

ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΙΟΥ
Α.Ε.Ν. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΕΛΙΣΑΡΙΟΣ
ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΥ

Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών μηνυμάτων στο γήινο
χώρο

ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ: ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΟΣ ΑΛΤΙΝΟΓΛΟΥ

Α.Γ.Μ. : 3849

Ημερομηνία ανάληψης της εργασίας:

Ημερομηνία παράδοσης της εργασίας:

<i>A/A</i>	<i>Όνοματεπώνυμο</i>	<i>Ειδικότητα</i>	<i>Αξιολόγηση</i>	<i>Υπογραφή</i>
<i>1</i>				
<i>2</i>				
<i>3</i>				
<i>ΤΕΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ</i>				

Ο ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ:

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ.....	7
2.1 Λίγα λόγια για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.....	7
2.2 Λίγα λόγια για το ηλεκτρομαγνητικό άσμα.....	8
2.3 Συμβολή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΤΟ ΓΗΙΝΟ ΧΩΡΟ.....	10
3.1 Λίγα λόγια για τη διάδοση των ΗΜ στο γήινο χώρο.....	10
3.1.1 Μηχανισμοί διάδοσης ΗΜ.....	11
3.2 Κύμα εδάφους.....	13
3.3 Κύμα χώρου.....	14
3.4 Κύμα επιφανείας.....	17
3.5 Τροποσφαιρική διάδοση.....	21
3.6 Τροποσφαιρική διάθλαση.....	22
3.7 Τροποσφαιρικός κυματοδηγός.....	24
3.8 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	25
3.8.1 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την ατμόσφαιρα.....	25
3.8.2 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων λόγω της απόστασης από τη πηγή.....	26
3.9 Περίθαλψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	27
3.10 Διάδοση στην Ιονόσφαιρα.....	28
3.10.1 Διάθλαση στην Ιονόσφαιρα.....	29
3.10.2 Σκέδαση στην Ιονόσφαιρα.....	31
Βιβλιογραφία.....	32

Περίληψη

Το θέμα μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η διάδοση των Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ΗΜ) στο γήινο χώρο. Συγκεκριμένα παρουσιάζουμε ορισμένα στοιχεία που αφορούν τα Ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπως τι είναι η ασύρματη επικοινωνία σε ποια είδη διακρίνεται και στη σπουδαιότητα του πομπού και του δέκτη. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ενημέρωση για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, τη δομή της, το εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος καθώς και αναφορά στο φαινόμενο της συμβολής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όταν αυτά ταξιδεύουν στο χώρο. Στο τρίτο κεφάλαιο αναφερόμαστε εκτενέστερα στους μηχανισμούς διάδοσης των Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων όπως είναι για παράδειγμα η ανάκλαση. Έπειτα περιγράφουμε αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του κύματος εδάφους και του κύματος επιφανείας. Επίσης γίνεται παρουσίαση της διάδοσης των ΗΜ στο στρώμα της τροπόσφαιρας και αναλύονται όσο λεπτομερέστερα γίνεται τα φαινόμενα της τροποσφαιρικής διάθλασης και του τροποσφαιρικού κυματοδηγού. Τέλος γίνεται περιγραφή των φαινομένων της διάθλασης και της σκέδασης στην ιονόσφαιρα.

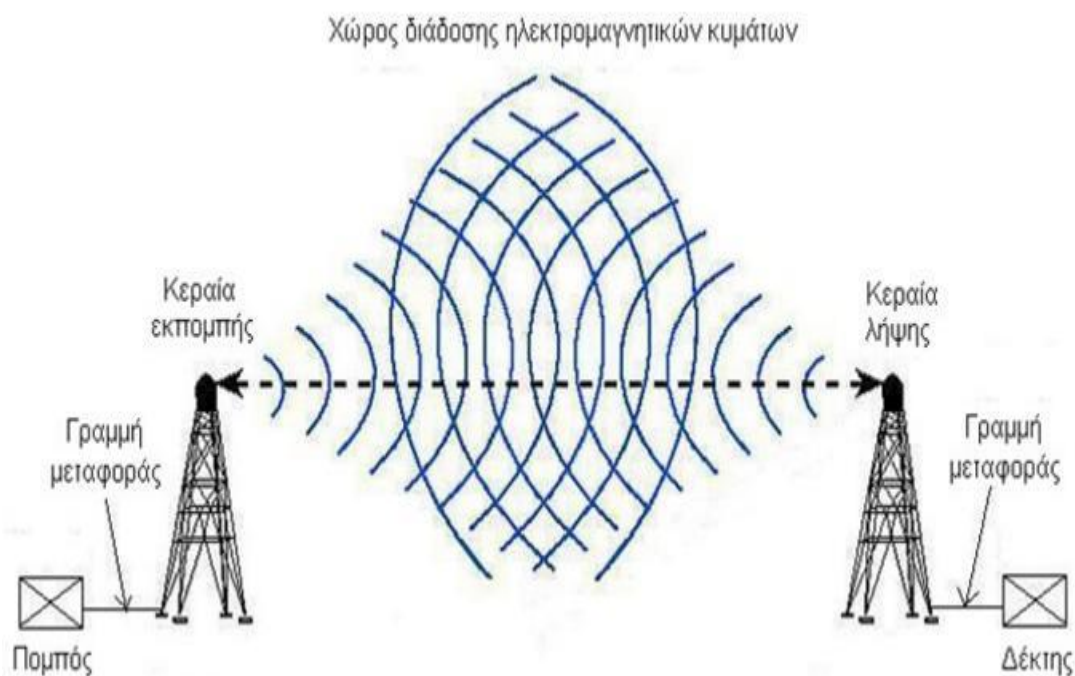
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Μέχρι το 1820 ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός θεωρούνταν δύο διαφορετικά μη συνδεδεμένα φαινόμενα. Όλα αυτά άλλαξαν όταν ο Δανός φυσικός H.C. Oersted (Έρστεντ) παρατήρησε ένα ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί απόκλιση της μαγνητικής βελόνας μιας πυξίδας. Μετά από τον Έρστεντ πολλοί μεγάλοι φυσικοί και μαθηματικοί της εποχής ξεκίνησαν τα πειράματα πάνω στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπως για παράδειγμα ο Michael Faraday και J.C. Maxwell. Μερικά χρόνια αργότερα ο Γουλιέλμο Μαρκόνι καταφέρνει κάνει εφικτή την ασύρματη συνεννόηση ανάμεσα στις δύο πλευρές του Ατλαντικού. Σήμερα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα βρίσκονται παντού στη καθημερινή μας ζωή και θεωρούνται πλέον απαραίτητα για τον σύγχρονο πολιτισμό. Χρησιμοποιούνται από τεράστια γκάμα επιστημών από την ιατρική μέχρι και την ψυχαγωγία, την αστροφυσική και την ναυτιλία όπου η χρήση και ανάπτυξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έπαιξε καθοριστικό ρόλο για την καλύτερη και αποτελεσματικότερη αποφυγή των συγκρούσεων στη θάλασσα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο γήινο χώρο και όχι μόνο μπορεί να πραγματοποιηθεί αποκλειστικά και μόνο μέσω της ασύρματης επικοινωνίας. Η οποία ορίζεται σαν το σύνολο εκείνων των συστημάτων με τα οποία είναι δυνατή η χωρίς σύρματα επικοινωνία και περιλαμβάνει το σύνολο των συσκευών εκείνων που χρησιμοποιούνται. Επίσης εύκολα μπορούμε να εισάγουμε την έννοια του ασύρματος δικτύου που χαρακτηρίζεται σαν το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που είτε είναι τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών που χρησιμοποιεί ραδιοκύματα σαν φορείς πληροφορίας. Μάλιστα στα ασύρματα δίκτυα περιέχονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN)



Εικόνα 1. Χώρος διάδοσης Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ΗΜ)

Σημαντικό κομμάτι του συστήματος επικοινωνίας είναι ο πομπός. Πρόκειται για μια ηλεκτρονική συσκευή που με τη βοήθεια μιας κεραίας που εκπέμπει σήματα που περιέχουν πληροφορίες όπως είναι για παράδειγμα το ραδιοφωνικό, το τηλεοπτικό ή σήματα άλλων τηλεπικοινωνιών. Επιπλέον δέχεται ένα πλήθος δεδομένων που μετασχηματίζει η είναι σε θέση να κωδικοποιεί για την μετάδοση σε κάποιο κανάλι ή μέσο μετάδοσης. Σαν μέσο μετάδοσης θεωρείται ο κενός χώρος, τα δισύρματα καλώδια, οι οπτικές ίνες και άλλα. Παραδείγματα πομπών είναι η τηλεόραση, το ραδιόφωνο, οι επίγειοι πομποί προς τους τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους. Ακόμα πομπός λογίζεται και ένα modem που δέχεται ροή ψηφιακών δεδομένων και τα οποία μετατρέπει σε αναλογικό σήμα προτού τα αποστείλει στο τηλεφωνικό δίκτυο.

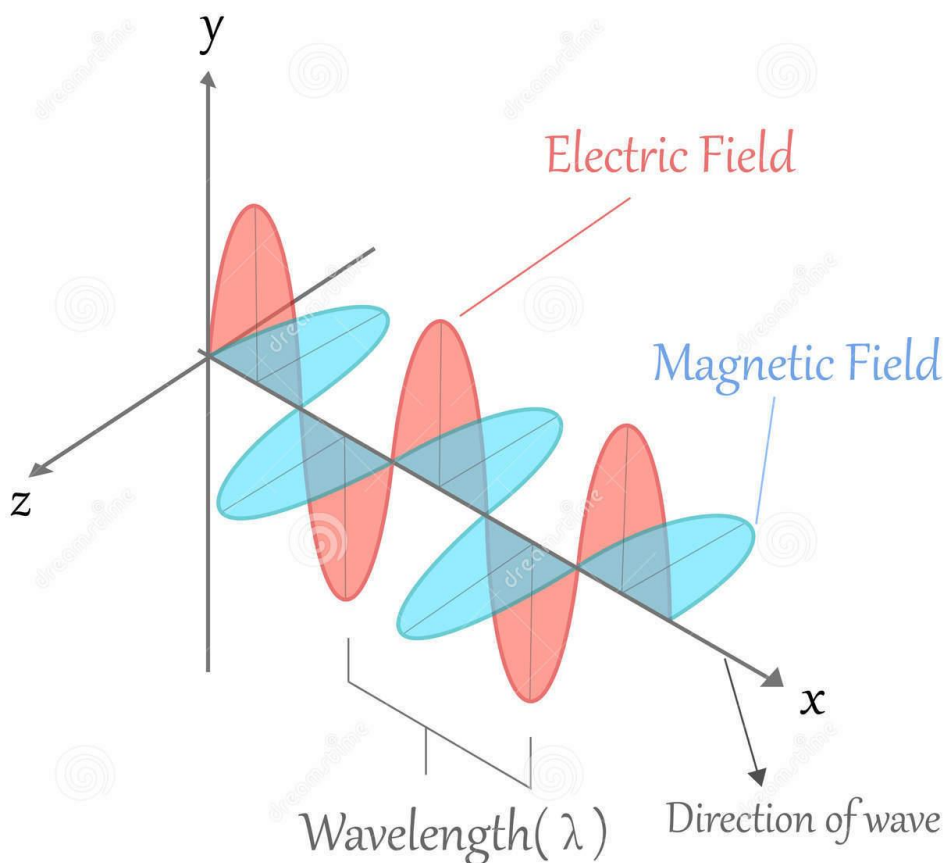
Ωστόσο εκτός από το πομπό έχουμε και το δέκτη που πραγματοποιεί την ανάποδη διαδικασία. Ειδικότερα είναι σε θέση να μετατρέπει τα δεδομένα του καναλιού μετάδοσης σε εκείνα που μπόρεσε να λάβει ο πομπός, προκειμένου να έχει νόημα η αποστολή δεδομένων. Μάλιστα ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν οι πάσης φύσεως συσκευές ραντάρ, συσκευές τηλεπικοινωνιών, δορυφόροι αλλά και σε πολλούς ακόμα τομείς του σύγχρονου κόσμου που αποτελούν ταυτόχρονα πομπο-δέκτες δικών τους ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Επίσης σαν ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορεί κανείς να ορίσει τα συζευγμένα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που κινούνται με την ταχύτητα του φωτός και εμφανίζουν τυπική κυματική συμπεριφορά. Η δε διάδοση των κυμάτων αυτών πραγματοποιείται μέσω των φαινομένων της ανάκλασης, της περίθλασης και της σκέδασης. Συνήθως ο τρόπος διάδοσης καθορίζεται από το μήκος κύματος του κάθε αντικειμένου.

Τέλος αξίζει να αναφερθούμε στη κεραία που είναι ένας αγωγός που μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα και αντίστροφα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για εκπομπή όσο και για τη λήψη. Μάλιστα μια κεραία χαρακτηρίζεται από ένα διάγραμμα ακτινοβολίας που αναπαριστά στο χώρο τη συμπεριφορά μιας κεραίας ως προς την ισοτροπική κεραία. Η δε κατευθυντικότητα της κεραίας καθορίζεται από την εφαρμογή της κεραίας στο δίκτυο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

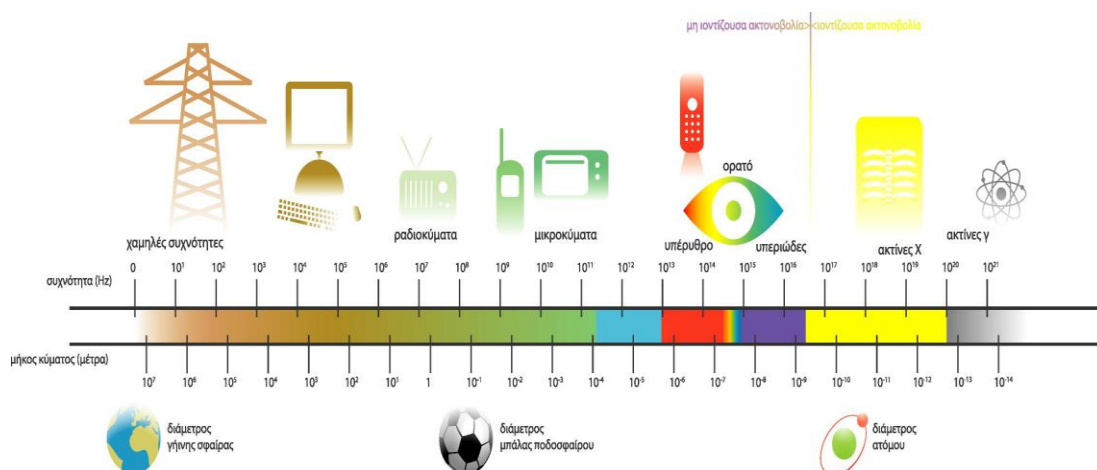
2.1 Λίγα λόγια για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στον χώρο υπό μορφή κυμάτων που ονομάζονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι συγχρονισμένα ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία ταλαντώνονται σε κάθετα επίπεδα μεταξύ τους και κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης. Διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός ($c=299.792,5 \text{ m/s}$), ενώ μέσα στην ύλη με ταχύτητα μικρότερη από αυτή του φωτός.



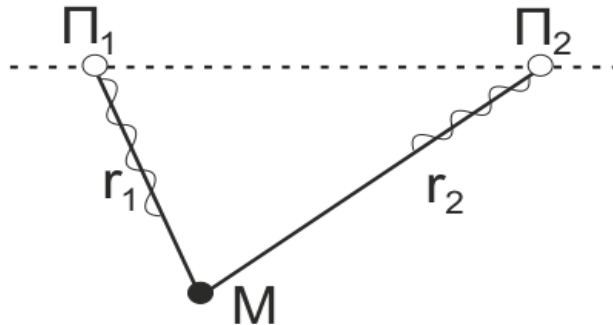
2.2 Λίγα λόγια για το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ονομάζεται το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται θεωρητικά από τις μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο. Με βάση κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες. Αυτές είναι: τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, η υπέρυθη ακτινοβολία, η ορατή ακτινοβολία (φως), η υπεριώδης ακτινοβολία, οι ακτίνες X και οι ακτίνες Γ. Δεν είναι όμως όλα τα είδη ακτινοβολίας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ακίνδυνα. Η ιονίζουσα ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που μεταφέρει ενέργεια ικανή να εισχωρήσει στην ύλη, να προκαλέσει ιονισμό σε άτομα, να διασπάσει βίαια χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει βιολογικές βλάβες στους οργανισμούς. Είναι το κομμάτι της ακτινοβολίας που βρίσκονται έπειτα το ορατό, ενώ το κομμάτι που βρίσκεται από το ορατό και πριν ονομάζεται μη ιονίζουσα ακτινοβολία. Παρ' όλο που η μη ιονίζουσα ακτινοβολία δεν προκαλεί βλάβες στους οργανισμούς, μπορεί να επιδράσει ηλεκτρικά, χημικά ή θερμικά με αυτούς. Στις επικοινωνίες, συνήθως, χρησιμοποιούνται τα ραδιοκύματα, μια μορφή μη ιονίζουσας.



2.3 Συμβολή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Το φαινόμενο της συμβολής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι αρκετά συχνό στη μετάδοση των κυμάτων υψηλής συχνότητας τα οποία μεταδίδονται στην ατμόσφαιρα, αλλά και σε διαδόσεις κυμάτων που εκπέμπονται στο κομμάτι των μικροκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται όταν δύο κύματα, που παράγονται από δύο σύμφωνες πηγές, φτάνουν στην ίδιο σημείο του μέσου που μεταδίδεται το κύμα. Το φαινόμενο της συμβολής εμφανίζεται, επίσης, όταν δύο κύματα που προέρχονται από την ίδια πηγή φτάνουν στο ίδιο σημείο μέσω διαφορετικών διαδρομών.

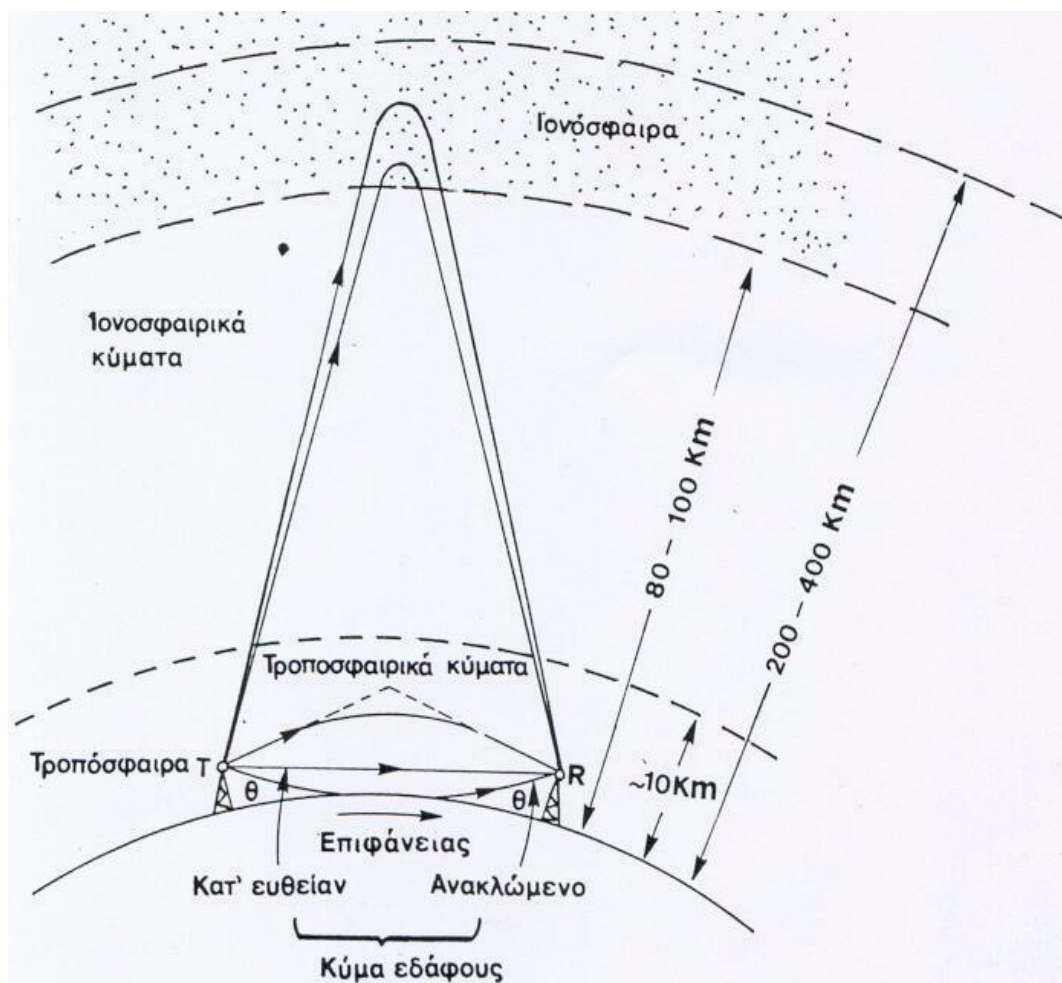


Συμβολή κυμάτων από δύο σύμφωνες πηγές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΤΟ ΓΗΙΝΟ ΧΩΡΟ

3.1 Λίγα λόγια την διάδοση των ΗΜ στο γήινο χώρο

Η διάδοση ΗΜ σε πραγματικές διαστάσεις διαφέρει σε σημαντικό βαθμό από ότι σε ελεύθερο χώρο λόγω της παρουσίας της γήινης επιφάνειας, του σφαιρικού της σχήματος, της ανομοιογένειας των χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας καθώς και στην παρουσία μιας ιονισμένης περιοχής (ιονόσφαιρα) που εκτείνεται από μερικές δεκάδες μέχρι και μερικές εκατοντάδες km υπεράνω της γης. Οπότε η μετάδοση από την κεραία εκπομπής τους προς τη κεραία λήψης πραγματοποιείται με ποικίλους τρόπους ή μηχανισμούς διάδοσης. Οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί διάδοσης απεικονίζονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Μηχανισμοί διάδοσης στο γήινο χώρο

3.1.1 Μηχανισμοί διάδοσης HM

Στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες ο ελεύθερος χώρος μεταξύ των κερασιών του πομπού και του δέκτη αποτελεί το κανάλι της επικοινωνίας. Όταν αναφερόμαστε στον ελεύθερο χώρο εννοούμε έναν χώρο που δεν αναπτύσσονται μαγνητικά πεδία, βαρυτικά πεδία και ιονισμένα σωματίδια. Γενικά η έννοια του ελεύθερου χώρου δεν υφίσταται στη πραγματικότητα. Παρ' όλ' αυτά χρησιμοποιούμε την έννοια του ελεύθερου χώρου για να γίνουν απλούστεροι οι υπολογισμοί στο φαινόμενο της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όταν μια σημειακή πηγή εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα, αυτά ταξιδεύουν σφαιρικά και ομοιόμορφα στον ελεύθερο χώρο. Ο πιο απλός μηχανισμός διάδοσης HM είναι η διάδοση στο γήινο χώρο. Οι πιο χαρακτηριστικές του ιδιότητες είναι η ομοιογένεια, η ιστροπικότητα, η γραμμικότητα και οι χωρίς απώλειες αφού κάνουμε τη προσέγγιση ότι ο γήινος χώρος μοιάζει με τον ατμοσφαιρικό.

Στο γήινο χώρο (ελεύθερο) τα κύματα διαδίδονται επί ευθείας γραμμής και οπότε στον ατμοσφαιρικό χώρο το κύμα μεταδίδεται επί μιας ευθείας γραμμής. Οπότε κατά αυτό τον τρόπο έχουμε ένα μηχανισμό διάδοσης στον ελεύθερο χώρο που αποκαλείται κατ' ευθείαν κύμα (direct wave) και το οποίο όταν διασχίσει την ατμόσφαιρα υφίσταται τα φαινόμενα της διάθλασης (refraction), σκέδασης (scattering) ή και το φαινόμενο της περιστροφής του επιπέδου πόλωσης.

Ένας επιπρόσθετος μηχανισμός διάδοσης των Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι η διάδοση μέσω της ανάκλασης επί του εδάφους (**ground-reflected wave**). Το συνολικό εύρος του ανακλώμενου κύματος καθορίζεται από τις ιδιότητες της γήινης επιφάνειας στο σημείο όπου λαμβάνει χώρα η ανάκλαση. Το απευθείας και το ανακλώμενο κύμα αποκαλούνται κύματα χώρου (**space waves**).

Επιπρόσθετα υπάρχει και ένας τρίτος μηχανισμός διάδοσης αποτελεί το κύμα επιφάνειας που ακολουθεί την πορεία του εδάφους. Το κύμα επιφάνειας δίνει την δυνατότητα διάδοσης των ραδιοηλεκτρικών σημάτων συχνότητας LF και MF (μακρά και μεσαία κύματα) προκειμένου όταν συναντούν φυσικά εμπόδια όπως είναι τα όρη, οι λόφοι και τα κτίρια να μην εμποδίζουν τη διάδοσή τους.

Η εξασθένιση του κύματος επιφάνειας καθορίζεται από τις σταθερές αγωγιμότητας και διηλεκτρικότητας του εδάφους κατά μήκος του οποίου οδεύει. Στην περίπτωση που

οι κεραιές πομπού και του δέκτη εντοπίζονται στο έδαφος, το κατευθείαν και το ανακλώμενο κύμα απαλείφονται μεταξύ τους και οπότε η μετάδοση των ραδιοηλεκτρικών κυμάτων καθορίζεται στο κύμα επιφάνειας. Τα κύματα χώρου και τα κύματα επιφάνειας οφείλονται στο κύμα επιφάνειας και αποκαλούνται κύματα εδάφους.

Επίσης υπάρχει μια περιοχή της ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρας) που εκτείνεται από την επιφάνεια της γης μέχρι ένα ύψος 10km και παρέχει ένα ακόμη μηχανισμό διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το στρώμα της ατμόσφαιρας θεωρείται ως ένα μέσο γραμμικό, διηλεκτρικό και μη ομοιογενές με ιδιότητες που προσδιορίζονται από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Ο δείκτης διάθλασης της τροπόσφαιρας (refractive index) μειώνεται με το ύψος παρουσιάζοντας ένα σύνολο μεταβολών που έχουν σαν αποτέλεσμα την διάθλαση και την σκέδαση και ένα πλήθος μερικών ή ολικών ανακλάσεων.

Στο κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας (κατώτερη τροπόσφαιρα) οι συνθήκες καιρού είναι διαμορφωμένες προκειμένου να εμφανίζεται απότομη μείωση του δείκτη διάθλασης με το ύψος. Οπότε δημιουργείται ένα είδος κυματοδηγού που αποκαλείται τροποσφαιρικός κυματοδηγός (duct) και είναι σε θέση να διαδίδει το σήμα μέχρι περίπου 800km από το πομπό. Το μεγαλύτερο μέρος των κυμάτων που φθάνουν στο δέκτη αφού υποστούν διάθλαση, σκέδαση ή ανάκλαση στην τροπόσφαιρα αποκαλούνται τροποσφαιρικά κύματα (tropospheric waves).

Ακόμα τα κύματα που καταλήγουν στο δέκτη αφού προηγουμένως έχουν υποστεί τα φαινόμενα της ανάκλασης ή της σκέδασης στη ιονόσφαιρα αποκαλούνται ουράνια κύματα (sky waves) ή ιονοσφαιρικά κύματα. Η περιοχή της ιονόσφαιρας εκτείνεται από 80 μέχρι 600km υπεράνω του εδάφους και είναι υπεύθυνη για την πρόκληση της διάθλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που δίνει την δυνατότητα διάδοσης των βραχέων κυμάτων (3-30MHz) μεταξύ των σημείων που βρίσκονται σε απόσταση μερικών χιλιάδων χιλιομέτρων. Οπότε με μια ανάκλαση από την ιονόσφαιρα είναι δυνατόν να καλυφθεί μια απόσταση περίπου 4000km. Οπότε εκτός από την διάθλαση η ιονόσφαιρα δημιουργεί σκέδαση κυμάτων που οφείλεται στην παρουσία ζωνών ανώμαλου ιονισμού. Το δε φαινόμενο δίνει την δυνατότητα διάδοσης υπερβραχέων κυμάτων (30-100 MHz) για την πραγματοποίηση ζεύξεων της τάξης των 2000 km.

Τέλος οι συνεισφορές των κυμάτων που φθάνουν στο δέκτη μέσω ποικίλων μηχανισμών προστίθενται διανυσματικά με βάση τα σχετικά τους πλάτη και τις

σχετικές τους φάσεις. Τα πλάτη καθορίζονται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η κατευθυντικότητα της κεραίας, τους δείκτες διάθλασης των διαφόρων περιοχών, από τους συντελεστές ανάκλασης και από τους παράγοντες απόσβεσης. Οι σχετικές φάσεις καθορίζονται από τις διαθλαστικές και ανακλαστικές ιδιότητες του γήινου χώρου και από τις αποστάσεις των διαφόρων διαδρομών διάδοσης από το πομπό προς το δέκτη. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι το στρώμα της ατμόσφαιρας προκαλεί εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εξαιτίας της απορρόφησης ενέργειας και μάλιστα η εξασθένιση δεν είναι ίδια για όλο το πλήθος των συχνοτήτων αλλά παρουσιάζει μια επιλεκτικότητα.

3.2 Κύμα εδάφους

Το κύμα εδάφους αποτελείται από το κύμα επιφάνειας και το κύμα χώρου το οποίο τελευταίο αποτελείται από το κατευθείαν κύμα και το υπό του εδάφους ανακλώμενο κύμα. Με βάση το Bullington το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται εξαιτίας του κύματος εδάφους δίνεται από τη ακόλουθη σχέση: [8]

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 [1 + Re^{-j\Delta} + (1 - R)Ae^{-j\Delta}] \quad (1)$$

Όπου ο πρώτος όρος αποτελεί το κατευθείαν κύμα, ο δεύτερος το ανακλώμενο κύμα και ο τρίτος το κύμα επιφανείας. Ο όρος E_0 είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο ελεύθερο χώρο, R είναι ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους, A ο συντελεστής απόσβεσης του κύματος επιφανείας και Δ η διαφορά φάσης που οφείλεται στη διαφορά διαδρομής μεταξύ του ανακλώμενου και του κατ' ευθείαν κύματος.

Στη περίπτωση που οι κεραίες εκπομπής και λήψης βρίσκονται ή τοποθετούνται επί της επιφάνειας του εδάφους, η γωνία πρόσπτωσης ψ του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι ίση με το μηδέν. Οπότε ο συντελεστής ανάκλασης

R ισούται με -1 και το κατευθείας κύμα με το ανακλώμενο κύμα μπορούν να απαλειφθούν μεταξύ τους. Ωστόσο στην περίπτωση η μετάδοση του κύματος οφείλεται αποκλειστικά στο κύμα επιφάνειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις υψηλές (3-30MHz) και στις πολύ υψηλές συχνοτήτες (30-300MHz) το μήκος κύματος είναι αρκετά μικρό και οπότε καθίσταται δυνατή η ανύψωση κεραιών υπεράνω του εδάφους σε ύψος ίσο ή και μεγαλύτερο του $\lambda/4$. Σε εκείνη την περίπτωση το κύμα χώρου είναι διάφορο του μηδενός και το πεδίο στη κεραία λήψης είναι το διανυσματικό άθροισμα του κύματος χώρου και του κύματος επιφάνειας.

3.3 Κύμα χώρου

Στην περίπτωση που οι κεραιές εκπομπής και λήψης βρίσκονται σε οπτική επαφή και είναι ανυψωμένες τουλάχιστον πάνω από ένα μήκος κύματος από το έδαφος, ο συντελεστής A στην εξίσωση (1) θεωρείται αμελητέος και το σήμα λήψης είναι το διανυσματικό άθροισμα του κατ' ευθείαν και του ανακλώμενου κύματος.

Το ανακλώμενο κύμα καθορίζεται από τον συντελεστή ανάκλασης R, τη διαφορά φάσης Δ που οφείλεται στην διαφορά διαδρομής του ανακλώμενου και του κατ' ευθείαν κύματος. Η διαφορά φάσης Δ δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

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

Όταν η απόσταση των κεραιών (d) τηρεί την ανίσωση $d > 5(h_1 + h_2)$, τότε η γωνία Δ δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$\Delta \approx \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d} \quad (3)$$

Σε ότι έχει να κάνει με το συντελεστή ανάκλασης του εδάφους R θεωρούμε ότι η επιφάνεια του εδάφους είναι λεία και επίπεδη και ότι το έδαφος παρουσιάζει πεπερασμένη αγωγιμότητα σ και διηλεκτρική σταθερά ϵ . Εντούτοις στην πραγματικότητα η διηλεκτρική σταθερά είναι μιγαδική ποσότητα και δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$\epsilon' = \epsilon \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon} \right) \quad (4)$$

Οπότε ένα μερικώς αγωγίμο διηλεκτρικό μέσον θεωρείται σαν ένα διηλεκτρικό μέσο με μιγαδική διηλεκτρική σταθερά ϵ' . Στο Σχήμα 1 το μέσον (1) είναι η ατμόσφαιρα με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_1 = \epsilon_0$ και το μέσον (2) είναι η γη με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_2 = \epsilon' = \epsilon_0 - j\chi$ όπου $\chi = \sigma/\omega\epsilon_0$. Η δε γωνία πρόσπτωσης ψ δίνεται από τη σχέση: [8]

$$\tan \psi = \frac{h_1 + h_2}{d} \quad (5)$$

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές ισχύει $\tan \psi = \psi$ και οπότε η εξίσωση (5) γίνεται

$$\psi = \frac{h_1 + h_2}{d} \quad (6)$$

Οπότε με τις σχέσεις (5) και (6) προκύπτει ότι ο συντελεστής ανάκλασης επιπέδου κύματος οριζόντιας πόλωσης προσπίπτοντος επί του εδάφους δίνεται ως εξής: [8]

$$R_o = \frac{\sin \psi - \sqrt{(\varepsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{(\varepsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}} \quad (7)$$

Ενώ αντίστοιχα ο συντελεστής παράλληλης πόλωσης είναι:

$$R_k = \frac{(\varepsilon_r - j\chi) \sin \psi - \sqrt{(\varepsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}}{(\varepsilon_r - j\chi) \sin \psi + \sqrt{(\varepsilon_r - j\chi) - \cos^2 \psi}} \quad (8)$$

Οπότε από τις προαναφερθείσες εξισώσεις προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι συντελεστές ανάκλασης είναι μιγαδικοί και οπότε το ανακλώμενο κύμα θα διαφέρει τόσο ως προς το εύρος και τη φάση από το προσπίπτον κύμα.

Στην περίπτωση που η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρή δηλαδή ισχύουν $R_o = -1$ και $R_k = -1$, δηλαδή το ανακλώμενο κύμα παρουσιάζει το ίδιο εύρος με το προσπίπτον αλλά παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 180° . Αυτό λαμβάνει χώρα για ένα ευρύ σύνολο συχνοτήτων και για όλες τις ειδικές αγωγιμότητες των διαφόρων τύπων εδάφους. Επίσης προκύπτει ότι στο προσπίπτον κύμα οριζόντιας πόλωσης η φάση του ανακλώμενου κύματος διαφέρει από εκείνη του 180° περίπου για όλες τις τιμές της γωνίας πρόσπτωσης ψ . Μάλιστα όσο αυξάνεται το ψ τόσο το εύρος R_o μεταβάλλεται, χωρίς όμως να εμφανίζονται μεγάλες μεταβολές. Η δε μεταβολή είναι τόσο μεγαλύτερη όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα και τόσο μικρότερη είναι η αγωγιμότητα.

Στην κατακόρυφη πόλωση παρατηρούμε αύξηση της γωνίας ψ τόσο ως προς το εύρος όσο και στη φάση του ανακλώμενου κύματος που μειώνεται με γρήγορο ρυθμό. Το συνολικό εύρος του συντελεστή ανάκλασης R_k διέρχεται από ένα ελάχιστο στην περίπτωση που λαμβάνει την τιμή -90° . Οπότε η γωνία πρόσπτωσης ψ αποκαλείται γωνία ψευδο-Brewster σε αναλογία με βάση την περίπτωση τέλειων διηλεκτρικών. Τελικά η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία Brewster ή ψευδο-Brewster, όταν το ανακλώμενο κύμα είναι πολύ μικρό. Η συγκεκριμένη ιδιότητα αξιοποιείται στη πράξη για την αποφυγή ανεπιθύμητων ανακλάσεων. Έτσι για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας ψ το εύρος αυξάνει και η φάση τείνει στο μηδέν. Τέλος αν στην εξίσωση (1) θεωρήσουμε ότι η γωνία ψ είναι μικρή ($\psi=0$), τότε $R = -1$

Και οπότε η νέα σχέση θα είναι:

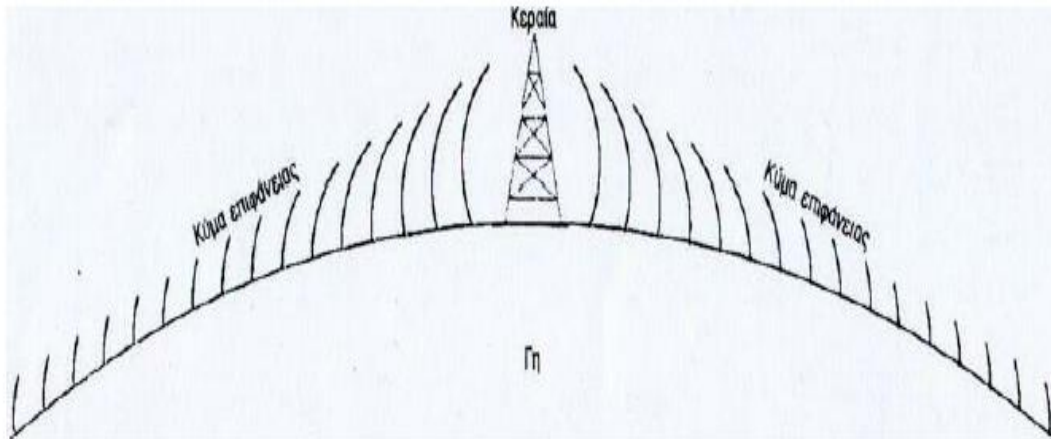
$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_o (1 + Re^{-j\Delta}) = \mathbf{E}_o (1 - e^{-j\Delta}) = \mathbf{E}_o (1 - \cos \Delta + j \sin \Delta)$$

(9)

όπου \mathbf{E}_o είναι η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στον ελεύθερο χώρο.

3.4 Κύμα επιφανείας

Στις περιπτώσεις που τα ύψη κεραιών είναι μικρά σχετικά με το μήκος κύματος το πεδίο στη κεραία λήψης είναι μεγαλύτερο με κατακόρυφη πόλωση από ότι με οριζόντια. Αφορά την περίπτωση μακρών και μεσαίων κυμάτων αλλά όχι με τα υπερβραχέα κύματα. Το δε κύμα επιφανείας παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Κύμα επιφανείας

Οπότε ο όρος που παρέχει τη συνεισφορά του κύματος επιφανείας στη εξίσωση (1) θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν. Αυτό γίνεται γιατί το έδαφος δεν είναι τέλειος ανακλαστήρας και οπότε το πεδίο θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί επί ένα συμπληρωματικό συντελεστή απόσβεσης A .

Η εξασθένιση του πεδίου οφείλεται στην απορρόφηση ενέργειας από το έδαφος και προκαλείται λόγω της απορρόφησης ενέργειας από το έδαφος. Ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας μεταφέρεται μέσω του εδάφους και δημιουργεί ηλεκτρικά ρεύματα που διαφέρουν σε σημαντικό βαθμό από τα αντίστοιχα που θα σχηματισθούν όταν υπάρχει μια τέλεια επιφάνεια ανάκλασης. Το κύμα επιφανείας καθορίζεται σαν κατακόρυφο ηλεκτρικό πεδίο για κατακόρυφη πόλωση ή αλλιώς σαν οριζόντιο ηλεκτρικό πεδίο για οριζόντια πόλωση, που συνδέεται με τις συνιστώσες των ρευμάτων εδάφους που σχηματίζονται εξαιτίας της μη τέλειας ανάκλασης.

Στην εξίσωση (1) η παράμετρος A είναι ο συντελεστής απόσβεσης του κύματος επιφανείας για επίπεδη γη και κεραίες επί της γήινης επιφάνειας και εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την απόσταση, τη συχνότητα, τις σταθερές εδάφους και το τύπο της πόλωσης. Ακόμα λαμβάνει τιμές μικρότερες ή ίσες από τη μονάδα. Έτσι έχουμε τη ακόλουθη απλή έκφραση.

$$A = \frac{-1}{1 + j \frac{2\pi d}{\lambda} (\sin \psi + z)^2} \quad (10)$$

όπου

$$z = \frac{\sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}}{\varepsilon} \quad \text{για κατακόρυφη πόλωση και}$$

$$z = \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi} \quad \text{για οριζόντια πόλωση και}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r - j60\lambda\sigma,$$

με ε_r τη σχετική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, σ την ειδική αγωγιμότητα, λ το μήκος κύματος σε m και ψ είναι η γωνία πρόσπτωσης μετρούμενη από την επιφάνεια του εδάφους και η οποία είναι ίση με μηδέν για κεραίες τοποθετημένες επί της επιφάνειας του εδάφους.

Τις περισσότερες φορές ο συντελεστής απόσβεσης A δίνεται από τις καμπύλες που είναι συναρτήσεις δύο παραμέτρων όπως είναι η αριθμητική απόσταση p και η φασική σταθερά b που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Για τιμές του ψ κοντά στο μηδέν ($\psi=0$) η φασική σταθερά b και η αριθμητική απόσταση p για κατακόρυφη πόλωση, δίνονται προσεγγιστικά από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$b \approx \tan^{-1} \frac{\varepsilon_r + 1}{\chi}, \quad p = \frac{\pi d}{\lambda \chi} \cos b \quad (10)$$

Για πολύ μικρές τιμές της φασικής σταθεράς b ($b < 5^0$) ο συντελεστής απόσβεσης A , δίνεται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$|A = A_1 \approx \frac{2 + 0,3p}{2 + p + 0,6p^2}, \quad (11)$$

Για $p < 1$, ο συντελεστής απόσβεσης είναι $A=1$, ενώ για $p > 10$ είναι ανάλογος του $1/d$.

Ακόμα αποδεικνύεται ότι για χαμηλές συχνότητες ή για έδαφος υψηλής αγωγιμότητας η p είναι ανάλογη του $f^2 d / \sigma$, ενώ για υψηλές συχνότητες ή χαμηλές αγωγιμότητες η p είναι ανάλογη του $f d / (\epsilon r + 1)$. Επιπρόσθετα αξίζει να αναφέρουμε ότι το ίδιο έδαφος που συμπεριφέρεται σαν αγωγός σε χαμηλές συχνότητες, μπορεί να συμπεριφερθεί και σαν διηλεκτρικό με χαμηλές απώλειες σε πολύ υψηλές συχνότητες. Κατά την εκπομπή ενός κύματος επιφανείας από μια κεραία εκπομπής, αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε μια απόσταση από τη πηγή. Ο υπολογισμός της γίνεται με τη χρήση των εξισώσεων του Maxwell:

$$E = \frac{120\pi h_l I}{\lambda d}$$

Όπου 120π : η αντίσταση του ελεύθερου χώρου

h_l : ενεργό μήκος κεραίας μετάδοσης

h_r : ενεργό μήκος κεραίας λήψης

I : ρεύμα που διαρρέει την κεραία εκπομπής

d : απόσταση από την κεραία εκπομπής

λ : μήκος κύματος

3.5 Τροποσφαιρική διάδοση

Το στρώμα της τροπόσφαιρας αποτελεί την κατώτερη περιοχή της ατμόσφαιρας καθώς εκτείνεται σε ύψος περίπου 18km στη περιοχή του Ισημερινού, 10-13 km στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και 8 km στους πόλους της Γης. Το στοιχείο εκείνο που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην διάδοση των ραδιοκυμάτων, είναι η μεταβολή συναρτήσεως του ύψους της σχετικής υγρασίας που παρουσιάζει διηλεκτρική σταθερά μεγαλύτερη από τη διηλεκτρική σταθερά του κενού. Οπότε θα υφίσταται αλλαγές με το ύψος του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας και κατ'επέκταση η φασική ταχύτητα του κύματος.

Το αποτέλεσμα, είναι η λήψη του ραδιοηλεκτρικού σήματος μέσω διαφόρων μηχανισμών ακόμη και πέρα του γεωμετρικού ορίζοντα. Οι συνολικοί μηχανισμοί που πρέπει να ασκήσει η τροπόσφαιρα στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι διάθλαση, η ανάκλαση και η σκέδαση. Το φαινόμενο της ολικής ή μερικής ανάκλασης εκδηλώνει στρωμάτωση. Επίσης δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι τοπικές αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας σχηματίζουν ζώνες σκέδασης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που με την σειρά του δίνει την δυνατότητα για μόνιμη ζεύξη εκτός του γεωμετρικού ορίζοντα σε απόσταση 500-600 km από τον πομπό.

Ακόμα η μείωση του δείκτη διάθλασης με το ύψος προκαλεί την καμπύλωση των ηλεκτρομαγνητικών ακτίνων προς τα κάτω με ακτίνα καμπυλότητας μεγαλύτερη από την ακτίνα της γης. Πράγμα που συνεπάγεται την την υλοποίηση ζεύξεων λόγω περίθλασης εκτός του οπτικού ορίζοντα που αγγίζει τη τάξη του 20-30% χωρίς απώλειες. Μάλιστα υπό ορισμένες συνθήκες είναι δυνατόν ο δείκτης διάθλασης να παρουσιάζει αύξηση τόσο με το ύψος και οπότε να "καμπυλώνονται" οι ακτίνες προς τα πάνω με συνέπεια την εξασθένιση του σήματος λήψης.

3.6 Τροποσφαιρική Διάθλαση

Έστω ότι έχουμε μια ατμόσφαιρα με δείκτη διάθλασης n όπου μεταβάλλεται με το ύψος h , τότε οι ηλεκτρομαγνητικές ακτίνες που σε μια ομοιογενή ατμόσφαιρα θα ήταν ευθύγραμμες τώρα υφίστανται καμπύλωση. Εάν θεωρήσουμε ότι η ατμόσφαιρα αποτελείται από στρώματα ομοκεντρικά ακτίνας r_1, r_2, r_3 , με δείκτη διάθλασης n_1, n_2, n_3 , τότε σύμφωνα με βάση το νόμο του Snell θα έχουμε:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2' \quad (12)$$

Με βάση το θεώρημα του ημιτόνου, θα έχουμε:

$$\frac{\sin \theta_2}{r_1} = \frac{\sin \theta_2'}{r_2} \quad (13)$$

Από τις εξισώσεις (12) και (13) έχουμε ότι:

$$r_1 n_1 \sin \theta_1 = r_2 n_2 \sin \theta_2 \quad (14)$$

και σε γενικές γραμμές γράφουμε:

$$nr \sin \theta = \text{σταθερά} \quad (15)$$

Η τελευταία εξίσωση εκφράζει το νόμο του Bouguet ή αλλιώς νόμο της διάθλασης μέσω σφαιρικών στρωμάτων. Με βάση το νόμο Bouguet, αποδεικνύεται ότι η ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς του ηλεκτρομαγνητικού κύματος δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = -\frac{1}{\frac{dn}{dh}} \frac{n}{\sin \theta} \quad (16)$$

Στην μελέτη περίπτωσης οριζόντιας διάδοσης τότε $\sin \theta = 1$ και δεχόμενοι ότι $n=1$, η παραπάνω εξίσωση μετατρέπεται στην ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{dn}{dh} \quad (17)$$

Τελικά έχουμε ότι η ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι αντιστρόφως ανάλογη της μεταβολής του δείκτη διάθλασης με το ύψος. Μάλιστα για πρότυπες συνθήκες ατμόσφαιρας και με βάση τις σχέσεις (17) και

$$\frac{dn}{dh} = -39 \cdot 10^{-6} \quad (\text{km}^{-1}) \quad (18)$$

Προκύπτει $\rho = 25,6 \cdot 10^3 \text{ km} = 4 \alpha$ όπου $\alpha = 6370 \text{ km}$ είναι η ακτίνα της γης.

3.7 Τροποσφαιρικός κυματοδηγός

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση εκείνη που είναι συνηθισμένη πάνω από τις θάλασσες και συγκεκριμένα εκείνη όπου η κλίση της καμπύλης είναι αρνητική κοντά στην επιφάνεια της γης και μετά από κάποιο ύψος γίνεται θετική ή η αρνητική κλίση εκτείνεται εντός ενός περιορισμένου ύψους, ξεκινώντας από κάποιο ύψος της ατμόσφαιρας. Είναι δυνατόν να εμφανιστούν διαδοχικές ανακλάσεις μεταξύ της γης και του θεωρούμενου τροποσφαιρικού στρώματος επιτρέποντας την δημιουργία ζεύξεων σε πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Οπότε οι ηλεκτρομαγνητικές ακτίνες παραμένουν εντός ενός είδους κυματοδηγού που αποκαλείται τροποσφαιρικός κυματοδηγός (duct) και ο οποίος δημιουργείται από την σύμπραξη της επιφάνειας της γής και το θεωρούμενο τροποσφαιρικό στρώμα. Ωστόσο τις περισσότερες φορές ο τροποσφαιρικός κυματοδηγός δημιουργείται μεταξύ δύο τροποσφαιρικών στρωμάτων εντός των οποίων η απόκλιση του δείκτη διάθλασης της καμπύλης είναι αρνητική.

Οι συνθήκες αυτές σχηματίζονται από μάζες αέρα ζεστού και ξηρού πάνω από υγρές ή υδάτινες επιφάνειες (θάλασσες, ωκεανούς). Το φαινόμενο της εξάτμισης που εμφανίζεται κατόπιν δημιουργεί μια ταχύτατη μείωση των υδρατμών με το ύψος. Στη ξηρά δημιουργούνται από ψύξη του εδάφους κατά τη διάρκεια της νύχτας και το οποίο προκαλεί αναστροφή της θερμοκρασίας.

Κατά τους θερινούς μήνες στην Μεσόγειο θάλασσα παρατηρούνται για ποσοστά χρόνου πολύ μεγαλύτερα από 70%, μετεωρολογικές συνθήκες που οδηγούν σε δραστική μείωση του δείκτη διάθλασης με το ύψος, δηλαδή σε συνθήκες που βοηθούν στο σχηματισμό τροποσφαιρικών κυματοδηγών. Ωστόσο στη πραγματικότητα μόνο οι ακτίνες που σχηματίζουν γωνία με τον ορίζοντα της τάξης της 1° - $1,5^{\circ}$ μπορούν να κυματοδηγηθούν.

Η εν γένει παρουσία τροποσφαιρικών κυματοδηγών προκαλεί διαλείψεις του σήματος λήψης και τις περισσότερες φορές οι υψηλότερες συχνότητες υφίστανται αυτό το τύπο διαλείψεων. Οπότε για να αποφευχθούν όλες αυτές θα πρέπει η ηλεκτρομαγνητική ακτίνα μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης να βρίσκεται όσο το δυνατόν υψηλότερα από το έδαφος και απαραίτητως υπεράνω του ύψους του τροποσφαιρικού

κυματοδηγού ώστε να είναι δυνατόν να σχηματισθεί στην περιοχή που πραγματοποιείται η ζεύξη.

Όταν σχηματίζεται ο τροποσφαιρικός κυματοδηγός, τα αποτελέσματα όσον αφορά το πεδίο λήψης στο δέκτη είναι διαφορετικά με βάση τη θέση των κεραιών εκπομπής και λήψης ως προς το ύψος του κυματοδηγού. Μάλιστα αν και οι δύο κεραιές βρίσκονται υπεράνω του τροποσφαιρικού κυματοδηγού η διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν υφίσταται καμιά μεταβολή. Αν και οι δύο κεραιές βρίσκονται εντός του τροποσφαιρικού κυματοδηγού τότε το πεδίο στην κεραία λήψης είναι ισχυρότερο από εκείνο που θα υπήρχε αν δεν υπήρχε ο κυματοδηγός. Ενώ αν η μία από τις δύο κεραιές βρίσκεται εντός και η άλλη εκτός του κυματοδηγού, το πεδίο στη κεραία λήψης είναι ασθενέστερο του πεδίου που θα υπήρχε χωρίς την παρουσία κυματοδηγού.

3.8 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

3.8.1 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την ατμόσφαιρα

Για κύματα συχνοτήτων μικρότερες των 3GHz, τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας δεν προκαλούν απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Ενώ για συχνότητες μεγαλύτερες των 3 GHz, προκαλείται εξασθένιση των κυμάτων λόγω της απορρόφησης ενέργειας από το οξυγόνο, τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας, καθώς και στην απορρόφηση και σκέδαση (διασκορπισμός της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όταν προσπέσουν σε μικροσκοπικά σωματίδια, έτσι διαχέονται στο χώρο χωρίς να φαίνονται) της ενέργειας από τη βροχή, το χαλάζι ή την ομίχλη είναι σημαντική.

Η εξασθένιση των κυμάτων εξαιτίας της απορρόφησης ενέργειας από το μόρια του οξυγόνου και του υδρατμού αυξάνει εκθετικά με το μήκος της ζεύξης και οπότε εκφράζεται σε dB/km. Η δε εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που οφείλεται στο οξυγόνο και τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας καθορίζεται από τους παράγοντες της συχνότητας, την πίεση των υδρατμών και την θερμοκρασία.

Σε δεδομένη ζεύξη η πίεση των υδρατμών (απόλυτη υγρασία) επηρεάζεται κατά μήκος της ζεύξης και οπότε η απορρόφηση της ενέργειας εκδηλώνει μεταβολές σε σχέση με το χρόνο.

Σε γενικές γραμμές τα φαινόμενα σκέδασης και ανάκλασης των μικροκυμάτων στο στρώμα της τροπόσφαιρας οφείλονται σε ανομοιογένειες της τροπόσφαιρας, που είναι συγκρίσιμες ως προς τα μήκη κύματος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων της περιοχής αυτής των συχνοτήτων. Εξαιτίας της σημαντικής απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε αυτά τα μήκη κύματος, δεν αξιοποιούνται καθόλου στις ραδιοζεύξεις συχνότητες μεγαλύτερες των 10 GHz περίπου για ζεύξεις απόστασης αρκετών δεκάδων km, όπως και αντίστοιχα για συχνότητες μεγαλύτερες των 20 GHz περίπου για ζεύξεις απόστασης της τάξης των 10.

3.8.2 Εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων λόγω απόστασης από τη πηγή

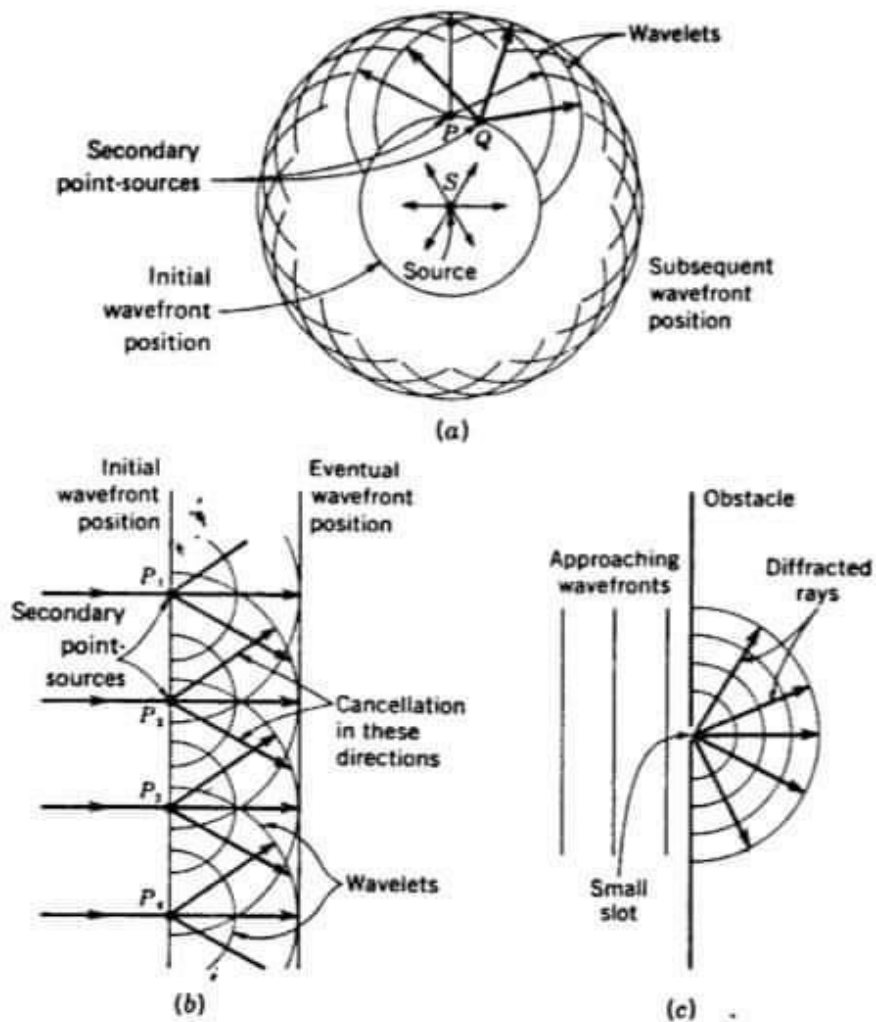
Όπως είπαμε και παραπάνω, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν ομοιόμορφα στον ελεύθερο χώρο. Όμως όσο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα απομακρύνονται από τη πηγή εκπομπής τόσο εξασθενούν. Συγκεκριμένα η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι ανάλογη του τετραγώνου της αποστάσεως που διένυσαν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Έστω P_1 η πυκνότητα της ισχύος, ϵ_1 η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και r_1 η απόσταση του κύματος από τη πηγή. Έστω ότι ισχύει και για P_2 , ϵ_2 και r_2 όπου $r_2 > r_1$. Τότε η εξασθένιση είναι

$$\alpha_P = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{\frac{P_1}{4\pi r_1^2}}{\frac{P_1}{4\pi r_2^2}} = 10 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 = 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

3.9 Περίθαλψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Πρόκειται για μια ιδιότητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων η οποία οφείλεται στην ύπαρξη σχισμών σε αγωγίμο επίπεδο ή στην ύπαρξη εμποδίων. Το εν λόγω φαινόμενο μελετήθηκε αρχικά από τον Huygens (Χύχενς) σύμφωνα με το θεώρημα του οποίου κάθε σημείο του μετώπου ενός σφαιρικού κύματος μπορεί να θεωρηθεί σαν μια πηγή κυμάτων. Αυτό συμβαίνει διότι αν θεωρήσουμε ένα άπειρο επίπεδο κύμα τότε σε όλες τις κατευθύνσεις, εκτός από αυτή του κύματος, τα δευτερεύοντα κύματα εξουδετερώνονται.



3.10 Διάδοση στην Ιονόσφαιρα

Η Ιονόσφαιρα απορροφά μεγάλες ποσότητες ακτινοβολίας από τον ήλιο διότι βρίσκεται στο ανώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας της Γης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την θέρμανση και τον ιονισμό της Ιονόσφαιρας. Έτσι η Ιονόσφαιρα είναι στρωματοποιημένη σε περιοχές με διάφορα επίπεδα ιονισμού. Οι διαφορετικές αυτές περιοχές στρωματοποίησης της ιονόσφαιρας είναι τέσσερις: D, E, F1, F2 με σειρά από κάτω προς τα πάνω. Τα στρώματα D και E είναι παρών μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ τα στρώματα F1 και F2 συνδυάζονται τις νυχτερινές ώρες και αποτελούν ένα ενιαίο στρώμα F.

Για κύματα συχνοτήτων μικρότερων των 30 MHz, όπως και μικρότερες των 100 MHz, το στρώμα της ιονόσφαιρας αποτελεί ένα ακόμη μέσον διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, για ζεύξεις απόστασης πολύ πέραν των κυμάτων εδάφους και των τροποσφαιρικών κυμάτων. Αξίζει να αναφερθεί ότι στο φάσμα των συχνοτήτων που είναι μεγαλύτερες των 30MHz και μικρότερες των 100MHz ο τρόπος διάδοσης διαφέρει από εκείνον με το οποίο διαδίδονται τα κύματα συχνότητας μικρότερης των 30MHz. Κύματα συχνοτήτων 1,6-30 MHz, διαδίδονται αφού προηγουμένως έχουν υποστεί διάθλαση και ανάκλαση στην ιονόσφαιρα.

Παρόλο που τα τελευταία χρόνια οι δορυφορικές ζεύξεις έχουν αντικαταστήσει τις ιονοσφαιρικές τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις, εντούτοις οι τελευταίες χρησιμοποιούνται ακόμη ευρύτατα στο τομέα των τηλεπικοινωνιών μεταξύ σταθερού και κινητού σημείου μεγάλης απόστασης.

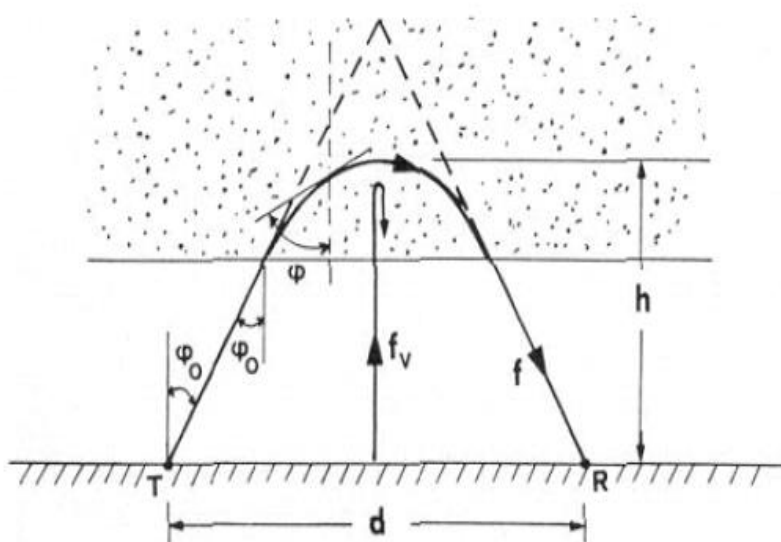
Το στρώμα της ιονόσφαιρας αποτελείται από ιονισμένα στρώματα που βρίσκονται σε ύψη περίπου 80-400 km. Η σχετικά υψηλή πυκνότητα ιόντων και ελευθέρων ηλεκτρονίων παρέχει ένα ενεργό δείκτη διάθλασης μικρότερο της μονάδος με συνέπεια τη διάθλαση και την ανάκλαση των προσπιπτόντων κυμάτων συχνότητας 3-30MHz. Σε ύψη κάτω των 50km ο ιονισμός είναι αμελητέος σε ότι έχει να κάνει με τη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Το στρώμα της ιονόσφαιρας δημιουργείται μέσω του ιονισμού των συστατικών της ανώτερης ατμόσφαιρας από την ηλιακή ακτινοβολία και κατά κύριο λόγο από υπεριώδεις ακτινοβολίες και ακτίνες X.

3.10.1 Διάθλαση στην Ιονόσφαιρα

Από την στιγμή που το ηλεκτρομαγνητικό κύμα "εισβάλλει" σε περιοχές όπου η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη τότε ο δείκτης διάθλασης μειώνεται και αντίστοιχα η γωνία διάθλασης με αποτέλεσμα το κύμα να υφίσταται καμπύλωση (Σχήμα 3). Έτσι με εφαρμογή του νόμου του Snell θα έχουμε:

$$n \sin \phi = n_0 \sin \phi_0 \quad (19)$$

όπου ϕ μετριέται από την κάθετο επί της επιφάνειας του ιονοσφαιρικού στρώματος στο σημείο στο οποίο η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι τέτοια ώστε η τιμή του δείκτη διάθλασης να είναι n . Στην είσοδο της ιονόσφαιρας ο δείκτης διάθλασης είναι $n=n_0$ και λαμβάνεται $n_0=1$, δεδομένου ότι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων λαμβάνεται ίση με το μηδέν.



Σχήμα 3. Διάθλαση κύματος στην ιονόσφαιρα

Το φαινόμενο της καμπύλωσης της ακτίνας παρουσιάζεται όταν έχουμε ανάκλαση δηλαδή όταν $\sin\phi=1$, οπότε η διαδρομή του κύματος είναι παράλληλη προς το ιονοσφαιρικό στρώμα. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση (19) μετατρέπεται στην ακόλουθη:

$$n = \sin \phi_o \quad (20)$$

Σε γενικές γραμμές ο δείκτης διάθλασης στο στρώμα της τροπόσφαιρας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$n = \sqrt{1 - \frac{81N}{f^2}} \quad (21)$$

Όπου παρατηρούμε ότι η πυκνότητα ηλεκτρονίων N δίνεται σε ηλεκτρόνια / cm^3 και η συχνότητα f σε KHz. Από τις σχέσεις (20) και (21) διαπιστώνουμε ότι το υψηλότερο σημείο που μπορεί να φθάσει το κύμα είναι εκείνο όπου η πυκνότητα των ηλεκτρονίων N να επαληθεύει την ακόλουθη σχέση:

$$N = \frac{f^2 \cos^2 \phi_o}{81} \quad (22)$$

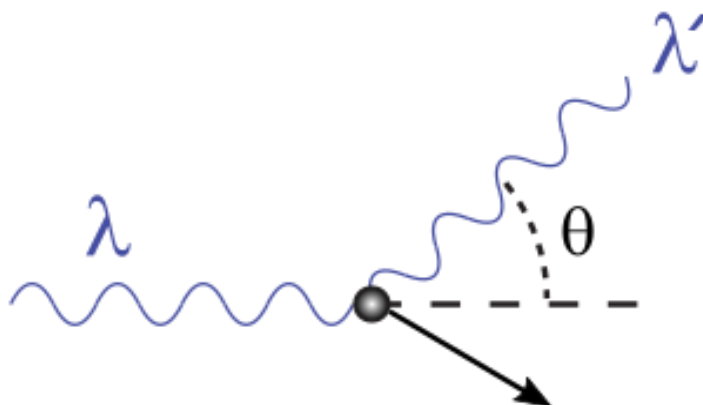
Εφόσον η πυκνότητα των ηλεκτρονίων σε ένα ορισμένο ύψος του στρώματος είναι αρκετά μεγάλη ώστε να ικανοποιείται η παραπάνω εξίσωση, τότε το κύμα θα επιστρέψει στη γη. Εάν όμως η πυκνότητα ηλεκτρονίων είναι μικρότερη από τιμή της σχέσης (22) οπότε το κύμα θα εισχωρήσει πιο βαθιά στο στρώμα.

3.9.2 Σκέδαση στη Ιονόσφαιρα

Από πειραματικές μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι το στρώμα της ιονόσφαιρας προκαλεί σκέδαση στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συχνότητας 40-70 MHz περίπου. Ο όρος ιονοσφαιρική σκέδαση έχει αποδοθεί εξαιτίας των ανομοιογενειών που παρατηρούνται στην πυκνότητα των ηλεκτρονίων λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας και λόγω του ιονισμού που προκαλείται από μετεωρίτες πολύ μικρών διαστάσεων, που υπάρχουν στην ανώτερη ατμόσφαιρα.

Σε γενικές γραμμές το εύρος ζώνης των ραδιοζεύξεων ιονοσφαιρικής σκέδασης είναι γενικά μικρό και είναι της τάξης των δεκάδων KHz. Το μέγιστο εύρος της μεταδιδόμενης ζώνης είναι της τάξης των 30KHz. Οπότε οι ραδιοζεύξεις δίνουν την δυνατότητα μεταβίβασης πληροφορίας που περιέχει μικρό αριθμό τηλεφωνικών διαδεύσεων.

Τέλος τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που σκεδάζονται με αυτό το τρόπο επιστρέφουν στη γη σε αποστάσεις από τον πομπό της τάξης της τάξης των 800-1000 km. Επίσης αποτελεσματικές ζεύξεις επιτυγχάνονται και μέχρι περίπου 2000 km. Η αποδοτικότητα της ζεύξης παραμένει χαμηλή καθώς η απόσβεση μετάδοσης είναι περίπου 100 dB κάτω της τιμής μετάδοσης στον ελεύθερο χώρο. Πράγμα που σημαίνει ότι έχουμε σημαντικά ποσά ακτινοβολίας που αγγίζουν την τάξη των δεκάδων kW και κεραιές με υψηλό κέρδος της τάξης των 20 dB. Μάλιστα με δεδομένο ότι οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες είναι σχετικά χαμηλές, οι κεραιές που χρειάζονται είναι μεγάλων διαστάσεων και συνεπώς υψηλού κόστους.



Παράδειγμα σκέδασης

Βιβλιογραφία

1. http://diktia.weebly.com/uploads/6/4/5/1/6451366/texn_diktywn_epikoin_kef03.pdf
2. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%BF%CE%BC%CF%80%CF%8C%CF%82>
3. <http://users.sch.gr/pepoudi/site/pages/page30.html>
4. http://www.securitymanager.gr/sub_site/arxeio/contents_article/cctv_4_4_2007.php
5. http://2epal-n-smyrn.att.sch.gr/files/texn_site/texn2.htm
6. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%83%CF%8D%CF%81%CE%BCE%CE%B1%CF%84%CE%BF_%CE%B4%CE%AF%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BF#.CE.9C.CE.AD.CE.B8.CE.BF.CE.B4.CE.BF.CE.B9_.CE.BC.CE.B5.CF.84.CE.AC.CE.B4.CE.BF.CF.83.CE.B7.CF
7. Presentation-5-MESA METADOSHS-PowerPoint- Διαφάνιες
8. ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ-ΔΙΑΦΑΝΙΕΣ
9. <http://www.techrepair.gr/ypiresies/wireless-networks.html>