

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΛΑΜΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**

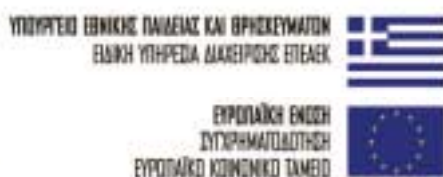
**ΘΕΩΡΙΑ ‘ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ-ΔΙΑΔΟΣΗ
ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ’**

Ο ΔΙΔΑΣΚΩΝ

ΒΑΡΖΑΚΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Η εκτύπωση αυτή έγινε με δαπάνη του Έργου «Αναμόρφωση Προπτυχιακών Προγραμμάτων Σπουδών του ΤΕΙ Λαμίας», Υποέργο 1 «Αναμόρφωση Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών Τμ. Ηλεκτρονικής»



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός του μαθήματος “**Ασύρματες Ζεύξεις-Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων**” είναι η απόκτηση εξοικείωσης με τα φαινόμενα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε πραγματικό περιβάλλον και επιτυχούς επίλυσης των προβλημάτων διάδοσης και ασύρματων ζεύξεων σε ένα σύνθετο περιβάλλον λειτουργίας ενός συστήματος εκπομπής-λήψης. Στόχος του μαθήματος είναι η κατανόηση των βασικών τρόπων μετάδοσης του ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε πραγματικά περιβάλλοντα.

Οι Συμπληρωματικές Σημειώσεις που ακολουθούν έχουν γραφτεί για να συμπληρώσουν τις ανάγκες του Μαθήματος “**Ασύρματες Ζεύξεις-Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων**” του Ζ΄ εξαμήνου του Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρονικής του Τ.Ε.Ι. Λαμίας. Η συγγραφή αυτών των Συμπληρωματικών Διδακτικών Σημειώσεων κρίθηκε απαραίτητη διότι σε αυτές παρουσιάζονται πρόσθετα στοιχεία θεωρίας και παραδείγματα συμπληρώνοντας έτσι το βασικό σύγγραμμα του μαθήματος.

Θα πρέπει να σημειωθεί από το συγγραφέα, ότι η επέκταση, τυχόν διορθώσεις και υποδείξεις στις παρούσες Συμπληρωματικές Σημειώσεις είναι πάντα ευπρόσδεκτες από τους συναδέλφους και τους φοιτητές του Τμήματος Ηλεκτρονικής του Α.Τ.Ε.Ι. Λαμίας.

Δρ. Βαρζάκας Παναγιώτης
Φυσικός-Ραδιοηλεκτρολόγος (M.Sc.)
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Ηλεκτρονικής
Α.Τ.Ε.Ι. Λαμίας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Γενικά
2. Τρόποι διάδοσης των ραδιοκυμάτων-Γενικά
3. Περιοχές συχνοτήτων
4. Ανυσματικά μεγέθη των Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
5. Πόλωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
6. Διάδοση στο κενό
7. Απώλειες ενέργειας στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
- 8.1 Κύματα εδάφους
- 8.2. Εύρεση έντασης ηλεκτρομαγνητικού κύματος για διάδοση με κύμα εδάφους
- 8.3 Διάδοση στη περιοχή συχνοτήτων VLF
9. Τροποσφαιρική διάδοση
- 9.1 Οπτικός ορίζοντας-Ευθύγραμμη διάδοση
- 9.2 Τροποσφαιρική διάθλαση
- 9.3 Ραδιο-Οπτικός (Ραδιο-ηλεκτρικός) ορίζοντας
- 9.4 Υπερ-διάθλαση-Τροποσφαιρικός Κυματοδηγός
- 9.5 Τροποσφαιρική σκέδαση
- 9.6. Απορρόφηση και Σκέδαση λόγω αερίων και υδρατμών
- 9.7 Εξασθένηση λόγω υδρατμών
- 9.8 Εξασθένηση λόγω οξυγόνου
- 9.9 Απορρόφηση και Σκέδαση λόγω Βροχής
- 9.10 Απορρόφηση και σκέδαση λόγω στερεών σωματιδίων
- 9.11 Περίθλαση κυμάτων στην τροπόσφαιρα-Ζώνες Fresnel
10. Ιονόσφαιρα
- 10.1 Ιονισμός της πραγματικής ατμόσφαιρας
- 10.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της ιονόσφαιρας
- 10.3 Διάδοση κύματος στην Ιονόσφαιρα
- 10.4 Διάθλαση και ανάκλαση των κυμάτων από την Ιονόσφαιρα
- 10.5 Μέγιστη και άριστη χρησιμοποιήσιμη Συχνότητα
- 10.6 Ιονοσφαιρική σκέδαση
- 10.7 Διαλείψεις στην Ιονοσφαιρική διάδοση
- 10.8 Ιονοσφαιρικές αποκλίσεις

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Π1. Μοντέλο διάδοσης πάνω από επίπεδη γη
- Π.2 Γενικευμένο μοντέλο διάδοσης
- Π.3 Στατιστικά μοντέλα διάδοσης
- Π.4 Στατιστική περιγραφή καναλιού πολλαπλών διαδρομών
- Π.5 Στατιστική περιγραφή της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος
- Π.6 Μέθοδοι διαφορικής λήψης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

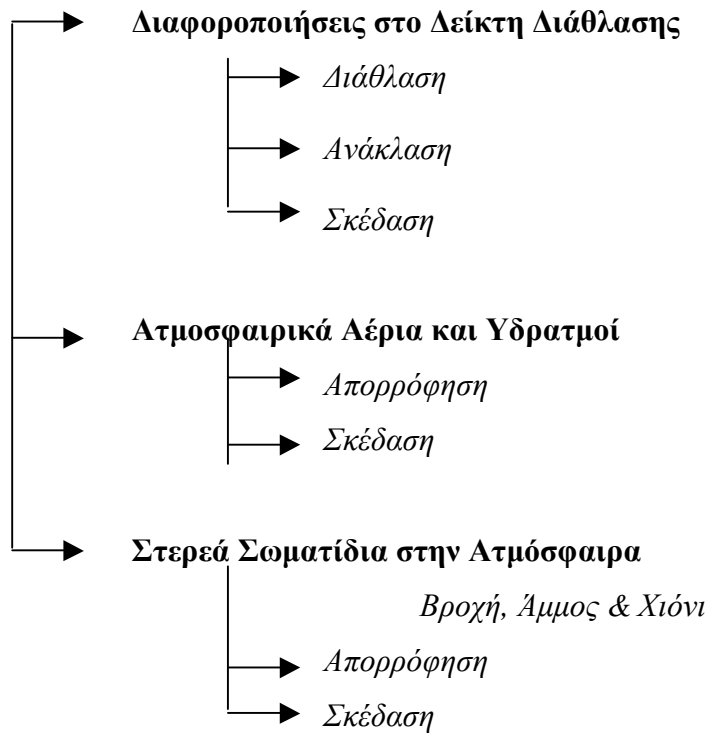
1.Γενικά

Η μελέτη της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αποτελεί ένα από τα πλέον σύνθετα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής μετάδοσης. Το πλέον απλό μοντέλο μελέτης μιας ραδιοζεύξης, είναι αυτό της διάδοσης στον **ελεύθερο χώρο** (free space) δηλαδή σε ένα χώρο θεωρητικά άπειρης έκτασης, με ομοιογενή χαρακτηριστικά και με μηδενικές απώλειες. Η διάδοση και οι απώλειες σύμφωνα με αυτό το μοντέλο ονομάζονται **διάδοση ελεύθερου χώρου** και **απώλειες ελεύθερου χώρου**, αντίστοιχα.

Το προηγούμενο μοντέλο δεν είναι επαρκές για τη μελέτη των πραγματικών προβλημάτων μετάδοσης, διότι η γήινη ατμόσφαιρα, που είναι ο χώρος μετάδοσης των ραδιοκυμάτων, δεν είναι ομοιογενής. Για παράδειγμα, ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες (θερμοκρασία, πίεση και υγρασία), παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις ως προς τη διηλεκτρική επιτρεπτότητα (διηλεκτρική σταθερά) ε της ατμόσφαιρας. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρουσιάζονται φαινόμενα διάθλασης και σε ειδικές περιπτώσεις ακόμη και ανάκλασης ή σκέδασης των ραδιοκυμάτων. Επιπλέον, η ατμόσφαιρα περιέχει αέρια, υδρατμούς καθώς και στερεά σωματίδια που μπορούν να προκαλέσουν φαινόμενα εξασθένησης ή και σκέδασης των ραδιοκυμάτων.

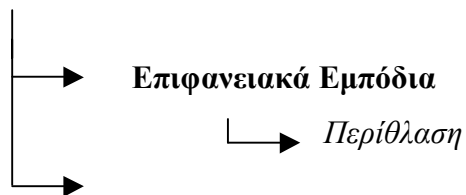
Η ύπαρξη της γήινης επιφάνειας επιδρά στη διάδοση, διότι εμφανίζονται φαινόμενα ανακλάσεων και περιθλάσεων, που προκαλούν απώλειες και παρεμβολές στο λαμβανόμενο σήμα. Επομένως, το μοντέλο της ελεύθερης διάδοσης χρήζει μιας επιπλέον διόρθωσης, εφόσον ληφθεί υπόψη η επίδραση της γήινης επιφάνειας και των φυσικών ή τεχνικών εμποδίων πάνω της.

- Διάδοση Ελεύθερου Χώρου
- Επίδραση της Ατμόσφαιράς



•

- Επίδραση του Εδάφους



Επιφάνεια

2. Τρόποι διάδοσης των ραδιοκυμάτων-Γενικά

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά τη διάδοση τους από την κεραία του πομπού στην κεραία του δέκτη ακολουθούν κύριος δυο διαφορετικούς δρόμους. Ένα τμήμα τους διαδίδεται πάνω από την επιφάνεια της γης και σχηματίζει το ονομαζόμενο **επιφανειακό κύμα** η **έρπον κύμα** η **κύμα εδάφους**. Ένα άλλο τμήμα τους εκπέμπεται με γωνία προς την επιφάνεια της γης και διαδίδεται κατά μήκος των ανωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Το τμήμα αυτό ονομάζεται **κύμα χώρου**.

Η απόσταση στην οποία διαδίδεται το κύμα εδάφους εξαρτάται από τα συστατικά, τη μορφολογία του εδάφους και από τη συχνότητα f του εκπεμπόμενου κύματος. Η γη είναι ταυτόχρονα και αγωγός και μονωτής και για αυτό σημαντική ενέργεια των κυμάτων εδάφους, λόγω της συμπεριφοράς μονωτή, απορροφάται από αυτήν. Αντίθετα, αν το κύμα συναντήσει αγωγίμη επιφάνεια όπως π.χ. είναι η επιφάνεια του νερού τότε διαδίδεται σχεδόν χωρίς απώλεια ενέργειας. Η απορρόφηση των κυμάτων εδάφους είναι διαφορετική για τις διάφορες συχνότητες. Όσο πιο μικρό είναι το μήκος κύματος λ του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (μεγάλη συχνότητα f) τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση του από το έδαφος. Αντίθετα τα μεγαλύτερα μήκη κύματος λ ακολουθούν την καμπυλότητα της γης και υπερπηδούν τα εμπόδια (βουνά, λόφους κ.α.) που συναντούν στο δρόμο τους και έτσι οι μικρότερες συχνότητες διαδίδονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Οι ασύρματες ζεύξεις σε μεγαλύτερες αποστάσεις πραγματοποιούνται με τη βοήθεια των κυμάτων χώρου. Τα κύματα χώρου ανακλώνται από τα ανωτέρα στρώματα της ατμόσφαιρας (**ιονόσφαιρα**). Η ιονόσφαιρα αποτελείται από ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα τα οποία σχηματίζονται λόγω της υπεριώδους ακτινοβολίας του ήλιου. Γενικά ο βαθμός ιονισμού της ιονόσφαιρας εξαρτάται από την ηλιακή δραστηριότητα.

Τέλος, ένα τμήμα των εκπεμπόμενων κυμάτων διαδίδεται κατά μήκος των κατωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας (**τροπόσφαιρα**) και μεταξύ κεραιών εκπομπής και λήψης οι οποίες βρίσκονται σε οπτική επαφή.

3. Περιοχές συχνοτήτων

Το φάσμα των συχνοτήτων που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες εκτείνεται από 10^4 Hz έως 10^{12} Hz. Η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ελεύθερο χώρο (κενό) δεν εξαρτάται από τη συχνότητα του κύματος και είναι ίση με $c=3 \cdot 10^8$ m/sec. Το μήκος κύματος λ για ένα ηλεκτρομαγνητικού κύμα συχνότητας f υπολογίζεται από την επόμενη σχέση:

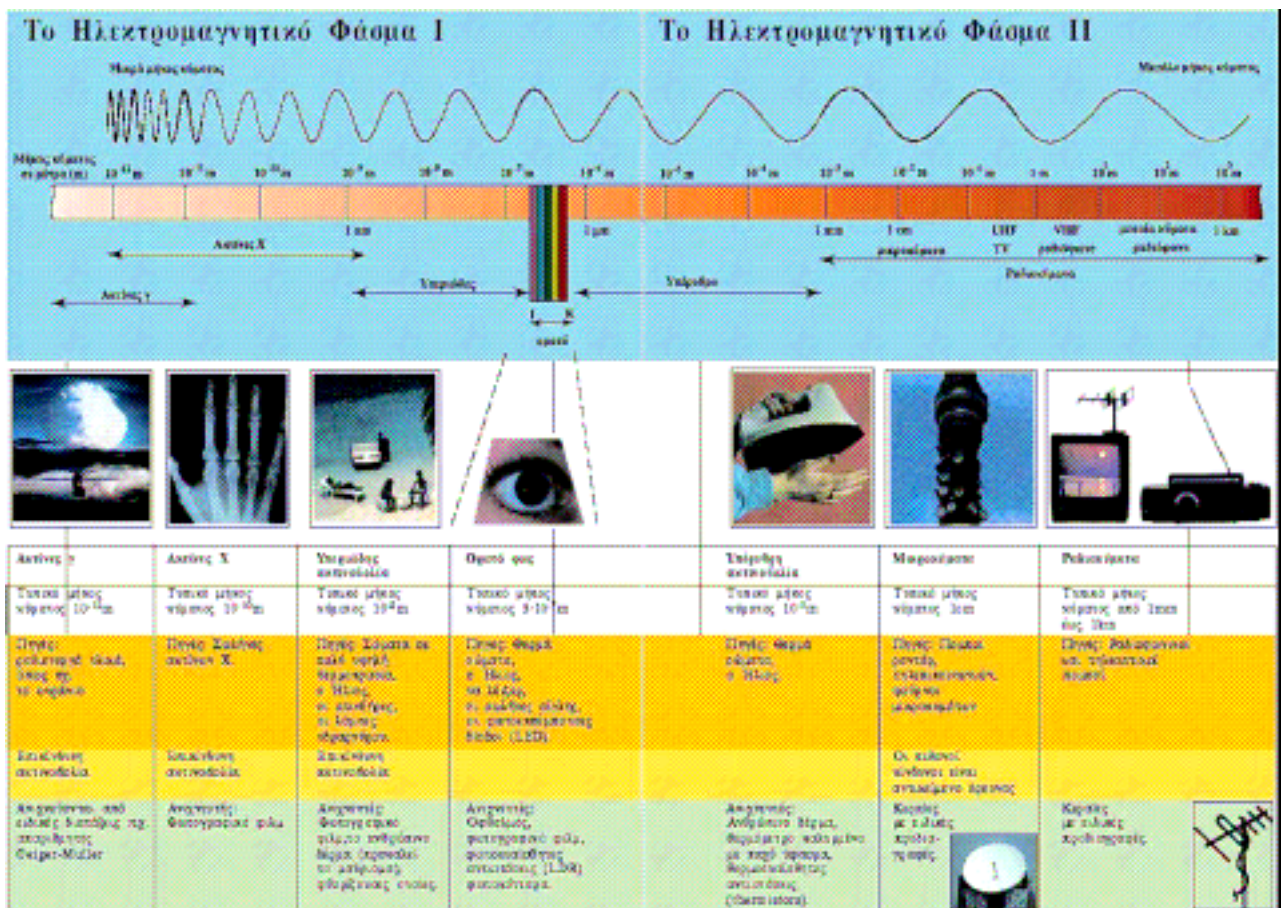
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να ταξινομηθούν όπως παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

Περιοχή Συχνοτήτων	Μήκος κύματος λ	Ονομασία περιοχής συχνοτήτων	Σύμβολο
3-30KHz	100-10Km	Πολύ χαμηλές	VLF (Very Low Frequencies)
30-300KHz	10Km-1Km	Χαμηλές	LF Low Frequencies)
300KHz-3MHz	1Km-100m	Μεσαίες	MF (Medium Frequencies)
3MHz-30MHz	100m-10m	Υψηλές	HF (High Frequencies)

30MHz-300MHz	10m-1m	Πολύ Υψηλές	VHF (Very High Frequencies)
300MHz-3GHz	1m-10cm	Εξαιρετικά Υψηλές	UHF (Ultra High Frequencies)
3GHz-30GHz	10cm-1cm	Υπερ-υψηλές	SHF (Super High Frequencies)
30GHz-300GHz	1cm-1mm	Υπερβολικά Υψηλές Υψηλές Υψηλές	EHF (Extra High Frequencies)

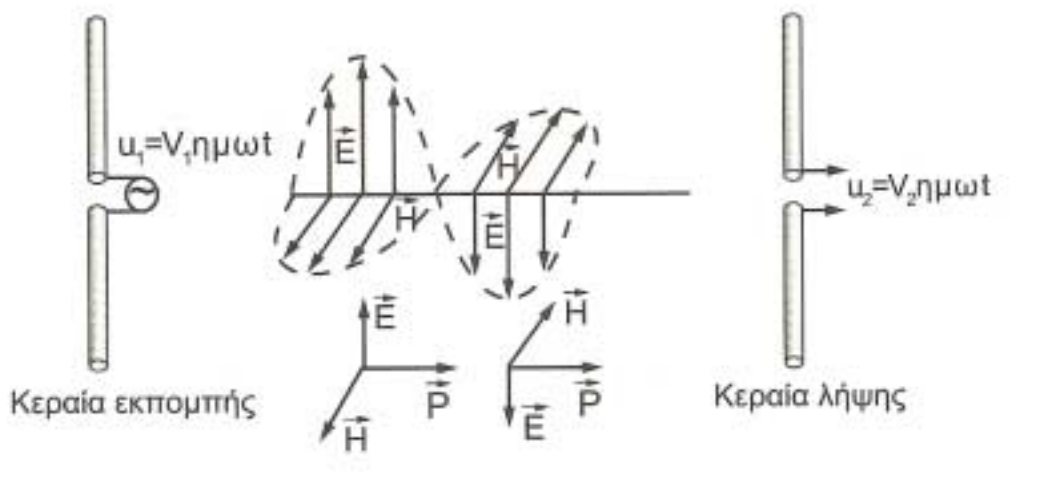
Στο επόμενο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται οι διάφορες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και οι αντίστοιχες εφαρμογές.



Σχήμα 3.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

4. Ανυσματικά μεγέθη των Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Από την Ηλεκτρομαγνητική θεωρία είναι γνωστό ότι κινούμενα φορτία με μεταβαλλόμενη ταχύτητα δημιουργούν γύρω τους ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτό το πεδίο «ταξιδεύει» και η ενέργεια του «μεταφέρεται». Για να έχουμε εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πρέπει να υπάρχουν φορτία κινούμενα με μεταβαλλόμενη ταχύτητα. Ας υποθέσουμε τώρα ότι έχουμε μια κεραία εκπομπής κατακόρυφη, όπως στο Σχημα 4.1, που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ημιτονικό ρεύμα. Παρατηρούμε ότι η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού κύματος φεύγει από την κεραία εκπομπής και μπορεί να ληφθεί από την κεραία λήψης. Το ηλεκτρικό πεδίο μεταβαλλόμενο διαδίδεται ημιτονικά στο γύρω χώρο. Το άνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} στην περίπτωση του Σχ. 4.1 είναι παράλληλο προς την κεραία εκπομπής και το άνυσμα του μαγνητικού πεδίου \vec{H} είναι κάθετο προς αυτήν. Τα δύο ανύσματα είναι κάθετα μεταξύ τους και το επίπεδο που σχηματίζουν είναι κάθετο προς τη διεύθυνση που διαδίδεται το κύμα. Δηλαδή τα ανύσματα \vec{E} και \vec{H} είναι κάθετα στη διεύθυνση \vec{P} .



Σχήμα 4.1. Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Ονομάζουμε **άνυσμα Poynting** \vec{P} το εξωτερικό γινόμενο των ανυσμάτων \vec{E} και \vec{H} .

Ισχύει δηλαδή:

$$\vec{P} = \vec{E} * \vec{H} \quad (4.1)$$

Αν πάρουμε το μέτρο του \vec{P} , το οποίο θα συμβολίζουμε με P, τότε ισχύει :

$$P = E * H * \eta \mu \varphi \quad (4.2)$$

όπου φ είναι η γωνία που σχηματίζουν τα ανύσματα \vec{E} και \vec{H} σε μοίρες (deg) ή σε ακτίνια (rad). Για $\eta\mu\varphi = \eta\mu 90^\circ = 1$, όπως στο Σχ.4.1 ισχύει:

$$[P] = [EH] \quad \left(\frac{V}{m} \frac{A}{m} \right) = \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4.3)$$

Βλέπουμε δηλαδή ότι το μέτρο P του ανύσματος Poynting \vec{P} μας δίνει την ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας (πυκνότητα ισχύος) που μεταφέρεται στο χώρο και η κατεύθυνση του ανύσματος \vec{P} μας δίνει την κατεύθυνση προς την οποία ταξιδεύει η ενέργεια αυτή.

5. Πόλωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

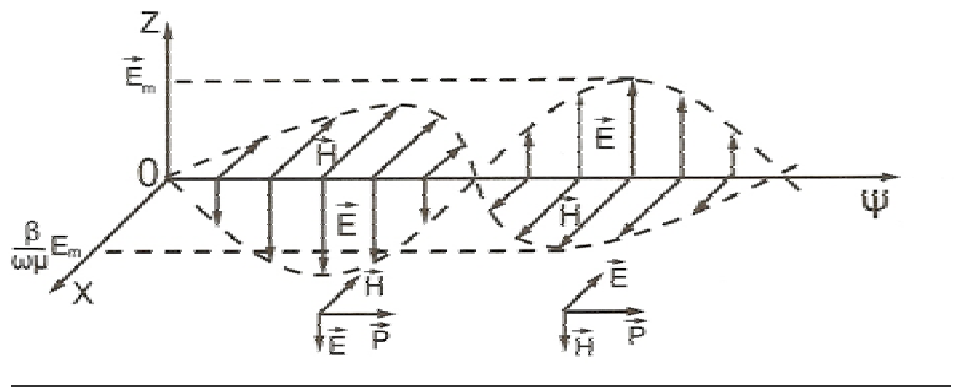
Όταν αναφερόμαστε στην **πόλωση** του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (ραδιοκύματος, φωτός, κλπ.) δεν εννοούμε το ίδιο το κύμα, αλλά το ηλεκτρικό του πεδίο E . Όταν λέμε π.χ. ότι το φως του ήλιου ή το φως ενός λαμπτήρα πυράκτωσης είναι απόλωτο (μη πολωμένο), εννοούμε ότι το ηλεκτρικό του πεδίο δεν έχει σταθερό προσανατολισμό στο χώρο, αλλά έχει τυχαίες κατευθύνσεις. Αν αυτό το φως πέσει σε μια επιφάνεια και ανακλαστεί, τότε θα είναι πολωμένο, δηλαδή το ηλεκτρικό του πεδίο στο χώρο θα έχει σταθερή διεύθυνση. Πράγματι επειδή το ηλεκτρικό πεδίο πέφτοντας πάνω σε μια επιφάνεια μπορεί να κινήσει ελεύθερα ή δεσμευμένα ηλεκτρόνια μόνο πάνω στην επιφάνεια και παράλληλα προς αυτήν, το ανακλώμενο φως θα έχει ηλεκτρικό πεδίο σταθερά προσανατολισμένο παράλληλα προς την ανακλούσα επιφάνεια.

Αν το ηλεκτρικό πεδίο E , καθώς διαδίδεται το κύμα, βρίσκεται συνεχώς πάνω σ' ένα επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση διάδοσής του, τότε λέμε ότι το κύμα είναι **γραμμικά ή επίπεδα πολωμένο** (linear or plane polarized wave). Γενικά μπορούμε να διακρίνουμε δύο κατηγορίες επίπεδων κυμάτων:

α) αυτά που το ηλεκτρικό τους πεδίο παραμένει σταθερά σε μια διεύθυνση του χώρου πάνω στο επίπεδο (οριζόντια πολωμένο, κάθετα πολωμένο, κλπ.)

β) αυτά που το ηλεκτρικό τους πεδίο περιστρέφεται πάνω στο επίπεδο (κυκλικά δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα πολωμένο, ελλειπτικά δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα πολωμένο, κλπ.).

Γενικά χαρακτηρίζουμε ως πόλωση του κύματος τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο σε σχέση με κάποια επιφάνεια αναφοράς. Ειδικά όμως για κεραίες εκπομπής ως πόλωση του κύματος θεωρούμε τη διεύθυνση της κεραίας ως προς την επιφάνεια της Γης και όχι τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου του ως προς την επιφάνειά της. Στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρικό πεδίο μιας οριζόντιας κεραίας είναι παράλληλο με την επιφάνεια της Γης, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο μιας κάθετης κεραίας δεν είναι πάντα κάθετο με την επιφάνειά της. Στην πραγματικότητα δεν είναι το κύμα κάθετα πολωμένο, αλλά η κεραία είναι κάθετη ως προς κάποιο σημείο αναφοράς, που συνήθως είναι η επιφάνεια της Γης. Στην περίπτωση αυτή καταχρηστικά θεωρούμε ότι το κύμα που προέρχεται από μια κατακόρυφη κεραία, είναι και αυτό κατακόρυφα πολωμένο (Σχ.5.1).



Σχήμα 5.1 Κατακόρυφα πολωμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

6. Διάδοση στο κενό

Με τον όρο **ελεύθερο χώρο** (free space) εννοούμε ένα χώρο στον οποίο 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 σε αυτόν. Ακόμη οι συνθήκες διάδοσης μερικές φορές στην πραγματικότητα προσεγγίζουν τις συνθήκες του ελευθέρου χώρου, ειδικά στις υψηλότερες συχνότητες της ζώνης UHF.

Ας υποθέσουμε ότι η κεραία εκπομπής είναι **ισοτροπική** δηλαδή το εκπεμπόμενο κύμα από αυτή είναι σφαιρικό. Έστω P_t η ισχύς της κεραίας. Η επιφάνεια μιας σφαίρας είναι ίση με $4\pi r^2$. Συνεπώς η πυκνότητα ισχύος σε απόσταση r από την κεραία είναι ίση με:

$$P_d = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (6.1)$$

Η πυκνότητα ισχύος σε απόσταση r από τον πομπό είναι ίση με το μέτρο του ανύσματος Poynting δηλαδή:

$$P_d = P = EH \Rightarrow \frac{P_t}{4\pi r^2} = \frac{E_r^2}{Z_c} \quad (6.2)$$

Απο τη σχέση (6.2) υπολογίζουμε την ένταση του λαμβανομένου πεδίου E_r :

$$E_r = \sqrt{\frac{P_t Z_c}{4\pi r^2}} \quad \left(\frac{V}{m} \right) \quad (6.3)$$

όπου Z_c είναι η χαρακτηριστική αντίσταση του μέσου διάδοσης (σε Ω). Αν η διάδοση γίνεται στον αέρα τότε $Z_c=120\pi$ (σε Ω) και η σχέση (6.3) γίνεται:

$$E_r = \frac{\sqrt{P_t 30}}{r} \quad \left(\frac{V}{m} \right) \quad (6.4)$$

Αν η κεραία εκπομπής παρουσιάζει απολαβή G_t τότε η λαμβανομένη ισχύς στη διεύθυνση της μέγιστης εκπομπής θα είναι $P_t G_t$ και η σχέση (6.4) τροποποιείται όπως ακολουθεί:

$$E_r = \frac{\sqrt{P_t G_t 30}}{r} \quad \left(\frac{V}{m} \right) \quad (6.5)$$

Αν είναι απαραίτητο να βρούμε την ισχύ που λαμβάνουμε στην κεραία λήψης P_r τότε πρέπει να γνωρίζουμε την ενεργό επιφάνεια της κεραίας λήψης A_e και έτσι τελικά βρίσκουμε:

$$P_r = P_d A_e \quad (W) \quad (6.6)$$

Για κατευθυντικές κεραίες ισχύει:

$$G_r = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (6.7)$$

Οι προηγούμενες σχέσεις στην περίπτωση κεραίας εκπομπής μη ισοτροπικής με απολαβή G_t και με ενεργό επιφάνεια A_t και κεραίας λήψης μη ισοτροπικής με απολαβή G_r και με ενεργό επιφάνεια A_r γράφονται ως εξής:

$$P_r = P_t \cdot \frac{G_t G_r}{r^2 \lambda^2} \quad (6.8)$$

Η προηγούμενη εξίσωση είναι γνωστή και ως **εξίσωση Friis** (εξίσωση μετάδοσης).

Παράδειγμα: Ένας τηλεοπτικός σταθμός ισχύος 5KW χρησιμοποιεί κεραία με απολαβή 7,782 dB και εκπέμπει σε συχνότητα 175,25MHz. Σε απόσταση από αυτόν ένας τηλεοπτικός σταθμός κάνει λήψη του σταθμού αυτού χρησιμοποιώντας κεραία λήψης Yagi με απολαβή 10dB ενώ η κεραία λήψης και το ομοαξονικό καλώδιο έχουν αντίσταση 60Ω και προσαρμογή. Να βρείτε την ένταση του πεδίου στη λήψη και την τάση στην είσοδο του δέκτη της τηλεόρασης.

Λύση:

Για την κεραία εκπομπής υπολογίζουμε την απολαβή G_t :

$$10 \log G_t = 7,782 \Rightarrow G_t = 6 \quad (\text{αναφερόμαστε σε ισχείς})$$

Συνεπώς χρησιμοποιώντας τη σχέση (6.5) βρίσκουμε:

$$E_r = \frac{\sqrt{P_t G_t 30}}{r} = \frac{\sqrt{5 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 30}}{30 \cdot 10^3} = 32 \frac{\text{mV}}{\text{m}}$$

Για την κεραία λήψης υπολογίζουμε την απολαβή G_r :

$$20 \log G_r = 10 \Rightarrow G_r = 3,162 \quad (\text{αναφερόμαστε σε τάσεις})$$

Το μήκος κύματος λ είναι ίσο με:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{175,25 \cdot 10^6} = 1,71 \text{ m}$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (6.7) βρίσκουμε ενεργό επιφάνεια της κεραίας λήψης A_e :

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_t}{4\pi} = 0,736 \text{ m}^2$$

Συνεπώς χρησιμοποιώντας τη σχέση (6.6) βρίσκουμε την ισχύ που φτάνει στην κεραία λήψης:

$$P_r = P_d A_e = \frac{E^2}{Z_c} A_e = 2 \mu\text{W}$$

Δεδομένου ότι υπάρχει προσαρμογή ισχύει:

$$P_r = \frac{V^2}{R} \Rightarrow V = 11 \text{ mV}$$

7. Απώλειες ενέργειας στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Αν P_t είναι η ισχύς της κεραίας εκπομπής σε μια ραδιοζευξη και P_r η λαμβανομένη ισχύς τότε ο λόγος $\frac{P_r}{P_t}$ ονομάζεται **απώλειες ραδιοζευξης** ή **απώλειες διάδοσης (transmission loss)**. Ο προηγούμενος λόγος L τις περισσότερες φορές εκφράζεται σε dB:

$$L = 10 \cdot \log \frac{P_r}{P_t} \quad (\text{σε dB}) \quad (7.1)$$

Αν η διάδοση δεν γίνεται στον ελεύθερο χώρο τότε η σχέση (6.3) τροποποιείται ως εξής:

$$E_r = \sqrt{\frac{P_t Z_c G_t}{4\pi r^2}} \cdot F \quad \left(\frac{\text{V}}{\text{m}} \right) \quad (7.2)$$

όπου F είναι η **συνάρτηση εξασθένισης** (attenuation function) η τιμή της οποίας εξαρτάται από την απορρόφηση του μέσου μετάδοσης και από τα φαινόμενα τα οποία συμβαίνουν κατά τη διάδοση του κύματος όπως ανάκλαση, περίθλαση, συμβολή κ.λ.π. Για διάδοση στον ελεύθερο χώρο οίνε προφανές ότι ισχύει $F=1$ ενώ για την περίπτωση απευθείας ραδιοζευξης στην οποία το μέσο μετάδοσης προκαλεί μόνο εξασθένιση τότε $F<1$. Τέλος όταν έχουμε λήψη σημάτων από πολλαπλές διαδρομές τότε είναι δυνατόν να είναι και $F>1$.

8.1 Κύματα εδάφους

Κύμα εδάφους, επιφανειακό κύμα ή **έρπον κύμα** ονομάζεται εκείνο το ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο κινείται στην επιφάνεια του εδάφους και ακολουθεί στη διάδοση του την καμπυλότητα της γήινης επιφάνειας. Η διάδοση ενός κύματος εδάφους επηρεάζεται και εξαρτάται άμεσα από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γης.

Για να υπάρξει κύμα εδάφους πρέπει η κεραία εκπομπής να βρίσκεται σε σύζευξη με την επιφάνεια της γης δηλαδή να βρίσκεται τοποθετημένη κοντά στην επιφάνεια της γης και σε απόσταση μικρότερη από μερικά μήκη κύματος λ της αντίστοιχης συχνότητας εκπομπής. Συνεπώς τα μακρά, τα μεσαία και τα βραχέα κύματα επειδή έχουν μεγάλα μήκη κύματος λ βρίσκονται σε σύζευξη με την επιφάνεια της γης και έτσι σε αυτές τις περιπτώσεις συχνοτήτων δημιουργούνται επιφανειακά κύματα (κύματα εδάφους). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κύμα εδάφους έχουμε και κατά ύψος από το έδαφος της γης αλλά η ισχύς του μειώνεται πολύ γρήγορα στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η περιοχή γύρω από την κεραία λήψης στην οποία είναι δυνατόν να έχουμε ικανοποιητικό βαθμό λήψης με κύματα εδάφους ονομάζεται **Πρώτη Ζώνη Κάλυψης**. Στη Ραδιοφωνία η λήψη με κύματα εδάφους ονομάζεται **λήψη πρώτου βαθμού** και τονίζεται ότι δεν παρατηρούνται **διαλείψεις** (fading) όπως παρατηρούνται κατά τη διάδοση μέσω της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας.

Η εξασθένιση των κυμάτων εδάφους εξαρτάται από την απόσταση λήψης, από τη συχνότητα του κύματος και από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Κατά την εκπομπή δεδομένου ότι η γη συμπεριφέρεται και ως αγωγός και ως μονωτής δημιουργούνται ταυτόχρονα δυο είδη ηλεκτρικών ρευμάτων: το ρεύμα αγωγιμότητας (μεταφοράς) και το ρεύμα μετατόπισης. Συνολικά, για να χαρακτηρίσει κάποιος τη συμπεριφορά του γήινου εδάφους λαμβάνει ως κριτήριο το λόγο:

$$\frac{\text{ρεύμα αγωγιμότητας (μεταφοράς)}}{\text{ρεύμα μετατόπισης}} = \frac{\sigma E}{\omega \epsilon E} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon} = \frac{\sigma}{(2\pi f) \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r)} = \frac{60\lambda\sigma}{\epsilon_r} \quad (8.1)$$

Δηλαδή, θα πρέπει σε κάθε περίπτωση διάδοσης με κύματα εδάφους να γίνεται αρχική διερεύνηση της σχέσης (8.1) όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια:

- Αν $60\lambda\sigma \gg \epsilon_r$ τότε το έδαφος συμπεριφέρεται ως **καλός αγωγός** αφού υπερτερεί το ρεύμα αγωγιμότητας
- Αν $60\lambda\sigma \ll \epsilon_r$ τότε το έδαφος συμπεριφέρεται ως **μονωτής** αφού υπερτερεί το ρεύμα μετατόπισης
- Αν $60\lambda\sigma \approx \epsilon_r$ τότε το έδαφος συμπεριφέρεται ως **ημιαγωγός** αφού τα δυο ρεύματα έχουν σχεδόν την ίδια τιμή.

Η συχνότητα στην οποία ισχύει $60\lambda\sigma \approx \epsilon_r$ ονομάζεται **συχνότητα μεταφοράς** (transition frequency) δηλαδή είναι η συχνότητα εκείνη στην οποία το ρεύμα αγωγιμότητας είναι ίσο με το ρεύμα μετατόπισης. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εδάφους δηλαδή η σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r και η ειδική αγωγιμότητα σ δίνονται από καμπύλες της CCIR και για διάφορα είδη εδαφών όπως υγρό έδαφος, θαλασσινό βέρο μέσης αλμυρότητας, έδαφος μέτριας ξηρότητας, καθαρό νερό, πάγος, κ.α. Στον επόμενο πίνακα δίνονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γης για διαφορετικές συχνότητες και για διαφορετικές επιφάνειες γης.

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΓΗΣ	ΜΑΚΡΑ, ΜΕΣΑΙΑ, ΒΡΑΧΕΑ		$\lambda=9\text{cm}$	
	ϵ_r	σ (S/m)	ϵ_r	σ (S/m)
Θαλασσινό νερό	80	4	80	5,5
Υγρό Έδαφος	10	0,01	24	0,6
Γλυκά νερά	80	0,001	80	2

Ημι-υγρό έδαφος	8	0,001	-	-
Ξερό έδαφος	4	0,001	2	0,003
Άμμος	5	0,0001	-	-

**Πίνακας Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γης για διαφορετικές συχνότητες
και για διαφορετικές επιφάνειες γης.**

Παρατηρούμε ότι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εδάφους εξαρτώνται από τη συχνότητα του κύματος και από την υγρασία του εδάφους.

Παράδειγμα: Το κανάλι 5 της TV εκπέμπει σε συχνότητα 175,25MHz. Να εξετάσετε αν το συγκεκριμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα δημιουργεί ρεύμα αγωγιμότητας η ρεύμα μετατοπισης σε ξερό έδαφος και σε θαλασσινό νερό. Δίνονται: για πολύ ξερό έδαφος $\epsilon_r=15$ και $\sigma=0,0001\text{S/m}$ και για θαλασσινό νερό: $\epsilon_r=70$ και $\sigma=5\text{ S/m}$.

Λύση:

Ξερό έδαφος: Χρησιμοποιούμε τη σχέση (8.1) από την οποία βρίσκουμε ότι:

$$\frac{\text{ρευμα μετατοπισης}}{\text{ευμα αγωγιμοτητας}} = \frac{\epsilon_r}{60\lambda\sigma} = \frac{15}{60 \cdot 1,71 \cdot 0,0001} = 49$$

Θαλασσινό νερό: Χρησιμοποιούμε πάλι τη σχέση (8.1) από την οποία βρίσκουμε ότι:

$$\frac{\text{ρευμα μετατοπισης}}{\text{ευμα αγωγιμοτητας}} = \frac{\epsilon_r}{60\lambda\sigma} = \frac{3}{60 \cdot 1,71 \cdot 0,0001} = 292$$

Συνεπώς, στη συγκεκριμένη συχνότητα που αναφερόμαστε (175,25MHz) το ρεύμα μετατόπισης είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα αγωγιμότητας και συνεπώς στην περιοχή των VHF δεν υπάρχει διάδοση με κύματα εδάφους.

8.2. Εύρεση έντασης ηλεκτρομαγνητικού κύματος για διάδοση με κύμα εδάφους

Για να υπολογίσουμε την ένταση του λαμβανομένου πεδίου για τη διάδοση με κύμα εδάφους δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (6.5) διότι αυτή αναφέρεται σε διάδοση στον ελεύθερο χώρο. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα πρόβλεψης του λαμβανομένου πεδίου αλλά το πιο διαδεδομένο είναι αυτό του **Van de Pol** το οποίο και θα περιγραφεί στη συνέχεια. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο η σχέση (6.5) τροποποιείται όπως ακολουθεί:

$$E_r = \frac{\sqrt{P_t G_t 30}}{r} \cdot F(x) \quad \left(\frac{\text{V}}{\text{m}} \right) \quad (8.2)$$

δηλαδή πραγματοποιήθηκε πολλαπλασιασμός (στη σχέση (6.5)) με ένα διορθωτικό παράγοντα $F(x)$ η οποία ονομάζεται **συνάρτηση εξασθένισης** (attenuation function) ο οποίος εισάγεται για να προσδιορίσει την εξασθένιση του κύματος λόγω του εδάφους και x είναι μέγεθος χωρίς διαστάσεις το οποίο ονομάζεται **αριθμητική απόσταση** (numerical distance). Τα προηγούμενα μεγέθη δίνονται από τις επόμενες σχέσεις:

$$F(x) = \sqrt{2} \cdot \frac{2 + 0.3x}{2 + x + 0.6x^2} \quad (8.3)$$

$$60 \lambda \sigma \gg \epsilon_r \Rightarrow x = \frac{\pi r}{60 \lambda^2 \sigma} \quad (8.4)$$

$$60 \lambda \sigma \ll \epsilon_r \Rightarrow x = \frac{\pi r}{\lambda \epsilon_r}$$

δηλαδή ανάλογα με τη συμπεριφορά του εδάφους ως αγωγού η μονωτή προσδιορίζεται και η τιμή της συνάρτησης εξασθένισης δηλαδή απαιτείται σχετική **διερεύνηση** μέσω της σχέσης (8.4).

Παράδειγμα: Να βρείτε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ενός ραδιοφωνικού σταθμού συχνότητας 1179KHz για διάδοση πάνω από έδαφος σε απόσταση 50Km από τον πομπό. Σας δίνονται τα επόμενα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εδάφους και αντίστοιχες βοηθητικές μαθηματικές σχέσεις (8.3) και (8.4) για το μοντέλο Van de Pol:

$$P_t G_t = 50\text{KW}, \epsilon_r = 4, \sigma = 0,001\text{S/m}$$

Λύση:

Το μήκος κύματος λ που αντιστοιχεί στη συχνότητα εκπομπής 1179KHz είναι ίσο με $\lambda=254,45\text{m}$. Είναι:

$$60\lambda\sigma = 15,27 \gg 4 = \epsilon_r$$

Συνεπώς, το έδαφος συμπεριφέρεται ως καλός αγωγός για τη συγκεκριμένη συχνότητα εκπομπής. Επομένως είναι:

$$x = \frac{\pi}{60\lambda^2\sigma} = 40,4$$

και έτσι $F(x) = \sqrt{2} \cdot \frac{2 + 0.3x}{2 + x + 0.6x^2} = 0,02$.

Τελικά: $E_r = \frac{\sqrt{P_t G_t 30}}{r} \cdot F(x) = \frac{\sqrt{50 \cdot 10^3 30}}{50 \cdot 10^3} \cdot 0,02 = 490 \left(\frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right)$

8.3 Διάδοση στη περιοχή συχνοτήτων VLF

Όταν η διάδοση γίνεται επάνω από καλό αγωγό όπως το θαλασσινό νερό, ειδικά σε συχνότητες κάτω από 100KHz, η απορρόφηση λόγω ανάκλασης στην επιφάνεια του νερού είναι μικρή το ίδιο και η εξασθένιση από την ατμόσφαιρα. Λόγω των μεγάλων μηκών κύματος των VLF σημάτων, τα κύματα μπορούν να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις πριν εξαφανιστούν (γύρω από την Γη αν εκπέμφθηκαν με επαρκή ισχύ). Σε αποστάσεις άνω των 1000Km το κύμα εδάφους είναι εξαιρετικά σταθερό δείχνοντας ασήμαντη ημερήσια, εποχιακή ή ετήσια μεταβολή. Η διάδοση σε τόσο μεγάλες αποστάσεις στην περιοχή των VLF γίνεται συνήθως μέσω του φαινομένου του τροποσφαιρικού κυματοδηγού. 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 περιοχή VLF χρησιμοποιείται κυρίως στις «θαλάσσιες επικοινωνίες». Τα πλοία χρησιμοποιούν τις συχνότητες που τους έχουν παραχωρηθεί (10 έως 110 kHz) για ραδιοναυσιπλοΐα και θαλάσσια ασύρματη επικοινωνία.

9. Τροποσφαιρική διάδοση

Τροπόσφαιρα ονομάζεται εκείνο το τμήμα της γήινης ατμόσφαιρας στο οποίο παρατηρούνται μετεωρολογικά φαινόμενα. Η τροπόσφαιρα θεωρείται ότι είναι η περιοχή της ατμόσφαιρας που είναι κοντά στη γήινη επιφάνεια και εκτείνεται μέχρι το ύψος των 10 Km περίπου. Πιο συγκεκριμένα το ύψος της τροπόσφαιρας είναι 8-10 Km για τις περιοχές των πόλων και φτάνει από 16 Km μέχρι 18 Km στον ισημερινό. Σ' αυτή την περιοχή της

ατμόσφαιρας σχηματίζονται τα σύννεφα και η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος με ρυθμό $6.5^{\circ}\text{C}^{\circ}$ ανά Km μέχρι την τιμή των -50°C . Μετά από την τροπόσφαιρα σχηματίζεται η στρατόσφαιρα όπου θεωρείται ότι η θερμοκρασία παραμένει σταθερή.

Ο δείκτης διάθλασης της ατμόσφαιρας δεν είναι σταθερός διότι εξαρτάται από τα μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά της, την πίεση, τη θερμοκρασία και την απόλυτη υγρασία. Η τροπόσφαιρα δεν συμπεριφέρεται σαν τέλειο μονωτικό, διότι απορροφά ενέργεια.

Η περιοχή των συχνοτήτων όπου είναι δυνατή η διάδοση των κυμάτων μέσα στην τροπόσφαιρα είναι η περιοχή των ραδιοκυμάτων, δηλαδή κυμάτων με συχνότητες πάνω από 30 MHz. Οι μηχανισμοί διάδοσης κυμάτων στην τροπόσφαιρα είναι αρκετοί, και οι κυριότεροι είναι οι ακόλουθοι:

- ομαλή διάθλαση (normal refraction)
- ανώμαλη ανάκλαση και διάθλαση (abnormal reflection and refraction)
- παγίδευση του κύματος (ducting)
- τροποσφαιρική σκέδαση και
- περίθλαση (diffraction).

Πέραν όμως από αυτούς τους μηχανισμούς διάδοσης που αναφέρονται όλοι εκτός από την περίθλαση στην επίδραση της μεταβολής του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας, παρουσιάζεται και το πρόβλημα της διάλειψης των κυμάτων με συχνότητες πάνω από περίπου 10GHz από τα αέρια της ατμόσφαιρας και τους υδρομετεωρίτες (βροχή, χιόνι, χαλάζι).

Η τροπόσφαιρα περιέχει διάφορα αέρια και υδρατμούς. Ο καθαρός, ξηρός αέρας συντίθεται κατ' όγκο από:

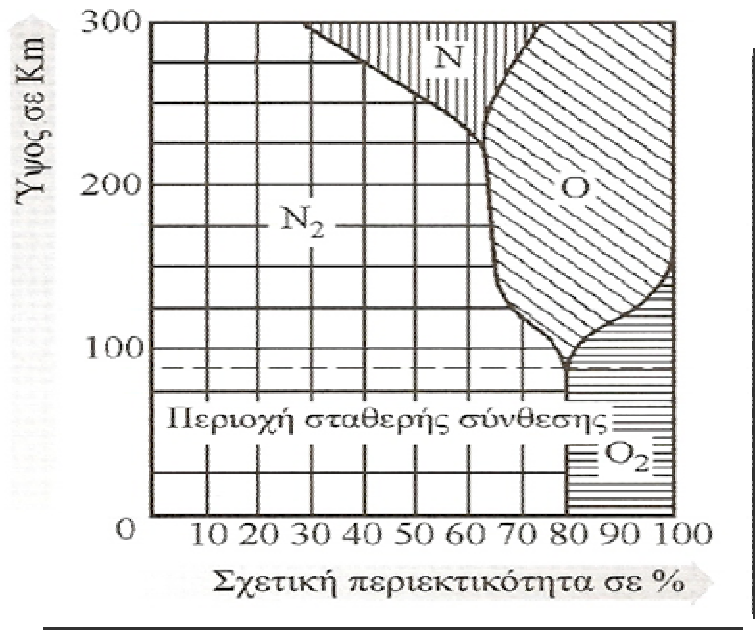
N_2 κατά 78,1%

O_2 κατά 20,9%

Αργό και διάφορα άλλα σπάνια αέρια κατά 0,9% και

CO_2 κατά 0,3%.

Η προηγούμενη σύσταση της τροπόσφαιρας διατηρείται πρακτικά σταθερή μέχρι τα 50 km περίπου (Σχήμα 9.1). Αντίθετα η περιεκτικότητα σε υδρατμούς μεταβάλλεται σημαντικά. Η πίεση, η θερμοκρασία και η υγρασία της ατμόσφαιρας μεταβάλλονται με τη θέση στην υδρόγειο, το χρόνο και το ύψος πάνω από το έδαφος.



Σχ.9.1 Σύνθεση της ατμόσφαιρας, κατά όγκο, σε διάφορα ύψη της.

Η τροπόσφαιρα παρουσιάζει συγκεκριμένη διηλεκτρική σταθερά και συνεπώς και ένα αντίστοιχο δείκτη διάθλασης. Οι μεταβολές της ατμόσφαιρας συνεπάγονται αντίστοιχες μεταβολές στο δείκτη διάθλασης της που είναι ελαφρά μεγαλύτερος της μονάδος στην επιφάνεια του εδάφους και μειώνεται με την αύξηση του ύψους από την επιφάνεια της γης. Έτσι, ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που διαδίδεται πλάγια πάνω από το έδαφος ακολουθεί την καμπυλότητα της γήινης επιφάνειας. Η εμβέλεια των ραδιοζεύξεων αυξάνεται κατά 20-30% λόγω της ατμοσφαιρικής διάθλασης. Εκτός της διάθλασης η ατμόσφαιρα, προκαλεί παράλληλα και άλλα φαινόμενα όπως απορρόφηση και σκέδαση και τα φαινόμενα αυτά συνδέονται όχι πλέον με την “καθαρή” ατμόσφαιρα αλλά με τα διάφορα υδρομετέωρα όπως π.χ. η βροχή και το χιόνι.

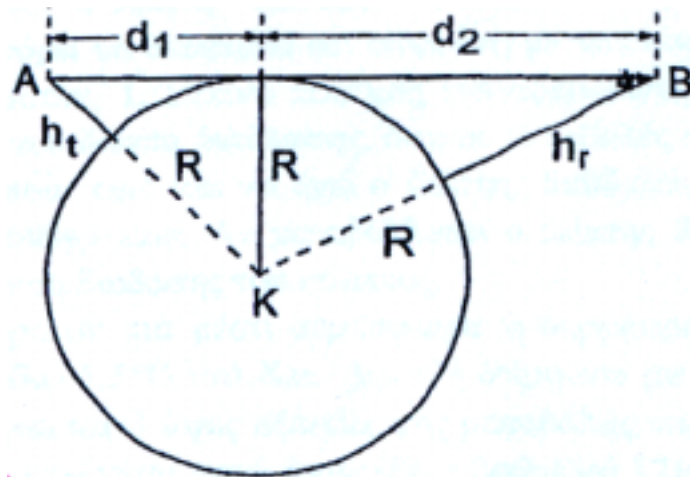
Είναι φανερό ότι αφού η επίδραση της ατμόσφαιρας στην διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εξαρτάται από την κατάσταση της είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους και το πώς αυτές επηρεάζουν τον δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας και κατ’ επέκταση την διάδοση των ραδιοκυμάτων σε αυτή.

9.1 Οπτικός ορίζοντας-Ευθύγραμμη διάδοση

Εξαιτίας του σφαιρικού σχήματος της γης η εμβέλεια των σταθμών, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια της γης, με απευθείας διάδοση είναι πολύ περιορισμένη. Σε

πρώτη προσέγγιση ως υποθέσουμε ότι το κύμα διαδίδεται ευθύγραμμα. Στο σχήμα 9.2 βλέπουμε μια κεραία εκπομπής A σε ύψος h_t (m) με κεραία λήψης B σε ύψος h_r (m) πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η εμβέλεια E του σταθμού A με τις προηγούμενες υποθέσεις βρίσκεται να είναι ίση με:

$$E = d_1 + d_2 = \sqrt{(R + h_t)^2 - R^2} + \sqrt{(R + h_r)^2 - R^2} = \sqrt{2Rh_t + h_t^2} + \sqrt{2Rh_r + h_r^2} \quad (9.1)$$



Σχήμα 9.2 Εμβέλεια των σταθμών A και B , με ύψη κεραιών h_t και h_r .

Η απόσταση $E=AB$ ονομάζεται **οπτικός ορίζοντας**. Επειδή η ακτίνα R της γης είναι πολύ μεγαλύτερη από τα ύψη των κεραιών h_t και h_r ($R \gg h_t, h_r$), η προηγούμενη σχέση κατά προσέγγιση γράφεται:

$$E = \sqrt{2Rh_t + h_t^2} + \sqrt{2Rh_r + h_r^2} \cong \sqrt{2Rh_t} + \sqrt{2Rh_r} = \sqrt{2R} (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \Rightarrow$$

$$E = 3,57 \cdot (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \text{ km} \quad (9.2)$$

όπου h_t και h_r τα ύψη των κεραιών εκπομπής και λήψης σε m. Διαπιστώνουμε λοιπόν, από την προηγούμενη σχέση ότι αν πρόκειται να έχουμε μόνο απευθείας διάδοση, όπως π.χ. στην περιοχή των VHF και UHF ή στην περιοχή των μικροκυμάτων και απαιτείται να καλύψουμε μεγάλες αποστάσεις, τότε θα πρέπει οι σταθμοί εκπομπής και λήψης να βρίσκονται σε βουνοκορφές δηλαδή σε πολύ υψηλό ύψος από την επιφάνεια της γης, πράγμα το οποίο στην πράξη εφαρμόζεται ευρύτατα στις τηλεπικοινωνίες.

Άσκηση: Βρείτε την εμβέλεια σταθμού τηλεόρασης ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος σε ύψος α) 2Km πάνω την επιφάνεια της γης και η κεραία λήψης σε 0m πάνω την επιφάνεια της γης β) 2Km πάνω την επιφάνεια της γης και η κεραία λήψης σε 30m πάνω την επιφάνεια της γης (Απ: α) 160Km β) 179Km).

9.2 Τροποσφαιρική διάθλαση

Καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στην τροπόσφαιρα δεν αντιλαμβάνονται κατά τη διάδοσή τους ένα ομοιογενή χώρο, αλλά αντίθετα ένα χώρο στον οποίο παρουσιάζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τη διηλεκτρική επιτρεπτότητα. $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ (όπου ϵ_0 είναι η διηλεκτρική επιτρεπτότητα στον κενό χώρο και ϵ_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά). Στην ανάλυση που ακολουθεί, αντί της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας ϵ , θα γίνει χρήση του δείκτη διάθλασης $n = \sqrt{\epsilon_r}$ και της διαθλαστικότητας $N = (n-1) \times 10^6$. Επειδή οι μεταβολές του δείκτη διάθλασης στην τροπόσφαιρα με το ύψος είναι μικρές χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς συνήθως η διαθλαστικότητα N.

Η μεταβολή του δείκτη διάθλασης n μπορεί να ερμηνευθεί μέσω των γνωστών μετεωρολογικών δεδομένων που χαρακτηρίζουν τη γήινη ατμόσφαιρα. Η ατμοσφαιρική πίεση, η θερμοκρασία και η υγρασία μειώνονται με την αύξηση του ύψους και γενικά μεταβάλλονται στη διάρκεια του χώρου αλλά και ανάλογα με τη γεωγραφική θέση. Η τιμή του δείκτη διάθλασης εκφράζει την επίδραση αυτών των τριών ατμοσφαιρικών παραμέτρων. Η σχέση (9.2) που μας δίνει προσεγγιστικά την εμβέλεια των σταθμών οπτικής επαφής ισχύει με την προϋπόθεση ότι η διαδρομή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην τροπόσφαιρα γίνεται ευθύγραμμη. Αυτό γίνεται μόνο αν ο δείκτης διάθλασης n (ή η διηλεκτρική σταθερά ϵ) της τροπόσφαιρας θεωρηθεί σταθερός στο χώρο που διαδίδεται το κύμα. Στην

πραγματικότητα ο δείκτης διάθλασης της τροπόσφαιρας δεν είναι σταθερός, αλλά αποδεικνύεται ότι μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση :

$$\eta = 1 + \frac{77,6}{T} \cdot \left(P + \frac{4810}{T} e \right) \cdot 10^{-6} \quad (9.3)$$

όπου η : ο δείκτης διάθλασης της ατμόσφαιρας, καθαρός αριθμός
 T : η απόλυτη θερμοκρασία σε ° K ($T=273,16^\circ\text{C}$)
 P : η ατμοσφαιρική πίεση σε millibar (mb)
 e : η απόλυτη υγρασία (ειδική πίεση των υδρατμών της τροπόσφαιρας)
σε mb

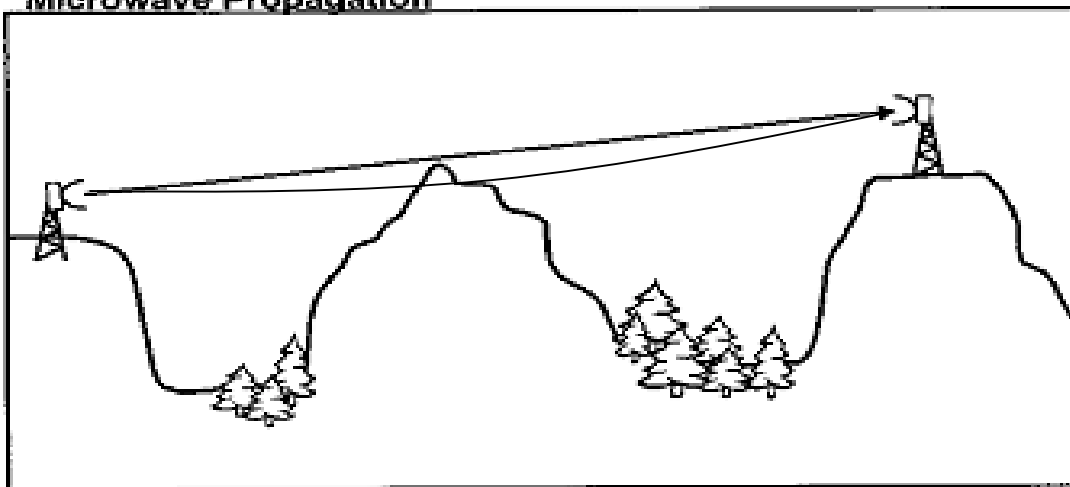
Οι μέσες τιμές στην επιφάνεια της θάλασσας είναι: $\theta=15^\circ\text{C}$, $P=1.013$ mb, $e=12$ mb. Η μέση τιμή του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας στην επιφάνεια της θάλασσας είναι:

$$\eta = 1 + \frac{77,6}{288,16} \cdot \left(1013 + \frac{4810}{288,16} \cdot 12 \right) \cdot 10^{-6} = 1,000327 \quad (9.4)$$

Όταν ο δείκτης διάθλασης μειώνεται συνεχώς και σταθερά, με την αύξηση του υψόμετρου, η αλληλεπίδραση του κύματος με την ατμόσφαιρα είναι σχετικά ήπια και παρατηρούνται φαινόμενα διάθλασης (και όχι σκέδασης ή ανάκλασης). Υπό αυτή την έννοια η βαθμιαία μεταβολής του n και το φαινόμενο της διάθλασης του κύματος ονομάζεται **ομαλή ατμοσφαιρική διάθλαση**. Η παραδοχή της σταθερής γραμμικής μεταβολής του δείκτη διάθλασης αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση για τα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας (περίπου κάτω από τα 1000 m). Σε μεγαλύτερα ύψη, η μεταβολή του n παρουσιάζει εξάρτηση εκθετικού τύπου.

Εφόσον τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται ταχύτερα σε μέσα με χαμηλότερο δείκτη διάθλασης, το τμήμα του μετώπου του κύματος στην «αραιότερη» περιοχή (χαμηλότερο n) έχει την τάση να κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα, από ότι το τμήμα που βρίσκεται στην «πυκνότερη» περιοχή (υψηλότερο n). Το γεγονός αυτό προκαλεί μια κάμψη της πορείας του κύματος από τα αραιότερα προς τα πυκνότερα στρώματα. Στο ίδιο συμπέρασμα μπορεί κανείς να καταλήξει, αν υποθέσει ότι η ατμόσφαιρα αποτελείται από στρώματα με σταθερό δείκτη διάθλασης στην οριζόντια κατεύθυνση και γραμμική μεταβολή κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση. Λόγω της βαθμιαίας αυτής μεταβολής του n , το κύμα υφίσταται συνεχείς διαθλάσεις, σύμφωνα με το **νόμο του Snell** της οπτικής. Συνεπώς, παρουσιάζει την τάση να απομακρύνεται από την περιοχή της αραιότερης ατμόσφαιρας προς την πυκνότερη, ακολουθώντας τελικά μια **καμπύλη τροχιά** αντί της ευθύγραμμης.

Microwave Propagation



Σχήμα 9.3 Καμπύλωση τροχιάς ηλεκτρομαγνητικού κύματος στην τροπόσφαιρα.

Είναι φανερό ότι η οπτική επαφή κατά μήκος της γεωμετρικής ευθείας μεταξύ πομπού και δέκτη, **δεν ταυτίζεται** με την πραγματική τροχιά του κύματος. Το γεγονός αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη, διότι λόγω της κάμψης τα αντικείμενα που βρίσκονται κοντά στην ευθεία της οπτικής επαφής μπορούν να πλησιάσουν επηρεάζοντας τη ζεύξη δημιουργώντας, είτε φαινόμενα περίθλασης είτε μπλοκαρίσματος της ζεύξης. Είναι προφανές ότι η καμπύλωση της τροχιάς μπορεί να λειτουργήσει και ευνοϊκά, “απομακρύνοντας” τα εμπόδια από την τροχιά διάδοσης του κύματος, διευρύνοντας έτσι το ραδιοηλεκτρικό ορίζοντα της ζεύξης.

Προκειμένου να αποφευχθούν τα φαινόμενα που οδηγούν σε εξασθένηση ή μηδενισμό του σήματος στο δέκτη, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της καμπύλης τροχιάς του κύματος. Εάν υποθεθεί, ότι η καμπύλη τροχιά του κύματος αποτελεί τόξο ενός νοητού κύκλου με ακτίνα ρ , τότε αυτή η ακτίνα (ρ) ονομάζεται καμπυλότητα της τροχιάς. Εάν, τέλος, η γήινη ατμόσφαιρα χωριστεί σε επάλληλα ομόκεντρα σφαιρικά στρώματα, που απέχουν απόσταση dh και ο δείκτης διάθλασης τους διαφέρει κατά dn , μπορεί να αποδειχθεί ότι η καμπυλότητα ρ δίνεται προσεγγιστικά από τον ακόλουθο τύπο:

$$\rho \cong -\frac{1}{(dn / dh)} \quad (9.5)$$

Ο δείκτης διάθλασης n δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (9.6)$$

όπου N είναι η διαθλαστικότητα και εκφράζεται συναρτήσει της ατμοσφαιρικής πίεσης P (mb), της απόλυτης θερμοκρασίας T σε $^{\circ}\text{K}$ ($=273+^{\circ}\text{C}$) και της υγρασίας e (μβ):

$$N = \frac{77.6}{T} \cdot \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (9.7)$$

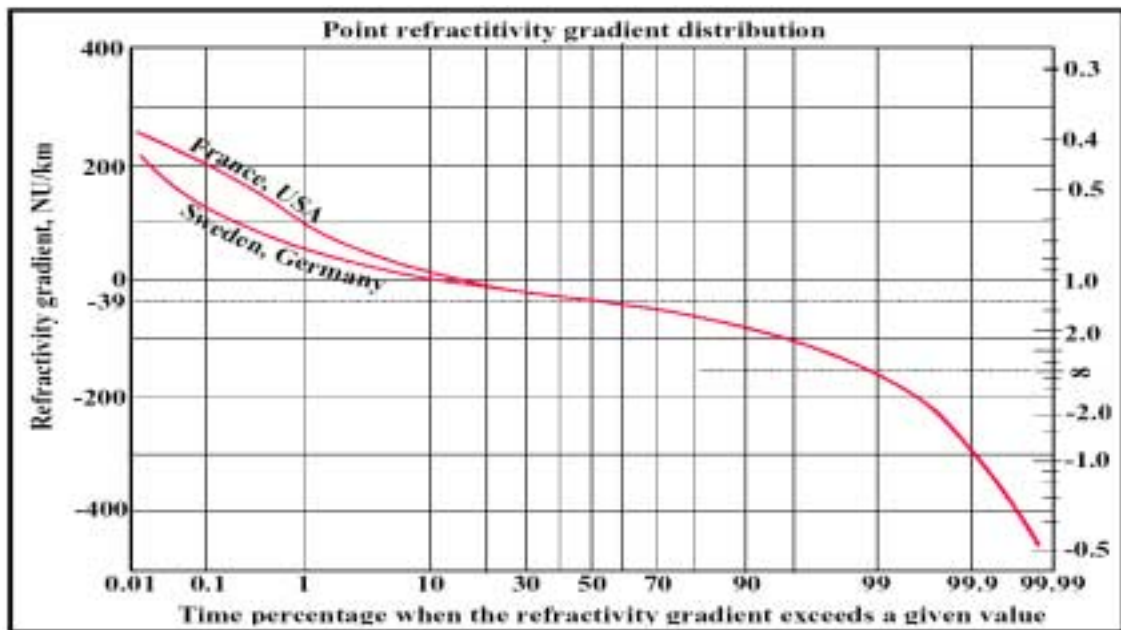
Σύμφωνα με τις σχέσεις (9.6) και (9.7), μπορεί να υπολογισθεί η παράγωγος dn/dh . Συνήθως οι υπολογισμοί γίνονται για την αποκαλούμενη πρότυπη ατμόσφαιρα, όπου dn/dh είναι σταθερή και επομένως ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται γραμμικά με το ύψος h . Η τιμή της παραγώγου προκύπτει αν χρησιμοποιήσουμε μια σειρά από μέσες τιμές για τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους (P , T και e)

$$\frac{dn}{dh} \cong -4 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1} \quad (9.8)$$

Αντικαθιστώντας την σχέση (9.8) στη σχέση (9.5) προκύπτει η καμπυλότητα της τροχιάς ρ :

$$\rho = 25 \times 10^6 \text{ m} \cong 4\alpha \quad (9.9)$$

όπου $\alpha = 6,37 \times 10^6 \text{ m} = 6366 \text{ Km}$ είναι η ακτίνα της γης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η καμπυλότητα ρ αλλάζει τόσο στη διάρκεια του μέρας, του μήνα κλπ όσο και ανάλογα με τη τοποθεσία. Η τιμή που υπολογίστηκε στη σχέση (9.9), είναι μια μέση τιμή, που αντιστοιχεί σε στατιστικές μέσες τιμές για τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους. Η πλήρης μελέτη μιας ραδιοζεύξης προϋποθέτει τη συλλογή στατιστικών στοιχείων για τις τιμές του δείκτη διάθλασης n και της παράγωγου του (dn/dh). Τα στοιχεία αυτά δίνονται συνήθως μέσω της διαθλαστικότητας N και της παραγώγου της (dN/dh) και μέσω εμπειρικών τύπων και στατιστικών μετρήσεων για τις διάφορες γεωγραφικές ζώνες (Σχήμα 9.4).

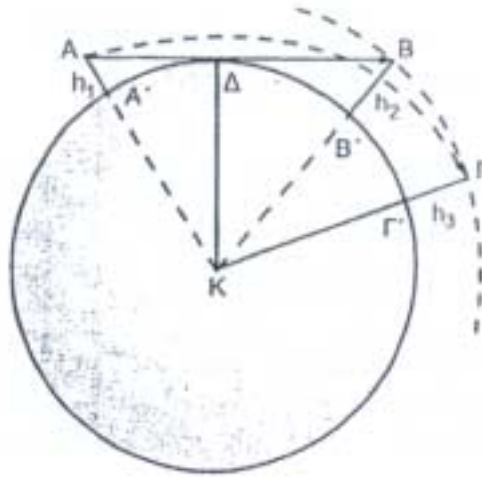


Σχήμα 9.4 Μεταβολή διαθλαστικότητας (δηλαδή της dN/dh) της τροπόσφαιρας σε συνάρτηση με το χρόνο (κατανομή της παραγώγου της διαθλαστικότητας N) για διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές της γης.

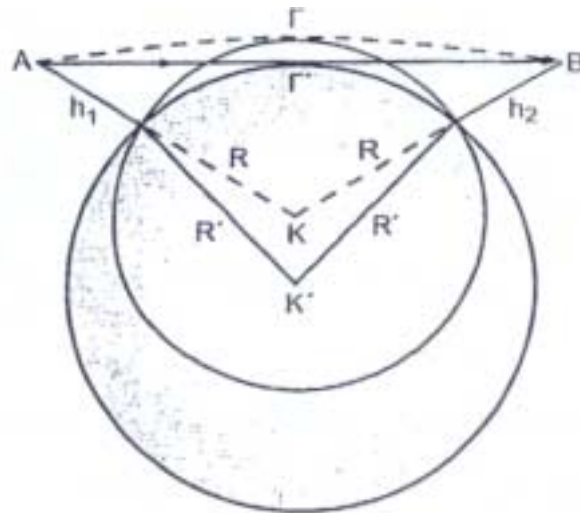
9.3 Ραδιο-Οπτικός (Ραδιο-ηλεκτρικός) ορίζοντας

Εφόσον, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο δείκτης διάθλασης στην τροπόσφαιρα μειώνεται με το ύψος, σύμφωνα με το νόμο του Snell, η διαδρομή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος καμπυλώνεται προς τα κάτω, με αποτέλεσμα την αύξηση της εμβέλειας της ζεύξης. Στο σχήμα (9.5) φαίνεται ότι με ευθύγραμμη διάδοση και για ύψη κεραιών πομπού και δέκτη αντίστοιχα h_1 και h_2 η εμβέλεια του πομπού A είναι η απόσταση $A'B'$, ενώ για καμπυλόγραμμη (δηλαδή προς τα κάτω) διαδρομή, η εμβέλειά του πομπού γίνεται $A'D' > A'B'$ (θεωρούμε ότι ισχύει $h_2 = h_3$). Για την ευκολία των υπολογισμών θεωρούμε την καμπυλόγραμμη διάδοση ως ευθύγραμμη. Στην περίπτωση αυτή το μήκος της ακτίνας της γης θεωρείται μεταβλητό, εξαρτώμενο από τις καιρικές συνθήκες.

Στο σχήμα (9.6) ο κύκλος που έχει κέντρο το σημείο K και ακτίνα R παριστάνει την πραγματική γη. Σ' αυτή η πραγματική διαδρομή είναι AGB . Η διαδρομή αυτή, που οφείλεται στη τροποσφαιρική διάθλαση, ονομάζεται **Ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας**.



Σχήμα 9.5 Αύξηση της εμβέλειας των σταθμών εξαιτίας της μείωσης του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας σε σχέση με το ύψος της τροπόσφαιρας.



Σχήμα 9.6 Η ενεργός γήινη ακτίνα R' .

Μπορούμε να θεωρήσουμε τη διαδρομή $ΑΓ'Β$, η οποία όμως γίνεται πάνω σε μια φανταστική γη με κέντρο σημείο K' και ακτίνα R' . Οι διαδρομές $ΑΓΒ$ και $ΑΓ'Β$ αντιστοιχούν στην απόσταση $ΑΒ$. Η νέα ακτίνα της γης ονομάζεται **ενεργός γήινη ακτίνα** και συμβολίζεται με R' . Η σχέση (9.2) τώρα γράφεται:

$$E = \sqrt{R'} (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad (9.10)$$

Θέτουμε:

$$R' = KR \quad (9.11)$$

Για το συντελεστή αναλογίας K αποδεικνύεται ότι ισχύει:

$$K = \frac{1}{1 + R \frac{dn}{dh}} \quad (9.12)$$

Από τη σχέση (9.12) συμπεραίνουμε άμεσα ότι ο συντελεστής αναλογίας K εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην τροπόσφαιρα και συγκεκριμένα από το ρυθμό μεταβολής του δείκτη διάθλασης n σε σχέση με το ύψος, δηλαδή για τη παράγωγο του δείκτη διάθλασης n ως προς h (dn/dh). Η συνηθισμένη τιμή του συντελεστή αναλογίας K για τη μέση τροπόσφαιρα είναι:

$$K = \frac{1}{1 + R \frac{dn}{dh}} \cong \frac{1}{1 + R \frac{\Delta n}{\Delta h}} = \frac{1}{1 + \frac{40000}{2\pi} \cdot \frac{1,000288 - 1,000327}{1 - 0}} = 1,33 \quad (9.13)$$

Στη βιβλιογραφία ο συντελεστής K για μια μέση τροπόσφαιρα δίνεται να είναι $K=4/3$, δηλαδή πολύ κοντά τον αριθμό 1,33. Η σχέση (4.5) τώρα γράφεται:

$$E\sqrt{1KR}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 10^7}{3 \cdot 2\pi}}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 4,12 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (\text{km}) \quad (9.14)$$

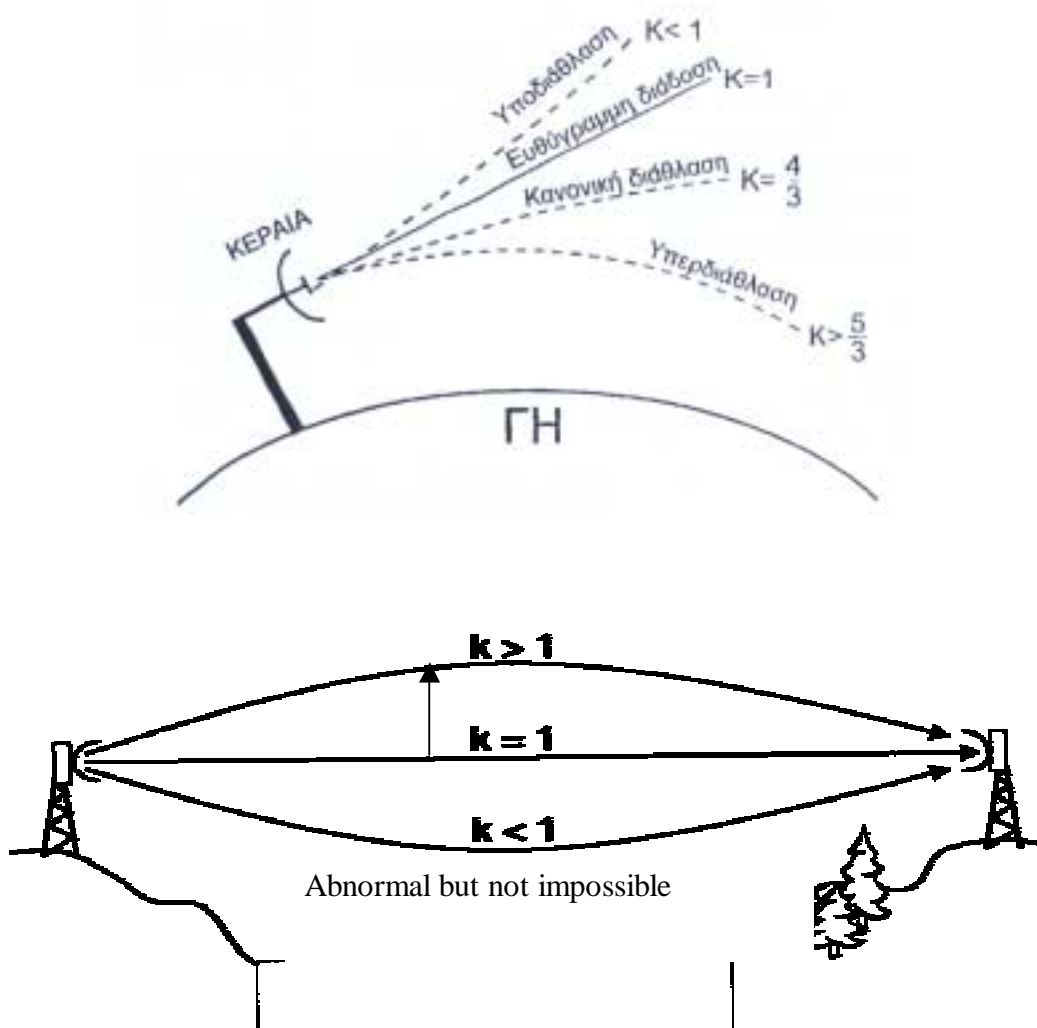
Ο ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας μεγαλώνει κατά τον παράγοντα $\sqrt{K} = \sqrt{4/3} = 1,1547$ έναντι του οπτικού ορίζοντα (σχέση (9.2)). Επομένως με μια μέση τροπόσφαιρα η εμβέλεια των σταθμών αυξάνεται κατά 15,5% έναντι της ευθύγραμμης διάδοσης με σταθερό δείκτη διάθλασης n . Δηλαδή τελικά, **ο Ραδιο-ηλεκτρικός ορίζοντας είναι κατά 15.5% μεγαλύτερος από τον οπτικό ορίζοντα.**

9.4 Υπερ-διάθλαση-Τροποσφαιρικός Κυματοδηγός

Κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, οι τιμές του δείκτη διάθλασης παρουσιάζουν απότομες μεταβολές, καθώς και διαταραχές κατά τις οποίες αραιότερα στρώματα (χαμηλός δείκτης διάθλασης) εμφανίζονται σε χαμηλά ύψη κάτω από πυκνότερα (υψηλός δείκτης διάθλασης). Οι διαταραχές αυτές οφείλονται σε αντίστοιχες μετεωρολογικές διαταραχές, οι

οποίες προκαλούν αναστροφές στη θερμοκρασία και την υγρασία. Αυτού του είδους τα φαινόμενα αποτελούν την αιτία για μια σειρά σύνθετων φαινομένων διάδοσης όπως η **πολυδιόδευση** (multipath propagation), η **αποεστίαση του κύματος** (defocusing) και **τροποσφαιρική κυματοδότηση** (ducting).

Όταν ο συντελεστής αναλογίας $K=4/3$, τότε λέμε ότι έχουμε **κανονική διάθλαση** και ομαλή διάδοση του κύματος. Στην περίπτωση, που οι τροποσφαιρικές συνθήκες είναι τέτοιες ώστε ο δείκτης διάθλασης να μη μεταβάλλεται κατά ύψος, ($dn/dh=0$) τότε προκύπτει $K=1$ και η διάδοση του κύματος γίνεται ευθύγραμμη. Όταν ο δείκτης διάθλασης αυξάνεται κατά ύψος, αντί να μειώνεται, τότε λέμε ότι έχουμε **υποδιάθλαση**, ο συντελεστής αναλογίας $K<1$ και η εμβέλεια των σταθμών στην τροπόσφαιρα μειώνεται δηλαδή το ηλεκτρομαγνητικό κύμα καμπυλώνεται προς τα άνω. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται **ανώμαλη διάθλαση** και ανώμαλη διάδοση. Αν $K>5/3$ τότε παρατηρείται το φαινόμενο της **υπερδιάθλασης** και η εμβέλεια των σταθμών μεγαλώνει. Στο σχήμα (9.7) παρουσιάζονται αυτές οι διαφορετικές περιπτώσεις διάδοσης του κύματος στην τροπόσφαιρα.



Σχήμα 9.7 Διαφορετικές διαδρομές ηλεκτρομαγνητικού κύματος εξαρτώμενες από τις συνθήκες της τροπόσφαιρας.

Από τη σχέση:
$$K = \frac{1}{1 + R \frac{dn}{dh}}, \quad \text{αν ισχύει } 1 + R \frac{dn}{dh} = 0 \quad (9.15)$$

τότε ισχύει:
$$\frac{dn}{dh} = -\frac{1}{R} = -0,157 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \quad \text{και } K = \infty \quad (9.16)$$

αν ισχύει:
$$1 + R \frac{dn}{dh} < 0, \quad \text{τότε } K < 0. \quad (9.17)$$

Σε περίπτωση που ο δείκτης διάθλασης n μεταβάλλεται περισσότερο από $-0.157 \cdot 10^{-6}$ τότε ο συντελεστής K γίνεται αρνητικός και το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, αντί να διαθλαστεί στην τροπόσφαιρα, θα ανακλαστεί σ' αυτή. Το κύμα γρήγορα σχηματίζει την ορική γωνία και αν η γωνία πρόσπτωσης γίνει μεγαλύτερη από αυτή, τότε αντί να διαθλασθεί ανακλάται. Η κυριότερη αιτία που θα προκαλέσει μια τόσο απότομη μείωση του n , κατά ύψος είναι το πολύ γνωστό φαινόμενο της **αναστροφής της θερμοκρασίας**. Είναι πολύ γνωστό αυτό το φαινόμενο στην Ελλάδα, εξαιτίας του δηλητηριώδους νέφους που δημιουργείται κυρίως στην Αθήνα.. Τα δηλητηριώδη αέρια που δημιουργούνται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες εγκλωβίζονται μεταξύ της γήινης επιφάνειας και της διαχωριστικής επιφάνειας μέχρι την οποία φτάνει η αναστροφή της θερμοκρασίας.

Η αναστροφή της θερμοκρασίας, δηλαδή η αύξηση της θερμοκρασίας της τροπόσφαιρας κατά ύψος, αντί της φυσιολογικής μείωσής της προκαλείται από έκτακτες μετεωρολογικές συνθήκες. Υπάρχουν δυο είδη αναστροφών της θερμοκρασίας. Η αναστροφή θερμοκρασίας που αρχίζει από την επιφάνεια της γης (**αναστροφή επιφάνειας**) και η αναστροφή θερμοκρασίας που αρχίζει από κάποιο ύψος της τροπόσφαιρας και πάνω (**αναστροφή ύψους**).

Τα αίτια που προκαλούν αναστροφή θερμοκρασίας είναι:

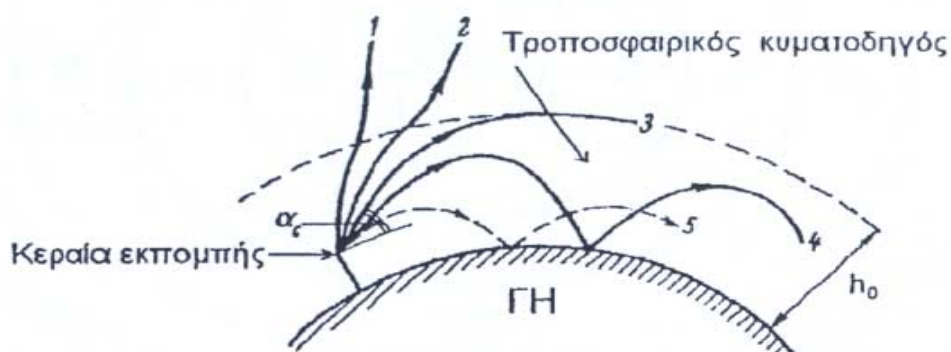
A) Αναστροφή επιφάνειας:

1. Η έντονη ψύξη του έδαφος κατά τις ασυννέφιαστες νύχτες. Στην περίπτωση αυτή τα αέρια στρώματα που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος ψύχονται περισσότερο από αυτά που βρίσκονται ψηλότερα.
2. Η μεταφορά θερμών αερίων μαζών πάνω από την περιοχή που είναι ψυχρή.

B) Αναστροφή ύψους:

1. Τα σύννεφα από την απάνω επιφάνειά τους ακτινοβολούν θερμότητα και ψύχονται έντονα. Οι αέριες μάζες που ακουμπούν στην επιφάνειά τους γίνονται ψυχρότερες από αυτές που είναι λίγο ψηλότερα.
2. Η θαλάσσια αύρα επίσης μπορεί να προκαλέσει αναστροφή θερμοκρασίας ύψους.

Υποθέτουμε ότι η υπερδιάθλαση καταλαμβάνει έναν όγκο πάνω από την επιφάνεια της γης με ύψος h_0 . Τα κύματα με μεγάλες γωνίες ανύψωσης (1 και 2 στο σχήμα 9.8) διαθλώμενα λίγο, εξέρχονται από τον όγκο αυτό. Κύματα που ξεκινούν με μια κρίσιμη γωνία ανύψωσης α_c (ορική γωνία) όταν φτάσουν σε ύψος h_0 γίνονται παράλληλα προς το έδαφος της γης. **Κύματα που έχουν γωνία ανύψωσης μικρότερη από την ορική γωνία α_c θα παγιδευτούν μέσα σ' αυτόν τον όγκο.** Γι' αυτό αυτός ο όγκος λέγεται **κυματοπαγίδα ή ατμοσφαιρικός κυματοδηγός (ή τροποσφαιρικός κυματοδηγός, duct)**. Η κάτω πλευρά του κυματοδηγού είναι η ημιαγώγιμη επιφάνεια της γης και η άλλη πλευρά του είναι το άνω όριο της τροπόσφαιρας όπου σταματά η υπερδιάθλαση (αναστροφή θερμοκρασίας). Με τον τρόπο αυτόν καλύπτονται αποστάσεις, μερικές φορές, γύρω στα 1000Km.



Σχήμα 9.8 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος με υπερ-διάθλαση.

Όπως στους μεταλλικούς μικροκυματικούς κυματοδηγούς **διαδίδονται μόνο οι συχνότητες οι μεγαλύτερες από τη συχνότητα αποκοπής τους**, έτσι και στους τροποσφαιρικούς κυματοδηγούς διαδίδονται οι συχνότητες οι μεγαλύτερες από τη συχνότητα αποκοπής τους (μήκος κύματος αποκοπής). Αποδεικνύεται ότι ισχύει:

$$\lambda_c \cong 8,5 \cdot 10^{-4} h_0^{\frac{3}{2}} \quad (9.18)$$

όπου λ_c το **μήκος κύματος αποκοπής** σε m και h_0 το ύψος της κυματοπαγίδας σε m. Συνήθως το ύψος h_0 φτάνει μέχρι μερικά μέτρα ή δεκάδες μέτρα και πολύ σπάνια μέχρι τα 200m. Π.χ. για $h_0=6m$, βρίσκουμε $\lambda_c=0,0125m$ ή $f_c=24$ GHz. Δηλαδή ο τροποσφαιρικός κυματοδηγός είναι σα να μην υπάρχει για συχνότητες μικρότερες από 24 GHz. Αν $h_0 = 24$ m τότε βρίσκουμε $\lambda_c =0,1$ και $f_c =3GHz$.

Η διάδοση με ατμοσφαιρικούς κυματοδηγούς ενδιαφέρει μόνο τα Μικροκύματα και σε εντελώς εξαιρετικές περιπτώσεις την περιοχή UHF ή VHF. Για την ραδιοφωνική περιοχή Μακρών, Μεσαίων και βραχέων κυμάτων είναι σα να μην υπάρχουν οι ατμοσφαιρικοί κυματοδηγοί.

Στην επόμενη παράγραφο δίνονται συνοπτικά τα φαινόμενα που συναντώνται στην τροποσφαιρική διάδοση λόγω αλλαγής των κανονικών συνθηκών του δείκτη διάθλασης

Παγίδευση κύματος ή Τροποσφαιρική Κυματοδότηση (trapping, duct propagation):

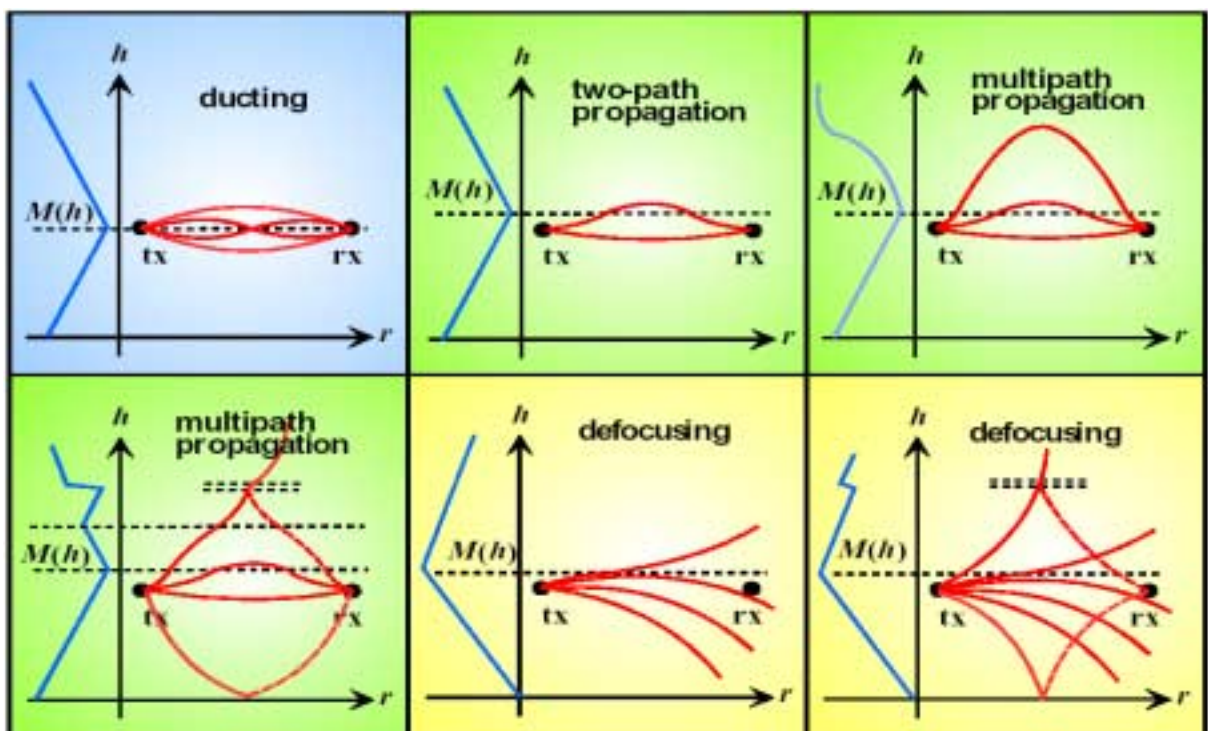
Σε αυτή την περίπτωση, ο συνδυασμός πυκνότερων και αραιότερων στρωμάτων μπορεί να παγιδεύσει το κύμα. Αυτό συμβαίνει, διότι το κύμα μέσω διαδοχικών ανακλάσεων στα όρια του πυκνού στρώματος, παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά μιας ιδιόμορφης κυματοδότησης. Εάν αυτή η παγίδευση, κατά τη διεύθυνση του στρώματος, δεν οδηγεί στον δεκτή είναι προφανές ότι ο τελευταίος αντιλαμβάνεται μηδενισμό του σήματος. Το **φαινόμενο της παγίδευσης** μπορεί να είναι και επιφανειακό (surface ducting) δηλ μπορεί να παρατηρηθεί παγίδευση με διαδοχικές ανακλάσεις μεταξύ ενός ατμοσφαιρικού στρώματος και της επιφάνειας της γης. (Σχήμα 9.9.α)).

Πολυδιόδευση (multipath propagation):

Σε αυτή την περίπτωση, ανάλογα με την διεύθυνση διάδοσης των «ακτινών» του κύματος και την αλληλεπίδραση με σημαντικά διαφορετικές τιμές της τροποποιημένης διαθλαστικότητας, προκύπτουν διαφορετικές καμπύλες τροχιές. Υπό συνθήκες, ο δέκτης μπορεί να λάβει σήμα μέσω πολλών οδών διάδοσης. Το φαινόμενο είναι σημαντικό, διότι λόγω του διαφορετικού μήκους όδευσης, τα επιμέρους σήματα μπορούν να φτάνουν με τέτοια διαφορά φάσης, ώστε να αναιρούνται μεταξύ τους (multipath fading, Διάλειψη Πολυδιόδευσης) (Σχήμα 9.9 (β)(γ)(δ)).

Απο-εστίαση (Defocusing or Black out phenomenon):

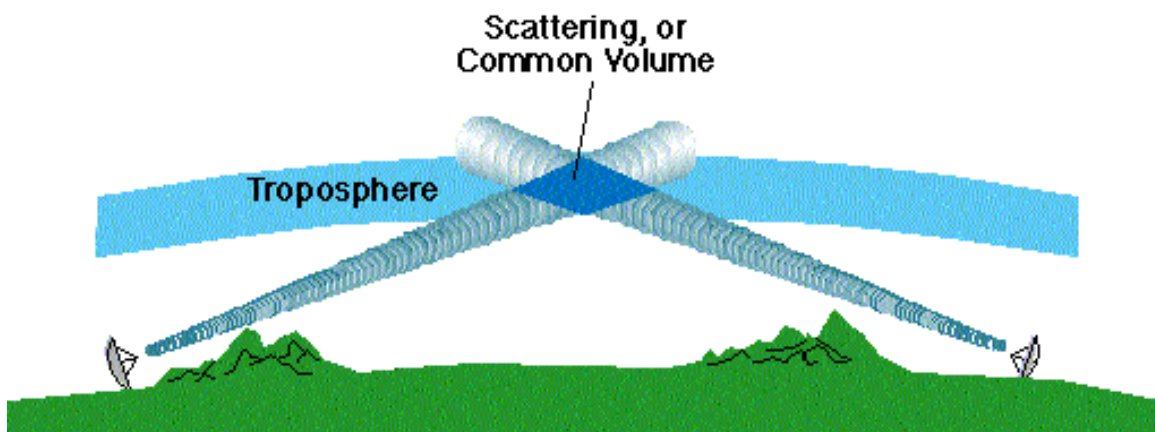
Σε αυτή την περίπτωση η ύπαρξη ενός αραιότερου στρώματος πάνω από ένα πυκνότερο στρώμα έχει την τάση να αλλάζει απότομα τη διεύθυνση διάδοσης του (αντί της βαθμιαίας μεταβολής). Σε αυτή την περίπτωση, το κύμα **αποεστιάζεται** από τη κατεύθυνση που βρίσκεται ο δέκτης. Συνεπώς για όσο χρονικό διάστημα διατηρούνται αυτού του τύπου οι ατμοσφαιρικές συνθήκες ο δέκτης δεν λαμβάνει σήμα από τον πομπό. (Σχήμα 9.9 (ε) (στ)).



Σχήμα 9.9 Φαινόμενα ανώμαλης διάθλασης συναρτήσει της διαθλαστικότητας (α) παγίδευση ή κυματοδότηση (ducting), (β)(γ)(δ) Πολυδιόδευση (two path, multipath propagation), (ε)(στ) Αποεστίαση (defocusing).

9.5 Τροποσφαιρική σκέδαση

Στην περιοχή της τροπόσφαιρας παρουσιάζονται στρώματα, πάχους κάποιων δεκάδων μέτρων και μήκους κάποιων χιλιομέτρων, των οποίων ο δείκτης διάθλασης διαφέρει σημαντικά από τον υπόλοιπο χώρο. Η απότομη μεταβολή του δείκτη διάθλασης, στα όρια αυτών των στρωμάτων, τους προσδίδει σημαντικές ανακλαστικές ιδιότητες. Αυτού του τύπου η ανομοιογένεια του δείκτη διάθλασης, δημιουργεί **κέντρα σκέδασης** της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 9.10 Τροποσφαιρική σκέδαση.

Εφόσον, αυτοί οι τρισδιάστατοι σκεδαστές, βρεθούν εντός του κοινού όγκου που ορίζουν οι δέσμες εκπομπής και λήψης δύο κεραιών (Σχήμα 9.10), είναι δυνατή η πέραν του οριζοντα μεταξύ τους ζεύξη, μέσω του μηχανισμού της σκέδασης (scattering). Το φαινόμενο καλείται **τροποσφαιρική σκέδαση** (tropospheric scattering) και μπορεί να υποστηρίξει ζεύξεις σε αποστάσεις έως και 500-600 km. Μια προσέγγιση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος δίνει μείωση ανάλογη με την $7^{\text{η}}$ ή $8^{\text{η}}$ δύναμη της απόστασης. Στην πραγματικότητα, εκτός της απόστασης, υπάρχουν και άλλοι οι παράμετροι που επηρεάζουν τις απώλειες. Συνοπτικά μπορούν να αναφερθούν οι εξής παράμετροι:

- η διαφορά του δείκτη διάθλασης Δn , ανάμεσα στο ατμοσφαιρικό στρώμα που λειτουργεί σαν σκεδαστής και τον υπόλοιπο χώρο. Είναι προφανές, ότι όσο πιο μεγάλη τιμή λαμβάνει το Δn , τόσο πιο ισχυρά ανακλαστικά λειτουργεί το τροποσφαιρικό στρώμα και επομένως, τόσο πιο μεγάλο τμήμα της εκπεμπόμενης ισχύος σκεδάζεται προς το δέκτη. Η εξάρτηση από τον δείκτη διάθλασης εξηγεί τις εποχιακές διακυμάνσεις στη στάθμη του σήματος καθώς και τις τυχαίες διαλείψεις.

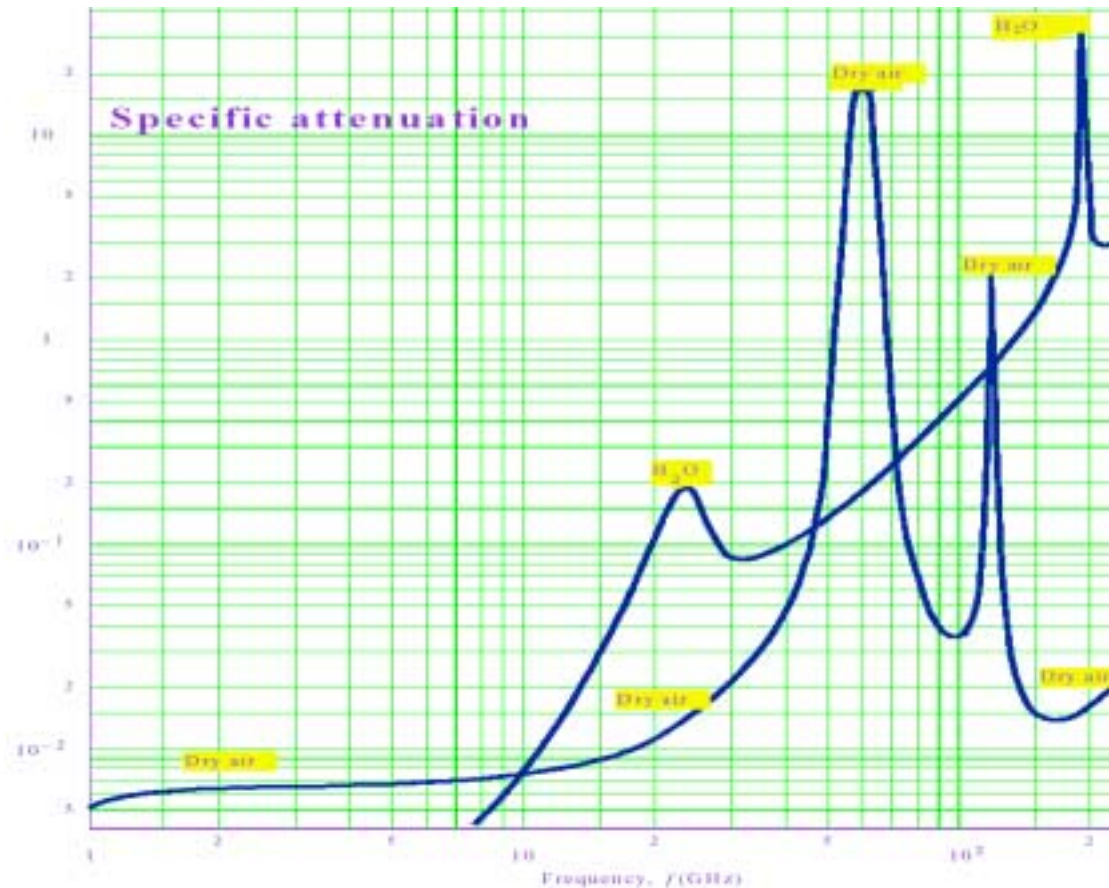
- η συχνότητα λειτουργίας της τροποσφαιρικής ζεύξης f . Οι απώλειες αυξάνουν με την αύξηση της συχνότητας και η πλέον χρήσιμη ζώνη φαίνεται να περιλαμβάνει συχνότητες μεταξύ 100 MHz έως και 10 GHz.

- το κέρδος G των κεραιών εκπομπής και λήψης. Συνήθως, χρησιμοποιούνται κεραιές υψηλού κέρδους/κατευθυντικότητας με παραβολικά κάτοπτρα διαμέτρου έως και 50 λ. Η εμφάνιση «απότομων» διαλείψεων (deep fading), με επιλεκτικότητα ως προς τη συχνότητα (selective fading) καθιστά αναγκαία τη χρήση συστημάτων διαφορικής λήψης. Λόγω του επιλεκτικού χαρακτήρα της διάλειψης, ως προς τη συχνότητα, η διαφορική λήψη συχνότητας (frequency diversity) είναι συνηθισμένη.

Για ζεύξεις πέραν του ορίζοντα, όπου υπάρχουν φυσικά εμπόδια και δεν είναι επιθυμητή ή δυνατή η χρήση αναμεταδοτών, η τροποσφαιρική σκέδαση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια εναλλακτική αλλά ιδιαίτερα απαιτητική επιλογή.

9.6. Απορρόφηση και σκέδαση λόγω αερίων και υδρατμών

Σε συχνότητες πάνω από τα 20GHz, η διάδοση των ραδιοκυμάτων στη γήινη ατμόσφαιρα επηρεάζεται αισθητά, παρουσιάζοντας απώλειες ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Οι απώλειες αυτές οφείλονται στην **απορρόφηση ενέργειας** λόγω **συντονισμού** με μόρια υδρατμών και οξυγόνου. Όπως είναι γνωστό, η σύνθεση της ατμόσφαιρας, σε συνθήκες ξηρού αέρα, αποτελείται κατά 99% από Άζωτο (N_2) και οξυγόνο (O_2). Το υπόλοιπο 1% αποτελείται από διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και ένα αριθμό άλλων σπάνιων στοιχείων. Από όλα τα παραπάνω στοιχεία, μόνο το οξυγόνο επηρεάζει τα ραδιοκύματα, και επομένως, από ραδιοηλεκτρική άποψη, η ατμόσφαιρα αποτελείται μόνο από οξυγόνο. Η απόκλιση από τις συνθήκες του ξηρού αέρα δηλ. η παρουσία υδρατμών (H_2O), έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση επιπλέον απωλειών, λόγω της απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από τα μόρια του νερού.



Σχήμα 9.11 Απώλειες (dB) συναρτήσει της συχνότητας (GHz) λόγω παρουσίας του O₂ και H₂O στην ατμόσφαιρα.

Η εξασθένηση λόγω του O₂ παρουσιάζει μέγιστη τιμή για συχνότητες μεταξύ 50 GHz και 70GHz, με ένα μέγιστο περίπου στα 60 GHz (Σχήμα 9.11). Δεδομένου ότι η ποσότητα του οξυγόνου δεν μεταβάλλεται σημαντικά σε διαφορετικά σημεία της ατμόσφαιρας, η εξασθένηση αυτή θεωρείται σταθερή.

Η εξασθένηση λόγω υδρατμών (H₂O) παρουσιάζει μέγιστη τιμή περίπου στα 23 GHz, ενώ αυξάνει όσο αυξάνει η συχνότητα πάνω από τα 31 GHz (Σχήμα 9.11). Η ποσότητα των υδρατμών μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή, ανάλογα με τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες. Επομένως, η γνώση της θερμοκρασίας, της πίεσης και της υγρασίας, είναι απαραίτητη για να υπολογιστεί η εξασθένηση λόγω υδρατμών.

Γενικά, η διάδοση των κυμάτων στην τροπόσφαιρα με συχνότητες πάνω από 30 GHz παρουσιάζει προβλήματα. Ωστόσο από το σχήμα 9.11 παρατηρούμε ότι παρουσιάζονται **παράθυρα απορρόφησης** στα οποία η εξασθένηση παρουσιάζει ελάχιστη τιμή.

9.7 Εξασθένηση λόγω υδρατμών

Σύμφωνα με τις διεθνείς συστάσεις (ITU-R P.840), η εξασθένηση γ_w (dB/km) λόγω υδρατμών, για συχνότητες κάτω από 350 GHz, υπολογίζεται από τον ακόλουθο εμπειρικό τύπο:

$$\gamma_w = \left[3,27 \times 10^{-2} r_t + 1,67 \times 10^{-3} \frac{\rho r_t^7}{r_p} + 7,7 \times 10^{-4} f^{0,5} + \frac{3,79}{(f - 22235)^2 + 9,81 r_p^2 r_t} + \frac{11,73 r_t}{(f - 18331)^2 + 11,85 r_p^2 r_t} + \frac{4,01 r_t}{(f - 325153)^2 + 1044 r_p^2 r_t} \right] \times f^2 \rho r_p r_t 10^{-4} \quad (9.19)$$

όπου γ_w η εξασθένηση σε dB/km, f είναι η συχνότητα σε GHz, $r_p = p/1013$ είναι ο συντελεστής πίεση (p είναι η πίεση σε hPa), $r_t = 288/(273+t)$ είναι θερμοκρασιακός συντελεστής (t είναι η θερμοκρασία σε °C), και ρ είναι η πυκνότητα των υδρατμών σε g/m^3 .

9.8 Εξασθένηση λόγω οξυγόνου

Σύμφωνα με τις διεθνείς συστάσεις (ITU-R P.640) η εξασθένηση γ_o (dB/km) λόγω της παρουσίας O_2 στην ατμόσφαιρα, δίνεται από τους ακόλουθους εμπειρικούς τύπους:

Εξασθένηση λόγω O_2 για συχνότητες κάτω από τα 57 GHz:

$$\gamma_o = \left[\frac{7,27 r_t}{f^2 + 0,351 r_p^2 r_t} + \frac{7,5 r_t}{(f - 57)^2 + 2,44 r_p^2 r_t^5} \right] f^2 r_p^2 r_t^2 \times 10^{-3} \quad (9.20)$$

Εξασθένηση λόγω O_2 για συχνότητες μεταξύ 57GHz and 63GHz:

$$\gamma_o = \left(\frac{(f - 60)(f - 63)}{18} \right) \gamma_o(57) - 1,66 r_p^2 r_t^{8,5} (f - 57)(f - 63) + \left(\frac{(f - 57)(f - 60)}{18} \right) \gamma_o(63) \quad (9.21)$$

Εξασθένηση λόγω O_2 για συχνότητες μεταξύ 63GHz και 350GHz:

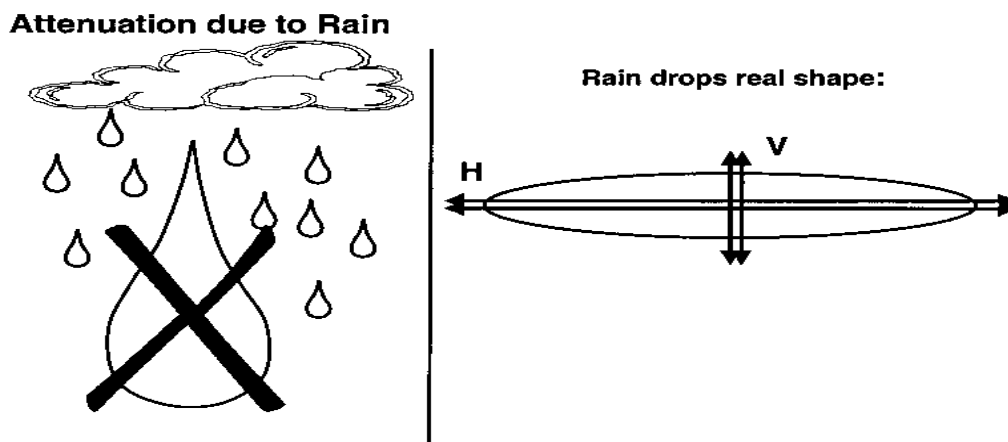
$$\gamma_o = \left[2 \times 10^{-4} r_t^{1,5} (1 - 1,2 \times 10^{-5} f^{1,5}) + \frac{4}{(f - 63)^2 + 1,5 r_p^2 r_t^5} + \frac{0,28 r_t^2}{(f - 11875) + 2,84 r_p^2 r_t^2} \right] f^2 r_p^2 r_t^2 \times 10^{-3} \quad (9.22)$$

όπου γ_o είναι η εξασθένηση σε dB/km, f είναι η συχνότητα σε GHz, $r_p = p/1013$ είναι συντελεστής πίεση (p είναι η πίεση σε hPa), και $r_t = 288/(273+t)$ είναι θερμοκρασιακός συντελεστής (t είναι η θερμοκρασία σε °C).

9.9 Απορρόφηση και Σκέδαση λόγω Βροχής

Όταν ένα ραδιοκύμα αλληλεπιδρά με αντικείμενα, όπως π.χ. οι σταγόνες της βροχής, που έχουν διαφορετικές διηλεκτρικές ιδιότητες από το περιβάλλοντα χώρο και μέγεθος συγκρίσιμο με το μήκος κύματος, τμήμα της ενέργειάς του κύματος απορροφάται και σκεδάζεται. Σύμφωνα με αυτή τη περιγραφή ερμηνεύεται το γεγονός της σημαντικής εξασθένησης των ραδιοκυμάτων, όταν παρατηρούνται δυνατές βροχοπτώσεις. Ο βαθμός της επίδρασης της βροχόπτωσης σε ένα ραδιοκύμα εξαρτάται από:

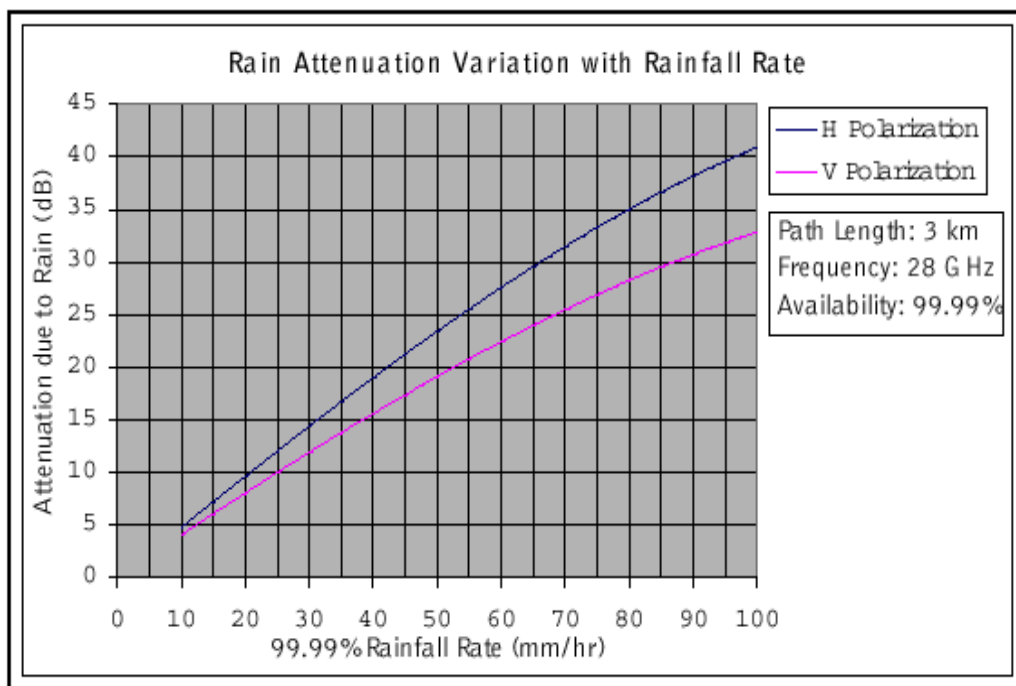
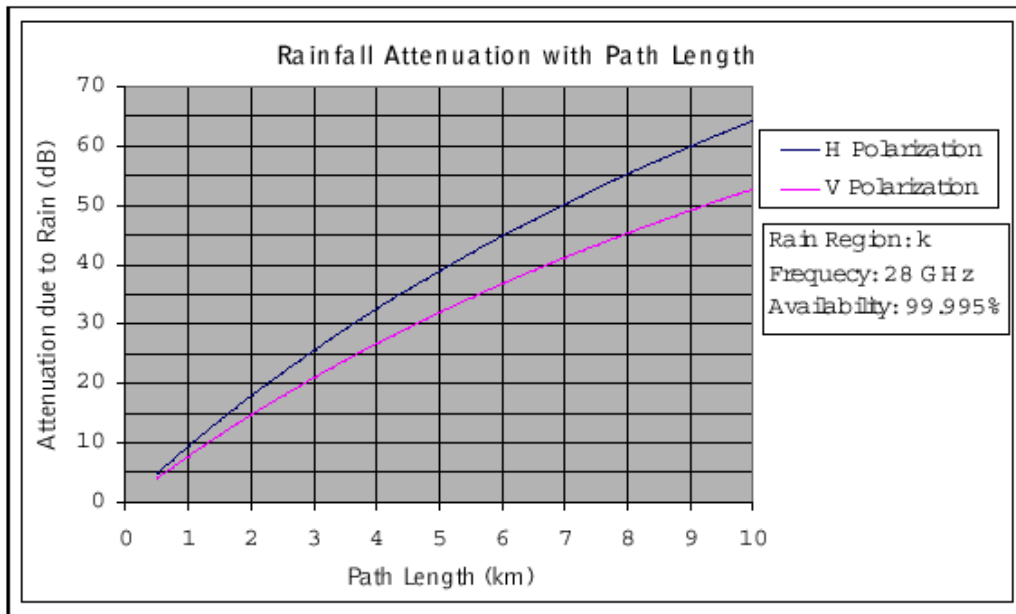
- τη συχνότητα f : Όσο μεγαλώνει η συχνότητα f και το μήκος κύματος γίνεται συγκρίσιμο με τις διαστάσεις της σταγόνας, τόσο το κύμα αντιλαμβάνεται τις σταγόνες ως ευμεγέθεις σκεδαστές (εμπόδια). Επομένως, όσο αυξάνει η συχνότητα και το ραδιοηλεκτρικό μέγεθος των σταγόνων, τόσο αυξάνουν και οι αποσβέσεις λόγω βροχής.
- το ύψος της βροχόπτωσης: όσο αυξάνει το ύψος της βροχόπτωσης και αυξάνει η πυκνότητα των σταγόνων, τόσο το κύμα αλληλεπιδρά με ένα αυξανόμενο αριθμό σκεδαστών. Επομένως, όσο αυξάνει το ύψος της βροχόπτωσης, τόσο πιο έντονες είναι οι απώλειες που παρατηρούνται.



Σχήμα 9.12 Γεωμετρία σταγόνας βροχής και πόλωση κύματος.

- το είδος της πόλωσης: Η οριζόντια πόλωση είναι πιο επιρρεπής στις αποσβέσεις από ότι η κατακόρυφη. Το γεγονός αυτό εξηγείται από το σχήμα που παίρνουν οι σταγόνες καθώς πέφτουν. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της πτώσης, παραμορφώνονται παρουσιάζοντας την τάση να κατανείμουν τον όγκο τους, κύρια κατά μήκος της διεύθυνσης του οριζόντια

πολωμένου ηλεκτρικού πεδίου. Από αυτή την άποψη, η αλληλεπίδραση του πεδίου με τη σταγόνα, είναι **πιο σημαντική στην οριζόντια πόλωση** από ότι στην κατακόρυφη. Οι προηγούμενες παρατηρήσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.13((α) και β)).



Σχήμα 9.13 Εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης συναρτήσει (α) του μήκους της ζεύξης (β) του ύψους της βροχόπτωσης.

Σύμφωνα με τις διεθνείς συστάσεις (ITU-R P. 837) η εξασθένιση του σήματος γ_R λόγω βροχής (σε dB/Km), με ύψος βροχόπτωσης R (mm/hr), δίνεται από τον ακόλουθο εμπειρικό τύπο:

$$\gamma_R = K \cdot R^a \quad (\text{dB/Km}) \quad (9.23)$$

Οι συντελεστές K και a , είναι συναρτήσεις της συχνότητας και της πόλωσης (Σχήμα 9.14) και ορίζονται σύμφωνα με τις διεθνείς συστάσεις (ITU-R P.525). Το ύψος της βροχόπτωσης προκύπτει, είτε από τοπικά μετεωρολογικά δεδομένα, είτε από τη από τη διεθνώς αποδεκτή κατηγοριοποίηση του κόσμου σε ζώνες με συγκεκριμένα ύψη βροχόπτωσης (ITU-R P. 837).

Συχνότητα (GHz)	K_H	K_V	a_H	a_V
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0,00301	0.00265	1.332	1.312
8	0.00454	0.00395	1.327	1.310
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0,0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.030
30	0.187	0.167	1.021	1.000
35	0.263	0.233	0.979	0.963
40	0.350	0.310	0.939	0.929
45	0.442	0.393	0.903	0.897
50	0.536	0.479	0.873	0.868
60	0.707	0.642	0.826	0.824
70	0.851	0.784	0.793	0.793
80	0.975	0.906	0.769	0.769
90	1.06	0.999	0.753	0.754
100	1.12	1.06	0.743	0.744
120	1.18	1.13	0.731	0.732
150	1.31	1.27	0.710	0.711
200	1.45	1.42	0.689	0.690
300	1.36	1.35	0.688	0.689
400	1.32	1.31	0.683	0.684

Σχήμα 9.14 Συντελεστές απόσβεσης K και a λόγω βροχόπτωσης για οριζόντια (a_H , K_H) και κατακόρυφη (a_V , K_V) πόλωση του κύματος και για διάφορες συχνότητες.

9.10 Απορρόφηση και σκέδαση λόγω στερεών σωματιδίων

Γενικότερα, τα υγρά σωματίδια της ατμόσφαιρας, με διάμετρο μικρότερη από 0,01 cm, θεωρούνται σαν ομίχλη, ενώ με διάμετρο μεγαλύτερη από 0,01 cm σαν βροχή. Λόγω του μικρότερου μεγέθους αναμένεται να είναι μικρότερες και οι εξασθενήσεις στη διάδοση του κύματος. Για παράδειγμα, η συνηθισμένη ομίχλη επιφέρει εξασθένηση περίπου 0,1 dB/Km για συχνότητα 35 GHz και επομένως μπορεί να αμεληθεί. Η αγνόηση της εξασθένησης αυτής δεν είναι σημαντική και για ένα επιπλέον λόγο. Είναι λογικό να υποθέσει κανείς ότι η βροχή δεν συμβαίνει παράλληλα με χιονόπτωση/ομίχλη/αμμοθύελλα. Με άλλα λόγια, εάν βρέχει δεν υπάρχει την ίδια στιγμή ομίχλη ή χιονόπτωση. Αποδεχόμενοι αυτή την υπόθεση και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι απώλειες λόγω βροχόπτωσης είναι γενικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του χιονιού κλπ, προκύπτει ότι εάν υπολογίσουμε τις απώλειες λόγω βροχής υπερκαλύπτουμε τις απώλειες λόγω χιονόπτωσης/αμμοθύελας/ομίχλης.

9.11 Περίθλαση κυμάτων στην τροπόσφαιρα-Ζώνες Fresnel

Ο όρος **περίθλαση** στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία χαρακτηρίζει τα φαινόμενα που παρατηρούνται όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε ένα εμπόδιο. Στην περίπτωση αυτή επάγονται πάνω στο εμπόδιο ρεύματα υψηλής συχνότητας τα οποία αποτελούν τις πηγές του δευτερογενούς πεδίου ή του πεδίου της περίθλασης. Από θεωρητική άποψη ο όρος περίθλαση είναι στενά συνδεδεμένος με τον γενικότερο όρο σκέδαση, που χρησιμοποιείται όμως κυρίως για τρισδιάστατα εμπόδια και διάδοση κυμάτων σε τρεις διαστάσεις. Στην οπτική επειδή το μήκος κύματος ακτινοβολίας είναι μικρό σχετικά με τις διαστάσεις του εμποδίου, δημιουργούνται ευκρινείς σκοτεινές περιοχές. Στις ραδιοσυχνότητες όμως που εξετάζουμε το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις των εμποδίων και ως εκ τούτου κατά την περίθλαση παρατηρείται εξασθένηση και όχι μηδενισμός του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η γη προκαλεί φαινόμενα περίθλασης στη διάδοση κυμάτων γύρω από αυτήν για δυο κυρίως λόγους. Πρώτον λόγω ανωμαλιών στην επιφάνειά της και επιπλέον επειδή και η ίδια αποτελεί έναν μεγάλο σφαιρικό σκεδαστή.

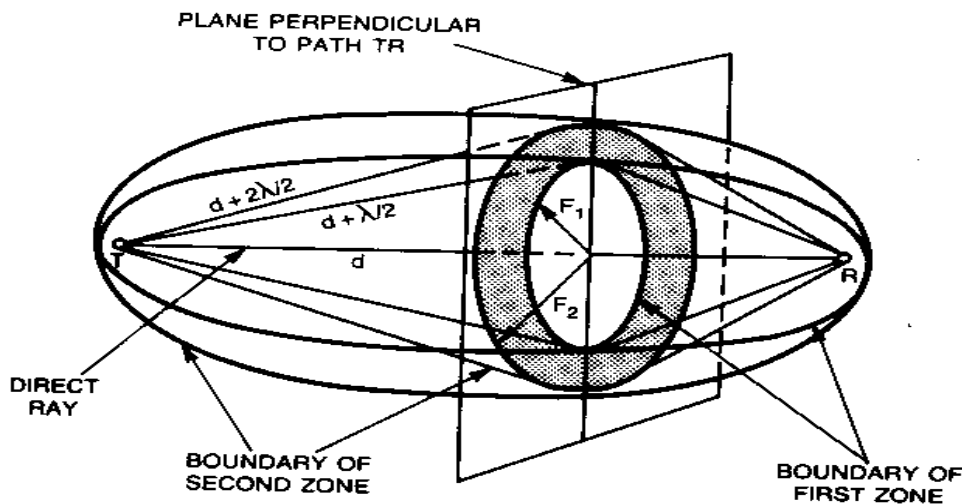
Η περίθλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω σε ανωμαλίες του εδάφους είναι υπεύθυνη για πάρα πολλές ανωμαλίες που παρατηρούνται στη διάδοσή τους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το φαινόμενο περίθλασης των κυμάτων πάνω σε εμπόδια της επιφάνειας της γης, όπως π.χ. σπίτια, λόφοι, βράχια, δέντρα κλπ. Αν π.χ. έχουμε ραδιοζεύξη μεταξύ του σταθμού Α και Β και τα κύματα του σταθμού φτάνουν απευθείας και με

περίθλαση στους λόφους ή άλλα εμπόδια, τότε το σήμα που φτάνει σ' αυτό θα εξαρτηθεί από τη διαφορά φάσης με την οποία συμβάλλουν το απευθείας κύμα με τα από περίθλαση προερχόμενα κύματα.

Ο ορισμός της απόστασης ασφαλείας, σε ότι αφορά τις απώλειες λόγω της περίθλασης, βασίζεται στην έννοια ενός γεωμετρικού τόπου, ο οποίος ονομάζεται **ζώνη Fresnel**. Συγκεκριμένα, ο ενδιάμεσος χώρος κυματικής διάδοσης ανάμεσα στον πομπό (T) και τον δέκτη (R), μπορεί να υποδιαιρεθεί από μια οικογένεια ομόκεντρων ελλειψοειδών, που ονομάζονται **ελλειψοειδή Fresnel** (Σχήμα 9.15). Κάθε ελλειψοειδές Fresnel έχει εστιακά σημεία τα T και R, ενώ κάθε σημείο M στην επιφάνεια του ικανοποιεί τη σχέση:

$$TM + MR = TR + n \frac{\lambda}{2} \quad (9.24)$$

Η κάθε διαφορετική τιμή του n (=1,2,3...) ορίζει ένα μοναδικό ελλειψοειδές π.χ. για n=1 το 1^ο ελλειψοειδές Fresnel, για n=2 το 2^ο ελλειψοειδές Fresnel κ.ο.κ.



Σχήμα 9.15 Ελλειψοειδές Fresnel.

Η τομή των ελλειψοειδών με ένα επίπεδο κάθετο στην οδό διάδοσης (μέτωπο του κύματος) ορίζει μια σειρά ομόκεντρων κύκλων ακτίνας R_n ($n=1,2,3...$) που ονομάζονται **ζώνες Fresnel**.

Σύμφωνα με τη σχέση (9.24) και το συμβολισμό του Σχήματος 9.15, στην περιφέρεια της n-οστής ζώνης Fresnel ικανοποιείται η σχέση:

$$d_3 + d_4 = (d_1 + d_2) + n \frac{\lambda}{2} \quad (9.25)$$

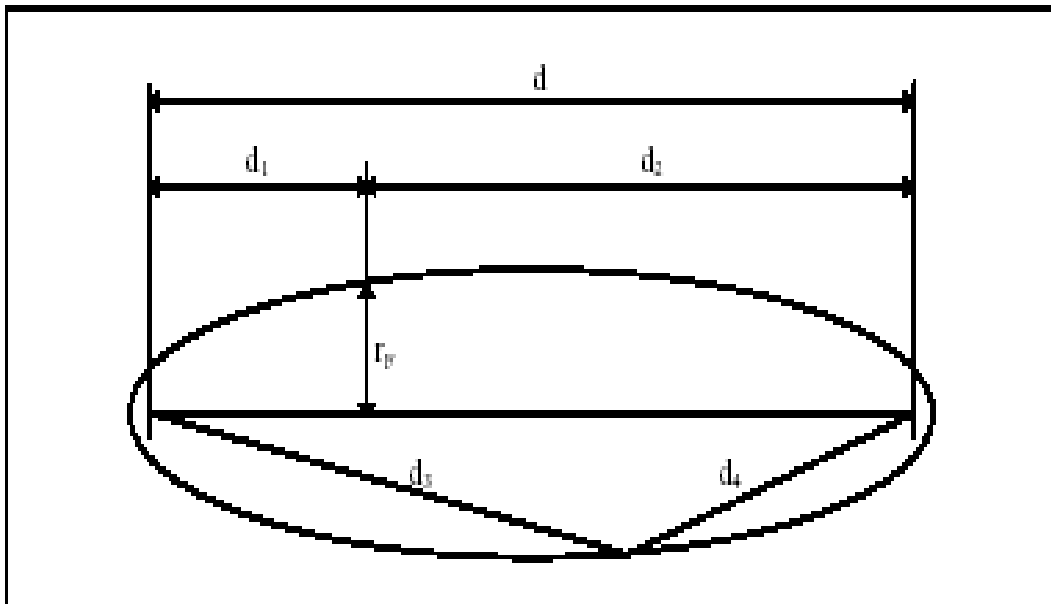
ενώ η ακτίνα της δίνεται από τον ακόλουθο γενικό τύπο:

$$R_{F_n} = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} = \sqrt{n} R_{F_1} \quad (9.26)$$

Για $n=1$, προκύπτει η ακτίνα της 1^{ης} ζώνης Fresnel:

$$R_{F_1} = 17.3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f(d_1 + d_2)}} \quad (9.27)$$

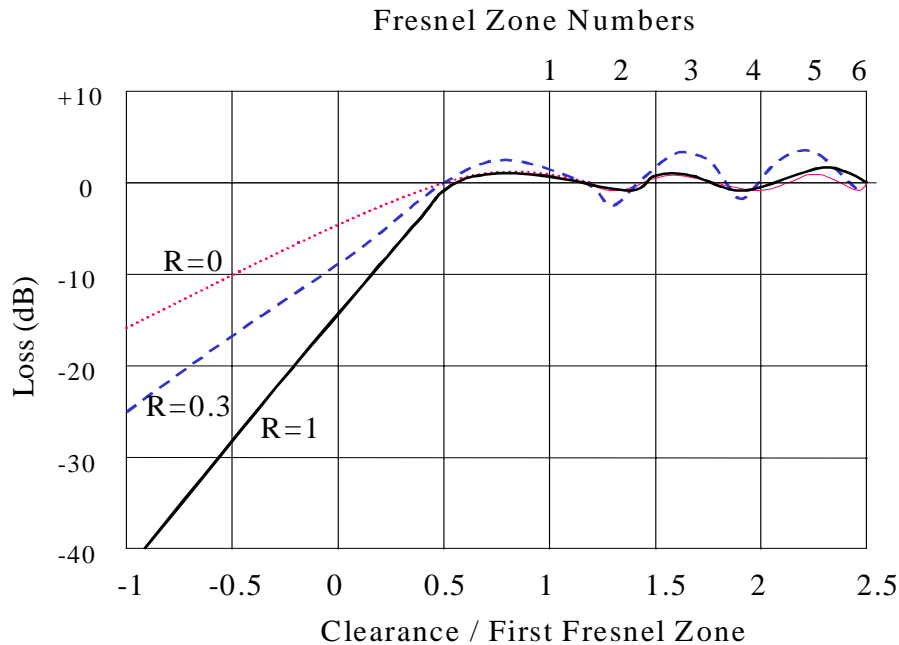
όπου R_{F_n} : η ακτίνα της n -οστής ζώνης Fresnel, R_{F_1} : η ακτίνα της 1ης ζώνης Fresnel, d_1 : η απόσταση από το αριστερό εστιακό σημείο (κεραία-πομπός) έως το σημείο υπολογισμού (km), d_2 : η απόσταση από το δεξιό εστιακό σημείο (κεραία-δέκτης) έως το σημείο υπολογισμού (km), $d=d_1+d_2=H$ εστιακή απόσταση (απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη) (km), f : η συχνότητα μετάδοσης (GHz).



Σχήμα 9.16 Ακτίνα 1^{ης} Ζώνης Fresnel για ένα συγκεκριμένο σημείο της οδού διάδοσης.

Αν υποθέσουμε ότι στην περιοχή των ζωνών Fresnel υπάρχουν δευτερογενείς πηγές ακτινοβολίας (από περίθλαση) που επάγονται από τον πομπό T, τότε τα κύματα που θα φθάνουν στο δέκτη R θα έχουν διαφορά φάσης $n\lambda/2$ συγκριτικά με το κατευθείαν κύμα. Η διαφορά φάσης μεταξύ των κυμάτων μπορεί να προκαλέσει, στην καλύτερη περίπτωση, μια ενδυνάμωση του κατευθείαν κύματος, αλλά οπωσδήποτε υπάρχει και το ενδεχόμενο μιας σημαντικής εξασθένησης. Γενικά η ενδυνάμωση του κύματος, όταν οι επιμέρους συνιστώσες του βρίσκονται σε φάση, αποτελεί πλεονέκτημα που συνήθως δεν υπολογίζεται ως αναμενόμενο. Αντίθετα, η πιθανότητα εξασθένησης συνυπολογίζεται, έτσι ώστε να υπάρχει

πρόβλεψη για αυτή. Ο πρακτικός κανόνας που χρησιμοποιείται στη σχεδίαση των ραδιοζεύξεων, προκειμένου να αποφευχθούν οι απώλειες περίθλασης, είναι η απουσία εμποδίων στο χώρο που ορίζει η 1^η ζώνη Fresnel ή τουλάχιστον το 0.6 της 1^{ης} ζώνης Fresnel.



Σχήμα 9.17 Απώλειες λόγω περίθλασης ανάλογα με την ύπαρξη εμποδίων γύρω από την ευθεία οπτικής επαφής.

Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 9.17, όπου σχεδιάζονται γραφικά οι απώλειες για εμπόδια διαφορετικής καμπυλότητας, και για διαφορετικές αποστάσεις από την οδό διάδοσης. Το R είναι παράγοντας καμπυλότητας δηλ. το R=0 αντιστοιχεί σε ένα αιχμηρό εμπόδιο, ενώ το R=1 σε ένα τέλειο σφαιρικό εμπόδιο. Η απόσταση του εμποδίου από την ευθεία πομπού-δέκτη εκφράζεται συναρτήσει της ακτίνας της 1^{ης} ζώνης Fresnel. π.χ. η αρνητική τιμή -0.5 σημαίνει ότι η κορυφή του εμποδίου βρίσκεται σε ύψος $0.5 R_{F1}$ πάνω από την ευθεία πομπού-δέκτη. Ανάλογα, η θετική τιμή 0.5 σημαίνει ότι το εμπόδιο βρίσκεται σε απόσταση $0.5 R_{F1}$ κάτω από την ευθεία πομπού-δέκτη. Το κλάσμα της απόστασης του εμποδίου από την ευθεία οπτικής επαφής προς τη ακτίνα της 1^{ης} ζώνης Fresnel, αναφέρεται ως η «καθαρότητα» (clearance) της 1^{ης} ζώνης Fresnel. Η εξέταση του διαγράμματος αλλά και των σχέσεων οδηγεί ακόλουθα συμπεράσματα:

- οι απώλειες αυξάνουν όσο αυξάνει η καμπυλότητα του εμποδίου
- οι απώλειες αυξάνουν μονότονα καθώς η απόσταση του εμποδίου από την ευθεία οπτικής επαφής γίνεται μικρότερη από $0.6 R_{F1}$. Είναι προφανές ότι οι απώλειες

μεγιστοποιούνται όταν το εμπόδιο παρεμβάλλεται στην ευθεία οπτικής επαφής (αρνητικές τιμές στον οριζόντιο άξονα).

- όσο μειώνεται η συχνότητα, τόσο μεγαλώνει η ακτίνα της 1^{ης} ζώνης Fresnel , και επομένως τόσο πιο μακριά πρέπει να βρίσκονται τα διάφορα εμπόδια από την ευθεία οπτικής επαφής.

Λαμβάνοντας υπόψη την προηγηθείσα συζήτηση είναι προφανές ότι κατά τη σχεδίαση μιας ραδιοζεύξης, και εφόσον υπάρχουν εμπόδια ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη, θα πρέπει να ρυθμιστούν τα ύψη των κεραιών και αντίστοιχα η ευθεία πομπού-δέκτη, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται καθαρότητα της 1^{ης} ζώνης Fresnel τουλάχιστον 0,6.



Σχήμα 9.18 Σχεδίαση ραδιοζεύξης έτσι ώστε τα εμπόδια να βρίσκονται εκτός της 1^{ης} ζώνης Fresnel.

10. Ιονόσφαιρα

Ιονόσφαιρα είναι ο χώρος γύρω από τη γη στην οποία υπάρχουν ιονισμένα άτομα και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η ιονόσφαιρα εκτείνεται από τα 60-80Km και φτάνει έως και τα 400-500Km. Η ιονόσφαιρα αποτελεί μέσο διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από 1.6 έως 30MHz μέσω διάθλασης και ανάκλασης σε αυτή. Οι ιονοσφαιρικές ζεύξεις δεν βρίσκουν πολλές εφαρμογές σήμερα λόγω αντικατάστασης τους από τις δορυφορικές ζεύξεις αλλά χρησιμοποιούνται στη ναυσιπλοΐα και ιδιαίτερα για ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων.

Η κυριότερη αιτία δημιουργίας της ιονόσφαιρας είναι ο ήλιος. Η ακτινοβολία του, εκτός από τη φωτεινή ενέργεια, περιλαμβάνει και υπέρυθρη ακτινοβολία, ακτινοβολία συχνοτήτων της περιοχής των Ραδιοκυμάτων, υπεριώδη ακτινοβολία, ακτίνες X, ακτίνες γ, καθώς και ενέργεια σωματιδιακής φύσης, όπως πυρήνες υδρογόνου, ηλίου, ηλεκτρόνια, ακτίνες α, β, κλπ., που εκτοξεύονται από τον ήλιο με πολύ μεγάλη ταχύτητα.

Σε ύψος μεγαλύτερο από 50Km πάνω από την επιφάνεια της Γης υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες για τη δημιουργία ιονισμένων αερίων μαζών από την ακτινοβολία του ήλιου. Όταν η πυκνότητα του αερίου είναι μικρή, τότε ένα άτομο που ιονίζεται από την ακτινοβολία του Ήλιου μπορεί να παραμείνει επί πολύ χρόνο ιονισμένο, μιας και εξαιτίας της αραιότητάς του δεν θα βρει εύκολα άλλο άτομο να συγκρουσθεί και να αποϊονισθεί, δηλαδή να γίνει ουδέτερο άτομο. Η κυριότερη μορφή της ιονίζουσας ενέργειας είναι η υπεριώδης ακτινοβολία κατάλληλου μήκους κύματος. Τα πρώτα εξωτερικά στρώματα της ιονόσφαιρας ιονίζονται από ακτινοβολία σωματιδιακής φύσης (ιονισμός από σωματίδια).

Ο ιονισμός της ατμόσφαιρας και η δημιουργία της ιονόσφαιρας γίνεται κυρίως με δύο τρόπους :

α) Ιονισμός με ακτινοβολία

Θεωρούμε την υπεριώδη ακτινοβολία του Ήλιου κβαντισμένη, δηλαδή ότι αποτελείται από φωτόνια ενέργειας $h\nu$. Αν για ένα άτομο ή μόριο απαιτείται ενέργεια ιονισμού W και δεχθεί ενέργεια από το φωτόνιο $h\nu > W$, τότε το άτομο ιονίζεται, αποβάλλοντας ένα ηλεκτρόνιο και η πλεονάζουσα ενέργεια του φωτονίου δίνει μια ταχύτητα $v_{εξ}$ εξόδου στο ηλεκτρόνιο που έτσι εξέρχεται από το άτομο ή το μόριο και γίνεται ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$h\nu = W + \frac{1}{2} m_{\eta\lambda} v_{εξ}^2 \quad (\text{Joule}) \quad (10.1)$$

όπου $m_{\eta\lambda} = 9.1 \cdot 10^{-31}$ Kg, είναι η μάζα του ηλεκτρονίου.

β) Ιονισμός με κινούμενα σωματίδια

Ένα σωματίδιο (ηλεκτρόνιο, άτομο, μόριο) μάζας m_σ και ταχύτητας v_σ έχει κινητική ενέργεια $\frac{1}{2} m_\sigma v_\sigma^2$. Αν η ενέργεια αυτή είναι μεγαλύτερη από το έργο που απαιτείται για την έξοδο ενός ηλεκτρονίου, τότε το άτομο ιονίζεται και το εξερχόμενο από αυτό ηλεκτρόνιο έχει ταχύτητα $v_{εξ}$, που προκύπτει από τη σχέση:

$$\frac{1}{2} m_\sigma v_\sigma^2 = W + \frac{1}{2} m_{ηλ} v_{εξ}^2 \quad (10.2)$$

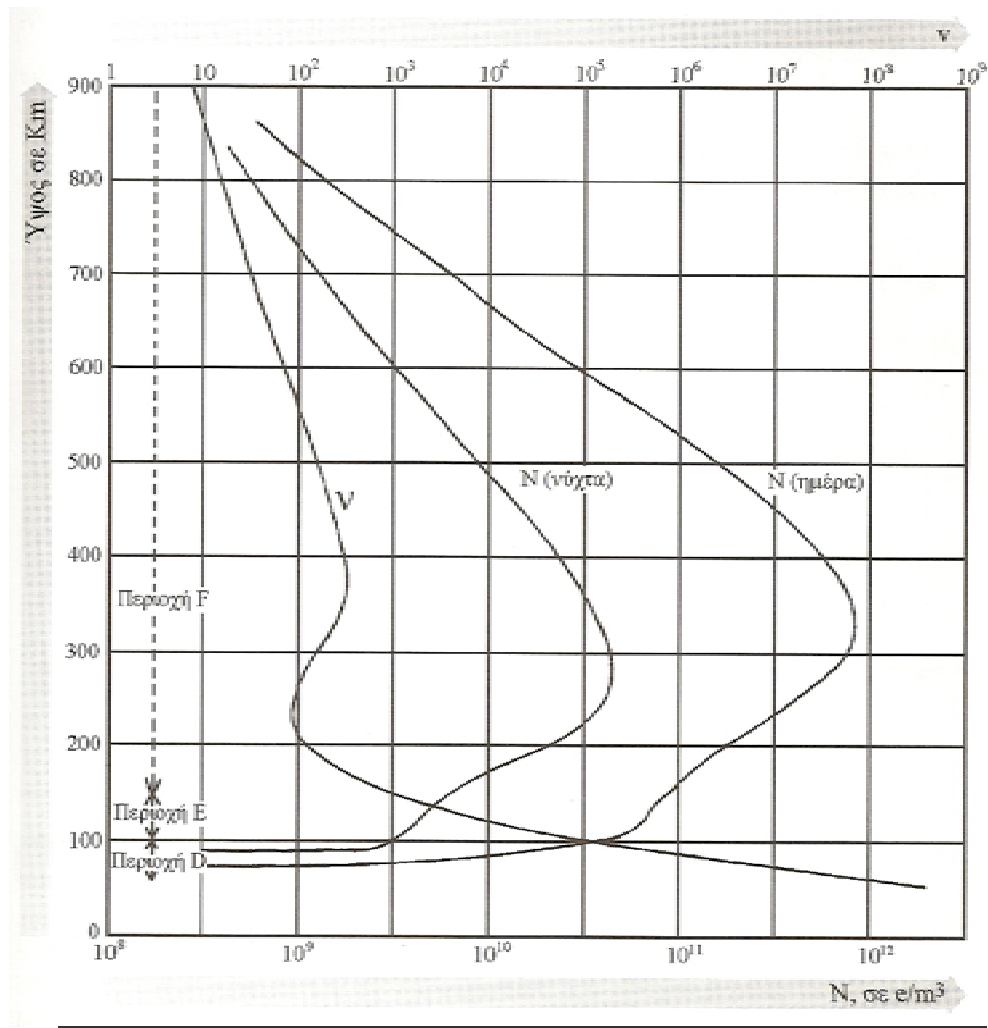
Η κινητική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου πολλές φορές εκφράζεται σε eV (Ηλεκτρονιοβολτ).

10.1 Ιονισμός της πραγματικής ατμόσφαιρας

Η πραγματική ατμόσφαιρα μπορεί να θεωρηθεί ομογενής μέχρι τα 90Km και από εκεί και πέρα στρωματώνεται, δηλαδή αποτελείται από διαφορετικά στρώματα αέρα. Ο ιονισμός της προκαλείται όχι μόνο από τις υπεριώδεις και τις ακτίνες X του Ήλιου, αλλά και από σωματίδια.

Επειδή η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάποια ορισμένη θέση της γήινης ατμόσφαιρας μεταβάλλεται καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου, καθώς και καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, επόμενο είναι να μεταβάλλεται συνέχεια και η πυκνότητα ιονισμού της ιονόσφαιρας. Γι' αυτό δεν δίνονται με ακρίβεια το πάχος της ιονόσφαιρας ή των ιονοσφαιρικών στρωμάτων από τα οποία αποτελείται, ποια είναι η πυκνότητα ιονισμού τους και ποιο είναι το ύψος τους αλλά δίνονται μέσες τιμές. Η ιονόσφαιρα αρχίζει από το ύψος των 50 Km και τελειώνει στα 500 Km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Φυσικά τη νύχτα το πάχος αυτό μικραίνει πολύ, μιας και η αιτία που δημιουργεί τον ιονισμό, δηλαδή η ακτινοβολία του Ήλιου, δεν υπάρχει πια. Το πάχος αυτό εξαρτάται και από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.

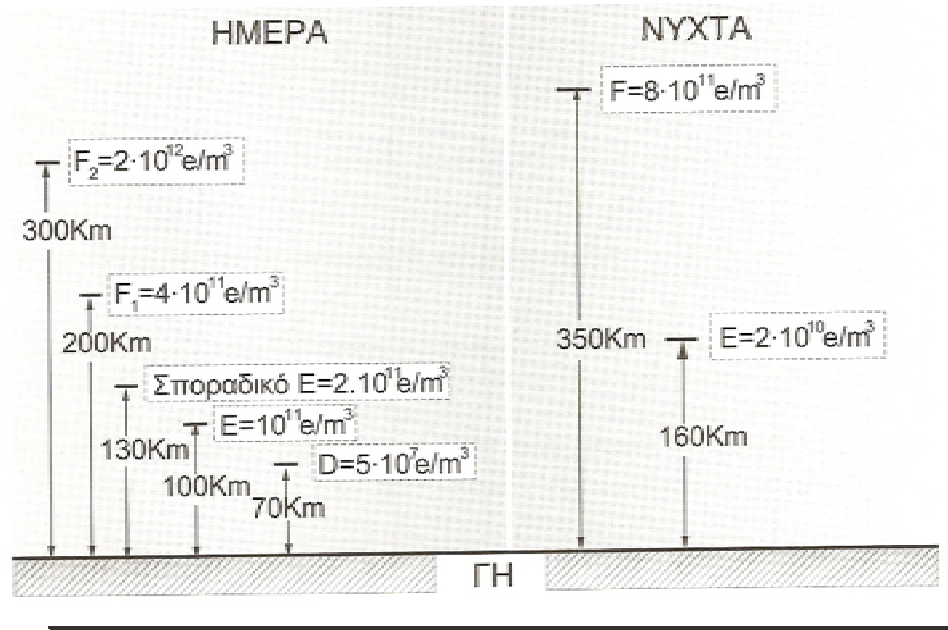
Η πυκνότητα ιονισμού N (σε e/m^3) της ιονόσφαιρας ξεκινώντας από την επιφάνεια της Γης και πηγαίνοντας προς τα πάνω κατακόρυφα δεν μεταβάλλεται ομαλά, δηλαδή δεν έχουμε συνεχώς αύξηση ή μείωση της πυκνότητας ιονισμού, αλλά μεταβάλλεται ανώμαλα. Παρουσιάζει δηλαδή μέγιστα και ελάχιστα πυκνότητας ηλεκτρονίων. Η περιοχή που παρουσιάζει μέγιστο ιονισμού λέγεται **ιονοσφαιρικό στρώμα**.



Σχήμα 10.1 Κατανομή στην ιονόσφαιρα, κατά ύψος, της πυκνότητας των ηλεκτρονίων N (σε e/m^3) και της συχνότητας σύγκρουσης τους ν .

Στο Σχήμα 10.1 παρουσιάζεται η μεταβολή της πυκνότητας ιονισμού της ιονόσφαιρας σε σχέση με το ύψος της. Σημαντική είναι η διαφορά που υπάρχει μεταξύ της ημερήσιας και της νυχτερινής καμπύλης ιονισμού.

Τα ιονοσφαιρικά στρώματα συμβολίζονται με τα γράμματα D, E, F₁, και F₂. Το στρώμα E αναφέρεται και ως στρώμα Kennely-Heavisite και το στρώμα F₁ ως στρώμα Appleton. Τη νύχτα τα στρώματα F₁, και F₂ ενώνονται και σχηματίζουν το στρώμα F και το D εξαφανίζεται εξαιτίας της έλλειψης ηλιακής δράσης. Όσο πιο μεγάλη είναι η διάρκεια της νύχτας τόσο πιο κοντά στη Γη είναι ένα ιονοσφαιρικό στρώμα. Στο Σχήμα 10.2 φαίνονται τα ιονοσφαιρικά στρώματα της ημέρας και της νύχτας με τις τυπικές πυκνότητες ιονισμού και τα τυπικά ύψη τους.



Σχήμα 10.2 Τυπικά ιονοσφαιρικά στρώματα της ημέρας και της νύχτας.

Τέλος, πιο ψηλά από την ιονόσφαιρα υπάρχουν ιονισμένες περιοχές, σε μορφή ζωνών, που περιβάλλουν τη γη και είναι γνωστές ως ζώνες Van Allen. Αποτελούνται από ιονισμένα σωματίδια, που παγιδεύτηκαν από το γήινο μαγνητικό πεδίο.

10.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της ιονόσφαιρας

Η ιονόσφαιρα συμπεριφέρεται και ως αγωγός διότι έχει ελεύθερα ηλεκτρόνια και ως μονωτής διότι έχει και ουδέτερα μόρια. Συνεπώς στην ιονόσφαιρα παρουσιάζονται ταυτόχρονα και ρεύμα μετατόπισης και ρεύμα μεταφοράς. Τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της ιονόσφαιρας που πρέπει να δοθούν είναι η διηλεκτρική της σταθερά ϵ και η αγωγιμότητα της σ . Αποδεικνύεται ότι είναι:

$$\epsilon = \epsilon_0 - \frac{Ne^2}{m(\omega^2 + \nu^2)} \quad (10.3)$$

η ισοδύναμα:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m(\omega^2 + \nu^2)} \quad (10.4)$$

$$\sigma = \frac{Ne^2 \nu}{m(\omega^2 + \nu^2)} \quad (10.5)$$

10.3 Διάδοση κύματος στην Ιονόσφαιρα

Στις πρακτικές εφαρμογές θεωρούμε την ιονόσφαιρα, για τη διάδοση των Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων, ως **τέλειο μονωτικό** με σχετική διηλεκτρική σταθερά:

$$\epsilon_r = 1 - 80.8 \frac{N}{f^2} \cong 1 - 81 \frac{N}{f^2} \quad (10.6)$$

όπου N η πυκνότητα ιονισμού σε (σε e/m^3) και f συχνότητα του κύματος σε Hz. Για συχνότητες μεγαλύτερες από 1.6MHz η ιονόσφαιρα, πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ως τέλειο μονωτικό για τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με διηλεκτρική σταθερά που δίνεται από τη σχέση (10.6). Η σχέση (10.6) πρακτικά ισχύει για συχνότητες μεγαλύτερες από 1.6MHz και για $\omega \gg \nu$.

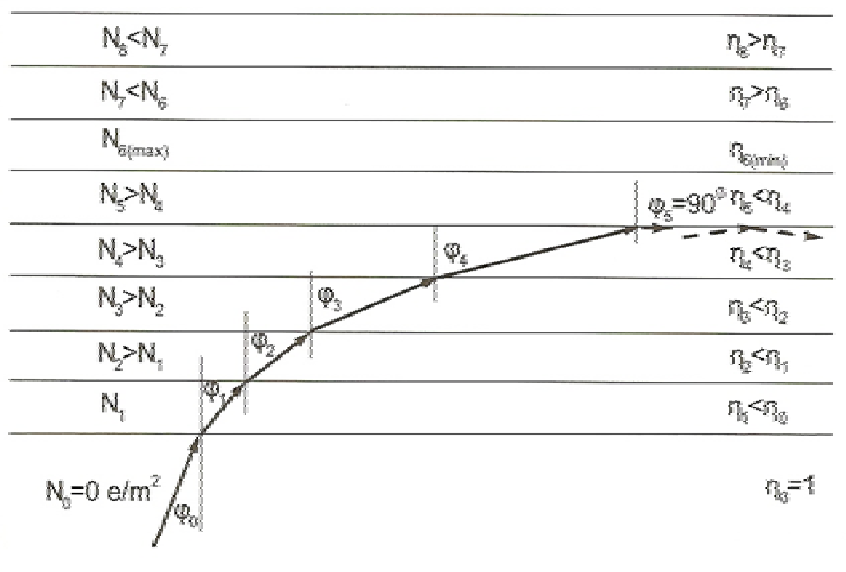
10.4 Διάθλαση και ανάκλαση των κυμάτων από την Ιονόσφαιρα

Για να εξηγήσουμε το φαινόμενο της ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο ιονοσφαιρικό στρώμα, πρέπει πρώτα να εξηγήσουμε το φαινόμενο της διάθλασής του σ' αυτό. Συνήθως λέμε ότι το Ηλεκτρομαγνητικό Κύμα ανακλάται στην ιονόσφαιρα. Στην πραγματικότητα επειδή το Ηλεκτρομαγνητικό Κύμα μεταβαίνει από οπτικά πυκνότερο σε οπτικά αραιότερο μέσο **διαθλάται διαδοχικά** και αν προλάβει να σχηματίσει γωνία πρόσπτωσης λίγο μεγαλύτερη από την ορική γωνία, τότε παθαίνει ολική ανάκλαση και επιστρέφει στη γη.

Για την απλότητα της διερεύνησης του φαινομένου θεωρούμε τα ιονοσφαιρικά στρώματα επίπεδα, αντί για σφαιρικά. Η μεταβολή της πυκνότητας ιονισμού σ' ένα ιονοσφαιρικό στρώμα είναι συνεχής (Σχήμα 10.3), αλλά θα θεωρήσουμε ότι κάθε ιονοσφαιρικό στρώμα αποτελείται από στοιχειώδη υποστρώματα με σταθερή πυκνότητα ιονισμού N και επομένως και με σταθερό δείκτη διάθλασης n . Στο κέντρο περίπου του ιονοσφαιρικού στρώματος η πυκνότητα ιονισμού είναι μέγιστη, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτό, προς τα άνω και προς τα κάτω, αυτή ελαττώνεται. Δηλαδή ισχύει:

$$N_0 < N_1 \dots < N_{\eta-1} < N_{\eta} > N_{\eta+1} > \dots >$$

Γενικά στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι γνωστό ότι όταν το κύμα στην πορεία του συναντήσει διαφορετικό μέσο διάδοσης από αυτό μέσα στο οποίο ήδη διαδίδεται, τότε ένα μέρος του ανακλάται και ένα άλλο μέρος του διαθλώμενο συνεχίζει την πορεία του στο επόμενο μέσο.



Σχήμα 10.3 Ανάκλαση κύματος σε ιονοσφαιρικό στρώμα.

Το κύμα περνώντας από τον αέρα στο πρώτο ιονισμένο υπόστρωμα και από εκεί στο δεύτερο, τρίτο, κλπ, υφίσταται κάθε φορά και ανάκλαση και διάθλαση. Το ποσοστό του ανακλώμενου κύματος σε κάθε υπόστρωμα το θεωρούμε ασήμαντο και δεν το λαμβάνομε υπόψη και ενδιαφέρει μόνο το διαθλώμενο κύμα. Στην πράξη η απορρόφηση μπορεί να είναι από ασήμαντη έως σημαντικότητα.

Για να μελετηθεί, η ανάκλαση του κύματος στο ιονοσφαιρικό στρώμα, πρέπει να μελετηθεί η διαδοχική διάθλασή του στα υποστρώματα του ιονοσφαιρικού στρώματος. Δηλαδή θα πρέπει να μελετηθεί η πορεία που ακολουθεί το διάνυσμα Raynting μέσα στο ιονοσφαιρικό στρώμα. Η μελέτη της συμπεριφοράς για τα Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα ενός ιονοσφαιρικού στρώματος γίνεται ευκολότερα αν το θεωρήσουμε ως οπτικό μέσο με δείκτη διάθλασης n . Λαμβάνοντας υπόψη ότι ισχύει $n = \sqrt{\epsilon_r}$, η σχέση (10.6) μπορεί να γραφεί:

$$n = \sqrt{1 - \frac{81N}{f^2}} \quad (10.7)$$

Η σχέση (10.7) ισχύει για πολύ αραιά ιονισμένα αέρια στα οποία ο αριθμός των συγκρούσεων των ηλεκτρονίων με ουδέτερα μόρια σε κάθε κυβικό μέτρο και σε κάθε δευτερόλεπτο είναι κατά πολύ μικρότερος από τη συχνότητα f του κύματος, πράγμα που πρακτικά ισχύει για την ιονόσφαιρα.

Παράδειγμα:

Σας δίνεται η πυκνότητα ιονισμού για το στρώμα F_1 $N=7 \cdot 10^{11}$ (e/m^3) και για το στρώμα F_2 $N=2 \cdot 10^{12}$ (e/m^3). Βρείτε τους αντίστοιχους δείκτες διάθλασης και ερμηνεύστε τα αποτελέσματα για το Πρώτο Πρόγραμμα της EPA ($f=792$ KHz) και για το κανάλι 5 της ET ($f=175.25$ MHz).

Για το Πρώτο Πρόγραμμα της EPA ($f=792$ KHz) είναι:

$$n = \sqrt{1 - \frac{81 \cdot 7 \cdot 10^{11}}{(792 \cdot 10^3)^2}} = \sqrt{-106} = 10.3j$$

δηλαδή ο δείκτης διάθλασης είναι φανταστικός αριθμός το οποίο σημαίνει ολική εσωτερική ανάκλαση μέσα στο ιονοσφαιρικό στρώμα.

Για το κανάλι 5 της ET ($f=175.25$ MHz) είναι:

$$n = \sqrt{1 - \frac{81 \cdot 7 \cdot 10^{11}}{(175.25 \cdot 10^6)^2}} = 0.999076$$

δηλαδή ο δείκτης διάθλασης είναι πολύ κοντά στη μονάδα, όση περίπου είναι ο δείκτης διάθλασης του αέρα. Επομένως για τη συχνότητα αυτή η ιονόσφαιρα είναι διαφανής. Το κύμα θα περάσει το στρώμα F_1 , αλλά και την ιονόσφαιρα, χωρίς ν' ανακλαστεί σ' αυτήν και θα διαφύγει στο διάστημα, διότι η σχέση (10.7) για το στρώμα F_2 $N=2 \cdot 10^{12}$ (e/m^3) και $f=175.25$ MHz δίνει $n = 0.997 > 0$.

Θεωρούμε το δείκτη διάθλασης του αέρα ίσο με 1 και τον συμβολίζουμε με n_0 . Με n_i συμβολίζουμε το δείκτη διάθλασης του υποστρώματος i . Αν δεχθούμε ότι δεν έχουμε καθόλου απώλειες στην ιονόσφαιρα, τότε ισχύει η σχέση:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (10.8)$$

Η σχέση του Snell για τη διάθλαση γράφεται: $\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{n_1}{n_0} = \frac{n_1}{1} = n_1$ (10.9)

Στο Σχήμα 10.3 παρατηρούμε ότι το κύμα διαθλάται διαδοχικά και στο πέμπτο υπόστρωμα γίνεται παράλληλο προς την επιφάνεια της γης, δηλαδή η διαθλώμενη ακτίνα στο στρώμα N_5 εξέρχεται με γωνία $\theta_t = 90^\circ$. Την πυκνότητα ιονισμού του υποστρώματος στο οποίο η γωνία

διάθλασης γίνεται 90° τη συμβολίζουμε με N' (δηλαδή το στρώμα στο οποίο η ακτίνα διαθλάται και λαμβάνει κλίση προς την επιφάνεια της γης). Συνεπώς η σχέση (10.9) γράφεται:

$$\sin\theta_i = n_1 \cdot \sin\theta_t = n_1 \cdot \sin 90^\circ = n_1$$

$$\sin\theta_i = n_1 = \sqrt{1 - \frac{81N'}{f^2}} \Rightarrow \sin^2\theta_i = 1 - \frac{81N'}{f^2} \Rightarrow 1 - \sin^2\theta_i = \frac{81N'}{f^2} \Rightarrow \cos\theta_i = \frac{9\sqrt{N'}}{f}$$

ή τελικά
$$f = \frac{9\sqrt{N'}}{\cos\theta_i} \quad (10.10)$$

Είναι φανερό ότι αν η μέγιστη πυκνότητα ιονισμού στο κέντρο ενός ιονοσφαιρικού στρώματος συμβολιστεί με N_{max} τότε η μέγιστη συχνότητα που μπορεί ν' ανακλαστεί σ' αυτό θα είναι:

$$f_{max} = \frac{9\sqrt{N_{max}}}{\cos\theta_i} \quad (10.11)$$

Δηλαδή όλες οι συχνότητες που είναι μικρότερες από τη συχνότητα f_{max} ανακλώνται σ' αυτό το ιονοσφαιρικό στρώμα. **Η μέγιστη συχνότητα που μπορεί ν' ανακλαστεί σ' ένα ιονοσφαιρικό στρώμα, όταν το κύμα προσπέσει κάθετα σ' αυτό λέγεται κρίσιμη συχνότητα f_c για το στρώμα αυτό.** Για την κρίσιμη συχνότητα ισχύει η σχέση:

$$f_c = 9\sqrt{N_{max}} \quad (10.12)$$

Για όλες τις συχνότητες μικρότερες από τη κρίσιμη συχνότητα το κύμα που προσπίπτει κάθετα στην ιονόσφαιρα θα ανακλαστεί και θα επιστρέψει στη γη. **Κύματα με συχνότητα μεγαλύτερη από την κρίσιμη συχνότητα δεν επιστρέφουν στη γη αλλά διαπερνούν το ιονοσφαιρικό στρώμα.**

10.5 Μέγιστη και άριστη χρησιμοποιήσιμη Συχνότητα

Η σχέση $f_{max} = \frac{9\sqrt{N_{max}}}{\cos\theta_i}$ δίνει τη μέγιστη συχνότητα που μπορεί ν' ανακλαστεί πάνω

σ' ένα ιονοσφαιρικό στρώμα που έχει μέγιστη πυκνότητα ιονισμού N_{max} και το κύμα προσπίπτει σ' αυτό με γωνία θ_i . Αυτή η συχνότητα λέγεται **Μέγιστη Χρησιμοποιήσιμη Συχνότητα** (Maximum Usable Frequency) και συμβολίζεται με f_{MUF} . Η σχέση (10.11) αποτελεί τον ονομαζόμενο secant law και είναι πολύ χρήσιμη για αρχικούς προσεγγιστικούς

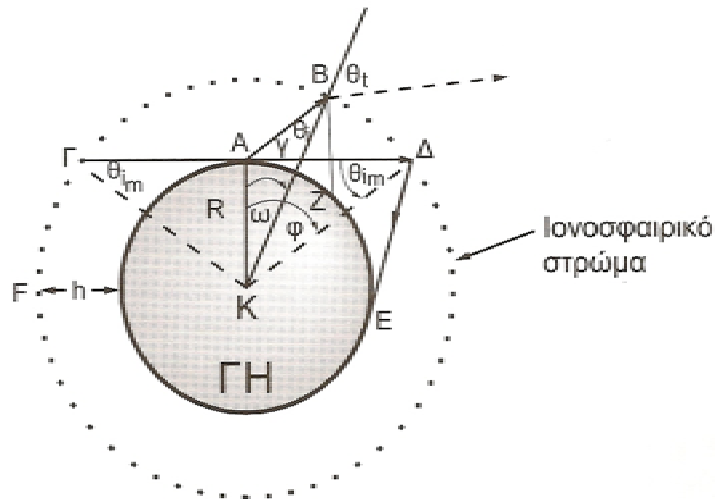
υπολογισμούς. Η παραπάνω σχέση ισχύει μόνο για επίπεδη γη και επίπεδη ανακλώμενη επιφάνεια. Παρόλα αυτά η γωνία πρόσπτωσης δεν είναι πρωτεύουσας σημασίας αφού καθορίζεται από την απόσταση μεταξύ των σημείων που θα συνδεθούν για μια sky-wave μετάδοση. Συνήθεις τιμές για τη f_{MUF} είναι από 8 έως 35MHz, αλλά μετά από ασυνήθιστη ηλιακή δραστηριότητα μπορεί να αυξηθούν μέχρι τα 50MHz.

Συχνότητες μικρότερες από την f_{MUF} μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια ζεύξη μέσου ιονοσφαιρικού στρώματος με τις συνθήκες πυκνότητας ιονισμού και γωνίας πρόσπτωσης που αναφέρονται παραπάνω.

Στην πράξη χρησιμοποιείται η **Άριστη Συχνότητα Εργασίας** f_{OUF} (Optimum Usable Frequency), η οποία στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως **Άριστη Χρησιμοποιήσιμη Συχνότητα**, για ζεύξη μια συχνότητα λίγο μικρότερη από την f_{MUF} . Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος που προσπίπτει στο ιονοσφαιρικό στρώμα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απορρόφηση των Κυμάτων από αυτό. Αντίθετα, όσο μεγαλώνει η συχνότητα εκπομπής και πλησιάζει την f_{MUF} , τόσο μειώνεται η αξιοπιστία της ζεύξης, διότι η μέγιστη πυκνότητα ιονισμού ενός ιονοσφαιρικού στρώματος υπόκειται σε διάφορες χρονικές και τοπικές μεταβολές. Για το ιονοσφαιρικό στρώμα F_2 λαμβάνουμε ως f_{OUF} το 85% της f_{MUF} , ενώ για τα στρώματα E και F_1 , που είναι πιο σταθερά, ως f_{OUF} λαμβάνεται το 95% ή και 100% ακόμα της f_{MUF} . Γενικά όμως για όλα τα στρώματα η f_{OUF} λαμβάνεται πάντοτε μεταξύ 50% και 85% της f_{MUF} .

Από τη σχέση $f_{\max} = \frac{9\sqrt{N_{\max}}}{\cos\theta_i}$ βγαίνει το λανθασμένο συμπέρασμα ότι ανάκλαση

μπορεί να γίνει σε ιονοσφαιρικό στρώμα με οποιαδήποτε μεγάλη συχνότητα, αρκεί να μεγαλώσει η γωνία θ_i , οπότε ο παρονομαστής του κλάσματος μικραίνει τείνοντας προς το 0 και η συχνότητα f τείνει να γίνει άπειρη. Το συμπέρασμα αυτό δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, διότι η γωνία θ_i δεν μπορεί να γίνει μεγαλύτερη πάνω από ένα ορισμένο όριο, το οποίο εξαρτάται από το ύψος του ιονοσφαιρικού στρώματος. Τα ιονοσφαιρικά στρώματα δεν είναι επίπεδα, αλλά σφαιρικά.



Σχήμα 10.4 Μεγιστοποίηση της γωνίας πρόπτωσης θ_i σε ιονοσφαιρικό στρώμα.

Στο Σχήμα 10.4 φαίνεται η Γη και ένα τυχαίο ιονοσφαιρικό στρώμα, έστω το στρώμα F. Αν ένας πομπός βρίσκεται στο σημείο A της Γης και εκπέμπει προς ένα σημείο B σ' ένα ιονοσφαιρικό στρώμα, τότε έχουμε τη γωνία πρόσπτωσης θ_i σ' αυτό. Αν το σημείο B μετακινείται πάνω στο ιονοσφαιρικό στρώμα F, τότε αποδεικνύεται ότι η γωνία πρόσπτωσης γίνεται μέγιστη μόνο αν η AB είναι κάθετη προς την ακτίνα KA, δηλαδή όταν ο πομπός A εκπέμπει από το σημείο A παράλληλα προς τον ορίζοντα, οπότε ισχύει:

$$\theta_{i,m} = \arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right) \quad (10.13)$$

όπου R η ακτίνα της γης (6.366.000 m) και h το ύψος του ιονοσφαιρικού στρώματος, σε m. Γενικά είναι παραδεκτό ότι συχνότητες μεγαλύτερες από 30 MHz δεν ανακλώνονται στην ιονόσφαιρα. Υπάρχουν όμως εξαιρετικές περιπτώσεις όπου το ιονοσφαιρικό στρώμα D κατεβαίνει πολύ χαμηλά, με ταυτόχρονη αύξηση της πυκνότητας ιονισμού του. Τότε παρατηρείται το φαινόμενο της λήψης μακρινών τηλεοπτικών σταθμών της μπάντας I, δηλαδή συχνοτήτων γύρω στα 50 MHz.

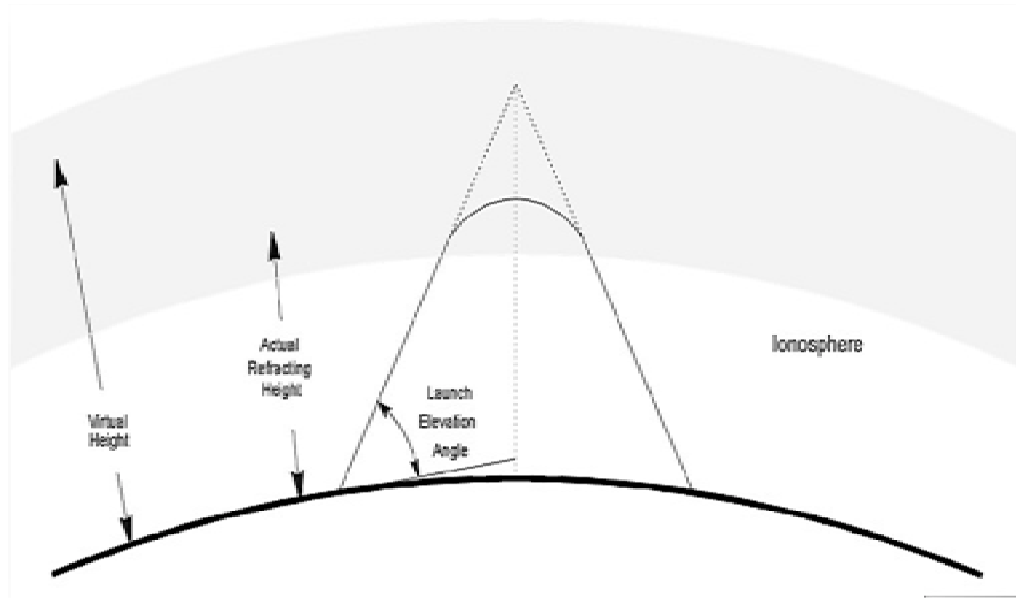
10.6 Ιονοσφαιρική σκέδαση

Το φαινόμενο της τροποσφαιρικής διάχυσης οφείλεται στην ανομοιογένεια που παρατηρείται στο δείκτη διάθλασης η, προς όλες τις διευθύνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας στο στρώμα D και κατά τη διάρκεια της νύχτας στο κατώτερο μέρος του στρώματος E. Αποτέλεσμα αυτής της ανομοιογένειας είναι η δυνατότητα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών

κυμάτων με ιονοσφαιρική διάχυση, με μηχανισμό ανάλογο με εκείνον της τροποσφαιρικής διάχυσης.

Οι τηλεπικοινωνίες με τα κύματα σκέδασης στην ιονόσφαιρα παρουσιάζουν το μεγάλο πλεονέκτημα κατά τη διάρκεια ξαφνικών **ιονοσφαιρικών διαταραχών (SID)** τα σήματα σκέδασης να παρουσιάζονται ενισχυμένα, σε αντίθεση με τα κύματα ιονοσφαιρικής ανάκλασης που εξασθενούν πάρα πολύ, μέχρι και πλήρους διακοπής της ζεύξης. Κατά συνέπεια στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη της γης, όπου οι ιονοσφαιρικές διαταραχές είναι συχνές, οι ραδιοεπικοινωνίες με ιονοσφαιρική σκέδαση είναι ιδιαίτερα χρήσιμες. Οι αποστάσεις για τις οποίες μπορούμε να έχουμε πρακτικά εκμεταλλεύσιμη ισχύ είναι από 800 Km έως το πολύ 2.400 Km. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται είναι από 30 MHz έως 70MHz, αλλά κάτω από ειδικές συνθήκες μπορεί να χρησιμοποιηθούν συχνότητες μέχρι 100MHz. Οι πομποί είναι συνήθως ισχύος 50KW με κεραίες απολαβών 20dB.

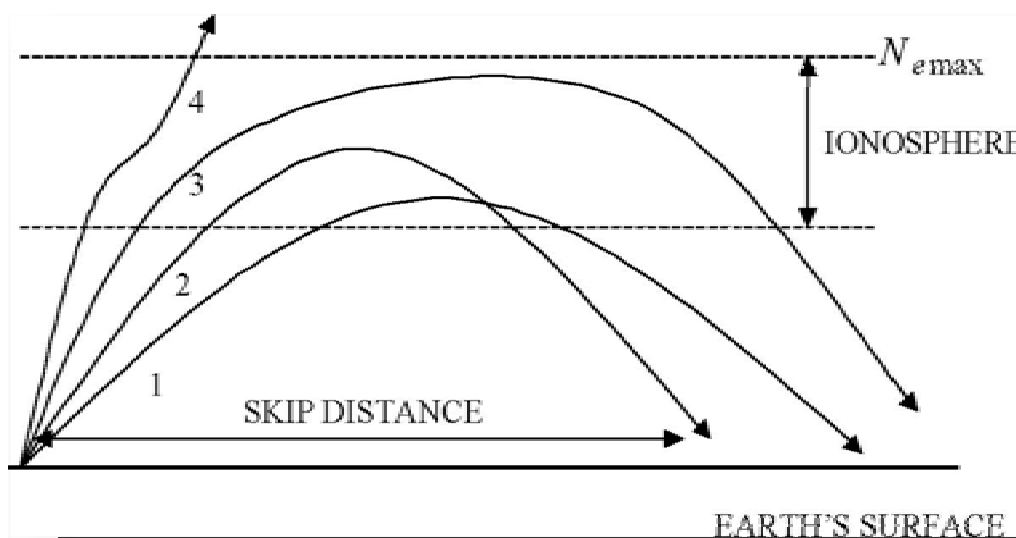
Το σχήμα 10.5 δείχνει πως όσο το κύμα διαθλάται, κυρτώνει σταδιακά παρά απότομα. Ωστόσο κάτω από το επίπεδο ιονισμού οι διαθλώμενες ακτίνες ακολουθούν μονοπάτια που είναι τα ίδια με αυτά που θα υπήρχαν αν η διάθλαση είχε προκληθεί από επιφάνεια που θα βρισκόταν σε μεγαλύτερο ύψος το οποίο και καλείται **εικονικό ύψος** (virtual height) 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 10.5 Πραγματικό και εικονικό ύψος για ένα στρώμα της ιονόσφαιρας.

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. 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.

Η **απόσταση υπερπήδησης** (skip distance) είναι η μικρότερη απόσταση από τον πομπό, μετρούμενη στην επιφάνεια της γης, στην οποία ένα κύμα συγκεκριμένης συχνότητας (μεγαλύτερη από f_c) θα επιστρέψει στη γη (Σχήμα 10.6)



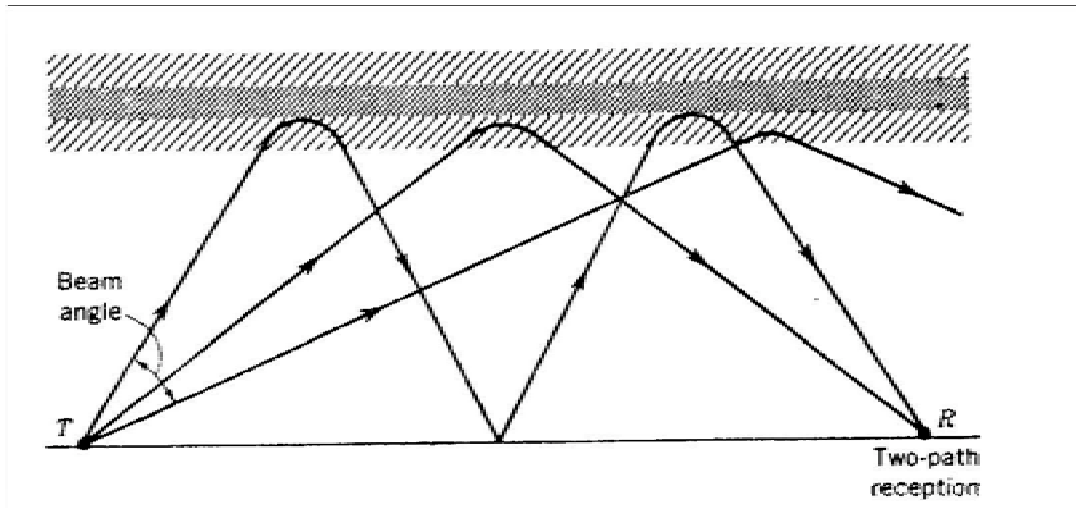
Σχήμα 10.6 Επίδραση της ιονόσφαιρας σε κύματα τα οποία εκπέμπονται με διαφορετικές γωνίες.

Όταν η γωνία πρόσπτωσης γίνεται πολύ μεγάλη (σχήμα 10.6 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. 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 επιστρέφει στην γη. Έτσι λοιπόν για δύο δοσμένα σημεία στη επιφάνεια της γης η απόσταση υπερπήδησης είναι ίση με την πραγματική τους απόσταση όταν η συχνότητα εκπομπής είναι ίση με την f_{MUF} .

Σε αποστάσεις από τον πομπό ίσες με την απόσταση υπερπήδησης 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 f_{MUF} . Ένας άλλος λόγος είναι η έλλειψη κατευθυντικότητας των κεραιών υψηλής συχνότητας. Αν 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 10.7, προκαλώντας παρεμβολή.

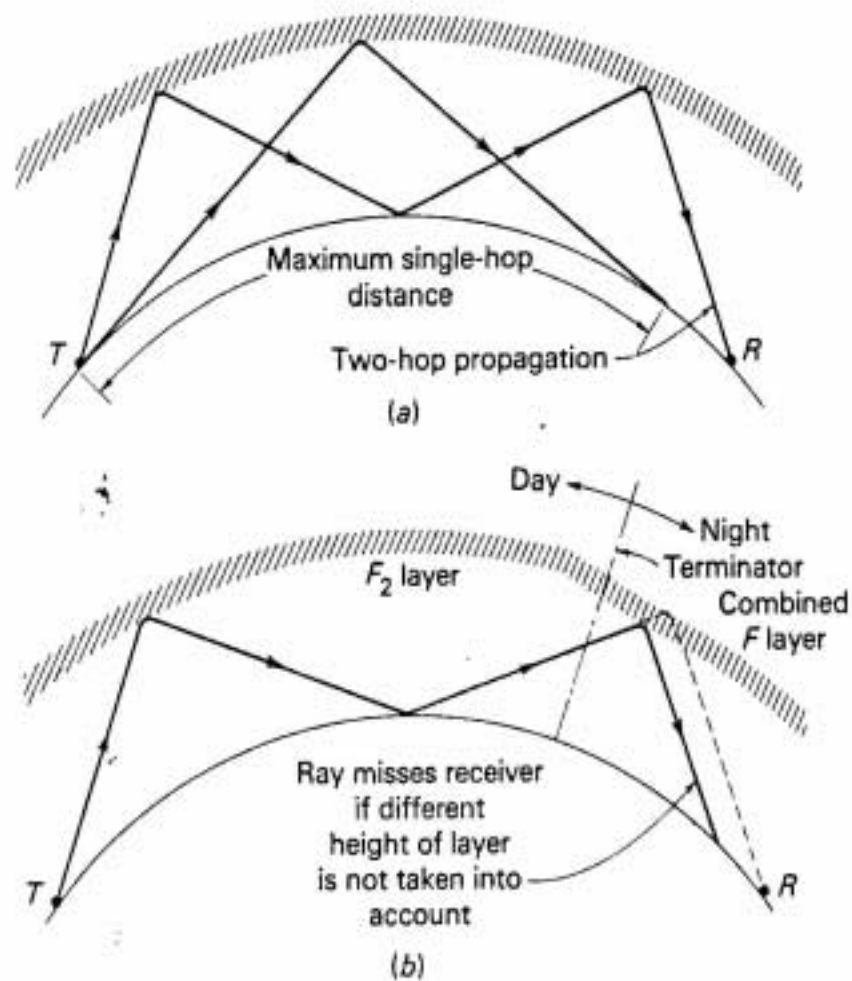


Σχ. 10.7 Ιονοσφαιρική διάδοση και πολυδιόδευση.

10.7 Διαλείψεις στην Ιονοσφαιρική διάδοση

Με τον όρο εξασθένιση ή **διαλείψεις** (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 διάλειψη (fading) είναι πιο πιθανή με μικρότερα μήκη κύματος δηλαδή σε υψηλότερες συχνότητες.

Η διάλειψη μπορεί να παρουσιαστεί λόγω παρεμβολής μεταξύ των χαμηλότερων και υψηλότερων ακτινών ενός ιονοσφαιρικού κύματος, μεταξύ κυμάτων που φθάνουν από διαφορετικά μονοπάτια και μετά από διαφορετικό αριθμό αναπήδησεων ή ακόμα μεταξύ ενός επίγειου και ενός εναέριου κύματος ειδικά στο χαμηλότερο άκρο της HF μπάντας. Μπορεί επίσης να παρουσιαστεί αν ένα απλό ιονοσφαιρικό κύμα λαμβάνεται λόγω των διακυμάνσεων του ύψους ή της πυκνότητας του επιπέδου που αντανακλά το κύμα. Ένας από τους πιο πετυχημένους τρόπους αντιμετώπισης της διάλειψης είναι η τεχνική **διαφορικής λήψης χώρου ή διαφορικής λήψης συχνότητας** (space or frequency diversity).



Σχήμα 10.8 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις.

(a) Από βορά προς νότο (b) Από ανατολή προς δύση.

Επειδή η διάλειαση 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 διαφορικής λήψης (diversity).

Έντονα φαινόμενα εξασθένισης συνήθως παρατηρούνται στα Βραχεία Κύματα, τα οποία κυρίως μεταδίδονται με ανάκλαση στην ιονόσφαιρα. Στα Μεσαία την ημέρα δεν

παρατηρούνται ενοχλητικές διαλείψεις, εκτός από την περίπτωση που ο δέκτης βρίσκεται σε τέτοια απόσταση από τον πομπό, ώστε να δέχεται σήματα και κύματα επιφάνειας και ιονοσφαιρικά κύματα της ίδιας τάξης μεγέθους. Τότε οι διαλείψεις είναι έντονες ακόμα και την ημέρα. Τη νύχτα είναι παρατηρημένο ότι γενικά οι σταθμοί στα Μακρά και ιδίως στα Μεσαία κύματα ακούγονται πολύ πιο ισχυρά από ότι την ημέρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ιονοσφαιρικά στρώματα εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν τα ιονίζει πια ο ήλιος τη νύχτα, αποκτούν μεγαλύτερο ύψος και επομένως η εμβέλεια των σταθμών, γενικά, αυξάνεται. Αυτή όμως η μεταβολή του ύψους των ιονοσφαιρικών στρωμάτων γίνεται πολύ άτακτα, με αποτέλεσμα την έντονη παρουσίαση του φαινομένου των διαλείψεων. Μεγάλο ρόλο στις διαλείψεις παίζει και το γήινο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επηρεάζει, κάτω από ορισμένες συνθήκες, έντονα τις διαδρομές των κυμάτων.

Αν η πυκνότητα ιονισμού ενός ιονοσφαιρικού στρώματος είναι μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται για να ανακλαστεί η συχνότητα f του κύματος, τότε αυτό πριν φθάσει στο κέντρο του ιονοσφαιρικού στρώματος θα ανακλαστεί. Το πόσο βαθιά θα πάει μέσα στο ιονοσφαιρικό στρώμα θα εξαρτηθεί από τη συχνότητα του κύματος. Ένα διαμορφωμένο κύμα αποτελείται από ένα μεγάλο πλήθος συχνοτήτων, γνωστές ως πλευρικές συχνότητες. Οι υψηλότερες συχνότητες θα διεισδύσουν βαθύτερα μέσα στο ιονοσφαιρικό στρώμα, από τις χαμηλότερες. Η κάθε μια από αυτές τις συχνότητες θα ακολουθεί κάπως διαφορετική διαδρομή από τις άλλες και θα φθάσουν στο δέκτη με διαφορά φάσης. Το φαινόμενο αυτό λέγεται επιλεκτική διάλειψη (selective fading) και οδηγεί στην παραμόρφωση της χροιάς της ομιλίας ή της μουσικής που μεταδίδεται.

10.8 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(\pm 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.

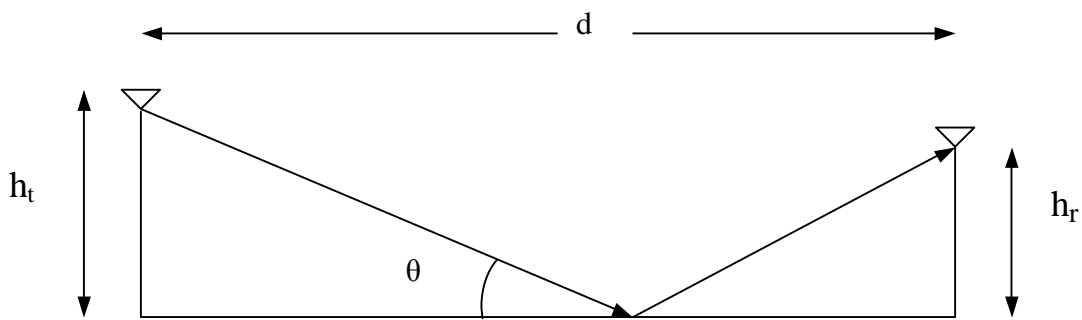
Τέλος, το σποραδικό στρώμα E συχνά παρουσιάζεται ως ασυνήθιστη ιονοσφαιρική διαταραχή. Όταν εμφανίζεται προκαλεί το διπλό φαινόμενο της εμπόδισης μακράς-απόστασης HF επικοινωνιών και της διευκόλυνσης VHF επάνω από τον ορίζοντα επικοινωνιών. Τα πραγματικά και φαινομενικά ύψη για επικοινωνίες σε αυτό το 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.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΑΝΑΛΙ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ-ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ-ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΛΗΨΗΣ

Π1. Μοντέλο διάδοσης πάνω από επίπεδη γη

Ας θεωρήσουμε δύο κεραιές που είναι τοποθετημένες πάνω σε επίπεδη γη και απέχουν απόσταση d , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.1, και έστω $u(t)$ το εκπεμπόμενο σήμα με εύρος ζώνης B .



Σχήμα Π.1 Μοντέλο διάδοσης πάνω από επίπεδη γη.

Το λαμβανόμενο σήμα $r(t)$, προκύπτει από την υπέρθεση δύο διαφορετικών συνιστωσών: το σήμα από απευθείας διάδοση στον ελεύθερο χώρο και το σήμα μετά από ανάκλαση στην επιφάνεια της γης. Αν η χρονική διαφορά τ , μεταξύ του απευθείας σήματος και του σήματος μετά από την ανάκλαση στη επιφάνεια της γης είναι μικρή σε σχέση με το αντίστροφο του εύρους ζώνης B του εκπεμπόμενου σήματος, τότε τα δύο σήματα που φτάνουν στην κεραιά λήψης είναι πανομοιότυπα.. Αν η κεραιά εκπομπής έχει ύψος h_t και η κεραιά λήψης έχει ύψος h_r , τότε η ισχύς P_r που λαμβάνεται δίνεται από τη σχέση:

$$P_r = P_t \cdot \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \cdot g_t \cdot g_r \cdot \left| 1 + R \cdot e^{j\varphi} + (1 - R) \cdot A e^{j\varphi} + \dots \right|^2 \quad (\text{Π.1})$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος, P_t είναι η εκπεμπόμενη ισχύς, R είναι ο συντελεστής ανάκλασης, φ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ του απευθείας και του ανακλωμένου κύματος, A ο συντελεστής εξασθένησης λόγω της γης (surface wave attenuation factor) και g_t, g_r είναι οι ενισχύσεις (gain) αντίστοιχα των κεραιών εκπομπής και λήψης. Ο συντελεστής ανάκλασης R δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{\sin\theta - z}{\sin\theta + z} \quad (\text{Π.2})$$

όπου θ είναι η γωνία πρόσπτωσης και

$$z = \frac{\sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2\theta}}{\varepsilon_0}, \quad \text{για κάθετη πόλωση του σήματος}$$

$$z = \sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2\theta}, \quad \text{για οριζόντια πόλωση του σήματος}$$

ενώ ε_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά της γης. Για μεγάλες τιμές της απόστασης d και αγνοώντας τον συντελεστή εξασθένισης A , η σχέση (Π.1) προσεγγιστικά γράφεται ως εξής:

$$P_r = 4P_0 \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right) \quad (\text{Π.3})$$

όπου P_0 είναι η λαμβανόμενη ισχύς κατά τη διάδοση στον *ελεύθερο χώρο* (free space). Όμως ισχύει:

$$P_0 = P_t \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot g_t \cdot g_r \quad (\text{Π.4})$$

και έτσι τελικά:

$$P_r = P_t \cdot g_t \cdot g_r \cdot \left(\frac{h_t h_r}{d^2}\right)^2 \quad (\text{Π.5})$$

Από τη σχέση (Π.5) παρατηρούμε ότι για μεγάλες τιμές της απόστασης d μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης, η λαμβανομένη ισχύς μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την τέταρτη δύναμη της απόστασης d δηλαδή είναι ανάλογη με τον όρο d^{-4} . Δηλαδή η λαμβανόμενη ισχύς, παρουσιάζει ρυθμό μείωσης ίσο με 40dB/dec ή 12dB/oct. Επίσης, από τη σχέση (Π.5), συμπεραίνεται ότι το ύψος της κεραιάς εκπομπής προσφέρει κέρδος 6dB/oct. Η λαμβανομένη ισχύς P_r είναι γενικά ανεξάρτητη της συχνότητας εκπομπής f αλλά πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι είναι $P_r \propto f^{-n}$ όπου $2 \leq n \leq 3$.

Π.2 Γενικευμένο μοντέλο διάδοσης

Το γενικευμένο μοντέλο διάδοσης, χρησιμοποιείται για να προβλέψει την ένταση του πεδίου δηλαδή την λαμβανόμενη ισχύ για οποιοδήποτε περιβάλλον και διάταξη των κεραιών εκπομπής και λήψης. Στο μοντέλο αυτό πρέπει τα ύψη των κεραιών, οι θέσεις τους, οι διηλεκτρικές σταθερές να είναι γνωστές με ακρίβεια όπως και οι θέσεις του πομπού και δέκτη να είναι σαφώς καθορισμένες σε σχέση με τον χώρο που τις περιβάλλει. Το μοντέλο χρησιμοποιεί μεθόδους γεωμετρικής οπτικής για να καθορίσει την ισχύ από απευθείας

διάδοση, διάδοση μετά από ανάκλαση, διάχυση, ή περίθλαση και δεν τίθεται κανένας περιορισμός στον αριθμό των κυμάτων που θεωρείται ότι φτάνουν στο δέκτη του συστήματος. Η απευθείας διάδοση και η ανάκλαση του σήματος αντιμετωπίζονται όπως περιγράφηκε προηγουμένα στο μοντέλο διάδοσης πάνω από επίπεδη γη, ενώ η διάχυση και η περίθλαση του σήματος αντιμετωπίζονται ξεχωριστά.

Π.3 Στατιστικά μοντέλα διάδοσης

Τα δύο μοντέλα που περιγράψαμε προηγουμένως, απαιτούν γνώση του αριθμού των λαμβανομένων από τον δέκτη κυμάτων και της φυσικής διαδικασίας από την οποία αυτά προκύπτουν. Όμως κάτι τέτοιο είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί στη πράξη, γιατί ο πομπός και ο δέκτης του συστήματος δεν έχουν στη γενική περίπτωση σταθερές θέσεις και το περιβάλλον τους μεταβάλλεται συνεχώς. Συνεπώς απαιτείται στατιστική περιγραφή για να γίνει πρόβλεψη του λαμβανόμενου σήματος και τα αντίστοιχα μοντέλα ονομάζονται **στατιστικά μοντέλα**. Στη στατιστική περιγραφή λαμβάνονται υπόψη δύο ξεχωριστά φαινόμενα:

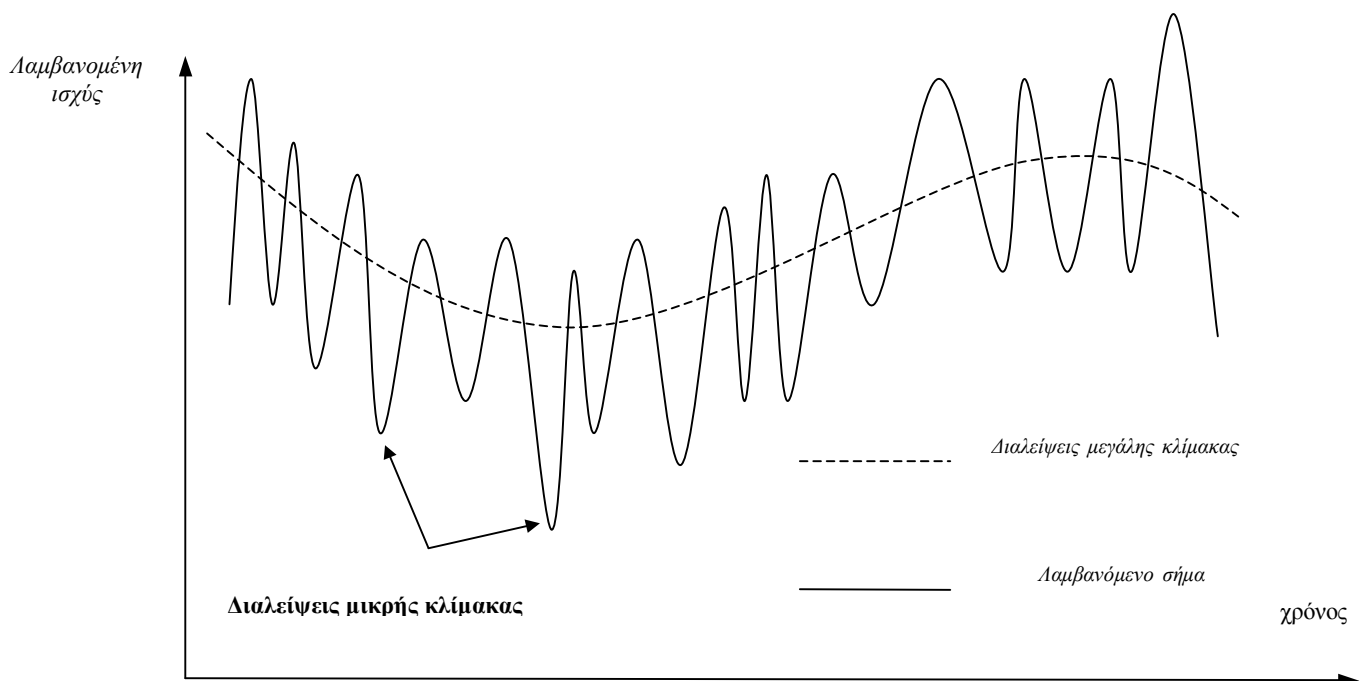
- η λήψη στο δέκτη του συστήματος, κυμάτων με τυχαίες φάσεις η υπέρθεση των οποίων οδηγεί σε στιγμιαίες μεταβολές της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος δηλαδή στο φαινόμενο των *διαλείψεων μικρής κλίμακας* (fast fading ή short-fading ή multipath fading) και
- η *εξασθένιση* ή οι *διαλείψεις μεγάλης κλίμακας* (shadowing ή slow fading ή long-term fading) του απευθείας και ανακλώμενου σήματος λόγω των κτιρίων ή άλλων αντικειμένων του περιβάλλοντος που μεσολαβεί μεταξύ πομπού και δέκτη.

Η λήψη στο δέκτη κυμάτων με τυχαίες φάσεις, προκαλεί τις διαλείψεις μικρής κλίμακας της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος και οφείλεται κυρίως στις πολλαπλές ανακλάσεις του μεταδιδόμενου σήματος από τοπικούς σκεδαστές, κινητούς ή ακίνητους, όπως κτίρια και άλλες ανθρώπινες κατασκευές, ή από φυσικά εμπόδια όπως δάση που περιστοιχίζουν τον κινητό σταθμό. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαλείψεις μικρής κλίμακας, δεν προκαλούνται από φυσικά εμπόδια όπως ένα βουνό ή ένας λόφος που τυχόν βρίσκονται ανάμεσα στον πομπό και στο δέκτη, αλλά αντιθέτως οφείλονται στο γειτονικό περιβάλλον του κινητού δέκτη. Οι διαλείψεις αυτού του είδους αναφέρονται και σαν *διαλείψεις πολυδιόδευσης*.

Η εξασθένιση του σήματος, λόγω της σχετικά μικρής έκτασης μεταβολές στην τοπογραφία κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης, οφείλεται στη μορφολογία του εδάφους και στο δομημένο περιβάλλον ανάμεσα στον πομπό και στο δέκτη και αναφέρεται σαν διάλειψη μεγάλης κλίμακας του λαμβανόμενου σήματος. Τελικά, επειδή τα δύο φαινόμενα είναι στατιστικά ανεξάρτητα μεταξύ τους η περιβάλλουσα $r(t)$ του λαμβανόμενου σήματος μπορεί να δοθεί ως το γινόμενο δύο όρων:

$$r(t) = r_f(t) \cdot r_s(t) \quad (\text{Π.6})$$

όπου, οι συναρτήσεις $r_f(t)$ και $r_s(t)$, περιγράφουν αντίστοιχα τις διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας. Στο Σχήμα Π.2 παρουσιάζεται η μορφή της λαμβανομένης ισχύος.



Σχήμα Π.1 Λαμβανόμενη ισχύς σήματος.

Π.4 Στατιστική περιγραφή καναλιού πολλαπλών διαδρομών

Τα στατιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις διαλείψεις της περιβάλλουσας ενός σήματος σε ένα κανάλι πολλαπλών διαδρομών, βασίζονται γενικά, στη υπόθεση ότι το φυσικό περιβάλλον του δέκτη αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό από ανακλαστές με τυχαίες θέσεις και ιδιότητες. Ας θεωρήσουμε ότι το εκπεμπόμενο σήμα $s(t)$, έχει τη μορφή:

$$s(t) = \text{Re}[u(t) \cdot \exp(j2\pi f_0 t + \varphi_0)] \quad (\text{Π.7})$$

όπου $u(t)$ είναι το σήμα βασικής ζώνης, f_0 είναι η συχνότητα του φέροντος κύματος, φ_0 είναι μία αυθαίρετη αρχική φάση του εκπεμπόμενου σήματος και ο τελεστής $\text{Re} [\cdot]$ δίνει το

πραγματικό μέρος. Τότε το λαμβανόμενο σήμα $r(t)$, μπορεί να δωθεί ως η υπέρθεση όλων των κυμάτων που φτάνουν στο δέκτη δηλαδή να προσεγγιστεί από τη σχέση,

$$r(t) \cong A \cdot \sum_i R_i \cdot u(t - \tau_i) \cdot \exp(j2\pi(f_0 - \delta f_i)t + \theta_i - \delta f_i \cdot \tau_i) \quad (\text{Π.8})$$

όπου i είναι ο αριθμός των κυμάτων που φτάνουν στο δέκτη του συστήματος, R_i είναι ο συντελεστής ανάκλασης, δf_i είναι η μετατόπιση Doppler που παρατηρείται λόγω της κίνησης του δέκτη, τ_i είναι η καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay), και θ_i είναι η φάση αντίστοιχα για κάθε μία από τις i διαδρομές του σήματος ενώ τέλος ο συντελεστής A εισάγεται στη σχέση (Π.8) για να παρουσιάσει την επίδραση του κέρδους των κεραιών εκπομπής και λήψης και τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος. Βέβαια, όλα τα προηγούμενα μεγέθη είναι χρονικά μεταβαλλόμενα, αποτέλεσμα των συνεχών αλλαγών στη δομή του περιβάλλοντος. Πρέπει επίσης να ειπωθεί ότι στη σχέση (Π.8), θεωρήθηκε ότι στο δέκτη του συστήματος δεν λαμβάνεται ισχύς από απευθείας διάδοση του σήματος.

Π.5 Στατιστική περιγραφή της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος

Διαλείψεις μικρής κλίμακας

Όπως παρατηρούμε από τη σχέση (Π.8), το λαμβανόμενο σήμα προκύπτει από το άθροισμα ενός αριθμού από χρονικά μεταβαλλόμενα ανύσματα (φάσορες) με τυχαία πλάτη και φάσεις. Αν θεωρηθεί ότι ο αριθμός των ανυσμάτων είναι μεγάλος, οι φάσεις τους ακολουθούν *ομοιόμορφη κατανομή* (uniform distribution) στο διάστημα $[0, 2\pi]$, και τα ανύσματα έχουν ίσο πλάτος, τότε η περιβάλλουσα (στιγμιαίο πλάτος r) του λαμβανόμενου σήματος αποδεικνύεται ότι ακολουθεί *κατανομή Rayleigh* δηλαδή έχει *συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας* (probability density function):

$$p(r) = \frac{2r}{\langle r^2 \rangle} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\langle r^2 \rangle}\right), \quad r \geq 0 \quad (\text{Π.9})$$

όπου $\langle r^2 \rangle$ είναι η μέση ισχύς του λαμβανόμενου σήματος και ο συμβολισμός $\langle \cdot \rangle$ που χρησιμοποιείται δηλώνει τη *μέση τιμή* (average value). Στη περίπτωση αυτή, ο στιγμιαίος λόγος σήματος-προς-θόρυβο γ στη λήψη ακολουθεί *κατανομή Γάμμα* (Gamma distribution), με δύο βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή έχει *συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας*:

$$p(\gamma) = \frac{1}{\Gamma} \cdot \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right), \quad 0 \leq \gamma \leq \infty \quad (\text{Π.10})$$

όπου $\Gamma = \langle \gamma \rangle$ είναι ο μέσος λαμβανόμενος λόγος σήματος-προς-θόρυβο. Αν θεωρηθεί ότι ο δέκτης λαμβάνει και ισχύ σήματος από απευθείας διάδοση, τότε η περιβάλλουσα του σήματος r ακολουθεί την κατανομή *Rician* δηλαδή έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας,:

$$p(r) = \frac{2r}{\langle r^2 \rangle} \cdot \exp\left(-\frac{r^2 + A_0^2}{\langle r^2 \rangle}\right) \cdot I_0\left(\frac{r}{\sqrt{\langle r^2 \rangle}} \cdot \frac{A_0}{\sqrt{\langle r^2 \rangle}}\right), \quad r \geq 0 \quad (\text{Π.11})$$

όπου A_0 είναι το πλάτος του απευθείας σήματος και $I_0(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση *Bessel* πρώτου είδους και μηδενικής τάξης πρώτης τάξης. Θεωρητικά η κατανομή *Rician*, προκύπτει από το άθροισμα δύο ανυσμάτων εκ των οποίων το ένα έχει γνωστό πλάτος A_0 και τυχαία φάση και το άλλο έχει στιγμιαίο πλάτος που ακολουθεί κατανομή *Rayleigh* και τυχαία φάση.

Στη περίπτωση που τα κύματα που φτάνουν στο δέκτη του συστήματος έχουν τυχαία πλάτη και τυχαίες φάσεις, τότε η περιβάλλουσα r του λαμβανόμενου σήματος ακολουθεί την κατανομή *Nakagami* (ή m -κατανομή) δηλαδή η r έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$p(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \cdot \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m \cdot r^{2m-1} \cdot \exp\left[-\frac{m}{\Omega} r^2\right], \quad r \geq 0 \quad (\text{Π.12})$$

όπου $\Gamma(m)$ είναι η συνάρτηση Γάμμα, $\Omega = \langle r^2 \rangle$ και $m \geq 0.5$ είναι ο λεγόμενος παράγοντας μορφής (shape factor) ο οποίος εξάγεται μαθηματικά αλλά και μέσω πειραματικών δεδομένων. Ο παράγοντας μορφής m δίνεται από τη σχέση:

$$m = \frac{\langle r^2 \rangle^2}{\langle (r^2 - \langle r^2 \rangle)^2 \rangle} \quad (\text{Π.13})$$

και καθορίζει το βαθμό της απόσβεσης (διάλειψης) που παρατηρείται στο κανάλι πολλαπλών διαδρομών. Πρέπει στο σημείο αυτό να ειπωθεί ότι, για διάφορες τιμές του m προκύπτουν από τη σχέση (Π.12) άλλες γνωστές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας που περιγράφουν συγκεκριμένες κατανομές. Έτσι, για $m=1$ προκύπτει η κατανομή *Rayleigh* ενώ για $m=0.5$ λαμβάνεται η *μονόπλευρη* (one-side) κατανομή *Gauss*. Τέλος, για $m \rightarrow \infty$, η κατανομή που προκύπτει αντιστοιχεί στη περίπτωση που στο κανάλι δεν παρουσιάζεται το φαινόμενο των διαλείψεων. Επίσης, η κατανομή *Rician* και η *λογαριθμικά κανονική κατανομή* (lognormal

distribution) μπορούν να προσεγγιστούν μέσω της κατανομής Nakagami για συγκεκριμένες περιοχές τιμών της παραμέτρου m .

Μία ακόμη κατανομή που έχει χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τις διαλείψεις μικρής κλίμακας, είναι η κατανομή *Weibull* η οποία εξάγεται με εμπειρικό τρόπο και στην οποία η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της περιβάλλουσας r δίνεται από τη σχέση:

$$p(r) = \frac{ab}{r_0} \cdot \left(\frac{br}{r_0}\right)^{a-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{br}{r_0}\right)^a\right] \quad (\text{Π.14})$$

όπου a είναι μία παράμετρος που ονομάζεται παράμετρος μορφής και επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να οδηγεί σε όσο το δυνατό μεγαλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα, r_0 είναι η ενεργός τιμή (rms τιμή) του r και b είναι ένας παράγοντας κανονικοποίησης που δίνεται από τη σχέση:

$$b = \left[\frac{2}{a} \cdot \Gamma\left(\frac{2}{a}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Π.15})$$

Στην ειδική περίπτωση όπου $a=0.5$, η σχέση (Π.14) περιγράφει την κατανομή Rayleigh. Όταν $a=1$, από τη σχέση (Π.14), προκύπτει η εκθετική κατανομή (exponential distribution). Η κατανομή Weibull είναι εξίσου χρήσιμη με την κατανομή Nakagami αλλά στερείται θεωρητικού υποβάθρου. Η κατανομή Weibull, χρησιμοποιείται ευρύτατα στη θεωρία διατήρησης και στα μοντέλα μελέτης παρασιτικών σημάτων που οφείλονται στη παρουσία της θάλασσας και τα οποία εμφανίζονται στην οθόνη των Radar.

Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σήμα από απευθείας διάδοση και τα σήματα από ανάκλαση που φτάνουν στο δέκτη του συστήματος, υπόκεινται σε εξασθένιση λόγω διάδοσης και εξαιτίας του συνεχώς μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος. Η εξασθένιση της ισχύος του λαμβανομένου σήματος με την απόσταση περιγράφεται από τη σχέση (Π.5) δηλαδή η λαμβανομένη ισχύς μειώνεται με την τέταρτη δύναμη της απόστασης d μεταξύ πομπού και δέκτη. Παράλληλα με την μείωση της λαμβανομένης ισχύος με την απόσταση παρατηρείται και μία αργή χρονικά μεταβολή της τοπικής μέσης ισχύος του σήματος (local mean power) που οφείλεται στην μεταβολή του περιβάλλοντος δηλαδή στην αλλαγή της θέσης και του αριθμού των διαφόρων εμποδίων που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη. Η αργή χρονικά μεταβολή της ισχύος του λαμβανομένου σήματος αποδεικνύεται, από τα πειραματικά δεδομένα, ότι ακολουθεί προσεγγιστικά την λεγόμενη *λογαριθμικά κανονική κατανομή*

δηλαδή η τοπική μέση τιμή P_{av} της ισχύος του σήματος έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$p(P_{av}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma P_{av}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \cdot \ln^2\left(\frac{P_{av}}{\langle P_{av} \rangle}\right)\right] \quad (\text{Π.16})$$

όπου $\langle P_{av} \rangle$ είναι η μέση τιμή της τοπικής μέσης ισχύος ονομαζόμενη και *μέση τιμή περιοχής* (area mean) και η οποία είναι και η στατιστική μέση τιμή της λογαριθμικά κανονικής κατανομής ενώ σ είναι η *τυπική απόκλιση* (standard deviation) της λογαριθμικά κανονικής κατανομής. Η τιμή της τυπικής απόκλισης σ εξαρτάται από το συγκεκριμένο περιβάλλον λειτουργίας του συστήματος και συνήθως παίρνει τιμές στο διάστημα μεταξύ 4 και 12 dB. Τελικά, όσον αφορά τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος, η σχέση (Π.16) δηλώνει ότι ο λογάριθμος της τοπικής μέσης ισχύος P_{av} , μεταβάλλεται σύμφωνα με την *κανονική κατανομή* (Gaussian distribution). Η τοπική μέση ισχύς του σήματος βρίσκεται *εξομαλύνοντας* (smoothing out) τις διαλείψεις μικρής κλίμακας του σήματος και διατηρώντας έτσι μόνο ένα σήμα στο οποίο η ισχύς του μεταβάλλεται αργά με το χρόνο σύμφωνα με την κατανομή που δίνεται από τη σχέση (Π.16).

Π.6 Μέθοδοι διαφορικής λήψης

Σκοπός των μεθόδων *διαφορικής λήψης* (ή *διαφοροποίησης στη λήψη*) (diversity methods) είναι η αντιμετώπιση του φαινομένου των διαλείψεων που παρατηρούνται στο λαμβανόμενο σήμα όταν αυτό εκπέμπεται σε ένα τυχαία μεταβαλλόμενο με το χρόνο κανάλι. Τα πρώτα πειράματα διαφορικής λήψης πραγματοποιούνται το 1927. Γενικά, μία μέθοδος διαφορικής λήψης απαιτεί να είναι διαθέσιμος στον δέκτη του συστήματος ένας αριθμός από διαφορετικές και διακριτές “*διαδρομές διάδοσης*” (transmission paths) του εκπεμπόμενου σήματος, όλες μεταφέροντας την ίδια πληροφορία αλλά που να επηρεάζονται με διαφορετικό τρόπο από το κανάλι. Οι διαφορετικές “*διαδρομές*” του σήματος είναι δυνατό να υλοποιούνται στο πεδίο της συχνότητας ή στο πεδίο του χρόνου. Ο κατάλληλος *συνδυασμός* (combining) των σημάτων που προέρχονται από τις διαφορετικές “*διαδρομές*” του σήματος δίνει την δυνατότητα να αντιμετωπιστεί, σε ορισμένο βαθμό, το φαινόμενο των διαλείψεων και να αυξηθεί η αξιοπιστία του συγκεκριμένου συστήματος εκπομπής, δεδομένου ότι η πιθανότητα ταυτόχρονης παρουσίας διαλείψεων στα σήματα των διαφορετικών διαδρομών είναι γενικά μικρή.

Διαφορική λήψη χώρου

Τα πρώτα πειράματα διαφορικής λήψης, αναφέρονται στην εκπομπή σήματος από μια κεραία προς πολλαπλούς δέκτες τοποθετημένους σε τέτοια απόσταση ώστε οι διαλείψεις που παρατηρούνται στο σήμα που κάθε ένας δέκτης λαμβάνει, να είναι στατιστικά *ασυσχέτιστες* (uncorrelated) μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη μέθοδος διαφορικής λήψης ονομάζεται **διαφορική λήψη χώρου** (space diversity). Οποσδήποτε, διαφορική λήψη μπορεί να επιτευχθεί και αντίστροφα, εκπέμποντας το ίδιο σήμα από περισσότερους του ενός πομπούς και λαμβάνοντας μέσω ενός μοναδικού δέκτη.

Η διαφορική λήψη χώρου είναι εύκολα υλοποιήσιμη και δεν απαιτεί επιπρόσθετο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Οποσδήποτε, απαιτείται η απόσταση μεταξύ των διαφορετικών κεραιών (κλάδων) (branches) να είναι τέτοια ώστε τα διάφορα σήματα που λαμβάνονται απ' αυτές να είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους. Θεωρητικά μία απόσταση της τάξης του $\lambda/2$ για διαφορική λήψη σε κινητό δέκτη είναι ικανοποιητική, θεωρώντας έναν συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των σημάτων μικρότερο του 0.2. Όσον αφορά τους σταθμούς βάσης η απόσταση μεταξύ των κεραιών πρέπει να είναι της τάξης των δεκάδων μηκών κύματος. Η διαφορική λήψη χώρου δεν συνιστάται στην περίπτωση χαμηλών συχνοτήτων αφού η απαιτούμενη απόσταση ανάμεσα στις κεραίες μεγαλώνει σημαντικά και κατά συνέπεια η εφαρμογή της μεθόδου είναι πρακτικά δύσκολη. Τέλος, πρέπει να ειπωθεί ότι δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των κεραιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλλά ο ρυθμός βελτίωσης του τελικού σήματος, μειώνεται όσο ο αριθμός των κεραιών μεγαλώνει.

Διαφορική λήψη πόλωσης

Αν ένα σήμα πληροφορίας, εκπεμφθεί ταυτόχρονα με οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση ηλεκτρικού πεδίου, τότε στη λήψη προκύπτουν δύο σήματα ασυσχέτιστα μεταξύ τους που μεταφέρουν το καθένα την ίδια πληροφορία. Η προηγούμενη διαπίστωση αποτελεί την βάση της μεθόδου **διαφορικής λήψης πόλωσης** (polarization diversity). Η μέθοδος διαφορικής λήψης πόλωσης μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ειδική περίπτωση διαφορικής λήψης χώρου, στην οποία το ίδιο σήμα εκπέμπεται από τον πομπό με δύο διαφορετικά είδη πόλωσης και απαιτούνται μόνο δύο διαφορετικές κεραίες εκπομπής και λήψης. Οποσδήποτε, απώλεια 3dB στην εκπεμπόμενη ισχύ παρατηρείται λόγω διαχωρισμού της ισχύος κατά την εκπομπή σε δύο πολώσεις. Στη διαφορική λήψη πόλωσης δεν απαιτείται σημαντική απόσταση ανάμεσα στις χρησιμοποιούμενες κεραίες δεδομένου ότι εδώ ο διαχωρισμός των σημάτων γίνεται σε σχέση με την πόλωσή τους.

Διαφορική λήψη γωνίας

Αν το λαμβανόμενο σήμα φτάνει στην κεραία του δέκτη μέσω πολλών διαφορετικών διαδρομών, καθεμιά από τις οποίες έχει διαφορετική γωνία άφιξης, τότε οι διαφορετικές συνιστώσες του ίδιου σήματος μπορούν να απομονωθούν με τη βοήθεια κατευθυντικών κεραιών. Έτσι κάθε κατευθυντική κεραία θα απομονώσει μια διαφορετική γωνιακή συνιστώσα. Τελικά, τα σήματα από σκέδαση, που λαμβάνονται από τις διάφορες κατευθυντικές κεραιές και τα οποία φτάνουν στο δέκτη από διαφορετικές γωνίες παρουσιάζουν στατιστικά ασυσχέτιστες διαλείψεις και παρέχοντας την δυνατότητα **διαφορικής λήψης γωνίας** (angle diversity).

Σε αντιστοιχία με τη διαφορική λήψη γωνίας, οι συνιστώσες E_z , H_x , H_y ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, σε οποιαδήποτε δεδομένη χρονική στιγμή, όταν λαμβάνονται είτε στον κινητό δέκτη είτε στον σταθερό πομπό. Οι τρεις αυτές συνιστώσες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου αποτελούν τις διαφορετικές “διαδρομές” του σήματος από τις οποίες προκύπτει η διαφορική λήψη γωνίας. Βέβαια, ο αριθμός των κεραιών στην συγκεκριμένη μέθοδο διαφορικής λήψης περιορίζεται σε τρεις.

Διαφορική λήψη στο πεδίο της συχνότητας

Μια εναλλακτική μέθοδος για να πετύχουμε διαφορική λήψη είναι να χρησιμοποιηθούν περισσότερες της μιας συχνότητες, για την εκπομπή του ίδιου σήματος πληροφορίας. Έτσι, αν οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες απέχουν φασματικά σε ικανοποιητικό βαθμό τότε οι διαλείψεις του σήματος που παρατηρούνται σε καθεμιά από τις συχνότητες είναι στατιστικά ασυσχέτιστες. Η μέθοδος ονομάζεται **διαφορική λήψη συχνότητας** (*frequency diversity*). Όπως έχει ήδη ειπωθεί, αν οι δύο εκπεμπόμενες συχνότητες απέχουν φασματικά απόσταση μεγαλύτερη από το εύρος ζώνης συμφωνίας B_{coh} ενός καναλιού πολλαπλών διαδρομών, τότε οι συχνότητες αυτές επηρεάζονται διαφορετικά από το κανάλι. Ανάλογα με τη σχέση μεταξύ του εύρους ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος B και του εύρους ζώνης συμφωνίας του καναλιού B_{coh} , τα συστήματα διακρίνονται σε *συστήματα περιορισμένου φάσματος* (narrow-band systems) και σε *συστήματα ευρέος φάσματος* (broad-band systems) σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$B < B_{coh}: \text{συστήματα περιορισμένου φάσματος}$$

(Π.17)

$$B > B_{coh}: \text{συστήματα ευρέος φάσματος}$$

Διαφορική λήψη στο πεδίο του χρόνου

Η διαφορική λήψη στο πεδίο του χρόνου, αναφέρεται στην εκπομπή του ίδιου σήματος πληροφορίας, σε M διαφορετικές χρονικές στιγμές με χρονική απόσταση μεταξύ τους μεγαλύτερη από το χρόνο συμφωνίας του καναλιού πολλαπλών διαδρομών και εφαρμόζεται κυρίως στην εκπομπή ψηφιακών δεδομένων μέσα από το κανάλι.

Η εκπομπή των δειγμάτων του σήματος πληροφορίας μπορεί να επαναλαμβάνεται με χρονική διαφορά τουλάχιστον κατά $1/2f_m$, όπου $f_m = v/\lambda_0$, ώστε να επιτευχθεί διαφορική λήψη στο πεδίο του χρόνου δεδομένου ότι τότε οι διαλείψεις που παρουσιάζονται στα δείγματα του λαμβανόμενου σήματος είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Βέβαια, στον πομπό και στο δέκτη του συστήματος, απαιτείται αποθήκευση των δειγμάτων του σήματος που εκπέμπονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η μέθοδος εισάγει χρονική καθυστέρηση ίση με $M/2f_m$ secs ενώ και το εύρος ζώνης συχνοτήτων που απαιτείται από τη μέθοδο αυξάνει ανάλογα. Τέλος πρέπει να ειπωθεί ότι, σε πλήρη αντίθεση με τις άλλες μεθόδους διαφορικής λήψης, η εφαρμογή της μεθόδου διαφορικής λήψης χρόνου, εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα του κινητού δέκτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. “Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων”, Α.Ρωμανίδης, Εκδόσεις Ζήτη 2006.
2. “Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Γήινο Περιβάλλον”, Ι.Δ. Κανελλόπουλος, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
3. “Ηλεκτρομαγνητικά κύματα”, Σ.Ε.Ρούλης, Μακεδονικές Εκδόσεις, ΙΩΝ.
4. “Κεραίες, Ασύρματες Ζεύξεις,” Χ.Καψάλης, Π.Κωττής, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
5. “Effects of the troposphere on radio communication, IEE Electromagnetic Waves Series 8, M.P.M. Hall, 1979.
6. “Στοιχεία Θεωρίας Κεραιών & Διάδοσης Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων”, Σ. Κουρής, Εκδόσεις Ζήτη, 1996.
7. Διδακτορική διατριβή: Μέθοδος εκτίμησης φασματικής απόδοσης συστημάτων επικοινωνιών κινητών, Π.Βαρζακας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Φυσικής, 1999.