

8. ΕΚΠΟΜΠΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Το πρώτο διάγραμμα του κεφαλαίου 1 παριστά το φυσικό κανάλι μεταξύ του πομπού και του δέκτη ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος και τον τρόπο με τον οποίο τα σήματα (μετά την γένεση και την ακτινοβολία τους από τον πομπό) μεταδίδονται σε αυτό μέχρι να φτάσουν στο δέκτη. Στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες, το κανάλι είναι ο ελεύθερος χώρος μεταξύ των κεραιών του πομπού και του δέκτη και αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού είναι η συμπεριφορά των εκπεμπόμενων σημάτων κατά την μετάδοσή τους στον ελεύθερο χώρο.

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των σημάτων, το κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αναφέρεται στην έννοια της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Εξετάζονται η φύση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η εξασθένιση που υφίστανται κατά την διάδοσή τους, καθώς και το φαινόμενο της ανάκλασής τους.

Το δεύτερο μέρος παρουσιάζει λεπτομερειακά ορισμένες πρακτικές πλευρές του φαινομένου της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η σχέση της συχνότητας και της διάδοσης, καθώς και πως η εγγύτητα της γης επηρεάζει την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι τρεις μέθοδοι διάδοσης, η διάδοση εκμεταλλευόμενοι την καμπυλότητα της γης, η διάδοση με ανάκλαση στην ιονόσφαιρα και η απευθείας διάδοση (εξαρτάται καθοριστικά από την συχνότητα) αναπτύσσονται λεπτομερειακά στο κεφάλαιο αυτό. Τέλος εξετάζονται ορισμένες πλευρές της διάδοσης των μικροκυμάτων όπως τα φαινόμενα της διάθλασης, της τροποσφαιρικής σκέδασης, και της αλλοίωσης των κυμάτων κατά την διάδοσή τους στην ιονόσφαιρα.

8-1. ΕΚΠΟΜΠΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

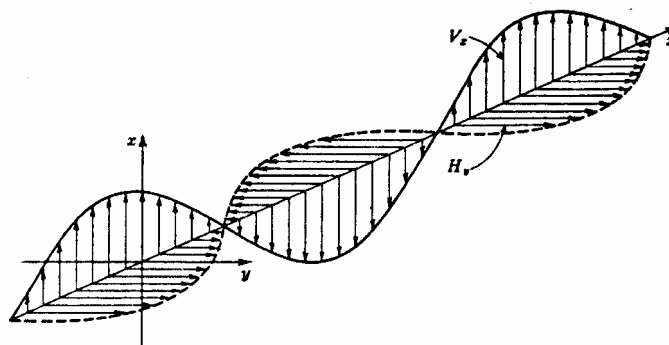
Όταν τροφοδοτείται ένα ηλεκτρικό κύκλωμα με ισχύ, αναπτύσσεται σε αυτό ένα σύστημα ρευμάτων και τάσεων, των οποίων η σχέση εξαρτάται από την τοπολογία του κυκλώματος. Για παράδειγμα η τάση (συγκρινόμενη με το ρεύμα) μπορεί να είναι υψηλή αν η εμπέδηση του κυκλώματος είναι υψηλή ή αν η τάση και το ρεύμα έχουν διαφορά φάσης 90 μοίρες. Κατά παρόμοιο τρόπο αν ισχύς, εκπέμπεται στον ελεύθερο χώρο, μεταδίδεται λαμβάνοντας υπ όψιν τα χαρακτηριστικά του ελευθέρου χώρου. Αν η ισχύς αυτή εκπέμπεται για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό τότε λέμε ότι ακτιβολείται και διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο με την μορφή που ονομάζουμε ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Με τον όρο ελεύθερο χώρο εννοούμε έναν χώρο στον οποίον δεν υπάρχουν μαγνητικά πεδία και πεδία βαρύτητας, χωρίς συμπαγή σώματα και ιονισμένα σωματίδια. Γενικά λέγοντας ελεύθερο χώρο εννοούμε κάτι το ιδανικό, το οποίο δεν υπάρχει στην πραγματικότητα. Ωστόσο η έννοια του ελευθέρου χώρου χρησιμοποιείται γιατί απλουστεύει το φαινόμενο της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, καθώς είναι εύκολο να υπολογιστούν οι συνθήκες διάδοσης. Ακόμη οι συνθήκες διάδοσης μερικές φορές στην πραγματικότητα προσεγγίζουν τις συνθήκες του ελευθέρου χώρου, ειδικά στις υψηλότερες συχνότητες της ζώνης UHF.

Η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αναπτύχθηκε από τον Άγγλο φυσικό James Clerk Maxwell το 1857 και τελειοποιήθηκε το 1873. Αποτελεί την βασική μαθηματική εξήγηση της συμπεριφοράς των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Επειδή η μαθηματική εξήγηση των εξισώσεων του Maxwell δεν είναι το αντικείμενο του βιβλίου αυτού θα δοθεί έμφαση στην περιγραφή και εξήγηση της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων με αναφορές στο μαθηματικό υπόβαθρο όπου απαιτείται.

8-1.1 Βασικές έννοιες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

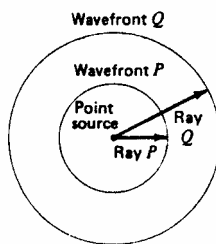
Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι ταλαντώσεις πού μεταδίδονται στον ελεύθερο χώρο με την ταχύτητα του φωτός ($c = 299.792.500 \pm 300m/sec$, για τις περισσότερες εφαρμογές $c = 3 \cdot 10^8 m/sec$). Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έχει πολλές ομοιότητες με την διάδοση των κυμάτων που δημιουργούνται στο νερό όταν μια πέτρα διαταράζει την ισορροπία του, με μια σημαντική διαφορά. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια ενώ τα κύματα στο νερό διαμήκη. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι κάθετα μεταξύ τους όπως δείχνει και το σχήμα 8-1. Αυτή είναι μια θεώρηση που πρακτικά δεν μπορεί να ελεγχθεί αφού τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι μη ορατά. Ωστόσο η θεώρηση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κυμάτων κατά τα φαινόμενα της ανάκλασης της διάθλασης και της περίθλασης.



Σχήμα 8-1. Εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Κύματα στον ελεύθερο χώρο Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που εκπέμπεται από μια σημειακή πηγή διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η διάδοση του κύματος είναι σφαιρική όπως φαίνεται και στο σχήμα 8-2. Για να απλουστεύσουμε την έννοια της διάδοσης φανταζόμαστε ακτίνες που εκπέμπονται από την σημειακή πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις.

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



Σχήμα 8-2. Σφαιρικό μέτωπο κύματος

Όλα τα σημεία εκείνα τα οποία έχουν την ίδια φάση σχηματίζουν ένα επίπεδο το οποίο ονομάζεται μέτωπο κύματος. Αν το μήκος της ακτίνας Q είναι διπλάσιο του P τότε η νέα σφαίρα που δημιουργείται έχει επιφάνεια 4 φορές μεγαλύτερη της σφαίρας ακτίνας P. Αποδεικνύεται, ότι η συνολική ισχύς της σημειακής πηγής εξαπλώνεται καλύπτοντας τετραπλάσια περιοχή (σφαιρική) για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Έτσι αν ορίσουμε την πυκνότητα ισχύος σαν ακτινοβολούμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας τότε η πυκνότητα ισχύος ελαττώνεται στο $\frac{1}{4}$ της τιμής της όταν η απόσταση από την πηγή διπλασιάζεται.

Αποδεικνύεται ότι η πυκνότητα ισχύος είναι αντίστροφα ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή. Ο νόμος αυτός ονομάζεται νόμος του αντίστροφου τετραγώνου και ισχύει για κάθε μορφή διάδοσης στον ελεύθερο χώρο. Έτσι έχουμε:

$$P = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (8-1)$$

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

P_t = ακτινοβολούμενη ισχύς.

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

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

$$\epsilon = fH \quad (8-2)$$

όπου ϵ = ενεργός τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

H = ενεργός τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου

f = χαρακτηριστική αντίσταση του μέσου (Ω)

Η χαρακτηριστική αντίσταση του μέσου δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (8-3)$$

όπου μ = μαγνητική διαπερατότητα του μέσου
 ε = διηλεκτρική σταθερά του μέσου

Για το κενό ισχύουν:

$$\varepsilon = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F / m}$$

$$\mu = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H / m}$$

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

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = 120\pi = 377\Omega \quad (8-4)$$

Η γνώση της χαρακτηριστικής αντίστασης κάνει δυνατό τον υπολογισμό της έντασης του πεδίου σε απόσταση r από την ισοτροπική πηγή. Έτσι όπως στα ηλεκτρικά κυκλώματα ισχύει $P=V^2/Z$, για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ισχύει $P=\varepsilon^2 / Z$. Από την τελευταία εξίσωση και τις εξισώσεις (8-1) και (8-2) προκύπτει:

$$\varepsilon = P \times Z = \frac{P_t}{4\pi r^2} \times 120\pi = \frac{30P_t}{r^2}$$

$$\therefore \varepsilon = \frac{\sqrt{30P_t}}{r} \quad (8-5)$$

Από την εξίσωση (8-5) είναι φανερό ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι αντίστροφα ανάλογη της απόστασης από την πηγή και ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της πυκνότητας ισχύος.

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

Εκπομπή και λήψη Οι κεραιές εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή διαφορετικά ένα κύκλωμα όταν διαρρέετε από ρεύμα υψηλής συχνότητας ακτινοβολεί. Τυχαία το φαινόμενο αυτό είχε αποδειχθεί μαθηματικά από τις εξισώσεις του Maxwell από τις οποίες προκύπτει ότι όταν ένα καλώδιο διαρρέετε από ρεύμα γύρο από αυτό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Επιπρόσθετα αν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται, μεταβάλλοντας το ρεύμα, δημιουργείται και ένα ηλεκτρικό πεδίο επίσης. Όπως θα δειχθεί σε επόμενο κεφάλαιο η ισορροπία του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό.

Πόλωση (Polarization) Όπως φαίνεται στο σχήμα 8-1 το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι εγκάρσιο και το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο είναι κάθετα μεταξύ τους. Το μαγνητικό πεδίο όπως αναφέρθηκε, περιβάλλει το καλώδιο και είναι κάθετο σε αυτό, το οποίο σημαίνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο θα είναι παράλληλο στο καλώδιο. Αυτό ισχύει μετά την εκπομπή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από την κεραία.

Η πόλωση αναφέρεται στον φυσικό προσανατολισμό του εκπεμπόμενου κύματος στον χώρο. Τα κύματα ονομάζονται πολωμένα (γραμμικά πολωμένα) αν έχουν τον ίδιο προσανατολισμό στον χώρο. Είναι χαρακτηριστικό των περισσότερων κεραιών ότι η ακτινοβολία που εκπέμπουν είναι γραμμικά πολωμένη. Για παράδειγμα, μια κάθετη κεραία ακτινοβολεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα των οποίων τα διανύσματα των ηλεκτρικών τους πεδίων είναι κάθετα και παραμένουν κάθετα κατά την διάδοσή τους στον ελεύθερο χώρο. Από την άλλη πλευρά το φως ακτινοβολείται από μη συμφασικές πηγές (όπως το φως που ακτινοβολείται από τον ήλιο) και έχει τα διανύσματα των ηλεκτρικών πεδίων των ακτινών τυχαία καταναμημένα. Αυτό το είδος της πόλωσης ονομάζεται τυχαία πόλωση.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα του σχήματος 8-1 είναι γραμμικά πολωμένο και επίσης κατακόρυφα πολωμένο αφού τα διανύσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετα μεταξύ τους. Γενικά ισχύει ότι η κατεύθυνση της πόλωσης είναι ίδια με την κατεύθυνση της κεραίας. Έτσι κατακόρυφες κεραιές ακτινοβολούν κατακόρυφα πολωμένα κύματα και οριζόντιες κεραιές ακτινοβολούν οριζόντια πολωμένα κύματα. Γενικά επικρατεί η τάση να αναφέρονται κεραιές σαν κατακόρυφα ή οριζόντια πολωμένες παρόλο που αυτό δεν είναι απόλυτα σωστό.

Είναι επίσης πιθανό κεραιές να εκπέμπουν κυκλικά ή ελλειπτικά πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, με αποτέλεσμα η κατεύθυνση του κύματος να περιστρέφεται συνεχώς με ελικοειδή τρόπο.

Λήψη Όπως ένα καλώδιο που μεταφέρει υψίσυχνα ρεύματα περιβάλλεται από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία έτσι και ένα καλώδιο που εισέρχεται μέσα σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα που επάγει σε αυτό το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Με άλλα λόγια αυτό σημαίνει ότι το καλώδιο λαμβάνει μέρος τις ακτινοβολίας του πεδίου και συμπεριφέρεται σαν μια κεραία λήψης. Με βάση το γεγονός ότι η διαδικασία της λήψης είναι αντίθετη της διαδικασίας της εκπομπής, οι κεραιές λήψης και εκπομπής χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο. Έκτός από τον τρόπο που διαχειρίζονται την ισχύ οι κεραιές εκπομπής και λήψης είναι ίδιες. Στην πραγματικότητα ισχύει το θεώρημα της αμοιβαιότητας. Με βάση το θεώρημα αυτό τα χαρακτηριστικά των κεραιών όπως αντίσταση ακτινοβολίας και διάγραμμα ακτινοβολίας παραμένουν ίδια, ανεξάρτητα από την χρήση της κεραίας σαν κεραία εκπομπής ή λήψης.

Εξασθένηση (attenuation) και απορρόφηση (absorption) Ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου δείχνει ότι η πυκνότητα ισχύος ελαττώνεται σημαντικά με την αύξηση της απόστασης από την πηγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Με άλλα λόγια τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξασθενούν καθώς απομακρύνονται από την πηγή και η εξασθένηση είναι ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης που διένυσαν. Η εξασθένηση μετριέται σε dB και συμβαίνει να είναι ίδια αριθμητικά τόσο για την ένταση του πεδίου όσο και για την πυκνότητα ισχύος. Η απόδειξη αυτού ακολουθεί.

Έστω P_1 και ϵ_1 είναι η πυκνότητα ισχύος και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αντίστοιχα, σε απόσταση r_1 από την πηγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αν οι

ίδιες παραδοχές ισχύουν και για P_2 , E_2 και r_2 με $r_2 > r_1$ η εξασθένηση της πυκνότητας ισχύος θα είναι σε dB:

$$\alpha_p = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{\frac{P_t}{4\pi r_1^2}}{\frac{P_t}{4\pi r_2^2}} = 10 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 = 20 \log \frac{r_2}{r_1} \quad (8-6)$$

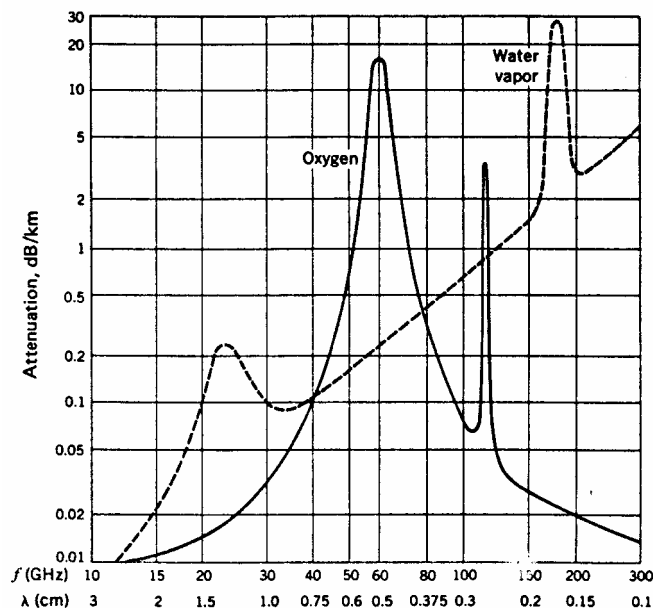
Παρόμοια για την εξασθένηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου θα έχουμε:

$$\alpha_E = 20 \log \frac{\sqrt{30P_t / r_1}}{\sqrt{30P_t / r_2}} = 20 \log \frac{r_2}{r_1} \quad (8-6')$$

Όπως προκύπτει η εξασθένηση είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Έτσι σε απόσταση $2r$ από την πηγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τόσο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου όσο και η πυκνότητα ισχύος του μαγνητικού πεδίου είναι κατά 6dB μικρότερες από την τιμή τους σε απόσταση r από την πηγή.

Στο κενό η έννοια της απορρόφησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δεν υφίσταται μιας και δεν υπάρχει τίποτα που να εμποδίζει την διάδοσή τους. Ωστόσο το σχήμα είναι διαφορετική στην ατμόσφαιρα της γης. Η ατμόσφαιρα απορροφά μέρος της ενέργειας των ραδιοκυμάτων καθώς μέρος της ενέργειας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων απορροφάται από τα άτομα και μόρια της ατμόσφαιρας. Η ανταλλαγή αυτή της ενέργειας έχει σαν αποτέλεσμα τα άτομα και τα μόρια της ατμόσφαιρας που απορρόφησαν την ενέργεια να ταλαντώνονται και η ατμόσφαιρα στο σημείο εκείνο να θερμαίνεται.

Στην πραγματικότητα, η απορρόφηση των ηλεκτρομαγνητικών από την ατμόσφαιρα για συχνότητες κάτω των 10GHz είναι ασήμαντη. Όπως δείχνει και το σχήμα 8-3 η απορρόφηση από το οξυγόνο και τους υδρατμούς(συστατικών της ατμόσφαιρας) σε αυτή τη συχνότητα γίνεται σημαντική και αυξάνει σταδιακά για μεγαλύτερες συχνότητες. Εξαιτίας των διαφορετικών μοριακών συντονισμών στο σχήμα υπάρχουν πολλές κορυφές και η εξασθένηση εμφανίζει πολλά τοπικά μέγιστα. Όπως δείχνει το σχήμα 8-3 οι συχνότητες των 60 και 120 GHz δεν συνίστανται για διάδοση σε μεγάλες αποστάσεις στην ατμόσφαιρα. Επίσης το ίδιο ισχύει και για τις συχνότητες των 23 και 180 GHz εκτός από περιόδους όπου η ατμόσφαιρα είναι ξηρή. Από την άλλη πλευρά το παράθυρο στο οποίο η εξασθένηση είναι μικρή είναι για συχνότητες όπως 33 και 110 GHz.



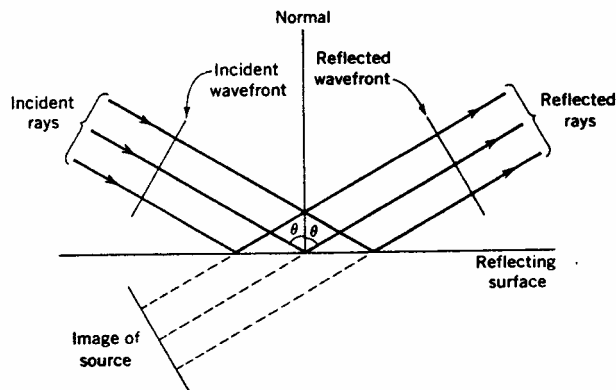
Σχήμα 8-3. Απορρόφηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την ατμόσφαιρα

Η απορρόφηση, όπως δείχνει και το σχήμα 8-3 χωρίζεται σε δύο βασικές συνιστώσες με την απορρόφηση εξαιτίας των υδρατμών να λαμβάνεται για μια συγκεκριμένη τιμή της υγρασίας. Αν η υγρασία αυξηθεί ή αν υπάρχει ομίχλη, βροχή ή χιόνι η απορρόφηση αυξάνεται σημαντικά και ταυτόχρονα υπάρχει το ενδεχόμενο της ανάκλασης(reflection) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από το νερό της βροχής. Για παράδειγμα, ένα radar στα 10 GHz καλύπτει μια περιοχή 75 Km σε ξηρό αέρα, 68 Km για μικρή ψιχάλα, 55 km για σιγανή βροχή, 22Km για μέτρια βροχή και 8 Km για δυνατή βροχή. Επαναλαμβάνεται ότι η εξασθένηση αυτή είναι ασήμαντη για χαμηλές συχνότητες εκτός αν η απόσταση διάδοσης είναι πολύ μεγάλη.

8-1.2 Επίδραση του περιβάλλοντος

Για διάδοση ραδιοκυμάτων κοντά στην επιφάνεια της γης πρέπει να εξεταστούν ορισμένοι παράγοντες οι οποίοι αμελούνται για διάδοση στο κενό. Για παράδειγμα πρέπει να ληφθεί υπ όψιν η ανάκλαση(reflection) των κυμάτων από το έδαφος, τα βουνά και τα κτίρια. Επιπρόσθετα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υφίστανται διάθλαση(refraction)καθώς διαπερνούν διαφορετικά στρώματα της ατμόσφαιρας, τα οποία έχουν διαφορετική πυκνότητα ή διαφορετικό βαθμό ιονισμού. Επίσης, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα περιθλώνται (diffraction) γύρω από αιχμηρά ογκώδη αντικείμενα. Κύματα που προέρχονται από διαφορετικές πηγές αφού διανύσουν διαφορετικές διαδρομές είναι δυνατόν να ενωθούν. Τέλος κύματα είναι δυνατόν να διαδίδονται σε διαφορετικά μέσα.

Ανάκλαση των κυμάτων Υπάρχει ομοιότητα μεταξύ της ανάκλασης του φωτός σε ένα καθρέφτη και της ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα αγωγίμο μέσο. Και στις δύο περιπτώσεις η γωνία ανάκλασης είναι ίδια με την γωνία πρόσπτωσης όπως εικονίζεται στο σχήμα 8-4. Στο παράδειγμα της ανάκλασης του φωτός η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα και η κάθετη στο επίπεδο πρόσπτωσης είναι στο ίδιο επίπεδο.

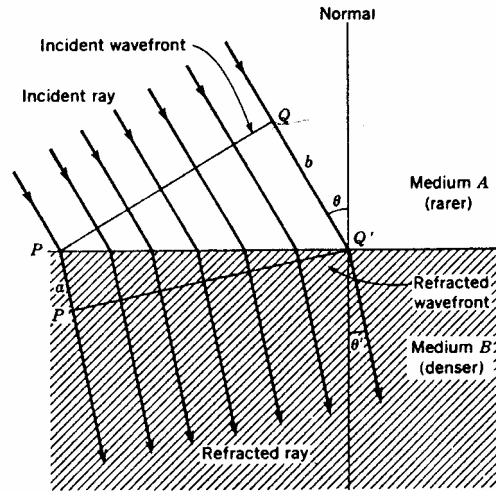


Σχήμα 8-4. Μηχανισμός Ανάκλασης κυμάτων

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

Στη συνέχεια θα δούμε διάφορα σημεία τα οποία σχετίζονται με την ανάκλαση των κυμάτων. Πρώτον, είναι σημαντικό το γεγονός ότι το δάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετο στην αγωγή επιφάνεια. Σε διαφορετική περίπτωση, θα αναπτυχθούν στην επιφάνεια ρεύματα και δεν θα υπάρχει ανάκλαση με την έννοια που έχει αναφερθεί. Δεύτερον, αν η αγωγή επιφάνεια είναι καμπύλη, η ανάκλαση και στην περίπτωση αυτή ακολουθεί την ανάκλαση του φωτός. Τέλος, αν η αγωγή επιφάνεια είναι άγρια, η ανάκλαση θα είναι η ίδια όπως και στο λείο επίπεδο.

Διάθλαση Όπως και στην περίπτωση του φωτός, η διάθλαση λαμβάνει χώρα όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα περάσει από ένα μέσο διάδοσης σε ένα άλλο με διαφορετική πυκνότητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το κύμα να ακολουθεί μια άλλη κατεύθυνση στο δεύτερο μέσο και ταυτόχρονα η ταχύτητα του μεταβάλλεται. Η πιο απλή περίπτωση διάθλασης εικονίζεται στο σχήμα 8-5 όπου στο επίπεδο υπάρχουν δύο μέσα διάδοσης.



Σχήμα 8-5. Διάθλαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Στο σχήμα 8-5 ένα κύμα περνά από το μέσο A στο μέσο B με το προσπίπτων κύμα να σχηματίζει γωνία με το διαχωριστικό όριο διαφορετική από 90 μοίρες. Στο σχήμα το μέτωπο του κύματος P-Q φαίνεται σε ένα στιγμιότυπο όταν διεισδύει στο μέσο B και το μέτωπο του κύματος P'-Q' όταν πλέον έχει ολοκληρωθεί η είσοδός του στο δεύτερο μέσο. Η ακτίνα b διάνυσε απόσταση Q-Q', ανάλογη της ταχύτητάς της στο αραιό μέσο διάδοσης. Όμοια η ακτίνα a διάνυσε απόσταση P-P', ανάλογη της ταχύτητάς της στο πυκνό μέσο διάδοσης. Η απόσταση P-P' είναι μικρότερη της απόστασης Q-Q' διότι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος είναι μικρότερη στο πυκνό μέσο.

Η σχέση μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης θ και της γωνίας διάθλασης θ' υπολογίζεται χρησιμοποιώντας απλές σχέσεις της τριγωνομετρίας και της γεωμετρίας. Από τα τρίγωνα PQQ' και PP'Q' προκύπτει:

$$PQ \sin \theta = P'Q' \sin \theta' \quad (8-7)$$

Έτσι:

$$\frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = \frac{PP' / PQ'}{QQ' / PQ'} = \frac{PP'}{QQ'} = \frac{v_B}{v_A} \quad (8-8)$$

όπου v_A = Ταχύτητα κύματος στο μέσο A

v_B = Ταχύτητα κύματος στο μέσο B

Από την εξίσωση (7-7) γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα διάδοσης κύματος σε ένα διηλεκτρικό μέσο είναι αντίστροφα ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της διηλεκτρικής σταθεράς του μέσου. Έτσι η εξίσωση (8-8) γίνεται:

$$\frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = \sqrt{\frac{k}{k'}} = \frac{1}{\mu} \quad (8-9)$$

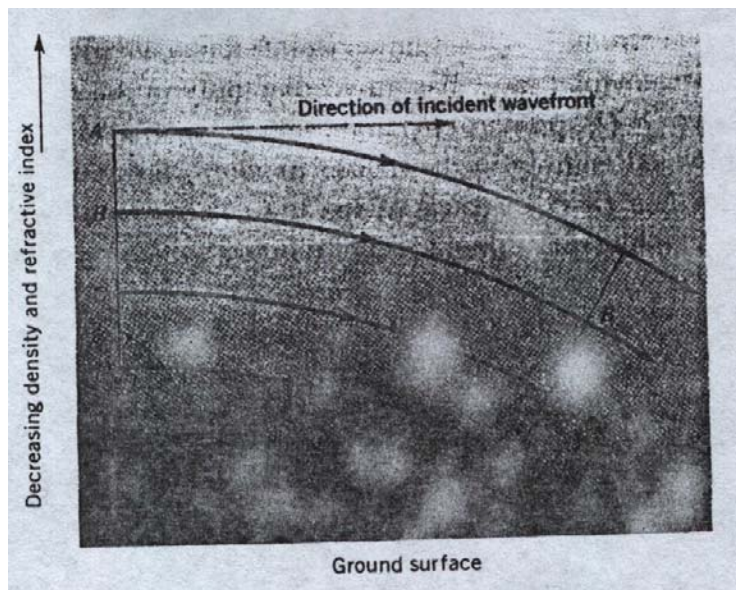
όπου: k = διηλεκτρική σταθερά του μέσου A

k' = διηλεκτρική σταθερά του μέσου B

μ = συντελεστής διάθλασης

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η διηλεκτρική σταθερά είναι 1 για το κενό και σχεδόν 1 για τον αέρα. Η εξίσωση (8-9) είναι γνωστή στην οπτική σαν *νόμος του Snell*.

Όταν το όριο μεταξύ των δύο μέσων είναι καμπύλο, η διάθλαση και σε αυτή την περίπτωση ακολουθεί ότι ακριβώς ισχύει και στην διάθλαση του φωτός. Αν η αλλαγή στην πυκνότητα του μέσου είναι σταδιακή, το φαινόμενο της διάθλασης είναι πιο σύνθετο. Το σχήμα 8-5 δείχνει ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται από το αραιό προς το πυκνό μέσο διαθλώνται προσεγγίζοντας την κάθετο. Έτσι κύματα που διαδίδονται κατά την αντίθετη κατεύθυνση αποκλίνουν πολύ από την κατακόρυφο. Ωστόσο αν η πυκνότητα του μέσου μεταβάλλεται γραμμικά, οι ακτίνες θα καμπυλώνουν προς την κατακόρυφο όπως εικονίζεται και στο σχήμα 8-6.



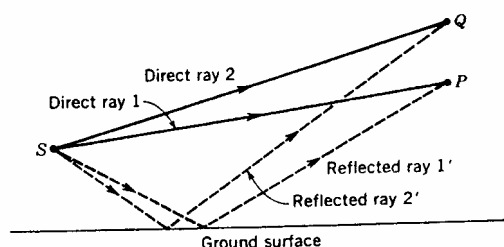
Σχήμα 8-6. Διάθλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μέσο με γραμμική αύξηση των πυκνότητάς του

Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει στην ατμόσφαιρα όπου η πυκνότητά της μεταβάλλεται με το ύψος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να λαμβάνει χώρα μια ασθενής διάθλαση και έτσι τα κύματα αντί να ακολουθούν ευθείες τροχιές καμπυλώνουν σημαντικά. Με αυτό τον τρόπο ο ραδιοορίζοντας αυξάνεται, αλλά τα αποτελέσματα είναι παρατηρήσιμα μόνο για ακτίνες που διαδίδονται οριζόντια. Στην πραγματικότητα αυτό που συμβαίνει είναι ότι η κορυφή του μετώπου του κύματος ταξιδεύει σε πιο αραιή περιοχή της ατμόσφαιρας από ότι η κάτω άκρη του και για αυτό το λόγο ταξιδεύει πιο γρήγορα. Ένα παρόμοιο φαινόμενο συναντάται όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συναντάνε την ιονόσφαιρα.

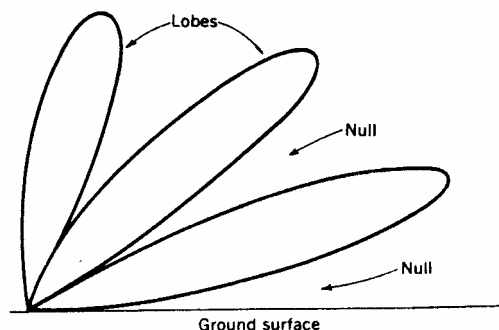
Συμβολή(interference) των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων Συνεχίζοντας τις ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων θα εξετάσουμε το φαινόμενο της συμβολής τους. Συμβολή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έχουμε όταν δύο κύματα φθάνουν στο ίδιο σημείο, διανύοντας διαφορετικές διαδρομές από την πηγή εκπομπής μέχρι το σημείο αυτό. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται συνεχώς σε διαδόσεις κυμάτων υψηλής συχνότητας στην ατμόσφαιρα (παράγραφος 8-2.2) και σε διαδόσεις κυμάτων μικροκυματικής συχνότητας (παράγραφος 8-2.3) . Η δεύτερη περίπτωση θα αναλυθεί στο σημείο αυτό. Έστω ότι έχουμε τοποθετημένη μια μικροκυματική κεραία κοντά στο έδαφος. Τα κύματα τα οποία εκπέμπει φθάνουν στην κεραία λήψης

ακολουθώντας όχι μόνο την απευθείας διάδοση αλλά και τις ανακλάσεις από το έδαφος. Αυτό παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 8-7.

Είναι προφανές ότι το μήκος της απευθείας διαδρομής είναι μικρότερο από το μήκος της διαδρομής του ανακλώμενου κύματος. Για ένα συνδυασμό της συχνότητας και του ύψους της κεραίας από το έδαφος, η διαφορά μεταξύ των διαδρομών 1 και 1' είναι ακριβώς μισό μήκος κύματος. Έτσι αν το έδαφος είναι τέλειος ανακλαστήρας τότε στο σημείο P θα έχουμε πλήρη εξουδετέρωσή του συνιστάμενου κύματος, ενώ αν το έδαφος έχει μη τέλειες ανακλαστικές ιδιότητες τότε στο σημείο λήψης θα έχουμε μερική εξουδετέρωση. Αν πάρουμε ένα άλλο σημείο λήψης Q ώστε η διαφορά στις διαδρομές 2 και 2' να είναι ένα μήκος κύματος τότε, θα έχουμε ενίσχυση των λαμβανόμενων κυμάτων μερική ή ολική ανάλογα με την ανακλαστική ικανότητα του εδάφους. Η εναλλαγή τέτοιων σημείων δημιουργεί ένα διάγραμμα συμβολής, αποτελούμενο από εναλλασσόμενες ενισχύσεις(reinforcements) και εξουδετερώσεις(cancellations) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Το διάγραμμα αυτό εικονίζεται στο σχήμα 8-8.



Σχήμα 8-7. Συμβολή απευθείας και ανακλώμενου υπό του εδάφους κυμάτων



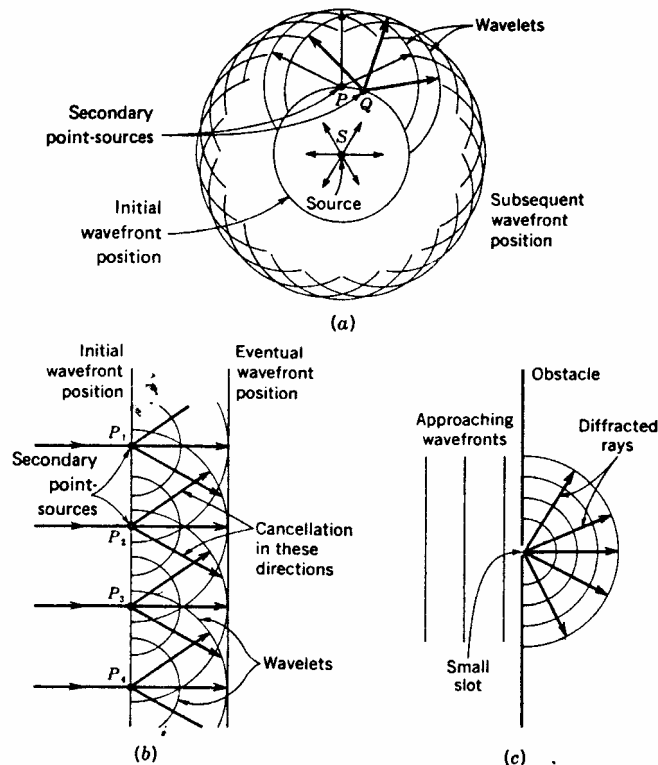
Σχήμα 8-8. Συμβολή κυμάτων. Διάγραμμα ακτινοβολίας

Η καμπύλη στο σχήμα 8-8 ενώνει σημεία τα οποία έχουν την ίδια ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Το διάγραμμα αυτό αναφέρεται σε μια κεραία σε απόσταση από το έδαφος ενός μήκους κύματος, με τις ανακλάσεις από το έδαφος να δημιουργούν συμβολή. Διαγράμματα σαν το παραπάνω μπορούν να σχεδιαστούν για διάφορες τιμές της έντασης του πεδίου. Στο σχήμα 8-8 οι καμπύλες που μοιάζουν με πέταλα λουλουδιού ονομάζονται λοβοί. Οι λοβοί αντιστοιχούν σε σημεία ενίσχυσης όπως το Q στο σχήμα 8-7 και τα μηδενικά(nulls) αντιστοιχούν σε σημεία εξουδετέρωσης P.

Για συχνότητες στην περιοχή VHF η συμβολή των κυμάτων είναι ασήμαντη, επειδή στις συχνότητες αυτές τα μήκη κύματος είναι πολύ μεγάλα. Στις UHF και άνω συχνότητες, η συμβολή των κυμάτων είναι αρκετά σημαντική και πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα radar και σε άλλα μικροκυματικά συστήματα. Για παράδειγμα αν ο στόχος βρίσκεται σε μια κατεύθυνση ενός null, τότε όσο και να αυξηθεί η ισχύς του radar δεν μπορεί να

ανιχνευτεί ο στόχος. Επίσης σημαντικό στοιχείο για τα full range radars είναι η γωνία που σχηματίζει ο πρώτος λοβός με το έδαφος. Στο παράδειγμα αυτό η κεραία εκπομπής είναι οριζόντια και η περιοχή ανίχνευσης από το radar περιορίζεται όχι από την ισχύ εκπομπής και την ευαισθησία του δέκτη αλλά από το γεγονός ότι στην συγκεκριμένη κατεύθυνση υπάρχει null σημείο. Λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να δοθεί ανυψώνοντας την κεραία και στρέφοντάς την προς τα κάτω.

Περίθλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων Η περίθλαση είναι μια άλλη ιδιότητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και προέρχεται από την ύπαρξη σχισμών σε ένα αγωγίμο επίπεδο ή την ύπαρξη αιχμηρών εμποδίων. Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε τον δέκατο έβδομο αιώνα και απετέλεσε την βάση για την ανάπτυξη της θεωρίας του Huygens. Σύμφωνα με το θεώρημα του Huygens κάθε σημείο του μετώπου ενός σφαιρικού κύματος μπορεί να θεωρηθεί σαν μια πηγή κυμάτων, η οποία ακτινοβολεί προς την εξωτερική πλευρά όπως φαίνεται και στο σχήμα 8-9. Το συνολικό πεδίο σε σημεία μακριά από την πηγή είναι ίσο με το διάνυσμα του αθροίσματος των δευτερευόντων αυτών κυματιδίων. Για κανονική διάδοση, το θεώρημα του Huygens δεν λαμβάνεται υπ όψιν αλλά σε περιπτώσεις που ο υπολογισμός της περίθλασης κυμάτων είναι ζητούμενος πρέπει να λαμβάνεται υπ όψιν. Η θεωρία του Huygens μπορεί να αποδειχτεί επίσης και με βάση τις εξισώσεις του Maxwell.

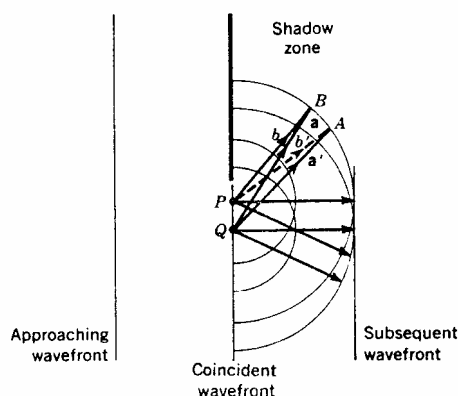


Σχήμα 8-9. Περίθλαση. (α) Σφαιρικό κύμα (β) Επίπεδο κύμα (γ) Δια μέσου μιας μικρής οπής

Ας θεωρήσουμε ένα επίπεδο κύμα, σχήμα 8-9b. Το ερώτημα που γεννάται είναι, γιατί το μέτωπο του κύματος κατά την διάδοσή του συνεχίζει να είναι επίπεδο και δεν απλώνεται προ όλες τις κατευθύνσεις; Η απάντηση είναι ότι αν θεωρήσουμε ένα άπειρο επίπεδο κύμα τότε μαθηματικά αποδεικνύεται ότι σε όλες τις κατευθύνσεις εκτός από την πραγματική του κύματος τα δευτερεύοντα κυματίδια εξουδετερώνονται. Έτσι το μέτωπο του κύματος συνεχίζει να είναι επίπεδο.

Από τη άλλη πλευρά αν θεωρήσουμε ένα πεπερασμένο κύμα, η εξουδετέρωση των δευτερευόντων κυματιδίων δεν είναι πλήρης και λαμβάνουν χώρα φαινόμενα απόκλισης(diverge) ή σκέδασης(scattering). Πιο αναλυτικά, θεωρούμε ένα μικρό κύμα ώστε να μπορεί να διέλθει από μια μικρή οπή ενός αγωγίμου επιπέδου όπως του σχήματος 8-9c. Το κύμα στην περίπτωση αυτή παραμένει επίπεδο μέχρι να διέλθει την οπή οπότε απλώνεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Στην περίπτωση αυτή η οπή δρα σαν μια σημειακή πηγή κυμάτων και ακτινοβολεί προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ακτινοβολία είναι μέγιστη μπροστά από την οπή και στην συνέχεια εξασθενεί σταδιακά.

Το σχήμα 8-10 δείχνει τι συμβαίνει σε ένα επίπεδο κύμα όταν συναντά μια ακμή ενός εμποδίου. Παρατηρούμε ότι το φαινόμενο της περίθλασης λαμβάνει χώρα και στην περίπτωση αυτή για τους ίδιους λόγους όπως και προηγουμένως. Ας θεωρήσουμε δύο σημεία P και Q όπως δείχνει το σχήμα 8-10, τα οποία όπως και προηγουμένως θεωρούνται πηγές κυματιδίων. Παρατηρούμε ότι υπάρχει ακτινοβολία και σε κατευθύνσεις εκτός της κύριας κατεύθυνσης διάδοσης. Αν η ακμή του εμποδίου δε υπήρχε τότε ακτινοβολία εκτός της κύριας διεύθυνσης διάδοσης του κύματος δεν θα είχαμε εξαιτίας της δημιουργίας και άλλων σημειακών πηγών και της αμοιβαίας εξουδετέρωσης μεταξύ τους.



Σχήμα 8-10. Περίθλαση κυμάτων από μια ακμή ενός εμποδίου

Η ακτινοβολία σε μεγάλες αποστάσεις από την ακμή ελαττώνεται αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό όπως στην περίπτωση της οπής διότι λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της συμβολής. Για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, οι ακτίνες a και a' που προέρχονται από τα P, Q αντίστοιχα, έχουν διαφορά διαδρομής μισό μήκος κύματος και για αυτόν το λόγο εξουδετερώνονται. Με παρόμοιο τρόπο, οι ακτίνες b και b' έχουν διαφορά διαδρομής ένα μήκος κύματος και στην περίπτωση αυτή έχουμε το φαινόμενο της ενίσχυσης προς την κατεύθυνση αυτή.

Ο τύπος αυτός της περίθλασης λαμβάνεται υπ όψιν σε δύο πρακτικές περιπτώσεις. Πρώτον, ορισμένες φορές σήματα είναι δυνατόν να λαμβάνονται πίσω από ψηλά κτίρια ή πίσω από βουνά και άλλα παρόμοια εμπόδια σαν αποτέλεσμα της περίθλασης. Δεύτερον, στην σχεδίαση των μικροκυματικών κεραίων.

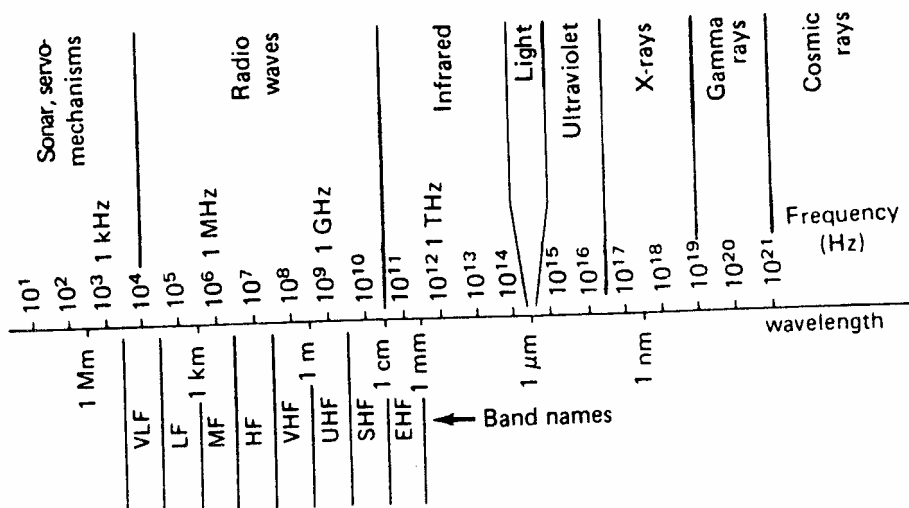
8-2. ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες αυτές καθ' αυτές των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αλλά και από τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας. Επειδή η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών

κυμάτων εξαρτάται σημαντικά από την συχνότητα στο σχήμα 8-11 φαίνεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα συχνοτήτων με τον άξονα της συχνότητας να είναι σε λογαριθμική κλίμακα.

Τα κύματα διαδίδονται σε ευθείες τροχιές εκτός αν η ατμόσφαιρα με τα χαρακτηριστικά της αλλάξουν την πορεία τους. Εκτός ελαχίστων περιπτώσεων κύματα σε συχνότητες άνω της περιοχής HF διαδίδονται σε ευθείες τροχιές. Τα κύματα αυτά ονομάζονται μερικές φορές τροποσφαιρικά κύματα επειδή διαδίδονται στην τροπόσφαιρα, το στρώμα της ατμόσφαιρας πιο κοντά στο έδαφος. Για συχνότητες κάτω από την ζώνη HF τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται γύρω από την γη, ορισμένες φορές κάνοντας πλήρη περιστροφή. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι δημιουργείται ένα είδος κυματοδηγού μεταξύ του χαμηλότερου επιπέδου της ιονόσφαιρας και της επιφάνειας της γης. Τα κύματα αυτά ονομάζονται κύματα επιφανείας και χρησιμοποιούνται για διαδόσεις χωρίς οπτική επαφή.

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα στις συχνότητες της ζώνης HF ανακλώνται από την ιονόσφαιρα και ονομάζονται ουράνια ή ιονοσφαιρικά κύματα. Τέτοιου είδους κύματα εκπέμπονται προς τον ουρανό ανακλώνται από την ιονόσφαιρα και επιστρέφουν στο έδαφος πολύ πέρα από τον ορίζοντα. Για να φθάσουν τα κύματα αυτά σε δέκτες που βρίσκονται στο άλλο ημισφαίριο της γης πρέπει να ανακλαστούν μεταξύ της γης και τη ιονόσφαιρας αρκετές φορές.



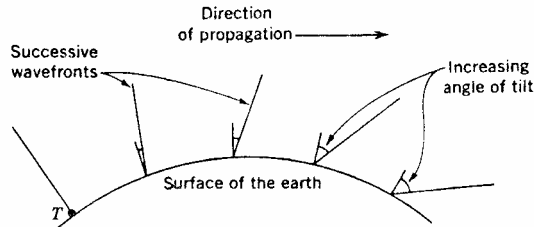
Σχήμα 8-11. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

8-2.1 Κύματα επιφανείας (Ground Waves)

Τα επίγεια κύματα κινούνται κατά μήκος της επιφάνειας της γης και πρέπει να πολωθούν κατακόρυφα προς αποφυγή short circuiting της ηλεκτρικής συνιστώσας. Κατά την διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος κοντά στην επιφάνεια της γης επάγεται ρεύμα στο έδαφος και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μέρος της ενέργειάς του να απορροφάται από αυτό.

Υπάρχει κι άλλος τρόπος εξασθένισης του σήματος. Το κύμα λόγω διάθλασης σταδιακά αποκτά κλίση (tilt), όπως φαίνεται στο σχήμα 8-12. Όσο το κύμα μεταδίδεται επάνω από τη γη αποκτά όλο και μεγαλύτερη κλίση έτσι ώστε να προκαλείται μεγαλύτερο short circuiting της ηλεκτρικής συνιστώσας. Τελικά και σε απόσταση ορισμένων μηκών κύματος μακριά από την κεραία το κύμα «οριζοντιώνεται & πεθαίνει» (lies down and dies). Αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία αφού δείχνει ότι η μέγιστη εμβέλεια ενός τέτοιου πομπού εξαρτάται τόσο από τη

συχνότητα όσο και από την ισχύ μετάδοσης. Έτσι στην VLF μάλιστα η ανεπαρκής εμβέλεια μετάδοσης μπορεί να αντιμετωπιστεί με αύξηση της ισχύος μετάδοσης. Από την άλλη αυτή η μέθοδος δεν δουλεύει κοντά στην κορυφή της MF κλίμακας αφού η μετάδοση εδώ εξαρτάται άμεσα από την κλίση.



Σχήμα 8-12. Διάδοση μέσω κυμάτων εδάφους

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση Κατά την εκπομπή ενός κύματος επιφανείας από μια κεραία εκπομπής αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε μια απόσταση από την πηγή, η οποία υπολογίζεται με χρήση των εξισώσεων του Maxwell. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε Volts/m λαμβάνοντας υπ' όψιν το κέρδος της κεραίας εκπομπής δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{120\pi h_t I}{\lambda d} \quad (8-10)$$

Αν τώρα μία κεραία λήψης τοποθετηθεί στο σημείο αυτό το σήμα που θα λάβει θα είναι σε Volts:

$$V = \frac{120\pi h_t h_r I}{\lambda d} \quad (8-11)$$

όπου:

120π =χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση του ελεύθερου χώρου

h_t =ενεργό μήκος κεραίας μετάδοσης

h_r = ενεργό μήκος κεραίας λήψης

I = ρεύμα που διαρρέει την κεραία εκπομπής

d =απόσταση από την κεραία εκπομπής

λ =μήκος κύματος

Εάν η απόσταση μεταξύ των δύο κεραιών είναι αρκετά μεγάλη η μείωση της ισχύος του πεδίου, που οφείλεται στο έδαφος και την ατμοσφαιρική απορρόφηση, συνεπάγεται μείωση της τιμής των Volts που λαμβάνονται, λιγότερα από αυτά που υπολογίζονται από τη σχέση 8-11. Ο υπολογισμός της μείωσης της ισχύος του κύματος όταν αυτό φθάνει στην κεραία λήψης είναι εφικτός. Η φυσιολογική διαδικασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό της ισχύος του σήματος με τη βοήθεια εμπειρικών γραφημάτων και πινάκων.

Διάδοση στη ζώνη VLF Όταν η διάδοση γίνεται επάνω από καλό αγωγό όπως το θαλασινό νερό, ειδικά σε συχνότητες κάτω από 100kHz, η απορρόφηση λόγω ανάκλασης στην επιφάνεια του νερού είναι μικρή το ίδιο και η εξασθένηση από την ατμόσφαιρα. Η γωνία κλίσης είναι ο κύριος και καθοριστικός παράγοντας σε διαδόσεις μεγάλων αποστάσεων τέτοιων σημάτων. Ο βαθμός κλίσης εξαρτάται από την απόσταση από την κεραία σε μήκη κύματος και συνεπώς έχουμε πρόιμη εξαφάνιση του κύματος επιφάνειας στην HF μετάδοση. Αντίστροφα και λόγω των

μεγάλων μηκών κύματος των VLF σημάτων, τα κύματα σε αυτό το εύρος μπορούν να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις πριν εξαφανιστούν (γύρω από την Γη αν εκπέμφθηκαν με επαρκή ισχύ).

Σε αποστάσεις άνω των 1000 km το κύμα εδάφους (ground or surface wave) είναι εξαιρετικά σταθερό δείχνοντας ασήμαντη ημερήσια, εποχιακή ή ετήσια μεταβολή. Η διάδοση σε τόσο μεγάλες αποστάσεις στην VLF μάλιστα γίνονται συνήθως εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο του τροποσφαιρικού κυματοδηγού ο οποίος και θα αναπτυχθεί παρακάτω. Επίσης, στις συχνότητες αυτές λαμβάνουν χώρα φαινόμενα (μεγάλης ή μικρής διάρκειας) μεταβολής της ισχύος του κύματος με τα πρώτα να περιλαμβάνουν και τον 11-ετή ηλιακό κύκλο. Η ισχύς των σημάτων χαμηλής συχνότητας μεταβάλλεται βαθμιαία τόσο που δεν παρατηρείται απότομη εξασθένιση. Η μετάδοση σε αυτά τα μήκη κύματος επιτυγχάνει αξιόπιστη επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις.

Η διάδοση στην μάλιστα VLF χρησιμοποιείται κυρίως στις «θαλάσσιες επικοινωνίες» αλλά και σε διαδόσεις χρόνου και συχνότητας. Τα πλοία χρησιμοποιούν τις συχνότητες που τους έχουν παραχωρηθεί (10 έως 110 kHz) για ραδιοναυσιπλοΐα και θαλάσσια ασύρματη επικοινωνία. Οι μεταδόσεις χρόνου και συχνότητας γίνονται σε συχνότητες όπως 16 kHz και τα 17.8 kHz. Παρέχουν έτσι μία παγκόσμια ωριαία μετάδοση σταθερών ραδιοσυχνοτήτων, σταθερές χρονικές αποστάσεις, ανακοινώσεις χρόνου, σταθερό μουσικό τόνο, σταθερές ακουστικές συχνότητες και πληροφορίες ραδιομετάδοσης. Αυτές οι υπηρεσίες παρέχονται επίσης και στα HF, τυχαία, από σταθμούς όπως ο WWV (Ft.Collins,Colorado) και ο WWVH(Hawaii) που λειτουργούν στα 2.5 MHz και τις πέντε πρώτες αρμονικές των 5 MHz.

Αφού οι VLF κεραιές είναι σίγουρα αναποτελεσματικές, χρησιμοποιούνται υψηλές ισχύς εκπομπής και πολύ μεγάλα μήκη κεραιών. Έτσι συναντάμε τις περισσότερες φορές ισχύς εκπομπής μεγαλύτερες από 1 MW στην VLF μάλιστα. Για παράδειγμα οι αμερικάνικοι ναυτιλιακοί σταθμοί έχουν συστοιχία κεραιών που αποτελείται από 13 πολύ ψηλά στοιχεία, το ψηλότερο από τα οποία έχει ύψος 387 m, με χαμηλότερη συχνότητα μετάδοσης στα 15 kHz.

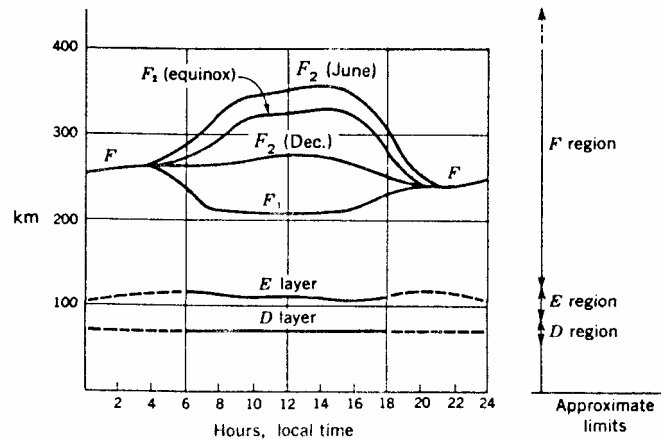
8-2.2 Ουράνια κύματα (Sky waves) - Η Ιονόσφαιρα

Πριν ακόμα το 1925, υπήρχε η υποψία ότι ο ιονισμός των ανωτέρων στρωμάτων της γήινης ατμόσφαιρας παίζει ένα ρόλο στη διάδοση των ραδιοκυμάτων, ειδικά στις υψηλές συχνότητες. Η πειραματική δουλειά του Appleton έδειξε πως η ατμόσφαιρα λαμβάνει επαρκή ενέργεια από τον ήλιο ώστε τα μόριά της να χωρίζονται σε θετικά και αρνητικά ιόντα, τα οποία και παραμένουν ιονισμένα για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Έδειξε επίσης πως διάφορα επίπεδα ιονισμού σε διαφορετικά ύψη της ατμόσφαιρας (υπό ορισμένες συνθήκες) αντανακλούν πίσω στη γη τα κύματα με υψηλές συχνότητες που διαφορετικά θα χάνονταν στο διάστημα. Αυτά τα επίπεδα έχουν συγκεκριμένη επίδραση στη μετάδοση των ραδιοκυμάτων και χρήζουν λεπτομερειακής μελέτης.

Η Ιονόσφαιρα και η επίδρασή της Η ιονόσφαιρα είναι το ανώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας. Απορροφά μεγάλες ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας κι έτσι θερμαίνεται και ιονίζεται. Υπάρχει πληθώρα φυσικών ιδιοτήτων της ιονόσφαιρας, όπως θερμοκρασία, πυκνότητα και σύνθεση. Εξαιτίας αυτών αλλά και των διαφορετικών τύπων ακτινοβολίας που απορροφά, η ιονόσφαιρα τείνει να

διαστρωματώνεται δημιουργώντας έτσι περιοχές με διαφορετικά επίπεδα ιονισμού.. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες ιονισμού είναι η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία α , β και γ , όπως επίσης η κοσμική ακτινοβολία και οι μετεωρίτες. Όλα αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8-13 στην ιονόσφαιρα να σχηματίζονται τέσσερα βασικά επίπεδα D, E, F_1 , F_2 με αύξουσα σειρά. Τα δύο τελευταία συνδυάζονται τη νύχτα για να σχηματίσουν ένα μόνο επίπεδο.

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



Σχήμα 8-13. Τα στρώματα της ιονόσφαιρας της γης

Το στρώμα E ακολουθεί το D και βρίσκεται στα 100 χλμ περίπου, με πάχος 25 χλμ. Όπως και το στρώμα D εξαφανίζεται τη νύχτα. Ο λόγος είναι ο επανασηματισμός των ιόντων σε μόρια, λόγω της απουσίας του ήλιου, όταν ακτινοβολία δε λαμβάνεται πλέον. Τα κύρια χαρακτηριστικά του επιπέδου E είναι η μικρή βοήθεια στην MF (surface-wave) διάδοση και η αντανάκλαση των HF κυμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας.

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

Το στρώμα F_1 , όπως φαίνεται στο σχήμα 8-13, βρίσκεται σε ύψος 180 km την ημέρα, ενώ την νύχτα ενώνεται με το στρώμα F_2 . Το πάχος του την ημέρα είναι περίπου 20 km. Αν και μερικά HF κύματα ανακλώνται από αυτό, τα περισσότερα το διαπερνούν για να ανακλαστούν στο F_2 στρώμα. Η κύρια ιδιότητα του είναι λοιπόν ότι εξασθενεί σε πολύ μεγάλο βαθμό τα HF κύματα μέχρι που χάνονται.

Το στρώμα F_2 είναι το πιο σημαντικό ανακλαστικό μέσο για τα ραδιοκύματα υψηλών συχνοτήτων. Το πάχος του, κατά προσέγγιση, μπορεί να ανέλθει στα 2000 km και το εύρος ύψους του από τα 250 ως τα 400 km την ημέρα. Τη νύχτα πέφτει σε ένα ύψος 300 km, όπου ενώνεται με το F_1 στρώμα. Το ύψος του αλλά και βαθμός ιονισμού του ποικίλουν εξαιρετικά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8-13. Εξαρτώνται

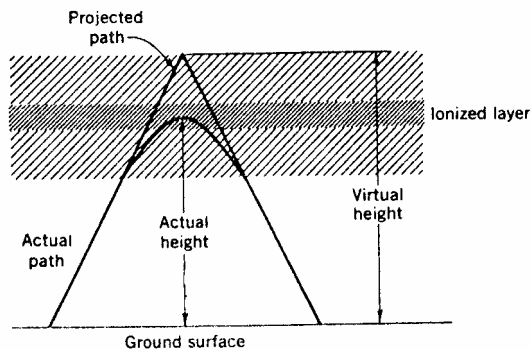
από τη ώρα της ημέρας, τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος και τον ηλιακό κύκλο. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το στρώμα F διατηρείται και την νύχτα σε αντίθεση με τα άλλα στρώματα της ιονόσφαιρας. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό. Ο πρώτος λόγος, είναι το γεγονός ότι είναι το πιο υψηλό στρώμα της ιονόσφαιρας και του μεγαλύτερου βαθμού ιονισμένο κατά συνέπεια υπάρχει η πιθανότητα ο ιονισμός να παραμείνει το βράδυ, σε κάποιο βαθμό τουλάχιστον. Ο δεύτερος κύριος λόγος είναι ότι αν και ο βαθμός ιονισμού είναι υψηλός, δεν συμβαίνει το ίδιο και με την πυκνότητα του αέρα και έτσι τα περισσότερα μόρια σε αυτό είναι ιονισμένα. Επιπλέον αυτή η χαμηλή πυκνότητα δίνει στα μόρια ένα μεγάλο μέσο ελεύθερο μονοπάτι (mean free path) (η στατιστική μέση απόσταση κατά την οποία ένα μόριο ταξιδεύει πριν συγκρουστεί με ένα άλλο μόριο). Αυτή η χαμηλή συχνότητα συγκρούσεων των μορίων σημαίνει πως σε αυτό το επίπεδο ο ιονισμός δεν εξαφανίζεται όταν ο ήλιος ανατέλλει. Τελικά πρέπει να σημειωθεί πως ο λόγος για την καλύτερη HF λήψη κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι ο συνδυασμός των F1 και F2 στρωμάτων σε ένα στρώμα F καθώς επίσης και η εικονική εξαφάνιση των άλλων δύο επιπέδων, που προκαλούσε σημαντική απορρόφηση κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Μηχανισμός Ανάκλασης Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα επιστρέφουν στη Γη αφού ανακλαστούν σε ένα από τα στρώματα της ιονόσφαιρας. Για την ακρίβεια ο μηχανισμός που επιδρά είναι η διάθλαση, περίπτωση παρόμοια με αυτή του σχήματος 8-6. Όσο ο βαθμός ιονισμού αυξάνει, για ένα κύμα που πλησιάζει το δεδομένο στρώμα της ιονόσφαιρας υπό μία γωνία τόσο μειώνεται ο δείκτης διάθλασης του στρώματος. Το προσπίπτων κύμα λοιπόν κυρτώνει όλο και περισσότερο από το κανονικό, όπως φαίνεται στο σχήμα 8-6.

Αν η συχνότητα μεταβολής του δείκτη διάθλασης ανά μονάδα ύψους (μετρούμενη σε μήκη κύματος) είναι επαρκής, η διαθλώμενη ακτίνα τελικά θα γίνει παράλληλη με το στρώμα. Θα κυρτώσει τότε προς τα κάτω, για να ανακλαστεί τελικά από το ιονισμένο στρώμα υπό γωνία ίση με τη γωνία προσπτώσεώς της. Βέβαια στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι λαμβάνει χώρα και κάποια απορρόφηση από το δεδομένο στρώμα της ιονόσφαιρας.

Ορολογία και ορισμοί Η ορολογία που έχει αναπτυχθεί γύρω από την ιονόσφαιρα και τη sky-wave διάδοση περιλαμβάνει διάφορες εκφράσεις και ονομασίες, των οποίων το νόημα δεν είναι εμφανές πάντα.

Το εικονικό ύψος (virtual height) ενός ιονοσφαιρικού επιπέδου γίνεται καλύτερα κατανοητό από το σχήμα 8-14. Το σχήμα δείχνει πως όσο το κύμα διαθλάται, κυρτώνει σταδιακά παρά απότομα. Ωστόσο κάτω από το επίπεδο ιονισμού οι διαθλώμενες ακτίνες ακολουθούν μονοπάτια που είναι τα ίδια με αυτά που θα υπήρχαν αν η διάθλαση είχε προκληθεί από επιφάνεια που θα βρισκόταν σε μεγαλύτερο ύψος το οποίο και καλείται εικονικό ύψος του συγκεκριμένου στρώματος. Αν το εικονικό ύψος είναι γνωστό είναι εύκολο να υπολογιστεί η γωνία προσπτώσεως που απαιτείται ώστε το κύμα να επιστρέψει στο έδαφος και σε ένα συγκεκριμένο σημείο.



Σχήμα 8-14. Πραγματικό και εικονικό ύψος για ένα στρώμα της ιονόσφαιρας

Η κρίσιμη συχνότητα (critical frequency) f_c , για δεδομένο στρώμα, είναι η υψηλότερη συχνότητα ενός κύματος το οποίο θα επιστρέψει στη γη αφού ανακλαστεί από την ιονόσφαιρα. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι υπάρχει μέγιστο και απαραίτητο να γνωρίζουμε την τιμή του υπό συγκεκριμένες συνθήκες, δεδομένου ότι αυτή η τιμή μεταβάλλεται ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Ένα κύμα κυρτώνει προς τα κάτω όταν η συχνότητα αλλαγής του βαθμού ιονισμού της ιονόσφαιρας είναι τέτοια ώστε να το αναγκάσει να ανακλαστεί σε αυτήν. Επίσης προκύπτει πως όσο πιο κάθετη είναι η προσπίπτουσα σε ένα στρώμα της ιονόσφαιρας ακτίνα τόσο πιο πολύ πρέπει να κυρτώσει για να επιστρέψει πίσω στη Γη. Το αποτέλεσμα αυτών των δύο ιδιοτήτων είναι διπλό. Αρχικά όσο πιο υψηλή είναι η συχνότητα τόσο πιο μικρό είναι το μήκος κύματος και λιγότερο πιθανή είναι η αλλαγή στον βαθμό ιονισμού της ιονόσφαιρας ώστε να είναι δυνατή η διάθλαση του κύματος και στην συνέχεια η ανάκλασή του και η επιστροφή του στη γη. διάθλαση. Δεύτερον, όσο πιο κάθετη είναι μια δεδομένη προσπίπτουσα ακτίνα τόσο λιγότερο πιθανό είναι να επιστρέψει στο έδαφος. Αυτό συνεπάγεται πως μία μέγιστη συχνότητα πρέπει να υπάρχει επάνω από την οποία οι ακτίνες διαπερνούν την ιονόσφαιρα. Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι κάθετη η συχνότητα αυτή ονομάζεται κρίσιμη συχνότητα. Οι τιμές της κυμαίνονται μεταξύ 5 και 12 MHz για το F₂ στρώμα.

Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι διαφορετική από 90 μοίρες η παραπάνω συχνότητα ονομάζεται μέγιστη χρησιμοποιούμενη συχνότητα (Maximum usable frequency) MUF. Έτσι για γωνία πρόσπτωσης θ :

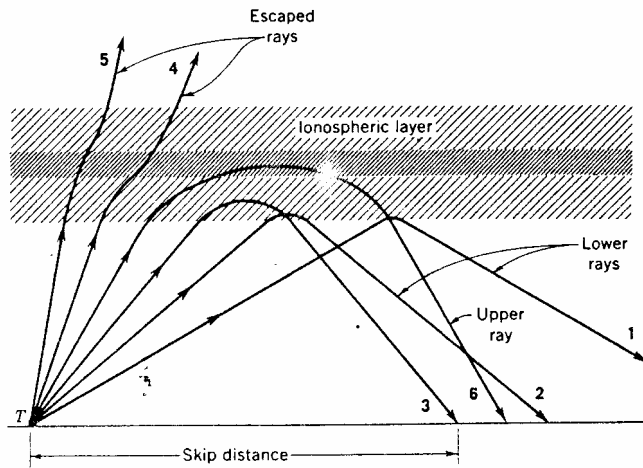
$$MUF = \frac{\text{critical - frequency}}{\cos \theta} \quad (8-12)$$

$$= f_c \sec \theta$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τον ονομαζόμενο secant law και είναι πολύ χρήσιμη για αρχικούς προσεγγιστικούς υπολογισμούς για συγκεκριμένο MUF. Η παραπάνω σχέση ισχύει μόνο για επίπεδη γη και επίπεδη ανακλώμενη επιφάνεια. Παρόλα αυτά η γωνία πρόσπτωσης δεν είναι πρωτεύουσας σημασίας αφού καθορίζεται από την απόσταση μεταξύ των σημείων που θα συνδεθούν για μια sky-wave μετάδοση. Η MUF καθορίζεται από αυτά τα δύο σημεία παρά από τη γωνία πρόσπτωσης στην ιονόσφαιρα. Ορίζεται ως η υψηλότερη συχνότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για sky-wave επικοινωνία μεταξύ δύο δεδομένων σημείων στη γη. Υπάρχουν διαφορετικές τιμές MUF για κάθε ζευγάρι σημείων στη γη. Συνήθεις τιμές για το MUF είναι από 8 έως 35 MHz, αλλά μετά από ασυνήθιστη ηλιακή δραστηριότητα μπορεί να αυξηθούν μέχρι τα 50 MHz. Η υψηλότερη συχνότητα για

μια δεδομένη ζεύξη στην πράξη είναι πάντα μικρότερη από την MUF, αλλά όχι πολύ μικρότερη για λόγους που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Η απόσταση υπερπήδησης (skip distance) είναι η μικρότερη απόσταση από τον πομπό, μετρούμενη στην επιφάνεια της γης, στην οποία ένα sky-wave κύμα συγκεκριμένης συχνότητας (μεγαλύτερη από f_c) θα επιστρέψει στη γη. Σχ. 8-15.



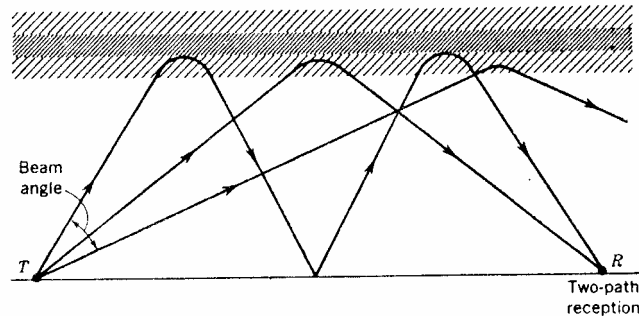
Σχήμα 8-15. Επίδραση της ιονόσφαιρας σε κύματα τα οποία εκπέμπονται με διαφορετικές γωνίες

Όταν η γωνία πρόσπτωσης γίνεται πολύ μεγάλη (σχ.8-15 ακτίνα 1) το κύμα επιστρέφει στο έδαφος σε μία μεγάλη απόσταση από τον πομπό. Όσο αυτή η απόσταση μειώνεται φυσιολογικά το κύμα επιστρέφει όλο και πιο κοντά στον πομπό (ακτίνα 2 και 3). Αν η γωνία γίνει πολύ μικρότερη από αυτή της ακτίνας 3 η ακτίνα θα είναι σχεδόν κατακόρυφη με αποτέλεσμα να μην επιστρέψει στη γη (ακτίνες 4 και 5). Και στις δύο περιπτώσεις η κύρτωση δεν επαρκεί για την επιστροφή του κύματος, εκτός κι αν η συχνότητα που χρησιμοποιείται για επικοινωνία είναι μικρότερη από την κρίσιμη συχνότητα (το πιο συχνό φαινόμενο). Σε αυτή την περίπτωση όλα τα κύματα επιστρέφουν στη γη. Τελικά αν η γωνία πρόσπτωσης είναι λίγο μικρότερη από αυτή της ακτίνας 3, το κύμα μπορεί να επιστρέψει, αλλά η απόσταση θα είναι μεγαλύτερη από αυτή του σημείου επιστροφής της ακτίνας 3 (ακτίνα 6). Η ψηλότερη αυτή ακτίνα κυρτώνει σταδιακά, διότι η πυκνότητα των ιόντων μεταβάλλεται πολύ αργά σε αυτή τη γωνία. Τέλος επιστρέφει στη γη σε μία αξιοσημείωτη απόσταση από τον πομπό και είναι σημαντικά εξασθενημένη.

Η ακτίνα 3 προσπίπτει στο στρώμα της ιονόσφαιρας με μια γωνία τέτοια, που έχει σαν συνέπεια την επιστροφή της κοντά στον πομπό. Η απόσταση αυτή είναι η απόσταση υπερπήδησης (skip distance). Έτσι λοιπόν προκύπτει το συμπέρασμα ότι κάθε ακτίνα που εκπέμπεται με συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας της ακτίνας 3 και με γωνία ίση με την γωνία εκπομπής της ακτίνας 3 δεν θα επιστρέψει στην γη. Έτσι λοιπόν για δύο δοσμένα σημεία στη επιφάνεια της γης η απόσταση υπερπήδησης (skip distance) είναι ίση με την πραγματική τους απόσταση όταν η συχνότητα εκπομπής είναι ίση με την MUF.

Σε αποστάσεις από τον πομπό ίσες με την skip distance μόνο η κανονική ή η μικρότερης γωνίας εκπομπής ακτίνες μπορούν να φτάσουν τον προορισμό, ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις μπορεί να ληφθεί επίσης και η μεγαλύτερης γωνίας εκπομπής ακτίνα προκαλώντας βέβαια παρεμβολή. Αυτός είναι ένας λόγος για τον οποίο δεν χρησιμοποιούνται σε ζεύξεις συχνότητες πολύ μικρότερες της MUF. Ένας άλλος λόγος είναι η έλλειψη κατευθυντικότητας των κεραιών υψηλής συχνότητας. Αν

η χρησιμοποιούμενη συχνότητα είναι αρκετά χαμηλή, είναι πιθανό να λάβουμε χαμηλότερες ακτίνες από δύο διαφορετικά μονοπάτια μετά από ένα ή δύο αναπηδήσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.16, προκαλώντας παρεμβολή.

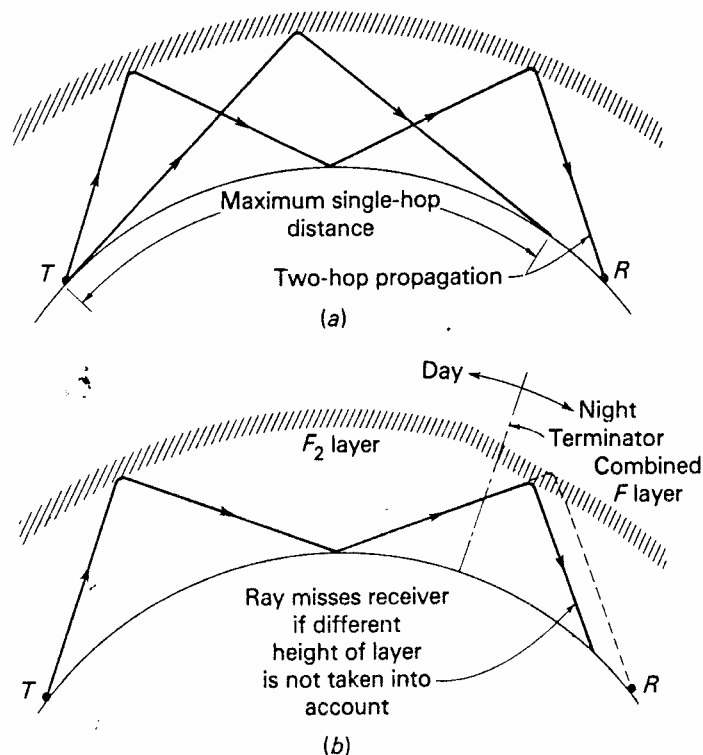


Σχήμα 8-16. Διάδοση και πολυδιόδευση

Το μονοπάτι μετάδοσης (transmission path) περιορίζεται από την απόσταση υπερπήδησης (skip distance) από τη μια και από την καμπυλότητα της γης από την άλλη. Η μακρύτερη απόσταση κατά την οποία η ακτίνα δεν ανακλάται στην επιφάνεια της γης (single hop distance) λαμβάνεται όταν η ακτίνα μεταδίδεται ασυμπτωτικά της επιφάνεια της γης, όπως φαίνεται στο σχήμα 8-17. Για το στρώμα F_2 της ιονόσφαιρας αυτό αντιστοιχεί σε μία μέγιστη απόσταση περίπου 4000 χλμ. Δεδομένου ότι η περίμετρος της γης είναι 20000 χλμ, multi hop διαδρομές συχνά απαιτούνται για point to point communication (σχήμα 8-17). Στο σημείο αυτό πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η διαφορά ώρας σε διάφορες περιοχές της γης μιας και αυτό επιδρά στην σύνθεση της ιονόσφαιρας. Για παράδειγμα αν ζητούμε point to point communications με τον πομπό στην ανατολή και τον δέκτη στη δύση τότε πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι κατά την διάρκεια της μετάδοσης στην πλευρά του πομπού θα είναι μέρα και στην πλευρά του δέκτη νύχτα ή το αντίστροφο με αποτέλεσμα το F_2 στρώμα της ιονόσφαιρας την νύχτα να μην υφίσταται και να γίνεται F_1 . (Σχήμα 8-17b). Το παραπάνω δεν ισχύει για north-south point to point communication. (Σχήμα 8-17a).

Με τον όρο εξασθένιση (fading) εννοούμε τη διακύμανση στην ισχύ ενός σήματος στο δέκτη. Η εξασθένιση (fading) μπορεί να είναι γρήγορη (fast fading) ή αργή (slow fading), γενική ή επιλεκτική-συχνοτήτων (frequency selective fading). Σε κάθε περίπτωση οφείλεται στην παρεμβολή μεταξύ δύο κυμάτων που φεύγουν από την ίδια πηγή αλλά φτάνουν στον προορισμό τους από διαφορετικά μονοπάτια. Επειδή το σήμα που λαμβάνεται κάθε χρονική στιγμή είναι το διανυσματικό άθροισμα όλων των κυμάτων που λαμβάνονται, εξουδετερώσεις και ενισχύσεις θα λάβουν χώρα μεταξύ των κυμάτων (κάθε χρονική στιγμή) των οποίων η διαφορά των διαδρομών από τον πομπό στον δέκτη θα είναι μεγαλύτερη από μισό μήκος κύματος. Αυτό σημαίνει ότι η εξασθένιση (fading) είναι πιο πιθανή με μικρότερα μήκη κύματος δηλαδή σε υψηλότερες συχνότητες.

Η εξασθένιση (fading) μπορεί να παρουσιαστεί λόγω παρεμβολής μεταξύ των χαμηλότερων και υψηλότερων ακτινών ενός ουράνιου κύματος (sky wave), μεταξύ κυμάτων που φθάνουν από διαφορετικά μονοπάτια και μετά από διαφορετικό αριθμό αναπηδήσεων ή ακόμα μεταξύ ενός επίγειου και ενός εναέριου κύματος ειδικά στο χαμηλότερο άκρο της HF μπάνας. Μπορεί επίσης να παρουσιαστεί αν ένα απλό sky wave κύμα λαμβάνεται λόγω των διακυμάνσεων του ύψους ή της πυκνότητας του επιπέδου που αντανακλά το κύμα. Ένας από τους πιο πετυχημένους τρόπους αντιμετώπισης της εξασθένισης (fading) είναι τεχνική space or frequency diversity.



Σχήμα 8-17. Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις.
(a) Από βόρα προς νότο (b) Από ανατολή προς δύση

Επειδή η εξασθένιση είναι συχνοτικά επιλεκτική (frequency selective fading) διαφορετικά στιγμιότυπα του ίδιου κύματος εξασθενούν με διαφορετικό τρόπο. Αυτό είναι πιο πιθανό να συμβεί στις υψηλότερες συχνότητες. Τα AM κύματα υποφέρουν περισσότερο από το φαινόμενο της συχνοτικά επιλεκτικής εξασθένισης. Αντίθετα τα SSB σήματα έχουν καλύτερη συμπεριφορά. Σε κάθε περίπτωση το φαινόμενο της συχνοτικά επιλεκτικής εξασθένισης αντιμετωπίζεται με τεχνικές diversity.

Ιονοσφαιρικές Αποκλίσεις Η Ιονόσφαιρα εξαρτάται πολύ από τον ήλιο και για αυτό οι συνθήκες της και η σύνθεσή της ποικίλουν συνεχώς. Υπάρχουν δύο είδη αποκλίσεων. Οι κανονικές έχουν ήδη περιγραφεί ως ημερήσιες και εποχιακές αλλαγές ύψους και πάχους. Οι ασυνήθιστες αποκλίσεις οφείλονται κύρια στο γεγονός ότι ο ήλιος είναι ένα μεταβλητό αστέρι.

Ο ήλιος έχει ένα 11-ετή κύκλο όπου η ακτινοβολία του παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές. Το γεγονός αυτό δεν είναι ευρέως γνωστό διότι οι αποκλίσεις στη ένταση του φωτός είναι μικρές. Το εύρος της ηλιακής διαταραχής μετράται με μία μέθοδο η οποία ονομάζεται μέτρηση της ηλιακής κηλίδας (sunspot counting) και αναπτύχθηκε από τον Wolf τον δέκατο όγδοο αιώνα.. Σύμφωνα με αυτή, κάθε 11(±1) χρόνια εμφανίζεται ένας κύκλος της ηλιακής δραστηριότητας και ίσως κάθε 90 χρόνια ένας υπέρ-κύκλος. Οι υψηλότερες μετρούμενες δραστηριότητες καταγράφηκαν το 1778, 1871 και το 1957 (υψηλότερη).

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.

Τέλος, το σποραδικό στρώμα E συχνά παρουσιάζεται ως ασυνήθιστη ιονοσφαιρική διαταραχή. Όταν εμφανίζεται προκαλεί το διπλό φαινόμενο της εμπόδισης μακράς-απόστασης HF επικοινωνιών και της διευκόλυνσης VHF επάνω από τον ορίζοντα επικοινωνιών. Τα πραγματικά και φαινομενικά ύψη για επικοινωνίες σε αυτό το στρώμα εμφανίζονται να είναι ίδια. Εδραιώνεται έτσι η αντίληψη ότι το στρώμα αυτό είναι λεπτό και πυκνό, έτσι ώστε να παρατηρείται πραγματική ανάκλαση των κυμάτων.

8-2.3 Κύματα Χώρου

Ο μηχανισμός διάδοσης τους είναι απλός μιάς και μεταδίδονται γενικά σε ευθείες γραμμές. Ωστόσο αφού εξαρτώνται από συνθήκες line-of-sight περιορίζονται στη μετάδοσή τους από την καμπυλότητα της γης, εκτός από πολύ ασυνήθιστες περιπτώσεις. Μεταδίδονται σαν ηλεκτρομαγνητικά κύματα στον ελεύθερο χώρο όπως περιγράφεται στην παράγραφο 8-1.1. Αυτή η συμπεριφορά τους επιβάλλεται διότι τα μήκη κύματός τους είναι πολύ μικρά για ανάκλαση στην ιονόσφαιρα και διότι τα κύματα εδάφους εξαφανίζονται πολύ κοντά στον πομπό.

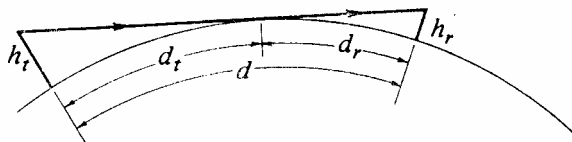
Ραδιοηλεκτρικός Ορίζοντας Ο ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας για κύματα χώρου είναι περίπου τα 4/3 σε μήκος του οπτικού ορίζοντα. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ σημαντική και προκαλείται από την σύσταση της ατμόσφαιρας που περιβάλλει την καμπύλη γη. Προσεγγιστικά, δίνεται από τον εμπειρικό τύπο:

$$d_t = 4\sqrt{h_t} \quad (8-13)$$

όπου d_t =απόσταση από την κεραία μετάδοσης, km
 h_t =ύψος κεραίας μετάδοσης επάνω από τη γη, m

Ο ίδιος τύπος εφαρμόζεται στις κεραίες λήψης. Η συνολική απόσταση δίνεται από τη σχέση (σχήμα 8-18):

$$d = d_t + d_r = 4\sqrt{h_t} + 4\sqrt{h_r} \quad (8-14)$$



Σχήμα 8-18. Ο ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας

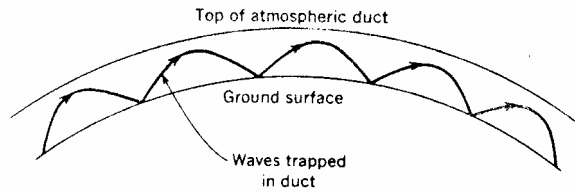
Ένα απλός υπολογισμός δείχνει ότι για μία κεραία μετάδοσης ύψους 255m επάνω από την επιφάνεια της γης, ο ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας είναι 60km. Αν τώρα η κεραία εκπομπή δεν είναι στο έδαφος αλλά σε ύψος 16m από αυτό τότε η απόσταση αυξάνεται στα 76km. Μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ κεραιών επιτυγχάνεται με τοποθέτηση των κεραιών σε κορυφές βουνών. Ραδιοζεύξεις μεγαλύτερες των 1000km σπάνια χρησιμοποιούνται για εμπορικές επικοινωνίες.

Γενικές Θεωρήσεις Όπως αναλυτικά παρουσιάζεται και στην παράγραφο 8-2.2 κάθε ψηλό και ογκώδες αντικείμενο εμποδίζει τα κύματα χώρου που διαδίδονται κοντά στο έδαφος. Προκύπτουν έτσι ζώνες σκίασης και διάθλασης. Γι αυτό χρειάζονται σε ορισμένες περιοχές ψηλότερες κεραιές από αυτές που η θεωρία υποδεικνύει (εξ 8-14). Από την άλλη κάποιες περιοχές λαμβάνουν τέτοια σήματα από ανακλάσεις των κυμάτων από ογκώδη εμπόδια.. Έτσι σε περιοχές έμπροσθεν του εμποδίου μια μορφή παρεμβολής γνωστή ως «ghosting» μπορεί να παρατηρηθεί πχ στην οθόνη ενός δέκτη τηλεόρασης. Προκαλείται από τη διαφορά διαδρομών (άρα και στη φάση) μεταξύ του απευθείας και του ανακλώμενου εκ του εμποδίου κύματος.. Η κατάσταση χειροτερεύει κοντά σε ένα πομπό παρά σε απόσταση από αυτόν, λόγω του ότι οι ανακλώμενες ακτίνες είναι ισχυρότερες εκεί κοντά. Τελικά ισχυρή παρεμβολή υπάρχει σε μια αρκετά μεγάλη απόσταση από τον πομπό μιας και είναι σχεδόν αδύνατο να ληφθούν στο δέκτη ταυτόχρονα τόσο το απευθείας κύμα όσο και το ανακλώμενο.

Μικροκυματική διάδοση κυμάτων Χώρου Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά των κυμάτων για τις χαμηλές και μέσες συχνότητες ισχύουν και για τις μικροκυματικές συχνότητες με κάποιες μικρές παραλλαγές. Στις μικροκυματικές συχνότητες η ατμοσφαιρική απορρόφηση λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Έτσι προκύπτει το γεγονός ότι σε αυτά τα μικρά μήκη κύματος όλα έχουν την τάση να συμβαίνουν πολύ γρήγορα. Η ανάκλαση, η παρεμβολή και η απορρόφηση τείνουν να οξυνθούν. Ένα νέο φαινόμενο που εμφανίζεται στις υψηλές συχνότητες είναι η υπερδιάθλαση (superrefraction) γνωστή και ως κυματοδήγηση (ducting).

Η πυκνότητα του αέρα μειώνεται και ο δείκτης διάθλασης αυξάνεται με το ύψος από το έδαφος. Η αύξηση στο δείκτη διάθλασης είναι κανονικά γραμμική και σταδιακή αλλά κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ένα επίπεδο ζεστού αέρα μπορεί να παγιδευτεί επάνω από ψυχρότερο στρώμα αέρα, συχνά επάνω από την επιφάνεια του νερού. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση του δείκτη διάθλασης πολύ πιο γρήγορα με το ύψος από ό,τι συνήθως. Αυτό συμβαίνει κοντά στο έδαφος, συχνά μέσα στα 30m από αυτό. Η γρήγορη μείωση του δείκτη διάθλασης (και της διηλεκτρικής σταθεράς) προκαλούν στα μικροκύματα, ότι ακριβώς προκαλεί η ιονόσφαιρα στα HF κύματα δηλαδή καμπυλώνουν και κινούνται προς το έδαφος όπως φαίνεται και στο σχήμα 8-19. Τα μικροκύματα συνεχώς διαθλώνται και ανακλώνται από το έδαφος έτσι που μεταδίδονται γύρω από την γη για αποστάσεις που μερικές φορές υπερβαίνουν τα 1000km. Η κύρια απαίτηση είναι η αντιστροφή θερμοκρασίας (temperature inversion). Πρόκειται για αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα με το ύψος αντί της συνηθισμένης

μείωσης στη θερμοκρασία των $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ στην «τυπική» ατμόσφαιρα. Η υπερδιάθλαση (superrefraction) είναι πιο συνηθισμένη σε υποτροπικές παρά σε εύκρατες ζώνες.

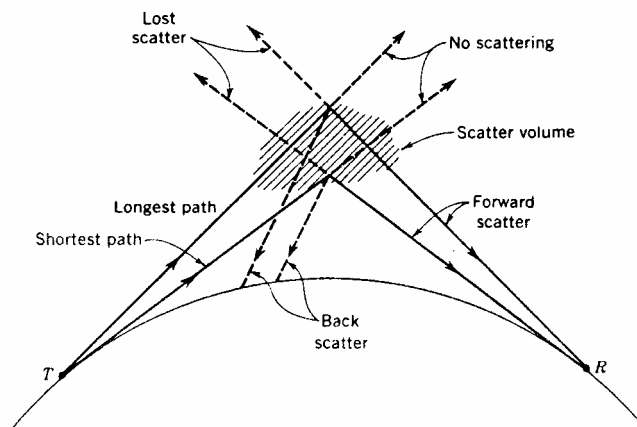


Σχήμα 8-19. Υπερδιάθλαση - Τροποσφαιρικός κυματοδηγός

8-2.4 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 (15km από το έδαφος).

Ιδιότητες Όπως φαίνεται στο σχήμα 8-20 δύο κατευθυντικές κεραιές 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 κεραιά μετάδοσης και η άλλη μία UHF κεραιά λήψης τότε μέσω του φαινομένου της τροποσφαιρικής σκέδασης επαρκής ενέργεια θα κατευθυνθεί προς την κεραιά 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 $1/1000000000$ της προσπίπτουσας ισχύος, οπότε απαιτείται πολύ υψηλή ισχύς μετάδοσης.



Σχήμα 8-20. Διάδοση μέσω τροποσφαιρικής σκέδασης

Πρακτικές Θεωρήσεις Αν και η διάδοση μέσω τροποσφαιρικής σκέδασης προκαλεί ισχυρό fading(εξασθένιση λόγω πολυδιάθλασης) ωστόσο αποτελεί μια πολύ αξιόπιστη μέθοδο για πέρα από τον ορίζοντα επικοινωνία. Αυτή η μέθοδος διάδοσης χρησιμοποιείται συχνά για να παρέχει τηλεφωνικές και άλλου είδους

τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις μακράς απόστασης, ως μία εναλλακτική λύση αντί των μικροκυματικών ζεύξεων ή τις ενσύρματες ζεύξεις μέσω ομοαξονικών καλωδίων. Τυπικές αποστάσεις που καλύπτουν οι παραπάνω ζεύξεις είναι της τάξης των 300 έως 500 χιλιομέτρων.

Τα κύματα κατά την διάδοσή τους μέσω τροποσφαιρικής σκέδασης υφίστανται δύο ειδών αλλοιώσεις. Η πρώτη είναι γρήγορη και εμφανίζεται αρκετά συχνά (κάποιες φορές ανά λεπτό στη χειρότερη περίπτωση), με μέγιστη μεταβολή ισχύος σήματος περίπου 20 dB. Καλείται συχνά και Rayleigh αλλοίωση (fading) και προκαλείται από μετάδοση μέσα από πολλά μονοπάτια (πολυδιόδευση). Στο σχήμα 8.20 φαίνεται ότι η σκέδαση προέρχεται από μία περιοχή και όχι ένα σημείο, έτσι ώστε διάφορα μονοπάτια μετάδοσης να συνυπάρχουν μέσα στην περιοχή σκέδασης. Η δεύτερη μορφή αλλοίωσης είναι πολύ αργότερη και προκαλείται από μεταβολές στην ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά μήκος ενός μονοπατιού.

Έχει διαπιστωθεί ότι τα καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται από μετάδοση μέσω τροποσφαιρικής σκέδασης αν οι κεραιές ανυψωθούν και έπειτα κατευθυνθούν προς τον ορίζοντα. Συνήθως και σε αυτήν την περίπτωση διάδοσης χρησιμοποιούνται τόσο στην εκπομπή όσο και στη λήψη τεχνικές diversity και πιο συγκεκριμένα περισσότερο τεχνικές frequency diversity παρά space diversity. Γενικά σε ζεύξεις σαν την παραπάνω χρησιμοποιούνται MIMO (multiple input multiple output) συστήματα κεραιών.

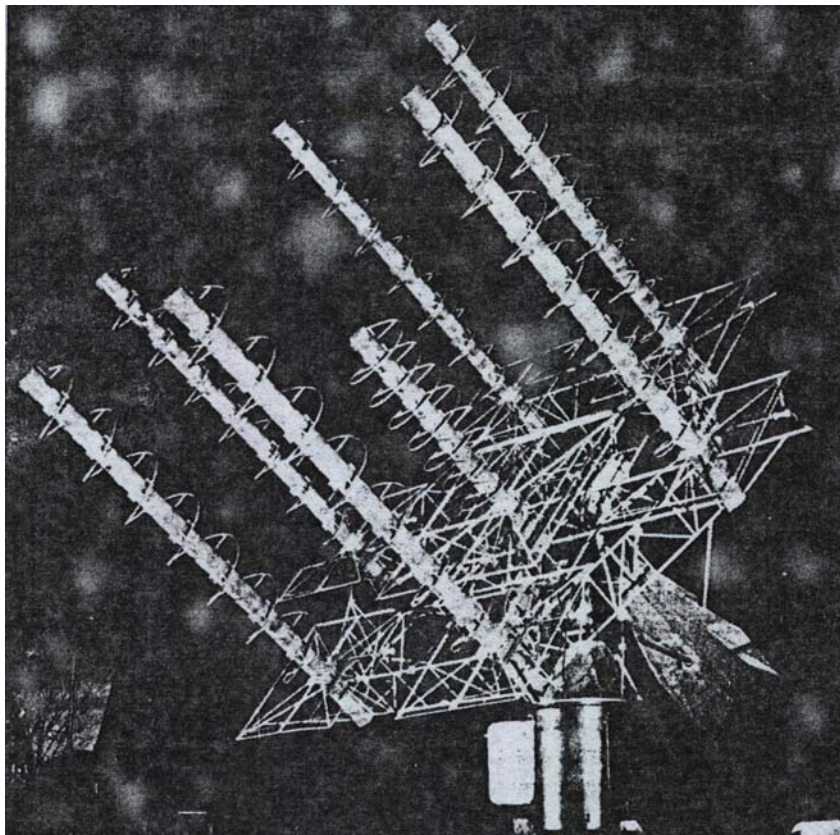
8-2.5 Εξωγήινες Επικοινωνίες

Η πιο πρόσφατος και ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας των τηλεπικοινωνιών περιλαμβάνει τη χρήση διάφορων δορυφόρων, ο πρώτος εκ των οποίων εκτοξεύθηκε το 1957, 12 χρόνια μετά την εγκατάσταση σε τροχιά σταθερών δορυφόρων όπου για πρώτη φορά περιγράφηκαν και υπολογίστηκαν. Ο τομέας χωρίζεται σε τρεις υποτομείς, κάθε ένας από τους οποίους έχει διαφορετικές απαιτήσεις. Ο πρώτος περιλαμβάνει επικοινωνία με χρήση γρήγορα κινούμενων δορυφόρων σε κλειστές τροχιές, τυπικά σε ακτίνα 145 km. Ο δεύτερος υποτομέας περιλαμβάνει επικοινωνίες μέσω γεωστατικών δορυφόρων. Τέτοιο δορυφόροι τοποθετούνται σε τροχιές γύρω από τον ισημερινό σε ύψος 36000 km. Αυτό το ύψος δίνει στο δορυφόρο την ίδια γωνιακή ταχύτητα με τη γη, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται σταθερός επάνω από ένα σταθερό σημείο στον ισημερινό.

Η ιονόσφαιρα όχι μόνο επιτρέπει μετάδοση HF μακράς απόστασης, αλλά επηρεάζει επίσης και τη μετάδοση κυμάτων μέσα της. Στο σχήμα 8.15 φαίνεται ότι τα κύματα που δεν ανακλώνται από την ιονόσφαιρα υφίστανται και αυτά κύρτωση από την αυθεντική τους τροχιά. Αυτό υποδηλώνει άμεσα ότι οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται εδώ χρειάζεται να είναι επάνω από την κρίσιμη συχνότητα για ελαχιστοποίηση της διάθλασής τους. Αν αυτό δε συμβεί σοβαρά σφάλματα εντοπισμού και επικοινωνιακές δυσκολίες θα προκληθούν λόγω της κύρτωσης των ραδιοκυμάτων. Εφόσον η διάθλαση γίνεται ασήμαντη σε συχνότητες επάνω από τα 100 MHz, ενώ η ατμοσφαιρική απορρόφηση είναι αμελητέα μέχρι 14 GHz, αυτές οι δύο θεωρήσεις περιορίζουν το εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιείται στην πράξη.

Ένα πρόβλημα που παρατηρείται σε ζεύξεις αυτής της μορφής είναι το φαινόμενο Faraday. Αυτό προκαλεί πόλωση του ραδιοκύματος, το οποίο περιστρέφεται όταν περνάει από την ιονόσφαιρα. Πρόκειται για πολύπλοκη διεργασία που οφείλεται γενικά στην ύπαρξη ιονισμένων σωματιδίων στην ιονόσφαιρα και στην επίδραση του μαγνητικού πεδίου της γης. Όσο η πυκνότητα των ιόντων στην ιονόσφαιρα μεταβάλλεται το ίδιο συμβαίνει και στο φαινόμενο Faraday σε οποιαδήποτε μετάδοση και έτσι δεν είναι πρακτικό να υπολογίσουμε την έκτασή του

και να κάνουμε τις κατάλληλες θεωρήσεις. Για παράδειγμα μία οριζόντια πολωμένη κεραία θα λάβει σήμα μηδενικής ισχύος από ένα κύμα που πολώθηκε οριζόντια όταν έφυγε από την κεραία εκπομπής αλλά έχει πολωθεί κάθετα από την διέλευση του από την ιονόσφαιρα. Για το παραπάνω παράδειγμα υπάρχουν διάφορες λύσεις. Μία είναι να χρησιμοποιήσουμε μία κεραία με κυκλική πόλωση (Σχήμα 8-21), που μπορεί να εκπέμψει και να λάβει τόσο οριζόντια πολωμένα κύματα όσο και κατακόρυφα. Τέτοια κεραία χρησιμοποιείται για μετάδοση και λήψη σε επίγειους σταθμούς. Μεταδόσεις από και προς ένα δορυφόρο λοιπόν μπορούν να ληφθούν ικανοποιητικά ανεξάρτητα από την περιστροφή του επιπέδου πόλωσής τους στην ιονόσφαιρα. Σημειώνεται ότι η περιστροφή μπορεί να υπερβεί τις 360° σε κάποια από τις χαμηλότερες συχνότητες. Μια άλλη λύση είναι η χρήση συχνοτήτων επάνω από το 1 GHz, στις οποίες η περιστροφή Faraday είναι αμελητέα. Η τάση για διαστημικές τηλεπικοινωνίες είναι η χρήση συχνοτήτων μεταξύ 1 και 14 GHz.



Σχήμα 8-21. Κυκλικά πολωμένη στοιχειοκεραία για εντοπισμό δορυφόρων σε χαμηλές τροχιές

Εντοπισμός Δορυφόρων Οι απαιτήσεις για τον εντοπισμό και την επικοινωνία με δορυφόρους σε κλειστές τροχιές περιλαμβάνουν τη χρήση fast-rotating και κυκλικά πολωμένων κεραιών, μαζί με χαμηλού θορύβου δέκτες και μέσης ισχύος πομπούς. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στις ζεύξεις αυτές είναι από 138 έως 144 MHz. Οι περισσότερες από τις επικοινωνίες είναι τύπου τηλεμετρίας αφού η πλειοψηφία λειτουργιών αυτών των δορυφόρων είναι η συλλογή επιστημονικών και άλλων στοιχείων. Επειδή αυτοί οι δορυφόροι είναι σε χαμηλές τροχιές και συνεπώς περιστρέφονται γύρω από τη γη σε περίπου 90 λεπτά, πρέπει οι κεραιές εδάφους να είναι ικανές για γρήγορη περιστροφή διότι οι δορυφόροι εξαφανίζονται από τον ορίζοντα σε λίγα λεπτά.

Ο εντοπισμός συσκευών εκπομπής δεδομένων (interplanetary probes) (Pioneer ή Voyager probes) είναι πρόβλημα άλλης τάξης, ειδικά αφού οι αποστάσεις

που σχετίζονται μπορεί να είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες. Οι Voyager 1 και 2 επικοινωνούσαν με τη Γη από τον Κρόνο με ισχύ 30 W από περίπου 1.5 δις km μακριά. Φαίνεται λοιπόν ότι στην περίπτωση αυτή υπάρχει απαίτηση για τεράστιες κεραιές και εξαιρετικά χαμηλής ισχύος δέκτες. Ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται από τις κεραιές του δικτύου Deep Space της NASA είναι τάξης μόνο 10^{-17} W. Αυτές οι απαιτήσεις είναι ταυτόσημες με αυτές των ραδιοτηλεσκοπίων που στην πραγματικότητα μερικές φορές χρησιμοποιούνται για εντοπισμό πηγών σήματος από το διάστημα. Οι κεραιές που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι παραβολικοί ανακλαστήρες με διάμετρο γύρω στα 60m.