές σε γωνίες ορθές ως προς το επίπεδο της στοιχειοκεραίας, εκπέμποντας ελάχιστα στο επίπεδό της. Το όνομα προέρχεται από το ναυτικό όρο broadside. Εάν θεωρήσουμε κάποιο σημείο κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στο επίπεδο της στοιχειοκεραίας, φαίνεται ότι αυτό το απόμακρο σημείο απέχει σχεδόν εξ ίσου από όλα τα δίπολα της

στοιχειοκεραίας. Οι μεμονωμένες εκπομπές, ήδη αρκετά ισχυρές προς αυτή την κατεύθυνση, ενισχύονται περισσότερο. Στην κατεύθυνση του επιπέδου, εντούτοις, υπάρχει λίγη ακτινοβολία, επειδή τα δίπολα δεν ακτινοβολούν προς την κατεύθυνση στην οποία δείχνουν, αλλά και λόγω των ακυρώσεων στην κατεύθυνση της ευθείας που συνδέει το κέντρο. Αυτό συμβαίνει επειδή οποιοδήποτε απόμακρο σημείο στην ευθεία αυτή δεν απέχει εξίσου από όλα τα δίπολα, με αποτέλεσμα να αλληλοεξουδετερώνονται οι εκπομπές τους στην κατεύθυνση αυτή (ιδιαίτερα εάν η απόστασή ανάμεσά τους είναι $\lambda/2$, κάτι το οποίο παρατηρείται πολύ συχνά).

Τα τυπικά μήκη κεραιών στην περίπτωση των ευρύπλευρων στοιχειοκεραιών κυμαίνονται από 2 ως 10 μήκη κύματος, οι τυπικές αποστάσεις ανάμεσα στις κεραιές είναι $\lambda/2$ ή λ , και ντουζίνες στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία στοιχειοκεραία. Σημειώνουμε τέλος ότι οποιαδήποτε στοιχειοκεραία που είναι κατευθυντική κάθετα στο επίπεδο, έχει ευρύπλευρη ή μετωπική δράση.

4.3.1.3 Αξονικά Ακτινοβολούσες ή Ακροπυροδοτικές Στοιχειοκεραίες

Η φυσική διαρρύθμιση της ακροπυροδοτικής στοιχειοκεραίας (end-fire array) είναι σχεδόν η ίδια με αυτή της ευρύπλευρης στοιχειοκεραίας. Ενώ όμως τα όλα στοιχεία τροφοδοτούνται με το ίδιο πλάτος ρεύματος, η φάση δεν είναι η ίδια, δηλαδή υπάρχει μια διαφορά φάσης μεταξύ των ρευμάτων που τροφοδοτούν τα στοιχεία. Αυτό παρατηρείται προοδευτικά από τα αριστερά προς τα δεξιά στην Εικόνα 4.4, δεδομένου ότι υπάρχει μια καθυστέρηση φάσης μεταξύ των διαδοχικών στοιχείων, ίση σε hertz με την απόσταση μεταξύ τους σε μήκη κύματος. Το διάγραμμα ακτινοβολίας της ακροπυροδοτικής στοιχειοκεραίας είναι αρκετά διαφορετικό από αυτή της ευρύπλευρης στοιχειοκεραίας. Η μέγιστη ακτινοβολία επιτυγχάνεται στο επίπεδο της στοιχειοκεραίας, όχι κάθετα σε αυτό, και η κεραία είναι μονοκατευθυντική παρά δικατευθυντική. Σημειώνουμε τέλος ότι οποιαδήποτε στοιχειοκεραία με την διαρρύθμιση της ακροπυροδοτικής, εμφανίζει ακροπυροδοτική συμπεριφορά.



Εικόνα 4.4 - (α) Ακροπυροδοτική στοιχειοκεραία και (β) διάγραμμα ακτινοβολίας

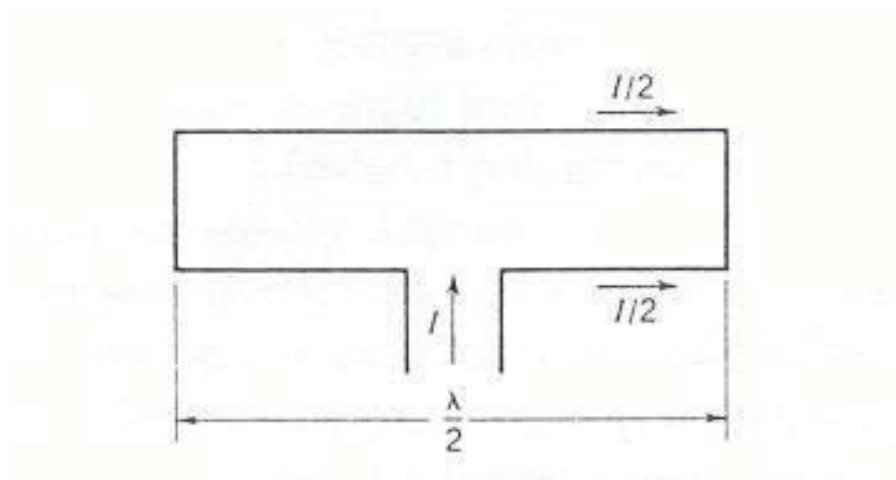
Δεν υπάρχει ακτινοβολία σε γωνίες κάθετες στο επίπεδο της στοιχειοκεραίας λόγω ακυρώσεων. Ένα σημείο πάνω σε μια ευθεία κάθετη στο επίπεδο της στοιχειοκεραίας ισαπέχει από όλα τα στοιχεία, αλλά τώρα το πρώτο και το τρίτο δίπολο τροφοδοτούνται με διαφορετική φάση και επομένως ακυρώνουν το ένα την εκπομπή του άλλου, όπως επίσης το δεύτερο με το τέταρτο δίπολο, κ.ο.κ. Με τη συνηθισμένη απόσταση ανάμεσα στα δίπολα ($\lambda/4$ ή $3\lambda/4$), όχι μόνο θα υπάρχει ακύρωση κάθετα στο επίπεδο της στοιχειοκεραίας, όπως περιγράφηκε, αλλά και προς την κατεύθυνση από δεξιά προς τα αριστερά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10. Όχι μόνο είναι το πρώτο δίπολο κοντύτερα κατά $\lambda/4$ σε κάποιο απόμακρο σημείο προς αυτή την κατεύθυνση (έτσι ώστε η ακτινοβολία του να προηγείται κατά 90 μοίρες αυτής του δεύτερου δίπολου), αλλά επίσης προηγείται του δεύτερου δίπολου κατά 90 μοίρες, λόγω της μεθόδου τροφοδοσίας. Οι ακτινοβολίες από τα πρώτα δύο δίπολα θα είναι κατά 180 μοίρες εκτός φάσης σε αυτή την κατεύθυνση και θα ακυρώνονται, όπως επίσης αυτές του τρίτου και τέταρτου δίπολου, κ.ο.κ. Στην κατεύθυνση από αριστερά προς δεξιά, η φυσική διαφορά φάσης ανάμεσα στα δίπολα δημιουργείται από τη διαφορά φάσης της τροφοδοσίας τους. Άρα έχουμε ενίσχυση της ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα ισχυρή μονοκατευθυντική ακτινοβολία.

Τόσο οι ακροπυροδοτικές όσο και οι ευρύπλευρες στοιχειοκεραίες ονομάζονται γραμμικές. Και οι δύο είναι συντονισμένες αφού αποτελούνται από συντονισμένα στοιχεία. Παρομοίως, όπως και οποιοδήποτε συντονισμένο κύκλωμα υψηλού Q, και οι δύο στοιχειοκεραίες έχουν στενό εύρος ζώνης, το οποίο καθιστά και τις δύο ιδιαίτερα κατάλληλες για μετάδοση μονής συχνότητας, αλλά όχι και τόσο χρήσιμες για λήψη, όπου απαιτείται γενικά η δυνατότητα να λαμβάνουμε σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

4.3.2 Αναδιπλωμένο Δίπολο και Εφαρμογές

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5, το αναδιπλωμένο δίπολο (folded dipole) είναι μια ενιαία κεραία αποτελούμενη από δύο στοιχεία. Το πρώτο τροφοδοτείται απευθείας, ενώ το δεύτερο είναι συζευγμένο επαγωγικά στις άκρες. Το διάγραμμα ακτινοβολίας του αναδιπλωμένου δίπολου είναι ίδιο με αυτό ενός ευθυγραμμισμένου δίπολου, αλλά η εμπέδηση εισόδου του είναι μεγαλύτερη. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί αν παρατηρήσουμε (Εικόνα 4.5) ότι εάν το συνολικό ρεύμα εισόδου είναι I και οι δύο βραχίονες έχουν ίσες διαμέτρους, τότε το ρεύμα σε κάθε βραχίονα είναι I/2. Εάν αυτό ήταν ένα ευθυγραμμισμένο δίπολο, το συνολικό ρεύμα θα διέρρεε τον πρώτο (και μοναδικό) βραχίονα. Τώρα εφαρμόζοντας την ίδια ισχύ, μόνο το μισό ρεύμα ρέει στον πρώτο βραχίονα, και έτσι η σύνθετη αντίσταση εισόδου είναι τέσσερις φορές εκείνη του ευθυγραμμισμένου δίπολου. Ως εκ τούτου, $R_r = 4 \times 72 = 288 \Omega$ για ένα αναδιπλωμένο δίπολο ημίσεος κύματος με ίσης διαμέτρου βραχίονες.

Εάν χρησιμοποιούνται στοιχεία άνισων διαμέτρων, τότε είναι εφαρμόσιμοι λόγοι μετασχηματισμού από 1.5 έως 25, και εάν απαιτούνται μεγαλύτεροι λόγοι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι βραχίονες. Αν και το αναδιπλωμένο δίπολο έχει το ίδιο διάγραμμα ακτινοβολίας με το συνηθισμένο δίπολο, εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα: υψηλότερη σύνθετη αντίσταση εισόδου, μεγαλύτερο εύρος ζώνης, καθώς και ευκολία και μικρό κόστος κατασκευής και προσαρμογής της σύνθετης αντίστασης.



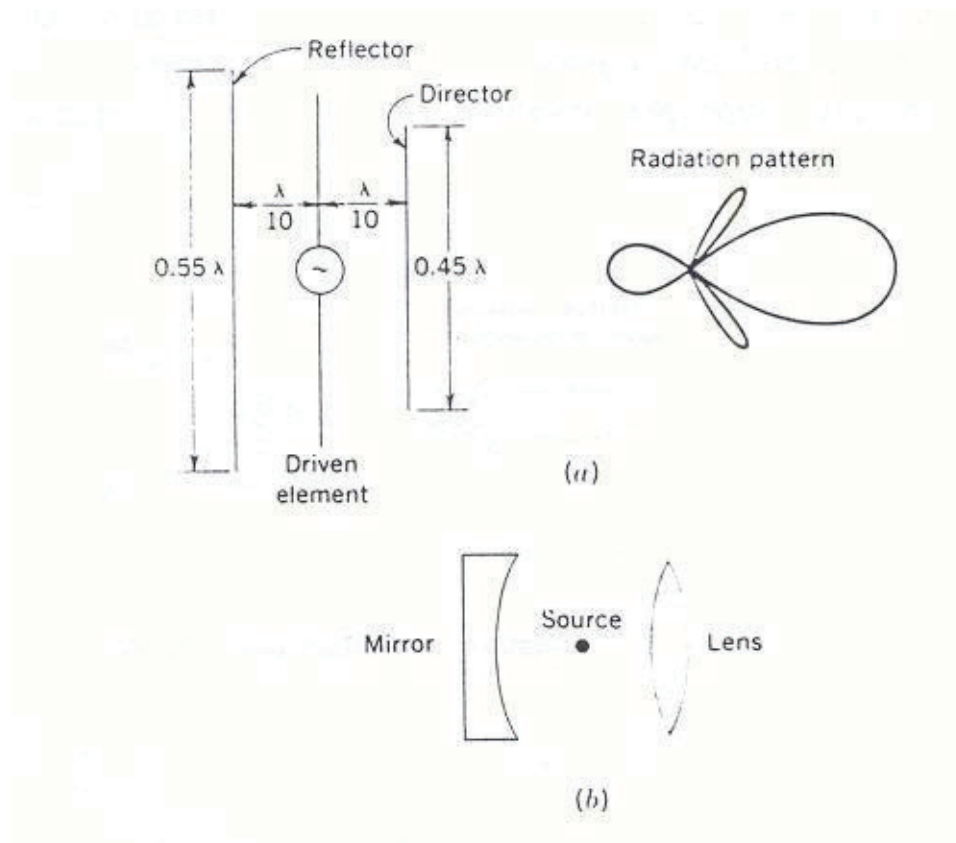
Εικόνα 4.5 - Αναδιπλωμένο δίπολο

4.3.2.1 Η Κεραία Yagi-Uda

Η κεραία Yagi-Uda είναι μία στοιχειοκεραία η οποία αποτελείται από ένα διεγερόμενο στοιχείο και ένα ή περισσότερα παρασιτικά στοιχεία. Αυτά είναι τοποθετημένα επί μιας ευθείας γραμμής και κοντά το ένα στο άλλο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6, μαζί με το αντίστοιχο σύστημα στην οπτική και το διάγραμμα ακτινοβολίας.

Δεδομένου ότι είναι σχετικά μονοκατευθυντική, όπως φαίνεται από τη μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας, και έχει ένα μέτριο κέρδος στην περιοχή των 7dB, η κεραία Yagi-Uda χρησιμοποιείται ως HF κεραία εκπομπής. Επίσης χρησιμοποιείται σε υψηλότερες συχνότητες, κυρίως σαν μια VHF κεραία λήψης τηλεόρασης. Ο οπίσθιος λοβός της Εικόνας 4.6(b) μπορεί να ελαττωθεί, και έτσι ο λόγος front-to-back της κεραίας μπορεί να βελτιωθεί, φέρνοντας τα ακτινοβολούντα στοιχεία πλησιέστερα. Αυτό, όμως, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της σύνθετης αντίστασης εισόδου της στοιχειοκεραίας. Τελικά η απόσταση που φαίνεται στο σχήμα (**0,1λ**) είναι η βέλτιστη τιμή.

Η ακριβής επίδραση του παρασιτικού στοιχείου εξαρτάται από την απόστασή του και την ρύθμισή του, δηλ. από το μέγεθος και τη φάση του ρεύματος που επάγεται σε αυτό. Όπως αναφέρθηκε ήδη, ένα παρασιτικό στοιχείο συντονισμένο σε μια χαμηλότερη συχνότητα από το διεγερόμενο στοιχείο, (δηλ. μεγαλύτερο σε μήκος) θα συμπεριφερθεί ως ήπιος ανακλαστήρας, ενώ ένα μικρότερο σε μήκος παρασιτικό στοιχείο θα ενεργήσει ως ήπιος κατευθυντήρας της ακτινοβολίας. Καθώς ένα παρασιτικό στοιχείο τοποθετείται όλο και πιο κοντά στο διεγερόμενο στοιχείο, θα προσθέσει περισσότερο φορτίο στο διεγερόμενο στοιχείο και θα μειώσει τη σύνθετη αντίσταση εισόδου του. Αυτός είναι ίσως ο βασικός λόγος για την τόσο συχνή χρησιμοποίηση του αναδιπλωμένου δίπολου ως το διεγερόμενο στοιχείο μιας τέτοιας στοιχειοκεραίας.



Εικόνα 4.6 - Yagi κεραία (α) Κεραία και διάγραμμα ακτινοβολίας (β) οπτικό ισοδύναμο

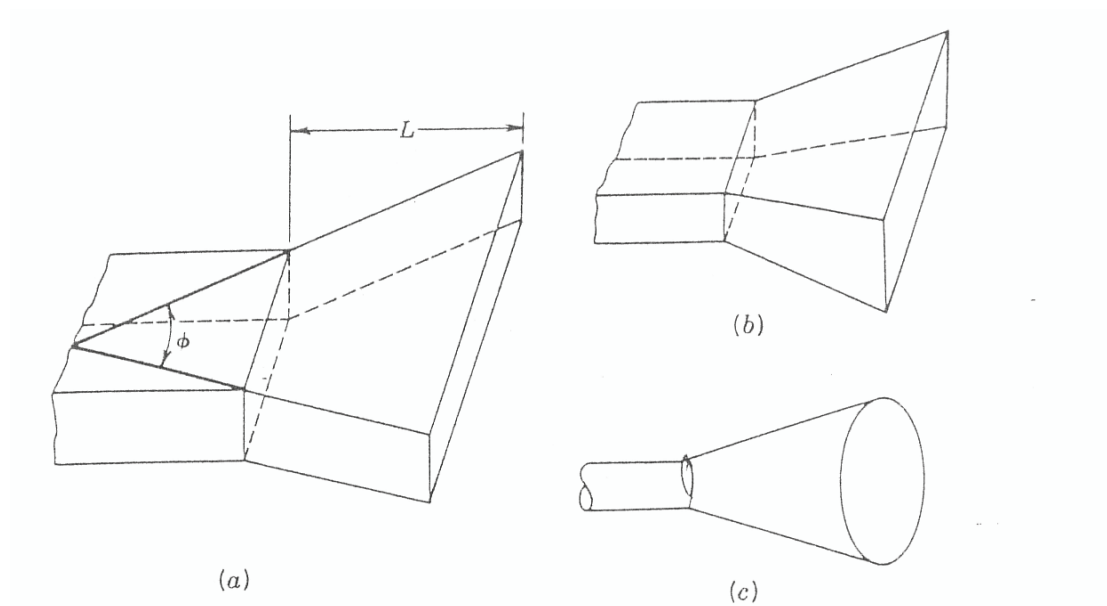
Η κεραία Yagi-Uda κατά γενική ομολογία δεν έχει υψηλό κέρδος, αλλά είναι πολύ συμπαγής, σχετικά ευρείας ζώνης, λόγω της χρήσης του αναδιπλωμένου δίπολου, και έχει ένα αρκετά καλό μονοκατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας. Στην πράξη, η κεραία αυτή έχει έναν ανακλαστήρα και μερικούς κατευθυντήρες που είναι είτε ίσου μήκους είτε με μήκος που μειώνεται ελαφρώς όσο απομακρυνόμαστε από το διεγερόμενο στοιχείο. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι το αναδιπλωμένο δίπολο, μαζί με μια ή δύο άλλες κεραίες, ονομάζεται μερικές φορές κεραία υπερκέρδους (supergain antenna), λόγω του καλού κέρδους και εύρους δέσμης ακτινοβολίας που εμφανίζει ανά μονάδα επιφανείας της στοιχειοκεραίας.

4.4 Κεραίες Χοάνης

Ένας κυματοδηγός μπορεί να ακτινοβολεί ενέργεια σε ανοιχτό χώρο αν διεγείρεται κατάλληλα στο ένα του άκρο και είναι ανοιχτός στο άλλο. Αυτή η ακτινοβολία είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που παίρνουμε από μία δισύρματη γραμμή μεταφοράς, όπως περιγράφηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, αλλά παρουσιάζει παρόμοιες δυσκολίες. Μόνο ένα μικρό ποσοστό της εμπρόσθιας ενέργειας στον κυματοδηγό εκπέμπεται, και ένα μεγάλο μέρος της ανακλάται προς τα πίσω από το ανοιχτό κύκλωμα. Όπως και με την γραμμή μεταφοράς, το ανοιχτό κύκλωμα αποτελεί μία ασυνέχεια, η οποία δεν προσαρμόζει καλά τον κυματοδηγό στον χώρο. Περιθλάσεις στις άκρες καθιστούν το διάγραμμα ακτινοβολίας μη κατευθυντικό. Για να αντιμετωπίσουμε αυτά τα προβλήματα, μπορούμε να μεγαλώσουμε το άνοιγμα του κυματοδηγού, όπως κάναμε και με την γραμμή μεταφοράς, αλλά αυτή τη φορά προκύπτει μια ηλεκτρομαγνητική χοάνη αντί για ένα δίπολο.

4.4.1 Βασικές Χοάνες

Όταν ένας κυματοδηγός τερματίζεται από μία χοάνη, όπως αυτές που φαίνονται στην Εικόνα 4.7, η απότομη ασυνέχεια που υπήρχε ως τώρα, αντικαθίσταται από μία σταδιακή αλλαγή. Δεδομένου ότι η ρύθμιση της σύνθετης αντίστασης είναι σωστή, όλη η ενέργεια που φεύγει προς τα μπροστά από τον κυματοδηγό θα ακτινοβολείται. Επιπλέον θα βελτιωθεί και η κατευθυντικότητα, ενώ θα μειωθούν και οι περιθλάσεις.



Εικόνα 4.7 - Κεραίες Χοάνης (α) Τομέας, (b) πυραμοειδής, (c) κωνική

Υπάρχουν αρκετοί δυνατοί τύποι χοανών: τρεις από τις πιο συνηθισμένες χοάνες παρουσιάζονται εδώ. Η χοάνη τομέα (sectoral horn) εκπέμπει σε μία μόνο κατεύθυνση και είναι ισοδύναμη με τον pillbox παραβολικό ανακλαστήρα. Η πυραμοειδής χοάνη (pyramidal horn) είναι μια δικάτευθυντική κεραία και έχει το σχήμα κόλυρης πυραμίδας. Η κωνική χοάνη (conical horn) είναι παρόμοια με την πυραμοειδή και αποτελεί ένα λογικό τερματισμό για τους κυκλικούς κυματοδηγούς.

Αν η γωνία εκπομπής φ είναι τόσο μικρή, οδηγώντας σε μία ρηχή χοάνη, το μέτωπο του κύματος θα είναι σφαιρικό και όχι επίπεδο, και η δέσμη ακτινοβολίας δεν θα είναι κατευθυντική. Το ίδιο ισχύει και για τις δύο γωνίες εκπομπής της πυραμοειδούς χοάνης. Αν η γωνία φ είναι πολύ μικρή, το ίδιο μικρό θα είναι και το στόμιο της χοάνης, και η κατευθυντικότητα θα υποφέρει για μια ακόμα φορά (είναι πολύ πιθανά φαινόμενα διαθλάσεως). Είναι λοιπόν φανερό ότι η γωνία εκπομπής έχει μία βέλτιστη τιμή, η οποία σχετίζεται στενά με το μήκος L , που σημειώνεται στην Εικόνα 53(α), εκφρασμένο σε μήκη κύματος.

Στην πράξη, η γωνία φ κυμαίνεται από 40 μοίρες όταν $L/\lambda = 6$ με το εύρος δέσμης ακτινοβολίας στο επίπεδο της χοάνης να είναι 66 μοίρες και το μέγιστο κέρδος κατευθυντικότητας να είναι 40, μέχρι τις 15 μοίρες όταν $L/\lambda = 50$, όπου το εύρος δέσμης ακτινοβολίας είναι 23 μοίρες και το κέρδος είναι 120. Η χρήση πυραμοειδούς ή κωνικής χοάνης βελτιώνει την συνολική κατευθυντικότητα γιατί η εκπομπή γίνεται τώρα σε περισσότερες από μία κατευθύνσεις. Στην περίπτωση των παραβολικών ανακλαστήρων το παραπάνω δεν είναι πάντα απαραίτητο. Η κεραία χοάνης δεν είναι τόσο κατευθυντική, όσο μία κεραία με παραβολικό ανακλαστήρα, αλλά έχει αρκετά καλή κατευθυντικότητα, ένα ικανοποιητικό εύρος ζώνης (στην περιοχή του 10%) και απλή μηχανική κατασκευή. Η συγκεκριμένη κεραία χρησιμοποιείται πολύ συχνά μαζί με κυματοδηγούς. Απλές χοάνες όπως αυτές που απεικονίζονται στην Εικόνα 4.7 (ή με εκθετικές αντί για επίπεδες πλευρές) χρησιμοποιούνται συχνά είτε μόνες τους, είτε ως πρωταρχικές κεραίες εκπομπής για παραβολοειδείς ανακλαστήρες.

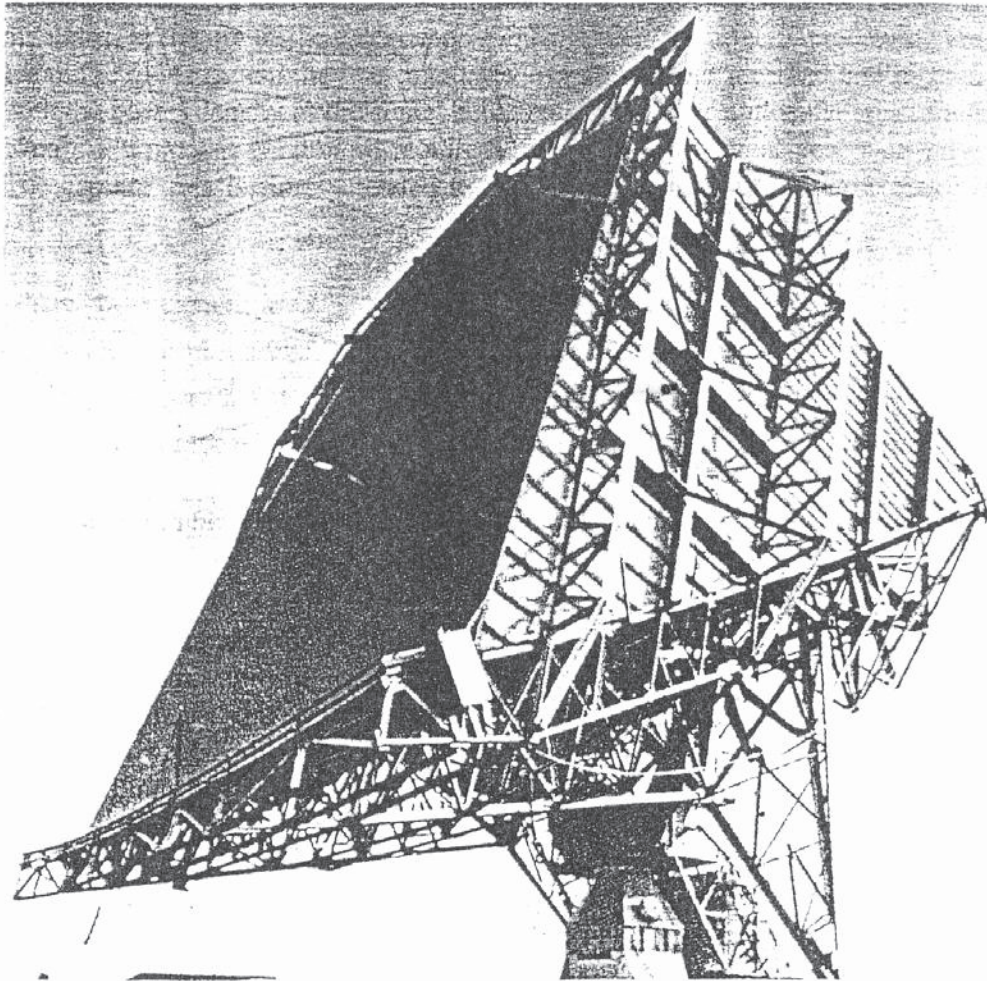
Ορισμένες συνθήκες υπαγορεύουν την χρήση μίας κοντής, ρηχής χοάνης, όπου το μέτωπο του εκπεμπόμενου κύματος είναι κυρτό, και όχι επίπεδο όπως θεωρήθηκε μέχρι τώρα. Όταν κάτι τέτοιο δεν μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιείται ένας διηλεκτρικός φακός για να διορθωθεί η κυρτότητα.

4.4.2 Ειδικές Χοάνες

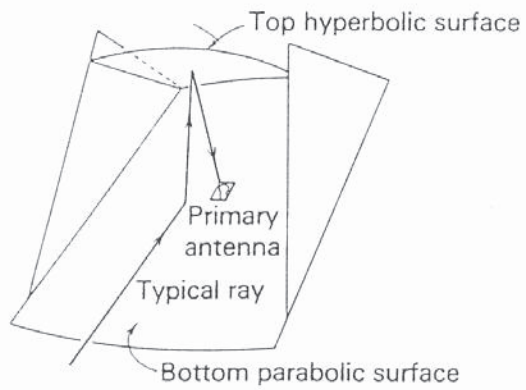
Υπάρχουν δύο κεραίες σε χρήση που είναι σχετικά δύσκολο να τις κατατάξουμε, αφού κάθε μία αποτελεί διασταύρωση μεταξύ μίας χοάνης και ενός παραβολικού ανακλαστήρα. Πρόκειται για την Cass χοάνη και την τριπλά αναδιπλούμενη χοάνη ανακλαστήρα, η τελευταία αποκαλείται συχνότερα τοξοειδής χοάνη.

Στην Cass-χοάνη κεραία, τα ραδιοκύματα συλλέγονται από μια μεγάλη επιφάνεια βάσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8, η οποία είναι ελαφρά (παραβολικά) κυρτή και ανακλώνται προς τα πάνω σε γωνία 45 μοίρες. Όταν χτυπήσουν την πάνω επιφάνεια, η οποία είναι ένας μεγάλος υπερβολικός κύλινδρος, ανακλώνται προς τα κάτω στην εστία, η οποία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8(b), βρίσκεται στο κέντρο της επιφάνειας της βάσης. Εκεί, οι ακτίνες συλλέγονται από την κωνική χοάνη που είναι τοποθετημένη στην εστία. Στην περίπτωση της εκπομπής συμβαίνουν τα ακριβώς αντίθετα.

Αυτός ο τύπος της κεραίας χοάνης-ανακλαστήρα έχει κέρδος και εύρος δέσμης συγκρίσιμο με αυτό ενός παραβολοειδούς ανακλαστήρα της ίδιας διαμέτρου. Όπως και το Cassegrain feed, από το οποίο πήρε και το όνομά του, η Cass- χοάνη έχει τέτοια γεωμετρία που επιτρέπει την τοποθέτηση του δέκτη (ή του πομπού) στην εστία, χωρίς εμπόδια. Πρόκειται λοιπόν για μια κεραία χαμηλού θορύβου που χρησιμοποιείται στην παρακολούθηση δορυφόρων και επικοινωνιακών σταθμών. Η κεραία που απεικονίζεται στην Εικόνα 4.8 προέρχεται από έναν τέτοιο σταθμό στην Δυτική Αυστραλία.



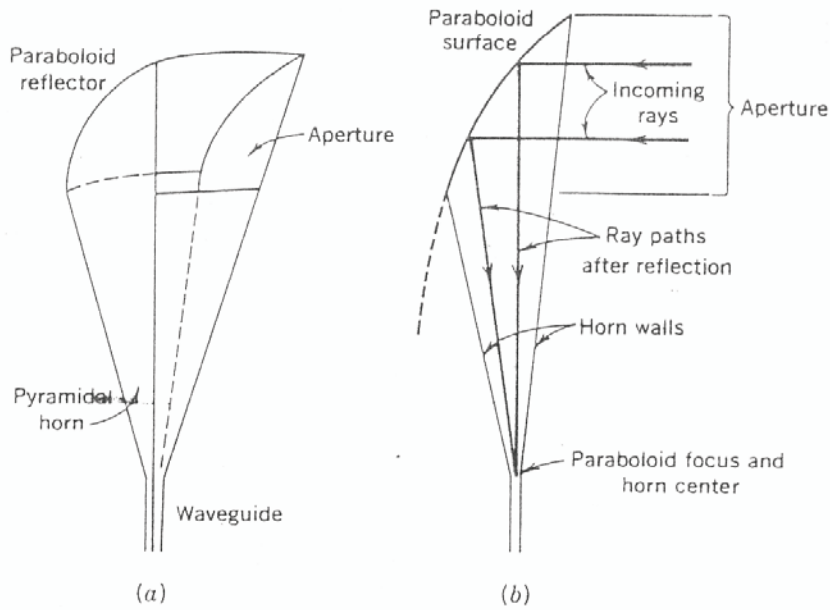
(a)



(b)

Εικόνα 4.8 - Cass-horn κεραία (a) Cass-horn κεραία για δορυφορικές επικοινωνίες (Courtesy of Overseas Telecommunications Commission, Australia), (b) τροφοδότηση της Cass-horn κεραίας

Η τοξοειδής κεραία της Εικόνας 4.9 αποτελεί έναν άλλον συνδυασμό παραβολοειδούς και χοάνης. Πρόκειται για μια χαμηλού-θορύβου μικροκυματική κεραία, όπως και η Cass-χοάνη, και έχει παρόμοιες εφαρμογές. Αποτελείται από έναν παραβολικό κύλινδρο ενωμένο με μία πυραμοειδή χοάνη, με ακτίνες που πηγάζουν από, ή λαμβάνονται στην κορυφή της χοάνης. Ένα από τα πλεονεκτήματα της τοξοειδούς χοάνης έγκειται στο ότι το σημείο λήψεως δεν μετακινείται όταν η κεραία περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της.



Εικόνα 4.9 - Τοξοειδής χοάνη (α) Όψη, (b) διαδρομές ακτινών

Κεφάλαιο 5. Πειραματικό Μέρος

5.1 Κατασκευή Κυματοδηγού

Για την κατασκευή του κυματοδηγού [10] χρησιμοποιήσαμε τις παρακάτω μικροσυσκευές:

- 1 Gunn oscillator: OSG 100
- 1 ferrite isolator: ISO 100
- 1 PIN modulator: MOD 100
- 1 calibrated attenuator: ATC 100
- 1 measurement sensor: DEL 100
- 1 slotted line: LAF 100
- 1 matched load: CHG 100

Ο κυματοδηγός αποτελείται από 4 τμήματα.

Το πρώτο τμήμα αποτελείται από τη πηγή (OSG 100, ISO 100, MOD 100). Ο ταλαντωτής OSG 100 παράγει το μικροκύμα και ρυθμίζεται από το διαμορφωτή MOD 100. Ο μονωτής ISO 100 τοποθετείται ανάμεσα στο ταλαντωτή και στο διαμορφωτή αποτρέποντας τις παραλλαγές φορτίων που προκαλούνται από την αντίδραση στο ταλαντωτή.

Το δεύτερο τμήμα αποτελείται από τον εξασθενητή (ATC 100). Ο εξασθενητής ATC 100 ελέγχει το επίπεδο των εισροών και επιτρέπει τις μετρήσεις μείωσης που πρέπει να γίνουν.

Το τρίτο τμήμα αποτελείται από το κινούμενο δέκτη (LAF 100) και ένα προσαρτημένο επάνω στον δέκτη αισθητήρα μέτρησης (DEL 100). Η γραμμή LAF 100 χρησιμοποιείται για το καθορισμό του SWR (Standing Wave Ratio) και την μέγιστη - ελάχιστη θέση ηλεκτρικών πεδίων στον κυματοδηγό.

Το τέταρτο τμήμα αποτελείται από το τερματισμό ισοδύναμου φορτίου (CHG 100).



Εικόνα 5.1 - Κυματοδηγός



Εικόνα 5.2 – Κυματοδηγός (2)

5.2 Τροφοδοτικό

Το τροφοδοτικό δίνει μία τάση. Διεγείρει τη κρυσταλλοδίοδο εκπομπή της πηγής και η πηγή εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.



Εικόνα 5.3 - Τροφοδοτικό

5.3 Παλμογράφος

Ο παλμογράφος [11] είναι ένα πολύ χρήσιμο όργανο για τη μελέτη της λειτουργίας των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Χρησιμοποιείται κυρίως για την απεικόνιση τάσεων που εμφανίζονται σε διάφορα σημεία ενός κυκλώματος, και με τη βοήθειά του μπορούν να μετρηθούν χαρακτηριστικά μεγέθη αυτών. Ενδεικτικά αναφέρουμε το πλάτος, τη συχνότητα, τη διαφορά φάσης σε σχέση με μία άλλη τάση κ.λ.π. Επίσης, ο παλμογράφος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη έμμεση (νόμος Ohm) μέτρηση ρευμάτων που διαρρέουν ένα κύκλωμα.



Εικόνα 5.4 – Παλμογράφος



Εικόνα 5.5 - Παλμογράφος, Κυματοδηγός, Τροφοδοτικό

5.4 Προσδιορισμός του μήκους κύματος (λ)

Θεωρήσαμε $f_{\text{πηγής}} = 9\text{GHz}$. Γνωρίζοντας τον τύπο $c = \lambda \times f$ μπορούμε να υπολογίσουμε το λ . Επομένως

$$c = \lambda \times f \Rightarrow 3 \times 10^8 = \lambda \times 9 \times 10^9 \Rightarrow \lambda = \frac{1}{3} \times 10^{-1} \text{m} = 3,3\text{cm} \text{ ή } 3,3 \times 10^{-2} \text{m}$$

Για να υπολογίσουμε το λ πρέπει να βρούμε τα σήματα στα οποία έχουμε κοιλίες και δεσμούς. Επομένως,

10,5 κοιλία	1,35 Volt
9,5 δεσμός	1 Volt
8,6 κοιλία	1,4 Volt
7,7 δεσμός	1 Volt
6,8 κοιλία	1,4 Volt
5,9 δεσμός	1 Volt

Παίρνουμε και αφαιρούμε την 1^η κοιλία με τον 1^ο δεσμό, τον 1^ο δεσμό με την 2^η κοιλία και την 2^η κοιλία με τον 2^ο δεσμό και έχουμε

$$\frac{10,5 - 9,5 + 9,5 - 8,6 + 8,6 - 7,7}{3} = \frac{1 + 0,9 + 0,9}{3} = \frac{2,8}{3} = 0,93$$

Ξέρουμε ότι η διαφορά ανάμεσα σε μία κοιλία και ένα δεσμό είναι $\frac{\lambda}{4}$, οπότε

$$0,93 = \frac{\lambda_{\pi}}{4} \Rightarrow \lambda_{\pi} = 3,72\text{cm}$$

Επομένως, το συμπέρασμα είναι ότι το πειραματικό λ_{π} που υπολογίσαμε είναι \approx με το δοθέν λ .

5.5 Μελέτη τεχνητής εξασθένησης σήματος (κοιλία)

Πήραμε ένα μέγιστο σήμα και το εξασθενίσαμε έναντι στη πηγή. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν απεικονίζονται παρακάτω:

dB	Εξασθένηση - dB	Πειραματικό - V_{out}	Θεωρητικό - V_{out}
0	0	1,4	1,4
1	-1	1,2	1,24
2	-2	0,95	1,11
3	-3	0,8	0,99
4	-4	0,7	0,88
5	-5	0,65	0,78
6	-6	0,55	0,70
7	-7	0,55	0,62
8	-8	0,5	0,55
9	-9	0,45	0,49
10	-10	0,4	0,44
11	-11	0,35	0,39
12	-12	0,3	0,35
13	-13	0,3	0,31
14	-14	0,25	0,27
15	-15	0,25	0,24
16	-16	0,25	0,22
17	-17	0,2	0,19
18	-18	0,15	0,17
19	-19	0,15	0,15
20	-20	0,1	0,14

Για να υπολογίσουμε το Θεωρητικό - V_{out} , χρησιμοποιήσαμε τον τύπο $L(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{V_1}{V_0}\right)$.

Οπότε για $\text{dB} = 0$ έχουμε $V_1 = V_0 = 1,4$

για $\text{dB} = 1$ έχουμε

$$L(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{V_1}{V_0}\right) \Rightarrow -1 = 20 \log\left(\frac{V_1}{1,4}\right) \Rightarrow \frac{-1}{20} = \log\left(\frac{V_1}{1,4}\right) \Rightarrow -0,05 = \log\left(\frac{V_1}{1,4}\right) \Rightarrow 10^{-0,05} = \frac{V_1}{1,4} \Rightarrow V_1 = 1,4 \times 0,89 \Rightarrow V_1 = 1,24$$

Όπως βλέπουμε από τον παραπάνω πίνακα, υπάρχει απόκλιση μεταξύ του Πειραματικού - V_{out} και του Θεωρητικού - V_{out} λόγω της αντίστασης της εξασθένησης.

Γνωρίζουμε ότι $P \sim \frac{V^2}{Z}$

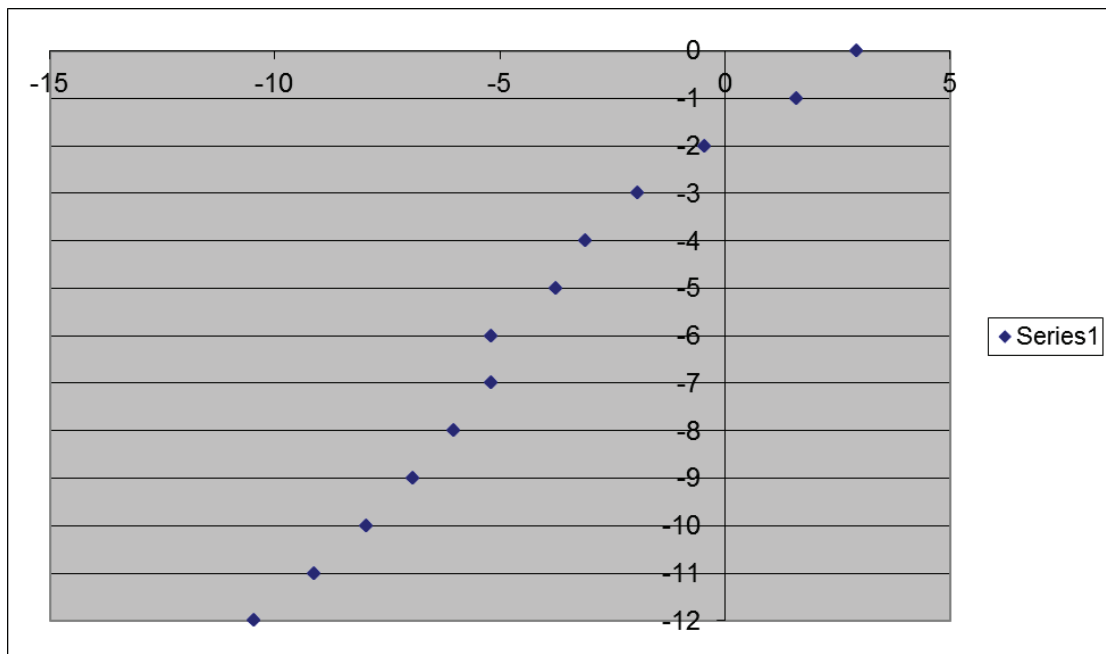
Επομένως έχουμε

$$L(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \Rightarrow L(\text{dB}) = 10 \log \frac{V_{\text{out}}^2}{Z P_{\text{in}}} \Rightarrow L(\text{dB}) = 10 \log \frac{V_{\text{out}}^2}{Z \times P_{\text{in}}} \Rightarrow L(\text{dB}) = 10[\log V_{\text{out}}^2 - 10 \log(Z \times P_{\text{in}})] \Rightarrow L(\text{dB}) = 20 \log V_{\text{out}} - 10 \log(Z \times P_{\text{in}})$$

Επίσης, πρέπει να βρούμε τη γραφική εξασθένιση σε σχέση με το **20 log Vout**

dB	Πειραματικό - Vout	Εξασθένιση - dB	20 log Vout
0	1,4	0	2,92
1	1,2	-1	1,58
2	0,95	-2	-0,44
3	0,8	-3	-1,93
4	0,7	-4	-3,09
5	0,65	-5	-3,74
6	0,55	-6	-5,19
7	0,55	-7	-5,19
8	0,5	-8	-6,02
9	0,45	-9	-6,93
10	0,4	-10	-7,95
11	0,35	-11	-9,11
12	0,3	-12	-10,45

Παρακάτω βλέπουμε τη γραφική παράσταση μεταξύ της Εξασθένισης – dB και του **20 log Vout**



Γνωρίζουμε όμως ότι $P_{in} = 4 - 5 \text{ mW}$

Οπότε συνεχίζοντας την προηγούμενη εξίσωση για $\text{dB} = 0$, $20 \log V_{out} = 1,8$ και για $P_{in} = 4.5 \text{ mW}$ έχουμε

$$\begin{aligned} 0 &= 1,8 - 10 \log(Z \times P_{in}) \Rightarrow -1,8 = -10 \log(Z \times P_{in}) \Rightarrow 1,8 = 10 \log(Z \times P_{in}) \\ &\Rightarrow \frac{1,8}{10} = \log(Z \times P_{in}) \Rightarrow 0,18 = \log(Z \times P_{in}) \Rightarrow Z \times P_{in} = 10^{0,18} \Rightarrow Z \\ &= \frac{1,51}{4,5 \times 10^{-3}} \Rightarrow Z = \frac{1.510}{4,5} \Rightarrow Z = 335 \Omega \end{aligned}$$

Από τη θεωρία ξέρουμε ότι $Z = 377 \Omega$. Επομένως βλέπουμε ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ του Θεωρητικού - Z και με του Z που υπολογίσαμε παραπάνω.

5.6 Μελέτη τεχνητής εξασθένησης σήματος (δεσμός)

Πήραμε ένα μέγιστο σήμα και το εξασθενίσαμε έναντι στη πηγή. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν απεικονίζονται παρακάτω:

dB	Εξασθένηση - dB	Πειραματικό - Vout	Θεωρητικό - Vout
0	0	0,8	0,8
1	-1	0,75	0,71
2	-2	0,65	0,63
3	-3	0,6	0,56
4	-4	0,5	0,5
5	-5	0,45	0,44
6	-6	0,4	0,4
7	-7	0,4	0,35
8	-8	0,35	0,31
9	-9	0,3	0,28
10	-10	0,3	0,25
11	-11	0,25	0,22
12	-12	0,2	0,2
13	-13	0,2	0,17
14	-14	0,2	0,15
15	-15	0,15	0,14
16	-16	0,15	0,12
17	-17	0,15	0,11
18	-18	0,1	0,1
19	-19	0,1	0,08
20	-20	0,05	0,08

Για να υπολογίσουμε το Θεωρητικό - **Vout**, χρησιμοποιήσαμε τον τύπο $L(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{V_1}{V_0}\right)$.

Οπότε για $\text{dB} = 0$ έχουμε $V_1 = V_0 = 0,8$

για $\text{dB} = 1$ έχουμε

$$\begin{aligned} L(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{V_1}{V_0}\right) \Rightarrow -1 &= 20 \log\left(\frac{V_1}{0,8}\right) \Rightarrow \frac{-1}{20} = \log\left(\frac{V_1}{0,8}\right) \Rightarrow -0,05 = \log\left(\frac{V_1}{0,8}\right) \\ \Rightarrow 10^{-0,05} &= \frac{V_1}{0,8} \Rightarrow V_1 = 0,8 \times 0,89 \Rightarrow V_1 = 0,71 \end{aligned}$$

Όπως βλέπουμε από τον παραπάνω πίνακα, υπάρχει απόκλιση μεταξύ του Πειραματικού - **Vout** και του Θεωρητικού - **Vout** λόγω της αντίστασης της εξασθένησης.

5.7 Τελικά Συμπεράσματα

Το συμπέρασμα είναι οι μετρήσεις που κάναμε ήταν αρκετά καλές, αφού δεν έχουν μεγάλη διαφορά με τη θεωρία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Paolo Vecchia, Rüdiger Matthes, Gunde Ziegelberger James Lin, Richard Saunders, Anthony Swerdlow, “Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz)”
2. Εθνική επιτροπή ταχυδρομείων και τηλεπικοινωνιών
3. H. Sizun, “Radiowave propagation for Telecommunications Applications”, Springer, 2003
4. Σ. Κωτσόπουλος, “Διάδοση Κυμάτων & Σχεδίαση Κεραιών”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003
5. Γ. Αλεξίου, “Ασύρματα ηλεκτρονικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα”, Πανεπιστήμιο Πατρών
6. Ron Schmitt. Electromagnetics Explained. Elsevier Science, 2002
7. Γ. Αλεξίου, “Ασύρματα ηλεκτρονικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα”, Πανεπιστήμιο Πατρών
8. Hung-Jui Lam, “UWB Antenna in Coplanar Technology”, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Victoria, 2005
9. Γ. Αλεξίου, “Ασύρματα ηλεκτρονικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα”, Πανεπιστήμιο Πατρών
10. ORITEL, “Experimentation manual”, της Chauvin Arnoux
11. Model V-423(R)/V-223 Oscilloscope Operation Manual, Hitachi Denshi, Ltd.