



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ,
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΙΟΣΤΑΘΜΩΝ VHF
ΚΑΙ ΕΠΙΔΕΙΞΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

(MEASUREMENTS OF VHF RADIO-STATIONS AND
OPERATION DEMONSTRATION)

Πτυχιακή Εργασία των:

Ευάγγελου Κασαπίδη Α.Ε.Μ. 4103

Συμεών Κανακάρη Α.Ε.Μ. 4366

Επιβλέπων Καθηγητής: Στ. Τσίτσος

ΣΕΡΡΕΣ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023

Υπεύθυνη δήλωση: Βεβαιώνουμε ότι είμαστε οι συγγραφείς αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια που προσφέρθηκε στην εκπόνησή της αναγνωρίζεται και αναφέρεται στο κείμενο. Επιπρόσθετα, αναφέρονται όλες οι βιβλιογραφικές πηγές από τις οποίες έγινε χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, πρωτογενείς και δευτερογενείς, είτε η συμβολή τους παρατίθεται επακριβώς ως απόσπασμα είτε ως παράφραση. Επιπλέον, βεβαιώνουμε ότι αυτή η πτυχιακή εργασία προετοιμάστηκε από εμάς προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδος.

Οι συγγραφείς της πτυχιακής εργασίας

Ευάγγελος Κασαπίδης

Συμεών Κανακάρης

Υπογραφή

Υπογραφή

Περίληψη

Η πτυχιακή εργασία με θέμα «ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΙΟΣΤΑΘΜΩΝ VHF ΚΑΙ ΕΠΙΔΕΙΞΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ» εξετάζει τις μετρήσεις των ραδιοσταθμών VHF και παρουσιάζει μια λεπτομερή επίδειξη της λειτουργίας τους. Μέσω της ανάλυσης των μετρήσεων, εξετάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα και την απόδοση της επικοινωνίας τόσο στις ραδιοεπικοινωνίες VHF όσο στον ευρύτερο τομέα των ασυρμάτων δικτύων. Παρέχει σαφή κατανόηση των διαφόρων παραγόντων που συμβάλλουν στην αποτελεσματική λειτουργία των ραδιοσταθμών VHF και παρέχει ζωντανά παραδείγματα για την απεικόνιση των εννοιών, εμβαθύνοντας στην τεχνολογία VHF και την επίδειξη αυτής. Παρέχει επίσης λεπτομερή ανάλυση των χαρακτηριστικών των υπόλοιπων ζωνών συχνοτήτων, με σκοπό την κατανόηση των εξειδικευμένων χρήσεων κάθε μίας από αυτές και επιδιώκει την ανάλυση των λειτουργικών και οικονομικών πτυχών που συνδέονται με διαφορετικές συχνότητες.

Εξετάζεται το πλήρες φάσμα της τεχνολογίας VHF, ξεκινώντας από τις βασικές έννοιες, όπως η εισαγωγή στον ηλεκτρομαγνητισμό. Επεξηγούνται οι βασικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία των ασύρματων επικοινωνιών σε αυτήν τη συχνότητα. Πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών (H/M) κυμάτων, των χαρακτηριστικών τους και τις δυνατότητες που προσφέρουν για επικοινωνία. Παρέχεται εκτενής ανάλυση των απωλειών διάδοσης στο πλαίσιο των ραδιοεπικοινωνιών VHF. Μέσω αυτής της ανάλυσης, διερευνώνται οι απώλειες που προκύπτουν κατά τη διάδοση των σημάτων σε αυτή τη ζώνης συχνοτήτων και επεξηγείται η επίδρασή τους στην απόδοση της επικοινωνίας.

Τέλος, πραγματοποιείται μια συγκριτική μελέτη μεταξύ συστημάτων χαμηλότερης συχνότητας λειτουργίας και συστημάτων υψηλότερης συχνότητας λειτουργίας. Αυτή η σύγκριση αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα και τις δυνατότητες της τεχνολογίας VHF σε σχέση με άλλες ζώνες συχνοτήτων. Μέσω αυτής της ανάλυσης, παρέχεται μία συνολική κατανόηση των προκλήσεων και των ευκαιριών που προσφέρει η ζώνη VHF στο πεδίο των ασύρματων επικοινωνιών.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
1. Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες.....	5
1.1 Ασύρματο σύστημα επικοινωνίας	5
1.2 Συχνότητα σημάτων.....	6
1.3 Βασικές ζώνες συχνοτήτων.....	8
1.4 Διαμόρφωση σημάτων.....	12
1.5 Πομποί και δέκτες.....	14
1.6 Κεραίες.....	15
1.7 Πόλωση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	17
1.8 Ένταση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.....	18
1.8.1 Ένταση πεδίου και ισχύς ακτινοβολίας κεραίας.....	18
1.9 Ανάγκες της κοινωνίας για βελτίωση της ποιότητας επικοινωνίας.....	19
2. Ανάλυση κυμάτων επικοινωνίας.....	22
2.1 Εισαγωγή στον ηλεκτρομαγνητισμό.....	22
2.2 Ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας.....	23
2.3 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	24
2.4 Αυτοδονούμενες κεραίες και διάδοση ουράνιων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	25
2.5 Διάδοση βραχέων κυμάτων (HF/SF).....	29
2.5.1 Ανάκλαση βραχέων κυμάτων κατά τη διάρκεια της νύχτας.....	29
2.5.2 Απορρόφηση βραχέων κυμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας.....	30
2.6 Διάδοση μετρικών κυμάτων (VHF).....	30
2.6.1 Ζώνη Fresnel.....	31
2.7 Διάδοση δεκατομετρικών (UHF) και εκατοστομετρικών (SHF) κυμάτων	32
2.8 Διάδοση τηλεοπτικών κυμάτων.....	33
3. Συστήματα μετάδοσης δεδομένων.....	35

3.1	
Εισαγωγή.....	35
3.2	Θεωρητικοί
υπολογισμοί.....	36
3.3 Συγκριτική μελέτη μεταξύ συστημάτων στα 169 MHz και 866 MHz.....	39
3.3.1	Απώλειες
διάδοσης.....	39
3.3.2 Πομποί και δέκτες.....	40
3.3.3 Ρυθμός μετάδοσης, εύρος καναλιού και ευαισθησία.....	41
3.3.4	
Κεραίες.....	42
3.3.5 Κόστος.....	43
4. Συμπεράσματα.....	47

1. Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες

1.1 Ασύρματο σύστημα επικοινωνίας

Αρχικά θα περιγράψουμε τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της ασύρματης τεχνολογίας τηλεπικοινωνιών και πώς χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δικτύων. Η ασύρματη τεχνολογία τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιείται ευρέως για δικτύωση, γιατί είναι οικονομικότερη και πιο ευέλικτη από τα καλώδια δικτύου. Όμως, ενώ τα ασύρματα δίκτυα μπορεί να είναι εξίσου γρήγορα και ισχυρά με τα ενσύρματα δίκτυα, έχουν ορισμένα μειονεκτήματα.

Τα ασύρματα συστήματα τηλεπικοινωνιών (ραδιοζεύξεις) είναι σημαντικά επειδή μπορούν να μεταφέρουν πληροφορία (ήχο, βίντεο, ομιλία, δεδομένα) χωρίς τη χρήση καλωδίων, στο χώρο άνω της επιφάνειας της γης. Χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά (H/M) κύματα που ταξιδεύουν στον αέρα. Αυτά σχηματίζονται όταν δημιουργούνται ηλεκτρικές ταλαντώσεις μέσα από ένα κομμάτι αγώγιμου υλικού (μετάλλου), για παράδειγμα ένα σύρμα ή μια κεραία, οπότε σχηματίζονται H/M κύματα γύρω από αυτό το κομμάτι μετάλλου. Είναι ικανά να διανύσουν κάποια απόσταση ανάλογα με την ισχύ τους.

Ακολούθως αναλύονται τα βασικά στοιχεία που διέπουν ένα ασύρματο ραδιοσύστημα και περιγράφονται στο Σχήμα 1.1.

1. **Πομπός** (transmitter): πρόκειται για μία συσκευή εκπομπής H/M κυμάτων στον ελεύθερο χώρο. Δύναται να λειτουργήσει και ως πομποδέκτης, δηλαδή να ενώσει ή να διαχωρίσει το λαμβανόμενο από το μεταδιδόμενο σήμα, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται η ίδια κεραία για εκπομπή και λήψη.

2. **Γραμμή τροφοδοσίας** (feeder), που συνδέει τον πομπό με την κεραία εκπομπής.

3. **Κεραία εκπομπής** (transmitting antenna): είναι ισχυρά κατευθυντική, σχήματος παραβολικού ή χοάνης, ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή μετάδοση σήματος από σημείο προς σημείο (point to point). Χρησιμοποιείται προκειμένου να μεταβιβαστεί η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στην κεραία λήψης. Για να επιτευχθεί το τελευταίο, απαιτούνται αρκετά υψηλές

συχνότητες και μάλιστα μεγαλύτερες από ένα ελάχιστο όριο (threshold), το οποίο εξαρτάται από τις διαστάσεις των κεραιών.

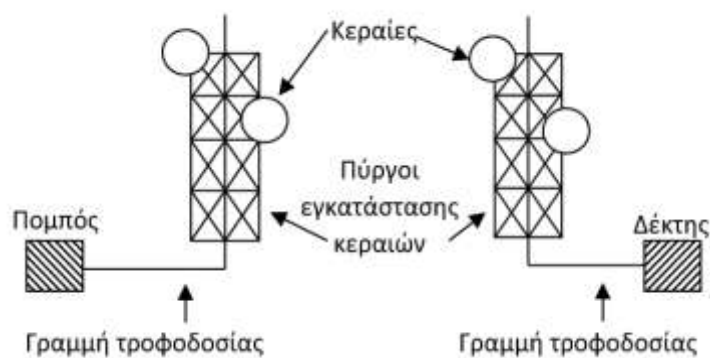
4. **Χώρος διαδόσεως** H/M κυμάτων (path).

5. **Κεραία λήψης** (receiving antenna): λαμβάνει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που προέρχεται από την κεραία εκπομπής.

6. **Γραμμή σύνδεσης** (feeder) της κεραίας λήψης με το δέκτη.

7. **Δέκτης** (receiver): ανακτά την πληροφορία από το φέρον κύμα, μέσω ενός αποδιαμορφωτή (demodulator) τον οποίο διαθέτει.

8. **Πύργοι εγκατάστασης** (towers) των κεραιών: έχουν σημαντικό ρόλο στην επιτυχή διάδοση των ραδιοκυμάτων και γι' αυτό, θα πρέπει να εξασφαλίζεται βέλτιστη οπτική επαφή. Επομένως, τοποθετούνται ανυψωμένοι πάνω από τυχόν εμπόδια που υπάρχουν στη διαδρομή των ραδιοκυμάτων και λαμβάνουν υπόψη τη σφαιρικότητα της γης. Ωστόσο, σε περιοχές που δεν βρίσκονται σε οπτική επαφή, τα H/M κύματα ορισμένης συχνότητας υφίστανται ισχυρή απόσβεση κατά τη διάδοσή τους πέραν ορισμένων αποστάσεων, για αυτό και επιλέγεται η λύση μιας δεύτερης παράλληλης ζεύξης. Τέλος, για την τοποθέτηση ενός πύργου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και ορισμένοι ακόμη παράγοντες, όπως το κόστος κατασκευής και συντήρησης των σταθμών αυτών.



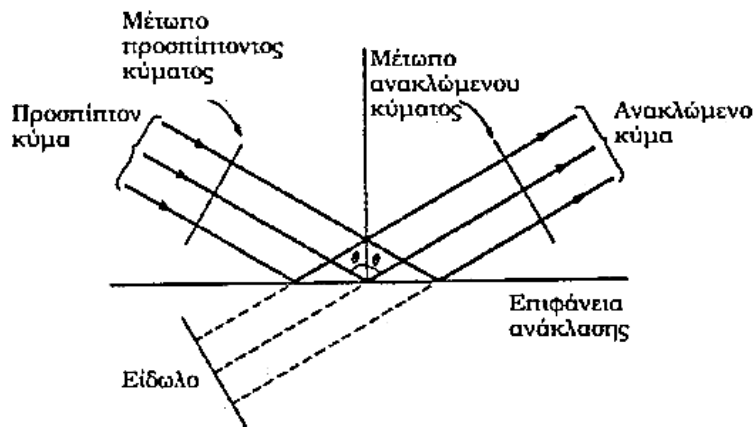
Σχήμα 1.1: Βασικά στοιχεία ενός ασύρματου ραδιοσυστήματος.

1.2 Συχνότητα σημάτων

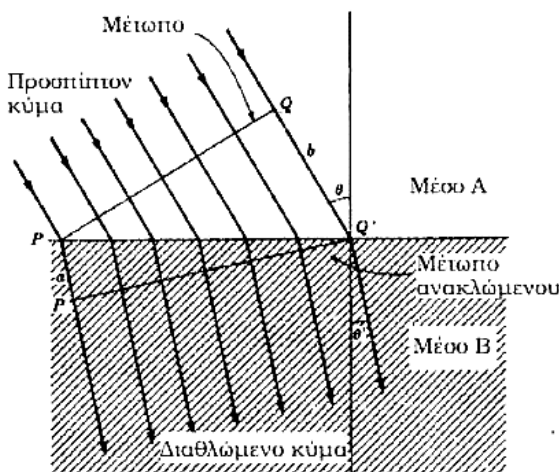
Τα H/M κύματα διαδίδονται με κάποια συχνότητα. Εάν το κύμα μεταβάλλεται αργά, έχει **χαμηλή συχνότητα**, ενώ αν μεταβάλλεται γρήγορα, έχει **υψηλή συχνότητα**. Ένα H/M κύμα που μεταφέρει πληροφορία, μπορεί να καταλαμβάνει ένα στενό ή ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

Η συχνότητα μετριέται σε **Hertz (Hz)**, που δείχνει τον αριθμό των κύκλων του κύματος ανά δευτερόλεπτο. Για παράδειγμα, τα σήματα ραδιοφώνου FM έχουν συχνότητα περίπου 100MHz, δηλαδή 100 εκατομμύρια κύκλους το δευτερόλεπτο. Δεδομένου ότι τα σήματα επικοινωνιών λειτουργούν γενικά σε πολύ υψηλές συχνότητες, χρησιμοποιούμε τις μονάδες Megahertz (MHz = 10^6 Hz) και Gigahertz (GHz = 10^9 Hz). Συνεπώς 1 GHz = 1000 MHz.

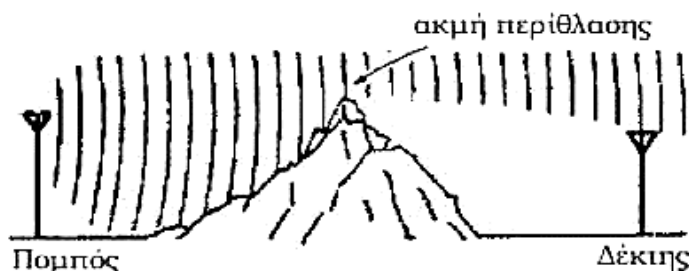
Σε μία ζεύξη, κατά την οποία υπάρχει οπτική επαφή, χρησιμοποιούνται οι υψηλότερες συχνότητες του φάσματος συχνοτήτων. Αντίθετα, για τις χαμηλότερες συχνότητες, μια καλή οπτική επαφή δεν είναι απαραίτητη και αντίστοιχα ο περιορισμός της δεν αποτελεί εμπόδιο, καθώς τα κύματα έχουν την δυνατότητα να εισχωρήσουν, λόγω του φαινομένου της περιθλάσεως (diffraction), στις περιοχές όπου θα βρίσκονταν «υπό σκιά». Το φαινόμενο της περιθλάσεως διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη ραδιοφωνία, διότι ευνοεί τη ραδιοφωνική κάλυψη περιοχών που βρίσκονται υπό τη «σκιά» βουνών, οικημάτων κλπ. Επί της τροχιάς των ραδιοηλεκτρικών ακτίνων επιδρούν και άλλα φαινόμενα, όπως ανάκλαση (reflection), διάθλαση (refraction), διάχυση (diffusion) και απορρόφηση (absorption), που εξαρτώνται από τις χρησιμοποιούμενες συχνότητες (Σχήμα 1.2).



(α) Ανάκλαση.



(β) Διάθλαση.



(γ) Περίθλαση.

Σχήμα 1.2:α) Ανάκλαση, β) Διάθλαση, γ) Περίθλαση.

Το ατμοσφαιρικό υψόμετρο, οι σφαιρικοί και γωνιακοί να κώνες της ατμόσφαιρας, αποτελούν παράγοντες ικανούς να προκαλέσουν εξασθένηση των κυμάτων (attenuation). Η εξασθένηση των ραδιοηλεκτρικών κυμάτων είναι συνάρτηση της χρησιμοποιούμενης συχνότητας, οφείλεται στα συστατικά της ατμόσφαιρας και συγκεκριμένα στην απορρόφηση ενέργειας από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο και τους υδρατμούς, και μπορεί να προκύψει σε συχνότητες μεγαλύτερες των 3 GHz. Ειδικότερα, όσο μεγαλύτερες είναι οι συχνότητες, τόσο μεγαλύτερο είναι και το φαινόμενο της εξασθένησης των Η/Μ κυμάτων. Για συχνότητες άνω των 20 GHz εμφανίζονται φαινόμενα «συντονισμού» και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατό οι αποσβέσεις να είναι τόσο μεγάλες που να προκαλούν διακοπή της ζεύξης. Ακόμη, παράγοντες όπως η βροχή, το χαλάζι, η ομίχλη και η νέφωση μπορούν να προκαλέσουν ισχυρές εξασθενίσεις.

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

1.3 Βασικές ζώνες συχνοτήτων

Οι βασικές ζώνες συχνοτήτων αναφέρονται συνήθως σε διαφορετικά εύρη συχνοτήτων στο φάσμα των Η/Μ κυμάτων. Κάθε ζώνη συχνοτήτων έχει διαφορετικές εφαρμογές και χαρακτηριστικά. Παρακάτω, δίνονται μερικές βασικές ζώνες συχνοτήτων και τα χαρακτηριστικά τους:

1. Ζώνη AM (Amplitude Modulation):

- Εύρος Συχνοτήτων: περίπου 530 έως 1700 kHz.
- Χαρακτηριστικά: Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση ραδιοφωνικών σταθμών, αλλά με χαμηλότερη ποιότητα ήχου σε σύγκριση με την FM.

- Παρατηρήσεις: Η AM χρησιμοποιείται ευρέως για τη μετάδοση ειδήσεων, αθλητικών αναφορών και άλλων φωνητικών εκπομπών.

2. Ζώνη FM (Frequency Modulation):

- Εύρος Συχνοτήτων: περίπου 88 έως 108 MHz.
- Χαρακτηριστικά: Χρησιμοποιείται για την μετάδοση ραδιοφωνικών σταθμών.
- Παρατηρήσεις: Η FM προσφέρει καλή ποιότητα ήχου και είναι κατάλληλη για μουσική και φωνητικές εκπομπές.

3. Ζώνη GSM (Global System for Mobile Communications):

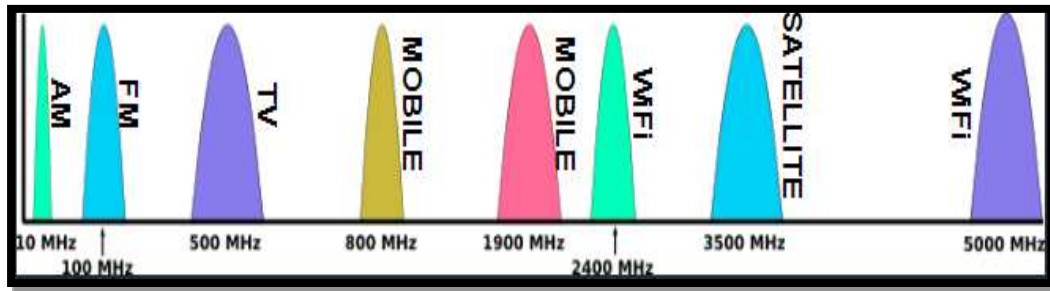
- Εύρος Συχνοτήτων: διαφορετικές ζώνες, συνήθως μεταξύ 900 και 1800 MHz.
- Χαρακτηριστικά: Χρησιμοποιείται για κινητή τηλεφωνία και δεδομένα σε κινητές συσκευές.
- Παρατηρήσεις: Το GSM είναι μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας.

4. Ζώνη Wi-Fi:

- Ζώνες συχνοτήτων: 2.4 GHz και 5 GHz.
- Χαρακτηριστικά: Χρησιμοποιείται για ασύρματη σύνδεση σε δίκτυα internet και για επικοινωνία με ασύρματες συσκευές.
- Παρατηρήσεις: Η τεχνολογία Wi-Fi επιτρέπει την ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο σε σπίτια και επιχειρηματικά περιβάλλοντα.

Κάθε ζώνη συχνοτήτων έχει διάφορες εφαρμογές και χρήσεις σε διάφορους τομείς, όπως τηλεπικοινωνίες, ασύρματες συνδέσεις και ραδιοφωνία.

Παρακάτω δίνονται το εύρος και τα κανάλια συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται συνήθως στις τηλεπικοινωνίες. Οι πομποί εκπομπής για AM, FM και τηλεόραση χρησιμοποιούν συχνότητες κάτω των 1000 MHz. Το Wi-Fi χρησιμοποιεί δύο ζώνες σε υψηλότερες συχνότητες (2,4GHz και 5 GHz). Η κινητή τηλεφωνία χρησιμοποιεί διάφορες ζώνες συχνοτήτων, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Ζώνες συχνοτήτων στις τηλεπικοινωνίες (<http://www.commotionwireless.net>)

Έχουν αναπτυχθεί δύο πρότυπα χαρακτηρισμού των ζωνών συχνοτήτων, τα οποία προέρχονται από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union, ITU) και το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE).

Οι ζώνες συχνοτήτων που καθορίζονται από την ITU και το IEEE καλύπτουν διάφορους τομείς της τεχνολογίας των επικοινωνιών. Παρακάτω, παρουσιάζονται κάποιες από αυτές τις ζώνες.

Ζώνες Συχνοτήτων ITU (Διαιρέσεις του Φάσματος):

1. Ζώνες Ραδιοεπικοινωνιών (ITU-R):

- Κοντινής Εμβέλειας (VHF/UHF): χρησιμοποιούνται για ασύρματες επικοινωνίες, όπως τηλεόραση, ραδιοφωνία, κινητή τηλεφωνία και ραντάρ.
- Μακρινής Εμβέλειας (HF): χρησιμοποιείται για μακρινές ασύρματες επικοινωνίες, όπως ο ραδιοερασιτεχνισμός και η ασύρματη επικοινωνία μακρινής εμβέλειας.

2. Ζώνες Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ITU-T):

- Ζώνες DSL: χρησιμοποιούνται για υψηλής ταχύτητας ευρυζωνικές συνδέσεις στο internet μέσω των τηλεφωνικών γραμμών.
- Ζώνες Οπτικών Επικοινωνιών: χρησιμοποιούνται για μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας μέσω οπτικών ινών.

3. Ζώνες Ανάπτυξης (ITU-D):

- Αναπτυξιακές Ζώνες: προορίζονται για τηλεπικοινωνίες σε αναπτυσσόμενες περιοχές.

Ακολούθως (Πίνακας 1.1), δίνονται οι περιοχές συχνοτήτων και οι αντίστοιχες ονομασίες κατά ΙΤΥ, για χρήση κυρίως στις ασύρματες επικοινωνίες. Διαφορετικές κατανομές ζωνών συχνοτήτων και ονομασίες, όπως για παράδειγμα σε συστήματα ραντάρ, χρησιμοποιούνται από άλλα πρότυπα.

Πίνακας 1.1: Ζώνες συχνοτήτων κατά ΙΤΥ.

Ονομασία	Αρχικά (ΙΤΥ)	Συχνότητα	Μήκος κύματος	Εφαρμογές
εξαιρετικά χαμηλή συχνότητα	ELF (extremely low frequency)	3-30 Hz	10.000-100.000 km	αντιληπτό ως ήχος αν μετατραπεί σε μηχανική ταλάντωση, τηλεπικοινωνίες υποβρυχίων
υπερχαμηλή συχνότητα	SLF (super low frequency)	30-300 Hz	1.000-10.000 km	αντιληπτό ως ήχος αν μετατραπεί σε μηχανική ταλάντωση, ηλεκτρικά δίκτυα διανομής (50-60 Hz)
κατ'εξοχήν χαμηλή συχνότητα	ULF (ultra low frequency)	300-3000 Hz	100-1.000 km	αντιληπτό ως ήχος αν μετατραπεί σε μηχανική ταλάντωση, τηλεπικοινωνίες στα ορυχεία
πολύ χαμηλή συχνότητα (υπερμακρά κύματα)	VLF (very low frequency)	3-30 kHz	10-100 km	αντιληπτό ως ήχος αν μετατραπεί σε μηχανική ταλάντωση (έως 20 kHz; υπέρηχος για μεγαλύτερες συχνότητες)
χαμηλή συχνότητα (μακρά κύματα)	LF (low frequency)	30-300 kHz	1-10 km	ραδιοφωνικές μεταδόσεις AM, ραδιοφάροι (NDB), ερασιτεχνικά walkie-talkie (μόνο ΗΠΑ)
μέση συχνότητα (μεσαία κύματα)	MF (medium frequency)	300-3000 kHz	100-1000 m	ραδιοσυστήματα πλοήγησης (NDB), ραδιοφωνικές μεταδόσεις AM, τηλεπικοινωνίες σε ναυτιλία και αεροναυτιλία
υψηλή συχνότητα (βραχεία κύματα)	HF (high frequency)	3-30 MHz	10-100 m	βραχεία (ραδιόφωνο), ερασιτεχνικές ραδιοεκπομπές, walkie-talkie
πολύ υψηλή συχνότητα (υπερβραχεία κύματα)	VHF (very high frequency)	30-300 MHz	1-10 m	ραδιοφωνικές μεταδόσεις FM, τηλεοπτικές εκπομπές, αεροναυτιλία, GPR
κατ'εξοχήν υψηλή συχνότητα	UHF (ultra high frequency)	300-3000 MHz	10-100 cm	τηλεοπτικές εκπομπές, κινητή τηλεφωνία, ασύρματα τηλέφωνα, ασύρματα δίκτυα Η/Υ, αυτόματες κλαδοαριές αυτοκινήτων, φούρνοι μικροκυμάτων, GPR
υπερυψηλή συχνότητα	SHF (super high frequency)	3-30 GHz	1-10 cm	ασύρματα δίκτυα, δορυφορικές συνδέσεις, δορυφορική τηλεόραση, πόρτες γκαράζ
εξαιρετικά υψηλή συχνότητα	EHF (extremely high frequency)	30-300 GHz	1-10 mm	ραδιοτηλεσκόπιο, τηλεπισκόπηση (remote sensing), οπτικά συστήματα, ανιχνευτές/συστήματα ασφαλείας

Ζώνες Συχνοτήτων IEEE:

1. Ασύρματες Επικοινωνίες:

- Wi-Fi: 2,4 GHz και 5 GHz, για ασύρματο Internet και δικτύωση σε κοντινή εμβέλεια.

- Bluetooth: 2,4 GHz, για ασύρματη συνδεσιμότητα μικρής εμβέλειας.
- ZigBee: 2,4 GHz, για βιομηχανικές και έξυπνες εφαρμογές.

2. Κινητή Τηλεφωνία:

- 2G, 3G, 4G, 5G: Χρησιμοποιούνται διάφορες ζώνες συχνοτήτων, προσφέροντας διαφορετικές ταχύτητες και χαρακτηριστικά.

3. Κινητή Τηλεφωνία, Ρομποτική και IoT:

- LoRa: 169 MHz, 433 MHz (Ασία), 868 MHz (Ευρώπη) and 915 MHz (B. Αμερική). Χρησιμοποιείται για επικοινωνία χαμηλής ισχύος σε μακρινές αποστάσεις για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT).
- NB-IoT: Χρησιμοποιεί διάφορες ζώνες συχνοτήτων (από 800 MHz μέχρι 2200MHz για συσκευές IoT που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας).

Ο χαρακτηρισμός ζωνών συχνοτήτων σύμφωνα με τα πρότυπα του IEEE έχει τη βάση του σε στρατιωτικούς κωδικούς του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, οι οποίοι κατόπιν καθιερώθηκαν (Πίνακας 1.2).

Πίνακας 1.2: Ζώνες συχνοτήτων κατά IEEE Std 521-2002 Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands. Reaffirmed standard of 1984.

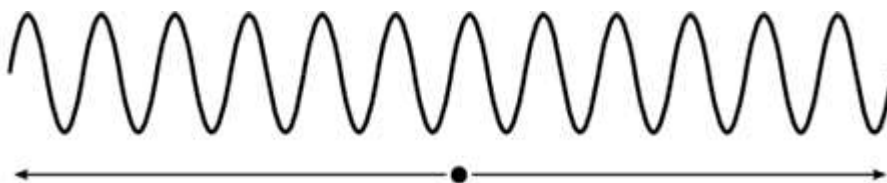
Ζώνη	Περιοχή συχνοτήτων	Προέλευση ονομασίας
HF band	3 - 30 MHz	High Frequency
VHF band	30-300 MHz	Very High Frequency
UHF band	300-1000 MHz	Ultra High Frequency
L band	1 - 2 GHz	Long wave
S band	2 - 4 GHz	Short wave
C band	4 - 8 GHz	Compromise (συμβιβασμός) ανάμεσα στο S και το X
X band	8 - 12 GHz	Χρησιμοποιήθηκε κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο για συστήματα ελέγχου πυρός, το X θυμίζει το σταυρόνημα σκόπευσης.
K_u band	12-18 GHz	Kurz-under
K band	18 - 27 GHz	Kurz (βραχύς, στα Γερμανικά)
K_a band	27-40 GHz	Kurz-above
V band	40 - 75 GHz	
W band	75 - 110 GHz	Το W ακολουθεί το V στο αγγλικό αλφάβητο
mm band	110 - 300 GHz	(χιλιοστομετρικά κύματα)

Κάθε οργανισμός εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς και τεχνολογίες, έχοντας ως στόχο τη βελτίωση και την προώθηση των σχετικών τεχνολογικών τομέων.

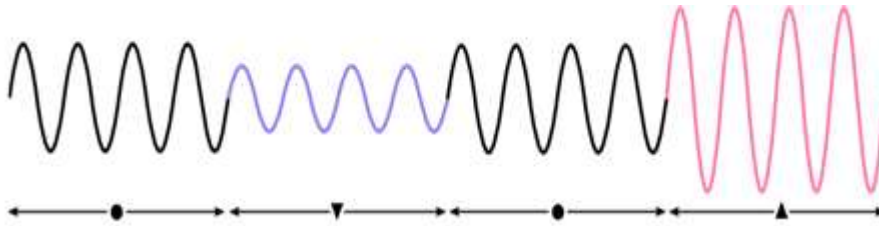
1.4 Διαμόρφωση σημάτων

Εκτός από τις διαφορετικές συχνότητες, τα Η/Μ κύματα διαφέρουν και στον τρόπο με τον οποίο μεταφέρουν πληροφορίες. Ένα Η/Μ κύμα(Σχήμα 1.4) θα πρέπει να διαμορφωθεί (να αλλάξει μορφή), για την αποστολή πληροφοριών. Υπάρχουν πολλοί τύποι και διαφορετικές τεχνολογίες διαμόρφωσης για την αποστολή και λήψη πληροφοριών.

Στο Σχήμα 1.5, βλέπουμε τη διαμόρφωση κατά πλάτος (AM: AmplitudeModulation), όπου μεταβάλλεται το πλάτος του κύματος μίας συγκεκριμένης συχνότητας.

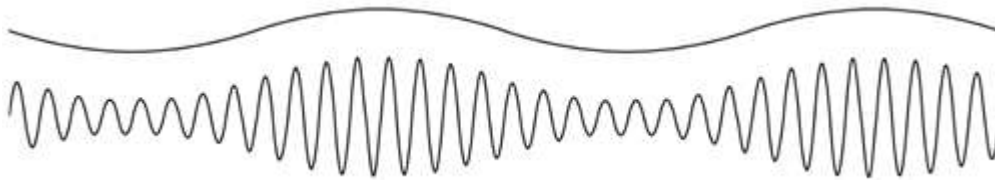


Σχήμα 1.4:Μη-διαμορφωμένο Η/Μ κύμα.



Σχήμα 1.5:Διαμόρφωση ΑΜ.

Στο Σχήμα 1.6 βλέπουμε μία πιο λεπτομερή περιγραφή της διαμόρφωσης ΑΜ.



Σχήμα 1.6:Διαμόρφωση Η/Μ κατά ΑΜ (λεπτομερής).

Οι τύποι διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες μπορεί να είναι πολύ διαφορετικοί και συχνά δεν είναι συμβατοί μεταξύ τους. Ένα δορυφορικό σύστημα δεν μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με φορητό υπολογιστή ή με smartphone, το οποίο χρησιμοποιεί Wi-Fi, για την αποστολή και λήψη πληροφοριών. Αυτό συμβαίνει επειδή οι πομποδέκτες σε διαφορετικές συσκευές λειτουργούν μόνο σε ορισμένους τύπους διαμόρφωσης και σε συγκεκριμένες συχνότητες.

Για παράδειγμα, ορισμένοι ραδιοφωνικοί πομποδέκτες διαθέτουν διακόπτη για επιλογή μεταξύ σημάτων ΑΜ και FM επειδή χρησιμοποιούν: 1) διαφορετικές συχνότητες για μετάδοση και 2) διαφορετικούς τύπους διαμόρφωσης. Εάν προσπαθήσουμε να ακούσουμε ένα σήμα ΑΜ σε ένα ραδιόφωνο που χρησιμοποιεί διαμόρφωση FM, δεν θα είναι δυνατό. Ισχύει και το αντίθετο, δηλαδή στη λειτουργία ΑΜ, ένα σήμα FM δεν μπορεί να γίνει αντιληπτό. Συνεπώς, οι πομποί και οι δέκτες θα πρέπει να χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες και τύπους διαμόρφωσης για να επιτευχθεί η επικοινωνία.

Στον

Πίνακας 1.3:Τύποι διαμόρφωσης και συχνότητες σε διάφορα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

1.3 βλέπουμε τις διάφορες συχνότητες και τους τύπους διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται σε διάφορα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Αυτό σημαίνει ότι οι περισσότερες συσκευές μπορούν να αντιληφθούν μόνο ένα πολύ συγκεκριμένο είδος σήματος.

Πίνακας 1.3: Τύποι διαμόρφωσης και συχνότητες σε διάφορα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ		ΚΙΝΗΤΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ				
ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ	ΨΗΦΙΑΚΗ	ΟΜΙΛΙΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ/ ΨΗΦΙΑΚΗ	ΔΕΔΟΜΕΝΑ 3G/4G/LTE ΨΗΦΙΑΚΗ	BLUETOOTH ΨΗΦΙΑΚΗ	WALKIE TALKIE ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ/ ΨΗΦΙΑΚΗ	
50 MHz– 800 MHz	200 MHz– 800 MHz	800 MHz– 900 MHz	1700 MHz– 1900 MHz	2400 MHz	AM/FM	ΑΛΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ			ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ Wi-Fi		ΡΑΔΙΟΦΩΝΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ	
ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΤΥΠΟΙ ΣΗΜΑΤΩΝ	ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ	Wi-Fi	BLUETOOTH	AM	FM
ΟΜΙΛΙΑ/ ΗΧΟΣ/ ΒΙΝΤΕΟ/ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ/ ΨΗΦΙΑΚΗ	3400 MHz, 5900 MHz, 10,7 GHz, 14,5 GHz, 23 GHz	ΨΗΦΙΑΚΗ 2400 MHz & 5000 MHz	ΨΗΦΙΑΚΗ 2400MHz	0,6 MHz– 1,6 MHz	88 MHz– 108 MHz

1.5 Πομποί και δέκτες

Ο ασύρματος πομπός είναι μία συσκευή που εκπέμπει σήματα στον ελεύθερο χώρο. Μία άλλη συσκευή που λαμβάνει αυτά τα σήματα και κατανοεί τις πληροφορίες ονομάζεται δέκτης. Στην περίπτωση του ραδιοφώνου FM, υπάρχει ένας πομπός (που ανήκει και λειτουργεί στον ραδιοφωνικό σταθμό) και πολλοί δέκτες με τους οποίους οι άνθρωποι ακούν τον σταθμό. Όταν μία συσκευή διαθέτει πομπό και δέκτη ονομάζεται πομποδέκτης. Οι πομποδέκτες μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν ταυτόχρονα, κάτι που τους καθιστά χρήσιμους στη δημιουργία δικτύων.

Οι πομποί, οι δέκτες και οι πομποδέκτες αποτελούν βασικά στοιχεία σε μια ευρεία γκάμα τεχνολογιών επικοινωνίας και ασύρματης μετάδοσης πληροφοριών.

Πομποί:

Εκπομπή Σήματος: Οι πομποί λειτουργούν μετατρέποντας την αρχική πληροφορία σε ένα ηλεκτρονικό σήμα. Η πληροφορία μπορεί να είναι φωνή, δεδομένα, βίντεο, ή οτιδήποτε άλλο πρέπει να μεταδοθεί.

Διαμόρφωση: Οι πομποί συνήθως χρησιμοποιούν τεχνικές διαμόρφωσης για να ενσωματώσουν την πληροφορία στο φέρον σήμα. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω διαφορετικών τεχνικών, όπως η αναλογική ή η ψηφιακή διαμόρφωση.

Ισχύς Εξόδου: Οι πομποί μπορούν να ρυθμίζουν την ισχύ εξόδου τους για να επιτύχουν την εμβέλεια και την ποιότητα του σήματος που μεταδίδεται.

Δέκτες:

Λήψη Σήματος: Οι δέκτες εκτελούν την αντίθετη διαδικασία από εκείνη των πομπών. Λαμβάνουν το μεταδιδόμενο σήμα από τον πομπό μέσω της κεραίας.

Αποδιαμόρφωση: Οι δέκτες λαμβάνουν το σήμα και το αποκωδικοποιούν για να ανακτήσουν την αρχική πληροφορία. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την απομάκρυνση της παρεμβολής και τον εντοπισμό του αρχικού σήματος.

Φιλτράρισμα: Οι δέκτες συνήθως χρησιμοποιούν φίλτρα για να επιλέξουν την επιθυμητή ζώνη συχνοτήτων και να απορρίπτουν παρεμβολές από άλλες ζώνες συχνοτήτων.

Πομποδέκτες:

Διπλή Κατεύθυνση: Οι πομποδέκτες είναι συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν ως πομποί και δέκτες ταυτόχρονα. Αυτό επιτρέπει την διπλή κατεύθυνση επικοινωνίας, όπως στα κινητά τηλέφωνα.

Ευελιξία: Οι πομποδέκτες μπορούν να προσαρμοστούν σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων και πρότυπα επικοινωνίας, προσφέροντας ευελιξία στις συσκευές.

Συνολικά, οι πομποί, οι δέκτες και οι πομποδέκτες είναι ζωτικά στοιχεία για την αποτελεσματική και αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ συσκευών, διευκολύνοντας τη ροή των πληροφοριών σε διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές.

1.6 Κεραίες

Οι ασύρματοι πομποδέκτες χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους κεραιών. Μερικοί πομποδέκτες έχουν ενσωματωμένες κεραίες, ενώ σε άλλους, επιλέγεται η κεραία που μπορεί να συνδεθεί σε αυτούς. Υπάρχουν πολλοί τύποι κεραιών. Κυρίως, όμως, τρεις βασικοί τύποι χρησιμοποιούνται τις περισσότερες φορές και είναι χρήσιμοι στην υλοποίηση ενός ασύρματου δικτύου. Ο πρώτος τύπος κεραίας, που είναι και ο πιο συνηθισμένος, είναι η πανκατευθυντική κεραία.

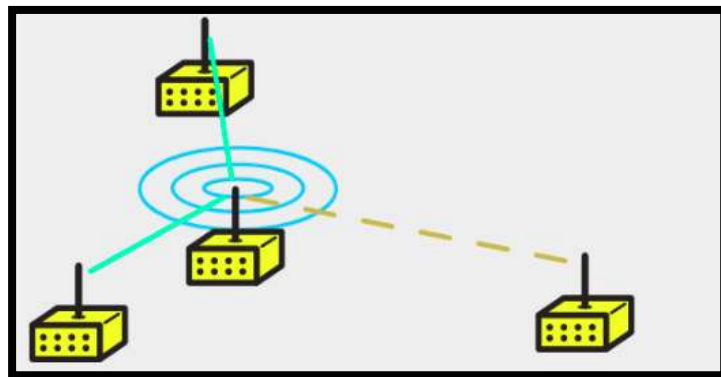
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ VHF ΡΑΔΙΟΣΤΑΘΜΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΔΕΙΞΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Μια πανκατευθυντική κεραία (Σχήμα 1.7) στέλνει ένα σήμα εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω της.

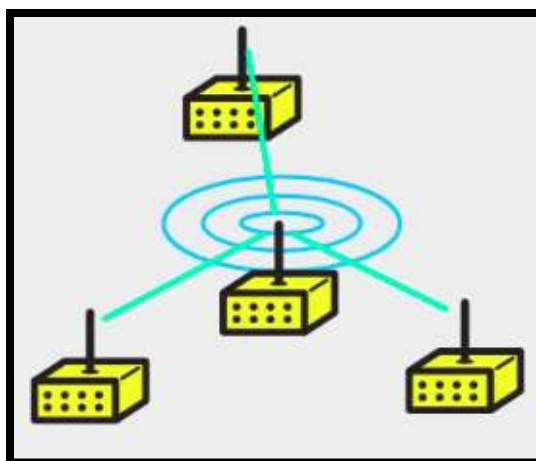


Σχήμα 1.7: Πανκατευθυντική κεραία.

Η χρήση πανκατευθυντικών κεραιών έχει το πλεονέκτημα της δημιουργίας ασύρματων συνδέσεων προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, δημιουργώντας έτσι ένα ασύρματο δίκτυο (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.8: 3 κόμβοι εκ των οποίων ο ένας δεν έχει αξιόπιστη σύνδεση με τον πομπό.



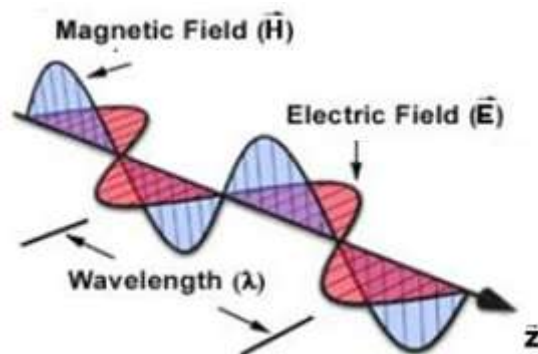
Σχήμα 1.9: Πανκατευθυντική κεραία που συνδέει 3 κόμβους.

Δεδομένου ότι το σήμα διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις και εξασθενεί πολύ γρήγορα με την απόσταση, εάν οι κόμβοι ή οι πελάτες είναι μακριά, ενδέχεται να μην έχουν καλή ζεύξη(Σχήμα 1.8).

1.7 Πόλωση Η/Μ κυμάτων

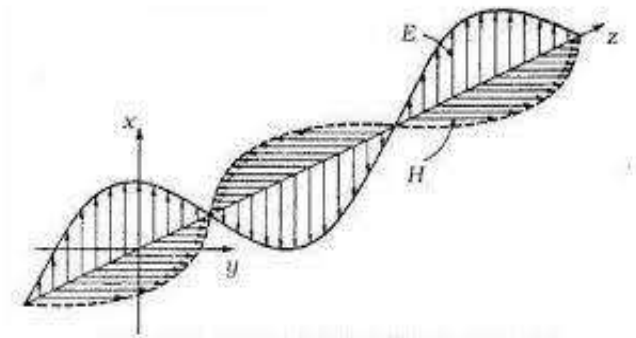
Τα ακτινοβολούμενα από τον πομπό Η/Μ κύματα αποτελούνται από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Τα πεδία απεικονίζονται με τις δυναμικές γραμμές. Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου είναι σχεδόν παράλληλες με τον άξονα της κεραίας. Αντιθέτως, οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου σχηματίζουν κυκλικά επίπεδα κάθετα προς τον άξονα της κεραίας.

Η ονομασία της πόλωσης των κυμάτων καθορίζεται από την κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών **μόνο του ηλεκτρικού πεδίου** και όχι του μαγνητικού. Αν η κεραία είναι οριζόντια και οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού της πεδίου είναι οριζόντιες, η πόλωση των κυμάτων ονομάζεται **οριζόντια** (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10:Οριζόντια πόλωση κυμάτων.

Αν η κεραία είναι κατακόρυφη και οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού της πεδίου είναι κατακόρυφες, η πόλωση των Η/Μ κυμάτων ονομάζεται **κατακόρυφη** (Σχήμα 1.11).



Σχήμα 1.11:Κατακόρυφη πόλωση κυμάτων.

1.8 Ένταση Η/Μ πεδίου

Το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μία μεταβολή στην τάση, η οποία εκφράζεται σε Volt, milliVolt ή microVolt, κατά μήκος των δυναμικών γραμμών.

Αυτή η μεταβολή της τάσης ανά μονάδα μήκους ονομάζεται «ένταση πεδίου». Η ένταση του πεδίου μας δείχνει την επίδραση ενός πομπού στη θέση λήψης (δέκτης). Η ένταση πεδίου είναι ένα χρήσιμο μέγεθος στην ραδιοφωνική και τηλεοπτική μετάδοση.

Σε μια θέση που σαρώνεται π.χ. από ένα κατακόρυφα πολωμένο κύμα, μεταξύ δύο σημείων, παρουσιάζεται μία τάση προκαλούμενη από τα Η/Μ κύματα. Η τιμή αυτής της τάσης σε ένα ομοιόμορφο πεδίο είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά ύψους μεταξύ των δύο σημείων. Αν π.χ. η ένταση του πεδίου είναι 14μV/m και η διαφορά ύψους των δύο σημείων είναι 8 m, τότε η τάση μεταξύ των δύο σημείων είναι: **8 · 14 = 112 μV.**

1.8.1 Ένταση πεδίου και ισχύς ακτινοβολίας κεραίας

Σύμφωνα με τη θεωρία, υπάρχει μία σχέση μεταξύ της ισχύος ακτινοβολίας της κεραίας εκπομπής και της έντασης F του Η/Μ πεδίου στο χώρο, σε ορισμένη απόσταση από τον πομπό. Η σχέση αυτή εξαρτάται φυσικά και από τον τύπο της κεραίας εκπομπής. Αν αυτή είναι ένα δίπολο $\lambda/2$, όπως π.χ. η κεραία της τηλεόρασης, η σχέση δίνεται από τον τύπο:

$$F = \frac{7\sqrt{P}}{l} \quad (1.1)$$

Όπου:

- P = η ισχύς ακτινοβολίας της κεραίας σε Watt
- l = η απόσταση σε m
- F = η ένταση του πεδίου σε V/m

Όπως βλέπουμε, το πεδίο σε ένα καθορισμένο σημείο A, είναι ανάλογο με την τετραγωνική ρίζα της ισχύος ακτινοβολίας της κεραίας εκπομπής και αντιστρόφως ανάλογο με την απόσταση του σημείου A από την κεραία. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η εξίσωση (1.1) ισχύει μόνο όταν το πεδίο διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο, όταν δηλαδή δεν υπάρχουν φαινόμενα απορρόφησης και ανάκλασης του Η/Μ κύματος.

Αν η ισχύς ακτινοβολίας P της κεραίας ενός πομπού είναι 25 kW, η ένταση F του πεδίου σε απόσταση l = 50 km από την κεραία είναι:

$$F = \frac{7\sqrt{25000}}{50000} = \frac{7 \cdot 5 \cdot 10 \cdot 3,16}{50000} = 0,022 \text{ V/mή } 22\text{mV/m}$$

Αν η κεραία εκπομπής βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της γης, ο μηχανισμός διάδοσης του Η/Μ πεδίου εξαρτάται πολύ από τη συχνότητά του. Αν το πεδίο μεταβάλλεται με τη συχνότητα των μακρών και μεσαίων κυμάτων, το πεδίο διαδίδεται κατά μήκος της γήινης επιφάνειας (**κύμα εδάφους/επιφάνειας**).

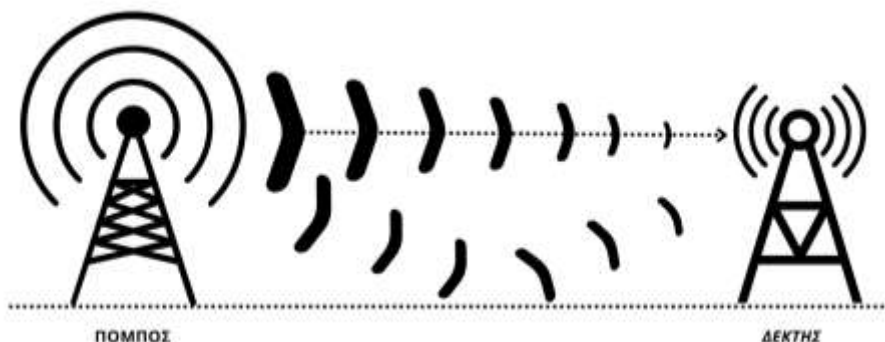
Στις συχνότητες των βραχέων κυμάτων, η διάδοση του Η/Μ πεδίου γίνεται κυρίως με την ανάκλασή του στην ιονόσφαιρα (**κύματα χώρου**).

Στις πολύ υψηλές συχνότητες, όπως οι χρησιμοποιούμενες στη ραδιοφωνία FM και στην τηλεόραση, η διάδοση γίνεται σε ευθεία γραμμή (**κατευθείαν κύμα**).

Στη θέση της κεραίας λήψης (δέκτης), το Η/Μ πεδίο σε αυτές τις συχνότητες, αποτελείται γενικώς από δύο συνιστώσες:

- Το **κατευθείαν κύμα**, το οποίο διαδίδεται κατά μήκος της νοητής ευθείας γραμμής μεταξύ κεραίας εκπομπής και κεραίας λήψης.
- Το **ανακλώμενο κύμα** από την επιφάνεια της γης κύμα.

Όπως φαίνεται στο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**¹², το κατευθείαν κύμα διανύει μικρότερη απόσταση από το ανακλώμενο, συνεπώς φθάνει νωρίτερα στη κεραία λήψης από το ανακλώμενο κύμα. Αυτό δημιουργεί διαφορά φάσης μεταξύ των δύο κυμάτων και επίσης η ένταση του κατευθείαν κύματος είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη του ανακλώμενου κύματος.



Σχήμα 1.12: Κατευθείαν και ανακλώμενο κύμα.

1.9 Ανάγκες της κοινωνίας για βελτίωση της ποιότητας επικοινωνίας

Η αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία είναι υψίστης σημασίας για πολλές σημαντικές πολιτικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Σε σενάρια όπου το περιβάλλον διάδοσης είναι «δύσκολο», όπως σε πολύπλοκα εδάφη, αστικά φαράγγια και εσωτερικούς χώρους, η επίτευξη αξιόπιστης επικοινωνίας που δεν παρεμποδίζεται σημαντικά από την παρουσία εμποδίων και σκεδαστών είναι εξαιρετικά δύσκολη. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της ταχείας παγκόσμιας αστικοποίησης, υπάρχει διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για αξιόπιστες επικοινωνίες, για επείγουσες και τακτικές εφαρμογές σε απαιτητικά περιβάλλοντα. Απαιτούνται δίκτυα (τα οποία ενσωματώνουν επικοινωνίες και ανίχνευση) για την υποστήριξη ανθρώπων και αυτόνομων μηχανών, σε πραγματικό χρόνο τοποθέτησης και παρακολούθησης.

Τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών που λειτουργούν στην ανώτερη υπερβραχέαζώνη συχνοτήτων (VHF) μέσω μικροκυμάτων υφίστανται μεγάλης και μικρής κλίμακας εξασθένηση, καθώς και παραμόρφωση φάσης λόγω πολλαπλών διαδρομών διάδοσης του H/M κύματος. Σε ένα περίπλοκο περιβάλλον, σε αυτές τις συχνότητες και χωρίς οπτική επαφή, η διάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός διάδοσης μεταξύ πομπού και δέκτη, ενώ το κατευθείαν κύμα είναι συχνά εξαιρετικά αδύναμο εξαιτίας των μεγάλων απωλειών που υφίσταται κατά τη διείσδυσή του σε κτίρια. Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει γίνει σημαντική προσπάθεια στο σχεδιασμό εξελιγμένων τεχνικών μείωσης των πολλαπλών διαδρομών, χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση καναλιών και διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης, ώστε να ξεπεραστούν οι δυσκολίες. Οι τεχνικές αυτές αυξάνουν σημαντικά την πολυπλοκότητα του υλικού και του λογισμικού ενός πομποδέκτη και μπορεί να παρέχουν μόνο οριακή απόδοση σε δύσκολα σενάρια, π.χ., δικτύωση με πολλά hops ή πολύ υψηλή ισχύ μετάδοσης.

Η χαμηλότερη ζώνη VHF δεν απαιτεί σημαντική πολυπλοκότητα, χρησιμοποιεί χαμηλή ισχύ και μπορεί να παρέχει εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες. Αυτό πηγάζει πρωτίστως από το γεγονός ότι στη κατώτερη ζώνη VHF, οι σκεδαστές είναι μικροί ως προς το μήκος κύματος. Κατά συνέπεια, η διείσδυση του H/M κύματος μέσα από πολλούς τοίχους και κτίρια μπορεί να επιτευχθεί με σχετικά χαμηλή ισχύ. Ως εκ τούτου, τα φαινόμενα ανάκλασης, σκέδασης και περίθλασης μειώνονται δραστικά, ελαχιστοποιώντας σημαντικά την εξασθένηση λόγω πολλαπλών διαδρομών, δημιουργώντας ένα κανάλι μικρής εμβέλειας (που μοιάζει με κανάλι οπτικής επαφής) με πολύ μικρή παραμόρφωση φάσης και καθυστέρηση διάδοσης. Αυτό απελευθερώνει ένα σύστημα χαμηλών συχνοτήτων VHF από τις τυπικά αυστηρές απαιτήσεις

ισχύος, εύρους ζώνης συστήματος και σύνθετης επεξεργασίας ισοστάθμισης, που απαιτούνται σε συστήματα υπερ-υψηλών συχνοτήτων (UHF) και μικροκυμάτων.

Φυσικά, οι συμβατικές κεραιές, όπως τα δίπολα που λειτουργούν στην κατώτερη ζώνη VHF, είναι πολύ μεγάλες και περιορίζουν την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων μόνο σε σταθερά σημεία ή σε μεγάλες πλατφόρμες. Στην περίπτωση κινητών κόμβων με μικρότερες κεραιές, η ισχύς μετάδοσής τους πρέπει να είναι αρκετά υψηλή για να αντισταθμίσουν την κακή απόδοση των κεραιών. Μέχρι σήμερα, το μεγάλο μέγεθος των συμβατικών κεραιών ήταν ένα σημαντικό εμπόδιο όσον αφορά την ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας της ζώνης VHF σε σενάρια κινητής τηλεφωνίας, σε εξαιρετικά δύσκολα περιβάλλοντα. Ωστόσο, λόγω των πρόσφατων προόδων στις τεχνικές σμίκρυνσης κεραιών, η ανάπτυξη κεραιών VHF μικρότερου μεγέθους (παλάμης) με καλή απόδοση και με χαμηλή ισχύ, έχει αυξηθεί η μετάδοση χαμηλού ρυθμού δεδομένων σε αυτήν τη ζώνη. Συνεπώς, είναι ανάγκη να κατανοηθούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά του καναλιού σε αυτή τη ζώνη, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερος σχεδιασμός συστημάτων που λειτουργούν στην κατώτερη ζώνη VHF.

Σε σύνθετα σενάρια διάδοσης, απαιτούνται μετρήσεις απώλειας διάδοσης για την υποστήριξη ασύρματων εφαρμογών μεγάλης εμβέλειας, οι οποίες λειτουργούν στο ανώτερο εύρος της ζώνης UHF και των μικροκυμάτων. Οι μελέτες συνήθως υποθέτουν έναν ισχυρό σταθμό βάσης (πομπό) με μεγάλη κεραία και κινητές μονάδες που βρίσκονται κοντά στο έδαφος, όπως συμβαίνει με τα κινητά τηλέφωνα και με άλλες εφαρμογές κινητής επικοινωνίας. Αντιθέτως, λίγη προσοχή έχει δοθεί στη κατώτερη ζώνη VHF για κόμβους κοντά στο έδαφος που αναπτύσσονται σε σύνθετα σενάρια διάδοσης, ειδικότερα για επικοινωνίες από εσωτερικό σε εσωτερικό χώρο και από εξωτερικό σε εσωτερικό χώρο. Ωστόσο, τα κλασικά μοντέλα αστικής διάδοσης, τα οποία είναι συχνά προσανατολισμένα σε συμβατικές κυψελοειδείς περιοχές στις οποίες ένας σταθμός βάσης βρίσκεται σε σχετικά μεγάλο υψόμετρο, δεν είναι κατάλληλα για κόμβους κοντά στο έδαφος. Τέτοια μοντέλα δεν είναι αξιόπιστα στις κατώτερες ζώνες VHF και στην υψηλή ζώνη HF.

2. Ανάλυση Η/Μ κυμάτων επικοινωνίας

2.1 Εισαγωγή στον ηλεκτρομαγνητισμό

Ο ηλεκτρομαγνητισμός αποτελεί κλάδο της επιστήμης που ασχολείται με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων και ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που σχηματίζονται από αυτά. Η μελέτη του περιλαμβάνει φορτία, μαγνήτες, ηλεκτρικές μηχανές, ηλεκτρική ενέργεια, μετασχηματιστές, ηλεκτρομαγνητικά κύματα, ραδιοφωνία, τηλεόραση, επικοινωνίες, κινητή τηλεφωνία, φως,βιολογικά ηλεκτρικά σήματα, ηλεκτρικά διαγνωστικά συστήματα κ.ά. Αποτελεί επίσης και μια από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις (Ηλεκτρομαγνητισμός, Βαρύτητα, Ασθενείς πυρηνικές δυνάμεις, Ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις).

Επιγραμματικά, οι εφαρμογές του ηλεκτρομαγνητισμού έχουν ως εξής:

1. **Ηλεκτρική Ενέργεια:** Ο ηλεκτρομαγνητισμός είναι ο βασικός μηχανισμός παραγωγής, μεταφοράς και χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας σε οικιακό και βιομηχανικό επίπεδο.
2. **Τηλεπικοινωνίες:** Οι μελέτες του ηλεκτρομαγνητισμού είναι βασικές για την κατανόηση των φαινομένων των τηλεπικοινωνιών, όπως τα ραδιοκύματα, η διάδοση φωτός σε οπτικές ίνες και η ασύρματη επικοινωνία.
3. **Ιατρική Απεικόνιση:** Ο ηλεκτρομαγνητισμός βοηθά στην ανάπτυξη τεχνολογιών απεικόνισης, όπως οι μαγνητικές τομογραφίες (MRI) και οι απεικονίσεις CT, οι οποίες χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία για τη διάγνωση και την εξέταση των εσωτερικών δομών του ανθρώπινου σώματος.
4. **Υλικά και Τεχνολογία:** Ο ηλεκτρομαγνητισμός χρησιμοποιείται επίσης στην κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών, υλικών με μαγνητικές ιδιότητες και σε προηγμένες τεχνολογίες, όπως οι υπεραγωγοί.
5. **Επιστήμες του Διαστήματος:** Ο ηλεκτρομαγνητισμός είναι σημαντικός για την κατανόηση των φαινομένων που συμβαίνουν στο διάστημα, όπως οι ηλιακοί άνεμοι, οι

ακτίνες«γ»(προκύπτουν από πυρηνικές αντιδράσεις, όπως η διάσπαση ραδιενεργών πυρήνων ή στοιχειωδών σωματιδίων) και η αλληλεπίδραση των αστεριών με τα μαγνητικά πεδία.

Όταν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα τροφοδοτείται με ισχύ, αναπτύσσονται σε αυτό ρεύματα και τάσεις, των οποίων η σχέση εξαρτάται από την τοπολογία του κυκλώματος. Όταν η ισχύς αυτή ακτινοβολείται στον ελεύθερο χώρο, μεταφέρεται από ένα Η/Μ κύμα.

Γενικά, ως **ελεύθερο χώρο (free-space)** εννοούμε ένα χώρο ομοιόμορφο, ομοιογενή και ισοτροπικό, κάτι το οποίο δεν υπάρχει στην πραγματικότητα. Ωστόσο, η έννοια του ελεύθερου χώρου χρησιμοποιείται γιατί απλουστεύει τη μελέτη του φαινομένου της διάδοσης των Η/Μ κυμάτων, καθώς είναι εύκολο να υπολογιστούν οι συνθήκες διάδοσης. Ακόμη, οι συνθήκες διάδοσης μερικές φορές προσεγγίζουν τις συνθήκες του ελεύθερου χώρου, ειδικά στις υψηλότερες συχνότητες της ζώνης UHF. Η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που αποτελεί μαθηματική εξήγηση της συμπεριφοράς των Η/Μ κυμάτων, αναπτύχθηκε από τον Σκωτσέζο Φυσικό James Clerk Maxwell το 1857 και τελειοποιήθηκε το 1873.

Συνολικά, ο ηλεκτρομαγνητισμός διαμορφώνει τη σύγχρονη τεχνολογία και την κατανόησή μας για τη φύση, επιτρέποντάς μας να αναπτύσσουμε νέες εφευρέσεις και να εξελίσσουμε την κοινωνία μας.

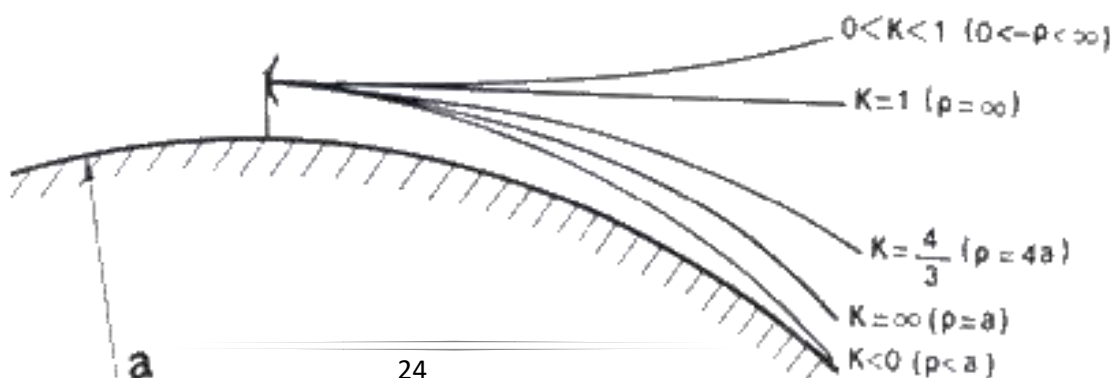
2.2 Ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας

Ο ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας για κύματα χώρου είναι περίπου τα 4/3 του οπτικού (γεωμετρικού) ορίζοντα, το οποίο σημαίνει ότι τα Η/Μ κύματα μπορούν να φτάσουν σε απόσταση κατά 1,33 φορές μεγαλύτερη από τον οπτικό ορίζοντα. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ σημαντική και προκαλείται από την σύσταση της ατμόσφαιρας που περιβάλλει την καμπύλη γη. Προσεγγιστικά, δίνεται από τον εμπειρικό τύπο:

$$d_t = 4\sqrt{h_t} \tag{2.1}$$

Όπου:

- d_t = απόσταση από την κεραία εκπομπής, σε km
- h_t = ύψος κεραίας εκπομπής πάνω από τη γη, σε m



Σχήμα 2.1: Τροχιές Η/Μ ακτίνων για διάφορες ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Στην περίπτωση επαλήθευσης των συνθηκών οπτικής επαφής μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης, αυξάνεται (εικονικά) η γήινη ακτίνα, με αποτέλεσμα ο τροποσφαιρικός δείκτης K να ισούται με $4/3$ για ποσοστό χρόνου μεγαλύτερο του 50%, όμως για χρονικά διαστήματα της τάξης του 1% ή 2%, ο δείκτης K λαμβάνει τιμές μικρότερες ή ίσες της μονάδας. Επίσης, οι ραδιοζεύξεις απαιτείται συνήθως να εξασφαλίζουν επικοινωνία για ποσοστά χρόνου της τάξης του 99% και άνω. Συνεπώς για την επαλήθευση της οπτικής επαφής απαιτείται να λαμβάνεται $K=1$. Η εξίσωση (2.1) εφαρμόζεται και στις κεραιές λήψης.

Η συνολική απόσταση διάδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$d = d_t + d_r = 4\sqrt{h_t} + 4\sqrt{h_r} \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.2: Ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας.

Η τηλεόραση, η ραδιοναυτιλία, τα ραντάρ, το μεγαλύτερο μέρος των τηλεπικοινωνιών μέσω δορυφορικών ή επίγειων σταθμών, η κινητή τηλεφωνία, κλπ., κάνουν ευρεία χρήση των μικροκυμάτων. Τα παραπάνω καθιστούν τα μικροκύματα ένα σημαντικό φορέα μετάδοσης της πληροφορίας.

2.3 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Η διάδοση των Η/Μ κυμάτων από την κεραιά του πομπού στην κεραιά του δέκτη ακολουθεί κυρίως δύο κατευθύνσεις. Για συχνότητες κάτω από την ζώνη HF, τα Η/Μ κύματα διαδίδονται γύρω από την γη, ορισμένες φορές κάνοντας πλήρη περιστροφή. Έτσι θεωρητικά, δημιουργείται ένας κυματοδηγός μεταξύ της τροπόσφαιρας και της επιφάνειας της γης. Τα κύματα αυτά ονομάζονται κύματα επιφανείας (επιφανειακά κύματα/έρποντα/κύματα εδάφους) διαδίδονται χωρίς οπτική επαφή. Η δεύτερη βασική κατεύθυνση των κυμάτων είναι εκείνη κατά την οποία εκπέμπονται με γωνία προς την επιφάνεια της γης και διαδίδονται κατά

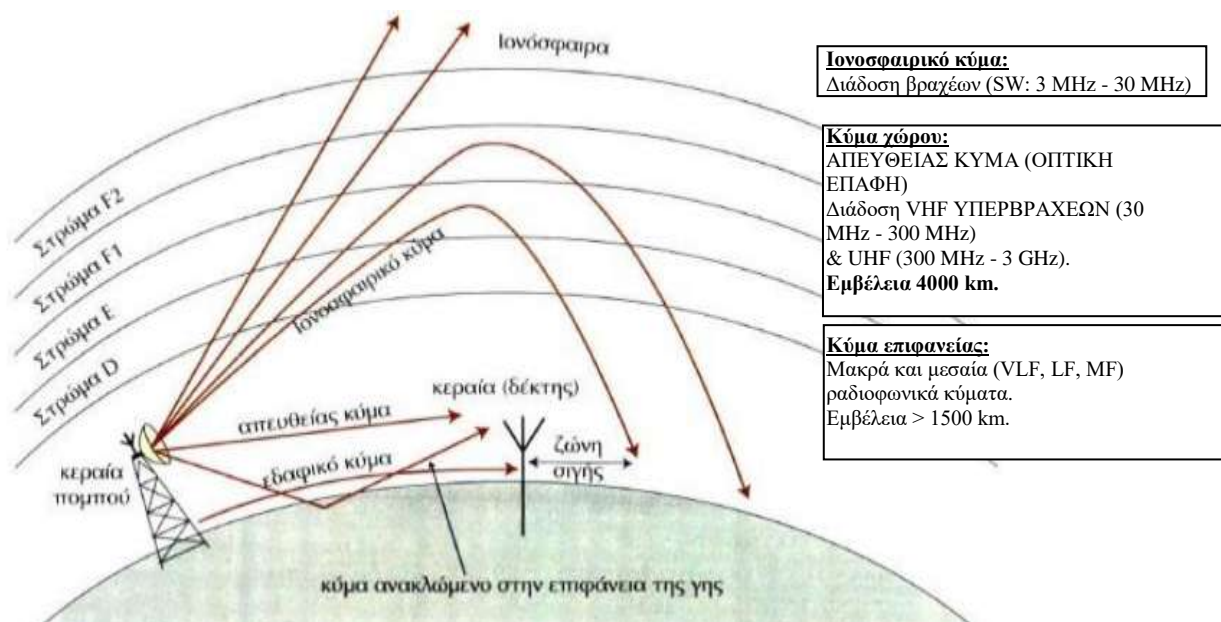
μήκος των ανωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Τα τελευταία χαρακτηρίζονται ως κύματα χώρου.

Η απόσταση την οποία θα διανύσει το επιφανειακό κύμα εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους και την συχνότητα f του εκπεμπόμενου κύματος. Η γη, εκτός από αγωγός είναι ταυτόχρονα και μονωτής, με αποτέλεσμα να απορροφά σημαντικό μέρος της ενέργειας των κυμάτων εδάφους. Η απορρόφηση αυτή εξαρτάται από την συχνότητα f και το μήκος κύματος λ του Η/Μ κύματος. Πιο συγκεκριμένα, όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος λ (μεγάλη συχνότητα f) τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφησή του από το έδαφος.

Αντίθετα, σε αγωγίμες επιφάνειες, όπως για παράδειγμα η επιφάνεια του νερού, το κύμα διαδίδεται σχεδόν χωρίς καμία απώλεια ενέργειας. Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος ακολουθούν την καμπυλότητα της γης και υπερπηδούν τυχόν εμπόδια (βουνά, λόφους κ.ά.), που μπορεί να συναντήσουν στην πορεία τους. Για αυτόν τον λόγο, Η/Μ κύματα χαμηλότερων συχνοτήτων διαδίδονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Ένα άλλο μέρος των εκπεμπόμενων κυμάτων διαδίδεται κατά μήκος των κατωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρα) και μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης, όταν βρίσκονται σε οπτική επαφή. Τα κύματα αυτά φέρουν την ονομασία «τροποσφαιρικά κύματα».

Οι ασύρματες ζεύξεις σε μεγαλύτερες αποστάσεις πραγματοποιούνται με τη βοήθεια των κυμάτων χώρου. Η/Μ κύματα στις συχνότητες της ζώνης HF ανακλώνται από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (ιονόσφαιρα) και ονομάζονται «ουράνια ή ιονοσφαιρικά κύματα». Η ιονόσφαιρα αποτελείται από ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα, τα οποία σχηματίζονται λόγω της υπεριώδους ακτινοβολίας του ήλιου. Μετά την ανάκλασή τους από την ιονόσφαιρα, τα ιονοσφαιρικά κύματα επιστρέφουν στο έδαφος πολύ πέρα από τον ορίζοντα. Για να φθάσουν τα κύματα αυτά σε δέκτες που βρίσκονται σε άλλο ημισφαίριο της γης πρέπει να ανακλώνται συνεχώς μεταξύ της γης και της ιονόσφαιρας. Οι διάφοροι μηχανισμοί διάδοσης των Η/Μ κυμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3.

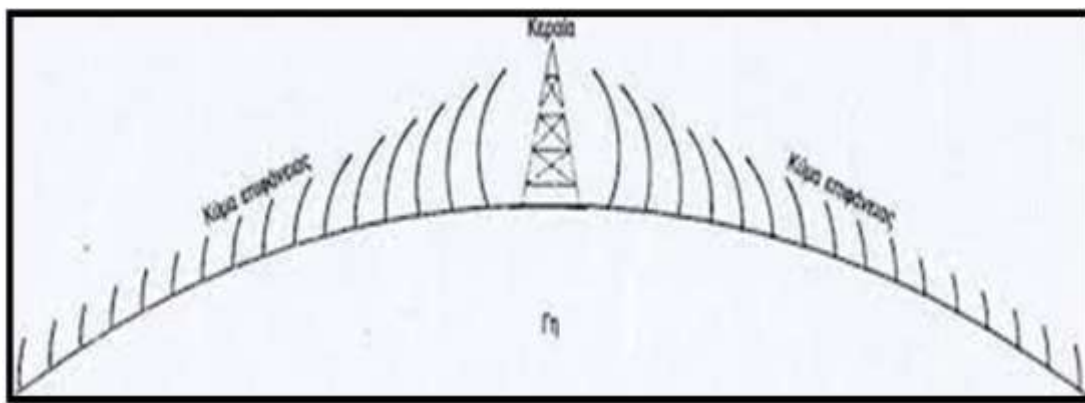


Σχήμα 2.3: Μηχανισμοί διάδοσης H/Μκυμάτων.

2.4 Αυτοδονούμενες κεραιές και διάδοση ουράνιων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

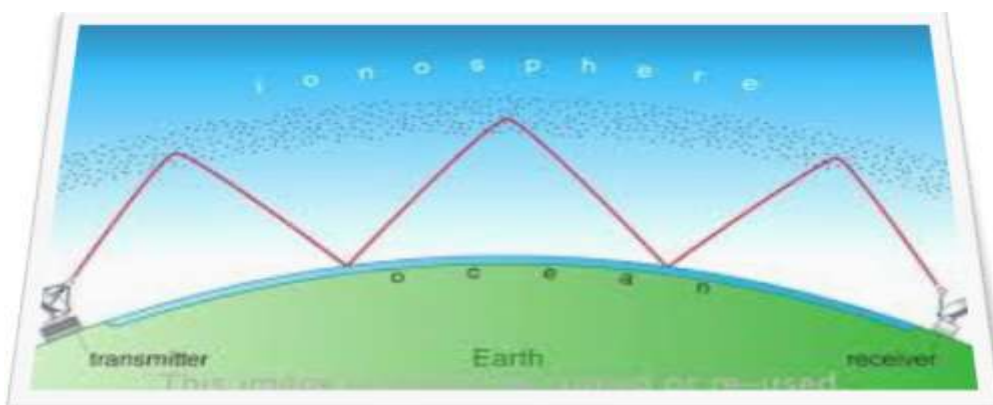
Οι κεραιές που λειτουργούν στα μακρά μήκη κύματος αποτελούνται από αγωγούς τεντωμένους και παράλληλους προς τη γήινη επιφάνεια, οι οποίοι βρίσκονται σε μεγάλο ύψος από το έδαφος, που ξεπερνά πολλές φορές τα 100m. Η διαφορά τους με τον κατακόρυφο ακτινοβολητή είναι, ότι γύρω από μια οριζόντια κεραιά οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου διαδίδονται στο χώρο οριζόντια, ενώ οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου κατακόρυφα. Συνεπώς, μία οριζόντια κεραιά δημιουργεί πεδίο οριζόντιας πόλωσης, ενώ μία κατακόρυφη κεραιά δημιουργεί πεδίο κατακόρυφης πόλωσης.

Στη ζώνη των μεσαίων κυμάτων (ραδιοφωνία) οι περισσότερες κεραιές είναι όπως στο Σχήμα 2.4. Τα μήκη κύματος αυτής της ζώνης είναι μεταξύ 200 m και 600 m. Επομένως, μπορούμε σχετικά εύκολα να κατασκευάσουμε κεραιές $\lambda/4$ ή και $\lambda/2$. Σε αυτές, ο ίδιος ο ιστός είναι ο ακτινοβολητής. Είναι ο λεγόμενος «αυτοδονούμενος» ιστός. Το ακτινοβλούμενο από τέτοιες κεραιές πεδίο είναι πολωμένο κατακόρυφα, επειδή οι δυναμικές γραμμές του διαδίδονται στο χώρο κατακόρυφα.



Σχήμα 2.4: Κεραία ραδιοφωνικών κυμάτων.

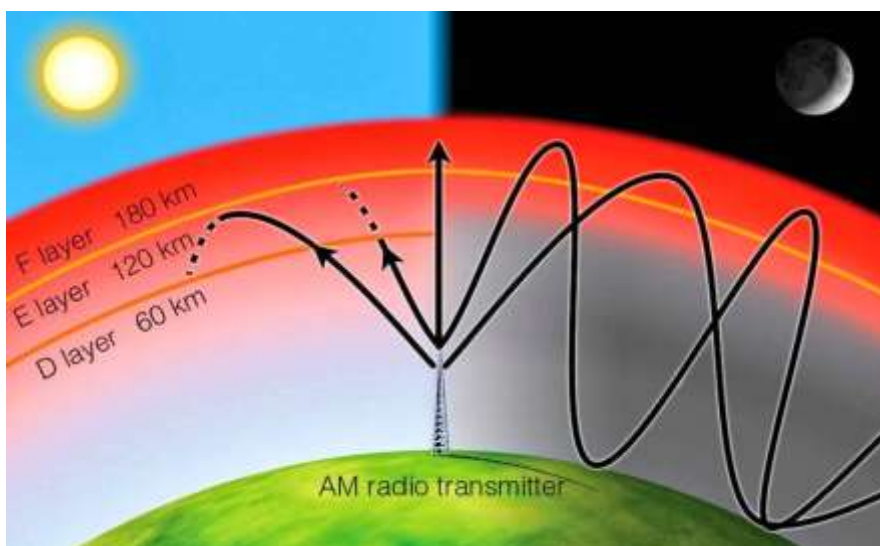
Όσον αφορά τη διάδοση των μακρών, μεσαίων και βραχέων κυμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, το πεδίο διαδίδεται, όχι μόνο κατά μήκος της επιφάνειας της γης, αλλά και λοξά, επάνω προς τον ουρανό. Προς όποια κατεύθυνση και αν διαδίδεται, η πορεία του δεν μένει ανεμπόδιστη. Περνώντας από τη γήινη επιφάνεια, το «κύμα επιφάνειας» ή «κύμα εδάφους» συναντά διάφορα φυσικά και τεχνητά εμπόδια, τα οποία απορροφούν μέρος της ενέργειάς του. Το αντίθετο συμβαίνει με το «κύμα χώρου», που διαδίδεται προς τον ουρανό. Στο ύψος των 100–800 km, στην ιονόσφαιρα, το κύμα χώρου συναντά ελαφρώς αγωγίμα στρώματα, που διευκολύνουν τη διάδοσή του, αλλά συγχρόνως μεταβάλλουν βαθμιαία και την κατεύθυνσή του και το «ακτινοβολούν» πίσω προς τη γη. Η διεργασία αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Το κύμα χώρου, επιστρέφει στην επιφάνεια της γης σε μεγάλη απόσταση από τον πομπό, όπου το κύμα επιφάνειας έχει ήδη εξαφανιστεί. Οι υπερπόντιες ραδιοεπικοινωνίες έγιναν εφικτές μέσω ανακλάσεων των κυμάτων στην ιονόσφαιρα, όπως ακριβώς έγινε εφικτή και η εξαιρετική λήψη των ραδιοφωνικών σταθμών κατά το απόγευμα και τη νύχτα.



Σχήμα 2.5: Διάδοση ΗΜ κυμάτων μέσω ανάκλασης στην ιονόσφαιρα.

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

Τα ιονοσφαιρικά στρώματα συμβολίζονται με τα γράμματα D, E, F1, και F2 (Σχήμα 2.6). Το στρώμα E αναφέρεται και ως στρώμα Kennely–Heaviside, ενώ το στρώμα F1 ως στρώμα Appleton. Τη νύχτα, τα στρώματα F1 και F2 ενώνονται και δημιουργούν το στρώμα F, ενώ το στρώμα D εξαφανίζεται εξαιτίας της έλλειψης ηλιακής ακτινοβολίας. Οι καλύτερες συνθήκες διαδόσεως των κυμάτων χώρου στην ιονόσφαιρα επιτυγχάνονται κυρίως τις ώρες του απογεύματος και της νύχτας. Σε αυτές τις ώρες, τα κατώτερα όρια των αγωγίμων στρωμάτων της ιονόσφαιρας είναι σαφώς καθορισμένα και σε βαθμό, που να μπορούμε να πούμε ότι το κύμα χώρου ανακλάται από αυτά. Η επίδραση των ηλιακών ακτίνων κάνει δυσδιάκριτα αυτά τα όρια των στρωμάτων. Για τον λόγο αυτό, όσο διαρκεί η ημέρα, τα κύματα χώρου δεν επιστρέφουν προς τη γη (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6: Ιονοσφαιρική διάδοση H/M κυμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας.

Οι ανακλαστικές ιδιότητες της ιονόσφαιρας δεν είναι ίδιες για όλα τα μήκη κύματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος, τόσο πιο βέβαιοι είμαστε, ότι θα επιστρέψει στη γη. Για αυτόν τον λόγο, μήκη κύματος πάνω από 20.000 μέτρα (15kHz) χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί υπερπόντια ασύρματη επικοινωνία. Για μήκη κύματος από 1000m έως τα 200 m, οι ανακλαστικές ικανότητες της ιονόσφαιρας γίνονται περισσότερο αβέβαιες και περισσότερο εξαρτημένες από απρόβλεπτες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Για μήκη κύματος κάτω από τα 200 m, η λήψη ιονοσφαιρικών κυμάτων είναι αβέβαιη και η περιοχή όπου μπορεί να «ακουστεί» ένας σταθμός μικραίνει πολύ και φθάνει την περιορισμένη εμβέλεια του κύματος επιφάνειας.

Για μήκη κύματος από 100 μέως 10 m, οι συνθήκες για μακρινή λήψη αρχίζουν πάλι να γίνονται ευνοϊκότερες. Τα βραχέα αυτά κύματα διαπερνούν το κατώτερο στρώμα της ιονόσφαιρας και πάνω απ' αυτό, σε ύψη 500–800km, συναντούν ανώτερα στρώματα, που σε ορισμένες περιπτώσεις, έχουν ισχυρές ανακλαστικές ιδιότητες. Η αποτελεσματικότητα αυτών των στρωμάτων εξαρτάται κατά μεγάλο ποσοστό από την ώρα της ημέρας και από την εποχή του έτους. Οι ανακλαστικές ιδιότητες σε αυτά τα μήκη κύματος είναι τόσο καλές, ώστε το κύμα υφίσταται αρκετές διαδοχικές ανακλάσεις μεταξύ γης και ιονόσφαιρας. Έτσι, ερασιτεχνικοί πομποί με μικρή ισχύ μπορούν να καλύψουν ένα ημισφαίριο της γης, αν σ' αυτό επικρατεί νύχτα. Μερικά από τα ευνοούμενα μήκη κύματος είναι 60m, 49m, 41m, 31m, 25m, 19m, 16m, 13 m και 11 m. Σε κάθε περίπτωση, φυσικά, δεν ευνοείται ένα ακριβώς μήκος κύματος, αλλά μία στενή ζώνη γύρω απ' αυτό. Αυτές οι στενές ζώνες ονομάζονται «ζώνες βραχέων κυμάτων». Στις βραχύτερες απ' αυτές, δηλαδή στις ζώνες με μήκη κύματος 13m και 11 m, η λήψη σε μεγάλες αποστάσεις περιορίζεται σε ορισμένες μόνο ώρες τις νύχτας. Όλες τις άλλες ώρες, αυτά τα κύματα διασχίζουν όλα τα στρώματα της ιονόσφαιρας και χάνονται στο διάστημα.

2.5 Διάδοση βραχέων κυμάτων (HF ή SW)

Το μήκος κύματος των βραχέων κυμάτων κυμαίνεται από 100m έως 10m και οι συχνότητές τους είναι μεταξύ 3MHz–30MHz. Η απορρόφησή τους από το έδαφος είναι πολύ μεγάλη. Η εμβέλεια τους μέσω κύματος επιφάνειας είναι μερικές δεκάδες km. Η απορρόφησή τους από την ιονόσφαιρα είναι πολύ μικρή. Έχουν μεγάλη νεκρή ζώνη μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης ζώνης κάλυψης, καθώς και μεταξύ των ανακλάσεων του κύματος (από το έδαφος στην ιονόσφαιρα και από εκεί στο έδαφος). Εκτός από την πρώτη ζώνη κάλυψης, που άλλωστε είναι μικρή, σε μεγαλύτερες αποστάσεις έχουμε λήψη του κύματος σε συγκεκριμένες περιοχές. Μπορεί ένας ραδιοφωνικός σταθμός στα βραχέα να μην ακούγεται σε απόσταση 50km, αλλά να ακούγεται σε απόσταση 20.000km. Η διάδοσή τους γίνεται κυρίως με ιονοσφαιρικά κύματα.

Η σχεδίαση ραδιοζεύξεων με βραχέα κύματα απαιτεί καλή γνώση των συνθηκών της ιονόσφαιρας. Για τον σκοπό αυτόν, χρησιμοποιούνται δελτία πρόγνωσης των συνθηκών της ιονόσφαιρας, ώστε να επιλεγούν οι κατάλληλες συχνότητες που θα χρησιμοποιηθούν. Οι ιονοσφαιρικές συνθήκες μπορούν να αλλάζουν καθ' όλο το 24ωρο και καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η επιλογή της κατάλληλης συχνότητας εξαρτάται από τις ιονοσφαιρικές συνθήκες και από την απόσταση που επιδιώκουμε να καλύψουμε. Στη διάδοση βραχέωνκυμάτων παρατηρείται έντονα και το φαινόμενο της επιλεκτικής διάλειψης, που αντιμετωπίζεται είτε με τη λήψη της μίας μόνο πλευρικής ζώνης (SSB) είτε με τη χρησιμοποίηση διαφορεικής λήψης.

Τα βραχέα κύματα χρησιμοποιούνται στη ραδιοφωνία AM, στη ραδιοναυτιλία, στη ναυσιπλοΐα, στην αεροναυτιλία και στον ραδιοερασιτεχνισμό.

2.5.1 Ανάκλαση βραχέων κυμάτων κατά τη διάρκεια της νύχτας

Τα βραχέα κύματα, όπως τα ραδιοκύματα και τα υπέρυθρα κύματα, μπορούν να υποστούν ανάκλαση από την ατμόσφαιρα και άλλα αντικείμενα κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπως και κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η ανάκλαση είναι η φαινόμενη αλλαγή κατεύθυνσης ενός κύματος όταν συναντά ένα εμπόδιο ή μια διαφορά στον δείκτη διάθλασης του μέσου διάδοσης.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι συνθήκες μπορεί να είναι διαφορετικές από αυτές της ημέρας, καθώς η θερμοκρασία και άλλες παράμετροι της ατμόσφαιρας μπορεί να αλλάξουν. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να επηρεάσουν τον δείκτη διάθλασης του αέρα και άλλων μέσων αναφορικά με τη διάδοση των βραχέων κυμάτων. Ως αποτέλεσμα, η ανάκλαση των βραχέων κυμάτων μπορεί να είναι διαφορετική από αυτήν κατά τη διάρκεια της ημέρας.

2.5.2 Απορρόφηση βραχέων κυμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, τα βραχέα κύματα όπως τα ραδιοκύματα και τα υπέρυθρα κύματα, μπορούν να απορροφηθούν από την ατμόσφαιρα και άλλα αντικείμενα. Αυτή η απορρόφηση συμβαίνει καθώς τα κύματα διέρχονται μέσα από τα στρώματα της ατμόσφαιρας και αλληλεπιδρούν με τα μόρια και τα άτομα των αερίων της ατμόσφαιρας.

Η απορρόφηση βραχέων κυμάτων από την ατμόσφαιρα εξαρτάται από τη συχνότητα των κυμάτων και την σύνθεση της ατμόσφαιρας. Οι συγκεκριμένες συχνότητες μπορεί να αλληλεπιδρούν με συγκεκριμένα μόρια ενός αερίου, προκαλώντας απορρόφηση των βραχέων κυμάτων.

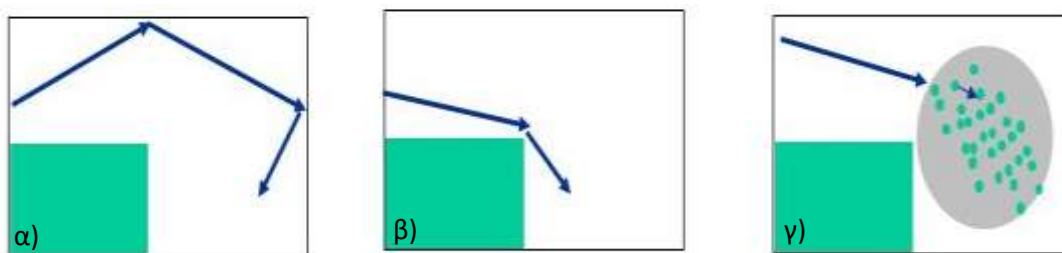
Στη ραδιοφωνία, για παράδειγμα, υπάρχουν συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων που μπορούν να διαδοθούν μέσω ιονόσφαιρας, όπως τα ραδιοκύματα μεγάλων συχνοτήτων (HF) που μπορούν να ανακλαστούν από την ιονόσφαιρα και να καλύψουν μεγάλες αποστάσεις.

Συνολικά, η απορρόφηση βραχέων κυμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η σύνθεση της ατμόσφαιρας, η γωνία προσέγγισης, η ενέργεια των κυμάτων και περιβαλλοντικοί παράγοντες. Η απορρόφηση μπορεί να επηρεάσει τη διάδοση των κυμάτων και να περιορίσει την απόσταση που μπορούν να καλύψουν κατά τη διάρκεια της ημέρας.

2.6 Διάδοση μετρικών κυμάτων (VHF)

Το μήκος κύματος των μετρικών κυμάτων είναι από 10m έως 1m και οι συχνότητές τους είναι από 30MHz έως 300MHz. Δεν διαδίδονται ούτε με ιονοσφαιρικά ούτε με επιφανειακά κύματα. Διαδίδονται μόνο με κύματα χώρου. Λόγω της υψηλής τους συχνότητας, δεν επηρεάζονται εύκολα από ατμοσφαιρικές και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, σε αντίθεση με τα πολύ μακρά, μακρά, μεσαία και εν μέρει τα βραχέα κύματα, που επηρεάζονται εύκολα. Όσο πιο μικρό είναι το μήκος κύματος των κυμάτων VHF, τόσο πιο χαμηλές είναι οι παρεμβολές που δέχονται.

Τα κύματα VHF εξασθενούν λόγω περίθλασης και σκέδασης από ανωμαλίες του εδάφους και της τροπόσφαιρας (Σχήμα 2.7). Επίσης, παρατηρείται το φαινόμενο της απορρόφησής τους από τα αέρια της τροπόσφαιρας, τη βροχή, το χιόνι, την ομίχλη, κλπ. Ανακλώνονται επίσης εύκολα στην επιφάνεια της Γης. Η ισχύς που φτάνει σε έναν δέκτη κυμάτων VHF μπορεί να υποβαθμιστεί ή να παρουσιάζει αυξομειώσεις λόγω διαλείψεων που προκαλούνται από τη λήψη του απευθείας και του ανακλώμενου κύματος ταυτόχρονα. Κατά τη σχεδίαση μιας ραδιοζεύξης, πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη, τουλάχιστον η πρώτη ζώνη Fresnel (βλ. υπο-παράγρ. 2.6.1).



Σχήμα 2.7: α) Ανάκλαση. β) Περίθλαση. γ) Σκέδαση.

Τα κύματα VHF μπορούν να διαδίδονται επίσης μέσω τροποσφαιρικής ή ιονοσφαιρικής σκέδασης. Σε σπάνιες περιπτώσεις, ένα κύμα VHF είναι δυνατό να παγιδευτεί σε ατμοσφαιρικό κυματοδηγό (duct). Επίσης, παρατηρείται και ένα είδος διαλείψεων που οφείλεται στη συμβολή του απευθείας με το ανακλώμενο κύμα είτε στο έδαφος είτε στην τροπόσφαιρα όταν

ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται έντονα με το ύψος. Μια άλλη αιτία διαλείψεων είναι η χρονικά μεταβαλλόμενη απορρόφηση των κυμάτων από την ιονόσφαιρα, κατά τη διάδοσή τους μέσω ιονοσφαιρικής σκέδασης.

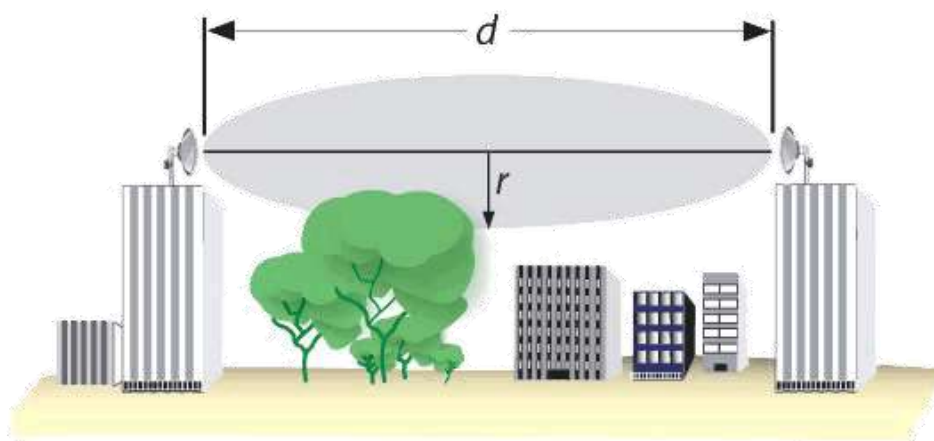
Οι συχνότητες των κυμάτων VHF χρησιμοποιούνται στις ζώνες I και III της τηλεόρασης, στη ραδιοφωνία FM, στους ραδιοερασιτεχνικούς σταθμούς, στον έλεγχο τεχνητών δορυφόρων, στη ραδιοναυτιλία, κλπ.

2.6.1 Ζώνη Fresnel

Η ζώνη Fresnel (Σχήμα 2.8) είναι ένα ελλειψοειδές, το οποίο περιβάλλει τη νοητή ευθεία της οπτικής επαφής του πομπού με το δέκτη.

Τα διαδιδόμενα ραδιοφωνικά, ηχητικά ή φωτεινά κύματα που εκπέμπονται ταυτόχρονα μπορούν να ακολουθήσουν ελαφρώς διαφορετικές διαδρομές πριν φτάσουν σε έναν δέκτη, ειδικά εάν υπάρχουν εμπόδια ή αντικείμενα που εκτρέπουν τα κύματα. Δύο κύματα μπορούν να φτάσουν στον δέκτη σε ελαφρώς διαφορετικούς χρόνους, άρα και με διαφορά φάσης μεταξύ τους, λόγω των διαφορετικών μηκών διαδρομής.

Ανάλογα με το μέγεθος της διαφοράς φάσης μεταξύ δύο κυμάτων, τα κύματα μπορεί να συμβάλλουν θετικά ή καταστροφικά. Το μέγεθος της υπολογιζόμενης ζώνης Fresnel σε κάποια συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη παρεμβολών, που μπορεί να προκληθούν από εμπόδια ή ασυνέχειες κατά μήκος της διαδρομής.



Σχήμα 2.8: Ζώνη Fresnel.

Η ακτίνα r της ζώνης Fresnel εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των δύο κεραιών. Είναι σημαντικός ο υπολογισμός της μέγιστης ακτίνας, γιατί ακόμα και αν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ των δύο σημείων, ένα εμπόδιο (λόφος, δέντρα, κτίριο) που βρίσκεται μέσα στην ζώνη Fresnel επηρεάζει το σήμα και δημιουργεί απώλειες. Οι απώλειες αυτές θεωρούνται αμελητέες όταν εξασφαλίζεται ότι τουλάχιστον το 80% της ζώνης Fresnel είναι ελεύθερο από εμπόδια.

Η εξίσωση που μας δίνει την μέγιστη ακτίνα της ζώνης Fresnel (στο κέντρο της έλλειψης δηλαδή) είναι η ακόλουθη:

$$r = 8,66 \sqrt{\frac{d}{f}} \quad (2.3)$$

Όπου:

- d : απόσταση μεταξύ των κεραιών, σε km
- f : συχνότητα, σε GHz
- r : η μέγιστη ακτίνα της ζώνης Fresnel, σε m

2.7 Διάδοση δεκατομετρικών (UHF) και εκατοστομετρικών (SHF) κυμάτων

Το μήκος κύματος των δεκατομετρικών κυμάτων (UHF) είναι από 1m έως 10cm και οι συχνότητές τους είναι από 300MHz έως 3GHz, ενώ των εκατοστομετρικών κυμάτων είναι από 10cm έως 1cm και από 3GHz έως 30GHz, δηλαδή ανήκουν στην περιοχή των μικροκυμάτων.

Στη διάδοση των μικροκυμάτων σε ανοικτό μέσο διάδοσης, κύριο ρόλο παίζει η τροπόσφαιρα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της διάδοσής τους είναι:

1. Η αισθητή απορρόφησή τους στην τροπόσφαιρα από τη βροχή, το χιόνι, την ομίχλη, την υγρασία κλπ.
2. Η ισχυρή διασπορά τους κατά την ανάκλασή τους στην επιφάνεια της γης. Τα δένδρα, οι φράχτες, τα κύματα της θάλασσας και όσα άλλα αντικείμενα έχουν μέγεθος συγκρίσιμο με το μήκος κύματός τους δημιουργούν ισχυρά φαινόμενα περίθλασής τους.
3. Η παγίδευσή τους από ατμοσφαιρικούς κυματοδηγούς, η οποία εμφανίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι στα κύματα VHF.

Για την διάδοσή τους απαιτείται οπτική επαφή. Φυσικά θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη ο ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας, αντί του οπτικού, αν ο ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας ήταν σταθερός και ανεξάρτητος από το χρόνο, πράγμα που δεν συμβαίνει. Σε περιπτώσεις, όπως π.χ. υπερδιάθλαση ή παγίδευσή τους μέσα σε τροποσφαιρικούς κυματοδηγούς, κλπ., μπορούν να διαδοθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις, απ'ότι μέσω οπτικής επαφής.

2.8 Διάδοση τηλεοπτικών κυμάτων

Τα τηλεοπτικά κύματα διακρίνονται σε ζώνες, την ζώνη I, III, IV και V(Πίνακας2.1).Είναι κυρίως κύματα UHF και διαδίδονται σε ευθεία σχεδόν γραμμή, συνεπώς υφίστανται διάθλαση, περίθλαση, ανάκλαση κλπ..

Πίνακας 2. 1: Ζώνες συχνοτήτων τηλεοπτικών κυμάτων.

Περιοχή	Κανάλι	Περιοχή Συχνοτήτων MHz	Συχνότητα φορέα εικόνας MHz	Συχνότητα φορέα ήχου MHz
I (UKW)	2	45...54	48,25	53,75
	3	54...61	55,25	60,75
	4	61...68	62,25	67,75
III (VHF)	5	174...181	175,25	180,75
	6	181...188	182,25	187,75
	7	188...195	189,25	194,75
	8	195...202	196,25	201,75
	9	202...209	203,25	208,75
	10	209...216	210,25	215,75
	11	216...223	217,25	222,75
IV (UHF)	21	470...478	471,25	476,75
	22	478...486	479,25	484,75

	37	598...606	599,25	604,75
V (UHF)	38	606...614	607,25	612,75
	39	614...622	615,25	620,75

	60	782...790	783,25	788,75

Για να έχουμε καλή λήψη των τηλεοπτικών κυμάτων, θα πρέπει η κεραία του δέκτη να«βλέπει» την κεραία του πομπού, δηλαδή να μην υπάρχουν εμπόδια μεταξύ των δύο κεραιών. Αυτός ο τύπος διάδοσης ονομάζεται «οπτικός», επειδή μοιάζει με τη διάδοση των οπτικών ακτίνων και ο ορίζοντας όπου φτάνουν τα κύματα, «οπτικός ορίζοντας».

Σε σημεία που βρίσκονται πέρα από τον οπτικό ορίζοντα, όπου δεν φαίνεται η κεραία του πομπού, τα κύματα φτάνουν μέσω περίθλασης ή διάθλασης στην τροπόσφαιρα (ύψος ~12kmαπό τη θαλάσσια επιφάνεια). Η επίδραση της τροπόσφαιρας αλλάζει με τις καιρικές συνθήκες, δηλαδή με τη θερμοκρασία, την πυκνότητα και την υγρασία. Γι' αυτό, πολλές φορές έχουμε λήψη και σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις από τον πομπό. Έτσι ξεπερνούμε τον οπτικόορίζοντα και φθάνουμε στον «ραδιοηλεκτρικό ορίζοντα», που είναι μεγαλύτερος από τον οπτικό.

Τα κύματα της ζώνης των υπερβραχέων (VHF) κυμάτων που χρησιμοποιούνται στη ραδιοφωνία (ζώνη II) με διαμόρφωση κατά συχνότητα (FM) βρίσκονται μεταξύ των ζωνών I και III της τηλεόρασης. Συμπεριφέρονται και αυτά όπως τα κύματα των ζωνών I και III.

Τα τελευταία χρόνια, γίνονται μελέτες και πειράματα για να πετύχουμε ραδιοεπικοινωνία με υπερβραχέα κύματα, χρησιμοποιώντας τις ανακλάσεις τους από μετεωρίτες (που περνούν από μεγάλα ύψη) ή και από τα ιονισμένα ίχνη που οι ίδιοι δημιουργούν. Αλλά και οι τεχνητοί δορυφόροι χρησιμοποιούνται σήμερα επιτυχώς, ως ενδιάμεσοι σταθμοί λήψης και εκπομπής για διηπειρωτικές επικοινωνίες. Θεωρητικά, με τρεις μόνο γεωστατικούς δορυφόρους μπορεί να καλυφθεί ολόκληρη η υδρόγειος.

3. Συστήματα μετάδοσης δεδομένων

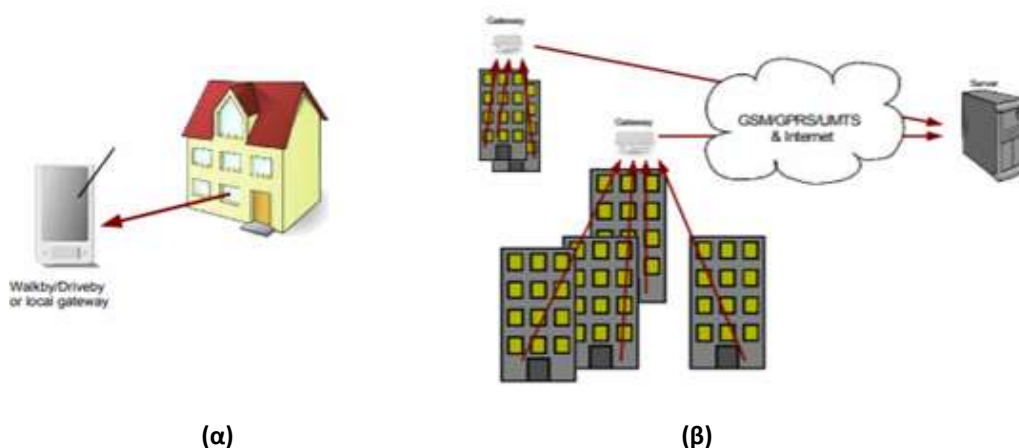
3.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα μετάδοσης δεδομένων μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες αναφορικά με την εμβέλειά τους:

- **Συστήματα μικρής εμβέλειας** (Σχήμα 3.1(α), όπου τα δεδομένα μίας τυπικής οικιακής μέτρησης(π.χ. μετρήσεις νερού, καυσίμων ή ηλεκτρισμού, κλπ.) πρέπει να μεταδοθούν στον κοντινότερο δέκτη. Σε τέτοια συστήματα, ο δέκτης είναι είτε σταθερός και τοποθετείται σε διαδρόμους, είτε κινητός, κατάλληλος για πεζούς ή οδηγούς. Και στις δύο περιπτώσεις, τα τελικά δεδομένα μεταδίδονται σε έναν κεντρικό

εξυπηρετητή (Server). Ημετάδοσή τους γίνεται μέσω ενός καναλιού ραδιοκυμάτων (RF), π.χ. ασύρματοInternet.

- **Συστήματα μεγάλης εμβέλειας** (Σχήμα 3.1(β)), όπου τα δεδομένα πρέπει να μεταδοθούν σε έναν κεντρικό εξυπηρετητή που είναι σε μεγάλη απόσταση. Τέτοιου είδους συστήματα απαιτούν χαμηλές σε κόστος ραδιοκυματικές ζεύξεις. Συνήθως οι πύλες (κεραίες) που είναι εγκατεστημένες σε οροφές κτιρίων, χρειάζονται εξωτερική ηλεκτρική ενέργεια και είναι πιο ακριβές σε σχέση με τις κεραίες μικρής εμβέλειας. Συνεπώς, ο αριθμός τους είναι μικρός, ώστε να μειωθεί το κόστος.



Σχήμα 3.1: Συστήματα μετάδοσης: (α) μικρής εμβέλειας, (β) μεγάλης εμβέλειας.

Σε αυτό το Κεφάλαιο, θα εξετάσουμε ποια είναι η καλύτερη επιλογή ζώνης συχνοτήτων για μετάδοση δεδομένων (π.χ., VHF στα 169MHz ή UHF στα 868MHz). Οι ενδιάμεσες συχνότητες, π.χ. 313/433MHz, δεν θα εξεταστούν (για απλοποίηση της μελέτης), αλλά σίγουρα θα παρέχουν τα ενδιάμεσα χαρακτηριστικά μετάδοσης που θα χρειαστούμε. Μεγαλύτερες συχνότητες, π.χ. 2,4GHz, δεν θα μελετηθούν, διότι δεν είναι κατάλληλες για συστήματα μετάδοσης δεδομένων μεγάλης εμβέλειας.

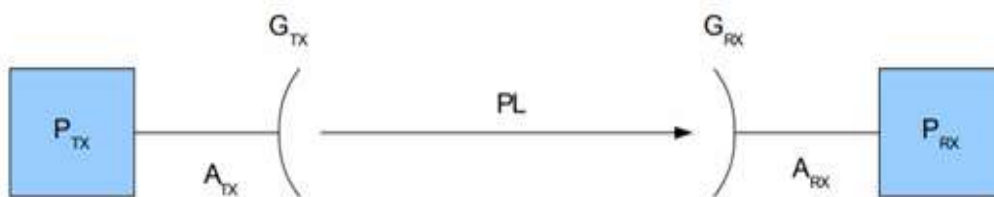
Η σύγκριση των δύο συστημάτων εμβέλειας, θα γίνει χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα μία μικρή πόλη στη Γαλλία (Besancon), η οποία εκτείνεται σε ακτίνα μήκους 1 km από το κέντρο της (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**).



Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.: Πόλη Besançon, Γαλλία.

3.2 Θεωρητικοί υπολογισμοί

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται μία ασύρματη ραδιοκυματική ζεύξη.



Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.: Ασύρματη ραδιοκυματική ζεύξη.

Όπου:

- P_{TX} : η ισχύς εξόδου του πομπού
- A_{TX} : οι συνολικές απώλειες στην πλευρά του πομπού (απώλειες καλωδίων, ωμικές απώλειες, απώλειες συνδετήρων κ.ά.)
- G_{TX} : το κέρδος της κεραίας εκπομπής, συγκρίνοντάς το υποθετικά με μία **ισοτροπική κεραία**, η οποία έχει κέρδος 0dB εξ ορισμού.
- PL : η απώλεια του σήματος εκπομπής λόγω της διαδρομής του από τον πομπό προς τον δέκτη. Η απώλεια αυτή οφείλεται στον ελεύθερο χώρο και σε άλλους παράγοντες εξασθένισης (π.χ., σκίαση, εμπόδια, κ.ά.).
- G_{RX} : το κέρδος της κεραίας λήψης, συγκρίνοντάς το υποθετικά με μία **ισοτροπική κεραία** (όπως και το κέρδος της κεραίας εκπομπής)
- A_{RX} : οι συνολικές απώλειες στην πλευρά του δέκτη (απώλειες καλωδίων, ωμικές απώλειες, απώλειες συνδετήρων κ.ά.).
- P_{RX} : η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος.

Όταν οι τιμές των παραμέτρων εκφράζονται σε dB, οι πράξεις απλουστεύονται, δηλαδή προσθέτουμε τα κέρδη και αφαιρούμε τις απώλειες:

$$P_{RX} = P_{TX} - A_{TX} + G_{TX} - PL + G_{RX} - A_{RX} \quad (3.1)$$

Μία ασύρματη ζεύξη είναι λειτουργική, όσο η λαμβανόμενη ισχύς P_{RX} είναι μεγαλύτερη της ισχύος κατωφλίου ευαισθησίας S_{RX} του δέκτη.

Στην εξίσ. (3.1), ο κυρίαρχος όρος σε όρους απόλυτων τιμών είναι η απώλεια διαδρομής PL. Μία έκφραση της απώλειας διαδρομής PL σε dB, αποτελεί ο εμπειρικός τύπος του Friis:

$$PL = 32,4 + 20 \log\left(\frac{f}{1 \text{ GHz}}\right) + 10 n \log\left(\frac{d}{1 \text{ m}}\right) \quad (3.2)$$

Όπου:

- f : η συχνότητα, σε GHz.
- d : η απόσταση μεταξύ των κεραιών πομπού-δέκτη.
- n : συντελεστής, που λαμβάνει τιμές: 2 στον ελεύθερο χώρο, 3 ή 4 σε εσωτερικό χώρο.

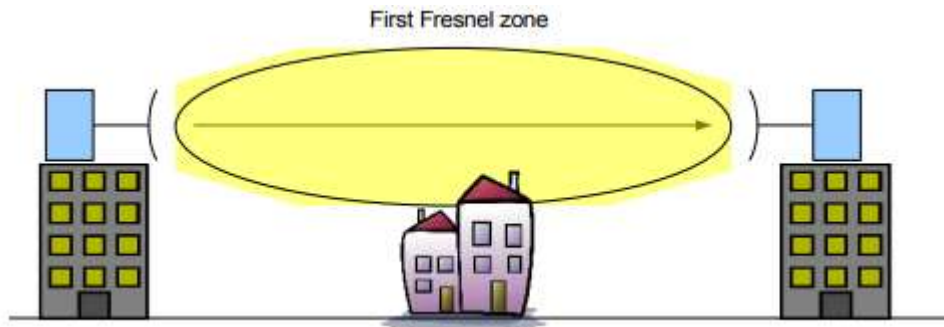
Το μοντέλο απωλειών της εξίσ. (3.2) είναι απλουστευμένο. Παρόλο που υπάρχουν ακριβέστερα μοντέλα διάδοσης, όπως το μοντέλο Hata για αστικές περιοχές, το μοντέλο απωλειών της εξίσ. (3.2) επαρκεί για την παρούσα μελέτη.

Οι υψηλές τιμές απωλειών σε μία ασύρματη ραδιοκυματική ζεύξη, μπορούν να υπολογιστούν με ένα αριθμητικό παράδειγμα, εφαρμόζοντας την εξίσ. (3.2). Για $d = 500\text{m}$, $f = 868\text{MHz}$ και $n = 2,2$, οι απώλειες διαδρομής είναι 90dB. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς που φτάνει στην κεραία λήψης είναι $10^{90/10}$ ή ένα δισεκατομμύριο φορές χαμηλότερη από την ισχύ που εκπέμπεται από την κεραία του πομπού.

Σε πραγματικές συνθήκες, η εξασθένηση του σήματος είναι πολύ μεγαλύτερη, για τους παρακάτω λόγους:

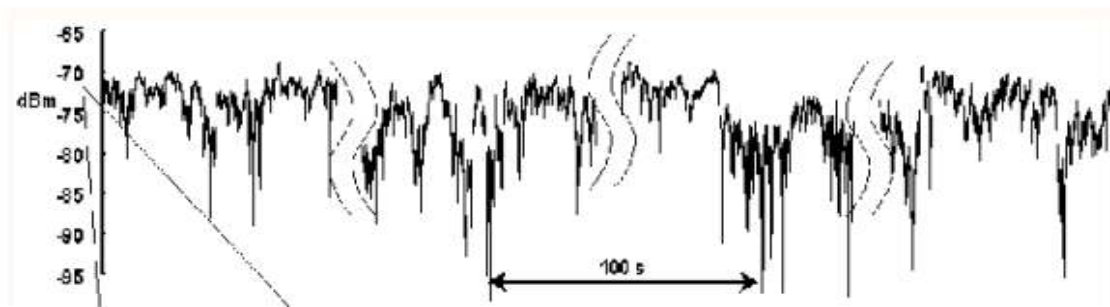
- **Απορρόφηση σήματος:** προκύπτει κυρίως λόγω της παρουσίας εμποδίων που υπάρχουν στη διαδρομή του σήματος ή πλησίον αυτής. Συγκεκριμένα, αφορά αντικείμενα που παρεμβάλλονται στη ζώνη Fresnel ανάμεσα στις δύο κεραιές και εμποδίζουν τη διάδοση του σήματος (Σχήμα 3.4).

Για τη χαμηλή συχνότητα των 169MHz που εξετάζουμε, η ακτίνα της ζώνης Fresnel για ζεύξη μήκους 1km είναι 21m ($r = 8,66 \sqrt{\frac{D}{f}}$). Έτσι, μόνο τα εμπόδια που υπάρχουν κατά μήκος της γραμμής οπτικής επαφής μεταξύ των κεραιών είναι σημαντικά και εισάγουν υψηλές απώλειες. Εμπόδια, όπως ένα θεμέλιο ή τοίχος από τούβλα, εισάγουν απώλειες 15–25dB, ενώ μία ξύλινη πόρτα εισάγει απώλειες 3–5dB. Αυτές οι απώλειες εξαρτώνται από τη συχνότητα. Γενικά, οι απώλειες διάδοσης μέσω αντικειμένων αυξάνουν με τη συχνότητα.



Σχήμα 3.4: Ζώνη Fresnel μεταξύ δύο κεραιών με παρουσία εμποδίων.

- **Σκίαση λόγω πολλαπλών διαδρομών:** υφίσταται λόγω της ταυτόχρονης ύπαρξης ανακλώμενων και κατευθειάνκυμάτων, τα οποία τείνουν να αλληλοαναιρούν το ένα το άλλο (Σχήμα 3.5). Οι απώλειες λόγω σκίασης της τάξης των 20dB είναι αρκετά συνηθισμένες στα σημεία χαμηλής λήψης σήματος («μηδενικά σκίασης»). Το φυσικό μέγεθος ενός «μηδενικού σκίασης» είναι περίπου ανάλογο του μήκους κύματος.



Σχήμα 3.5: Μεταβολή της ισχύος λήψης στο δέκτη.

- **Διάθλαση:** προκύπτει από την παρουσία αντικειμένων με αιχμηρές γωνίες στην διαδρομή του σήματος.
- **Σκέδαση σήματος:** προκύπτει όταν μικρά αντικείμενα, συγκρίσιμα με το μήκος κύματος ($\lambda = \frac{c}{f}$), βρίσκονται στην διαδρομή σήματος. Αυτά τα δύο φαινόμενα (διάθλαση και σκέδαση) λαμβάνονται προσεγγιστικά υπόψη στην παράμετρο n του εμπειρικού τύπου του Friis (εξίσ. 3.2), αλλά είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η διασπορά, για ένα δεδομένο μικρό εμπόδιο, θα είναι μεγαλύτερη σε μικρότερα μήκη κύματος, που σημαίνει ότι η εξασθένιση θα είναι υψηλότερη όταν η συχνότητα είναι υψηλότερη.
- **Απώλειες λόγω αναντιστοιχίας στην πόλωση:** συμβαίνουν όταν η πόλωση των κεραιών λήψης και εκπομπής δεν είναι ίδια ή όταν το επίπεδο πόλωσης αλλάζει μέσω της διάδοσης.

3.3 Συγκριτική μελέτη μεταξύ συστημάτων στα 169 MHz και 868 MHz

3.3.1 Απώλειες διάδοσης

Ο εμπειρικός τύπος του Friis (εξίσ. 3.2) δείχνει ότι οι απώλειες διάδοσης είναι άμεση συνάρτηση της συχνότητας. Στον Πίνακα 3.1, παρουσιάζονται οι απώλειες διάδοσης για διάφορες αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη, για διάδοση στον ελεύθερο χώρο ($n=2$) και σε τυπικό αστικό περιβάλλον ($n=3$) για τις συχνότητες 169MHz και 868MHz. Στο Σχήμα 3.6, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.1 υπό μορφή γραφήματος.

Πίνακας 3.1: Απώλειες διάδοσης με βάση τον τύπο του Friis (εξίσ. 3.2).

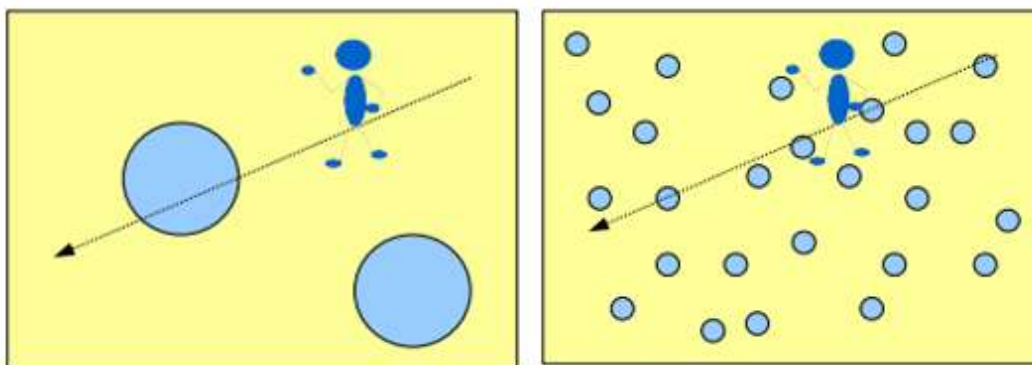
Απόσταση (m)	Απώλεια διάδοσης (dB)			
	f = 169 MHz ελεύθερος χώρος (n=2)	f = 169 MHz αστικό περιβάλλον (n=3)	f = 868 MHz ελεύθερος χώρος (n=2)	f = 868 MHz αστικό περιβάλλον (n=3)
1	17	17	31	31
10	37	47	51	61
50	51	68	65	82
100	57	77	71	91
1000	77	107	91	121

Σχήμα 3.6: Μεταβολή απωλειών διάδοσης σε σχέση με την απόσταση για τις δύο συχνότητες λειτουργίας.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι μία ραδιοζεύξη που λειτουργεί στη συχνότητα 868 MHz έχει απώλειες διάδοσης κατά 14 dB περισσότερο από ότι αν λειτουργούσε στη συχνότητα 169 MHz, που σημαίνει ότι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος θα είναι περίπου 25 φορές χαμηλότερη, ανεξάρτητα από την απόσταση και το περιβάλλον διάδοσης.

Η απορρόφηση, η περίθλαση και η σκέδαση του σήματος από εμπόδια είναι επίσης υψηλότερες στα 868 MHz από ότι στα 169 MHz. Τα κύματα χαμηλότερων συχνοτήτων έχουν περισσότερες πιθανότητες να διαδίδονται γύρω από αντικείμενα ή μέσω αντικειμένων (εκτός από συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπου θα μπορούσε να συμβεί συντονισμός), καθώς τα μήκη κύματος λειτουργίας τους είναι - συγκριτικά - μεγαλύτερα (1,77 m στα 169 MHz έναντι 34,5 cm στα 868 MHz).

Ωστόσο, στη συχνότητα 868 MHz, υπάρχει **πλεονέκτημα** όσον αφορά την εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών: καθώς το μήκος κύματος είναι μικρότερο στα 868 MHz, τα σημεία χαμηλής λήψης σήματος («μηδενικά σκίασης»), έχουν μικρότερες διαστάσεις σχετικά με την απόσταση διάδοσης. Αυτό σημαίνει ότι στα 868 MHz ένας κινούμενος χρήστης θα εισέλθει περισσότερες φορές σε «μηδενικά σκίασης», αλλά θα «αποδράσει» πιο γρήγορα από αυτά, σε σχέση με τα αντίστοιχα της συχνότητας 169 MHz (Σχήμα 3.7). Αυτό θα μπορούσε να δώσει μια πιο ικανοποιητική ποιότητα σήματος στον χρήστη, ακόμα και αν η πιθανότητα μίας αποτυχημένης μετάδοσης σε μια δεδομένη θέση είναι η ίδια και στις δύο συχνότητες.

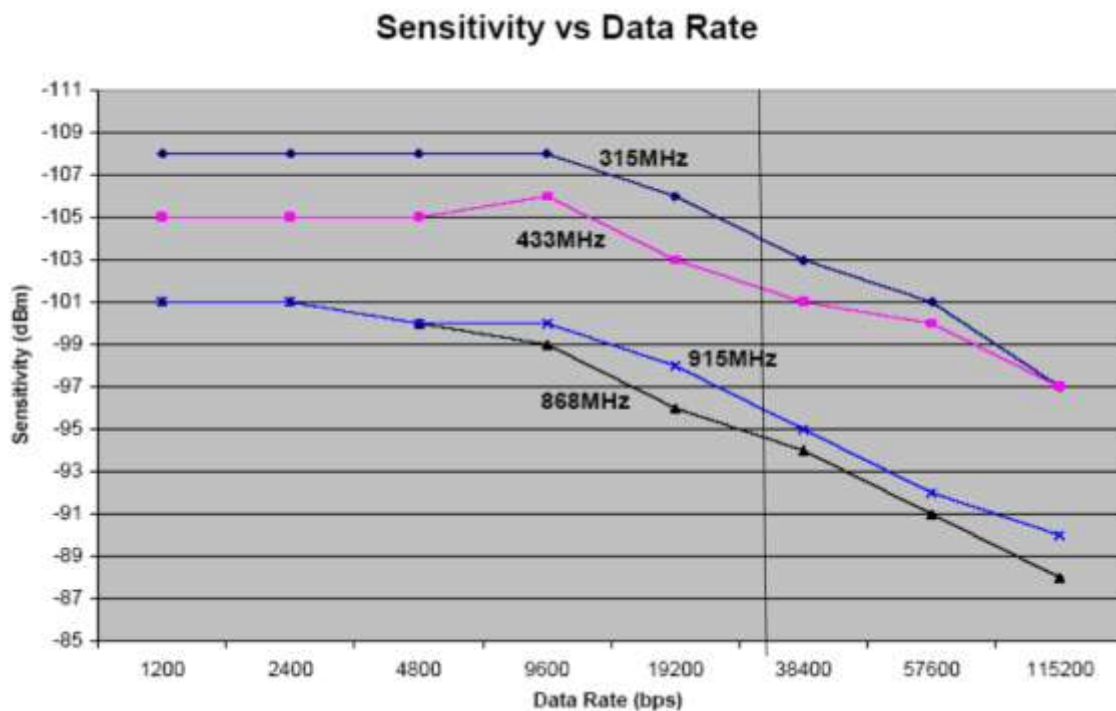


Σχήμα 3.7: Κινούμενος χρήστης και «μηδενικά σκίασης» (α) Συχνότητα: 169 MHz.
(β) Συχνότητα: 868 MHz.

3.3.2 Πομποί και δέκτες

Οι δέκτες είναι κατασκευασμένοι από chip πυριτίου, τα οποία έχουν εγγενείς περιορισμούς. Η πρώτη βαθμίδα ενός δέκτη είναι ένας ενισχυτής. Για τους ενισχυτές, το γινόμενο **κέρδος × εύρος ζώνης** είναι γενικά σταθερό, αλλά μπορεί να αυξομειώνεται ανάλογα με τις επιδόσεις του chip. Συνεπώς, όταν **το απαιτούμενο εύρος ζώνης (δηλαδή η συχνότητα λειτουργίας) αυξάνεται, το κέρδος μειώνεται**. Αυτό σημαίνει ότι, **για μια δεδομένη τεχνολογία, ένας δέκτης θα έχει πάντα καλύτερη ευαισθησία όταν η συχνότητα είναι χαμηλότερη**.

Για παράδειγμα, το παρακάτω φύλλο δεδομένων ενός chip πομποδέκτη TRC101 UHF της RFM (Σχήμα 3.8) δείχνει σαφώς ότι η ευαισθησία (sensitivity) του δέκτη μειώνεται με τη συχνότητα για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (data rate).



Σχήμα 3.8: Ευαισθησία (sensitivity) δέκτη σε σχέση με τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (data rate) για διάφορες συχνότητες.

Ένας δέκτης της ίδιας τεχνολογίας, έχει κέρδος ευαισθησίας 5–10 dB στη συχνότητα 169 MHz σε σχέση με τη συχνότητα 868 MHz. Ομοίως, ένας πομπός απαιτεί συνήθως λιγότερη ηλεκτρική ισχύ για να επιτύχει την ίδια ισχύ εξόδου σε χαμηλές συχνότητες, σε σχέση με υψηλότερες συχνότητες, για μια δεδομένη τεχνολογία. Αυτό οφείλεται στη συμπεριφορά του χιρπυριτίου, το οποίο παρουσιάζει υψηλότερες χωρητικές απώλειες όταν αυξάνεται η συχνότητα. Επίσης, το κέρδος του ενισχυτή είναι υψηλότερο στις χαμηλές συχνότητες. Τέλος, οι απώλειες καλωδίων και συνδετήρων είναι μεγαλύτερες σε υψηλότερες συχνότητες.

3.3.3 Ρυθμός μετάδοσης, εύρος καναλιού και ευαισθησία

Το εύρος του καναλιού είναι συνήθως 12,5kHz στη συχνότητα 169MHz (παρ' όλοπου η ευρωπαϊκή σύσταση REC7003E επιτρέπει έως και 50kHz). Στην εναρμονισμένη ζώνη συχνοτήτων g3 των 868,4–868,65MHz (είναι μιάυπο-ζώνη της ζώνης των 868MHz με επιτρεπόμενη ισχύ μετάδοσης έως 500 mW), το εύρος του καναλιού είναι 25kHz.

Καθώς ο **θόρυβος εντός του καναλιού είναι ανάλογος με το εύρος ζώνης του καναλιού**, ένας δέκτης στα 868 MHz θα έχει διπλάσιο θόρυβο από έναν δέκτη στα 169 MHz. Εάν οι δύο δέκτες έχουν τις ίδιες επιδόσεις και αν οι ρυθμοί μετάδοσης είναι ίδιοι, για καθορισμένο εύρος καναλιού, ο δέκτης των 169 MHz θα έχει 3dB βελτίωση στην ευαισθησία του για δεδομένη τιμή σήματος/θόρυβο (S/N) σε σχέση με τον δέκτη των 868 MHz.

Επιπρόσθετα, ένας χαμηλός ρυθμός μετάδοσης συνεπάγεται υψηλότερη απόδοση του λόγου S/N , όπως προκύπτει από την εξίσωση του Shannon:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.3)$$

Όπου:

- C : η χωρητικότητα του καναλιού (ή ρυθμός μετάδοσης, bits/sec ή bps)
- B : το εύρος καναλιού (Hz)
- S/N : λόγος σήματος προς τον θόρυβο, τον οποίο ο δέκτης μπορεί να αποκωδικοποιήσει.

Παρομοίως, ο ρυθμός μετάδοσης σχετίζεται με τη συνολική χωρητικότητα, η οποία είναι η ίδια και στις δύο συχνότητες (169 MHz και 868 MHz).

3.3.4 Κεραίες

Υπάρχουν δύο ζητήματα σχετικά με τις κεραίες: η προσαρμογή σύνθετης αντίστασης με τα ομοαξονικά καλώδια που τις τροφοδοτούν και η σταθερότητα σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ο συντελεστής ποιότητας μιας κεραίας στενής ζώνης συχνοτήτων, είναι ο λόγος της συχνότητας προς το εύρος ζώνης της κεραίας και δίνεται προσεγγιστικά ως εξής:

$$Q = \frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka} \quad (3.4)$$

Όπου:

- a : η ακτίνα μίας σφαίρας που περικλείει την κεραία
- $k=2\pi/\lambda$: ο κυματικός αριθμός

Το μήκος κύματος στα 169MHz είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερο από ότι στα 868MHz. Υποθέτοντας ότι ο διαθέσιμος χώρος τοποθέτησης μιας κεραίας είναι δεδομένος (θεωρώντας ότι οι 2 κεραίες έχουν σχεδόν το ίδιο μέγεθος), η εξίσ. 3.4 δείχνει ότι το Q θα είναι σημαντικά μεγαλύτερο στα 169MHz απ' ότι στα 868MHz. Επομένως, για το ίδιο φυσικό μέγεθος, μία κεραία στα 169MHz θα έχει σημαντικά μικρότερο εύρος ζώνης από μία κεραία στα 868MHz. Αυτό δεν σημαίνει ότι θα ήταν αδύνατο να σχεδιάσουμε μία μικρή κεραία στα 169MHz τόσο καλή όσο μία μικρή κεραία στα 868MHz, ωστόσο ο σχεδιασμός θα είναι πολύ πιο δύσκολος για να επιτευχθεί ίδια απόδοση. Σημαίνει επίσης ότι εξωτερικές αλλαγές (καλωδίωση, εγγύτητα τοίχων, κ.ά.) που θα μπορούσαν να αποσυντονίσουν την κεραία θα έχουν ισχυρότερη επίδραση στα 169MHz απ' ότι στα 868MHz. Επιπλέον, μια κεραία στα 169MHz θα είναι μεγαλύτερη όταν πρόκειται να προσαρμοστεί σε ένα σύστημα χαρακτηριστικής αντίστασης των 50Ω, σε σχέση με μία κεραία στα 868MHz.

Συνοπτικά, η κεραία στα 169MHz είναι 5 φορές μεγαλύτερη από την κεραία στα 868MHz. Εάν ο χώρος είναι περιορισμένος, όπως είναι πάντα στις εφαρμογές μέτρησης, τουλάχιστον στην πλευρά του πομπού, τότε η κεραία στα 169MHz θα έχει μικρότερο εύρος ζώνης και θα

είναι σημαντικά πιο ευαίσθητη στον αποσυντονισμό. Πειραματικά ένα κλασικό κοντό (10–15 cm) δίπολο στα 868MHz μπορεί να παρέχει κέρδος από 0 έως 3dBi, ενώ στα 169MHz, για το ίδιο μέγεθος, το κέρδος που θα επιτευχθεί θα είναι από –10 έως –5dBi. Έτσι, όταν ο χώρος είναι περιορισμένος, υπάρχει πλεονέκτημα κέρδους της τάξης των 8 έως 13 dB στα 868MHz.

Το όριο μεταξύ του ακτινοβολούμενου κοντινού πεδίου και του μακρινού πεδίου μίας κεραίας δίνεται γενικά ως εξής:

$$M \approx \frac{2L^2}{\lambda} \quad (3.5)$$

Όπου:

- L : η μεγαλύτερη φυσική διάσταση της κεραίας
- λ : το μήκος κύματος

Υποθέτοντας μια κεραία του ίδιου μεγέθους (π.χ. 20 cm) και για τις 2 συχνότητες, βρίσκουμε $M = 4,5$ cm στα 169 MHz και $M = 23$ cm στα 868 MHz. Αυτό σημαίνει ότι μία κεραία μήκους 20 cm στα 868 MHz θα διαταραχθεί από αντικείμενα που βρίσκονται σε ακτίνα 23 cm από αυτήν, ενώ μία κεραία μήκους 20 cm στα 169 MHz θα διαταραχθεί από αντικείμενα που βρίσκονται μόλις σε ακτίνα 4,5 cm. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση θα είναι διαφορετική, εάν το μέγεθος της κεραίας δεν περιορίζεται.

3.3.5 Κόστος

Από τεχνικής πλευράς, οι πομποί μέσης ισχύος τόσο στα 169MHz όσο και στα 868MHz μπορούν να σχεδιαστούν με πολύ χαμηλό κόστος, με ενσωματωμένους πομποδέκτες. Η αγορά πομποδεκτών χιρστα 868MHz είναι πολύ μεγαλύτερη, επομένως τα χιρσείνια φθηνότερα σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων. Ωστόσο, καθώς τα συστήματα μεγάλης εμβέλειας απαιτούν συνήθως πομποδέκτες υψηλής ισχύος στα 868MHz ώστε να λαμβάνεται σχετικά υψηλή στάθμη σήματος σε σχέση με το θόρυβο, η διαφορά κόστους μεταξύ των δύο συστημάτων είναι αρκετά μικρή. Το κόστος ενός συμβατού πομποδέκτη χιρστα 169MHz είναι οριακά υψηλότερο από το κόστος ενός πομποδέκτη χιρ υψηλής ισχύος στα 868MHz. Συστήματα με μεγάλη κατανάλωση ισχύος μπορεί να απαιτούν σημαντικά πιο ακριβή σχεδιασμό (διακριτούς ταλαντωτές VCO, κ.λπ.), αλλά αυτό ισχύει και για τα δύο συστήματα. Επιπλέον, οι ενισχυτές ισχύος στα 868 MHz είναι πιο ακριβοί από τους ενισχυτές στα 169 MHz. Ωστόσο, καθώς τα κανάλια των 169 MHz είναι μικρότερα, αυτό συνήθως απαιτεί έναν ταλαντωτή αναφοράς υψηλότερης ακρίβειας, που συνεπάγεται επιπλέον κόστος.

Συμπερασματικά, οι πομποδέκτες στα 169MHz είναι ελαφρώς ακριβότεροι από εκείνους των 868MHz, αλλά αντιπροσωπεύουν μικρότερο μέγεθος της αγοράς.

Στον Πίνακα 3.2 γίνεται σύγκριση των δύο συστημάτων μετάδοσης που μελετήθηκαν.

Πίνακας 3.2: Σύγκριση συστημάτων μετάδοσης.

Παράμετρος	Σύστημα στα 169 MHz	Σύστημα στα 868 MHz
Απώλειες διάδοσης	Χαμηλότερη κατά 14 dB	Υψηλότερη κατά 14dB
Απορρόφηση από εμπόδια	Χαμηλότερη	Υψηλότερη
Σκέδαση και περίθλαση	Μικρότερη	Μεγαλύτερη
Σκίαση πολλαπλών διαδρομών	Λίγα, αλλά μεγάλα «μηδενικά σκίασης»	Πολλά, αλλά μικρά «μηδενικά σκίασης»
Εσωτερική ευαισθησία δέκτη	Μεγαλύτερη κατά 5–10dB	Μικρότερη κατά 5–10dB
Απώλειες καλωδίων και συνδέσμων	Πολύ χαμηλές	Χαμηλές, καθώς τα καλώδια είναι μικρά σε μέγεθος
Απόδοση πομπού	Καλύτερη	Χειρότερη
Ευαισθησία δέκτη	Μεγαλύτερη κατά 3dB	Μικρότερη κατά 3 dB
Κέρδος κεραίας	Χειρότερο κατά 8–12dB, για μικρού μεγέθους κεραία	Καλύτερο κατά 8–12dB, για μικρού μεγέθους κεραία
Ζώνη παρεμβολής κεραίας	Μικρή (για σταθερού μεγέθους κεραία)	Μεγάλη (για σταθερού μεγέθους κεραία)
Κόστος παραγωγής	Λίγο μεγαλύτερο	Λίγο μικρότερο

Σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 3.2, είναι δυνατός ο υπολογισμός ενός μέσου όρου προϋπολογισμού ζεύξης (link-budget). Για παράδειγμα, μία ζεύξη στα 169MHz παρέχει κατά μέσο όρο:

14dB(διαφορά απωλειών διάδοσης) +7,5 dB(μέσος όρος διαφοράς εσωτερικής ευαισθησίας δέκτη) +3dB (μεγαλύτερη ευαισθησία δέκτη) –10 dB(μέσος όρος διαφοράς κέρδους κεραίας) = 14,5 dB, καλύτερο προϋπολογισμό ζεύξης σε σύγκριση με μία ζεύξη 868MHz, ακόμη και στην περίπτωση όπου οι κεραίες έχουν το ίδιο φυσικό μέγεθος. Όπως θα δείξουμε στο παράδειγμα που ακολουθεί, για ίδια ισχύ εκπομπής, το σύστημα στα 169MHz θα παρέχει πενταπλάσια ραδιοκάλυψη σε σύγκριση με το σύστημα στα 868MHz, σε συνθήκες ελεύθερου χώρου($n = 2$), ενώ σε τυπική αστική διάδοση ($n=3$), η ραδιοκάλυψη είναι τριπλάσια.

Για μία μικρή πόλη ακτίνας 1 km, θεωρούμε τις εξής παραμέτρους:

- Ισχύς εκπομπής: 500mW
- Κέρδος κεραίας πομπού: –10dBi στα 169MHz, 0dBi στα 868MHz
- Κέρδος κεραίας δέκτη: 0 dBi και για τις 2 κεραίες
- Άλλες απώλειες: 4 dB στον πομπό, 1dB στον δέκτη
- Συντελεστής απόσβεσης: 2,5 (ελαφρά αστικό περιβάλλον)

- Περιθώριο εξασθένισης: 7,5dB
- Απώλειες λόγω αναντιστοιχίας στην πόλωση: 3dB
- Απώλεια λόγω διείσδυσης σε κτίρια: 25dB στα 169MHz, 30dB στα 868MHz
- Συνολική ευαισθησία δέκτη: -120dBm στα 169 MHz, -110dBm στα 868MHz.

Ο προϋπολογισμός της ζεύξης (link-budget) για τα δύο συστήματα παρουσιάζεται συνοπτικά στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Προϋπολογισμός ζεύξης (link-budget) για τα δύο συστήματα μετάδοσης (www.alciom.com).

LINK BUDGET V2		alciom	LINK BUDGET V2		alciom
Transmitter					
Output power	27 dBm		Output power	27 dBm	
Or	501,19 mW		Or	501,19 mW	
Frequency	169 MHz		Frequency	868 MHz	
Cabling and connector losses	1 dB		Cabling and connector losses	1 dB	
TX antenna gain	-10 dBi		TX antenna gain	0 dBi	
Packaging losses	3 dB		Packaging losses	3 dB	
Transmitted power	13 dBm		Transmitted power	23 dBm	
Path					
Distance	1000 m		Distance	200 m	
Damping factor			Damping factor		
- Free space: 2			- Free space: 2		
- Shops : 2,2	2,5 (2 à 3)		- Shops : 2,2	2,5 (2 à 3)	
- Offices, light walls : 2,6			- Offices, light walls : 2,6		
- Hard walls : 3			- Hard walls : 3		
Floors crossed	0 (0 à 3)		Floors crossed	0 (0 à 3)	
Fast fading margin	7,5 dB		Fast fading margin	7,5 dB	
Polarisation loss	3 dB		Polarisation loss	3 dB	
Buildig penetration loss	25 dB		Buildig penetration loss	30 dB	
Free space loss	127,46 dB		Free space loss	129,20 dB	
Receiver					
Received power	-114,46 dBm		Received power	-106,20 dBm	
Packaging losses	0 dB		Packaging losses	0 dB	
RX antenna gain	0 dBi		RX antenna gain	0 dBi	
Cabling and connector losses	1 dB		Cabling and connector losses	1 dB	
Net power	-115,46 dBm		Net power	-107,20 dBm	
RX sensitivity @ BER=1%	-120 dBm		RX sensitivity @ BER=1%	-110 dBm	
Link budget	+4,54 dB		Link budget	+2,80 dB	
169MHz			868MHz		

Από τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι με το σύστημα των 169MHz, ολόκληρη η πόλη ακτίνας 1 km μπορεί να καλυφθεί με μία μόνο κεντρική κεραία και με περιθώριο εξασθένισης 4,54dB. Με το σύστημα των 868MHz, μπορούμε να πετύχουμε ζεύξη σε απόσταση 200 m, με περιθώριο εξασθένισης 2,80dB.

Συνεπώς, η μικρή πόλη ακτίνας 1 km θα χρειαζόταν μόνο μία κεραία χρησιμοποιώντας το σύστημα των 169 MHz, ενώ χρησιμοποιώντας το σύστημα των 868MHz, θα χρειαζόταν 8–10 κεραίες (αναμεταδότες), όπως φαίνεται στα σχήματα 3.9 και 3.10.



Σχήμα 3.9:Ραδιοκάλυψη πόλης ακτίνας 1 km με σύστημα μετάδοσης στα 169 MHz(www.alciom.com).



Σχήμα 3.10: Ραδιοκάλυψη πόλης ακτίνας 1 km με σύστημα μετάδοσης στα 868MHz. Η ακτίνα ραδιο-κάλυψης κάθε αναμεταδότη είναι 200m(www.alciom.com).

4. Συμπεράσματα

Η μελέτη των μετρήσεων και της λειτουργίας των ραδιοσταθμών VHF, που πραγματοποιήθηκε για την εν λόγω πτυχιακή εργασία, είχε ως αποτέλεσμα την εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων.

Παρατηρήθηκε ότι οι διαστάσεις και το κόστος των κεραιών σχετίζεται με την επιλογή της συχνότητας. Συγκεκριμένα, όσο υψηλότερη είναι η φέρουσα συχνότητα, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης και τόσο μικρότερες οι διαστάσεις των κεραιών για ορισμένο κέρδος (Gain) των κεραιών. Αυτό όμως συνεπάγεται μικρότερη απόδοση και αξιοπιστία των ενισχυτών. Αντίθετα, όσο μεγαλύτερες είναι οι κεραιές, τόσο μεγαλύτερο είναι και το κέρδος, αλλά ταυτόχρονα αυτό συνεπάγεται και αύξηση του κόστους του σταθμού.

Επιπρόσθετα, η επιλογή συχνότητας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την υλοποίηση μιας ασύρματης ζεύξης, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές μεταξύ των διαφόρων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Η πραγματοποίηση ραδιο ζεύξεων με μεγάλο εύρος ζώνης είναι επιθυμητή διότι αυξάνεται η ικανότητα του συστήματος, όμως πολλές φορές μια δεύτερη παράλληλη ζεύξη μπορεί να αποτελεί μια καλύτερη οικονομικά και τεχνικά λύση.

Τέλος, ύστερα από τη συγκριτική μελέτη που πραγματοποιήθηκε μεταξύ συστημάτων χαμηλότερης συχνότητας (169 MHz) και συστημάτων υψηλότερης συχνότητας (868 MHz), αναδείχθηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ζώνης VHF, σε σχέση με άλλες ζώνες συχνοτήτων.

Παρατηρήθηκε ότι οι απώλειες διάδοσης μέσω αντικειμένων αυξάνουν με τη συχνότητα. Για μια ραδιοζεύξη που λειτουργεί στη συχνότητα 868 MHz, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος θα είναι περίπου 25 φορές χαμηλότερη, σε σχέση με συστήματα συχνότητας 169 MHz, ανεξάρτητα από την απόσταση και το περιβάλλον διάδοσης. Έτσι, μόνο τα εμπόδια που υπάρχουν κατά μήκος της γραμμής οπτικής επαφής μεταξύ των κεραιών είναι σημαντικά και εισάγουν υψηλές απώλειες.

Ακόμη, στη συχνότητα 868 MHz, υπάρχει πλεονέκτημα όσον αφορά την εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών: καθώς το μήκος κύματος είναι μικρότερο στα 868 MHz, τα σημεία χαμηλής λήψης σήματος («μηδενικά σκίασης»), έχουν μικρότερες διαστάσεις σχετικά με την απόσταση διάδοσης. Το τελευταίο θα μπορούσε να δώσει μια πιο ικανοποιητική ποιότητα σήματος στον χρήστη, ακόμα και αν η πιθανότητα μίας αποτυχημένης μετάδοσης σε μια δεδομένη θέση είναι η ίδια και στις δύο συχνότητες.

Εξαιτίας της συμπεριφοράς του χίρπυριτίου, το οποίο παρουσιάζει υψηλότερες χωρητικές απώλειες όταν αυξάνεται η συχνότητα, ο δέκτης θα έχει πάντα καλύτερη ευαισθησία, όταν η συχνότητα είναι χαμηλότερη. Επίσης, το κέρδος του ενισχυτή είναι υψηλότερο στις χαμηλές συχνότητες. Τέλος, οι απώλειες καλωδίων και συνδετήρων είναι μεγαλύτερες σε υψηλότερες συχνότητες.

Ένας πομπός απαιτεί συνήθως λιγότερη ηλεκτρική ισχύ για να επιτύχει την ίδια ισχύ εξόδου σε χαμηλές συχνότητες σε σχέση με υψηλότερες συχνότητες, για μια δεδομένη τεχνολογία.

Μία κεραία στα 169 MHz είναι 5 φορές μεγαλύτερη από μία κεραία στα 868 MHz.

Εάν ο χώρος είναι περιορισμένος, όπως είναι σχεδόν πάντα στις εφαρμογές μέτρησης τουλάχιστον στην πλευρά του πομπού, τότε η κεραία στα 169 MHz θα έχει μικρότερο εύρος ζώνης και θα είναι σημαντικά πιο ευαίσθητη στον αποσυντονισμό.

Οι πομποδέκτες στα 169 MHz είναι ελαφρώς ακριβότεροι από εκείνους των 868 MHz, αλλά αντιπροσωπεύουν μικρότερο μέγεθος της αγοράς.

Συμπερασματικά, μελετώντας ένα πρακτικό παράδειγμα σε μία μικρή πόλη της Γαλλίας ακτίνας 1 km, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για τη ραδιοκάλυψη της πόλης, θα χρειαζόταν μόνο μία κεραία για το σύστημα των 169 MHz, ενώ για το σύστημα των 868 MHz, θα χρειαζόταν τουλάχιστον 8 με 10 κεραίες (αναμεταδότες).

Βιβλιογραφία

- [1] Καψάλης, Χ.,Κωττής, Π.,«Κεραίες, Ασύρματες Ζεύξεις», Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.

- [2] Μαλαχίας, Ν., Σάγος Γ., «Αρχές Ραντάρ και Ηλεκτρονικού Πολέμου», Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1998.
- [3] Ρωμανίδης, Α., «Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 2006.
- [4] Βαρβαρίγος Ε., Μπερμπερίδης Κ., «ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πάτρα 2008.
- [5] Βαρζάκας Π., «ΘΕΩΡΙΑ ‘ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ-ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ’», Διδακτικές Σημειώσεις, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λαμίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρονικής, Λαμία 2008.
- [6] Ζώη Δ. Σ., Ρουμेलιώτης Γ., Κεκάτος Β., Μπερμπερίδης Κ., «Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας, Α' Μέρος», Διδακτικές Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής, 2008.
- [7] Σ. Τσίτσος, «Ασύρματες Επικοινωνίες», Διδακτικές Σημειώσεις, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πληροφορικής και Επικοινωνιών, 2008, <https://www.anamorfosi.teicm.gr>.
- [8] «Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες», Διδακτικές Σημειώσεις, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Τομέας Επικοινωνιών και Επεξεργασίας Σήματος, 2006.
- [9] Αλτινόγλου Χ., «Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών μηνυμάτων στο γήινο χώρο», Πτυχιακή Εργασία, Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού (Α.Ε.Ν.) Μακεδονίας, 2008.
- [10] Διαμαντής Η., «Το τηλεοπτικό σήμα και ο έλεγχός του μέσα από εφαρμογές του παλμογράφου εικόνας», Πτυχιακή Εργασία, Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Παράρτημα Ρεθύμνου, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, 2023.
- [11] Ερτζάν Γ., «Τεχνικές μετάδοσης του σήματος στις τηλεπικοινωνίες», Πτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2023.
- [12] Ράπτης Μ., «Θεωρητική μελέτη και ανάλυση Ασύρματων Επικοινωνιών και υλοποίηση απλού δικτύου με χρήση λογισμικού Matlab», Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδος, Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε., 2016.
- [13] Σαββίδης Γ., «Επίγειες Επικοινωνίες στη Ναυτιλία. Ραδιοτηλέφωνο VHF/MF/HF, Ραδιοτηλέτυπο MF/HF», Πτυχιακή Εργασία., Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού (Α.Ε.Ν.) Μακεδονίας, Σχολή Πλοιάρχων.
- [14] Μακρή Α., «Μελέτη και σχεδίαση επίπεδων ευρυζωνικών κεραιών για εφαρμογές επικοινωνιών υπερ-ευρείας ζώνης (UWB)», Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τομέας Τηλεπικοινωνιών, 2009.
- [15] «Εισαγωγή στον Ηλεκτρομαγνητισμό: 5 Σημαντικές πτυχές», <https://www.el.lambdageeks.com>.
- [16] «Ιονοσφαιρική Διάδοση στα Βραχέα (HF)», <https://www.svlahh.blogspot.com>.
- [17] «Ζώνη Fresnel και η σημασία της στις ασύρματες ζεύξεις», <https://www.kioan.users.uth.gr>.

- [18] «Ραδιοκύματα», <https://www.hellenicaworld.com>.
- [19] «Ζώνες συχνότητων για ηλεκτρονικές επικοινωνίες», <https://www.eur-lex.europa.eu>.
- [20] «Ραδιοφάσμα: η βάση των ασύρματων επικοινωνιών», <https://www.digital-strategy.ec.europa.eu>.
- [21] «Πολιτική της ΕΕ για το ραδιοφάσμα για διασυνοριακές ασύρματες συνδέσεις». <https://www.digital-strategy.ec.europa.eu>.
- [22] «ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ: Η κυματική φύση του φωτός, το πρόβλημα, η λύση», <https://www.oeclass.aua.gr>.
- [23] «Παραγωγή και Μετάδοση Ραδιοηλεκτρονικών Προγραμμάτων»,<https://www.tech-scholi2-lem.schools.ac.cy>.
- [24] Smith, T. D., “THE THEORY OF TELEVISION SIGNAL PROPAGATION”, 1967.
- [25] R. Lacoste, “Long range metering systems: VHF or UHF?”, White paper, 2010.
- [26] “Learn Wireless Basics”, <https://www.commotionwireless.net>.
- [27] IEEE Std 521-2002 Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands. Reaffirmed standard of 1984.
- [28] “Learn Wireless Basics”,<https://www.commotionwireless.net>.
- [29] <https://www.alciom.com>