

Τμήμα  
Μηχανικών  
Πληροφορικής τ.ε.

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα  
Δυτικής Ελλάδας

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματικός προσδιορισμός χαρακτηριστικών πομπού –  
δέκτη, καθώς και πειραματική μελέτη των χαρακτηριστικών  
σε ασύρματη ζεύξη.**

ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ – ΑΜ: 1642

ΜΑΚΡΗ ΓΕΩΡΓΙΑ – ΑΜ: 1733

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΑΣΑΡΙΔΗΣ ΗΛΙΑΣ

ΑΝΤΙΠΡΟ 2016



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αποτέλεσμα της απόκτησης σημαντικών γνώσεων που λάβαμε ως προπτυχιακές φοιτήτριες στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής του ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον υπεύθυνο καθηγητή αυτής της εργασίας, τον κύριο Ασαρίδη Ηλία, για την σημαντική καθοδήγηση που μας προσέφερε σε όλα τα στάδιά της. Ακόμη, έχουμε την ανάγκη να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας προς το οικογενειακό και φιλικό μας περιβάλλον για την υλική και ηθική υποστήριξή του. Ολοκληρώνοντας, ελπίζουμε ο,τι τα πορίσματα της μελέτης μας θα εκτιμηθούν θετικά ως προς τη συμβολή τους στον κλάδο των συναφών ερευνών.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας, είναι να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά του πομπού και του δέκτη σε μία ασύρματη ζεύξη και να τα αποτυπώσουμε πειραματικά.

Στο πρώτο κεφάλαιο θα αναφέρουμε τις βασικές έννοιες που πρέπει να γνωρίζει κάποιος ώστε να κατανοήσει την χρησιμότητα των ασύρματων συνδέσεων στη σημερινή επικοινωνία καθώς και τις παραμέτρους από τις οποίες αποτελείται.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα περιγράψουμε αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της ασύρματης επικοινωνίας. Στη συνέχεια, θα προσδιορίσουμε και θα αναλύσουμε τα ασύρματα μέσα μετάδοσης. Επίσης, αναφερόμαστε στην κυψελοειδή τηλεφωνία, στα είδη επικοινωνίας και τέλος, εξηγούμε γιατί πρέπει να χρησιμοποιείται η ασύρματη δικτύωση και αναφέρουμε τις περιπτώσεις τις οποίες δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφερόμαστε γενικά στις κεραίες, την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και γίνετε μια αναφορά για τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς και οι μονάδες μέτρησης τους. Ακόμη, αναλύονται τα μεγέθη και τα χαρακτηριστικά των κεραιών και οι απώλειες τους. Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον γήινο και στον ελεύθερο χώρο.

## ABSTRACT

The aim of this thesis is to study the characteristics of the transmitter and receiver in a wireless link and the capture experimentally of the above.

The first chapter will mention the basic concepts to know someone to understand the usefulness of wireless connections in today's communication as well as the parameters of which it consists.

The second chapter will describe in detail the characteristics of wireless communication. Then, we will identify and analyze wireless transmission media. Also, refer to cellular telephony, media and end items, we explain why you should use the wireless networking and mention the cases need not be used.

The third chapter generally refer to antennas, electromagnetic radiation and become a reference for the key figures are used to describe an electromagnetic wave and their measurement units. Furthermore, analyzing the sizes and characteristics of antennas and their losses. Finally, described in detail the way the spread of electromagnetic radiation on earthy space and in space.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
ABSTRACT .....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ- Ορισμοί .....	10
1.1 Ασύρματη επικοινωνία .....	10
1.2 Ασύρματο δίκτυο .....	10
1.3 Πομπός.....	11
1.4 Δέκτης .....	11
1.5 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα.....	11
1.6 Περίθλαση.....	12
1.7 Συμβολή.....	12
1.8 Κεραία.....	12
1.8.1 Ισοτροπική κεραία .....	12
1.8.2 Πραγματική κεραία.....	12
1.8.3 Απώλειες μέσου διάδοσης .....	12
1.9 Τροποσφαιρικά φαινόμενα .....	13
1.10 Απώλειες διαδρομής (Pathloss) .....	13
1.11 Decibels.....	14
1.12 Απώλειες διάδοσης στον ελεύθερο χώρο .....	14
1.13 Θόρυβος.....	14
1.13.1 Επίδραση του θορύβου: .....	14
1.14 LAN & WLAN .....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ - Ασύρματη Επικοινωνία .....	15
2.1 Ασύρματα Μέσα Μετάδοσης .....	15
2.1.1 Επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις .....	17
2.1.2 Δορυφορικές μικροκυματικές ζεύξεις .....	19
2.1.3 Κυψελοειδής Τηλεφωνία .....	21
2.1.4 FM Ραδιόφωνο.....	23
2.1.5 Σταθερή τηλεφωνία με ασύρματες ζεύξεις.....	25
2.1.7 Επιλογή μέσου μετάδοσης .....	32
2.2 Είδη επικοινωνίας .....	33
2.2.1 Το πρότυπο IEEE 802.11 .....	34

2.2.2 Χαρακτηριστικά ασύρματης τηλεπικοινωνίας .....	35
2.2.3 Φάσμα συχνοτήτων.....	40
2.3 Που και γιατί πρέπει να χρησιμοποιούμε ασύρματη δικτύωση; .....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> : ΚΕΡΑΙΕΣ .....	46
3.1 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ .....	46
3.1.1 Εξισώσεις Maxwell.....	46
3.1.2 Ηλεκτρομαγνητική ισχύς .....	49
3.1.3 Ανάκλαση και διάθλαση επιπέδου κύματος επί τέλειου διηλεκτρικού .....	50
3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	54
3.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΣΤΟΝ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΧΩΡΟ .....	58
3.3.1 Εξίσωση του Friis. Απώλεια μετάδοσης.....	58
3.3.2 Εξίσωση RADAR .....	61
3.3.3 Θερμοκρασία κεραίας.....	63
3.4 ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΤΟΝ ΓΗΙΝΟ ΧΩΡΟ .....	64
3.4.1 Εισαγωγή .....	64
3.4.2 Κύμα εδάφους.....	67
3.4.3 Κύμα χώρου .....	68
3.4.4 Κύμα επιφάνειας .....	71
3.4.5 Σφαιρική γη - Συντελεστής απόκλισης.....	73
3.4.6 Συνθήκη οπτικής επαφής .....	74
3.4.7 Επίδραση εμποδίων στη διάδοση - Ζεύξη δια περίθλασης.....	76
3.4.8 Αποφυγή εμποδίων – Χρήση συστημάτων back-to-back και παθητικού κατόπτρου .....	79
3.4.9 Τροποσφαιρική διάδοση .....	80
3.4.10 Δείκτης διάθλασης της τροπόσφαιρας.....	81
3.4.11 Τροποσφαιρική διάθλαση .....	82
3.4.12 Ραδιοηλεκτρικός Ορίζοντας - Πολλαπλές Οδεύσεις .....	85
3.4.13 Τροποσφαιρικός κυματοδηγός.....	87
3.4.14 Τροποσφαιρική σκέδαση .....	88
3.4.15 Διαλείψεις και συστήματα διαφορικής λήψης.....	93
3.4.16 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την ατμόσφαιρα .....	96
3.4.17 Ιονοσφαιρική διάδοση .....	96
3.4.18 Ιονοσφαιρική διάθλαση και ανάκλαση.....	97
3.4.19 Ιονοσφαιρική σκέδαση .....	102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	103
ΠΗΓΕΣ.....	121

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανθρώπινη επικοινωνία αναπτύχθηκε πριν από εκατομμύρια χρόνια εφόσον οι άνθρωποι ένιωθαν από νωρίς αυτήν την ανάγκη. Σήμερα, η επικοινωνία παίζει μεγάλο ρόλο στη ζωή μας αφού ολόκληρη η καθημερινότητά μας εξαρτάται από αυτήν. Οι άνθρωποι, πάντα έβρισκαν διάφορους τρόπους επικοινωνίας ακόμα και από απόσταση. Τα παλαιότερα χρόνια η μορφή της επικοινωνίας ήταν κυρίως λεκτική, αλλά στις μέρες μας χρησιμοποιείται και η μαζική επικοινωνία η οποία δεν είναι μορφή επικοινωνίας που δόθηκε από την φύση

Η κάλυψη της ανάγκης αυτής ξεκίνησε με τους αγγελιαφόρους, οι οποίοι ήταν δρομείς που μετέφεραν προφορικά και γραπτά μηνύματα και στη συνέχεια ακολούθησαν οι φρυκτωρίες, ένα σύστημα μετάδοσης φωτεινών μηνυμάτων με διαδοχικό άναμα φωτιάς, οι πυρσίδες, τα ταχυδρομικά περιστέρια, το τηλέφωνο κ.α. ώσπου φτάσαμε στον πρώτο πραγματικά ασύρματο τρόπο επικοινωνίας, τον οποίο χρησιμοποιούμε μέχρι και σήμερα. Το κίνητρο για ασύρματη επικοινωνία ήταν η απαλλαγή από τη χρήση των καλωδίων. Τα καλώδια παρουσίαζαν πολλούς περιορισμούς και είχαν μεγάλο κόστος. Ειδικά σε μεγάλες αποστάσεις, η εγκατάσταση καλωδίων ήταν δύσκολη και χρονοβόρα.

Λίγη ιστορία....

Την περίοδο 1867-1873, ο James Maxwell ανέπτυξε την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του φωτός και προέβλεψε την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη διάδοσή τους στο χώρο με ταχύτητα ίση με αυτή του φωτός. Λίγο καιρό αργότερα, το 1888, ο Hertz ήταν ο πρώτος που κατόρθωσε να παράγει ραδιοκύματα στο εργαστήριό του και να δείξει την παρουσία τους στο χώρο. Μετά απ' αυτόν, πολλοί ήταν αυτοί που εξέτασαν τη δυνατότητα χρήσης των ραδιοκυμάτων σε πρακτικές εφαρμογές, π.χ. ο Alexander Fleming.

Το 1907, έγινε δυνατή η παραγωγή ραδιοκυμάτων οποιασδήποτε συχνότητας και μεγάλης ισχύος, με την εφεύρεση της τριόδου λυχνίας. Για την φώραση (ανίχνευση) των ραδιοκυμάτων, επινοούνταν κατά καιρούς διάφοροι φωρατές, όπως για παράδειγμα ο συνοχέας (coherer) του Κολτσέκι. Ο συνοχέας αυτό ήταν ένα γυαλινο περίβλημα, το οποίο περιείχε μέσα του ρινίσματα σιδήρου. Αργότερα δοκιμάστηκαν άλλοι και πιο ευαίσθητοι φωρατές όπως οι μαγνητικοί, οι ηλεκτρολυτικοί και οι κρυσταλλικοί. Οι κρυσταλλικοί φωρατές ήταν πιο διαδεδομένοι και πιο λειτουργικοί από τους άλλους δυο. Σήμερα τα ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών, υλοποιούνται βασισμένα στις προδιαγραφές που ορίζει η οικογένεια πρωτοκόλλων του IEEE 802.11 και που στην [8]



ουσία είναι τον πρότυπο ethernet και το csma/ca, δηλαδή το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή συγκρούσεων. Ενδεικτικά αναφέρουμε το 802.11b που είναι τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης που επιτρέπει ταχύτητες μέχρι 11Mbps και το 802.11g που είναι τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης που επιτρέπει ταχύτητες μέχρι 54Mbps. Η κάρτα δικτύου που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση, κάνοντας χρήση της ασύρματης τεχνολογίας επιτυγχάνει την ίδια δικτύωση με μια κλασσική κάρτα δικτύου, αλλά χωρίς καλώδια. Μια ειδική περίπτωση που μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα, είναι το hotspot, το οποίο είναι το ασύρματο δίκτυο στο οποίο ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση στο internet.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ- Ορισμοί

Για να κατανοηθεί καλύτερα η ασύρματη επικοινωνία, πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας τους ακόλουθους ορισμούς.

### 1.1 Ασύρματη επικοινωνία

Η ασύρματη επικοινωνία μπορεί να περιγραφεί με έναν πρόχειρο ορισμό ως «*Τα διάφορα συστήματα με τα οποία είναι δυνατή η χωρίς σύρματα επικοινωνία, καθώς και οι συσκευές που χρησιμοποιούνται*».

### 1.2 Ασύρματο δίκτυο

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, συνήθως τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών, το οποίο χρησιμοποιεί, ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN). [3]



Εικόνα 1.2-Σύστημα ασύρματης επικοινωνίας

### **1.3 Πομπός**

Ο πομπός αποτελεί μέρος ενός συστήματος επικοινωνίας. Ο πομπός είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που, συνήθως με τη βοήθεια μιας κεραίας, εκπέμπει σήματα που περιέχουν πληροφορίες όπως το ραδιοφωνικό, το τηλεοπτικό ή σήμα άλλων τηλεπικοινωνιών. Δέχεται κάποια δεδομένα τα οποία μετασχηματίζει ή κωδικοποιεί για να μεταδοθούν σε κάποιο κανάλι ή μέσο μετάδοσης. Ως μέσα μετάδοσης μπορούν να θεωρηθούν ο κενός χώρος, δισύρματα καλώδια, οπτικές ίνες κ.α. Παράδειγμα πομπών είναι αυτοί της τηλεόρασης, του ραδιοφώνου, επίγειοι πομποί προς τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους. Επίσης, πομπός μπορεί να θεωρηθεί ένα modem, το οποίο δέχεται ροή ψηφιακών δεδομένων, τα οποία μετατρέπει σε αναλογικό σήμα πριν τα αποστείλει στο τηλεφωνικό δίκτυο. [7]

### **1.4 Δέκτης**

Ο δέκτης - παραλήπτης κάνει την αντίστροφη εργασία. Δηλαδή μετατρέπει τα δεδομένα του καναλιού μετάδοσης στα πρωτογενή που έλαβε ο πομπός, ώστε να έχει νόημα η αποστολή δεδομένων. Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν οι πάσης φύσεως συσκευές ραντάρ, (επιφανείας, αέρος κ.λπ), τα ηλεκτρονικά βυθόμετρα, κ.ά υποβρύχιες συσκευές που αποτελούν ταυτόχρονα πομπο-δέκτες των ιδίων (δικών τους) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

### **1.5 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα**

Συζευγμένα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία κινούνται με την ταχύτητα του φωτός και παρουσιάζουν τυπική κυματική συμπεριφορά. Η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων γίνεται με ανάκλαση, περίθλαση και σκέδαση. Η επιλογή του τρόπου διάδοσης εξαρτάται από το μήκος κύματος του καθε αντικειμένου.

## **1.6 Περίθλαση**

Η κάμψη που υφίστανται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά τη διέλευση του από λεπτά ανοίγματα ή λεπτά εμπόδια. (Το μήκος των ανοιγμάτων και των εμποδίων συγκρίνεται με το  $\lambda$  της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.)

## **1.7 Συμβολή**

Η ταυτόχρονη διάδοση δύο κυμάτων στην ίδια περιοχή του μέσου. Οδηγεί σε αλλοίωση του λαμβανόμενου σήματος. Για να υπάρξει συμβολή πρέπει οι πηγές διάδοσης των κυμάτων να έχουν την ίδια συχνότητα και το ίδιο μήκος κύματος.

## **1.8 Κεραία**

Ως κεραία, χαρακτηρίζεται ένας αγωγός που μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα σε ηλεκτρομαγνητικό (H/M) κύμα και αντίστροφα. Μία κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπομπή και λήψη. Κάθε κεραία χαρακτηρίζεται από ένα διάγραμμα ακτινοβολίας, το οποίο αναπαριστά στο χώρο τη συμπεριφορά μιας κεραίας ως προς την ισοτροπική κεραία. Μία κεραία μπορεί να χαρακτηριστεί, από το διάγραμμα ακτινοβολίας, ως κατευθυντική. Η κατευθυντικότητα της κεραίας είναι επιθυμητή ανάλογα με την εφαρμογή της κεραίας στο δίκτυο.

### **1.8.1 Ισοτροπική κεραία**

Είναι η κεραία που ακτινοβολεί με τον ίδιο τρόπο προς όλες τις κατευθύνσεις

### **1.8.2 Πραγματική κεραία**

Είναι η κεραία που ακτινοβολεί με τον ίδιο τρόπο προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις

### **1.8.3 Απώλειες μέσου διάδοσης**

Λόγω της μεταβολής της πυκνότητας της ατμόσφαιρας με την αύξηση του ύψους η απόσβεση που προκαλεί μειώνεται με το ύψος.

Οι κατακόρυφες μεταδόσεις υπερτερούν σημαντικά σε σχέση με αυτές κοντά στον ορίζοντα, αφού το σήμα πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας στην περίπτωση της οριζόντιας επικοινωνίας.

Η ατμόσφαιρα παρουσιάζει έναν αριθμό παραθύρων στο ραδιοφάσμα όπου η απόσβεση των ραδιοκυμάτων είναι μικρή. Συγκεκριμένα, οι μεταδόσεις είναι πολύ καλές κάτω από τα 10 GHz.

Η απορρόφηση και η διάχυση γίνονται κυρίως στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας, η διάθλαση στα ανώτερα (τροπόσφαιρα), ενώ η αποπόλωση προκαλείται στην ιονόσφαιρα ή στην ατμόσφαιρα παρουσία βροχής.

### 1.9 Τροποσφαιρικά φαινόμενα

- Απορρόφηση αερίων
- Απόσβεση λόγω βροχής
- Απόσβεση από σύννεφα και βροχή
- Αποπόλωση λόγω βροχής
- Αποπόλωση από σύννεφα και ομίχλη
- Αποπόλωση από τον πάγο

### 1.10 Απώλειες διαδρομής (Pathloss)

Απώλειες διαδρομής είναι η απόσβεση του σήματος (σε dB), δηλαδή ο λόγος της εκπεμπόμενης ισχύος προς την λαμβανόμενη ισχύ, χωρίς όμως να ληφθούν υπ' όψιν τα κέρδη των κεραιών:

$$\frac{P_t}{P_r} = G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

Όπου:  $P_r$  η λαμβανόμενη ισχύς,  $P_t$  η εκπεμπόμενη ισχύς,  $G_t$  το κέρδος της εκπεμπόμενης κεραιάς,  $G_r$  το κέρδος της λαμβανόμενης κεραιάς,  $\lambda$  το μήκος κύματος,  $d$  η απόσταση μεταξύ των κεραιών και dB η μονάδα μέτρησης των απωλειών (decibels).

## 1.11 Decibels

Είναι μονάδα συγκρίσης κυρίως ενεργειών και ισχυών. Χρησιμεύει στις περιπτώσεις που τα μεγεθη μεταβαλλονται κατα αρκετες ταξεις μεγεθους και όταν μας ενδιαφερει κυριως η σχεση (ο λογος) δυο μεγεθων.

## 1.12 Απώλειες διάδοσης στον ελεύθερο χώρο

Υπολογίζονται από τη σχέση:

$$Pr(d) = \frac{Pt \cdot Gt \cdot Gr \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2} = \frac{Pt}{(4\pi d)^2} \cdot Gt \cdot Gr \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Ισοδύναμα, αφού  $1 \text{ dB} = 10 \cdot \log \frac{Pr}{Pt}$ , ισχύει:

$$\frac{Pt}{Pr} = -10 \cdot \log \frac{Gt \cdot Gr \cdot \lambda^2}{4\pi^2 \cdot d^2}$$

## 1.13 Θόρυβος

Θόρυβος καλείται οποιοδήποτε σήμα, το οποίο δεν ανήκει στο σήμα που μεταφέρει την πληροφορία. Ο θόρυβος μπορεί στοχαστικός, λευκός, ή προσθετικός ανάλογα με τη συχνότητά (f) του.

Σημαντικότερα είδη θορύβου:

Θερμικός θόρυβος

Θόρυβος από εξωτερικές πηγές

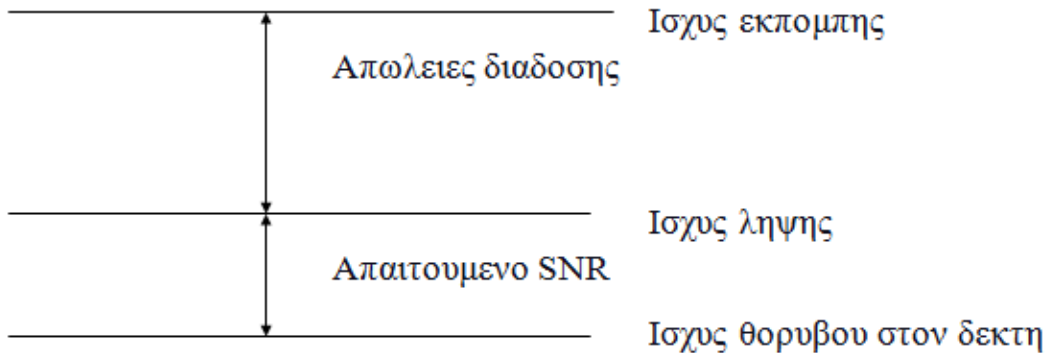
Θόρυβος από παρεμβολές

Θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης

### 1.13.1 Επίδραση του θορύβου:

Οι επιδόσεις ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος καθορίζονται από την σηματοθορυβική σχέση (signal-to-noise ratio - SNR). Μερικές φορές αναφέρεται και σαν λόγος φερντος προς θορύβο (carrier-to-noise ratio). Ο SNR εκφράζεται σε decibels (dB):

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{N}$$



Εικόνα 1.1 - Διάγραμμα θορύβου

## 1.14 LAN & WLAN

LAN (Local Area Network) είναι ένα δίκτυο υπολογιστών που καλύπτει μια μικρή γεωγραφική περιοχή, όπως ένα σπίτι, το γραφείο, το σχολείο, ή ομάδα κτιρίων. Δεδομένου ότι οι συμβάσεις ονοματοδοσίας προτείνουν, LAN είναι για μικρότερα, πιο εντοπισμένο δικτύωση - σε ένα σπίτι, τις επιχειρήσεις, το σχολείο, κλπ - ενώ ευρυζωνικών δικτύων καλύπτουν μεγαλύτερες περιοχές, όπως οι πόλεις, ακόμη και επιτρέπουν στους υπολογιστές σε διαφορετικά έθνη για να συνδεθείτε.

Το WLAN ή αλλιώς wireless local area network, είναι ένα ασύρματο δίκτυο το οποίο συνεργάζεται με άλλες ασύρματες συσκευές. Ένα συμβατικό οικιακό/μικρής επιχείρησης δίκτυο έχει δύο ή περισσότερους ηλεκτρονικούς υπολογιστές που συνδεούνται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας δικτυακό καλώδιο και κάποια συσκευή όπως hub/ switch/ router.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ - Ασύρματη Επικοινωνία

### 2.1 Ασύρματα Μέσα Μετάδοσης

[15]

Οι ασύρματες ζεύξεις είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους, πλέον, τρόπους μετάδοσης είτε φωνής, είτε δεδομένων, είτε τηλεοπτικών σημάτων. Σήμερα, χρησιμοποιούνται για την μετάδοση δεδομένων, ιδιαίτερα μέσω μικροκυματικών και δορυφορικών συνδέσεων. Το πιο βασικό πλεονέκτημα αυτών των μέσων μετάδοσης, είναι ότι δεν εξαρτώνται από υλικά μέσα, όπως, για παράδειγμα, η σύνδεση πομπού και δέκτη με καλώδιο. Αυτό συμβαίνει διότι ως μέσο μετάδοσης χρησιμοποιείται ο ελεύθερος χώρος. Όμως, ο ελεύθερος χώρος παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα. Μεταξύ αυτών συμπεριλαμβάνονται η μεγάλη ισχύς, που απαιτούν οι πομποί για τη μετάδοση, η ευαισθησία στο θόρυβο και ο χαμηλός βαθμός ασφάλειας, που παρέχεται, αφού ο οποιοσδήποτε μπορεί να λαμβάνει τα εκπεμπόμενα σήματα χρησιμοποιώντας απλά μία κεραία και ένα δέκτη.

Στα ασύρματα μέσα μετάδοσης η εκπομπή του σήματος γίνεται σε μία συγκεκριμένη συχνότητα ή σε ένα σύνολο συχνοτήτων. Λόγω του ότι, το φάσμα συχνοτήτων είναι περιορισμένο και οι συχνότητες αποτελούν σπάνιο εθνικό πόρο, για να γίνει εκπομπή σε κάποια συχνότητα, θα πρέπει η συχνότητα να έχει ανατεθεί εκ των προτέρων αρχές στο φορέα που θα τη χρησιμοποιήσει. Η μετάδοση και η λήψη των μεταδιδόμενων σημάτων γίνεται από ειδικές κεραίες οι οποίες συνδέονται με τον σταθμό λήψης και μετάδοσης. Σε περίπτωση, που το σήμα μεταδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις, τότε μπορεί να ληφθεί από οποιαδήποτε κεραία, π.χ. το ραδιόφωνο, η τηλεόραση και τα συστήματα κυψελοειδούς τηλεφωνίας.



Στα ασύρματα μέσα μετάδοσης ανήκουν οι επίγειες και δορυφορικές μικροκυματικές ζεύξεις και τα συστήματα κυψελοειδούς τηλεφωνίας. [1]

Ας δούμε αναλυτικά σε τι αναφέρονται οι παραπάνω όροι:

### **2.1.1 Επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις**

Οι επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις στηρίζονται στην κατευθυντική μετάδοση μικροκυμάτων στην περιοχή πολύ υψηλών συχνοτήτων (GHz). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούν συχνότητες 2 - 40 GHz, αν και τα περισσότερα συστήματα λειτουργούν στην περιοχή των 2 - 18 GHz. Από πλευράς δεδομένων, οι ρυθμοί μετάδοσης ξεκινούν από μερικές δεκάδες Mbps (στην περιοχή των 2 GHz) και μπορεί να φθάσουν τις μερικές εκατοντάδες Mbps. Οι πομποί και οι δέκτες είναι παραβολικά πιάτα και χρησιμοποιούνται κυρίως από τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς και ιδιωτικά δίκτυα. Για να είναι δυνατή η μεταφορά δεδομένων, απαιτείται οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Λόγω της απαιτούμενης οπτικής επαφής και της καμπυλότητας της γης απαιτούνται σταθμοί αναμετάδοσης κάθε 40-50 χιλιόμετρα περίπου.

Οι επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις χρησιμοποιούνται, κυρίως, για μετάδοση τηλεοπτικού σήματος και φωνής, για μικρές από σημείο σε σημείο σύνδεσης, μεταξύ κτιρίων για κλειστό κύκλωμα τηλεόρασης ή για συνδέσεις δεδομένων μεταξύ τοπικών δικτύων. Παρουσιάζουν, επίσης, μεγάλη ευαισθησία στο περιβάλλοντικό θόρυβο και ιδιαίτερα στην κακοκαιρία. Αξίζει να αναφερθεί, ότι μία καταιγίδα είναι ικανή ακόμα και αν διακόψει τη ζεύξη. Επίσης, επειδή απαιτείται η οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, για ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων είναι αναπόφευκτη η χρήση αλληπάλληλων αναμεταδοτών.

Οι μικροκυματικές ζεύξεις προσφέρουν αξιολογη χωρητικότητα μετάδοσης (συνήθως πάνω από 6 Gbps ), ενώ συνήθεις ρυθμοί μετάδοσης είναι αυτοί των 1,5 και 45 Mbps. Σχετικά με την ασφάλεια μετάδοσης, όπως και όλα τα άλλα ασύρματα μέσα, προσφέρουν χαμηλή ασφάλεια, με συνέπεια να είναι αναγκαία η κρυπτογράφηση της μεταδιδόμενης πληροφορίας.

Συγκρινόμενες με τα ενσύρματα μέσα μετάδοσης, πολλές φορές αποδεικνύονται ελκυστικότερες αν αναλογιστούμε τα προβλήματα που παρουσιάζονται στα ενσύρματα μέσα και αφορούν τα δικαιώματα διέλευσης, άνοιγμα φρεατίων, τοποθέτηση καλωδίων και συνδέσεων. Ένας άλλος παράγοντας, που μπορεί να συνηγορήσει υπέρ της χρήσης

των ασύρματων ζεύξεων, είναι η μορφολογία του εδάφους των περιοχών, που θέλουμε να συνδέσουμε. [1]

Στους παρακάτω πίνακες, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μικροκυματικών ζεύξεων:

#### Πλεονεκτήματα

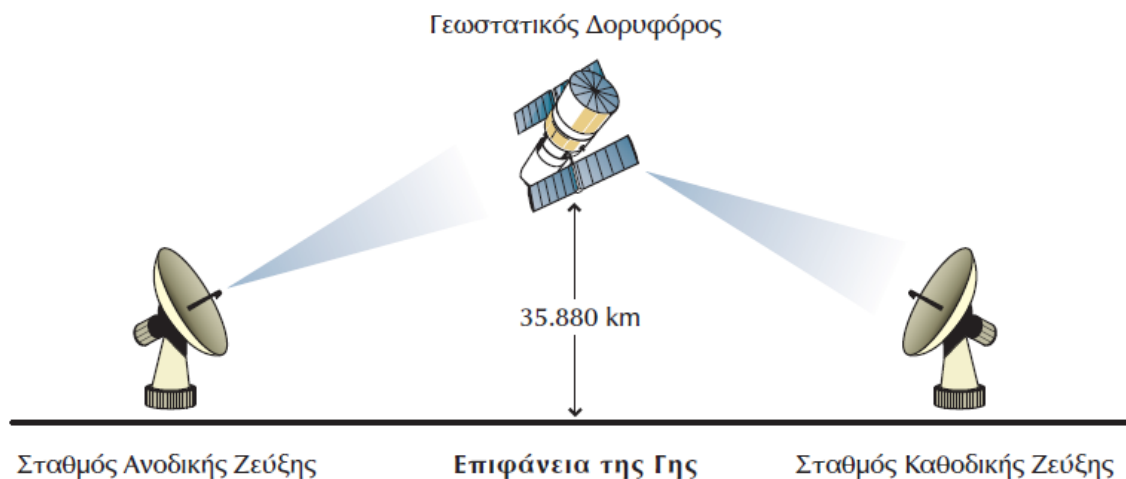
Δεν χρειάζεται καλωδίωση
Μεγάλη χωρητικότητα
Μετάδοση πολλαπλών καναλιών

#### Μειονεκτήματα

Απαιτείται οπτική επαφή
Ακριβοί πύργοι και αναμεταδότες
Παρεμβολές από διερχόμενα αεροπλάνα και βροχή
Μικρή ασφάλεια, εύκολη υποκλοπή

## 2.1.2 Δορυφορικές μικροκυματικές ζεύξεις

Οι δορυφορικές μικροκυματικές ζεύξεις χρησιμοποιούν διαστημικούς σταθμούς αναμετάδοσης (δορυφόρους), οι οποίοι μπορούν να αναμεταδίδουν σήμα σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Οι δορυφορικές ζεύξεις, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις ανοδικές (uplink) και καθοδικές (downlink). Οι ανοδικές ζεύξεις χρησιμοποιούνται για την αποστολή σημάτων από τους επίγειους σταθμούς στους δορυφόρους, ενώ οι δορυφόροι αναμεταδίδουν τα σήματα που λαμβάνουν, στις καθοδικές ζεύξεις. Η εκπομπή (broadcast) των καθοδικών ζεύξεων κάνει τα δορυφορικά συστήματα ελκυστικά για υπηρεσίες εκπομπής (broadcasting services), όπως η μετάδοση τηλεοπτικού σήματος.



Οι δορυφορικές επικοινωνίες ξεκίνησαν το 1958. Οι πρώτοι δορυφόροι, λόγω της μειωμένης ισχύος των πυράβλων που τους εκτόξευαν, τίθονταν σε τροχιά σε ύψος όχι μεγαλύτερο των 10 χιλιομέτρων από τη Γη. Αποτέλεσμα, ήταν οι δορυφόροι να κινούνται με ταχύτητα περιστροφής μεγαλύτερη από την ταχύτητα περιστροφής της Γης. Συνεπώς, δεν βρίσκονταν συνεχώς πάνω από το ίδιο σημείο. Το γεγονός αυτό, είχε ως αποτέλεσμα τα προβληματικά δορυφορικά συστήματα, αφού οι γήινοι σταθμοί έπρεπε να περιστρέφονται συνεχώς, για να παρακολουθούν τους δορυφόρους.

Σε εξέλιξη των συστημάτων αυτών κατασκευάστηκαν οι γεωστατικοί δορυφόροι, που τίθενται σε τροχιά σε ύψος 35.880km και κινούνται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται η Γη (11.040 χλμ/ώρα). Έτσι, φαίνονται από τη Γη σαν ακίνητοι, μένοντας σταθεροί πάνω από το ίδιο σημείο της Γης. Με αυτό τον τρόπο, οι

επίγειοι σταθμοί δεν χρειάζεται να περιστρέφονται, καθώς οι δορυφόροι βλέπουν μόνιμα το ίδιο σημείο. Οι επίγειοι σταθμοί που επικοινωνούν με τους δορυφόρους αυτούς, στέλνουν προς αυτούς και δέχονται από αυτούς τηλεπικοινωνιακά σήματα ξεπερνώντας το εμπόδιο της καμπυλότητας της Γης. Κάθε γεωστατικός δορυφόρος καλύπτει ορίζοντα 120, έτσι που με τρεις τέτοιους δορυφόρους καλύπτεται όλη η ΓηΟι ζώνες μετάδοσης, που χρησιμοποιούνται, είναι στα 4-6 GHz, 12-14 GHz και 19-29 GHz.

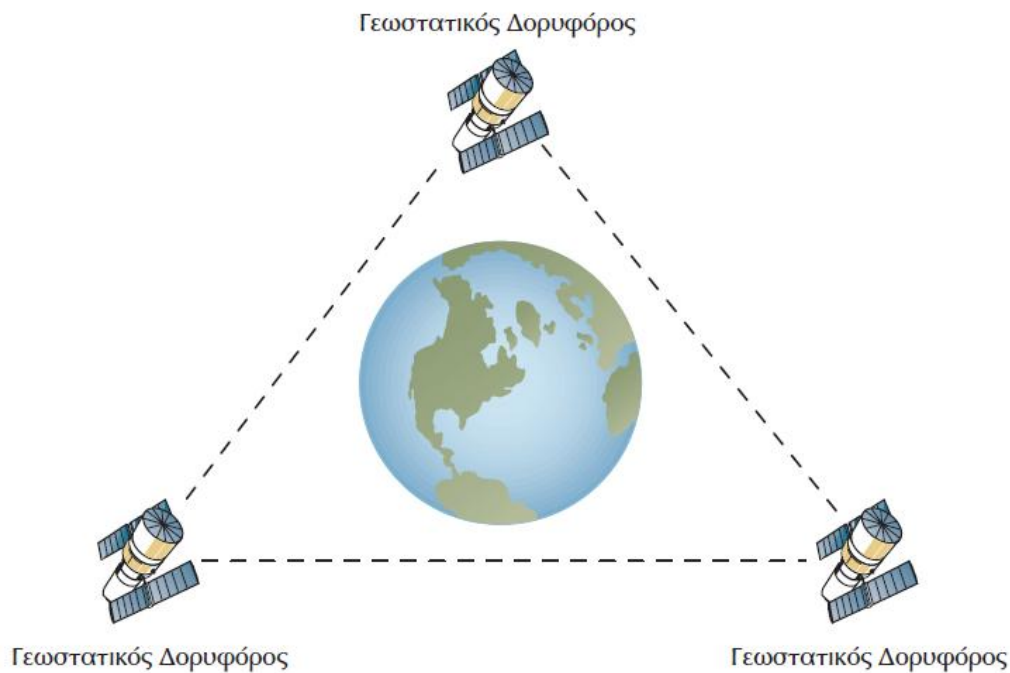
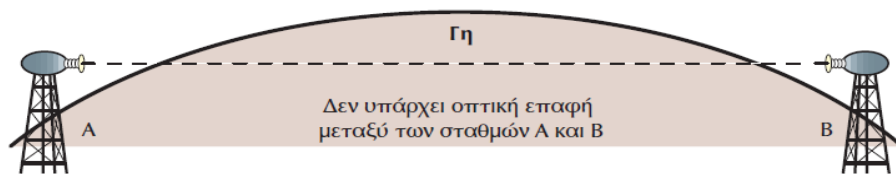
Οι δορυφορικές ζεύξεις διατηρούν και αυτές τα μειονεκτήματα των ασύρματων μέσων μετάδοσης, δηλαδή χαμηλή ασφάλεια, ευαισθησία σε παρεμβολές και αυξημένο κόστος εξοπλισμού. Παρόλα αυτά, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν, παραμένουν αρκετά ελκυστικές, ιδιαίτερα για υπηρεσίες εκπομπής (broadcasting). Στους παρακάτω πίνακες, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ασύρματων μικροκυματικών ζεύξεων. [1]

#### Πλεονεκτήματα

Είναι ανεξάρτητες από την απόσταση των σημείων που θέλουμε να συνδέσουμε
Προσφέρουν μεγάλη χωρητικότητα της τάξης των 45 Mbps, η οποία όμως συγκρινόμενη με τη χωρητικότητα των οπτικών ινών είναι μικρή
Καλύπτουν μεγάλη γεωγραφική περιοχή
Είναι φθηνές για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων αφού είναι ανεξάρτητες της απόστασης

#### Μειονεκτήματα

Χαμηλή ασφάλεια
Ευαισθησία στο θόρυβο και παρεμβολές
Μεγάλο αρχικό κόστος
Καθυστερήση μετάδοσης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σημαντικές καθυστερήσεις στις επικοινωνίες υπολογιστών



### 2.1.3 Κυψελοειδής Τηλεφωνία

Η κινητή ραδιοτηλεφωνία ήταν ο πρόδρομος της κυψελοειδούς τηλεφωνίας, αφού σε εξέλιξη των συστημάτων της πρώτης αναπτύχθηκαν τα συστήματα της δεύτερης. Η κινητή ραδιοτηλεφωνία εξυπηρετεί την επικοινωνία μεταξύ κινούμενων και σταθερών σταθμών, καθώς επίσης και κινούμενων σταθμών σε οποιαδήποτε απόσταση. Χρησιμοποιείται, κυρίως, για την επικοινωνία, μεταξύ διαφόρων υπηρεσιών όπως Αστυνομία, Πυροσβεστική, πρώτες Βοήθειες και ταξί.

Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται, βρίσκονται στην περιοχή 30 - 900 MHz. Η εμβέλεια των συχνοτήτων αυτών περιορίζεται πολύ εξαιτίας της οπτικής επαφής που απαιτείται μεταξύ πομπού και δέκτη και εξαρτάται από το ύψος των κεραιών των δύο σταθμών (σταθερού και κινητού). Επειδή το ύψος της κεραιάς του κινητού σταθμού είναι περιορισμένο, η κεραιά του σταθερού σταθμού τοποθετείται σε υψηλό σημείο.

Το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο σύστημα κινητής ραδιοτηλεφωνίας τέθηκε σε εφαρμογή το 1946. Στο σύστημα αυτό, ένας υψηλός πύργος μετάδοσης ανορθώθηκε κοντά στο κέντρο μιας αστικής περιοχής. Κάθε όχημα μέσα στην περιοχή μπορούσε να δεσμεύσει ένα από τα διαθέσιμα κανάλια επικοινωνίας. Επειδή όμως ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών είναι περιορισμένος και ο αριθμός των χρηστών συνεχώς μεγάλωνε, παρουσιάζονταν σημαντικά προβλήματα, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να ικανοποιηθούν οι ανάγκες των συνδρομητών. [1]



Η λύση σε αυτό το πρόβλημα ήταν το κυψελοειδες σύστημα κινητής ραδιοτηλεφωνίας. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, οι αστικές περιοχές διαιρούνται σε εξάγωνα (κυψέλες), των οποίων η διάμετρος μετριέται μεταξύ 1,5 και 13 χιλιομέτρων. Κάθε κυψέλη περιλαμβάνει πομπό χαμηλής ισχύος τοποθετημένο σε σταθερό σταθμό βάσης. Οι συχνότητες της κυψελοειδούς τηλεφωνίας βρίσκονται στην περιοχή των 900 και 1800 MHz και επιτρέπουν μεγάλο αριθμό συνδιαλέξεων ανα κυψέλη. Σε κάθε κυψέλη λειτουργεί ένα σύνολο συχνοτήτων, που διαφέρει από τις συχνότητες των γειτονικών κυψελών.

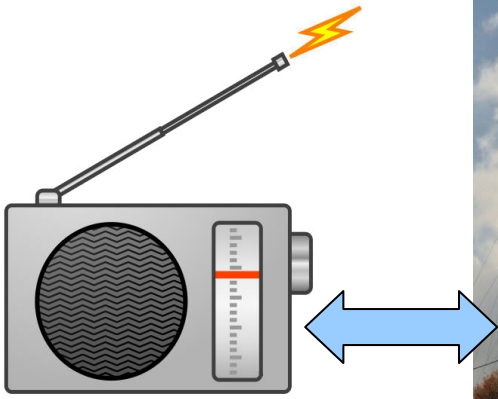
Οι κυψέλες εξυπηρετούνται συνήθως από δύο ομάδες τηλεφωνικών καναλιών, οι οποίες χορηγούνται για όλη την περιοχή. Τα κανάλια αυτά λαμβάνονται από τις εκχωρημένες ζώνες συχνοτήτων (περιοχές γύρω από τα 900 και 1800 MHz) και μοιράζονται σε διάφορες κυψέλες. Επειδή η ισχύς μετάδοσης σε κάθε κυψέλη διατηρείται σε ένα ορισμένο επίπεδο ώστε να μπορεί να εξυπηρετείται μόνο η συγκεκριμένη κυψέλη, το ίδιο σύνολο συχνοτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες κυψέλες, της ίδιας περιοχής. Συνεπώς, τα ίδια τηλεφωνικά κανάλια χρησιμοποιούνται σε περισσότερες από μια κυψέλες, με την προϋπόθεση όμως ότι απέχουν αρκετά μεταξύ τους, ώστε να αποφεύγονται προβλήματα παρεμβολών.

Στα συστήματα κυψελοειδούς τηλεφωνίας, ένας κεντρικόςυπολογιστής παρακολουθεί τους συνδρομητές, καθώς αστοί κινούνται μέσα και μεταξύ των κυψελών. Στην περίπτωση, που κατά την διάρκεια μιας κλήσης ένας συνδρομητής περάσει από μια κυψέλη σε γειτονική, το τηλεφωνικό κέντρο τον μετάγει αυτόματα σε ελεύθερο κανάλι της νέας κυψέλης. Η μεταγωγή αυτή σχεδόν δεν γίνεται αντιληπτή από τον συνδρομητή.

Καθώς ο αριθμός των συνδρομητών αυξάνει, δημιουργείται η ανάγκη επαναχρησιμοποίησης των ίδιων καναλιών για την εξυπηρέτησή τους. Η επαναχρησιμοποίηση, όμως αυτών προϋποθέτει τη διαίρεση των κυψελών σε μικρότερες κυψέλες, έτσι ώστε να αποφεύγονται προβλήματα παρεμβολών. Σήμερα, το σύστημα κυψελοειδούς τηλεφωνίας χρησιμοποιείται όχι μόνο για μετάδοση φωνής αλλά και δεδομένων (με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, της τάξης των εμρικών kbps) ακόμη και πρόσβαση στο Διαδίκτυο. [1]

#### **2.1.4 FM Ραδιόφωνο**

Στην ασύρματη μετάδοση ραδιοφωνικού σήματος γίνεται πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας. Η μετάδοση FM προϋποθέτει 'οπτική επαφή' πομπού-δέκτη. [7]





### 2.1.5 Σταθερή τηλεφωνία με ασύρματες ζεύξεις

Σε απομακρυσμένα χωριά όπως το χωριό Κύμη της Ροδόπης (σύνορα Ελλάδος – Βουλγαρίας) – είναι ευκολότερο (και φθηνότερο) να φέρεις σταθερά τηλέφωνα με ασύρματη ζεύξη από ότι με καλώδιο. Με αυτόν τον τρόπο δεν μπορείς να έχεις δίκτυα DSL ή σύνδεση H/Y με το Internet σε γρήγορες ταχύτητες. [7]

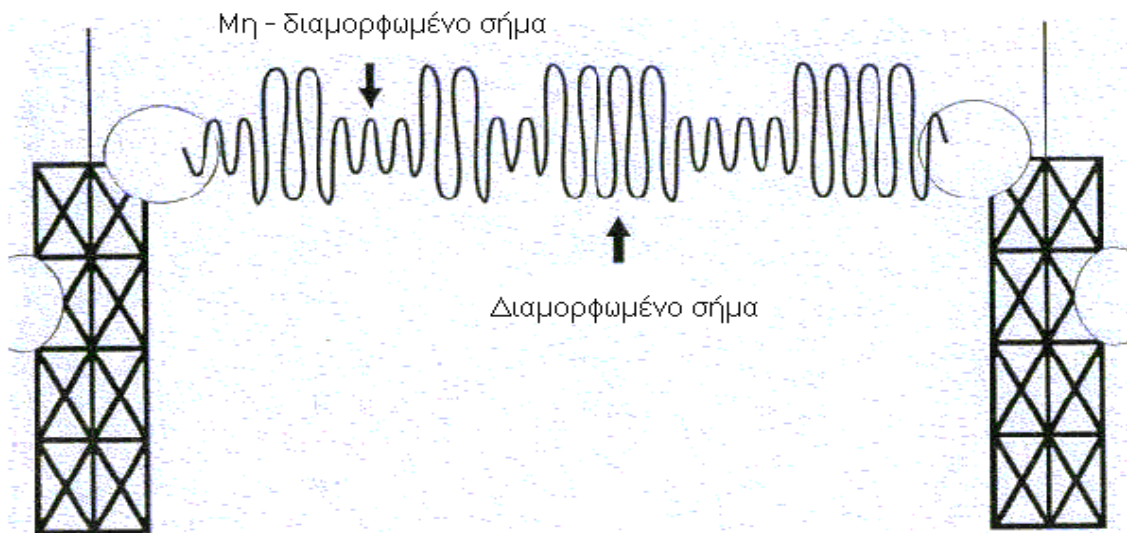


## 2.1.6 Αναλογική και ψηφιακή μετάδοση

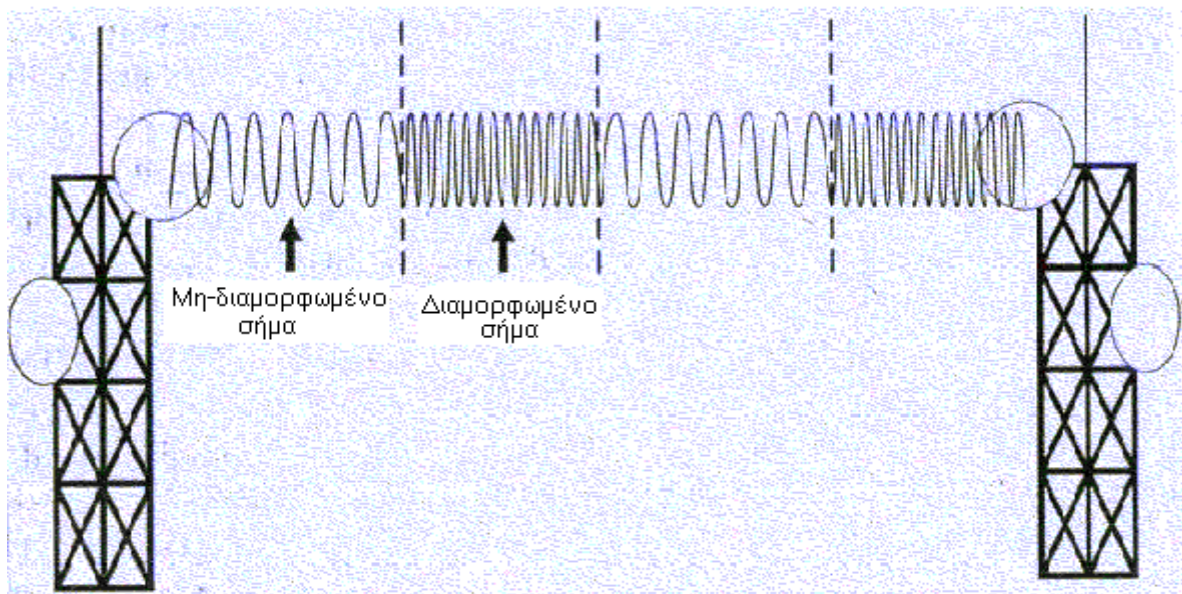
Τα μικροκυματικά ασυρματικά συστήματα κατατάσσονται ευρέως σε αναλογικά και ψηφιακά, γεγονός που εξαρτάται από την τεχνική διαμόρφωσης.

### Αναλογικά συστήματα

Τα αναλογικά συστήματα χρησιμοποιούν είτε την διαμόρφωση πλάτους (*AM*) είτε τη διαμόρφωση συχνότητας (*FM*), με περισσότερο ευρέως χρησιμοποιούμενη την *FM*. Για εύρος ζώνης  $30\text{ MHz}$  ενός κοινού φορέα  $6\text{ GHz}$ , η υποθετική χωρητικότητα της *FM* τεχνολογίας είναι  $2400$  κανάλια ομιλίας. Άλλες χωρητικότητες καναλιών χρησιμοποιούν διαμόρφωση πλάτους (*AM*) και μετάδοση απλής πλευρικής ζώνης (*Single Side Band - SSB*). Για το ίδιο εύρος ζώνης των  $30\text{ MHz}$ , ένα σύστημα *AM SSB*, μπορεί να μεταφέρει  $6000$  κανάλια. Σχηματικά, τα δύο είδη διαμορφώσεων *AM* και *FM* στα αναλογικά συστήματα παριστάνονται στα σχήματα 2.1 και 2.2. [8]

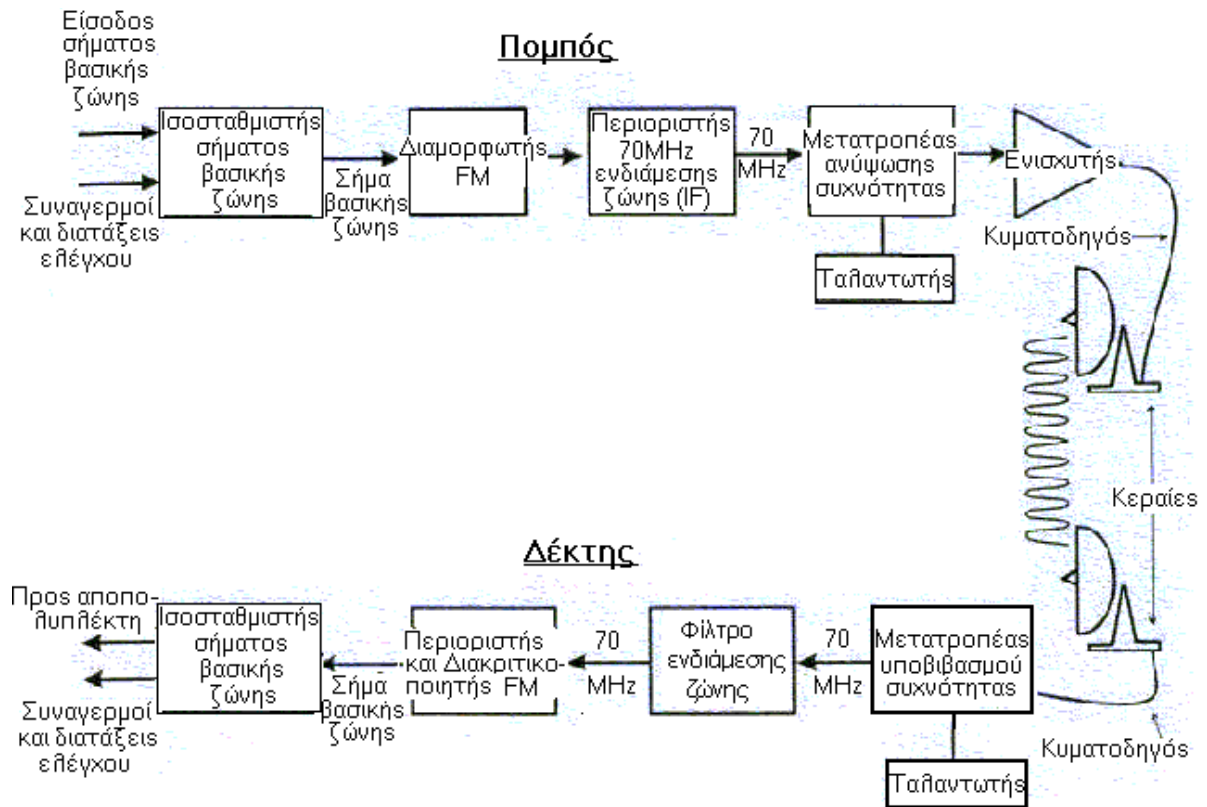


**Σχήμα 2.1:** Διαμόρφωση AM. Το φέρον σήμα συνδυάζεται με το διαμορφώνον σήμα ώστε να παράγει μια αύξηση στο πλάτος η οποία παριστάνει την πραγματική πληροφορία. [8]



**Σχήμα 2.2:** Διαμόρφωση FM. Το φέρον σήμα συνδυάζεται με το διαμορφώνον σήμα ώστε να παράγει έναν υψηλότερο ρυθμό συχνότητας ο οποίος παριστάνει την πραγματική πληροφορία.

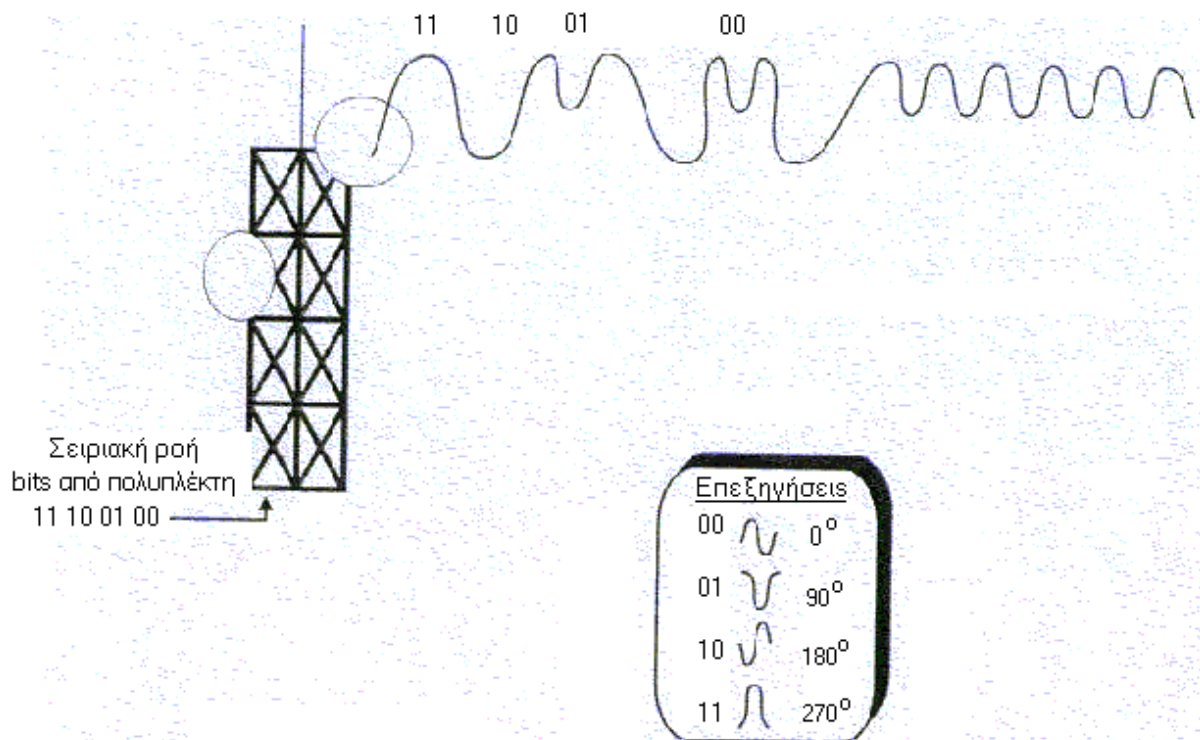
Ένα διάγραμμα block ενός πλήρους μικροκυματικού συστήματος αναλογικής διαμόρφωσης συχνότητας παριστάνεται στο σχήμα 2.3. Το σήμα βασικής ζώνης (baseband input) αφού περάσει από έναν ισοσταθμιστή (equaliser) διαμορφώνει το φέρον κύμα με τη χρήση του διαμορφωτή *FM* (*FM modulator*). Το διαμορφωμένο σήμα μετατρέπεται σε μια ενδιάμεση συχνότητα (*IF*) των  $70\text{ MHz}$ , το οποίο στη συνέχεια αυξάνει στη χρησιμοποιούμενη συχνότητα με τη χρήση του up-converter. Στο δέκτη πραγματοποιείται η αντίστροφη διαδικασία. Ο δέκτης λαμβάνει το διαμορφωμένο σήμα και το υποβαθμίζει στην ενδιάμεση συχνότητα (*IF*) των  $70\text{ MHz}$  με τη χρήση του down-converter. Στη συνέχεια το σήμα περνάει μέσα από ένα φίλτρο και έναν ενισχυτή (gain control) ώστε να εξομαλυνθεί οποιαδήποτε παραμόρφωση καθυστέρησης στα φίλτρα. Στη συνέχεια οδηγείται στον διακριτικοποιητή (discriminator) όπου ακολουθείται η διαδικασία αποδιαμόρφωσης. Συστήματα που χρησιμοποιούν αναλογική μετάδοση, μπορούν τυπικά να μεταφέρουν από 24 μέχρι 2700 κανάλια ομιλίας. [8]



Σχήμα 2.3: Τυπικό ασυρματικό αναλογικό δίκτυο διαμορφώσεως FM. [8]

## Ψηφιακά συστήματα

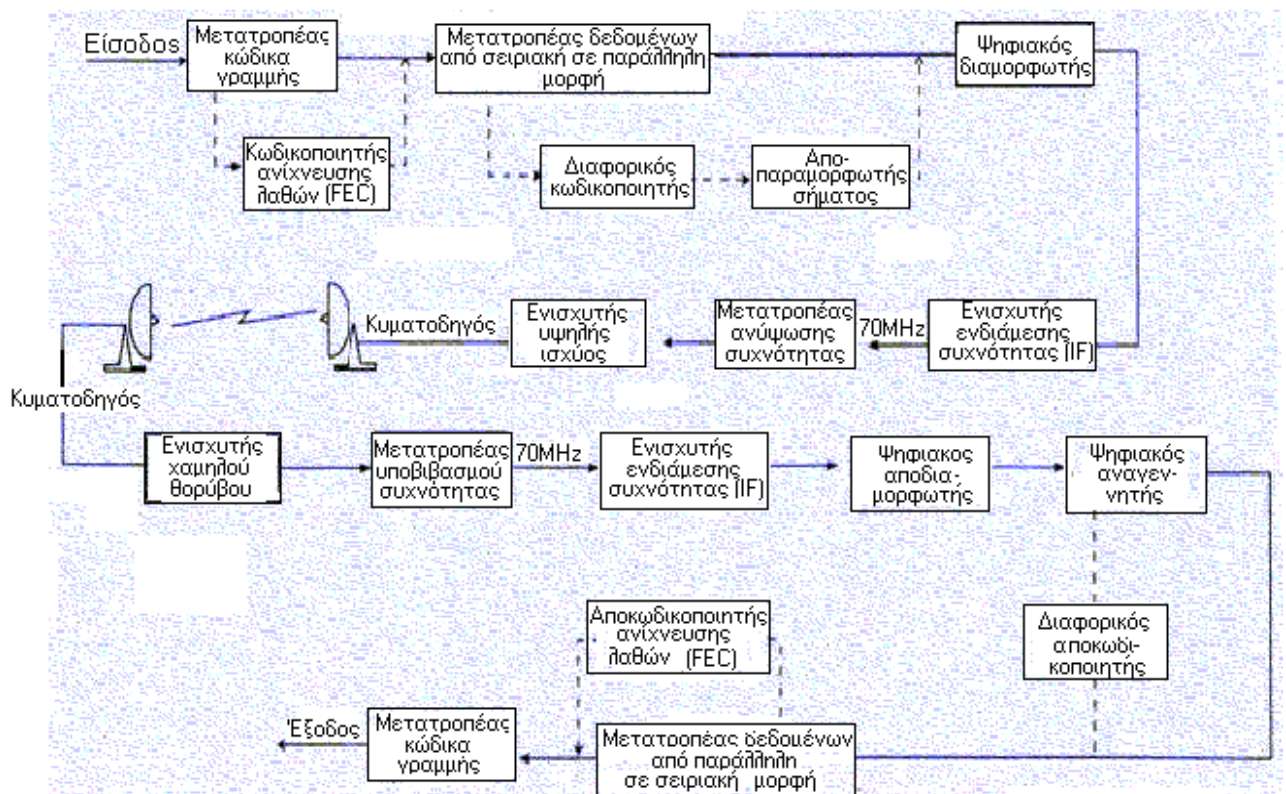
Μικροκυματικά συστήματα ψηφιακής μετάδοσης άρχισαν να χρησιμοποιούνται από τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Στην ψηφιακή μετάδοση χρησιμοποιείται συνήθως η διαμόρφωση μετατόπισης φάσεως (phase shift keying-*PSK*, σχήμα 2.4) ή η διαμόρφωση τετραγωνικού παλμού (quadrature amplitude modulation=*QAM*). Έτσι ένας συνολικός αριθμός από 1344 κανάλια φωνής μπορούν να πολυπλεχθούν σε 30 MHz ραδιοσυχνότητας και να έχουμε μια φασματική απόκριση περίπου 3 bits/Hz. Καινούργιες τεχνικές των 64 *QAM* υποστηρίζουν 2014 κανάλια ομιλίας σε 30 MHz ραδιοσυχνότητας και η φασματική απόκριση είναι τώρα 4,5 bits/Hz. [8]



**Σχήμα 2.4:** Διαμόρφωση μετατόπισης 4 φάσεων για τη μετάδοση 2 bits/Hz.

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ένα ψηφιακό ασύρματο μικροκυματικό σύστημα. Μερικά από τα υποσυστήματα που παρουσιάζονται στο σχήμα είναι προαιρετικά. Ο μετατροπέας γραμμής κώδικα (line code converter) λαμβάνει ένα τυποποιημένο κώδικα γραμμής παλμοκωδικής διαμόρφωσης (*PCM*) και την μετατρέπει σε μορφή non-return to zero (*NRZ*). Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας κωδικοποιητής ανιχνεύσεως και διορθώσεως λαθών [Forward Error Check (*FEC*) coder] αν και αυτή η διαδικασία δεν υλοποιείται πάντα. Η μετατροπή από σειριακή σε παράλληλη γίνεται από τον κατάλληλο μετατροπέα (serial to parallel converter) και διαχωρίζει τη ροή των σειριακών δεδομένων σε δύο διαφορετικές εισόδους: την (*I*) φάση και την τετραγωνική (*q*) φάση ώστε να

εκτελεστεί η τεχνική διαμόρφωσης φάσεως. Ένας προαιρετικός διαφορικός κωδικοποιητικής (differential coder) χρησιμοποιείται για να ισοσταθμίσει ασάφειες στις φάσεις των δεδομένων. Η συσκευή pre-distorter που είναι επίσης προαιρετική, χρησιμοποιείται για τη διόρθωση τυχόν παραμόρφωσης του σήματος λόγω ενίσχυσης. Ο διαμορφωτής (digital modulator) παρέχει τη συνάρτηση διαμόρφωσης του σήματος βασικής ζώνης (baseband signal). Το διαμορφωμένο σήμα στη συνέχεια μετατρέπεται σε μια ενδιάμεση συχνότητα, ενισχύεται και αποστέλλεται στον μετατροπέα συχνότητας προς τα άνω (up-converter), ο οποίος μετατρέπει το σήμα βασικής ζώνης στη χρησιμοποιούμενη συχνότητα του ραδιοσυστήματος. Το σήμα στη συνέχεια περνά από τον ενισχυτή υψηλής ισχύος (high-power amplifier) και μέσω κυματοδηγού (waveguide) οδηγείται στην κεραία για εκπομπή. Στο δέκτη ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία ώστε να ανακτάται η πληροφορία στην αρχική της μορφή. [8]



Σχήμα 2.5: Τυπικό ψηφιακό ασυρματικό σύστημα.

Οι συνήθεις χωρητικότητες των ψηφιακών ασυρματικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές ραδιοζεύξεις είναι οι εξής: 2 Mbits/s, 2x2 Mbits/s, 4x2 Mbits/s, 8x2 Mbits/s, 16x2 Mbits/s, 34 Mbits/s, 51 Mbits/s και 155 Mbits/s. [8]

Για να αξιολογήσουμε την καλή λειτουργία μιας ραδιοζεύξης ορίζουμε τις ακόλουθες παραμέτρους:

**BER** (*Bit Error Rate*): Ρυθμός λαθών στο χρόνο μέτρησης

**EFS** (*Error Free Seconds*): Δευτερόλεπτα χωρίς λάθη

**ES** (*Errored Seconds*): Δευτερόλεπτα με λάθη

**SES** (*Severely Errored Seconds*): Δευτερόλεπτα με πάρα πολλά λάθη

**DM** (*Degraded Minutes*): Πρώτα λεπτά με λάθη

**US** (*Unavailable Seconds*): Μη διαθέσιμα δευτερόλεπτα

Η επίδραση των λανθασμένων bits στη μετάδοση φωνής παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1.

Στις πρακτικές ραδιοζεύξεις, θεωρούμε συνήθως ως αποδεκτή τιμή του *BER* το  $10^{-3}$ . [8]

**Πίνακας 2.1:** Επίδραση των λαθεμένων bits στη μετάδοση φωνής [8]

Ρυθμός λαθών (BER)	Υποκειμενική εντύπωση των λαθεμένων bits
$10^{-6}$	Όχι αντιληπτή.
$10^{-5}$	Σποραδικοί κρουστικοί θόρυβοι στις χαμηλές στάθμες ομιλίας, μόλις αντιληπτή
$10^{-4}$	Σποραδικοί κρουστικοί θόρυβοι μερικών επιδράσεων, στις χαμηλές στάθμες ομιλίας
$10^{-3}$	Παρενόχληση σε κάθε στάθμη ομιλίας
$10^{-2}$	Υψηλός βαθμός παρενόχλησης, κατανόηση ομιλίας ουσιαστικά ελαττωμένη
$5 \times 10^{-2}$	Σχεδόν ακατανόητη

### 2.1.7 Επιλογή μέσου μετάδοσης

Ο τελικός στόχος σε κάθε τηλεπικοινωνιακή ζεύξη είναι η μετάδοση της πληροφορίας από το ένα σημείο στο άλλο με όσο το δυνατό λιγότερες αλλοιώσεις και χαμηλότερο κόστος. Αυτά αποτελούν και τον βασικό παράγοντα επιλογής του μέσου μετάδοσης. Από τη μία πλευρά έχουμε τη μείωση του κόστους και από την άλλη την εξασφάλιση ελάχιστης ποιότητας, προκειμένου να διασφαλίσει τα χαρακτηριστικά μετάδοσης. Το κόστος μετάδοσης εξαρτάται κυρίως από το είδος του μέσου μετάδοσης, αλλά και από την πολλαπλή εκμετάλλευσή του, δηλαδή από τη χρησιμοποίησή του για τη μετάδοση ταυτόχρονα μεγάλου αριθμού συνδρομητικών ζεύξεων. [7]

Τα βασικά χαρακτηριστικά, που χαρακτηρίζουν τα μέσα μετάδοσης, είναι τα ακόλουθα:

Εύρος ζώνης συχνοτήτων

Μέγιστο μήκος μέσου μετάδοσης

Ευαισθησία στο θόρυβο

Ευκολία χρήσης

Ασφάλεια

**Εύρος ζώνης συχνοτήτων:** Κάθε μέσο μετάδοσης επιτρέπει τη μετάδοση σε ορισμένη περιοχή συχνοτήτων, την περιοχή μετάδοσής του. Για τη μετάδοση της πληροφορίας χορηγείται ορισμένη ζώνη μέσα σε αυτή την περιοχή. Από την ζώνη συχνοτήτων, που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση, εξαρτάται και ο ρυθμός μετάδοσης (ταχύτητες) και, επομένως, ο όγκος της πληροφορίας, που μπορεί να μεταφέρεται. [7]

**Το μέγιστο μήκος του μέσου μετάδοσης:** Προσδιορίζει τη μέγιστη απόσταση, στην οποία μπορεί να μεταφερθεί η πληροφορία, χωρίς να γίνει χρήση αναμεταδοτών ή άλλων ενεργών στοιχείων που ενισχύουν το σήμα. Η μέγιστη απόσταση μεταφοράς της πληροφορίας εξαρτάται από τις απώλειες, που εισάγει το μέσο στα μεταδιδόμενα σήματα επικοινωνίας (πληροφορία). Θα πρέπει οι απώλειες να είναι τέτοιες, ώστε να επιτρέπεται η ορθή ανάκτηση ή αποκατάσταση του σήματος στην πλευρά του δέκτη, έτσι ώστε να μην υπάρχει αλλοίωση της μεταφερόμενης πληροφορίας. [7]

**Ευαισθησία στο θόρυβο:** Προσδιορίζει την ευαισθησία, την οποία παρουσιάζει το μέσο σε θορύβους (οποιοδήποτε σήμα πλην του μεταδιδόμενου), που παρενοχλούν το προς μετάδοση σήμα.



**Ευκολία χρήσης:** Η ευκολία με την οποία επιτυγχάνεται η εγκατάσταση του μέσου, οι διάφορες διασυνδέσεις, οι έλεγχοι και η συντήρησή του.

**Ασφάλεια:** Προσδιορίζει το πόσο ασφαλές είναι το μέσο μετάδοσης από ανεπιθύμητες παρεμβολές και υποκλοπές.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε, ότι από τα παραπάνω χαρακτηριστικά των μέσων μετάδοσης το εύρος ζώνης, η ευαισθησία στο θόρυβο και το μέγιστο μήκος δεν είναι ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, αλλά υπάρχει ισχυρή αλληλεξάρτηση μεταξύ τους.

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μέσων μετάδοσης εξετάζοντας την συμπεριφορά τους με βάση τα γενικά χαρακτηριστικά, που παρουσιάστηκαν παραπάνω. [7]

Τα χαρακτηριστικά των ασύρματων μέσων μετάδοσης, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

Χαρακτηριστικά	Οπτική Ίνα	Επίγειες ζεύξεις	Δορυφορικές ζεύξεις
Ευαισθησία στις παρεμβολές	Απρόσβλητη	Μεγάλη	Μεγάλη
Ασφάλεια	Μεγάλη	Χαμηλή. Απαιτείται κρυπτογράφηση της πληροφορίας	Χαμηλή. Απαιτείται κρυπτογράφηση της πληροφορίας
Δυνατότητα διασύνδεσης σημείου προς πολλά σημεία	Τεχνικά δεν υπάρχει πρόβλημα, όμως το κόστος παραμένει υψηλό	Χρησιμοποιούνται κυρίως για συνδέσεις σημείο σε σημείο	Υλοποιείται εύκολα
Διασύνδεση με τους χρήστες	Απαιτείται συνδρομητικό δίκτυο	Με κεραίες που εγκαθίστανται στους χρήστες	Με κεραίες που εγκαθίστανται στους χρήστες

Πίνακας 1 - Χαρακτηριστικά ασύρματων μέσων μετάδοσης και οπτικών ινών [7]

## 2.2 Είδη επικοινωνίας

Η διασύνδεση μεταξύ των πηγών και η μεταφορά της πληροφορίας έχει γίνει σήμερα επιτακτική ανάγκη. Υπάρχουν αναρίθμητες «ανάγκες» για μεταφορά και πρόσβαση κάθε είδους πληροφορίας, είτε αυτή είναι μονόπλευρη όπως συμβαίνει στα τηλεοπτικά

κανάλια και στους ραδιοφωνικούς σταθμούς, είτε αμφίπλευρη όπως συμβαίνει στα τηλεφωνικά δίκτυα, στα «δίκτυα υπολογιστών» κλπ.

Σε κάθε είδος επικοινωνίας εξυπηρετούνται και διαφορετικές ανάγκες. Η μονόπλευρη επικοινωνία έχει μορφή περισσότερο ενημερωτική, ψυχαγωγική, εκπαιδευτική δηλαδή εκ των πραγμάτων αποφασίζει η «πηγή» της πληροφορίας, την πληροφορία που θα διαθέσει. [7]

Στην αμφίδρομη επικοινωνία η πληροφορία λόγω του ότι πραγματοποιείται μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη γίνεται πληρέστερη, χρησιμότερη, ευέλικτη, «ασφαλέστερη» και γενικότερα έχει πλέον μία ολοκληρωμένη μορφή και αποτελεί μία αποτελεσματική λύση επικοινωνίας. Η δυνατότητα της ανταλλαγής πληροφορίας στην αμφίδρομη επικοινωνία προϋποθέτει εξοπλισμό και μία σειρά υλοποιήσεων αρκετά εξειδικευμένη, είτε αυτό έχει να κάνει με υλικό εξοπλισμό είτε με τεχνικό – λειτουργικό δυναμικό. Σε αυτήν την περίπτωση ο εξοπλισμός και γενικά η αρχιτεκτονική της επίτευξης της επικοινωνίας γίνεται πολυπλοκότερη. [7]

Στην αμφίδρομη επικοινωνία διακρίνουμε δύο γενικούς τρόπους επικοινωνίας.

A) Ο «εναλλάξ» (half) τρόπος στον οποίο η μία πλευρά ενεργεί ως πομπός ενώ η άλλη πλευρά ως λήπτης, όπως είναι ο τηλετύπο.

B) Η «ταυτόχρονη» (full) στην οποία και οι δύο πλευρές μπορούν να επικοινωνούν ταυτόχρονα όπως είναι τα τηλεφωνικά δίκτυα. [7]

Πέραν αυτού του τρόπου επικοινωνίας, σημαντικό ρόλο παίζουν, επίσης, ο όγκος, η ταχύτητα, το είδος της ανταλλαγής της πληροφορίας, αλλά και το αν εκτελείται σε πραγματικό χρόνο ή όχι. Εδώ, μπορούμε να πούμε ότι έχουμε δύο κατηγοριοποιήσεις της πληροφορίας, η οπτικοακουστική πληροφορία και η πληροφορία δεδομένων όπως είναι τα κείμενα, τα προγράμματα και άλλα.

Τέλος, το μέσο που χρησιμοποιείται για τη επίτευξη της ανταλλαγής πληροφοριών επιλέγεται σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες που έχει η κάθε πληροφορία. Υπάρχουν ακόμα σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή του μέσου όπως είναι το κόστος, συντήρησης, ασφάλεια, αξιοπιστία, αναβάθμιση, επεκτασιμότητα συμβατότητα, ευελιξία του μέσου που θα επιλεγεί. [7]

### **2.2.1 Το πρότυπο IEEE 802.11**

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο είναι αυτό στο οποίο ένας κινούμενος χρήστης μπορεί να συνδεθεί σε ένα τοπικό δίκτυο μέσω μια ασύρματης σύνδεσης. Το πρότυπο IEEE 802.11 περιγράφει τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Το

802.11 είναι μια οικογένεια προδιαγραφών για ασύρματα τοπικά δίκτυα που αναπτύχθηκαν από ομάδες εργασίας του ινστιτούτου ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών, το γνωστό institute of electrical and electronics engineers (IEEE). [7]

### 2.2.2 Χαρακτηριστικά ασύρματης τηλεπικοινωνίας

Με τον όρο ασύρματη τηλεπικοινωνία ή ραδιοζεύξεις, εννοούμε τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (τα οποία μεταφέρουν τις πληροφορίες), στον χώρο υπεράνω της επιφάνειας της γης. Ένα σύστημα ασύρματης τηλεπικοινωνίας αποτελείται από τα εξής στοιχεία (σχήμα 1.1):

τον **πομπό** (transmitter)

τη **γραμμή τροφοδοσίας** (feeder) του πομπού με την κεραία εκπομπής

την **κεραία εκπομπής** (transmitting antenna)

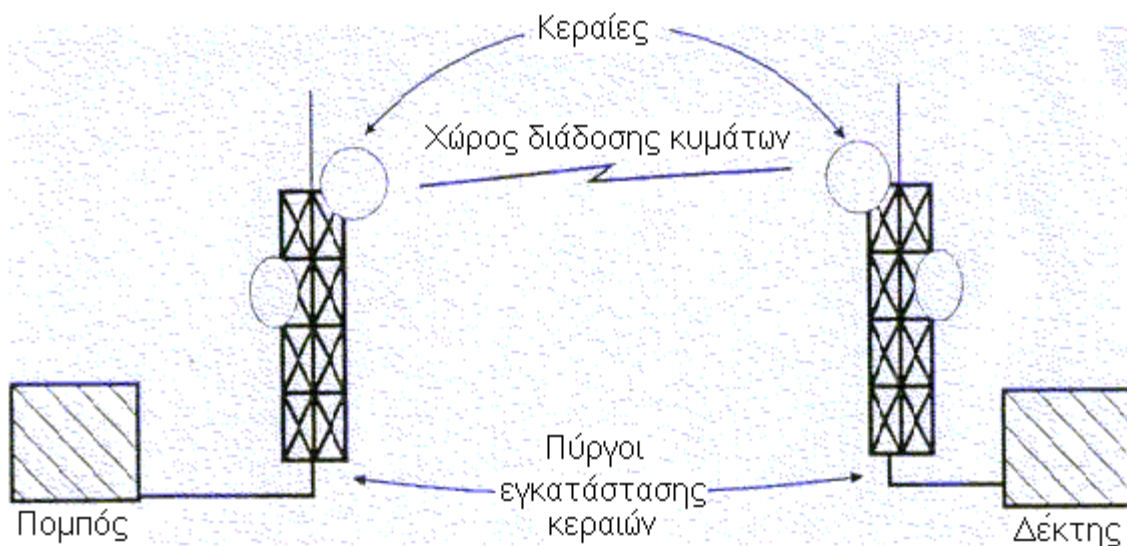
το **χώρο διαδόσεως** ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (path)

την **κεραία λήψεως** (receiving antenna)

τη **γραμμή σύνδεσης** (feeder) της κεραίας λήψεως με το δέκτη

το **δέκτη** (receiver)

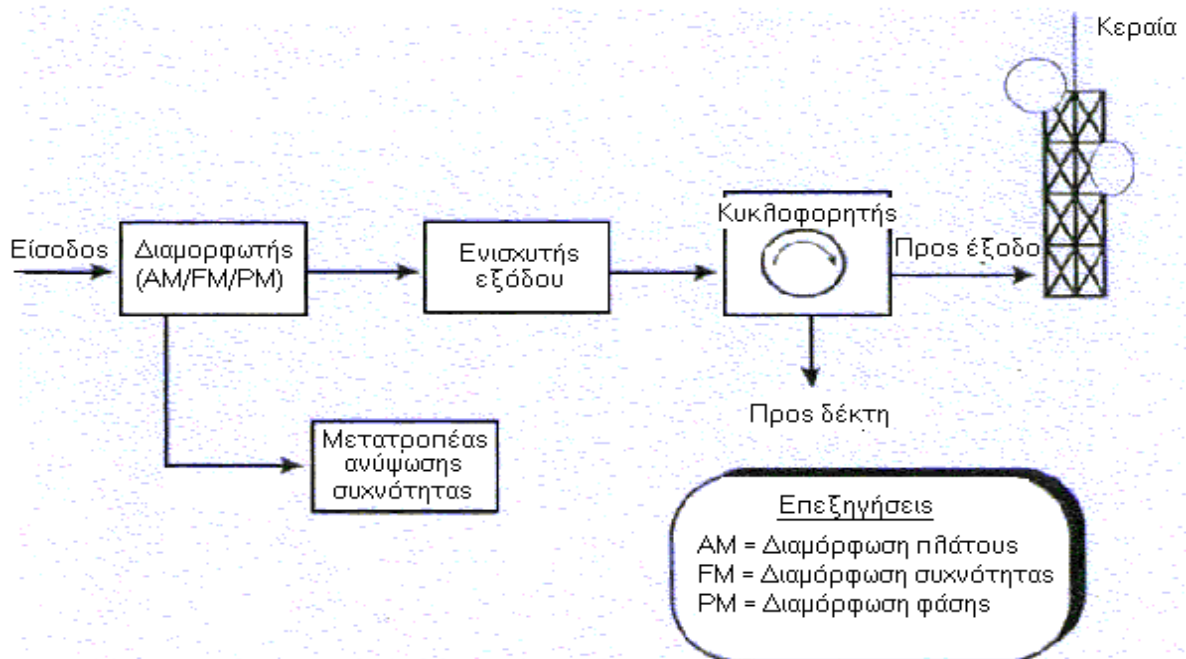
τους **πύργους εγκατάστασης** (tower) των κεραιών (όπου κρίνεται απαραίτητο) [8]



**Σχήμα 1.1:** Βασικά στοιχεία ενός ασύρματου ραδιοσυστήματος.

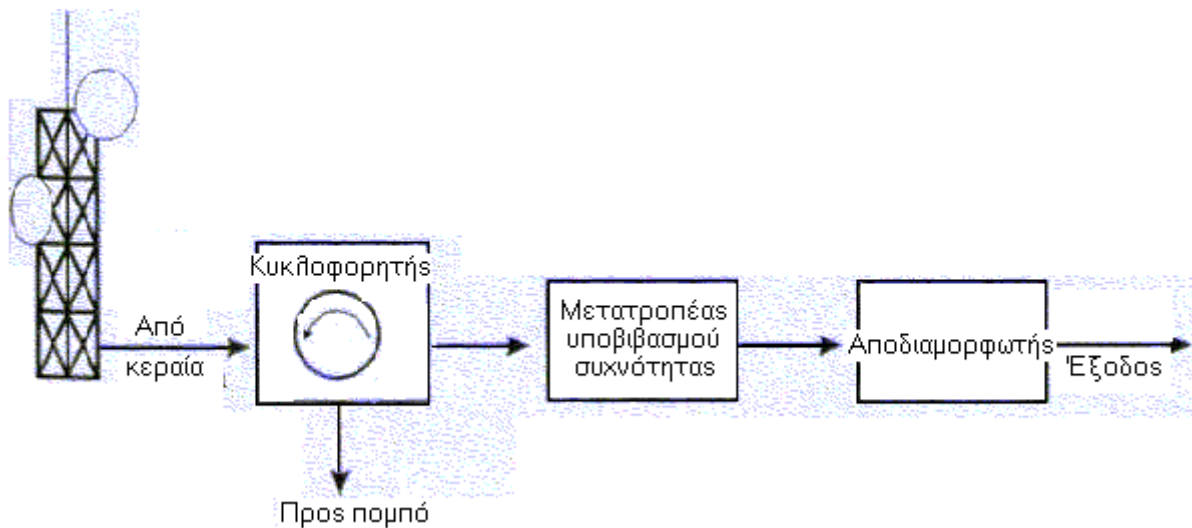
**Ο πομπός** (σχήμα 1.2) αποτελείται από τον διαμορφωτή (modulator) ο οποίος εφαρμόζει την προς μετάδοση πληροφορία σε ένα φέρον (carrier) σήμα, έναν προαιρετικό μετατροπέα συχνότητας (frequency up-converter) που ανυψώνει τη συχνότητα εισόδου – εξόδου, τον ενισχυτή εξόδου (output amplifier) ο οποίος ενισχύει το σήμα για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις και τον συζεύκτη κεραίας που χρησιμοποιεί έναν κυκλοφορητή [35]

(circulator) για να ενώσει ή να διαχωρίσει το λαμβανόμενο από το μεταδιδόμενο σήμα έτσι ώστε να χρησιμοποιείται η ίδια κεραία για εκπομπή και λήψη. [8]



**Σχήμα 1.2:** Βασικά στοιχεία ενός πομπού.

Ο δέκτης (σχήμα 1.3) αποτελείται από επίσης έναν κυκλοφορητή (circulator) για το διαχωρισμό του λαμβανόμενου από το μεταδιδόμενο σήμα χρησιμοποιώντας την ίδια κεραία, το μετατροπέα συχνότητας (frequency down-converter) για τον υποβιβασμό της συχνότητας προς τα κάτω και τον αποδιαμορφωτή (demodulator) ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανάκτηση της πληροφορίας από το φέρον κύμα. [8]



**Σχήμα 1.3:** Βασικά στοιχεία ενός δέκτη.

**Οι κεραιές** εκπομπής και λήψεως πρέπει να επιλέγονται έτσι, ώστε να παρέχουν βέλτιστη απόδοση, υψηλή αξιοπιστία στη μετάδοση, ευκολία στην επιλογή συχνότητας και να εναρμονίζονται με τις διεθνείς συστάσεις. Για μετάδοση σημείου προς σημείο (point to point) οι κεραιές είναι ισχυρά κατευθυντικές σχήματος παραβολικού ή χοάνης.

**Οι πύργοι εγκατάστασης** των κεραιών παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιτυχή διάδοση των ραδιοκυμάτων. Γι' αυτό, θα πρέπει να είναι ανυψωμένοι πάνω από τυχόν εμπόδια που υπάρχουν στη διαδρομή των ραδιοκυμάτων ώστε να εξασφαλίζεται η οπτική επαφή και να λαμβάνουν υπόψη τη σφαιρικότητα της γης. Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή ενός πύργου είναι το κόστος, οι περιορισμοί λόγω νομοθεσίας, η κίνηση αεροσκαφών στην περιοχή, οι συνθήκες του εδάφους, ο καιρός (φόρτιση λόγω ανέμου) και τα χαρακτηριστικά των κυματοδηγών.

**Η διάδοση** κατά μήκος των γραμμών τροφοδοσίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των γραμμών και των συνθέτων αντιστάσεων στα άκρα τους. Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την κεραιά εκπομπής στην κεραιά λήψεως εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των κεραιών εκπομπής και λήψεως και από τις φυσικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας όπου πραγματοποιείται η διάδοση. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάδοση στην ατμόσφαιρα, υφίστανται μεταβολές τόσο τα πλάτη όσο και οι φάσεις των ηλεκτρικών σημάτων. [8]

Για να μεταβιβαστεί η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια από την **κεραία εκπομπής** στην **κεραία λήψεως**, απαιτείται η συχνότητα των ρευμάτων που πραγματοποιούν την ακτινοβολία της ενέργειας να είναι αρκετά υψηλή και μεγαλύτερη ενός ορισμένου κατώτερου ορίου, το οποίο εξαρτάται από τις διαστάσεις των κεραιών. Επίσης ο χώρος υπεράνω της γης θεωρείται ως ένα μέσο ενιαίο, ομοιογενές και ισότροπο, έτσι ώστε μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή που παράγεται σε ένα σημείο του ελεύθερου χώρου, διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω από το σημείο αυτό. Συνεπώς για να πραγματοποιήσουμε ταυτόχρονα δύο ή περισσότερες ραδιοηλεκτρικές ζεύξεις, απαιτούνται ειδικά τεχνάσματα ώστε να διακρίνουμε τα σήματα της μίας ζεύξεως από αυτά της άλλης. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

Χρησιμοποίηση ζωνοπερατών φίλτρων, τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση χωρίς εξασθένηση κυματομορφών ορισμένων συχνοτήτων, ενώ εξασθενούν σημαντικά κυματομορφές άλλων συχνοτήτων. Για την πραγματοποίηση δύο ταυτόχρονων ραδιοζεύξεων, παράγονται δύο διαφορετικές φέρουσες συχνότητες και μετά την εκπομπή τους στον ελεύθερο χώρο υπάρχουν ταυτόχρονα και τα δύο ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Έτσι, τοποθετούμε στην είσοδο του δέκτη ένα φίλτρο, το οποίο επιτρέπει τη διέλευση

σημάτων της επιθυμητής συχνότητας που είναι ίση ή παραπλήσια εκείνης που παράγεται στον πομπό. [8]

Χρησιμοποίηση κατάλληλων κατευθυντικών κεραιών εκπομπής και λήψεως. Υπάρχουν κεραιές εκπομπής, οι οποίες εκπέμπουν ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά κύματα εντός ενός περιορισμένου κώνου, ενώ εκτός αυτού τα εκπεμπόμενα κύματα είναι τόσο εξασθενημένα που δεν επιδρούν σε άλλους δέκτες. Το ίδιο συμβαίνει και με τις κεραιές λήψεως. Η δυσκολία που προκύπτει από τον περιορισμό της ενέργειας εντός μιας προκαθορισμένης γωνίας, εξαρτάται από τις απαιτούμενες διαστάσεις των κεραιών σε συνάρτηση με τη συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Για παράδειγμα, η γωνία ακτινοβολίας μιας κεραιάς στο οριζόντιο επίπεδο, δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση  $\alpha = 60\lambda/l$  μοίρες, όπου  $\lambda$  είναι το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος και  $l$  η οριζόντια διάσταση της κεραιάς. Έτσι, για μια στενή δέσμη ακτινοβολίας της τάξεως της  $1$  μοίρας, απαιτείται  $l = 60\lambda$ . Συνεπώς αν η χρησιμοποιούμενη συχνότητα είναι  $f = 1$  MHz, τότε προκύπτει  $l = 18$  Km (!), ενώ αν  $f = 1$  GHz θα είναι  $l = 18$  m (ισχύει  $\lambda = c/f$ , όπου  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s είναι η ταχύτητα του φωτός). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για κεραιές μεγάλης κατευθυντικότητας πρέπει να χρησιμοποιούνται οι υψηλότερες συχνότητες του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων. [8]

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ορισμένης συχνότητας υφίστανται ισχυρή απόσβεση κατά τη διάδοσή τους πέραν ορισμένων αποστάσεων. Έτσι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα της ίδιας συχνότητας σε ταυτόχρονες ζεύξεις, σε περιοχές όμως που δεν βρίσκονται σε οπτική επαφή.

Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος ασύρματης τηλεπικοινωνίας, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εξής:

Όσο υψηλότερη είναι η φέρουσα συχνότητα, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης και τόσο μικρότερες οι διαστάσεις των κεραιών για ορισμένο κέρδος (gain) των κεραιών. Αυτό όμως συνεπάγεται μικρότερη απόδοση και αξιοπιστία των ενισχυτών. Μεγάλες κεραιές, σημαίνει μεγάλο κέρδος αλλά και αύξηση του κόστους του σταθμού. [8]

Η τοποθέτηση κεραιών σε ψηλούς πύργους ή σε ψηλά βουνά, έχει ως αποτέλεσμα την κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων αλλά και την αύξηση του κόστους κατασκευής και συντήρησης των σταθμών.

Η πραγματοποίηση ραδιοζεύξεων με μεγάλο εύρος ζώνης είναι επιθυμητή διότι αυξάνεται η ικανότητα του συστήματος, όμως πολλές φορές μια δευτερή παράλληλη ζεύξη μπορεί να αποτελεί μια καλύτερη οικονομικά και τεχνικά λύση. [8]



### 2.2.3 Φάσμα συχνοτήτων

Το φάσμα συχνοτήτων που χρησιμοποιείται στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες περιγράφεται στον πίνακα 1.1. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στον ελεύθερο χώρο (το κενό) με ταχύτητα που είναι σταθερή και ανεξάρτητη της συχνότητας και είναι ίση με  $c=3 \cdot 10^8$  m/s. Το μήκος κύματος  $\lambda$  του ηλεκτρομαγνητικού κύματος συχνότητας  $f$  δίνεται από τη σχέση  $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8/f$ , όπου  $\lambda$  δίνεται σε  $m$  και η συχνότητα  $f$  σε *Hertz*.

[8]

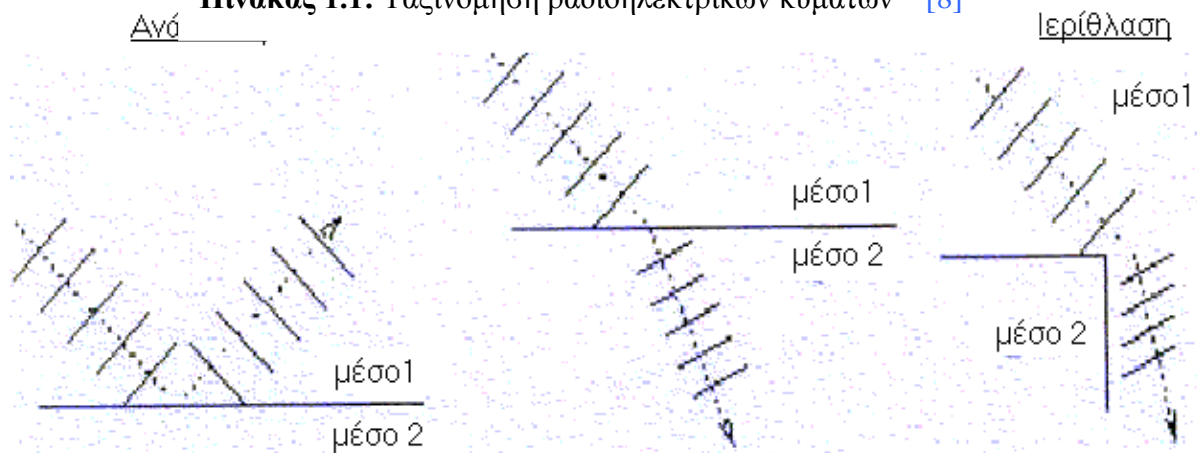
Οι υψηλότερες συχνότητες του φάσματος συχνοτήτων χρησιμοποιούνται γενικά σε ζεύξεις οπτικής επαφής. Για μικρότερες συχνότητες, ο περιορισμός της οπτικής επαφής έχει μικρότερη σημασία, επειδή τα κύματα αυτά εισχωρούν – λόγω του φαινομένου της περιθλάσεως (diffraction) – σε εκείνες τις περιοχές οι οποίες θα βρίσκονταν «υπό σκιάν». Το φαινόμενο της περιθλάσεως παίζει σημαντικό ρόλο στη ραδιοφωνία, αφού με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ραδιοφωνική κάλυψη περιοχών που βρίσκονται υπό τη «σκιά» βουνών, οικημάτων κλπ. Επί της τροχιάς των ραδιοηλεκτρικών ακτίνων και κατά τρόπο που εξαρτάται από τις χρησιμοποιούμενες συχνότητες επιδρούν και άλλα φαινόμενα, όπως ανάκλαση (reflection), διάθλαση (refraction), διάχυση (diffusion) και απορρόφηση (absorption). Μερικά από τα προαναφερθέντα φαινόμενα περιγράφονται στο σχήμα 1.4. [8]



Ζώνη συχνότητας	Μήκος κύματος	Ονομασία συχνότητας (κυμάτων)	Σύμβολο	Χαρακτηρισμός κυμάτων	Χρήση
3 – 30 KHz	100–10 Km	Πολύ χαμηλή (μυριομετρικά)	VLF (Very low freq.)		Τηλεπ/νίες μεγάλης αποστάσεως
30–300 KHz	10 – 1 Km	Χαμηλή (χιλιομετρικά)	LF (Low freq)	Μακρά	Ραδιοφωνία, Ραδιοναυσιπλοΐα
0,3 – 3 MHz	1Km – 100m	Μέση (εκατομετρικά)	MF (Medium freq.)	Μεσαία	Ραδιοφωνία
3 – 30 MHz	100 – 10 m	Υψηλή (δεκαμετρικά)	HF (High Frequency)	Βραχεία	Ασύρματη τηλεφωνία μεγάλων αποστάσεων
30 – 300 MHz	10 – 1 m	Πολύ υψηλή (μετρικά)	VHF (Very High Frequency)	Υπερβραχεία	FM Ραδιοφωνία, Τηλεόραση, Τηλεπ/νία μεταξύ κινητών σημείων, Ραδιοναυσιπλοΐα
0,3 – 3 GHz	100 – 10 cm	Εξαιρετικά υψηλή (δεκατομετρικά )	UHF (Ultra High Freq)	Μικροκύματα	Τηλεόραση, Τηλεπ/νία μεταξύ κινητών σημείων, Ραδιοναυσιπλοΐα, Ραντάρ

3 – 30 GHz	10 – 1 cm	Υπερύψηλη (Εκατο- στομετρικά)	SHF (Super High Freq)	Μικροκύματα	Ασύρματη τηλεφωνία, ραντάρ, δορυφορικές τηλεπ/νίες
30 – 300 GHz	10 – 1 mm	Υπερβολικά υπερύψηλη (χιλιοστομετρικ ά)	EHF (Extra High Freq.)		

**Πίνακας 1.1:** Ταξινόμηση ραδιοηλεκτρικών κυμάτων [8]



**Σχήμα 1.4:** Φαινόμενα ανάκλασης, διάθλασης και περίθλασης.

Η εξασθένιση (attenuation) των ραδιοηλεκτρικών κυμάτων είναι συνάρτηση της χρησιμοποιούμενης συχνότητας και οφείλεται στα συστατικά της ατμόσφαιρας. Για συχνότητες μικρότερες των 3 GHz περίπου, τα αέρια της ατμόσφαιρας δεν παράγουν εξασθένιση των κυμάτων. Όμως για συχνότητες άνω των 3 GHz, η εξασθένιση που οφείλεται στην απορρόφηση ενέργειας από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο και τους υδρατμούς, γίνεται αισθητή. Με την αύξηση της συχνότητας παρατηρείται και αύξηση της εξασθένισης, ενώ παράλληλα εμφανίζονται φαινόμενα «συντονισμού» για συχνότητες άνω των 20 GHz. Έτσι είναι δυνατόν σε ορισμένες συχνότητες άνω των 20 GHz, οι αποσβέσεις να είναι τόσο μεγάλες ώστε να προκαλούν διακοπή της ζεύξεως ακόμη και μικρού μήκους, της τάξεως μερικών km. Άλλοι παράγοντες όπως η βροχή, το χαλάζι, η ομίχλη και η νέφωση προκαλούν ισχυρές εξασθενήσεις στην περιοχή των μικροκυμάτων. [8]

Για ραδιοζεύξεις της τάξεως μερικών χιλιάδων km επί της επιφάνειας της γης, σημαντικό ρόλο παίζει η ιονόσφαιρα, δηλαδή εκείνη η περιοχή της ατμόσφαιρας που [42]

βρίσκεται σε ύψος μεταξύ περίπου 80 και 1000 km. Για συχνότητες μέχρι περίπου 30 MHz η ιονόσφαιρα δρα σαν κάτοπτρο ή καλύτερα σαν το μέσο που προκαλεί διάθλαση των ραδιοηλεκτρικών ακτίνων, δηλαδή προοδευτική κάμψη τους προς τα κάτω, ώστε οι ακτίνες να επιστρέφουν στη γη. Το ύψος όπου το κύμα υφίσταται ανάκλαση είναι συνάρτηση της συχνότητας του και της ηλεκτρονικής πυκνότητας της ιονόσφαιρας. Η ηλεκτρονική πυκνότητα εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και συνεπώς η ιονοσφαιρική διάδοση είναι συνάρτηση του ημερήσιου χρόνου και της εποχής του έτους. Άρα, για να είναι εφικτή μία ζεύξη πρέπει να γνωρίζουμε τη σύνθεση και το ύψος της ιονόσφαιρας, ώστε να μεταβάλλεται η συχνότητα ζεύξεως μέσα σε διάστημα λίγων ωρών.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η εκλογή συχνότητας είναι καθοριστικός παράγοντας για την υλοποίηση μιας ασύρματης ζεύξεως, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές μεταξύ των διαφόρων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. [8]

### **2.3 Που και γιατί πρέπει να χρησιμοποιούμε ασύρματη δικτύωση;**

Η χρήση ασύρματου μέσου μετάδοσης έχει μία σειρά από πλεονεκτήματα:

Κινητικότητα χρήστη

Οι χρήστες μπορούν να μετακινούνται εντός της εμβέλειας του ασύρματου δικτύου, δηλαδή σε χώρο που θα έχουν επαρκές σήμα, διατηρώντας την συνδεσιμότητα τους με αυτό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη παραγωγικότητα - αποτελεσματικότητα στο εργασιακό περιβάλλον και όχι μόνο.

Ευκολία, ευελιξία και απλότητα εγκατάστασης

Δεν χρειάζεται να εγκαταστήσουμε καλωδιώσεις μέσα από τοίχους και ταβάνια. Μπορεί να γίνει η δικτύωση σε μέρη όπου η καλωδίωση θα ήταν αδύνατη, ή μη επιθυμητή, όπως η δικτύωση γραφείων τα οποία βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους. Η εγκατάσταση στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να γίνει εύκολα αν ακολουθηθούν κάποιοι βασικοί κανόνες εγκατάστασης.

Κλιμάκωση, δυνατότητα επέκτασης

Τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να διαρθρωθούν σε ένα πλήθος από τοπολογίες, ώστε να ταιριάζουν στις απαιτήσεις των εφαρμογών. Οι τοπολογίες αλλάζουν εύκολα και επεκτείνονται από απλά δίκτυα με μικρό αριθμό χρηστών, ως μεγάλες δομές δικτύων με εκατοντάδες χρήστες και δυνατότητα περιαγωγής (roaming).

Κόστος

[43]

Παρόλο που το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι υψηλότερο σε σχέση με λύσεις ενσύρματης δικτύωσης, το κόστος για όλη τη διάρκεια ζωής της επένδυσης μπορεί να είναι μικρότερο, ιδιαίτερα σε δυναμικό περιβάλλον που απαιτεί συχνές αλλαγές, αναδιαρθρώσεις και μετακινήσεις. Επιπλέον το κόστος υλοποίησης - εγκατάστασης και συντήρησης - διαχείρισης του δικτύου είναι πολύ μικρό. Το σημαντικότερο κομμάτι του κόστους είναι η αγορά του εξοπλισμού.

#### Ταχύτητες μετάδοσης

Όσο αναπτύσσεται η τεχνολογία γίνεται δυνατή η μετάδοση μεγαλύτερων ρυθμών δεδομένων. Ήδη ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, από τα 2Mbps που μπορούσαν να επιτευχθούν αρχικά, έφτασε σήμερα σε ταχύτητες πάνω από 100Mbps ενώ ήδη έχουν εξαγγελθεί ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες.

#### Αξιοπιστία - ανεξαρτησία

Ένα ασύρματο δίκτυο κατάλληλα διαμορφωμένο μπορεί να έχει μεγάλη αξιοπιστία. Έτσι μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να εργάζεται όταν συμβαίνουν διακοπές ρεύματος και να περιλαμβάνει πολλές εναλλακτικές διαδρομές.

#### Εμβέλεια

Η εμβέλεια ενός ασύρματου δικτύου σε περιβάλλον γραφείου μπορεί να είναι μερικές δεκάδες μέτρα. Τα ραδιοκύματα σε εσωτερικό χώρο έχουν να διαπεράσουν τοίχους και οροφές οπότε υφίστανται σημαντική απόσβεση. Σε ανοικτό χώρο όπου υπάρχει οπτική επαφή ανάμεσα στις ασύρματες συσκευές, οι αποστάσεις που μπορεί να καλυφθούν είναι μεγαλύτερες.

#### Συμβατότητα με το υπάρχον δίκτυο

Τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα έχουν προτυποποιημένο τρόπο σύνδεσης με τα υπάρχοντα ενσύρματα δίκτυα. Έτσι, η προσθήκη ασύρματης δικτύωσης σε υπάρχουσες δομές δικτύων μπορεί να γίνει με τον ευκολότερο τρόπο. Πολλές φορές δε αποτελούν επέκταση ενός ενσύρματου δικτύου.

## 2.4 Που δεν χρειάζεται ασύρματη δικτύωση;

Η χρήση ασύρματης τεχνολογίας, σε καμία περίπτωση δεν παραγκωνίζει τις λύσεις ενσύρματης δικτύωσης. Οι δύο οικογένειες τεχνολογιών είναι συμπληρωματικές και όχι ανταγωνιστικές. Δεν πρέπει να γίνεται χρήση της ασύρματης τεχνολογίας στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Όταν ο χρήστης έχει κατευθείαν εύκολη πρόσβαση στο ενσύρματο δίκτυο, για παράδειγμα η σύνδεση ενός - δύο υπολογιστών που βρίσκονται δίπλα - δίπλα σε ένα γραφείο με ένα απλό ethernet καλώδιο.
- Στις περιπτώσεις όπου ο χρήστης - εφαρμογή απαιτεί αρκετά μεγάλο ρυθμό μετάδοσης, όπου δεν μπορεί να καλυφθεί από το ασύρματο δίκτυο. Έτσι για παράδειγμα εάν θέλουμε μία διασύνδεση με ταχύτητα 1Gbps, μπορούμε να την υλοποιήσουμε με πολύ χαμηλό κόστος με συσκευές που να υποστηρίζουν GigabitEthernet και την κατάλληλη καλωδίωση. Η ασύρματη τεχνολογία προς το παρόν δεν προβλέπεται να φτάσει αυτές τις ταχύτητες. Επιπλέον ήδη έχουν κυκλοφορήσει λύσεις ενσύρματης δικτύωσης που φτάνουν στα 10Gbps αν και δεν είναι κοινή ακόμα η χρήση τους.
- Σε δίκτυα που απαιτούν μεγάλο βαθμό ασφαλείας, οι ενσύρματες λύσεις είναι σαφώς καλύτερες. Σε ένα καλώδιο το οποίο είναι προστατευμένο κάτω από ψευδοπατώματα, δεν είναι δυνατή η φυσική πρόσβαση στο καλώδιο προκειμένου να γίνει υποκλοπή. Αντίθετα, στην περίπτωση ασύρματης υλοποίησης, επειδή δεν είναι δυνατό να περιορίσουμε τα ραδιοκύματα, είναι εύκολο να γίνει ανίχνευση της μεταδιδόμενης πληροφορίας. Σε περίπτωση δε, που η πληροφορία δεν είναι κωδικοποιημένη μπορεί να γίνει ανάκτηση της. Για να φτάσουν σε παρόμοιο βαθμό ασφαλείας τα ασύρματα δίκτυα, πρέπει να εφαρμοστούν σε αυτά περίπλοκες τεχνικές αυθεντικοποίησης και κωδικοποίησης και μάλιστα σε επίπεδο εφαρμογής. Άλλωστε αυτός είναι και ένας από τους λόγους που δεν χρησιμοποιούνται σε κρίσιμες στρατιωτικές εφαρμογές οι συμβατικές ασύρματες τεχνολογίες (για παράδειγμα επικοινωνία συσκευών, εφαρμογών, προσωπικού, σε ένα πολεμικό πλοίο ή εντός μιας στρατιωτικής βάσης).
- Σε περιοχές που έχουν μεγάλο ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα προβληματικές και μη αξιόπιστες συνδέσεις.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΚΕΡΑΙΕΣ

### 3.1 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

#### 3.1.1 Εξισώσεις Maxwell

Τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και η θεωρία των κεραιών βασίζονται στις εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες συσχετίζουν την πυκνότητα ηλεκτρικής ροής  $\mathbf{D}$ , την πυκνότητα μαγνητικής ροής  $\mathbf{B}$ , την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $\mathbf{E}$  και την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$  με την πυκνότητα της εντάσεως του ρεύματος  $\mathbf{J}$  και την πυκνότητα φορτίου  $\rho$ :

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.1.1)$$

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

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

όπου τα εμφανιζόμενα βαθμωτά και διανυσματικά μεγέθη είναι σημειακές συναρτήσεις του χρόνου. [Σημειώνεται ότι τα διανύσματα συμβολίζονται με έντονα (**bold**) γράμματα].

[8]

Για ένα γραμμικό, ισότροπο και ομοιογενές μέσο:

Το  $\mathbf{D}$  είναι ανάλογο του  $\mathbf{E}$  και το  $\mathbf{B}$  ανάλογο του  $\mathbf{H}$ :  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$  και  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ , όπου  $\varepsilon$  είναι η διηλεκτρική σταθερά και  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου.

Οι τιμές τους στο κενό είναι  $\varepsilon_0 = (36\pi \cdot 10^9)^{-1} \text{ F/m}$  και  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ .

Σε ένα μη γραμμικό μέσο το  $\varepsilon$  και το  $\mu$  είναι συναρτήσεις του  $\mathbf{E}$  και του  $\mathbf{H}$ , σε ένα ανισοτροπικό μέσο διαφέρουν εξαρτούμενα από τη διεύθυνση του πεδίου, ενώ σε ένα ανομοιογενές μέσο είναι σημειακές συναρτήσεις. [8]

Η κυματική εξίσωση στον ελεύθερο χώρο, δηλαδή σε ένα μέσο γραμμικό, ισότροπικό, ομοιογενές, άνευ φορτίων και ρευμάτων, μπορεί να εξαχθεί από τις εξισώσεις του Maxwell θέτοντας  $\mathbf{J}=0$  και  $\rho=0$ .

[46]

Έτσι, προκύπτουν η διανυσματική κυματική εξίσωση του ηλεκτρικού πεδίου:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (3.1.2)$$

και του μαγνητικού πεδίου:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (3.1.3)$$

Για πεδία που μεταβάλλονται ημιτονοειδώς ως προς τον χρόνο και για κύματα στον ελεύθερο χώρο, η κυματική εξίσωση (3.1.2) μετατρέπεται – με αντικατάσταση της  $\partial^2/\partial t^2$  με την  $-\omega^2$ , στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu\epsilon \mathbf{E} = 0 \quad (3.1.4)$$

ή ακόμη:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (3.1.5)$$

όπου  $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon} = \omega/c$ , ονομάζεται **σταθερά διάδοσης** ή **κυματικός αριθμός** στον ελεύθερο χώρο,  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$  είναι η ταχύτητα του φωτός στον ελεύθερο χώρο ίση με  $3 \cdot 10^8$  m/sec και  $\mathbf{E}(x,y,z)$  είναι τώρα μια μιγαδική διανυσματική συνάρτηση χώρου (phasor) ανεξάρτητη του χρόνου. Η εξίσωση (3.1.5) είναι γνωστή σαν εξίσωση του **Helmholtz**. [8]

Αν υποθέσουμε ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $\mathbf{E}$  είναι συνάρτηση μόνο του  $z$  και επιπλέον έχει μόνο τη συνιστώσα  $E_x$  τότε η (3.1.5) απλουστεύεται στη μονοδιάστατη κυματική εξίσωση:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k^2 E_x = 0 \quad (3.1.6)$$

Μία λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι η:

$$E_x(z) = A e^{-jkz} \quad (3.1.7)$$

Εάν εισάγουμε και τη μεταβολή ως προς τον χρόνο, πολλαπλασιάζοντας επί  $e^{j\omega t}$ , το ηλεκτρικό πεδίο δίνεται από τη σχέση:

$$E_x(z,t)=\text{Re}[Ae^{j(\omega t-kz)}]=A \cos(\omega t-kz)=E_{x0} \cos(\omega t-kz) \quad (3.1.8)$$

όπου  $E_{x0}$  είναι η τιμή του  $E_x(z,t)$  για  $z=0$  και  $t=0$  (το *Re* σημαίνει *Real Part*, δηλαδή το πραγματικό μέρος του μιγαδικού). Ο όρος  $Ae^{j\omega t-kz}$  παριστάνει ένα επίπεδο κύμα που οδεύει κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα  $z$  με σταθερή ταχύτητα  $c=\omega/k$ . Η περίοδος του συνημιτονοειδούς αυτού κύματος κατά μήκος του άξονα  $z$  ονομάζεται μήκος κύματος  $\lambda$  και ισχύει η σχέση  $k\lambda=2\pi$ , απ' όπου προκύπτει η σχέση  $\lambda=2\pi/k=(2\pi/\omega)c=c/f$  και η  $k=2\pi/\lambda$ . Έτσι, σε κάθε σημείο του χώρου, έχουμε μια ημιτονοειδή μεταβολή ως προς το χρόνο με περίοδο  $T=1/f$  και σε κάθε χρονική στιγμή  $t$  έχουμε μια ημιτονοειδή μεταβολή στον χώρο με περίοδο  $\lambda$ . [8]

Αντίστοιχα, για την ένταση του μαγνητικού πεδίου προκύπτει:

$$\mathbf{H} = \mathbf{a}_y \frac{E_{x0}}{\eta} e^{j(\omega t-kz)} \quad (3.1.9)$$

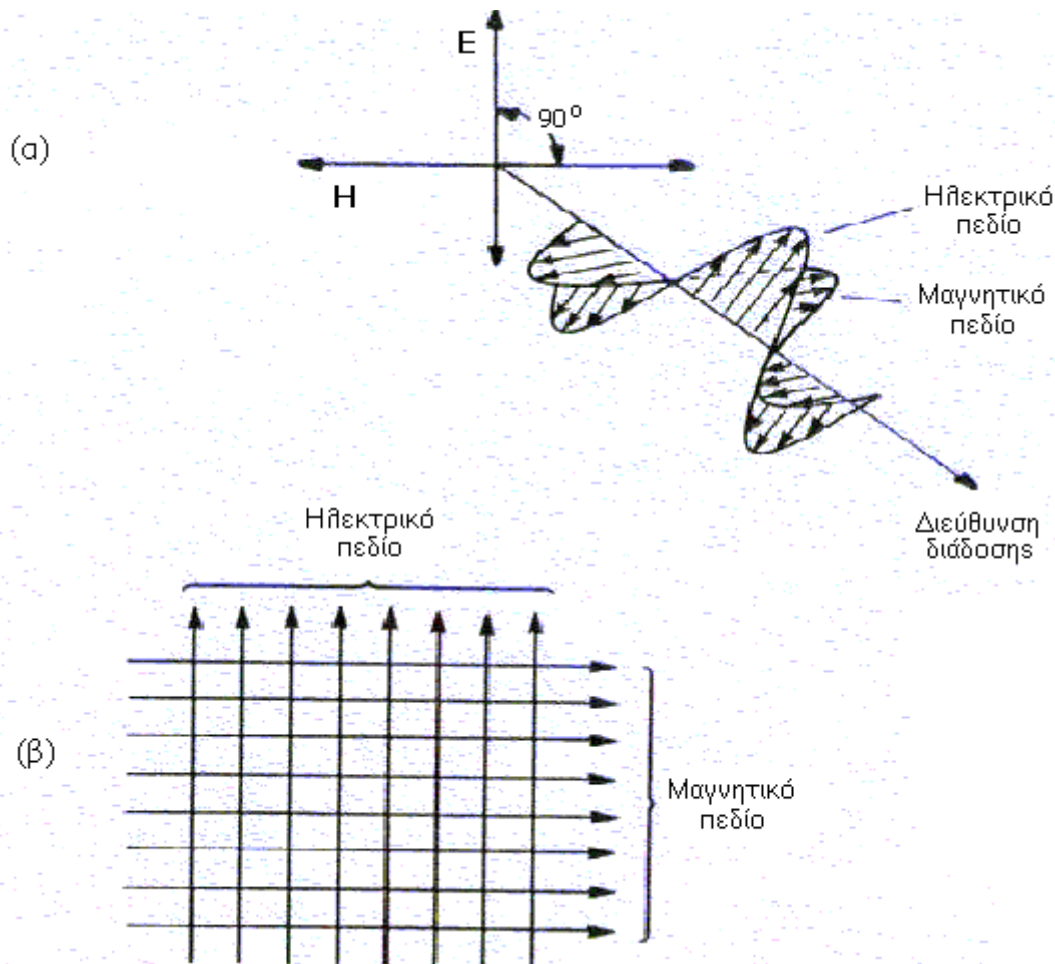
όπου  $\mathbf{a}_y$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κατά τον άξονα  $y$  και  $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}=120\pi = 377\Omega$  είναι η χαρακτηριστική αντίσταση του ελεύθερου χώρου (του κενού).

Αν θεωρήσουμε βαθμωτά μεγέθη η (3.1.9) γίνεται:

$$H_y = \frac{1}{\eta} E_x \quad (3.1.10)$$

Παρατηρούμε ότι στο επίπεδο κύμα, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (σχήμα 3.1.1):





**Σχήμα 3.1.1:** α) Διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Β) Πρόσωση του κύματος σε μεγάλη απόσταση από την πηγή. [8]

### 3.1.2 Ηλεκτρομαγνητική ισχύς

Ας θεωρήσουμε έναν οποιονδήποτε όγκο  $V$  που περικλείεται από την κλειστή επιφάνεια  $S$ . Το μέσον εντός του  $V$  θεωρείται ισοτροπικό και ομοιογενές με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon$ , μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  και αγωγιμότητα  $\sigma$ . Η στιγμιαία ροή ισχύος δια μέσου της κλειστής επιφάνειας  $S$  δίνεται από τη σχέση:

$$\oint_S \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S} = \oint_S \mathbf{E} \times \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left( \frac{\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}}{2} + \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{D}}{2} \right) dV - \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV \quad (3.1.11)$$

Στην παραπάνω εξίσωση οι όροι  $\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}/2$  και  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{D}/2$  παριστάνουν πυκνότητα ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο μαγνητικό και στο ηλεκτρικό πεδίο στον χώρο  $V$ :

$$W_{\mu} = \int_V \frac{\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}}{2} dV = \int_V \frac{\mu}{2} \mathbf{H}^2 dV \quad (3.1.12)$$

$$W_e = \int_V \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{D}}{2} dV = \int_V \frac{\varepsilon}{2} \mathbf{E}^2 dV \quad (3.1.13)$$

Ο όρος  $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \sigma E^2$  δηλώνει την ισχύ απωλειών ανά μονάδα όγκου στον χώρο  $V$ .

Επομένως η εξίσωση (3.1.11) δηλώνει ότι η στιγμιαία ροή ισχύος διαμέσου της κλειστής επιφάνειας  $S$  ισούται με την ταχύτητα μείωσης της αποθηκευμένης ενέργειας στο πεδίο στον χώρο που περικλείεται από την  $S$  μείον την ισχύ απωλειών στον όγκο  $V$ . Το διάνυσμα  $\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$  ονομάζεται **διάνυσμα του Poynting** και δίνει τη στιγμιαία ροή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας. Η ροή ενέργειας πραγματοποιείται προς τη διεύθυνση που είναι κάθετη στα διανύσματα  $\mathbf{E}$  και  $\mathbf{H}$ , δηλαδή κατά τη διεύθυνση διάδοσης. [8]

Στις περισσότερες περιπτώσεις θεωρίας και πρακτικής των κεραιών, βασική σημασία έχει η μέση τιμή της επιφανειακής πυκνότητας ισχύος κατά τη χρονική περίοδο ενός κύκλου και όχι η στιγμιαία τιμή της. [8]

Αυτό οδηγεί στον ορισμό ενός μιγαδικού διανύσματος Poynting:

$$\mathbf{P}_c = \frac{1}{2} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \quad (3.1.14)$$

το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μέσης χρονικής τιμής της επιφανειακής πυκνότητας ισχύος:

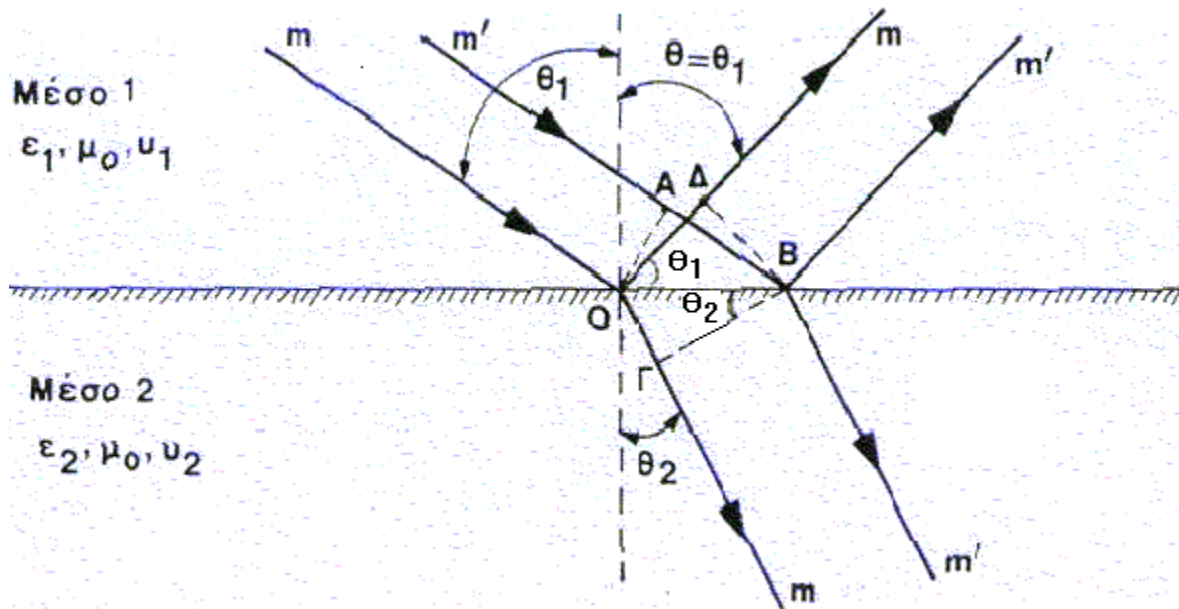
$$\mathbf{P}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \quad (3.1.15)$$

Η μέση χρονική τιμή του διανύσματος Poynting για την περίπτωση του επιπέδου κύματος με μοναδιαία συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου την  $E_x(z)$  στον ελεύθερο χώρο δίνεται από τη σχέση: [8]

$$\mathbf{P}_{av} = \frac{1}{2} \frac{E_{xo}^2}{\eta} \quad (3.1.15a)$$

### 3.1.3 Ανάκλαση και διάθλαση επιπέδου κύματος επί τέλειου διηλεκτρικού

Έστω ότι ένα επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε επιφάνεια η οποία διαχωρίζει δύο διαφορετικά ηλεκτρικώς μέσα και η οποία δεν είναι παράλληλη προς το επίπεδο το καθοριζόμενο από τα πεδία  $\mathbf{E}$  και  $\mathbf{H}$ . Τότε μέρος του κύματος θα ανακλασθεί και μέρος του κύματος θα μεταδοθεί υφιστάμενο όμως διάθλαση, δηλαδή η διεύθυνση διάδοσης του θα μεταβληθεί (σχήμα 3.1.2).



**Σχήμα 3.1.2:** Παράσταση μεταδιδόμενων και ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών ακτίνων. [8]

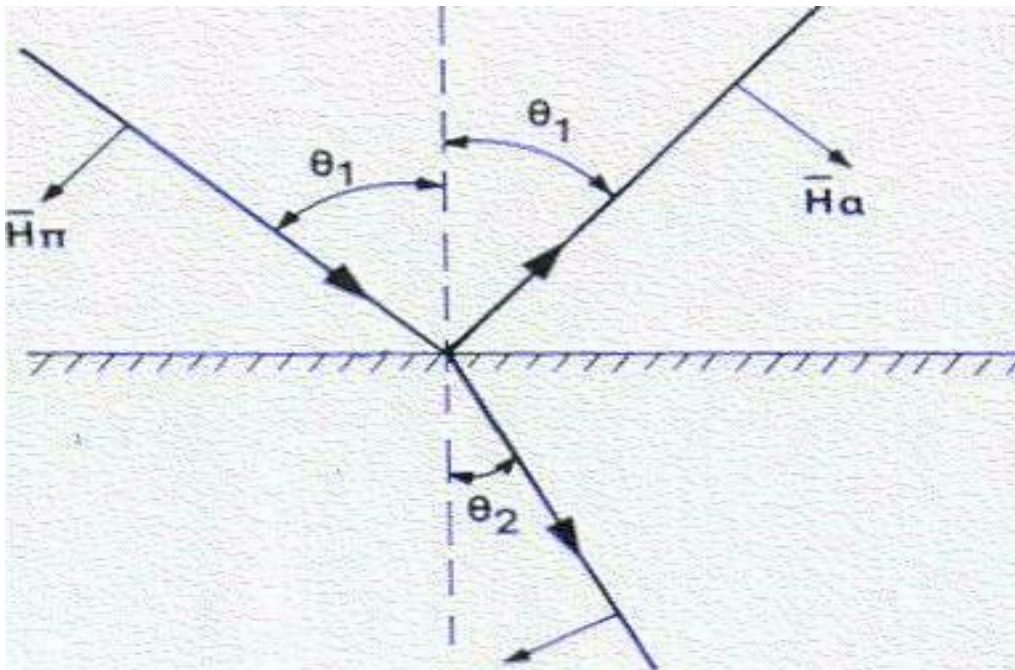
Η εξίσωση που συνδέει τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  και τη γωνία διάθλασης  $\theta_2$  δίνεται από το **νόμο του Snell**:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1}} \quad (3.1.16)$$

Επίσης από το σχήμα προκύπτει ότι  $OA=AB$  και συνεπώς  $\sin \theta = \sin \theta_1$  ή  $\theta = \theta_1$ , δηλαδή η γωνία ανάκλασης  $\theta$  είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$ . [8]

Θα εξετάσουμε παρακάτω δύο περιπτώσεις ανάκλασης και διάθλασης: η μία αναφέρεται στην περίπτωση κατά την οποία το ηλεκτρικό πεδίο  $\mathbf{E}$  είναι κάθετο επί του επιπέδου πρόσπτωσης (**οριζόντια πόλωση**) και η άλλη όπου το  $\mathbf{E}$  κείται επί του επιπέδου πρόσπτωσης (**κατακόρυφη πόλωση**). [8]

**Α. Οριζόντια πόλωση:** Στην περίπτωση αυτή το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  είναι κάθετο επί του επιπέδου πρόσπτωσης και παράλληλο προς την επιφάνεια διαχωρισμού (Σχήμα 3.1.3):



**Σχήμα 3.1.3:** Παράσταση πεδίων στην περίπτωση οριζόντιας πόλωσης.

Σύμφωνα με την οριακή συνθήκη κατά την οποία η εφαπτομενική συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  είναι συνεχής επί της επιφάνειας διαχωρισμού των δύο μέσων, θα ισχύει  $E_{\pi} + E_{\alpha} = E_{\mu}$  ή  $E_{\mu}/E_{\pi} = 1 + (E_{\alpha}/E_{\pi})$  και αποδεικνύεται ότι ισχύει η ακόλουθη **εξίσωση του Fresnel:** [8]

$$\frac{E_{\alpha}}{E_{\pi}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_2}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_2} \quad (3.1.17)$$

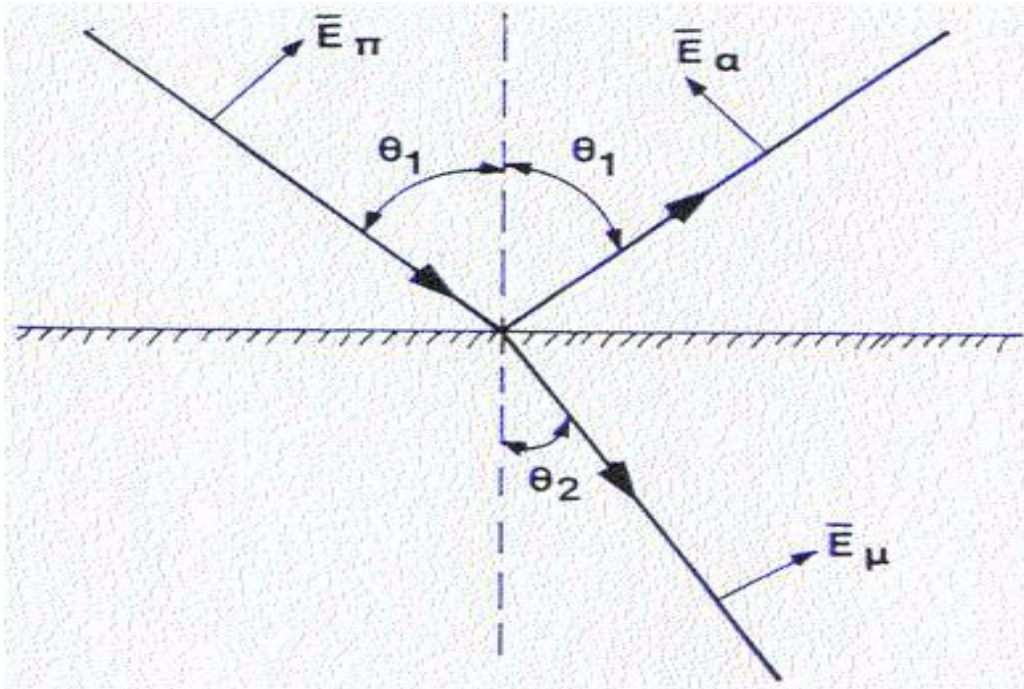
Αν θέσουμε  $R_o = E_{\alpha}/E_{\pi}$  και αν λάβουμε υπόψη το νόμο του Snell, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί διαφορετικά:

$$R_o = \frac{E_{\alpha}}{E_{\pi}} = \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1 - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_1 - \sin^2 \theta_1}} \quad (3.1.18)$$

όπου  $R_o$  είναι ο **συντελεστής ανάκλασης** για κάθετη ή οριζόντια πόλωση, ενώ  $T_o = E_{\mu} / E_{\pi}$  είναι ο **συντελεστής μετάδοσης:** [8]

$$T_o = 1 + R_o = \frac{2 \cos \theta_1}{\cos \theta_1 + \sqrt{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) - \sin^2 \theta_1}} \quad (3.1.19)$$

**B. Κατακόρυφη πόλωση:** Το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  κείται στο επίπεδο πρόσπτωσης (σχήμα 3.1.4):



**Σχήμα 3.1.4:** Παράσταση πεδίων στην περίπτωση παράλληλης πόλωσης. [8]

Σύμφωνα με την οριακή συνθήκη κατά την οποία η εφαπτομενική συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  είναι συνεχής επί της διαχωριστικής επιφάνειας, θα ισχύει  $(E_{\pi} - E_{\alpha}) \cos \theta_1 = E_{\mu} \cos \theta_2$  ή  $E_{\mu} / E_{\pi} = [1 - (E_{\alpha} / E_{\pi})] (\cos \theta_1 / \cos \theta_2)$  και αποδεικνύεται ότι ισχύει η ακόλουθη **εξίσωση του Fresnel**: [8]

$$\frac{E_{\alpha}}{E_{\pi}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_2}{\sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_2} \quad (3.1.20)$$

Από το νόμο του Snell και θέτοντας  $E_{\alpha} / E_{\pi} = R_k$  η εξίσωση (3.20) μετατρέπεται στην ακόλουθη:

$$R_k = \frac{E_{\alpha}}{E_{\pi}} = \frac{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) \cos \theta_1 - \sqrt{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) - \sin^2 \theta_1}}{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) \cos \theta_1 + \sqrt{(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) - \sin^2 \theta_1}} \quad (3.1.21)$$

όπου  $R_k$  είναι ο **συντελεστής ανάκλασης** για παράλληλη ή κατακόρυφη πόλωση. Όσον αφορά τον **συντελεστή μετάδοσης** για παράλληλη ή κατακόρυφη πόλωση, δίνεται από την εξίσωση:

$$T_{\kappa} = \frac{E_{\mu}}{E_{\pi}} = (1 - R_{\kappa}) \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \quad (3.1.22)$$

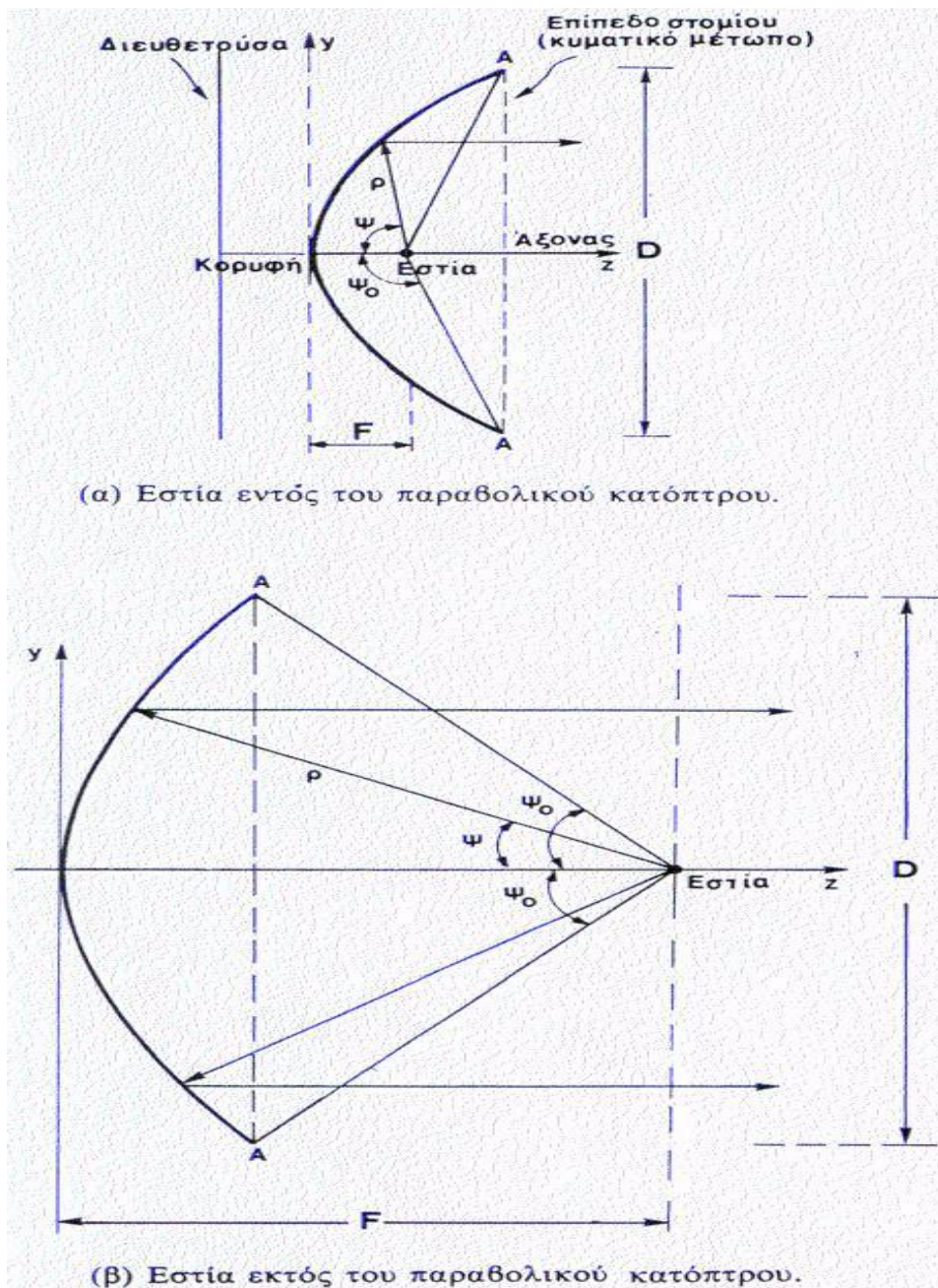
Από την εξίσωση (3.1.21) προκύπτει ότι για μια ορισμένη τιμή της γωνίας  $\theta_1$ , ο αριθμητής και συνεπώς ο συντελεστής ανάκλασης  $R_{\kappa}$  μηδενίζεται. Προκύπτει ότι αυτό συμβαίνει όταν: [8]

$$\tan \theta_1 = \frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1}} \quad (3.1.23)$$

Όταν ισχύει η παραπάνω σχέση, η γωνία  $\theta_1$  ονομάζεται **γωνία Brewster**. Συνεπώς, όταν έχουμε πρόσπτωση κύματος κατακόρυφης πόλωσης με γωνία πρόσπτωσης ίση με τη γωνία Brewster, δεν υφίσταται ανακλώμενο κύμα. Η ιδιότητα αυτή χρησιμοποιείται στην πράξη προς αποφυγή ανεπιθύμητων ανακλάσεων. Από την εξίσωση (3.1.18) προκύπτει ότι ο αριθμητής δεν μπορεί να μηδενιστεί και συνεπώς δεν υπάρχει αντίστοιχη γωνία Brewster για κάθετη ή οριζόντια πόλωση. Στην περίπτωση αυτή, για κάθε τιμή της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta_1$  το κύμα θα υφίσταται ανάκλαση. [8]

### 3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΡΑΙΩΝ

Η κεραία, τόσο σαν **πομπός** όσο και σαν **δέκτης**, είναι ένα σύστημα αγωγών κατάλληλης μορφής και διαστάσεων, το οποίο διαρρέεται από ρεύματα υψηλής συχνότητας. Ένας συνηθισμένος τύπος κεραίας που χρησιμοποιείται ευρέως σε επίγειες ασυρματικές ζεύξεις είναι η παραβολική κεραία και παριστάνεται στο σχήμα 3.2.1. [8]



Σχήμα 3.2.1: Δισδιάστατη παράσταση παραβολικού ανακλαστήρα. [8]

Η ακτινοβολούμενη συνολική μέση ισχύς από μία κεραία, μπορεί γενικά να οριστεί ως η καταναλισκόμενη ισχύς σε μια υποθετική, ισοδύναμη αντίσταση, η οποία ονομάζεται **αντίσταση ακτινοβολίας**. Εάν  $I$  είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος στην κεραία, η αντίσταση ακτινοβολίας ορίζεται από τη σχέση: [8]

$$W_a = \frac{1}{2} R_a I^2 \quad (3.2.1)$$

Η **συνάρτηση κατευθυντικότητας**  $D(\theta, \phi)$  μιας κεραίας κατά τη διεύθυνση  $(\theta, \phi)$  ορίζεται ως ο λόγος της ακτινοβολούμενης ισχύος ανά μονάδα στερεάς γωνίας κατά τη διεύθυνση  $(\theta, \phi)$  δια της ακτινοβολούμενης συνολικής μέσης ισχύος ανά μονάδα στερεάς γωνίας.

Η ισχύς ανά μονάδα στερεάς γωνίας  $U(\theta, \phi)$  ορίζεται ως:

$$U(\theta, \phi) = r^2 P_r \quad (3.2.2)$$

όπου  $P_r$  είναι η **πυκνότητα ισχύος** σε απόσταση  $r$  από την κεραία. Η ακτινοβολούμενη συνολική μέση ισχύς ανά μονάδα στερεάς γωνίας δίνεται από τη σχέση: [8]

$$U_o = \frac{W_a}{4\pi} \quad (3.2.3)$$

η οποία είναι και η ακτινοβολούμενη ισχύς ανά μονάδα στερεάς γωνίας από μια υποθετική ισοτροπική κεραία, που ακτινοβολεί ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις την αυτή συνολική ισχύ  $W_a$ , όπως και η θεωρούμενη κεραία. Συνεπώς η συνάρτηση κατευθυντικότητας δίνεται γενικότερα από τη σχέση: [8]

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_o} = \frac{U(\theta, \phi)}{W_a / 4\pi} = \frac{4\pi r^2 P_r}{W_a} \quad (3.2.4)$$

Η μέγιστη τιμή της συναρτήσεως κατευθυντικότητας, δηλαδή η τιμή της κατά τη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας, η οποία είναι και πρακτικώς πιο χρήσιμη, ονομάζεται **κατευθυντικότητα της κεραίας**. Η κατευθυντικότητα είναι ένα μέτρο του πόσο αποτελεσματική είναι η κεραία στο να συγκεντρώνει σε μια δεδομένη κατεύθυνση την ακτινοβολούμενη ισχύ. [8]

Συχνά αντί της συνάρτησης κατευθυντικότητας χρησιμοποιείται η **συνάρτηση κέρδους**, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας ισχύος σε ένα ορισμένο σημείο (μέση χρονική τιμή του διανύσματος Poynting) σε μία δεδομένη κατεύθυνση, προς την πυκνότητα ισχύος στο ίδιο σημείο, που παρέχεται από μια ισοτροπική κεραία που



τροφοδοτείται με την ίδια συνολική ισχύ εισόδου, με την οποία τροφοδοτείται και η κεραία της οποίας ζητείται η συνάρτηση κέρδους.

Δηλαδή η συνάρτηση κέρδους  $G(\theta, \phi)$  δίνεται από τη σχέση:

$$G(\theta, \phi) = \frac{P_r}{(W_a + W_{a\pi}) / 4\pi r^2} = \frac{4\pi r^2 P_r}{W_T} \quad (3.2.5)$$

όπου  $W_T = W_a + W_{a\pi}$  είναι η συνολική ισχύς τροφοδοσίας της κεραίας και η  $W_{a\pi}$  περιλαμβάνει όλες τις ωμικές **απώλειες**. Η μέγιστη τιμή της συνάρτησης κέρδους ορίζει το λεγόμενο **κέρδος** της κεραίας: [8]

$$G = \frac{4\pi r^2 P_{r(\mu\epsilon\gamma.)}}{W_T} \quad (3.2.6)$$

Συχνά το κέρδος, όπως και η κατευθυντικότητα, εκφράζονται σε decibel, δηλαδή:

$$G = 10 \log \frac{4\pi r^2 P_{r(\mu\epsilon\gamma.)}}{W_T} \quad (3.2.7)$$

Όταν είναι γνωστό, το κέρδος μιας κεραίας σε μια δεδομένη κατεύθυνση, η μέση χρονική στιγμή του διανύσματος Poynting (πυκνότητα ισχύος) σε εκείνη τη κατεύθυνση, σε απόσταση  $r$  από την κεραία εκπομπής, προσδιορίζεται [με βάση την εξίσωση (3.2.6)] από την έκφραση: [8]

$$P_r = \frac{W_T G}{4\pi r^2} \quad (3.2.8)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κέρδος μιας κεραίας εξαρτάται από τη συχνότητα εκπομπής.

Ο λόγος της ακτινοβολούμενης ισχύος από την κεραία προς τη συνολική ισχύ εισόδου στην κεραία ορίζει τον **βαθμό αποδόσεως** (radiation efficiency) της κεραίας:

$$a = \frac{W_a}{W_T} = \frac{G}{D} \quad (3.2.9)$$

Η ικανότητα μιας κεραίας λήψης να απορροφά ισχύ χαρακτηρίζεται από την παράμετρο  $A_R$ , η οποία καλείται **ενεργός επιφάνεια της κεραίας**. Η  $A_R$  ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της απορροφούμενης ισχύος  $W_R$  στο φορτίο υπό συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και προσαρμογής και της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας  $P$  του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος: [8]

$$A_R = \frac{W_R}{P} \quad (3.2.10)$$

[57]

Ο λόγος ενεργός επιφάνεια προς κατευθυντικότητα (ή κέρδος) μιας κεραίας δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{A}{D} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (3.2.11)$$

ή για  $R_{a\pi}=0$ , από τη σχέση:

$$\frac{A}{G} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (3.2.12) [8]$$

### 3.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΣΤΟΝ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΧΩΡΟ

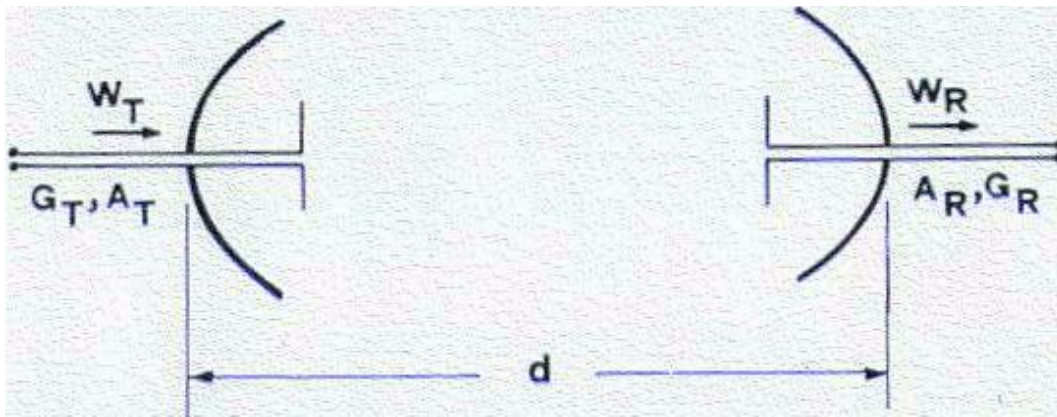
Τα μεγέθη που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα μας επιτρέπουν να προσδιορίσουμε τη σχέση μεταξύ της ισχύος  $W_R$ , την οποία η κεραία λήψης παρέχει στον **δέκτη** και της ισχύος  $W_T$ , την οποία η πηγή παρέχει στην κεραία εκπομπής, σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Η σχέση αυτή εκφράζεται από την εξίσωση του **Friis** και την εξίσωση **ραντάρ**, ανάλογα με τον τύπο του συστήματος. [8]

#### 3.3.1 Εξίσωση του Friis. Απώλεια μετάδοσης

Από τις εξισώσεις (3.2.9) και (3.2.10) και για απόσταση  $d$  μεταξύ των κεραιών τοποθετημένων στον ελεύθερο χώρο (σχήμα 3.3.1), η ισχύς στην είσοδο του **δέκτη** δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W_R = A_R P = A_R \frac{W_T G_T}{4\pi d^2} = W_T \frac{A_R G_T}{4\pi d^2} \quad (3.3.1)$$

όπου  $G_T$  είναι το κέρδος της κεραίας εκπομπής. Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή σαν **εξίσωση μετάδοσης** στον ελεύθερο χώρο ή **εξίσωση του Friis**. [8]



**Σχήμα 3.3.1:** Σχηματική παράσταση προσανατολισμού κεραιών εκπομπής και λήψης. [8]

Η εξίσωση (3.3.1) μπορεί να γραφεί σε διαφορετικές μορφές αν λάβουμε υπόψη τις εξισώσεις (3.2.12) και (3.2.13) για τα αντίστοιχα μεγέθη εκπομπής και λήψης. Έτσι καταλήγουμε στις ακόλουθες σχέσεις στις οποίες εμφανίζονται μόνον τα κέρδη ή μόνον οι ενεργές επιφάνειες των δύο κεραιών: [8]

$$W_R = W_T \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (3.3.2)$$

$$W_R = W_T \frac{A_T A_R}{d^2 \lambda^2} \quad (3.3.3)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις προσδιορίστηκαν δεχόμενοι ότι στην **κεραία λήψης**, σε απόσταση  $d$  από την κεραία εκπομπής φτάνει ένα επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν η απόσταση  $d$  είναι μικρή. Οι εξισώσεις αυτές ισχύουν μόνο για τον ελεύθερο χώρο, όταν οι αποστάσεις μεταξύ των κεραιών και από τον γήινο χώρο είναι τέτοιες ώστε να ισχύει η σχέση: [8]

$$d > 2a^2/\lambda \quad (3.3.4)$$

όπου  $a$  είναι η μεγαλύτερη γραμμική διάσταση μιας των δύο κεραιών.

Από την εξίσωση (3.3.2) προκύπτει ο λόγος  $W_T/W_R = (4\pi d)^2 / (G_T G_R \lambda^2)$  ο οποίος ονομάζεται **απώλεια μετάδοσης** (transmission loss) στον ελεύθερο χώρο και συνήθως εκφράζεται σε *dB*: [8]

$$A_0(dB) = 10 \log \frac{W_T}{W_R} = A_b(dB) - G_{R(dB)} - G_{T(dB)} \quad (3.3.5)$$

όπου:

$$A_b = 10 \log(4\pi d / \lambda)^2 \quad (3.3.6)$$

ονομάζεται **βασική απώλεια μετάδοσης** (basic transmission loss). Εάν εκφράσουμε την απόσταση  $d$  σε *km* και το μήκος κύματος  $\lambda$  σε εκατοστά, η εξίσωση (3.3.5) μετατρέπεται στην ακόλουθη πρακτική έκφραση:

$$A_0(dB) = 122 + 20 \log d(km) - G_{R(dB)} - G_{T(dB)} - 20 \log \lambda_{(cm)} \quad (3.3.7)$$

Από τη σχέση (3.2.12) και αντικαθιστώντας το  $\lambda$  με  $c/f$  προκύπτει η σχέση:

$$G = A \frac{4\pi f^2}{c^2} \quad (3.3.8)$$

η οποία δηλώνει ότι για μια κεραία δεδομένης γεωμετρικής επιφάνειας και αποδοτικότητας, το κέρδος θα είναι τόσο μεγαλύτερο όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα. [8]

Επίσης, από τις σχέσεις (3.3.7) και (3.3.8) προκύπτει ότι η **απώλεια μετάδοσης** στον ελεύθερο χώρο μεταξύ δύο κεραιών σε σταθερή απόσταση και δεδομένης γεωμετρικής επιφάνειας και αποδοτικότητας, ελαττώνεται αυξανόμενης της συχνότητας.

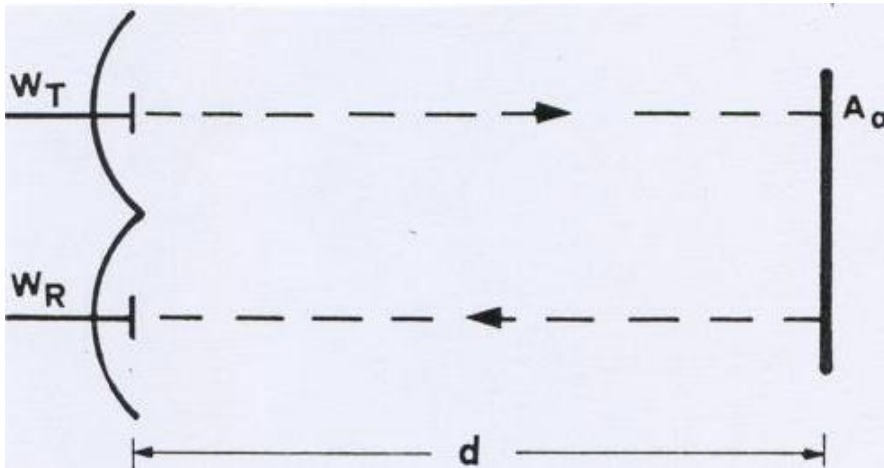
Αν θεωρήσουμε ότι  $W_{R(min)}$  είναι η ελάχιστη ισχύς λήψης στους ακροδέκτες της κεραίας λήψης ικανή να δώσει ακόμη ένα σήμα χρήσιμο και  $W_T$  είναι η ισχύς μετάδοσης στους ακροδέκτες της κεραίας εκπομπής, τότε η **μέγιστη απόσταση μετάδοσης** στον ελεύθερο χώρο, όπως προκύπτει από την εξίσωση (3.3.2), θα είναι: [8]

$$d_o = \frac{\sqrt{G_T G_R \lambda^2}}{4\pi} \sqrt{\frac{W_T}{W_{R(min)}}} \quad (3.3.9)$$

Συνεπώς, η απόσταση **ασυρματικής ζεύξης** στον ελεύθερο χώρο θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση της απόστασης που καθορίζεται από την εξίσωση (3.3.9).

### 3.3.2 Εξίσωση RADAR

Ας θεωρήσουμε ένα σύστημα radar το οποίο, σε απλουστευμένη μορφή, αποτελείται από μία κεραία εκπομπής ισχύος  $W_T$  και κέρδους  $G_T$  και μία κεραία λήψης ισχύος  $W_R$  και κέρδους  $G_R$  (σχήμα 3.3.2). Η εξίσωση που δίνει την ισχύ η οποία λαμβάνεται στο δέκτη του radar από έναν στόχο, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη μελέτη των συστημάτων radar. [8]



**Σχήμα 3.3.2:** Σχηματική παράσταση κεραίας εκπομπής, λήψης και αντικειμένου (κατόπτρου).

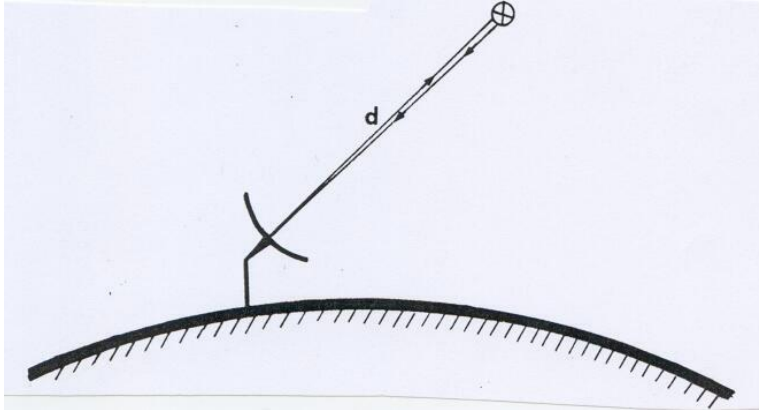
Η πυκνότητα ισχύος στη θέση που βρίσκεται το αντικείμενο, δηλαδή σε απόσταση  $d$  από την κεραία εκπομπής δίνεται από την εξίσωση (3.2.8):

$$P = \frac{W_T G_T}{4\pi d^2} \quad (3.3.10)$$

Αν το αντικείμενο είναι ένα παθητικό κάτοπτρο που παρουσιάζει μια ενεργό επιφάνεια  $A_a$ , η απορροφούμενη από αυτό ισχύς θα είναι:

$$W = \frac{W_T G_T}{4\pi d^2} A_a \quad (3.3.11)$$

Γενικά, κάθε αντικείμενο παρουσιάζει μια ισοδύναμη επιφάνεια ή **εγκάρσια διατομή radar  $\sigma$** , η οποία ορίζεται ως η επιφάνεια που απορροφά όλη την προσπίπτουσα επ' αυτής ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και την επαναντανακλά ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις έτσι ώστε να παράγει στον δέκτη του radar το ίδιο σήμα, το οποίο δίνει και το πραγματικό αντικείμενο (σχήμα 3.3.3). [8]



**Σχήμα 3.3.3:** Σχηματική παράσταση κεραίας εκπομπής-λήψης και αντικειμένου σκέδασης. [8]

Για παράδειγμα, για μια μεγάλη μεταλλική σφαίρα διαμέτρου  $D$ , που αντανακλά όλη την απορροφούμενη ισχύ, η εγκάρσια διατομή radar είναι ίση με τη φυσική εγκάρσια διατομή, δηλαδή το εμβαδόν κύκλου διαμέτρου  $D$  ( $\pi D^2/4$ ). Για ένα αεροπλάνο, η εγκάρσια διατομή radar κυμαίνεται εντός μιας ευρείας ζώνης τιμών, που εξαρτάται από τη διεύθυνση του προσπίπτοντος κύματος. Για ένα αεροπλάνο μέσου μεγέθους η εγκάρσια διατομή radar έχει μια ελάχιστη τιμή περίπου  $20 \text{ m}^2$ . [8]

Με βάση τα παραπάνω, η απορροφούμενη από το αντικείμενο ισχύς και ανακλώμενη εκ νέου ισοτροπικά από αυτό, δηλαδή η **ισχύς σκέδασης**, θα δίνεται από τη σχέση:

$$W = \frac{W_T G_T}{4\pi d^2} \sigma \quad (3.3.12)$$

Η πυκνότητα ισχύος στην κεραία λήψης δίνεται από τη σχέση:

$$P' = \frac{W_T G_T}{4\pi d^2} \frac{\sigma}{4\pi d^2} \quad (3.3.13)$$

Συνεπώς, εάν η κεραία λήψης έχει κέρδος  $G_R$  και ενεργό επιφάνεια  $A_R$ , η ισχύς λήψης θα είναι:

$$W_R = \frac{W_T G_T \sigma}{(4\pi d^2)^2} A_R \quad (3.3.14)$$

και αν λάβουμε υπόψη την εξίσωση (3.2.12), καταλήγουμε στην τελική σχέση: [62]

$$W_R = W_T \frac{G_T G_R \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 d^4} \quad (3.3.15)$$

Η **μέγιστη απόσταση ανιχνεύσεως** ή **εμβέλεια του radar** μπορεί να υπολογιστεί από την προηγούμενη σχέση. Αν θεωρήσουμε ότι  $W_{R(min)}$  είναι η ελάχιστη δυνατή ισχύς λήψης, η οποία θα έδινε ακόμη σήμα αντιληπτό στον **δέκτη**, τότε η μέγιστη εμβέλεια του radar είναι: [8]

$$d_{max} = \sqrt[4]{\frac{\sigma G_T G_R \lambda^2 W_T}{(4\pi)^3 W_{R(min)}}} \quad (3.3.16)$$

Η παραπάνω έκφραση μπορεί να εκφραστεί και συναρτήσει του ελάχιστου διακρινόμενου λόγου σήματος προς θόρυβο  $(S/N)_{min}$ . Αφού  $W_R=S$  και  $N=kTB$ , όπου  $k$  είναι η σταθερά του Boltzmann,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία που εξαρτάται από τη θερμοκρασία θορύβου του **δέκτη** και  $B$  το εύρος ζώνης συχνοτήτων του συστήματος, η εξίσωση (3.3.16) μπορεί να γραφεί με τη μορφή: [8]

$$d_{max} = \sqrt[4]{\frac{W_T G_T G_R \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 kTB(S/N)_{min}}} \quad (3.3.17)$$

όπου  $kT_o=4 \cdot 10^{-21}$  Joule και  $T_o=290$  °K.

### 3.3.3 Θερμοκρασία κεραίας

Μία κεραία μπορεί να θεωρηθεί και ως **δέκτης** θορύβου, αφού κάθε αντικείμενο που έχει θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν ακτινοβολεί. Η ποσότητα της ακτινοβολούμενης ισχύος μπορεί να παρασταθεί από μια ισοδύναμη θερμοκρασία. [8]

Η ισχύς θερμικού θορύβου ανά μονάδα εύρους ζώνης συχνοτήτων που είναι διαθέσιμη στους ακροδέκτες μιας αντίστασης  $R$  η οποία βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T$ , δίνεται από τη σχέση:

$$w(f) = kT \quad (3.3.18)$$

όπου  $k$  είναι η σταθερά του Boltzmann και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία. [8]

Για μια πλήρως προσαρμοσμένη κεραία η οποία δεν παρουσιάζει ωμικές **απώλειες**, η ισχύς θορύβου ανά μονάδα εύρους ζώνης που μεταφέρεται στο φορτίο είναι:

$$w = kT_a \quad (3.3.19)$$

όπου  $T_a$  είναι η **θερμοκρασία της κεραίας** ή θερμοκρασία της αντίστασης ακτινοβολίας της κεραίας, που προσδιορίζεται από τη θερμοκρασία του χώρου ή αντικειμένου προς το οποίο η κεραία είναι προσανατολισμένη. [8]

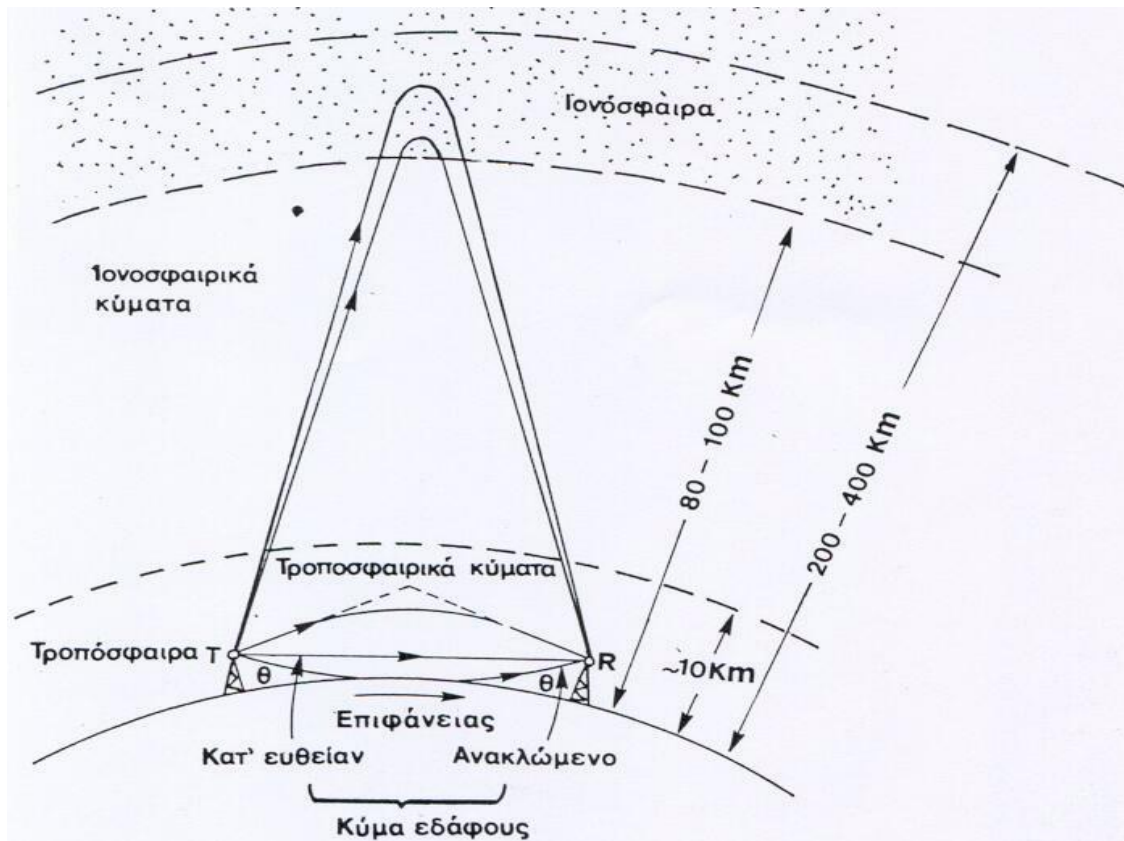
### 3.4 ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΤΟΝ ΓΗΙΝΟ ΧΩΡΟ

#### 3.4.1 Εισαγωγή

Η **διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον πραγματικό χώρο** είναι διαφορετική από αυτήν στον ελεύθερο χώρο. Αυτό οφείλεται στην παρουσία της **γήινης επιφάνειας** και του σφαιρικού της σχήματος, στην ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας καθώς και στην παρουσία μιας ιονισμένης περιοχής (ιονόσφαιρα) που εκτείνεται από μερικές δεκάδες μέχρι μερικές εκατοντάδες *km* υπεράνω της γης. Επομένως η μετάδοση από την κεραία εκπομπής προς την κεραία λήψης γίνεται με διάφορους τρόπους ή **μηχανισμούς διάδοσης**. Αυτοί οι μηχανισμοί διάδοσης παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4.1. [8]

[64]





Σχήμα 3.4.1: Μηχανισμοί διάδοσης στον πραγματικό χώρο. [8]

Μηχανισμοί διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Ο πιο απλός μηχανισμός διάδοσης είναι η **διάδοση στον ελεύθερο χώρο**. Οι ιδιότητές του είναι ομοιογενείς, ιστροπικές, γραμμικές και χωρίς **απώλειες** (μπορούμε γενικά να θεωρήσουμε ότι ο ελεύθερος χώρος προσεγγίζει τον ατμοσφαιρικό χώρο). Στον ελεύθερο χώρο το κύμα διαδίδεται επί ευθείας γραμμής, συνεπώς και στον ατμοσφαιρικό χώρο το κύμα μεταδίδεται επί ευθείας γραμμής. Έτσι, έχουμε ένα μηχανισμό διάδοσης στον γήινο χώρο που ονομάζεται **κατ' ευθείαν** κύμα (direct wave), το οποίο όταν διέρχεται στην ατμόσφαιρα μπορεί να υποστεί διάθλαση (refraction), σκέδαση (scattering) ή ακόμη και περιστροφή του επιπέδου πόλωσης. [8]

Ένας άλλος μηχανισμός διάδοσης είναι η διάδοση **δι' ανάκλασης επί του εδάφους** (ground-reflected wave). Το εύρος του ανακλώμενου κύματος προσδιορίζεται από τις ιδιότητες της γήινης επιφάνειας στο σημείο όπου πραγματοποιείται η ανάκλαση. Το κατευθείαν και το ανακλώμενο κύμα ονομάζονται **κύματα χώρου** (space waves). [8]

Ένας τρίτος μηχανισμός διάδοσης είναι το **κύμα επιφάνειας** (surface wave) το οποίο ακολουθεί την πορεία (συνήθως ανώμαλη) του εδάφους. Το κύμα επιφάνειας επιτρέπει [65]

τη διάδοση των ραδιοηλεκτρικών σημάτων συχνότητας *LF* και *MF* (μακρά και μεσαία κύματα), - τα οποία είναι συνήθως ραδιοφωνικά σήματα – έτσι ώστε τα φυσικά εμπόδια όπως όρη, λόφοι, κτίρια κλπ., να μην εμποδίζουν τη διάδοσή τους. [8]

Η εξασθένιση του κύματος επιφάνειας εξαρτάται άμεσα από τις σταθερές αγωγιμότητας και διηλεκτρικότητας του εδάφους κατά μήκος του οποίου οδεύει. Όταν οι κεραιές **πομπού** και **δέκτη** είναι τοποθετημένες επί του εδάφους, το κατευθείαν και το ανακλώμενο κύμα απαλείφονται μεταξύ τους και έτσι η μετάδοση των ραδιοηλεκτρικών κυμάτων οφείλεται αποκλειστικά στο κύμα επιφάνειας. Τα **κύματα χώρου** και τα **κύματα επιφάνειας** ονομάζονται **κύματα εδάφους** (ground waves). [8]

Η τροπόσφαιρα, δηλαδή η περιοχή της ατμόσφαιρας που εκτείνεται από την επιφάνεια της γης μέχρι ένα ύψος *10 km* περίπου, προσφέρει ένα ακόμη μηχανισμό διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η τροπόσφαιρα μπορεί να θεωρηθεί ως μέσον γραμμικό, απολύτως διηλεκτρικό και μη ομοιογενές με ιδιότητες που καθορίζονται από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Ο δείκτης διάθλασης της τροπόσφαιρας (refractive index) μειώνεται με το ύψος έχοντας διαφορές μεταβολές οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τη διάθλαση, -γεγονός που συνεπάγεται τη ραδιοηλεκτρική επικοινωνία μεταξύ σημείων που βρίσκονται πέραν του γεωμετρικού ορίζοντα – και ακόμη σκέδαση καθώς και μερικές ή ολικές ανακλάσεις. Στην κατώτερη τροπόσφαιρα οι μετεωρολογικές συνθήκες είναι τέτοιες, ώστε να παρουσιάζεται απότομη μείωση του δείκτη διάθλασης με το ύψος. Σχηματίζεται τότε ένα είδος κυματοδηγού που ονομάζεται **τροποσφαιρικός κυματοδηγός** (duct), που επιτρέπει τη διάδοση μέχρι *800* περίπου *km* από τον πομπό. Όλα τα αναφερθέντα κύματα, που φτάνουν στον δέκτη κατόπιν διάθλασης, σκέδασης ή ανάκλασης στην τροπόσφαιρα ονομάζονται **τροποσφαιρικά κύματα** (tropospheric waves).

Τέλος, τα κύματα που φτάνουν στον δέκτη μετά από ανάκλαση ή σκέδαση στην ιονόσφαιρα ονομάζονται **ουράνια κύματα** (sky waves) ή **ιονοσφαιρικά κύματα** (ionospheric waves). Η ιονόσφαιρα είναι εκείνη η περιοχή της ατμόσφαιρας που εκτείνεται από *80* μέχρι *600 km* περίπου υπεράνω του εδάφους. Μέσω της ιονόσφαιρας προκαλείται διάθλαση (ανάκλαση) των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η οποία επιτρέπει τη διάδοση των βραχέων κυμάτων (*3-30 MHz*) μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε απόσταση μερικών χιλιάδων *km*. Έτσι, με μία μόνο ανάκλαση από την ιονόσφαιρα μπορεί να καλυφθεί μία απόσταση περίπου *4000 km*. Εκτός από τη διάθλαση, η ιονόσφαιρα μπορεί να προκαλέσει και σκέδαση των κυμάτων η οποία οφείλεται στην παρουσία ζωνών ανώμαλου ιονισμού. Το φαινόμενο αυτό επιτρέπει τη διάδοση των

υπερβραχέων κυμάτων (30-100 MHz) για την πραγματοποίηση ζεύξεων της τάξης των 2000 km. [8]

Όλες οι συνεισφορές των κυμάτων που φτάνουν στον δέκτη μέσω των διαφόρων μηχανισμών που εξετάσαμε παραπάνω προστίθενται διανυσματικώς, σύμφωνα με τα σχετικά πλάτη τους και τις σχετικές φάσεις τους. Τα πλάτη εξαρτώνται από την κατευθυντικότητα της κεραίας, από τους δείκτες διάθλασης των διαφόρων περιοχών, από τους συντελεστές ανάκλασης και από τον παράγοντα απόσβεσης. Οι σχετικές φάσεις εξαρτώνται από τις διαθλαστικές και ανακλαστικές ιδιότητες του γήινου χώρου και από τις αποστάσεις των διαφόρων διαδρομών διάδοσης από τον **πομπό** στον **δέκτη**. [8]

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η ατμόσφαιρα δρα ως ένα μέσο που προκαλεί εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων λόγω απορρόφησης ενέργειας. Η εξασθένιση αυτή δεν είναι ίδια για όλες τις συχνότητες αλλά παρουσιάζει επιλεκτικότητα. [8]

### 3.4.2 Κύμα εδάφους

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το κύμα εδάφους αποτελείται από το κύμα επιφάνειας και από το κύμα χώρου, το οποίο αποτελείται από το κατευθείαν κύμα και από το υπό του εδάφους ανακλώμενο κύμα. Σύμφωνα με τον Bullington το ηλεκτρικό πεδίο που οφείλεται στο κύμα εδάφους δίνεται από τη σχέση: [8]

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_o [1 + R e^{-j\Delta} + (1 - R) A e^{-j\Delta}] \quad (3.4.1)$$

όπου ο πρώτος όρος αφορά το **κατ' ευθείαν κύμα**, ο δεύτερος το **ανακλώμενο κύμα** και ο τρίτος το **κύμα επιφάνειας**,  $E_o$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στον ελεύθερο χώρο,  $R$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους,  $A$  είναι ο συντελεστής απόσβεσης του κύματος επιφάνειας και  $\Delta$  η διαφορά φάσης, η οποία οφείλεται στη διαφορά διαδρομής μεταξύ του ανακλώμενου και του κατ' ευθείαν κύματος. [8]

Όταν οι κεραίες εκπομπής και λήψης είναι τοποθετημένες ή μπορούν να θεωρηθούν τοποθετημένες ( $l \ll \lambda$ ) επί της επιφάνειας του εδάφους, η γωνία πρόσπτωσης  $\psi$  του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι ίση με μηδέν. Τότε ο συντελεστής ανάκλασης  $R$  ισούται με  $-1$  και το κατευθείαν κύμα με το ανακλώμενο κύμα [67]

απαλείφονται μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή, η μετάδοση του κύματος οφείλεται αποκλειστικά στο κύμα επιφάνειας. Αυτό συμβαίνει π.χ. με τη λήψη ραδιοφωνικών εκπομπών στη διάρκεια της ημέρας. Στις υψηλές (3-30MHz) και λίαν υψηλές (30-300 MHz) συχνότητες, το μήκος κύματος είναι σχετικά μικρό και έτσι είναι δυνατή, οικονομικώς και τεχνικώς, η ανύψωση των κεραιών υπεράνω του εδάφους σε ύψος ίσο ή και μεγαλύτερο του  $\lambda/4$ . Τότε το κύμα χώρου είναι διάφορο του μηδενός και το πεδίο στην κεραία λήψης είναι το διανυσματικό άθροισμα του κύματος χώρου και του κύματος επιφάνειας. [8]

### 3.4.3 Κύμα χώρου

Όταν οι κεραιές εκπομπής και λήψης που βρίσκονται σε οπτική επαφή είναι ανυψωμένες τουλάχιστον πάνω από ένα μήκος κύματος από το έδαφος, ο συντελεστής  $A$  στην εξίσωση (3.4.1) μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος και το σήμα λήψης είναι το διανυσματικό άθροισμα του κατ' ευθείαν και του ανακλώμενου κύματος. [8]

Το ανακλώμενο κύμα εξαρτάται από τον συντελεστή ανάκλασης  $R$ , και τη διαφορά φάσης  $\Delta$  η οποία οφείλεται στην διαφορά διαδρομής του ανακλώμενου και του κατ' ευθείαν κύματος. Η διαφορά φάσης  $\Delta$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{h_1 + h_2}{d}\right)^2 + 1} - \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{h_2 - h_1}{d}\right)^2 + 1} \quad (3.4.2)$$

Όταν για την απόσταση  $d$  μεταξύ των κεραιών ισχύει  $d > 5(h_1 + h_2)$ , τότε η γωνία  $\Delta$  δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση: [8]

$$\Delta \approx \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d} \quad (3.4.3)$$

Όσον αφορά τον συντελεστή ανάκλασης του εδάφους  $R$ , δεχόμαστε αρχικά ότι η επιφάνεια του εδάφους είναι λεία και επίπεδη και επίσης ότι το έδαφος έχει πεπερασμένη αγωγιμότητα  $\sigma$  και διηλεκτρική σταθερά  $\varepsilon$ . Στην πραγματικότητα η διηλεκτρική σταθερά είναι μιγαδική και δίνεται από τη σχέση: [8]

$$\varepsilon' = \varepsilon \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon}\right) \quad (3.4.4)$$

Δηλαδή ένα μερικώς αγωγίμο διηλεκτρικό μέσον μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα διηλεκτρικό μέσον με μιγαδική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon'$ . Στο σχήμα 3.4.2 το μέσον (1) είναι η ατμόσφαιρα με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_1 = \epsilon_0$  και το μέσον (2) είναι η γη με διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_2 = \epsilon' = \epsilon_r \epsilon_0 - j\chi \epsilon_0$  όπου  $\chi = \sigma/\omega \epsilon_0$ . Η γωνία πρόσπτωσης  $\psi$  (σχήμα 3.4.2) δίνεται από τη σχέση: [8]

$$\tan \psi = \frac{h_1 + h_2}{d} \quad (3.4.5)$$

και στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές ισχύει  $\tan \psi = \psi$ , οπότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\psi = \frac{h_1 + h_2}{d} \quad (3.4.6)$$

Με βάση τα παραπάνω και τις εξισώσεις (3.1.18) και (3.1.21), αποδεικνύεται ότι ο συντελεστής ανάκλασης επιπέδου κύματος **οριζόντιας πόλωσης** προσπίπτοντος επί του εδάφους δίνεται ως εξής: [8]

$$R_o = \frac{\sin \psi - \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}} \quad (3.4.7)$$

ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής **παράλληλης πόλωσης** είναι:

$$R_\kappa = \frac{(\epsilon_r - j\chi) \sin \psi - \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}}{(\epsilon_r - j\chi) \sin \psi + \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}} \quad (3.4.8)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι οι συντελεστές ανάκλασης είναι μιγαδικοί και συνεπώς το ανακλώμενο κύμα θα διαφέρει σε εύρος και φάση από το προσπίπτον κύμα. [8]

Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρή,  $\psi \approx 0$ , τότε  $R_o = -1$  και  $R_\kappa = -1$ , δηλαδή το ανακλώμενο κύμα έχει το ίδιο εύρος με το προσπίπτον αλλά παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφορά φάσης  $180^\circ$ . Αυτό συμβαίνει για όλες τις συχνότητες και όλες τις ειδικές αγωγιμότητες των διαφόρων τύπων εδάφους. Ακόμη, προκύπτει ότι για το προσπίπτον κύμα **οριζόντιας πόλωσης** η φάση του ανακλώμενου κύματος διαφέρει από εκείνη του προσπίπτοντος κατά  $180^\circ$  περίπου για όλες τις τιμές της γωνίας πρόσπτωσης  $\psi$ . Αυξανόμενη της  $\psi$  το εύρος του  $R_o$  μεταβάλλεται, χωρίς όμως να παρουσιάζει μεγάλες

μεταβολές. Η μεταβολή είναι τόσο μεγαλύτερη όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα και όσο μικρότερη είναι η αγωγιμότητα. [8]

Στην περίπτωση **κατακόρυφης πόλωσης**, προκύπτει ότι όσο αυξάνει η γωνία  $\psi$ , τόσο το εύρος όσο και η φάση του ανακλώμενου κύματος μειώνονται ταχέως. Το εύρος του συντελεστή ανάκλασης  $R_k$  διέρχεται από ένα ελάχιστο, όταν η φάση του παίρνει την τιμή  $-90^\circ$ . Η αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης  $\psi$ , ονομάζεται γωνία **ψευδο-Brewster**, σε αναλογία με την περίπτωση τέλειων διηλεκτρικών. Συνεπώς όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία Brewster ή ψευδο-Brewster, το ανακλώμενο κύμα είναι πολύ μικρό. Η ιδιότητα αυτή χρησιμοποιείται στην πράξη για να αποφύγουμε ανεπιθύμητες ανακλάσεις. Για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας  $\psi$  το εύρος αυξάνει και η φάση τείνει στο μηδέν. [8]

Αν στην εξίσωση (3.4.1) θεωρήσουμε ότι η γωνία  $\psi$  είναι μικρή ( $\psi \approx 0$ ), τότε  $R \approx -1$  και συνεπώς προκύπτει η σχέση:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_o(1 + \text{Re}^{-j\Delta}) = \mathbf{E}_o(1 - e^{-j\Delta}) = \mathbf{E}_o(1 - \cos \Delta + j \sin \Delta) \quad (3.4.9)$$

Στην πράξη, η γωνία  $\Delta$  είναι μικρή, έτσι ώστε  $\cos \Delta \approx 1$  και  $\sin \Delta \approx \Delta$  και λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (3.4.3), η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$|E| = E_o \Delta = E_o \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d} \quad (3.4.10)$$

όπου  $E_o$  είναι η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στον ελεύθερο χώρο. Από την εξίσωση (3.2.6) και σε απόσταση  $d$  από την κεραία εκπομπής και με βάση την εξίσωση (3.1.15α) θα έχουμε: [8]

$$G_T = \frac{4\pi d^2 P}{W_T} = \frac{4\pi d^2}{W_T} \frac{1}{2} \frac{E_o^2}{\eta} = \frac{2\pi d^2}{W_T} \frac{E_o^2}{120\pi} \quad (3.4.11)$$

και συνεπώς το ηλεκτρικό πεδίο σε  $V/m$  θα είναι:

$$E_o = \frac{\sqrt{60W_T G_T}}{d} \quad (3.4.12)$$

Επομένως το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο της εξίσωσης (3.4.10) θα είναι:

$$|E| = \frac{\sqrt{60W_T G_T}}{d} \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d} \quad V/m \quad (3.4.13)$$

Στην παραπάνω ανάλυση το έδαφος θεωρήθηκε λείο. Στην πραγματικότητα το έδαφος είναι ανώμαλο με αποτέλεσμα το ανακλώμενο κύμα να υφίσταται σκέδαση και να μειώνεται σε εύρος ως προς το ανακλώμενο κύμα από λεία επιφάνεια. Ως μέτρο της

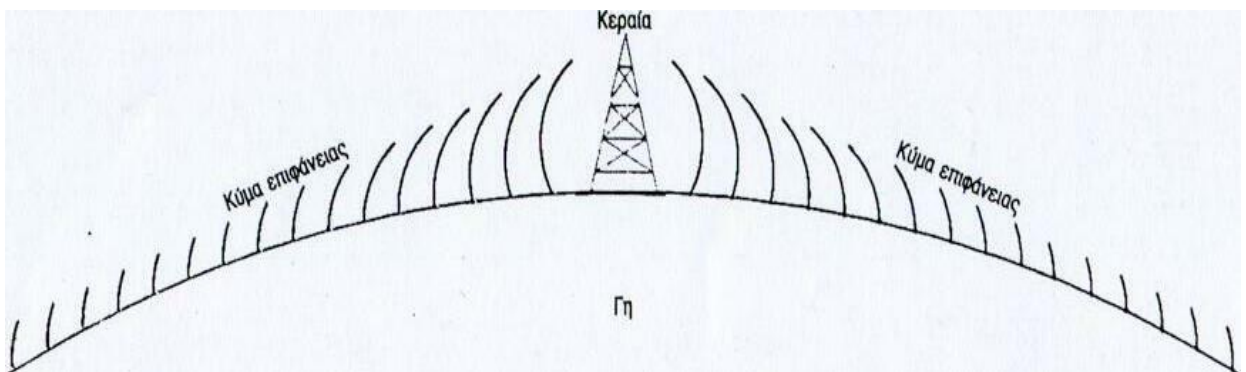
ανωμαλίας του εδάφους, μπορούμε να θεωρήσουμε τη διαφορά φάσης που θα προκύψει από τη διαφορά διαδρομής λόγω ανώμαλης ή λείας επιφάνειας: [8]

$$\delta = \frac{4\pi D \sin \psi}{\lambda} \quad (3.4.14)$$

όπου  $D$  είναι η τυπική απόκλιση των ανωμαλιών του εδάφους ως προς το μέσο ύψος της γήινης επιφάνειας,  $\psi$  είναι η γωνία πρόσπτωσης και  $\lambda$  το μήκος κύματος. [8]

### 3.4.4 Κύμα επιφάνειας

Όταν τα ύψη των κεραιών είναι μικρά ως προς το μήκος κύματος, το πεδίο στην κεραία λήψης είναι συνήθως μεγαλύτερο με κατακόρυφη πόλωση απ' ό,τι με οριζόντια. Αυτή είναι συνήθως η περίπτωση με τα μακρά και μεσαία κύματα αλλά όχι με τα υπερβραχέα κύματα. Το κύμα επιφάνειας παριστάνεται στο σχήμα 3.4.6. Στην περίπτωση αυτή, ο όρος που δίνει τη συνεισφορά του κύματος επιφάνειας στην εξίσωση (3.4.1) θα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αυτό συμβαίνει επειδή το έδαφος δεν είναι τέλειος ανακλαστήρας και επομένως το πεδίο πρέπει να πολλαπλασιαστεί επί ένα συμπληρωματικό συντελεστή απόσβεσης  $A$ . [8]



Σχήμα 3.4.6: Σχηματική παράσταση

του κύματος επιφάνειας. [8]

Η απόσβεση (ή εξασθένιση) του πεδίου οφείλεται στην απορρόφηση ενέργειας από το έδαφος. Ένα μέρος της ενέργειας μεταδίδεται εντός του εδάφους και προκαλεί ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία διαφέρουν από εκείνα που θα είχαν δημιουργηθεί στην ιδανική περίπτωση μιας τέλειας επιφάνειας ανάκλασης. Το κύμα επιφάνειας ορίζεται ως το κατακόρυφο ηλεκτρικό πεδίο για κατακόρυφη πόλωση ή το οριζόντιο ηλεκτρικό πεδίο για οριζόντια πόλωση, το οποίο συσχετίζεται με τις συνιστώσες των ρευμάτων εδάφους που δημιουργούνται λόγω της μη τέλειας ανάκλασης. [8]

Η παράμετρος  $A$  στην εξίσωση (3.4.1) είναι ο συντελεστής απόσβεσης του κύματος επιφάνειας για επίπεδη γη και κεραίες επί της γήινης επιφάνειας και εξαρτάται από την απόσταση, τη συχνότητα, τις σταθερές εδάφους και τον τύπο της πόλωσης. Επίσης λαμβάνει τιμές μικρότερες ή ίσες από τη μονάδα. Κατά προσέγγιση, δίνεται από την ακόλουθη απλή έκφραση:

$$A = \frac{-1}{1 + j \frac{2\pi d}{\lambda} (\sin \psi + z)^2} \quad (3.4.15)$$

όπου  $z = \frac{\sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}}{\varepsilon}$  για κατακόρυφη πόλωση ή  $z = \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}$  για οριζόντια πόλωση

και  $\varepsilon = \varepsilon_r - j60\lambda\sigma$ , με  $\varepsilon_r$  τη σχετική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους,  $\sigma$  την ειδική αγωγιμότητα,  $\lambda$  το μήκος κύματος σε  $m$  και  $\psi$  είναι η γωνία πρόσπτωσης μετρούμενη από την επιφάνεια του εδάφους και η οποία είναι ίση με μηδέν για κεραίες τοποθετημένες επί της επιφάνειας του εδάφους. Συνήθως ο συντελεστής απόσβεσης  $A$  δίνεται από καμπύλες οι οποίες είναι συναρτήσεις δύο παραμέτρων, της αριθμητικής απόστασης  $p$  και της φασικής σταθεράς  $b$ , που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Για  $\psi=0$ , η φασική σταθερά  $b$  και η αριθμητική απόσταση  $p$  για κατακόρυφη πόλωση, δίνονται προσεγγιστικά από τις ακόλουθες σχέσεις: [8]

$$b \approx \tan^{-1} \frac{\varepsilon_r + 1}{\chi}, \quad p = \frac{\pi d}{\lambda \chi} \cos b \quad (3.4.16)$$

Οι καμπύλες που δίνουν τον συντελεστή απόσβεσης  $A$  συναρτήσει της αριθμητικής απόστασης  $p$  και της φασικής σταθεράς  $b$  παριστάνονται στο σχήμα 3.4.7. Για πολύ μικρές τιμές της φασικής σταθεράς  $b$  ( $b < 5^\circ$ ) ο συντελεστής απόσβεσης  $A$ , δίνεται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση  $A = A_1 \approx \frac{2 + 0,3p}{2 + p + 0,6p^2}$ , ενώ για όλες τις τιμές της

φασικής σταθεράς  $b$  δίνεται από την εμπειρική σχέση  $A \cong A_1 - \sin b \sqrt{p/2} e^{-(5/8)p}$ . [8]

Για  $p < 1$ , ο συντελεστής απόσβεσης είναι  $A \cong 1$ , ενώ για  $p > 10$  είναι ανάλογος του  $1/d$ . Επίσης αποδεικνύεται ότι για χαμηλές συχνότητες ή για έδαφος υψηλής αγωγιμότητας η  $p$  είναι ανάλογη του  $f^2 d / \sigma$ , ενώ για υψηλές συχνότητες ή χαμηλές αγωγιμότητες η  $p$  είναι ανάλογη του  $f d / (\varepsilon_r + 1)$ . Ακόμη πρέπει να σημειωθεί ότι το ίδιο έδαφος που συμπεριφέρεται σαν αγωγός σε χαμηλές συχνότητες, συμπεριφέρεται ως διηλεκτρικό με χαμηλές **απώλειες** σε πολύ υψηλές συχνότητες. [8]



### 3.4.5 Σφαιρική γη - Συντελεστής απόκλισης

Στη μέχρι τώρα μελέτη διάδοσης του κύματος εδάφους, θεωρήσαμε ότι η γη είναι επίπεδη. Η υπόθεση αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε μικρές αποστάσεις που καθορίζονται από τη σχέση  $d=80f^{-1/3}$ , όπου  $f$  είναι σε  $MHz$ . Σε μεγαλύτερες αποστάσεις όμως, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η γη είναι σφαιρική και όχι επίπεδη. Το γεγονός αυτό επηρεάζει τη διάδοση του κύματος εδάφους κατά διάφορους τρόπους και επομένως οι αναλυτικές σχέσεις που περιγράφηκαν μέχρι τώρα πρέπει να υποστούν κάποια διόρθωση. [8]

Έτσι, αν λάβουμε υπόψη τη σφαιρικότητα της γης, το κύμα επιφάνειας δεν θα φτάνει στο σημείο λήψης κατόπιν ευθύγραμμης διαδρομής αλλά δια περίθλασης επί τη γη ως και δια διάθλασης στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας. Η απόσβεση του κύματος γίνεται γρήγορα αρκετά μεγάλη και προσεγγιστικά μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$A = \frac{0,62}{\sqrt[3]{\lambda}} \quad (3.4.17)$$

όπου  $A$  είναι σε  $dB/km$  και  $\lambda$  σε  $m$ . [8]

Όσον αφορά το κύμα χώρου έχουμε τα εξής: το υπό του εδάφους ανακλώμενο κύμα ανακλάται τώρα από σφαιρική επιφάνεια με αποτέλεσμα η ανακλώμενη δέσμη να αποκλίνει περισσότερο από την αντίστοιχη δέσμη, η οποία θα ανακλάτο από επίπεδη επιφάνεια. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα το ανακλώμενο κύμα να φτάνει στο δέκτη εξασθενημένο ως προς την περίπτωση ανάκλασης από επίπεδη γη. Η εξασθένιση αυτή μετριέται από τον **συντελεστή απόκλισης  $D$** , ο οποίος είναι μικρότερος της μονάδας και δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2d_1d_2}{a(h_1 + h_2)}}} \quad (3.4.18)$$

όπου  $a=6370 km$  είναι η ακτίνα της γης. [8]

Επιπλέον τα ύψη  $h_1'$  και  $h_2'$  των κεραιών εκπομπής και λήψης υπεράνω του επιπέδου του εφαιπτόμενου της γης στο σημείο ανάκλασης, είναι μικρότερα των υψών των κεραιών  $h_1$

και  $h_2$  από την επιφάνεια της γης και προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για τα διορθωμένα ύψη: [8]

$$h_1' = h_1 - \Delta h_1 = h_1 - \frac{d_1^2}{2a} \quad (3.4.19)$$

$$h_2' = h_2 - \Delta h_2 = h_2 - \frac{d_2^2}{2a}$$

Αν στις παραπάνω εξισώσεις αντικαταστήσουμε την ακτίνα της γης  $a=6370 \text{ km}$  και τα ύψη εκφρασθούν σε  $m$ , ενώ οι αποστάσεις από το σημείο ανάκλασης  $d_1$  και  $d_2$  σε  $km$ , τότε προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$h_1' = h_1 - \frac{d_1^2}{12,7} \quad (3.4.20)$$

$$h_2' = h_2 - \frac{d_2^2}{12,7}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για σφαιρική γη οι σχέσεις που ισχύουν για επίπεδη γη, αν τα πραγματικά ύψη των κεραιών  $h_1$  και  $h_2$  αντικατασταθούν από τα διορθωμένα ύψη  $h_1'$  και  $h_2'$  που δίνονται από τις εξισώσεις (3.4.19) και (3.4.20) και ο συντελεστής ανάκλασης  $R$  της εξίσωσης (3.4.1) αντικατασταθεί από το γινόμενο  $RD$ , όπου ο συντελεστής απόκλισης  $D$  δίνεται από την (3.4.18), στην οποία στη θέση των υψών  $h_1$  και  $h_2$  θα τεθούν τα ύψη  $h_1'$  και  $h_2'$  αντίστοιχα: [8]

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2d_1 d_2}{a(h_1' + h_2')}}} \quad (3.4.21)$$

### 3.4.6 Συνθήκη οπτικής επαφής

Ας υποθέσουμε αρχικά ότι η επιφάνεια της γης είναι τέλεια σφαιρική και λεία και ότι η ατμόσφαιρα είναι ομοιογενής με δείκτη διάθλασης ίσο με εκείνον το κενού. Για να βρίσκονται δύο απομακρυσμένα σημεία σε οπτική επαφή, θα πρέπει να είναι ανυψωμένα υπεράνω του εδάφους, όπου δείχνεται η οριακή συνθήκη οπτικής επαφής. [8]

Τα ελάχιστα ύψη των κεραιών υπεράνω του εδάφους, ώστε να εξασφαλιστεί η οπτική επαφή, δίνονται από τις σχέσεις:

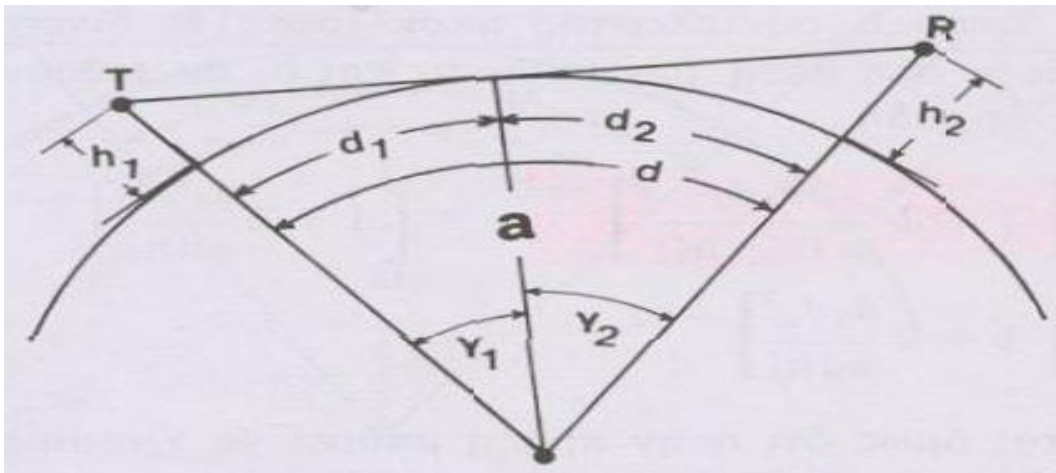
$$\cos \gamma_1 = \frac{\alpha}{\alpha + h_1}, \quad \cos \gamma_2 = \frac{\alpha}{\alpha + h_2} \quad (3.4.22)$$

και οι αποστάσεις  $d_1$  και  $d_2$  από τις σχέσεις:

$$d_1 = \sqrt{2ah_1}, \quad d_2 = \sqrt{2ah_2} \quad (3.4.23)$$

Επομένως, για κεραίες τοποθετημένες σε ύψη  $h_1$  και  $h_2$ , η **μέγιστη απόσταση ζεύξης οπτικής επαφής** είναι:

$$d = d_1 + d_2 = \sqrt{2a}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (3.4.24)$$



**Σχήμα 3.4.9:** Οριακή συνθήκη οπτικής επαφής.

Αντικαθιστώντας την αριθμητική τιμή της ακτίνας της γης  $a$  στην παραπάνω εξίσωση, προκύπτει η ακόλουθη σχέση για την απόσταση  $d$  σε  $km$  και τα ύψη των κεραιών  $h_1$  και  $h_2$  σε  $m$ : [8]

$$d = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (3.4.25)$$

Υπό συνθήκες οριακής οπτικής επαφής, ένα μέρος της ακτινοβολούμενης ενέργειας από την κεραία εκπομπής εμποδίζεται από την επιφάνεια της γης. Η οπτική επαφή είναι εξασφαλισμένη μόνον όταν το μέγιστο μέρος της μεταδιδόμενης ενέργειας φτάνει στην κεραία λήψης. Δεχόμαστε ότι αυτό συμβαίνει, όταν είναι ελεύθερο από εμπόδια ένα στερεό ελλειψοειδές εκ περιστροφής, το οποίο ονομάζεται **ελλειψοειδές του Fresnel** (σχήμα 3.4.10) και το οποίο ορίζεται ως ο τόπος των σημείων  $P$ , για τα οποία ισχύει  $PA + PB = d_1 + d_2 + \lambda/2$ . [8]

Η τομή του ελλειψοειδούς του Fresnel με το επίπεδο που είναι κάθετο στην ευθεία  $AB$ , ονομάζεται **πρώτη ζώνη του Fresnel** και η ακτίνα του  $r$  δίνεται από τη σχέση:

$$r = \sqrt{\frac{d_1 d_2 \lambda}{d_1 + d_2}} \quad (3.4.26)$$

η οποία μετατρέπεται στην:

$$r = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{df}} \quad (3.4.27)$$

όπου οι αποστάσεις  $d_1$ ,  $d_2$  και  $d$  είναι σε  $km$ , η συχνότητα  $f$  σε  $GHz$  και η ακτίνα  $r$  σε  $m$ . Η  $r$  λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της στο κέντρο του ελλειψοειδούς όπου  $d_1=d_2=d/2$ :

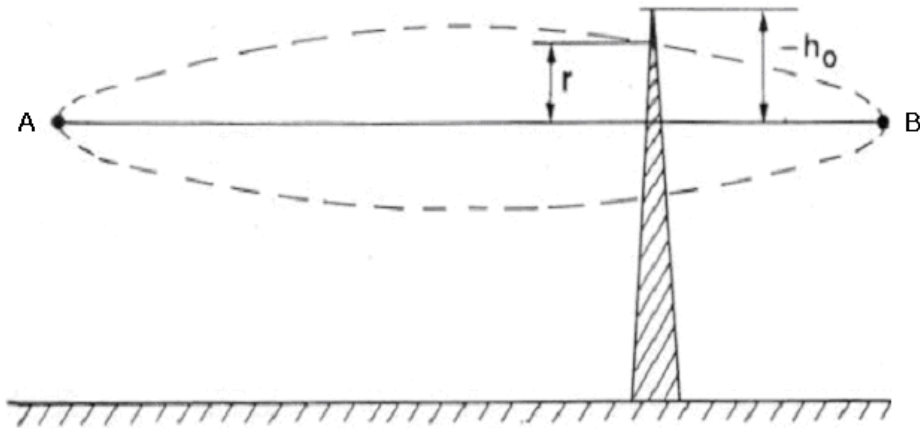
$$r = \frac{\sqrt{d\lambda}}{2} \quad (3.4.28)$$

Η θεώρηση του ελλειψοειδούς του Fresnel έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόστασης οπτικής ζεύξης  $d$  που δίνεται από τις (3.4.24) και (3.4.25). Η απόσταση  $d$  μπορεί να μειωθεί ακόμη περισσότερο, αν υπάρχουν προεξοχές του εδάφους όπως υψώματα, λόφοι, δάση, κτίρια κλπ. Η επαλήθευση της οπτικής επαφής πραγματοποιείται σχεδιάζοντας το ελλειψοειδές του Fresnel το οποίο πρέπει να είναι ελεύθερο από εμπόδια.

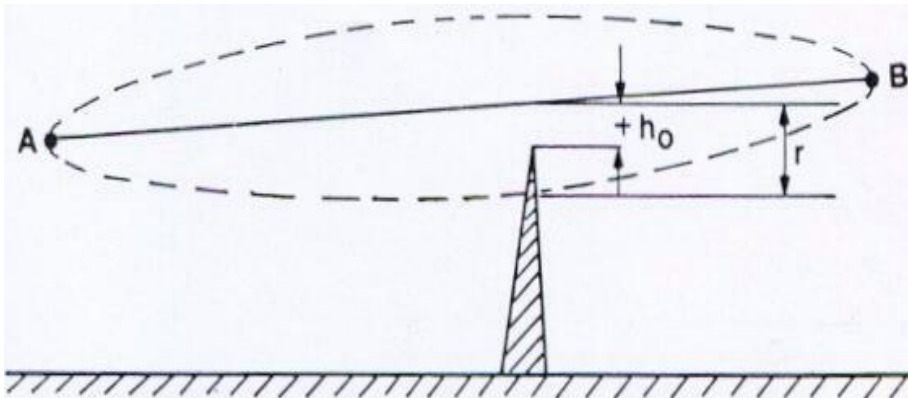
Όταν η οπτική επαφή είναι πλήρως εξασφαλισμένη ή όταν ένα μικρό μέρος της πρώτης ζώνης του Fresnel παρεμποδίζεται, η **ολική απόσβεση** μπορεί να υπολογισθεί λαμβάνοντας υπόψη το κατ' ευθείαν κύμα μεταξύ πομπού και δέκτη, του οποίου η απόσβεση δίνεται από την (3.3.7), και το υπό του εδάφους ανακλώμενο κύμα, το οποίο υπολογίζεται με τα όσα αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. [8]

### 3.4.7 Επίδραση εμποδίων στη διάδοση - Ζεύξη δια περίθλασης

Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε τον προσδιορισμό του πεδίου στον **δέκτη**, όταν υπάρχει εμπόδιο στη διαδρομή του κύματος. Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει επί ενός αιχμηρού εμποδίου (σχήματα 3.4.11 και 3.4.12), το πεδίο πέραν του εμποδίου είναι ασθενέστερο του πεδίου που θα είχαμε απ' ότι για διάδοση στον ελεύθερο χώρο αλλά δεν είναι μηδέν. Αυτό συμβαίνει, επειδή σύμφωνα με την αρχή του Huyghens, η περιοχή του χώρου υπεράνω του εμποδίου δρα σαν μια δευτερεύουσα πηγή διαχύσεως της ακτινοβολίας η οποία ακτινοβολεί ενέργεια σε σημεία που βρίσκονται υπό σκιάν ως προς τις κατ' ευθείαν ακτίνες. [8]



**Σχήμα 3.4.11:** Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων παρουσία αιχμηρού εμποδίου με προεξοχή  $h_0$  αρνητική. [8]



**Σχήμα 3.4.12:** Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων παρουσία αιχμηρού εμποδίου με προεξοχή  $h_0$  θετική. [8]

Με βάση την αρχή του Huyghens, το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  στο σημείο  $B$ , το οποίο παράγεται δια περίθλασης από την πηγή που βρίσκεται στο σημείο  $A$ , δίνεται από τον λόγο του πεδίου  $E_0$  το οποίο θα υπήρχε στο σημείο  $B$  υπό συνθήκες διάδοσης ελευθέρου χώρου, δια ενός **συντελεστή απόσβεσης** ο οποίος είναι συνάρτηση του λόγου  $h_0/r$  όπου  $h_0$  είναι η προεξοχή του αιχμηρού εμποδίου ως προς την ευθεία  $AB$  (κατευθείαν ακτίνα) και  $r$  είναι η ακτίνα της πρώτης ζώνης Fresnel στην περιοχή του εμποδίου. [8]

Από τα σχήματα 3.4.11 και 3.4.12, παρατηρούμε δύο περιπτώσεις διάδοσης παρουσία αιχμηρού εμποδίου. Στο σχήμα 3.4.11 το εμπόδιο τέμνει την κατευθείαν ακτίνα  $AB$ , οπότε η προεξοχή λαμβάνεται αρνητική, ενώ στο σχήμα 3.4.12 το εμπόδιο δεν τέμνει την κατευθείαν ακτίνα αλλά εισχωρεί στο ελλειψοειδές του Fresnel και η προεξοχή λαμβάνεται θετική. Στη δεύτερη περίπτωση η παρουσία του εμποδίου μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε ενίσχυση του πεδίου, που ονομάζεται **κέρδος πεδίου από εμπόδιο** της τάξης περίπου  $1,18$  ή  $1,4$   $dB$ . Αντίθετα στην πρώτη περίπτωση, το πεδίο είναι πάντοτε εξασθενημένο. Για  $h_o=0$ , ο συντελεστής απόσβεσης είναι ίσος με 2, αφού το εμπόδιο παρακωλύει ακριβώς τον μισό χώρο. [8]

Η απόσβεση  $A_d$  σε  $dB$  του πεδίου, που οφείλεται στην παρουσία αιχμηρού εμποδίου, δίνεται στο σχήμα 3.4.13 και ονομάζεται **συμπληρωματική ως προς τον ελεύθερο χώρο εξασθένιση λόγω περίθλασης**. Όπως προκύπτει από το σχήμα 3.4.13 η εξασθένιση αυτή αυξάνει αυξανομένου του λόγου  $h_o/r$ . Δεδομένου ότι η ακτίνα του ελλειψοειδούς του Fresnel μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας [εξίσ. (3.4.27)], η απόσβεση  $A_d$  αυξάνει αυξανομένης της συχνότητας. Αυτό σημαίνει ότι παρουσία εμποδίου μεταδίδονται δια περίθλασης κύματα μεγαλύτερου μήκους κύματος  $\lambda$ . [8]

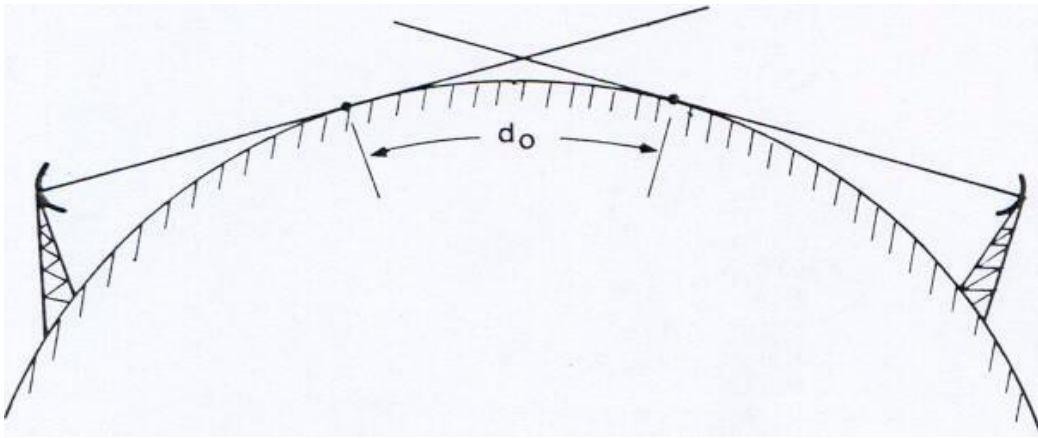
Το πρόβλημα που εξετάσαμε είναι ανάλογο εκείνου που συναντάμε στην πράξη, όταν το εμπόδιο είναι ένας λόφος ή ένα κτίριο, για τα οποία δεχόμαστε ότι το βάθος τους είναι αμελητέο ως προς την απόσταση της ζεύξης. Δηλαδή, σαν αιχμηρό εμπόδιο (knife-edge) λαμβάνεται ένα οξύ αντικείμενο, μικρού βάθους, το οποίο είναι αδιαφανές στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Συνεπώς μια λεία σφαιρική γη δεν μπορεί να θεωρηθεί αιχμηρό εμπόδιο (σχήμα 3.4.14). Στην περίπτωση αυτή η απόσβεση λόγω περίθλασης είναι μεγαλύτερη από την απόσβεση του πεδίου στην περίπτωση αιχμηρού εμποδίου και είναι συνάρτηση της απόστασης εκτός ορατότητας  $d_o$ , η οποία καθορίζεται από τα εφαπτομενικά σημεία των εφαπτομένων στην επιφάνεια τη γης από τις κεραίες εκπομπής και λήψης (σχήμα 3.4.14). [8]

**Η συμπληρωματική απόσβεση λόγω περίθλασης  $A_d$  ως προς την απόσβεση στον ελεύθερο χώρο, δίνεται σε  $dB$  από την προσεγγιστική σχέση:**

$$A_d = 17 + \frac{260d_o}{a^{\frac{2}{3}}\lambda^{\frac{1}{3}}} = 17 + \frac{0,756d_o}{\lambda^{\frac{1}{3}}} \quad (3.4.29)$$

όπου  $d_o$  είναι σε  $km$ ,  $a=6370$   $km$  και  $\lambda$  σε  $m$ . Από την παραπάνω εξίσωση συνάγεται ότι η συμπληρωματική απόσβεση λόγω λείας, σφαιρικής γης, αυξάνει αυξανομένης της συχνότητας. Αυτό οδηγεί στο να χρησιμοποιούνται, σε ζεύξεις δια περίθλασης, όπως π.χ. [78]

ζεύξης μεγάλης απόστασης υπεράνω θαλάσσης στις οποίες δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση ενδιάμεσων σταθμών, οι μικρότερες συχνότητες της περιοχής των υπερβραχέων κυμάτων, δηλαδή από 40 μέχρι 100 MHz περίπου. [8]



**Σχήμα 3.4.14:** Διάδοση παρουσία εμποδίου που συνίσταται από μέρος της λείας, σφαιρικής επιφάνειας της γης. [8]

### 3.4.8 Αποφυγή εμποδίων - Χρήση συστημάτων back-to-back και παθητικού κατόπτρου

Σε πολλές περιπτώσεις ραδιοζεύξεων είναι αναγκαίο να διατηρείται η οπτική επαφή ακόμη και όταν υπάρχουν εμπόδια στη διάδοση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται στην πράξη δύο τεχνικές για την αποφυγή του εμποδίου και τη διατήρηση της οπτικής επαφής. [8]

Στην πρώτη περίπτωση, τοποθετούνται στην κορυφή του εμποδίου δύο κεραίες από τις οποίες η μία «βλέπει» την κεραία του **πομπού** και η άλλη την κεραία του **δέκτη**. Στην περίπτωση αυτή, η συμπληρωματική απόσβεση ως προς τον ελεύθερο χώρο, είναι συνάρτηση του μήκους του κυματοδηγού που συνδέει τις δύο κεραίες back-to-back. Μια ενδεικτική τιμή αυτής της απόσβεσης για τις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις είναι το 1 dB. Πρέπει να σημειωθεί ότι το σύστημα back-to-back χρησιμοποιείται, όταν η γωνία μεταξύ πομπού και δέκτη που σχηματίζεται λόγω του εμποδίου είναι μεγαλύτερη από 120°. [8]

Στη δεύτερη περίπτωση, τοποθετείται στην κορυφή του εμποδίου ένα παθητικό κάτοπτρο το οποίο είναι μία επίπεδη μεταλλική επιφάνεια που αντανακλά πλήρως την ηλεκτρομαγνητική δέσμη προς την κατεύθυνση της κεραίας του δέκτη . [8]

Η συμπληρωματική απόσβεση λόγω εξασθένησης του παθητικού κατόπτρου δίνεται από την εξίσωση:

$$A_{PR} = 20 \log \frac{300 \frac{D_1 D_2}{f} \frac{D_1 + D_2}{a S \cos \frac{\theta}{2}}}{\theta} \quad (3.4.30)$$

όπου  $A_{PR}$  η εξασθένηση λόγω παθητικού κατόπτρου σε  $dB$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  οι αποστάσεις σε  $km$  του παθητικού κατόπτρου από την κεραία του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα,  $f$  η συχνότητα λειτουργίας σε  $GHz$ ,  $a=0,8$  και  $S$  η επιφάνεια του παθητικού κατόπτρου σε  $m^2$ . Η γωνία  $\theta$  παριστάνεται στο σχήμα 6.16. Πρέπει να σημειωθεί ότι το σύστημα του παθητικού κατόπτρου χρησιμοποιείται, όταν η γωνία  $\theta$  μεταξύ πομπού και δέκτη που σχηματίζεται λόγω του εμποδίου είναι μικρότερη από  $120^\circ$ . Επίσης το κόστος κατασκευής του συστήματος παθητικού κατόπτρου είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό των κεραιών back-to-back. [8]

### 3.4.9 Τροποσφαιρική διάδοση

Η **τροπόσφαιρα** είναι η κατώτερη περιοχή της ατμόσφαιρας, η οποία εκτείνεται σε ύψος μέχρι  $10 km$  περίπου. Η παράμετρος της τροπόσφαιρας που παίζει σημαντικό ρόλο στη διάδοση των ραδιοκυμάτων, είναι η μεταβολή συναρτήσεως του ύψους της σχετικής υγρασίας, η οποία έχει διηλεκτρική σταθερά μεγαλύτερη από τη διηλεκτρική σταθερά του κενού. Συνεπώς, θα μεταβάλλεται με το ύψος ο δείκτης διάθλασης της τροπόσφαιρας και επομένως η φασική ταχύτητα του κύματος. Το αποτέλεσμα, είναι η λήψη του ραδιοηλεκτρικού σήματος δια διαφόρων μηχανισμών ακόμη και πέραν του γεωμετρικού ορίζοντα. Οι μηχανισμοί που μπορεί να ασκήσει η τροπόσφαιρα στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι **διάθλαση**, **ανάκλαση** και **σκέδαση**. Ανάκλαση, ολική ή μερική, λαμβάνει χώρα όταν η τροπόσφαιρα παρουσιάζει στρωμάτωση. Εξάλλου, τοπικές αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας, δημιουργούν ζώνες σκέδασης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό επιτρέπει μόνιμη **ζεύξη** πέραν του γεωμετρικού ορίζοντα σε απόσταση  $500-600 km$  από τον πομπό. [8]



Η μείωση του δείκτη διάθλασης με το ύψος έχει σαν αποτέλεσμα την καμπύλωση των ηλεκτρομαγνητικών ακτίνων προς τα κάτω με ακτίνα καμπυλότητας γενικά μεγαλύτερη από την ακτίνα της γης. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την υλοποίηση ζεύξεων λόγω περίθλασης πέραν του οπτικού ορίζοντα, της τάξης του 20-30% χωρίς **απώλειες**. Υπό ορισμένες συνθήκες όμως είναι δυνατόν ο δείκτης διάθλασης να παρουσιάζει αύξηση με το ύψος και συνεπώς παρουσιάζεται καμπύλωση των ακτίνων προς τα άνω με αποτέλεσμα την εξασθένιση του σήματος λήψης.

### 3.4.10 Δείκτης διάθλασης της τροπόσφαιρας

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η τροπόσφαιρα επιδρά στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών μέσω του δείκτη διάθλασης, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{αέρα}}}{\epsilon_0}} = \sqrt{\epsilon_r} \quad (3.4.31)$$

όπου  $\epsilon_{\text{αέρα}}$  είναι η διηλεκτρική σταθερά του αέρα,  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού και  $\epsilon_r$  η σχετική διηλεκτρική σταθερά της τροπόσφαιρας. Η  $\epsilon_r$  της τροπόσφαιρας είναι μεγαλύτερη της μονάδας κοντά στην επιφάνεια της γης και μειώνεται με το ύψος, συνεπώς και ο δείκτης διάθλασης  $n$  ακολουθεί την ίδια μεταβολή, λαμβάνοντας κοντά στην επιφάνεια της γης την τιμή 1,00033. Επειδή οι μεταβολές της τιμής του  $n$  είναι μικρές, χρησιμοποιείται συνήθως η **διαθλαστικότητα**  $N=(n-1)10^6$  που δίνεται από τη σχέση: [8]

$$N = (n-1)10^6 = \frac{77,6}{T} (p + 4810 \frac{e}{T}) = 77,6 \frac{p}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (3.4.32)$$

ή ακόμη από τη σχέση:

$$N = (n-1)10^6 = 77,6 \frac{p}{T} - 5,6 \frac{e}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (3.4.33)$$

όπου  $p$  είναι η πίεση σε *millibars*,  $e$  η μερική πίεση του υδρατμού σε *millibars* και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς *Kelvin*. Αν  $s$  είναι η ειδική υγρασία, οριζόμενη σε γραμμάρια υδρατμού ανά *kg* μάζης αέρα, τότε ισχύει η σχέση: [8]

$$e = \frac{sp}{623 - 0,377s} \approx 0,00161sp \quad (3.4.34)$$

Η βαθμιαία μείωση του δείκτη διάθλασης με το ύψος για τη λεγόμενη **πρότυπη ατμόσφαιρα** (standard atmosphere), στην οποία η κατανομή της θερμοκρασίας και της υγρασίας με το ύψος είναι ομοιόμορφη, εκφράζεται από την εξής σχέση:

$$\frac{dn}{dh} = -39 \cdot 10^{-6} \quad (km^{-1}) \quad (3.4.35)$$

Οι μέσες τιμές των παραμέτρων που ορίζουν την πρότυπη ατμόσφαιρα είναι:

P=1013 mb	dp/dh=-0,121 mb/m
T=288°K (t=15°C)	dT/dh=-0,0065 °K/m
e=10 mb	de/dh=-0,0033 mb/m

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γραμμική σχέση που αντιστοιχεί στην πρότυπη ατμόσφαιρα δεν μπορεί να ληφθεί, ούτε προσεγγιστικά, ότι είναι εφαρμόσιμη σε όλο το ύψος της τροπόσφαιρας. Έτσι ορίζεται η **βασική ατμόσφαιρα αναφοράς** ως εξής:

$$n(h) = 1 + 289 \cdot 10^{-6} e^{-0,136h} \quad (3.4.36) [8]$$

όπου  $h$  είναι το ύψος σε  $km$  υπεράνω της στάθμης της θάλασσας. Στα πρώτα  $km$  η ατμόσφαιρα αναφοράς είναι σχεδόν ακριβώς ισοδύναμη με την πρότυπη ατμόσφαιρα.

### 3.4.11 Τροποσφαιρική διάθλαση

Ας θεωρήσουμε μία ατμόσφαιρα όπου ο δείκτης διάθλασης  $n$  μεταβάλλεται με το ύψος  $h$ . Οι ηλεκτρομαγνητικές ακτίνες, οι οποίες σε μια ομοιογενή ατμόσφαιρα θα ήταν ευθύγραμμες, υφίστανται τώρα καμπύλωση. Αν υποθέσουμε ότι η ατμόσφαιρα αποτελείται από στρώματα ομοκεντρικά ακτίνας  $r_1, r_2, r_3$ , με δείκτη διάθλασης  $n_1, n_2, n_3$ , αντίστοιχα, τότε σύμφωνα με το νόμο του Snell θα ισχύει: [8]

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2' \quad (3.4.37)$$

Σύμφωνα με το θεώρημα του ημιτόνου, θα έχουμε:

$$\frac{\sin \theta_2}{r_1} = \frac{\sin \theta_2'}{r_2} \quad (3.4.38)$$

Από τις εξισώσεις (3.4.37) και (3.4.38) προκύπτει ότι:

$$r_1 n_1 \sin \theta_1 = r_2 n_2 \sin \theta_2 \quad (3.4.39)$$

και γενικότερα μπορούμε να γράψουμε:

$$nr \sin \theta = \text{σταθερά} \quad (3.4.40)$$

Η εξίσωση (3.4.40) εκφράζει το νόμο του Bouguet ή νόμο της διάθλασης μέσω σφαιρικών στρωμάτων. [8]

Βάσει του νόμου του Bouguet, αποδεικνύεται ότι η ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς του ηλεκτρομαγνητικού κύματος δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = -\frac{1}{\frac{dn}{dh} \sin \theta} \quad (3.4.41)$$

Αν θεωρήσουμε σχεδόν οριζόντια διάδοση τότε  $\sin \theta \cong 1$  και δεχόμενοι ότι  $n \cong 1$ , η παραπάνω εξίσωση μετατρέπεται στην ακόλουθη:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{dn}{dh} \quad (3.4.42)$$

Προκύπτει, λοιπόν, ότι η ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι αντιστρόφως ανάλογη της μεταβολής του δείκτη διάθλασης με το ύψος. Για την πρότυπη ατμόσφαιρα, από τις εξισώσεις (3.4.35) και (3.4.42) προκύπτει  $\rho \cong 25,6 \cdot 10^3 \text{ km} = 4a$ , όπου  $a = 6370 \text{ km}$  είναι η ακτίνα της γης. [8]

Μία ευθύγραμμη ηλεκτρομαγνητική ακτίνα παρουσιάζει καμπυλότητα ίση με  $-1/a$  ως προς την επιφάνεια της γης. Αν μετασχηματίσουμε τη γραμμή που παριστάνει τη σφαιρική επιφάνεια της γης σε μια ευθεία γραμμή, τότε οι τροχιές των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μετασχηματίζονται σε τόξα κύκλου καμπυλότητας  $-1/a$ . Εάν οι τροχιές παρουσιάζουν ήδη καμπυλότητα  $1/\rho = -dn/dh$ , τότε μετασχηματίζονται σε τόξα κύκλου καμπυλότητας:

$$\frac{1}{\rho_{\sigma}} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{a} \quad (3.4.43)$$

Εάν, αντίθετα, είναι επιθυμητό να έχουμε τροχιές ευθύγραμμες αντί καμπυλόγραμμες, τότε θα χρησιμοποιηθεί προφανώς μια ισοδύναμη ακτίνα της γης  $a_{\sigma} = Ka$ , η οποία θα λαμβάνει υπόψη την καμπυλότητα του κύματος. Δηλαδή κατ' αναλογία με την εξίσωση (6.43), θα ισχύει η σχέση: [8]

$$\frac{1}{a_{\sigma}} = \frac{1}{a} - \frac{1}{\rho} \quad (3.4.44)$$

που σημαίνει ότι η καμπυλότητα της γης μειώνεται της καμπυλότητας  $1/\rho$  των ηλεκτρομαγνητικών ακτίνων. Θεωρούμε δηλαδή ότι η διάδοση γίνεται σε ατμόσφαιρα ομοιογενή και ισοτροπική, όπου ο δείκτης διάθλασης είναι σταθερός και η γη έχει ακτίνα  $Ka$ . Για την πρότυπη ατμόσφαιρα, από τις εξισώσεις (3.4.44), (3.4.42) και (3.4.35) προκύπτει:

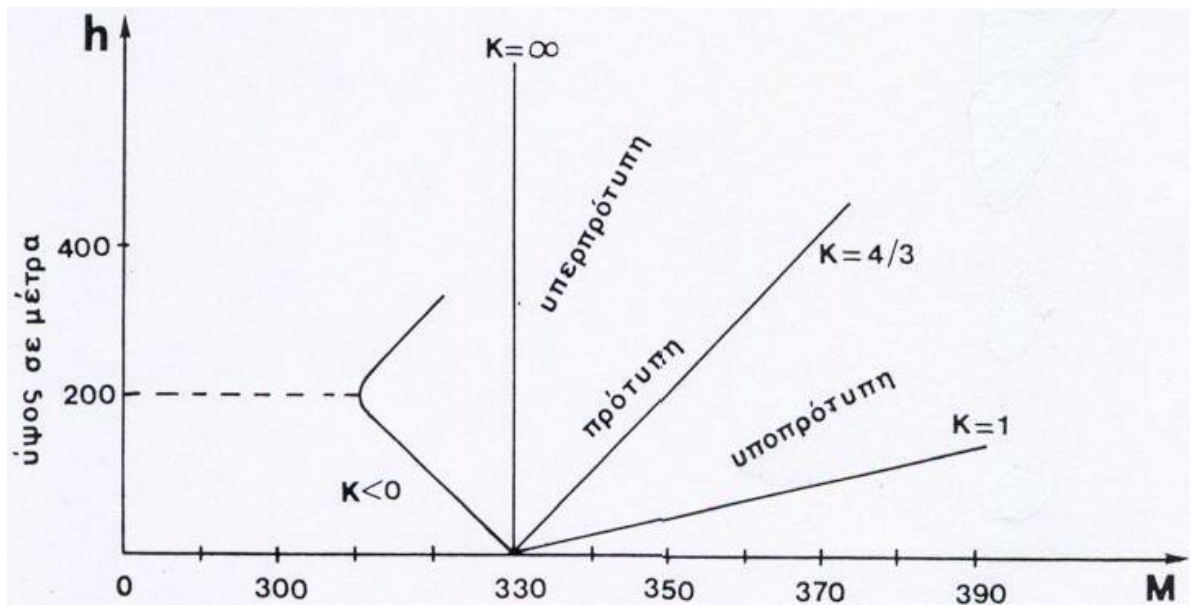
$$a_{i\sigma} = K\alpha = \frac{4}{3}\alpha \approx 8490km \quad (3.4.45)$$

Η παράμετρος  $K=\alpha_{i\sigma}/\alpha$  ονομάζεται **τροποσφαιρικός δείκτης** και παίρνει τιμές μεταξύ 0,5 και 5. [8]

Ο **τροποποιημένος δείκτης διάθλασης** (modified refractive index) ορίζεται από τη σχέση:

$$M = (n - 1 + \frac{h}{a})10^6 \quad (3.4.46)$$

Για την πρότυπη ατμόσφαιρα, ο δείκτης  $M$  αυξάνει κατά περίπου 12 μονάδες ανά 100 m ύψους και έχει την τιμή  $M_0 \approx 330$  κοντά στην επιφάνεια της γης. Οι διάφορες συνθήκες της τροπόσφαιρας εκφράζονται από τις καμπύλες του δείκτη  $M$ . Στο σχήμα 3.4.19 απεικονίζονται χαρακτηριστικές καμπύλες του τροποποιημένου δείκτη διάθλασης  $M$  και στο σχήμα 3.4.20 δείχνονται οι αντίστοιχες τροχιές των ηλεκτρομαγνητικών ακτίνων ως προς την καμπυλότητα της γης. [8]



**Σχήμα 3.4.19:** Χαρακτηριστικές καμπύλες του τροποποιημένου δείκτη διάθλασης. [8]

Ευθύγραμμη καμπύλη  $M$  με θετική κλίση  $dM/dh=0,118 \text{ m}^{-1}$  ( $K=4/3$ ), αντιστοιχεί σε **συνθήκες πρότυπης ατμόσφαιρας**. Αυτό συμβαίνει όταν οι μετεωρολογικές συνθήκες προκαλούν ασθενείς μετακινήσεις αερίων μαζών με κάθετη συνιστώσα. Αν ο δείκτης

διάθλασης  $M$  αυξάνει με το ύψος ταχύτερα απ' ότι στην περίπτωση της πρότυπης ατμόσφαιρας, δηλαδή η κλίση της καμπύλης  $M(h)$  είναι μεγαλύτερη. Στην περίπτωση αυτή  $dM/dh$  είναι μεγαλύτερο απ' ότι στην πρότυπη ατμόσφαιρα και συνεπώς  $\alpha_{i\sigma}$  και  $K$  ελαττώνονται. Στην οριακή περίπτωση της ομοιογενούς ατμόσφαιρας ( $dn/dh=0$ ),  $dM/dh=0,157 \text{ m}^{-1}$ ,  $\rho=\infty$  και  $K=1$  που σημαίνει ότι η τροχιά των ακτίνων είναι ευθύγραμμη (σχήμα 3.4.20). Όταν  $0 < K < 1$ , η καμπυλότητα  $1/\rho$  είναι αρνητική και οι τροχιές των ακτίνων καμπυλώνονται προς τα άνω

Όταν ο δείκτης διάθλασης μειώνεται με το ύψος  $h$  ταχύτερα απ' ότι στην περίπτωση της πρότυπης ατμόσφαιρας, η κλίση της καμπύλης  $M(h)$  μειώνεται και συνεπώς  $dM/dh < 0,118 \text{ m}^{-1}$ . Υπό αυτές τις συνθήκες, η ισοδύναμη ακτίνα της γης  $\alpha_{i\sigma}$  είναι μεγαλύτερη από αυτήν που αντιστοιχεί στην πρότυπη ατμόσφαιρα και  $K > 4/3$ . Η ακτίνα καμπυλότητας  $\rho$  της τροχιάς του κύματος είναι μικρότερη της ακτίνας  $\rho$  της πρότυπης ατμόσφαιρας και συνεπώς οι τροχιές τείνουν να πλησιάσουν τη γη περισσότερο του κανονικού. Στην οριακή περίπτωση όπου  $M$  είναι σταθερό με το ύψος η κλίση της καμπύλης  $M(h)$  είναι άπειρη και η ισοδύναμη ακτίνα  $\alpha_{i\sigma}$  είναι και αυτή άπειρη. Συνεπώς  $K=\infty$  και  $\rho=\alpha$ , δηλαδή η τροχιά του κύματος είναι παράλληλη προς την επιφάνεια της γης [8]

Οι τελευταίες δύο συνθήκες αντιστοιχούν στις λεγόμενες **υπερπρότυπες συνθήκες** (superstandard) και οφείλονται γενικά σε αύξηση της θερμοκρασίας με το ύψος ή σε μείωση των υδρατμών με το ύψος. Π.χ. κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν, λόγω ισχυρής ψύξης της επιφάνειας της γης, ο αέρας κοντά στο έδαφος λαμβάνει θερμοκρασίες χαμηλότερες από εκείνες των υπερκείμενων μαζών αέρα. [8]

### 3.4.12 Ραδιοηλεκτρικός Ορίζοντας - Πολλαπλές Οδεύσεις

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο (σχήμα 3.4.19) η καμπύλη του δείκτη διάθλασης  $n$  συναρτήσεως του ύψους  $h$ , μεταβάλλεται ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες, γεγονός που σημαίνει ότι η ατμόσφαιρα είναι ένα μεταβαλλόμενο ανομοιογενές μέσον. Αν όμως αντικαταστήσουμε την πραγματική ακτίνα της γης με την ισοδύναμη ακτίνα  $Ka$ , η μεταβαλλόμενη ανομοιογενής ατμόσφαιρα μετατρέπεται σε μια ατμόσφαιρα ομοιογενή και ισοτροπική όπου ο δείκτης διάθλασης είναι σταθερός. Επομένως οι εξισώσεις που προσδιορίστηκαν στα προηγούμενα θεωρώντας την ατμόσφαιρα ομοιογενή και ισοτροπική, ισχύουν και για την ομοιογενή ατμόσφαιρα,

αρκεί να αντικαταστήσουμε την ακτίνα της γης  $\alpha$  με την ισοδύναμη ακτίνα  $K\alpha$ . Έτσι η εξίσωση (3.4.24) η οποία δίνει τη μέγιστη απόσταση ζεύξης οπτικής επαφής μετατρέπεται στην ακόλουθη: [8]

$$d = \sqrt{2Ka}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (3.4.47)$$

και οι εξισώσεις (3.4.19) των διορθωμένων υψών  $h_1'$  και  $h_2'$  των κεραιών εκπομπής και λήψης, στις εξής:

$$h_1' = h_1 - \frac{d_1^2}{2Ka} \quad (3.4.48)$$

$$h_2' = h_2 - \frac{d_2^2}{2Ka}$$

Οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν κατά το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου είναι εκείνες της πρότυπης ατμόσφαιρας, πράγμα που σημαίνει ότι οι ηλεκτρομαγνητικές ακτίνες ακολουθούν ικανοποιητικά την καμπυλότητα της γης και επομένως μπορούν να ξεπεράσουν τα εμπόδια τα οποία θα παρεμπόδιζαν ευθύγραμμες τροχιές κυμάτων. Συνεπώς, ο **ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας** είναι μεγαλύτερος από τον γεωμετρικό ορίζοντα. Αντικαθιστώντας την τιμή του  $K=4/3$  στην εξίσωση (3.4.47) προκύπτει για την πρότυπη ατμόσφαιρα: [8]

$$d = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (3.4.49)$$

όπου  $d$  δίνεται σε  $km$  και  $h_1, h_2$  σε  $m$ . Έτσι αντί του συντελεστή 3,57 στην εξίσωση (3.4.25) έχουμε τώρα τον συντελεστή 4,12.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση επαλήθευσης των συνθηκών οπτικής επαφής μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης, η αύξηση της γήινης ακτίνας που αναφέραμε προηγουμένως μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένους υπολογισμούς, αφού ισχύει μεν ότι ο τροποσφαιρικός δείκτης  $K$  ισούται με  $4/3$  για ποσοστό χρόνου μεγαλύτερο του 50%, όμως για χρονικά διαστήματα της τάξης του 1% ή 2% ο δείκτης  $K$  λαμβάνει τιμές μικρότερες ή ίσες της μονάδας. Επίσης, οι ραδιοζεύξεις απαιτείται συνήθως να εξασφαλίζουν επικοινωνία για ποσοστά χρόνου της τάξης του 99% και πλέον και συνεπώς για την επαλήθευση της οπτικής επαφής απαιτείται να λαμβάνεται  $K=1$ . Ακόμη, οι μεταβολές του  $K$  έχουν ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση του σημείου

ανάκλασης και κατά συνέπεια να μεταβάλλεται η διαφορά φάσης  $\Delta$  μεταξύ του πεδίου του κατευθείαν κύματος  $E_d$  και του πεδίου του ανακλώμενου κύματος  $E_r$ , με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται το συνιστάμενο πεδίο στον δέκτη το οποίο μπορεί να πάρει όλες τις τιμές μεταξύ  $E_d + E_r$  και  $E_d - E_r$ . [8]

Τέλος είναι δυνατόν ορισμένες ηλεκτρομαγνητικές ακτίνες να ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές διαφορετικού μήκους κατά τη μετάδοση από τον πομπό στο δέκτη, γεγονός που αποτελεί το φαινόμενο των πολλαπλών οδεύσεων. Αυτό συμβαίνει συνήθως χωρίς ανακλάσεις από το έδαφος και οφείλεται σε ανομοιογένειες στην ατμόσφαιρα, οι οποίες χωρίζουν την τροχιά του κατευθείαν κύματος σε επιμέρους τροχιές. [8]

### 3.4.13 Τροποσφαιρικός κυματοδηγός

Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση η οποία είναι συνηθισμένη πάνω από τις θάλασσες, είναι εκείνη κατά την οποία η κλίση της καμπύλης  $M$  είναι αρνητική κοντά στην επιφάνεια της γης και μετά από ορισμένο ύψος γίνεται θετική ή η αρνητική κλίση εκτείνεται εντός ενός περιορισμένου ύψους, αρχίζοντας από κάποιο ύψος της ατμόσφαιρας. Διαδοχικές ανακλάσεις μεταξύ της γης και του θεωρούμενου τροποσφαιρικού στρώματος είναι δυνατές και επιτρέπουν ζεύξεις σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. [8]

Συνεπώς οι ηλεκτρομαγνητικές ακτίνες τείνουν να παραμείνουν εντός ενός είδους κυματοδηγού, ο οποίος ονομάζεται **τροποσφαιρικός κυματοδηγός** (duct) και ο οποίος σχηματίζεται από την επιφάνεια της γης και από το θεωρούμενο τροποσφαιρικό στρώμα. Συνήθως όμως ο τροποσφαιρικός κυματοδηγός σχηματίζεται μεταξύ δύο τροποσφαιρικών στρωμάτων εντός των οποίων η απόκλιση του δείκτη διάθλασης  $M$  είναι αρνητική. Συνθήκες αυτού του είδους προκαλούνται συνήθως από μάζες αέρα ζεστού και ξηρού πάνω από υγρές ή υδάτινες επιφάνειες (θάλασσες, ωκεανούς). Η ισχυρή εξάτμιση που επακολουθεί παράγει μια ταχύτατη μείωση των υδρατμών με το ύψος. Στην ξηρά προκαλούνται από ψύξη του εδάφους κατά τη διάρκεια της νύχτας, γεγονός που προκαλεί αναστροφή της θερμοκρασίας. Στη Μεσόγειο θάλασσα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού παρατηρούνται για ποσοστά χρόνου μεγαλύτερα από 70%, μετεωρολογικές συνθήκες που οδηγούν σε δραστική μείωση του δείκτη διάθλασης με το

ύψος, δηλαδή συνθήκες που ευνοούν το σχηματισμό τροποσφαιρικών κυματοδηγών. Στην πράξη μόνο οι ακτίνες που σχηματίζουν γωνία με τον ορίζοντα της τάξης της  $1^\circ - 1,5^\circ$  μπορούν να κυματοδηγηθούν. [8]

Γενικά, ο τροποσφαιρικός κυματοδηγός συμπεριφέρεται όπως οι μεταλλικοί κυματοδηγοί, δηλαδή η επίδρασή του γίνεται αισθητή μόνο για μήκη κύματος μικρότερα ενός μήκους κύματος αποκοπής, το οποίο εξαρτάται από το ύψος του τροποσφαιρικού κυματοδηγού. Το ύψος αυτό λαμβάνει τιμές από μερικά  $m$  μέχρι περίπου  $100 m$  και οι αντίστοιχες συχνότητες αποκοπής κυμαίνονται από  $10 GHz$  μέχρι περίπου  $500 MHz$ . Προσεγγιστικά το μήκος κύματος αποκοπής  $\lambda_c$  σε  $cm$  είναι  $\lambda_c \cong 0,085 h_c^{3/2}$ , όπου  $h_c$  είναι το ύψος του κυματοδηγού σε  $m$ . [8]

Η παρουσία τροποσφαιρικών κυματοδηγών δύναται να προκαλέσει διαλείψεις του σήματος λήψης και συνήθως οι υψηλότερες συχνότητες υφίστανται αυτόν τον τύπο διαλείψεων. Για την αποφυγή αυτών των διαλείψεων πρέπει η ηλεκτρομαγνητική ακτίνα μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης να βρίσκεται όσο το δυνατόν υψηλότερα από το έδαφος και οπωσδήποτε υπεράνω του ύψους του τροποσφαιρικού κυματοδηγού που είναι δυνατόν να σχηματισθεί στην περιοχή που πραγματοποιείται η ζεύξη. [8]

Σε περίπτωση σχηματισμού τροποσφαιρικού κυματοδηγού, τα αποτελέσματα όσον αφορά το πεδίο λήψης στο δέκτη είναι διαφορετικά, ανάλογα με τη θέση των κεραιών εκπομπής και λήψης ως προς το ύψος του κυματοδηγού. Αν και οι δύο κεραιές βρίσκονται υπεράνω του τροποσφαιρικού κυματοδηγού η διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν υφίσταται καμιά επίδραση. Αν και οι δύο κεραιές βρίσκονται εντός του τροποσφαιρικού κυματοδηγού το πεδίο στην κεραία λήψης είναι ισχυρότερο από εκείνο που θα υπήρχε αν δεν υπήρχε ο κυματοδηγός. [8]

Τέλος αν η μία κεραία βρίσκεται εντός και η άλλη εκτός του κυματοδηγού, το πεδίο στην κεραία λήψης είναι ασθενέστερο του πεδίου που θα υπήρχε χωρίς την ύπαρξη κυματοδηγού. Η καμπύλωση ως προς την επιφάνεια της γης μερικών ακτίνων μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τη λήψη ηλεκτρομαγνητικών ακτίνων, οι οποίες διανύουν διαφορετικές διαδρομές διαφορετικού μήκους. [8]

#### **3.4.14 Τροποσφαιρική σκέδαση**

Ο μηχανισμός με τον οποίο διαδίδονται τα υπερβραχέα κύματα σε μεγάλες αποστάσεις πολύ πέραν του ορίζοντα, οφείλονται στο φαινόμενο σκεδάσεώς τους. Με βάση τη



θεωρία της περίθλασης προκύπτουν, για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε σημεία πέραν του ορίζοντα της τάξης εκατοντάδων  $km$ , τιμές αρκετών εκατοντάδων  $dB$  κάτω από τις αντίστοιχες τιμές λόγω απόσβεσης στον ελεύθερο χώρο και συνεπώς αποκλείεται κάθε δυνατότητα επικοινωνίας σύμφωνα με τη θεωρία αυτή. Όμως, πειραματικές μετρήσεις της εντάσεως του πεδίου σε τέτοιες αποστάσεις, έχουν δείξει ότι οι αποσβέσεις είναι μικρότερες των προβλεπομένων με βάση τη θεωρία της περίθλασης. Πιο συγκεκριμένα, οι συμπληρωματικές αποσβέσεις ως προς τον ελεύθερο χώρο είναι της τάξης των  $70-100\ dB$ , γεγονός που επιτρέπει αξιόπιστες ζεύξεις μέχρι αποστάσεις  $500-600\ km$ . Αυτή η διαφορά μεταξύ των θεωρητικών υπολογισμών βάσει της θεωρίας της περίθλασης και των πειραματικών δεδομένων, οφείλεται στο φαινόμενο **σκέδασης** (scattering) των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, λόγω ανομοιογενειών του δείκτη διάθλασης σε ορισμένες περιοχές της τροπόσφαιρας. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται κέντρα σκέδασης και μπορούν να θεωρηθούν σαν φυσαλίδες με διαστάσεις της τάξης μεγέθους του μέτρου. Όταν περιβληθούν από ηλεκτρομαγνητικά κύματα προκαλούν καμπύλωση και διάχυση των ηλεκτρομαγνητικών ακτίνων προς όλες τις κατευθύνσεις. Ως αποτέλεσμα, ένα μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας φτάνει σε σημεία πολύ πέραν του ορίζοντα. Ο σχηματισμός των περιοχών ανομοιογένειας καθώς και η τιμή του δείκτη διάθλασης σε κάθε μια από αυτές μεταβάλλονται με το χρόνο και έτσι η ένταση του πεδίου που οφείλεται στο φαινόμενο τροποσφαιρικής σκέδασης σε σημεία πολύ πέραν του οπτικού ορίζοντα παρουσιάζει διακυμάνσεις με το χρόνο. Οι διακυμάνσεις αυτές (fading) κατατάσσονται σε αργού τύπου και ταχέως τύπου διακυμάνσεις. Στη δεύτερη περίπτωση η ένταση του λαμβανόμενου πεδίου ακολουθεί κατανομή Rayleigh και οι διακυμάνσεις αυτού του τύπου μπορούν να ελαττωθούν σημαντικά χρησιμοποιώντας συστήματα διαφορικής λήψης. Οι διακυμάνσεις αργού τύπου ακολουθούν κατανομή log-κανονική (log-normal). [8]

Όταν μια λεπτή ηλεκτρομαγνητική δέσμη προσπίπτει σε μια περιοχή κέντρων σκέδασης, η διαχυόμενη προς τις διάφορες διευθύνσεις ενέργεια μεταβάλλεται σημαντικά με τη γωνία  $\theta$ , η οποία ορίζεται από τον άξονα της δέσμης και τη διεύθυνση όπου θεωρείται η σκέδαση και ονομάζεται **γωνία σκέδασης**. Το διάνυσμα Poynting  $P$  (δηλαδή η πυκνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος) δίνεται συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  από τη σχέση: [8]

$$P(\theta) = \frac{P_o}{\theta^4} \quad (3.4.50)$$

όπου  $P_o = W_T G_T / (4\pi r_1)^2$ . Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι, όταν η κεραία εκπομπής είναι ιστροπική, στην παραγωγή του πεδίου σκέδασης σε σημεία πέραν του οπτικού ορίζοντα, συνεισφέρουν κυρίως εκείνες οι περιοχές σκέδασης για τις οποίες η γωνία  $\theta$  είναι ελάχιστη, ενώ οι συνεισφορές των άλλων κέντρων είναι σχεδόν αμελητέες. Ο **όγκος σκέδασης** που συνεισφέρει ενεργά στην παραγωγή του πεδίου σκέδασης στο σημείο λήψης  $R$  είναι εκείνος ο οποίος θεωρείται από τις κεραίες εκπομπής και λήψης εντός γωνίας: [8]

$$a_o = \frac{2}{3} \frac{d}{a} \quad (3.4.51)$$

υπεράνω του ορίζοντα (σχήμα 3.4.23), όπου  $a$  είναι η ακτίνα της γης και  $d$  η απόσταση της ζεύξης.

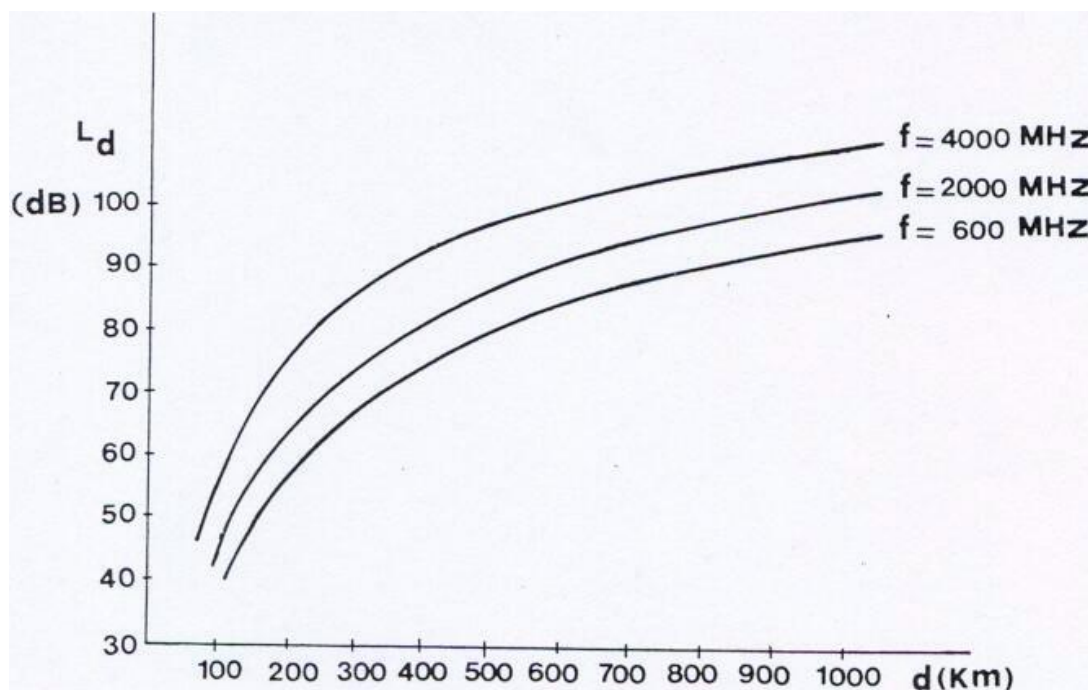
Αν στα σημεία  $T$  και  $R$  τοποθετηθούν δύο κατευθυντικές κεραίες (σχήμα 3.4.23) και αυξήσουμε σταδιακά το κέρδος τους, τότε ελαττώνεται η γωνία ανοίγματος  $\alpha$  της δέσμης εκπομπής και λήψης, δηλαδή τα εύρη δέσμης ακτινοβολίας των δύο κεραίων. Αρχικά, όταν  $\alpha > \alpha_o$ , έχουμε αύξηση του «φωτισμού» του χρήσιμου όγκου σκέδασης  $V$  και επομένως την ανάλογη αύξηση της ισχύος σκέδασης από τον όγκο  $V$ . Όταν  $\alpha < \alpha_o$ , τότε έχουμε αύξηση της ακτινοβολούμενης ισχύος από την κεραία εκπομπής και αντίστοιχη αύξηση της απορροφούμενης ισχύος από την κεραία λήψης, όμως το πλεονέκτημα μεγαλύτερου «φωτισμού» του όγκου  $V$ , μειώνεται εν μέρει από το γεγονός ότι ο όγκος  $V$  καθίσταται μικρότερος από εκείνον ο οποίος είναι σε θέση να σκεδάσει χρήσιμα ισχύ από τον πομπό  $T$  στον δέκτη  $R$ . Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται σαν μια έλλειψη αυξήσεως του κέρδους των κεραίων αυξανόμενων των διαστάσεών τους και ονομάζεται **απώλεια σύζευξης της κεραίας με το μέσον**. Η απώλεια αυτή είναι συνάρτηση του κέρδους  $G_o$ , το οποίο η κεραία θα είχε αν χρησιμοποιούνταν σε ζεύξεις οπτικής επαφής και συνάρτηση της απόστασης  $d$  της ζεύξης τροποσφαιρικής σκέδασης. Στον πίνακα 3.4.1 δίνονται ορισμένες τιμές σε  $dB$  της απώλειας σύζευξης με το μέσον, της κεραίας εκπομπής  $L_{CT}$  και της κεραίας λήψης  $L_{CR}$  και αντίστοιχες τιμές του κέρδους  $G_s$  της κεραίας που χρησιμοποιείται σε ζεύξη τροποσφαιρικής σκέδασης. [8]

**Πίνακας 3.4.1:** Απώλεια σύζευξης της κεραίας με το μέσον[8]

d(km)	$G_o$ (dB)	$G_s$ (dB)	$L_{CT}$ (dB)	$L_{CR}$ (dB)
200	34	33,5	0,5	3,8
	42,5	39	3,5	7

400	34	31,2	2,8	4,5
	42,5	36,3	6,2	11
600	34	30,5	3,5	8
	42,5	34	8,5	17,5

Επιπλέον της απώλειας σύζευξης με το μέσον, σε μια ζεύξη τροποσφαιρικής σκέδασης πρέπει να ληφθεί υπόψη και η **συμπληρωματική απόσβεση** ως προς εκείνη της διάδοσης στον ελεύθερο χώρο. Αυτή εξαρτάται από την απόσταση  $d$  και είναι σχεδόν ανεξάρτητη της συχνότητας. Η συμπληρωματική απόσβεση ορίζεται για διάφορα ποσοστά χρόνου, δεδομένου ότι το πεδίο λήψης υφίσταται διακυμάνσεις στο χρόνο. Στο σχήμα 3.4.24 δίνονται ενδεικτικές καμπύλες συμπληρωματικής απόσβεσης για διάφορες συχνότητες οι οποίες αναφέρονται σε μέσες τιμές, δηλαδή τιμές που δεν υπερβαίνουν το 50% του χρόνου της ζεύξης. [8]



**Σχήμα 3.4.24:** Συμπληρωματική μέση απόσβεση για διάφορες συχνότητες. [8]

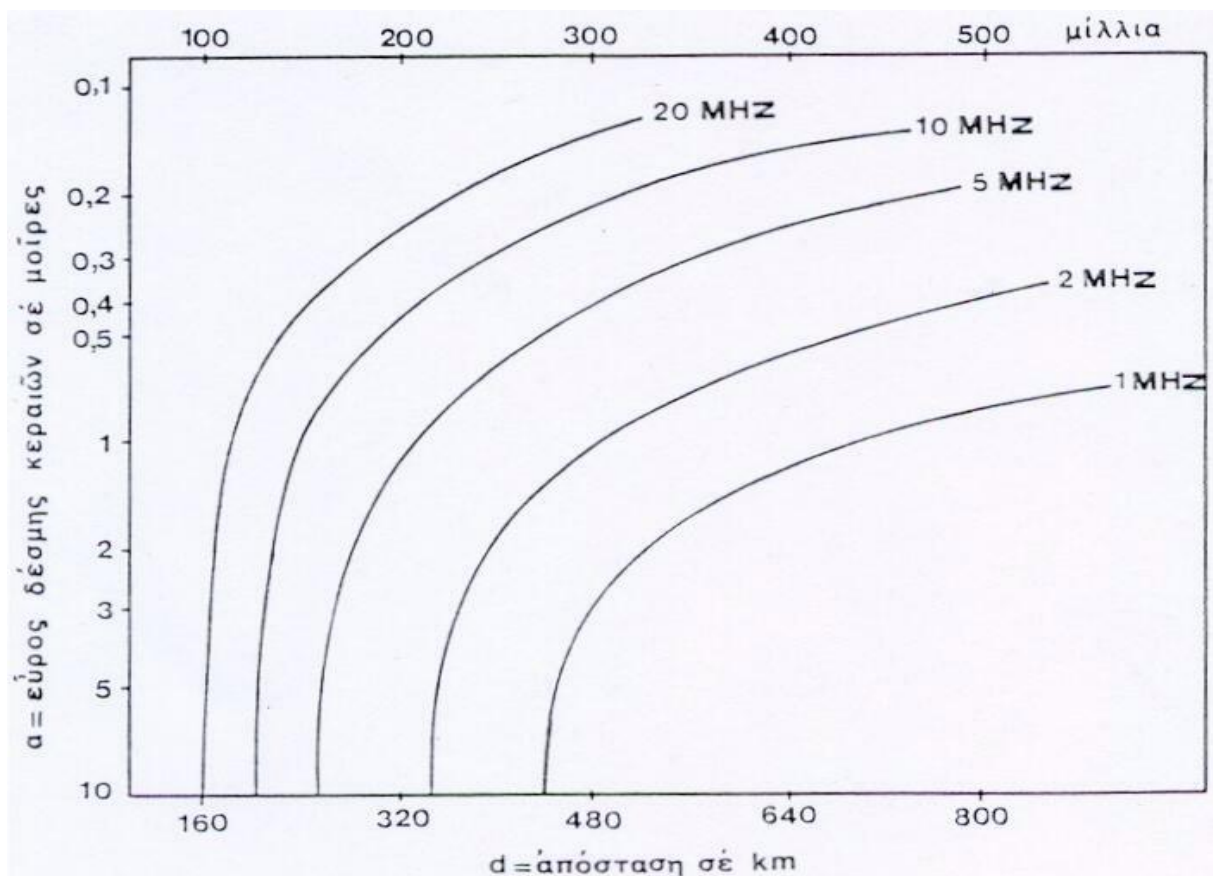
Αποδεικνύεται ότι η **συνολική μέση απόσβεση** δίνεται σε  $dB$  από την ακόλουθη σχέση:

$$L = 122 + 20 \log d - 20 \log \lambda - G_T - G_R + L_d + L_{CT} + L_{CR} = L_o + L_d + L_{CT} + L_{CR}$$

(3.4.52)

όπου  $L_o$  είναι η απώλεια μετάδοσης στον ελεύθερο χώρο σε  $dB$ ,  $L_d$  η συμπληρωματική μέση απόσβεση σε  $dB$  και  $L_{CT}$ ,  $L_{CR}$  οι **απώλειες** σύζευξης με το μέσον των κεραιών εκπομπής και λήψης σε  $dB$  αντίστοιχα. [8]

Το εύρος ζώνης μεταφοράς πληροφοριών σε μια **ζεύξη** τροποσφαιρικής σκέδασης, εξαρτάται από τον όγκο σκέδασης  $V$  και παρουσιάζεται ενδεικτικά στο σχήμα 3.4.25. Με κεραιές χαμηλής κατευθυντικότητας ( $\alpha > \alpha_o$ ) έχουμε το ελάχιστο εύρος ζώνης το οποίο ορίζεται από τον μέγιστο χρήσιμο όγκο σκέδασης, δηλαδή από τη γωνία  $\alpha_o$ . Για κεραιές υψηλής κατευθυντικότητας ( $\alpha < \alpha_o$ ), ο χρήσιμος όγκος σκέδασης περιορίζεται από τη γωνία ανοίγματος των δεσμών των κεραιών εκπομπής και λήψης και συνεπώς μειώνεται η διαφορά διαδρομών των ακτίνων σκέδασης με αποτέλεσμα να αυξάνεται το εύρος ζώνης της ζεύξης. [8]



**Σχήμα 3.4.25:** Εύρος ζώνης ζεύξης τροποσφαιρικής σκέδασης. [8]

Οι περιοχές συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται σε ζεύξεις τροποσφαιρικής σκέδασης είναι από 150-2000 MHz ή ακόμη και 4 GHz. Κάτω των 150 MHz το κόστος των κεραιών αυξάνει κατά πολύ λόγω των απαιτούμενων μεγάλων διαστάσεων. Για την αντιστάθμιση της μεγάλης συμπληρωματικής απόσβεσης χρησιμοποιούνται κεραιές με κέρδη μεγαλύτερα των 40 dB και ισχείς εκπομπής μέχρι μερικές δεκάδες KW. Ζεύξεις τροποσφαιρικής σκέδασης για αποστάσεις της τάξης των 500-600 km επιτρέπουν τη μεταβίβαση πληροφοριών που περιέχει 24 τηλεφωνικές διοδεύσεις με καλή ποιότητα σήματος προς θόρυβο. Για τη μετάδοση τηλεοπτικής διοδεύσεως έχουμε ικανοποιητική ζεύξη για αποστάσεις περίπου 200-300 km. [8]

### 3.4.15 Διαλείψεις και συστήματα διαφορικής λήψης

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, κατά τη διάδοσή του στο μέσο, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα υφίσταται μεταβολές τόσο στο εύρος όσο και στη φάση του, συναρτήσει του χρόνου κατά τυχαίο τρόπο. Οι μεταβολές αυτές και ιδιαίτερα εκείνες του πλάτους ονομάζονται **διαλείψεις** (fading) και εκφράζονται σε dB ως προς την θεωρητική στάθμη του σήματος στον ελεύθερο χώρο ή ως προς την πραγματική μέση στάθμη του σήματος, που διαφέρει από την προηγούμενη κατά μερικά dB. Οι διαλείψεις οφείλονται στη στιγμιαία εκτροπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας προς άλλες κατευθύνσεις ή στη συμβολή κυμάτων που φτάνουν στον δέκτη μέσω διαφορετικών οδών (πολλαπλές οδεύσεις) ή ακόμη στη συμβολή μεταξύ του κατευθείαν και του ανακλώμενου κύματος και σε μεταβολές των ατμοσφαιρικών συνθηκών κατά μήκος της ζεύξης. Οι διαλείψεις αυξάνουν συνήθως με την αύξηση της συχνότητας και την απόσταση της ζεύξης. Μόνο στην ιδεώδη περίπτωση ομοιόμορφης ατμόσφαιρας η μετάδοση γίνεται με το κατευθείαν κύμα, διαφορετικά το κύμα υφίσταται καμπύλωση προς τα άνω ή προς τα κάτω ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν. Η καμπύλωση αυτή μπορεί να οδηγήσει στον μετασχηματισμό μιας ζεύξης οπτικής επαφής σε μια **ζεύξη** άνευ ορατότητας

Διαλείψεις που οφείλονται στη συμβολή του κατευθείαν και του ανακλώμενου κύματος, είναι σημαντικές σε ζεύξεις υπεράνω θαλάσσης, λιμνών ή λείου υγρού εδάφους και μπορούν να ελαχιστοποιηθούν τοποθετώντας τη μια κεραιά υψηλά και την άλλη χαμηλά. Με τον τρόπο αυτόν το σημείο ανάκλασης τοποθετείται πλησίον της χαμηλής

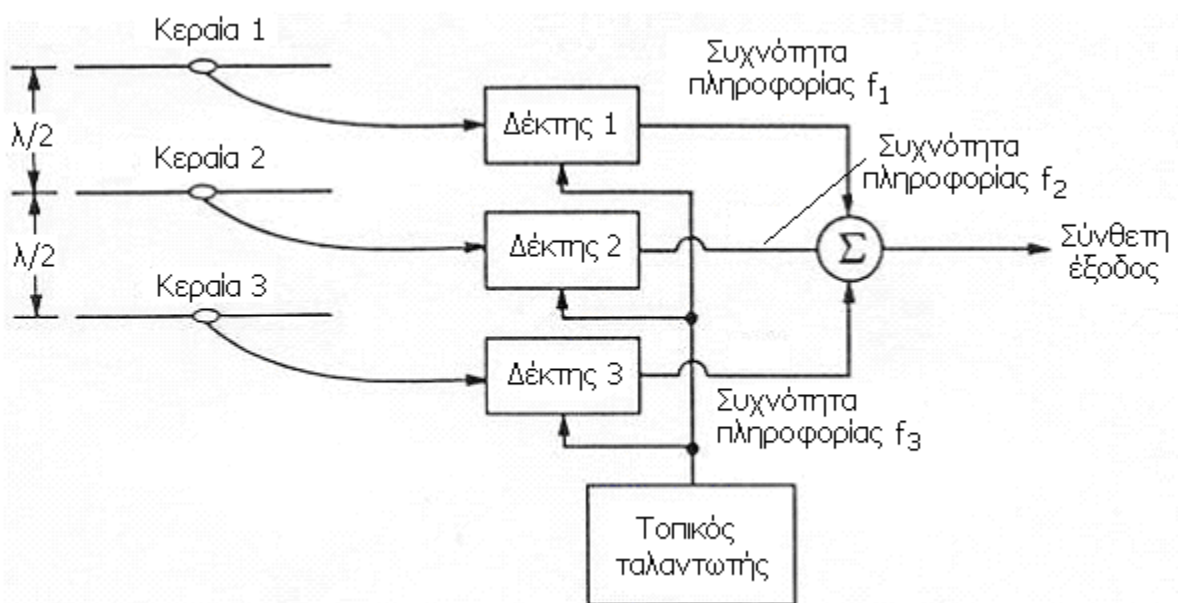
κεραίας και η διαφορά φάσης μεταξύ του κατευθείαν και του ανακλώμενου κύματος παραμένει σχετικά σταθερή. [8]

Όσον αφορά το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών του κύματος το οποίο προκαλεί διαλείψεις, αυτό οφείλεται στις ανομοιογένειες του δείκτη διάθλασης κυρίως κατά την κατακόρυφη διεύθυνση αλλά και σε μικρότερο βαθμό, κατά την οριζόντια διεύθυνση. Λόγω διαφοράς στα μήκη των διαδρομών, το σήμα στον δέκτη είναι το άθροισμα των συνιστωσών με συγκρίσιμα πλάτη αλλά τυχαίες φάσεις. Η κατανομή των διαλείψεων λόγω πολλαπλών οδεύσεων πλησιάζει την κατανομή Rayleigh. Το βάθος των διαλείψεων στη χειρότερη περίπτωση, φτάνει τα 40 dB. [8]

Για τον περιορισμό των διαλείψεων χρησιμοποιούνται στην πράξη τρεις διαφορετικές τεχνικές: η **διαφορική λήψη συχνότητας**, η **διαφορική λήψη χώρου** και η **διαφορική λήψη πολικότητας**. [8]

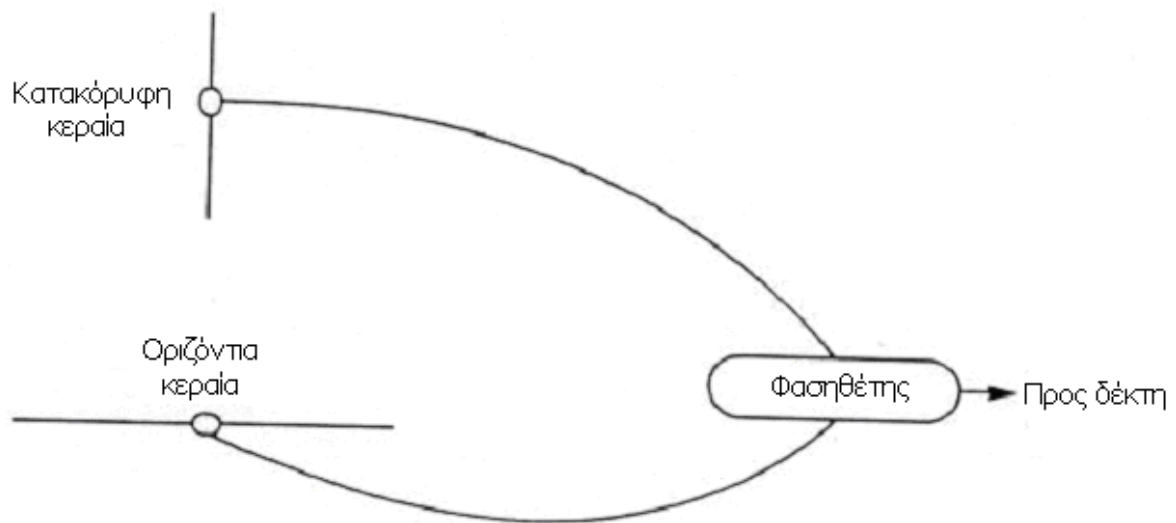
Στη **διαφορική λήψη συχνότητας** ο **πομπός** εκπέμπει σε δύο ή περισσότερες συχνότητες συγχρόνως, οι οποίες περιέχουν την ίδια διαμορφώνουσα πληροφορία. Εφόσον οι δύο συχνότητες θα παρουσιάζουν διαφορετική διάλεια κατά τη διάδοση, η μία θα έχει πάντα ισχυρό πλάτος. [8]

Σε ένα σύστημα **διαφορικής λήψης χώρου** (σχήμα 3.4.27) ο **πομπός** εκπέμπει μία συχνότητα αλλά στη λήψη χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερες κεραίες λήψης σε απόσταση μισού μήκους κύματος μεταξύ τους. Έτσι το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να παρουσιάζει διάλεια στη μία κεραία λήψης αλλά θα είναι ισχυρό στην άλλη κεραία. [8]



**Σχήμα 3.4.27:** Σύστημα διαφορικής λήψης χώρου. [8]

Το σύστημα διαφορικής λήψης πολικότητας (σχήμα 3.4.28) χρησιμοποιεί στη λήψη κεραίες, και οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης. Οι έξοδοι από τις δύο κεραίες λήψης συνδυάζονται για να παράγουν ένα σταθερό σήμα εξόδου. [8]



**Σχήμα 3.4.28:** Σύστημα διαφορικής λήψης πολικότητας. [8]

Ένας άλλος τύπος διάλειψης είναι η **επιλεκτική διάλειψη** και προέρχεται από το γεγονός ότι η διάλειψη είναι συνάρτηση της συχνότητας. Σε ένα σήμα με *AM* διαμόρφωση για παράδειγμα, η άνω και η κάτω πλευρική ζώνη διαφέρουν ελαφρώς ως προς τη συχνότητα και έτσι φτάνουν στο δέκτη με διαφορετικές φάσεις. Αυτού του είδους η διάλειψη μπορεί να αντιμετωπιστεί με εκπομπή της μιας μόνο πλευρικής ζώνης ή με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων στον δέκτη. [8]

### 3.4.16 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την ατμόσφαιρα

Για συχνότητες μικρότερες των  $3\text{ GHz}$  περίπου, τα συστατικά αέρια της ατμόσφαιρας δεν προκαλούν απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Αντίθετα, για συχνότητες μεγαλύτερες των  $3\text{ GHz}$ , η εξασθένιση των κυμάτων που οφείλεται στην απορρόφηση ενέργειας από το οξυγόνο και τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας, καθώς και στην απορρόφηση και σκέδαση ενέργειας από τη βροχή, το χαλάζι ή την ομίχλη είναι σημαντική. [8]

Η προκαλούμενη εξασθένιση λόγω απορροφήσεως ενέργειας από τα μόρια του οξυγόνου και του υδρατμού αυξάνει εκθετικά με το μήκος της ζεύξης και επομένως μπορεί να εκφραστεί σε  $dB/km$ . [8]

Η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που οφείλεται στο οξυγόνο και τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας εξαρτάται από τη συχνότητα, την πίεση των υδρατμών και τη θερμοκρασία. Σε μία δεδομένη ζεύξη, η πίεση των υδρατμών, δηλαδή η απόλυτη υγρασία, συνήθως μεταβάλλεται κατά μήκος της ζεύξης και συνεπώς η απορρόφηση της ενέργειας παρουσιάζει μεταβολές συναρτήσει του χρόνου.

Γενικά, τα φαινόμενα σκέδασης και ανάκλασης των μικροκυμάτων στην τροπόσφαιρα οφείλονται σε ανομοιογένειες της τροπόσφαιρας, οι οποίες είναι συγκρίσιμες προς τα μήκη κύματος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων της περιοχής αυτής των συχνοτήτων. Λόγω της σημαντικής απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε αυτά τα μήκη κύματος, δεν χρησιμοποιούνται στις συνήθεις ραδιοζεύξεις συχνότητες μεγαλύτερες των  $10\text{ GHz}$  περίπου για ζεύξεις απόστασης αρκετών δεκάδων  $km$ , όπως και συχνότητες μεγαλύτερες των  $20\text{ GHz}$  περίπου για ζεύξεις απόστασης της τάξης των  $10\text{ km}$ . [8]

### 3.4.17 Ιονοσφαιρική διάδοση

Για συχνότητες μικρότερες των  $30\text{ MHz}$ , όπως και μικρότερες των  $100\text{ MHz}$ , η ιονόσφαιρα αποτελεί ένα ακόμη μέσον διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, για ζεύξεις απόστασης πολύ πέραν των κυμάτων εδάφους και των τροποσφαιρικών κυμάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι για συχνότητες μεγαλύτερες των  $30\text{ MHz}$  και μικρότερες των  $100\text{ MHz}$ , ο μηχανισμός διάδοσης είναι διαφορετικός από εκείνον με τον οποίον διαδίδονται κύματα συχνότητας μικρότερης των  $30\text{ MHz}$ . Συχνότητες από  $1,6$  μέχρι  $30\text{ MHz}$ , διαδίδονται κατόπιν διάθλασης και ανάκλασης στην ιονόσφαιρα. Αν και τα τελευταία χρόνια οι **δορυφορικές ζεύξεις** έχουν αντικαταστήσει τις **ιονοσφαιρικές τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις**, οι τελευταίες χρησιμοποιούνται ακόμη ευρύτατα στις [96]



τηλεπικοινωνίες για τη ναυσιπλοΐα, δηλαδή μεταξύ σταθερού και κινητού σημείου μεγάλης απόστασης. [8]

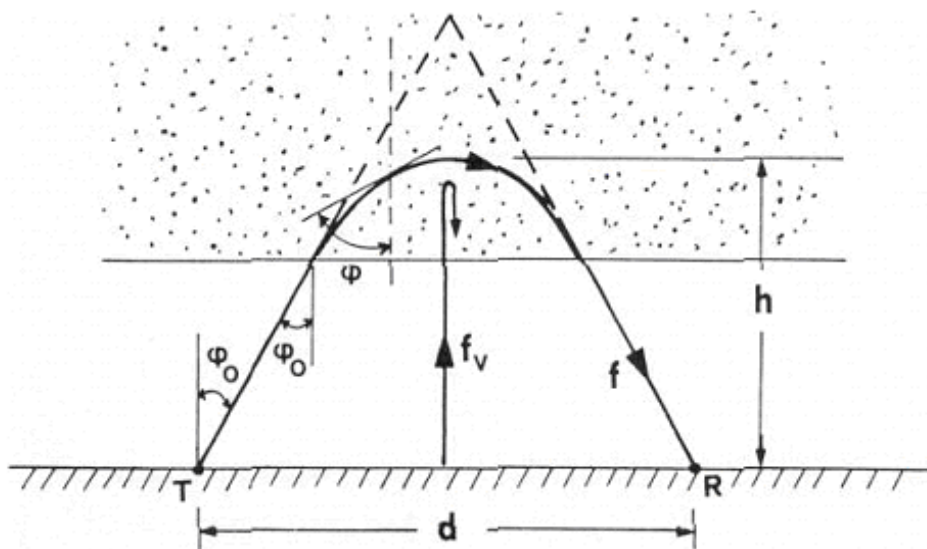
Η ιονόσφαιρα αποτελείται από **ιονισμένα στρώματα**, τα οποία βρίσκονται σε ύψη περίπου  $80-400\text{ km}$ . Η σχετικά υψηλή πυκνότητα ιόντων και ελευθέρων ηλεκτρονίων στην περιοχή αυτή, παρέχει έναν ενεργό δείκτη διάθλασης μικρότερο της μονάδος, με αποτέλεσμα τη διάθλαση και ανάκλαση των προσπιπόντων κυμάτων συχνότητας  $3-30\text{ MHz}$ . Κάτω από  $50\text{ km}$  ύψος, ο ιονισμός είναι αμελητέος όσον αφορά τη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Η ιονόσφαιρα σχηματίζεται δια ιονισμού των συστατικών της ανώτερης ατμόσφαιρας από την ηλιακή ακτινοβολία, κυρίως υπεριώδεις και  $X$  ακτίνες. [8]

### 3.4.18 Ιονοσφαιρική διάθλαση και ανάκλαση

Καθώς το ηλεκτρομαγνητικό κύμα εισχωρεί σε περιοχές όπου η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη, ο δείκτης διάθλασης μειώνεται και αντίστοιχα αυξάνεται η γωνία διάθλασης. Το κύμα υφίσταται τότε καμπύλωση (σχήμα 3.4.32). Εφαρμόζοντας το νόμο του Snell, προκύπτει: [8]

$$n \sin \phi = n_o \sin \phi_o \quad (3.4.53)$$

όπου  $\phi$  μετριέται από την κάθετο επί της επιφάνειας του ιονοσφαιρικού στρώματος στο σημείο στο οποίο η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι τέτοια ώστε η τιμή του δείκτη διάθλασης να είναι  $n$ . Στην είσοδο της ιονόσφαιρας ο δείκτης διάθλασης είναι  $n=n_o$  και λαμβάνεται  $n_o=1$ , δεδομένου ότι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων λαμβάνεται ίση με το μηδέν. [8]



**Σχήμα 3.4.32:** Διάθλαση ιονοσφαιρικού κύματος. [8]

Καμπύλωση της ακτίνας έτσι ώστε να έχουμε ανάκλαση, έχουμε όταν  $\sin\phi=1$ , οπότε η διαδρομή του κύματος είναι παράλληλη προς το ιονοσφαιρικό στρώμα. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση 3.4.53 μετατρέπεται στην ακόλουθη: [8]

$$n = \sin \phi_o \quad (3.4.54)$$

Γενικότερα, ο δείκτης διάθλασης στην τροπόσφαιρα δίνεται από τη σχέση:

$$n = \sqrt{1 - \frac{81N}{f^2}} \quad (3.4.55)$$

όπου η πυκνότητα των ηλεκτρονίων  $N$  δίνεται σε *ηλεκτρόνια/cm<sup>3</sup>* και η συχνότητα  $f$  σε *KHz*.

Από τις παραπάνω εξισώσεις (3.4.54, 3.4.55), αποδεικνύεται ότι το υψηλότερο σημείο στο οποίο φτάνει το κύμα είναι εκείνο στο οποίο η πυκνότητα των ηλεκτρονίων  $N$  ικανοποιεί τη σχέση:

$$N = \frac{f^2 \cos^2 \phi_o}{81} \quad (3.4.56)$$

Εάν η πυκνότητα των ηλεκτρονίων σε ένα ορισμένο ύψος του στρώματος είναι αρκετά μεγάλη ώστε να ικανοποιείται η παραπάνω εξίσωση, τότε το κύμα θα επιστρέψει στη γη. Εάν η τιμή της  $N$  είναι μικρότερη εκείνης της εξίσωσης (3.4.56), τότε το κύμα θα εισχωρήσει ενδότερα στο στρώμα. [8]

Για μια ηλεκτρομαγνητική ακτίνα συχνότητας  $f_v$ , η οποία προσπίπτει κάθετα επί της ιονόσφαιρας, οπότε  $\phi_o=0$ , προκύπτει από την εξίσωση (3.4.54) ότι ο δείκτης διάθλασης είναι  $n=0$  και επομένως η εξίσωση (3.4.55) γίνεται:

$$\sqrt{1 - \frac{81N}{f^2}} = 0 \quad (3.4.57)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η σχέση που πρέπει να πληρούται για την επιστροφή προς τη γη από το στρώμα με πυκνότητα ηλεκτρονίων  $N$ , κύματος συχνότητας  $f_v$  κάθετης πρόσπτωσης. Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει:

$$f_v = \sqrt{81N} \quad (3.4.58)$$

και από τις εξισώσεις (3.4.56, 3.4.58) έπεται η ακόλουθη σχέση:

$$f = \frac{f_v}{\cos \phi_o} \quad (3.4.59)$$

Η παραπάνω εξίσωση συχετίζει μία ακτίνα συχνότητας  $f$  προσπίπτουσα πλαγίως με γωνία  $\phi_o$  και μια ακτίνα συχνότητας  $f_v$  προσπίπτουσα καθέτως επί του ιονοσφαιρικού στρώματος, οι οποίες δύνανται να επιστρέψουν στη γη από το αυτό ιονοσφαιρικό στρώμα.

Ονομάζουμε **κρίσιμη συχνότητα ή συχνότητα αποκοπής**  $f_c$  ενός ιονοσφαιρικού στρώματος, το οποίο έχει μέγιστη πυκνότητα ηλεκτρονίων  $N_{max}$ , η μέγιστη συχνότητα ηλεκτρομαγνητικού κύματος το οποίο προσπίπτει κάθετα επί της επιφάνειας του ιονοσφαιρικού στρώματος, συχνότητα για την οποία το κύμα υφίσταται ακόμη ανάκλαση και επιστρέφει στη γη και η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$f_c = f_{v_{max}} = \sqrt{81N_{max}} \quad (3.4.60)$$

Για όλες τις συχνότητες  $f$  μικρότερες από την κρίσιμη συχνότητα  $f_c$  το κύμα κάθετης πρόσπτωσης θα ανακλαστεί και θα επιστρέψει στη γη. Κύματα με συχνότητα μεγαλύτερη της  $f_c$  και γωνία πρόσπτωσης  $\phi_o=0$  δεν επιστρέφουν στη γη αλλά διαπερνούν το ιονοσφαιρικό στρώμα. [8]

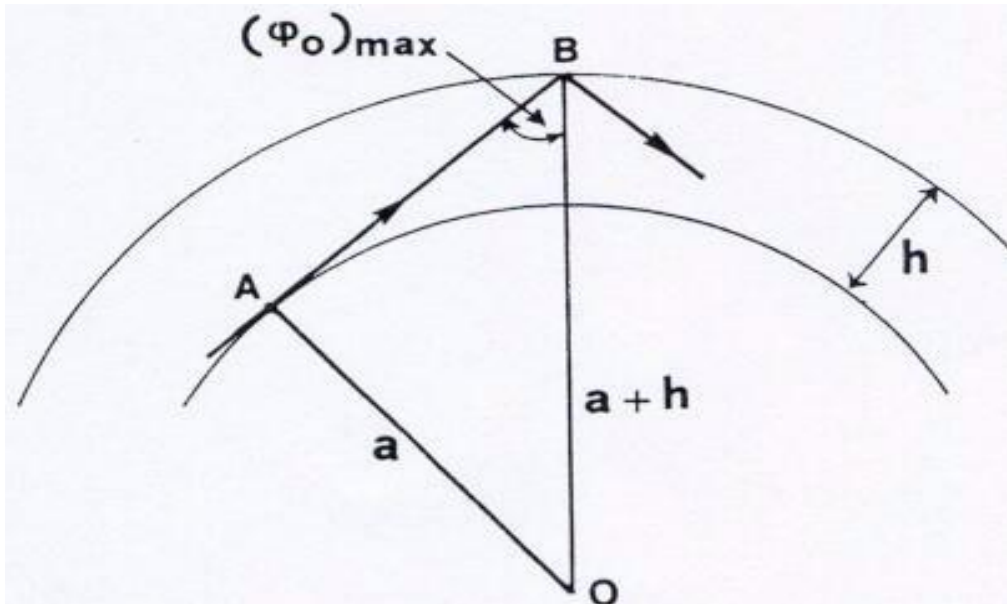
Η συχνότητα που καθορίζεται από την εξίσωση (3.4.60) δεν αποτελεί τη λεγόμενη **μέγιστη χρησιμοποιήσιμη συχνότητα** (maximum usable frequency) ενός στρώματος, αφού το ύψος στο οποίο διεισδύει το κύμα εξαρτάται όχι μόνο από την πυκνότητα  $N$  αλλά και από τη γωνία πρόσπτωσης  $\phi_o$ , όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (3.4.58, 3.4.59). Από αυτές και την εξίσωση (3.4.60) προκύπτει ότι για μια ορισμένη γωνία πρόσπτωσης  $\phi_o$  και πυκνότητα  $N=N_{max}$  η μέγιστη χρησιμοποιήσιμη συχνότητα είναι: [8]

$$F_{MUF} = \frac{\sqrt{81N_{max}}}{\cos \phi_o} = \frac{f_c}{\cos \phi_o} \quad (3.4.61)$$

Συνεπώς η μέγιστη χρησιμοποιήσιμη συχνότητα για ένα στρώμα είναι μεγαλύτερη της  $f_c$ . Η  $f_{MUF}$  αυξάνει με τη γωνία πρόσπτωσης  $\phi_o$ . Όμως η  $\phi_o$  δεν μπορεί να υπερβεί μία μέγιστη τιμή λόγω της σφαιρικότητας της γης και της καμπυλότητας του ιονοσφαιρικού στρώματος. Από το σχήμα (3.4.33) προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της γωνίας πρόσπτωσης αντιστοιχεί στην περίπτωση εφαπτομενικής προς τη γη εκπομπής και δίνεται από τη σχέση: [8]

$$\sin \phi_{o(\max)} = \frac{a}{a+h} \quad (3.4.62)$$

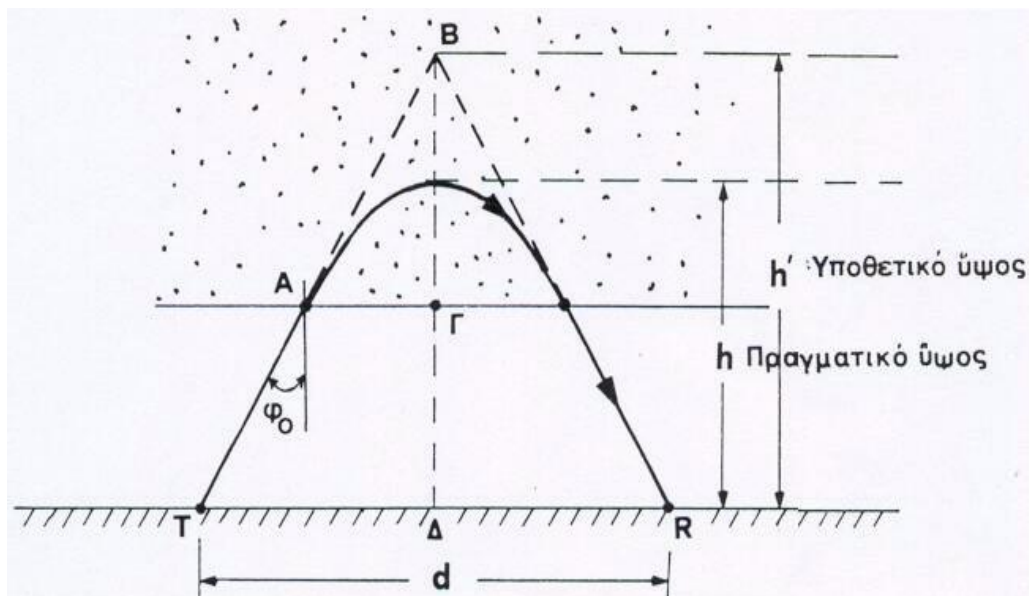
Για το στρώμα  $F$  π.χ, η  $\phi_{o(\max)}$  είναι περίπου  $74^\circ$  και επομένως θα έχουμε  $f_{MUF} = f_c / \cos 74^\circ \approx 3,6 f_c$ .



Σχήμα 3.4.33: Μέγιστη γωνία πρόσπτωσης. [8]

Υπό ομαλές ιονοσφαιρικές συνθήκες, η  $f_{MUF}$  εξασφαλίζει αποτελεσματική ζεύξη για τουλάχιστον 50% του χρόνου λειτουργίας. Συνήθως όμως χρησιμοποιείται ως **συχνότητα λειτουργίας της ζεύξης**, η συχνότητα  $f_{FOT}$  (Frequency of Optimum Traffic), όπου  $f_{FOT} \approx 0,85f_c$ . Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εξασθένιση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας και επομένως για μικρότερη εξασθένιση, η συχνότητα λειτουργίας της ζεύξης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, πάντως όμως μικρότερη της  $f_{MUF}$ . Ορίζεται συνεπώς μία **ελάχιστη χρησιμοποιήσιμη συχνότητα**  $f_{LUF}$  (lowest usable frequency), με την οποία είναι ακόμη δυνατή ικανοποιητική λήψη υπό δεδομένες ιονοσφαιρικές συνθήκες. Επομένως η συχνότητα λειτουργίας τη ζεύξης  $f$ , εκλέγεται στην περιοχή  $f_{LUF} < f \leq f_{FOT}$ . [8]

Το **υποθετικό ύψος** (virtual height) ενός στρώματος δίνεται από το ύψος υπεράνω της γης, στο οποίο μπορεί να θεωρηθεί ένας υποθετικός τέλειος ανακλαστήρας που ανακλά το προσπίπτον κύμα όπως αυτό ανακλάται από την ιονόσφαιρα (σχήμα 3.4.34). [8]



**Σχήμα 3.4.34:** Υποθετικό ύψος ιονοσφαιρικού στρώματος[8]

Από το σχήμα προκύπτει ότι ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το κύμα στο υψηλότερο σημείο της τροχιάς είναι:

$$t = \frac{AB}{c} \quad (3.4.63)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι μπορούμε να αντικαταστήσουμε την πραγματική τροχιά του κύματος συχνότητας  $f$ , με μία υποθετική τροχιά που διανύει μία ηλεκτρομαγνητική ακτίνα συχνότητας  $f$  με ταχύτητα  $c$  στον ελεύθερο χώρο. Συνεπώς, το υποθετικό ύψος  $h'$  ενός στρώματος είναι το  $B\Delta$ , το οποίο είναι το ύψος στο οποίο θα ανακλάτο το κύμα στον ελεύθερο χώρο. [8]

Η μέγιστη δυνατή απόσταση μετάδοσης μιας ιονοσφαιρικής ζεύξης δίνεται από τη σχέση:

$$d = 2a \cos^{-1} \left( \frac{a}{a + h'_{\max}} \right) \quad (3.4.64)$$

### 3.4.19 Ιονοσφαιρική σκέδαση

Έχει βρεθεί πειραματικά ότι η ιονόσφαιρα ασκεί σκέδαση επί των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων συχνότητας  $40-70\text{ MHz}$  περίπου. Η ιονοσφαιρική σκέδαση αποδίδεται από μερικούς ερευνητές σε ανομοιογένειες της πυκνότητας των ηλεκτρονίων που οφείλονται στην ηλιακή ακτινοβολία και από άλλους σε ανομοιογένειες που οφείλονται σε ιονισμό που προκαλείται από μετεωρίτες πολύ μικρών διαστάσεων, οι οποίοι υπάρχουν στην ανώτερη ατμόσφαιρα. [8]

Το εύρος ζώνης των ραδιοζεύξεων ιονοσφαιρικής σκέδασης είναι γενικά μικρό, της τάξης των δεκάδων  $\text{KHz}$ . Το μέγιστο εύρος της μεταδιδόμενης ζώνης είναι περίπου  $30\text{ KHz}$ . Επομένως οι ραδιοζεύξεις αυτού του τύπου επιτρέπουν μεταβίβαση πληροφορίας που περιέχει μικρό αριθμό τηλεφωνικών διαδεύσεων. [8]

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που υφίστανται ιονοσφαιρική σκέδαση, επιστρέφουν στη γη σε αποστάσεις από τον πομπό της τάξης των  $800-1000\text{ km}$ . Αποτελεσματικές ζεύξεις μπορούν να επιτευχθούν και μέχρι περίπου  $2000\text{ km}$ . Η αποδοτικότητα της ζεύξης είναι πάντως χαμηλή, δεδομένου ότι η απόσβεση μετάδοσης είναι περίπου  $100\text{ dB}$  κάτω της τιμής μετάδοσης στον ελεύθερο χώρο. Αυτό συνεπάγεται σημαντικές ισχείς ακτινοβολίας της τάξης των δεκάδων  $\text{kW}$  και κεραίες με υψηλό κέρδος της τάξης των  $20\text{ dB}$ . Δεδομένου ότι οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες είναι σχετικά χαμηλές, οι κεραίες που απαιτούνται είναι μεγάλων διαστάσεων και συνεπώς υψηλού κόστους. [8]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Σκοπός αυτού του εργαστηριακού πειράματος είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών του πομπού και του δέκτη σε ασύρματη ζεύξη. Αρχικά, τοποθετήσαμε τον κατάλληλο εξοπλισμό έτσι ώστε ο πομπός και ο δέκτης να βρίσκονται στην ίδια ευθεία και οι χοάνες να έχουν τον ίδιο προσανατολισμό.

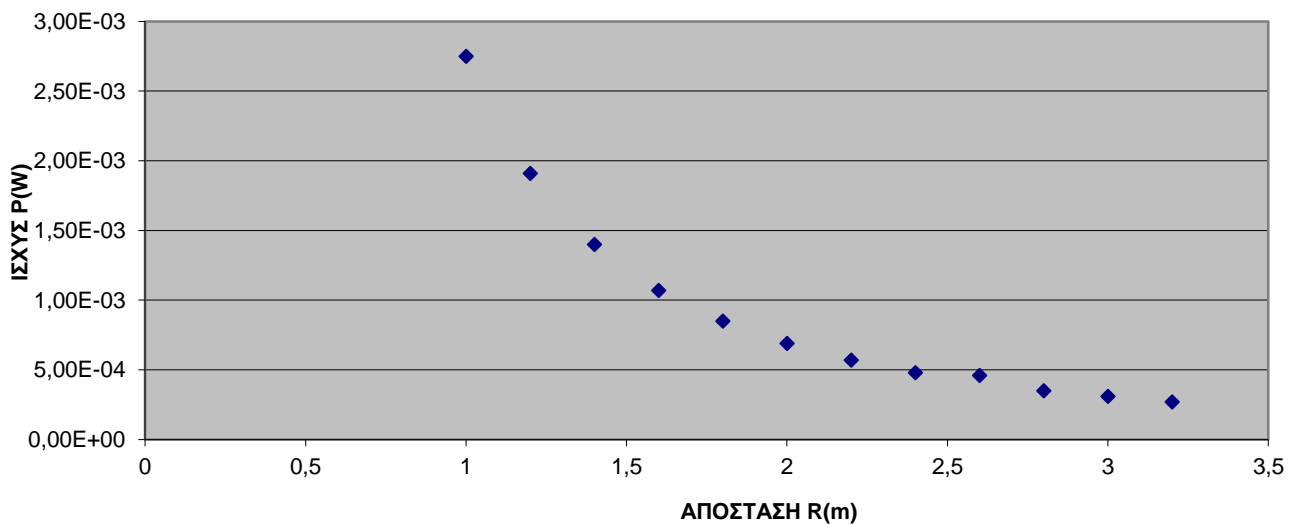
Οι πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

<u>Κεραία Δηλεκτρικού</u>		
a/a	Απόσταση R(m)	Ισχύς P(W)
1	1	0,00275
2	1,2	0,00191
3	1,4	0,00140
4	1,6	0,00107
5	1,8	0,00085
6	2	0,00069
7	2,2	0,00057
8	2,4	0,00048
9	2,6	0,00046
10	2,8	0,00035
11	3	0,00031
12	3,2	0,00027

Πίνακας 1

Τα πειραματικά δεδομένα του παραπάνω πίνακα απεικονίζονται στην παρακάτω γραφική παράσταση  $P_r(R)$ , όπου όπως φαίνεται βρίσκονται πάνω σε μια καμπύλη.

## ΙΣΧΥΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ



Γραφημα 1

Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία και με τη θεωρία αφού η σχέση που περιγράφει την εξάρτηση του  $P_R$  με το  $R$  είναι η σχέση  $P_R = \left( \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2} \right) \cdot \frac{1}{R^2}$

Στην συνέχεια και αφού γνωρίζουμε το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας  $\lambda_0$  μπορεί να προσδιοριστεί και η απολαβή της κεραίας  $G$ , μέσω της σχέσης:

$$P_R = \left( \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2} \right) \cdot \frac{1}{R^2}$$

όπου:

- $P_R$ : η ισχύς που εκπέμπει η κεραία σε απόσταση  $r$ , μετρημένη σε  $W$ ,
- $\lambda_0$ : το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο κενό,
- $G$ : το κέρδος της κεραίας στην κατεύθυνση ενδιαφέροντος,
- $R$ : η απόσταση από το κέντρο της κεραίας της θέσης υπολογισμού της ισχύος ακτινοβολίας, σε  $m$  (για αποστάσεις μεγαλύτερες από  $R_{ff}$ )
- Για τον προσδιορισμό του  $G$  χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη με το προηγούμενο πείραμα με τη μόνη διαφορά ότι τώρα καταγραφόταν η απόσταση  $R$  μεταξύ πομπού και δέκτη καθώς και το σήμα του δέκτη σε διάφορες αποστάσεις  $R$ . Το σήμα του δέκτη [104]



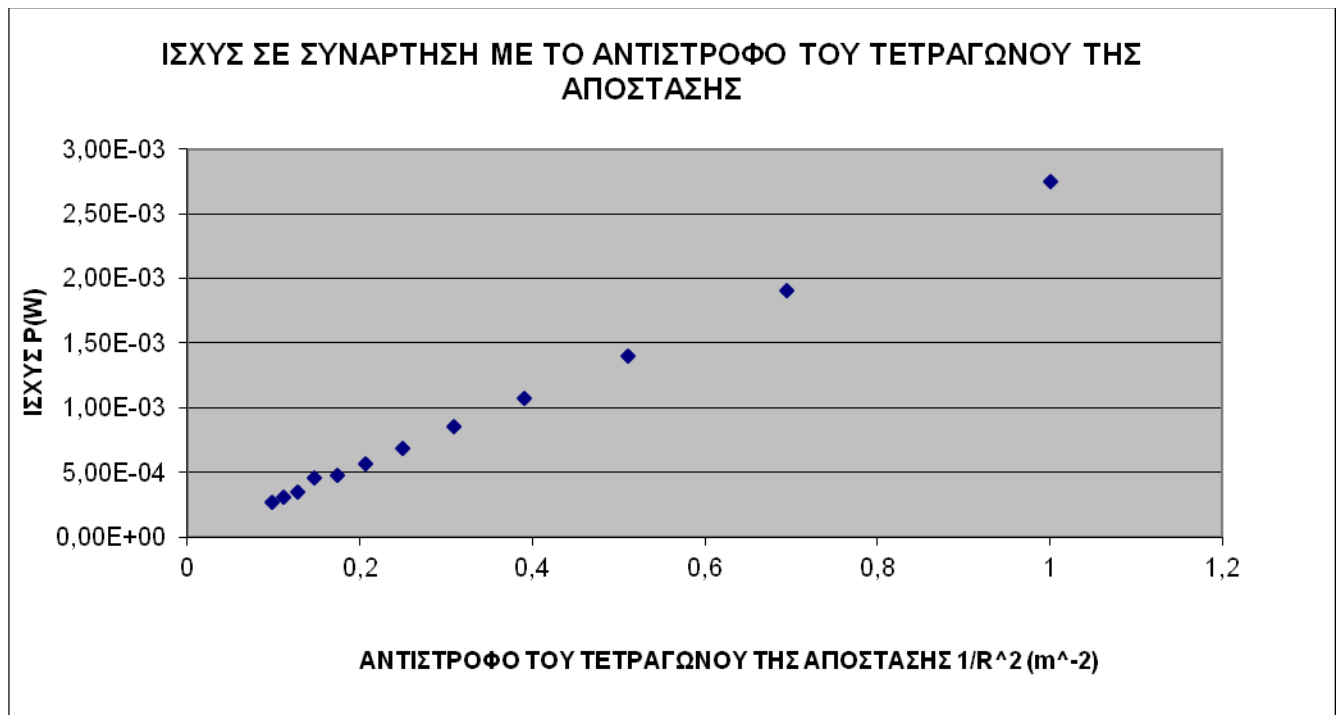
καταγραφόταν μέσω ενός παλμογράφου, όπου λόγω των στάσιμων κυμάτων μεταξύ πομπού και δέκτη είχε ληφθεί μέριμνα ο δέκτης να δείχνει μέγιστο σήμα, να απομακρύνεται από τον πομπό και να σταματά σε μέγιστο σήμα και στη συνέχεια να μετρείται η απόσταση μεταξύ πομπού και δεκτή.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η απολαβή  $G$  της κεραίας κατασκευάζεται η γραφική παράσταση  $P_R\left(\frac{1}{R^2}\right)$  η οποία θα είναι μια ευθεία με κλίση  $A_2 = \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2}$ .

<b><math>a/\alpha</math></b>	<b><math>1/R^2</math></b>	<b><math>P(W)</math></b>
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,00275</b>
<b>2</b>	<b>0,694444444</b>	<b>0,00191</b>
<b>3</b>	<b>0,510204082</b>	<b>0,0014</b>
<b>4</b>	<b>0,390625</b>	<b>0,00107</b>
<b>5</b>	<b>0,308641975</b>	<b>0,00085</b>
<b>6</b>	<b>0,25</b>	<b>0,00069</b>
<b>7</b>	<b>0,20661157</b>	<b>0,00057</b>
<b>8</b>	<b>0,173611111</b>	<b>0,00048</b>
<b>9</b>	<b>0,147928994</b>	<b>0,00046</b>
<b>10</b>	<b>0,12755102</b>	<b>0,00035</b>
<b>11</b>	<b>0,111111111</b>	<b>0,00031</b>
<b>12</b>	<b>0,09765625</b>	<b>0,00027</b>

**Πίνακας 2**

Τα πειραματικά δεδομένα του παραπάνω πίνακα απεικονίζονται στην παρακάτω γραφική παράσταση  $P_R\left(\frac{1}{R^2}\right)$ , όπου όπως φαίνεται βρίσκονται πάνω σε μια ευθεία. Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η συγκεκριμένη γραφική:



**Γραφημα 2**

Η παραπάνω γραφική όπως φαίνεται είναι μια ευθεία, της οποίας η κλίση έχει προσδιοριστεί γραφικά, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση SLOPE στο υπολογιστικό πακέτο EXCEL, είναι:

$$A_2 = \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2} = 0,002734899$$

$$\frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2} = 0,002734899 \Rightarrow \frac{100 \cdot 10^{-1} \cdot G^2 \cdot (0,33)^2}{(4\pi)^2} = 2,7 \cdot 10^{-3}$$

$$\Rightarrow 100 \cdot 10^{-1} \cdot G^2 \cdot (0,33)^2 = 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot (4\pi)^2 \Rightarrow$$

$$G^2 = \frac{426,384 \cdot 10^{-3}}{0,01089} = 39 \Rightarrow G = 6Q + W$$

Για τον υπολογισμό του σφάλματος του G σε W θα έχουμε:

$$\sigma(G) = \pm \left\{ \left( \frac{\partial G(P_R, R)}{\partial P} \cdot \sigma(P) \right)^2 + \left( \frac{\partial G(P_R, R)}{\partial R} \cdot \sigma(R) \right)^2 \right\}^{1/2} \quad \text{όπου } \sigma(P) \text{ και } \sigma(R) \text{ τα σφάλματα στα}$$

συγκεκριμένα μετρούμενα μεγέθη. Οπότε  $G(P_R, R) = \frac{4\pi R}{\lambda_0} \left\{ \frac{P_R}{P_e} \right\}^{1/2}$  και οι μερικές

παράγωγοι θα είναι  $\frac{\partial G(P_R, R)}{\partial R} = \frac{4\pi}{\lambda_0} \left\{ \frac{P_R}{P_e} \right\}^{1/2}$  και  $\frac{\partial G(P_R, R)}{\partial P} = \frac{4\pi R}{\lambda_0 \sqrt{P_e}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{P_R}}$  μετά

από πράξεις και προσεγγίσεις προκύπτει ότι  $\sigma(G) = \pm 2 \cdot 10^{-1} W$

Έπειτα μετατρέψαμε τα W σε dB:  $G(\text{dB}) = 6 \log 10 \pm 2 \cdot 10^{-1} = 8 \pm 2 \cdot 10^{-1} \text{dB}$ .

Για να ελέγξουμε αν το πείραμα μας έχει πετύχει παίρνουμε τον τύπο:

$$\alpha\% = \frac{|G_{\text{πειρ}} G_{\text{θεωρ}}|}{G_{\text{θεωρ}}} \cdot 100 = \frac{6-20}{20} \cdot 100 = 60\%. \text{ Το πείραμα μας έχει } 60\% \text{ απόκλιση.}$$

Στην παραπάνω ανάλυση η τιμή του  $\lambda_0$ , με δεδομένο ότι η συχνότητα εκπομπής της κεραίας-πομπού είναι  $f = 9 \text{GHz}$ , όπως αυτή προκύπτει χρησιμοποιώντας τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής θα είναι:

$$c = \lambda_0 \cdot f \Rightarrow 3 \cdot 10^8 = \lambda_0 \cdot 9 \cdot 10^9 \Rightarrow \lambda_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{9 \cdot 10^9} = 6 \cdot 10^{-1} \text{m}$$

Στην περίπτωση των μικροκυμάτων, τόσο η κρυσταλλοδίοδος εκπομπής (πομπός Π) όσο και η κρυσταλλοδίοδος λήψης (δέκτης Δ) μικροκυμάτων είναι μη γραμμικές αντιστάσεις, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται μερικές διαφοροποιήσεις ως προς την ισχύ των αναλογιών  $E_R \propto R^{-1}$  και  $I_R \propto R^{-2}$ . Οι γραμμικές αντιστάσεις, ως γνωστό, ακολουθούν τον νόμο του Ohm ( $i = V/R$ ) μια ωμική αντίσταση R, η οποία είναι ανεξάρτητη από το ρεύμα i, την τάση V, και τη θερμοκρασία T.

Στην πράξη, ισχύει η αναλογία  $I_R \propto R^n$ , όπου β αρνητικός αριθμός (όχι κατ' ανάγκη ακέραιος αριθμός) με τιμές γύρω από το  $n = -2$ . Η εύρεση της τιμής του n είναι δυνατή από την ανάλυση και την διερεύνηση της μορφής της εξάρτησης που έχουν οι ενδείξεις του δεκτή με τη μεταβολή της απόστασης R του δέκτη από τον πομπό.

## 4.2 ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ

Μια συνηθισμένη σχέση μεταξύ των μεταβλητών  $y$  και  $x$  είναι η εξίσωση με τη μορφή:

$$y = y_0 + cx^n$$

όπου  $y_0$  είναι η τιμή της μεταβλητής  $y$  όταν  $x=0$  (τεταγμένη στην αρχή). Η  $c$  είναι μια σταθερή ποσότητα και  $n$  είναι ένας αριθμός. Εάν  $n=1$  τότε η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης είναι ευθεία και εάν  $n=2$  είναι παραβολή. Πολλές φορές τυχαίνει  $y_0$  να είναι μηδέν και τότε η εξίσωση θα έχει τη μορφή  $y = cx^n$ . Για να απλοποιήσουμε το πρόβλημα μας θα ασχοληθούμε με την τελευταία σχέση. Έτσι λοιπόν θα αναλύσουμε τη σχέση

$$y = cx^n$$

Λογαριθμίζοντας και τα δυο μέλη της παραπάνω εξίσωσης με βάση το 10 βρίσκουμε ότι

$$\log y = \log c + n \log x$$

Εάν  $Y = \log y$ ,  $C = \log c$  και  $X = \log x$  η πιο πάνω εξίσωση γράφεται:

$$Y = C + nX$$

που είναι μια εξίσωση ευθείας. Επομένως, εάν αντί των τιμών  $y$  και  $x$  χρησιμοποιήσουμε τους λογάριθμους αυτών, τότε η καμπύλη της παραπάνω εξίσωσης ανάγεται σε ευθεία με κλίση ίση προς  $n$  που δίνεται από τη σχέση

$$n = \frac{\log y_2 - \log y_1}{\log x_2 - \log x_1}$$

όπου  $(x_1, y_1)$  και  $(x_2, y_2)$  είναι δυο ζεύγη τιμών που αντιστοιχούν σε δυο σημεία της ευθείας. Άρα, αν μεταξύ των  $\log y$  και  $\log x$  ισχύει γραμμική σχέση ( $\log y = \log c + n \log x$ ) συνεπάγεται ότι μεταξύ των μεταβλητών τιμών  $y$  και  $x$  ισχύει η σχέση  $y = cx^n$ . Άρα είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η ακριβής τιμή του εκθέτη  $n$  στη

σχέση  $P_R = \left( \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2} \right) \cdot \frac{1}{R^n}$ , η οποία τιμή αναμένεται να είναι κοντά στην τιμή 2.

Ξεκινώντας από τη σχέση  $P_R = \left( \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2} \right) \cdot \frac{1}{R^n}$  θα έχουμε:

$$P_R = \left( \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2} \right) \cdot \frac{1}{R^n} \Rightarrow P_R = A \cdot \frac{1}{R^n} \Rightarrow \log P_R = \log A + \log \frac{1}{R^n} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \underbrace{\log P_R}_Y = \log A - n \underbrace{\log R}_X \Rightarrow Y = \log A - nX$$

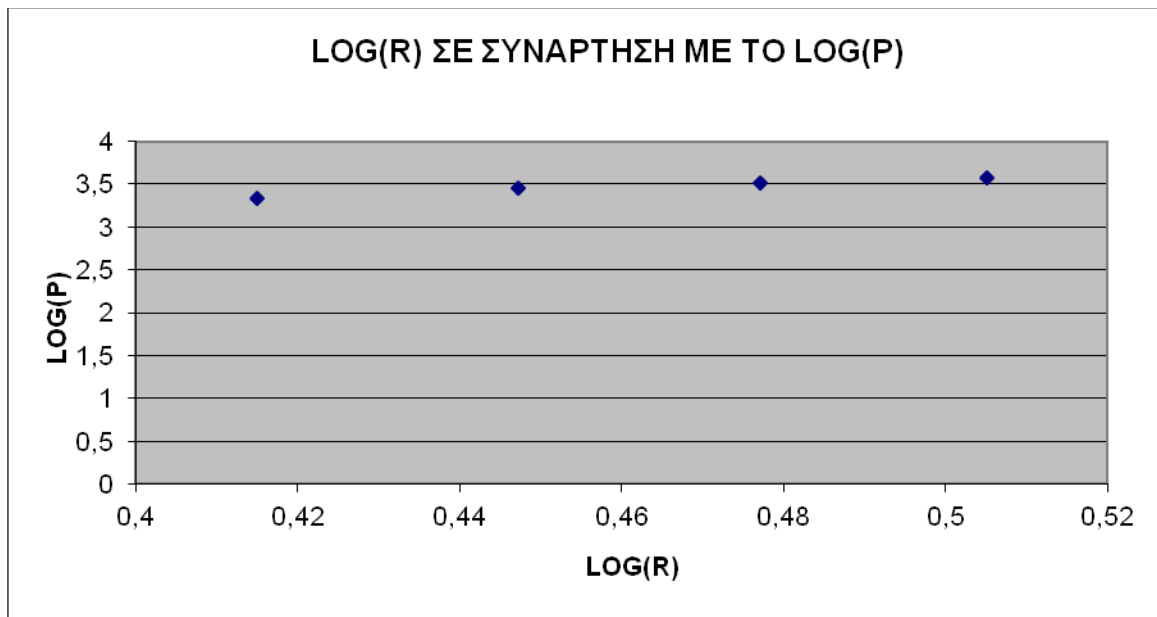
Άρα είναι δυνατός ο προσδιορισμός του εκθέτη  $n$  μέσω της κλίσης της ευθείας

$$\underbrace{\log P_R}_Y = \log A - n \underbrace{\log R}_X.$$

<b>a/a</b>	<b>LOGR</b>	<b>LOGP</b>
<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2,5606673</b>
<b>2</b>	<b>0,07918</b>	<b>2,7189666</b>
<b>3</b>	<b>0,14613</b>	<b>2,853872</b>
<b>4</b>	<b>0,20412</b>	<b>2,9706162</b>
<b>5</b>	<b>0,25527</b>	<b>3,0705811</b>
<b>6</b>	<b>0,30103</b>	<b>3,1611509</b>
<b>7</b>	<b>0,34242</b>	<b>3,2441251</b>
<b>8</b>	<b>0,38021</b>	<b>3,3187588</b>
<b>9</b>	<b>0,41497</b>	<b>3,3372422</b>
<b>10</b>	<b>0,44716</b>	<b>3,455932</b>
<b>11</b>	<b>0,47712</b>	<b>3,5086383</b>
<b>12</b>	<b>0,50515</b>	<b>3,5686362</b>

**Πίνακας 3**

Τα πειραματικά δεδομένα του παραπάνω πίνακα για τον προσδιορισμό του  $n$  απεικονίζονται στην παρακάτω γραφική παράσταση  $\log P_r(R)$ , όπου όπως φαίνεται σχηματίζεται μια ευθεία.



Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση SLOPE στο υπολογιστικό πακέτο EXCEL το  $n$  είναι ίσο με 1,971193735.

Για το υπολογισμό του σφάλματος στην τιμή του  $n$  θα έχουμε:

$$\sigma(n) = \pm \left\{ \left( \frac{\partial n(P_R, R)}{\partial P_R} \cdot \sigma(P_R) \right)^2 + \left( \frac{\partial n(P_R, R)}{\partial R} \cdot \sigma(R) \right)^2 \right\}^{1/2}$$

Αρχικά προσδιορίζεται η συνάρτηση  $n(P_R, R)$ .

$$P_R = \left( \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2} \right) \cdot \frac{1}{R^n} \Rightarrow R^n = \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2 \cdot P_R} \Rightarrow \log R^n = \log \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2 \cdot P_R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n \cdot \log R = \log \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2 \cdot P_R} \Rightarrow n = \frac{\log \left( \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2 \cdot P_R} \right)}{\log R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n(P_R, R) = \log \left( \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2 \cdot P_R} \right) - \log R$$

Στην συνέχεια θα προσδιοριστούν οι μερικές παράγωγοι  $\frac{\partial n(P_R, R)}{\partial P}$  και  $\frac{\partial n(P_R, R)}{\partial R}$ .

Έτσι λοιπόν προκύπτει ότι  $\frac{\partial n(P_R, R)}{\partial R} = -\frac{1}{R}$  και

$$\frac{\partial n(P_R, R)}{\partial P_R} = - \left( \frac{(4\pi)^2 \cdot P_R}{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2} \right) \left( \frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2 \cdot P_R} \right) = -5$$

Μετά από πράξεις και προσεγγίσεις προκύπτει ότι  $\sigma(n)=0,05$

Άρα τελικά προέκυψε  $n = 1.97 \pm 0,05$ .



Σε αυτό το σημείο αξίζει να σχολιαστεί το γεγονός ότι τυχόν μικρές αποκλίσεις των θεωρητικών από των πειραματικών τιμών που προσδιορίστηκαν μπορεί να οφείλονται: α) σε ατέλειες των οργάνων μέτρησης (οι ατέλειες των οργάνων είναι κυρίως η βαθμονόμηση της κλίμακας μέτρησης καθώς και η φθορά του οργάνου), β) στη μέθοδο μέτρησης, σε εξωτερικά αίτια, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, οι ηλεκτρικές επιδράσεις κ.α. είναι δυνατόν να επηρεάσουν τις μετρήσεις. Ακόμα είναι δυνατόν αυτή η απόκλιση να οφείλεται γ) στην περιορισμένη ευαισθησία του οργάνου μέτρησης (τα διάφορα μεγέθη μετρούνται συνήθως με κατάλληλα βαθμολογημένα κλίμακα) και τέλος δ) στην ικανότητα του παρατηρητή: η πείρα, η προσοχή και η προσωπική ικανότητα του παρατηρητή είναι στοιχεία που συντελούν στη μεγαλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων.

## 4.3 ΘΕΩΡΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

### 4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρώτο βήμα στην κατανόηση ενός φαινομένου είναι να βρούμε τους νόμους που το περιγράφουν. Οι νομοί περιγράφονται από τη σχέση δυο ή περισσότερων μεταβλητών και μας δείχνουν πως μεταβάλλεται ένα φυσικό μέγεθος, όταν κάποιο άλλο μέγεθος που το επηρεάζει μεταβάλλεται. Οι νόμοι αυτοί, που συνήθως εκφράζονται με μαθηματικές σχέσεις, βρίσκονται από πειραματικά δεδομένα. Η συστηματική μελέτη των φυσικών φαινομένων γίνεται κυρίως από μια συνεχή διαδικασία που μπορεί να ξεκινάει από πειραματικά δεδομένα.

Οι πειραματικές μετρήσεις πρέπει να είναι ακριβείς ώστε να οδηγηθούμε σε ορθά αποτελέσματα. Κατά τις μετρήσεις γίνονται σφάλματα που άλλοτε οφείλονται σε συνθήκες παρατήρησης και άλλοτε σε εξωτερικά αίτια που δεν ελέγχονται. Μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις και προκαλούν σφάλματα είναι ατέλειες οργάνων, αδεξιότητες παρατηρητή, εξωτερικά πεδία κλπ.

### 4.3.2 ΕΙΔΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Σ' ένα πείραμα, η εύρεση των σχέσεων μεταξύ μεγεθών προϋποθέτει τη διεργασία μιας μέτρησης. Συνεπώς είναι σκόπιμο να ορίσουμε τι εννοούμε με τον όρο "μέτρηση". "Μέτρηση ενός μεγέθους  $A$  είναι η διεργασία σύγκρισης αυτού προς ομοειδές μέγεθος  $a$  που αυθαίρετα λαμβάνεται ως μονάδα. Η αριθμητική τιμή του μεγέθους  $A$ , είναι ο λόγος του μεγέθους  $A$  προς την ορισμένη μονάδα  $a$ ".

Τις μετρήσεις τις διακρίνουμε σε δυο κατηγορίες: τις απλές (άμεσες) και τις σύνθετες (έμμεσες). Απλές είναι μετρήσεις στις οποίες η αριθμητική τιμή ενός μεγέθους προκύπτει απευθείας από μια παρατήρηση π.χ. η μέτρηση του μήκους μια απόστασης με μια μετροταινία. Σύνθετες είναι οι μετρήσεις με τις οποίες η αριθμητική τιμή ενός μεγέθους προκύπτει σα συνάρτηση των τιμών άλλων μεγεθών π.χ. ο υπολογισμός του εμβαδού μιας επιφάνειας.



### 4.3.3 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΚΑΙ ΠΙΣΤΟΤΗΤΑ

Η λέξη "ακρίβεια" αναφέρεται στη διακριτική ικανότητα της μέτρησης, δηλαδή πόσο στενά είναι τα όρια μέσα στα οποία μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή του μεγέθους που μετράμε. Λέμε π.χ. ότι ένα διαστημόμετρο μετρά μήκος "με ακρίβεια δεκάτου χιλιοστού". Στην περίπτωση που ρωτάμε ποια είναι η "ακριβής ώρα" αναφερόμαστε στην πιστότητα της μέτρησης και όχι στην ακρίβεια. Δηλαδή στο πόσο κοντά στην "πραγματική τιμή" του μεγέθους που μετριέται βρίσκεται η τιμή που προσδιορίζει η μέτρηση. Με άλλα λόγια "ακρίβεια" και "πιστότητα" είναι δυο διαφορετικές έννοιες. Μια μέτρηση μπορεί να είναι ακριβής αλλά η τιμή που προσδιορίζει να βρίσκεται μακριά από την πραγματική τιμή του μεγέθους που μετριέται. Στο παράδειγμα του διαστημόμετρου είναι φανερό ότι η ακρίβεια του είναι ανεξάρτητη από το πόσο "σωστό" είναι το αποτέλεσμα της μέτρησης. Όπως θα δούμε αργότερα κάθε μέτρηση εκφράζεται με το συμβολισμό  $\langle \chi \rangle \pm \sigma$ , όπου το  $\chi$  είναι το αριθμητικό αποτέλεσμα της μέτρησης και  $\sigma$  είναι το πειραματικό σφάλμα που συνοδεύει τη μέτρηση. Αν το ρολόι που μετρά το χρόνο δεν διαθέτει δεύτερο-λεπτοδείκτη, μπορεί να δείχνει την πραγματική ώρα, αλλά με μικρή ακρίβεια μέσα στα όρια του ενός λεπτού.

Θα περιορίσουμε τον όρο διακριτική ικανότητα αποκλειστικά στην αξιολόγηση των οργάνων μέτρησης. Για μια μοναδική μέτρηση που πραγματοποιείται από ένα συγκεκριμένο όργανο, η διακριτική ικανότητα αποτελεί τη μέγιστη ακρίβεια με την οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η μέτρηση.

Ορίζουμε ακόμη την απόλυτη ακρίβεια μιας μέτρησης (ή απόλυτη διακριτική ικανότητα ενός οργάνου). Αυτή εκφράζεται με τις ίδιες μονάδες που χρησιμοποιούνται για το μέγεθος που μετριέται. Η σχετική ακρίβεια εκφράζει την ιδιότητα σε ποσοστιαίες μονάδες σε σχέση με την απόλυτη τιμή που προσδιορίζει η μέτρηση.

### 4.4.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Απ' όσα συζητήθηκαν στην παράγραφο I κατανοήσαμε ότι τα σφάλματα είναι ένα αναπόφευκτο χαρακτηριστικό κάθε μετρητικής διαδικασίας και πειραματικής διερεύνησης. Στην πράξη, τα σφάλματα συνηθέστερα ταξινομούνται ως (Α) Τυχαία και (Β) Συστηματικά, κατ' αντιστοιχία με το αν σχετίζονται με την ακρίβεια ή με την πιστότητα της μετρητικής διαδικασίας.

#### **4.4.4.1. ΤΥΧΑΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ**

Τα Τυχαία Σφάλματα σχετίζονται με την Ακρίβεια μιας μέτρησης και είναι εκείνα που ανακύπτουν στατιστικά από την ανάλυση των επαναλαμβανόμενων και πολλαπλών μετρήσεων. Ειδικότερα, ποσοτικοποιούνται με καλύτερη ακρίβεια (και η τάξη μεγέθους τους ελαττώνεται) από την αυξανόμενη πολλαπλότητα των μετρήσεων. Τα Τυχαία Σφάλματα διαπράττονται αναπόφευκτα σε κάθε πειραματική διαδικασία, ακόμα και αν θεωρήσουμε ότι ο πειραματιστής εξαντλεί την προσοχή και την επιμέλειά του. Οφείλονται σε αστάθμητους κι ανεξέλεγκτους παράγοντες (τυχαίες διακυμάνσεις). Επενεργούν άλλοτε κατά τη μία και άλλοτε κατά την άλλη κατεύθυνση, «διασπείροντας» τις πειραματικές τιμές που καταγράφουμε «εκατέρωθεν» (δηλαδή δεξιά κι αριστερά) της πραγματικής τιμής του υπό μέτρηση φυσικού μεγέθους. Όλα τα σφάλματα που θα κληθείτε να προσδιορίσετε ποσοτικά, κατά την εξάσκησή σας στα Εργαστήρια Φυσικής, θα είναι πάντοτε τυχαία. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα τυχαίου σφάλματος αποτελούν οι παρατηρούμενες μικροδιαφοροποιήσεις στην καταγραφή του χρόνου πραγματοποίησης ενός φαινομένου.

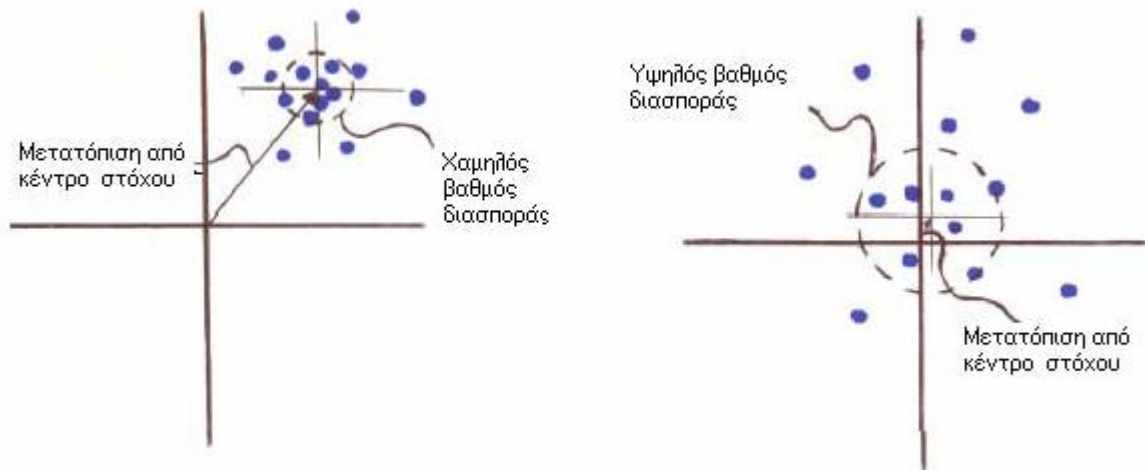
#### **4.4.4.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ.**

Τα Συστηματικά Σφάλματα εκφράζουν την Πιστότητα μίας μέτρησης.

Οφείλονται σε λόγους είτε (α) Θεωρητικούς (Χάριν απλοποίησης της θεωρητικής προσέγγισης ενός φαινομένου, αμελούμε την επίδραση κάποιου παράγοντα και ως εκ τούτου η μέτρηση μας δεν το λαμβάνει υπόψη), είτε (β) Πρακτικούς ( Βρίσκονται «εκτός δικαιοδοσίας» του πειραματιστή και συνήθως οφείλονται σε κατασκευαστική ατέλεια του χρησιμοποιούμενου μετρητικού οργάνου, η οποία συνίσταται στο ότι δεν ομοιάζει επακριβώς του θεωρούμενου ως προτύπου). Τα συστηματικά σφάλματα επενεργούν πάντοτε κατά την ίδια κατεύθυνση μετατοπίζοντας «συστηματικά» την καταγραφόμενη τιμή του υπό μέτρηση μεγέθους είτε μόνιμα σε μεγαλύτερη, είτε μόνιμα σε μικρότερη ένδειξη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάπραξης συστηματικού σφάλματος είναι το εξής: Υποθέστε ότι επιχειρούμε τη μέτρηση ενός μήκους με ένα κανόνα (χάρακα). Κι έστω ότι βρίσκουμε το εν λόγω μήκος να έχει την τιμή των 8 μέτρων. Από

τη στιγμή που πληροφορηθούμε ότι ο συγκεκριμένος χάρακας που χρησιμοποιήσαμε δεν έχει μήκος ακριβώς 1m ή 100cm, όπως νομίζαμε, αλλά –λόγω κατασκευαστικών ατελειών- είναι κάπως «ελαττωματικός» με συνέπεια το πραγματικό του μήκος να μην είναι 100cm, αλλά 98cm για παράδειγμα. Οπότε, το υπό μέτρηση μέγεθος (εδώ, μήκος) δεν είναι  $8 \times 100\text{cm} = 8$  μέτρα, αλλά  $8 \times 98\text{cm}$ . Μπορείτε τώρα μόνοι σας να φανταστείτε ένα παρεμφερές σενάριο για μία υποθετική μέτρηση μάζας με μία «ελαττωματική» ζυγαριά, που δε μετρά «πραγματικά» κιλά, αλλά είναι έτσι κατασκευασμένη ώστε να καταγράφει το 90% κάθε «πραγματικού» κιλού. Προσέξτε τα ακόλουθα λεπτά σημεία: (α) Κατά τη διάρκεια κάθε πειράματος, γνωρίζω ότι κατά πάσα πιθανότητα υποπίπτω σε συστηματικό σφάλμα. Όμως, δε μπορώ να εκτιμήσω ποσοτικά την τάξη μεγέθους του σφάλματος που διαπράττω, παρά μόνο αν συγκρίνω το μετρητικό όργανο που χρησιμοποιώ με κάποιο άλλο που θεωρείται πρότυπο. Αυτός είναι ο μόνος τρόπος να ποσοτικοποιήσω τα συστηματικά σφάλματα. (β) Σε μία πειραματική διαδικασία κι εφ' όσον το μετρητικό όργανο που χρησιμοποιώ είναι πάντα το ίδιο, το συστηματικό σφάλμα που διαπράττω είναι συνεχώς το ίδιο και μάλιστα μένει ανεπηρέαστο από το πόσες φορές θα εκτελέσω το πείραμα και από το πόσες μετρήσεις θα καταγράψω.

Σε αντίθεση, τα τυχαία σφάλματα σχετίζονται με την Ακρίβεια μιας μέτρησης και περιγράφονται από την επαναληψιμότητα της συγκεκριμένης μέτρησης: Έστω ότι έχουμε αυτές τις δύο εικόνες που προκύπτουν από τα ίχνη των βολών ενός όπλου σε ένα στόχο. Το όπλο σημαδεύει, με τον ίδιο τρόπο και στις δύο περιπτώσεις, στο κέντρο ενός «πραγματικού» στόχου. Σημειώνουμε ότι το πού θα καταλήξει η κάθε σφαίρα και αντίστοιχα το ίχνος που αυτή θα αποδώσει, μεταβάλλονται τυχαία και δε μπορούν να προβλεφθούν εκ των προτέρων.



Σχήμα 3.9

#### 4.4.4.3. ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Σε πολλές μετρήσεις είναι αδύνατον να εκτιμήσουμε το σφάλμα μόνο με βάση την ένδειξη του οργάνου. Για παράδειγμα όταν με τη βοήθεια χρονομέτρου μετράμε το χρόνο ανάμεσα σε δύο γεγονότα το σφάλμα μας οφείλεται (αν εξαιρέσουμε διάφορους άλλους παράγοντες) κύρια στην αντίδραση του χειριστή του χρονομέτρου, γιατί είναι σχεδόν αδύνατο να θεωρήσουμε ότι πάντα βάζει σε λειτουργία το χρονόμετρο "ταυτόχρονα" με το πρώτο γεγονός και το σταματάει "ταυτόχρονα" με το δεύτερο.

Σ' αυτή την περίπτωση επαναλαμβάνουμε τη μέτρηση μερικές φορές και έτσι μπορούμε να βρούμε καλύτερα και την τιμή που είναι κοντά στην πραγματική, αλλά και το σφάλμα.

#### 4.4.5.ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ

Έστω λοιπόν ότι μετράμε την ίδια ποσότητα  $N$  φορές και βρίσκουμε τις τιμές  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ . Τότε σύμφωνα με τη θεωρία των πιθανοτήτων θεωρούμε ότι η τιμή που βρίσκεται πιο κοντά στην "πραγματική" είναι η μέση τιμή που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\delta x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}$$

Και σ' αυτή την περίπτωση όμως δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το αποτέλεσμα μας συμπίπτει με την "πραγματική" τιμή. Πρέπει λοιπόν να υπολογίσουμε το σφάλμα, δηλαδή μια περιοχή τιμών του  $x$  μέσα στην οποία βρίσκεται αυτή η πραγματική τιμή. Δηλαδή

$$x = \pm x \delta x$$

Από τη μαθηματική θεωρία σφαλμάτων προκύπτει ότι αν θέλουμε η πραγματική τιμή να βρίσκεται στο διάστημα (4.2) με πιθανότητα 68%, τότε

$$\delta x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}$$

Ο υπολογισμός των δύο ποσοτήτων που ορίζουμε αμέσως ακολούθως, θα αποτελέσουν (μαζί με τον υπολογισμό της μέσης τιμής) το ουσιαστικό αποσκοπούμενο σας, κατά την επεξεργασία των μετρήσεων στα πειράματα που θα εκτελέσετε στα Εργαστήρια Φυσικής. Είναι ακριβώς οι τρεις αυτές ποσότητες που αντανακλούν την πεποίθησή μας ότι περιγράφουν αντιπροσωπευτικότερα από οποιαδήποτε άλλες τα μετρούμενα αποτελέσματα μιας πειραματικής διαδικασίας και των αναπόφευκτα εμπλεκόμενων ανακρίβειών. Η κατανόηση της σημασίας τους –και όχι η στείρα απομνημόνευσή τους– προϋποθέτει τη μελέτη, αποκρυστάλλωση και αφομοίωση των βασικότερων στοιχείων της θεωρίας. Συμφωνούμε λοιπόν στο εξής να ονομάζουμε **«απόλυτο σφάλμα της μέσης τιμής»** την ποσότητα:

$$\delta\bar{x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}} \equiv \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}$$

Συμβολίζουμε το απόλυτο σφάλμα της μέσης τιμής με το μικρό ελληνικό γράμμα «δ», για να συμμορφωνόμαστε με τα διεθνώς κείμενα και ισχύοντα. Παρατηρούμε –όπως άλλωστε φαίνεται στη παραπάνω σχέση - ότι το απόλυτο σφάλμα της μέσης τιμής δεν είναι τίποτε άλλο από αυτό που είχαμε ορίσει στην προηγούμενη παράγραφο ως «**τυπική απόκλιση της μέσης τιμής**». Σημειώνουμε ότι το  $\delta x$  έχει τις ίδιες διαστάσεις (δηλαδή μετριέται στις ίδιες μονάδες) με τη μέση τιμή του μετρούμενου μεγέθους και αυτό είναι κάτι το οποίο δεν πρέπει ν'αμελούμε ποτέ να επισημαίνουμε, κατά την αναφορά των αποτελεσμάτων μας. Εντελώς ανάλογα, ορίζουμε ως «**σχετικό σφάλμα της μέσης τιμής**» την ποσότητα

$$\frac{\delta\bar{x}}{\bar{x}}$$

Δηλαδή, για να βρούμε το σχετικό σφάλμα ενός μεγέθους, διαιρούμε απλά το απόλυτο σφάλμα με τη μέση τιμή. Σημειώνουμε τα εξής ευνόητα:

(α) Οι δύο εκφράσεις των σφαλμάτων είναι πολύ συγγενείς και αλληλένδετες μεταξύ τους. Από τη στιγμή που γνωρίζουμε το ένα απ'αυτά, μπορούμε να υπολογίσουμε και το άλλο (αρκεί να ξέρουμε τη μέση τιμή) και σε τελική ανάλυση νομιμοποιούμαστε να ισχυριστούμε ότι το σχετικό σφάλμα δεν είναι τίποτε άλλο παρ'εκτός η αναφορά του απόλυτου σφάλματος υπό τη μορφή ποσοστού. (β) Επειδή ακριβώς το σχετικό σφάλμα εκφράζεται ως ποσοστό, δηλαδή λόγος δύο ομοειδών μεγεθών, γι'αυτό είναι και αδιάστατο (είναι όπως λέμε ένας καθαρός αριθμός ή δεν έχει μονάδες μέτρησης). Θα δούμε στη συνέχεια της παρούσας παραγράφου τί σκοπούς εξυπηρετεί αυτό και σε τί πλεονεκτεί η αναφορά του σχετικού σφάλματος σε σχέση με την αναφορά του απόλυτου σφάλματος. Επίσης, θα δούμε τι επιπτώσεις έχει στον τρόπο αναγραφής των αποτελεσμάτων το γεγονός ότι το σχετικό σφάλμα είναι αδιάστατο. (γ) Συνηθέστατα, το σχετικό σφάλμα αναφέρεται και ως ποσοστό επί τοις εκατό, δηλαδή:

$$\sigma_{sx} \% = \frac{\delta\bar{x}}{\bar{x}} \cdot 100$$

Αλλά και οι τρεις αυτές επισημάνσεις ήταν τόσο ευνόητες που σίγουρα θα τις είχατε αντιληφθεί και μόνοι σας! Έτσι δεν είναι; Πάντως, εκείνο που κρατούμε ως κανόνα είναι το εξής: **Στο τέλος κάθε πειράματος, μετά τη λήψη μετρήσεων και την επεξεργασία των τιμών, αναφέρουμε πάντα τη μέση τιμή με τα σφάλματα της (και το απόλυτο και το σχετικό).**

#### 4.5 ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ.

##### *A. ΓΕΝΙΚΑ.*

Γενικά, υπάρχουν δύο τρόποι για να βρίσκουμε το πώς «διαδίδονται» τα σφάλματα των άμεσα μετρούμενων μεγεθών, που υπεισέρχονται ως μεταβλητές στην εξίσωση υπολογισμού του τελικά ζητούμενου μεγέθους. Ο πρώτος –και ο απλούστερος- είναι να προσθέτουμε απλά τα επί μέρους **σχετικά σφάλματα**. Δηλαδή, για να βρούμε τον όγκο της δεξαμενής χρησιμοποιήσαμε τον τύπο  $V=HWL$ . Αρα, σύμφωνα με όσα μόλις είπαμε, το σχετικό σφάλμα του όγκου πρέπει να είναι

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{\delta H}{H} + \frac{\delta W}{W} + \frac{\delta L}{L}$$

Το μειονέκτημα αυτού του τρόπου είναι ότι «υπερεκτιμά» τα επί μέρους σφάλματα, δηλαδή τα λαμβάνει όλα υπόψη εξ ίσου, ανεξάρτητα από το αν είναι μεγάλα ή μικρά και μη εξετάζοντας το πόσο συμβάλλουν στο τελικό σφάλμα. Συνήθως, το σφάλμα μιας επί μέρους εμπλεκόμενης μεταβλητής (μεγέθους) είναι ανεξάρτητο από τα σφάλματα των άλλων μεταβλητών και στο τέλος κάποια από αυτά καταλήγουν να είναι αμελητέα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Ο δεύτερος τρόπος είναι σωστότερος, πλέον ενδεδειγμένος και – τέλος πάντων- είναι αυτός που πρέπει να χρησιμοποιείτε κατά την εξάσκησή σας στα Εργαστήρια Φυσικής. Το σωστό λοιπόν τρόπο χειρισμού των διαδιδόμενων σφαλμάτων το δανειζόμαστε από ένα μαθηματικό πρόβλημα που αποκαλείται **«πρόβλημα του τυχαίου δρόμου»** (random walk problem). Το πρόβλημα του τυχαίου δρόμου μας παρέχει μία πολύ εκλεπτυσμένη και κομψή μαθηματική έκφραση για να υπολογίζουμε το σφάλμα συναρτήσεων πολλών μεταβλητών σ'ένα πειραματικό εγχείρημα. Για να είμαστε σε θέση να το κατανοήσουμε πλήρως, χρειαζόμαστε κάτι ακόμα! Πρέπει –για μία φορά ακόμη- να προστρέξουμε στο οπλοστάσιο των μαθηματικών μας, για να εφοδιαστούμε με ένα νέο μαθηματικό εργαλείο: την **μερική παράγωγο**. Σ' αυτό το σημείο ας ανοίξουμε μία μεγάλη παρένθεση για μερικές απλές και σύντομες –το υποσχόμαστε- αμιγείς

γνώσεις μαθηματικών: Εστω λοιπόν μία συνάρτηση τριών (3) μεταβλητών  $f = f(x, y, z)$ , τότε γράφουμε

$$\frac{\partial f}{\partial x}$$

διαβάζουμε «μερική παράγωγος της  $f$  ως προς  $x$ » κι εννοούμε ότι  $\frac{\partial f}{\partial x}$  είναι το αποτέλεσμα της παραγωγίσις της  $f$  ως προς τη μεταβλητή  $x$  (όπως ακριβώς ξέραμε μέχρι τώρα, σαν η  $f$  να εξαρτιόταν μόνο από τη μεταβλητή  $x$ ), συμπεριφερόμενοι στα  $y$  και  $z$  να ήταν σταθερές. Δηλαδή, αν μας δώσουν την  $f = f(x, y, z) = 8x^5 yz^3$  και μας ζητήσουν να υπολογίσουμε τις μερικές της παραγωγούς, αυτές θα είναι:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 40x^4 yz^3, \quad \frac{\partial f}{\partial y} = 8x^5 z^3 \quad \text{και} \quad \frac{\partial f}{\partial z} = 8x^5 y3z^2$$

Ο γενικός κανόνας υπολογισμού του σφάλματος  $df$ , στην περίπτωση που η  $f$  είναι συνάρτηση πολλών μεταβλητών,  $f = f(x, y, \dots, z)$  και με την προϋπόθεση ότι τα σφάλματα των  $x, y, \dots, z$  είναι τυχαία κι ανεξάρτητα μεταξύ τους δίνεται από τη σχέση:

$$df = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \delta y\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \delta z\right)^2}$$

Περιφραστικά, η εξίσωση που μόλις γράψαμε «εισηγείται» ότι το σφάλμα μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών ισούται με τη τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των επί μέρους σφαλμάτων όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών, σταθμισμένων με την επίδρασή τους πάνω στην  $f$ . Αρκετά όμως με τη θεωρία, πίσω τώρα στο παράδειγμά μας:



## ΠΗΓΕΣ

[http://diktia.weebly.com/uploads/6/4/5/1/6451366/texn\\_diktywn\\_epikoin\\_kef03.pdf](http://diktia.weebly.com/uploads/6/4/5/1/6451366/texn_diktywn_epikoin_kef03.pdf)

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%BF%CE%BC%CF%80%CF%8C%CF%8>

[2](#)

<http://users.sch.gr/pepoudi/site/pages/page30.html>

[http://www.securitymanager.gr/sub\\_site/arxeio/contents\\_article/cctv\\_4\\_4\\_2007.php](http://www.securitymanager.gr/sub_site/arxeio/contents_article/cctv_4_4_2007.php)

[http://2epal-n-smyrn.att.sch.gr/files/texn\\_site/texn2.htm](http://2epal-n-smyrn.att.sch.gr/files/texn_site/texn2.htm)

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%83%CF%8D%CF%81%CE%BC%CE%B1>

[\\_%CF%84%CE%BF\\_%CE%B4%CE%AF%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BF#.CE.9](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%83%CF%8D%CF%81%CE%BC%CE%B1)

[C.CE.AD.CE.B8.CE.BF.CE.B4.CE.BF.CE.B9\\_.CE.BC.CE.B5.CF.84.CE.AC.CE.B4.CE.](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%83%CF%8D%CF%81%CE%BC%CE%B1)

[BF.CF.83.CE.B7.CF.82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%83%CF%8D%CF%81%CE%BC%CE%B1)

Presentation-5-MESA METADOSHS-PowerPoint- Διαφάνιες

ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ-ΔΙΑΦΑΝΙΕΣ

<http://www.techrepair.gr/ypiresies/wireless-networks.html>