

**Τμήμα
Μηχανικών
Πληροφορικής τ.ε.**
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Δυτικής Ελλάδας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Θεωρητική και πειραματική μελέτη
των φυσικών διαδικασιών απωλειών σε
ασύρματη Ζεύξη.**

ΑΡΕΤΗ ΖΑΧΑΡΑΚΗ

Επιβλέπων καθηγητής: Ηλίας Ασαρίδης

Αντίρριο Φεβρουάριος 2016

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Αντίρριο, 9/5/16

Ευχαριστίες

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου για τις πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου που ολοκληρώνονται με την παρούσα εργασία. Πολλές ευχαριστίες οφείλω στους γονείς μου που χωρίς την αμέριστη υλική και ηθική τους υποστήριξη θα ήταν αδύνατον να καταφέρω τον σκοπό μου. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Ηλία Ασαρίδη για την καθοδήγηση και την επίβλεψη της παρούσας πτυχιακής εργασίας

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή.....	5
1.1 Ιστορική ανασκόπηση	5
1.2 Σύγχρονες εξελίξεις.....	6
1.4 Ασύρματο κανάλι επικοινωνίας	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ Η/Μ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	11
2.1 Μηχανισμοί διάδοσης Η/Μ ακτινοβολίας.....	11
2.2 Πολυοδική διάδοση.....	13
2.3 Επίγεια μετάδοση	13
2.3.1 Ανάκλαση.....	13
2.3.2 Περίθλαση.....	15
2.3.3 Σκληρότητα του εδάφους	19
2.4 Ατμοσφαιρική εξασθένηση (atmospheric losses).....	20
2.4.1 Ιονόσφαιρα	20
2.4.2 Τροπόσφαιρα.....	21
2.6 Ηλιακή δραστηριότητα.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΛΕΙΨΕΙΣ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ	27
3.1 Εισαγωγή.....	27
3.2 Διάδοση στον ελεύθερο χώρο	28
3.3 Απώλειες ελεύθερου χώρου Free Space Loss (FSL).....	30
3.4 Εξαγωγή ενός εμπειρικού μοντέλου.....	31
3.5 Εμπειρικό μοντέλο λογαριθμικής κατανομής	33
3.6 Το φαινόμενο των διαλείψεων	34

3.6.1 Διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale-fading)	37
3.6.2 Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας. (large-scale fading).....	43
3.7 Στατιστική αναπαράσταση των καναλιών με διαλείψεις	43
3.7.1 Κατανομή Gauss.....	44
3.7.2 Κατανομή Rayleigh.....	45
3.7.3 Κατανομή Rice	46
3.8 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ RICE Κ και η φυσική του σημασία.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΚΕΡΑΙΕΣ	50
4.1 Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	51
4.2 Το στοιχειώδες δίπολο (Hertz Dipole)	52
4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ	53
4.3.1 Κέρδος κεραίας και Αποτελεσματική Ισχύς Εκπομπής	53
4.3.2 Μέτρηση εκπομπής και ένταση πεδίου	55
4.3.3 Αντίσταση ακτινοβολίας κεραίας.....	55
4.3.4 Εύρος ζώνης συχνοτήτων, Εύρος δέσμης και πολικότητα κεραίας	57
4.4 ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	59
4.4.1 Στοιχειοκεραία Διπόλων.....	59
4.4.2 Αναδιπλωμένο Δίπολο Και Εφαρμογές.....	63
4.4.3 Μη Συντονισμένες Κεραίες - Η Ρομβική Κεραία	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	67
5.1 Εξισώσεις Καμπυλών:.....	67
5.1.1 Ευθεία Γραμμή	67
5.2 Προσδιορισμός Κέρδους Κεραίας (G):	68
5.3 Περιγραφή Πειράματος.....	69
5.4 Λογαριθμικές Καμπύλες.....	74
5.5 Θεωρία Σφαλμάτων.....	78
5.5.1 Είδη μετρήσεων.....	78
5.5.2 Ακρίβεια και Πιστότητα	79
5.5.3 Κατηγορίες Σφαλμάτων	80
5.5.3.1 Τυχαία Σφάλματα	80
5.5.3.2 Συστηματικά Σφάλματα	80
5.5.3.3 Πολλαπλές Μετρήσεις.....	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή

1.1 Ιστορική ανασκόπηση

Αφορμή για τη γέννηση της επιστήμης της ασύρματης επικοινωνίας στάθηκε η θεμελίωση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας από το Maxwell το 1861. Πρώτος ο Maxwell απέδειξε την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και πρότεινε τη χρήση τους στο χώρο των επικοινωνιών. Στη συνέχεια ο Hertz έδειξε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό. Απέδειξε έτσι την ορθότητα της θεωρίας του Maxwell. Βασισμένος στις αποδείξεις του Maxwell ο Marconi το 1895 πραγματοποιεί την πρώτη επίσημη ασύρματη μετάδοση με τη βοήθεια ενός δίπολου Hertz. Κατασκεύασε με αυτόν τον τρόπο τον πρώτο ασύρματο τηλέγραφο. Μετά από αυτή την πρώτη μετάδοση ξεκίνησαν περαιτέρω προσπάθειες ανάπτυξης των ασύρματων επικοινωνιών και μάλιστα η εφεύρεση των ενισχυτικών λυχνιών και ταλαντωτών τη δεκαετία 1905-1915 οδήγησε σε ακόμη ταχύτερη εξέλιξή τους. Κατά τη διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου έγιναν διάφορες πρόοδοι όπως η χρήση του RADAR. Πρακτικά ωστόσο η ιστορία των κινητών επικοινωνιών ξεκινά τη δεκαετία του 1950, οπότε με την ανακάλυψη των τρανζίστορ, αναπτύχθηκε η δυνατότητα της κατασκευής συσκευών αξιόπιστων, ελαφριών, με μικρό μέγεθος και με χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Τα πρώτα συστήματα κινητών επικοινωνιών λειτούργησαν στην περιοχή των 2 MHz. Μετά το τέλος του 2ου παγκοσμίου πολέμου, στην διάρκεια του οποίου η τεχνολογία των ραδιοεπικοινωνιών γνώρισε αλματώδη πρόοδο, άρχισαν οι πρώτες έρευνες στα εργαστήρια της Bell για την βελτίωση των υπηρεσιών των ραδιοεπικοινωνιών και τη δυνατότητα χρησιμοποίησης υψηλότερων φασματικών περιοχών (μεγαλύτερες συχνότητες). Το πρώτο δημόσιο επίγειο δίκτυο κινητών επικοινωνιών εμφανίστηκε μόλις το 1979. Οι λόγοι αυτής της καθυστέρησης ήταν εμφανείς, αφού έλειπε εκείνη η τεχνολογία που θα παρείχε τη δυνατότητα στα συστήματα κινητών επικοινωνιών της προσφοράς ουσιαστικών υπηρεσιών υψηλής ποιότητας και ευρύτητας, σε πραγματικά ανταγωνιστικό επίπεδο με τα υπάρχοντα ενσύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Η εμφάνιση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, των μικροεπεξεργαστών, των συνθετών συχνότητας, δηλαδή της σύγχρονης ηλεκτρονικής τεχνολογίας έδωσε την απαιτούμενη ώθηση και μετέτρεψε τον τομέα των κινητών επικοινωνιών σε κυρίαρχο σημείο αναφοράς των

τεχνολογικών και κατ' επέκταση, κοινωνικών εξελίξεων.

1.2 Σύγχρονες εξελίξεις

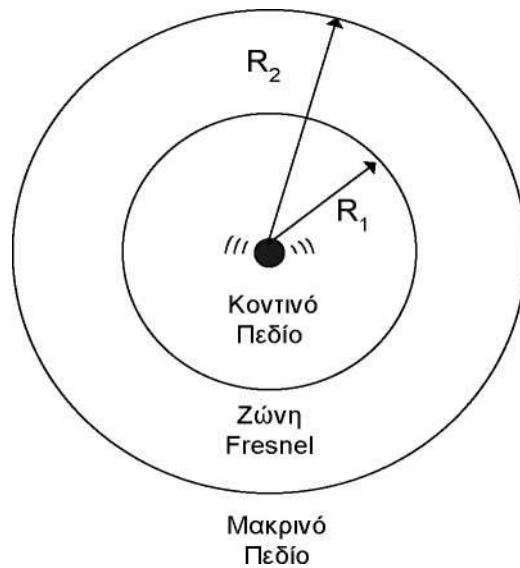
Τα σύγχρονα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα έχουν διεισδύσει σε όλους τους τομείς της καθημερινότητας. Ο σκοπός των κινητών επικοινωνιών είναι να παρέχουν διπλής κατεύθυνσης επικοινωνία όσον αφορά στη φωνή, στα πολυμέσα και γενικότερα σε οποιαδήποτε μορφή υπηρεσίας μετάδοσης δεδομένων μεταξύ οντοτήτων, οι οποίες βρίσκονται σε οποιοδήποτε μέρος, οποιαδήποτε στιγμή. Σήμερα η ασύρματη κινητή τηλεφωνία έχει γίνει πολύ δημοφιλής σε όλο τον κόσμο, σε βαθμό μάλιστα όπου σε πολλές χώρες η διείσδυσή της στην αγορά είναι μεγαλύτερη από εκείνη της σταθερής. Τα σύγχρονα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας παρέχουν άμεσα υπηρεσίες φωνητικής κλήσης ή μεταφοράς δεδομένων υψηλής ταχύτητας οποιαδήποτε ώρα, οποιαδήποτε και με ποιότητα, πλέον, ανάλογη των σταθερών δικτύων. Συγκεκριμένα τα δεύτερης γενιάς κυτταρικά συστήματα, 2G, κινητής τηλεφωνίας έχουν πλέον καθιερωθεί, με παραπάνω από 2 δισεκατομμύρια χρήστες παγκοσμίως, ενώ παράλληλα συνεχίζουν να εξελίσσονται. Τα τρίτης γενιάς κυτταρικά συστήματα, 3G, παρά την αρχική καθυστέρηση στην εξάπλωσή τους, έχουν πλέον αρχίσει να διαδίδονται με γρήγορους ρυθμούς. Τα συστήματα αυτά παρέχοντας δυνατότητες βίντεο-κλήσης, μεταφοράς κινούμενων εικόνων και ρυθμούς δεδομένων της τάξεως των Mbits/s, ανοίγουν νέους ορίζοντες στην επικοινωνία. Όμως, ο ανταγωνισμός μεταξύ των συστημάτων εντείνεται από τις καινούριες τεχνολογίες που έχουν έρθει στο προσκήνιο. Έτσι δίκτυα όπως τα ασύρματα τοπικά, wireless local area networks (W-LAN), υπερ-ευρείας ζώνης, ultrawide band (UWB), ασύρματης πιστότητας, wireless fidelity (Wi-Fi) και παγκόσμιας διαλειτουργικότητας για μικροκυματική πρόσβαση, worldwide interoperability for microwave access (WiMax) θα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην επικοινωνία εσωτερικών χώρων. Γενικότερα, είναι γνωστό ότι υψηλοί ρυθμοί δεδομένων χρειάζονται περισσότερο διαθέσιμο φάσμα, το οποίο όμως μπορεί να βρεθεί μόνο στις υψηλότερες συχνότητες και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της εμβέλειας των συστημάτων. Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη, είναι λογικά, τα συστήματα τέταρτης γενιάς, 4G, δηλαδή μια μίξη των τεχνολογιών 3G, WiMax και Wi-Fi. Μια περιοχή η οποία εξελίσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια είναι οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες μικρής απόστασης. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται οι προαναφερθέντες τεχνολογίες

UWB, W-LAN, και επιπλέον οι BlueTooth, ψηφιακού βελτιωμένου ασυρματικού τηλεφώνου, digital enhanced cordless telecommunications (DECT), Zigbee και ταυτοποίησης μέσω ραδιο-συχνότητας, radio frequency identification (RFID).

Τα συστήματα κυψελωτών επικοινωνιών, ασύρματης τηλεφωνίας και ασύρματης μεταφοράς δεδομένων που έχουν παγκοσμίως αναπτυχθεί, ανέδειξαν την αναγκαιότητα των ασύρματων επικοινωνιών και θεμελίωσαν τις βάσεις της μελλοντικής εξέλιξης των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και υπηρεσιών

1.3 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Ο τρόπος που διαδίδονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είτε στο γήινο εξωτερικό περιβάλλον, είτε στο εσωτερικό ενός κτιριακού συγκροτήματος χαρακτηρίζεται από φαινόμενα ανάκλασης, περίθλασης και σκέδασης. Όταν η μελέτη της διάδοσης έχει να κάνει και με περιβάλλοντα εξωτερικού χώρου, συμβαίνουν επιπρόσθετα με τα παραπάνω και φαινόμενα διάθλασης, ή απορρόφησης π.χ στην ατμόσφαιρα της Γης. Οι ανομοιογενείς εν γένει επιφάνειες, οι ποίκιλες τιμές αγωγιμότητας από υλικό σε υλικό και μερικές φορές ακόμα και στο ίδιο το υλικό, οι μεταβαλλόμενες διηλεκτρικές ιδιότητες είτε εξαιτίας της θερμοκρασίας είτε εξαιτίας της υγρασίας, τα μετεωρολογικά φαινόμενα και κυρίως η βροχή, η ιονόσφαιρα, τα κέντρα σκέδασης που δημιουργούνται λόγω καιρικών φαινομένων στην τροπόσφαιρα, σε περιπτώσεις μελέτης διάδοσης στην ατμόσφαιρα σε μήκη κύματος μεγαλύτερα των 0,3 m (συχνότητα μεγαλύτερη των 10 GHz), οι ιδιομορφίες των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος στο οποίο μεταδίδονται τα ραδιοκύματα, ακόμα και το γήινο μαγνητικό πεδίο ή η έντονη ηλιακή δραστηριότητα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία των ασύρματων ζεύξεων. Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μελετάται ξεχωριστά για μια σειρά από διαφορετικές περιοχές.



Σχήμα 1 :Περιοχές στις οποίες μελετάται το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο

Έχουμε υποθέσει ότι ο ακτινοβολητής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας βρίσκεται στο κέντρο ομόκεντρων σφαιρών ακτίνας R_1 και R_2 .

Θεωρούμε όπου λ το μήκος κύματος και όπου D την μεγαλύτερη διάσταση του ακτινοβολητή π.χ αν έχουμε κεραία την μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας.

Στο σχήμα 1 διακρίνονται οι εξής τρεις περιοχές :

- Η περιοχή μακρινού πεδίου που εκτείνεται για $R < R_1 = 0.62 \left(\frac{D^3}{\lambda} \right)^{1/2}$

Στην περιοχή αυτή το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμφανίζει άεργη συμπεριφορά δηλαδή δεν έχουμε ακτινοβολία ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

- Η ζώνη Fresnel που εκτείνεται μεταξύ R_1 και R_2

Στην περιοχή αυτή έχουμε ακτινοβολία ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, αλλά οι εγκάρσιες συνιστώσες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου έχουν ακτινική εξάρτηση.

- Η περιοχή μακρινού πεδίου που εκτείνεται για $R > R_2 = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$

Στην περιοχή αυτή οι εγκάρσιες συνιστώσες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δεν έχουν ακτινική εξάρτηση.

Το πρόβλημα της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι από τα πλέον δύσκολα να μοντελοποιηθεί επειδή ο ραδιοδιάυλος είναι ένα σύνθετο και μεταβλητό περιβάλλον. Δύσκολα κανείς μπορεί να προβλέψει τους αστάθμητους παράγοντες που θα υπεισέρχονται στην διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, και ακόμα πιο δύσκολα την τελική τιμή των πεδίων σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο του χώρου που μελετάται η διάδοση. Η διαδικασία αυτή συνήθως γίνεται χρησιμοποιώντας διάφορες στατιστικές μεθόδους κατόπιν μετρήσεων που γίνονται ειδικά για συστήματα επικοινωνιών ή χρήση φάσματος.

1.4 Ασύρματο κανάλι επικοινωνίας

Ο στόχος κάθε συστήματος επικοινωνιών είναι η επιτυχής μεταφορά πληροφοριών από τον πομπό στο δέκτη. Το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας είναι δυναμικό, δεν είναι σταθερό, δηλαδή η συνάρτηση μεταφοράς του είναι τυχαία. Η μέση ένταση των λαμβανομένων σημάτων από μια κεραία μπορεί να είναι ικανοποιητική, αλλά ορισμένες φορές δεν είναι ασυνήθιστο η στιγμιαία στάθμη του σήματος σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών (multipath fading environment) να πέσει πολύ (30 dB ή περισσότερο) κάτω από το μέσο επίπεδό του. Κατά τη διάρκεια αυτών των απότομων πτώσεων της στάθμης του σήματος ίσως έχουμε εσφαλμένη παράληψη του σήματος. Με άλλα λόγια ο δέκτης είτε να μην λάβει καθόλου πληροφορία, είτε να λάβει εσφαλμένη πληροφορία. Προκειμένου να αντισταθμιστεί η εξασθένηση που παρουσιάζεται εξαιτίας του καναλιού και για να εξασφαλιστεί ότι η πληροφορία θα αποκωδικοποιηθεί σωστά, η ισχύς μετάδοσης μπορεί να αυξηθεί κατά τη διάρκεια λήψης των ασθενών σημάτων από την κεραία. Τα περισσότερα όμως ασύρματα συστήματα επικοινωνιών είναι χαμηλής ισχύος και δεν έχουν τη δυναμική περιοχή που χρειάζεται για να αντιμετωπίσουν τις διαλείψεις (fading). Μια πετυχημένη προσπάθεια αύξησης της αξιοπιστίας σε ένα περιβάλλον διαλείψεων πολλαπλών διαδρομών (multipath fading) χωρίς αύξηση της ισχύος εκπομπής είναι να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα λήψης διαφορισμού κεραιών (antenna diversity systems). Η εξασθένηση είναι το βασικό χαρακτηριστικό όλων των καναλιών επικοινωνίας.

Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα κανάλια βάσει των εξασθενήσεων που αυτά παρουσιάζουν. Έτσι έχουμε περιπτώσεις με ζεύξη οπτικής επαφής (simple line of sight, LOS), και άλλες όπου μεταξύ πομπού και δέκτη παρεμβάλλονται βουνά ή κτήρια. Τότε το σήμα φτάνει στο δέκτη μέσω πολυόδευσης και λέμε ότι το κανάλι υποφέρει από διαλείψεις πολυόδευσης (multipath fading). Γύρω από τις κεραίες πομπού και δέκτη, όπως και ανάμεσά τους, υπάρχουν διάφορα αντικείμενα που προκαλούν ανακλάσεις και εν γένει διασκόρπιση της μεταδιδόμενης ενέργειας. Εκεί οφείλεται η πολυόδευση (multipath propagation). Στην ακραία, αλλά καθόλου ασυνήθιστη περίπτωση όπου το απευθείας σήμα δεν μπορεί να φτάσει στον δέκτη ονομάζεται διάδοση μη οπτικής επαφής (NLOS, non-line-of-sight). Λόγω της παρουσίας της πολυόδευσης, γίνεται στατιστική περιγραφή του λαμβανόμενου σήματος καθώς είναι δύσκολος ο αναλυτικός υπολογισμός αφού είναι αδύνατη (πρακτικά) η ακριβής γνώση της θέσης και των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών όλων των σκεδαστών. Η διαμόρφωση καναλιών που εξετάζουμε εδώ είναι ευρείας και όχι στενής ζώνης. Αυτό σημαίνει ότι το κανάλι επηρεάζει ανόμοια τις διάφορες συνιστώσες με αποτέλεσμα τη διαστρέβλωση στο δέκτη των φασματικών συνιστωσών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ Η/Μ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

2.1 Μηχανισμοί διάδοσης Η/Μ ακτινοβολίας

Υπάρχουν διάφορα είδη εξασθένησης (attenuation) που υφίσταται το σήμα κατά την διάδοσή του και οφείλονται στους διάφορους μηχανισμούς διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

- **Ανάκλαση** (reflection)

Ανάκλαση εμφανίζεται όταν το διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε αντικείμενο διαστάσεων πολύ μεγαλύτερων από το μήκος κύματος.

-**Σκέδαση** (scattering)

Εμφανίζεται όταν στη διαδρομή του κύματος υπάρχουν αρκετά αντικείμενα, με διαστάσεις μικρότερες από το μήκος κύματος λ.

- **Περίθλαση** (diffraction)

Όταν κατά τη διαδρομή του ραδιοκύματος από τον πομπό προς τον δέκτη αυτό προσπίπτει σε αντικείμενα με αιχμή, συγκρίσιμα με το μήκος κύματος, τότε, από την αρχή του *Huygens*, το σημείο δρα ως δευτερεύουσα πηγή με αποτέλεσμα ηλεκτρομαγνητική ενέργεια να είναι παρούσα και πίσω από το αντικείμενο, σε σημεία όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή με την πηγή, όπου δεν είναι δυνατή η πρόβλεψη της έντασης της περιθλώμενης ακτινοβολίας με οπτική γεωμετρία.

-**Διάθλαση** (refraction)

Εμφανίζεται λόγω αλλαγής του δείκτη διάθλασης στο μέσο διάδοσης, όπως όταν περνάει το ραδιοκύμα από τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας με διαφορετική πυκνότητα. και έχει σαν αποτέλεσμα την εκτροπή του κύματος.

-**Απορρόφηση** (absorbition), **Σκίαση**

Αυτά τα φαινόμενα είναι εξαρτώμενα από το έδαφος, από τα φαινόμενα της ατμόσφαιρας καθώς και από τα αντικείμενα στη διαδρομή όπως βουνά, κτήρια, δέντρα κτλ.

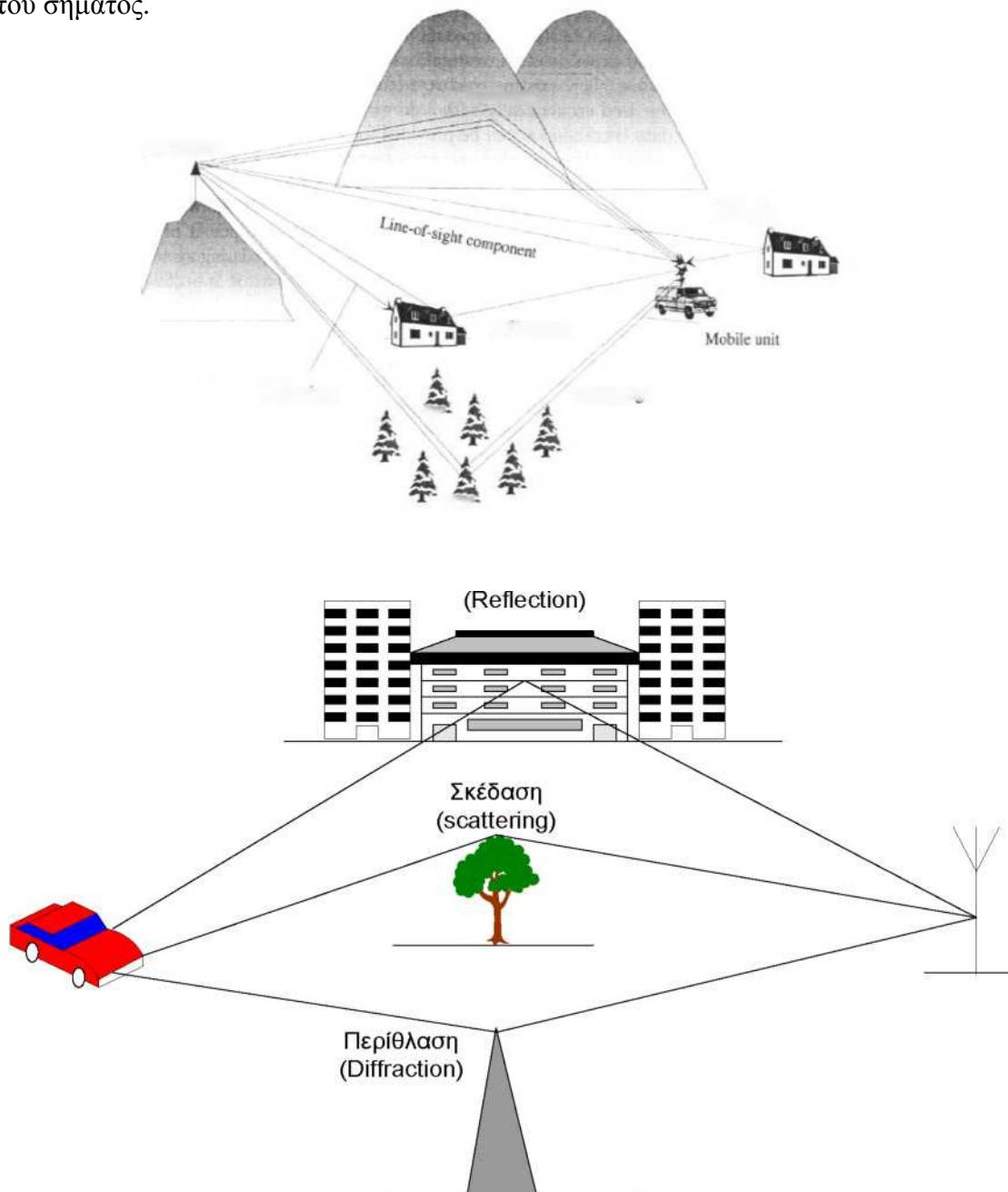
Το αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι να φθάνουν στον δέκτη διάφορα κύματα

από διαφορετικές κατευθύνσεις. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάδοση πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation) και θα το εξετάσουμε παρακάτω.

Η περίπτωση που το απευθείας κύμα δεν μπορεί να φθάσει στον δέκτη ονομάζεται διάδοση μη - οπτικής - επαφής (non line of sight - NLOS).

Από τα παραπάνω φαινόμενα έχει αποδειχθεί ότι η σκέδαση είναι ο μηχανισμός διάδοσης που είναι πιο δύσκολο να προβλεφθεί στα ασύρματα συστήματα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών.

Στο σχήμα 2.1 βλέπουμε την αναπαράσταση των διάφορων μηχανισμών διάδοσης του σήματος.



Σχήμα 2.1 : Οι βασικοί μηχανισμοί διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

2.2 Πολυοδική διάδοση

Βασικός παράγοντας απωλειών είναι η πολυοδική διάδοση ή διάδοση με διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (multipath fading). Η πολυοδική διάδοση οδηγεί σε ραγδαίες διακυμάνσεις της φάσης και του πλάτους του σήματος. Το σήμα που φτάνει στον δέκτη δεν περιέχει μόνο το κύμα της άμεσης οπτικής ευθείας, αλλά και μεγάλο αριθμό ραδιοκυμάτων που φτάνουν μέσω ανάκλασης και περίθλασης. Τα πολλαπλά επίπεδα κύματα συνδυάζονται στην κεραία του δέκτη για να παράγουν ένα σύνθετο λαμβανόμενο σήμα. Οι επιδράσεις της πολυόδευσης και περαιτέρω περιγραφή της, θα γίνει στην παράγραφο (3.6). Στην κεραία, μία συνηθισμένη τεχνική καταπολέμησης θορύβου, είναι η απόκρυψη του πλάγιου λοβού της κεραίας, αν υποθέσουμε ότι σημαντικό μέρος των πολυοδευόμενων ακτινών φτάνουν πλαγίως.

2.3 Επίγεια μετάδοση

Στην επίγεια (terrestrial) μετάδοση δεν έχουμε μετάδοση στον ελεύθερο χώρο (free space) αλλά πρέπει να υπολογιστεί η επίδραση της επιφάνειας της γης στο κανάλι μετάδοσης. Δύο φαινόμενα που παρουσιάζονται είναι η παρεμπόδιση του σήματος, ή περίθλαση αν το σήμα περάσει από το εμπόδιο, δηλαδή η σκίαση που εξετάστηκε παραπάνω, και δεύτερον η ανάκλαση από το έδαφος (Ground Reflection). Αν το έδαφος είναι αρκετά ανακλαστικό μπορεί να προκληθεί ισχυρή εξασθένηση. Θα δούμε την περίπτωση που στον δέκτη φτάνει μία μόνο ανακλώμενη ακτίνα από το έδαφος, και η απευθείας συνιστώσα. Αν το κανάλι μετάδοσης είναι πολύ κοντά στο έδαφος και παράλληλο με αυτό, τότε έχουμε Near Earth Propagation.

2.3.1 Ανάκλαση

Με τον όρο ανάκλαση περιγράφουμε το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει πάνω σε εμπόδιο με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με το μήκος κύματος. Παραδείγματα ανάκλασης έχουμε από την επιφάνεια του εδάφους, από την επιφάνεια της Γης, από τα κτίρια, από βουνά, από τοίχους κλπ. Τα ανακλώμενα κύματα μπορούν είτε να ενισχύουν, είτε να αποσβένουν το συνολικό σήμα. Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα περάσει από ένα μέσο σε ένα άλλο με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, ένα ποσοστό του κύματος

ανακλάται ενώ ένα άλλο μεταδίδεται. Αν τα σώματα αυτά είναι διηλεκτρικά μέρος της ακτινοβολίας μεταδίδεται από το ένα στο άλλο σώμα, και μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στο αρχικό σώμα, ενώ δεν υπάρχει καθόλου απώλεια ενέργειας ή απορρόφηση. Αν όμως το δεύτερο σώμα είναι τέλειος αγωγός, τότε όλη η ενέργεια ανακλάται πίσω στο πρώτο σώμα. Το ποσοστό του κύματος που ανακλάται ορίζει τον συντελεστή ανάκλασης ο οποίος ονομάζεται και συντελεστής ανάκλασης Fresnel (Γ). Ο συντελεστής ανάκλασης εξαρτάται από την πόλωση, την γωνία πρόσπτωσης και την συχνότητα του διαδιδόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος, καθώς και την επιφάνεια του εδάφους.

Τέλος αν Γ είναι ο συντελεστής ανάκλασης και T συντελεστής μετάδοσης οι δύο συντελεστές συνδέονται μεταξύ τους μέσω της παρακάτω βασικής σχέσης η οποία εξασφαλίζει ότι δεν έχουμε απώλεια ενέργειας :

$$T = 1 + \Gamma \quad (2.1)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης Γ είναι σημαντική παράμετρος στον υπολογισμό του αθροίσματος των ακτίνων στο δέκτη, καθώς επηρεάζει το μέτρο και τη φάση της προσπίπτουσας ακτίνας. Για μικρή γωνία πρόσπτωσης και αλλαγή φάσης 180° ο συντελεστής ανάκλασης έχει τιμή $\Gamma=1$. Στην περίπτωση που η απόσταση των δύο κεραιών είναι πολύ μεγαλύτερη από το ύψος των κεραιών, δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης της ανακλώμενης ακτίνας στο έδαφος είναι πολύ μικρή, μπορούμε να πούμε ότι οι δύο ακτίνες καλύπτουν προσεγγιστικά την ίδια απόσταση και άρα η απώλεια ελεύθερου χώρου είναι ίδια για τις δύο περιπτώσεις. Τότε έχω 6 dB ενίσχυση δηλαδή διπλασιασμό πλάτους στο δέκτη, αν η ανακλώμενη ακτίνα είναι σε φάση με την απευθείας. Διπλασιασμός του πλάτους σημαίνει τετραπλασιασμός της ισχύος. Αυτή είναι η ακραία περίπτωση θετικής συνεισφοράς της ανακλώμενης ακτίνας στο λαμβανόμενο σήμα. Η ακραία περίπτωση αρνητικής επίδρασης της ανακλώμενης ακτίνα είναι αν υπάρχει διαφορά φάσης 180° οπότε τα σήματα αλληλοαναιρούνται.

Η λαμβανόμενη ισχύς συναρτήσεται της απόστασης δίνεται από τη σχέση:

$$P_r (d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \quad (2.2)$$

Το path loss είναι ίσο με :

$$P L = G_t G_r \frac{(h_t h_r)^2}{d^4} \quad (2.3)$$

όπου :

G_t, G_r :: τα κέρδη των κεραιών ,

h_t : το ύψος της κεραιάς του πομπού,

h_r : το ύψος της κεραιάς του δέκτη.

2.3.2 Περίθλαση

Με τον όρο περίθλαση περιγράφουμε το φαινόμενο κατά το οποίο ένα αδιαπέραστο και συνήθως αιχμηρό, ή με αιχμηρές ανωμαλίες στην επιφάνεια του, σώμα, παρεμβάλλεται μεταξύ της ασύρματης ζεύξης πομπού και δέκτη. Με βάση την αρχή του Huygen πίσω από το εμπόδιο παράγονται δευτερογενή κύματα τα οποία φτάνουν στον δέκτη, ακόμα και αν δεν υπάρχει καμία οπτική επαφή με τον πομπό. Το φαινόμενο της περίθλασης είναι το πλέον συχνό σε αστικές, πυκνοκατοικημένες περιοχές. Σε υψηλές συχνότητες το φαινόμενο της περίθλασης εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εμποδίου, όπως και από το πλάτος, την φάση και την πόλωση του προσπίπτοντος κύματος στο σημείο στο οποίο λαμβάνει χώρα η περίθλαση.

Ζώνες Fresnel

Μερικές ενδιαφέρουσες αρχές σχετικές με την περίθλαση προκύπτουν αν θεωρήσουμε ένα πομπό (T) και ένα δέκτη (R) σε περιβάλλον ελεύθερου χώρου. Επίσης θεωρούμε ότι μεταξύ του πομπού και του δέκτη παρεμβάλλεται ένα εμπόδιο το οποίο εκτείνεται σε άπειρο βάθος και φτάνει σε ενεργό ύψος h δηλαδή βρίσκεται κατά h μέτρα πάνω από την ευθεία που ενώνει τον πομπό και τον δέκτη, η δε οριζόντια απόσταση του εμποδίου είναι d_1 από τον πομπό και d_2 από τον δέκτη. Η διαφορά δρόμων Δ μεταξύ της «διαδρομής περίθλασης» και της υποθετικής, εάν υπήρχε, διαδρομής άμεσης οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη (line of sight) υπολογίζεται από τον τύπο :

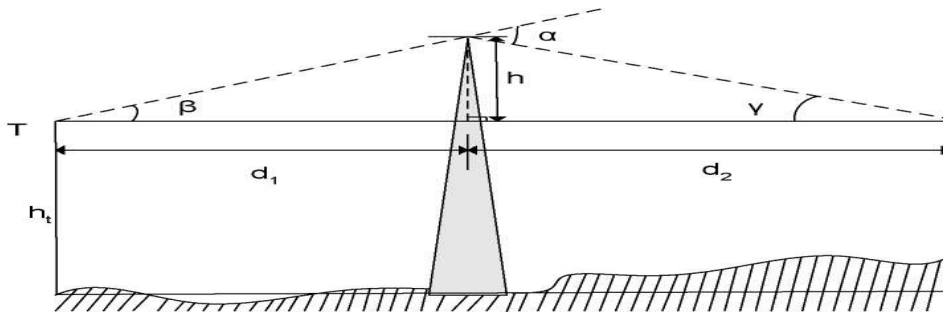
$$\Delta = \frac{h^2}{2} \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 \cdot d_2} \quad (2.4)$$

Στην (2.4) έχει υποθεθεί $h \ll d_1, d_2$ και $h \gg \lambda$. Η διαφορά δρόμων Δ καλείται επιπλέον απόσταση. Η διαφορά φάσης που αντιστοιχεί σε αυτή τη διαφορά δρόμων

προκύπτει από τη σχέση :
$$\varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{h^2}{2} \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 \cdot d_2} \quad (2.5)$$

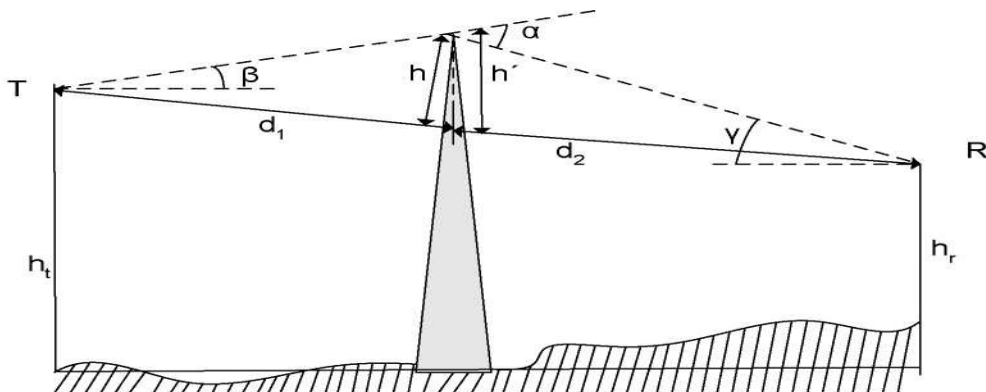
Αναφερόμενοι στα σχήματα που ακολουθούν έχουμε δύο περιπτώσεις γεωμετρίας. Η πρώτη αφορά την περίπτωση που πομπός και δέκτης βρίσκονται στο ίδιο ύψος, ενώ η δεύτερη την περίπτωση που πομπός και δέκτης βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη.

Πρώτη περίπτωση :



Σχήμα 2.2 - Γεωμετρία περίθλασης με πομπό και δέκτη στο ίδιο ύψος

Δεύτερη περίπτωση :



Σχήμα 2.3 - Γεωμετρία περίθλασης με πομπό και δέκτη σε διαφορετικό ύψος

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει άμεσα ότι αν $\tan\alpha = x$ που συμβαίνει για μικρές τιμές του x , τότε $\alpha = \beta + \gamma$ και η γωνία α προκύπτει από τη σχέση :

$$a = h \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 \cdot d_2} \quad (2.6)$$

Μια πιο απλή έκφραση για την εξίσωση (2.5) προκύπτει εάν χρησιμοποιήσουμε την αδιάστατη παράμετρο Fresnel – Kirchoff η οποία ορίζεται από τη σχέση :

$$v = h \cdot \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}} \quad (2.7)$$

ή

$$v = h \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot d_1 \cdot d_2}{\lambda \cdot (d_1 + d_2)}} \quad (2.8)$$

όπου a εκφρασμένο σε ακτίνια (rad).

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει άμεσα η εξάρτηση της παραμέτρου Fresnel – Kirchoff από την διαφορά φάσης φ κατά τον τύπο :

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \cdot v^2 \quad (2.9)$$

Οι σχέσεις (2.7), (2.8), (2.9) δείχνουν ότι η διαφορά φάσης φ εξαρτάται από το ύψος και την θέση του εμποδίου καθώς και από την θέση και απόσταση του πομπού και του δέκτη.

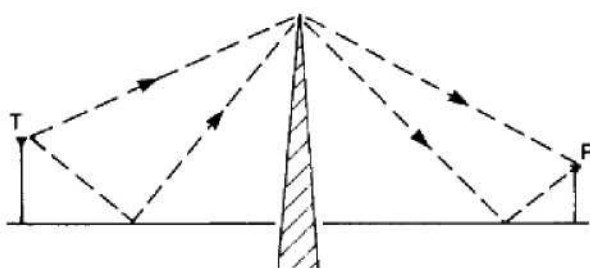
Απαραίτητη προϋπόθεση για να έχουμε μετάδοση σε συνθήκες ελεύθερου χώρου (free space) είναι η διατήρηση μιας περιοχής γνωστής ως πρώτη ζώνη Fresnel η οποία θα πρέπει να είναι ελεύθερη από εμπόδια. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι οι κεραίες πρέπει να υψωθούν τόσο όσο χρειάζεται για να είναι η πρώτη ζώνη Fresnel ελεύθερη από εμπόδια. Εάν οι κεραίες βρίσκονται σχετικά χαμηλά με την απευθείας διαδρομή

μετάδοσης (line of sight) να περνά κοντά στην επιφάνεια της Γης σε κάποια ενδιάμεσα σημεία, τότε η απώλεια του σήματος είναι αρκετά μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη απώλεια ελεύθερου χώρου, παρόλο που στην διαδρομή δεν υπάρχει κανένα εμπόδιο. Το ποσοτικό μέτρο που καθορίζει εάν έχουμε ή όχι εδαφικά εμπόδια και κατ' επέκταση αν έχουμε ή όχι απώλειες περίθλασης (diffraction losses), δίνεται από τις ελλειψοειδείς ζώνες Fresnel.

Γενικά οι ζώνες μονού αριθμού, δηλαδή για περιττό n , λέμε ότι δρουν καταστρεπτικά στο σήμα, καθώς η διαφορά των δύο μονοπατιών είναι της τάξης του λ , η ανακλώμενη/περιθλώμενη ακτίνα μπορεί να είναι της ίδιας ισχύος με αυτή του απευθείας σήματος. Από την άλλη ανακλάσεις από ζώνες άρτιου αριθμού δρουν ενισχυτικά στο σήμα. Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι οι ζώνες έχουν ελλειψοειδή σχήματα με εστίες τις κεραίες εκπομπής και λήψης.

Αρχή Huygen

Για την επεξήγηση της αρχής του Huygens, για την διάδοση ενέργειας πίσω από ένα αντικείμενο, χρησιμοποιείται ένα ιδανικό εμπόδιο, ευθύ, απόλυτα απορροφητικό. Η πραγματικότητα διαφέρει προφανώς και μία άλλη προσέγγιση είναι αυτή του (Knife edge diffraction), που θεωρεί φυσικό εμπόδιο, αλλά με πολύ λεπτή κορυφή. Υπάρχουν επίσης πολλές περαιτέρω προσεγγίσεις.



Σχήμα 2.4 Το φαινόμενο της περίθλασης (knife edge)

Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συναντάει ένα εμπόδιο ή μια ασυνέχεια, η οποία είναι τόσο μικρή ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί ως αιχμή, τότε από τις εξισώσεις του Maxwell μπορούμε να καταλήξουμε σε μία χρήσιμη λύση του προβλήματος η οποία ταυτίζεται με την εξαγωγή της αρχής του Huygen. Το κεντρικό νόημα της

αρχής του Huygen είναι ότι κάθε σημείο του μετώπου του κύματος μπορεί να συμπεριφερθεί σαν μια πηγή δευτερεύοντος κύματος. Αν όλα αυτά τα δευτερεύοντα κύματα συνδυαστούν, δημιουργούν ένα νέο μέτωπο κύματος στην κατεύθυνση διάδοσης. Η περίθλαση οφείλεται στην διάδοση των δευτερευόντων κυμάτων στην περιοχή σκίασης του εμποδίου. Το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο θα είναι ίσο με το άθροισμα όλων των δευτερευόντων κυμάτων στο χώρο γύρω από το εμπόδιο. Αν κατά την επίγεια μετάδοση ο δρόμος διακόπτεται από την επιφάνεια της γης ή από ένα εμπόδιο, παρουσιάζεται το φαινόμενο της περίθλασης για μετάδοση πέρα από τον ορίζοντα. Οι παρεμβολές που εισάγονται εξαρτώνται από την ακτίνα της καμπύλης στην κορυφή του εμποδίου. Δηλαδή στην περίπτωση παρεμβολής ενός κτηρίου αν η απόσταση των επίγειων κεραιών είναι μεγάλη, δεν παίζει ρόλο μόνο το ύψος του κτηρίου, αλλά λαμβάνεται υπόψη και η καμπύλωση της γης. Γενικά για αποστάσεις μικρότερες των 10 χιλιομέτρων η καμπύλωση της γης αγνοείται.

2.3.3 Σκληρότητα του εδάφους

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας της επίδρασης της επιφάνειας της γης στο κανάλι μετάδοσης είναι η σκληρότητα του εδάφους (Surface Roughness). Σε πολλές περιπτώσεις, το έδαφος είναι αρκετά ανώμαλο με αποτέλεσμα να μην είναι ρεαλιστική η προσέγγιση του εδάφους ως λείας ανακλαστικής επιφάνειας, αλλά αυτό να υφίσταται σκέδαση. Η σκληρότητα του εδάφους μετράται με τη βοήθεια του κριτηρίου Rayleigh, το οποίο κρίνει την υψομετρική διαφορά που εμφανίζει το έδαφος. Αν η διαφορά από τα βυθίσματα μέχρι τις κορυφές είναι μικρότερη από αυτήν που θα προκαλούσε διαφορά φάσης μικρότερη από 90^0 σε δύο ανακλώμενες ακτίνες από τα ακραία σημεία (την κορυφή και το βύθισμα) τότε το έδαφος χαρακτηρίζεται ομαλό. Το ποσό της ανωμαλίας του εδάφους που είναι αποδεκτή ώστε να χαρακτηριστεί ομαλό το έδαφος, είναι ανάλογο του μήκους κύματος και της απόστασης και αντιστρόφως ανάλογο του ύψους των κεραιών.

Ο μαθηματικός τύπος που εκφράζει τα ανωτέρω είναι :

$$R=4\pi\sigma\sin\varphi/\lambda \quad (2.10)$$

Όπου:

σ =η απόκλιση του μέσου ύψους των ανωμαλιών του εδάφους

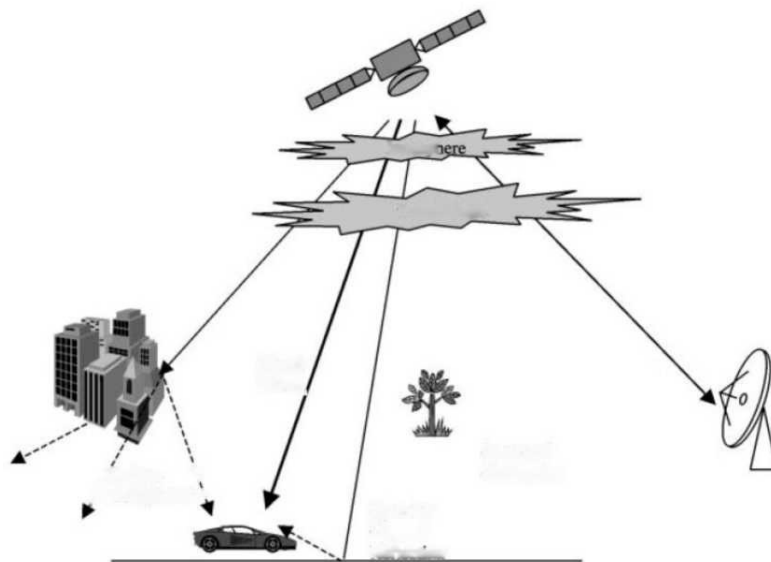
φ =η γωνία πρόσπτωσης και λ το μήκος κύματος

Αν $R < 0.1$ τότε η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ομαλή (smooth) ενώ αν $R > 10$

Η επιφάνεια χαρακτηρίζεται σκληρή (rough)

2.4 Ατμοσφαιρική εξασθένηση (atmospheric losses)

Εξασθένηση του σήματος στην ατμόσφαιρα δημιουργείται είτε από απορρόφηση της ενέργειας από διάφορα αέρια, φαινόμενο που έχει το όνομα ατμοσφαιρική απορρόφηση (atmospheric absorption) είτε από εξασθενήσεις οφειλόμενες σε καιρικές συνθήκες που ονομάζονται ατμοσφαιρικές εξασθενήσεις (atmospheric attenuation). Στα επόμενα υποκεφάλαια περιγράφονται οι εξασθενήσεις που λαμβάνουν χώρα στην τροπόσφαιρα και την ιονόσφαιρα. Τα τροποσφαιρικά φαινόμενα μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα σε συχνότητες κάτω από 10 GHz.



Σχήμα 2.5 Απεικόνιση της διάδοσης του σήματος μέσω των ζωνών της ατμόσφαιρας.

2.4.1 Ιονόσφαιρα

Το πρώτο τμήμα της ατμόσφαιρας που συναντάει το σήμα από δορυφόρο είναι η ιονόσφαιρα, ένα στρώμα ιονισμένων σωματιδίων, κυρίως λόγω της επίδρασης του ηλίου. Τα βασικά προβλήματα που προκαλεί η ιονόσφαιρα είναι η ξαφνική αλλαγή του δείκτη διάθλασης, ο ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός (Ionospheric scintillation) και γενικά στατιστικές διακυμάνσεις της τιμής του σήματος, που δεν μπορούν να προβλεφθούν τοπικά. Ο ιονοσφαιρικός σπινθηρισμός περιγράφει μεταβολές της

φάσης, του πλάτους, της πολικότητας και της γωνίας άφιξης του κύματος. Τα φαινόμενα αυτά, που οφείλονται στα χαρακτηριστικά της ιονόσφαιρας που περιγράφονται παρακάτω, είναι μεταβλητά με το χρόνο, και μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές απώλειες στο σήμα, για διάρκεια της τάξης των λεπτών. Για αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη ισχύς σήματος. Μία από τις εξασθενίσεις που εισάγονται από την ιονόσφαιρα, ειδικότερα, η περιστροφή Faraday (δηλαδή η περιστροφή του επιπέδου πόλωσης ενός γραμμικά πολωμένου ηλεκτρομαγνητικού κύματος στην ιονόσφαιρα, λόγω της αλληλεπίδρασής του με το μαγνητικό πεδίο της Γης) μπορεί να εξουδετερωθεί αποτελεσματικά από την εκλεκτική χρήση της πόλωσης της μετάδοσης.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα αλλά σχηματίζουν στρώματα. Ακόμα, ταξιδεύουσες ιονοσφαιρικές διαταραχές, γνωστές ως νέφη ηλεκτρονίων ταξιδεύουν στην ατμόσφαιρα δημιουργώντας διακυμάνσεις στο σήμα. Στην ιονόσφαιρα υπάρχουν πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια ανά μονάδα όγκου. Η συνολική μετατόπιση ενός πλήθους ηλεκτρονίων N σε έναν όγκο δημιουργεί την διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου, που καλείται πόλωση P . Η επίδραση της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος προκαλεί μια τέτοια πόλωση η οποία οδηγεί στην αλλαγή του δείκτη διάθλασης n της ιονόσφαιρας. προκύπτει ότι n^2 είναι ανάλογο της πυκνότητας ελευθέρων ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου και αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας. Αυτό είναι ένα στατιστικό φαινόμενο, δεν μπορεί δηλαδή να προβλεφτεί τοπικά. Φαινόμενα της ιονόσφαιρας δεν θα εξεταστούν περαιτέρω καθώς επίδραση της στα μικροκύματα είναι αρκετά μικρή.

2.4.2 Τροπόσφαιρα

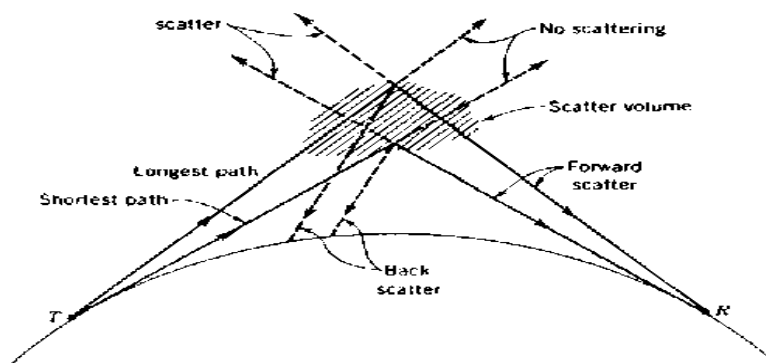
Η τροπόσφαιρα είναι το χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας και εκτείνεται από την επιφάνεια της θάλασσας περίπου ως το ύψος των 10Km όπου είναι η τροπόπαυση (tropopause). Το ακριβές ύψος αλλάζει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος από 9km στους πόλους ως 16km στον ισημερινό, αλλά και μεταβάλλεται τοπικά. Στην τροπόσφαιρα η θερμοκρασία εξαρτάται από το ύψος, σε αντίθεση με τη στρατόσφαιρα όπου η θερμοκρασία είναι σταθερή.

Για μικρές συχνότητες, κάτω του 1 GHz υπάρχει πολύ μικρή απορρόφηση, ενώ για συχνότητες μεγαλύτερες, και ειδικά πάνω από 10GHz υπάρχει μεγάλη απορρόφηση

κυρίως λόγω του φαινομένου του μοριακού συντονισμού, που προκαλείται κυρίως από δύο στοιχεία, το οξυγόνο και το εξατμιζόμενο νερό.

2.4.2.1 Τροποσφαιρική σκέδαση (Tropospheric Scatter Propagation)

Η τροποσφαιρική σκέδαση, είναι ένας τρόπος μετάδοσης UHF κυμάτων πέρα από τον ορίζοντα. Χρησιμοποιεί συγκεκριμένες ιδιότητες της τροπόσφαιρας, το κοντινότερο κομμάτι της ατμόσφαιρας (15 km από το έδαφος). Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6 δύο κατευθυντικές κεραίες δείχνουν κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι δέσμες σήματός τους να τέμνονται στο μέσο μεταξύ τους και πέρα από τον ορίζοντα. Αν μία από αυτές είναι μία UHF κεραία μετάδοσης και η άλλη μία UHF κεραία λήψης τότε μέσω του φαινομένου της τροποσφαιρικής σκέδασης επαρκής ενέργεια θα κατευθυνθεί προς την κεραία λήψης του point to point συστήματος. Τα αίτια του φαινομένου αυτού δεν έχουν διευκρινιστεί σαφώς αλλά επικρατούν δύο θεωρίες.. Η πρώτη εξηγεί ότι το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε ανακλάσεις από σταγονίδια στην ατμόσφαιρα παρόμοια με το διασκορπισμό μιας δέσμης φωτός από σωματίδια σκόνης και η δεύτερη από ανακλάσεις από τα υπόλοιπα ατμοσφαιρικά στρώματα. Γενικά, πρόκειται για μία μόνιμη κατάσταση και όχι για ένα σποραδικό φαινόμενο. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται πιο συχνά έχουν κέντρο τα 900, 2000 και 5000 MHz. Ωστόσο η ισχύς του κύματος μετά την σκέδαση είναι μικρότερη κατά 60 με 90 dB, ή 1/1000000 με 1/10000000000 της προσπίπτουσας ισχύος, οπότε απαιτείται πολύ υψηλή ισχύς μετάδοσης.

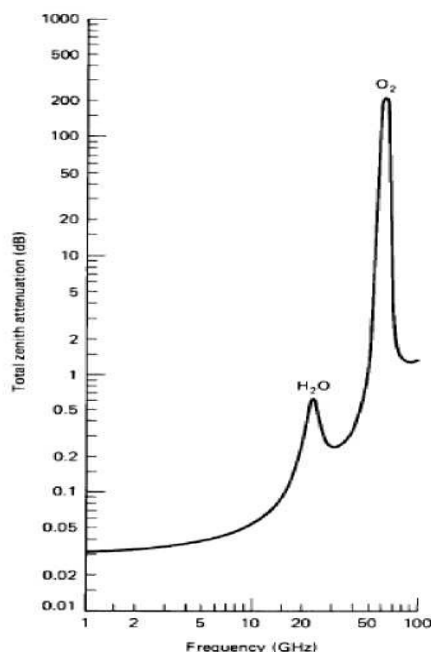


Σχήμα 2.6 Διάδοση μέσω τροποσφαιρικής σκέδασης

2.5.2.2 Τροποσφαιρικά φαινόμενα

Απορρόφηση λόγω αερίων.

Με την αύξηση της συχνότητας αυξάνεται και η απορρόφηση από τα διάφορα μόρια αερίων της ατμόσφαιρας, ειδικά από τους υδρατμούς και το οξυγόνο. Το νερό και το οξυγόνο παρουσιάζουν μόνιμη ηλεκτρική και μαγνητική ροπή αντίστοιχα με αποτέλεσμα να επηρεάζουν οποιοδήποτε εφαρμοζόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Στις συχνότητες 22,3 και 60 GHz αντίστοιχα προκαλούνται 2 βυθίσματα (peak) όπως φαίνεται στο σχήμα (2.7). Άλλα αέρια που προκαλούν απορρόφηση σε μικροκυματικές συχνότητες είναι μεταξύ άλλων τα CO, O₃, N₂O, SO₂ τα οποία έχουν πολύ χαμηλή μοριακή πυκνότητα οπότε η συνεισφορά τους στις απώλειες είναι αμελητέα. Η ατμοσφαιρική απορρόφηση μακριά από τα δύο μέγιστα που προαναφέρθηκαν, έχει σχετικά μικρές τιμές όπως φαίνεται το σχήμα (για πίεση 1atm και θερμοκρασία 20ο)..



Σχήμα 2.7 Απορρόφηση του νερού και μοριακού οξυγόνου συναρτήσει της συχνότητας

Υδρομετεωρίτες:

Οι υδρομετεωρίτες (δηλαδή σταγόνες βροχής, νιφάδες χιονιού ή χαλάζι) απορροφούν ή σκεδάζουν κύματα με μήκος κύματος συγκρίσιμο με το μέγεθός τους. Και αυτό συμβαίνει για συχνότητες μεγαλύτερες από 10 GHz, όπου πχ οι σταγόνες της βροχής

εκλαμβάνονται ως ευμεγέθη εμπόδια, ή διηλεκτρικές σφαίρες με απώλειες για μεγάλες συχνότητες. Η πλέον κοινή μετρήσιμη παράμετρος της βροχής είναι η έντασή της σε διάφορα σημεία επί του εδάφους. Η εξασθένηση λόγω βροχής (rain attenuation) μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση της έντασής της, η οποία μετριέται με χιλιοστόμετρα ανά ώρα. Ο μαθηματικός τύπος της εξασθένησης ανά χιλιόμετρο είναι :

$$\alpha = kR^\gamma \quad \text{dB/km} \quad (2.11)$$

Όπου

R = ο ρυθμός βροχόπτωσης

γ, k = σταθερές εξαρτώμενες από τη συχνότητα και την πόλωση.

Άρα η συνολική εξασθένηση σε περιβάλλον βροχόπτωσης είναι :

$$A = \alpha L \quad \text{dB} \quad (2.12)$$

Όπου

L = το συνολικό ενεργό μήκος της διαδρομής του σήματος στη βροχή

α = η εξασθένηση ανά χιλιόμετρο

Το L προκύπτει από το πραγματικό μήκος, διαμορφωμένο ώστε να περιλαμβάνει τις επιδράσεις της ανομοιογένειας της βροχής και του ύψους του δέκτη. Η συνολική διατομή εξασθένησης για σταγόνα ακτίνας a $Q(a)$ υπολογίζεται με τη βοήθεια της θεωρίας Mie για a περίπου ίση του μήκους κύματος λ , ενώ για $\lambda \gg a$ είμαστε στην περιοχή Rayleigh όπου Q ανάλογο της ποσότητας a .

Αποπόλωση λόγω σκέδασης από μη σφαιρικά σωμάτια (σταγόνες βροχής, κρυστάλλους)

Σπινθηρισμοί

Με την αύξηση της συχνότητας η μεταβολή του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας προκαλεί μεγάλες αυξομειώσεις στο πλάτος και τη φάση του σήματος.

Ατμοσφαιρική διάθλαση

Η παραδοχή ότι τα μέτωπα των κυμάτων οδεύουν σε ευθείες γραμμές μπορούν να οδηγήσουν σε σφάλματα, καθώς στην ατμόσφαιρα παρατηρούνται φαινόμενα

διάθλασης και αντίστοιχης καμπύλωσης των ακτινών, όπως αναλύθηκε στην περίπτωση της ιονόσφαιρας. Ο ατμοσφαιρικός δείκτης διάθλασης δεν είναι σταθερός αλλά παρουσιάζει βαθμώσεις, ανάλογα με το ύψος (ατμοσφαιρική πίεση) την υπάρχουσα θερμοκρασία και τη μερική πίεση υδρατμών. Ο δείκτης διάθλασης μειώνεται εκθετικά με το ύψος.

Σε αντίθεση με τις απώλειες ελευθέρου χώρου, οι διαλείψεις που υφίσταται το σήμα και οφείλονται στα πιο επιβαρυντικά για την ποιότητα του σήματος ατμοσφαιρικά φαινόμενα, κυρίως τη βροχή, δεν επηρεάζουν σε μόνιμη βάση τη λειτουργία του συστήματος, αλλά σε τυχαίες χρονικές στιγμές και για τυχαία χρονικά διαστήματα. Τα διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα αποτελούν, λοιπόν, τυχαίες διαδικασίες και η απόσβεση που εισάγουν κατά τη διάδοση του σήματος δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί ντετερμινιστικά. Για το λόγο αυτό η επίδρασή τους στην ποιότητα του ραδιοδιαύλου μελετάται στατιστικά και το μέτρο σύγκρισης είναι η πιθανότητα κατά το συνολικό χρόνο λειτουργίας του συστήματος να υπερβεί η εξασθένιση, που αυτά προκαλούν, μία συγκεκριμένη στάθμη.

2.6 Ηλιακή δραστηριότητα

Ο ήλιος παρουσιάζει μια περιοδική δραστηριότητα 11 ετών. Σε αυτό το διάστημα παρατηρείται μεταβολή της ποσότητας των ηλιακών κηλίδων. Οι ηλιακές κηλίδες είναι φαινομενικά σκοτεινές περιοχές της φωτόσφαιρας του ηλίου, οι οποίες λόγω της μαγνητικής δραστηριότητας της επιφάνειας του άστρου (και παρεμπόδισης της κίνησης αέριων μαζών) έχουν μειωμένη θερμοκρασία έως και 20000 C σε σχέση με το περιβάλλον τους. Αυτός είναι και ο λόγος που φαίνονται σκοτεινές αυτές οι περιοχές. Οι κηλίδες λοιπόν είναι δείκτης της ηλιακής δραστηριότητας, και καθώς αυξάνονται έως ένα μέγιστο και μειώνονται έως ένα ελάχιστο μέσα στον ενδεκαετή ηλιακό κύκλο, αντίστοιχα αυξομειώνεται η μαγνητική δραστηριότητα του ηλίου, καθώς και το παραγόμενο από αυτή τη δραστηριότητα προϊόν, ο ηλιακός άνεμος. Από τις ηλιακές προεξοχές (solar flares) γίνεται εκτόξευση από τον ήλιο τεράστιων ποσοτήτων πλάσματος, (ιονισμένων σωματιδίων) τα οποία βομβαρδίζουν και τους πλανήτες. Αυτά τα σωματίδια δεν φτάνουν στην επιφάνεια της γης καθώς εμποδίζονται από το μαγνητικό πεδίο της γης, και οδηγούνται στους πόλους δημιουργώντας το σέλας. Επιπτώσεις υπάρχουν γενικά στις ραδιοεπικοινωνίες καθώς και σε γραμμές μεταφοράς ενέργειας. Οι κύριες διαταραχές που προκαλούνται στην ιονόσφαιρα είναι

τα SIDs (sudden ionospheric disturbances) και οι ιονοσφαιρικές καταιγίδες. Τα SIDs προκαλούνται από ηλιακές εκρήξεις, που είναι γιγαντιαίες εκπομπές υδρογόνου από τον ήλιο. Αυτές οι εκρήξεις είναι ξαφνικές και απρόβλεπτες, αλλά πιο πιθανές κατά τη διάρκεια έντονης ηλιακής δραστηριότητας. Η ακτινοβολία-x που συνοδεύει της ηλιακές εκρήξεις αυξάνει δραματικά την πυκνότητα ιονισμού στο στρώμα D. Στην περίπτωση αυτή το στρώμα D απορροφά σήματα που κανονικά θα το διαπερνούσαν και θα ανακλώνταν από το επίπεδο F. Έτσι οι επικοινωνίες μακράς απόστασης εξαφανίζονται εντελώς για περιόδους άνω της μίας ώρας κάθε φορά.

Από μελέτες με επίγειους ραδιοηλιογράφους και δορυφόρους προέκυψε μεγάλο ποσό πληροφορίας σχετικά με τις ηλιακές εκρήξεις έτσι που οι βραχυπρόθεσμες προβλέψεις έγιναν πιθανές. Δύο άλλα στοιχεία πρέπει να σημειωθούν σχετικά με τα SIDs. Πρώτον ότι μόνο η ηλιοφώτιστη πλευρά της γης επηρεάζεται και δεύτερον ότι η VLF διάδοση βελτιώνεται. Οι ιονοσφαιρικές καταιγίδες προκαλούνται από εκπομπές σωματιδίων από τον ήλιο, γενικότερα ακτίνες α και β . Δεδομένου ότι οι εκπομπές αυτές κάνουν περίπου 36 ώρες για να φτάσουν στη γη, κάποια προειδοποίηση είναι πιθανή ιδιαίτερα μετά από μεγάλες ηλιακές κηλίδες και εκρήξεις. Η ισχύς των σημάτων τότε μειώνεται σημαντικά. Ωστόσο η χρήση χαμηλών συχνοτήτων συχνά βοηθά, αφού οι υψηλότερες επηρεάζονται περισσότερο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΛΕΙΨΕΙΣ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα χρησιμοποιούν ως μέσο μετάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τη γήινη ατμόσφαιρα. Η περιοχή συχνοτήτων που χρησιμοποιείται εκτείνεται από 10 kHz έως 40 GHz.

FREQUENCY BAND	FREQUENCY RANGE
Extremely Low Frequency (ELF)	< 3 kHz
Very Low Frequency (VLF)	3 - 30 kHz
Low Frequency (LF)	30 - 300 kHz
Medium Frequency (MF)	300 kHz - 3MHz
High Frequency (HF)	3 - 30 MHz
Very High Frequency (VHF)	30 - 300 MHz
Ultra High Frequency (UHF)	300 MHz - 3 GHz
Super High Frequency (SHF)	3 - 30 GHz
Extra High Frequency (EHF)	30 - 300 GHz

Πίνακας Περιοχών Συχνοτήτων

Ασύρματη επικοινωνία πραγματοποιείται είτε μεταξύ δύο σταθερών σημείων, είτε μεταξύ δύο σημείων από τα οποία το ένα ή και τα δύο είναι εν κινήσει. Η επικοινωνία μεταξύ σταθερών σημείων πραγματοποιείται με τις μικροκυματικές ζεύξεις οπτικής επαφής, με τροποσφαιρικές ζεύξεις πέραν ορίζοντος και με δορυφορικές ζεύξεις.

Επίγεια μικροκυματικά συστήματα οπτικής επαφής επιτρέπουν τη μετάδοση μεταξύ δύο σταθερών σημείων με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που συγκεντρώνεται με τη βοήθεια κατευθυντικών κεραιών. Με τα συστήματα αυτά επιτυγχάνεται η μετάδοση τηλεφωνικών συνδιαλέξεων, που έχουν πολυπλεχθεί στο πεδίο συχνότητας (φερέσυχνα συστήματα) ή στο πεδίο χρόνου (συστήματα PCM), προγραμμάτων τηλεόρασης και δεδομένων (data).

Οι απώλειες στο ασύρματο κανάλι

Ως απώλειες μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τη συνολική εξασθένηση της ισχύος του σήματος κατά τη διάρκεια της διαδρομής του από τον πομπό στον δέκτη. Οι βασικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος είναι η ανάκλαση, η διάθλαση και η σκέδαση. Ανάκλαση συμβαίνει όταν το κύμα προσκρούει σε μία μεγάλη λεία επιφάνεια (νερό ή μεγάλες μεταλλικές επιφάνειες). Διάθλαση ή περίθλαση έχουμε όταν η παρουσία εμποδίου στην ευθεία μεταξύ πομπού και δέκτη προκαλεί τη δημιουργία δευτερευόντων κυμάτων μετά το εμπόδιο. Αυτό το φαινόμενο λέγεται σκίαση (shadowing) και ευθύνεται για τη λήψη σήματος από τον δέκτη ακόμα κι όταν δεν υπάρχει οπτική επαφή (LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη. Το τρίτο φαινόμενο η σκέδαση συμβαίνει όταν το κύμα προσκρούει σε ανώμαλες επιφάνειες με διαστάσεις κοντά στο μήκος κύματος οπότε η ενέργεια ανακλάται και σκεδάζεται (διασκορπίζεται) προς όλες τις διευθύνσεις. Επίσης η εξασθένηση μπορεί να οφείλεται σε κατανάλωσή (απορρόφηση) του σήματος, που μπορεί να οφείλεται στην παρουσία σωματιδίων στην ατμόσφαιρα ή σε φαινόμενα ανάκλασης. Οι απώλειες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ντετερμινιστικές και σε στατιστικά κυμαινόμενες.

3.2 Διάδοση στον ελεύθερο χώρο

Η πιο απλή περίπτωση μελέτης της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι χρησιμοποιώντας το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου. Για να χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο μοντέλο θα πρέπει πομπός (T – Transmitter) και δέκτης (R – Receiver) να έχουν άμεση οπτική επαφή (line of sight) και να μην υπάρχουν γύρω εμπόδια. Είναι προφανές ότι το συγκεκριμένο μοντέλο διάδοσης απαιτεί ιδανικές συνθήκες, οι οποίες είναι μάλλον αμφίβολο αν μπορούν να αντικατοπτρίσουν ρεαλιστικά ένα πραγματικό σενάριο ασύρματης ζεύξης, ωστόσο σε διάφορες περιπτώσεις όπως για παράδειγμα σε μια δορυφορική ζεύξη, σε μια μικροκυματική ζεύξη, η πιο ειδικά στην περίπτωση μας στην μελέτη ενός προβλήματος στο οποίο έχουμε περιβάλλον ικανό να θεωρηθεί όμοιο με το περιβάλλον «ελεύθερου χώρου» μπορεί να χρησιμοποιηθεί δίνοντας εκτιμήσεις για την στάθμη ισχύος του σήματος. Υποθέτοντας ότι η κεραία

εκπομπής και η κεραία λήψης βρίσκονται σε περιβάλλον «ελεύθερου χώρου», δηλαδή μακριά από τη Γη, ή τυχόν εμπόδια και ότι P_T , P_R η ισχύς που εκπέμπεται από τον πομπό και τον δέκτη αντίστοιχα, G_T , G_R τα κέρδη της κεραίας του πομπού και του δέκτη στη κατεύθυνση λήψης αντίστοιχα, A η ενεργός περιοχή της κεραίας, d η απόσταση της ραδιοξέυξης, η ενέργεια ανά μονάδα επιφανείας σε απόσταση d ή αλλιώς η πυκνότητα ισχύος στον δέκτη προκύπτει ίση με :

$$W = \frac{P_T G_T}{4\pi \cdot d^2} \quad (3.1)$$

Το γινόμενο $G_T \cdot P_T$ είναι η Ενεργός Ακτινοβολούμενη Ισοτροπική Ισχύς (EIRP)

Η διαθέσιμη ισχύς της κεραίας λήψης προκύπτει ίση με :

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi \cdot d^2} \cdot A = \frac{P_T G_T}{4\pi \cdot d^2} \cdot \frac{\lambda^2 \cdot G_R}{4\pi} \quad (3.2)$$

Η τελευταία σχέση μπορεί να γραφτεί με δύο ακόμα διαφορετικές μορφές :

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d} \right)^2 \quad (3.3)$$

και

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{c}{4\pi \cdot f \cdot d} \right)^2 \quad (3.4)$$

Η σχέση (3.3) είναι η γνωστή εξίσωση ελεύθερου χώρου ή εξίσωση Friis. Για την εξαγωγή της έχει χρησιμοποιηθεί η υπόθεση ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται μέσα από σφαιρική επιφάνεια εμβαδού $4\pi d^2$ χωρίς εμπόδια στον περιβάλλοντα χώρο. Στη σχέση (3.4) προφανώς έχει γίνει χρήση της $c = \lambda f$.

Είναι φανερό ότι στην περίπτωση του μοντέλου διάδοσης ελεύθερου χώρου έχουμε ότι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος P_R είναι ανάλογη του παράγοντα $1/d^2$.

Αυτή είναι η πρώτη, αρκετά απλοποιημένη όπως θα εξηγήσουμε, περιγραφή της διάδοσης του κύματος. Πρόκειται για μια ντετερμινιστική περιγραφή, δηλαδή αρκεί η γνώση των δύο παραμέτρων, του μήκους κύματος και της απόστασης και έχουμε τον ακριβή λόγο της ισχύος λήψης προς την ισχύ εκπομπής. Βλέπουμε ότι για τη διάδοση στον ελεύθερο χώρο ισχύει ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου, για την απόσταση, αλλά και για τη συχνότητα. Οπότε η λαμβανόμενη ισχύς μειώνεται κατά 6dB όταν διπλασιάζεται η απόσταση. Επίσης βλέπουμε ότι για μεγάλες συχνότητες έχουμε μεγαλύτερη εξασθένηση, οπότε απαιτείται η χρήση κεραιών μεγάλου κέρδους ή μεγαλύτερης ευαισθησίας για αντιμετώπιση αυτής της εξασθένησης.

3.3 Απώλειες ελεύθερου χώρου Free Space Loss (FSL)

Η εξασθένηση που προκαλείται στο σήμα μετάδοσης από το ασύρματο κανάλι, είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων με κυριότερο την απόσταση. Συνήθως στην περίπτωση που τα στοιχεία του καναλιού μετάδοσης δεν είναι πλήρως καθορισμένα, αυτό που αναφέρεται είναι η εξασθένηση του σήματος συναρτήσει της απόστασης κατά τη διάδοση στον ελεύθερο χώρο. Το μοντέλο του ελεύθερου χώρου όπως αποκαλείται προϋποθέτει ότι η περιοχή μεταξύ πομπού και δέκτη είναι απαλλαγμένη από αντικείμενα τα οποία ίσως απορροφούν ή αντανακλούν τη διαδιδόμενη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση για το απευθείας (LOS) σήμα έχουμε εξασθένηση που σχετίζεται μόνο από τις απώλειες ελεύθερου χώρου που εξαρτώνται δηλαδή από τη συχνότητα λειτουργίας και την απόσταση που διανύει το σήμα. Οι απώλειες διαδρομής, (path loss) δίνονται σε dB :

$$PL(db) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_T}{P_R} \right) \quad (3.5)$$

Όπου:

PL = απώλειες διαδρομής σε dB

PT,PR : η ισχύς εκπομπής και λήψης αντίστοιχα.

Η απώλεια διάδρομής σε dB όπως προκύπτει με χρήση του μοντέλου διάδοσης ελεύθερου χώρου Free Space Loss είναι ίση με :

$$L_F = -10 \cdot \log_{10} \frac{P_R}{P_T} = -10 \cdot \log_{10} G_T - 10 \cdot \log_{10} G_R + 20 \cdot \log_{10} f + 20 \cdot \log_{10} d - k$$

(3.6) όπου το f σε Hz και το d σε m και το $k = 20 \cdot \log_{10} \frac{3 \cdot 10^8}{4\pi} = 147.6$

Σε αυτό το μοντέλο έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:

Ο χώρος μεταξύ των δύο κεραιών εκπομπής και λήψης θεωρείται κενός. Δηλαδή θεωρούμε απουσία αντικειμένων που απορροφούν ή ανακλούν το σήμα. Ακόμα παραλείπουμε την επίδραση της ατμόσφαιρας. Επίσης η γη θεωρείται απείρως μακριά από το σήμα, ή αντίστοιχα θεωρούμε απουσία ανακλάσεων. Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές το μοντέλο του Friis είναι ανεπαρκές για την περιγραφή του καναλιού, και λαμβάνεται μόνο προσεγγιστικά ή για πρώτη εκτίμηση κάποιου προβλήματος. Το μοντέλο χρειάζεται διορθώσεις ώστε να προσεγγίζει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες. Τα επίγεια συστήματα λειτουργούν κατά κύριο λόγο σε περιβάλλον μη οπτικής επαφής (non-line-of-sight, NLOS). Εμπειρικά βλέπουμε ότι μόνο σε διάδοση χωρίς εμπόδια η ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη του d^2 (ο εκθέτης $n=2$). Γενικά, η μέση τιμή των απωλειών διαδρομής αυξάνει εκθετικά με την απόσταση, και ο εκθέτης n δείχνει το ρυθμό αύξησης των απωλειών διαδρομής. Το n κυμαίνεται από 3.5 ως 5.

3.4 Εξαγωγή ενός εμπειρικού μοντέλου

Η μοντελοποίηση του ασύρματου καναλιού διάδοσης είναι πολύ σημαντική για το σχεδιασμό των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Το μοντέλο του ελεύθερου χώρου (free space loss) είναι και το απλούστερο προϋποθέτει ότι μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης δεν υπάρχουν εμπόδια ενώ γίνεται επίσης η υπόθεση ότι η ατμόσφαιρα είναι ένα ομοιόμορφο και μη απορροφητικό μέσο.

Όμως στην πραγματικότητα η διάδοση του κύματος γίνεται στην ατμόσφαιρα και κοντά στο έδαφος άρα το παραπάνω μοντέλο είναι ακατάλληλο για την περιγραφή

του καναλιού. Τα περισσότερα γνωστά εμπειρικά μοντέλα που σχετίζονται με την ασύρματη διάδοση έχουν προκύψει σαν συνδυασμός είτε αναλυτικών υπολογιστικών μεθόδων, είτε εμπειρικών μετρήσεων και προσεγγίσεων. Ο πυρήνας για την εξαγωγή ενός εμπειρικού μοντέλου είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαραγωγή μιας ευθείας που έχει προκύψει κατόπιν μετρήσεων του λαμβανόμενου σήματος με τη βοήθεια ενός μαθηματικού τύπου. Γίνεται δηλαδή προσπάθεια μαθηματικής αναπαραγωγής των μετρήσεων. Με αυτό τον τρόπο ο κύριος άξονας ενός εμπειρικού μοντέλου έχει να κάνει με την ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων οι οποίες πραγματοποιούνται στο περιβάλλον που μελετάται. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι οι περισσότεροι πολύπλοκοι παράγοντες που υπεισέρχονται κατά την ασύρματη διάδοση γίνονται αντικείμενο της μέτρησης που λαμβάνει χώρα και όχι αντικείμενο πρόβλεψης από αυτόν που εκπονεί την μελέτη. Συγχρόνως όμως αποτελεί και μειονέκτημα, γιατί εσφαλμένες μετρήσεις από κάποιον παράγοντα που δεν λήφθηκε υπ' όψιν μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Για αυτό το λόγο όταν πραγματοποιούνται μετρήσεις για την εξαγωγή ενός εμπειρικού μοντέλου γίνεται προσπάθεια να εξασφαλίζεται όσο αυτό είναι δυνατό η αξιοπιστία των μετρούμενων μεγεθών. Ένας ενδεικτικός τρόπος είναι η μακρόχρονη μέτρηση του χώρου που πρόκειται να μελετηθεί εις βάρος της άμεσης εξαγωγής του εμπειρικού μοντέλου. Επιπλέον όταν πραγματοποιούνται μετρήσεις πρέπει να γίνονται σε πολλές και διαφορετικές συχνότητες, αφού τυχόν αλλαγή σε μια διαφορετική συχνότητα από τη συχνότητα στην οποία εκτελείται η μέτρηση επηρεάζει κατά πολύ τα συμπεράσματα. Αυτή είναι μια ακόμα αδυναμία των εμπειρικών μοντέλων. Δηλαδή το γεγονός ότι έχουν προέλθει από σειρά μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε συγκεκριμένη συχνότητα και σε συγκεκριμένο περιβάλλον κάνει δύσκολη και επικίνδυνη την χρήση τους σε άλλες συχνότητες ή σε διαφορετικό περιβάλλον. Πολλά μοντέλα που ισχύουν σε ένα περιβάλλον ενδέχεται να είναι τελείως εσφαλμένα και να οδηγούν σε λάθος συμπεράσματα όταν εφαρμοστούν σε ένα άλλο περιβάλλον, μολονότι τα δύο περιβάλλοντα μπορεί παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες ως προς τα γεωμετρικά ή άλλα χαρακτηριστικά. Σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως μερικά κλασικά μοντέλα διάδοσης όπως το μοντέλο ελευθέρου χώρου, ή το μοντέλο επίπεδης επιφανείας τα οποία είναι αρκετά στην περίπτωση που μελετάται μια μεγάλου μεγέθους περιοχή κάλυψης.

3.5 Εμπειρικό μοντέλο λογαριθμικής κατανομής

Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει εύκολα, είτε κοιτάζουμε τις θεωρητικές προσεγγίσεις είτε τις πειραματικές διαδικασίες για τον καθορισμό ενός εμπειρικού μοντέλου, είναι ότι σε όλες τις περιπτώσεις η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος στον δέκτη μειώνεται λογαριθμικά με την απόσταση υψωμένη σε έναν εκθέτη n . Το συμπέρασμα αυτό είναι γενικό και ισχύει τόσο σε περιπτώσεις που έχουμε να κάνουμε με διάδοση σε εξωτερικούς χώρους, όσο και σε περιπτώσεις που η διάδοση γίνεται σε εσωτερικούς χώρους. Η σχέση που ερμηνεύει μαθηματικά αυτό το συμπέρασμα είναι η παρακάτω :

$$PL(d) \propto \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3.7)$$

ή πιο συγκεκριμένα
$$\overline{PL}(d)(dB) = \overline{PL}(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3.8)$$

Στη σχέση (3.7) πρέπει να τονίσουμε ότι το d_0 είναι η πλησιέστερη απόσταση αναφοράς από τον πομπό (T), και πρέπει υποχρεωτικά να βρίσκεται στο μακρινό πεδίο.

Ο όρος n ονομάζεται εκθέτης απωλειών διαδρομής και εξαρτάται από το περιβάλλον στο οποίο μελετάται η διάδοση. Για παράδειγμα αν η διάδοση γίνεται σε περιβάλλον ελεύθερου χώρου $n = 2$. Ο όρος $PL(d_0)$ δίνει την τιμή των απωλειών λόγω διαδρομής από τον πομπό μέχρι την απόσταση αναφοράς d_0 , και προκύπτει είτε χρησιμοποιώντας το μοντέλο ελεύθερου χώρου (free space loss), είτε πειραματικές μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην απόσταση αναφοράς d_0 . Η γραφική παράσταση της (3.8) σε λογαριθμική κλίμακα δίνει μια ευθεία κλίσης $10 \cdot n$ dB ανά δεκάδα. Τέλος πρέπει να πούμε ότι η (3.8) αναφέρεται σε μεγέθη τα οποία είναι μέσες τιμές. Δεν λαμβάνει όμως υπόψη το γεγονός ότι η αταξία σε ένα περιβάλλον μπορεί να είναι διαφορετική σε δύο θέσεις όπου η απόσταση πομπού και

δέκτη είναι η ίδια και αυτό οδηγεί σε σήματα των οποίων η μέση ισχύς είναι διαφορετική σε σχέση με εκείνη που υπολογίζεται από την (3.8).

Από πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει έχει προκύψει ότι για οποιαδήποτε τιμή του d οι απώλειες διαδρομής $PL(d)$ σε συγκεκριμένη θέση ακολουθούν λογαριθμική κανονική κατανομή γύρω από τη μέση τιμή των απωλειών που υπολογίζεται βάσει της απόστασης. Δηλαδή :

$$PL(d)(dB) = \overline{PL}(d) + X_{\sigma} \quad (3.9)$$

και από την (3.8):
$$PL(d)(dB) = \overline{PL}(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma} \quad (3.10)$$

Επίσης είναι :
$$P_r(d) = P_t(d) - PL(d) \quad (3.11)$$

Η X_{σ} είναι μια τυχαία μεταβλητή Gauss σε dB, με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ (σε dB επίσης). Η λογαριθμική κανονική κατανομή περιγράφει τις τυχαίες επιδράσεις σκίασης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μεγάλου αριθμού μετρήσεων σε θέσεις που έχουν μεν την ίδια απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, άλλα έχουν διαφορετικούς βαθμούς αταξίας στη διαδρομή διάδοσης. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται και ως *λογαριθμική κανονική σκίαση*. Η λογαριθμική κανονική σκίαση συνεπάγεται ότι οι μετρούμενες στάθμες σήματος, για συγκεκριμένη απόσταση πομπού δέκτη, έχουν κατανομή Gauss γύρω από τη μέση τιμή στάθμης που υπολογίζεται συναρτήσει της απόστασης από τη σχέση (3.8).

3.6 Το φαινόμενο των διαλείψεων

Το περιβάλλον του ασύρματου καναλιού παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Η παρουσία και κίνηση αυτοκινήτων και ανθρώπων, η κίνηση των δέντρων εξαιτίας του ανέμου, ακόμα και το άνοιγμα μιας πόρτας είναι λίγα από τα πολλά παραδείγματα όπου εξωγενείς αιτίες μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στο μεταδιδόμενο σήμα στο κανάλι και να προκαλέσουν γρήγορες μεταβολές του σήματος. Αυτά τα φαινόμενα δημιουργούν μία χωροχρονική μεταβλητότητα στο κανάλι διάδοσης του κύματος.

Ακόμα στις επίγειες επικοινωνίες έχουμε την παρουσία πολλών αντικειμένων τα οποία επηρεάζουν τη διάδοση του σήματος καθώς το σήμα υφίσταται ανακλάσεις, περιθλάσεις, σκέδαση από κτίρια, δένδρα και απορρόφηση από την ίδια την ατμόσφαιρα. Επίσης σε μικρές αποστάσεις έχουμε διακυμάνσεις εξαιτίας της πολυόδευσης και του φαινομένου Doppler.

Με τον όρο διαλείψεις (fading) σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα εννοούμε τις διακυμάνσεις του σήματος στο δέκτη όσον αφορά το πλάτος ή τη φάση ή τη γωνία αφίξεώς του. Η αιτία αυτών των διακυμάνσεων είναι η πρόσθεση των συνιστωσών πολλαπλών διαδρομών του σήματος, εφόσον το κύμα κατά τη διάδοσή του στο ασύρματο κανάλι δύναται να ακολουθήσει πολλές και διαφορετικές διαδρομές στη μετάδοση από το πομπό στον δέκτη, υπόκειται δηλαδή στο φαινόμενο των πολλαπλών διαδράσεων (multipath). Ειδικότερα με το όρο διαλείψεις εννοούμε τις μεταβολές του πλάτους και εκφράζονται σε ντεσιμπέλ (dB) ως προς τη θεωρητική στάθμη του σήματος στον ελεύθερο χώρο. Οι διαλείψεις αποτελούν στιγμιαία εκτροπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας προς άλλες κατευθύνσεις ή οφείλονται στη συμβολή κυμάτων που φθάνουν στο δέκτη μέσω διαφορετικών δρόμων (πολλαπλές οδεύσεις) ή στη συμβολή μεταξύ του κατευθείαν και του ανακλώμενου κύματος. Οφείλονται δε σε μεταβολές των ατμοσφαιρικών συνθηκών κατά μήκος της ζεύξης. Οι διαλείψεις αυξάνουν συνήθως αυξανόμενης της συχνότητας ή αυξανόμενης της απόστασεως της ζεύξεως. Μόνο στην ιδεατή περίπτωση ομοιόμορφης ατμόσφαιρας η μετάδοση γίνεται με το κατευθείαν κύμα, αλλιώς το κύμα υφίσταται καμπύλωση προς τα άνω ή προς τα κάτω ανάλογα με τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η καμπύλωση αυτή μπορεί μερικές φορές να οδηγήσει στον μετασχηματισμό μιας ζεύξεως οπτικής επαφής σε μια ζεύξη άνευ ορατότητας. Ο τύπος αυτός των διαλείψεων δύναται να διαρκέσει επί αρκετές ώρες. Το σήμα που φθάνει στην είσοδο του δέκτη υφίσταται κατά τη διαδρομή του στο μέσο, μεταβολές εύρους και φάσης συναρτήσκει του χρόνου κατά τυχαίο τρόπο. Οι μεταβολές αυτές και ειδικότερα εκείνες του πλάτους, αποτελούν τις λεγόμενες διαλείψεις (fading) και εκφράζονται σε dB ως προς τη θεωρητική στάθμη του σήματος στον ελεύθερο χώρο ή ως προς την πραγματική μεσαία στάθμη του σήματος, που διαφέρει από την προηγούμενη κατά μερικά dB.

Ας δούμε τις επιδράσεις του καναλιού σε ένα σήμα της παρακάτω μορφής

$$s(t) = \text{Re} \left[u(t) e^{j2\pi f_c t} \right] = u(t) \cos(\omega_c t)$$

Όπου: $s(t)$ το σήμα προς αποστολή

ω : η γωνιακή ταχύτητα

Υποθέτουμε ότι υπάρχουν διάφορες διαδρομές διάδοσης. Για κάθε κανάλι υπάρχει μία και ένας συντελεστής εξασθένησης. Και οι καθυστερήσεις διάδοσης και οι συντελεστές εξασθένησης είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι ως αποτέλεσμα των αλλαγών στη δομή του μέσου. Το κανάλι περιγράφεται με τη χρονικά μεταβαλλόμενη απόκριση

$$c(\tau - t) = \sum a_n(t) e^{-j2\pi f_c r_n(t)} \delta[\tau - \tau_n(t)]$$

όπου

a_n = οι συντελεστές εξασθένησης

τ_n = η καθυστέρηση διάδοσης

Αν θεωρήσουμε ότι το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από μια σειρά multipath συνιστώσες τότε η απόκριση παλμού γίνεται :

$$c(\tau - t) = a(\tau - t) e^{-j2\pi f_c T}$$

όπου

$c(\tau - t)$ = η απόκριση του καναλιού τη χρονική στιγμή t , αν εκπέμψουμε ένα παλμό τη χρονική στιγμή $t - \tau$.

Έτσι η παραπάνω σχέση αποτελεί τον κατάλληλο προσδιορισμό της ισοδύναμης low pass απόκρισης του παλμού όταν το κανάλι χαρακτηρίζεται από συνεχές multipath ενώ η προηγούμενη περιγράφει ένα κανάλι με συνιστώσες διακριτού multipath.

Κατηγοριοποίηση διαλείψεων

Οι τύποι που μπορούν να διαχωριστούν μεταξύ τους οι εμφανιζόμενες διαλείψεις ως προς την αιτία εμφάνισής τους αλλά και της κατανομής που ακολουθούν είναι δύο. Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large scale fading) και οι **διαλείψεις μικρής κλίμακας** (small-scale fading).

3.6.1 Διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale-fading)

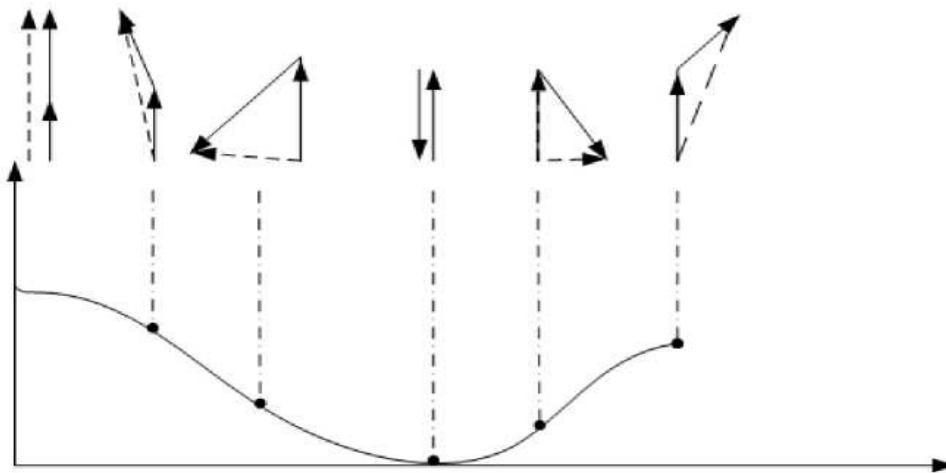
Στις διαλείψεις μικρής κλίμακας έχουμε απότομες μεταβολές του πλάτους και της φάσης του λαμβανόμενου σήματος που μπορούν να θεωρηθούν ως αποτέλεσμα μικρών αλλαγών (της τάξης του μισού μήκους κύματος) της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη λόγω μετακινήσεων και άρα λόγω αλλαγών των μονοπατιών πολυόδευσης, ή ως αποτέλεσμα της αλλαγής θέσης, ταχύτητας ή πυκνότητας των σωμάτων που επηρεάζουν έμμεσα τις επικοινωνίες. Αναφορικά μπορεί να λεχθεί πως τέτοια σώματα είναι τα διάφορα ειδών κτίρια, οχήματα και ζωντανοί οργανισμοί που συναντιούνται στις πόλεις, καθώς επίσης και τα διάφορα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Σε αυτού του είδους διαλείψεων είναι δυνατόν τα φαινόμενα διαλείψεων μεγάλης κλίμακας να μπορούν να αγνοηθούν. Μπορεί να έχουμε απώλειες της τάξης των 20-30 dB σε αποστάσεις μικρότερες του μήκους κύματος στις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Αναφορικά το κανάλι θεωρείται σταθερό για μία περίοδο (coherence time) που είναι της τάξης των msec. Οι κύριοι μηχανισμοί εξαιτίας των οποίων το σήμα φτάνει τελικά στο δέκτη είναι η ανάκλαση, η διάθλαση και η σκέδαση τους οποίους έχουμε προαναφέρει. Το τελικό αποτέλεσμα προκύπτει από την υπέρθεση ή την αλληλοακύρωση σημάτων από πολλαπλές διόδευσεις, από τις ταχύτητες του πομπού και του δέκτη και από το εύρος φάσματος του εκπεμπόμενου σήματος. Είναι γνωστές και σαν διαλείψεις πολλαπλής διόδευσης (**multipath fading**), ‘Διαλείψεις Rayleigh’ ή απλά ‘διαλείψεις’ (fading).

Multipath fading

Καθώς ο δέκτης κινείται σε μια περιοχή μη ιδανική οι ανακλάσεις (reflections) οι περιθλάσεις (diffractions) και οι σκεδάσεις (scatterings) που λαμβάνουν χώρα έχουν ως αποτέλεσμα την άφιξη πολλών επίπεδων κυμάτων στο κινητό τερματικό από πολλές κατευθύνσεις και με διαφορετικές καθυστερήσεις. Έτσι τελικά ο δέκτης θα λάβει πολλά αντίγραφα του σήματος. Θεωρούμε ως κυρίαρχη συνιστώσα αυτήν του απευθείας σήματος.

Τελικά το λαμβανόμενο σήμα στο δέκτη είναι το άθροισμα των αφιχθέντων σημάτων, τα οποία έχουν διαφορετικό χρόνο άφιξης αλλά και διαφορετική ισχύ και μετατόπιση φάσης. Ανάλογα δε με τη σχετική φάση μεταξύ τους δρούν είτε εποικοδομητικά είτε

καταστρεπτικά στο δέκτη. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συνεισφορά δύο αφιχθέντων σημάτων ίδιας έντασης αλλά με διαφορετική φάση στο τελικό σήμα του δέκτη, που φαίνεται στον κατακόρυφο άξονα.

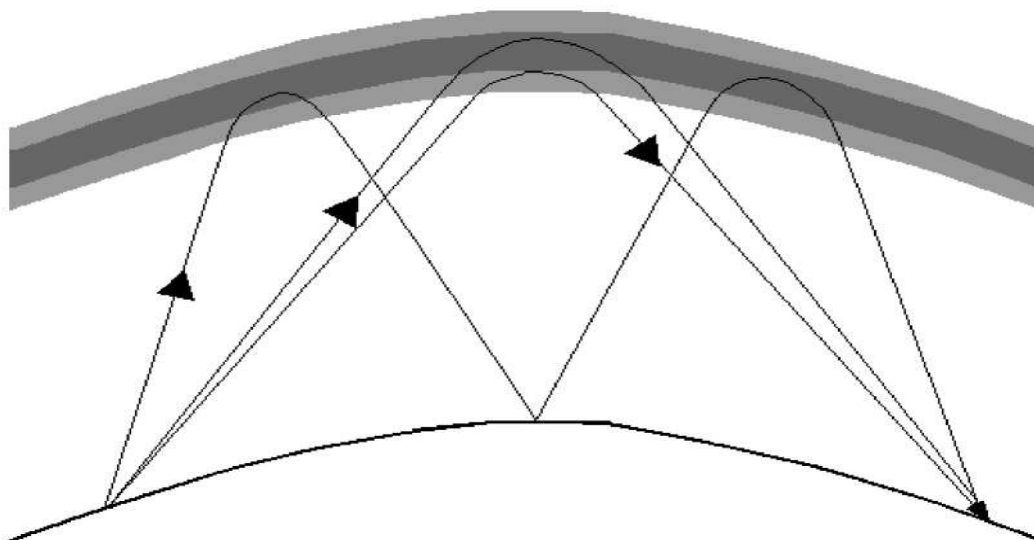


Σχήμα 3.1 Συνισταμένη δύο αντιγράφων του σήματος για διαφορετική διαφορά φάσης.

Αν οι δύο ημιτονοειδείς συνιστώσες ίδιας ισχύος είναι συμφασικές θα υπάρξει μεγιστοποίηση της κοινής τους συνεισφοράς αν φτάσουν συμφασικά, όπως φαίνεται στην πρώτη περίπτωση, ενώ αν φτάσουν στο δέκτη με διαφορά φάσης 180° , όπως φαίνεται στην τέταρτη περίπτωση του σχήματος (3.1), θα δράσουν καταστρεπτικά, μηδενίζοντας το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης.

Το άλλο πρόβλημα είναι ότι το κανάλι δεν παραμένει σταθερό. Αν ο πομπός της προηγούμενης εικόνας στείλει πάλι το ίδιο σήμα, ο δέκτης με εξαίρεση το απευθείας σήμα, θα δεχτεί έναν αριθμό σημάτων διαφορετικό από αυτόν της προηγούμενης φοράς σε αριθμό, σε χρόνο άφιξης, σε ισχύ και σε μετατόπιση φάσης. Το συμπέρασμα είναι ότι το κανάλι μεταβάλλεται χρονικά.

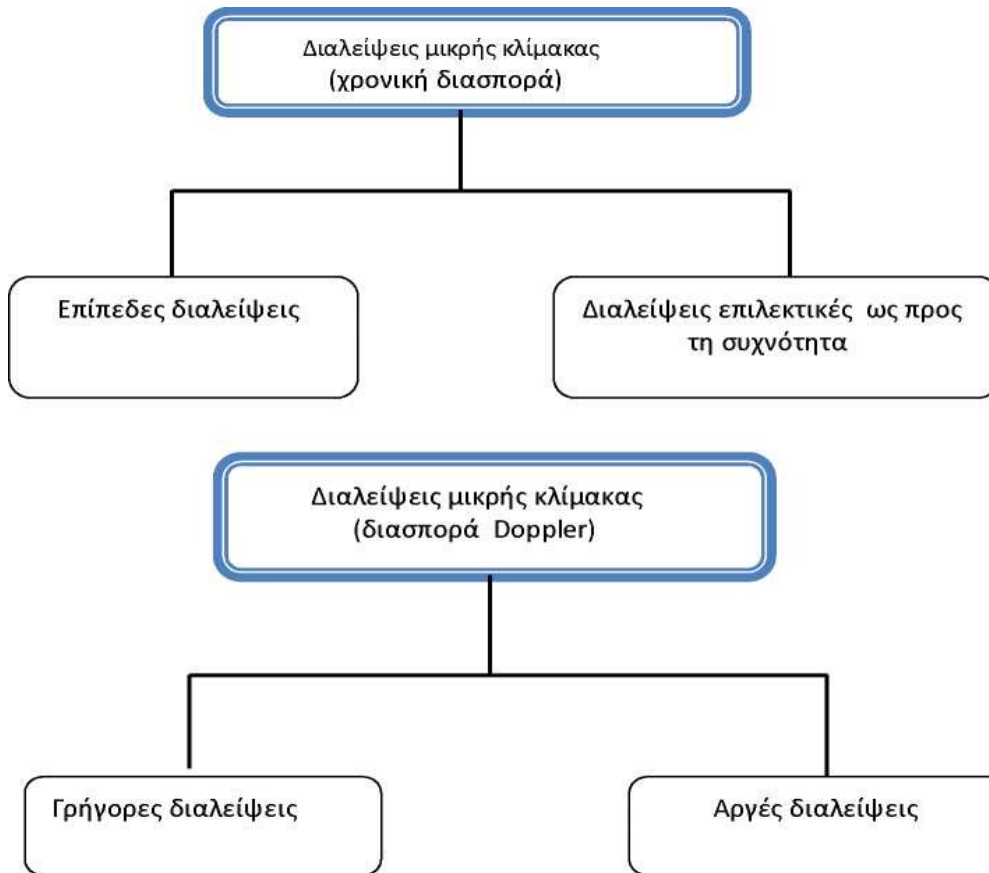
Στο σχήμα 3.2 φαίνεται ότι το εκπεμπόμενο σήμα φθάνει στον δέκτη μέσω πολλαπλών οδεύσεων προσκρούοντας διαδοχικά σε στρώματα της ιονόσφαιρας. Έτσι δύο ή και περισσότερα σήματα έχοντας διατρέξει διαφορετικά μονοπάτια φθάνουν τελικά στον προορισμό τους (δέκτη) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και επομένως δε θα είναι σε φάση το ένα με το άλλο.



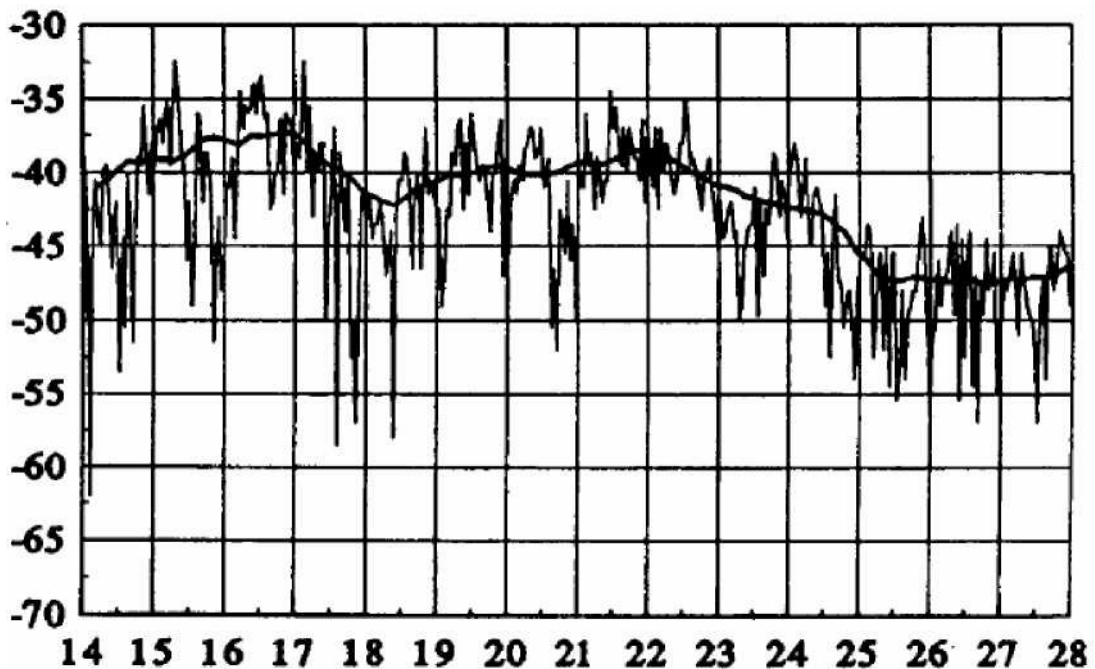
Σχήμα 3.2 Multipath Fading

Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 4 διαφορετικούς τύπους διαλείψεων ανάλογα με τα φαινόμενα διαλείψεων που οφείλονται πρώτον, στη διασπορά Doppler η οποία είναι η μέγιστη μετατόπιση Doppler, δηλαδή η μέγιστη μετατόπιση της συχνότητας που παρατηρείται στο λαμβανόμενο σήμα, όταν υπάρχει σχετική κίνηση του δέκτη ως προς τον πομπό και δεύτερο, στη διασπορά καθυστέρησης που είναι η τυπική απόκλιση της κατανομής των χρόνων καθυστέρησης των σημάτων πολλαπλής διάδοσης.

Οι 4 αυτοί τύποι διαλείψεων μικρής κλίμακας είναι οι εξής: α) Επίπεδες διαλείψεις β) Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (Frequency-Selective Fading) γ) Γρήγορες διαλείψεις (Fast Fading) δ) Αργές Διαλείψεις (Slow Fading)



Σχήμα 3.3 Οι 4 τύποι διαλείψεων μικρής κλίμακας



Σχ. 3.4 Παράδειγμα Μεγάλης Κλίμακας Διαλείψεων (Large-Scale Fading) και Μικρής Κλίμακας Διαλείψεων (Small-Scale Fading) - Ο κάθετος άξονας δείχνει την ισχύ του

λαμβανόμενου σήματος (Rx) ενώ ο οριζόντιος άξονας παρουσιάζει την απόσταση σε μέτρα κατά την οποία έχουμε τις ανάλογες διακυμάνσεις

Επίπεδες Διαλείψεις (Frequency-Flat Fading)

Οι επίπεδες διαλείψεις οφείλονται στη διασπορά της καθυστέρησης των πολλαπλών διαδεύσεων δηλαδή στη χρονική διασπορά λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης. Αν όλα τα φασματικά χαρακτηριστικά ενός εκπεμπόμενου σήματος επηρεάζονται και παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά τότε λέμε ότι οι διαλείψεις μας είναι μη επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (Frequency-Nonselective) ή ισοδύναμα επίπεδης ζώνης (Narrowband Systems), στα οποία το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος είναι αρκετά μικρότερο από το σύμφωνο εύρος ζώνης του καναλιού (Channel coherence bandwidth)

Τα τυπικά κανάλια επίπεδων διαλείψεων προκαλούν βαθιές διαλείψεις και συνεπώς μπορεί να απαιτείται 20 ή 30 dB περισσότερη μεταδιδόμενη ισχύ για να διατηρηθεί η αξιόπιστη μετάδοση κατά τη διάρκεια των διαλείψεων. Η μεταβολή των σημάτων γίνεται αρκετά αργά ώστε να μην εισάγονται αλλοιώσεις στο κανάλι.

Διαλείψεις Επιλεκτικές ως προς τη Συχνότητα

Οι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις ή διαφορετικά συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις οφείλονται κι αυτές όπως οι επίπεδες διαλείψεις στη διασπορά της καθυστέρησης των πολλαπλών διαδεύσεων δηλαδή στη χρονική διασπορά λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης. Δημιουργούνται όταν τα φασματικά χαρακτηριστικά ενός εκπεμπόμενου σήματος επηρεάζονται από διαφορετικού πλάτους κέρδη (Amplitude Gains) και μετατόπιση φάσης (Phase Shift). Αυτό το είδος διαλείψεων συναντάται σε συστήματα ευρείας ζώνης (Wideband Systems), στα οποία το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος είναι μεγαλύτερο από το σύμφωνο εύρος ζώνης του καναλιού.

Γρήγορες Διαλείψεις (Fast Fading)

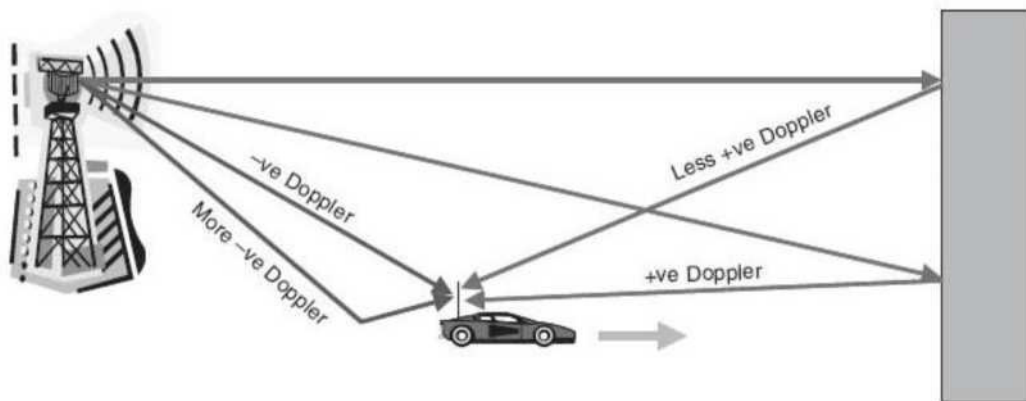
Οι γρήγορες διαλείψεις οφείλονται στη διασπορά Doppler η οποία είναι η μέγιστη μετατόπιση Doppler, δηλαδή η μέγιστη μετατόπιση της συχνότητας που παρατηρείται στο λαμβανόμενο σήμα όταν υπάρχει σχετική κίνηση του δέκτη ως προς τον πομπό. Οι γρήγορες διαλείψεις δημιουργούνται όταν ο χρόνος συμφωνίας του καναλιού (Channel's coherence time T_c) είναι μικρότερος του χρόνου συμβόλου του σήματος (Symbol time duration T_s). Η φασματική διασπορά που παρατηρείται λόγω διασποράς Doppler έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση του σήματος δηλ. την αλλοίωση των συμβόλων. Η παραμόρφωση αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται το φάσμα Doppler σε σχέση με το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος. Η μετατόπιση Doppler αυξάνει το εύρος φάσματος του σήματος κατά

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos \theta$$

Όπου: v : η ταχύτητα του κινούμενου δέκτη

λ : το μήκος κύματος

θ : η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση που κινείται ο δέκτης και την κατεύθυνση άφιξης του κύματος.



Σχήμα 3.5 Η εμφάνιση της διασποράς Doppler

3.6.2 Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας. (large-scale fading)

Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας αποκαλούνται αλλιώς αργές διαλείψεις ή σκίαση παρόλο που ο όρος 'αργές διαλείψεις' προσδιορίζει καλύτερα το περιεχόμενο των διαλείψεων μικρής κλίμακας. Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας χαρακτηρίζονται από μία lognormal συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και οφείλεται στο φαινόμενο της σκίασης και στην επακόλουθη διάθλαση και/ή πολυδιάσχυση. Οι αλλαγές εδώ οφείλονται σε σημαντικές αλλαγές στη γεωμετρία της απόστασης πομπού/δέκτη όπως για παράδειγμα η αλλαγή θέσης του δέκτη κατά τη διάρκεια της οδήγησης.

3.7 Στατιστική αναπαράσταση των καναλιών με διαλείψεις

Η συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (PDF), η Αθροιστική Συνάρτηση Πυκνότητας (CDF) και η Ροπογεννήτρια - Συνάρτηση (MGF) είναι οι σημαντικότερες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν ένα κανάλι επικοινωνίας. Στη συνέχεια ορίζονται οι συναρτήσεις αυτές καθώς και οι σχέσεις που τις συνδέουν.

Η αθροιστική συνάρτηση Πυκνότητας (CDF) μιας τυχαίας μεταβλητής X δίνεται από τον τύπο:

$$F_X(X) = \text{Pr ob}(X < x)$$

Η συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (PDF) μιας τυχαίας μεταβλητής X , δίνεται από τον τύπο:

$$P_X(X) = \frac{d}{d_x} F_X(X) \quad (3.12)$$

Η Ροπογεννήτρια - Συνάρτηση (MGF) μιας τυχαίας μεταβλητής X , δίνεται από τον τύπο:

$$\Phi_X(x) = \int_0^x e^{-sx} p_x(x) dx \quad (3.13)$$

Η περιβάλλουσα του σήματος μπορεί να περιγραφεί με διάφορες κατανομές όπως για παράδειγμα την Weibull ή την Nakagami. Αυτές οι κατανομές χρησιμοποιούνται σπανιότερα από τις Rayleigh και Rice που θα μελετήσουμε παρακάτω, καθώς οι τελευταίες προκύπτουν από γκαουσιανές μεταβλητές και επομένως χρησιμοποιούνται ευκολότερα σε υπολογιστικές μεθόδους.

Γνωρίζοντας τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σήματος, δηλαδή την PDF και την CDF (cumulative distribution function) μπορούμε να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους τις σχετικές με τη λειτουργία του ραδιοδιαύλου.

Μεταξύ αυτών των παραμέτρων θα αναφερθούμε συγκεκριμένα σε δύο :

- την πιθανότητα το σήμα να πέσει κάτω από μία συγκεκριμένη τιμή (threshold). Όταν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι κάτω από το κατώφλι θορύβου (noise threshold) τότε το σήμα επικαλύπτεται από το θόρυβο. Σε αυτήν την περίπτωση ο δέκτης δεν είναι σε θέση να αναπαραγάγει τα μεταδιδόμενα data.
- Τη στατιστική διάρκεια διαλείψεων. Κατά τη διάρκεια μιας διάλειψης η μετάδοση των δεδομένων διακόπτεται ανάλογα με την ταχύτητα του κινούμενου δέκτη. Όσο πιο αργά κινείται ο δέκτης τόσο μεγαλύτερες είναι οι περίοδοι διακοπής.

3.7.1 Κατανομή Gauss

Η κατανομή Gauss είναι η σημαντικότερη κατανομή που συναντάται στις επικοινωνίες. Η αιτία είναι ότι ο θερμικός θόρυβος που αποτελεί την κυριότερη πηγή θορύβου στα συστήματα επικοινωνίας ακολουθεί Gaussian κατανομή. Η CDF για Gaussian τυχαία μεταβλητή με $m=0$ (μέση τιμή) και $\sigma=1$ (τυπική απόκλιση) δηλώνεται με $\Phi(X)$ και δίνεται από την:

$$\Phi(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{r^2}{2}} dt \quad (3.14)$$

3.7.2 Κατανομή Rayleigh

Το μοντέλο περιγραφής ασύρματου καναλιού που συναντάται κυρίως στις σύγχρονες κινητές επικοινωνίες είναι το μοντέλο Rayleigh. Βασική προϋπόθεση για να θεωρήσουμε το ασύρματο κανάλι Rayleigh είναι η πολύοδη διάδοση του εκπεμπόμενου σήματος. Οι τοποθεσίες που εγκαθίστανται σήμερα συστήματα κινητών επικοινωνιών (αστικά ή ημιαστικά κέντρα) αποτελούν ένα πλούσιο περιβάλλον δέχεται μία συνολική παρεμβολή που προέρχεται από την υπέρθεση ενός μεγάλου αριθμού κυμάτων τα οποία έχουν πλάτη, φάση και διεύθυνση τυχαία και ανεξάρτητα μεταξύ τους, τότε αποδεικνύεται εφαρμόζοντας το κεντρικό οριακό θεώρημα ότι η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος εμπίπτει σε μία Gaussian κατανομή. Η περιβάλλουσα του σήματος στενής ζώνης η οποία αντιστοιχεί στην λαμβανόμενη ισχύ ακολουθεί στην περίπτωση αυτή την κατανομή Rayleigh. σκέδασης με έντονο το φαινόμενο της πολύοδης διάδοσης, γεγονός που συνιστά ευρεία χρήση του μοντέλου αυτού. Υποθέτοντας ότι ο κινητός δέκτης δέχεται μία συνολική παρεμβολή που προέρχεται από την υπέρθεση ενός μεγάλου αριθμού κυμάτων τα οποία έχουν πλάτη, φάση και διεύθυνση τυχαία και ανεξάρτητα μεταξύ τους, τότε αποδεικνύεται εφαρμόζοντας το κεντρικό οριακό θεώρημα ότι η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος εμπίπτει σε μία Gaussian κατανομή. Η περιβάλλουσα του σήματος στενής ζώνης η οποία αντιστοιχεί στην λαμβανόμενη ισχύ ακολουθεί στην περίπτωση αυτή την κατανομή Rayleigh. Η εξίσωση (3.15) μας δίνει την πυκνότητα πιθανότητας μιας τυχαίας μεταβλητής η οποία ακολουθεί την κατανομή Rayleigh :

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + a^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{με } r > 0 \quad (3.15)$$

$$P(r) = 0 \quad \text{για } r < 0$$

Οι διαλείψεις Rayleigh χαρακτηρίζονται από την παράμετρο σ , όπου το σ^2 είναι η μέση ισχύς του σήματος. Η περίπτωση του μοντέλου Rayleigh για το fading του σήματος αποτελεί το χειρότερο σενάριο αφού προϋποθέτει ότι το κατευθείαν σήμα είναι εξολοκλήρου μπλοκαρισμένο. Το πλάτος της πυκνότητας πιθανότητας a μπορεί να πάρει τιμές από $a=1$ που αντιστοιχεί στην περίπτωση που έχω LOS (Line Of

Sight) το οποίο σημαίνει ότι η απευθείας συνιστώσα του κύματος είναι ελεύθερη, έως την τιμή $\alpha=0$ το οποίο σημαίνει ότι έχουμε την απευθείας συνιστώσα τελείως μπλοκαρισμένη και το οποίο αντιστοιχεί στην περίπτωση Rayleigh.

3.7.3 Κατανομή Rice

Σε διάφορα (αστικά ή εσωτερικού χώρου) περιβάλλοντα υπάρχει μια κυρίαρχη συνιστώσα του σήματος δηλ, ένας κυρίαρχος δρόμος οπτικής επαφής αλλά και πολλές διαφορετικές οδεύσεις που μπορεί να ακολουθήσει το σήμα (multipath propagation) μέχρι τη λήψη του από τον δέκτη. Σε αυτήν την περίπτωση το πλάτος του τελικού σήματος ακολουθεί κατανομή Rice, και η περιβάλλουσα του σήματος στενής ζώνης το οποίο είναι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος δίνεται από την Rice pdf (συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας -probability density function) η οποία είναι η εξίσωση (3.16) :

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + a^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{ar}{\sigma^2}\right) \quad r > 0 \quad (3.16)$$

όπου

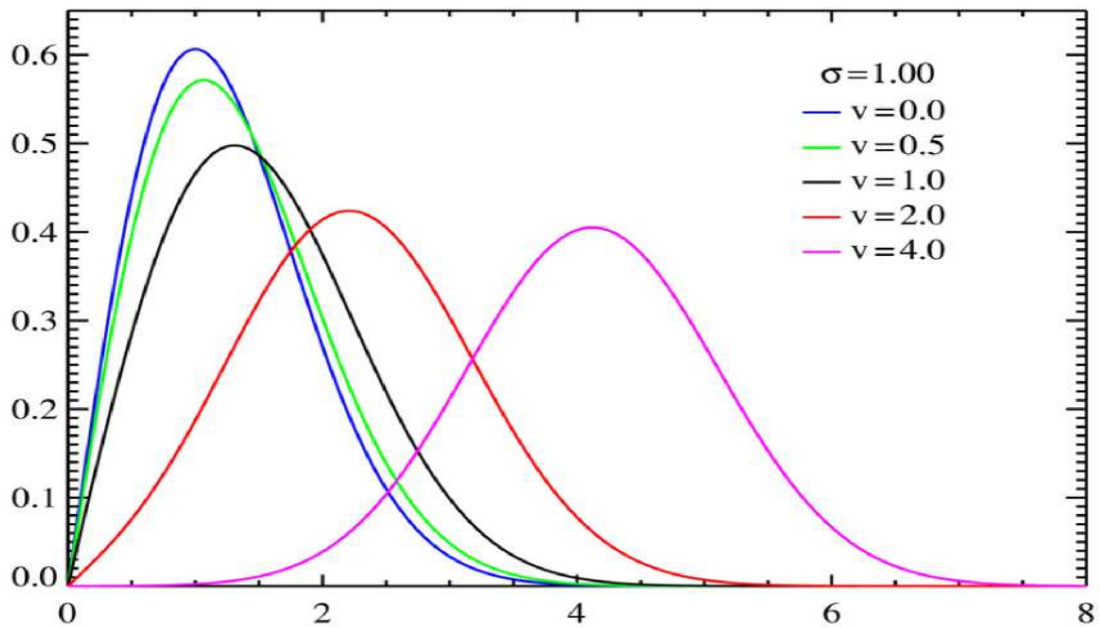
το I_0 είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου τύπου και μηδενικής τάξης,

r : το πλάτος του σύνθετου φακέλου

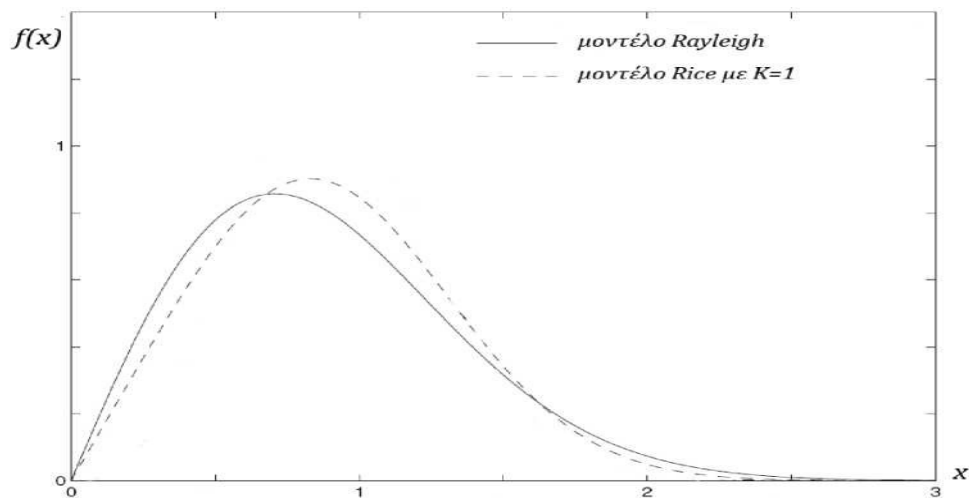
a : το πλάτος του κυρίαρχου σήματος

σ^2 : η μέση ισχύς του λαμβανομένου σήματος 2

Το μοντέλο Rice το οποίο φαίνεται περισσότερο πολύπλοκο στην ανάλυση σε σχέση με το μοντέλο Rayleigh, συνήθως αποτελεί μια πιο ακριβή απεικόνιση των συστημάτων ασύρματης ευρυζωνικότητας. Αυτό συμβαίνει επειδή τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν μια ή περισσότερες επικρατούσες διαδρομές.

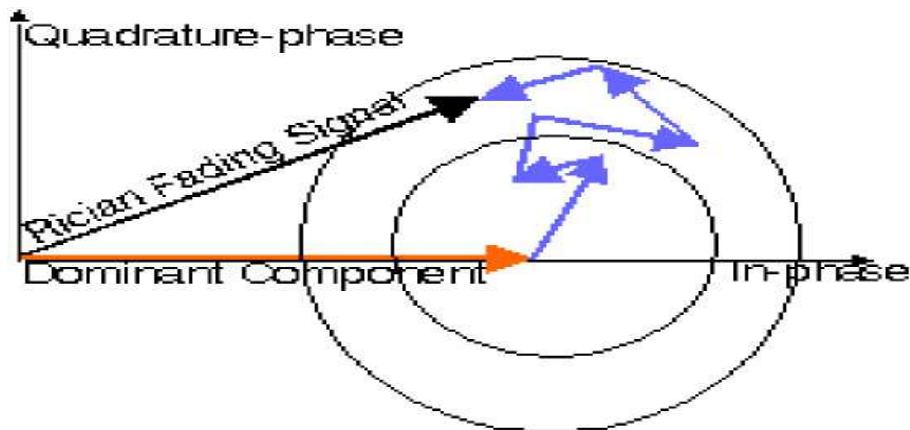


Σχήμα 3.6 Η μεταβολή της καμπύλης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για διαφορετικές τιμές του πλάτους ν της κυρίαρχης συνιστώσας και για σταθερό σ . Παρατηρούμε ότι για $\nu=0$ η κατανομή γίνεται Rayleigh. Για μεγάλο K οδηγούμαστε στην κατανομή Gauss.



Σχήμα 3.7 Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας του μέτρου των λήψεων $|h\ell|$ για κατανομές Rayleigh και Rice ($\mu = 1$) θεωρώντας μέση λαμβανόμενη ισχύ στο δέκτη ίση με

1.



Σχήμα 3.8 Διανυσματική απεικόνιση του Rician σήματος συναρτήσει της κυρίαρχης συνιστώσας και των πολυοδεύσεων

3.8 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ RICE K και η φυσική του σημασία

Ο συντελεστής Rice K δίνεται από την σχέση :

$$K = \frac{\alpha^2}{2\sigma^2} \quad (3.17)$$

και εκφρασμένο σε dB :

$$K(\text{dB}) = 10\log(k) \quad (3.18)$$

Η

$$K(\text{dB}) = 10\log\left(\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{dB} \quad (3.19)$$

το οποίο είναι επίσης γνωστό ως carrier to multipath ratio ή ως λόγος της ισχύος του φέροντος σήματος προς τη συνολική ισχύ του φέροντος μαζί με το σκεδαζόμενο σήμα και δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{P_{LOS}}{P_{LOS} + P_{R+S}} \quad (3.20)$$

όπου

P_{LOS} : τοπική μέση ισχύς της LOS συνιστώσας

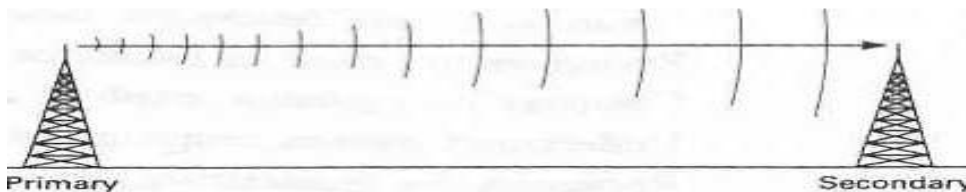
και PR+S : τοπική μέση ισχύς των ανακλώμενων και περιθλώμενων συνιστωσών.

Η παράμετρος K μας δίνει τη σχέση που υπάρχει μεταξύ της ισχύος του απευθείας δρόμου (περίπτωση LOS) και της συνολικής ισχύος των άλλων δρόμων λόγω σκέδασης που ακολουθούν μια κατανομή Rayleigh. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής K τόσο σημαντικότερο φαίνεται από τη σχέση (3.15) ότι είναι το απευθείας κανάλι σε σχέση με τα δευτερεύοντα, και τόσο λιγότερο φορτωμένη είναι η ζεύξη. Όταν τώρα η συνεισφορά του απευθείας σήματος είναι πολύ ασθενής (προσεγγιστικά $K < 5\text{dB}$) τότε η κατανομή Rice εκφυλίζεται σε κατανομή Rayleigh. (CCIR 1990). Ο συντελεστής αυτός μας βοηθά σημαντικά στην καλύτερη κατανόηση ενός ασύρματου καναλιού.

Επιπλέον η γνώση της τιμής του K είναι χρήσιμη στον υπολογισμό του BER (Bit Error Rate) του καναλιού μεταξύ άλλων παραμέτρων. Συμπερασματικά το μέγεθος του K εξαρτάται από το περιβάλλον στο οποίο κινούμαστε και θα πάρουμε μετρήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΚΕΡΑΙΕΣ

Απαραίτητη προϋπόθεση για την αναλυτική μελέτη της θεωρίας των κεραιών αποτελεί η κατανόηση της θεωρίας των συντονισμένων κυκλωμάτων (*resonant circuits*) και επιπρόσθετα των φαινομένων προσαρμογής σύνθετης αντίστασης (*impedance matching*). Αρχικά, η μέγιστη μεταφορά ισχύος κατά τη μετάδοσή της μέσω γραμμής μεταφοράς επιτυγχάνεται στην περίπτωση που η πηγή (*πομπός*) είναι προσαρμοσμένη στο φορτίο (*load*). Ως εκ τούτου η κεραία θα πρέπει να είναι προσαρμοσμένη τόσο στη γραμμή μεταφοράς (στην περίπτωση μας λογίζεται ως η πηγή) όσο και στο φορτίο (ως τέτοιο λογίζεται η ατμόσφαιρα-περιβάλλον χώρος)- στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι στις ραδιοκυματικές συχνότητες ένα απλό καλώδιο, αναλόγως του φυσικού μήκους του, μπορεί να αποτελέσει μία *impedance-matching* διάταξη.



Σχήμα 4.1 : Μετάδοση ενέργειας μεταξύ πομπού και δέκτη

Επιπρόσθετα, η διάταξη της κεραίας θα πρέπει να λειτουργεί κατά τρόπο παρόμοιο του τρόπου λειτουργίας των συντονισμένων κυκλωμάτων. Για παράδειγμα, θα πρέπει να εμφανίζει την ικανότητα μεταφοράς και εναλλαγής της ενέργειας από ηλεκτροστατική σε ηλεκτρομαγνητική και αντιστρόφως. Στην περίπτωση δε που η προσαρμογή της κεραίας στο υπόλοιπο κύκλωμα είναι άριστη, μέρος της μεταδιδόμενης ενέργειας εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα καθ' όμοιο τρόπο με τον αντίστοιχο με τον οποίο η ενέργεια μεταφέρεται από το πρωτεύον στο δευτερεύον πηνίο του μετασχηματιστή. Ο εν λόγω παραλληλισμός, αν και απλοϊκός, διευκολύνει στην κατανόηση της διαδικασίας η οποία απαντάται κατά την μετάδοση της RF ενέργειας.

Γενικά, η κεραία αποτελεί μία μεταλλική κατασκευή η λειτουργία της οποίας εστιάζεται στη μετατροπή των υψίσυχων ρευμάτων σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα

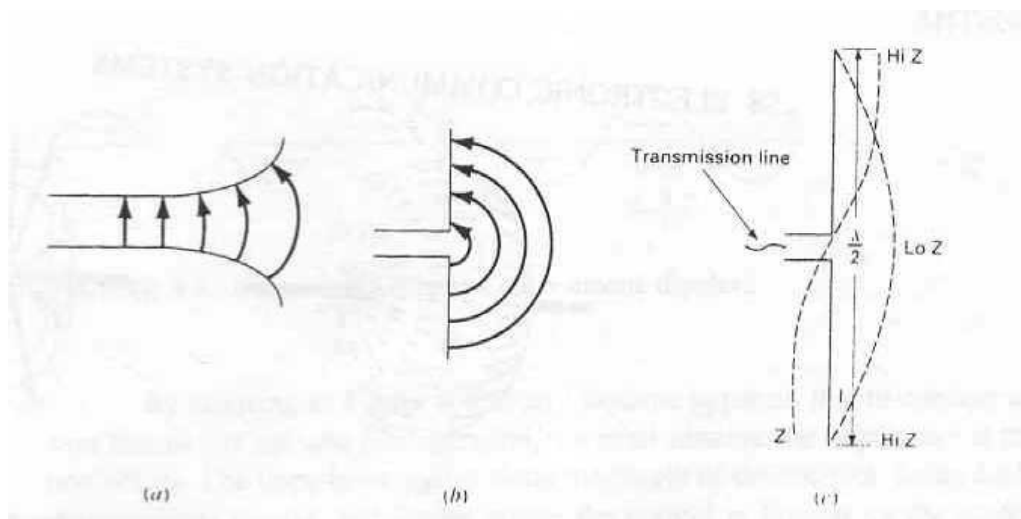
και αντίστροφα. Ανεξαρτήτως των διαφορετικών λειτουργιών τους, οι κεραιές λήψης και εκπομπής εμφανίζουν παρόμοια χαρακτηριστικά γεγονός που συνεπάγεται την ομοιότητα της συμπεριφορά τους. Οι διαστάσεις, το μέγεθος και το σχήμα των κεραιών σχετίζεται άμεσα και εξαρτώνται από το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου σήματος πχ το μηχανικό μήκος (*mechanical length*) μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα της συχνότητας του κύματος αφού ως γνωστόν ισχύει η σχέση:

$$T=1/f$$

όπου T: ο χρόνος

f: η συχνότητα

Συνεπώς, στην περίπτωση της κεραιάς η οποία λειτουργεί στα 50MHz το μήκος της θα πρέπει να είναι 6m.



Σχήμα 4.2: (a) γραμμή μεταφοράς “ανοικτών άκρων” (b) conductors in line (c) δίπολο μισού κύματος (center-fed)

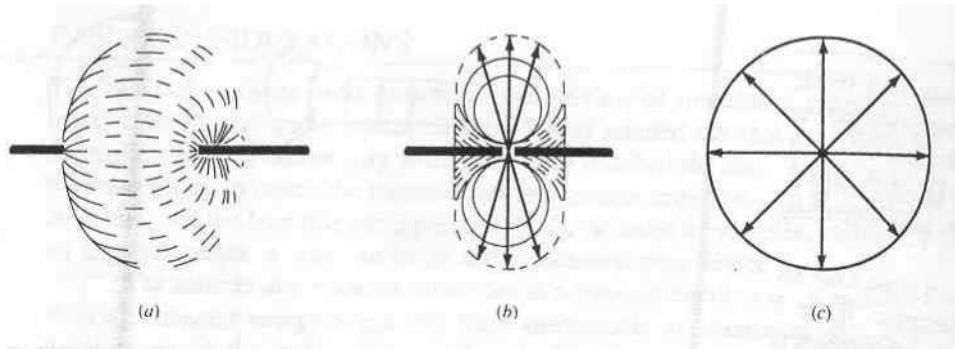
4.1 Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Οποτεδήποτε RF ενέργεια διοχετεύεται σε μη προσαρμοσμένη γραμμή μεταφοράς (*mismatched transmission line*), δημιουργούνται στάσιμα κύματα, (*standing waves*) αποτέλεσμα των οποίων είναι η απώλεια ενέργειας ή η εκπομπή της στον

περιβάλλοντα χώρο της γραμμής μεταφοράς. Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι η εν λόγω διαδικασία αποτελεί ανεπιθύμητο φαινόμενο κατά τη μετάδοση της ενέργειας. Μελετώντας λεπτομερέστερα την παραπάνω διαδικασία και εστιάζοντας στη γραμμή μεταφοράς (σχήμα 4.2) αγνοώντας τις διατάξεις που την πλαισιώνουν, παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη η ελεύθερη επιφάνειά της στο χώρο τόσο περισσότερο διευκολύνεται η διαδικασία ακτινοβολίας της ενέργειας οπότε και μεγαλύτερη ενέργεια εκπέμπεται στον περιβάλλοντα χώρο. Έχει αποδειχθεί ότι η **απόδοση ακτινοβολίας** (*radiation efficiency*) της προαναφερθείσας διάταξης μεγιστοποιείται στην περίπτωση που τα άκρα της έχουν καμφθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να εμφανίζονται κάθετα στη γραμμή μεταφοράς (σχήμα 4-2 β). Κατ' αυτό τον τρόπο το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι πλήρως συζευγμένα (*fully coupled*) κατά τη διάδοσή τους στον περιβάλλοντα χώρο, οπότε και επιτυγχάνεται η μέγιστη ακτινοβολούμενη ενέργεια. Η εν λόγω διάταξη καλείται **δίπολο**. Στην περίπτωση δε, που το συνολικό μήκος των δύο καλωδίων είναι ίσο με το μισό του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου κύματος, η κεραία καλείται **δίπολο μισού κύματος** (*half-wave dipole*). Η προαναφερθείσα διάταξη-διαμόρφωση εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά με την ισοδύναμη γραμμή μεταφοράς μήκους ίσου με $1/4\lambda$. Η τιμή της σύνθετης αντίστασης είναι μεγάλη στα άκρα της διάταξης (σχήμα 4.2 c) ενώ αντιθέτως η σύνθετη αντίσταση λαμβάνει μικρή τιμή στο κέντρό της στο σημείο όπου πραγματοποιείται η σύνδεσή της με την γραμμή μεταφοράς. Ως εκ τούτου η ένταση του ρεύματος είναι μεγάλη (*large current nodes*) στο κέντρο της διάταξης και αντιθέτως μικρή στα άκρα της κεραίας, γεγονός που οδηγεί στη μέγιστη ακτινοβολούμενη ενέργεια.

4.2 Το στοιχειώδες δίπολο (Hertz Dipole)

Στην ουσία πρόκειται για μία θεωρητική κεραία της οποίας το μήκος δεν ξεπερνά το μήκος του εκπεμπόμενου κύματος (σχήμα 4.3 α). Εξυπηρετεί στη θεωρητική μελέτη των κεραιών ως το πρότυπο βάσει του οποίου συγκρίνονται και ορίζονται τα χαρακτηριστικά όλων των κεραιών που χρησιμοποιούνται στην πράξη.



Σχήμα 4.3 Το διάγραμμα ακτινοβολίας του στοιχειώδους δίπολου (a) πλευρική άποψη (b) γωνία μέγιστης ακτινοβολίας (c) κατακόρυφη άποψη

Η ισχύς του πεδίου (*field strength*) του δίπολου Hertz υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$E = \frac{(60 \cdot \pi \cdot L_e \cdot I \cdot \sin \theta)}{\lambda \cdot r}$$

E: η ισχύς του μαγνητικού πεδίου

r: η απόσταση

L_e : το μήκος της κεραίας

I: η ένταση του ρεύματος

θ : γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα του καλωδίου και τη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας

Όπως εικονίζεται στο σχήμα 4.3b το διάγραμμα ακτινοβολίας του στοιχειώδους δίπολου εμφανίζει ομοιομορφία εκατέρωθεν του άξονα του δίπολου (συμμετρικοί κύκλοι) ενώ από το ίδιο σχήμα διαφαίνεται ότι η διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας του δίπολου είναι η κάθετη στον άξονά του.

4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ

4.3.1 Κέρδος κεραίας και Αποτελεσματική Ισχύς Εκπομπής

Συγκεκριμένοι τύποι κεραιών εστιάζουν το διάγραμμα ακτινοβολίας τους σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση συγκριτικά με τις πανκατευθυντικές κεραίες. Ένας διαφορετικός τρόπος περιγραφής της ικανότητας / χαρακτηριστικού της κεραίας να

συγκεντρώνει την εκπεμπόμενη ακτινοβολία αποτελεί το μέγεθος του **κέρδους της κεραίας** (*antenna gain*) (μετρούμενο σε *decibels*).

Κατευθυντικό κέρδος (*directive gain*) Ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας της εκπεμπόμενης ισχύος (*power density*) σε συγκεκριμένη κατεύθυνση προς την πυκνότητα ισχύος η οποία θα εκπεμπόταν από μία πανκατευθυντική κεραία (*omnidirectional-isotropic antenna*). Η πυκνότητα ισχύος αμφοτέρων των δύο τύπων κεραιών μετράται σε συγκεκριμένη κατεύθυνση και ως εκ τούτου ένας συγκριτικός λόγος υπολογίζεται. Σε πραγματική βάση το κέρδος του δίπολου Hertz, αναφορικά πάντοτε με μία πανκατευθυντική κεραία υπολογίζεται 1.76dB, ενώ καθ' όμοιο τρόπο η αντίστοιχη τιμή του κέρδους της διπολικής κεραίας μισού κύματος υπολογίζεται 2.15dB. Αναφορικά με τις wire κεραίες οι οποίες αναφέρθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, το κέρδος τους ποικίλει από 2.15dB (δίπολο μισού κύματος) έως 8.51dB (στην περίπτωση της διπολικής κεραίας μήκους $l=\lambda$). Στην περίπτωση δε των παρόμοιων (ως προς το μήκος) μη συντονισμένων κεραιών, οι τιμές κέρδους των είναι 5.05dB έως 12.4dB αντίστοιχα. Από την σύγκριση των παραπάνω τιμών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Κατά πρώτον, αυξανόμενου του μήκους της κεραίας αυξάνεται η τιμή του κέρδους της κεραίας. Κατά δεύτερον, συγκρίνοντας τα κέρδη των συντονισμένων κεραιών με τα αντίστοιχα των μη συντονισμένων προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι μη συντονισμένες κεραίες παρουσιάζουν μεγαλύτερο κέρδος γεγονός αναμενόμενο.

Κατευθυντικότητα και κέρδος ισχύος (*directivity and power gain*) Ένα επιπλέον μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του κέρδους μίας κεραίας είναι το **κέρδος ισχύος** (*power gain*). Το εν λόγω μέγεθος στην πραγματικότητα αποτελεί μέτρο σύγκρισης της ισχύος εξόδου μίας συγκεκριμένης κεραίας σε συγκεκριμένη κατεύθυνση, σε σχέση με μία ισοτροπική κεραία. Το κέρδος μίας κεραίας είναι ο λόγος ισχύος μεταξύ μίας πανκατευθυντικής και μία μονοκατευθυντικής κεραίας.

Η μαθηματική έκφραση μέσω της οποίας εκφράζεται και υπολογίζεται είναι η ακόλουθη:

$$A (d B) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

Όπου A(dB): το κέρδος της κεραίας σε *decibels*

P₁: η εκπεμπόμενη ισχύς της μονοκατευθυντικής κεραίας

P₂: η εκπεμπόμενη ισχύς της ιστροπικής κεραίας

Ένας επιπρόσθετος όρος ο οποίος χρησιμοποιείται προκειμένου να περιγράψει την απόδοση του συστήματος εκπομπής είναι ο *effective radiated power (ERP)*.

4.3.2 Μέτρηση εκπομπής και ένταση πεδίου

Οι επαγόμενες τάσεις σε μία κεραία λήψεως είναι πολύ μικρές, της τάξεως των μικροβόλτ. Ως εκ τούτου οι λαμβανόμενες μετρήσεις της εντάσεως του πεδίου (*field strength*) θα είναι της τάξεως των mV/m

Ένταση πεδίου: Η ένταση του πεδίου, που δημιουργείται ως αποτέλεσμα της εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στον περιβάλλοντα χώρο, σε συγκεκριμένο σημείο ισοδυναμεί με την επαγόμενη τάση επί καλωδίου μήκους 1m το οποίο βρίσκεται στο συγκεκριμένο σημείο. Η τιμή της εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων αναφέροντας χαρακτηριστικά τη χρονική στιγμή της ημέρας που πραγματοποιείται η εκπομπή της κεραίας, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες την απόσταση του καλωδίου από την κεραία κτλ.

4.3.3 Αντίσταση ακτινοβολίας κεραίας

Πρόκειται για ένα υποθετικό μέγεθος με θεωρητική μόνο σημασία. Ως **αντίσταση ακτινοβολίας** της κεραίας (*antenna radiation resistance*) ορίζεται η ωμική αντίσταση ενός κυκλώματος στην οποία θα απελευθερώνονταν το ίδιο ποσό ενέργειας με το αντίστοιχο ακτινοβολούμενο από την κεραία. Προσδιορίζεται δε από το λόγο της μέσης ακτινοβολούμενης ισχύος της κεραίας προς το τετράγωνο της έντασης του επαγόμενου ρεύματος που αναπτύσσεται σε συγκεκριμένο απομακρυσμένο σημείο (*feed point*).

Απώλειες και βαθμός απόδοσης: Πέραν της ενέργειας που εκπέμπεται από την κεραία, ένα σημαντικό μέγεθος, ο προσδιορισμός και περιορισμός του οποίου αποτελεί εξέχουσας σημασίας έργο, είναι οι απώλειες ισχύος. Παράγοντες που συμβάλλουν στην απώλεια ισχύος κατά την εκπομπή της κεραίας είναι μεταξύ των άλλων, η *ground resistance*, *corona effects*, *imperfect dielectric* στον περιβάλλοντα χώρο της κεραίας, επαγωγή eddy ρευμάτων σε μεταλλικά αντικείμενα τα οποία βρίσκονται κοντά στην κεραία, και τέλος σε θερμικές απώλειες κατά μήκος της κεραίας. Συνδυάζοντας λοιπόν όλα τα παραπάνω, προκύπτει η σχέση :

$$P_{in} = P_d + P_{rad}$$

όπου P_{in} : η συνολική ισχύς τροφοδοσίας της κεραίας

P_d : η απολεσθείσα ενέργεια

P_{rad} : η συνολικά ακτινοβολούμενη ενέργεια.

Από την παραπάνω σχέση και αντικαθιστώντας καθ' έναν εκ των τριών όρων με τον αντίστοιχο $I^2 R$ όρο, προκύπτει η ισοδύναμη σχέση :

$$R_{in} = R_d + R_{rad}$$

βασιζόμενοι στην οποία μπορούμε να ορίσουμε την παράμετρο του βαθμού απόδοσης (*efficiency*) της κεραίας ως εξής :

$$n = \frac{R_{rad}}{(R_{rad} + R_d)} \cdot 100\%$$

όπου

R_d : η αντίσταση της κεραίας (*antenna resistance*)

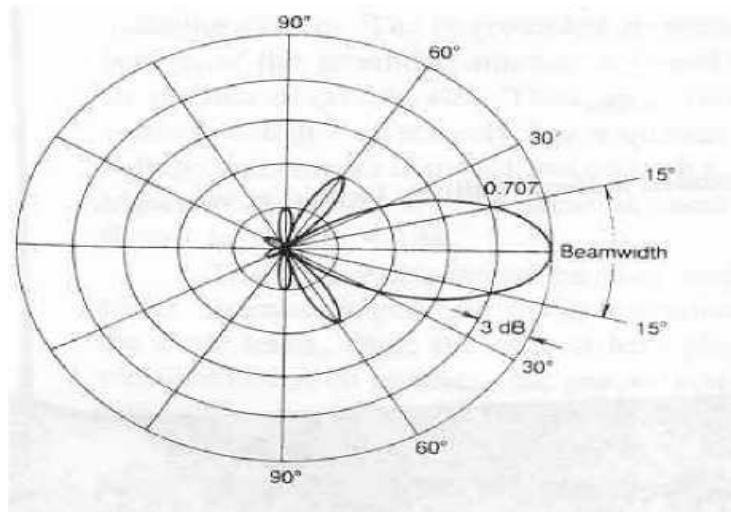
R_{rad} : η αντίσταση ακτινοβολίας της κεραίας Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι ο βαθμός απόδοσης της κεραίας μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της ακτινοβολούμενης ισχύος από την κεραία προς τη συνολική ισχύ τροφοδοσίας της κεραίας.

Οι LF (Low Frequency) και MF (Medium Frequency) κεραίες είναι οι λιγότερο αποδοτικές δεδομένων των δυσκολιών που απαντώνται στην επίτευξη του κατάλληλου μήκους τους. Συγκεκριμένα, ο βαθμός απόδοσης των εν λόγω κεραίων δεν ξεπερνά την τιμή 0.95 ενώ είναι δυνατό στη χειρότερη περίπτωση ο βαθμός

απόδοσης τους να μην ξεπερνά την τιμή 0.75. Φυσικά, αυξανόμενης της συχνότητας εκπομπής της κεραίας, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσής τους έτσι που σε ορισμένες περιπτώσεις επιτυγχάνεται άριστη απόδοση πλησίον της μέγιστης τιμής 1. Η αντίσταση ακτινοβολίας είναι δυνατό να λαμβάνει τιμή σε ένα εύρος λίγων Ohm μέχρι αρκετές εκατοντάδες Ohm Παράγοντες όπως, η επιλογή του σημείου τροφοδοσίας, τα φυσικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της κεραίας, είναι ορισμένοι εκ των οποίων καθορίζουν την τιμή της αντίστασης ακτινοβολίας της κεραίας.

4.3.4 Εύρος ζώνης συχνοτήτων, Εύρος δέσμης και πολικότητα κεραίας

Από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην περιγραφή των χαρακτηριστικών των κεραιών είναι το **εύρος ζώνης συχνοτήτων** (*bandwidth*) στις οποίες λειτουργεί η κεραία, το **εύρος δέσμης** (*beam width*) της κεραίας που καθορίζει το βαθμό συρρίκνωσης /συγκέντρωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας, γύρω από τον κεντρικό άξονα και τέλος η **πολικότητα** (*polarity*) που περιγράφει τον προσανατολισμό (*space orientation*) των εκπεμπόμενων κυμάτων στο χώρο. Συγκεκριμένα, ο όρος *bandwidth* προσδιορίζει το εύρος των συχνοτήτων (*frequency range*) στο οποίο η κεραία μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά, εννοώντας για παράδειγμα ότι η κεραία θα επιτυγχάνει ικανοποιητική απόδοση (*throughput*) στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Στο σημείο όπου η ισχύς της κεραίας μειώνεται στο μισό της μέγιστης τιμής της (3dB), το μέγιστο και ελάχιστο του συγκεκριμένου εύρους ζώνης συχνοτήτων στο οποίο λειτουργεί η κεραία έχει επιτευχθεί οπότε και η απόδοση της κεραίας μειώνεται σταδιακά. Στην περίπτωση δε των κεραιών που λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, προκειμένου να διατηρείται η απόδοση τους σε υψηλά επίπεδα, ενσωματώνονται κατάλληλα αντισταθμιστικά κυκλώματα (*compensating circuits*) έτσι ώστε ανά πάσα στιγμή να εξασφαλίζεται η προσαρμογή σύνθετη αντίστασης της κεραίας. Κατ' αυτό τον τρόπο, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα δημιουργίας στάσιμων κυμάτων, εξασφαλίζεται τρόπος τινά η "προστασία" του εκπεμπόμενου σήματος από αυτού του είδους τις παραμορφώσεις-υποβιβάσεις.



Σχήμα 4.4 : Το εύρος δέσμης συγκεκριμένης κεραίας

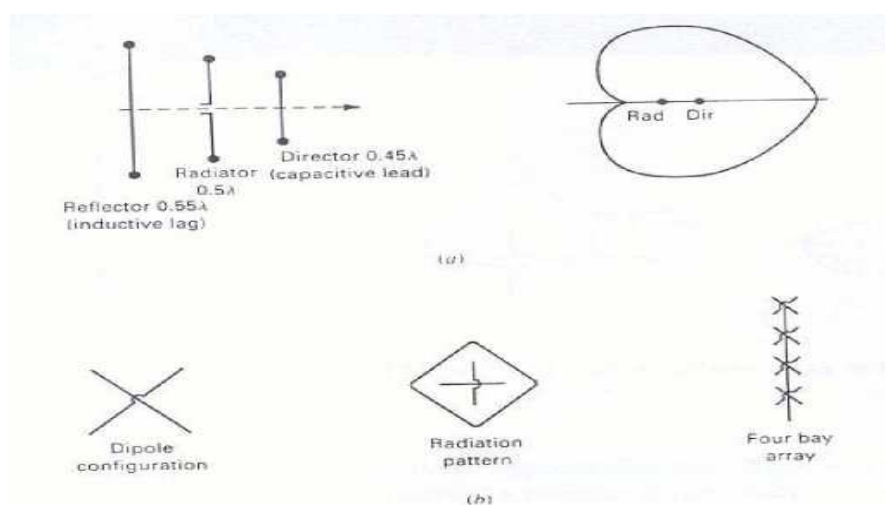
Από την άλλη μεριά, το εύρος δέσμης της κεραίας προσδιορίζει την ικανότητα συρρίκνωση ή όχι της ακτινοβολούμενης δέσμης γύρω από τον κύριο άξονα ακτινοβολίας. Περιγράφεται δε ως η γωνία που σχηματίζεται από τα σημεία ημίσεως ισχύος (*half power points-σημεία* στα οποία η ένταση του πεδίου της κεραίας μειώνεται στο 0.707 της μέγιστης τιμής της) του κυρίως λοβού του διαγράμματος ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, το εύρος δέσμης του διαγράμματος ακτινοβολίας του σχήματος 9.9 είναι 30° . Αρκεί να παρατηρήσουμε τα δύο σημεία ημίσεως ισχύος τα οποία και έχουν βρεθεί επί του κυρίου λοβού ακτινοβολίας του διαγράμματος, και να ενώσουμε κάθε ένα εξ αυτών με το κέντρο του λοβού ακτινοβολίας. Η γωνία που σχηματίζεται όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.4 είναι 30° . Τέλος αναφορικά με την πολικότητα της κεραίας, πρόκειται για τη παράμετρο που προσδιορίζει τον προσανατολισμό (στο χώρο) των πεδίων του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος (σχήμα 4.4). Στον ελεύθερο χώρο, τον περιβάλλοντα την κεραία, το μαγνητικό πεδίο του κύματος είναι κάθετο στη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου και επιπλέον η διεύθυνση διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι κάθετη και στα δύο επαγόμενα πεδία. Η πολικότητα της κεραίας καθορίζεται από την πολικότητα του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Έτσι λοιπόν στην περίπτωση που η διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετη, η κεραία εμφανίζεται κάθετα πολωμένη ενώ αντιθέτως όποτε η διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου είναι οριζόντια η κεραία χαρακτηρίζεται ως οριζόντια πολωμένη.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι LF (*Low Frequency*) κεραίες εμφανίζουν κάθετη πολικότητα κατά το πλείστο τους, εξ' αιτίας τόσο της επιδράσεως της επιφάνειας της

γης στα εκπεμπόμενα LF ηλεκτρομαγνητικά κύματα όσο και των μεθόδων κατασκευής τους. Από την άλλη μεριά, οι HF (*High Frequency*) κεραιές εμφανίζουν συνήθως οριζόντια πόλωση.

4.4 ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

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



Σχήμα 4.5: (α) Διεγερόμενο και παρασιτικά στοιχεία στοιχειοκεραίας και (β) οριζόντιο περιστροφικό δίπολο, διάγραμμα ακτινοβολίας και στοιχειοκεραία.

4.4.1 Στοιχειοκεραία Διπόλων

Μια στοιχειοκεραία είναι ένα σύστημα ακτινοβολίας που αποτελείται από ένα σύνολο ακτινοβολητών ή στοιχεία (Σχήμα 4.5). Αυτοί είναι τοποθετημένοι σε μικρή

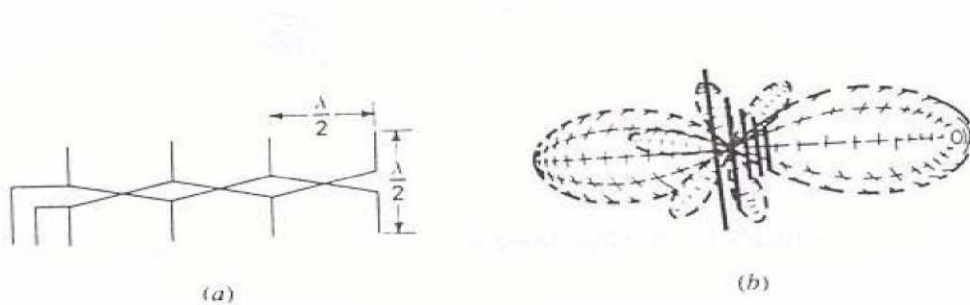
απόσταση μεταξύ τους, ούτως ώστε να είναι ο ένας μέσα στο πεδίο επαγωγής του άλλου. Επομένως αλληλεπιδρούν ο ένας με τον άλλον, παράγοντας ένα διάγραμμα ακτινοβολίας που ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των επιμέρους εκπομπών τους. Η ύπαρξη ενίσχυσης ή εξασθένησης σε οποιαδήποτε δεδομένη κατεύθυνση, καθορίζεται όχι μόνο από τα επιμέρους χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου, αλλά και από την απόσταση μεταξύ των στοιχείων, μετρούμενη σε μήκη κύματος, και από την (ενδεχόμενη) διαφορά φάσης ανάμεσα στα διάφορα σημεία τροφοδοσίας. Με την κατάλληλη τοποθέτηση των στοιχείων στη διάταξη, μπορούμε να δημιουργήσουμε ακυρώσεις και ενισχύσεις ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα η στοιχειοκεραία να εμφανίζει εξαιρετικά χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας. Κέρδη πολύ πάνω από 50 δεν είναι ασυνήθιστα, ειδικά στο άνω όριο της ζώνης υψηλών συχνοτήτων. Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε μία στοιχειοκεραία για να επιτύχουμε ένα μη κατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, όπως με τις περιστροφικές (turnstile) στοιχειοκεραίες (Σχήμα 4.5 β) που χρησιμοποιούνται στην εκπομπή τηλεόρασης. Γενικά πάντως οι HF στοιχειοκεραίες είναι πιο πιθανό να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί κατευθυντική συμπεριφορά παρά για τη δημιουργία μη κατευθυντικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας.

Παρασιτικά Στοιχεία Δεν είναι απαραίτητο όλα τα στοιχεία μιας διάταξης διπόλων να συνδέονται με την έξοδο του πομπού, αν και παρατηρείται σε ένα αρκετά μεγάλο αριθμό στοιχειοκεραίων. Ένα στοιχείο που συνδέεται με τον πομπό ονομάζεται *διεγερόμενο* (driven) στοιχείο, ενώ ένα στοιχείο που δεν συνδέεται με τον πομπό ονομάζεται *παρασιτικό* (parasitic). Τα παρασιτικά στοιχεία λαμβάνουν ενέργεια μέσω του πεδίου επαγωγής που δημιουργείται από ένα διεγερόμενο στοιχείο, και όχι μέσω της απευθείας σύνδεσης στη γραμμή μεταφοράς. Γενικά, ένα παρασιτικό στοιχείο μεγαλύτερο από το διεγερόμενο και τοποθετημένο κοντά σε αυτό, μειώνει την ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος προς την κατεύθυνσή του και την αυξάνει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Συμπεριφέρεται παρόμοια με έναν κοίλο οπτικό καθρέφτη και ονομάζεται *ανακλαστήρας* (Σχήμα 4.5). Ένα παρασιτικό στοιχείο μικρότερο από το αντίστοιχο διεγερόμενο, από το οποίο λαμβάνει ενέργεια, τείνει να αυξήσει την ακτινοβολία προς την κατεύθυνσή του.

Επομένως συμπεριφέρεται όπως ένας συγκλίνων κυρτός φακός και ονομάζεται *κατευθυντήρας* (director). Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 4.5. Το μεγαλύτερο μέρος των στοιχειοκεραίων αποτελείται συνήθως από δίπολα, σε συγκεκριμένα φυσικά σχήματα και διεγερόμενα με διάφορους τρόπους, ανάλογα με

τις απαιτήσεις.

Ευρύπλευρες ή Μετωπικές Στοιχειοκεραίες Ενδεχομένως το απλούστερο είδος στοιχειοκεραίας είναι αυτή η οποία αποτελείται από διάφορα δίπολα ίσου μεγέθους, τοποθετημένα σε ίσα διαστήματα πάνω σε μια ευθεία γραμμή (collinear), με όλα τα δίπολα να τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή και με την ίδια φάση. Αυτή η διάταξη είναι γνωστή ως ευρύπλευρη ή μετωπική στοιχειοκεραία (broadside array) και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6, μαζί με το διάγραμμα ακτινοβολίας της.



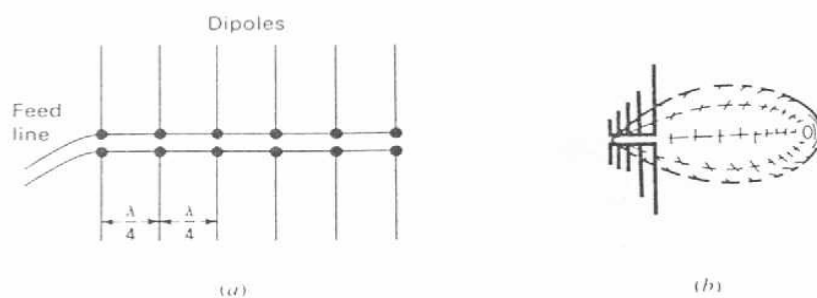
Σχήμα 4.6 (α) Ευρύπλευρη στοιχειοκεραία και (β) διάγραμμα ακτινοβολίας.

Οι ευρύπλευρες ή μετωπικές στοιχειοκεραίες είναι ισχυρά κατευθυντικές σε γωνίες ορθές ως προς το επίπεδο της στοιχειοκεραίας, εκπέμποντας ελάχιστα στο επίπεδό της. Το όνομα προέρχεται από το ναυτικό όρο *broadside*. Εάν θεωρήσουμε κάποιο σημείο κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στο επίπεδο της στοιχειοκεραίας, φαίνεται ότι αυτό το απόμακρο σημείο απέχει σχεδόν εξ ίσου από όλα τα δίπολα της στοιχειοκεραίας. Οι μεμονωμένες εκπομπές, ήδη αρκετά ισχυρές προς αυτή την κατεύθυνση, ενισχύονται περισσότερο. Στην κατεύθυνση του επιπέδου, εντούτοις, υπάρχει λίγη ακτινοβολία, επειδή τα δίπολα δεν ακτινοβολούν προς την κατεύθυνση στην οποία δείχνουν, αλλά και λόγω των ακυρώσεων στην κατεύθυνση της ευθείας που συνδέει το κέντρο. Αυτό συμβαίνει επειδή οποιοδήποτε απόμακρο σημείο στην ευθεία αυτή δεν απέχει εξίσου από όλα τα δίπολα, με αποτέλεσμα να αλληλοεξουδετερώνονται οι εκπομπές τους στην κατεύθυνση αυτή (ιδιαίτερα εάν η απόστασή ανάμεσά τους είναι $\lambda/2$, κάτι το οποίο παρατηρείται πολύ συχνά).

Τα τυπικά μήκη κεραιών στην περίπτωση των ευρύπλευρων στοιχειοκεραιών κυμαίνονται από 2 ως 10 μήκη κύματος, οι τυπικές αποστάσεις ανάμεσα στις κεραίες είναι $\lambda/2$ ή λ , και ντουζίνες στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία

στοιχειοκεραία. Σημειώνουμε τέλος ότι οποιαδήποτε στοιχειοκεραία που είναι κατευθυντική κάθετα στο επίπεδο, έχει ευρύπλευρη ή μετωπική δράση.

Αξονικά Ακτινοβολούσες ή Ακροπυροδοτικές Στοιχειοκεραίες Η φυσική διαρρύθμιση της ακροπυροδοτικής στοιχειοκεραίας (end-fire array) είναι σχεδόν η ίδια με αυτή της ευρύπλευρης στοιχειοκεραίας. Ενώ όμως τα όλα στοιχεία τροφοδοτούνται με το ίδιο πλάτος ρεύματος, η φάση δεν είναι η ίδια, δηλαδή υπάρχει μια διαφορά φάσης μεταξύ των ρευμάτων που τροφοδοτούν τα στοιχεία. Αυτό παρατηρείται προοδευτικά από τα αριστερά προς τα δεξιά στο Σχήμα 4.7, δεδομένου ότι υπάρχει μια καθυστέρηση φάσης μεταξύ των διαδοχικών στοιχείων, ίση σε hertz με την απόσταση μεταξύ τους σε μήκη κύματος. Το διάγραμμα ακτινοβολίας της ακροπυροδοτικής στοιχειοκεραίας είναι αρκετά διαφορετικό από αυτή της ευρύπλευρης στοιχειοκεραίας. Η μέγιστη ακτινοβολία επιτυγχάνεται στο επίπεδο της στοιχειοκεραίας, όχι κάθετα σε αυτό, και η κεραία είναι μονοκατευθυντική παρά δικατευθυντική. Σημειώνουμε τέλος ότι οποιαδήποτε στοιχειοκεραία με την διαρρύθμιση της ακροπυροδοτικής, εμφανίζει ακροπυροδοτική συμπεριφορά.



Σχήμα 4.7 (α) Ακροπυροδοτική στοιχειοκεραία και (β) διάγραμμα ακτινοβολίας.

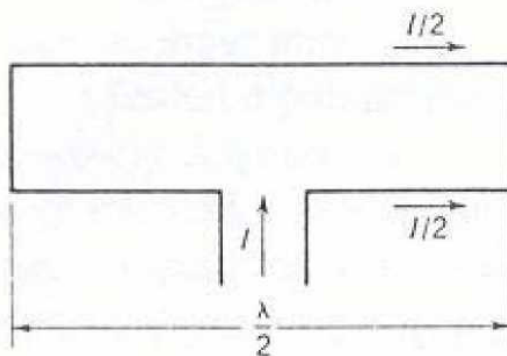
Δεν υπάρχει ακτινοβολία σε γωνίες κάθετες στο επίπεδο της στοιχειοκεραίας λόγω ακυρώσεων. Ένα σημείο πάνω σε μια ευθεία κάθετη στο επίπεδο της στοιχειοκεραίας ισαπέχει από όλα τα στοιχεία, αλλά τώρα το πρώτο και το τρίτο δίπολο τροφοδοτούνται με διαφορετική φάση και επομένως ακυρώνουν το ένα την εκπομπή του άλλου, όπως επίσης το δεύτερο με το τέταρτο δίπολο, κ.ο.κ. Με τη συνηθισμένη απόσταση ανάμεσα στα δίπολα ($\lambda/4$ ή $3\lambda/4$), όχι μόνο θα υπάρχει ακύρωση κάθετα στο επίπεδο της στοιχειοκεραίας, όπως περιγράφηκε, αλλά και προς την κατεύθυνση από δεξιά προς τα αριστερά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9-23. Όχι μόνο είναι το πρώτο δίπολο κοντύτερα κατά $\lambda/4$ σε κάποιο απόμακρο σημείο προς αυτή την κατεύθυνση

(έτσι ώστε η ακτινοβολία του να προηγείται κατά 90° αυτής του δεύτερου δίπολου), αλλά επίσης προηγείται του δεύτερου δίπολου κατά 90° , λόγω της μεθόδου τροφοδοσίας. Οι ακτινοβολίες από τα πρώτα δύο δίπολα θα είναι κατά 180° εκτός φάσης σε αυτή την κατεύθυνση και θα ακυρώνονται, όπως επίσης αυτές του τρίτου και τέταρτου δίπολου, κ.ο.κ. Στην κατεύθυνση από αριστερά προς δεξιά, η φυσική διαφορά φάσης ανάμεσα στα δίπολα δημιουργείται από τη διαφορά φάσης της τροφοδοσίας τους. Άρα έχουμε ενίσχυση της ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα ισχυρή μονοκατευθυντική ακτινοβολία. Τόσο οι ακροπυροδοτικές όσο και οι ευρύπλευρες στοιχειοκεραίες ονομάζονται *γραμμικές*. Και οι δύο είναι συντονισμένες αφού αποτελούνται από συντονισμένα στοιχεία. Παρομοίως, όπως και οποιοδήποτε συντονισμένο κύκλωμα υψηλού Q, και οι δύο στοιχειοκεραίες έχουν στενό εύρος ζώνης, το οποίο καθιστά και τις δύο ιδιαίτερα κατάλληλες για μετάδοση μονής συχνότητας, αλλά όχι και τόσο χρήσιμες για λήψη, όπου απαιτείται γενικά η δυνατότητα να λαμβάνουμε σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

4.4.2 Αναδιπλωμένο Δίπολο Και Εφαρμογές

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, το αναδιπλωμένο δίπολο (folded dipole) είναι μια ενιαία κεραία αποτελούμενη από δύο στοιχεία. Το πρώτο τροφοδοτείται απευθείας, ενώ το δεύτερο είναι συζευγμένο επαγωγικά στις άκρες. Το διάγραμμα ακτινοβολίας του αναδιπλωμένου δίπολου είναι ίδιο με αυτό ενός ευθυγραμμισμένου δίπολου, αλλά η εμπέδηση εισόδου του είναι μεγαλύτερη. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί αν παρατηρήσουμε (Σχήμα 4.8) ότι εάν το συνολικό ρεύμα εισόδου είναι I και οι δύο βραχίονες έχουν ίσες διαμέτρους, τότε το ρεύμα σε κάθε βραχίονα είναι $I/2$. Εάν αυτό ήταν ένα ευθυγραμμισμένο δίπολο, το συνολικό ρεύμα θα διέρρεε τον πρώτο (και μοναδικό) βραχίονα. Τώρα εφαρμόζοντας την ίδια ισχύ, μόνο το μισό ρεύμα ρέει στον πρώτο βραχίονα, και έτσι η σύνθετη αντίσταση εισόδου είναι τέσσερις φορές εκείνη του ευθυγραμμισμένου δίπολου. Ως εκ τούτου, $R_r = 4 \times 72 = 288 \Omega$ για ένα αναδιπλωμένο δίπολο ημίσεος κύματος με ίσης διαμέτρου βραχίονες. Εάν χρησιμοποιούνται στοιχεία άνισων διαμέτρων, τότε είναι εφαρμόσιμοι λόγοι μετασχηματισμού από 1.5 έως 25, και εάν απαιτούνται μεγαλύτεροι λόγοι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι βραχίονες. Αν και το αναδιπλωμένο δίπολο έχει το ίδιο διάγραμμα ακτινοβολίας με το συνηθισμένο δίπολο, εμφανίζει πολλά

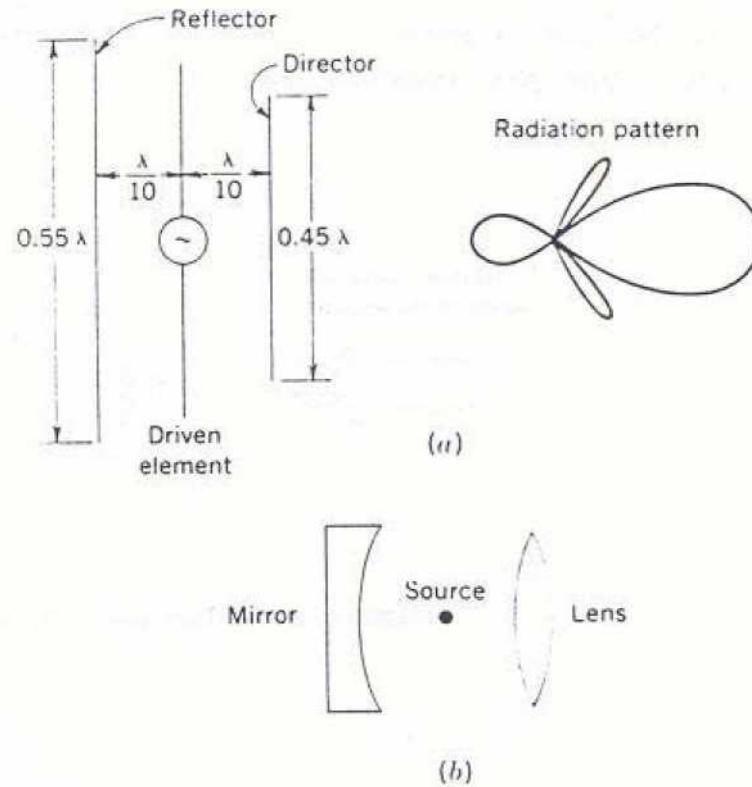
πλεονεκτήματα: υψηλότερη σύνθετη αντίσταση εισόδου, μεγαλύτερο εύρος ζώνης, καθώς και ευκολία και μικρό κόστος κατασκευής και προσαρμογής της σύνθετης αντίστασης.



Σχήμα 4.8 : Αναδιπλωμένο δίπολο

Η Κεραία Yagi-Uda : Η κεραία Yagi-Uda είναι μία στοιχειοκεραία η οποία αποτελείται από ένα διεγερόμενο στοιχείο και ένα ή περισσότερα παρασιτικά στοιχεία. Αυτά είναι τοποθετημένα επί μιας ευθείας γραμμής και κοντά το ένα στο άλλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, μαζί με το αντίστοιχο σύστημα στην οπτική και το διάγραμμα ακτινοβολίας. Δεδομένου ότι είναι σχετικά μονοκατευθυντική, όπως φαίνεται από τη μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας, και έχει ένα μέτριο κέρδος στην περιοχή των 7dB, η κεραία Yagi-Uda χρησιμοποιείται ως HF κεραία εκπομπής. Επίσης χρησιμοποιείται σε υψηλότερες συχνότητες, κυρίως σαν μια VHF κεραία λήψης τηλεόρασης. Ο οπίσθιος λοβός του Σχήματος 4.9 b μπορεί να ελαττωθεί, και έτσι ο λόγος front-to-back της κεραίας μπορεί να βελτιωθεί, φέρνοντας τα ακτινοβολούντα στοιχεία πλησιέστερα. Αυτό, όμως, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της σύνθετης αντίστασης εισόδου της στοιχειοκεραίας. Τελικά η απόσταση που φαίνεται στο σχήμα (0.1λ) είναι η βέλτιστη τιμή. Η ακριβής επίδραση του παρασιτικού στοιχείου εξαρτάται από την απόστασή του και την ρύθμισή του, δηλ. από το μέγεθος και τη φάση του ρεύματος που επάγεται σε αυτό. Όπως αναφέρθηκε ήδη, ένα παρασιτικό στοιχείο συντονισμένο σε μια χαμηλότερη συχνότητα από το διεγερόμενο στοιχείο, (δηλ. μεγαλύτερο σε μήκος) θα συμπεριφερθεί ως ήπιος ανακλαστήρας, ενώ ένα μικρότερο σε μήκος παρασιτικό στοιχείο θα ενεργήσει ως ήπιος κατευθυντήρας της ακτινοβολίας. Καθώς ένα παρασιτικό στοιχείο τοποθετείται όλο και πιο κοντά στο διεγερόμενο στοιχείο, θα προσθέσει περισσότερο φορτίο στο

διεγερόμενο στοιχείο και θα μειώσει τη σύνθετη αντίσταση εισόδου του. Αυτός είναι ίσως ο βασικός λόγος για την τόσο συχνή χρησιμοποίηση του αναδιπλωμένου δίπολου ως το διεγερόμενο στοιχείο μιας τέτοιας στοιχειοκεραίας.



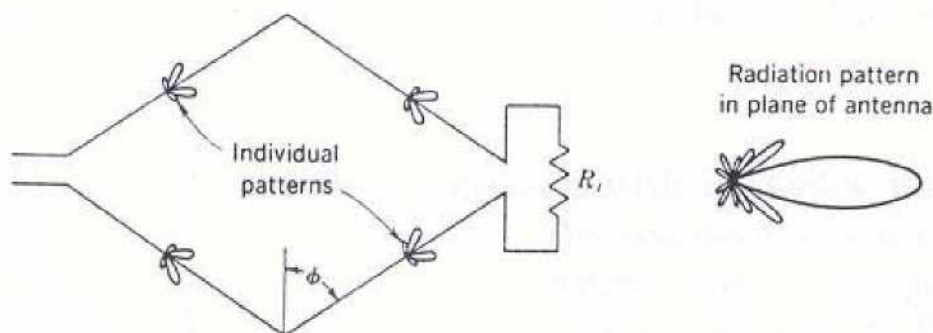
Σχήμα 4.9: Yagi κεραία. (α) Κεραία και διάγραμμα ακτινοβολίας, (β) οπτικό ισοδύναμο

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

4.4.3 Μη Συντονισμένες Κεραίες - Η Ρομβική Κεραία

Μία σημαντική απαίτηση για της υψηλές συχνότητες είναι η ανάγκη για μια κεραία

πολλαπλού εύρους ζώνης συχνοτήτων, ικανή να λειτουργήσει ικανοποιητικά στο μεγαλύτερο μέρος ή και σε όλη τη ζώνη συχνοτήτων από 3 ως 30 MHz, είτε για λήψη είτε για μετάδοση. Μια από τις προφανείς λύσεις είναι να χρησιμοποιήσουμε μία στοιχειοκεραία αποτελούμενη από μη συντονισμένες κεραίες, τα χαρακτηριστικά των οποίων δεν θα αλλάζουν δραστικά σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων. Μία πολύ ενδιαφέρουσα και ευρέως χρησιμοποιούμενη στοιχειοκεραία, ειδικά για σημείο-προς-σημείο επικοινωνίες, απεικονίζεται στο Σχήμα 4.10. Αυτή είναι η ρομβική κεραία, η οποία αποτελείται από μη συντονισμένα στοιχεία, τοποθετημένα διαφορετικά από όλες τις προηγούμενες συστοιχίες στοιχειοκεραίες. Πρόκειται για έναν επίπεδο ρόμβο που μπορεί να θεωρηθεί ως τμήμα μίας παράλληλης γραμμής μεταφοράς, λυγισμένη στο κέντρο. Τα μήκη των (ίσων) ακτινοβολούντων στοιχείων κυμαίνονται από 2 ως 8λ, και η γωνία ακτινοβολίας, ϕ , κυμαίνονται από 40° έως 75° , συνήθως καθοριζόμενη από το μήκος των σκελών.



Σχήμα 4.10: Ρομβική κεραία και διαγράμματα ακτινοβολίας

Τα τέσσερα σκέλη θεωρούνται μη συντονισμένες κεραίες. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μεταχείριση των δύο συνόλων ως μια γραμμή μεταφοράς σωστά τερματισμένη στην χαρακτηριστική σύνθετη αντίστασή της στο μακρινό άκρο της. Κατά συνέπεια υπάρχουν κύματα μόνο προς τα εμπρός. Δεδομένου ότι ο τερματισμός της κεραίας απορροφά κάποια ισχύ, η ρομβική κεραία πρέπει να τερματίζεται με έναν αντιστάτη ο οποίος, για την μετάδοση, είναι ικανός να απορροφήσει περίπου το ένα τρίτο της ισχύος που τροφοδοτεί την κεραία. Η τιμή της αντίστασης τερματισμού είναι συνήθως στην περιοχή των 800Ω και η σύνθετη αντίσταση εισόδου κυμαίνεται από 650 έως 700Ω

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 Εξισώσεις Καμπυλών:

Τα περισσότερα από τα φυσικά φαινόμενα αποδίδονται με απλές μαθηματικές σχέσεις στις οποίες και θα περιοριστούμε.

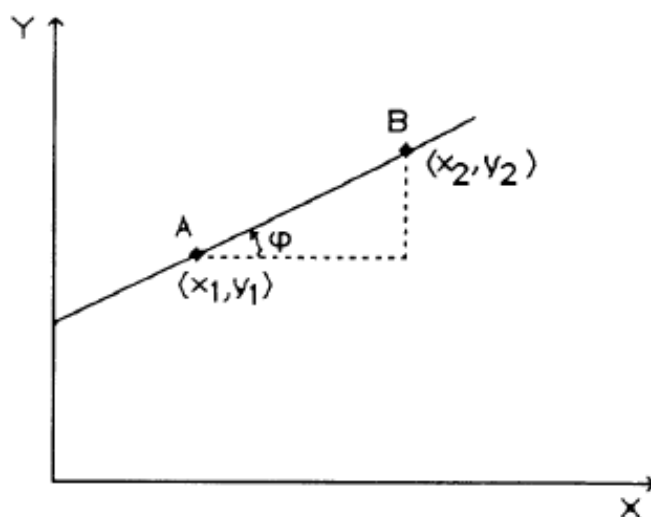
5.1.1 Ευθεία Γραμμή

Ο πιο απλός αλλά και συνηθισμένος τύπος καμπύλης είναι η ευθεία που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$y=y_0+\lambda x$$

όπου y και x είναι οι μεταβλητές (ή τα μετρούμενα φυσικά μεγέθη σ' ένα πείραμα),

y_0 και λ είναι σταθερές . Τις σταθερές αυτές μπορούμε να τις προσδιορίσουμε εύκολα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1, η σταθερά y_0 είναι η τιμή της μεταβλητής y όταν $x=0$ και καλείται τεταγμένη στην αρχή.



Σχήμα 5.1 Γραφική παράσταση της ευθείας.

Η σταθερά λ προσδιορίζεται ως εξής: παίρνουμε δυο σημεία πάνω στην ευθεία, έστω Α και Β, που έχουν ζεύγη τιμών (x_1, y_1) και (x_2, y_2) αντίστοιχα. Εισάγουμε αυτά τα ζεύγη διαδοχικά στην παραπάνω εξίσωση ευθείας και έχουμε:

$$y_1 = y_0 + \lambda x_1$$

$$y_2 = y_0 + \lambda x_2$$

Αφαιρούμε κατά μέλη της δυο αυτές εξισώσεις και έχουμε:

$$y_2 - y_1 = \lambda (x_2 - x_1)$$

οπότε

$$\lambda = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Η σταθερά αυτή λ ονομάζεται κλίση της ευθείας ως προς τον άξονα των x .

5.2 Προσδιορισμός Κέρδους Κεραίας (G):

Όπως είναι γνωστό η ισχύς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε απόσταση (R) από τη πηγή της περιγράφεται από τη σχέση:

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

όπου:

- P_R : η ισχύς που εκπέμπει η κεραία σε απόσταση r, μετρημένη σε W,
- λ_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})

Από την σχέση $P_{R=} = \left(\frac{P_e G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2} \right) \cdot \frac{1}{R^2}$ είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το κέρδος G της κεραίας μέσω της κλίσης της ευθείας $P_r \left(\frac{1}{R^2} \right)$, όπου η κλίση θα ισούται με $\frac{P_e \cdot G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2}$.

Είναι προφανές πως για προσδιοριστεί το G μέσω της κλίσης θα πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί το λ_0 , δηλαδή το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο κενό. Για το λόγο αυτό στην παρούσα μελέτη έχει το μήκος κύματος των μικροκυμάτων που εκπέμπει η πηγή με την μέθοδο των στάσιμων κυμάτων. Υπενθυμίζεται ότι η συχνότητα εκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχει ρυθμιστεί στα 9 GHz.

5.3 Περιγραφή Πειράματος

Σκοπός αυτού του εργαστηριακού πειράματος είναι η μελέτη μιας κεραίας σχισμών. Αρχικά τοποθετήθηκαν τα διαφορά όργανα, όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα. Επιβεβαιώθηκε ότι πομπός και ο δέκτης βρίσκονται στην ίδια ευθεία και ότι οι χοάνες τους έχουν τον ίδιο προσανατολισμό.



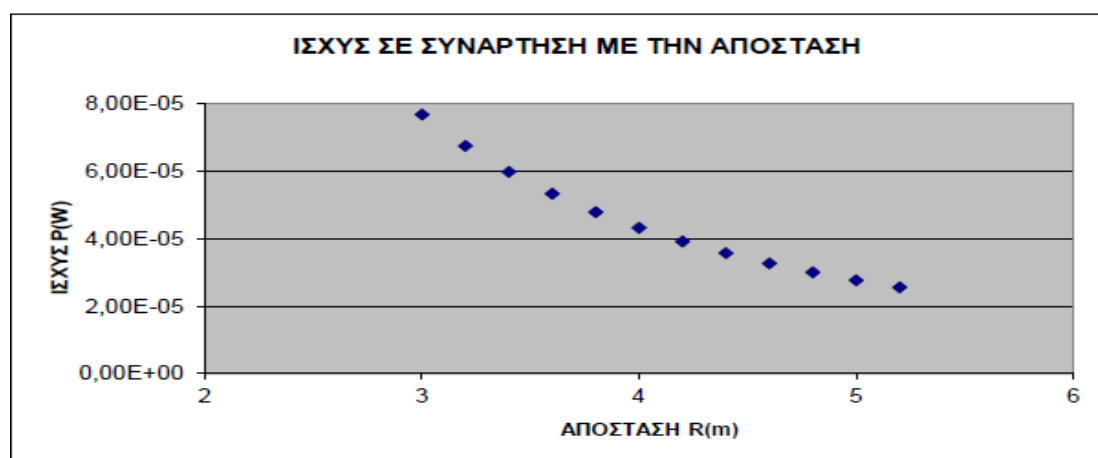
Σχήμα 5.3 Κεραία σχισμών

Οι πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

A/A	$R \pm 10^{-2}$ Απόσταση σε m	$P \pm 10^{-5}$ ισχύς σε W
1	3,0	7,6E-05
2	3,2	6,7E-05
3	3,4	5,9E-05
4	3,6	5,3E-05
5	3,8	4,7E-05
6	4,0	4,3E-05
7	4,2	3,9E-05
8	4,4	3,5E-05
9	4,6	3,2E-05
10	4,8	2,9E-05
11	5,0	2,7E-05
12	5,2	2,5E-05

Πίνακας 5.3.1

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



Σχήμα 5.3.1 Απεικόνιση πειραματικών σημείων για του υπολογισμό του κέρδους κεραίας.

Άξονας x: Ισχύς (W)

Άξονας y: Απόσταση (m)

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

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

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 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 μετρίεται 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 $A_2 = \frac{P_e G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^2}$.

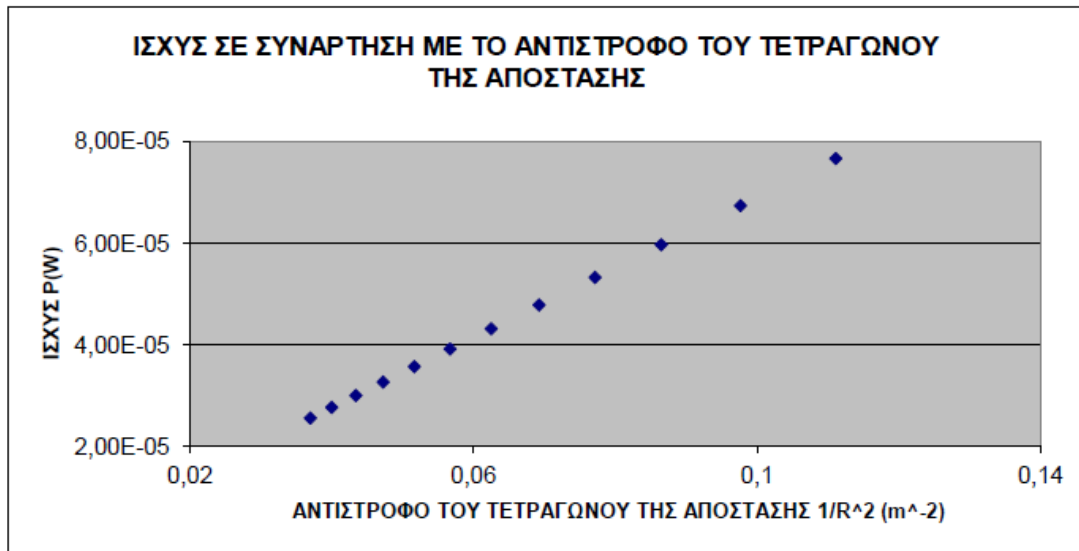
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συγκεκριμένη γραφική.

A/A	$1/R^2 \pm 10^{-3}$ απόσταση σε m	$P \pm 10^{-5}$ ισχύς σε W
1	0,111	7,6E-05
2	0,097	6,7E-05
3	0,086	5,9E-05
4	0,077	5,3E-05
5	0,069	4,7E-05
6	0,062	4,3E-05
7	0,056	3,9E-05
8	0,051	3,5E-05

9	0,047	3,2E-05
10	0,043	2,9E-05
11	0,041	2,7E-05
12	0,036	2,5E-05

Πίνακας 5.3.2

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 καμπύλη.



Σχήμα 5.3.3 Απεικόνιση πειραματικών σημείων για τον υπολογισμό του κέρδους κεραίας.

Άξονας x: Ισχύς(W)

Άξονας y: Αντίστροφο του τετραγώνου της απόσταση(m⁻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:

$$P(R) = (P\pi * G\pi * G\delta * \frac{\lambda_0^2}{16\pi^2}) * \frac{1}{R^2} \Rightarrow 6.9 * 10^{-4} = \frac{(10^{-1}) * 100 * G\delta * 0.033^2}{16\pi^2}$$

$$10^{-1} * 100 * G\delta * 0.033^2 = 6.9 * 10^{-4} * 16\pi$$

$$G\delta * 10 * 0.033^2 = 6.9 * 10^{-4} * 16\pi$$

$$G\delta * 0.01089 = 6.9 * 10^{-4} * 16 * 9.87$$

$$G\delta = \frac{6.9 * 10^{-4} * 16 * 9.87}{0.01089}$$

$$G\delta = \frac{6.9 * 10^{-4} * 157.92}{0.01089}$$

$$G\delta = 10W$$

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

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

Όπου $\sigma(P)$ και $\sigma(R)$ τα σφάλματα στα συγκεκριμένα μετρούμενα μεγέθη. Οπότε

$$G(P_R, R) = \frac{4\pi R}{\lambda_0} \left\{ \frac{P_R}{P_e} \right\}^{1/2} \text{ και οι μερικές παράγωγοι θα είναι } \frac{\partial G(P_R, R)}{\partial R} = \frac{4\pi}{\lambda_0} \left\{ \frac{P_R}{P_e} \right\}^{1/2}$$

Και $\frac{\partial G(P_R, R)}{\partial P} = \frac{4\pi R}{\lambda_0 \sqrt{P_e}} * \frac{1}{2\sqrt{P_R}}$ μετά από πράξεις και προσεγγίσεις προκύπτει ότι

$$\sigma(G) = \pm 2 * 10^{-1} W$$

Άρα τελικά προέκυψε $G = (0.02 \pm 0.002) W$

Έπειτα μετατρέπουμε τα watt σε dB: $G(\text{dB}) = 10 \log 10 = 10 \text{ dB}$

Το $\sigma(G(\text{dB}))$ σε dB θα προκύπτει σύμφωνα με την παραπάνω σχέση

$$\sigma(G(\text{dB})) = 1 \text{ dB} \text{ άρα τελικά προκύπτει } G = 10 \pm 1 \text{ dB.}$$

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

$$\alpha\% = \frac{|G_{\text{πειρ}} - G_{\text{θεωρ}}|}{G_{\text{θεωρ}}} * 100 = \frac{10 - 12}{12} * 100 = 16\%. \text{ Το πείραμα μας έχει } 16\%$$

απόκλιση.

Στην παραπάνω ανάλυση η τιμή του λ_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:

$$c = \lambda_0 * f \Rightarrow 3 * 10^8 = \lambda_0 * 9 * 10^9 \Rightarrow \lambda_0 = \frac{3 * 10^8}{9 * 10^9} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{3 * 10^8 * 10^{-9}}{9} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{10^{-1}}{3} \Rightarrow$$

$$\lambda_0 = 3.3333 * 10^{-1} \text{m} \Rightarrow \lambda_0 = 3.333 \text{cm} \Rightarrow \lambda_0 = 0.033 \text{m}$$

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.

5.4 Λογαριθμικές Καμπύλες

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

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

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

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

$$\Rightarrow \log_y P_R = \log A - n \log_x R \Rightarrow Y = \log A - nX$$

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

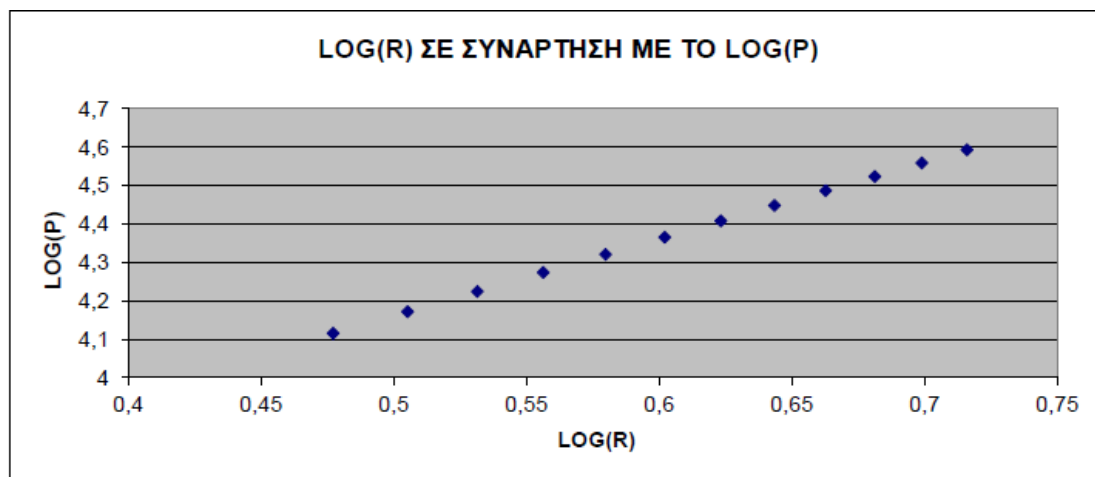
$$\log_y P_R = \log A - n \log_x R$$

A/A	Log R	Log P
1	0,477	4,115
2	0,505	4,171

3	0,531	4,224
4	0,556	4,274
5	0,579	4,321
6	0,602	4,365
7	0,623	4,408
8	0,643	4,448
9	0,662	4,487
10	0,681	4,524
11	0,698	4,559
12	0,716	4,593

Πίνακας 5.4.4.

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.



Σχήμα 5.4.5

Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση SLOPE στο υπολογιστικό πακέτο EXCEL το n είναι: $n=-1.87$

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

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

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

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

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

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

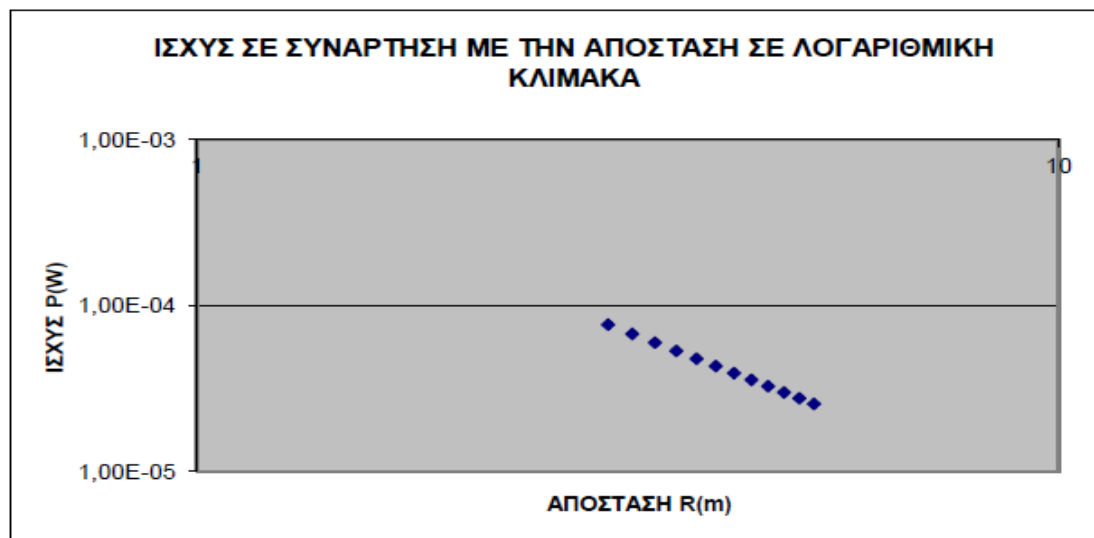
Στην συνέχεια θα προσδιοριστούν οι μερικές παράγωγοι $\frac{\partial n(P_R, R)}{\partial P}$ και $\frac{\partial n(P_R, R)}{\partial R}$.

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

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

Μετά από πράξεις και προσεγγίσεις προκύπτει ότι $\sigma(n) = 0.05$

Άρα τελικά προέκυψε $n = 1.87 \pm 0.05$



Σχήμα 5.4.6 Ισχύς σε συνάρτηση με την απόσταση σε log-log κλίμακα.

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.

5.5 Θεωρία Σφαλμάτων

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.

5.5.1 Είδη μετρήσεων

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.

5.5.2 Ακρίβεια και Πιστότητα

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 χ είναι το αριθμητικό αποτέλεσμα της μέτρησης και σ 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.

5.5.3 Κατηγορίες Σφαλμάτων

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.

5.5.3.1 Τυχαία Σφάλματα

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.

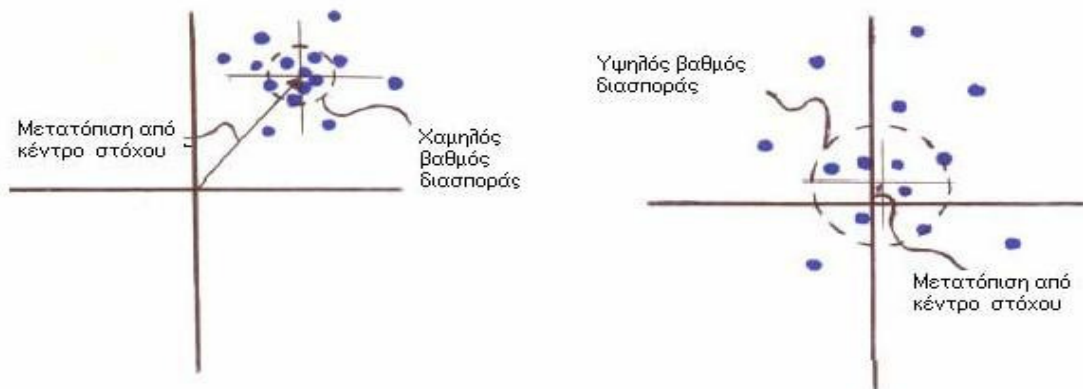
5.5.3.2 Συστηματικά Σφάλματα

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 u960 πάντοτε κατά την ίδια κατεύθυνση μετατοπίζοντας «συστηματικά» την καταγεγραμμένη 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 5.5.3.2

5.5.3.3 Πολλαπλές Μετρήσεις

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.