

---

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

---

Διδακτικές Σημειώσεις

## **Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας**

### **Α' Μέρος**

*Συγγραφείς:*

*Δάφνη-Σταυρούλα Ζώη, Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια ΤΜΗΥΠ*

*Γεώργιος Ρουμेलιώτης, Μεταπτυχιακός Φοιτητής ΤΜΗΥΠ*

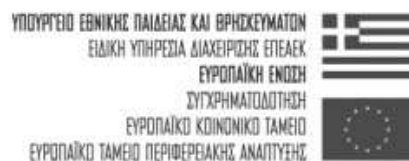
*Βασίλειος Κεκάτος, Διδάσκων Π.Δ.407/80 ΤΜΗΥΠ*

*Κωνσταντίνος Μπερμπερίδης, Καθηγητής ΤΜΗΥΠ*

Πάτρα, 16 Μαΐου 2008

---

Οι παρούσες διδακτικές σημειώσεις προετοιμάστηκαν στα πλαίσια της αναμόρφωσης του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, που χρηματοδοτείται από το 2<sup>ο</sup> Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης (ΕΠΕΑΕΚ II) του Υπουργείου Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων.



# Πρόλογος

Οι σημειώσεις αυτές αποτελούν μέρος του διδακτικού υλικού του μαθήματος 'Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας'. Συγκεκριμένα, αναφέρονται σε θέματα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, γραμμών μεταφοράς και βασικές αρχές κεραιών που περιλαμβάνονται στο Α' Μέρος του μαθήματος. Η υπόλοιπη ύλη του Α' Μέρους του μαθήματος καλύπτεται από το σύγγραμμα [1] που διανέμεται για το μάθημα.

Στόχος, τόσο των σημειώσεων αυτών, όσο και του μαθήματος γενικότερα, δεν είναι η πλήρης παρουσίαση των παραπάνω θεμάτων. Άλλωστε το γνωστικό αντικείμενο του μαθήματος είναι ιδιαίτερα ευρύ. Στόχος του μαθήματος είναι να δώσει στο μηχανικό ηλεκτρονικών υπολογιστών και πληροφορικής μια σφαιρική αντίληψη των βασικών αρχών της ασύρματης μετάδοσης. Μια τέτοια διαισθητική αντίληψη αποτελεί την προαπαιτούμενη βάση για την καλύτερη κατανόηση της τεχνολογίας των ασύρματων τηλεπικοινωνιών και δικτύων. Ο αναγνώστης που ενδιαφέρεται να εμβαθύνει περισσότερο στα παραπάνω θέματα, παραπέμπεται στη βιβλιογραφία που δίνεται στο τέλος των σημειώσεων, η οποία αποτέλεσε και τη βάση για τη δημιουργία των σημειώσεων αυτών.

Δεδομένου ότι το μάθημα 'Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας' εισήχθηκε πρόσφατα στο πρόγραμμα σπουδών του τμήματος, οι σημειώσεις αυτές αποτελούν μια πρώτη προσπάθεια συγκέντρωσης, ταξινόμησης και παρουσίασης του σχετικού υλικού. Έτσι, ενδεχομένως να περιέχουν σφάλματα, ασάφειες ή ελλείψεις. Κάθε παρατήρηση και σχόλιο για μελλοντική διόρθωση είναι ευπρόσδεκτο από τους συγγραφείς.

Οι συγγραφείς,  
Πάτρα, 16 Μαΐου 2008



# Περιεχόμενα

<b>Πρόλογος</b>	<b>i</b>
<b>Περιεχόμενα</b>	<b>iii</b>
<b>1 Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων</b>	<b>3</b>
1.1 Εισαγωγή . . . . .	3
1.1.1 Χαρακτηριστικά του Κύματος . . . . .	4
1.1.2 Θεμελιώδη Θέματα ΗΜ Κυμάτων . . . . .	5
1.1.3 Κύματα σε Ελεύθερο Χώρο . . . . .	6
1.1.4 Ακτινοβολία, Πόλωση και Λήψη . . . . .	8
1.2 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα . . . . .	10
1.3 Φαινόμενα κατά τη Μετάδοση ΗΜ Κυμάτων . . . . .	11
1.3.1 Ανάκλαση . . . . .	12
1.3.2 Διάθλαση . . . . .	13
1.3.3 Περίθλαση . . . . .	15
1.3.4 Σκέδαση ή Διασκορπισμός . . . . .	17
1.3.5 Φαινόμενο Doppler . . . . .	17
1.4 Σύνθεση Ατμόσφαιρας . . . . .	19
1.4.1 Τροπόσφαιρα . . . . .	20
1.4.2 Στρατόσφαιρα . . . . .	20
1.4.3 Ιονόσφαιρα . . . . .	20
1.5 Τρόποι Μετάδοσης . . . . .	23
1.5.1 Κύματα Εδάφους . . . . .	23
1.5.2 Ουράνια Κύματα . . . . .	26
1.5.3 Διάθλαση στην Ιονόσφαιρα . . . . .	26
1.5.4 Θερμοκρασιακή Αναστροφή . . . . .	32

1.5.5	Τροποσφαιρική Μετάδοση . . . . .	33
1.6	Παράγοντες Υποβάθμισης . . . . .	34
1.6.1	Πολύδρομη Μετάδοση . . . . .	34
1.6.2	Διαλείψεις . . . . .	35
1.6.3	Απορρόφηση στην Ιονόσφαιρα . . . . .	36
1.6.4	Μεταβολές στην Ιονόσφαιρα . . . . .	37
1.6.5	Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές . . . . .	38
1.6.6	Επίδραση Καιρικών Συνθηκών . . . . .	39
<b>2</b>	<b>Γραμμές Μεταφοράς</b>	<b>41</b>
2.1	Τύποι Γραμμών Μεταφοράς . . . . .	42
2.1.1	Παράλληλες Γραμμές . . . . .	42
2.1.2	Συνεστραμμένου Ζεύγους . . . . .	43
2.1.3	Θωρακισμένα Ζεύγη Καλωδίων . . . . .	45
2.1.4	Ομοαξονικές Γραμμές . . . . .	46
2.1.5	Κυματοδηγοί . . . . .	48
2.2	Απώλειες στις Γραμμές Μεταφοράς . . . . .	48
2.2.1	Απώλειες του Χαλκού . . . . .	49
2.2.2	Απώλειες Διηλεκτρικού . . . . .	49
2.2.3	Απώλειες Επαγωγής & Ακτινοβολίας . . . . .	50
2.3	Κατανεμημένα Χαρακτηριστικά . . . . .	50
2.3.1	Μήκος Γραμμής . . . . .	51
2.3.2	Επαγωγή . . . . .	51
2.3.3	Χωρητικότητα . . . . .	52
2.3.4	Αντίσταση . . . . .	52
2.3.5	Αγωγιμότητα . . . . .	52
2.3.6	Ισοδύναμη Αναπαράσταση . . . . .	53
2.4	Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Γύρω από Γραμμές Μεταφοράς . . . . .	54
2.5	Χαρακτηριστική Αντίσταση . . . . .	55
2.5.1	Ορισμός & Βασικές Ιδιότητες . . . . .	55
2.5.2	Υπολογισμός . . . . .	56
2.6	Καθυστέρηση Διάδοσης . . . . .	58
2.6.1	Ταχύτητα Διάδοσης . . . . .	58
2.6.2	Παράγοντας ταχύτητας . . . . .	60
2.7	Ανακλάσεις σε Γραμμές Μεταφοράς . . . . .	60
2.7.1	Ανάκλαση Τάσης DC σε Ανοιχτό Κύκλωμα . . . . .	61
2.7.2	Ανάκλαση Τάσης DC σε Βραχυκύκλωμα . . . . .	62

2.7.3	Ανάκλαση Τάσης AC σε Ανοιχτό Κύκλωμα . . . . .	63
2.7.4	Ανάκλαση Τάσης AC σε Βραχυκύκλωμα . . . . .	65
2.8	Αντίσταση Εισόδου σε Απόσταση $l$ από τον Τερματισμό . . . . .	66
2.9	Στάσιμα Κύματα . . . . .	69
2.9.1	Τερματισμός στη Χαρακτηριστική Αντίσταση . . . . .	71
2.9.2	Τερματισμός σε Ανοιχτό Κύκλωμα . . . . .	71
2.9.3	Τερματισμός σε Βραχυκύκλωμα . . . . .	72
2.9.4	Τερματισμός σε Ωμική Αντίσταση . . . . .	72
2.9.5	Τερματισμός σε Άεργο Φορτίο . . . . .	73
2.9.6	Τερματισμός σε Μιγαδικό Φορτίο . . . . .	74
2.9.7	Η Επίδραση της Προσαρμογής . . . . .	74
2.10	Εφαρμογές . . . . .	75
2.10.1	Εξομοίωση Συγκεντρωμένων Κυκλωμάτων . . . . .	75
2.10.2	Φίλτρα . . . . .	76
2.10.3	Μετατροπείς Baluns . . . . .	77
<b>3</b>	<b>Κεραίες</b>	<b>79</b>
3.1	Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία . . . . .	79
3.1.1	Πεδίο Επαγωγής . . . . .	80
3.1.2	Πεδίο Ακτινοβολίας . . . . .	86
3.2	Κατανομή Ρεύματος και Δυναμικού σε Δίπολο . . . . .	89
3.3	Χαρακτηριστικά των Κεραίων . . . . .	94
3.3.1	Αρχή της Αμοιβαιότητας . . . . .	94
3.3.2	Πόλωση . . . . .	94
3.3.3	Αντίσταση Ακτινοβολίας . . . . .	96
3.3.4	Διάγραμμα Ακτινοβολίας . . . . .	97
3.3.5	Ηλεκτρικό Μήκος . . . . .	99
3.3.6	Τροφοδοσία . . . . .	100
3.3.7	Σύζευξη . . . . .	101
3.3.8	Βασικοί Τύποι Κεραίων και Κριτήρια Επιλογής . . . . .	101
3.4	Κεραία Hertz & Αναδιπλωμένο Δίπολο . . . . .	102
3.5	Κεραία Marconi και η Επίδραση του Εδάφους . . . . .	104
3.5.1	Μη Γειωμένες Κεραίες . . . . .	104
3.5.2	Γειωμένες Κεραίες και Κεραία Marconi . . . . .	105
3.5.3	Συστήματα Γείωσης . . . . .	107
3.5.4	Top Loading . . . . .	107
3.6	Μαγνητικό Δίπολο . . . . .	108

---

3.7	Συστοιχίες Κεραίων . . . . .	112
3.7.1	Γενικά . . . . .	112
3.7.2	Ομοαξονική Συστοιχία . . . . .	113
3.7.3	Ευρύπλευρη Συστοιχία . . . . .	114
3.7.4	Ακροπυροδοτική Συστοιχία . . . . .	115
3.7.5	Κεραία Turnstile . . . . .	116
3.7.6	Παρασιτικές Συστοιχίες και η Κεραία Yagi-Uda . . . . .	117
3.8	Μη Συντονισμένες Κεραίες . . . . .	119
3.8.1	Σύρμα Μεγάλου Μήκους . . . . .	119
3.8.2	Κεραία V . . . . .	120
3.8.3	Ρομβοειδής Κεραία . . . . .	120





# Κεφάλαιο 1

## Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και στον τρόπο διάδοσής τους. Αναφερόμαστε στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων και τα φυσικά φαινόμενα που παρατηρούνται. Διακρίνουμε τα κύματα σε κύματα επιφανείας, κύματα χώρου και ουράνια κύματα ανάλογα με τον τρόπο διάδοσής τους. Τέλος, επισημαίνουμε το ρόλο της ατμόσφαιρας και τους παράγοντες υποβάθμισης κατά τη διάδοση των ραδιοσυχνοτήτων.

### 1.1 Εισαγωγή

Στην απλούστερη και αφαιρετική του μορφή ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα απαρτίζεται από τον πομπό, το δέκτη και το ασύρματο κανάλι. Η προς μετάδοση πληροφορία εκπέμπεται (ακτινοβολείται) από την κεραία του πομπού με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής (ΗΜ) ακτινοβολίας, διαδίδεται στο κανάλι (το μέσο μετάδοσης) και λαμβάνεται από την κεραία του δέκτη.

Το κύμα ενέργειας που ακτινοβολείται από την κεραία του πομπού ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αναπτύχθηκε από τον Άγγλο φυσικό James Clerk Maxwell το 1864 και τελειοποιήθηκε το 1873. Αποτελεί τη βασική μαθηματική εξήγηση της συμπεριφοράς των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ωστόσο, επειδή η μαθηματική εξήγηση των εξισώσεων του Maxwell ξεφεύγει από το σκοπό των σημειώσεων αυτών, θα περιοριστούμε σε απλές αναφορές σε αυτές όποτε απαιτείται.

Ο τρόπος με τον οποίο διαδίδεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης. Για την απλοποίηση

του φαινομένου της διάδοσης χρησιμοποιείται η έννοια του ελεύθερου χώρου. Με τον όρο *ελεύθερος χώρος* εννοούμε ένα χώρο στον οποίο δεν υπάρχουν μαγνητικά και βαρυτικά πεδία, χωρίς συμπαγή σώματα και ιονισμένα σωματίδια. Γενικότερα, λέγοντας ελεύθερο χώρο εννοούμε ιδανικές συνθήκες διάδοσης (κενό) που παρόλα αυτά πολλές φορές, κυρίως όταν πρόκειται για υψηλές συχνότητες, είναι δυνατόν να προσεγγιστούν ικανοποιητικά από τις πραγματικές συνθήκες διάδοσης.

### 1.1.1 Χαρακτηριστικά του Κύματος

*Κύμα* ονομάζεται κάθε διαταραχή που μεταφέρει ενέργεια με ορισμένη ταχύτητα που ονομάζεται *ταχύτητα διάδοσης* του κύματος. Για να παραχθεί ένα κύμα, απαιτείται μια πηγή η οποία να εκτελεί ταλαντώσεις. Όπως είναι γνωστό, η ταχύτητα  $v$  του κύματος συνδέεται με τη *συχνότητα*  $f$  και το *μήκος κύματος*  $\lambda$  με τη *βασική κυματική εξίσωση*

$$v = \lambda f. \quad (1.1)$$

Η συχνότητα του κύματος αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα της πηγής η οποία εκτελεί ταλαντώσεις και δεν εξαρτάται από το μέσο στο οποίο γίνεται η διάδοση του κύματος. Εάν ένα κύμα αλλάζει μέσο διάδοσης, τότε θα μεταβληθεί η ταχύτητά του και όπως προκύπτει από την Εξ. (1.1) θα αλλάξει και το μήκος κύματος  $\lambda$ .

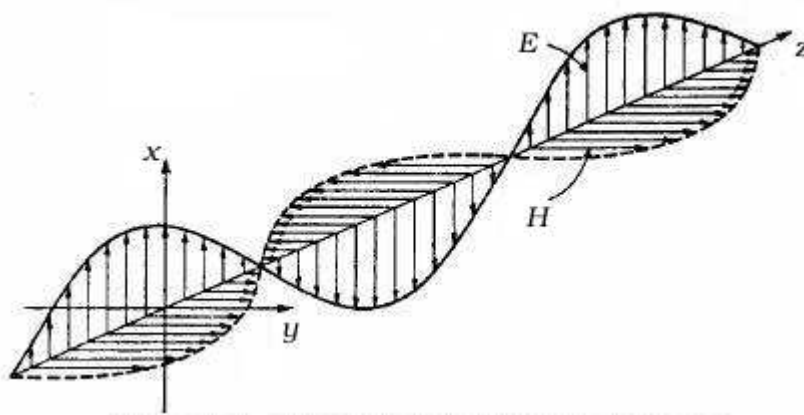
Ως *περίοδος*  $T$  ενός κύματος, ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να εκτελεστεί ένας πλήρης κύκλος, μετά τον οποίο το κύμα επαναλαμβάνεται. Η περίοδος ενός κύματος είναι ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για να επανέλθει ένα σταθερό σημείο του κύματος στην ίδια φάση, π.χ. να μεταβεί από κορυφή σε κορυφή ή από κοιλάδα σε κοιλάδα. Το αντίστροφο της περιόδου είναι η συχνότητα

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1.2)$$

Στο σύστημα SI η συχνότητα μετράται σε Hertz (Hz) ή σε κύκλους. Η συχνότητα ενός Hz ισοδυναμεί με μία πλήρη ταλάντωση ανά δευτερόλεπτο. Αντίστοιχα ως μήκος κύματος ορίζεται η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών (ή κοιλάδων) του κύματος και μετράται σε μονάδες μήκους.

### 1.1.2 Θεμελιώδη Θέματα ΗΜ Κυμάτων

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι ταλαντώσεις που μεταδίδονται στον ελεύθερο χώρο με την ταχύτητα του φωτός ( $c = 299.792.500 \pm 300$  m/sec, για τις περισσότερες εφαρμογές  $c = 3 \cdot 10^8$  μ/σες). Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έχει πολλές ομοιότητες με τη διάδοση των κυμάτων που δημιουργούνται στο νερό, όταν μια πέτρα διαταράζει την ηρεμία του. Τα κύματα αυτά ονομάζονται εγκάρσια.



Σχήμα 1.1: Εγκάρσιο Ηλεκτρομαγνητικό Κύμα.

*Εγκάρσιο* ονομάζεται ένα οδεύον κύμα το οποίο διαδίδεται σε μια διεύθυνση κάθετη της διεύθυνσης των ταλαντώσεων που παράγουν το κύμα, σε αντίθεση με ένα *διαμήκες* κύμα στο οποίο η διεύθυνση διάδοσης είναι παράλληλη της διεύθυνσης των ταλαντώσεων. Αν για παράδειγμα θεωρήσουμε δύο διαστάσεις και ένα κύμα που κινείται κατά τη διεύθυνση του άξονα  $x$ , τότε εάν πρόκειται για εγκάρσιο κύμα, οι ταλαντώσεις θα συμβαίνουν κατά τη διεύθυνση του άξονα  $y$ . Στο κλασικό παράδειγμα τις πέτρας που πέφτει στο νερό, τα μόρια του νερού ταλαντώνονται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης δημιουργώντας τους γνωστούς μας κυματισμούς. Μια παρόμοια μορφή έχουν και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η διαφορά στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτά εμφανίζονται δύο διαφορετικές ταλαντώσεις. Η ταλάντωση του ηλεκτρικού και η ταλάντωση του μαγνητικού πεδίου. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι κάθετα μεταξύ τους όπως δείχνει και το Σχ. 1.1 και ταυτόχρονα κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (άξονα  $z$ ). 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 που θα περιγραφούν στη συνέχεια.

### 1.1.3 Κύματα σε Ελεύθερο Χώρο

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που εκπέμπεται από μια σημειακή πηγή διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η διάδοση του κύματος είναι σφαιρική όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.2. Για να απλουσεύσουμε την έννοια της διάδοσης, φανταζόμαστε ακτίνες που εκπέμπονται από τη σημειακή πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις. Σε απόσταση  $P$  από τη σημειακή πηγή το κύμα έχει μια συγκεκριμένη φάση. 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



Σχήμα 1.2: Σφαιρικό μέτωπο κύματος.

πηγής εξαπλώνεται καλύπτοντας τετραπλάσια περιοχή (σφαιρική) για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Έτσι αν ορίσουμε την πυκνότητα ισχύος ως την ακτινοβολούμενη ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας, τότε η πυκνότητα ισχύος ελαττώνεται στο  $1/4$  της τιμής της όταν η απόσταση από την πηγή διπλασιάζεται. Αποδεικνύεται, ότι η πυκνότητα ισχύος είναι αντίστροφα 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

$$P(r) = \frac{P_t}{4\pi r^2}, \quad (1.3)$$

όπου  $P(r)$  η πυκνότητα ισχύος σε απόσταση  $r$  από την ισοτροποπική πηγή και  $P_t$  η εκπεμπόμενη 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. 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 ονομάζεται *ισοτροπικός*.

Οι εντάσεις του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι επίσης σημαντικές. Οι δύο αυτές ποσότητες είναι αντίστοιχες της τάσης και του ρεύματος σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα και οι μονάδες τους αντίστοιχα είναι Volt/m και A/m. Για ένα ηλεκτρικό κύκλωμα έχουμε  $V = ZI$ , ενώ για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ισχύει

$$E = ZH, \quad (1.4)$$

όπου  $E$  η ενεργός τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (V/m),  $H$  η ενεργός τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου (A/m) και  $Z$  η χαρακτηριστική αντίσταση του μέσου ( $\Omega$ ). Η χαρακτηριστική αντίσταση του μέσου δίνεται από τη σχέση

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad (1.5)$$

όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου και  $\epsilon$  η διηλεκτρική σταθερά του μέσου. Για το κενό ισχύουν:

$$\begin{aligned} \mu &= 4\pi \times 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}, \\ \epsilon &= 1/36\pi \times 10^9 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}. \end{aligned}$$

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

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{4 \times 10^{-7}}{16\pi \times 10^9}} = \sqrt{144\pi^2 \times 100} = 120\pi = 377\Omega. \quad (1.6)$$

Η γνώση της χαρακτηριστικής αντίστασης, κάνει δυνατό τον υπολογισμό της έντασης του πεδίου σε απόσταση  $r$  από την ισοτροπική πηγή. Έτσι, όπως

στα ηλεκτρικά κυκλώματα ισχύει  $P = V^2/Z$ , για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ισχύει  $P = E^2/Z$ . Από την τελευταία εξίσωση και την Εξ. (1.3) προκύπτει ότι

$$E(r) = \sqrt{P(r) \times Z} = \sqrt{\frac{P_t}{4\pi r^2} \times 120\pi} = \frac{\sqrt{30P_t}}{r}. \quad (1.7)$$

Από την Εξ. (1.7) γίνεται φανερό ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι αντίστροφα ανάλογη της απόστασης από την πηγή και ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της εκπεμπόμενης ισχύος. Η εξίσωση αυτή αποτελεί μία από τις εξισώσεις του Maxwell η οποία επέτρεψε τη μαθηματική ανάλυση των φαινομένων που προκαλούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Όπως προαναφέρθηκε, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι σφαιρικό αν το μέσο είναι ισοτροπικό. Σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή, κάθε μικρή περιοχή του μετώπου του κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως *επίπεδο κύμα*. Αυτό είναι φανερό από τη 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.

#### 1.1.4 Ακτινοβολία, Πόλωση και Λήψη

Οι κεραιές εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή διαφορετικά, όταν ένα κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα υψηλής συχνότητας ακτινοβολεί. Το φαινόμενο αυτό αποδεικνύεται μαθηματικά από τις εξισώσεις του Maxwell, από τις οποίες προκύπτει ότι όταν ένα καλώδιο διαρρέεται από ρεύμα, τότε γύρω από αυτό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Επιπρόσθετα αν το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται, όπως στην περίπτωση του εναλλασσόμενου ρεύματος, δημιουργείται επίσης και ένα ηλεκτρικό πεδίο. Περισσότερα για τις κεραιές και τον τρόπο με τον οποίο αυτές ακτινοβολούν θα αναφερθούν στο Κεφάλαιο 3. Επιγραμματικά και για τις ανάγκες αυτής της ενότητας θα αναφέρουμε ότι το είδος και η θέση της κεραιάς (κατακόρυφη ή οριζόντια) μπορούν να καθορίσουν την πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

*Πόλωση* ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ονομάζεται η καμπύλη που διαγράφεται από το άκρο του διανύσματος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  $\mathbf{E}$  σε επίπεδα σταθερής φάσης, δηλαδή σε επίπεδα κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης. Η πόλωση χαρακτηρίζεται ως ελλειπτική, κυκλική ή γραμμική

όταν η διαγραφόμενη καμπύλη είναι έλλειψη, κύκλος ή ευθεία γραμμή, αντίστοιχα.

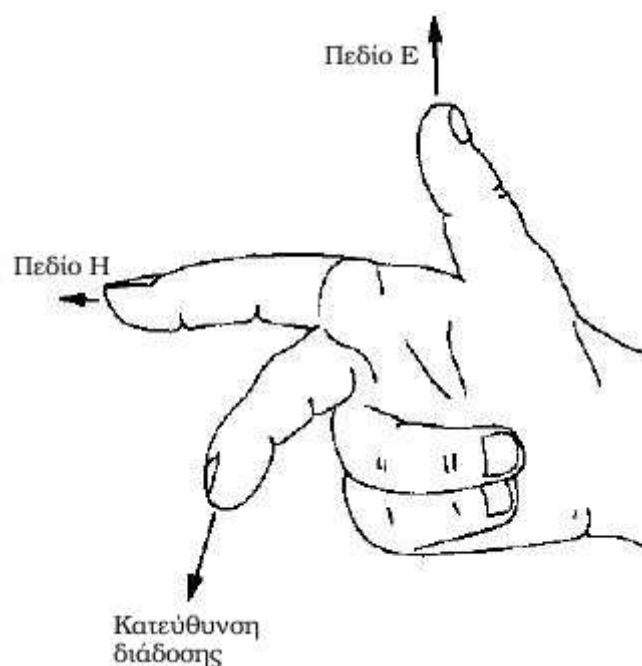
Για να αντιληφθούμε καλύτερα την έννοια της πόλωσης ας θεωρήσουμε και πάλι το Σχ. 1.1. Η διάδοση στην περίπτωση αυτή γίνεται κατά τη διεύθυνση του άξονα  $z$ . Θεωρώντας ένα οποιοδήποτε επίπεδο κάθετο στον άξονα  $z$  (δηλαδή ένα οποιοδήποτε  $xy$  επίπεδο) τα μεγέθη  $\mathbf{E}$  και  $\mathbf{H}$  είναι κάθετα μεταξύ τους και το ηλεκτρομαγνητικό κύμα χαρακτηρίζεται από σταθερή φάση. Αν στο επίπεδο αυτό προβάλλουμε το διάνυσμα  $\mathbf{E}$  για όλες τις πιθανές φάσεις του θα προκύψει μια καμπύλη που στην περίπτωσή μας θα είναι μια ευθεία γραμμή. Λέμε τότε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι γραμμικά πολωμένο. Είναι χαρακτηριστικό των περισσότερων κεραιών ότι η ακτινοβολία που εκπέμπουν είναι γραμμικά πολωμένη. Για παράδειγμα, μια κάθετη κεραία ακτινοβολεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα των οποίων τα διανύσματα των ηλεκτρικών τους πεδίων είναι κάθετα και παραμένουν κάθετα κατά τη διάδοσή τους στον ελεύθερο χώρο.

Γενικά, ισχύει ότι η κατεύθυνση της πόλωσης είναι ίδια με την κατεύθυνση της κεραίας. Έτσι κατακόρυφες κεραιές ακτινοβολούν κατακόρυφα πολωμένα κύματα και οριζόντιες κεραιές ακτινοβολούν οριζόντια πολωμένα κύματα. Συνήθως, επικρατεί η τάση να αναφέρονται κεραιές σαν κατακόρυφα ή οριζόντια πολωμένες παρόλο που αυτό δεν είναι απόλυτα σωστό. Είναι επίσης πιθανό κεραιές να εκπέμπουν κυκλικά ή ελλειπτικά πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, με αποτέλεσμα η διεύθυνση της ηλεκτρικής συνιστώσας του κύματος να περιστρέφεται συνεχώς με ελικοειδή τρόπο.

Εάν γνωρίζουμε τα διανύσματα  $\mathbf{E}$  και  $\mathbf{H}$ , είναι εύκολο να υπολογίσουμε την κατεύθυνση της διάδοσης. Ένας μνημονικός κανόνας για τον υπολογισμό αυτό είναι ο κανόνας του δεξιού χεριού. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.3, εάν εκτείνουμε τα δάχτυλά μας έτσι ώστε ο αντίχειρας να δείχνει προς την κατεύθυνση του  $\mathbf{E}$  και ο δείκτης να δείχνει προς την κατεύθυνση του  $\mathbf{H}$ , τότε ο μέσος θα δείχνει προς την κατεύθυνση της διάδοσης.

Όπως ένα καλώδιο που μεταφέρει υψίσουχνα ρεύματα περιβάλλεται από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, έτσι και ένα καλώδιο που εισέρχεται μέσα σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα που επάγει σε αυτό το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Με άλλα λόγια αυτό σημαίνει ότι το καλώδιο λαμβάνει μέρος της ακτινοβολίας του πεδίου και συμπεριφέρεται σαν μια κεραία λήψης. Με βάση το γεγονός ότι η διαδικασία της λήψης είναι αντίθετη της διαδικασίας της εκπομπής, οι κεραιές λήψης και εκπομπής





Σχήμα 1.3: Κανόνας του δεξιού χεριού για τη διάδοση.

χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο. Εκτός από τον τρόπο που διαχειρίζονται την ισχύ, οι κεραιές εκπομπής και λήψης είναι ίδιες. Στην πραγματικότητα ισχύει το *θεώρημα της αμοιβαιότητας*. Με βάση το θεώρημα αυτό τα χαρακτηριστικά των κεραιών, όπως αντίσταση ακτινοβολίας και διάγραμμα ακτινοβολίας παραμένουν ίδια, ανεξάρτητα από τη χρήση της κεραιάς ως κεραιάς εκπομπής ή λήψης.

## 1.2 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Οι συχνότητες από 3 kHz έως 300 GHz ονομάζονται *ραδιοσυχνότητες* γιατί χρησιμοποιούνται στις ασύρματες επικοινωνίες. Αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος διαιρείται σε περιοχές (μπάντες ή ζώνες) κάθε μια από τις οποίες είναι 10 φορές μεγαλύτερη σε συχνότητα από την προηγούμενή της. Αυτός ο διαχωρισμός εξυπηρετεί κυρίως μνημονικούς λόγους. Στον Πίν. 1.1 συνοψίζονται οι περιοχές των ραδιοσυχνοτήτων και παρατίθενται κάποιες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται στις αντίστοιχες περιοχές. Για παράδειγμα, η κινητή τηλεφωνία GSM ανήκει στη μπάντα UHF. Συγκεκριμένα, τα κινητά τηλέφωνα λειτουργούν είτε στα 900, είτε στα 1800 MHz, ανάλογα με

τον πάροχο. Από την άλλη, η ραδιοφωνία FM καταλαμβάνει τις συχνότητες από 87.5 έως 108 MHz στη μπάντα VHF.

Πίνακας 1.1: Περιοχές ραδιοσυχνοτήτων και εφαρμογές.

Ονομασία Ζώνης	Όρια Συχνοτήτων	Εφαρμογές
Extremely Low Frequencies (ELF)	1 Hz - 10 kHz	Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Very Low Frequencies (VLF)	10 kHz - 30 kHz	Ραδιοπλοήγηση, Ραδιοφωνία AM
Low Frequencies (LF)	30 kHz - 300 kHz	Ραδιοπλοήγηση, Ραδιοφωνία AM
Median Frequencies (MF)	300 kHz - 3 MHz	Ραδιοφωνία AM
High Frequencies (HF)	3 MHz - 30 MHz	Ραδιοφωνία AM
Very High Frequencies (VHF)	30 MHz - 300 MHz	Ραδιοφωνία FM, Τηλεόραση, Κινητή τηλεφωνία (1ης γενιάς)
Ultra High Frequencies (UHF)	300 MHz - 3 GHz	Ραδιοζεύξεις, Τηλεόραση, Ραδιοπλοήγηση, Κινητή τηλεφωνία (2ης γενιάς), RADAR
Super High Frequencies (SHF)	3 GHz - 30 GHz	Επίγειες και Δορυφορικές Ζεύξεις, Ψηφιακή Δορυφορική Τηλεόραση, RADAR
Extremely High Frequencies (EHF)	30 GHz - 300 GHz	Μετεωρολογία, Αστρονομία

### 1.3 Φαινόμενα κατά τη Μετάδοση ΗΜ Κυμάτων

Όπως έχουμε δει έως τώρα, η μετάδοση του σήματος σε φυσικό επίπεδο γίνεται με τη μετάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Για να επιτευχθεί η μετάδοση ενός σήματος σε ένα ασύρματο κανάλι, τυπικά θα έπρεπε να υπάρχει ένα απευθείας μονοπάτι, δηλαδή ο πομπός και ο δέκτης να βρίσκονται σε *ευθεία οράσεως* (Line Of Sight, LOS). Λαμβάνοντας υπόψη τη μορφολογία του εδάφους, την πυκνότητα δόμησης των σύγχρονων πόλεων και την πιθανότητα ο δέκτης να βρίσκεται στο εσωτερικό ενός κτηρίου, είναι πολύ

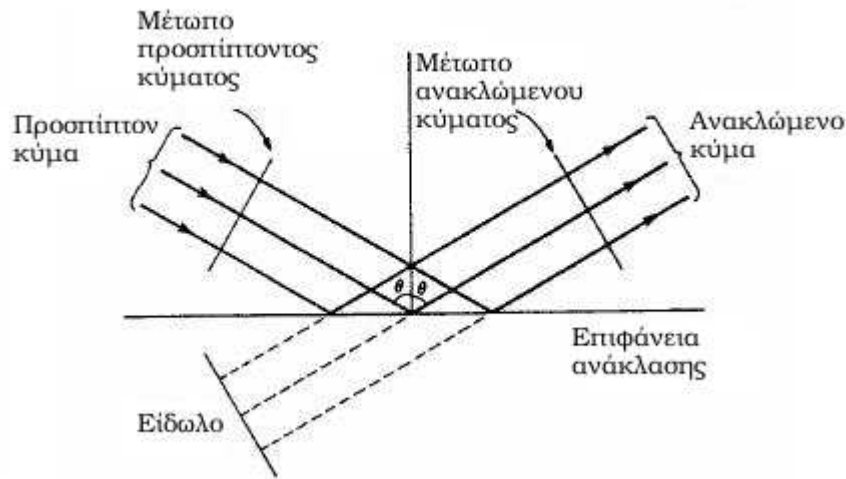
πιθανό πομπός και δέκτης να μη βρίσκονται σε οπτική επαφή. Η αδυναμία αυτή καλύπτεται από φυσικούς μηχανισμούς που διέπουν τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Συνεπώς, για τη διάδοση ραδιοκυμάτων σε ένα πραγματικό περιβάλλον, πρέπει να εξεταστούν ορισμένοι παράγοντες οι οποίοι αμελούνται για τη διάδοση στο κενό. Για παράδειγμα, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ανάκλαση (reflection) των κυμάτων από το έδαφος, τα βουνά και τα κτίρια. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υφίστανται διάθλαση (refraction) καθώς διαπερνούν διαφορετικά στρώματα της ατμόσφαιρας που έχουν διαφορετική πυκνότητα ή διαφορετικό βαθμό ιονισμού. Επίσης, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα περιθλώνται (diffraction) γύρω από αιχμηρά ογκώδη αντικείμενα, και υφίστανται σκέδαση ή διασκορπισμό (scattering) όταν προσπίπτουν σε αντικείμενα με διαστάσεις αντίστοιχες του μήκους κύματός τους. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τους παραπάνω μηχανισμούς (ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση, σκέδαση), καθώς και το φαινόμενο Doppler.

### 1.3.1 Ανάκλαση

Ο μηχανισμός της *ανάκλασης* (reflection) ακολουθεί τις αρχές της οπτικής που διέπουν την ανάκλαση του φωτός από ένα καθρέπτη. Και στις δύο περιπτώσεις η γωνία ανάκλασης είναι ίδια με την γωνία πρόσπτωσης όπως φαίνεται στο Σχ. 1.4. Στο παράδειγμα της ανάκλασης του φωτός η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα και η κάθετη στο επίπεδο πρόσπτωσης ανήκουν στο ίδιο επίπεδο.

Η απόδειξη της ισότητας των γωνιών ανάκλασης και πρόσπτωσης, ακολουθεί τον νόμο που είναι γνωστός ως δεύτερος νόμος της ανάκλασης του φωτός. Η απόδειξη βασίζεται στο γεγονός ότι το προσπίπτον και το ανακλώμενο κύμα έχουν την ίδια ταχύτητα. Υπάρχει και άλλη μια ομοιότητα της ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και της ανάκλασης του φωτός. Οποιοσδήποτε έχει βρεθεί ανάμεσα σε δύο καθρέφτες θα έχει παρατηρήσει ένα μεγάλο αριθμό από εικόνες-είδωλα του εαυτού του και ακόμη ότι η φωτεινότητά τους ελαττώνεται βαθμιαία. Αυτό οφείλεται στην απορρόφηση του φωτός σε κάθε ανάκλαση. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ο συντελεστής ανάκλασης  $\rho$  ορίζεται ως ο λόγος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου του ανακλώμενου κύματος προς την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου του προσπίπτοντος κύματος. Είναι μονάδα για τέλειους αγωγούς και μικρότερος από τη μονάδα για πρακτικές αγωγίμες επιφάνειες. Η διαφορά



Σχήμα 1.4: Ανάκλαση κυμάτων.

στην ένταση του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος είναι αποτέλεσμα της απορρόφησης της ενέργειας από τη μη τέλεια αγωγίμη επιφάνεια.

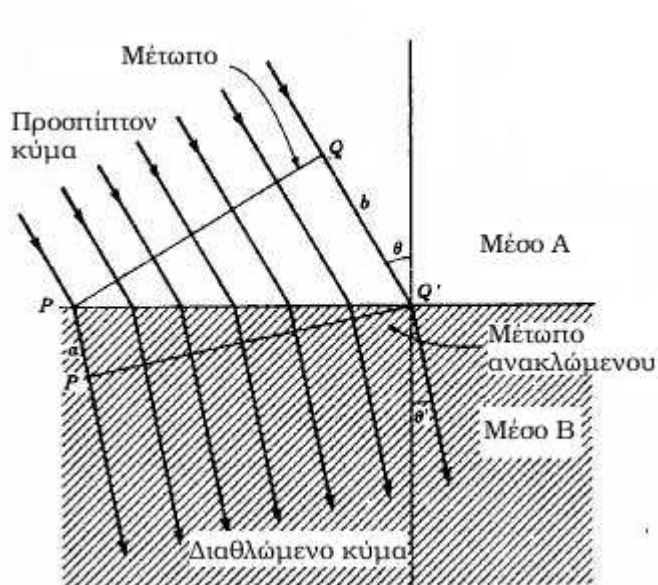
Η ανάκλαση των ραδιοκυμάτων μπορεί να γίνει από διάφορα αντικείμενα. Γενικότερα, το υλικό και η υφή της επιφάνειας πρόσπτωσης επηρεάζουν την ανάκλαση. Λείες και μεταλλικές επιφάνειες αποτελούν καλούς ανακλαστές των ραδιοκυμάτων. Η επιφάνεια της γης παρουσιάζει επίσης πολύ καλές ανακλαστικές ιδιότητες στις οποίες βασίζεται και η διάδοση των ραδιοκυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι η παραπάνω ανάλυση είναι έγκυρη υπό την προϋπόθεση ότι το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου του προσπίπτοντος κύματος είναι κάθετο στην αγωγίμη επιφάνεια. Σε διαφορετική περίπτωση, θα αναπτυχθούν επιφανειακά ρεύματα και δεν θα υπάρχει ανάκλαση με την έννοια που έχει αναφερθεί.

### 1.3.2 Διάθλαση

Όπως περιγράψαμε και στο μηχανισμό της ανάκλασης, κατά την πρόσπτωση του κύματος σε κάποια επιφάνεια, ένα μέρος της ισχύος του κύματος απορροφάται από την επιφάνεια, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Στο κύμα που απορροφάται λαμβάνει χώρα ο μηχανισμός της διάθλασης. Η *διάθλαση* (refraction) συμβαίνει όταν ένα κύμα περνά από ένα μέσο διάδοσης σε ένα άλλο διαφορετικής πυκνότητας (και συνεπώς

διαφορετικής ταχύτητας μετάδοσης). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κύμα να ακολουθεί μια άλλη κατεύθυνση στο δεύτερο μέσο και ταυτόχρονα η ταχύτητα του να μεταβάλλεται. Ένα καλό παράδειγμα είναι το εμφανές λύγισμα ενός κουταλιού όταν το βυθίσουμε μερικώς σε ένα δοχείο με νερό. Βέβαια το κουτάλι δε λυγίζει ούτε πρόκειται για κάποιο τρικ. Όπως γνωρίζουμε, η αίσθηση της όρασης βασίζεται στην ύπαρξη του φωτός και την ανάκλασή του στα διάφορα αντικείμενα. Αυτό που γίνεται στην περίπτωση του κουταλιού, είναι ότι καθώς το φως περνά από το νερό (μέσο υψηλής πυκνότητας) στον αέρα (μέσο σχετικά χαμηλής πυκνότητας) διαθλάται και αυτό που τελικά φτάνει στο μάτι μας είναι η εικόνα ενός λυγισμένου κουταλιού. Το μέρος του κουταλιού που βρίσκεται έξω από το νερό προφανώς το αντιλαμβανόμαστε ως έχει, αφού εδώ λαμβάνει χώρα η διάδοση του φωτός μόνο σε ένα μέσο, δηλαδή στον αέρα.



Σχήμα 1.5: Διάθλαση κυμάτων [2].

Στο Σχ. 1.5 ένα κύμα περνά από το μέσο A στο μέσο B με το προσπίπτον κύμα να σχηματίζει γωνία με το διαχωριστικό όριο διαφορετική από  $90^\circ$ . Στο σχήμα, φαίνεται σε ένα στιγμιότυπο το μέτωπο κύματος P-Q όταν διεισδύει στο μέσο B και το μέτωπο κύματος P'-Q' όταν έχει πλέον ολοκληρωθεί η είσοδος του στο δεύτερο μέσο. Η ακτίνα b διένυσε απόσταση Q-Q', ανάλογη της ταχύτητάς της στο αραιό μέσο διάδοσης. Όμοια, η ακτίνα a διένυσε απόσταση

P-P', ανάλογη της ταχύτητάς της στο πυκνό μέσο διάδοσης. Η απόσταση P-P' είναι μικρότερη της απόστασης Q-Q' διότι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος είναι μικρότερη στο πυκνό μέσο. Η σχέση μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$  και της γωνίας διάθλασης  $\theta'$  υπολογίζεται χρησιμοποιώντας απλές σχέσεις της τριγωνομετρίας και της γεωμετρίας. Τελικά προκύπτει

$$\frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = \frac{v_B}{v_A}, \quad (1.8)$$

όπου  $v_B$  και  $v_A$  οι ταχύτητες στα μέσα διάδοσης A και B αντίστοιχα. Ισχύει επίσης ότι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος σε ένα διηλεκτρικό μέσο είναι αντίστροφα ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της διηλεκτρικής σταθεράς του μέσου. Έτσι η Εξ. (1.8) παίρνει τη μορφή

$$\frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = \sqrt{\frac{k}{k'}} = \frac{1}{\mu}, \quad (1.9)$$

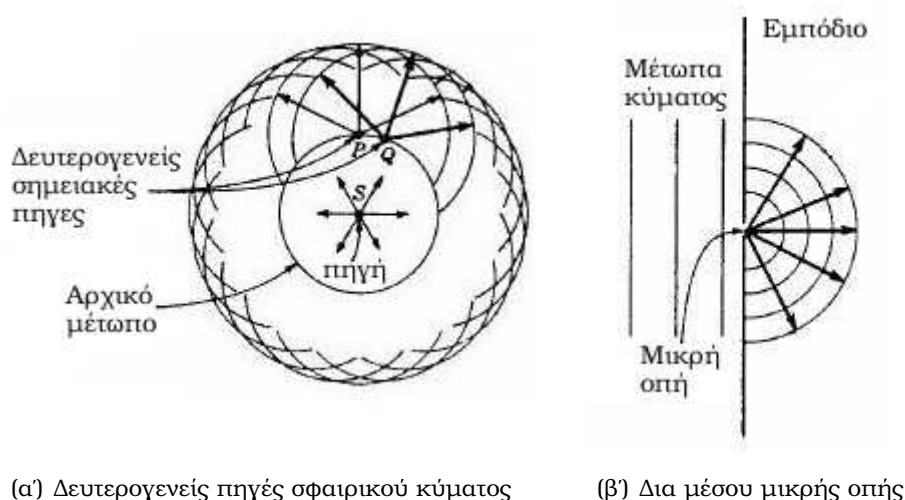
όπου  $k$  και  $k'$  οι διηλεκτρικές σταθερές των μέσων A και B αντίστοιχα, ενώ  $\mu$  ο συντελεστής (δείκτης) διάθλασης. Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται νόμος του Snell και είναι γνωστός νόμος της οπτικής.

### 1.3.3 Περίθλαση

*Περίθλαση* (diffraction) είναι οποιαδήποτε εκτροπή των κυμάτων από την ευθύγραμμη διάδοση όταν η εκτροπή αυτή δε μπορεί να ερμηνευτεί ως ανάκλαση, διάδοση ή διάθλαση. Περίθλαση συναντάμε σε αντικείμενα με ακμές για αυτό συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος περίθλαση ακμής (edge diffraction). Πολλές φορές βολεύει να σκεφτόμαστε ότι η πορεία του κύματος καμπυλώνει γύρω από την ακμή.

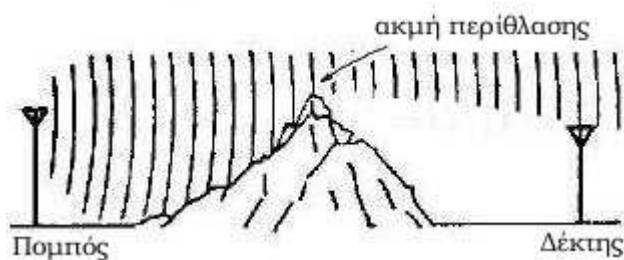
Τα φαινόμενα της ανάκλασης, διάδοσης και διάθλασης όπως αναφέραμε και στα προηγούμενα μπορούν να περιγραφούν από τη Γεωμετρική Οπτική. Η περίθλαση όμως, προβλέπεται και εξετάζεται από τη γενικότερη θεωρία της Κυματικής Οπτικής. Βασικός νόμος της Κυματικής οπτικής είναι η αρχή του Huygens, η αρχική μορφή της οποίας προτάθηκε από τον C. Huygens το 1690.

Το όριο της Κυματικής Οπτικής για τις υψηλές συχνότητες είναι η Γεωμετρική Οπτική και στο όριο αυτό, δεν υπάρχει περίθλαση. Υποψιαζόμαστε λοιπόν ότι οι χαμηλές συχνότητες θα υφίστανται εντονότερη περίθλαση από



(α) Δευτερογενείς πηγές σφαιρικού κύματος

(β) Δια μέσου μικρής οπής



(γ) Διάδοση πίσω από εμπόδιο

Σχήμα 1.6: Περίθλαση [2].

ότι οι πιο υψηλές. Αυτό είναι πράγματι σωστό. Όλοι μας έχουμε παρατηρήσει ότι οι 'μπάσες' ακουστικές συχνότητες γίνονται πιο αισθητές όταν για παράδειγμα βρισκόμαστε πίσω από έναν τοίχο από ότι οι υψηλότερες.

Η Κυματική Οπτική επεξηγεί πως όλα τα είδη κυμάτων (π.χ. φως, ακουστικά, ηλεκτρομαγνητικά) υφίστανται περίθλαση. Γενικά η περίθλαση είναι σπουδαίο φυσικό φαινόμενο. Εάν δεν υπήρχε, τα κύματα δε θα διαδίδονταν πίσω από εμπόδια. Μπορούμε να αποδώσουμε σε περίθλαση το ότι ακούμε στο δρόμο ήχους που προέρχονται από διπλανά τετράγωνα, το ότι βλέπουμε κύματα νερού μέσα σε σχεδόν κλειστά λιμάνια και το ότι το κινητό μας λειτουργεί πίσω από λόφους και μέσα σε πόλεις.

Σύμφωνα με την αρχή του Huygens, κάθε σημείο του μετώπου ενός σφαιρικού κύματος μπορεί να θεωρηθεί σαν μια δευτερογενής πηγή κυμάτων, η οποία ακτινοβολεί προς την εξωτερική πλευρά όπως φαίνεται και στο

Σχ. 1.6(α'). Το συνολικό πεδίο σε σημεία μακριά από την πηγή είναι ίσο με το διάνυσμα του αθροίσματος των δευτερευόντων αυτών κυμάτων. Στην κανονική διάδοση, η αρχή του Huygens δε χρησιμοποιείται. Ωστόσο σε περιπτώσεις υπολογισμού της περίθλασης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Η θεωρία του Huygens μπορεί να αποδειχτεί επίσης και με βάση τις εξισώσεις του Maxwell. Στην πράξη το φαινόμενο εμφανίζεται όταν το μονοπάτι ανάμεσα σε πομπό και δέκτη εμποδίζεται από μία επιφάνεια με τραχείες ακμές και γωνίες. Τότε, οι γωνίες μετατρέπονται σε δευτερογενείς πηγές του κύματος και επανεκπέμπουν το κύμα με μικρότερη ισχύ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται δευτερεύοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε ολόκληρο το χώρο, ακόμα και πίσω από κάποιο εμπόδιο (Σχ. 1.6(γ')).

### 1.3.4 Σκέδαση ή Διασκορπισμός

Σκέδαση ή Διασκορπισμός (scattering) εμφανίζεται στην περίπτωση που το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε αντικείμενα ή επιφάνειες με διαστάσεις παρόμοιας τάξης με το μήκος κύματος. Η σκέδαση έχει ως αποτέλεσμα την επανεκπομπή της ενέργειας του πομπού προς πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις. Έχει αποδειχθεί ότι η σκέδαση είναι ο μηχανισμός που είναι πιο δύσκολο να προβλεφθεί στα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Δεδομένου ότι το μήκος κύματος στην περίπτωση αυτή (τηλεφωνία GSM) είναι της τάξης των δεκάδων εκατοστών, οι θέσεις των λαμπτήρων, των σημάτων κυκλοφορίας, οι φυλλωσιές δέντρων καθώς και διαφημιστικές πινακίδες μπορούν να σκεδάσουν ενέργεια προς πολλές κατευθύνσεις και να παρέχουν συνεπώς κάλυψη σε περιοχές που μπορεί να μην λαμβάνουν ενέργεια μέσω ανάκλασης ή περίθλασης.

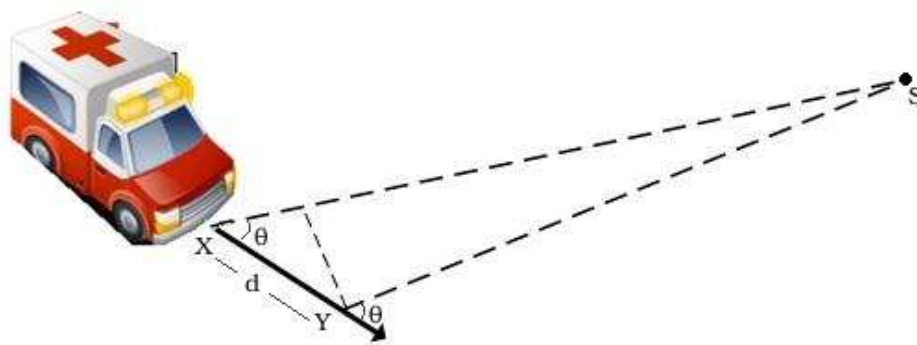
### 1.3.5 Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler εμφανίζεται όταν υπάρχει σχετική κίνηση ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη ενός σήματος. Ας δούμε πρώτα ένα απλοποιημένο ανάλογο από τον χώρο του ήχου και των ακουστικών συχνοτήτων. Έστω λοιπόν, ότι βρισκόμαστε στο δρόμο και κινείται προς το μέρος μας ένα ασθενοφόρο, ενώ η σειρήνα του εκπέμπει κάποιον ήχο κάποια συγκεκριμένης συχνότητας. Το ασθενοφόρο τρέχει με μεγάλη ταχύτητα, μας προσπερνά και συνεχίζει την πορεία του. Σε όλο αυτό το διάστημα η συχνότητα που φτάνει στα αυτιά μας δεν είναι σταθερή αλλά υπάρχει μία σταδιακή αύξηση και



μείωσή της. Αυτή η αυξομείωση οφείλεται στο φαινόμενο Doppler και παρατηρείται λόγω της σχετικής κίνησης πομπού και δέκτη. Το ίδιο αποτέλεσμα θα είχαμε και στην περίπτωση που η σειρήνα ήταν ακίνητη και μετακινούμαστε εμείς προς αυτήν με αντίστοιχη ταχύτητα [3].

Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και συγκεκριμένα στη φέρουσα συχνότητα που χρησιμοποιείται στις ασύρματες επικοινωνίες. Ας θεωρήσουμε ότι ο δέκτης κινείται με σταθερή ταχύτητα  $v$  σε ένα μονοπάτι μήκους  $d$  μεταξύ των σημείων  $X$  και  $Y$ , ενώ λαμβάνει σήματα από έναν απομακρυσμένο σταθμό βάσης  $S$  όπως φαίνεται στο Σχ. 1.7. Έστω



Σχήμα 1.7: Φαινόμενο Doppler.

ότι ο πομπός χρησιμοποιεί συχνότητα φέρουσας  $f_c$ . Αποδεικνύεται ότι το σήμα που λαμβάνει ο κινούμενος δέκτης δε θα έχει συχνότητα  $f_c$ , αλλά αυτή θα έχει διαφοροποιηθεί κατά μία ποσότητα  $f_d$ , που δίνεται από τη σχέση

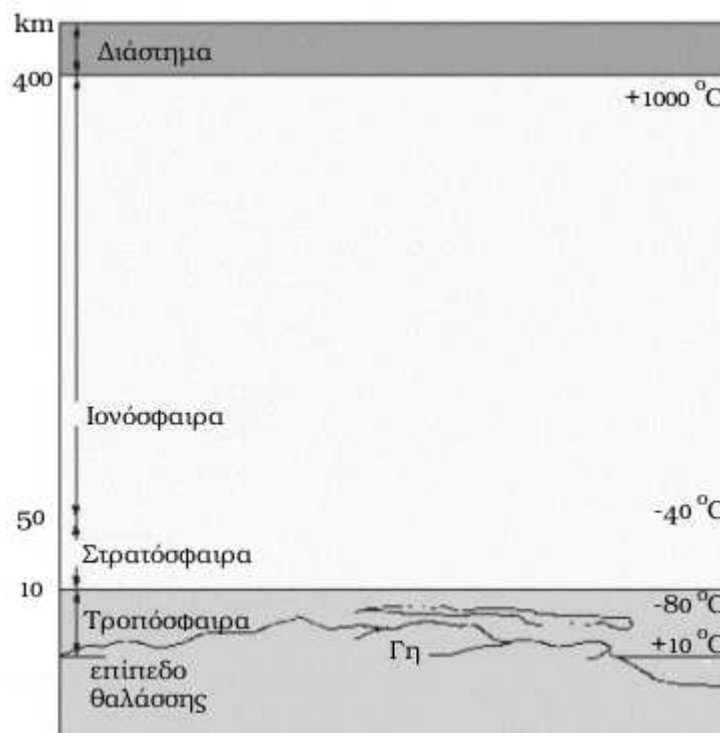
$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos \theta = f_D \cos \theta, \quad (1.10)$$

όπου  $v$  η ταχύτητα του δέκτη (και γενικότερα η σχετική ταχύτητα κίνησης ανάμεσα σε πομπό και δέκτη),  $\lambda$  το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη φέρουσα  $f_c$  και  $\theta$  η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση κίνησης και στην ευθεία πομπού δέκτη (LOS) αν κινηθούμε με φορά αντίστροφη των δεικτών του ρολογιού. Η ποσότητα  $f_D = v/\lambda$  είναι η μέγιστη μετατόπιση Doppler που μπορεί να εμφανιστεί και λέγεται *μετατόπιση Doppler* (Doppler spread ή Doppler shift)[4], [5].

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι αν ο δέκτης κινείται προς την κατεύθυνση από την οποία έρχεται το σήμα, τότε η μετατόπιση Doppler είναι θετική, ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι αρνητική.

## 1.4 Σύνθεση Ατμόσφαιρας

Οι ιδιότητες του μέσου διάδοσης είναι πολύ σημαντικές και επηρεάζουν άμεσα τον τρόπο διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ενώ η διάδοση στον ελεύθερο χώρο (κενό) μπορεί εύκολα να περιγραφεί λόγω των ιδανικών συνθηκών, δε συμβαίνει το ίδιο και με τη διάδοση στη γήινη ατμόσφαιρα. Η έλλειψη ομοιομορφίας στην ατμόσφαιρα της γης περιπλέκει τα πράγματα όσον αφορά στη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες ποικίλουν και εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως το ύψος, η γεωγραφική θέση, καθώς και ο χρόνος (μέρα, νύχτα, εποχή, έτος). Συνεπώς, η γνώση της σύνθεσης της γήινης ατμόσφαιρας είναι εξαιρετικά σημαντική για την κατανόηση της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η ατμόσφαιρα της γης αποτελείται από 3 στρώματα. Αυτά είναι η τροπόσφαιρα, η στρατόσφαιρα και η ιονόσφαιρα που απεικονίζονται στο Σχ. 1.8 και περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια [2].



Σχήμα 1.8: Στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας.

### 1.4.1 Τροπόσφαιρα

Η *τροπόσφαιρα* είναι το κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας στο οποίο κάτω από κανονικές συνθήκες η τιμή της θερμοκρασίας μειώνεται με το ύψος. Η τροπόσφαιρα εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους έως ένα ύψος που κυμαίνεται περίπου στα 10 km. Η τροπόσφαιρα είναι εκείνο το τμήμα της ατμόσφαιρας όπου οι μεταβολές του συντελεστή διάθλασης, της πίεσης και της υγρασίας, καθώς επίσης τα νέφη και οι υδρομετεωρίτες (βροχή, χιόνι, χαλάζι) επηρεάζουν σημαντικά τη διάδοση των ραδιοσυχνοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, σε συχνότητες πάνω από 30 MHz (α) τοπικές μεταβολές του συντελεστή διάθλασης στην τροπόσφαιρα μπορούν να σκεδάσουν την ενέργεια (β) απότομες μεταβολές της κατακόρυφης δομής του συντελεστή διάθλασης μπορεί να προκαλέσουν φαινόμενα ανάκλασης, ενώ (γ) εκτεταμένες ανώμαλες μεταβολές του συντελεστή διάθλασης με το ύψος δημιουργούν φαινόμενα παγίδευσης των ραδιοκυμάτων (ducting defraction). Όλοι οι προηγούμενοι μηχανισμοί μπορεί να μεταφέρουν ενέργεια αρκετά μακριά από τον κανονικό ορίζοντα. Μάλιστα, η ανάκλαση επηρεάζει κύρια τις συχνότητες μεταξύ 30 έως 1000 MHz, ενώ η παγίδευση έχει επίδραση στις συχνότητες πάνω περίπου από 1000 MHz.

### 1.4.2 Στρατόσφαιρα

Η *στρατόσφαιρα* βρίσκεται μεταξύ της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας και έχει πάχος περίπου 40 km. Η θερμοκρασία αυτού του στρώματος της ατμόσφαιρας θεωρείται σχεδόν σταθερή, ενώ η παρουσία των υδρατμών είναι περιορισμένη. Η στρατόσφαιρα γενικά ασκεί πολύ μικρή επίδραση στα ραδιοκύματα καθότι αποτελεί μια πολύ ήρεμη περιοχή με σχεδόν αμελητέες θερμοκρασιακές μεταβολές.

### 1.4.3 Ιονόσφαιρα

Η *ιονόσφαιρα* εκτείνεται από το ύψος των 50 km έως τα 400 km από τη επιφάνεια της γης και αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα. Η ιονόσφαιρα είναι το σημαντικότερο τμήμα της ατμόσφαιρας και επιτρέπει επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Η ιονόσφαιρα παίρνει το όνομά της από τα φορτισμένα ιόντα που δημιουργήθηκαν με τη διαδικασία του ιονισμού.

### Ιονισμός & Επανασύνδεση

Ο *ιονισμός* (ionization) λαμβάνει χώρα όταν το υπεριώδες φως του ηλίου εισέρχεται στην ιονόσφαιρα και συγκρούεται με τα άτομα των αερίων, προκαλώντας αποδέσμευση ηλεκτρονίων. Όταν το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο αποδεσμεύεται από τον πυρήνα του ατόμου, τότε το άτομο καθίσταται θετικά φορτισμένο (θετικό ιόν) και συνυπάρχει με το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται ιονισμός.

Καθώς η ατμόσφαιρα 'βομβαρδίζεται' από υπεριώδη ακτινοβολία διαφόρων συχνοτήτων δημιουργούνται διάφορα ιονισμένα υποστρώματα σε διαφορετικά ύψη. Χαμηλότερης συχνότητας υπεριώδης ακτινοβολία διεισδύει λιγότερο στη ατμόσφαιρα και συνεπώς δημιουργεί ιονισμένα υποστρώματα σε μεγαλύτερα ύψη. Από την άλλη, υπεριώδης ακτινοβολία υψηλότερης συχνότητας διεισδύει βαθύτερα και δημιουργεί ιονισμένα υποστρώματα σε μικρότερα ύψη. Ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την πυκνότητα των ιονισμένων υποστρωμάτων είναι η θέση του ήλιου ως προς τον ορίζοντα. Για το λόγο αυτό το ύψος και η πυκνότητα των ιονισμένων υποστρωμάτων ποικίλει και εξαρτάται από την ώρα της ημέρας και την εποχή του χρόνου.

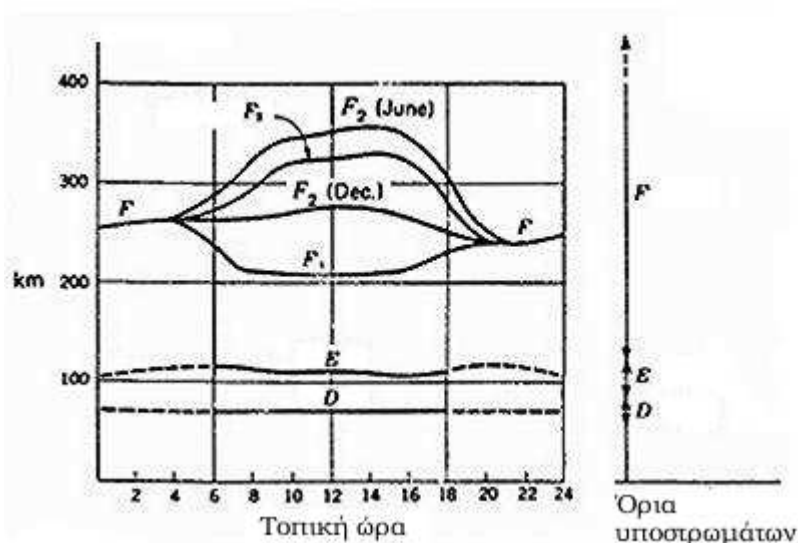
Η αντίστροφη διαδικασία του ιονισμού ονομάζεται *επανασύνδεση* (recombination) και συμβαίνει όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τα θετικά ιόντα συγκρούονται μεταξύ τους. Αποτέλεσμα αυτής της σύγκρουσης είναι η επαναδημιουργία του αρχικού ηλεκτρικά ουδέτερου ατόμου. Η διαδικασία της επανασύνδεσης εξαρτάται κι αυτή από την ώρα της ημέρας.

### Υποστρώματα Ιονόσφαιρας

Όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα, όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.9 να σχηματίζονται στην ιονόσφαιρα τέσσερα βασικά υποστρώματα D, E,  $F_1$ ,  $F_2$  με αύξουσα σειρά. Τα δύο τελευταία συνδυάζονται τη νύχτα για να σχηματίσουν ένα μόνο υπόστρωμα F.

Το υπόστρωμα D είναι το χαμηλότερο υπόστρωμα της ιονόσφαιρας. Υπάρχει σε ένα μέσο ύψος 70 km, με μέσο πάχος 10 km. Ο βαθμός ιονισμού του εξαρτάται από τη θέση του ήλιου ως προς τον ορίζοντα και για αυτό το λόγο εξαφανίζεται κατά τη διάρκεια της νύχτας. Είναι το λιγότερο σημαντικό υπόστρωμα για τη διάδοση HF. Ανακλά κύματα στις συχνότητες VLF και LF και απορροφά κάποια στις MF και HF συχνότητες.

Το υπόστρωμα E ακολουθεί το D και βρίσκεται στα 100 km περίπου,



Σχήμα 1.9: Τα υποστρώματα της ιονόσφαιρας [2].

με πάχος 25 km. Όπως και το υπόστρωμα D εξαφανίζεται τη νύχτα. Ο λόγος είναι η επανασύνδεση των ιόντων σε μόρια, λόγω της απουσίας του ηλίου όταν δε λαμβάνεται πλέον ακτινοβολία. Τα κύρια χαρακτηριστικά του υποστρώματος E είναι η μικρή βοήθεια στη διάδοση MF και η ανάκλαση των κυμάτων HF κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Το υπόστρωμα E<sub>s</sub> είναι ένα λεπτό στρώμα πολύ υψηλού βαθμού ιονισμού και μερικές φορές εμφανίζεται μαζί με το υπόστρωμα E. Καλείται αλλιώς και σποραδικό στρώμα E (sporadic layer E). Όταν εμφανίζεται διαρκεί μεγάλο χρονικό διάστημα και παραμένει ακόμα και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Δεν επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα στις διαδόσεις μεγάλων αποστάσεων, αλλά μερικές φορές επιτρέπει ανέλπιστα καλή λήψη. Οι αιτίες που το δημιουργούν δεν έχουν αποσαφηνισθεί πλήρως.

Το υπόστρωμα F<sub>1</sub>, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.9, βρίσκεται σε ύψος 180 km την ημέρα, ενώ τη νύχτα ενώνεται με το υπόστρωμα F<sub>2</sub>. Το πάχος του την ημέρα είναι περίπου 20 km. Αν και μερικά κύματα HF ανακλώνται από αυτό, τα περισσότερα το διαπερνούν για να ανακλαστούν στο F<sub>2</sub> υπόστρωμα. Η κύρια ιδιότητά του είναι λοιπόν ότι εξασθενεί σε πολύ μεγάλο βαθμό τα κύματα HF, μέχρι που χάνονται.

Το υπόστρωμα F<sub>2</sub> είναι το πιο σημαντικό ανακλαστικό μέσο για τα ραδιοκύματα υψηλών συχνοτήτων. Το ύψος του και ο βαθμός ιονισμού του ποικίλουν εξαιρετικά, όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.9. Εξαρτώνται από την

ώρα της ημέρας, τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος και τον ηλιακό κύκλο. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το υπόστρωμα F διατηρείται και τη νύχτα σε αντίθεση με τα άλλα υποστρώματα της ιονόσφαιρας. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό. Ο πρώτος λόγος είναι ότι όντας το υψηλότερο υπόστρωμα της ιονόσφαιρας ιονίζεται περισσότερο. Ο δεύτερος λόγος είναι η χαμηλή πυκνότητα του αέρα στο υπόστρωμα αυτό. Αυτή συνεπάγεται ότι τα μόρια είναι σχετικά απομακρυσμένα μεταξύ τους, οπότε μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα σύγκρουσης των μορίων και η επανασύνδεση των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τελικά πρέπει να σημειωθεί πως ο λόγος για την καλύτερη λήψη HF κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι ο συνδυασμός των  $F_1$  και  $F_2$  υποστρωμάτων σε ένα (F), καθώς επίσης και η εικονική εξαφάνιση των άλλων δύο υποστρωμάτων που προκαλούσαν σημαντική απορρόφηση κατά τη διάρκεια της ημέρας.

## 1.5 Τρόποι Μετάδοσης

Ο τρόπος με τον οποίο ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται από τον πομπό στο δέκτη όσον αφορά στη διαδρομή που αυτό ακολουθεί, οδηγεί στη διάκριση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε δύο βασικές κατηγορίες: στα κύματα εδάφους και στα ουράνια κύματα [6].

### 1.5.1 Κύματα Εδάφους

*Κύματα εδάφους* (ground waves) είναι εκείνα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται κοντά στην επιφάνεια της γης και διακρίνονται στα κύματα επιφανείας (surface waves) και στα κύματα χώρου (space waves).

#### **Κύματα Επιφανείας**

Τα *κύματα επιφανείας* (surface waves) παίρνουν το όνομά τους ακριβώς από το γεγονός ότι διαδίδονται κατά μήκος της επιφανείας της γης. Τα κύματα επιφανείας πρέπει να είναι κατακόρυφα πολωμένα προς αποφυγή βραχυκυκλώματος της ηλεκτρικής συνιστώσας. Κατά τη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος κοντά στην επιφάνεια της γης, επάγεται ρεύμα στο έδαφος και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μέρος της ενέργειάς του να απορροφάται από αυτό. Ένα κύμα επιφανείας διαδίδεται στην επιφάνεια της γης και με τη βοήθεια του μηχανισμού της περίθλασης. Όταν για παράδειγμα παρεμβάλλεται

στην πορεία του ένα εμπόδιο με διαστάσεις συγκρίσιμης τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος του επιφανειακού κύματος, τότε ο μηχανισμός της περίθλασης βοηθά στο να το 'ξεπεράσει'.

Ο τύπος της επιφάνειας του εδάφους παίζει σημαντικό ρόλο στη διάδοση των κυμάτων επιφανείας. Η εξασθένηση που υφίσταται ένα επιφανειακό κύμα εξαιτίας των επαγόμενων στο έδαφος ρευμάτων, εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους. Ο καλύτερος τύπος εδάφους για τη διάδοση είναι εκείνος που παρουσιάζει καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Όσο καλύτερη η αγωγιμότητα, τόσο μικρότερη η εξασθένηση. Έτσι, για παράδειγμα το νερό της θάλασσας εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και για το λόγο αυτό ευνοεί τις επικοινωνίες πάνω από την επιφάνειά του.

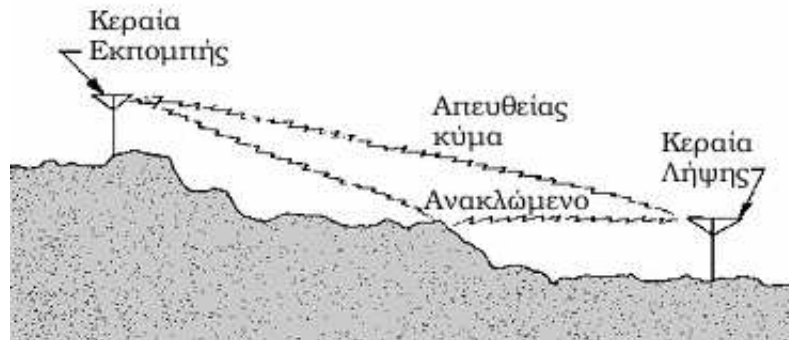
Ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας της εξασθένησης των κυμάτων επιφανείας είναι η συχνότητα. Όσο μικρότερη η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερο το μήκος κύματος και συνεπώς ευκολότερη η διάδοση των κυμάτων βάσει του μηχανισμού της περίθλασης. Για το λόγο αυτό τα επιφανειακά κύματα δε χρησιμοποιούνται πρακτικά σε συχνότητες άνω των 2 MHz (περίπου το κάτω όριο της μπάντας HF) λόγω της μεγάλης εξασθένησης που υφίστανται.

Σε αποστάσεις άνω των 1000 km το κύμα εδάφους είναι εξαιρετικά σταθερό δείχνοντας ασήμαντη ημερήσια, εποχιακή ή ετήσια μεταβολή. Η διάδοση στη μπάντα VLF χρησιμοποιείται κυρίως στις 'θαλάσσιες επικοινωνίες', αλλά και σε διαδόσεις χρόνου και συχνότητας. Για την εκπομπή στη μπάντα VLF χρησιμοποιούνται κεραίες με υψηλή ισχύ εκπομπής και πολύ μεγάλα μήκη. Έτσι συναντάμε τις περισσότερες φορές ισχύς εκπομπής της τάξης του 1 MW στη μπάντα VLF. Για παράδειγμα, οι ναυτιλιακοί σταθμοί έχουν συστοιχία κεραιών που αποτελείται από πολύ ψηλά στοιχεία (ύψος 300 m και άνω) με χαμηλότερη συχνότητα μετάδοσης στα 15 kHz.

### **Κύματα Χώρου**

Το *κύμα χώρου* (space wave) μπορεί να ακολουθήσει δύο διαφορετικές πορείες διάδοσης κατά τη μετάδοσή του από τον πομπό στο δέκτη. Οι δύο παραπάνω πορείες οδηγούν στη διάκριση των κυμάτων χώρου στα απευθείας κύματα (direct waves) και στα ανακλώμενα από το έδαφος κύματα (ground reflected waves) τα οποία φαίνονται παραστατικά στο Σχ. 1.10.

Ο μηχανισμός διάδοσης των απευθείας κυμάτων είναι απλός μιας και μεταδίδονται γενικά σε ευθείες γραμμές. Ωστόσο, αφού εξαρτώνται από την



Σχήμα 1.10: Κύματα χώρου.

ύπαρξη οπτικής επαφής (Line Of Sight) περιορίζονται από την καμπυλότητα της γης. Σε γενικές γραμμές, μεταδίδονται ως ηλεκτρομαγνητικά κύματα στον ελεύθερο χώρο. Αυτή η συμπεριφορά τους, επιβάλλεται διότι τα μήκη κύματός τους είναι πολύ μικρά για ανάκλαση στην ιονόσφαιρα και διότι τα κύματα εδάφους εξαφανίζονται πολύ κοντά στον πομπό (λόγω της υψηλής συχνότητας των κυμάτων χώρου). Ο ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας για κύματα χώρου είναι περίπου τα  $4/3$  του μήκους του οπτικού ορίζοντα. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ σημαντική και προκαλείται από τη σύσταση της ατμόσφαιρας που περιβάλλει την καμπύλη γη. Προσεγγιστικά, δίνεται από τον εμπειρικό τύπο

$$h = d_t + d_r = 4\sqrt{h_t} + 4\sqrt{h_r}, \quad (1.11)$$

όπου  $d_t$  και  $d_r$  η απόσταση σε km από την κεραία μετάδοσης και λήψης αντίστοιχα,  $h_t$  και  $h_r$  το ύψος κεραίας του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα σε m (Σχ. 1.11).



Σχήμα 1.11: Ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας.

Ένα απλός υπολογισμός δείχνει ότι για μία κεραία μετάδοσης ύψους 225 m επάνω από την επιφάνεια της γης, ο ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας είναι 60 km. Αν τώρα η κεραία λήψης δεν είναι στο έδαφος, αλλά σε ύψος 16 m από αυτό, η απόσταση αυξάνεται στα 76 km. Μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ



κεραιών επιτυγχάνεται με τοποθέτηση των κεραιών σε κορυφές βουνών. Ραδιοζεύξεις μεγαλύτερες των 1000 km σπάνια χρησιμοποιούνται για εμπορικές επικοινωνίες.

Αν και γενικότερα τα ανακλώμενα κύματα μπορούν να βοηθήσουν σε περιπτώσεις έλλειψης οπτικής επαφής, τα ανακλώμενα από το έδαφος (ή και από εμπόδια) κύματα μερικές φορές μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα όταν αυτά συνδυάζονται με τα απευθείας κύματα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πολύδρομη μετάδοση και θα εξεταστεί σε επόμενη ενότητα. Ενδεικτικά αναφέρουμε μια μορφή τέτοιας παρεμβολής γνωστή ως “ghosting” που μπορεί να παρατηρηθεί στην οθόνη ενός δέκτη τηλεόρασης. Στην περίπτωση της τηλεόρασης, ταυτόχρονα με την πραγματική εικόνα εμφανίζεται και μια ακόμη παραμορφωμένη εκδοχή της. Προκαλείται από τη διαφορά διαδρομών (και συνεπώς τη διαφορά φάσης) μεταξύ του απευθείας και του ανακλώμενου από το έδαφος (ή το εμπόδιο) κύματος. Η κατάσταση χειροτερεύει κοντά στον πομπό παρά σε απόσταση από αυτόν, λόγω του ότι οι ανακλώμενες ακτίνες είναι ισχυρότερες εκεί κοντά.

### 1.5.2 Ουράνια Κύματα

Τα *ουράνια κύματα* (sky waves), αποκαλούμενα συχνά και ιονοσφαιρικά, ακτινοβολούνται προς τον ουρανό και επιστρέφουν στη γη σε κάποια μακρινή απόσταση λόγω της διάθλασης στην ιονόσφαιρα. Αυτή η μορφή διάδοσης δεν επηρεάζεται από τη γήινη επιφάνεια και μπορεί να διαδώσει τα ραδιοκύματα σε μεγάλες αποστάσεις. Συνήθως χρησιμοποιείται η ζώνη υψηλής συχνότητας (HF) για τη διάδοση ουράνιων κυμάτων. Η ακόλουθη μελέτη της επίδρασης της ιονόσφαιρας στα ουράνια κύματα θα βοηθήσει στην κατανόηση της διάδοσης των ουράνιων κυμάτων.

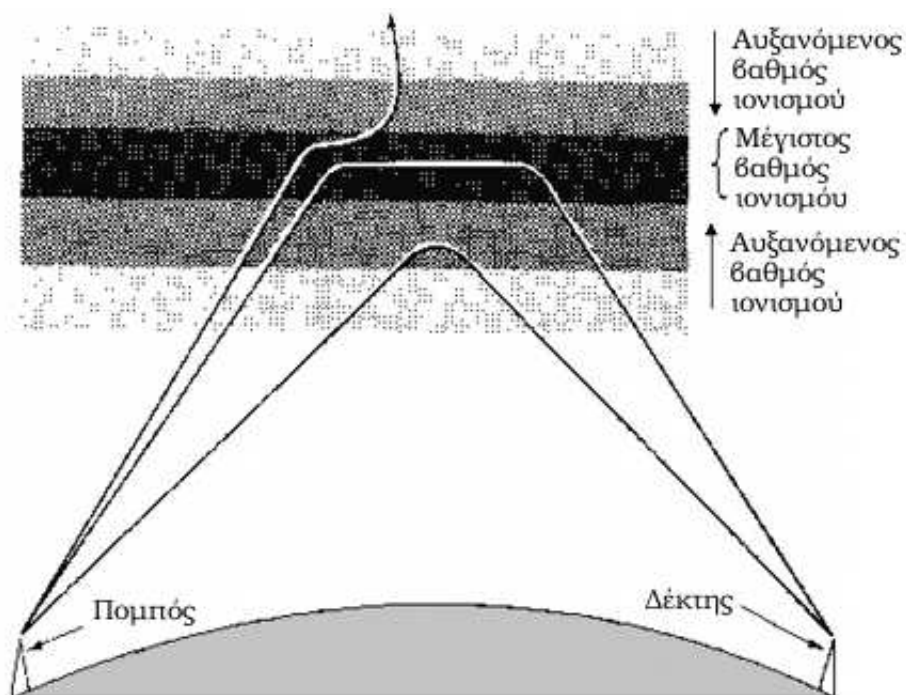
### 1.5.3 Διάθλαση στην Ιονόσφαιρα

Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται σε ένα ιονισμένο υπόστρωμα της ατμόσφαιρας πραγματοποιείται διάθλαση. Όπως αναφέρθηκε και στο Εδάφιο 1.3.2, η διάθλαση οφείλεται στην απότομη αλλαγή της ταχύτητας διάδοσης του κύματος κατά την είσοδο του σε ένα μέσο διαφορετικής πυκνότητας. Το κατά πόσο το κύμα θα διαθλαστεί εξαρτάται: (α) από το βαθμό ιονισμού του υποστρώματος, (β) από τη συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού

κύματος και ( $\gamma$ ) από την γωνία με την οποία το κύμα εισέρχεται στο υπόστρωμα.

### Πυκνότητα Υποστρωμάτων

Το Σχ. 1.12 απεικονίζει την εξάρτηση του τρόπου διάδοσης των ραδιοκυμάτων από την πυκνότητα των υποστρωμάτων της ατμόσφαιρας. Κάθε ιονισμένο υπόστρωμα εμφανίζει μια κεντρική περιοχή στον όγκο του που χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό ιονισμού. Καθώς απομακρυνόμαστε από αυτήν την κεντρική περιοχή (είτε προς τα πάνω, είτε προς τα κάτω), παρατηρείται μείωση του βαθμού ιονισμού. Όσο ο βαθμός ιονισμού αυξάνει, για ένα κύμα που πλησιάζει το δεδομένο στρώμα της ιονόσφαιρας υπό μία γωνία, τόσο μειώνεται ο συντελεστής διάθλασης του στρώματος. Καθώς λοιπόν το κύμα εισέρχεται στο ιονισμένο υπόστρωμα, η σταδιακή μείωση της πυκνότητας προκαλεί τη σταδιακή διάθλαση του διαδιδόμενου κύματος και τελικά την αλλαγή της πορείας κατευθύνοντάς το πίσω στη γη.



Σχήμα 1.12: Επίδραση της πυκνότητας των υποστρωμάτων.

Αν η συχνότητα μεταβολής του συντελεστή διάθλασης ανά μονάδα ύψους (μετρούμενη σε μήκη κύματος) είναι επαρκής, η διαθλώμενη ακτίνα τελικά

θα γίνει κάποια στιγμή παράλληλη με το υπόστρωμα. Καθώς η πυκνότητα του υποστρώματος μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για δεδομένο ύψος, το κύμα μπορεί να διανύσει μεγάλη απόσταση σε διεύθυνση παράλληλη με το υπόστρωμα.

Αντίθετα, εάν το κύμα συναντήσει ένα λεπτό αλλά πολύ υψηλού βαθμού ιονισμένο υπόστρωμα, μπορεί να 'κυρτώσει' τόσο γρήγορα δίνοντας μας την εντύπωση ότι ανακλάστηκε απευθείας πίσω στη γη. Για να ανακλαστεί με αυτόν τον τρόπο, θα πρέπει το ιονισμένο υπόστρωμα να μην είναι παχύτερο από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος ραδιοκύματος. Δεδομένου ότι τα ιονισμένα υποστρώματα μπορεί να έχουν πάχος μερικών χιλιομέτρων, η ιονοσφαιρική ανάκλαση συνήθως αφορά χαμηλές συχνότητες.

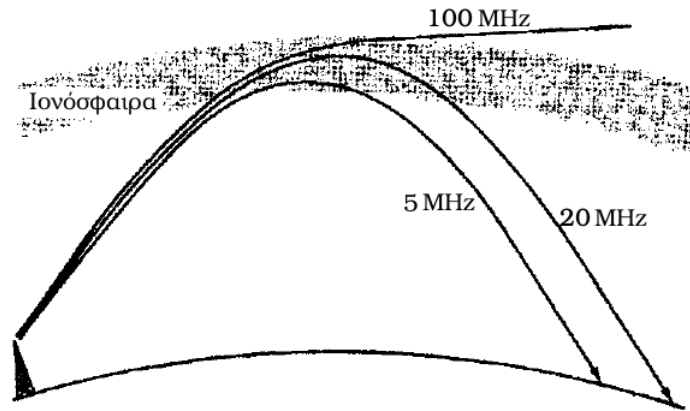
### Επίδραση Συχνότητας

Όσο πιο χαμηλή είναι η συχνότητα του ραδιοκύματος, τόσο πιο μεγάλο είναι το μήκος κύματος και περισσότερο πιθανή η διάθλαση του κύματος και στη συνέχεια η ανάκλασή του και η επιστροφή του στη γη. Η *κρίσιμη συχνότητα* (critical frequency)  $f_{crit}$  για δεδομένο υπόστρωμα, είναι η υψηλότερη συχνότητα ενός κύματος με γωνία  $90^\circ$  ως προς το επίπεδο (γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$ ), το οποίο θα επιστρέψει στη γη αφού ανακλαστεί από την ιονόσφαιρα. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι υπάρχει μέγιστο στην τιμή της κρίσιμης συχνότητας και απαραίτητο να γνωρίζουμε την τιμή του υπό συγκεκριμένες συνθήκες, δεδομένου ότι αυτή η τιμή μεταβάλλεται ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Οι τιμές της κυμαίνονται μεταξύ 5 και 12 MHz για το υπόστρωμα  $F_1$  της ιονόσφαιρας.

Ραδιοκύματα που εκπέμπονται σε συχνότητες μεγαλύτερες της  $f_{crit}$  διαπερνούν το υπόστρωμα και χάνονται στο διάστημα. Όσο πιο χαμηλή είναι η συχνότητα, τόσο πιο γρήγορα ανακλώνται τα ραδιοκύματα από ένα υπόστρωμα δεδομένου βαθμού ιονισμού.

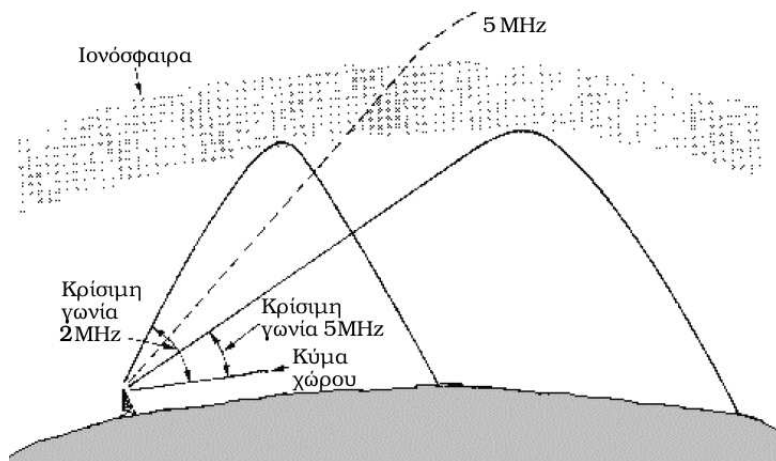
### Επίδραση Γωνίας

Όπως είναι προφανές, η γωνία πρόσπτωσης παίζει καθοριστικό ρόλο στην πορεία της διάδοσης του κύματος. Αντίστοιχα με την ύπαρξη κρίσιμης συχνότητας που αφορά γωνία  $90^\circ$  ως προς το επίπεδο, ορίζουμε την *κρίσιμη γωνία* για δεδομένη συχνότητα. Ως *κρίσιμη γωνία* (critical angle) λοιπόν για μια δεδομένη συχνότητα, ορίζεται η μέγιστη γωνία ως προς το επίπεδο για την



Σχήμα 1.13: Επίδραση της συχνότητας.

οποία έχουμε ανάκλαση του ραδιοκύματος πίσω στη γη. Οποιαδήποτε γωνία μεγαλύτερη της κρίσιμης έχει ως αποτέλεσμα τη διείσδυση του ραδιοκύματος στην ιονόσφαιρα και τη διαφυγή του στο διάστημα.

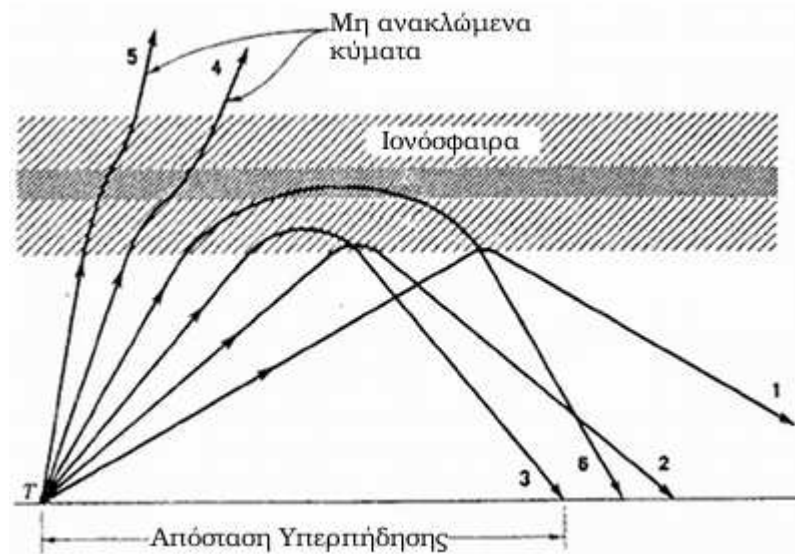


Σχήμα 1.14: Επίδραση της συχνότητας στην κρίσιμη γωνία.

Καθώς η συχνότητα του ραδιοκύματος αυξάνεται, η κρίσιμη γωνία θα πρέπει να μειωθεί ώστε να συμβεί ανάκλαση. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχ. 1.14 όπου η ανάκλαση του κύματος των 5 MHz προϋποθέτει μικρότερη κρίσιμη γωνία από εκείνη του κύματος των 2 MHz.

### Απόσταση Υπερπήδησης & Ζώνη Υπερπήδησης

Η απόσταση υπερπήδησης (skip distance) είναι η μικρότερη απόσταση από τον πομπό, μετρούμενη στην επιφάνεια της γης, στην οποία ένα ουράνιο κύμα συγκεκριμένης συχνότητας θα επιστρέψει στη γη.

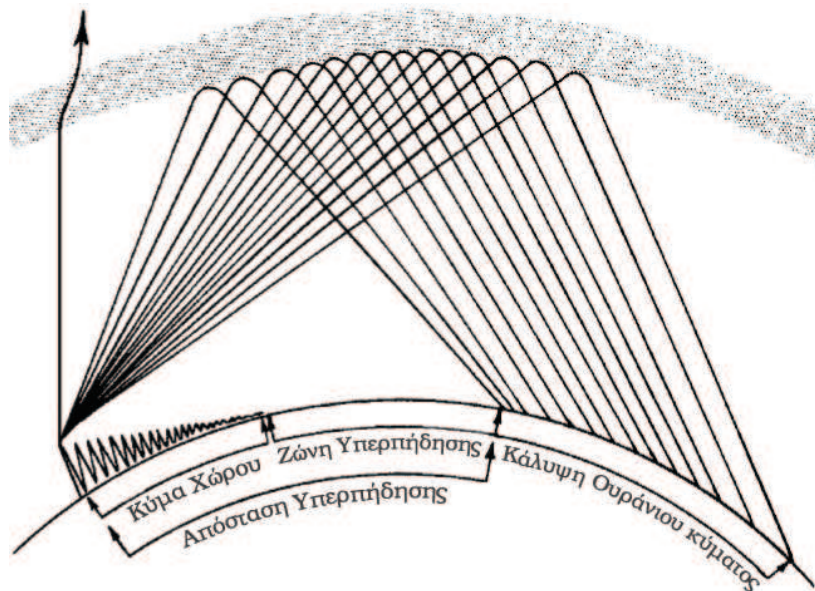


Σχήμα 1.15: Απόσταση υπερπήδησης [2].

Όταν η γωνία πρόσπτωσης γίνεται πολύ μεγάλη (Σχ. 1.15, κύμα 1), το κύμα επιστρέφει στο έδαφος σε μία μεγάλη απόσταση από τον πομπό. Όσο αυτή η απόσταση μειώνεται, φυσιολογικά το κύμα επιστρέφει όλο και πιο κοντά στον πομπό (κύματα 2 και 3). Αν η γωνία γίνει πολύ μικρότερη από αυτή του κύματος 3, το κύμα προσπίπτει σχεδόν κατακόρυφα με αποτέλεσμα να μην επιστρέψει στη γη (κύματα 4 και 5). Και στις δύο περιπτώσεις, η κύρτωση (λόγω της περίθλασης) δεν επαρκεί για την επιστροφή του κύματος, εκτός κι αν η συχνότητα που χρησιμοποιείται για επικοινωνία είναι μικρότερη από την κρίσιμη συχνότητα (το πιο συχνό φαινόμενο). Σε αυτήν την περίπτωση, όλα τα κύματα επιστρέφουν στη γη. Τελικά, αν η γωνία πρόσπτωσης είναι λίγο μικρότερη από αυτήν του κύματος 3, το κύμα μπορεί να επιστρέψει, αλλά η απόσταση θα είναι μεγαλύτερη από αυτήν του σημείου επιστροφής του κύματος 3 (κύμα 6). Αυτό το ψηλότερο κύμα κυρτώνει σταδιακά, διότι η πυκνότητα των ιόντων μεταβάλλεται πολύ αργά σε αυτήν τη γωνία. Τέλος, επιστρέφει στη γη σε μία αξιοσημείωτη απόσταση από τον πομπό και είναι

σημαντικά εξασθενημένο. Το κύμα 3 προσπίπτει στο στρώμα της ιονόσφαιρας με μια γωνία τέτοια, που έχει ως συνέπεια την επιστροφή του κοντά στον πομπό. Η απόσταση αυτή είναι η απόσταση υπερπήδησης (skip distance).

Αν υποθέσουμε ότι η κεραία εκπομπής των ιονοσφαιρικών (ουράνιων) κυμάτων εκπέμπει και ένα κύμα επιφανείας, μπορούμε να ορίσουμε άλλη μια απόσταση. Αυτή είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου που το κύμα επιφανείας εξασθενεί πλήρως και του σημείου που προσπίπτει το πρώτο ανακλώμενο από την ιονόσφαιρα κύμα και ονομάζεται *ζώνη υπερπήδησης* (skip zone). Ουσιαστικά αντιστοιχεί στο τμήμα της επιφάνειας της γης στο οποίο δεν είναι δυνατόν να έχουμε κάλυψη ούτε από τα κύματα χώρου, αλλά ούτε και από τα ουράνια κύματα (Σχ. 1.16).



Σχήμα 1.16: Ζώνη υπερπήδησης.

### Βέλτιστη Συχνότητα

Όπως είδαμε στα προηγούμενα, όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι  $90^\circ$ , η μέγιστη συχνότητα για την οποία το προσπίπτον κύμα ανακλάται από την ιονόσφαιρα κύμα ονομάζεται κρίσιμη συχνότητα. Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι διαφορετική από  $90^\circ$ , η παραπάνω συχνότητα ονομάζεται μέγιστη χρησιμοποιούμενη συχνότητα (Maximum Usable Frequency) MUF και προφανώς εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης. Παρόλα αυτά, η MUF δε χρησιμοποιείται στην πράξη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μικρές αλλαγές στη

σύνθεση των υποστρωμάτων της ιονόσφαιρας είναι δυνατόν να δημιουργήσουν πρόβλημα, έχοντας ως αποτέλεσμα παραδείγματος χάριν, την εκτροπή των ραδιοκυμάτων στο διάστημα. Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις, η συχνότητα που χρησιμοποιείται αντιστοιχεί στο 85% της MUF. Αυτή η συχνότητα ονομάζεται *βέλτιστη συχνότητα λειτουργίας* (Optimum Working Frequency).

#### 1.5.4 Θερμοκρασιακή Αναστροφή

Η πυκνότητα του αέρα μειώνεται και ο συντελεστής διάθλασης αυξάνεται με το ύψος από το έδαφος. Η αύξηση στο συντελεστή διάθλασης είναι κανονικά γραμμική και σταδιακή, αλλά κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ένα επίπεδο ζεστού αέρα μπορεί να παγιδευτεί επάνω από ψυχρότερο στρώμα αέρα, συχνά επάνω από την επιφάνεια του νερού (υπό φυσιολογικές ατμοσφαιρικές συνθήκες ο πιο ζεστός αέρας βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και καθώς ανεβαίνουμε σε υψόμετρο, ο αέρας αυτός γίνεται ψυχρότερος). Το αποτέλεσμα είναι η μείωση του συντελεστή διάθλασης πολύ πιο γρήγορα με το ύψος απ' ό,τι συνήθως. Αυτό συμβαίνει κοντά στο έδαφος, συχνά σε απόσταση 30 m από αυτό. Η γρήγορη μείωση του συντελεστή διάθλασης (και της διηλεκτρικής σταθεράς), προκαλεί στα ραδιοκύματα (κυρίως της UHF μπάντας) ότι ακριβώς προκαλεί η ιονόσφαιρα στα HF κύματα, δηλαδή καμπυλώνουν και κινούνται προς το έδαφος.



Σχήμα 1.17: Κυματοδήγηση.

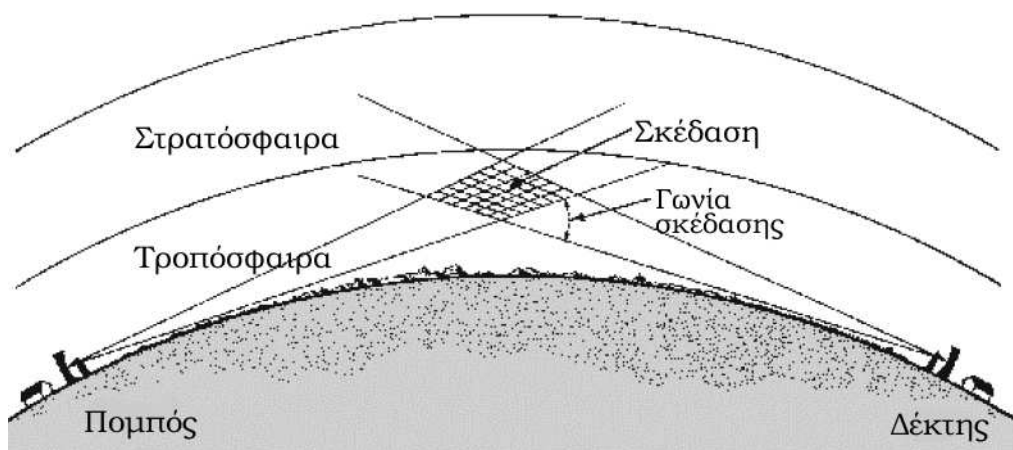
Τα ραδιοκύματα συνεχώς διαθλώνται και ανακλώνται από το έδαφος με αποτέλεσμα να μεταδίδονται γύρω από την γη σε αποστάσεις που μερικές φορές υπερβαίνουν τα 1000 km (Σχ. 1.17). Η κύρια απαίτηση είναι η *θερμοκρασιακή αναστροφή* (temperature inversion). Πρόκειται για αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα με το ύψος αντί της συνηθισμένης μείωσης στη θερμοκρασία των  $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$  στην 'τυπική' ατμόσφαιρα. Το φαινόμενο αυτό που

εμφανίζεται κυρίως στις υψηλές συχνότητες ονομάζεται *υπερδιάθλαση* (superrefraction), γνωστό και ως *κυματοδήγηση* (ducting).

### 1.5.5 Τροποσφαιρική Μετάδοση

Με τη χρήση της τροπόσφαιρας είναι δυνατό να μεταδοθούν UHF κύματα πέρα από τον ορίζοντα. Η τροποσφαιρική μετάδοση χρησιμοποιεί συγκεκριμένες ιδιότητες της τροπόσφαιρας.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 1.18 έχουμε επικοινωνία δύο κεραιών πέρα από τον ορίζοντα. Αν μία από αυτές είναι μία UHF κεραία μετάδοσης και η άλλη μία UHF κεραία λήψης, τότε μέσω του φαινομένου της τροποσφαιρικής σκέδασης θα κατευθυνθεί επαρκής ενέργεια προς την κεραία λήψης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Τα αίτια του φαινομένου αυτού δεν έχουν διευκρινιστεί σαφώς αλλά επικρατούν δύο θεωρίες. Η πρώτη εξηγεί ότι το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε ανακλάσεις από σταγονίδια στην ατμόσφαιρα, ενώ η δεύτερη ότι οφείλεται σε ανακλάσεις από τα υπόλοιπα ατμοσφαιρικά στρώματα. Γενικά, πρόκειται για μία μόνιμη κατάσταση και όχι για ένα σποραδικό φαινόμενο. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται πιο συχνά έχουν κέντρο τα 900, 2000 και 5000 MHz. Ωστόσο η ισχύς του κύματος μετά τη σκέδαση είναι μικρότερη κατά 60 με 90 dB της προσπίπτουσας ισχύος, οπότε απαιτείται πολύ υψηλή ισχύς μετάδοσης.



Σχήμα 1.18: Τροποσφαιρική μετάδοση.



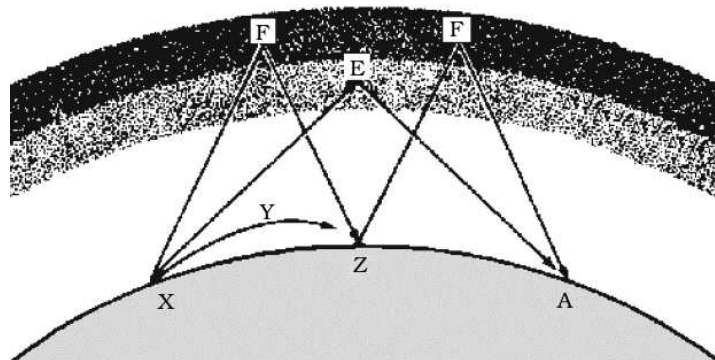
## 1.6 Παράγοντες Υποβάθμισης

### 1.6.1 Πολύδρομη Μετάδοση

Ο όρος *πολύδρομη μετάδοση* (multipath propagation) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις πολλαπλές διαδρομές που μπορεί να ακολουθήσει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα κατά τη διάδοσή του από τον πομπό στο δέκτη ενός ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Τέτοιες διαδρομές μπορεί να περιλαμβάνουν ανάκλαση στο έδαφος, ανάκλαση σε φυσικά εμπόδια, διάθλαση σε διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας, απευθείας διάδοση, καθώς και τη διάδοση ως κύματα επιφανείας.

Στο Σχ. 1.19 φαίνονται χαρακτηριστικά μερικές πιθανές διαδρομές που μπορεί να ακολουθήσει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα σε μια τυπική τηλεπικοινωνιακή ζεύξη. Η διαδρομή XYZ στο σχήμα αντιπροσωπεύει το κύμα επιφανείας, ενώ η διαδρομή ΧΕΑ περιλαμβάνει τη διάθλαση του κύματος στο στρώμα Ε της ατμόσφαιρας. Η διαδρομή ΧFΖFA είναι αποτέλεσμα της μεγαλύτερης γωνίας πρόσπτωσης και περιλαμβάνει τη διάθλαση του κύματος δύο φορές στο στρώμα F, λόγω της ενδιάμεσης ανάκλασής του στην επιφάνεια της γης (σημείο Z). Στο σημείο Z, το συνολικά λαμβανόμενο σήμα είναι συνδυασμός του κύματος επιφανείας και του ουράνιου κύματος. Έχοντας διανύσει διαφορετικές διαδρομές, αυτά τα δύο κύματα φθάνουν στο σημείο Z διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αν τα δύο λαμβανόμενα κύματα χαρακτηρίζονται από ίδια φάση, τότε το διανυσματικό του άθροισμα έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή έχουν διαφορετικές φάσεις, προκύπτει ένα εξασθενημένο σήμα. Μικρές διαφοροποιήσεις στη διαδρομή που ακολουθεί ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μπορεί να προκαλέσουν αξιοσημείωτες αλλαγές στο λαμβανόμενο σήμα.

Τα αποτελέσματα της πολύδρομης μετάδοσης είναι δυνατόν να αποφευχθούν ή να αξιοποιηθούν με τη χρήση των τεχνικών “diversity”. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται συνήθως δύο τεχνικές, η “space diversity” και η “frequency diversity”. Στην τεχνική του space diversity χρησιμοποιούνται στην πλευρά του δέκτη δύο ή και περισσότερες κεραιές λήψης, τοποθετημένες σε απόσταση μεταξύ τους. Όπως περιγράψαμε και προηγουμένως, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος μπορεί να είναι αισθητά διαφορετική για πολύ μικρές μετακινήσεις. Ακριβώς αυτό εκμεταλλεύεται και η εν λόγω τεχνική με τη χρήση περισσότερων κεραιών σε διαφορετικές θέσεις. Από την άλλη, στην τεχνική του frequency diversity, χρησιμοποιούνται δύο πομποί



Σχήμα 1.19: Πολύδρομη μετάδοση.

και δύο δέκτες για την εκπομπή και τη λήψη της ίδιας πληροφορίας σε δύο διαφορετικές συχνότητες επικοινωνίας και, συνεπώς, σχεδόν πάντα ένας από τους δύο δέκτες θα παρέχει αξιόπιστο σήμα.

### 1.6.2 Διαλείψεις

Το πιο ενοχλητικό πρόβλημα κατά τη λήψη των ραδιοκυμάτων είναι οι αυξομειώσεις στην ένταση του σήματος γνωστές και ως *διαλείψεις* (fading). Λόγω γενικά του μεγάλου αριθμού παραγόντων που συμβάλλουν στη δημιουργία των διαλείψεων, πρόκειται για ένα φαινόμενο που μπορεί να καθοριστεί μόνο με στατιστικές κατανομές. Υπάρχουν διάφορες συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορούν να συμβούν διαλείψεις.

Καθώς ένα ραδιοκύμα διαθλάται από την ιονόσφαιρα ή ανακλάται από τη γήινη επιφάνεια, μπορούν να προκληθούν τυχαίες αλλαγές στην πόλωση του κύματος. Οι κάθετα και οριζόντια τοποθετημένες κεραιές είναι σχεδιασμένες για να λαμβάνουν κάθετα και οριζόντια πολωμένα κύματα αντίστοιχα. Επομένως, αλλαγές στην πόλωση προκαλούν αλλαγές στην ποιότητα των λαμβανόμενων σημάτων. Διαλείψεις προκύπτουν επίσης από την απορρόφηση ενέργειας στην ιονόσφαιρα. Οι διαλείψεις λόγω απορρόφησης εμφανίζονται για μια πιο μεγάλη περίοδο σε σχέση με τους άλλους τύπους διαλείψεων, δεδομένου ότι η απορρόφηση πραγματοποιείται αργά. Συνήθως εντούτοις, οι διαλείψεις στην περίπτωση ιονοσφαιρικών κυμάτων είναι κυρίως αποτέλεσμα της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών που οφείλεται όπως περιγράψαμε στη συμβολή των κυμάτων που φθάνουν στο δέκτη από διαφορετικές διαδρομές. Οι διαλείψεις οφείλονται επίσης στην εξασθένηση του σήματος λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (π.χ. βροχή, χιόνι, χαλάζι).

### 1.6.3 Απορρόφηση στην Ιονόσφαιρα

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν ένα ραδιοκύμα κατά την πορεία του από τον πομπό στο δέκτη. Ο παράγοντας με τις δυσμενέστερες συνέπειες στα ραδιοκύματα είναι η *απορρόφηση*. Η απορρόφηση οδηγεί στην απώλεια ενέργειας ενός ραδιοκύματος και επακόλουθα, περιορίζει την εμβέλειά του. Όπως είδαμε και στην περίπτωση των κυμάτων επιφανείας, η εξασθένησή τους οφείλεται κυρίως στις απώλειες απορρόφησης λόγω των επαγόμενων στο έδαφος ρευμάτων. Τα ουράνια κύματα υφίστανται απώλειες λόγω της απορρόφησης τους από την ιονόσφαιρα. Σημειώστε ότι απορρόφηση των ουράνιων κυμάτων μπορεί επίσης να εμφανιστεί και σε χαμηλότερα ατμοσφαιρικά επίπεδα, λόγω της παρουσίας νερού και υδρατμών. Εντούτοις, αυτό γίνεται σημαντικό μόνο στις συχνότητες πάνω από 10 GHz.

Στο κενό η έννοια της απορρόφησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δεν υφίσταται, μιας και δεν υπάρχει κάτι που να εμποδίζει τη διάδοσή τους. Ωστόσο, δεν ισχύουν τα ίδια για την ατμόσφαιρα της γης. Η ατμόσφαιρα απορροφά μέρος της ενέργειας των ραδιοκυμάτων, καθώς μέρος της ενέργειας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων απορροφάται από τα άτομα και μόρια της ατμόσφαιρας. Η ανταλλαγή αυτή της ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα τα άτομα και τα μόρια της ατμόσφαιρας που απορρόφησαν την ενέργεια να ταλαντώνονται και η ατμόσφαιρα στο σημείο εκείνο να θερμαίνεται.

Η μεγαλύτερη ιονοσφαιρική απορρόφηση εμφανίζεται στις περιοχές της ιονόσφαιρας όπου ο βαθμός ιονισμού είναι μέγιστος. Καθώς ένα ραδιοκύμα περνά στην ιονόσφαιρα, χάνει μέρος της ενέργειάς του λόγω της σύγκρουσης με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τα ιόντα. Εάν αυτά τα υψηλής ενέργειας ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα δε συγκρούονται με μόρια αερίων χαμηλής ενέργειας, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που χάνεται από το ραδιοκύμα μετατρέπεται και πάλι σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, και το κύμα συνεχίζει να διαδίδεται έχοντας υποστεί πολύ μικρή εξασθένηση. Εντούτοις, εάν τα υψηλής ενέργειας ελεύθερα ηλεκτρόνια και τα ιόντα συγκρούονται με άλλα μόρια, ένα μεγάλο μέρος αυτής της ενέργειας χάνεται, με συνέπεια την απορρόφηση ενέργειας από το κύμα. Δεδομένου ότι η απορρόφηση της ενέργειας εξαρτάται από τη σύγκρουση των μορίων, όσο μεγαλύτερη η πυκνότητα του ιονισμένου στρώματος, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα των συγκρούσεων και επομένως, τόσο μεγαλύτερη η απορρόφηση. Τα ιδιαίτερα πυκνά στρώματα D και E προκαλούν τη μέγιστη απορρόφηση των ραδιοκυμάτων.

Δεδομένου ότι η πυκνότητα της ιονόσφαιρας ποικίλλει με την εποχή, τη

μέρα και την ώρα, είναι αδύνατο να εκφραστεί μια σταθερή σχέση μεταξύ της απόστασης και της ισχύος για ιονοσφαιρική διάδοση. Υπό ορισμένες συνθήκες, η απορρόφηση είναι τόσο μεγάλη ώστε η επικοινωνία πέρα από την ευθεία οπτικής επαφής (LOS) είναι πολύ δύσκολη.

#### 1.6.4 Μεταβολές στην Ιονόσφαιρα

Επειδή η ύπαρξη της ιονόσφαιρας συσχετίζεται άμεσα με τις ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τον ήλιο, η μετακίνηση της γης γύρω από αυτόν και οι αλλαγές στη δραστηριότητα του ήλιου μπορούν να οδηγήσουν σε μεταβολές στη σύσταση της ιονόσφαιρας. Αυτές οι μεταβολές είναι δύο τύπων: (α) εκείνες που εμφανίζονται περιοδικά και μπορούν να προβλεφθούν, και (β) εκείνες που είναι τυχαίες ως αποτέλεσμα της μη προβλέψιμης συμπεριφοράς του ήλιου.

##### Κανονικές Μεταβολές

Οι κανονικές μεταβολές μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: (α) τις ημερήσιες, (β) τις εποχιακές και (γ) τις μεταβολές που οφείλονται στον ηλιακό κύκλο.

Οι ημερήσιες μεταβολές στη σύσταση των υποστρωμάτων της ιονόσφαιρας είναι αποτέλεσμα της εικοσιτετράωρης περιστροφής της γης γύρω από τον άξονά της.

Η δομή και η πυκνότητα του υποστρώματος F εξαρτάται από την ώρα της ημέρας και τη γωνία του ήλιου. Όπως έχουμε πει, αποτελεί ένα ενιαίο υπόστρωμα κατά τη διάρκεια της νύχτας, αλλά διασπάται σε δύο υποστρώματα κατά τη διάρκεια της μέρας. Ο βαθμός ιονισμού του υποστρώματος  $F_1$  εξαρτάται από τη γωνία του ήλιου. Η κύρια επίδρασή του είναι η εξασθένηση των κυμάτων HF που το διαπερνούν πριν περάσουν στο υπόστρωμα  $F_2$ . Το υπόστρωμα  $F_2$  διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για τις επικοινωνίες HF μεγάλων αποστάσεων. Είναι ένα πολύ μεταβλητό υπόστρωμα καθώς το ύψος και η πυκνότητά του μεταβάλλονται ανάλογα με την ώρα της ημέρας, την εποχή, και την ηλιακή δραστηριότητα.

Το υπόστρωμα D ανακλά τα VLF κύματα, διαθλά τα LF και MF κύματα, απορροφά τα HF κύματα, έχει λίγη επίδραση στα VHF και εξαφανίζεται τη νύχτα. Στο υπόστρωμα E, ο ιονισμός εξαρτάται από τη γωνία του ήλιου. Το υπόστρωμα E διαθλά τα κύματα HF κατά τη διάρκεια της ημέρας μέχρι τα

20 MHz. Ο βαθμός ιονισμού του μειώνεται πολύ τη νύχτα.

Οι εποχιακές μεταβολές είναι αποτέλεσμα της περιστροφής της γης γύρω από τον ήλιο. Οι εποχιακές παραλλαγές της σύνθεσης των D, E, και  $F_1$  υποστρωμάτων σχετίζονται με τη γωνία του ήλιου και κατά συνέπεια ο βαθμός ιονισμού αυτών των υποστρωμάτων είναι μέγιστος κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Το υπόστρωμα  $F_2$  εντούτοις, δεν ακολουθεί αυτόν τον κανόνα και ο ιονισμός του είναι μέγιστος το χειμώνα και μικρότερος το καλοκαίρι. Κατά συνέπεια, οι συχνότητες λειτουργίας για τη διάδοση μέσω του υποστρώματος  $F_2$  είναι υψηλότερες το χειμώνα από ότι το καλοκαίρι.

Ο ήλιος εμφανίζει ένα κατώτατο και ανώτατο όριο δραστηριότητας (λόγω της εμφάνισης ή μη ηλιακών κηλίδων) που εμφανίζεται περίπου κάθε 11 έτη και ονομάζεται ενδεκαετής ηλιακός κύκλος. Κατά τη διάρκεια των περιόδων μέγιστης δραστηριότητας, ο βαθμός ιονισμού όλων των υποστρωμάτων αυξάνεται. Μια παρόμοια δραστηριότητα του ηλίου παρουσιάζεται κάθε 27 ημέρες που είναι η περίοδος περιστροφής του ηλίου.

### Τυχαίες Μεταβολές

Οι τυχαίες μεταβολές στις ιονοσφαιρικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά τη ραδιοδιάδοση. Επειδή αυτές οι μεταβολές είναι ανώμαλες και απρόβλεπτες, μπορεί να έχουν δραστικές επιπτώσεις στις επικοινωνίες. Οι πιο κοινές τυχαίες μεταβολές είναι το σποραδικό E, οι ξαφνικές ιονοσφαιρικές διαταραχές, και οι ιονοσφαιρικές θύελλες.

Οι ιονοσφαιρικές διαταραχές μπορεί να εμφανιστούν χωρίς προειδοποίηση και να διαρκέσουν για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα, από λεπτά έως και αρκετές ώρες. Οι ιονοσφαιρικές θύελλες είναι διαταραχές στο γήινο μαγνητικό πεδίο. Συνδέονται, με έναν τρόπο όχι πλήρως κατανοητό, με τις ηλιακές εκρήξεις καθώς και την περιστροφή του ήλιου.

### 1.6.5 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές

Ένας πρόσθετος παράγοντας που μπορεί να παρεμποδίσει τις ραδιοεπικοινωνίες είναι η παρουσία *ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής* (Electromagnetic Interference, EMI). Οι πηγές της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής μπορεί να είναι φυσικές ή ανθρώπινες.

### Ανθρώπινες Παρεμβολές

Η προκαλούμενη από τον άνθρωπο παρεμβολή μπορεί να προέλθει από διάφορες πηγές. Μερικές από αυτές τις πηγές είναι οι ταλαντωτές και γενικότερα οι πομποί τηλεπικοινωνιακών σημάτων, που μπορεί να παράγουν σήματα παρόμοιας ραδιοσυχνότητας. Μερικές ηλεκτρικές συσκευές παράγουν επίσης ηλεκτρομαγνητικά κύματα στις ραδιοσυχνότητες, αν και δε σχεδιάζονται συγκεκριμένα για αυτόν το λόγο. Παραδείγματα αποτελούν τα συστήματα ανάφλεξης, γεννήτριες, μηχανές, διακόπτες, ηλεκτρονόμοι (ρελέ) και ρυθμιστές τάσης.

### Φυσικές Παρεμβολές

Οι φυσικές παρεμβολές οφείλονται σε φυσικά φαινόμενα, όπως οι καταιγίδες, οι χιονοθύελλες, οι κοσμικές πηγές, και ο ήλιος. Η ενέργεια που απελευθερώνεται από αυτές τις πηγές μεταδίδεται στην περιοχή λήψης κατά προσέγγιση με τον ίδιο τρόπο όπως τα ραδιοκύματα. Κατά συνέπεια, όταν οι ιονοσφαιρικές συνθήκες είναι ευνοϊκές για τη διάδοση των ραδιοκυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις, είναι επιπλέον ευνοϊκές και για τη διάδοση των φυσικών παρεμβολών. Οι φυσικές παρεμβολές είναι πολύ ακανόνιστες, ιδιαίτερα στη μπάντα HF, αλλά γενικά μειώνονται καθώς αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας, ενώ είναι σχεδόν ανύπαρκτες σε συχνότητες άνω των 30 GHz.

#### 1.6.6 Επίδραση Καιρικών Συνθηκών

Ο άνεμος, η θερμοκρασία του αέρα, καθώς και η ύπαρξη νερού σε οποιαδήποτε μορφή στην ατμόσφαιρα μπορούν να επηρεάσουν τη διάδοση των ραδιοκυμάτων [6].

Ο υπολογισμός της επίδρασης του καιρού στη διάδοση των ραδιοκυμάτων θα ήταν συγκριτικά απλός εάν δεν υπήρχε καμία μορφή νερού στην ατμόσφαιρα. Εντούτοις, κάποια μορφή νερού (υδρατμοί, υγρή ή στερεή) είναι πάντα παρούσα και πρέπει να ληφθεί υπόψη σε όλους τους υπολογισμούς. Προτού αναλύσουμε την επίδραση που ασκούν στα ραδιοκύματα οι διάφορες μορφές ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (βροχή, χιόνι, ομίχλη), πρέπει να σημειώσουμε ότι η εξασθένηση λόγω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων είναι γενικά ανάλογη της συχνότητας και συνεπώς του μήκους κύματος των ραδιοκυμάτων. Παραδείγματος χάριν, η βροχή έχει έντονη επίδραση στα κύματα στις συχνότητες των μικροκυμάτων. Από την άλλη, η βροχή έχει

σπάνιες επιπτώσεις στα κύματα με μεγάλα μήκη κύματος (μπάντα HF και μικρότερες). Μπορούμε λοιπόν να υποθέσουμε, ότι καθώς το μήκος κύματος γίνεται πιο μικρό, οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις επηρεάζουν όλο και περισσότερο τα ραδιοκύματα, όσον αφορά στην εξασθένηση που προκαλούν.

Η εξασθένηση λόγω των σταγόνων βροχής είναι μεγαλύτερη από την εξασθένηση από τις άλλες μορφές ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων. Η εξασθένηση μπορεί να προκληθεί είτε από την απορρόφηση, κατά την οποία η σταγόνα βροχής απορροφά την ενέργεια από το ραδιοκύμα και το εξασθενεί λόγω της απώλειας θερμότητας, είτε από τη σκέδαση. Οι σταγόνες βροχής προκαλούν τη μεγαλύτερη εξασθένηση λόγω της σκέδασης στις συχνότητες άνω των 100 MHz. Στις συχνότητες άνω των 6 GHz, η εξασθένηση λόγω της σκέδασης στις σταγόνες της βροχής είναι ακόμα μεγαλύτερη (τα μήκη κύματος σε αυτές τις περιπτώσεις είναι συγκρίσιμα με το μέγεθος των σταγόνων της βροχής).

Δεδομένου ότι η ομίχλη αιωρείται στην ατμόσφαιρα, η εξασθένηση που εισάγει καθορίζεται από την ποσότητα νερού ανά μονάδα όγκου και από το μέγεθος των σταγονιδίων. Η εξασθένηση λόγω της ομίχλης είναι δευτερεύουσας σπουδαιότητας στις συχνότητες χαμηλότερες από 2 GHz.

Η σκέδαση λόγω του χιονιού είναι δύσκολο να υπολογιστεί λόγω των ασύμμετρων μεγεθών των νιφάδων. Βάσει υποθέσεων, η εξασθένηση από το χιόνι είναι μικρότερη απ' ό,τι στην περίπτωση βροχής που πέφτει με τον ίδιο ρυθμό. Αυτή η υπόθεση βασίζεται στο γεγονός ότι η πυκνότητα της βροχής είναι οκτώ φορές μεγαλύτερη από την πυκνότητα του χιονιού.

Τέλος, η εξασθένηση από το χαλάζι καθορίζεται από το μέγεθος των χαλαζόκοκκων και την πυκνότητά τους. Η εξασθένηση των ραδιοκυμάτων λόγω της σκέδασης στους χαλαζόκοκκους είναι αρκετά μικρότερη από ότι από την περίπτωση της βροχής.

# Κεφάλαιο 2

## Γραμμές Μεταφοράς

Ο όρος *γραμμή μεταφοράς* 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 (μια 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 [7]. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται ιδιαίτερα φαινόμενα που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη μετάδοση του ηλεκτρικού σήματος (τάσης) από το ένα σημείο στο άλλο.

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται κάποιες βασικές έννοιες για την κατανόηση των γραμμών μεταφοράς. Αρχικά, αναφερόμαστε στους βασικούς τύπους γραμμών μεταφοράς. Στη συνέχεια, μελετάμε κάποια γενικά γνωρίσματα των γραμμών μεταφοράς, όπως οι απώλειες που εμφανίζονται σε αυτές, τα κατανομημένα ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά τους, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που εμφανίζονται γύρω από αυτές, η χαρακτηριστική αντίσταση και η καθυστέρηση. Μελετάμε το φαινόμενο των ανακλάσεων στο σημείο τερματισμού μιας γραμμής μεταφοράς που οδηγεί στην εμφάνιση στάσιμων κυμάτων. Τέλος, αναφερόμαστε στις εφαρμογές των γραμμών μεταφοράς.



## 2.1 Τύποι Γραμμών Μεταφοράς

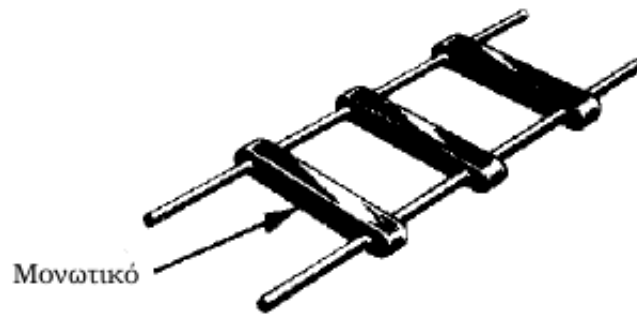
Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία γραμμών μεταφοράς με διαφορετικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και περιορισμούς, άρα και εφαρμογές. Ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά, μπορούμε να βρούμε γραμμές μεταφοράς εύκαμπτες ή άκαμπτες, θωρακισμένες από παρεμβολές και υγρασία ή όχι, που χρησιμοποιούν κάποιο διηλεκτρικό 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.

### 2.1.1 Παράλληλες Γραμμές

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

#### Δισύρματες Γραμμές Ανοιχτού Τύπου

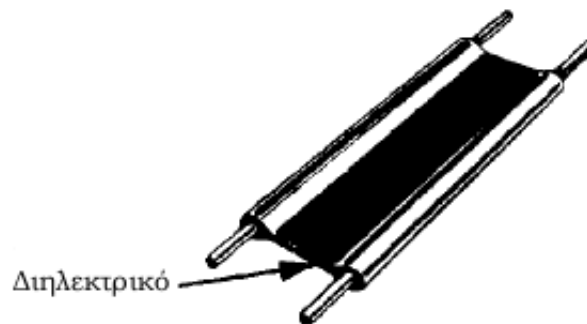
Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται κυρίως σε γραμμές μεταφοράς ισχύος, καθώς και σε υπαίθριες τηλεφωνικές γραμμές, αγροτικών κυρίως περιοχών. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι η απλότητα της κατασκευής τους. Τα μειονεκτήματά τους είναι πολλά ειδικά όταν πρόκειται για μεταφορά ραδιοσυχνοτήτων: χαρακτηρίζονται 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 στο Σχ. 2.1 αποτελείται από τμήματα μονωτικού υλικού τοποθετημένα ανά τακτά διαστήματα, τα οποία εξασφαλίζουν σταθερή απόσταση μεταξύ των δύο αγωγών.



Σχήμα 2.1: Δισύρματη γραμμή ανοιχτού τύπου.

### Δισύρματες Γραμμές Τύπου Ταινίας

Στο Σχ. 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.



Σχήμα 2.2: Δισύρματη γραμμή τύπου ταινίας.

#### 2.1.2 Συνεστραμμένου Ζεύγους

Αν δύο σύρματα 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 στο Σχ. 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 συχνότερα χρησιμοποιούμενο μέσο επίτευξης επικοινωνιακών ζεύξεων λόγω του χαμηλού κόστους και χρησιμοποιούνται ευρέως στο τηλεφωνικό δίκτυο.



Σχήμα 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.

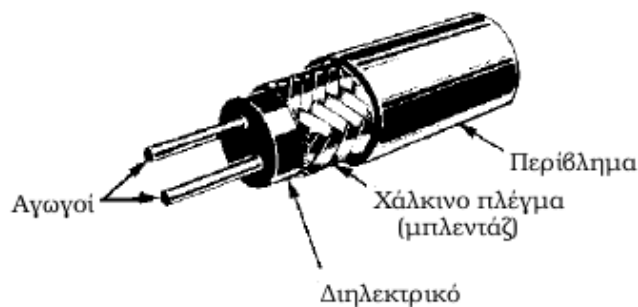
Τα συνεστραμμένα ζεύγη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση είτε αναλογικών είτε ψηφιακών σημάτων. Το εύρος ζώνης εξαρτάται από το πάχος του σύρματος και την καλυπτόμενη απόσταση. Σε πολλές περιπτώσεις πάντως μπορεί να επιτευχθεί εύρος πολλών Mbps για λίγα χιλιόμετρα. Λόγω της καλής απόδοσής τους 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 100 m. Το καλώδιο CAT5 αποτελείται από 4 συνεστραμμένα ζεύγη και πρέπει να πληρεί 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.

### 2.1.3 Θωρακισμένα Ζεύγη Καλωδίων

Το θωρακισμένο ζεύγος καλωδίων (Σχ. 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.



Σχήμα 2.4: Θωρακισμένα ζεύγη καλωδίων.

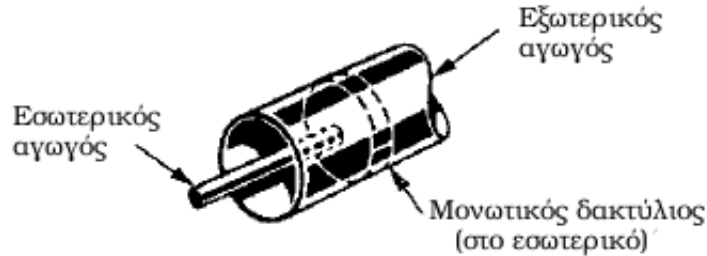
### 2.1.4 Ομοαξονικές Γραμμές

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.

#### 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 στο Σχ. 2.5. Σε μερικές εφαρμογές, ο εσωτερικός αγωγός είναι επίσης σωληνοειδής. 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 μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται σε μια δισύρματη 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' ότι στις προηγούμενες γραμμές μεταφοράς, είναι αρκετές ώστε να περιορίζουν και πάλι το μέγιστο πρακτικό μήκος της γραμμής. Η διαρροή που προκαλείται από την υγρασία αποτρέπεται 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



Σχήμα 2.5: Άκαμπτη ομοαξονική γραμμή.

των δύο αγωγών.

### Εύκαμπτες Ομοαξονικές Γραμμές

Οι εύκαμπτες ομοαξονικές γραμμές (Σχ. 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 (μπλενιάζ), το οποίο δίνει επίσης ευκαμψία στη γραμμή.



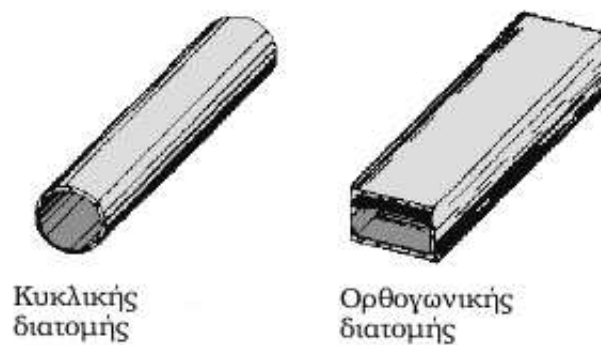
Σχήμα 2.6: Εύκαμπτη ομοαξονική γραμμή.

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.

### 2.1.5 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.



Σχήμα 2.7: Κυματοδηγοί.

## 2.2 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.

### 2.2.1 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.

### 2.2.2 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 κατα-



σκευή εύκαμπτων γραμμών με χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες.

### 2.2.3 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 ακτινοβολία 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.

## 2.3 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 [8], [7]. 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  $dx$ .

### 2.3.1 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 ( $\lambda = 10000$  m). Από την άλλη, η ίδια γραμμή θεωρείται ηλεκτρικά μεγάλου μήκους εάν μεταφέρει μια συχνότητα των 30.000 MHz ( $\lambda = 0.01$  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 μια τέτοια γραμμή εξαρτώνται από το μήκος της γραμμής, το μέγεθος των αγωγών, τη μεταξύ τους απόσταση, καθώς και από το είδος του διηλεκτρικού που βρίσκεται ανάμεσά τους. Λόγω της εξάρτησής τους από το μήκος της γραμμής τα χαρακτηριστικά αυτά ονομάζονται κατανεμημένα και μελετώνται αναλυτικά παρακάτω.

### 2.3.2 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.

### 2.3.3 Χωρητικότητα

Μεταξύ των δύο αγωγών μιας γραμμής μεταφοράς εμφανίζεται επίσης κάποια χωρητικότητα  $C$ , όπως φαίνεται και στο Σχ. 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.



Σχήμα 2.8: Χωρητικότητα.

### 2.3.4 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.

### 2.3.5 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. Το Σχ. 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

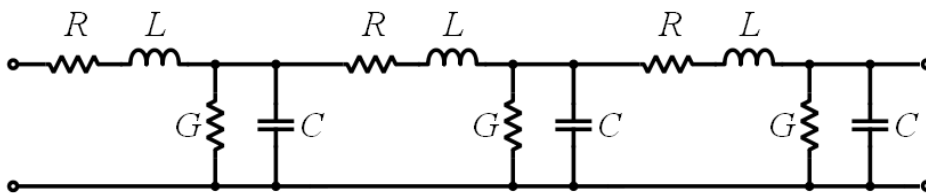
μεταφοράς μετράται σε  $mhos$  (αναγραμματισμός του  $ohms$ ) ή  $siemens$  ανά μονάδα μήκους.



Σχήμα 2.9: Αγωγιμότητα.

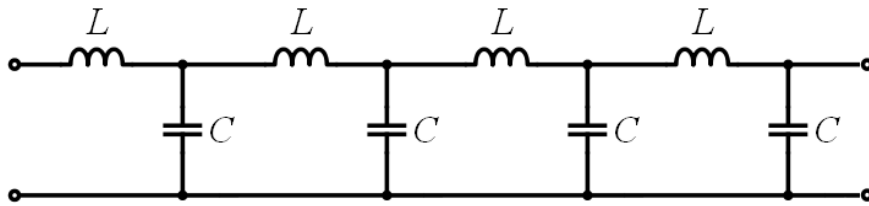
### 2.3.6 Ισοδύναμη Αναπαράσταση

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



Σχήμα 2.10: Ισοδύναμη αναπαράσταση κυκλώματος.

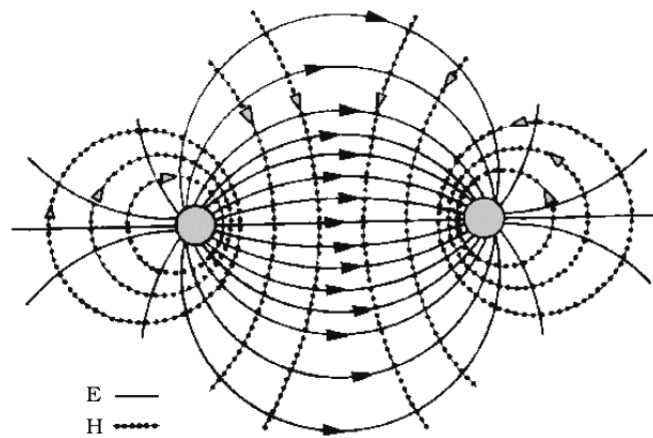
Στις ραδιοσυχνότητες (μεγάλες τιμές του  $\omega$ ), η επαγωγική αντίδραση  $\omega L$  είναι πολύ μεγαλύτερη από την ωμική αντίσταση  $R$ . Επίσης, η χωρητική δεκτικότητα  $\omega C$  είναι πολύ μεγαλύτερη από την παράλληλη αγωγιμότητα  $G$ . Για το λόγο αυτό, μπορούμε να αγνοήσουμε τα  $R$  και  $G$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



Σχήμα 2.11: Ισοδύναμη αναπαράσταση κυκλώματος.

## 2.4 Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Γύρω από Γραμμές Μεταφοράς

Τα κατανεμημένα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς που περιγράψαμε στα προηγούμενα 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.



Σχήμα 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 ( $\mathbf{H}$ ), το οποίο επίσης ασκεί δύναμη σε οποιοδήποτε κινούμενο φορτίο βρεθεί μέσα του. Το Σχ. 2.12 επεξηγεί τον τρόπο με τον οποίο τα πεδία  $\mathbf{E}$  και  $\mathbf{H}$  τείνουν να προσανατολίζονται μεταξύ των αγωγών μιας τυπικής δισύρματης γραμμής μεταφοράς. Το σχήμα παρουσιάζει μια διατομή των αγωγών της συγκεκριμένης γραμμής μεταφοράς απεικονίζοντας κάποιες από τις δυναμικές γραμμές. Το πεδίο  $\mathbf{E}$  αντιπροσωπεύεται από τις συνεχείς γραμμές και το πεδίο  $\mathbf{H}$  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  $\mathbf{H}$ . Συγκεκριμένα, εάν ο αντίχειρας του δεξιού χεριού δείχνει προς την κατεύθυνση του ρεύματος, τα υπόλοιπα δάχτυλα λυγισμένα, δείχνουν προς την κατεύθυνση του  $\mathbf{H}$ .

## 2.5 Χαρακτηριστική Αντίσταση

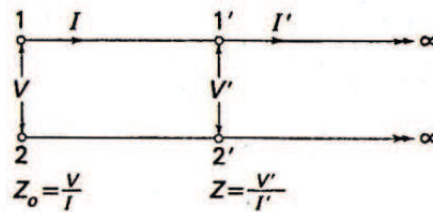
### 2.5.1 Ορισμός & Βασικές Ιδιότητες

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 καμία επίδραση στον υπολογισμό και για αυτό δεν αναφέρεται στον ορισμό.

Όπως περιγράψαμε και στην ισοδύναμη αναπαράσταση του κυκλώματος μιας γραμμής μεταφοράς, τα καταναμημένα χαρακτηριστικά αφορούν ένα μικρό τμήμα της γραμμής, με την υπόθεση ότι αυτά κατανέμονται ομοιόμορ-

φα 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.



Σχήμα 2.13: Γραμμή άπειρου μήκους.

Αν μετρούσαμε και πάλι τη σύνθετη αντίσταση σε κάποιο άλλο σημείο του κυκλώματος θα βρίσκαμε το ίδιο αποτέλεσμα. Αυτό εξηγείται ως εξής: Υποθέστε τη γραμμή άπειρου μήκους του Σχ. 2.13. Τα σημεία 1'-2' του Σχ. 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  $Z_0$ .

### 2.5.2 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 δι-

νεται ως [2], [9], [10], [8]:

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

όπου  $R$  η ωμική αντίσταση,  $\omega L$  η επαγωγική αντίδραση,  $G$  η αγωγιμότητα, και  $\omega C$  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

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

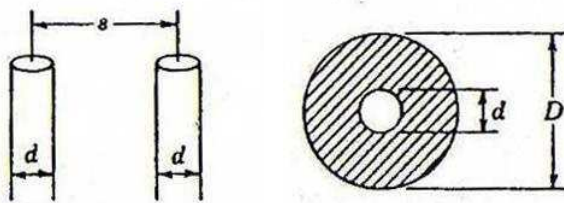
Παρατηρήστε ότι στην Εξ. (2.3) η χαρακτηριστική αντίσταση είναι ανεξάρτητη της συχνότητας και εξαρτάται από το λόγο της κατανεμημένης επαγωγής προς την κατανεμημένη χωρητικότητα της γραμμής μεταφοράς. Μια αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο αγωγών, συνεπάγεται αύξηση της επαγωγής και μείωση της χωρητικότητας. Η αύξηση της επαγωγής οφείλεται στο γεγονός ότι τώρα υπάρχει μεγαλύτερη μαγνητική ροή στο χώρο μεταξύ των αγωγών (τα μαγνητικά πεδία των δυο 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

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





(α) Παράλληλη γραμμή (β) Ομοαξονική γραμμή

Σχήμα 2.14: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς για τον υπολογισμό της  $Z_0$  [2].

όπου  $s$  η απόσταση των αγωγών,  $d$  η διάμετρος του ενός αγωγού (βλ. Σχ. 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. Σχ. 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 600  $\Omega$  για τις παράλληλες γραμμές και από 40 έως 150  $\Omega$  για τις ομοαξονικές.

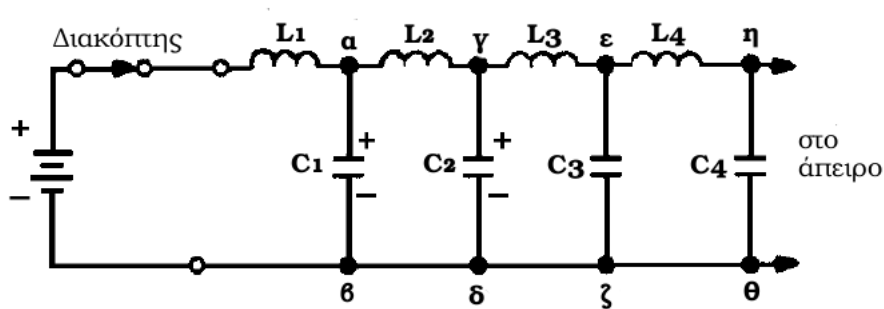
## 2.6 Καθυστέρηση Διάδοσης

### 2.6.1 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 κατανεμημένη επαγωγή παράλληλα συνδεδεμένη με κατανεμημένη 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 στο Σχ. 2.15.



Σχήμα 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 την 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  $v_p$  δίνεται ως

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

### 2.6.2 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 κυμάτων εξαρτάται από το μέσο στο οποίο διαδίδονται. Είναι πολύ κοντά στα  $3 \times 10^8$  m/s στο κενό και μικρότερη σε όλα τα άλλα μέσα. Η ταχύτητα του φωτός σε ένα μέσο δίνεται ως:

$$v_p = \frac{v_c}{\sqrt{k}}, \quad (2.10)$$

όπου  $v_p$  η ταχύτητα διάδοσης στο μέσο,  $v_c$  η ταχύτητα του φωτός στο κενό, και  $k$  η διηλεκτρική σταθερά του μέσου (1 για το κενό και περίπου 1 για τον αέρα).

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

$$v_f = \frac{v_p}{v_c} = \frac{1}{\sqrt{k}}. \quad (2.11)$$

Επειδή τα διηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στις γραμμές μεταφοράς έχουν  $k = 1.2-2.8$ , η ταχύτητα διάδοσης σε αυτές μπορεί να είναι 60–90% του  $v_c$ . Δεδομένης της βασικής κυματικής σχέσης  $v = f\lambda$  και εφόσον η συχνότητα παραμένει σταθερή, ο παράγοντας ταχύτητας επιδρά και 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  $\lambda$  σε  $\lambda/\sqrt{k}$ .

## 2.7 Ανακλάσεις σε Γραμμές Μεταφοράς

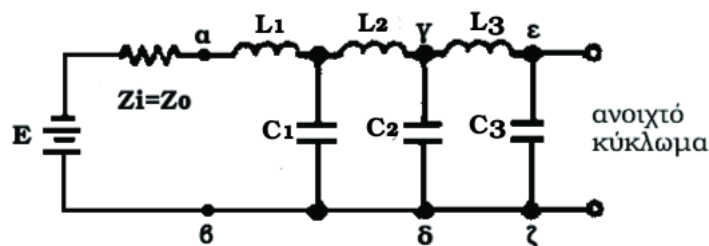
Αποδεικνύεται ότι σε μια γραμμή μεταφοράς επιτυγχάνεται η μέγιστη μεταφορά ισχύος όταν η γραμμή τερματίζεται σε φορτίο με σύνθετη αντίσταση

ίση με τη χαρακτηριστική της [7]. 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, ή 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).

### 2.7.1 Ανάκλαση Τάσης DC σε Ανοιχτό Κύκλωμα

Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας γραμμής μεταφοράς με ανοιχτοκυκλωμένη έξοδο φαίνεται στο Σχ. 2.16, όπου στην είσοδό της 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  $E/2$ .



Σχήμα 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

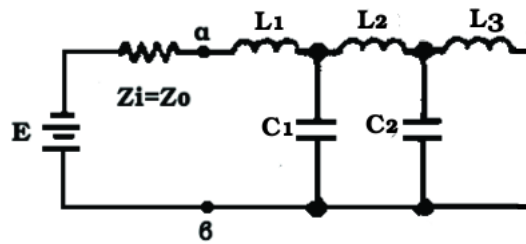
φόρτιση των πυκνωτών μέσω των πηνίων που προηγούνται. Καθώς φορτίζεται κάθε πυκνωτής, η τάση  $E/2$  εμφανίζεται κατά μήκος του κυκλώματος, προχωρώντας μέχρι το τέλος της γραμμής. Όταν φορτιστεί και ο τελευταίος πυκνωτής, η τάση στα άκρα του θα γίνει ίση με την τάση στα άκρα κάθε άλλου πυκνωτή, και η διαφορά δυναμικού των σημείων  $\gamma$  και  $\varepsilon$  θα είναι μηδενική. Συνεπώς, το πηνίο  $L_3$  που συνδέεται μεταξύ των σημείων  $\gamma$ ,  $\varepsilon$  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 διαφορά 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 φανταστούμε 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 ονομάζεται *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.

### 2.7.2 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 στο Σχ. 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



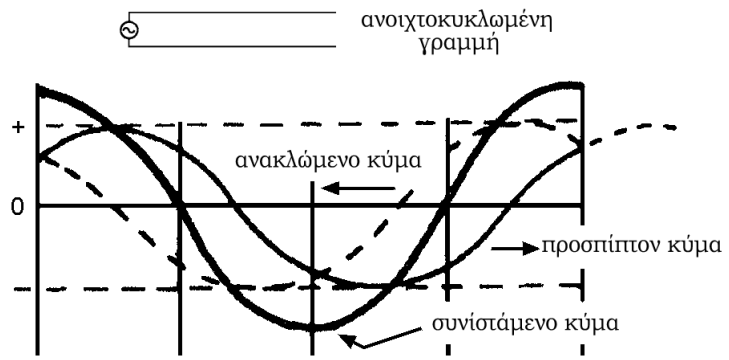
Σχήμα 2.17: Βραχυκυκλωμένη γραμμή σε τροφοδοσία τάσης DC.

γραμμής όπου 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 ( $R = G = 0$ ).

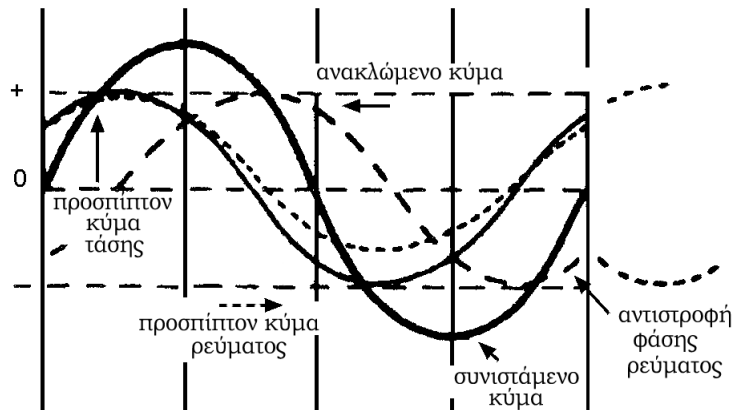
### 2.7.3 Ανάκλαση Τάσης AC σε Ανοιχτό Κύκλωμα

Στις περιπτώσεις που οι γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ραδιοσυχνοτήτων, 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 δευτερογε-

νός 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  $180^\circ$  μετά την ανάκλαση. Στην 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

Σχήμα 2.18: Ανάκλαση τάσης AC σε ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή.

Το Σχ. 2.18 φαίνονται τα προσπίπτοντα κύματα με συνεχείς γραμμές και τα ανακλώμενα με διακεκομμένες. Συγκεκριμένα στο Σχ. 2.18(α) απεικονίζονται οι τιμές της τάσης μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή όπου ο άξονας

$x$  αντιπροσωπεύει την απόσταση, ενώ αντίστοιχα το Σχ. 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. Στα Σχ. 2.18(α') και Σχ. 2.18(β'), το συνιστάμενο 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*, λεπτομερής ανάλυση του οποίου δίνεται στην Ενότητα 2.9.



Σχήμα 2.19: Συμβατική μορφή απεικόνισης στάσιμων κυμάτων.

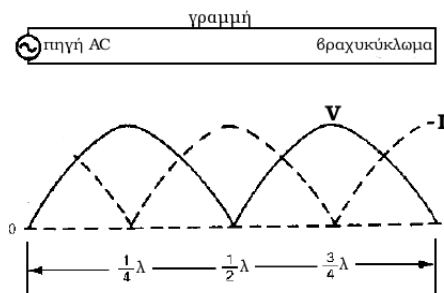
Η συμβατική μορφή απεικόνισης των στάσιμων κυμάτων είναι αυτή του Σχ. 2.19, όπου ο άξονας  $y$  αντιστοιχεί στην απόλυτη τιμή των  $V$  και  $I$ , αντίστοιχα, για την περίπτωση της ανοιχτοκυκλωμένης γραμμής. Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε τους μηδενισμούς των  $|V|$  και  $|I|$ . Σε απόσταση  $\lambda/4$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

#### 2.7.4 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  $180^\circ$ . Τα στάσιμα κύματα της τάσης και του ρεύματος απεικονίζονται στο Σχ. 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  $\lambda/2$ .



Σχήμα 2.20: Ανάκλαση τάσης AC σε βραχυκυκλωμένη γραμμή.

## 2.8 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  $V(x)$  και  $I(x)$ , όπου  $x$  ο άξονας της διεύθυνσης της γραμμής. Στις γραμμές μεταφοράς μπορούμε να θεωρήσουμε, χωρίς βλάβη της γενικότητας και των αποτελεσμάτων, ότι το  $x = 0$  αντιστοιχεί στον τερματισμό. Κάνοντας χρήση και της Εξ. (2.1), προκύπτει ότι

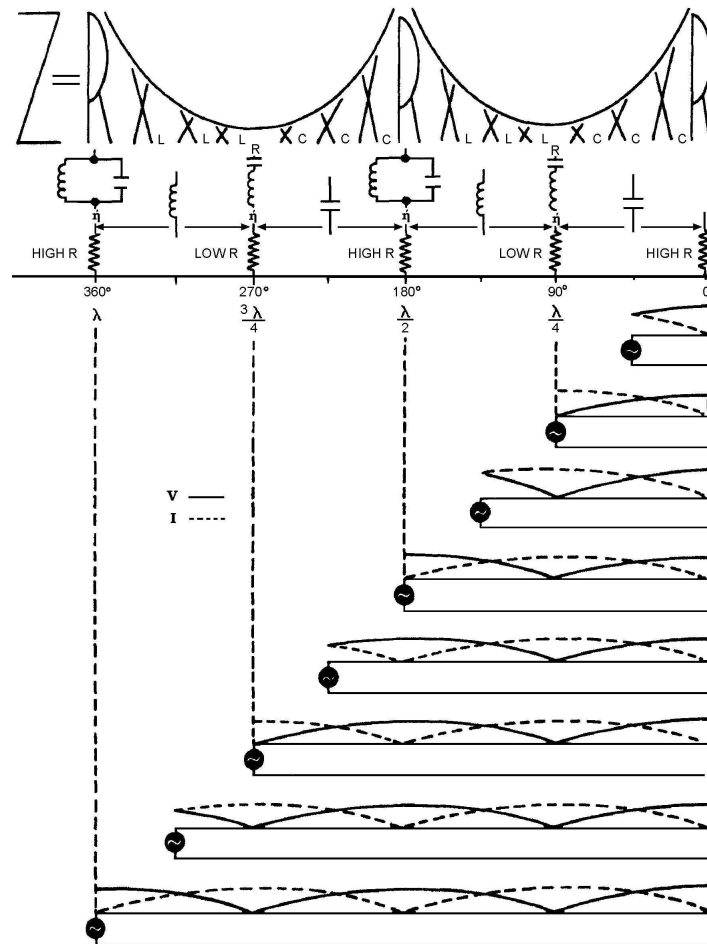
$$Z_{in}(l) = \left. \frac{V(x)}{I(x)} \right|_{x=l}, \quad (2.12)$$

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 [9], [10], [8] 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  $\lambda$  εννοούμε τη μειωμένη τιμή του μήκους κύματος της συχνότητας λόγω μετάδοσης μέσα στη γραμμή ( $\lambda/\sqrt{k}$ ).

Τα Σχ. 2.21 και Σχ. 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.



Σχήμα 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:

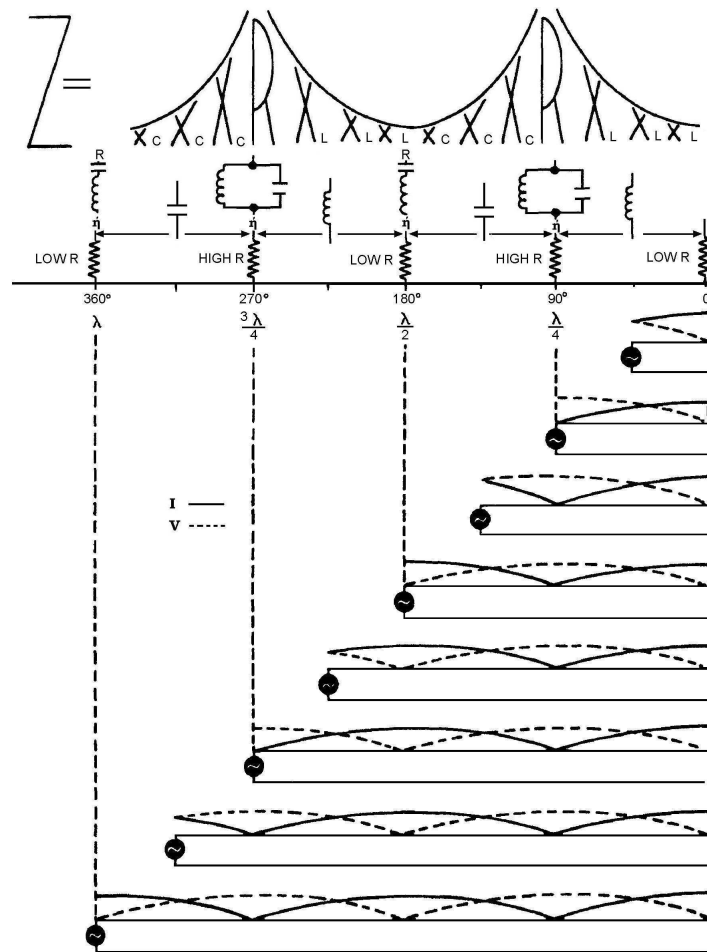
- της ανοιχτοκυκλωμένης γραμμής στις θέσεις  $v\lambda/2 + \lambda/4$ , και
- της βραχυκυκλωμένης γραμμής στις θέσεις  $v\lambda/2$ .

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 κυκλώματα LC) με την επιλογή γραμμών κατάλληλου μήκους.

Λόγω της πολυπλοκότητας της Εξ. (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.



Σχήμα 2.22: Τάση, ρεύμα και σύνθετη αντίσταση σε βραχυκυκλωμένη γραμμή.

## 2.9 Στάσιμα Κύματα

Μια περιγραφή της κατάστασης που επικρατεί σε μια γραμμή παρέχεται με την έννοια του *συντελεστή ανάκλασης τάσης*  $\rho$ ,

$$\rho = \frac{V_r}{V_i}, \tag{2.14}$$

όπου  $V_r$  η τιμή της τάσης του ανακλώμενου (reflected) κύματος και  $V_i$  η τιμή της τάσης του προσπίπτοντος (incident) κύματος στον τερματισμό [7]. Αρνητική τιμή του συντελεστή ανάκλασης σημαίνει στροφή φάσης κατά  $180^\circ$ . 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*

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

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*

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

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

Όπως θα δούμε στο Εδάφιο 2.9.7, η εμφάνιση ανακλάσεων είναι ανεπιθύμητη κατά τη λειτουργία μιας γραμμής μεταφοράς. Προκειμένου να μειώσουμε τις ανακλάσεις, μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε το συντελεστή ανάκλασης ισχύος  $\mathcal{R}$  ως προς τη σύνθετη αντίσταση του φορτίου  $Z_L$ . Αποδεικνύεται ότι ο συντελεστής ελαχιστοποιείται (για την ακρίβεια μηδενίζεται), όταν

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

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  $\rho$  ως

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

Δεδομένου του λόγου στάσιμου κύματος μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή ανάκλασης. Λύνοντας ως προς  $\rho$  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.

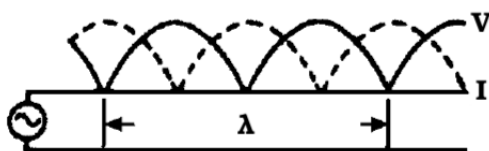
### 2.9.1 Τερματισμός στη Χαρακτηριστική Αντίσταση

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  $Z_0$ .

### 2.9.2 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 του Σχ. 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.



Σχήμα 2.23: Τερματισμός σε ανοιχτό κύκλωμα.

### 2.9.3 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 εκείνη του Σχ. 2.24. Ολόκληρη η ισχύς που προσπίπτει στον τερματισμό, ανακλάται. Το ρεύμα είναι μέγιστο στον τερματισμό και η τάση μηδενική.

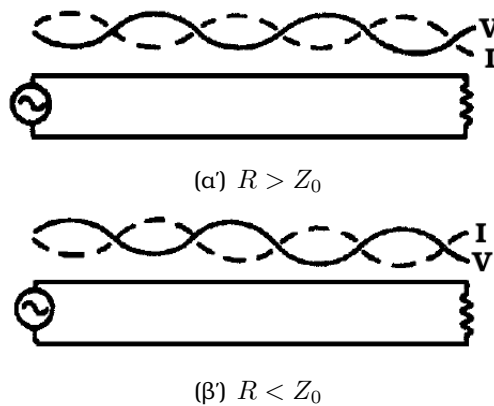


Σχήμα 2.24: Τερματισμός σε βραχύκλωμα.

### 2.9.4 Τερματισμός σε Ωμική Αντίσταση

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

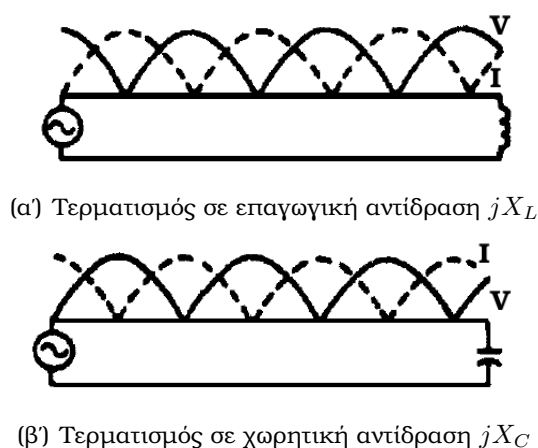
- i)  $Z_L > Z_0$ : Τότε,  $\rho > 0$  και στον τερματισμό εμφανίζεται μέγιστο τάσης. Από την Εξ. (2.21), προκύπτει ότι  $SWR = Z_L/Z_0$ . Η μορφή του στάσιμου κύματος απεικονίζεται στο Σχ. 2.25(α').
- ii)  $Z_L < Z_0$ : Τότε,  $\rho < 0$  και στον τερματισμό εμφανίζεται ελάχιστο τάσης. Από την Εξ. (2.21),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



Σχήμα 2.25: Τερματισμός σε ωμική αντίσταση.

### 2.9.5 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. Σχ. 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 ( $X = -1/\omega C$ ).



Σχήμα 2.26: Τερματισμός σε άεργο φορτίο.



### 2.9.6 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.

### 2.9.7 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 τις 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, που αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο στην περίπτωση της πολύδρομης μετάδοσης: πέρα από το αρχικό σήμα, λαμβάνεται και ένα δευτερεύον εξασθενημένο που οφείλεται στην ύπαρξη ανακλάσεων στη γραμμή.

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

#### Μετασχηματιστής $\lambda/4$

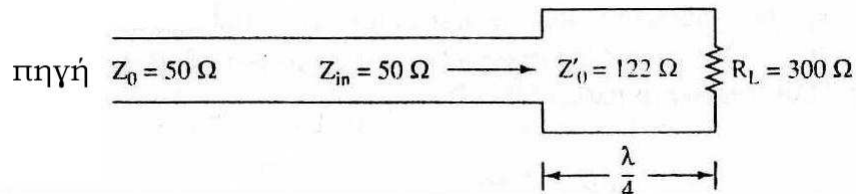
Ένα τρόπος για να πετύχουμε την προσαρμογή ενός ωμικού φορτίου σε μια γραμμή είναι η χρήση του μετασχηματιστή  $\lambda/4$ . Κατά την προσαρμογή με μετασχηματιστή  $\lambda/4$ , πριν συνδεθεί το φορτίο στη γραμμή μεταφοράς, παρεμβάλλεται άλλη γραμμή μεταφοράς μήκους  $L = \lambda/4$  για την επιθυμητή

συχνότητα λειτουργίας. Υποθέτουμε και πάλι γραμμές χωρίς απώλειες. Από την Εξ. (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

$$\frac{(Z'_0)^2}{Z_L} = Z_0 \Leftrightarrow Z'_0 = \sqrt{Z_0 Z_L}. \quad (2.23)$$



Σχήμα 2.27: Παράδειγμα προσαρμογής με χρήση μετασχηματιστή  $\lambda/4$  [2].

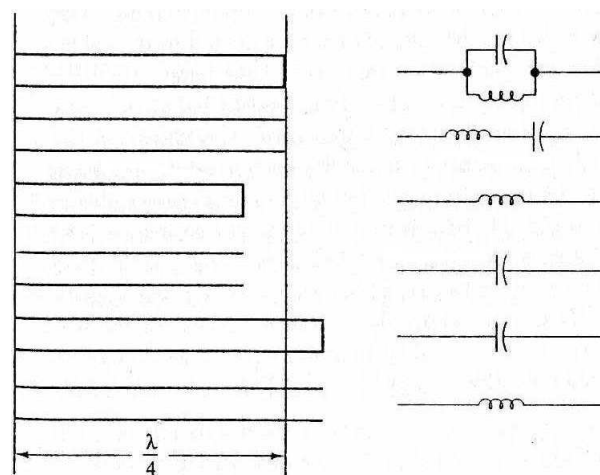
Η παραπάνω εξίσωση μας δίνει την τιμή που θα πρέπει να έχει η χαρακτηριστική αντίσταση του μετασχηματιστή  $\lambda/4$  στην περίπτωση που το φορτίο είναι ωμικό. Ας θεωρήσουμε την περίπτωση του Σχ. 2.27, όπου επιθυμούμε να πετύχουμε προσαρμογή του φορτίου  $R_L = 300 \Omega$  σε γραμμή χαρακτηριστικής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

## 2.10 Εφαρμογές

### 2.10.1 Εξομοίωση Συγκεντρωμένων Κυκλωμάτων

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 2.8, τμήματα γραμμών μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξομοίωση πηνίων, πυκνωτών και κυκλωμάτων LC. Το Σχ. 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' ό,τι αν χρησιμοποιούσαμε τα αντίστοιχα συγκεντρωμένα στοιχεία.

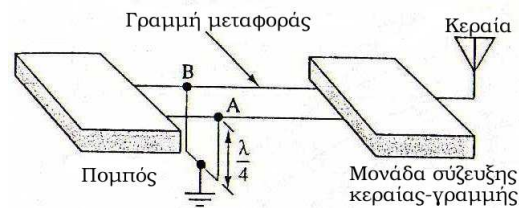


Σχήμα 2.28: Μήκη γραμμών και ισοδύναμα συγκεντρωμένα κυκλώματα [9].

### 2.10.2 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 στο Σχ. 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  $\lambda_2$  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 αντίστασης. Όπως φαίνεται στο σχήμα, 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  $\lambda/2$ .



Σχήμα 2.29: Φίλτρο  $\lambda/4$  [9].

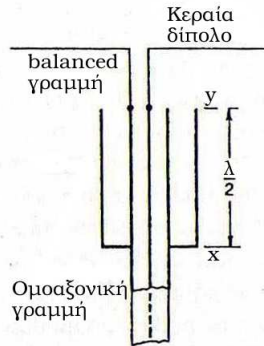
### 2.10.3 Μετατροπείς Baluns

Μια δισύρματη γραμμή μεταφοράς στη γενική της μορφή μεταφέρει δύο σήματα με διαφορά φάσης  $180^\circ$  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 στο Σχ. 2.30.

Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε πως ένα κυλινδρικό περίβλημα περιβάλλει την ομοαξονική γραμμή μεταφοράς και συνδέεται με τον εξωτερικό αγωγό της γραμμής στο σημείο x. Σε οποιοδήποτε σημείο y τότε του περιβλήματος, 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



Σχήμα 2.30: Balun [2].

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

## Κεραίες

Η κεραία αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι κάθε ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Μπορούμε να πούμε ότι αποτελεί ένα μετατροπέα ανάμεσα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα (αυτό του πομπού ή του δέκτη) και στο μέσο μετάδοσης (ατμόσφαιρα ή ακόμη και το κενό). Η κεραία εκπομπής χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τα κατευθυνόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εμφανίζονται μέσα στη γραμμή μεταφοράς σε κύματα ελεύθερου χώρου που μπορούν να μεταδοθούν στην ατμόσφαιρα. Αντίστροφα, η κεραία λήψης είναι ο 'μετασχηματιστής' που θα μετατρέψει τα κύματα ελεύθερου χώρου σε κατευθυνόμενα κύματα και μέσω της γραμμής μεταφοράς θα τα παραδώσει στο δέκτη.

Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι μια εισαγωγική παρουσίαση των κεραιών. Αρχικά, περιγράφονται τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται σε μία κεραία. Η κεραία παρουσιάζεται ως μια παραλλαγμένη γραμμή μεταφοράς και μελετώνται οι κατανομές ρεύματος και δυναμικού (τάσης) σε αυτή. Γίνεται ποιοτική αναφορά στα χαρακτηριστικά των κεραιών. Στη συνέχεια, περιγράφονται κάποιοι από τους βασικότερους τύπους κεραιών. Έμφαση δίνεται στις απλούστερες μορφές κεραιών Hertz και Marconi, ενώ γίνεται σύντομη αναφορά σε διατάξεις κεραιών και τύπους μη συντονισμένων κεραιών.

### 3.1 Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία

Για να καταλάβουμε πώς ένα ηλεκτρικό σήμα που φθάνει από τον πομπό στην κεραία εκπομπής μέσω μιας γραμμής μεταφοράς ακτινοβολείται στο

περιβάλλον, αλλά και την αντίστροφη διαδικασία στο δέκτη, θα πρέπει πρώτα να μελετήσουμε τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται γύρω από μία κεραία. Σε κάθε κεραία λοιπόν εμφανίζονται δύο ηλεκτρομαγνητικά πεδία: το *πεδίο επαγωγής* (ή *αντιδραστικό πεδίο (reactive field)*) και το *πεδίο ακτινοβολίας (radiation field)*. Το πρώτο σχετίζεται με την ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη μέσα στην ίδια την κεραία και δε λαμβάνει μέρος στη διαδικασία της μετάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το δεύτερο δημιουργείται από το πεδίο επαγωγής και χάρη σε αυτό επιτυγχάνεται τελικά η ασύρματη μετάδοση.

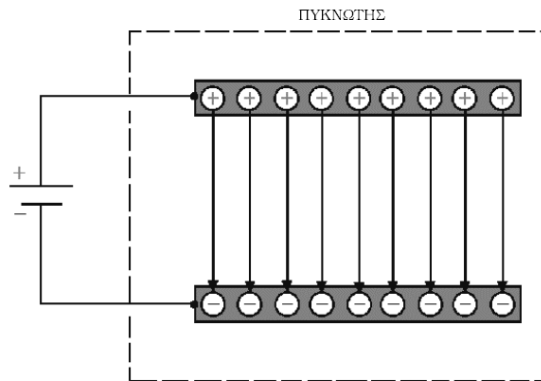
### 3.1.1 Πεδίο Επαγωγής

Γύρω από κάθε ηλεκτρικά φορτισμένο αντικείμενο υπάρχει ένα δυναμικό πεδίο που μπορεί να ανιχνευθεί, να μετρηθεί και να προκαλέσει τη μετακίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Όταν ένα αντικείμενο είναι ηλεκτρικά φορτισμένο, παρατηρείται μεγαλύτερη ή μικρότερη συγκέντρωση ηλεκτρονίων από το κανονικό. Επομένως, υπάρχει μια *διαφορά δυναμικού* μεταξύ ενός φορτισμένου αντικείμενου σε σχέση με ένα μη φορτισμένο αντικείμενο. Ένα ηλεκτρικό πεδίο επομένως σχετίζεται με μια διάφορα δυναμικού ή αλλιώς μια *τάση*.

Το αόρατο αυτό δυναμικό πεδίο αναπαρίσταται συνήθως μέσω γραμμών που σχεδιάζονται έτσι ώστε να δείχνουν τα μονοπάτια στα οποία επιδρά η δύναμη. Οι γραμμές που αναπαριστούν το ηλεκτρικό πεδίο σχεδιάζονται προς την κατεύθυνση κανονικής κίνησης ενός θετικά φορτισμένου φορτίου. Η ύπαρξη ισχυρότερου πεδίου παριστάνεται από μεγαλύτερη συγκέντρωση δυναμικών γραμμών.

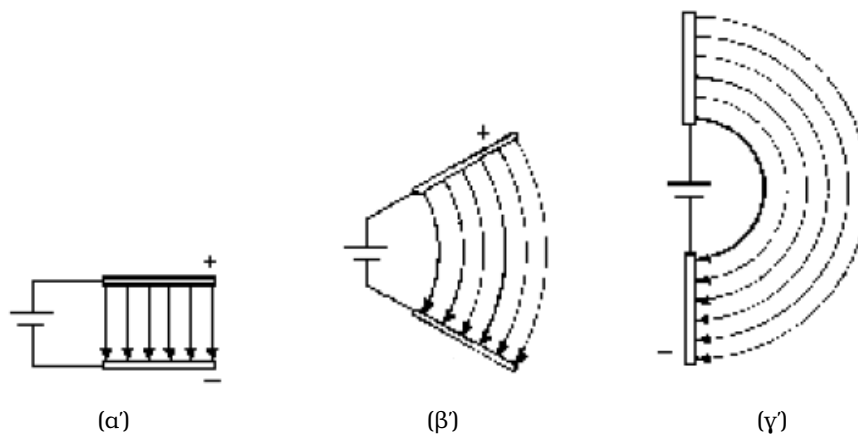
Όταν ένας πυκνωτής είναι συνδεδεμένος με μια πηγή δυναμικού, όπως είναι μια μπαταρία, φορτίζεται σε ένα βαθμό ανάλογα με το δυναμικό και την τιμή χωρητικότητας (Σχ. 3.1). Εξαιτίας της *ηλεκτροκινητικής* δύναμης της μπαταρίας, τα αρνητικά φορτία ρέουν προς τον χαμηλότερο οπλισμό, αφήνοντας τον επάνω οπλισμό θετικά φορτισμένο. Με την αύξηση του φορτίου, αυξάνεται επίσης και το ηλεκτρικό πεδίο. Οι δυναμικές γραμμές κατευθύνονται από τα θετικά προς τα αρνητικά φορτία και σε κάθετη γωνία με τους οπλισμούς. Όταν ο πυκνωτής είναι πλήρως φορτισμένος, η τάση του είναι ίση με την τάση της πηγής και έχει αντίθετη πολικότητα. Ο φορτισμένος πυκνωτής αποθηκεύει ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρικού πεδίου.

Εαν τώρα οι δύο οπλισμοί του πυκνωτή απομακρυνθούν μεταξύ τους, το ηλεκτρικό πεδίο καμπυλώνεται και βρίσκεται σε ορθή γωνία με τους οπλι-



Σχήμα 3.1: Ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ οπλισμών.

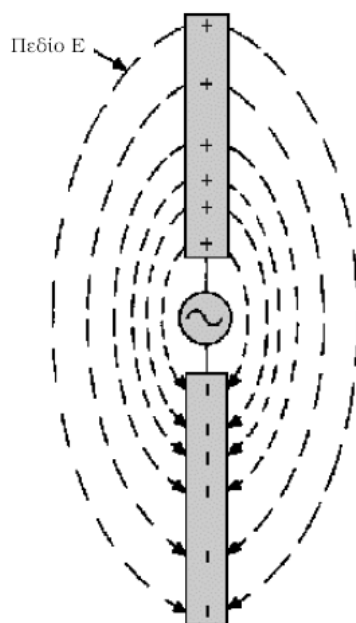
σμούς (Σχ. 3.2). Οι ευθείες γραμμές του Σχ. 3.2(α) μετατρέπονται στα τόξα του Σχ. 3.2(β) και προσεγγιστικά στα ημικύκλια του Σχ. 3.2(γ), όπου οι οπλισμοί σχηματίζουν μία ευθεία γραμμή. Αντί για επίπεδους μεταλλικούς οπλισμούς, τα δύο στοιχεία μπορούν να πάρουν τη μορφή μεταλλικών ράβδων ή συρμάτων σχηματίζοντας έτσι τη βασική κεραία.



Σχήμα 3.2: Ηλεκτρικά πεδία μεταξύ οπλισμών σε διάφορες γωνίες.

Αντικαθιστώντας τώρα τους οπλισμούς του πυκνωτή με δύο ράβδους και τη μπαταρία με μια πηγή 60 Hertz προκύπτει το Σχ. 3.3. Στην περίπτωση της θετικής εναλλαγής του σήματος, το ηλεκτρικό πεδίο εκτείνεται από τη θετικά φορτισμένη ράβδο προς την αρνητικά φορτισμένη, ενώ στην αρνητική εναλλαγή το φορτίο αντιστρέφεται. Η προηγούμενη επεξήγηση της κίνησης των ηλεκτρονίων από τον ένα οπλισμό του πυκνωτή στον άλλο (Σχ. 3.1) αφορά επίσης και τις ράβδους του Σχ. 3.3.





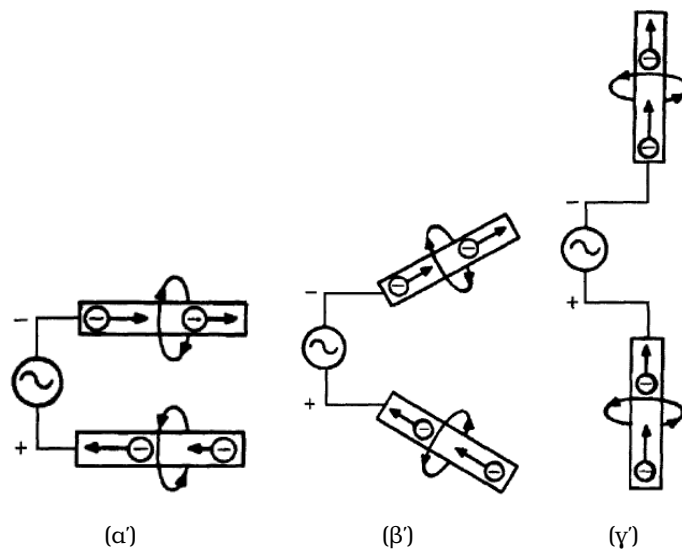
Σχήμα 3.3: Ηλεκτρικά πεδία μεταξύ στοιχείων.

Η πολικότητα των φορτίων και η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου αντιστρέφεται περιοδικά ανάλογα με τη συχνότητα της τάσης της πηγής. Πιο συγκεκριμένα, το ηλεκτρικό πεδίο αυξάνεται από το μηδέν έως τη μέγιστη τιμή του και στη συνέχεια, επιστρέφει στο μηδέν. Η ολοκληρωτική αυτή αντιστροφή συμβαίνει κατά τη διάρκεια ενός μόνο κύκλου της τάσης πηγής. Η *κεραία ημίσεως δίπολου (half-wave dipole)*, δηλαδή οι δύο συνευθειακές και ανεξάρτητες ράβδοι μήκους  $\lambda/4$  η κάθε μία όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος της συχνότητας της πηγής AC, αποτελεί το βασικό στοιχείο που χρησιμοποιείται συνήθως ως αρχικό σημείο αναφοράς σε κάθε συζήτηση σχετικά με την ακτινοβολία ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο χώρο. Εάν υψίσουχη ενέργεια παρέχεται από μια εναλλασσόμενη πηγή (ή πομπό) σε μια κεραία, η τάση κατά μήκος της κεραίας στερείται του ρεύματος κατά  $90^\circ$  και έτσι, η κεραία δρα σαν να ήταν πυκνωτής.

Όπως είναι ήδη γνωστό, όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα, στην περιοχή γύρω από αυτόν δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Στην πραγματικότητα, κάθε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο. Το *μαγνητικό πεδίο* είναι μια χωρική περιοχή στην οποία μια μαγνητική δύναμη είναι δυνατόν να ανιχνευθεί και να μετρηθεί.

Για την αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούνται και πά-

λι δυναμικές γραμμές. Οι συγκεκριμένες γραμμές δημιουργούνται από τη ροή ρεύματος και όχι από τη δύναμη της τάσης. Γενικά, συμβολίζουμε τις μαγνητικές γραμμές χρησιμοποιώντας το γράμμα  $\mathbf{H}$ . Η κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού, δηλαδή κρατώντας τον αγωγό με το δεξί χέρι και τον αντίχειρα να δείχνει προς της κατεύθυνση της ροής του ρεύματος, τα υπόλοιπα δάχτυλα θα δείξουν την κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών. Επομένως, οι μαγνητικές γραμμές σχεδιάζονται σε ορθές γωνίες ως προς την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος.



Σχήμα 3.4: Μαγνητικά πεδία γύρω από στοιχεία.

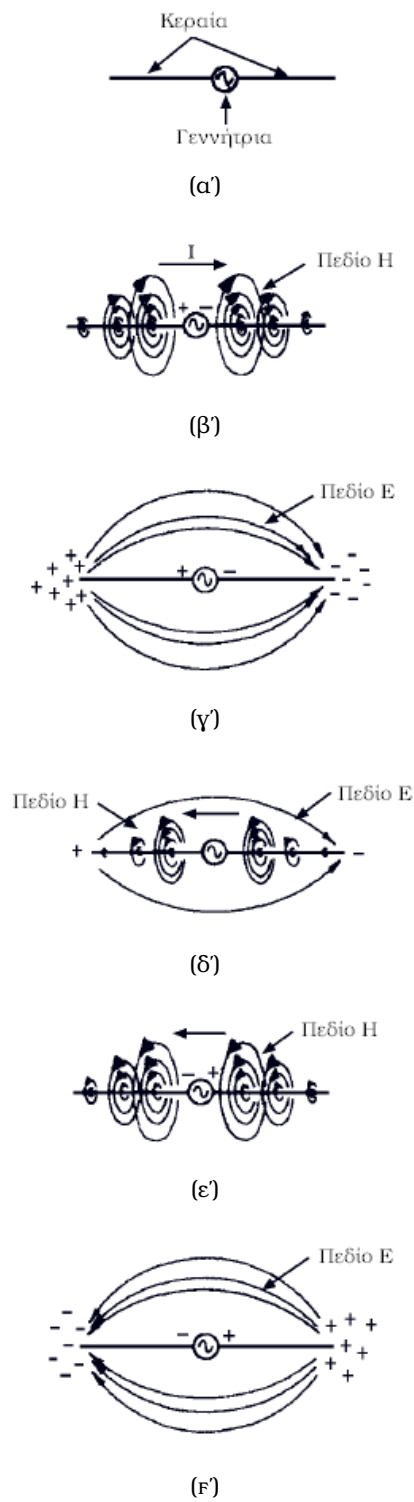
Τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται γύρω από δύο παράλληλες ράβδους, όπως φαίνονται στο Σχ. 3.4(α), βρίσκονται σε πλήρη αντίθεση μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο ότι η πρώτη ράβδος διαπερνάται από ρεύμα που ρέει από την πηγή, ενώ η δεύτερη από ρεύμα που ρέει προς την πηγή. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ακύρωση ενός μέρους ή ολόκληρων των μαγνητικών πεδίων με αποτέλεσμα την εμφάνιση μειωμένης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στο Σχ. 3.4(β') απεικονίζεται τι συμβαίνει όταν τα μακρινά άκρα των δύο ράβδων απομακρυνθούν μεταξύ τους ενώ οι ράβδοι είναι ακόμα συνδεδεμένες στην πηγή μέσω των κοντινών τους άκρων. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται η ύπαρξη περισσότερου χώρου και άρα λιγότερης αντίθεσης μεταξύ των μαγνητικών πεδίων των δύο ράβδων. Από την άλλη μεριά, στο Σχ. 3.4(γ') φαίνεται η περίπτωση που τοποθετούμε τις ράβδους στην ίδια ευθεία, κάνοντας έτσι το

ρεύμα που τις διαρρέει να κινείται προς την ίδια κατεύθυνση. Επομένως, τα δύο μαγνητικά πεδία έχουν την ίδια κατεύθυνση, γεγονός που οδηγεί στην επίτευξη μέγιστης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω: (α) η απλή κεραία έχει προκύψει από μία ανοιχτοκυκλωμένη γραμμή μεταφοράς μήκους  $\lambda/4$ , και (β) το μεν ηλεκτρικό πεδίο σχετίζεται με την τάση, το δε μαγνητικό με το ρεύμα που ρέει τη γραμμή κεραία. Λαμβάνοντας υπόψη την πλήρη ανάκλαση που πραγματοποιείται στη συγκεκριμένη γραμμή μεταφοράς, το ρεύμα και η τάση θα βρίσκονται σε διαφορά φάσης  $90^\circ$  (βλέπε Εδάφιο 2.7.3 και Σχ. 2.19). Η ίδια διαφορά φάσης μεταφέρεται ανάμεσα στο ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο που συνιστούν το *πεδίο επαγωγής*.

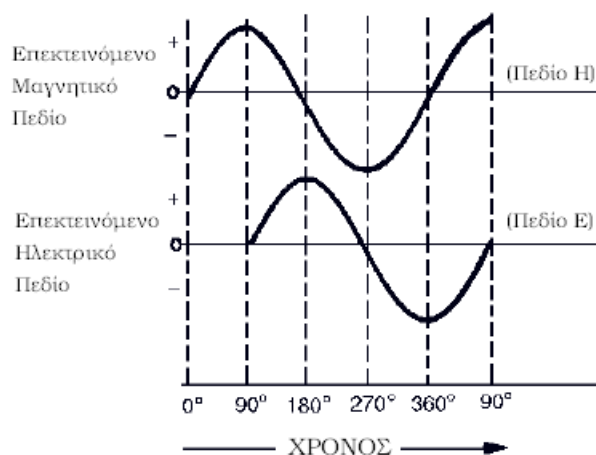
Στο Σχ. 3.5 παρουσιάζεται μια γεννήτρια συνδεδεμένη με μια κεραία που θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο παραγωγής ενός επαγωγικού πεδίου. Ας μελετήσουμε λοιπόν έναν κύκλο λειτουργίας της συγκεκριμένης γεννήτριας.

Αρχικά, θεωρούμε ότι η έξοδος της γεννήτριας είναι μηδενική και ότι δεν υπάρχει κάποιο πεδίο γύρω από την κεραία, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5(α). Στη συνέχεια, υποθέτουμε ότι η γεννήτρια παράγει ένα ελάχιστο δυναμικό και έχει τη στιγμιαία πολικότητα που απεικονίζεται στο Σχ. 3.5(β). Εξαιτίας αυτής της ελάχιστης πολικότητας, η χωρητικότητα της κεραίας δρα ως βραχυκύκλωμα, επιτρέποντας μια μεγάλη ροή ρεύματος να διαπεράσει την κεραία στην κατεύθυνση που δίνεται στο σχήμα. Η ροή αυτή ρεύματος με τη σειρά της παράγει ένα μεγάλο μαγνητικό πεδίο γύρω από την κεραία. Καθώς η ροή ρεύματος σε κάθε άκρο της κεραίας είναι ελάχιστη, το αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο σε κάθε άκρο της κεραίας είναι επίσης ελάχιστο. Με την πάροδο όμως του χρόνου, τα φορτία, που αντιτίθενται στο ρεύμα που διαρρέει την κεραία και παράγουν ένα ηλεκτροστατικό πεδίο, συγκεντρώνονται στα άκρα της. Τελικά, η χωρητικότητα της κεραίας φορτίζεται πλήρως διακόπτοντας με αυτόν τον τρόπο τη ροή ρεύματος μέσα από την κεραία. Υπό αυτές τις συνθήκες, το ηλεκτροστατικό πεδίο είναι μέγιστο και το μαγνητικό πεδίο μηδενικό, γεγονός που φαίνεται στο Σχ. 3.5(γ). Καθώς το δυναμικό της γεννήτριας μειώνεται πίσω στο μηδέν, μειώνεται και η τάση στα άκρα της κεραίας ή αποφορτίζεται ο πυκνωτής. Κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης, το ηλεκτρικό πεδίο μηδενίζεται και η κατεύθυνση της ροής του ρεύματος αντιστρέφεται, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5(δ). Στο υπόλοιπο μισό του κύκλου της γεννήτριας AC, τα φαινόμενα αντιστρέφονται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 3.5: Επαγωγικό πεδίο γύρω από μια κεραία.

Η γραφική παράσταση του Σχ. 3.6 δίνει τη σχέση μεταξύ του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου. Παρατηρείτε ότι το πεδίο **H** εμφανίζεται σε ένα επίπεδο κάθετο προς την κεραία, ενώ το πεδίο **E** σε ένα επίπεδο παράλληλο με αυτή.



Σχήμα 3.6: Σχέση φάσης των συνιστωσών του επαγωγικού πεδίου.

Όλη η παρεχόμενη στο επαγωγικό πεδίο ενέργεια επιστρέφεται στην κεραία μέσω των συρρικνούμενων πεδίων **E** και **H**. Καμία ποσότητα ενέργειας του επαγωγικού πεδίου δεν ακτινοβολείται από την κεραία. Επομένως, το επαγωγικό πεδίο θεωρείται τοπικό πεδίο και δεν παίζει ρόλο στη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Το επαγωγικό πεδίο αναπαριστά μόνο την αποθηκευμένη στην κεραία ενέργεια και είναι υπεύθυνο για φαινόμενα συντονισμού.

### 3.1.2 Πεδίο Ακτινοβολίας

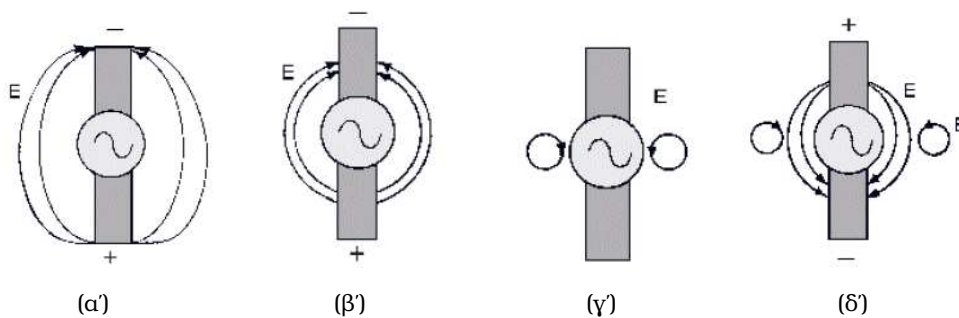
Τα πεδία **E** και **H** που δημιουργούνται κατά τη μεταφορά ενέργειας στο χώρο είναι γνωστά ως ένα πεδίο, το οποίο καλείται *πεδίο ακτινοβολίας (radiation field)* ή *μη ανυδραστικό πεδίο (non-reactive)*. Αυτό είναι υπεύθυνο για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία της κεραίας και εξασθενεί καθώς η απόσταση από την κεραία αυξάνεται. Θεωρώντας ομοιόμορφη ακτινοβολία προς όλα τα σημεία του τρισδιάστατου χώρου, η ακτινοβολούμενη ισχύς μειώνεται σε σχέση με την απόσταση από την κεραία ακολουθώντας το νόμο του αντίστροφου τετραγώνου.

Ας δούμε τώρα μια *κεραία ημίσεως μήκους κύματος (half-wave antenna)*

ώστε να καταλάβουμε πώς ακριβώς προκύπτει η συγκεκριμένη ακτινοβολία. Με απλά λόγια, μια κεραία ημίσεως μήκους κύματος είναι μια κεραία με ηλεκτρικό μήκος ίσο με το μισό του μήκους κύματος του σήματος που μεταδίδεται. Σε μικρή απόσταση από την κεραία (μερικών  $\lambda$ ), υπάρχει μόνο το πεδίο ακτινοβολίας. Το πεδίο αυτό απαρτίζεται από μια ηλεκτρική και μια μαγνητική συνιστώσα, κάθετες μεταξύ τους στο χώρο και με μεταβαλλόμενη τιμή έντασης.

Συνδέοντας μια γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων με μία κεραία, προκύπτει το επαγωγικό πεδίο που περιγράφηκε στην αμέσως προηγούμενη ενότητα. Ωστόσο, το δυναμικό της γεννήτριας αντιστρέφεται πριν τον πλήρη μηδενισμό του ηλεκτροστατικού πεδίου με αποτέλεσμα το ανεστραμμένο δυναμικό να εξουδετερώνει τυχόν εναπομείναντα φορτία, διατηρώντας έτσι ένα πεδίο  $\mathbf{E}$  στο χώρο.

Στο Σχ. 3.7 απεικονίζεται ένα πεδίο  $\mathbf{E}$  που απομακρύνεται από την κεραία. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το πεδίο  $\mathbf{H}$  δε λαμβάνεται υπόψη αν και υπάρχει. Στο Σχ. 3.7(α'), η τάση είναι μέγιστη και άρα, το ηλεκτρικό πεδίο έχει μέγιστη ένταση. Οι δυναμικές γραμμές ξεκινούν από το θετικά φορτισμένο άκρο της κεραίας και εκτείνονται προς το αρνητικά φορτισμένο άκρο της. Σημειώνεται ότι οι εξωτερικές γραμμές είναι καμπυλωμένες προς τα έξω λόγω των εσωτερικών. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της απωθητικής δύναμης που λαμβάνει χώρα μεταξύ των δυναμικών γραμμών στην ίδια κατεύθυνση. Καθώς η τάση μειώνεται (Σχ. 3.7(β')), τα διαχωρισμένα φορτία συναντώνται και οι άκρες των γραμμών μετατοπίζονται προς το κέντρο της κεραίας. Όμως, καθώς οι δυναμικές γραμμές της ίδιας κατεύθυνσης απωθούν η μία την άλλη, τα κέντρα των γραμμών διατηρούνται προς τα έξω.



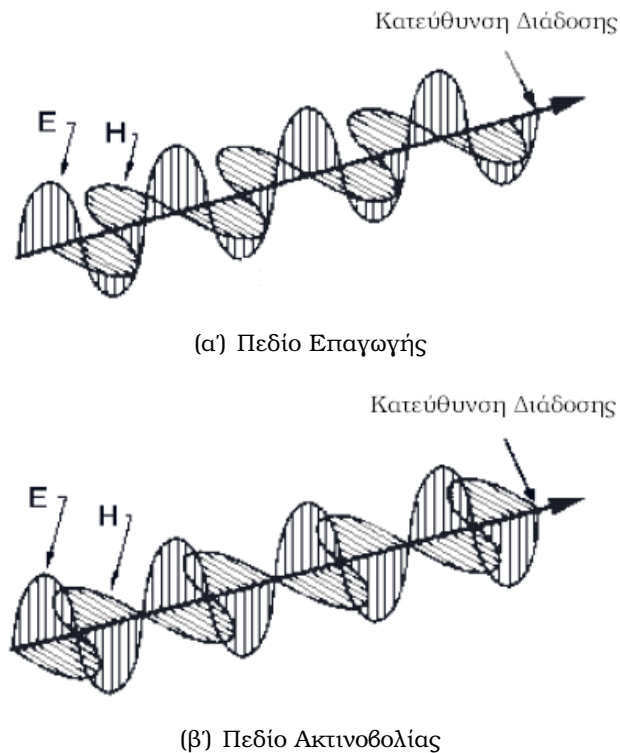
Σχήμα 3.7: Ακτινοβολία κεραίας.

Καθώς τώρα η τάση τείνει στο μηδέν (Σχ. 3.7(β')), μερικές από τις γραμμές

έρχονται πιο κοντά στην κεραία. Την ίδια στιγμή, τα άκρα των υπόλοιπων γραμμών αρχίζουν να πλησιάζουν το ένα το άλλο σχηματίζοντας έναν κύκλο (Σχ. 3.7(γ)). Στο σημείο αυτό, η τάση της κεραίας είναι μηδενική. Καθώς το φορτίο αρχίζει να συσσωρεύεται στην αντίθετη κατεύθυνση (Σχ. 3.7(δ)), οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές ξεκινούν και πάλι από το θετικά φορτισμένο άκρο της κεραίας και καταλήγουν στο αρνητικά φορτισμένο άκρο, άκρα που πλέον έχουν αντιστραφεί. Οι δυναμικές αυτές γραμμές, όντας στην ίδια κατεύθυνση με τις πλευρές των κλειστών βρόχων δίπλα στην κεραία, απωθούν τους κλειστούς αυτούς βρόχους και τους αναγκάζουν να απομακρυνθούν από την κεραία με την ταχύτητα του φωτός, παράγοντας με την κίνησή τους ένα μαγνητικό πεδίο συμφασικό με αυτά.

Για να αντιληφθούμε καλύτερα τις μετακινήσεις και το καμπύλωμα των δυναμικών γραμμών, θα πρέπει να σκεφτούμε ότι οι γραμμές αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο κινείται, τότε η τιμή της έντασης σε κάποιο σταθερό σημείο του χώρου δε διατηρείται σταθερή. Αν το φορτίο απομακρύνεται από το σημείο, τότε το πεδίο μειώνεται, και το αντίστροφο. Ωστόσο, η αυξομείωση του πεδίου σε αυτό το σημείο δε συμβαίνει ακαριαία με τη μετακίνηση του φορτίου. Αντίθετα, κατά τη μετακίνηση του φορτίου, η διάδοση της αλλαγής πραγματοποιείται με την ταχύτητα του φωτός. Άρα, υπάρχουν απομακρυσμένα σημεία που διατηρούν την παλιά τιμή του πεδίου. Τα φαινόμενα αυτά συμβαίνουν και κατά την ακτινοβολία της κεραίας ημίσεως κύματος. Λόγω της εναλλασσόμενης τάσης, τα ηλεκτρόνια της ράβδου αναγκάζονται σε επιταχυνόμενη και παλινδρομική κίνηση από το ένα άκρο στο άλλο. Εξαιτίας της κίνησης, η μεταβαλλόμενη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα στον περιβάλλοντα χώρο.

Καθώς κάθε διαδοχικό πεδίο  $\mathbf{E}$  παράγεται με πολικότητα αντίθετη αυτής του προηγούμενου πεδίου  $\mathbf{E}$ , παράγεται ένα ταλαντευόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Κατά την ταλάντωση του συγκεκριμένου πεδίου, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως που εξαρτάται από αυτήν του πεδίου  $\mathbf{E}$ . Οι διακυμάνσεις της έντασης του μαγνητικού πεδίου με τη σειρά τους παράγουν ένα άλλο πεδίο  $\mathbf{E}$ . Επομένως, τα δύο μεταβαλλόμενα πεδία συντηρούν το ένα το άλλο και μεταδίδονται συμφασικά. Στο Σχ. 3.8 δίνουμε μια σύγκριση μεταξύ του επαγωγικού πεδίου και του πεδίου ακτινοβολίας.

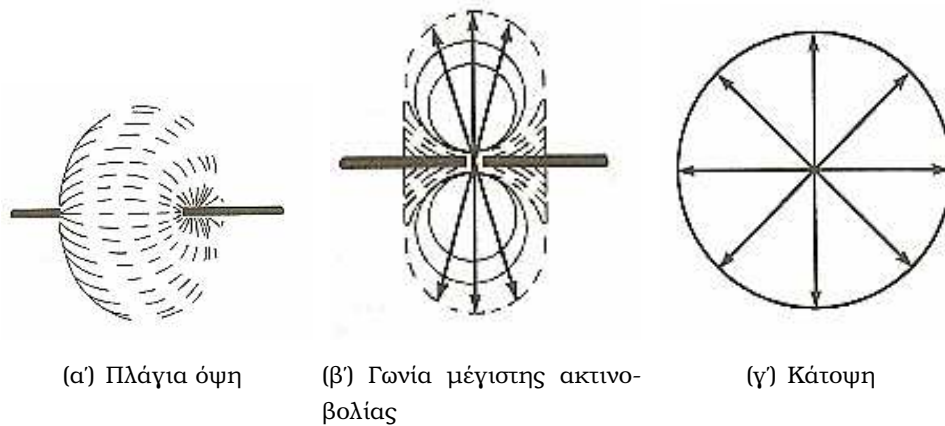


Σχήμα 3.8: Συνιστώσες  $\mathbf{E}$  και  $\mathbf{H}$  του επαγωγικού πεδίου και του πεδίου ακτινοβολίας.

### 3.2 Κατανομή Ρεύματος και Δυναμικού σε Δίπολο

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η απλούστερη μορφή κεραίας, προκύπτει αν πάρουμε μία παράλληλη γραμμή μεταφοράς και στρέψουμε τα ανοιχτά άκρα της προς τα έξω. Αν αυτή η παραλλαγμένη γραμμή μεταφοράς είναι κοντύτερη ενός μήκους κύματος  $\lambda$ , τότε ονομάζεται *ηλεκτρικό δίπολο* (*electric dipole*) ή *δίπολο Hertz*. Στην ειδική περίπτωση που το μήκος της κεραίας είναι  $\lambda/2$  προκύπτει το *δίπολο ημίσεως μήκους κύματος* (*half-wave dipole*). Το όνομα δίπολο προέκυψε επειδή οι ηλεκτρικές γραμμές εκτείνονται από το ένα ανοιχτό άκρο (ηλεκτρικό πόλο) στο άλλο, παράλληλα με τον άξονα του διπόλου και περιμετρικά από αυτόν. Το *διάγραμμα ακτινοβολίας* (*radiation pattern*) του διπόλου έχει τη χαρακτηριστική μορφή ντόνατ του Σχ. 3.9. Παρατηρήστε ότι δεν υπάρχει ακτινοβολία κατά μήκος του άξονα, ενώ η μέγιστη ακτινοβολία γίνεται στο κάθετο του άξονα επίπεδο.





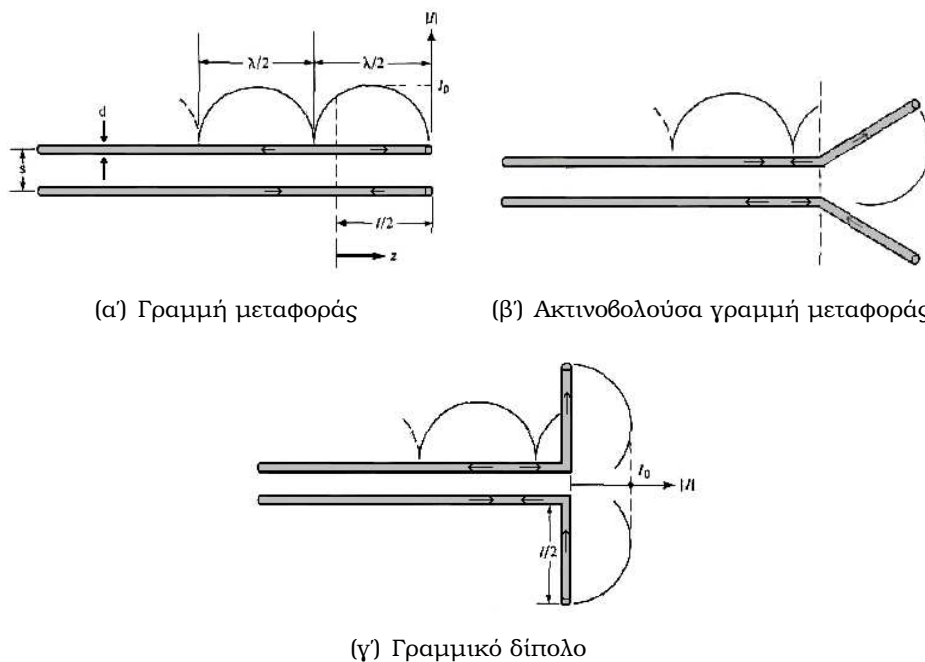
Σχήμα 3.9: Διάγραμμα ακτινοβολίας διπόλου Hertz [2].

Δεδομένου ότι το δίπολο μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μια παραλλαγμένη γραμμή μεταφοράς, μπορούμε να εφαρμόσουμε άμεσα τη θεωρία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2. Έτσι, αν το ηλεκτρικό δίπολο συνδεθεί με μια γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης, τότε εμφανίζονται ανακλάσεις και στάσιμα κύματα (βλέπε Εδάφιο 2.7.3). Συγκεκριμένα,

- στο ανοιχτό άκρο κάθε γραμμής μηδενίζεται το ρεύμα και μεγιστοποιείται το δυναμικό,
- σε απόσταση  $\lambda/4$  από το κάθε ανοιχτό άκρο μεγιστοποιείται το ρεύμα και μηδενίζεται το δυναμικό, ενώ
- τα φαινόμενα επαναλαμβάνονται με περίοδο  $\lambda/2$ .

Η κατανομή ρεύματος και τάσης σε ένα δίπολο επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως το μήκος του, οι απώλειες ισχύος, ο τρόπος τερματισμού, το πάχος των συρμάτων και η μεταξύ τους απόσταση, τα περιβάλλοντα αντικείμενα. Στο εξής θα προχωρήσουμε σε κάποιες απλουστευτικές υποθέσεις: οι κεραίες δεν παρουσιάζουν απώλειες, είναι κατασκευασμένες από σύρματα πολύ μικρής διατομής, η απόσταση των δύο συρμάτων είναι αμελητέα και ότι η ακτινοβολήση πραγματοποιείται στο κενό.

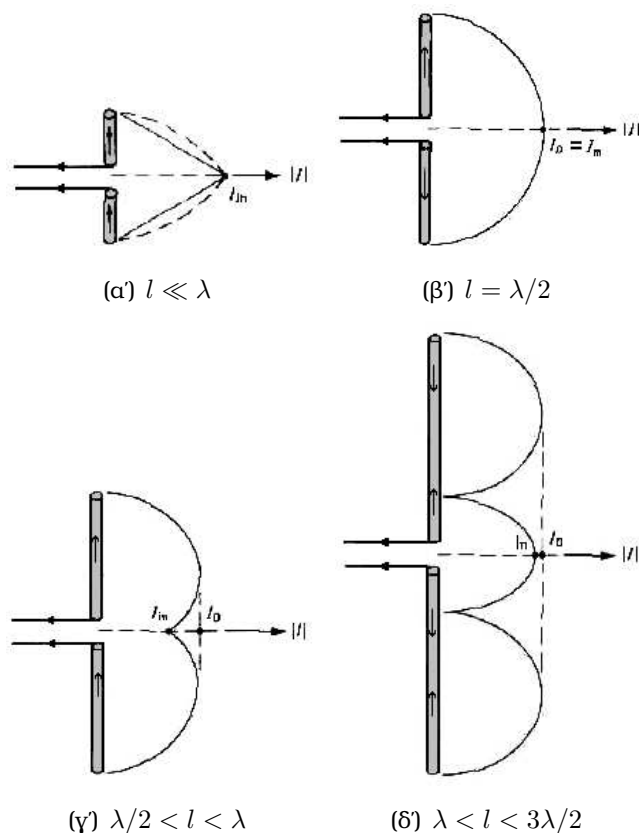
Για να μπορέσουμε να εξηγήσουμε την κατανομή ρεύματος σε ένα δίπολο, ξεκινάμε με τη γεωμετρία μιας παράλληλης γραμμής μεταφοράς, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.10(α') [11]. Τα πεδία που προκαλούνται από το ρεύμα κάθε σύρματος ακυρώνουν το ένα το άλλο. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια σχεδόν ιδανική (και επιθυμητή) γραμμή μεταφοράς που δεν εκπέμπει ακτινοβολία.



Σχήμα 3.10: Κατανομές ρεύματος [11].

Αν τα ακραία τμήματα της γραμμής μεταφοράς καμπυλωθούν όπως φαίνεται στο Σχ. 3.10(β), η κατανομή ρεύματος παραμένει η ίδια σε καθένα από τα δύο σύρματα. Επειδή τα καμπυλωμένα τμήματα των δύο συρμάτων δε βρίσκονται πλέον κοντά, τα μαγνητικά πεδία των δύο αγωγών δεν αλληλοκυρώνονται πλήρως και ακτινοβολούν. Τελικά, το καμπυλωμένο τμήμα της γραμμής μεταφοράς μπορεί να πάρει τη μορφή του διπόλου του Σχ. 3.10(γ). Αν  $l < \lambda$ , η φάση του στάσιμου κύματος ρεύματος είναι ίδια σε όλο το μήκος του διπόλου. Τα ακτινοβολούμενα πεδία από τα δύο σύρματα του διπόλου ενισχύουν το ένα το άλλο προς τις περισσότερες κατευθύνσεις.

Στη συνέχεια μελετάμε την επίδραση του μήκους του διπόλου στην κατανομή ρεύματος και κατ' επέκταση στο διάγραμμα ακτινοβολίας του. Η κατανομή ρεύματος ενός πολύ μικρού δίπολου (συνήθως  $\lambda/50 < l < \lambda/10$ ) μπορεί να προσεγγιστεί ως τριγωνική, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.11(α'). Αυξάνοντας το μήκος του διπόλου, η κατανομή του ρεύματος ακολουθεί την ημιτονοειδή μορφή του στάσιμου κύματος, διατηρώντας πάντα ως σημείο μηδενισμού τα ελεύθερα άκρα των δύο αγωγών (βλέπε Σχ. 3.11(β') και Σχ. 3.11(γ')). Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, η φορά του ρεύματος είναι σταθερή σε όλο το μήκος του διπόλου, όπως σημειώνεται από τα βελάκια κατά μήκος των αγω-

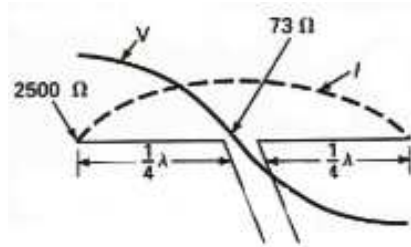


Σχήμα 3.11: Κατανομή ρεύματος σε δίπολα [11].

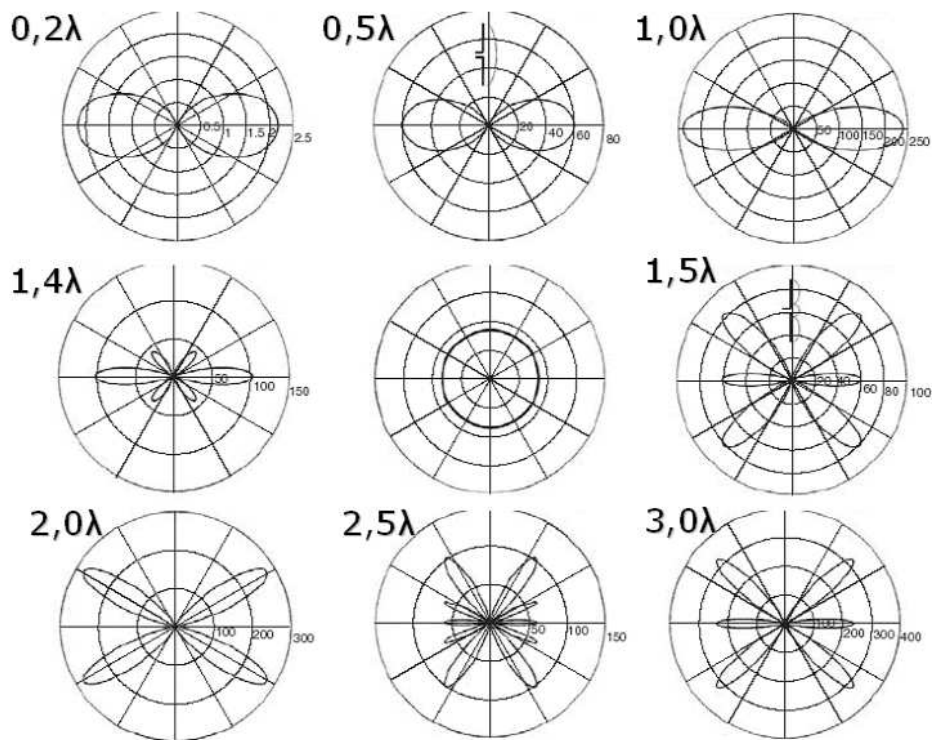
γών. Αντίθετα, όταν το μήκος του διπόλου ξεπεράσει το μήκος κύματος, τότε εμφανίζονται σημεία με αντίθετη πολικότητα ρεύματος, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.11(δ) για  $\lambda < l < 3\lambda/2$ . Κάτι τέτοιο συνεπάγεται μερική ακύρωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις, και ενίσχυσή του σε άλλες.

Στο Σχ. 3.12 απεικονίζεται η κατανομή του ρεύματος και τάσης κατά μήκος του διπόλου ημίσεως κύματος. Παρατηρήστε ότι το μέσο της κεραίας είναι σημείο μηδενισμού της τάσης, μεγίστου ρεύματος και άρα ελάχιστης (καθαρά ωμικής) αντίστασης  $73 \Omega$ . Αντίθετα, στα άκρα της κεραίας μεγιστοποιείται η τάση, μηδενίζεται το ρεύμα και επιτυγχάνεται μεγάλη (καθαρά ωμική) αντίσταση της τάξης των  $2500 \Omega$ .

Στο Σχ. 3.13 παρατίθενται τα διαγράμματα ακτινοβολίας ηλεκτρικών διπόλων με διαφορετικά μήκη. Δίνονται οι πλαϊνές όψεις των διαγραμμάτων με εξαίρεση την κεντρική. Η κεντρική όψη αποτελεί την κοινή κάτοψη όλων



Σχήμα 3.12: Κατανομή ρεύματος σε δίπολο ημίσεως κύματος [2].



Σχήμα 3.13: Διαγράμματα ακτινοβολίας σε ηλεκτρικά δίπολα διαφορετικού μήκους [7].

των άλλων διαγραμμάτων ακτινοβολίας και φαίνεται η ιστροπική μετάδοση περιμετρικά του άξονα του διπόλου. Όλα τα δίπολα με μήκος μικρότερο του μήκους κύματος παρουσιάζουν διάγραμμα ακτινοβολίας στη γνωστή μορφή του ντόνατ. Η μόνη διαφοροποίηση είναι ότι όσο αυξάνεται το μήκος του διπόλου, το διάγραμμα ακτινοβολίας γίνεται πιο επίπεδο, δηλαδή περισσότερο κατευθυντικό στην κάθετη του διπόλου γωνία. Όταν το μήκος της κεραίας ξεπεράσει το μήκος κύματος, εμφανίζονται ρεύματα αντίθετης πολικότητας. Στο παράδειγμα του  $3\lambda/2$ , η ακτινοβολία από το ένα άκρο της κεραίας προστίθεται σε αυτήν από το άλλο άκρο σε ορθές γωνίες, ενώ και οι δύο ακυρώνονται μερικώς από την ακτινοβολία του κεντρικού τμήματος. Γενικά, για  $l > \lambda$  εμφανίζονται δευτερεύοντες λοβοί ακτινοβολίας.

### 3.3 Χαρακτηριστικά των Κεραίων

#### 3.3.1 Αρχή της Αμοιβαιότητας

Μία σημαντική ιδιότητα των κεραίων είναι η *αρχή της αμοιβαιότητας* (*reciprocity principle*). Σύμφωνα με αυτήν, κάθε κεραία έχει τις ίδιες ιδιότητες κατά την εκπομπή και τη λήψη. Μία κεραία με αποδοτική εκπομπή, θα έχει και αποδοτική λήψη. Όλα τα χαρακτηριστικά μίας κεραίας, όπως το διάγραμμα ακτινοβολίας και η αντίσταση, είναι ίδια, ανεξάρτητα αν η κεραία χρησιμοποιείται σε κύκλωμα πομπού ή δέκτη. Λόγω αυτής της αρχής, (α) διευκολύνεται η ανάλυση των κεραίων, και (β) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ίδια κεραία για εκπομπή και λήψη (φυσικά όχι ταυτόχρονα) στην ίδια συχνότητα.

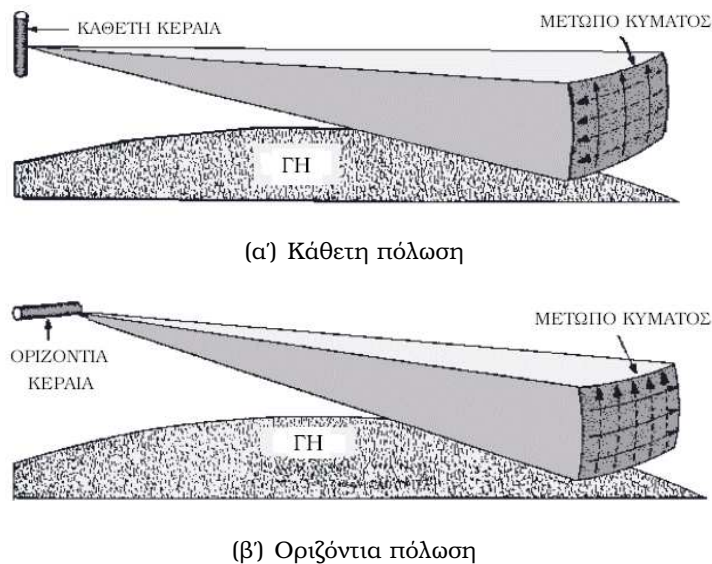
#### 3.3.2 Πόλωση

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το πεδίο ακτινοβολίας αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο που είναι κάθετα μεταξύ τους, αλλά και κάθετα προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Παρά την διπλή καθετότητα, τα διανύσματα  $\mathbf{E}$  και  $\mathbf{H}$  μπορούν να περιστραφούν κατά  $360^\circ$  ως προς τον άξονα της διάδοσης. Οι διαφορετικές θέσεις που μπορούν να λάβουν προσδιορίζουν την *πόλωση* του κύματος. Δεδομένου ότι το ένα πεδίο προσδιορίζει το άλλο, θεωρούμε κατά σύμβαση ότι η πόλωση ορίζεται από την κατεύθυνση των ηλεκτρικών γραμμών. Σε ένα κάθετα πολωμένο κύμα,

οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές εκτείνονται σε μία κάθετη διεύθυνση. Από την άλλη μεριά, σε ένα οριζόντιο πολωμένο κύμα, οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές εκτείνονται σε μία οριζόντια διεύθυνση. Τα παραπάνω φαίνονται στο Σχ. 3.14, όπου οι συμπαγείς γραμμές αντιστοιχούν στο ηλεκτρικό πεδίο και οι διακεκομμένες στο μαγνητικό.

Σε κάποιες περιπτώσεις, ο προσανατολισμός του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να μεταβάλλεται. Το πεδίο περιστρέφεται καθώς τα κύματα ταξιδεύουν στο χώρο. Η ηλεκτρική και η μαγνητική συνιστώσα παραμένουν κάθετες μεταξύ τους, ενώ η περιστροφή τους μπορεί να οδηγήσει σε *κυκλική* ή *ελλειπτική* πόλωση.

Από την πλευρά του δέκτη, βέλτιστη λήψη επιτυγχάνεται όταν το διάγραμμα της κεραίας λήψης ταιριάζει με την πόλωση του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών διπόλων αυτό σημαίνει ότι για αποδοτική λήψη κάθετα πολωμένων κυμάτων χρησιμοποιούνται κάθετες κεραίες, ενώ για τα οριζόντια πολωμένα κύματα οριζόντιες κεραίες. Στη συνέχεια μελετάμε την πόλωση κάθε κύματος ανάλογα με τον τρόπο διάδοσής του (βλέπε και Ενότητα 1.5).



Σχήμα 3.14: Κάθετη και οριζόντια πόλωση.

Κατά τη μετάδοση κυμάτων επιφανείας χρησιμοποιείται κάθετη πόλωση. Δεδομένου ότι κατά τη συγκεκριμένη μετάδοση χρησιμοποιούνται μεσαίες και χαμηλές συχνότητες και ότι η γη δρα ως ένας αρκετά καλός αγωγός σε

αυτές, οι οριζόντιες ηλεκτρικές γραμμές βραχυκυκλώνονται και εμποδίζεται η διάδοση σε μεγάλες αποστάσεις. Αντίθετα, οι κάθετες ηλεκτρικές γραμμές επηρεάζονται ελάχιστα από τη γη.

Η *μετάδοση ουράνιων κυμάτων* χρησιμοποιείται σε υψηλότερες συχνότητες. Για τη μετάδοση ουράνιων κυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε οριζόντια, είτε κάθετη πόλωση επειδή τα ουράνια κύματα φτάνουν στην κεραία λήψης ελλειπτικά πολωμένα. Η ελλειπτική πόλωση των ουράνιων κυμάτων οφείλεται στην πρόσκρουσή τους στην ιονόσφαιρα.

Κατά τη *μετάδοση κυμάτων χώρου* στα VHF και UHF μπορεί να χρησιμοποιηθεί οριζόντια ή κάθετη πόλωση. Τα συγκεκριμένα ραδιοκύματα διαδίδονται κατευθείαν από την κεραία εκπομπής στην κεραία λήψης χωρίς να εισέλθουν στην ιονόσφαιρα. Η αρχική πόλωση που παράγεται στην κεραία εκπομπής διατηρείται μέχρι το δέκτη. Συνεπώς, εάν χρησιμοποιήσουμε για μετάδοση μία οριζόντια πολωμένη κεραία, τότε για τη λήψη πρέπει να χρησιμοποιήσουμε επίσης μία οριζόντια πολωμένη κεραία.

### 3.3.3 Αντίσταση Ακτινοβολίας

Η *αντίσταση ακτινοβολίας* είναι μια υποθετική ωμική αντίσταση που θα κατανάλωνε ισοδύναμη ισχύς με αυτήν που εκπέμπεται πραγματικά από την κεραία. Ορίζεται ως ο λόγος ακτινοβολούμενης ισχύος από την κεραία προς το τετράγωνο του ρεύματος στο σημείο τροφοδοσίας.

Εκτός από την ενέργεια που εκπέμπεται από την κεραία, υπάρχουν και απώλειες ισχύος. Αυτές οφείλονται στην αντίσταση του εδάφους, σε ατελές διηλεκτρικό κοντά στην κεραία, σε απώλεια ενέργειας εξαιτίας επαγόμενων εναλλασσόμενων ρευμάτων σε γειτονικά μεταλλικά αντικείμενα και σε θερμικές απώλειες κατά μήκος της ίδιας της κεραίας. Το ισοζύγιο της ισχύος είναι

$$P_{in} = P_d + P_{rad}, \quad (3.1)$$

όπου  $P_{in}$  η συνολική ισχύς στο σημείο τροφοδοσίας,  $P_d$  η απωλεσθείσα ενέργεια και  $P_{rad}$  η συνολικά ακτινοβολούμενη ενέργεια. Αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση καθέναν εκ των τριών όρων με τον αντίστοιχο όρο  $I^2 R$ , προκύπτει

$$R_{in} = R_d + R_{rad}. \quad (3.2)$$

Σημειώνεται ότι για το δίπολο Hertz ( $l < \lambda$ ), η αντίσταση ακτινοβολίας  $R_{rad}$  είναι ίση με το πραγματικό μέρος της αντίστασης εισόδου  $R_{in}$ . Για

$l > \lambda$ , ισχύει  $R_{in} > R_{rad}$ .

Βάσει αυτής της έκφρασης, μπορούμε να ορίσουμε μία εξίσωση για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης μίας κεραίας ως

$$n = \frac{R_{rad}}{(R_{rad} + R_d)} \times 100\% \quad (3.3)$$

όπου  $R_d$  η αντίσταση της κεραίας και  $R_{rad}$  η αντίσταση ακτινοβολίας της κεραίας.

Οι κεραίες χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων είναι λιγότερο αποδοτικές δεδομένων των δυσκολιών που απαντώνται στην επίτευξη του κατάλληλου φυσικού μήκους τους. Συγκεκριμένα, κεραίες τέτοιου είδους μπορούν να επιτύχουν απόδοση από 75% έως 95%. Κεραίες μεγαλύτερων συχνοτήτων μπορούν να επιτύχουν αποδόσεις που προσεγγίζουν το 100%. Οι τιμές της αντίστασης ακτινοβολίας μπορούν να διαφέρουν από μερικά Ohms μέχρι μερικές εκατοντάδες Ohms ανάλογα με την επιλογή των σημείων τροφοδοσίας και των φυσικών-ηλεκτρικών χαρακτηριστικών.

### 3.3.4 Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Η ενέργεια που ακτινοβολείται από μία κεραία έχει ένα καθορισμένο *διάγραμμα ακτινοβολίας (radiation pattern)*. Ένα διάγραμμα ακτινοβολίας είναι μία τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση της ακτινοβολούμενης ενέργειας, η οποία μετρείται σε διαφορετικές γωνίες και σε σταθερή απόσταση από την κεραία.<sup>1</sup> Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε τους βασικούς τύπους ακτινοβολίας και τα διαγράμματα ακτινοβολίας τους.

Μια κεραία καλείται *ισοτροπική (isotropic)* όταν ακτινοβολεί ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις μιας σφαίρας. Πρακτικά, δεν υπάρχει κεραία που να ακτινοβολεί ισοτροπικά στον τρισδιάστατο χώρο. Οι κεραίες που υλοποιούνται εκπέμπουν ισχυρότερη ακτινοβολία προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις και ονομάζονται *ανισοτροπικές (anisotropic)*.

Μια κεραία καλείται *πανκατευθυντική (omnidirectional)* όταν ακτινοβολεί συμμετρικά σε ένα επίπεδο. Για παράδειγμα, εξετάζοντας τα διαγράμματα ακτινοβολίας των ηλεκτρικών διπόλων του Σχ. 3.13, διαπιστώνουμε ότι το δίπολο είναι πανκατευθυντική κεραία στο οριζόντιο επίπεδο και κατευθυντική στο κατακόρυφο.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Το πεδίο ακτινοβολίας μετράται κάποια μήκη κύματος μακριά από την κεραία, ώστε να έχει αποσβεστεί η επίδραση του επαγωγικού πεδίου.

<sup>2</sup>Στην περίπτωση της κάθετης πόλωσης.



Σχεδιάζοντας το διάγραμμα ακτινοβολίας μίας κεραίας μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε τις κατευθύνσεις ισχυρής ακτινοβολίας. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται *λοβοί (lobes)* και έξω από αυτές εκπέμπεται ελάχιστη ακτινοβολία. Τα σημεία που η ακτινοβολία είναι ελάχιστη ή μηδενική καλούνται *μηδενικά (nulls)*.

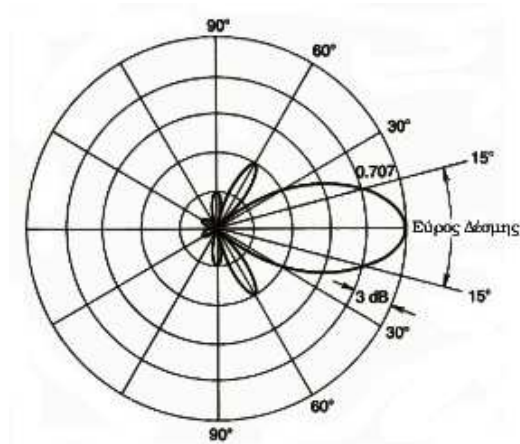
Ένας τρόπος για να προσδιορίσουμε τη συγκέντρωση ακτινοβολίας στον κύριο λοβό είναι να ορίσουμε το *κατευθυντικό κέρδος (directive gain)* μιας κεραίας. Αυτό ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας ισχύος στην κατεύθυνση του κύριου λοβού προς την πυκνότητα ισχύος που θα ακτινοβολούσαν από μία ισοτροπική κεραία. Για παράδειγμα, το κέρδος ενός διπόλου Hertz ισούται με 1.76 dB, ενώ το αντίστοιχο κέρδος μίας κεραίας ημίσεως κύματος ισούται με 2.15 dB.<sup>3</sup>

Ο όρος *εύρος ζώνης (bandwidth)* αναφέρεται στο εύρος των συχνοτήτων που ακτινοβολεί αποδοτικά μια κεραία. Για παράδειγμα, αν κατασκευάσουμε μια κεραία ημίσεως κύματος  $\lambda/2$ , θα λειτουργεί αποδοτικά για τη συχνότητα που αντιστοιχεί στο μήκος κύματος  $\lambda$ . Αν τροποποιήσουμε ελάχιστα την τιμή της συχνότητας, το δίπολο θα εξακολουθεί να ακτινοβολεί, αλλά με μικρότερη απόδοση. Αν απομακρυνθούμε σημαντικά από τη συχνότητα συντονισμού, τότε η απόδοση μπορεί να μειωθεί δραματικά.

Για να ορίσουμε αυστηρά το εύρος ζώνης, μετράμε τις δύο συχνότητες γύρω από τη συχνότητα συντονισμού στις οποίες η ισχύς εκπομπής μειώνεται στο μισό σε σχέση με τη μέγιστη ακτινοβολία (στη συχνότητα συντονισμού). Αν θεωρήσουμε ότι η ισχύς στη συχνότητα ακτινοβολίας είναι 1, τότε η ισχύς στις δύο αυτές συχνότητες θα είναι  $1/2$ . Αν εκφράσουμε την ισχύ σε dB, τότε η συχνότητα συντονισμού είναι στα 0 dB και οι άλλες δύο στα  $-3$  dB. Το εύρος μεταξύ των δύο συχνοτήτων καλείται εύρος ζώνης. Σημειώνεται ότι οι κεραίες που έχουν μεγάλο εύρος ζώνης θα πρέπει να ενσωματώνουν κατάλληλα αντισταθμιστικά κυκλώματα για τον τερματισμό της γραμμής μεταφοράς.

Το *εύρος δέσμης (beamwidth)* μίας κεραίας περιγράφεται ως το διάστημα των γωνιών που ορίζονται από τα σημεία ημίσεως ισχύος (3 dB) στον κύριο λοβό ακτινοβολίας με το σημείο μέγιστης ακτινοβολίας. Στο Σχ. 3.15 για παράδειγμα το εύρος δέσμης είναι  $30^\circ$ , που είναι το άθροισμα των δύο γωνιών που δημιουργούνται στα σημεία που η ένταση του πεδίου πέφτει στο 0.707 της μέγιστης τάσης στο κέντρο του λοβού.

<sup>3</sup>Από τις τιμές αυτές φαίνεται για άλλη μια φορά ότι η κεραία  $\lambda/2$  είναι περισσότερο κατευθυντική από εκείνες μικρότερου μήκους.



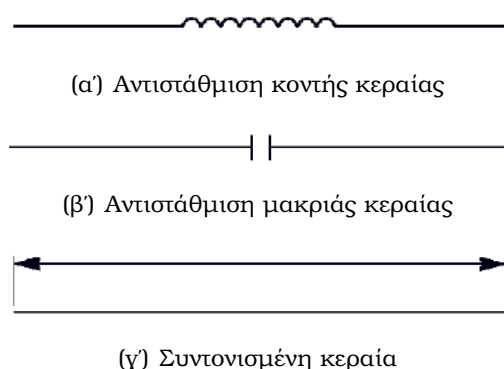
Σχήμα 3.15: Εύρος Δέσμης [2].

### 3.3.5 Ηλεκτρικό Μήκος

Συχνά χρησιμοποιούμε την ίδια κεραία για την εκπομπή/λήψη πολλών συχνοτήτων. Δεδομένου ότι η κεραία πρέπει να βρίσκεται πάντα σε συντονισμό με τη συχνότητα λειτουργίας, είναι πιθανό να χρειαστεί να επιμηκύνουμε ή να βραχύνουμε την κεραία φυσικά ή ηλεκτρικά.

Γενικά, η φυσική επιμήκυνση της κεραίας δεν είναι πρακτική. Ωστόσο, το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί μέσω της αλλαγής του ηλεκτρικού μήκους της κεραίας. Προκειμένου να αλλάξουμε το ηλεκτρικό μήκος, μπορούμε να συνδέσουμε είτε ένα πηνίο, είτε έναν πυκνωτή σε σειρά με την κεραία, όπως περιγράφεται στο Σχ. 3.16. Εάν η κεραία είναι πολύ μικρή για το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται, συντονίζεται σε υψηλότερη συχνότητα από εκείνη που διεγείρεται. Συνεπώς, παρέχει μία χωρητική αντίσταση στη συχνότητα διέγερσης. Αυτή η χωρητική αντίσταση μπορεί να αντισταθμιστεί με την εισαγωγή επαγωγικής αντίστασης, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.16(α'). Παρόμοια, εάν η κεραία είναι πολύ μεγάλη για τη συχνότητα λειτουργίας, τότε παρέχει επαγωγική αντίσταση που μπορεί να αντισταθμιστεί με χωρητική αντίσταση (Σχ. 3.16(β')).

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι το *ενεργό ηλεκτρικό μήκος* (*effective electrical length*) μιας κεραίας. Ο όρος σχετίζεται με το γεγονός ότι οι κεραίες συμπεριφέρονται σαν να είχαν μεγαλύτερο μήκος από το φυσικό τους. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους: (1) Θεωρητικά η κεραία θα πρέπει να έχει απείρως μικρή διατομή. Λόγω της πεπερασμένης διατομής της εμφανίζονται *φαινόμενα άκρων* (*end effects*). (2) Λόγω τεχνικών τροποποιήσης



Σχήμα 3.16: Ρύθμιση ηλεκτρικού μήκους κεραίας.

του ύψους μιας κεραίας (βλέπε τεχνική top loading στο Εδάφιο 3.5.4). Το αποτέλεσμα είναι ότι η ταχύτητα διάδοσης μέσα σε μία κεραία είναι 2 με 8% μικρότερη από αυτή στο κενό και ως εκ τούτου, το μήκος κύματος εντός της κεραίας είναι μικρότερο κατά το ίδιο ποσοστό. Επομένως, η κεραία εμφανίζεται μεγαλύτερη σε σύγκριση με την περίπτωση που το μήκος κύματος είχε υπολογιστεί για διάδοση στο κενό.

### 3.3.6 Τροφοδοσία

Ο τρόπος τροφοδοσίας μιας κεραίας, δηλαδή ο τρόπος σύνδεσης της κεραίας με τον πομπό, σχετίζεται άμεσα με την κατανομή ρεύματος πάνω σε αυτή. Ο απλούστερος τρόπος για να τροφοδοτήσουμε μία κεραία ημίσεως κύματος είναι να συνδέσουμε το ένα άκρο της διαμέσω ενός πυκνωτή στο τελικό στάδιο εξόδου του πομπού. Η μέθοδος αυτή καλείται συχνά *τροφοδοσία άκρου (end-feed)* ή *τροφοδοσία δυναμικού (voltage feed)*, επειδή πρόκειται για σημείο υψηλού δυναμικού.

Ένας δεύτερος τρόπος τροφοδοσίας είναι η διαίρεση της κεραίας στη μέση και η σύνδεση των δύο άκρων μιας παράλληλης γραμμής μεταφοράς με καθένα από αυτά. Δεδομένου ότι η κεραία τροφοδοτείται πλέον στο κέντρο (ένα σημείο χαμηλού δυναμικού και υψηλής τιμής ρεύματος), αυτός ο τύπος τροφοδοσίας καλείται *κεντρική τροφοδοσία (center feed)* ή *τροφοδοσία ρεύματος (current feed)*. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος τροφοδοσίας είναι πολύ σημαντική γιατί καθορίζει τον τύπο της γραμμής μεταφοράς που θα χρησιμοποιηθεί.

### 3.3.7 Σύζευξη

Ένας *συζεύκτης κεραίας (antenna coupler)* είναι ένα κύκλωμα χωρητικών και επαγωγικών στοιχείων, συγκεντρωμένων ή κατανεμημένων, και χρησιμοποιείται για τους ακόλουθους λόγους:

- Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν το μήκος της κεραίας είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο από το μήκος του επιθυμητού συντονισμού, τότε εμφανίζει χωρητική ή επαγωγική συμπεριφορά. Ο συζεύκτης καλείται να αναιρέσει μια τέτοια συμπεριφορά, εισάγοντας το αντίθετο ηλεκτρονικό στοιχείο. Για το λόγο αυτό, οι συζεύκτες συνήθως περιλαμβάνουν πυκνωτές και πηνία με μεταβλητές χωρητικότητες και επαγωγές, αντίστοιχα.
- Ο συζεύκτης χρησιμοποιείται για να επιτύχει προσαρμογή εμπέδησης ανάμεσα στην κεραία και τη γραμμή μεταφοράς ή τον πομπού (βλέπε μετασχηματιστής  $\lambda/4$  στην Ενότητα 2.5), οπότε αποτελείται συνήθως από μεταβλητές ωμικές αντιστάσεις.
- Εμποδίζει την ακτινοβολία ανεπιθύμητων υψηλών αρμονικών συχνοτήτων. Πολύ συχνά στο κύκλωμα του πομπού, μαζί με την επιθυμητή συχνότητα  $f_c$ , παράγονται και κάποιες αρμονικές  $kf_c$ . Ο συζεύκτης θα πρέπει να λειτουργήσει ως χαμηλοπερατό φίλτρο και να εμποδίσει τις συνιστώσες αυτές να φτάσουν στην κεραία.
- Μία τελευταία λειτουργία του συζεύκτη είναι να εμποδίσει τη διέλευση ρεύματος DC στην κεραία, γεγονός που θα αποτελούσε σημαντικό κίνδυνο για το προσωπικό λειτουργίας της κεραίας.

### 3.3.8 Βασικοί Τύποι Κεραίων και Κριτήρια Επιλογής

Μέχρι στιγμής παρουσιάστηκαν οι θεμελιώδεις αρχές λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των κεραίων. Εστίασαμε σε έναν από τους πιο απλούς τύπους κεραίας: το ηλεκτρικό δίπολο. Ωστόσο, η κεραία ενός ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος μπορεί να πάρει πολλές και αρκετά διαφορετικές μορφές. Το δίπολο μπορεί να εξελιχθεί σε κεραία Hertz ή Marconi, να αναδιπλωθεί και να προκύψει το αναδιπλωμένο δίπολο, ή να χρησιμοποιηθούν πολλά δίπολα μαζί σε συστοιχίες. Επίσης, υπάρχουν μη συντονισμένες κεραίες που είτε αποτελούνται από ένα απλό μεταλλικό σύρμα, είτε έχουν

συνδυαστεί σε ρομβικές κατασκευές. Μια άλλη μεγάλη κατηγορία κεραιών είναι οι κεραίες βρόγχου. Άλλωστε, σε υψηλές συχνότητες (UHF, μικροκύματα) ή σε ειδικές εφαρμογές, οι κεραίες παίρνουν περίπλοκες μορφές: παραβολοειδείς ανακλαστές, κωνικές κεραίες, κεραίες-φακοί, ελικοειδείς κεραίες, κεραίες υπό μορφή τυπωμένων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, και άλλες [12], [2], [11], που ξεφεύγουν από τα ενδιαφέροντα των σημειώσεων αυτών.

Ο τύπος της κεραίας που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε εφαρμογή επιλέγεται βάσει πολλών **κριτηρίων** όπως η συχνότητα λειτουργίας, το εύρος ζώνης, η ισχύς εκπομπής και λήψης, η πόλωση, οι διαστάσεις, η κατευθυντικότητα, το κόστος κατασκευής. Στο υπόλοιπο του κεφαλαίου στεκόμαστε σε ορισμένους από τους αντιπροσωπευτικότερους τύπους κεραιών.

### 3.4 Κεραία Hertz & Αναδιπλωμένο Δίπολο

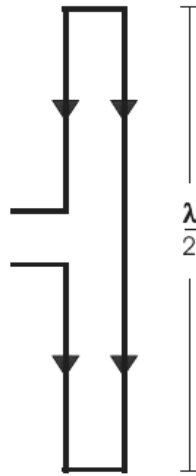
#### Κεραία Hertz

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο απλούστερος τρόπος να δημιουργηθεί μία κεραία είναι αν απομακρυνθούν τα δύο άκρα μιας ανοιχτοκυκλωμένης γραμμής μεταφοράς, οπότε θα προκύψει ένα ηλεκτρικό δίπολο. Στην Ενότητα 3.2 μελετήσαμε την κατανομή ρεύματος ενός διπόλου και αναλύσαμε την επίδραση που έχει το μήκος του διπόλου στο διάγραμμα ακτινοβολίας του (βλέπε Σχ. 3.12 και Σχ. 3.13). Το δίπολο Hertz και η κεραία ημίσεως κύματος χρησιμοποιούνται ευρύτατα και αποτελούν σημεία αναφοράς για πολλές άλλες κεραίες [12].

#### Αναδιπλωμένο Δίπολο

Προκειμένου να αυξηθεί η ακτινοβολούμενη ισχύς, μπορούμε να τοποθετήσουμε μερικά ηλεκτρικά δίπολα το ένα δίπλα στο άλλο. Όταν  $N$  δίπολα τοποθετούνται το ένα μέσα στο επαγωγικό πεδίο του άλλου, τότε η ακτινοβολούμενη ισχύς αυξάνεται κατά έναν παράγοντα  $N^2$  [7].

Στο Σχ. 3.17 φαίνεται το αναδιπλωμένο δίπολο. Μπορεί να ιδωθεί ως μια βραχυκυκλωμένη γραμμή μεταφοράς (ή κεραία βρόγχου με περιφέρεια  $\lambda$  όπως θα εξηγηθεί στην Ενότητα 3.6) που έχει συμπίεσει κατάλληλα. Σε χαμηλές συχνότητες όπου το αναδιπλωμένο δίπολο είναι ηλεκτρικό μικρό, η κεραία αυτή δεν ακτινοβολεί αποδοτικά επειδή τα ρεύματα στους παράλληλους αγωγούς τείνουν να ακυρώνουν το ένα το άλλο, όπως σε μία γραμμή



Σχήμα 3.17: Αναδιπλωμένο δίπολο [7].

μεταφοράς. Όταν η κεραία συντονίζεται, τα δύο ρεύματα γίνονται συμφασικά και η κεραία λειτουργεί ως δύο δίπολα τοποθετημένα δίπλα-δίπλα.

Αποδεικνύεται ότι τόσο η αντίσταση εισόδου, όσο και η αντίσταση ακτινοβολίας ενός αναδιπλωμένου διπόλου είναι  $N^2$  φορές μεγαλύτερη του απλού διπόλου [12], [2]. Επιπλέον, για την περαιτέρω αύξηση της τιμής των αντιστάσεων μπορούμε να τροποποιήσουμε τη διατομή μερικών διπόλων.

Αν και το διάγραμμα ακτινοβολίας του αναδιπλωμένου διπόλου είναι παρόμοιο με αυτό του απλού (μορφή ντόνατ), το αναδιπλωμένο δίπολο έχει κάποιες παρακάτω χρήσιμες ιδιότητες:

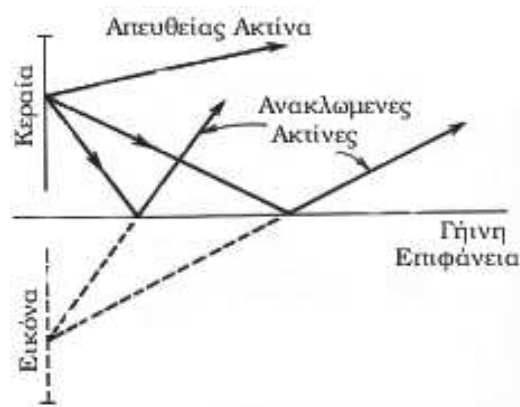
1. Ακτινοβολεί αποδοτικότερα από το απλό δίπολο.
2. Λόγω της μεγάλης αντίστασης εισόδου μπορεί να συνδεθεί ευκολότερα με τις υπάρχουσες γραμμές μεταφοράς.
3. Όταν απομακρυνόμαστε από τη συχνότητα συντονισμού, η χωρητική αντίστασή του μεταβάλλεται πολύ πιο αργά από ότι στο απλό δίπολο. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων.
4. Η κατασκευή του είναι σχετικά εύκολη και φθηνή.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, το αναδιπλωμένο δίπολο χρησιμοποιείται αρκετά συχνά, είτε μόνο του, είτε σε συστοιχίες κεραιών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι το ενεργό στοιχείο σε μια VHF κεραία τηλεόρασης Yagi-Uda (βλέπε Εδάφιο 3.7.6) συνήθως είναι ένα αναδιπλωμένο δίπολο.

## 3.5 Κεραία Marconi και η Επίδραση του Εδάφους

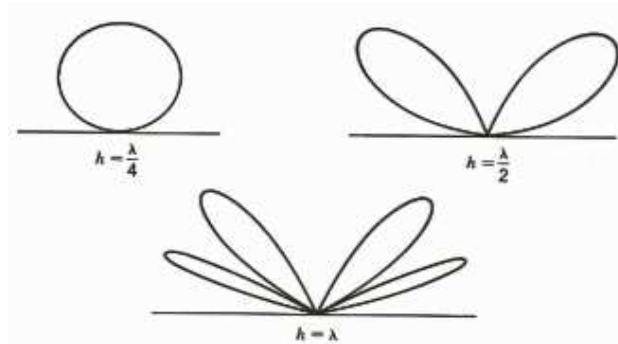
### 3.5.1 Μη Γειωμένες Κεραίες

Στις προηγούμενες ενότητες, εξετάσαμε την ακτινοβολία των κεραιών αγνοώντας την ύπαρξη του εδάφους. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, η επιφάνεια της γης μπορεί να λειτουργήσει ως ανακλαστής. Στην περίπτωση που μία κεραία είναι τοποθετημένη κοντά σε ανακλαστική επιφάνεια, το σήμα που λαμβάνεται σε οποιοδήποτε σημείο του περιβάλλοντα χώρου προσδιορίζεται από το διανυσματικό άθροισμα του απευθείας κύματος και των ανακλάσεών του. Για να απλοποιήσουμε την εξήγηση, αρκεί να φανταστούμε την ύπαρξη μιας εικονικής κεραίας, κατοπτρικής εικόνας της πραγματικής, κάτω από την επιφάνεια της γης (Σχ. 3.18).



Σχήμα 3.18: Μη γειωμένη κεραία και η εικόνα της [2].

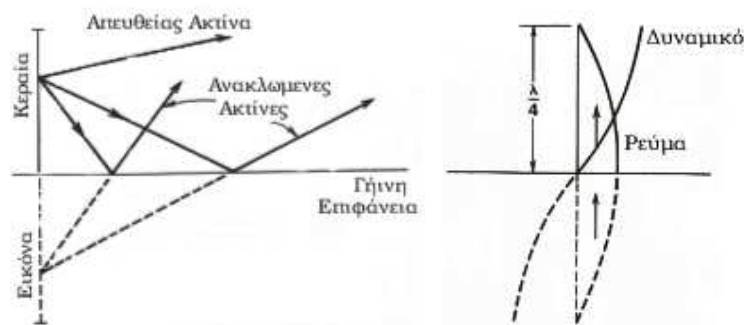
Όταν ένα κύμα ανακλάται (υπό μικρή γωνία), η πόλωσή του αλλάζει κατά  $180^\circ$ . Στα σημεία που το απευθείας και το ανακλώμενο κύμα έχουν το ίδιο πλάτος και την ίδια φάση, το διανυσματικό άθροισμά τους είναι μηδέν, οπότε δημιουργείται σημείο χωρίς ακτινοβολία. Φυσικά, υπάρχει και η αντίθετη περίπτωση των σημείων που το ένα κύμα ενισχύει το άλλο. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι το έδαφος μπορεί να δημιουργήσει κροσσούς συμβολής των κυμάτων και να τροποποιήσει σημαντικά το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας (Σχ. 3.19).



Σχήμα 3.19: Διαγράμματα ακτινοβολίας μη γειωμένου διπόλου  $\lambda/2$  σε διαφορετικά ύψη από το έδαφος [2].

### 3.5.2 Γειωμένες Κεραίες και Κεραία Marconi

Όπως στην περίπτωση των μη γειωμένων κεραιών που βρίσκονται κοντά στο έδαφος, έτσι και στην περίπτωση μιας γειωμένης κεραίας, η γη λειτουργεί ως ανακλαστής. Το κάτω άκρο της γειωμένης κεραίας συνδέεται με το άνω άκρο της εικόνας της, οπότε το σύστημα δρα σαν μία κεραία διπλάσιου μεγέθους. Επομένως, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.20(α'), η γειωμένη κεραία  $\lambda/4$  συμπεριφέρεται σαν κεραία  $\lambda/2$ . Μια τέτοια κεραία ονομάζεται *ηλεκτρικό μονόπολο (electric monopole)* ή *κεραία Marconi*.



(α') Κεραία και εικόνα

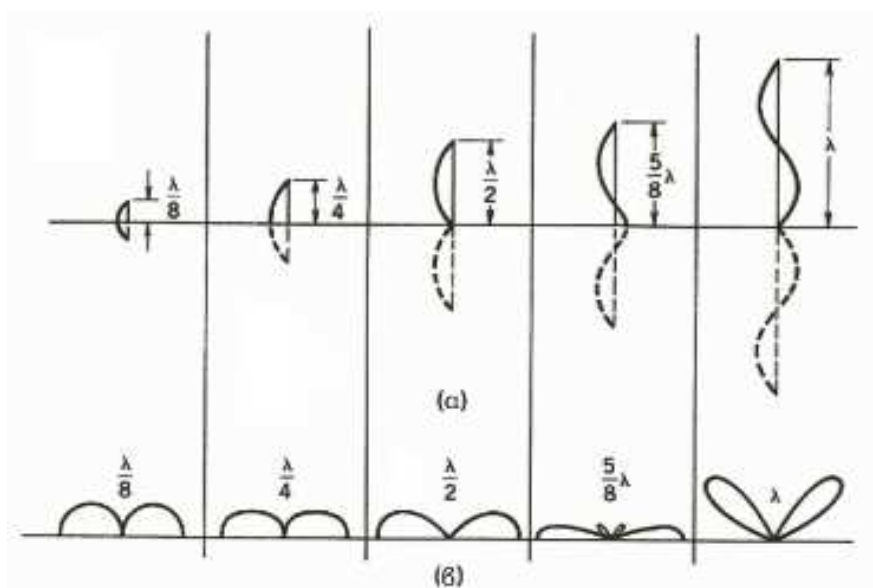
(β') Κατανομή ρεύματος και τάσης στη βασική κεραία Marconi

Σχήμα 3.20: Γειωμένες κεραιές [2].

Ένα ηλεκτρικό μονόπολο συμπεριφέρεται σαν ένα δίπολο Hertz διπλάσιου μήκους. Έτσι, οι κατανομές ρεύματος και τάσης μιας γειωμένης κεραίας  $\lambda/4$  είναι όμοιες με της κεραίας ημίσεως κύματος όπως φαίνεται στο Σχ. 3.20(β').



Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας Marconi έχει την ίδια μορφή με το άνω μισό τμήμα του διαγράμματος ακτινοβολίας του αντίστοιχου διπόλου. Στο Σχ. 3.21 φαίνονται ενδεικτικά κάποια διαγράμματα ακτινοβολίας για μονόπολα διαφορετικού ύψους. Παρατηρήστε ότι η οριζόντια κατευθυντικότητα βελτιώνεται με το ύψος μέχρι το μήκος των  $5\lambda/8$ , πέρα από το οποίο το διάγραμμα ακτινοβολίας ανυψώνεται από την επιφάνεια της γης. Για το λόγο αυτό αυτό, το μονόπολο  $5\lambda/8$  χρησιμοποιείται αρκετά συχνά στην πράξη σε εφαρμογές οριζόντιας κατευθυντικότητας.



Σχήμα 3.21: Κατανομές ρεύματος σε μονόπολα διαφορετικού ύψους και αντίστοιχα διαγράμματα ακτινοβολίας [2].

Συγκρίνοντας την κεραία Marconi με την κεραία Hertz σημειώνουμε ότι:

- Το πλεονέκτημα της κεραίας Marconi είναι ότι επιτυγχάνει το ίδιο διάγραμμα ακτινοβολίας με μια κεραία Hertz διπλάσιου μήκους. Αυτό διευκολύνει την υλοποίηση κεραιών κάθετης πόλωσης σε εφαρμογές χαμηλών συχνοτήτων (μεγάλου μήκους κύματος).
- Ωστόσο, το ηλεκτρικό μονόπολο είναι λιγότερο αποδοτικό από το δίπολο. Συγκεκριμένα, η αντίσταση ακτινοβολίας ενός μονοπόλου  $\lambda/4$  είναι η μισή της αντίστασης του διπόλου  $\lambda/2$ , δηλαδή  $R_{rad} = 73/2 = 36.5\Omega$ .

Το ηλεκτρικό μονόπολο υλοποιείται ως ένα απλό σύρμα το οποίο αποτελεί προέκταση του κεντρικού αγωγού μιας ομοαξονικής γραμμής μεταφοράς.

Ο εξωτερικός αγωγός - περίβλημα της γραμμής μεταφοράς είτε αφήνεται ασύνδετος, είτε συνδέεται με το έδαφος.

### 3.5.3 Συστήματα Γείωσης

Προκειμένου ένα ηλεκτρικό μονόπολο να ακτινοβολήσει ως δίπολο θα πρέπει να βρίσκεται σε μικρή ηλεκτρική απόσταση από το έδαφος, και το έδαφος να είναι καλός αγωγός. Για να εξασφαλίσουμε την καλή απόδοση ενός μονόπολου, συνήθως τοποθετείται μία μεταλλική πλάκα ή ένα μεταλλικό πλέγμα στη βάση του και η γείωση της κεραίας συνδέεται με αυτό. Ένα άλλο σύστημα τεχνητής γείωσης είναι η *διάταξη εξισορρόπησης (counterpoise)*. Μία διάταξη εξισορρόπησης αποτελείται από ένα σύστημα ηλεκτρικά μακριών συρμάτων που εκτείνονται ακτινικά γύρω από τη βάση της κεραίας. Αντί των μακριών ακτίνων, πολλές φορές τοποθετούνται ακτίνες μήκους  $\lambda/4$  που δείχνουν προς τα κάτω σε γωνία  $45^\circ$ . Στρέφοντας τις ακτίνες προς το έδαφος, η αντίσταση ακτινοβολίας αυξάνεται στα  $50 \Omega$ , κάνοντας την κεραία περισσότερο αποδοτική και επιτρέποντας τη σύνδεσή της με ένα τυπικό ομοαξονικό καλώδιο των  $50 \Omega$ .

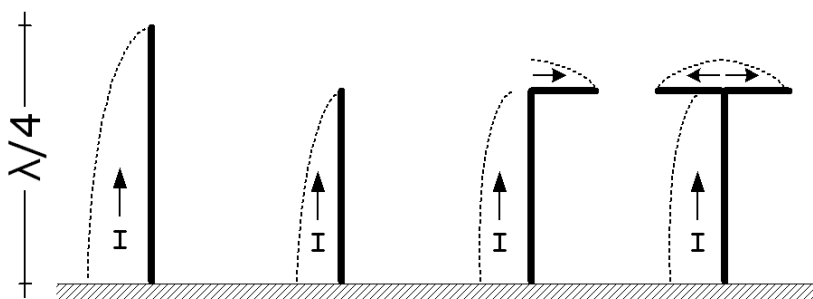


Σχήμα 3.22: Μεταλλικό πλέγμα ως σύστημα τεχνητής γείωσης [2].

### 3.5.4 Top Loading

Στις περιοχές των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων όπου τα μήκη κύματος είναι μεγάλα, συχνά δεν είναι πρακτική η χρήση μίας κεραίας φυσικού μήκους (τουλάχιστον  $\lambda/4$ ). Οι κατακόρυφες κεραίες που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις συχνότητες έχουν μικρό ηλεκτρικό μήκος και παρουσιάζουν χαμηλή αντίσταση εισόδου, η οποία απαρτίζεται από μία μικρή ωμική αντίσταση

και μία μεγάλη χωρητική αντίσταση. Η αντίσταση εισόδου στη βάση μίας κεραίας Marconi  $\lambda/8$  είναι μόλις  $(8 - j500) \Omega$ . Εμφανίζοντας μία τόσο μικρή τιμή αντίστασης ακτινοβολίας, η απόδοση της συγκεκριμένης κεραίας είναι πολύ περιορισμένη. Εξαιτίας της μεγάλης χωρητικής αντίστασης, η προσαρμογή της κεραίας στη γραμμή μεταφοράς επιτυγχάνεται δύσκολα, πρόβλημα που μπορεί μερικώς να επιλυθεί με την ενσωμάτωση μίας επαγωγικής αντίστασης συνδεδεμένης σε σειρά με την κεραία. Η εν λόγω παρέμβαση δεν οδηγεί σε αύξηση της ωμικής αντίστασης, απλά εξουδετερώνει τη χωρητική αντίσταση και αυξάνει εικονικά το ενεργό μήκος της κεραίας.



Σχήμα 3.23: Top Loading.

Μία πολύ καλή μέθοδος αύξησης της αντίστασης ακτινοβολίας είναι η τοποθέτηση ενός οριζόντιου τμήματος στην κορυφή της κεραίας. Το αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής (top loading), όπως φαίνεται στο Σχ. 3.23, είναι η αύξηση του ρεύματος στη βάση της κεραίας και η επίτευξη μεγαλύτερης ομοιομορφίας στην κατανομή του ρεύματος. Η τεχνική top loading υλοποιείται με τη χρήση ενός οριζόντιου τμήματος σχηματίζοντας τις inverted-L και T κεραίες του Σχ. 3.23. Μπορεί ακόμα να πάρει τη μορφή καπέλου (top hat), όπως φαίνεται στο Σχ. 3.24. Το καπέλο έχει επιπλέον ως αποτέλεσμα την προσθήκη χωρητικότητας σε σειρά με την κεραία, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της συνολικής χωρητικής αντίστασης εισόδου της κεραίας. Το διάγραμμα ακτινοβολίας μίας top loaded κεραίας είναι όμοιο με αυτό μίας κεραίας Marconi, καθώς η κατανομή ρεύματος είναι σχεδόν ίδια, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.23.

### 3.6 Μαγνητικό Δίπολο

Το μαγνητικό δίπολο (magnetic dipole) ή κεραία βρόγχου (loop antenna) είναι το αντίστοιχο του ηλεκτρικού διπόλου και είναι ένας βασικός τύπος κεραίας με πολλές εφαρμογές και παραλλαγές.



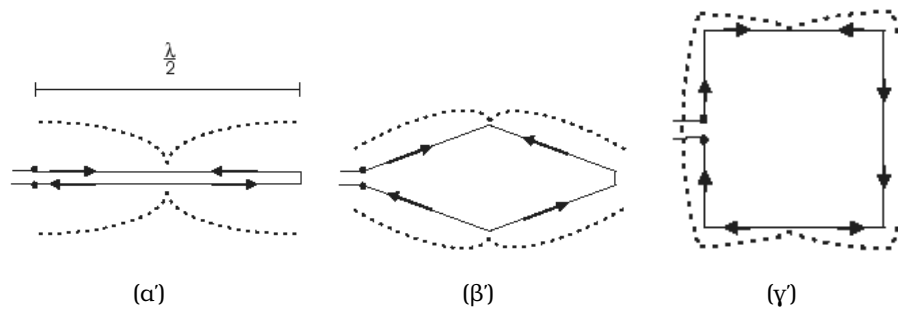
Σχήμα 3.24: Ιστός κεραίας με καπέλο.

### Κατασκευή Κεραίας Βρόγχου

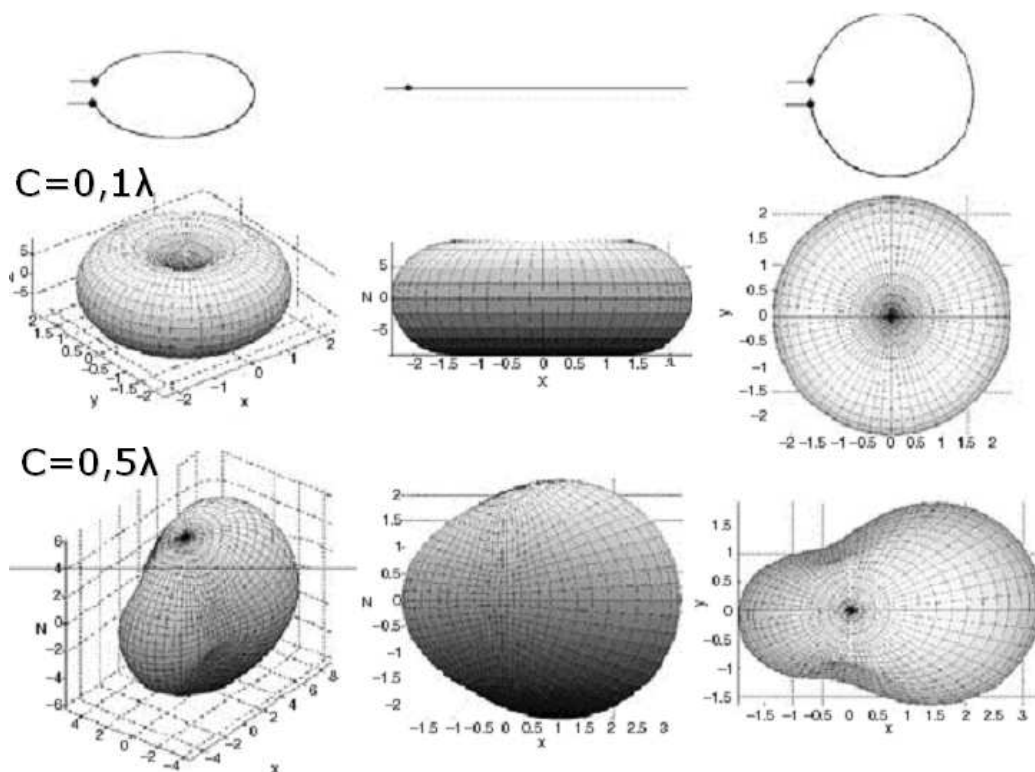
Όπως το ηλεκτρικό δίπολο δημιουργήθηκε κάμπτοντας τα άκρα μιας ανοιχτοκυκλωμένης παράλληλης γραμμής μεταφοράς, το μαγνητικό δίπολο παράγεται απομακρύνοντας τους παράλληλους αγωγούς μιας βραχυκυκλωμένης γραμμής μεταφοράς. Ειδικότερα, αν εφαρμόσουμε μια τάση AC σε μια βραχυκυκλωμένη γραμμή μεταφοράς μήκους  $\lambda/2$ , παράγεται στάσιμο κύμα. Λόγω της παραλληλίας των δύο αγωγών, τα μαγνητικά πεδία τους εξουδετερώνονται και η γραμμή δεν ακτινοβολεί (βλέπε Σχ. 3.25(α')).

Το επόμενο βήμα είναι να απομακρύνουμε το έναν αγωγό από τον άλλο και να δημιουργήσουμε τη μέγιστη επιφάνεια μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.25(β'). Η μέγιστη επιφάνεια προκύπτει όταν οι δύο αγωγοί σχηματίσουν κύκλο. Ωστόσο τετραγωνικοί βρόγχοι ή βρόγχοι άλλων σχημάτων λειτουργούν εξίσου καλά (Σχ. 3.25(γ')). Τα ρεύματα του βρόγχου δεν ακυρώνουν πλέον το ένα το άλλο, αλλά ακολουθούν κυκλική κίνηση.

Στην περίπτωση που η περιφέρεια του βρόγχου είναι μικρή σχετικά με το  $\lambda$  (π.χ.  $\lambda/10$ ), το ρεύμα έχει την ίδια πολικότητα κατά μήκος του βρόγχου κατά αντιστοιχία με το δίπολο Hertz. Τότε παράγεται μαγνητικό πεδίο που σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού, είναι κάθετο στο επίπεδο του βρόγχου. Όπως το ηλεκτρικό δίπολο εμφανίζει δύο ηλεκτρικούς πόλους, έτσι και ο βρόγχος εμφανίζει δύο μαγνητικούς πόλους. Από εκεί προκύπτει και το όνομα μαγνητικό δίπολο.



Σχήμα 3.25: Κατασκευάζοντας μια κεραία βρόγχου [7].



Σχήμα 3.26: Διάγραμμα ακτινοβολίας μαγνητικού διπόλου σε προοπτική, πλάγια όψη και κάτοψη [7].

### Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Κατά αναλογία με το ηλεκτρικό δίπολο, το διάγραμμα ακτινοβολίας του μαγνητικού διπόλου εξαρτάται από το ηλεκτρικό του μήκος. Για μικρά ηλεκτρικά μήκη, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας ακτινοβολείται ομοιόμορφα από το κέντρο του βρόγχου προς την περιφέρεια, ενώ η ακτινοβολία είναι μηδενική κατά μήκος του άξονα συμμετρίας. Έτσι, καταλήγουμε σε ένα διάγραμμα ακτινοβολίας αντίστοιχο του διπόλου Hertz, δηλαδή με τη γνωστή μορφή ντόνατ να περιβάλλει το βρόγχο (βλέπε το άνω διάγραμμα του Σχ. 3.26).

Καθώς αυξάνεται το μήκος του μαγνητικού διπόλου, εμφανίζονται στάσιμα κύματα ρεύματος στην περιφέρειά του. Το στάσιμο κύμα είναι αρκετά περίπλοκο και οδηγεί σε μη συμμετρικό διάγραμμα ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στο κάτω διάγραμμα του Σχ. 3.26. Το ενδιαφέρον σημείο εδώ είναι ότι προκαλείται ακτινοβολία και κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του βρόγχου.

### Αντίσταση

Το μαγνητικό δίπολο συμπεριφέρεται σαν μια βραχυκυκλωμένη γραμμική μεταφοράς. Όταν έχει μικρό ηλεκτρικό μήκος εμφανίζει επαγωγική αντίσταση εισόδου. Στο μήκος συντονισμού (περιφέρεια  $C = \lambda/2$ ), η κεραία παρουσιάζει καθαρά ωμική αντίσταση με μεγάλη τιμή (τυπικά 2-5 kΩ), ενώ πάνω από το συντονισμό η αντίσταση εισόδου γίνεται χωρητική. Στην πρώτη αρμονική της συχνότητας συντονισμού (για  $C = \lambda$ ), η αντίσταση εισόδου γίνεται πάλι καθαρά ωμική με μικρή όμως τιμή της τάξης των 100 Ω και περίπου ίση με την αντίσταση ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό, οι κεραίες βρόγχου σχεδιάζονται συνήθως με  $C = \lambda$  αντί του  $\lambda/2$ .

Αξίζει να σημειωθεί ότι, κατά αναλογία με το αναδιπλωμένο ηλεκτρικό δίπολο, μπορεί να κατασκευαστεί μια κεραία τυλίγοντας πολλές σπείρες μαζί. Η ισχύς ακτινοβολίας αυξάνεται κατά ένα παράγοντα  $N^2$ , όπου  $N$  το πλήθος των σπειρών. Για την περαιτέρω ενίσχυση της ακτινοβολίας, οι σπείρες τυλίγονται γύρω από πυρήνα σιδήρου που αυξάνει την ενεργό περιφέρεια του βρόγχου.

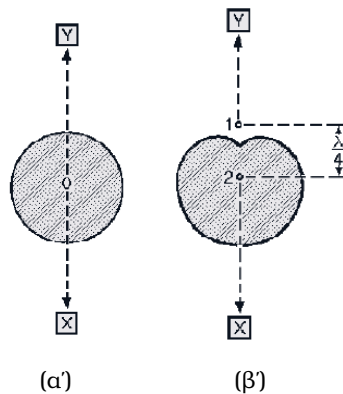
Η κεραία βρόγχου χρησιμοποιείται ευρύτατα (1) σε εφαρμογές εύρεσης κατεύθυνσης (direction finding, DF), και (2) σε εφαρμογές χαμηλών συχνοτήτων που το μήκος κύματος κάνει απαγορευτική την υλοποίηση ηλεκτρικών διπόλων (π.χ. ραδιοφωνία AM).

### 3.7 Συστοιχίες Κεραιών

Οι προηγούμενοι τύποι κεραιών χρησιμοποιούνται κυρίως σε χαμηλές συχνότητες. Αντίθετα, σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων (HF) χρησιμοποιούνται συστοιχίες κεραιών. Αυτό οφείλεται στο ότι: (α) οι συγκεκριμένες εφαρμογές χρησιμοποιούν μετάδοση σημείο-προς-σημείο οπότε απαιτούν υψηλή κατευθυντικότητα, και (β) το μικρό μήκος κύματος επιτρέπει πιο σύνθετες κατασκευές με υλοποιήσιμο τελικό μέγεθος συστοιχίας.

#### 3.7.1 Γενικά

Μία συστοιχία κεραιών είναι μία ειδική διεύθυνση στο χώρο που κατασκευάζεται από περισσότερα του ενός στοιχεία χρησιμοποιώντας συνήθως ως βασικό στοιχείο το δίπολο  $\lambda/2$ . Ένα *ενεργό στοιχείο* (*driven element*) είναι όμοιο με το δίπολο που έχουμε ήδη μελετήσει και συνδέεται άμεσα με τη γραμμή μεταφοράς. Λαμβάνει την ισχύ του κατευθείαν από τον πομπό ή, ως κεραία λήψης, παρέχει τη λαμβανόμενη ενέργεια άμεσα στο δέκτη. Από την άλλη, ένα *παρασιτικό στοιχείο* (*parasitic element*) βρίσκεται κοντά σε ένα ενεργό στοιχείο και λαμβάνει ισχύ από αυτό μέσω σύζευξης. Η κεραία που προκύπτει μπορεί να εκπέμπει προς διάφορες κατευθύνσεις.



Σχήμα 3.27: Φάση κεραιάς στον ελεύθερο χώρο.

Στη συνέχεια, εξηγούμε συνοπτικά τη γενική αρχή λειτουργίας μιας συστοιχίας κεραιών. Κάθε ενεργό στοιχείο (π.χ. απλό ή αναδιπλωμένο δίπολο) ακτινοβολεί με το συμβατικό τρόπο παράγοντας ένα ξεχωριστό ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Τα κύματα από τα επιμέρους στοιχεία αθροίζονται διανυσματικά σε κάθε σημείο του περιβάλλοντα χώρου δημιουργώντας κροσσούς συμβολής.

Έτσι, σε κάποια σημεία τα κύματα δύο στοιχείων μπορεί να αθροίζονται συμμασικά ενισχύοντας το σήμα και σε άλλα σημεία να αλληλοακυρώνονται. Τα σημεία ή γενικότερα οι κατευθύνσεις ενισχυμένης ακτινοβολίας καθορίζονται από τη διεύθυνση των στοιχείων και κυρίως από τη διαφορά φάσης μεταξύ τους. Αυτή η διαφορά φάσης μπορεί να δημιουργείται είτε φυσικά λόγω της απόστασης των δύο στοιχείων, είτε ηλεκτρονικά τροφοδοτώντας κάθε στοιχείο με διαφορετική καθυστέρηση.

Ας μελετήσουμε λοιπόν ένα απλό παράδειγμα συστοιχίας. Έστω οι κεραίες του Σχ. 3.27. Στο Σχ. 3.27(α) φαίνεται η κάτοψη του διαγράμματος ακτινοβολίας ενός διπόλου όταν δεν υπάρχει κανενός είδους παρεμβολή. Όπως παρατηρούμε, είναι ομοιόμορφο προς όλες τις κατευθύνσεις στο οριζόντιο επίπεδο. Στο Σχ. 3.27(β'), υπάρχουν δύο δίπολα τοποθετημένα στα σημεία 1 και 2 με τη μεταξύ τους απόσταση να ισούται με  $\lambda/4$ . Υποθέτουμε ότι και τα δύο δίπολα τροφοδοτούνται με ρεύμα από τον ίδιο πομπό κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ρεύμα που τροφοδοτεί την κεραία 2 να υστερεί του ρεύματος της κεραίας 1 κατά  $90^\circ$ . Η ακτινοβολούμενη από την κεραία 1 ενέργεια προς το σημείο λήψης X φτάνει στην κεραία 2 μετά από  $1/4$  του κύκλου λειτουργίας με αποτέλεσμα να υπάρχει ενίσχυση. Ομοίως, η ακτινοβολούμενη από την κεραία 2 ενέργεια προς το σημείο λήψης Y φτάνει στην κεραία 1 μετά από  $1/4$  του κύκλου λειτουργίας. Όμως, η ενέργεια της κεραίας 1 υστερεί κατά  $1/4$  του κύκλου της κεραίας 2, γεγονός που συνεπάγεται ότι η ακτινοβολία από την κεραία 1 προς το σημείο λήψης Y θα έχει διαφορά φάσης  $180^\circ$  από την ακτινοβολία της κεραίας 2. Ως αποτέλεσμα, τα πεδία ακτινοβολίας θα ακυρωθούν και επομένως, δε θα υπάρχει ακτινοβολία προς το σημείο λήψης Y. Στα σημεία λήψης που βρίσκονται μακριά από τη γραμμή ακτινοβολίας συμβαίνουν διαφορές φάσης από  $0^\circ$  έως  $180^\circ$  παράγοντας μεταβαλλόμενα ποσά ενέργειας προς αυτήν την κατεύθυνση. Το συνολικό αποτέλεσμα εμφανίζεται στο διάγραμμα ακτινοβολίας του Σχ. 3.27(β').

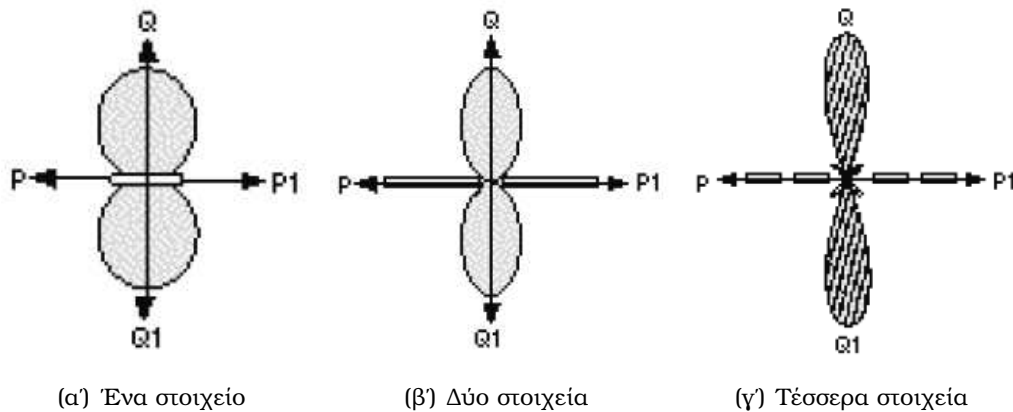
Γενικά, ρυθμίζοντας τα στοιχεία μιας συστοιχίας μπορούμε να τροποποιήσουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας και να δημιουργήσουμε διατάξεις με υψηλή κατευθυντικότητα. Στη συνέχεια, αναφερόμαστε σε κάποιες χαρακτηριστικές διατάξεις.

### 3.7.2 Ομοαξονική Συστοιχία

Μία *ομοαξονική συστοιχία (collinear array)* προκύπτει από την τοποθέτηση δύο ή περισσότερων διπόλων με τέτοιο τρόπο ώστε οι άξονές τους να



βρίσκονται στην ίδια ευθεία. Το διάγραμμα ακτινοβολίας μίας ομοαξονικής συστοιχίας μοιάζει με αυτό ενός απλού διπόλου. Η προσθήκη επιπλέον στοιχείων οδηγεί στην ενίσχυση του διαγράμματος ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.28, ενώ ταυτόχρονα εμφανίζονται δευτερεύοντες λοβοί.



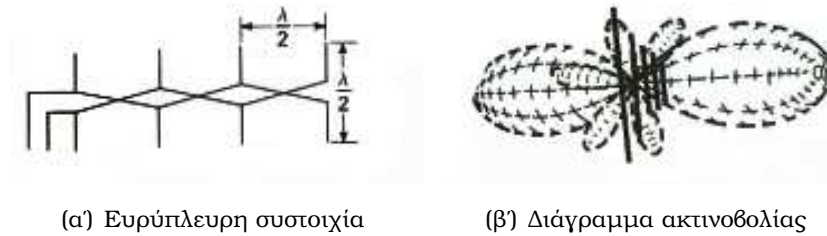
Σχήμα 3.28: Σύγκριση διπόλου και ομοαξονικής συστοιχίας δύο και τεσσάρων στοιχείων.

Στην πράξη σπάνια χρησιμοποιούνται περισσότερα από τέσσερα στοιχεία κυρίως για λόγους οικονομίας χώρου. Ως προς το κέρδος κατευθυντικότητας, ο διπλασιασμός των στοιχείων αυξάνει την κατευθυντικότητα κατά 3 dB. Το μήκος των στοιχείων θα πρέπει να είναι  $\lambda/2$ , ενώ σημειώνεται ότι η ομοαξονική συστοιχία παρουσιάζει σχετικό μικρό εύρος ζώνης.

### 3.7.3 Ευρύπλευρη Συστοιχία

Η *ευρύπλευρη συστοιχία (broadside array)* αποτελεί ίσως το απλούστερο είδος συστοιχίας. Απαρτίζεται από δίπολα ίσου μεγέθους, τοποθετημένα σε ίσα διαστήματα πάνω σε μία ευθεία γραμμή. Όλα τα δίπολα τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή και με την ίδια φάση. Μία τέτοια διάταξη απεικονίζεται στο Σχ. 3.29 μαζί με το διάγραμμα ακτινοβολίας της.

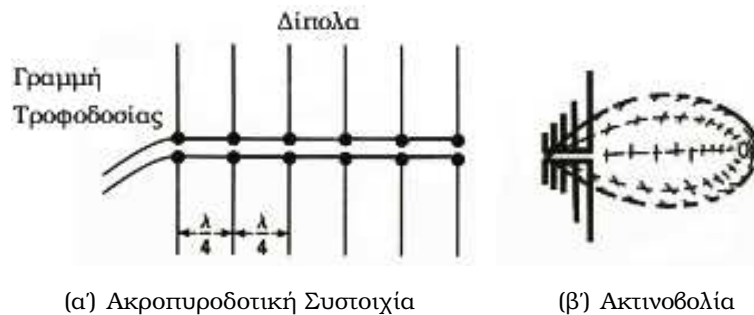
Όπως προκύπτει από το διάγραμμα ακτινοβολίας, η ευρύπλευρη συστοιχία είναι ισχυρά κατευθυντική σε ορθές γωνίες ως προς το επίπεδό της. Αντίθετα, στην κατεύθυνση του άξονά της έχει μηδενική ακτινοβολία λόγω των αλληλοακυρώσεων. Γενικά, οι ευρύπλευρες συστοιχίες παρουσιάζουν μεγάλο κατευθυντικό κέρδος και περιορισμένο εύρος ζώνης. Μπορεί να περιλαμβάνουν μια δεκάδα στοιχείων που απέχουν  $\lambda/2$  ή  $\lambda$  μεταξύ τους.



Σχήμα 3.29: Ευρύπλευρη συστοιχία και διάγραμμα ακτινοβολίας [2].

### 3.7.4 Ακροπυροδοτική Συστοιχία

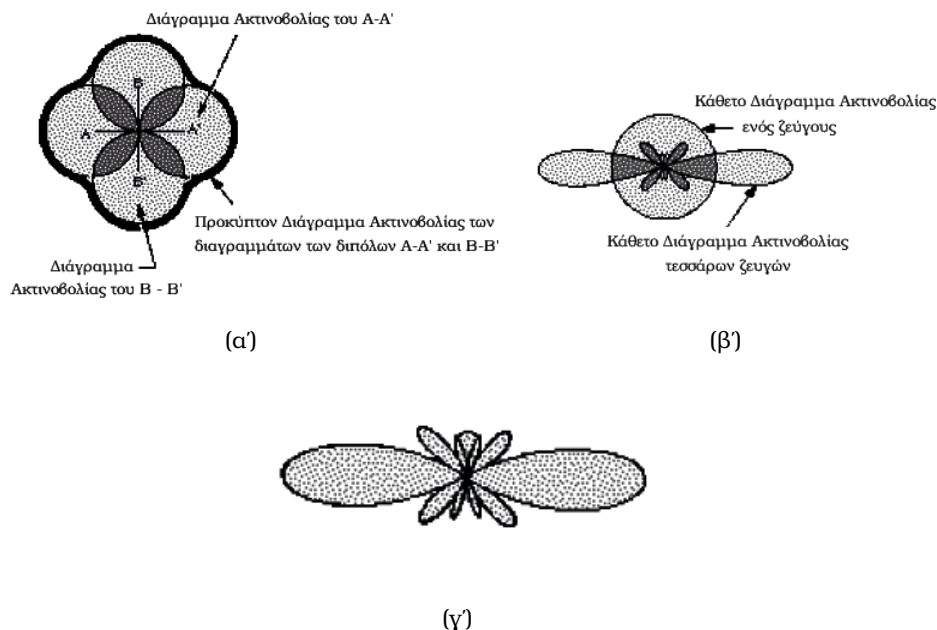
Η φυσική στοίχιση της *ακροπυροδοτικής συστοιχίας (end-fire array)* είναι σχεδόν ίδια με αυτή της ευρύπλευρης. Ωστόσο, αν και τα πλάτη των ρευμάτων που διαρρέουν τα στοιχεία είναι ίδια, υπάρχει μία διαφορά φάσης συνήθως  $90^\circ$ , όπως φαίνεται στο Σχ. 3.30. Επιπλέον, τα στοιχεία της ακροπυροδοτικής συστοιχίας τοποθετούνται εγγύτερα το ένα στο άλλο, γεγονός που οδηγεί σε πιο συμπαγείς κατασκευές. Για το λόγο αυτό, η ακροπυροδοτική συστοιχία προτιμάται έναντι άλλων σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλό κατευθυντικό κέρδος σε συνδυασμό με περιορισμένο χώρο.



Σχήμα 3.30: Ακροπυροδοτική Συστοιχία και Διάγραμμα Ακτινοβολίας [2].

Το διάγραμμα ακτινοβολίας της ακροπυροδοτικής συστοιχίας, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.30(β) είναι αρκετά διαφορετικό από αυτό της ευρύπλευρης. Η μέγιστη ακτινοβολία επιτυγχάνεται στο επίπεδο της συστοιχίας και όχι κάθετα σε αυτό με αποτέλεσμα η τελική κεραία να είναι μονοκατευθυντική. Η προσθήκη επιπλέον στοιχείων αυξάνει την κατευθυντικότητα και το πλήθος των δευτερευόντων λοβών.

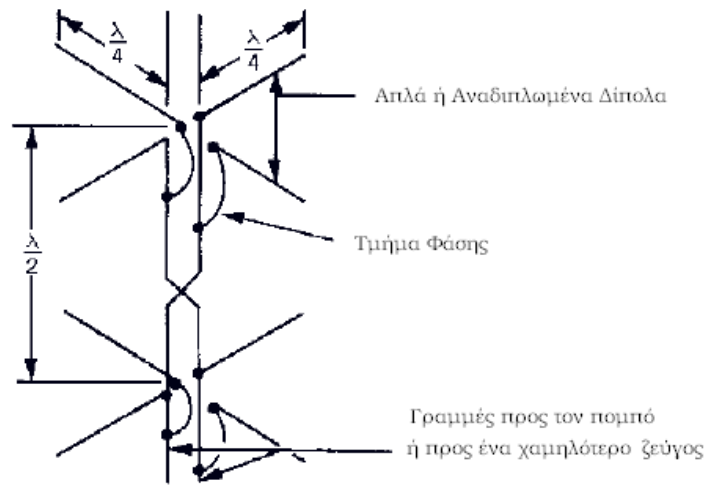
### 3.7.5 Κεραία Turnstile



Σχήμα 3.31: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας Turnstile.

Η κεραία αυτή είναι μία από τους πολλούς τύπους κεραιών που αναπτύχθηκαν για πανκατευθυντικές επικοινωνίες VHF στον οριζόντιο άξονα, όπως για παράδειγμα στη μετάδοση τηλεοπτικών σημάτων [2]. Μια βασική κεραία Turnstile αποτελείται από δύο οριζόντιες κεραιές ημίσεως κύματος, που ενώνονται σε ορθές γωνίες στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο. Όταν οι δύο αυτές κεραιές διεγείρονται με ίσα ρεύματα με διαφορά φάσης  $90^\circ$ , τα τυπικά διαγράμματα ακτινοβολίας των δύο κεραιών συγχωνεύονται ώστε να δημιουργηθεί το σχεδόν κυκλικό διάγραμμα του Σχ. 3.31(α).

Ζεύγη τέτοιων κεραιών συχνά τοποθετούνται σε σωρούς, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.32. Στο Σχ. 3.32 έχουν χρησιμοποιηθεί δύο ζεύγη σε απόσταση  $\lambda/2$  και τα αντίστοιχα στοιχεία διεγείρονται συμφασικά. Οι συνθήκες αυτές οδηγούν στην ακύρωση ενός μέρους της κατακόρυφης ακτινοβολίας από την ακτινοβολία του άλλου ζεύγους. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ακτινοβολούμενης ενέργειας σε υψηλά κατακόρυφες γωνίες και την αύξηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας στον οριζόντιο άξονα. Τοποθετώντας σε σωρό έναν αριθμό ζευγών μπορούμε να αλλάξουμε το κατακόρυφο διάγραμμα ακτινοβολίας, προκαλώντας ένα ουσιαστικό κέρδος προς μια οριζόντια κα-



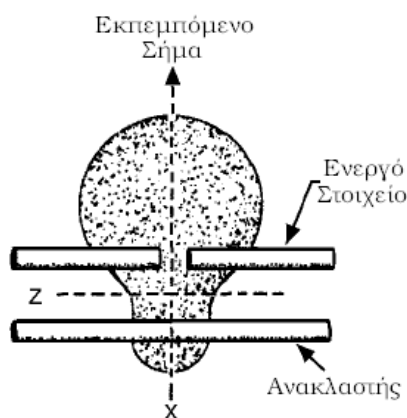
Σχήμα 3.32: Συστοιχία κεραίων Turnstile.

τεύθυνση χωρίς να αλλοιώνεται η συνολική οριζόντια κατευθυντικότητα. Στο Σχ. 3.31(β') συγκρίνουμε το κυκλικό κατακόρυφο διάγραμμα μιας κεραίας Turnstile ενός μόνο ζεύγους με το αιχμηρό διάγραμμα μιας κεραίας Turnstile τεσσάρων ζευγών (Σχ. 3.31(γ')).

### 3.7.6 Παρασιτικές Συστοιχίες και η Κεραία Yagi-Uda

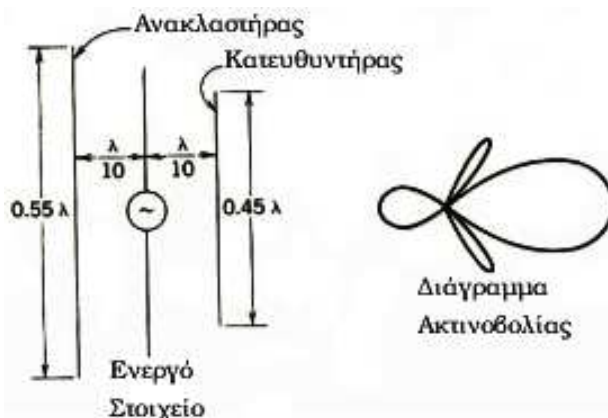
Για να πετύχουμε υψηλά κέρδη μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε παρασιτικές συστοιχίες, δηλαδή διατάξεις που περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερα παρασιτικά στοιχεία τοποθετημένα παράλληλα το ένα με το άλλο. Τα μειονεκτήματα των παρασιτικών συστοιχιών είναι η κρισιμότητα της προσαρμογής τους και το περιορισμένο εύρος ζώνης.

Στην περίπτωση που ένα παρασιτικό στοιχείο είναι τοποθετημένο με τέτοιο τρόπο ώστε να ακτινοβολεί μακριά από το ενεργό στοιχείο, καλείται *κατευθυντήρας* (*director*). Αντίθετα, αν είναι τοποθετημένο με τέτοιο τρόπο ώστε να ακτινοβολεί προς την κατεύθυνση που βρίσκεται το ενεργό στοιχείο, ονομάζεται *ανακλαστήρας* (*reflector*). Στο Σχ. 3.33, για παράδειγμα, η συστοιχία αποτελείται από ένα ενεργό και ένα παρασιτικό στοιχείο, το οποίο είναι ανακλαστήρας αφού ακτινοβολεί προς την κατεύθυνση του ενεργού στοιχείου. Συνδυάζοντας έναν ανακλαστήρα και έναν κατευθυντήρα με ένα ενεργό στοιχείο επιτυγχάνουμε μείωση της προς τα πίσω ακτινοβολούμενης ισχύος ακτινοβολίας και ταυτόχρονη αύξηση της κατευθυντικότητας.



Σχήμα 3.33: Διάγραμμα ακτινοβολίας.

Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας παρασιτικής συστοιχίας προκύπτει από τη λειτουργία των παρασιτικών στοιχείων. Ειδικότερα, η μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας εξαρτάται: (1) από το συντονισμό που καθορίζεται από το μήκος των παρασιτικών στοιχείων, (2) από την απόσταση ανάμεσα στα παρασιτικά και τα ενεργά στοιχεία, και (3) σε μικρότερο βαθμό από τη διάμετρο των παρασιτικών στοιχείων. Σημειώνουμε ότι η απόσταση και το μήκος των παρασιτικών στοιχείων καθορίζεται συνήθως πειραματικά ώστε να προκύπτει κάθε φορά το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ως ενεργό στοιχείο χρησιμοποιείται ένα αναδιπλωμένο δίπολο προκειμένου να αυξηθεί η αντίσταση ακτινοβολίας και το εύρος ζώνης λειτουργίας.



Σχήμα 3.34: Κεραία Yagi-Uda και Διάγραμμα Ακτινοβολίας [2].

Ένα παράδειγμα παρασιτικής συστοιχίας είναι η *κεραία Yagi-Uda* που αποτελείται από ένα ενεργό στοιχείο και ένα ή περισσότερα παρασιτικά, τοπο-

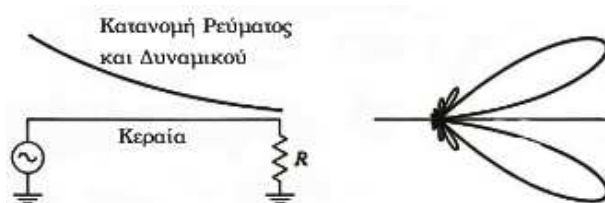
θετημένα παράλληλα και κοντά το ένα στο άλλο, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.34. Στο ίδιο σχήμα δίνεται και το διάγραμμα ακτινοβολίας της. Καθώς είναι σχετικά μονοκατευθυντική και έχει ένα μέτριο κέρδος γύρω στα 7 dB, η συγκεκριμένη κεραία χρησιμοποιείται για τη μετάδοση υψηλών συχνοτήτων ή ως κεραία λήψης για τηλεοπτικά σήματα VHF. Σημαντικό πλεονέκτημά της αποτελεί το γεγονός ότι είναι αρκετά συμπαγής [2].

## 3.8 Μη Συντονισμένες Κεραίες

Όλοι οι βασικοί τύποι κεραιών που παρουσιάστηκαν παραπάνω έθεταν σχετικά αυστηρούς περιορισμούς ανάμεσα στο μέγεθος της κεραίας και το μήκος κύματος της συχνότητας λειτουργίας. Κατά συνέπεια, η λειτουργία τους περιορίζεται σε μικρό εύρος ζώνης. Αντίθετα, στην ενότητα αυτή θα σταθούμε σε τύπους μη συντονισμένων κεραιών με κοινό χαρακτηριστικό το μεγάλο εύρος ζώνης.

### 3.8.1 Σύρμα Μεγάλου Μήκους

Η πιο απλή μη συντονισμένη κεραία (non-resonant) είναι ένα σύρμα με μήκος ίσο ή μεγαλύτερο του  $\lambda$  που τερματίζεται σε ωμική αντίσταση ίση με τη χαρακτηριστική του. Όπως στην περίπτωση των γραμμών μεταφοράς, ο κατάλληλος τερματισμός του σύρματος αποτρέπει την εμφάνιση στάσιμων κυμάτων. Γενικά, το κέρδος που επιτυγχάνουμε με μία τέτοια κεραία δεν είναι τόσο μεγάλο όπως άλλων κεραιών. Ωστόσο, το *σύρμα μεγάλου μήκους* (*long wire antenna, beverage antenna*) έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Η κατασκευή του είναι εύκολη, τόσο ηλεκτρικά όσο και μηχανικά, χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερα κρίσιμες διαστάσεις ή προσαρμογές. Λειτουργεί ικανοποιητικά και δίνει καλό κέρδος και κατευθυντικότητα για μια ζώνη συχνοτήτων έως και διπλάσια από την τιμή για την οποία έχει κατασκευαστεί. Ως προς το διάγραμμα ακτινοβολίας που φαίνεται στο Σχ. 3.35, παρατηρούμε ότι (1) είναι αιχμηρό τόσο στο οριζόντιο, όσο και στο κάθετο επίπεδο, (2) είναι μονοκατευθυντικό λόγω του τερματισμού σε αντίθεση με αυτό του διπόλου, (3) ο κύριος λοβός τείνει να εντοπίζεται στις μικρές γωνίες λόγω του μεγάλου μήκους.



Σχήμα 3.35: Διάταξη, κατανομή ρεύματος και διάγραμμα ακτινοβολίας μη συντονισμένης κεραίας [2].

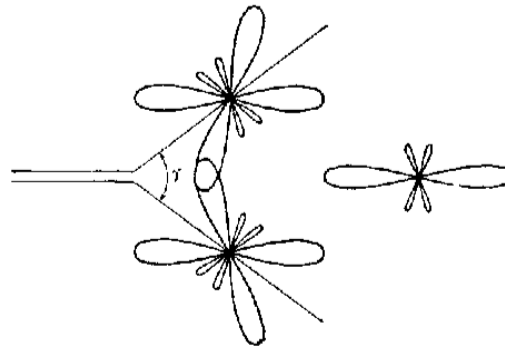
### 3.8.2 Κεραία V

Μια κεραία V είναι μια δικατευθυντική κεραία που χρησιμοποιείται κυρίως σε στρατιωτικές και εμπορικές επικοινωνίες. Αποτελείται από δύο αγωγούς τοποθετημένους έτσι ώστε να σχηματίζουν ένα V και καθένας να τροφοδοτείται με ρεύμα αντίθετης πολικότητας.

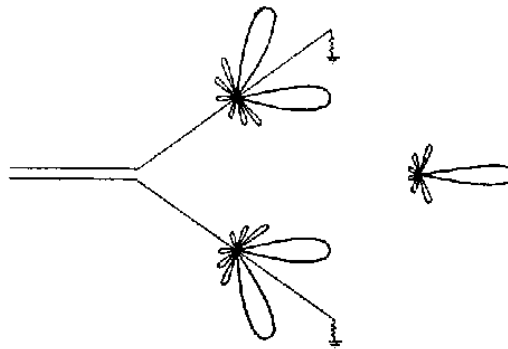
Συνδέοντας το καλώδιο τροφοδοσίας δύο συρμάτων στην κορυφή του V και διεγείροντας τα δύο σκέλη με διαφορά φάσης  $180^\circ$  έχει ως αποτέλεσμα οι λοβοί να ενισχύονται κατά μήκος της διχοτόμου και να ακυρώνονται σε άλλες κατευθύνσεις, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.36(α). Όταν επιλεγεί η σωστή γωνία των δύο αγωγών, οι οριζόντιοι λοβοί έχουν την ίδια διεύθυνση με αποτέλεσμα να συνδυάζονται ανά δύο και να δημιουργούν δύο ισχυρότερους οριζόντιους λοβούς. Αντίθετα, οι κατακόρυφοι λοβοί ακυρώνουν ο ένας τον άλλο ανά ζεύγη. Παρατηρήστε ότι αν τα δύο τμήματα της κεραίας V τερματιστούν στη χαρακτηριστική τους αντίσταση, δεν παράγονται στάσιμα κύματα και το διάγραμμα είναι μονοκατευθυντικό (βλέπε Σχ. 3.36(β)). Το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει και όταν χρησιμοποιηθούν κυλινδρικοί αγωγοί μεγάλου πάχους, οπότε το ανακλώμενο κύμα απορροφάται και σχεδόν εξαφανίζεται (βλέπε Σχ. 3.36(γ)) [12].

### 3.8.3 Ρομβοειδής Κεραία

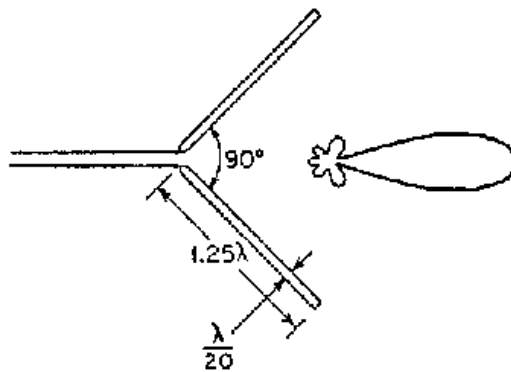
Η ρομβοειδής κεραία (Σχ. 3.37) αποτελείται από τέσσερις αγωγούς συνδεδεμένους σε σχήμα διαμαντιού. Η κεραία τερματίζεται με μια μη επαγωγική αντίσταση ώστε να παράγει ένα μονοκατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας. Μια ρομβοειδής κεραία μπορεί να δημιουργηθεί από δύο αμβλυγώνιες κεραίες V τοποθετημένες η μία δίπλα στην άλλη, ανυψωμένες στο οριζόντιο επίπεδο και τερματισμένες έτσι ώστε η κεραία να είναι μη συντονισμένη και



(α) Κεραία V.



(β) Τερματισμένη κεραία V.



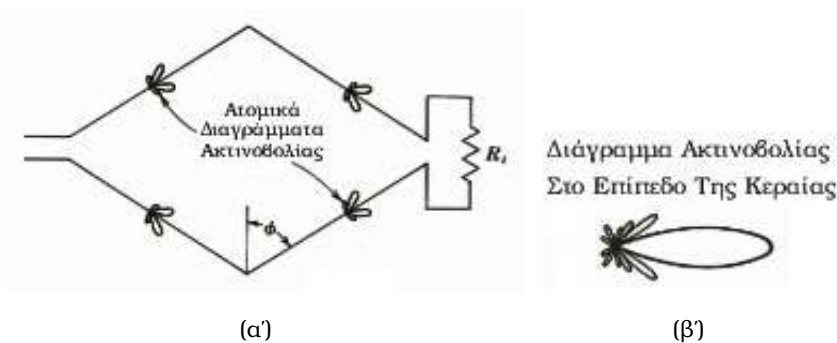
(γ) Κεραία V με κυλινδρικούς αγωγούς.

Σχήμα 3.36: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας V [12].



μονοκατευθυντική.

Η ρομβοειδής κεραία χρησιμοποιείται ευρέως για μετάδοση και λήψη μεγάλων αποστάσεων και υψηλών συχνοτήτων. Είναι μια από τις πιο δημοφιλείς κεραίες *σταθερής βάσης*, καθώς είναι πολύ χρήσιμη σε επικοινωνίες σημείου-προς-σημείο. Βασικό της πλεονέκτημα είναι το μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων.



Σχήμα 3.37: Ρομβοειδής Κεραία και Διαγράμματα Ακτινοβολίας [2].

Το κυριότερο μειονέκτημα της ρομβοειδούς κεραίας είναι ότι απαιτεί μια μεγάλη περιοχή για την ανέγερσή της. Ένα άλλο μειονέκτημα της ρομβοειδούς κεραίας είναι ότι τα οριζόντια και κάθετα διαγράμματα εξαρτώνται το ένα από το άλλο. Αν μια ρομβοειδής κεραία έχει κατασκευαστεί έτσι ώστε να έχει στενή οριζόντια δέσμη, η δέσμη είναι επίσης στενή και στην κάθετη διεύθυνση. Επομένως, η απόκτηση ακτινοβολίας μεγάλης κάθετης γωνίας είναι ανέφικτη εκτός κι αν υπάρχει ένα πολύ πλατύ οριζόντιο διάγραμμα και μικρό κέρδος. Όπως στην περίπτωση της κεραίας μεγάλου μήκους, η αντίσταση τερματισμού χρησιμοποιείται για να δώσει ένα μονοκατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας, ενώ από την άλλη σπαταλά ένα σημαντικό ποσοστό της ισχύος. Το μεγάλο κέρδος της κεραίας αντισταθμίζει την απώλεια αυτή. Τέλος, η χρήση της αντίστασης τερματισμού βοηθά στο διαχωρισμό των σημάτων που φτάνουν στην κεραία από πίσω, γεγονός που θεωρείται πολύ σημαντικό για τη λήψη.

# Βιβλιογραφία

- [1] J. G. Proakis and M. Salehi. *Communication Systems Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, 2002.
- [2] George Kennedy and Bernard Davis. *Electronic Communication Systems*. McGraw-Hill, 1992.
- [3] Κ. Μπερμπερίδης, Α. Μαράβα, Β. Κεκάτος, Ε. Βαρβαρίγος. *Πανεπιστημιακές Παραδόσεις: Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών*. Πανεπιστήμιο Πατρών, 2005.
- [4] Th. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practices*. Prentice Hall PTR, 1996.
- [5] J. Cavers. *Mobile Channel Characteristics*. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [6] Ι. Κανελλόπουλος. *Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Γήινο Περιβάλλον*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- [7] Ron Schmitt. *Electromagnetics Explained*. Elsevier Science, 2002.
- [8] Χ. Καψάλης, Π. Κωττής. *Κεραίες Ασύρματες Ζευξεις*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- [9] Gary M. Miller and Jeffrey S. Beasley. *Modern Electronic Communications*. Prentice Hall, 2002.
- [10] Ν. Ουζούνουγλου. *Εισαγωγή στα Μικροκύματα*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1994.

- [11] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory*. John Wiley & Sons, 1982.
- [12] John D. Kraus and Ronald J. Marhefka. *Antennas*. McGraw Hill, 2001.