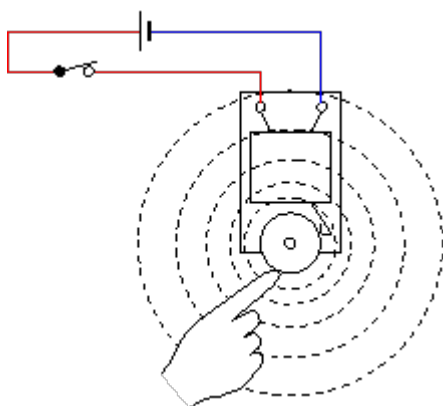


Ραδιοθεωρία

Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

Παλμική κίνηση – ήχος



Ήχος ονομάζεται το αίτιο που διεγείρει το αισθητήριο της ακοής, δηλαδή το αυτί μας. Οι ήχοι παράγονται από παλλόμενα σώματα. Αυτό είναι εύκολο να το διαπιστώσουμε, αν με την άκρη του δακτύλου μας αγγίζουμε, για παράδειγμα, το καμπανάκι ενός ηλεκτρικού κουδουνιού την ώρα που αυτό ηχεί. Θα διαπιστώσουμε τότε ότι το κουδούνισμα συνοδεύεται από αισθητές δονήσεις του μετάλλου (σχήμα 1-1).

Σχήμα 1-1. Παραγωγή ήχου από παλμική κίνηση σώματος.

Διάδοση του ήχου

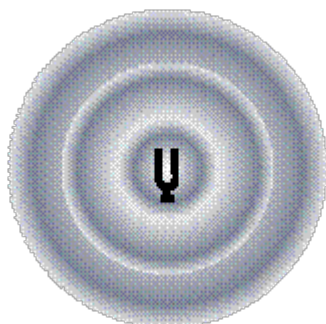
Για να φτάσει ο ήχος μέχρι το αυτί μας, πρέπει να διασχίσει την απόσταση που το χωρίζει από την πηγή του, διαδιδόμενος μέσα στον αέρα. Αυτό γίνεται ως εξής :

Η επιφάνεια του σώματος που πάλλεται θέτει σε κίνηση τα μόρια του αέρα, με τα οποία βρίσκεται σε επαφή. Επειδή ο αέρας είναι ελαστικό μέσο, τα κινούμενα μόριά του μεταδίδουν την κίνηση και στα γειτονικά τους μόρια. Με τον τρόπο αυτό οι παλμικές κινήσεις του σώματος που παράγει τον ήχο προκαλούν ένα "πήγαινε – έλα" στα μόρια του αέρα, το οποίο διαδίδεται σφαιρικά στο γύρω χώρο σαν κύμα και ονομάζεται *ακουστικό κύμα* (σχήμα 1-2).

Το κύμα αυτό αποτελείται από τοπικά πυκνώματα και αραιώματα του αέρα, που προκαλούν τοπικές αυξομειώσεις της πίεσής του. Αυτές οι αυξομειώσεις διαδίδονται μέσα στον αέρα με ταχύτητα που εξαρτάται από την πυκνότητα και τη θερμοκρασία του. Σε γενικές γραμμές είναι περίπου 340 μέτρα το δευτερόλεπτο.

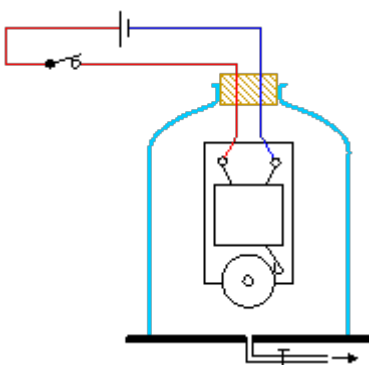
Όταν το ηχητικό κύμα φτάσει στο αυτί μας, οι αυξομειώσεις της πίεσης προκαλούν παλμικές κινήσεις σε μια μεμβράνη στο εσωτερικό του, που ονομάζεται τύμπανο. Οι παλμικές κινήσεις του τυμπάνου, μέσα από κάποιο περίπλοκο ανατομικό

σχηματισμό, διεγείρουν μια σειρά από ακουστικά νεύρα και προκαλούν στον εγκέφαλο το αίσθημα της ακοής.



Σχήμα 1-2. Διάδοση του ήχου.

Όμως δεν μπορούμε να ακούμε κάθε ήχο που παράγει κάθε παλλόμενο σώμα. Για να συμβεί αυτό, πρέπει το πλήθος των παλμικών κινήσεων σε ένα δευτερόλεπτο να είναι μεταξύ 20 και 20.000 ή, όπως αλλιώς λέμε, η συχνότητα των δονήσεων να είναι μεταξύ 20 Hz (Χερτζ) και 20 kHz (κιλοχέρτζ).



Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι για να υπάρξει ήχος, πρέπει να υπάρχει και ελαστικό μέσο για τη διάδοσή του. Αυτό εύκολα το διαπιστώνουμε, αν καλύψουμε το ηλεκτρικό κουδούνι του παραπάνω παραδείγματος με αεροστεγές κάλυμμα και αφαιρέσουμε τον αέρα. Τότε παρόλο που το κουδούνι θα χτυπά, ο ήχος δε θα ακούγεται (σχήμα 1-3).

Σχήμα 1-3. Αδυναμία διάδοσης του ήχου στο κενό.

Φαίνεται λοιπόν ότι ο ήχος διαδίδεται μόνο μέσα σε υλικά σώματα. Κυριότερο μέσο μετάδοσής του είναι ο αέρας. Εξίσου καλά όμως, ίσως και καλύτερα, ο ήχος διαδίδεται και μέσα σε υγρά και στερεά σώματα. Αυτές όμως οι περιπτώσεις δεν ενδιαφέρουν το συγκεκριμένο μάθημα.

Απλοί και σύνθετοι ήχοι

Οι ήχοι τους οποίους ακούμε δεν προκαλούν πάντοτε την ίδια εντύπωση. Οι ήχοι διακρίνονται σε *τόνους*, *φθόγγους*, *θορύβους* και *κρότους*. Τη μορφή όλων αυτών μπορούμε εύκολα να την απεικονίσουμε, χρησιμοποιώντας ένα μικρόφωνο συνδεδεμένο με έναν παλμογράφο.

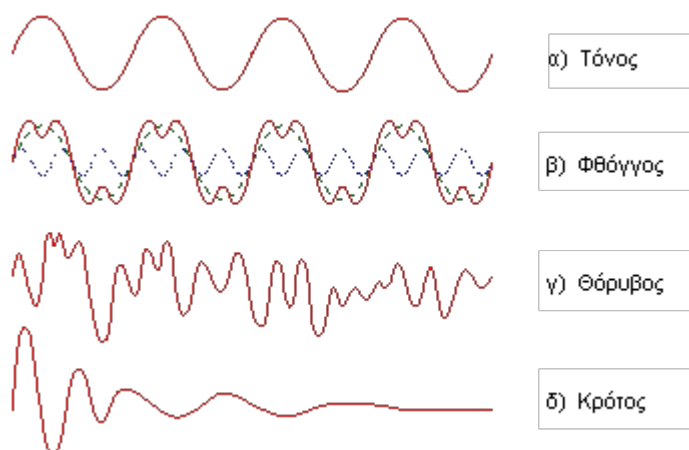
Οι τόνοι είναι η απλούστερη μορφή ήχων. Παράγονται μόνον από ορισμένα εργαστηριακά όργανα (π.χ. διαπασών ή γεννήτριες σημάτων) και στο άκουσμά τους θυμίζουν τα σφυρίγματα. Προέρχονται από την *αρμονική ταλάντωση* των υλικών μέσων και γι' αυτό η μορφή τους στον παλμογράφο θυμίζει τη μαθηματική συνάρτηση *ημίτονο*.

Οι φθόγγοι είναι ήχοι περισσότερο περίπλοκοι. Παράγονται από τα συνηθισμένα μουσικά όργανα και αντιστοιχούν σε ταλαντώσεις οι οποίες δεν είναι απλές αρμονικές. Το άκουσμά τους είναι συνήθως ευχάριστο. Οι φθόγγοι μπορούν να αναλυθούν σε αθροίσματα απλών τόνων, οι συχνότητες των οποίων είναι όλες ακέραια πολλαπλάσια μιας βασικής και ονομάζονται *αρμονικές*.

Οι θόρυβοι είναι ήχοι που αντιστοιχούν σε ακανόνιστα κύματα και δεν παρουσιάζουν καμιά περιοδικότητα. Το άκουσμά τους προκαλεί δυσάρεστη εντύπωση.

Οι κρότοι τέλος αντιστοιχούν σε ισχυρές και παροδικές δονήσεις του αέρα, όπως, για παράδειγμα, συμβαίνει κατά τις εκπυρσοκροτήσεις όπλων.

Απ' όλα τα παραπάνω είδη οι τόνοι ονομάζονται απλοί ήχοι, ενώ όλοι οι υπόλοιποι ονομάζονται σύνθετοι ήχοι. Η μορφή τους απεικονίζονται στο σχήμα 1-4. Παρατηρήστε ότι ο φθόγγος του σχήματος προκύπτει ως άθροισμα δύο τόνων, εκ των οποίων ο δεύτερος έχει συχνότητα τριπλάσια από τον πρώτο.



Σχήμα 1-4. Απλοί και σύνθετοι ήχοι.

Χαρακτηριστικά του ήχου

Τα χαρακτηριστικά ενός ήχου διακρίνονται σε αντικειμενικά και υποκειμενικά. Αντικειμενικά ονομάζονται εκείνα που ανιχνεύονται από επιστημονικά μετρητικά όργανα, ενώ τα υποκειμενικά καθορίζονται από τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τον ήχο με το αισθητήριο της ακοής. Για κάθε αντικειμενικό χαρακτηριστικό του ήχου υπάρχει και το αντίστοιχο υποκειμενικό.

Τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- α) **Η ένταση.** Είναι η μηχανική ισχύς του ήχου, η οποία διέρχεται από μια επιφάνεια που τη διασχίζει ο ήχος και εκφράζεται σε Watt/m^2 . Η ένταση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του πλάτους της ταλάντωσης των μορίων του υλικού, μέσα στο οποίο διαδίδεται ο ήχος.
- β) **Η συχνότητα.** Είναι το πλήθος των ταλαντώσεων που εκτελούν τα μόρια του υλικού μέσα σε ένα δευτερόλεπτο. Η συχνότητα εκφράζεται σε Hz (Χερτζ).
- γ) **Το φασματικό περιεχόμενο.** Εκφράζει το πλήθος και τη σχετική ένταση των απλών ήχων που απαρτίζουν ένα σύνθετο ήχο.

Τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- α) **Η ακουστότητα.** Είναι το γνώρισμα το οποίο μας επιτρέπει να χαρακτηρίσουμε έναν ήχο ισχυρό ή αδύναμο. Η ακουστότητα εξαρτάται κυρίως από την ένταση, αλλά και από τη συχνότητα του ήχου. Με σταθερή την ένταση, ήχοι που έχουν χαμηλή ή υψηλή συχνότητα (π.χ. 100 Hz ή 10.000 Hz) ακούγονται με μικρότερη ακουστότητα απ' ό,τι ήχοι με ενδιάμεση συχνότητα (π.χ. 1.000 Hz).
- β) **Το ύψος.** Είναι το γνώρισμα το οποίο μας επιτρέπει να χαρακτηρίσουμε έναν ήχο οξύ ή βαρύ. Το ύψος εξαρτάται από τη συχνότητα, αλλά δευτερευόντως επηρεάζεται και από την ένταση του ήχου. Έχει παρατηρηθεί ότι ήχοι ίδιας συχνότητας ακούγονται λιγότερο οξείς, όσο μεγαλώνει είναι η έντασή τους.
- γ) **Η χροιά.** Είναι το γνώρισμα το οποίο μας επιτρέπει να ξεχωρίζουμε μεταξύ τους δύο ήχους με το ίδιο ύψος και ακουστότητα, οι οποίοι όμως παράγονται από διαφορετικές ηχητικές πηγές. Η χροιά εξαρτάται από το φασματικό περιεχόμενο του ήχου, αλλά επηρεάζεται και από την έντασή του.

Ορισμός του σήματος

Τονίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο ότι το βασικό ηλεκτρικό σήμα είναι το ηλεκτρικό μέγεθος που έχουμε στην έξοδο του αισθητήρα

μετατροπέα και αντιπροσωπεύει το αρχικό φυσικό μέγεθος της πληροφορίας.



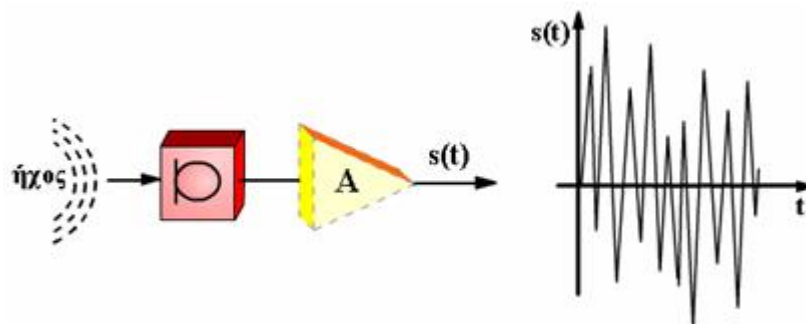
Σχήμα 3.3.1: Σήματα στην έξοδο του αισθητήρα

Παραδείγματα, που αναφέρθηκαν και σε άλλες περιπτώσεις, είναι το ηλεκτρικό σήμα στην έξοδο του μικροφώνου (σχήμα 3.3.1α) ή του φωτοκυττάρου της κάμερας (σχήμα 3.3.1β). Είναι μεταβαλλόμενα μεγέθη και γι' αυτό τα συμβολίζουμε ως συνάρτηση του χρόνου με τον εξής τρόπο:

$v(t)$: μεταβαλλόμενη τάση

$i(t)$: μεταβαλλόμενο ρεύμα

$s(t)$: γενικός συμβολισμός ενός βασικού σήματος.



Οι χρονικές μεταβολές του σήματος είναι ίδιες με αυτές του αρχικού μεγέθους, για παράδειγμα του αρχικού ήχου. Την ακριβή εικόνα του σήματος μπορούμε να την παρατηρήσουμε με το εργαστηριακό όργανο που λέγεται παλμογράφος, του οποίου τη χρήση γνωρίζουμε από τα εργαστηριακά μας μαθήματα. Έτσι, αν οι μεταβολές πίεσης του αέρα στην είσοδο του μικροφώνου ακολουθούν τη μορφή της γραφικής παράστασης 3.3.2α, συνδέοντας τον παλμογράφο στην έξοδο του μικροφώνου (ή του ενισχυτή που ακολουθεί) θα παρατηρήσουμε τη μορφή του σήματος που βλέπουμε στην εικόνα 3.3.2.

(α)

(β)

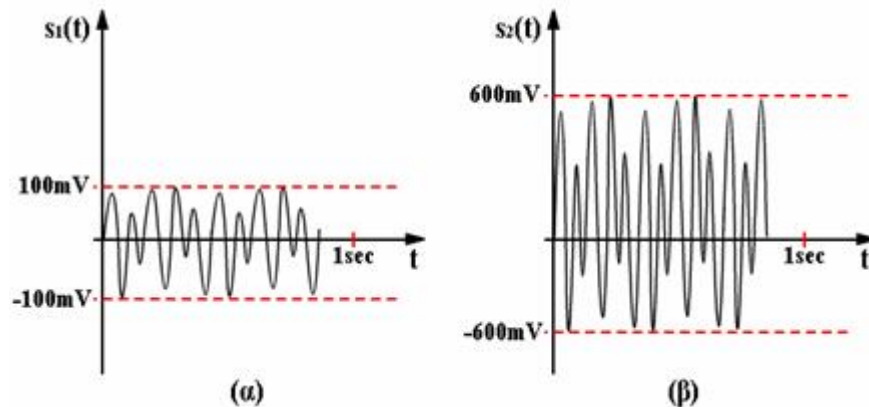
Σχήμα 3.3.2: Εικόνα σήματος στην έξοδο του μικροφώνου

Το γεγονός ότι σχεδιάζουμε το σήμα με θετικές και αρνητικές τιμές δηλώνει ότι το ρεύμα στην έξοδο του μικροφώνου μπορεί να έχει θετική ή αρνητική φορά, όπως το αντίστοιχο ηχητικό κύμα δημιουργεί υπερπίεσεις ή υποπίεσεις στη μεμβράνη του μικροφώνου (κεφάλαιο 1). Το ίδιο θα συνέβαινε, αν μιλούσαμε για το ρεύμα ή την τάση στην έξοδο του φωτοκυττάρου. Ένα τέτοιο σήμα, που παρουσιάζει συνεχείς μεταβολές στο

χρόνο, το ονομάζουμε αναλογικό σήμα σε αντίθεση με τα παλμικά ή ψηφιακά σήματα που παρουσιάζουν ασυνέχειες.

Τα ηλεκτρικά σήματα γενικά χαρακτηρίζονται:

- **Από την ισχύ τους ή απλούστερα την έντασή τους.** Είναι το μέγεθος που επιτρέπει να συγκρίνουμε και να εκτιμήσουμε αν ένα σήμα είναι ισχυρότερο ή ασθενέστερο από ένα άλλο αντίστοιχο σήμα. Στα σύνθετα σήματα που έχουν τυχαία μορφή ο ακριβής υπολογισμός της ισχύος δεν είναι πάντοτε εύκολη υπόθεση.
- **Από το ρυθμό** με τον οποίο εξελίσσονται στο χρόνο (γρήγορα ή αργά, απότομα ή λιγότερο απότομα, έχουμε πολλές ή λίγες αλλαγές της τιμής του σήματος στη μονάδα του χρόνου;). Ο ακριβής προσδιορισμός των ρυθμών μεταβολής ενός σήματος επίσης δεν είναι πάντοτε εύκολη υπόθεση. Στον παλμογράφο απλώς μπορούμε να συγκρίνουμε αυτούς τους ρυθμούς μεταξύ δύο σημάτων (σχήμα 3.3.3).



Σχήμα 3.3.3: Το σήμα (β) παρουσιάζει γρηγορότερους ρυθμούς μεταβολών από το (α) και έχει μεγαλύτερη ένταση

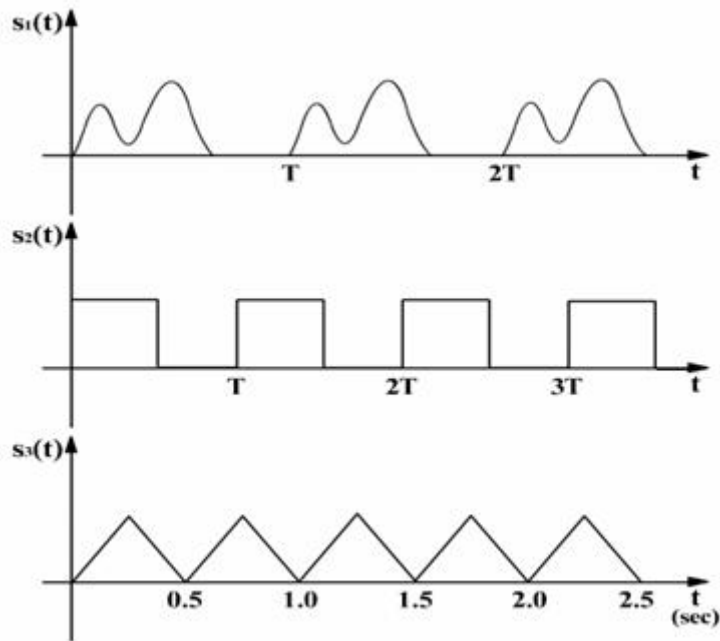
Διάκριση των σημάτων

Για να διευκολύνουμε τη μελέτη των σημάτων στην ηλεκτρονική και ιδιαίτερα στις τηλεπικοινωνίες, τα διακρίνουμε σε:

- Περιοδικά σήματα και
- μη περιοδικά σήματα.

Περιοδικό σήμα:

Ένα σήμα το αποκαλούμε περιοδικό, όταν επαναλαμβάνεται στο χρόνο (σχήμα 3.3.4), δηλαδή παίρνει μετά από συγκεκριμένο χρόνο τις ίδιες τιμές.



Σχήμα 3.3.4: Περιοδικά σήματα

Αυτός ο συγκεκριμένος χρόνος ονομάζεται **περίοδος** και συμβολίζεται T .

Δηλαδή, $s(t) = s(t+n \cdot T)$, όπου n ακέραιος αριθμός

Στο παράδειγμα του σχήματος η περίοδος του σήματος είναι $T = 0,5 \text{ sec} = 500 \text{ msec}$.

Το αντίστροφο της περιόδου ενός περιοδικού σήματος ονομάζεται **συχνότητα**, συμβολίζεται F (ή f) και μετριέται σε Ερτζ (Hertz = sec^{-1} : Hz). Για το παράδειγμα μας ισχύει:

$$F = 1/T = 1/(5 \cdot 10^{-1}) = 2 \text{ sec}^{-1} = 2 \text{ Hz}.$$

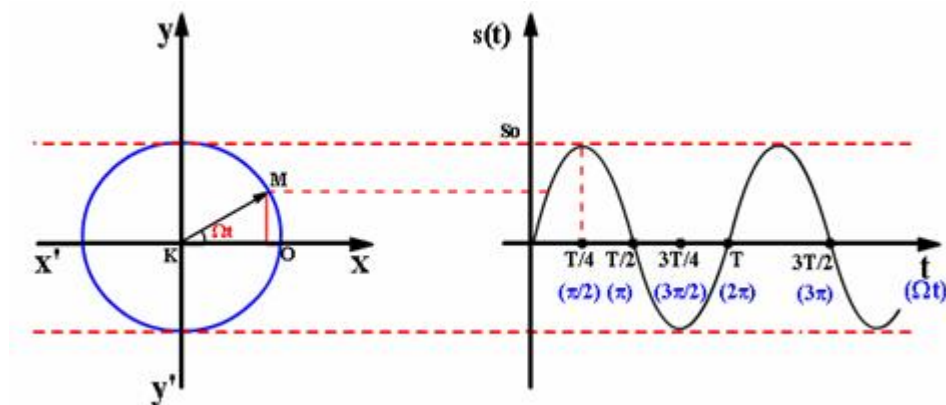
Η συχνότητα εκφράζει το ρυθμό επανάληψης του σήματος στη μονάδα του χρόνου που είναι το sec.

Εφαρμογή 1: Ένα περιοδικό σήμα έχει περίοδο $1,5 \mu\text{s}$. Να προσδιοριστεί η συχνότητα του.

$$\text{Λύση: } F = 1/1,5 \cdot 10^{-6} = 0,66 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 660 \text{ kHz}$$

Εφαρμογή 2: Η συχνότητα ενός περιοδικού σήματος είναι 18 kHz . Να προσδιοριστεί η περίοδος του σήματος.

$$\text{Λύση: } T = 1/F = 1/18 \cdot 10^3 = 55,5 \cdot 10^{-6} \text{ sec} = 55,5 \mu\text{s}$$



Το απλούστερο περιοδικό σήμα είναι το **ημιτονικό σήμα**, που το έχουμε γνωρίσει και από τα μαθήματα ηλεκτρονικής και ηλεκτροτεχνίας. Είναι το βασικότερο σήμα στις τηλεπικοινωνίες και το χρησιμοποιούμε πάντοτε σαν σήμα αναφοράς, για να περιγράψουμε και να χαρακτηρίσουμε όλα τα άλλα ηλεκτρικά σήματα. Η εικόνα του ημιτονικού σήματος στον παλμογράφο είναι αυτή του σχήματος 3.3.5 .

Σχήμα 3.3.5: Ημιτονικό σήμα. Αντιστοίχιση των τιμών του στον τριγωνομετρικό κύκλο

Υπενθυμίζουμε ότι το ημιτονικό σήμα ονομάζεται έτσι, διότι οι τιμές που παίρνει σε μιά περίοδο T αντιστοιχούν στις τιμές του ημιτόνου της γωνίας που σχηματίζεται στον τριγωνομετρικό κύκλο, όταν ένα κινητό, ξεκινώντας από το σημείο O , κινείται για να διαγράψει πλήρη κύκλο στο χρόνο μιάς περιόδου με σταθερή γωνιακή ταχύτητα.

Η πλήρης γωνία του τριγωνομετρικού κύκλου είναι 2π .

Άρα, η γωνιακή ταχύτητα είναι:

$$\Omega = 2\pi/T = 2\pi \cdot F$$

όπου F η συχνότητα του σήματος, που ορίσαμε προηγούμενα.

Στην ηλεκτρονική και τις τηλεπικοινωνίες για το μέγεθος Ω δεν χρησιμοποιούμε τον όρο γωνιακή ταχύτητα, αλλά **κυκλική συχνότητα**.

Είναι προφανές ότι τη χρονική στιγμή t η σχηματιζόμενη γωνία $\Phi = OKM$ (σχήμα 3.3.5) είναι:

$$\Phi = \Omega \cdot t = (2\pi/T) \cdot t = (2\pi \cdot F) \cdot t .$$

Έτσι η έκφραση του ημιτονικού σήματος είναι:

$$s(t) = S_0 \cdot \sin(\Omega t) = S_0 \cdot \sin(2\pi F t) . \quad (1)$$

Το S_0 είναι η μέγιστη τιμή του σήματος και την ονομάζουμε πλάτος του σήματος.

Υπενθυμίζουμε ότι η ισχύς του ημιτονικού σήματος που αποδίδεται σε ωμική αντίσταση R δίνεται από τη σχέση:

$$P = S_0^2 / 2R \quad (2)$$

Η έκφραση (1) του ημιτονικού σήματος προϋποθέτει ότι το σήμα μας, όταν αρχίσαμε να το μετράμε, δηλαδή όταν $t = 0$, ήταν $s(t) = 0$.

Πράγματι $\Omega t = 0$, άρα $s(t) = S_o \cdot \sin 0 = 0$.

Αν όμως το σήμα, όταν αρχίσαμε τη μέτρησή του, δεν ήταν μηδέν, αλλά είχε τιμή διάφορη του μηδενός, θα είμαστε υποχρεωμένοι να γράψουμε:

$$s(t) = S_o \cdot \sin(\Omega t + \phi_o) . \quad (3)$$

Πράγματι, για $t = 0$ το σήμα μας έχει τιμή $s(t) = S_o \cdot \sin \phi_o$.

Το μέγεθος ϕ_o ονομάζεται αρχική φάση του σήματος.

Παράδειγμα ημιτονικού σήματος είναι αυτό που έχουμε στην έξοδο του μικροφώνου, όταν διεγείρουμε το μικρόφωνο με τον ήχο του διαπασών. Ημιτονικό είναι επίσης το σήμα που έχουμε στην έξοδο μιάς εργαστηριακής γεννήτριας ημιτονικών σημάτων, που την ρυθμίζουμε σε συγκεκριμένη συχνότητα.

Θα τελειώσουμε τη γνωριμία μας με το ημιτονικό σήμα με μια σημαντική παρατήρηση. Αναφέραμε προηγουμένως ότι το ημιτονικό σήμα είναι το πιο απλό σήμα και ότι χρησιμοποιείται σαν σήμα αναφοράς για τη μελέτη της ηλεκτρονικής και των τηλεπικοινωνιών. Αυτό συμβαίνει διότι το ημιτονικό σήμα χαρακτηρίζεται λειτουργικά από μια βασική ιδιότητα: Όταν μια ημιτονική τάση ή ρεύμα διεγείρει ένα κύκλωμα, τότε παντού στο κύκλωμα, σε οποιοδήποτε κλάδο του, αποκαθίσταται ημιτονική τάση ή ρεύμα. Με απλά λόγια το ημιτονικό σήμα διατηρεί σε οποιοδήποτε σύστημα, απλό ή σύνθετο, τη μορφή και τη συχνότητα του. Το μόνο που αλλάζει είναι το πλάτος του (S_o) και η φάση του (ϕ_o). Αποδεικνύεται έτσι ότι η ανάλυση και ο υπολογισμός ή ο προσδιορισμός του κυκλώματος είναι εύκολος. Την αλήθεια αυτής της παρατήρησης μπορούμε εύκολα να την επαληθεύσουμε πειραματικά στο εργαστήριο με την βοήθεια του παλμογράφου.

Εφαρμογή 3: Να δοθεί η έκφραση ενός ημιτονικού σήματος συχνότητας 25 kHz και πλάτους 10 V.

$$\text{Λύση: } s(t) = 10 \sin(2\pi \cdot 25 \cdot 10^3 t)$$

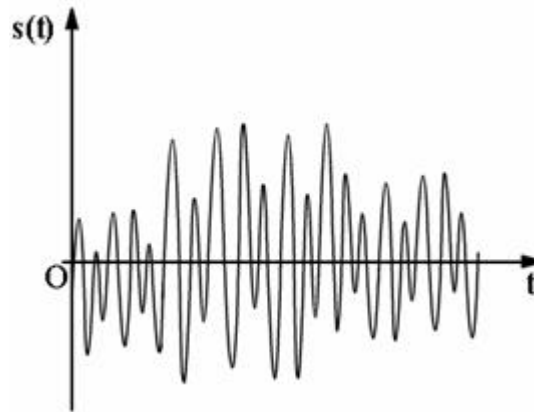
Εφαρμογή 4: Να υπολογιστεί η ισχύς ημιτονικής τάσης, σε αντίσταση $R = 50\Omega$, όταν το πλάτος του σήματος είναι 20 Volt.

$$\text{Λύση: } P = S_o^2 / 2R = 20^2 / 2 \cdot 50 = 4 \text{ Watt}$$

Μη περιοδικά σήματα

Τα τυχαία σήματα που δεν παρουσιάζουν επαναληπτικότητα ονομάζονται μη περιοδικά σήματα (σχήμα 3.3.6). Για παράδειγμα η ομιλία μας είναι μη περιοδικό σήμα.

Το σήμα που θα προκύψει στην έξοδο του φωτοκυττάρου από την σάρωση μιας εικόνας με την κάμερα είναι μη περιοδικό σήμα.



Τα περισσότερα ηλεκτρικά σήματα στη φύση είναι μη περιοδικά σήματα.

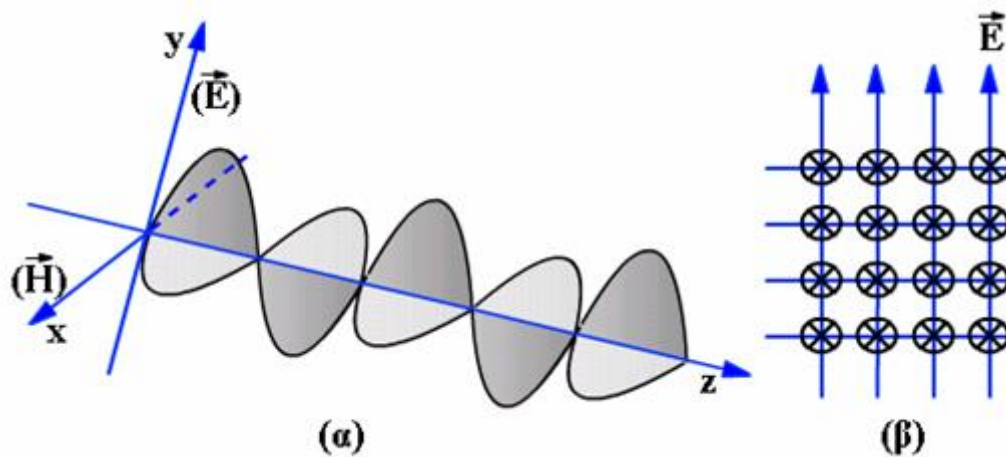
Σχήμα 3.3.6: Μη περιοδικό σήμα

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Ορισμός του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Στις τηλεπικοινωνίες, ιδιαίτερα στις ραδιοεπικοινωνίες (ασύρματες ζεύξεις), χρησιμοποιούνται **ηλεκτρομαγνητικά κύματα**.

Τι είναι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα; Η φυσική αποδεικνύει ότι κάθε ηλεκτρικό κύκλωμα που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα ακτινοβολεί μια ποσότητα της χορηγούμενης ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος.



Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι μια μορφή ενέργειας συνδυασμένου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, που είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης τους, όπως φαίνεται στα σχήματα 3.7.1(α), (β) που ακολουθούν.

Σχήμα 3.7.1: (α) Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. (β) Οι άξονες των διανυσμάτων E και H και της διάδοσης του κύματος.

Στο σχήμα (3.7.1α) φαίνεται ο συνδυασμός των κάθετων πεδίων (ηλεκτρικό πεδίο E και μαγνητικό πεδίο H), που εμφανίζονται ως ημιτονικά σήματα. Στο σχήμα (3.7.1β) απλοποιημένα σημειώνονται οι διευθύνσεις των διανυσμάτων έντασης των δύο πεδίων και, κάθετα προς το χαρτί του βιβλίου, η διεύθυνση διάδοσης.

Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό είναι η ταχύτητα διάδοσης του φωτός, το οποίο και αυτό είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

$$c = 300.000 \text{ km/sec} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$$

Αν η διάδοση δε γίνεται στο κενό, αλλά σε άλλο μέσο, για παράδειγμα, σε υγρό, σε γυαλί ή σε κάποιο καλώδιο, η ταχύτητα είναι διαφορετική και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c' = c/\sqrt{\epsilon} \quad , \quad (6)$$

όπου ϵ η διηλεκτρική σταθερά του υλικού.

Βασικό χαρακτηριστικό μέγεθος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, είναι το **‘μήκος κύματος’**, που συνήθως συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα λ .

Μήκος κύματος είναι η απόσταση που διανύει διαδιδόμενο το κύμα στο χρονικό διάστημα της περιόδου T του ηλεκτρικού σήματος από το οποίο προήλθε. Δηλαδή:

$$\lambda = c \cdot T \quad (7)$$

Αν, αντί για την περίοδο, χρησιμοποιήσουμε την συχνότητα f , έχουμε:

Καθώς $f = 1/T$, τότε $\lambda = c/f$

Εφαρμογή 1: Να υπολογιστεί το μήκος κύματος, όταν η συχνότητα του είναι $f = 40 \text{ MHz}$

$$\text{Λύση: } \lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 4 \cdot 10^7 = 0,75 \cdot 10 \text{ m} = 7,5 \text{ m}$$

Εφαρμογή 2: Να υπολογιστεί η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε μέσον που παρουσιάζει σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon = 2,25$.

$$\begin{aligned} \text{Λύση: } c' &= c/\sqrt{\epsilon} = 3 \cdot 10^8 / \sqrt{2,25} = 3 \cdot 10^8 / 1,5 = \\ &= 2 \cdot 10^8 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

Ισχύς και πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο του κύματος, πάντοτε κάθετα μεταξύ τους, έχουν την ίδια φάση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7.1.

Το επίπεδο του ηλεκτρικού πεδίου ορίζει την κατεύθυνση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, η οποία ονομάζεται **‘πόλωση’** του κύματος. Όταν το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου είναι κατακόρυφο, λέμε ότι το κύμα είναι κατακόρυφα πολωμένο. Αν το ίδιο επίπεδο είναι οριζόντιο, λέμε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι οριζόντια πολωμένο. Όταν το επίπεδο αυτό αλλάζει συνεχώς, δηλαδή περιστρέφεται, τότε έχουμε

κυκλική πόλωση του κύματος. Η πόλωση του κύματος σχετίζεται με τον προσανατολισμό της κεραίας που το ακτινοβολεί. Όταν η κεραία είναι κατακόρυφη, δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικό κύμα κατακόρυφα πολωμένο. Όταν η κεραία είναι οριζόντια, δημιουργεί οριζόντια πολωμένο κύμα. Αποδεικνύεται ότι οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου (E) και του μαγνητικού πεδίου (H) ενός κύματος δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Όταν πρόκειται για διάδοση στο κενό, συνδέονται με τη σχέση:

$$E/H = 120\pi = 377 \Omega \quad (8)$$

Υπενθυμίζουμε ότι το μέγεθος E, τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, εκφράζεται σε Volt/m. Το μέγεθος H, ένταση του μαγνητικού πεδίου, εκφράζεται αντίστοιχα σε A/m. Έτσι, εύκολα διαπιστώνουμε ότι το μέγεθος E/H εκφράζεται σε Ω και δηλώνει την ισοδύναμη αντίσταση του κενού.

Σε κάποια απόσταση από την πηγή δημιουργίας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (π.χ. την κεραία εκπομπής) η ηλεκτρομαγνητική ισχύς ανά μονάδα επιφανείας, που την αποκαλούμε **πυκνότητα ισχύος**, όταν E και H είναι οι τιμές των πεδίων σε αυτή την περιοχή, δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = E \cdot H \quad (9)$$

και μετριέται σε $(V/m) \cdot (A/m) = \text{Watt}/m^2$

Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως θεώρημα του Poynting (Πούτινγκ), προς τιμή αυτού που την διατύπωσε. Αντικαθιστώντας, βρίσκουμε ότι:

$$\rho = E^2 / 120\pi \quad (10)$$

Εφαρμογή 3: Σε συγκεκριμένο σημείο μετρούμε ένταση του μαγνητικού πεδίου ηλεκτρομαγνητικού κύματος $H = 1,5 \text{ A/m}$. Να προσδιοριστεί στο συγκεκριμένο σημείο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E.

Λύση: $E = 377(\Omega) \cdot H = 377(\Omega) \cdot 1,5(A/m) = 565,5 \text{ V/m}$

Εφαρμογή 4: Για τις τιμές του προηγούμενου παραδείγματος, να προσδιοριστεί στο ίδιο σημείο η πυκνότητα ισχύος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Λύση: Από την σχέση (9), αντικαθιστώντας βρίσκουμε: $\rho = 848,25 \text{ W/m}^2$

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Στην φυσική αποδεικνύεται, ότι η ακτινοβολούμενη ενέργεια στο χώρο είναι σημαντική, όταν οι διαστάσεις των κυκλωμάτων, και ιδιαίτερα της κεραίας που ακτινοβολεί, είναι ίδιου μεγέθους με το μήκος κύματος. Αυτό το σχολιάσαμε και σε προηγούμενη παράγραφο. Τα χρησιμοποιούμενα

λοιπόν επαγωγικά κυκλώματα και οι κεραίες είναι μικρότερες στις υψηλότερες συχνότητες.

Η μελέτη της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δεν είναι εύκολο πρόβλημα. Στο κενό, χωρίς εμπόδια, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται σφαιρικά και η ισχύς του αποσβήνεται αντιστρόφως ανάλογα προς το τετράγωνο της απόστασης. Δηλαδή, κάθε φορά που διπλασιάζεται η απόσταση από την πηγή (κεραία), το ηλεκτρομαγνητικό κύμα γίνεται τέσσερες φορές ασθενέστερο.

Όταν υπάρχουν εμπόδια, η συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος θυμίζει αυτήν του φωτός. Υπόκειται σε ανακλάσεις, απορροφήσεις, δημιουργεί σκιάσεις έντονες ή λιγότερο έντονες κ.λ.π. Η φυσική και η ραδιοηλεκτρολογία μελετά λεπτομερώς τα φαινόμενα που εξαρτώνται πάρα πολύ από τη συχνότητα ή το μήκος κύματος. Για να διευκολυνθεί η μελέτη της συμπεριφοράς των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, οι επιστήμονες έχουν διαιρέσει το **‘ηλεκτρομαγνητικό φάσμα’** – όπως συνήθως το ονομάζουμε – σε ζώνες, ανάλογα με τη συχνότητα του κύματος. Αυτές εκτείνονται από τις μικρές συχνότητες, έως το φως και τις ακτίνες X, που χρησιμοποιούνται στην ιατρική για τις ακτινογραφίες και φαίνονται στον πίνακα Α, που ακολουθεί:

Πίνακας Α: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και ονοματολογία

Ζώνη συχνοτήτων	Ονοματολογία	Συμβολισμός
100 Hz - 3 kHz	Άκρως Χαμηλές Συχνότητες	ELF
3 kHz - 30 kHz	Υπέρμακρα	VLF
30 kHz - 300 kHz	Μακρά	LF
300kHz - 3 MHz	Μεσαία	MF
3MHz - 30 MHz	Βραχεία	HF
30 MHz - 300MHz	Υπερβραχεία	VHF
300MHz - 3 GHz	Δεκατομετρικά Μικροκύματα	UHF
3 GHz - 30GHz	Εκατοστομετρικά Μικροκύματα	SHF
30 GHz - 300GHz	Χιλιοστομετρικά Μικροκύματα	EHF
300GHz - 10^{14}	Υπέρυθρες ακτίνες	IR
10^{14} - 10^{16}	Ορατό φώς	
10^{16} - 10^{18}	Υπεριώδεις ακτίνες	UV
10^{18} -	Ακτίνες X	X

- Στις ραδιοεπικοινωνίες σήμερα χρησιμοποιούνται περισσότερο οι συχνότητες από 100 kHz έως και 60 GHz ($1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$). Όσο αναπτύσσεται η τεχνολογία, γίνεται προσπάθεια να εκμεταλλευτούμε συχνότητες ακόμα υψηλότερες, έως και 300 GHz.
- Στις οπτικές επικοινωνίες, όπου το μέσο μετάδοσης είναι ειδικό γυάλινο καλώδιο, δηλαδή η οπτική ίνα, αξιοποιείται το υπέρυθρο (IR) και το ορατό φάσμα του φωτός.

Στον πίνακα Β δίνονται αναλυτικά οι ζώνες που χρησιμοποιούνται στις ραδιοεπικοινωνίες με την ονομασία τους και τις συχνότητες που αντιστοιχούν.

Πίνακας Β: Οι ζώνες στις ραδιοεπικοινωνίες (κατά IEEE ^{*})

<u>Συμβολισμός</u>	<u>Συχνότητες</u>
LF	30- 300 kHz
MF	300- 3000 kHz
HF	3 - 30 MHz
VHF	30- 300 MHz
UHF	300- 1000 MHz
L	1 - 2 GHz
S	2 - 4 GHz
C	4 - 8 GHz
X	8 - 12 GHz
Ku	12 - 18 GHz
K	18 - 27 GHz
Ka	27 - 40 GHz

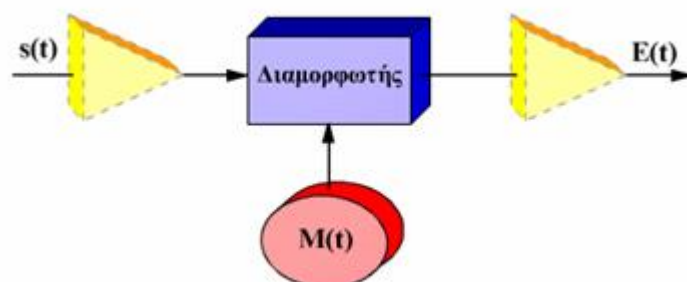
(* IEEE: International Electrical Electronic Engineering)

Διαμορφώσεις

Γενικά περί διαμορφώσεων

Στην παράγραφο 3.6 είδαμε ότι το βασικό σήμα που αντιπροσωπεύει την πληροφορία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι απ'ευθείας μεταδόσιμο. Αυτό τεκμηριώθηκε με διάφορα παραδείγματα.

Για τη μετάδοση ενός βασικού σήματος, καταφεύγουμε στην αξιοποίηση (χρήση) ενός σήματος πολύ μεγαλύτερης συχνότητας, που παίζει το ρόλο του μεταφορέα, γι' αυτό το ονομάζουμε και φέρον σήμα. Σε κάποιο από τα χαρακτηριστικά μεγέθη του φέροντος (πλάτος, συχνότητα, φάση) θα απεικονίσουμε το βασικό σήμα. Το φέρον επιλέγεται με χαρακτηριστικά που το προσαρμόζουν στο κανάλι μετάδοσης και στη συγκεκριμένη εφαρμογή που θέλουμε να κάνουμε.



Αυτή τη διαδικασία την ονομάζουμε διαμόρφωση και γενικά περιγράφεται στο σχήμα 3.8.1.

Σχήμα 3.8.1: Γενικά η διαδικασία της διαμόρφωσης

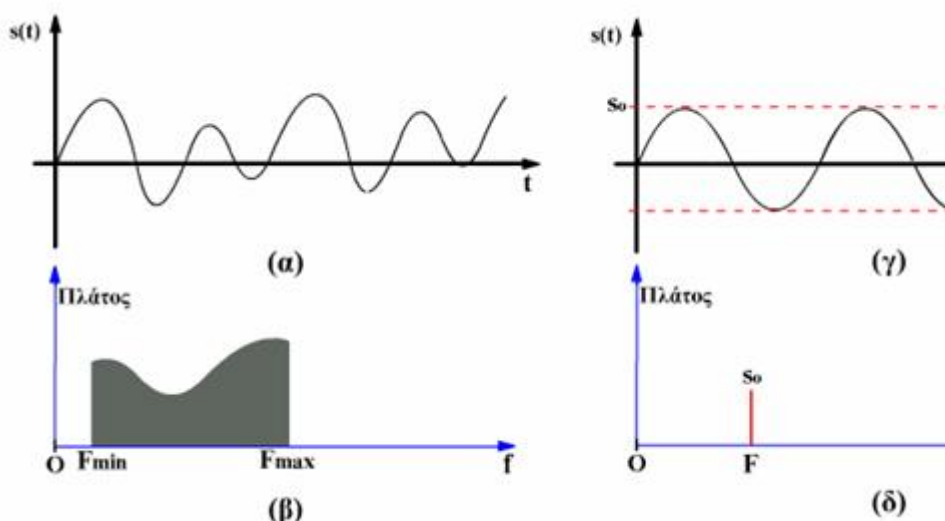
Το κεφάλαιο των διαμορφώσεων είναι πολύ μεγάλο. Διακρίνουμε πολλές μεθοδολογίες, που εξαρτώνται από τη μορφή που έχει το βασικό σήμα $s(t)$ και την επιλογή που κάνουμε για το φέρον, για το οποίο στην συνέχεια θα χρησιμοποιούμε πάντα το συμβολισμό $M(t)$. Συνοπτικά αναφέρουμε:

- Αναλογικές διαμορφώσεις: Όταν το $s(t)$ είναι αναλογικό σήμα και το φέρον $M(t)$ είναι ημιτονικό σήμα.
- Παλμικές διαμορφώσεις: Όταν το $s(t)$ είναι αναλογικό και το φέρον $M(t)$ είναι παλμικό σήμα υψηλής συχνότητας.
- Ψηφιακές διαμορφώσεις: Όταν το $s(t)$ είναι ψηφιακό (π.χ. προέρχεται από υπολογιστή).

Αυτή η κατάταξη είναι ενδεικτική και εξειδικεύεται περαιτέρω. Εδώ θα μας απασχολήσουν οι αναλογικές διαμορφώσεις. Στο ένατο κεφάλαιο του βιβλίου θα γίνει εισαγωγή στις παλμικές και ψηφιακές διαμορφώσεις, που με την ανάπτυξη της τεχνολογίας κερδίζουν συνεχώς έδαφος.

Αναλογικές διαμορφώσεις

Για να διευκολυνθούμε στην ανάλυση, ας ξαναπροσδιορίσουμε το πρόβλημα.



Διαθέτουμε προς αποστολή το βασικό σήμα $s(t)$, το οποίο χαρακτηρίζεται από τις χρονικές του μεταβολές (παρατήρηση στον παλμογράφο, σχήμα 3.8.2 α) και τη φασματική του ζώνη από F_{\min} έως F_{\max} (παρατήρηση στον αναλυτή φάσματος, σχήμα 3.8.2β). Καθώς τις περισσότερες φορές η συχνότητα F_{\min} έχει μικρή τιμή, την θεωρούμε για

απλοποίηση μηδενική. Στα σχήματα 3.8.2(γ) και (δ) δίνονται οι ίδιες εικόνες, όταν το σήμα $s(t)$ είναι ημίτονο, προερχόμενο από μια εργαστηριακή γεννήτρια.

Σχήμα 3.8.2: Παλμογραφική και φασματική εικόνα ενός σήματος.
(α,β) Τυχαίου σήματος . (γ,δ) Ημιτονικού σήματος

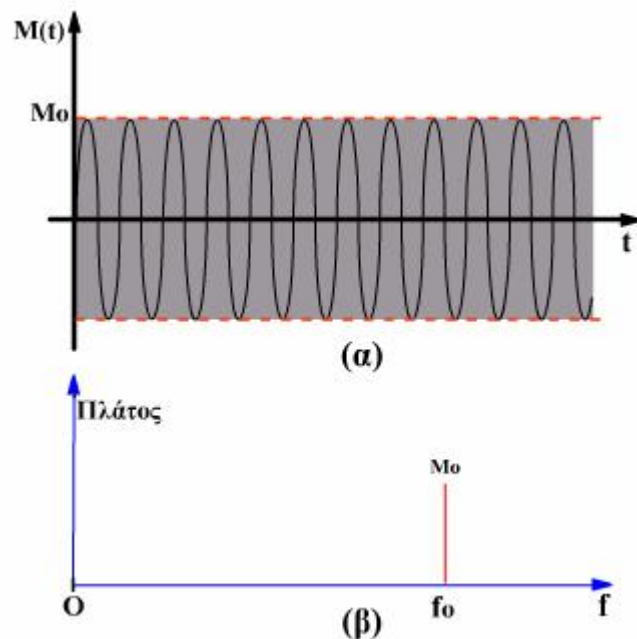
- Θα χρησιμοποιήσουμε φέρον $M(t)$ ημιτονικό , συχνότητας f_0 , που ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$f_0 > F_{\max}$$

$$M(t) = M_0 \sin(\omega_0 t + \phi_0) = M_0 \sin(2\pi f_0 t + \phi_0) , \quad (11)$$

όπου M_0 το πλάτος, ω_0 η κυκλική συχνότητα, f_0 η συχνότητα και ϕ_0 η αρχική φάση του σήματος.

Στα σχήματα 3.8.3(α) και (β) δίνονται η παλμογραφική εικόνα



και η φασματική ακτίνα του φέροντος.

Σχήμα 3.8.3: Παλμογραφική εικόνα και φασματική εικόνα του αδιαμόρφωτου φέροντος $M(t)$

Στη συνέχεια, σε όλο το βιβλίο, το $M(t)$ θα το αποκαλούμε απλά **φέρον**. Το $s(t)$ θα το αποκαλούμε **διαμορφώνον σήμα ή σήμα διαμόρφωσης**. Επίσης πάντα η συχνότητα του φέροντος θα συμβολίζεται με μικρό f . Η συχνότητα ή οι συχνότητες του διαμορφώνοντος σήματος με μεγάλο F . Το σήμα που προκύπτει από τη διαμόρφωση θα το συμβολίζουμε πάντα **$E(t)$** και θα το αποκαλούμε **διαμορφωμένο φέρον**.

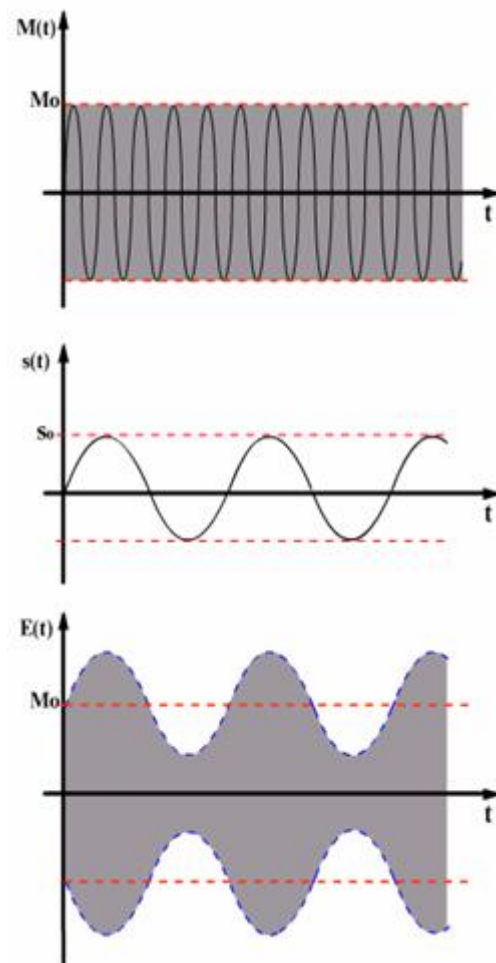
Διαμορφώσεις πλάτους

A) Διαμόρφωση πλάτους AM με φέρον

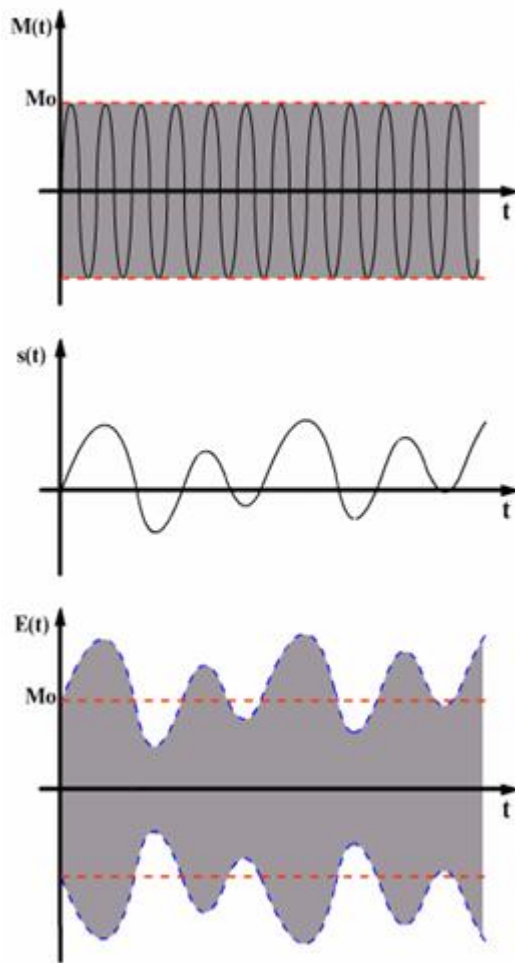
Στην διαμόρφωση πλάτους το βασικό σήμα $s(t)$ απεικονίζεται (επηρεάζει) στο πλάτος του σήματος $M(t)$. Δηλαδή:

$$E(t) = [M_o + s(t)] \cdot \sin(\omega_o t) \quad (12)$$

Θεωρήσαμε ότι $\phi_o=0$, δηλαδή $M(t)=0$ με την έναρξη της παρατήρησης ($t=0$).



Στην έξοδο του διαμορφωτή το διαμορφωμένο φέρον $E(t)$ έχει τη μορφή του σχήματος 3.8.4. Το (α) αναφέρεται στην περίπτωση που το $s(t)$ είναι τυχαίο. Το (β) αναφέρεται στην περίπτωση που το $s(t)$ είναι ημιτονικό.

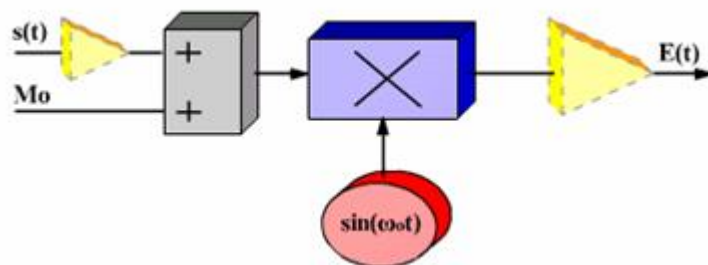


(α)

(β)

Σχήμα 3.8.4: Παλμογραφικές εικόνες σήματος διαμορφωμένου κατά πλάτος.
(α) Με τυχαίο σήμα. (β) Με ημιτονικό σήμα διαμόρφωσης.

Από το σχήμα προκύπτει ότι πρέπει πάντοτε :
 $|s(t)| < M_o$ ή $S_o < M_o$ (13)



Ένα απλό κύκλωμα διαμόρφωσης AM χωρίς σχολιασμούς δίνεται στο σχήμα 3.8.5

Σχήμα 3.8.5 : Δομικό διάγραμμα διαμορφωτή AM

Για να έχουμε πλήρη γνώση του τι συνέβη με τη διαδικασία της διαμόρφωσης, πρέπει να αναζητήσουμε τη φασματική ζώνη του σήματος που προέκυψε. Δηλαδή, να αναζητήσουμε τι θα δούμε στην οθόνη του αναλυτή φάσματος, όταν συνδεθεί στην είσοδό του το διαμορφωμένο φέρον $E(t)$. Αυτό είναι απαραίτητο, γιατί πρέπει να μεριμνήσουμε, ώστε το φάσμα που προέκυψε να μην αλλοιωθεί καθόλου στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Πρέπει να φτάσει στο δέκτη διατηρώντας πλήρως τη φυσιογνωμία του, ώστε με την αντίστροφη διαδικασία, την αποδιαμόρφωση, να αναζητήσουμε πάλι το αρχικό σήμα $s(t)$.

Για να προσδιορίσουμε τη φασματική ζώνη, πρέπει να αναλύσουμε τη σχέση (12). Για να διευκολυνθούμε, ας θεωρήσουμε την απλή περίπτωση όπου το $s(t)$ είναι ημιτονικό:

$$s(t) = S_o \sin(\Omega t) = S_o \sin(2\pi F t)$$

Έτσι έχουμε:

$$E(t) = [M_o + S_o \sin(\Omega t)] \sin(\omega_o t) = M_o [1 + m \sin(\Omega t)] \sin(\omega_o t) ,$$

όπου $m = S_o / M_o$. Το μέγεθος m , που είναι μικρότερο από τη μονάδα είναι καθαρός αριθμός και ονομάζεται ποσοστό διαμόρφωσης. Μετρείται συνήθως ως ποσοστό επί τοις εκατό (%).

Επίσης:

$$\begin{aligned} E(t) &= [M_o + S_o \sin(\omega t)] \sin(\omega_o t) = M_o \sin(\omega_o t) + S_o \sin(\Omega t) \sin(\omega_o t) = \\ &= M_o \sin(\omega_o t) + (S_o/2) \cos[(\omega_o - \Omega)t] - (S_o/2) \cos[(\omega_o + \Omega)t] \end{aligned} \quad (14)$$

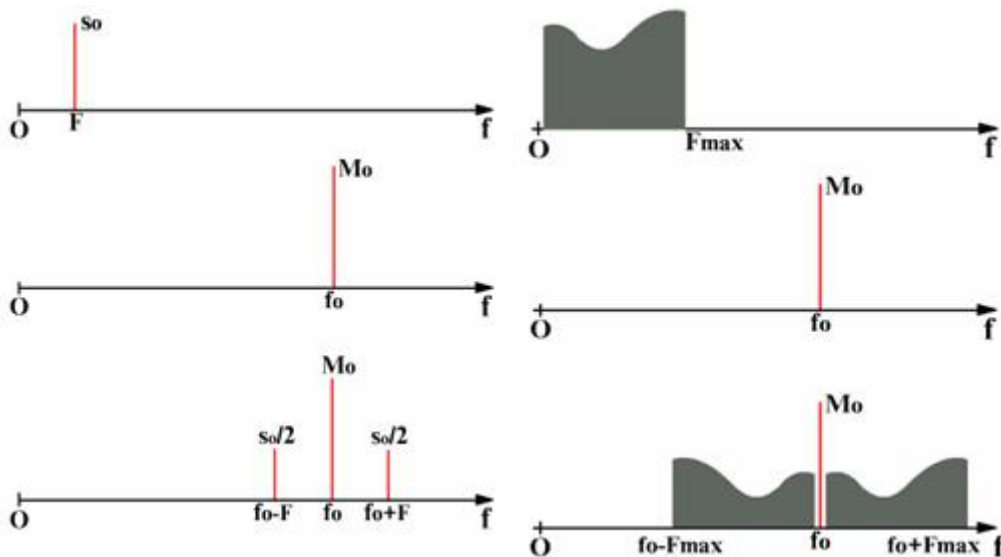
Δηλαδή, το διαμορφωμένο φέρον που προέκυψε αποτελείται (ισοδυναμεί) από τρεις φασματικές ακτίνες στις συχνότητες:

$$f_o, f_o - F \text{ και } f_o + F.$$

Η πρώτη ακτίνα είναι η φασματική ακτίνα του φέροντος. Οι δύο άλλες ονομάζονται **πλευρικές φασματικές ακτίνες** και καταλαμβάνουν θέσεις συμμετρικές γύρω από την κεντρική συχνότητα f_o (σχήμα 3.8.6α). Στην περίπτωση που το $s(t)$ είναι τυχαίο σήμα με φασματική ζώνη σαν αυτή του σχήματος 3.8.3γ, η φασματική ζώνη του διαμορφωμένου φέροντος εκτείνεται από $f_o - F_{\max}$ έως $f_o + F_{\max}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.6β.

(α)

(β)



Σχήμα 3.8.6: Τα φάσματα των σημάτων πριν και μετά την διαμόρφωση.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι με τη διαδικασία της διαμόρφωσης πλάτους (Amplitude Modulation : AM) το χαμηλό φάσμα του βασικού σήματος μεταφέρθηκε και κατέλαβε διπλάσια ζώνη συμμετρικά γύρω από τη συχνότητα του φέροντος.

Στη ραδιοφωνία με διαμόρφωση πλάτους διεθνώς έχει υιοθετηθεί για τα ακουστικά σήματα διαμόρφωσης ο περιορισμός:

$$F_{\max} = 5 \text{ kHz.}$$

Η ζώνη συχνοτήτων AM εκτείνεται από 560 kHz έως 1600 kHz (γνωστή ως μεσαία κύματα).

Εφαρμογή 1: Ένα βασικό σήμα της μορφής $s(t) = 10\sin(2\pi 10^3 t)$ διαμορφώνει φέρον $M(t) = 15\sin(2\pi 10^6 t)$. Να προσδιοριστεί το ποσοστό διαμόρφωσης και το φάσμα που προκύπτει (Οι συχνότητες δίνονται σε Hz, τα πλάτη σε Volt).

Λύση: α) $m = S_0/M_0 = 10/15 = 2/3 = 0,66$ ή 66%.

β) Το φάσμα περιλαμβάνει δύο φασματικές ακτίνες στις συχνότητες $10^6 - 10^3 \text{ Hz} = 999 \text{ kHz}$ και $10^6 + 10^3 \text{ Hz} = 1001 \text{ kHz}$. Έχουν πλάτος $S_0/2 = 5 \text{ Volt}$.

Εφαρμογή 2: Ένα βασικό σήμα της μορφής $s(t) = 10\sin(2\pi 10^3 t) + 8\sin(2\pi 4 \cdot 10^3 t)$ διαμορφώνει κατά πλάτος ένα φέρον $M(t) = 10\cos(2\pi 10^6 t)$. Να σχεδιαστεί το φάσμα.

Λύση: Το σήμα $s(t)$ περιέχει δύο φασματικές ακτίνες στις συχνότητες 1 kHz (με πλάτος 10 V) και 4 kHz (με πλάτος 8 V). Η φασματική ακτίνα του φέροντος είναι στη συχνότητα 1 MHz και έχει πλάτος 10V.

Με τη διαμόρφωση προκύπτουν συνολικά τέσσερις φασματικές ακτίνες. Δύο στις συμμετρικές συχνότητες 999 kHz και 1001 kHz με πλάτος 5 V και δύο στις συμμετρικές συχνότητες 996 kHz και 1004 kHz με πλάτος 4 Volt.

Η ισχύς του διαμορφωμένου φέροντος είναι το άθροισμα των ισχύων όλων των φασματικών ακτίνων του, δηλαδή:

$$P_{ολ} = P_1 + P_2 + P_3 ,$$

όπου $P_o = M_o^2 / 2R_L$, η ισχύς της φασματικής ακτίνας του αδιαμόρφωτου φέροντος, υπολογισμένη με αντίσταση φόρτου R_L ,

$$P_1 = P_2 = (S_o/2)^2 / 2R_L = S_o^2 / 8R_L = m^2 M_o^2 / 8R_L, \text{ η ισχύς της κάθε πλευρικής φασματικής ακτίνας.}$$

Η ολική ισχύς λοιπόν είναι :

$$P_{ολ} = (M_o^2 / 2R_L) \cdot (1 + m^2 / 2) \quad (15)$$

Καθώς η πληροφορία βρίσκεται στις δύο πλάγιες ζώνες, εύκολα καταλαβαίνουμε ότι για τη λήψη παρουσιάζει ενδιαφέρον η ολική ισχύς των δύο πλευρικών φασματικών ακτίνων. Από αυτή την άποψη η πραγματικά ωφέλιμη ισχύς του διαμορφωμένου σήματος είναι:

$$P_{ωφ} = P_1 + P_2 = S_o^2 / 4R_L = m^2 M_o^2 / 4R_L \quad (16)$$

Το λόγο της ωφέλιμης ισχύος ως προς την ολική ισχύ τον ονομάζουμε αποτελεσματικότητα της διαμόρφωσης D:

$$D = P_{ωφ} / P_{ολ} = m^2 / m^2 + 2 \quad (17)$$

Τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα την έχουμε, όταν $m=1$, δηλαδή έχουμε διαμόρφωση 100%. Τότε:

$$D = 1/3$$

Διαπιστώνεται, δηλαδή, ότι με τη διαδικασία της διαμόρφωσης πλάτους έχουμε σπατάλη ισχύος, μόνο το 1/3 της ολικής ισχύος είναι ωφέλιμη. Στην πράξη είναι ακόμα μικρότερη, γιατί δε χρησιμοποιούμε ποτέ ποσοστό διαμόρφωσης 100%, επειδή δημιουργεί παραμόρφωση του σήματος στο δέκτη. Οι συνήθεις τιμές του m κυμαίνονται από 0,75 (75%) έως 0,90 (90%).

Εφαρμογή 3: Να προσδιοριστεί η αποτελεσματικότητα D μιας διαμόρφωσης AM, όταν το ποσοστό διαμόρφωσης είναι 70%.

Λύση: $m = 0,7$, άρα $D = m^2 / m^2 + 2 = 0,197$ ή 19,7%

Εφαρμογή 4: Η ολική ισχύς ενός σήματος διαμορφωμένου κατά πλάτος με ποσοστό 80% είναι 200 Watt. Να προσδιοριστεί η ωφέλιμη ισχύς και η ισχύς κάθε πλάγιας ζώνης.

Λύση: $m = 0,80$, άρα $D = 0,24$.

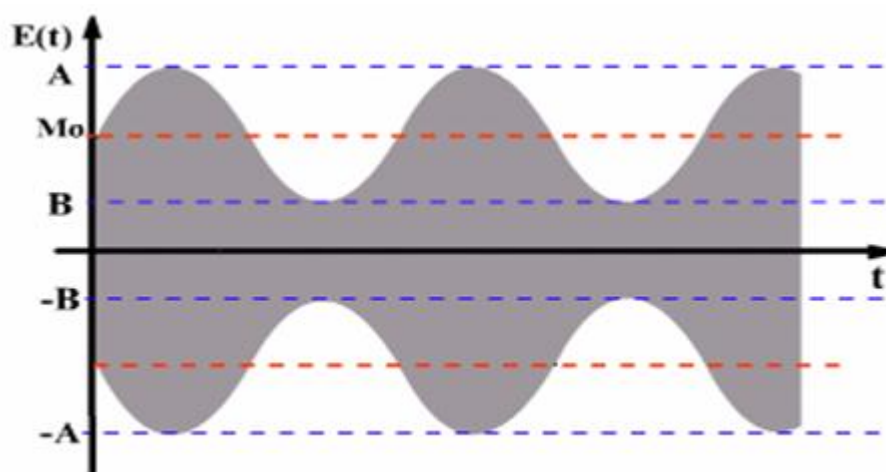
Επίσης $D = P_{ωφ} / P_{ολ}$, $P_{ωφ} = D \cdot P_{ολ} = 48 \text{ Watt}$.

Κάθε πλάγια ζώνη έχει ισχύ $48/2 = 24 \text{ Watt}$.

Μέτρηση του ποσοστού διαμόρφωσης στον παλμογράφο:

Παρατηρώντας το διαμορφωμένο σήμα στον παλμογράφο (σχήμα 3.8.7) μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε πειραματικά το ποσοστό διαμόρφωσης. Πράγματι έχουμε :

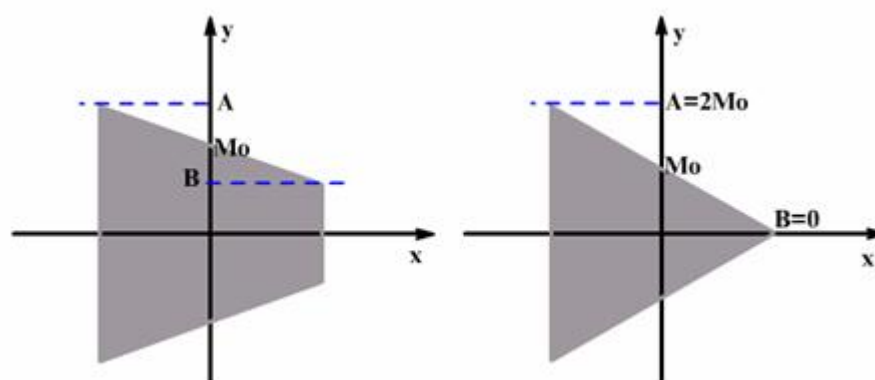
$$A = M_o + S_o = M_o(1+m)$$



$$B = M_o + S_o = M_o(1-m)$$

Σχήμα 3.8.7: Προσδιορισμός του ποσοστού διαμόρφωσης στον παλμογράφο
Άρα, $A/B = (1+m)/(1-m)$ από όπου $m = (A-B)/(A+B)$

Μετρώντας, δηλαδή, τη μέγιστη (A) και την ελάχιστη τιμή (B), υπολογίζουμε το ποσοστό διαμόρφωσης.



Αν έχουμε παλμογράφο που επιτρέπει παρατήρηση X-Y, τότε στέλνοντας το διαμορφωμένο φέρον E(t) στην είσοδο Y και το σήμα s(t) στην είσοδο X παρατηρούμε εικόνες σαν αυτές του σχήματος 3.8.8.

(α)

(β)

Σχήμα 3.8.8: Διαγράμματα τραπεζίου (α) Για τυχαίο ποσοστό διαμόρφωσης.
(β) Για ποσοστό διαμόρφωσης 100%

Αυτές οι εικόνες, γνωστές σαν εικόνες τραπεζίου, επιτρέπουν εύκολη μέτρηση του ποσοστού διαμόρφωσης. Το σχήμα (α) αντιστοιχεί σε τυχαίο ποσοστό διαμόρφωσης. Το σχήμα (β) αντιστοιχεί σε ποσοστό 100%.

Εφαρμογή 5: Στον παλμογράφο στην εικόνα διαμορφωμένου AM φέροντος μετρούμε μέγιστη τάση 100 V και ελάχιστη 25 V. Να προσδιοριστεί το ποσοστό διαμόρφωσης του φέροντος. Να προσδιοριστούν επίσης τα πλάτη

του σήματος διαμόρφωσης και του αδιαμόρφωτου φέροντος, καθώς και η ολική ισχύς του σήματος.

Λύση: $m = (A-B)/(A+B) = (100-25)/(100+25) = 0,6$ ή 60%.

Επίσης $A = M_o + S_o$ και $B = M_o - S_o$ από όπου $M_o = A+B/2 = 62,5$ Volt και $S_o = A-B/2 = 37,5$ Volt.

B) Διαμόρφωση πλάτους διπλής και απλής ζώνης χωρίς φέρον

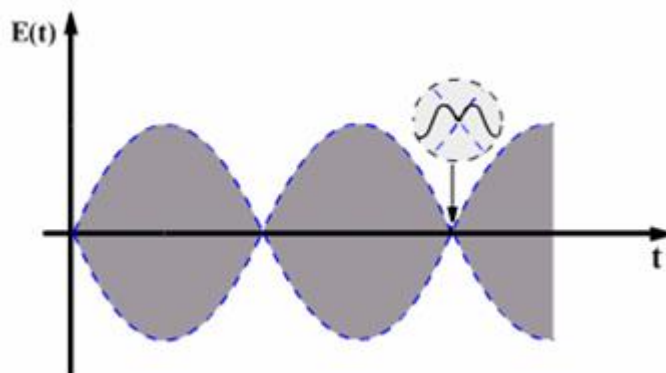
Πιο πάνω είδαμε ότι στην κλασική διαμόρφωση AM η ωφέλιμη ισχύς είναι :

$$P_{\omega\phi} \leq P_{o\lambda}/3$$

Αυτή η παρατήρηση μας οδηγεί στη σκέψη μήπως με μιά άλλη διαδικασία διαμόρφωσης πλάτους θα μπορούσαμε να έχουμε όλη την ισχύ του διαμορφωμένου σήματος ωφέλιμη.

Πράγματι, αν στην σχέση (12) δεν υπήρχε το M_o , τότε:

$$E(t) = s(t) \cdot \sin(\omega_o t) \quad (18)$$



Δηλαδή, το σήμα διαμόρφωσης $s(t)$ μόνο του παίζει το ρόλο του πλάτους του φέροντος σήματος. Η εικόνα του σήματος στον παλμογράφο δίνεται στο σχήμα 3.8.9.

Σχήμα 3.8.9: Διαμόρφωση διπλής ζώνης χωρίς φέρον

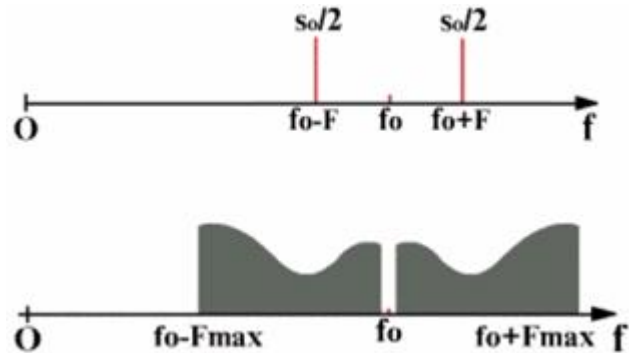
Εύκολα διαπιστώνουμε ότι στο φάσμα δεν υπάρχει φασματική συνιστώσα του φέροντος και ότι έχουμε δύο πλευρικές ζώνες.

$$E(t) = s(t) \cdot \sin(\omega_o t) = [S_o \sin(\Omega t)] \cdot [\sin(\omega_o t)] =$$

$$= (S_o/2) \cdot \cos[(\omega_o - \Omega)t] - (S_o/2) \cdot \cos[(\omega_o + \Omega)t] \quad (19)$$

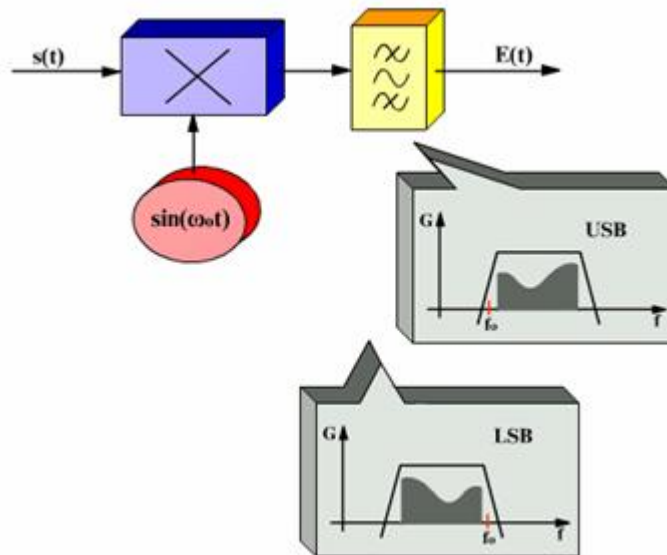
Γενικεύοντας, στην περίπτωση που το φάσμα είναι τυχαίο, η φασματική εικόνα είναι αυτή του σχήματος 3.8.10. Πρόκειται για διαμόρφωση διπλής ζώνης χωρίς φέρον, γνωστή με τον όρο **DSBsc (Double Side Band, suppressed carrier)**

Η ισχύς του σήματος είναι όλη ωφέλιμη, δηλαδή:



$$P_{\text{ολ}} = P_{\text{ωφ}} \cdot \text{Άρα } D = 1$$

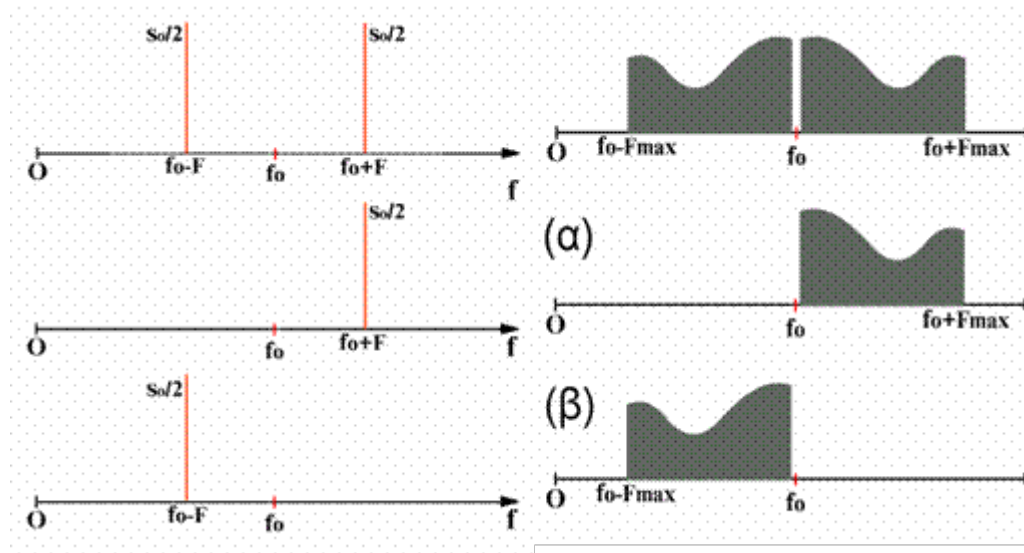
Σχήμα 3.8.10: Φάσμα διαμόρφωσης DSBsc



Στο σημείο αυτό και, αφού λύσαμε το πρόβλημα της σπατάλης που είχαμε στην ισχύ, ας κάνουμε μια ακόμα παρατήρηση. Οι δύο πλευρικές φασματικές ζώνες, που προήλθαν από το σήμα διαμόρφωσης, περιέχουν την ίδια πληροφορία. Θα μπορούσαμε λοιπόν να επιλέξουμε και να εκτέμψουμε μόνον τη μια από τις δύο, την πάνω ή την κάτω (σχήμα 3.8.11).

Σχήμα 3.8.11: Επιλογή της μιας από τις δύο πλάγιες ζώνες

Έτσι γίνεται οικονομία και στο φάσμα. Είναι η διαμόρφωση απλής ζώνης χωρίς φέρον ή **SSBsc (Single Side Band, suppressed carrier)**, ή όπως την αποκαλούμε απλά, SSB. Ειδικότερα για την πάνω ζώνη χρησιμοποιείται ο όρος USB (Upper Side Band), ενώ για την κάτω χρησιμοποιείται ο όρος LSB (Lower Side Band).



Αυτό σημαίνει ότι στη ζώνη που καταλαμβάνει μια εκπομπή με διαμόρφωση AM τώρα μπορούν να υπάρξουν δύο εκπομπές SSB (σχήμα 3.8.12).

Σχήμα 3.8.12: Φάσμα διαμόρφωσης SSB. (α) USB (β) LSB.

Στην περίπτωση της SSB διαμόρφωσης επίσης ισχύει:

$$P_{\omega\phi} = P_{\text{ολ}}$$

Έχει ενδιαφέρον να επανέλθουμε για λίγο στον υπολογισμό των ισχύων και να συγκρίνουμε τις περιπτώσεις των διαμορφώσεων AM και SSBsc.

Στην AM είδαμε ότι η μέγιστη τιμή της τάσης είναι :

$$M_o + S_o = M_o(1+m) \leq 2S_o \text{ και}$$

$$\text{η μέγιστη ωφέλιμη ισχύς : } P_{\omega\phi} = S_o^2/4R_L.$$

Αν στην διαμόρφωση SSB ενισχύσουμε το διαμορφωμένο σήμα έως την τιμή $2S_o$, τότε η ισχύς της είναι :

$$P_{\omega\phi} = P_{\text{ολ}} = (2S_o)^2/2R_L = 2S_o^2/R_L$$

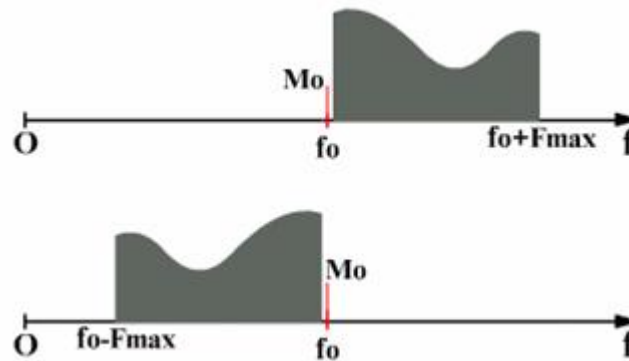
Συγκρίνοντας τις ισχύες, έχοντας ως σημείο αναφοράς το ίδιο πλάτος σήματος, βλέπουμε ότι:

$$P_{\omega\phi(\text{SSB})} = 8 \cdot P_{\omega\phi(\text{AM})} \quad (20)$$

Η ίδια σχέση σε dB εκφράζεται:

$$P_{\omega\phi(\text{SSB})} = 10\log[8 \cdot P_{\omega\phi(\text{AM})}] = 10\log 8 + 10\log P_{\omega\phi(\text{AM})} =$$

$$= 10\log P_{\omega\phi(AM)} + 9 \text{ db} \quad (21)$$



Είναι άμεσα λοιπόν κατανοητό ότι η διαμόρφωση SSB είναι πολύ πιο αποτελεσματική από την AM. Αυτός είναι ο λόγος που η διαμόρφωση SSB χρησιμοποιείται πολύ στη ραδιοτηλεφωνία των βραχέων κυμάτων για μακρινές ξεύξεις, που απαιτούν μεγάλη ισχύ σήματος. Βεβαίως, όπως θα δούμε, στη λήψη του σήματος τα πράγματα έχουν δυσκολέψει πολύ. Στο δέκτη πρέπει να ξαναδημιουργήσουμε τοπικά τη φασματική συνιστώσα του φέροντος, αφού είναι απαραίτητη για την αποδιαμόρφωση του σήματος. Υπάρχει τέτοια διαδικασία, αναγέννησης του φέροντος, αλλά με τίμημα την πολυπλοκότητα του δέκτη. Ακριβώς, για να διευκολυνθεί η διαδικασία της αποδιαμόρφωσης, σε πολλές εφαρμογές υιοθετείται εκπομπή SSB, αλλά με το φέρον να μη λείπει εντελώς από το φάσμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.13.

Σχήμα 3.8.13: Φάσμα διαμόρφωσης SSB με μερικώς κατασταλμένο το φέρον

Στη ραδιοφωνία των μεσαίων (AM) δε χρησιμοποιείται η διαμόρφωση SSB, γιατί οι δέκτες πρέπει να είναι απλοί και φθηνοί.

Εφαρμογή 6: Η ολική ισχύς φέροντος διαμορφωμένου με SSBsc είναι 250 Watt. Να προσδιοριστεί η ωφέλιμη ισχύς του σήματος.

Λύση: Όλη η ισχύς είναι ωφέλιμη, άρα 250 Watts

Εφαρμογή 7: Η ζώνη των μεσαίων εκτείνεται από 531 kHz έως 1602 kHz. Με τον περιορισμό της φασματικής ζώνης των ακουστικών σημάτων έως 4,5 kHz, να προσδιοριστεί ο αριθμός των ραδιοφωνικών εκπομπών με AM διαμόρφωση που μπορούν να συνυπάρξουν στην παραπάνω ζώνη. Να προσδιοριστεί επίσης πόσες θα ήταν αυτές οι εκπομπές, αν είχε υιοθετηθεί διαμόρφωση SSBsc.

Λύση: Το εύρος φάσματος στην AM είναι $2F_{max} = 9 \text{ kHz}$. Άρα, $N = (1602 - 531) / 9 = 119$ ανεξάρτητοι ραδιοφωνικοί σταθμοί. Στην SSB το εύρος φάσματος είναι το μισό, άρα θα μπορούσαν να υπάρξουν $2 \cdot 104 = 208$ ραδιοφωνικοί σταθμοί.

Διαμόρφωση συχνότητας (FM)

Η δεύτερη πίο συχνά χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία στις αναλογικές διαμορφώσεις είναι η **διαμόρφωση συχνότητας** ή σε συντομογραφία FM, από τον αγγλικό όρο Frequency Modulation. Όπως υποδηλώνει και το όνομα, στην περίπτωση αυτή το σήμα της πληροφορίας $s(t)$ αποτυπώνεται στη συχνότητα του φέροντος, το οποίο έχει σταθερό πλάτος.

Στη διαμόρφωση συχνότητας η βασική σχέση που περιγράφει τη διαδικασία είναι:

$$f(t) = f_o + k \cdot s(t) , \quad (22)$$



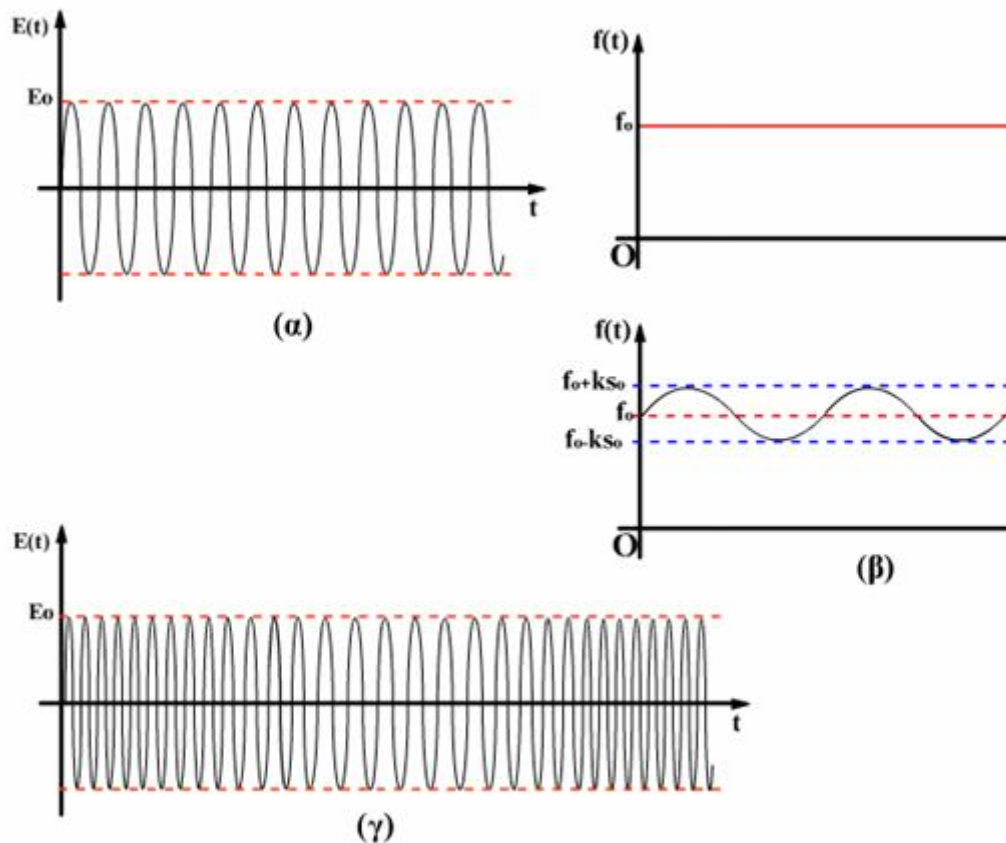
όπου $f(t)$ η στιγμιαία συχνότητα του φέροντος.

Σχήμα 3.8.14: Διαδικασία διαμόρφωσης συχνότητας

Αν στην είσοδο του διαμορφωτή (σχήμα 3.8.14) δεν εφαρμόσουμε σήμα $s(t)$, τότε η συχνότητα του φέροντος είναι σταθερή f_o και η εικόνα του στον παλμογράφο είναι αυτή που βλέπουμε στο σχήμα 3.8.15α.

Δηλαδή: $E(t) = M(t) = E_o \cdot \sin(\omega_o t)$

Όταν όμως εφαρμόσουμε το σήμα $s(t)$, τότε η συχνότητα του φέροντος μεταβάλλεται γύρω από την κεντρική συχνότητα f_o στο ρυθμό του διαμορφώνοντος σήματος. Στο σχήμα 3.8.15β φαίνεται αυτή η μεταβολή, σε περίπτωση που το $s(t)$ είναι ημιτονικό. Στο σχήμα 3.8.15γ δίνεται η μορφή που παίρνει το διαμορφωμένο φέρον $E(t)$.



Έτσι, όταν $s(t) = S_0 \sin(\Omega t)$, τότε $f(t) = f_0 + k S_0 \sin(\Omega t)$ (23)

Σχήμα 3.8.15: Το φέρον (α) Χωρίς διαμόρφωση. (β) Η μεταβαλλόμενη συχνότητα. (γ) Το φέρον με διαμόρφωση συχνότητας

Ο συντελεστής k χαρακτηρίζει το διαμορφωτή και τον τρόπο κατασκευής του, που θα δούμε σε επόμενη κεφάλαιο. Η συχνότητα $f(t)$ μετριέται σε Hz, το σήμα $s(t)$ μετριέται σε Volt. Είναι προφανές ότι ο συντελεστής k εκφράζει επίσης την κλίση του διαμορφωτή και μετριέται σε Hz/Volt ή συνήθως σε kHz/Volt.

Μετασχηματίζοντας τη σχέση (23) γράφουμε:

$$f(t) = f_0 + \Delta f_{\max} \sin(\Omega t) \quad (24)$$

Το μέγεθος Δf_{\max} καλείται μέγιστη απόκλιση συχνότητας. Εκφράζει τη μέγιστη απομάκρυνση της συχνότητας προς τη μια ή την άλλη κατεύθυνση (όταν το ημίτονο πάρει τις τιμές 1 ή -1) από την κεντρική της τιμή f_0 και εξαρτάται από την ένταση (πλάτος) του βασικού σήματος S_0 .

Αποδεικνύεται σε αυτή την περίπτωση ότι :

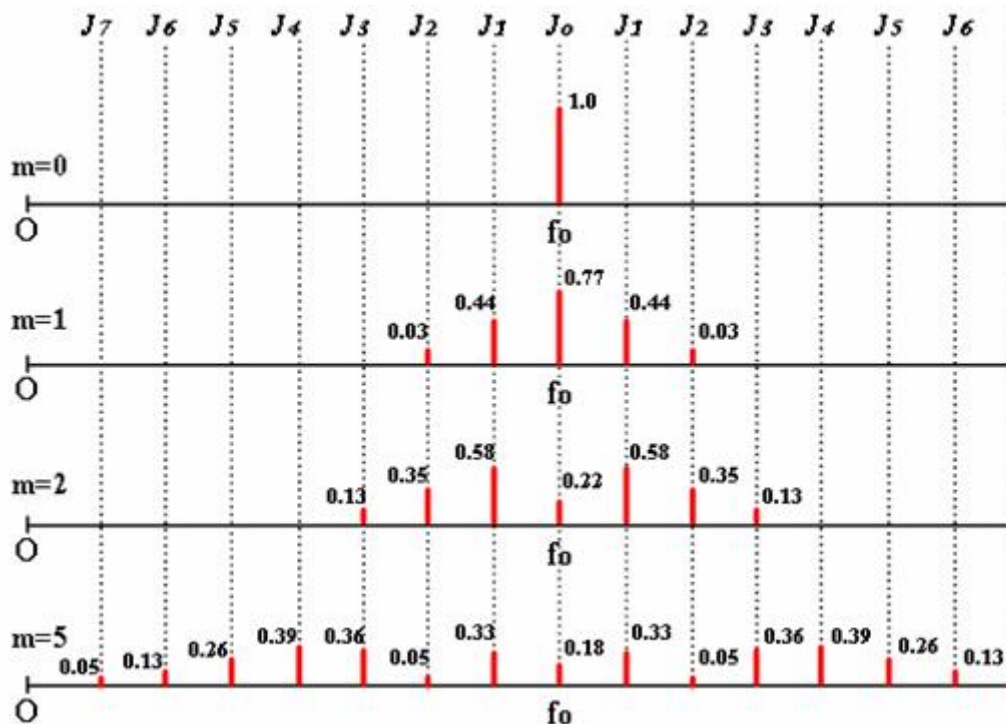
$$\begin{aligned} E(t) &= E_0 \sin[\omega_0 t - (\Delta f_{\max}/F) \cos(\Omega t)] = \\ &= E_0 \sin[\omega_0 t - m_f \cos(\Omega t)] \end{aligned} \quad (25)$$

Ο λόγος $m_f = \Delta f_{\max}/F = k'S_0/F$ ονομάζεται δείκτης διαμόρφωσης και είναι η βασική παράμετρος που χαρακτηρίζει μια διαμόρφωση FM.

Για να υπολογίσουμε τη φασματική ζώνη ενός φέροντος διαμορφωμένου κατά συχνότητα, πρέπει, όπως και στη διαμόρφωση πλάτους, να αναλύσουμε τη σχέση που δίνει το $E(t)$. Η μαθηματική ανάλυση είναι σχετικά δύσκολη και δε θα μας απασχολήσει αναλυτικά. Θα περιοριστούμε μόνο στην εικόνα του φάσματος.

Η εικόνα του φάσματος, που βλέπουμε στον αναλυτή φάσματος, όταν στην είσοδο του στείλουμε το διαμορφωμένο $E(t)$, περιέχει πολλές φασματικές ακτίνες. Κάνοντας το πείραμα για διαφορετικές τιμές του δείκτη διαμόρφωσης m , διαπιστώνουμε ότι ο αριθμός των φασματικών ακτίνων εξαρτάται από το m . Οι εμφανιζόμενες πλευρικές φασματικές ακτίνες καταλαμβάνουν ανά δύο συμμετρικές θέσεις ως προς τη συχνότητα του αδιαμόρφωτου φέροντος f_0 : f_0+nF και f_0-nF (n ακέραιος).

Στο σχήμα 3.8.16 απεικονίζεται η εικόνα του φάσματος για τιμές $m_f=1$, $m_f=2$ και $m_f=5$. Οι αριθμοί που σημειώνονται δίνουν το ποσοστό του πλάτους της φασματικής ακτίνας ως προς την ακτίνα του αδιαμόρφωτου φέροντος E_0 (όταν $m_f=0$).



Σχήμα 3.8.16: Το φάσμα στην FM για διάφορες τιμές του δείκτη διαμόρφωσης. (α) $m_f=1$ (β) $m_f=2$ (γ) $m_f=5$.

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται επίσης η κατανομή των ποσοστών για διάφορες τιμές του m , ώστε, αν θέλουμε, να σχεδιάσουμε το φάσμα ή να το επιβεβαιώσουμε στον αναλυτή φάσματος.

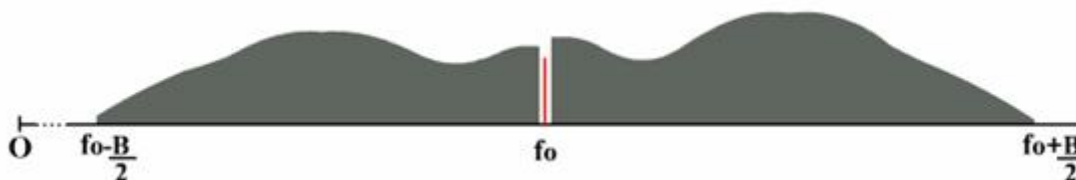
Πίνακας κατανομής ποσοστού στις φασματικές ακτίνες
(Συντελεστές Bessel)

m	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9
0	1									
0,25	0,98	0,12								
0,50	0,94	0,24	0,03							
1,00	0,77	0,44	0,03							
1,5	0,51	0,26	0,23	0,01						
2,0	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03					
2,5	0,05	0,5	0,45	0,22	0,07	0,02				
3,0	0,26	0,34	0,49	0,31	0,13	0,04	0,01			
4,0	0,40	0,07	0,36	0,43	0,28	0,13	0,05	0,02		
5,0	0,18	0,33	0,05	0,36	0,39	0,26	0,13	0,05	0,02	
9,0	0,09	0,24	0,14	0,18	0,27	0,06	0,20	0,33	0,30	
	<u>0,21</u>									

Το συνολικό εύρος της φασματικής ζώνης (Bandwith) ενός FM σήματος δίνεται από τη σχέση του Κάρσον (Carson):

$$B = 2(\Delta f_{\max} + F) = 2(m_f \cdot F + F) = 2F(m_f + 1) \quad (26)$$

Γενικεύοντας, όταν το σήμα $s(t)$ δεν είναι ημιτονικό, αλλά τυχαίο με φάσμα (F_{\min}, F_{\max}) (σχήμα 3.8.2), οι πλευρικές ζώνες αλληλοκαλύπτονται και το φάσμα δε διατηρεί πλήρως τη συμμετρία του (σχήμα 3.8.17).



Σχήμα 3.8.17: Συνεχές φάσμα στην FM, όταν το σήμα διαμόρφωσης είναι τυχαίο.

Το συνολικό εύρος ζώνης υπολογίζεται πάλι από τη σχέση του Carson, που διατυπώνεται για τη μέγιστη συχνότητα διαμόρφωσης F_{\max} του σήματος $s(t)$:

$$B = 2(\Delta f_{\max} + F_{\max}) = 2F_{\max}(m_f + 1), \quad m_f = \Delta f_{\max}/F_{\max}$$

Συμπερασματικά, όσο μεγαλύτερη τιμή έχει ο δείκτης διαμόρφωσης τόσο μεγαλύτερο είναι το φασματικό εύρος του σήματος. Αποδεικνύεται μάλιστα ότι το μεγάλο φασματικό εύρος προστατεύει το σήμα από το θόρυβο και τις κάθε είδους παρενοχλήσεις στο κανάλι μετάδοσης. Έτσι, όπου έχουμε υψηλές απαιτήσεις καθαρότητας του σήματος, υιοθετούμε μεγάλο m_f ($m_f > 1$), όπως στη ραδιοφωνία, και μιλάμε για διαμόρφωση συχνότητας

μεγάλου εύρους. Όπου αυτές οι απαιτήσεις είναι μικρότερες, όπως στη ραδιοτηλεφωνία, υιοθετούμε μικρό m_f ($m_f \leq 1$) και μιλάμε για διαμόρφωση FM στενού εύρους (NBFM: Narrow Band Frequency Modulation).

Στη ραδιοφωνία FM διεθνώς έχουν καθιερωθεί οι τιμές:

$$F_{\max} = 15 \text{ kHz}$$

$$\Delta f_{\max} = 75 \text{ kHz}$$

$$\text{Άρα } m_f = 5$$

$$\text{Έτσι, } B = 2(75 + 15) = 180 \text{ kHz}$$

Για να υπάρχει ένα μικρό περιθώριο και να μην επικαλύπτονται ο ένας ραδιοφωνικός σταθμός από τον άλλο, οι συχνότητες (κεντρικές), που χορηγούνται με νόμο που πρέπει να τηρείται και να εφαρμόζεται αυστηρά, τοποθετούνται σε απόσταση τουλάχιστον 200 kHz και πλέον ο ένας από τον άλλο.

Η φασματική ζώνη της FM διαμόρφωσης είναι πολύ πλατύτερη από την αντίστοιχη της AM. Γι' αυτό και για να μπορέσουν να συνυπάρξουν σε δεδομένη ζώνη συχνοτήτων πολλοί ραδιοφωνικοί σταθμοί, αναγκαζόμαστε να χρησιμοποιούμε πολύ μεγαλύτερες συχνότητες. Η ζώνη της ραδιοφωνίας FM είναι διεθνώς από 88 MHz έως 108 MHz.

Η ισχύς του φέροντος πριν και μετά την αποδιαμόρφωση είναι η ίδια, γιατί το πλάτος του σήματος παραμένει σταθερό:

$$P_{\text{ολ}} = E_o^2 / 2R_L$$

Ο διαμορφωτής, δηλαδή, σε αντίθεση με την περίπτωση της AM, δε χορηγεί πρόσθετη ισχύ στο φέρον. Απλώς με τη διαμόρφωση η ισχύς κατανέμεται σε όλη τη φασματική ζώνη που προκύπτει. Ο δέκτης, για να αποδιαμορφώσει το διαμορφωμένο φέρον, πρέπει να λάβει όλη τη φασματική ζώνη του σήματος.

Εφαρμογή 8: Το φάσμα ενός ακουστικού σήματος εκτείνεται από 100 Hz έως 8 kHz. Ο δείκτης διαμόρφωσης m_f που αντιστοιχεί στη μέγιστη συχνότητα είναι 3. Να προσδιοριστεί το εύρος της φασματικής ζώνης μετά τη διαμόρφωση FM.

Λύση: Από τον τύπο του Carson υπολογίζουμε:

$$B = 2 \cdot 8 \cdot (3+1) \text{ kHz} = 64 \text{ kHz}.$$

Εφαρμογή 9: Φέρον συχνότητας $f_o = 90 \text{ MHz}$ διαμορφώνεται κατά συχνότητα από σήμα $s(t) = 2\sin(2\pi 5 \cdot 10^3 t)$ (V). Ο διαμορφωτής παρουσιάζει κλίση $k = 15 \text{ kHz/Volt}$. Να προσδιοριστεί η μέγιστη απόκλιση συχνότητας και ο δείκτης διαμόρφωσης m_f . Να προσδιοριστούν επίσης το εύρος του φάσματος και ο αριθμός των φασματικών ακτίνων στο φάσμα του διαμορφωμένου φέροντος.

$$\text{Λύση: } \alpha) \Delta f_{\max} = k \cdot S_o = 15 \cdot 2 = 30 \text{ kHz}$$

$$\beta) m_f = 30 \cdot 10^3 / 5 \cdot 10^3 = 6$$

$$\gamma) B = 2 \cdot 5 \cdot 10^3 (6+1) = 70 \text{ kHz}$$

δ) Ο αριθμός των πλευρικών φασματικών ακτίνων είναι :

$N = B/F = 2(m_f + 1) = 12$. Αν συνυπολογίσουμε και τη φασματική ακτίνα του φέροντος, έχουμε σύνολο 13.

Εφαρμογή 10: Πόσοι ραδιοφωνικοί σταθμοί FM μπορούν να υπάρξουν στη ζώνη συχνοτήτων από 88 έως 108 MHz στην ίδια γεωγραφικά περιοχή;

Λύση: Θεωρώντας ότι η απόσταση μεταξύ των ραδιοφωνικών σταθμών είναι 200 kHz, τότε έχουμε:

$$N = (108 - 88) \text{ MHz} / 0,2 \text{ MHz} = 100.$$

Σύγκριση των διαμορφώσεων AM και FM

Εξετάσαμε στις προηγούμενες παραγράφους τις διαμορφώσεις AM (και τα παράγωγά της) και FM. Γνωρίσαμε το αποτέλεσμα της διαμόρφωσης και με τη χρονική εικόνα του τελικού φέροντος, αλλά και με τη φασματική του εικόνα. Με παραδείγματα τεκμηριώσαμε τις βασικές ιδιότητες των σημάτων και των διάφορων μεγεθών που υπεισέρχονται στη μελέτη αυτών των διαδικασιών. Είμαστε σε θέση τώρα να κάνουμε κάποιες συγκρίσεις με βάση αυτά τα αποτελέσματα:

α) Η ισχύς του πομπού στη διαδικασία AM (και SSB) δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από το ποσοστό διαμόρφωσης m ή το πλάτος του σήματος διαμόρφωσης $s(t)$. Στην FM διαμόρφωση η ισχύς εκπομπής είναι σταθερή. Αυτό σημαίνει ευκολία στην κατασκευή του πομπού. Στην FM δεν απαιτείται ενίσχυση ισχύος του $s(t)$.

β) Στη διαμόρφωση AM η ισχύς της φασματικής συνιστώσας του φέροντος, που δεν είναι ωφέλιμη ισχύς, αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής ισχύος του σήματος. Είναι πάντοτε πολύ μεγαλύτερη από την ισχύ των πλευρικών ζωνών, που είναι η ωφέλιμη. Έχουμε, δηλαδή, σπατάλη ισχύος. Στη διαμόρφωση FM η αρχική ισχύς κατανέμεται σε όλο το φάσμα και η ισχύς της φασματικής συνιστώσας του φέροντος είναι ένα μέρος της ολικής ισχύος. Έχουμε λοιπόν καλύτερη αξιοποίηση της ισχύος στην FM από ό,τι στην AM.

γ) Στην περίπτωση της AM είμαστε υποχρεωμένοι, αν ενισχύσουμε το σήμα μετά τη διαμόρφωση, να χρησιμοποιήσουμε ενισχυτές που δεν εισάγουν παραμόρφωση, γιατί η πληροφορία μας βρίσκεται στις μεταβολές του πλάτους του σήματος. Αντίθετα στην FM, αν υπάρξει παραμόρφωση, δεν είναι καταστροφική, γιατί η πληροφορία μας βρίσκεται στη συχνότητα του φέροντος. Μπορούμε λοιπόν στην FM να χρησιμοποιήσουμε ως τελικό στάδιο ενισχυτή τάξης C, που έχει μεγάλη απόδοση.

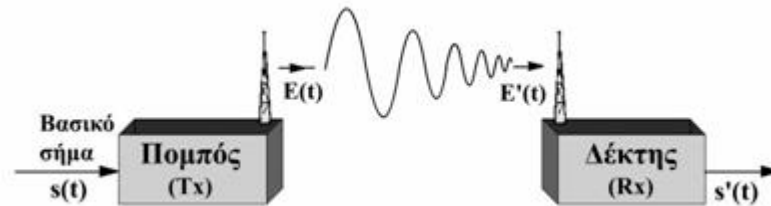
δ) Μειονέκτημα στην FM μπορεί να θεωρηθεί το γεγονός ότι το εύρος ζώνης του διαμορφωμένου φέροντος είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο εύρος της AM. Όμως όσον αφορά το θόρυβο, λόγω ακριβώς αυτού του μεγάλου εύρους, η FM παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα. Αποδεικνύεται ότι για τις συνήθεις τιμές του m_f στην ραδιοφωνία, αυτό το πλεονέκτημα φτάνει σχεδόν 18 dB. Δηλαδή, ο λόγος 'σήμα/θόρυβο' στην FM είναι 64 φορές καλύτερος σε σύγκριση με το λόγο 'σήμα/θόρυβο' στην AM (18 dB = 10log64).

Γι' αυτό η FM διαμόρφωση και εκπομπή προσφέρεται, για να απολαύσουμε μουσική πολύ πιο καλής ποιότητας από ό,τι στην ΑΜ.

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Ασύρματες τεχνικές. Φαινόμενα διάδοσης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο γνωρίσαμε την έννοια και τα βασικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.



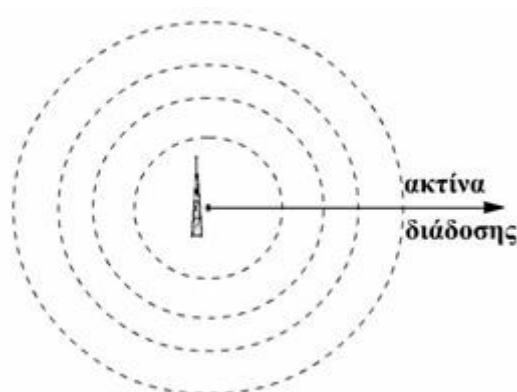
Στις **ραδιοεπικοινωνίες** το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελεί το μέσο μεταφοράς της πληροφορίας, που εκπέμπεται, ακτινοβολείται στο χώρο από την κεραία. Πολλές φορές το ηλεκτρομαγνητικό κύμα το ονομάζουμε **ραδιοκύμα**.

Σχήμα 4.1.1: Γενικό διάγραμμα Ραδιοεπικοινωνίας

Η κεραία λήψης στο δέκτη πρέπει να δεχτεί ένα μικρό ποσοστό ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, ώστε, αφού το ενισχύσει και το επεξεργαστεί κατάλληλα, να αποδώσει στην έξοδο του δέκτη το ωφέλιμο βασικό σήμα, δηλαδή την πληροφορία.

Η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο χώρο και η πλήρης μαθηματική μελέτη του φαινομένου είναι από τα δυσκολότερα κεφάλαια της φυσικής και της ραδιοηλεκτρολογίας.

Κεραίες υπάρχουν πολλών ειδών και θα εξεταστούν σε επόμενο κεφάλαιο. Αν θεωρήσουμε μία κεραία εκπομπής ως σημειακή πηγή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (μπορούμε να κάνουμε αυτή την υπόθεση σε αποστάσεις μακρινές από την κεραία), όταν δεν υπάρχουν εμπόδια, το κύμα διαδίδεται σφαιρικά όπως, τα κυκλικά κύματα της θάλασσας που παράγονται, όταν ρίξουμε ένα λιθαράκι στην επιφάνειά της.



Σχήμα 4.1.2: Σφαιρική διάδοση του κύματος

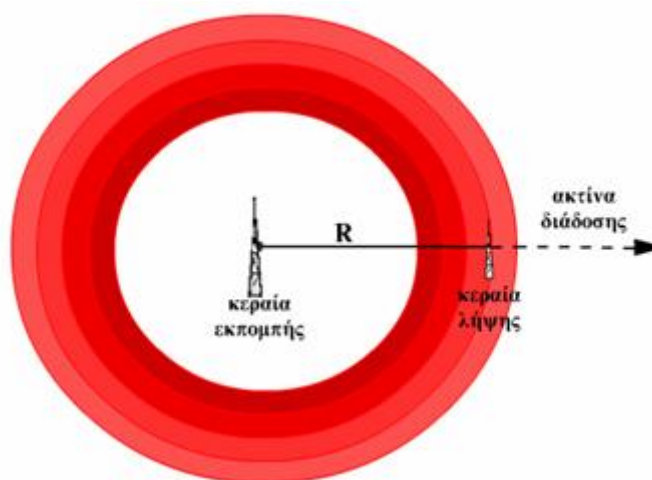
Η όλη συμπεριφορά του κύματος θυμίζει τη συμπεριφορά του φωτός. Δηλαδή όταν συναντάει εμπόδια, ενδεχομένως ανακλάται ή άλλοτε υπόκειται σε διάθλαση, όταν αλλάζει η πυκνότητα ή τα χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης, απορροφάται από διάφορα υλικά και εξασθενίζει δημιουργώντας μικρές ή μεγάλες σκιάσεις (έχουμε δηλαδή απόσβεση της ισχύος του) κλπ.

Η συνολική μελέτη αυτής της συμπεριφοράς είναι πολύ δύσκολη. Στους υπολογισμούς πρέπει να λάβουμε υπόψη πολλές παραμέτρους, όπως, για παράδειγμα, ποια εμπόδια ελαττώνουν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, ποια υλικά το απορροφούν ελαττώνοντας την ισχύ του, ποιους δρόμους ακολουθεί στην πορεία του, και παράγοντες, όπως ποια είναι η μορφολογία και η αγωγιμότητα του εδάφους, αν μιλούμε για διάδοση στην ξηρά ή τη θάλασσα, τις μετεωρολογικές συνθήκες κ.α.

Αποδεικνύεται ότι βασικό μέγεθος που καθορίζει ουσιαστικά τη συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι η συχνότητα του (f) και το μήκος κύματός του λ . Αυτός είναι ο λόγος που οι επιστήμονες διαχώρισαν και κατέταξαν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε φασματικές ζώνες με ιδιαίτερη ονομασία, ώστε να διευκολυνθεί η μελέτη της συμπεριφοράς τους. Με τη γνώση της συμπεριφοράς των κυμάτων προκύπτουν οι κανόνες αξιοποίησής τους στις τηλεπικοινωνίες και οι εφαρμογές τους.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται και θεωρητικά μοντέλα διάδοσης, αλλά και σημαντικά πειραματικά αποτελέσματα, με τα οποία μπορούμε να προβλέψουμε μιά σωστή **ραδιοξεύξη** (επικοινωνία) μεταξύ πομπού και δέκτη.

Επανερχόμαστε στην σφαιρική, χωρίς εμπόδια, διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η κεραία εκπομπής θεωρείται σημειακή πηγή της εκπεμπόμενης ενέργειας, που εκπέμπει σφαιρικά και ομοιόμορφα, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 4.1.3: Υπολογισμός της απόσβεσης του κύματος

Σε απόσταση R από την κεραία εκπομπής η **ισχύς ανά μονάδα επιφανείας** είναι:

$$\rho = P_e / S ,$$

όπου P_e η ισχύς εκπομπής στην κεραία σε Watt (Βατ),

$$S = 4\pi R^2 \text{ η επιφάνεια της σφαίρας ακτίνας R σε m}^2 \text{ ή km}^2 .$$

Άρα :
$$\rho = P_e / 4\pi R^2 \quad (1)$$

Το μέγεθος ρ μετριέται σε Watt / m² ή Watt / km²

Συνδυάζοντας το αποτέλεσμα με τη σχέση $\rho = E^2/120\pi$, που γνωρίσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος , τότε:

$$P_e / 4\pi R^2 = E^2 / 120\pi$$

Τελικά το **ηλεκτρικό πεδίο E** που δημιουργείται σε απόσταση R από την κεραία και μετριέται σε Volt/m υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = (\sqrt{30P_e}) / R \quad (2)$$

Αποδεικνύεται επίσης ότι μια κεραία λήψης (όμοια με αυτή της εκπομπής) που βρίσκεται σε απόσταση R από την κεραία εκπομπής λαμβάνει μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας του κύματος, που δίνεται από την σχέση:

$$P_\lambda = (\lambda^2 / 4\pi) \cdot \rho = (\lambda^2 \cdot P_e) / (4\pi R)^2 = (c^2 \cdot P_e) / (4\pi f R)^2$$

Για να υπολογίσουμε τις **απώλειες του κύματος** στον ελεύθερο χώρο κατά τη διάδοσή του από την κεραία εκπομπής στην κεραία λήψης σε dB, έχουμε:

$$\alpha = 10\log(P_e / P_\lambda)$$

Αντικαθιστώντας βρίσκουμε:

$$\alpha = (20\log R) + (20\log f) + 32,5 \quad (3)$$

όπου R η απόσταση εκφρασμένη σε km,

f η συχνότητα εκφρασμένη σε MHz. Η σταθερά 32,5 προκύπτει μέσω του λογαρίθμου από τις μονάδες που χρησιμοποιήσαμε (km και MHz).

Υπογραμμίζεται ότι η παραπάνω σχέση ισχύει για διάδοση στον ελεύθερο χώρο χωρίς κανένα εμπόδιο, δηλαδή όταν οι κεραίες είναι τοποθετημένες πολύ ψηλά και έχουν οπτική επαφή μεταξύ τους.

Εφαρμογή 1: Η ισχύς εκπομπής μιας κεραίας που ακτινοβολεί σφαιρικά είναι 1000 W. Να προσδιοριστεί η ισχύς ανά μονάδα επιφανείας του σήματος σε απόσταση $R = 100 \text{ km}$ από την κεραία.

Λύση: Από τη σχέση $\rho = P_e / 4\pi R^2$ αντικαθιστώντας σε W και m λαμβάνουμε $\rho = 80 \cdot 10^{-10} \text{ W/m}^2$.

Εφαρμογή 2: Να υπολογιστεί για τις ίδιες τιμές ισχύος και απόστασης από την κεραία το ηλεκτρικό πεδίο E .

Λύση: Από τη σχέση (2) αντικαθιστώντας βρίσκουμε:
 $E = 1,73 \cdot 10^{-3} \text{ Volt/m} = 1,73 \text{ mV/m}$

Εφαρμογή 3: Να υπολογιστούν σε dB οι απώλειες ραδιοκύματος από την κεραία εκπομπής έως την κεραία λήψης, όταν η συχνότητά του είναι $f = 10 \text{ MHz}$ και η απόσταση των κεραιών περίπου 40 km.

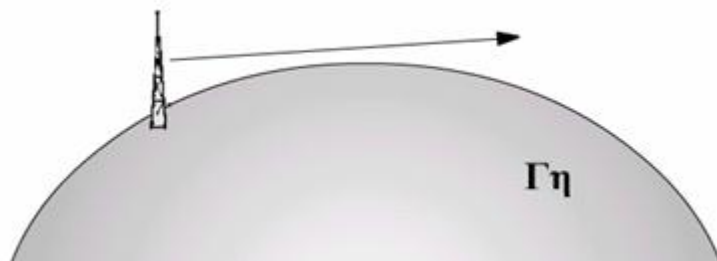
Λύση: Αντικαθιστώντας στη σχέση (3) βρίσκουμε:
 $\alpha = 20\log 40 + 20\log 10 + 32,5 = 84,5 \text{ dB}$

Τρόποι Διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Γενικά

Στην πράξη κατά τη διάδοση του ραδιοκύματος παρεμβάλλονται εμπόδια. Ένα από τα συνηθέστερα είναι η ίδια η καμπυλότητα της γης. Στα επόμενα σχήματα και για διευκόλυνση στην κατανόηση των φαινομένων της διάδοσης συμβολίζουμε το διαδιδόμενο κύμα μόνο με την ακτίνα διάδοσής του.

Δύο βασικούς τρόπους εξετάζουμε για τη διάδοση των κυμάτων, οι οποίοι φαίνονται απλοποιημένα στα σχήματα 4.2.1 και 4.2.2.



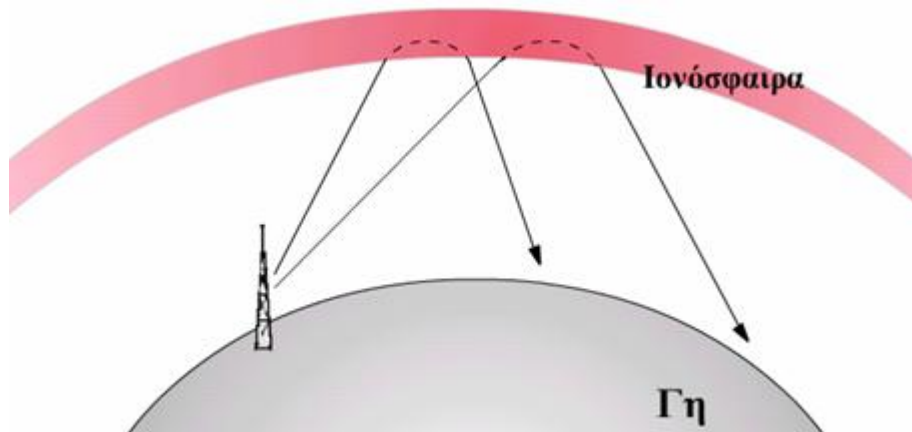
Ο πρώτος τρόπος αφορά την κυματική διάδοση, υποθέτοντας ότι το κύμα δεν απομακρύνεται πολύ από την επιφάνεια του εδάφους της γης.

Σχήμα 4.2.1: Κύμα εδάφους

Ο δεύτερος τρόπος αφορά την κυματική διάδοση, που στηρίζεται στην υπόθεση ότι το κύμα απομακρυνόμενο από την επιφάνεια του εδάφους

ξαναεπιστρέφει σε αυτό, αφού υποστεί ανάκλαση (σκέδαση) στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, που ονομάζονται **‘ιονόσφαιρα’** λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας ιονισμένων ατόμων, δηλαδή ηλεκτρικών φορτίων.

Η φυσική προβλέπει ότι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, όταν βρεθεί σε ατμόσφαιρα ηλεκτρικών φορτίων, υφίσταται εξασθένηση, η ακτίνα διάδοσής του διαθλάται (κάμπτεται) και κάτω από ορισμένες συνθήκες ανακλάται πάλι προς τη γή (αλλάζει πορεία).

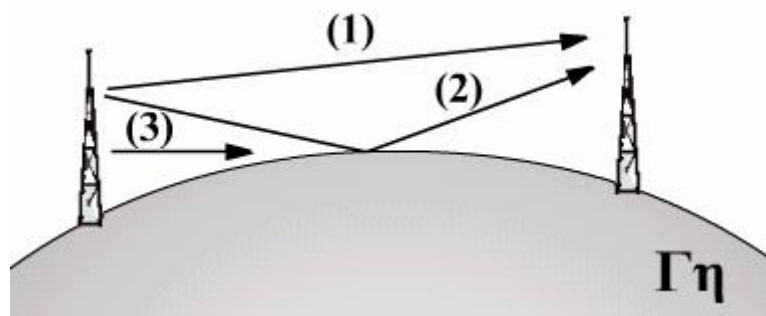


Σχήμα 4.2.2: Ιονοσφαιρικό κύμα

Κύματα εδάφους

Στην περίπτωση των **κυμάτων εδάφους** η ζεύξη κεραίας εκπομπής και κεραίας λήψης επιτυγχάνεται με τρεις τρόπους:

-



Με το **απ' ευθείας κύμα**, του οποίου η ακτίνα διάδοσης δεν εμποδίζεται από την καμπυλότητα της γής (1). Αυτή η κυματική ακτίνα μοιάζει να διαδίδεται στο κενό χωρίς εμπόδια. Επηρεάζεται μόνο από την απόσταση και τη διάχυση μέσα στην ατμόσφαιρα.

Σχήμα 4.2.3: Συνιστώσες του κύματος εδάφους

- **Κύμα από ανάκλαση στο έδαφος (2).**

Η διαδρομή αυτής της κυματικής ακτίνας προς την κεραία λήψης είναι σαφώς μεγαλύτερη. Στην κεραία λήψης έχουμε τη συμβολή των κυματικών ακτίνων του άμεσου και του από ανάκλαση στο έδαφος σήματος. Καθώς το κύμα είναι διανυσματικό μέγεθος, η συμβολή είναι διανυσματική, με αποτέλεσμα την αύξηση ή ελάττωση της έντασης του σήματος ανάλογα με την σχετική διαφορά των δύο δρόμων (διαφορά φάσης των κυμάτων)

- **Σημαντικό αποδεικνύεται το κύμα επιφανείας (3).** Πρόκειται για μέρος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται σχεδόν επαπτομενικά με το έδαφος. Το κύμα αυτό είναι σημαντικό, ιδιαίτερα όταν το έδαφος είναι αγωγίμο, και ακολουθεί την καμπυλότητα της γης. Εξασφαλίζει ζεύξη μεταξύ κεραιών όπου το απ' ευθείας κύμα δεν μπορεί να φτάσει λόγω εμποδίων.

Τα πειράματα έχουν δείξει ότι η διάδοση των κυμάτων εδάφους εξαρτάται σημαντικά από τη συχνότητα και η ολική απόσταση κάλυψης εξαρτάται από τη μορφολογία και την αγωγιμότητα του εδάφους. Πράγματι, με μετρήσεις διαπιστώνεται ότι οι αποστάσεις ραδιοζεύξεων με κύματα εδάφους είναι πολύ

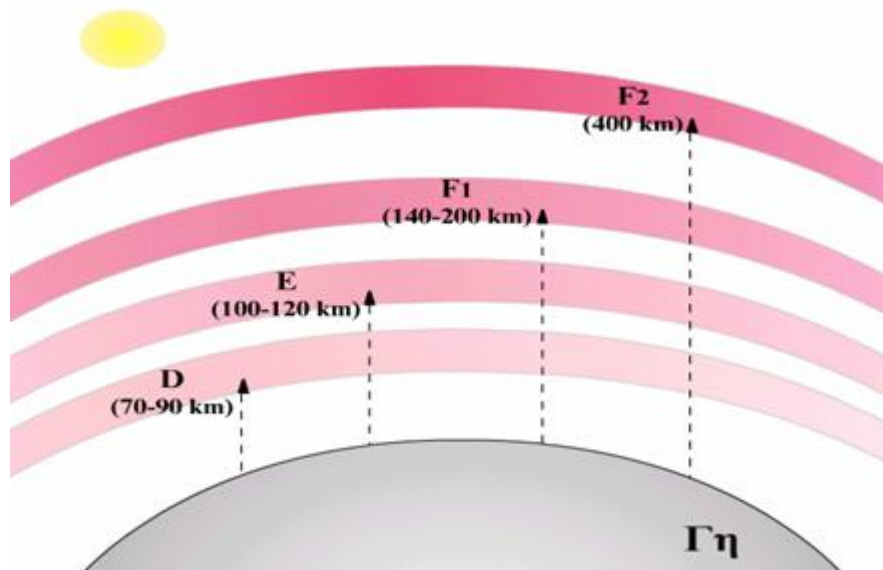
μεγαλύτερες στην επιφάνεια της θάλασσας (το νερό έχει μεγαλύτερη αγωγιμότητα) απ' ό,τι στην ξηρά.

Άλλες πειραματικές διαπιστώσεις είναι ότι όσο μικρότερη είναι η συχνότητα f του κύματος εδάφους (μεγαλύτερο μήκος κύματος) τόσο μικρότερη εξασθένηση υφίσταται λόγω απορρόφησης ενέργειας από το έδαφος και έχει καλύτερη συμπεριφορά προσαρμογής στη μορφολογία του εδάφους. Συμπερασματικά, αναφέρουμε ότι η διάδοση κυμάτων εδάφους με τους τρεις τρόπους, σε μεγάλες αποστάσεις απαιτεί μεγάλη σχετικά ισχύ εκπομπής.

Κύματα χώρου ή Ιονοσφαιρικά κύματα

Κύματα χώρου ή ιονοσφαιρικά κύματα είναι εκείνα, των οποίων οι κυματικές ακτίνες, αφού απομακρυνθούν από το έδαφος, ανακλώνται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (την ιονόσφαιρα) και επιστρέφουν, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2.2, προς τη γη. Αυτά τα κύματα επιτρέπουν κάλυψη μεγάλων αποστάσεων.

Η ιονόσφαιρα περιλαμβάνει τα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας που καταλαμβάνουν ύψη από 70 km από την επιφάνεια της γής έως και 400 km. Το όνομά της η ιονόσφαιρα το οφείλει στο γεγονός ότι αποτελείται από πολύ αγωγίμα ατμοσφαιρικά στρώματα λόγω της μεγάλης πυκνότητας 'ιόντων' (φορτισμένων σωματιδίων) που περιέχουν. Τα φορτία αυτά οφείλονται στον ιονισμό των ατόμων από την ηλιακή ενέργεια.



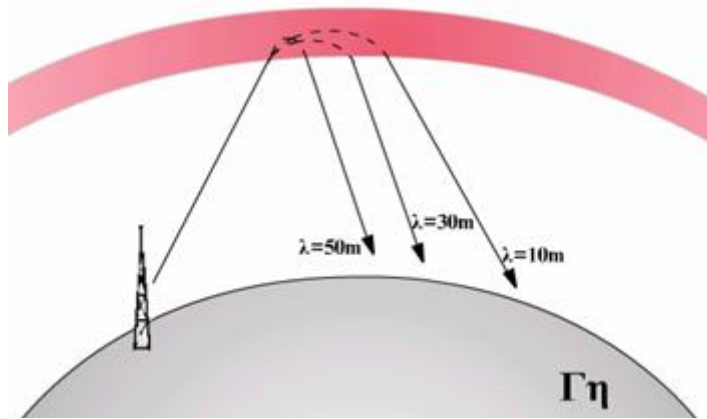
Σχήμα 4.2.4: Τα στρώματα της ιονόσφαιρας

Τα στρώματα της ιονόσφαιρας με τα σχετικά ύψη τους φαίνονται στο σχήμα 4.2.4.

Τα υψηλότερα στρώματα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ιονισμού. Το ύψος και το πάχος κάθε στρώματος επηρεάζονται σημαντικά από την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που τα ιονίζει. Γι' αυτό παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές μεταξύ ημέρας και νύχτας, (τη νύχτα εξασθενούν), ανάλογα με τις εποχές του έτους, χειμώνα, καλοκαίρι κλπ. Εξαρτώνται επίσης από τις ηλιακές μεταβολές (ηλιακές κηλίδες, καταιγίδες) και επηρεάζονται από μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της γης.

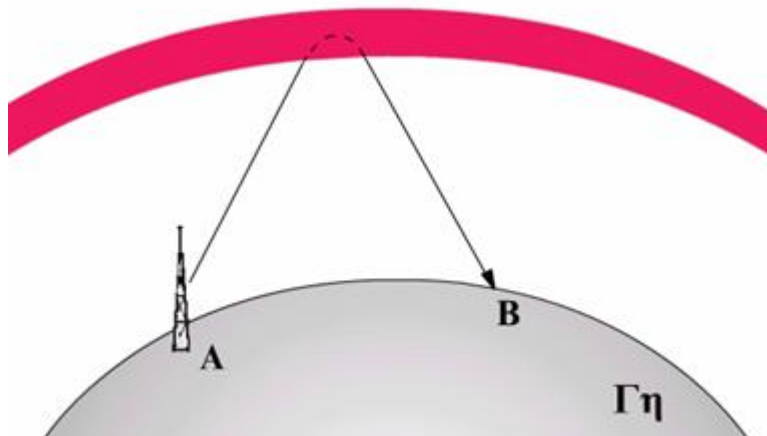
Είναι προφανές ότι οι μεταβολές αυτές των στρωμάτων της ιονόσφαιρας επηρεάζουν με τη σειρά τους σημαντικά το φαινόμενο της ανάκλασης των ραδιοκυμάτων σ' αυτά.

Καθώς το ηλεκτρομαγνητικό κύμα εισέρχεται στην ιονόσφαιρα, η ακτίνα διαδοχής του κυρτώνει (διαθλάται) όλο και περισσότερο όσο η πυκνότητα ιονισμού του στρώματος μεγαλώνει και κάτω από ορισμένες συνθήκες η κύρτωση της κυματικής ακτίνας είναι τέτοια, που τελικά το ραδιοκύμα επιστρέφει προς τη γη. Οι μελέτες και τα πειράματα έχουν δείξει ότι το φαινόμενο διευκολύνεται όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα ιονισμού του στρώματος και όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος λ (μικρότερη συχνότητα).

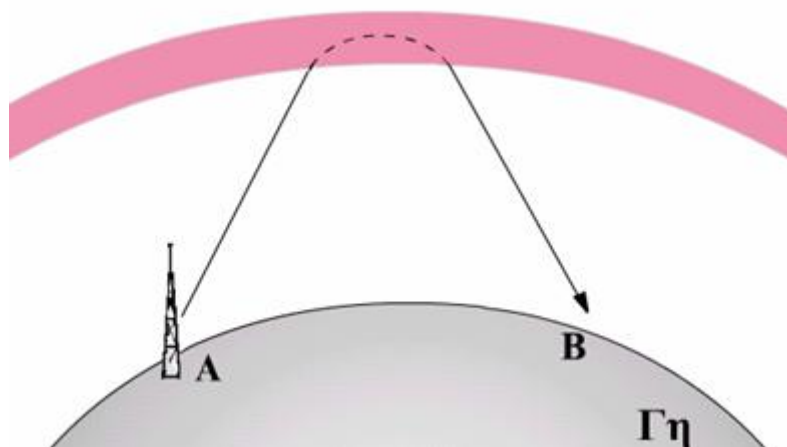


Σχήμα 4.2.5: Επίδραση του μήκους κύματος στην ανάκλαση

Αυτά τα συμπεράσματα επιβεβαιώνονται στο σχήμα 4.2.5.



Στα σχήματα 4.2.6 (α) και (β) σημειώνεται η διαφορά που υπάρχει μεταξύ ημέρας και νύχτας αντίστοιχα, όταν η πυκνότητα ιονισμού (λόγω έλλειψης ηλιακής ενέργειας) είναι μικρότερη.

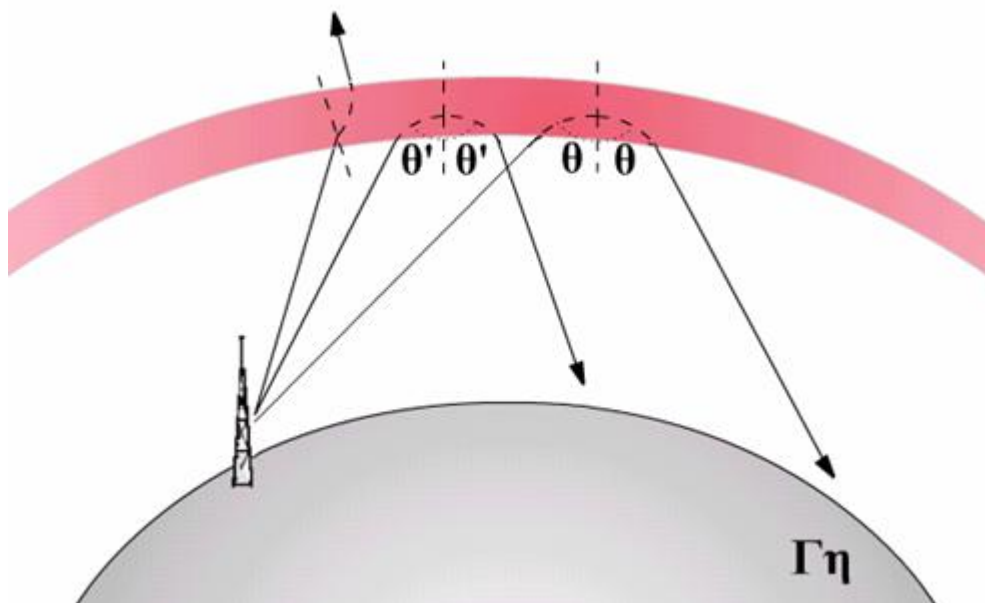


(α)
(β)

Σχήμα 4.2.6: Επίδραση της πυκνότητας ιονισμού στην ανάκλαση

Με αντίστροφο συλλογισμό καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ανάκλαση ραδιοκυμάτων μεγαλύτερης συχνότητας απαιτεί μεγαλύτερη πυκνότητα ιονισμού. Στα ανώτερα στρώματα της ιονόσφαιρας ανακλώνται ραδιοκύματα υψηλότερων συχνοτήτων. Στα κατώτερα στρώματα ανακλώνονται οι χαμηλότερες συχνότητες.

Αν το ραδιοκύμα δεν υποστεί ανάκλαση στην ιονόσφαιρα, διέρχεται από αυτήν και καθώς αποσβήνεται χάνεται προς το άπειρο.

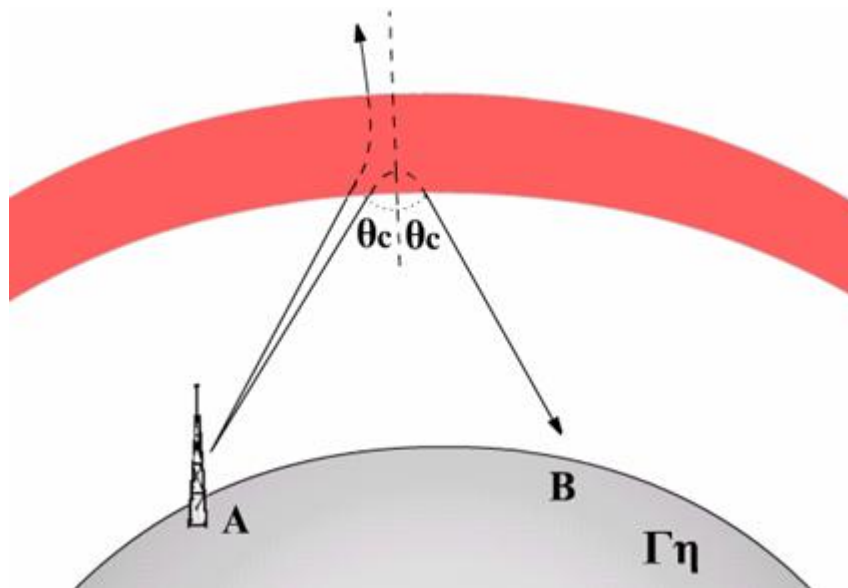


Η γωνία πρόσπτωσης θ της κυματικής ακτίνας (σχήμα 4.2.7) επίσης επηρεάζει το φαινόμενο της ανάκλασης. Αποδεικνύεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία πρόσπτωσης, τόσο διευκολύνεται το φαινόμενο.

Σχήμα 4.2.7: Επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στην ανάκλαση

Για δεδομένη πυκνότητα ιονισμού ως οριακή συχνότητα f_c , που χαρακτηρίζει το αντίστοιχο ιονοσφαιρικό στρώμα, θεωρείται η μέγιστη συχνότητα κύματος που προσπίπτοντας κάθετα στην ιονόσφαιρα μπορεί να ανακλαστεί. Αν η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος είναι μεγαλύτερη από την οριακή, το κύμα δεν ανακλάται, αλλά προσπερνά το αντίστοιχο στρώμα.

Ο συνδυασμός της συχνότητας του κύματος και της γωνίας πρόσπτωσης θ της ακτίνας οδηγούν στον ορισμό της μέγιστης χρήσιμης συχνότητας και της ελάχιστης οριακής απόστασης κάλυψης. Για δεδομένη συχνότητα εκπομπής, όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη από μιά οριακή γωνία θ_c το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δεν ανακλάται και χάνεται (σχήμα 4.2.8).



Σχήμα 4.2.8: Οριακή γωνία ανάκλασης και οριακή απόσταση ζεύξης

Με αντίστοιχο συλλογισμό, όταν μας ενδιαφέρει η ζεύξη μεταξύ δύο σημείων A και B (A: κεραία εκπομπής, B: κεραία λήψης), τότε δεδομένης της απόστασης AB υπάρχει μία μέγιστη συχνότητα MUF που μπορεί να χρησιμοποιηθεί (**MUF : Maximun Usable Frequency**) και πέρα από την οποία δεν μπορούμε να πετύχουμε ραδιοεπικοινωνία σε μικρότερη απόσταση.

Δηλαδή: $f < \text{MUF}$

(4)

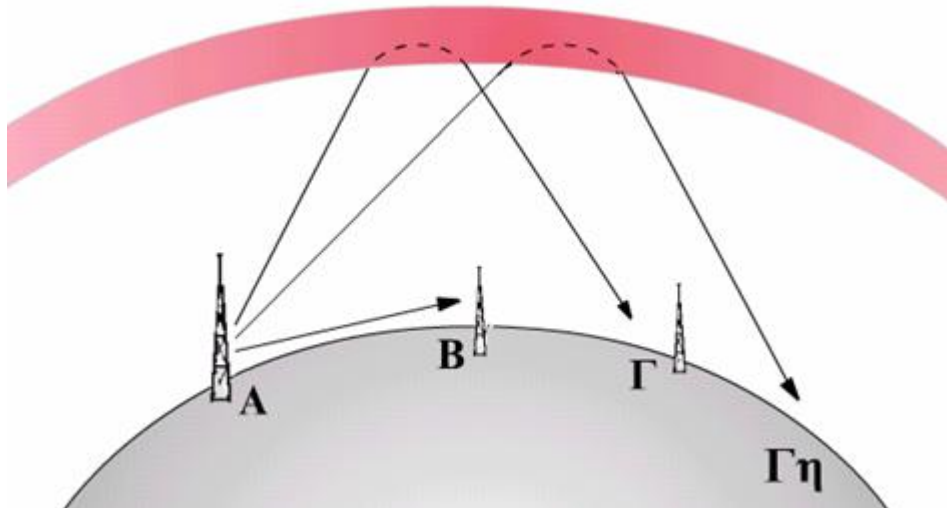
Η απόσταση που αντιστοιχεί στην τιμή της συχνότητας MUF ονομάζεται ελάχιστη οριακή απόσταση ζεύξης. Κυματικές ακτίνες, άρα κάλυψη, συναντούμε μακρύτερα από αυτή την απόσταση.

Το ραδιοκύμα κατά την διαδρομή του στα ιονοσφαιρικά στρώματα υφίσταται σημαντική εξασθένηση. Η εξασθένηση είναι μεγαλύτερη, όταν ο ιονισμός των στρωμάτων είναι μεγαλύτερος (για παράδειγμα, την ημέρα) και όσο η συχνότητα του κύματος είναι μικρότερη. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στον ορισμό της ελάχιστης συχνότητας εκπομπής (**LUF : Lowest Usable Frequency**) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την εκπομπή, ώστε το κύμα να μην απορροφηθεί (αποσβεστεί) τελείως από την ιονόσφαιρα.

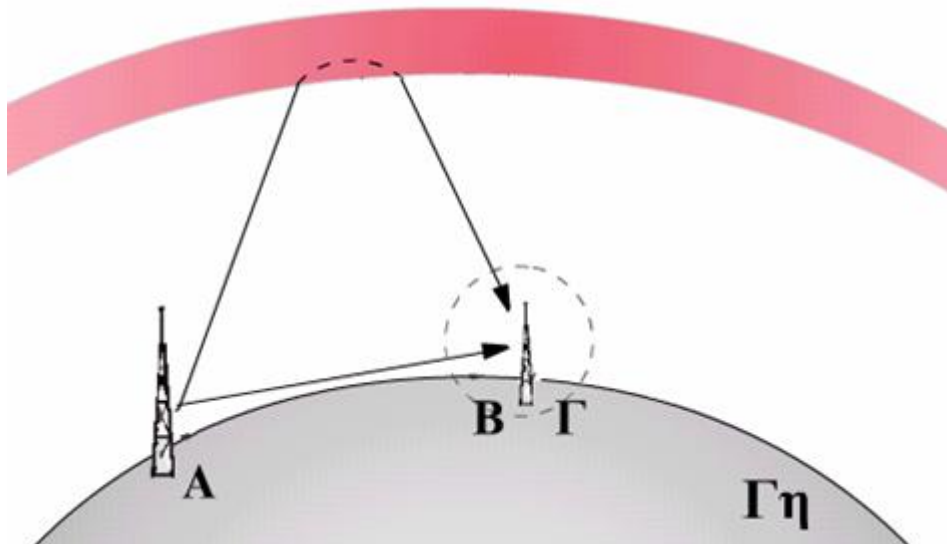
Μια ραδιοζεύξη με ιονοσφαιρικό κύμα είναι λοιπόν δυνατή για συχνότητες εκπομπής μεταξύ των τιμών LUF και MUF.

Οι διεθνείς οργανισμοί ραδιοεπικοινωνιών προσδιορίζουν και ανακοινώνουν τις τιμές των συχνοτήτων LUF και MUF με βάση τα ιονοσφαιρικά δεδομένα που επικρατούν κάθε φορά και που, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, έχουν σημαντική εξάρτηση από την ώρα, την εποχή, την ηλιακή δραστηριότητα και άλλους παράγοντες. Όσο και

να φαίνεται περίεργο, κάτω από ορισμένες ιονοσφαιρικές συνθήκες συμβαίνει η προσδιοριζόμενη συχνότητα LUF να είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα MUF. Σ' αυτή την περίπτωση η συνθήκη (4) δεν μπορεί να ικανοποιηθεί και η ραδιοξεύξη με ιονοσφαιρικά κύματα είναι εντελώς αδύνατη.



Συμπερασματικά, συγκεντρώνοντας στο σχήμα 4.2.9 τα φαινόμενα διάδοσης του κύματος εδάφους και του ιονοσφαιρικού κύματος ή κύματος χώρου οδηγούμαστε σε δύο σημαντικές παρατηρήσεις:



(α)

(β)

Σχήμα 4.2.9: Συνδυασμός κάλυψης από κύμα εδάφους και ιονοσφαιρικό κύμα

Αν η ελάχιστη οριακή απόσταση πέρα από την οποία έχουμε κάλυψη με ιονοσφαιρικό κύμα είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη κάλυψη από το κύμα εδάφους, τότε υπάρχει ‘**μια ζώνη σιγής**’ όπου δεν φτάνει το εκπεμπόμενο από τον πομπό σήμα (σχήμα 4.2.9α). Είναι πράγματι σύνηθες το φαινόμενο ένας πομπός ραδιοεπικοινωνίας να λαμβάνεται πολύ μακριά και να μην υπάρχει καθόλου λήψη σε ενδιάμεσες θέσεις.

- Αν η ελάχιστη οριακή απόσταση της ιονοσφαιρικής ζεύξης είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την απόσταση κάλυψης του κύματος εδάφους (σχήμα 4.2.9β), τότε στην κεραία λήψης έχουμε τη συμβολή των δύο κυμάτων που ακολούθησαν διαφορετικούς δρόμους. Επειδή, όπως σημειώσαμε και με άλλη ευκαιρία, η συμβολή είναι διανυσματική, το αποτέλεσμα εξαρτάται από τη σχετική φάση των δύο σημάτων. Μπορεί να είναι αθροιστικό (εντονότερο σήμα) ή αφαιρετικό (ελττωμένο σήμα). Είναι το φαινόμενο των ‘**διαλείψεων του σήματος (Fading)**’. Οι διαλείψεις δεν είναι σταθερό φαινόμενο, αλλά εξελίσσεται συνεχώς. Εξαρτάται από τους δρόμους των σημάτων, την κατάσταση της ιονόσφαιρας, από δευτερογενείς ενδεχομένως ανακλάσεις του κύματος σε εμπόδια, από τις μετεωρολογικές συνθήκες κ.α.

Εφαρμογή 1: Έχει ανακοινωθεί από την αρμόδια υπηρεσία ότι οι συχνότητες MUF και LUF είναι 22 MHz και 12 MHz αντίστοιχα. Ποια ή ποιες από τις παρακάτω συχνότητες μπορούμε να επιλέξουμε για ραδιοζεύξη με ιονοσφαιρικό κύμα .
(10 MHz, 8 MHz, 16 MHz, 25 MHz, 19 MHz)

Αύση: Μπορούμε να επιλέξουμε τις 16 MHz και 19 MHz, που επαληθεύουν τη σχέση (4)

Εφαρμογή 2: Κύμα συχνότητας $f_1=20$ MHz ή $f_2=28$ MHz ανακλάται ευκολότερα στην ιονόσφαιρα; Υποθέτουμε ότι και οι δύο συχνότητες ικανοποιούν τη συνθήκη (4).

Αύση: Το κύμα με συχνότητα 20 MHz (μεγαλύτερο μήκος κύματος).

Διάδοση των μικροκυμάτων

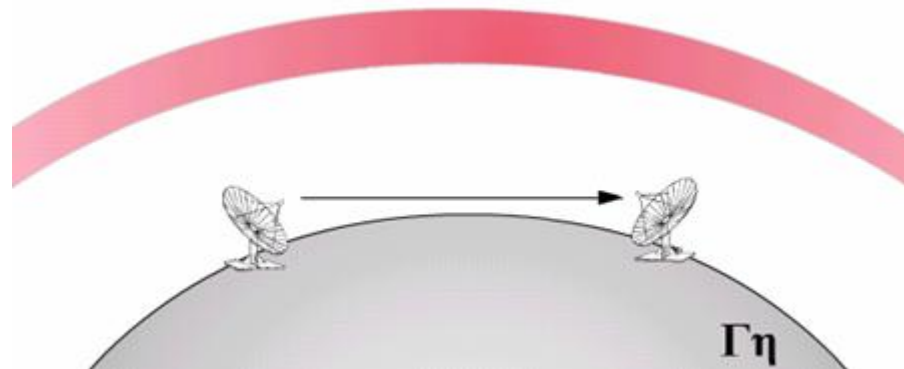
Με το γενικό όρο μικροκύματα ομαδοποιείται το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με συχνότητες πέραν των 300 MHz και με μήκη κύματος μικρότερα του 1m.

Συγκεκριμένα:

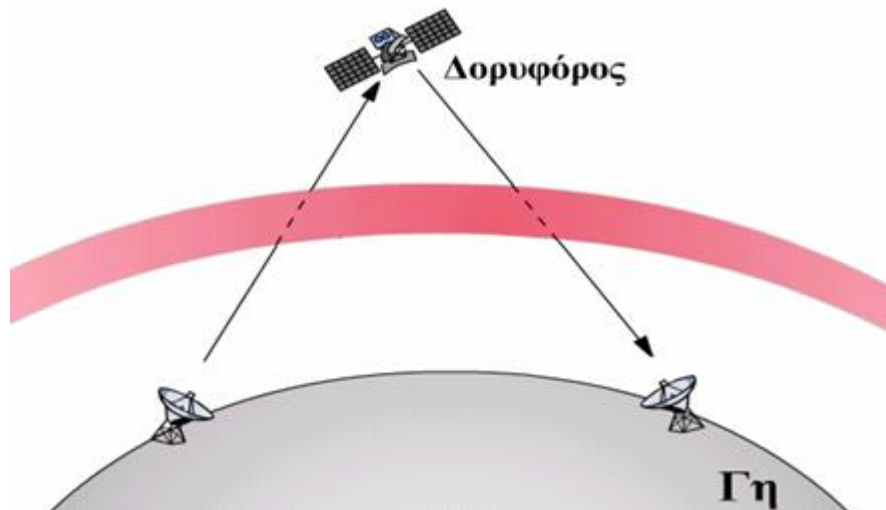
- Τα δεκατομετρικά κύματα από 300 MHz έως 3 GHz.
- Τα εκατοστομετρικά κύματα από 3GHz έως 30 GHz.
- Τα χιλιοστομετρικά κύματα από 30 GHz έως 300 GHz.

Οι συνθήκες διάδοσης είναι ακριβώς οι ίδιες μ’ αυτές των υπερβραχέων, με έμφαση στο γεγονός ότι λόγω των μικρών μηκών κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις ραδιοζεύξεις λίαν κατευθυντικές κεραίες ανάλογων διαστάσεων. Λόγω της κατευθυντικότητας των κεραιών δεν απαιτούνται μεγάλες ισχύες εκπομπής (σχήμα 4.3.4α).

Η ιδιαίτερη αξιοποίηση αυτών των κυμάτων, που λόγω της υψηλής συχνότητας επιτρέπουν διαμορφώσεις μεγάλου εύρους με τεράστιο όγκο πληροφορίας, ανοίγει νέο κεφάλαιο στις τηλεπικοινωνίες.



(α)



(β)

Σχήμα 4.3.4: Ραδιοζεύξεις με μικροκύματα
α) Με οπτική επαφή κεραιών β) Μέσω δορυφόρου

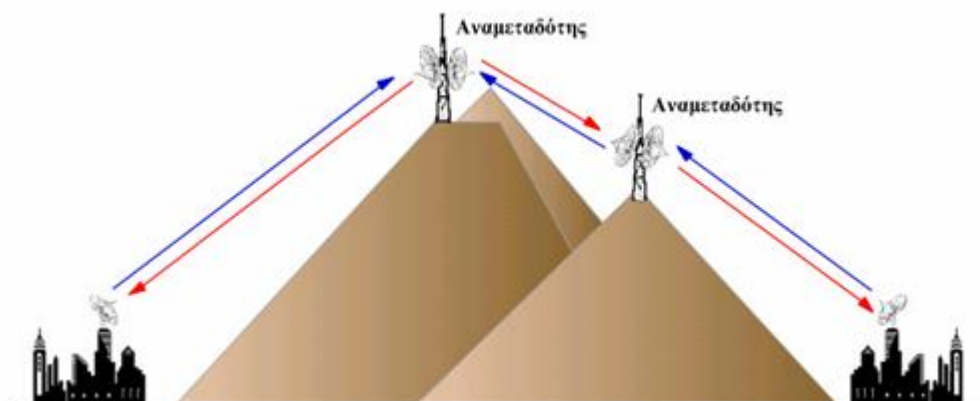
Πράγματι, καθώς τα κύματα αυτά διαπερνούν εύκολα τα στρώματα της ιονόσφαιρας, χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις **δορυφορικές επικοινωνίες**. Η εκπομπή και η λήψη των σημάτων γίνεται με κατοπτρικές κεραίες υψηλής κατευθυντικότητας που βλέπουν το δορυφόρο (παράγραφος 4.4.4).

Εφαρμογή : Σε ραδιοζεύξη υπερβραχέων κυμάτων τα ύψη των κεραιών εκπομπής και λήψης είναι αντίστοιχα 400 m και 200 m. Να εκτιμηθεί το μήκος του ραδιοηλεκτρικού ορίζοντα.

Λύση: Από τη σχέση (5) υπολογίζουμε σε μέτρα:

$$D = 140656 \text{ m} = 140,656 \text{ km}$$

Μικροκυματικές ραδιοζεύξεις

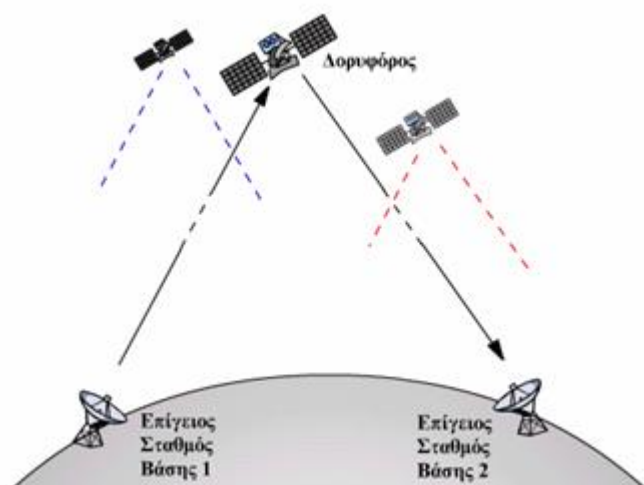


Επειδή στην περίπτωση των μικροκυματικών ζεύξεων είναι απαραίτητη η οπτική επαφή των κεραιών, η εμβέλεια των συστημάτων είναι περιορισμένη. Γι' αυτό χρησιμοποιείται συχνά η τεχνική της πολλαπλής αναμετάδοσης του σήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.5. Οι μικροκυματικές ζεύξεις (γνωστές και με τον όρο **Radio Link**) χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς, και όχι μόνο, με ευρύ φάσμα διαμόρφωσης για ζεύξεις λίαν κατευθυντικές 'σημείου' προς 'σημείο' (point to point) ή 'πολλαπλών σημείων' (point to multipoint) με μικρή ισχύ εκπομπής.

Σχήμα 4.4.5: Μικροκυματικές ζεύξεις με πολλαπλή αναμετάδοση

Δορυφορικές ζεύξεις

Οι δορυφορικές ζεύξεις είναι μικροκυματικές ζεύξεις 'σημείου' προς 'σημείο' ή 'πολλαπλών σημείων' όπου ο αναμεταδότης έχει τοποθετηθεί πάνω σε δορυφόρο σε τροχιά γύρω από τη γη.



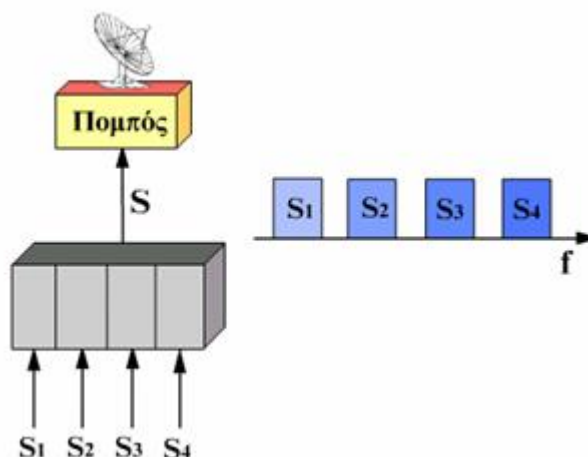
Σχήμα
4.4.6: Δορυφορικές
ζεύξεις

Μια πλήρης ζεύξη μέσω δορυφόρου απαιτεί ένα φέρον κύμα για ζεύξη από το σταθμό εκπομπής εδάφους προς το δορυφόρο, του οποίου η συχνότητα ονομάζεται **ανερχόμενη (up link frequency)**, και ένα φέρον για ζεύξη από το δορυφόρο προς το σταθμό

εδάφους, του οποίου η συχνότητα ονομάζεται κατερχόμενη (**down link frequency**) (σχήμα 4.4.6).

Στις δορυφορικές επικοινωνίες, λόγω χρήσης κατευθυντικών κατοπτρικών κεραιών (παραβολικές κεραίες) η απαιτούμενη ισχύς είναι γενικά μικρή, έως μερικά Watt. Σ' ένα δορυφόρο τοποθετούνται συνήθως πολλοί αναμεταδότες, για να εξυπηρετηθούν πολλές ανεξάρτητες ραδιοζεύξεις.

Η χρήση των δορυφόρων σήμερα γενικεύεται και αξιοποιούνται για ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές εκπομπές, για ραδιοτηλεφωνία και για την κινητή τηλεφωνία.



Στους σταθμούς εδάφους τις περισσότερες φορές **με την τεχνική της πολυπλεξίας** ομαδοποιούνται τα σήματα που προέρχονται από περισσότερους χρήστες ή από περισσότερες της μιας εφαρμογές. Αυτό γίνεται, για να μην απαιτείται για κάθε εφαρμογή ανεξάρτητη δορυφορική ζεύξη. Για παράδειγμα, δύο τηλεοπτικοί σταθμοί ομαδοποιούν τα σήματα δύο ανεξάρτητων εκπομπών και χρησιμοποιούν για τη ζεύξη κοινό αναμεταδότη στον ίδιο δορυφόρο. Στην κινητή τηλεφωνία ομαδοποιούνται για δορυφορική ζεύξη από τη μία ήπειρο στην άλλη τα σήματα χιλιάδων χρηστών. Η τεχνική της πολυπλεξίας γίνεται με τρόπο που επιτρέπει πάλι το διαχωρισμό των σημάτων στη λήψη, ώστε να δρομολογηθούν προς τους τελικούς χρήστες. Στο σχήμα 4.4.7 φαίνεται η τεχνική της φασματικής πολυπλεξίας όπου περισσότερα από ένα σήματα ομαδοποιούνται, με τρόπο που οι φασματικές τους ζώνες να μην αλληλοκαλύπτονται. Στη λήψη με κατάλληλα φίλτρα θα διαχωριστούν πάλι και θα δρομολογηθούν σε ανεξάρτητους χρήστες.

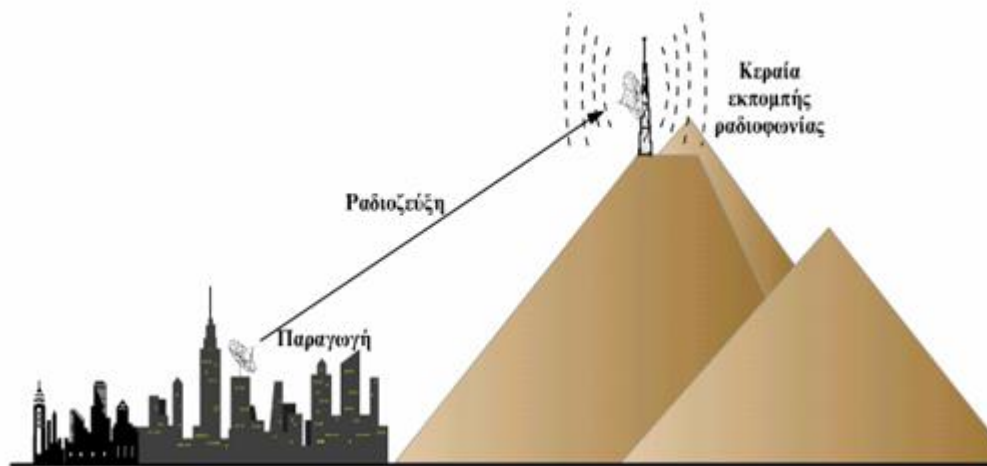
Σχήμα 4.4.7: *Επίγειος δορυφορικός σταθμός με πολυπλεξία*

Υπάρχουν **δορυφόροι υψηλής ή χαμηλής τροχιάς** (MEO, LEO), ανάλογα με το ύψος που βρίσκονται, ενώ αυτοί των οποίων η κίνηση (περιστροφή) είναι σύγχρονη με την κίνηση της γης ονομάζονται **γεωστατικοί δορυφόροι**. Η τροχιά τους είναι πάνω από τον ισημερινό σε ακτίνα περίπου 36.000 km και φαίνονται ακίνητοι από οποιοδήποτε σημείο της γης.

Τύποι ραδιοζεύξεων

Τα φαινόμενα της διάδοσης και οι ιδιαιτερότητες των ραδιοκυμάτων καθορίζουν, ανάλογα με την περίπτωση, τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιήσουμε και τον τρόπο αξιοποίησης του.
Ας δούμε τις βασικότερες εφαρμογές.

Εφαρμογές ραδιοφωνίας



Στις εφαρμογές της ραδιοφωνίας το σήμα απευθύνεται σε πολλούς δέκτες, οι οποίοι ως προς το σύστημα εκπομπής έχουν τυχαία θέση. Πρέπει λοιπόν να χρησιμοποιηθεί μεγάλη ισχύς εκπομπής του φέροντος, για να εξασφαλίζει μεγάλη εμβέλεια και επιπλέον η κάλυψη του χώρου να είναι σφαιρική. Αυτό ισχύει τόσο για τις ραδιοφωνικές εκπομπές στα μεσαία όσο και στην FM ραδιοφωνία, που είναι στη ζώνη των υπερβραχέων. Ιδιαίτερα στην τελευταία περίπτωση, καθώς απαιτείται οπτική επαφή των κεραιών πομπού και δέκτη, η κεραία εκπομπής πρέπει να τοποθετηθεί σε υψόμετρο, σε κάποιο βουνό, λόφο ή ψηλό πύργο, ώστε ο οπτικός ορίζοντας να είναι μεγάλος. Το ίδιο ισχύει, με μεγαλύτερη εμφαση, για τις εκπομπές της τηλεόρασης, που πραγματοποιούνται στις ζώνες των VHF και στις ζώνες των UHF κυμάτων.

Σχήμα 4.4.1: Στη ραδιοφωνία απαιτείται σφαιρική κάλυψη και μεγάλη εμβέλεια. Οι κεραίες τοποθετούνται ψηλά.

Αν ο χώρος παραγωγής του προγράμματος (studio) δε βρίσκεται στον ίδιο χώρο με την κεραία εκπομπής, το σήμα μεταφέρεται στην κεραία είτε με ομοαξονικό καλώδιο (αν η απόσταση είναι μικρή) είτε με μικροκυματική κατευθυντική ραδιοζεύξη, όπως αποδίδεται στο σχήμα 4.4.1.

Εφαρμογές ραδιοτηλεφωνίας

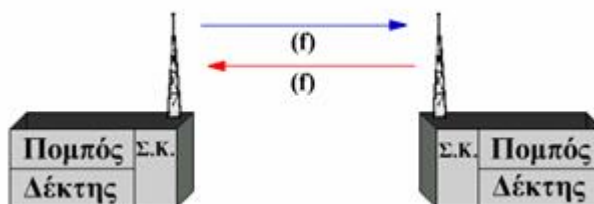
Πρόκειται για επικοινωνία μεταξύ συγκεκριμένων ανταποκριτών, που πραγματοποιούνται στη ζώνη των υπερβραχέων (VHF) και δεκατομετρικών κυμάτων (UHF). Εδώ οι ιδιαιτερότητες είναι πολλές. Κάθε ανταποκριτής συμμετέχει σε κάποιο δίκτυο ραδιοτηλεφωνίας, διαθέτει τη δική του μικρή συσκευή εκπομπής και λήψης τον 'πομποδέκτη' με μικρή κεραία που μέσω κατάλληλης διάταξης (συζεύκτη) χρησιμοποιείται και για την εκπομπή και για τη λήψη των σημάτων. Στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε το δικαίωμα να χρησιμοποιήσουμε μεγάλη ισχύ εκπομπής, διότι στον ίδιο χώρο, στην ίδια πόλη, στην ίδια περιοχή πρέπει να συνυπάρχουν πολλά συστήματα, πολλά ραδιοδίκτυα, όμοια με το δικό μας, που θα εξυπηρετήσουν πολλούς χρήστες. Οι κανόνες λοιπόν χρήσης των συχνοτήτων (των διαθέσιμων διαύλων) και εκμετάλλευσης τέτοιων δικτύων είναι πολύ αυστηροί. Καθορίζονται από τους διεθνείς τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς και εξειδικεύονται από τις αρμόδιες υπηρεσίες κάθε κράτους με μεγάλη αυστηρότητα. Οι χρησιμοποιούμενοι πομποδέκτες υπακούουν σε ακριβείς και προκαθορισμένες προδιαγραφές και ελέγχονται αυστηρά από τις αρμόδιες αρχές. Η ισχύς εκπομπής τους είναι περιορισμένη και δεν πρέπει σε καμμία περίπτωση να ξεπεράσει συγκεκριμένη τιμή.

Παράδειγμα: Ενδεχομένως το δίκτυο ραδιοτηλεφωνίας του πυροσβεστικού σώματος διαθέτει τη συχνότητα εκπομπής 170,125 MHz. Το αντίστοιχο ραδιοδίκτυο μιάς άλλης υπηρεσίας είναι στη συχνότητα 170,150 MHz. Το ραδιοδίκτυο μιάς τρίτης υπηρεσίας είναι στη συχνότητα εκπομπής 170,100 MHz. Καθένας, δηλαδή, διαθέτει μια ζώνη 25 KHz όπου πρέπει να χωρέσει το φάσμα της δικής του εκπομπής, του διαμορφωμένου φέροντος, που είδαμε στο τρίτο κεφάλαιο. Μέγιστη ισχύς εκπομπής του κάθε πομποδέκτη για όλους είναι τα 25 Watt.

Επισημάνθηκε ότι σ' αυτές τις ζώνες συχνοτήτων, για να έχουμε σωστή επικοινωνία, απαιτείται οπτική επαφή των κεραιών εκπομπής και λήψης. Προκύπτει ότι η εμβέλεια κάλυψης των συστημάτων αυτών είναι σχετικά μικρή, ιδιαίτερα σε περιοχές με πολλά φυσικά εμπόδια λόγω μορφολογίας εδάφους, εντός πόλεων, εντός κτιρίων κ.λ.π.

Στη ραδιοτηλεφωνία χρησιμοποιούμε τρεις τρόπους επικοινωνίας:

- Την απλή (SIMPLEX) επικοινωνία:

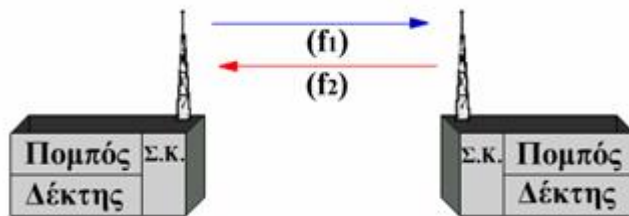


Οι δύο ανταποκριτές διαθέτουν πομποδέκτη (πομπό και δέκτη) με τον περιορισμό, όταν εκπέμπει ο ένας, ο άλλος λαμβάνει και αντίστροφα

(σχήμα 4.4.2). Και οι δύο χρησιμοποιούν την ίδια φέρουσα συχνότητα εκπομπής και λήψης.

Σχήμα 4.4.2: Μοντέλο simplex ραδιοεπικοινωνίας

- **Επικοινωνία πλήρως αμφίδρομη (FULL DUPLEX)**

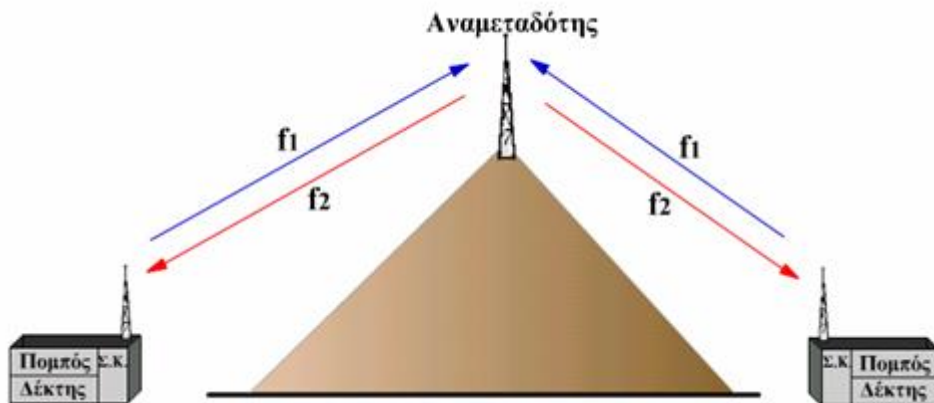


Στους ανταποκριτές που βρίσκονται σε επικοινωνία παρέχεται η δυνατότητα να εκπέμπουν και να λαμβάνουν στον πομποδέκτη τους ταυτόχρονα (ταυτόχρονη ομιλία και ακρόαση). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται δύο φέρουσες συχνότητες, f_1 και f_2 . Η συχνότητα εκπομπής του ενός είναι συχνότητα λήψης για τον άλλο, όπως αποδίδεται στο σχήμα 4.4.3.

Σχήμα 4.4.3: Μοντέλο full duplex ραδιοεπικοινωνίας

- **Ημιαμφίδρομη ζεύξη με αναμεταδότη (SEMI DUPLEX)**

Για να αυξήσουμε την εμβέλεια του συστήματος ραδιοηλεκτρονίας, χρησιμοποιείται αναμεταδότης που τοποθετείται σε υψηλό σημείο, ώστε να εξασφαλίζεται μέσω αυτού η ραδιοεπαφή των απλών συσκευών. Ο αναμεταδότης (repeater) συνδυάζει δέκτη και πομπό (σχήμα 4.4.4) και, καθώς η κεραία του είναι ψηλά, δημιουργεί μεγάλο ραδιοορίζοντα.



Σχήμα 4.4.4: Ραδιοεπικοινωνία μέσω αναμεταδότη

Κάθε τερματικός πομποδέκτης (του χρήστη) επικοινωνεί με κάποιον άλλο μέσω του αναμεταδότη ο οποίος, αφού λάβει ένα σήμα, το επανεκπέμπει. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η ζεύξη απαιτεί την χρήση δύο τουλάχιστον συχνοτήτων, f_1 και f_2 . Οι συσκευές των χρηστών εκπέμπουν φέρον στη μία συχνότητα (παράδειγμα, την f_1) και λαμβάνουν στην άλλη συχνότητα (f_2). Αντίθετα ο αναμεταδότης έχει συχνότητα λήψης την (f_1) και συχνότητα εκπομπής την (f_2).

Γραμμές μεταφοράς. Ομοαξονικό καλώδιο

Συνήθως σ' ένα σύστημα εκπομπής η κεραία δε βρίσκεται πολύ κοντά στο τελικό στάδιο ενίσχυσης του σήματος. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μεταφέρεται προς την κεραία με ειδικά καλώδια υψηλών συχνοτήτων, που λόγω του ρόλου τους τα ονομάζουμε **‘γραμμές μεταφοράς’**.

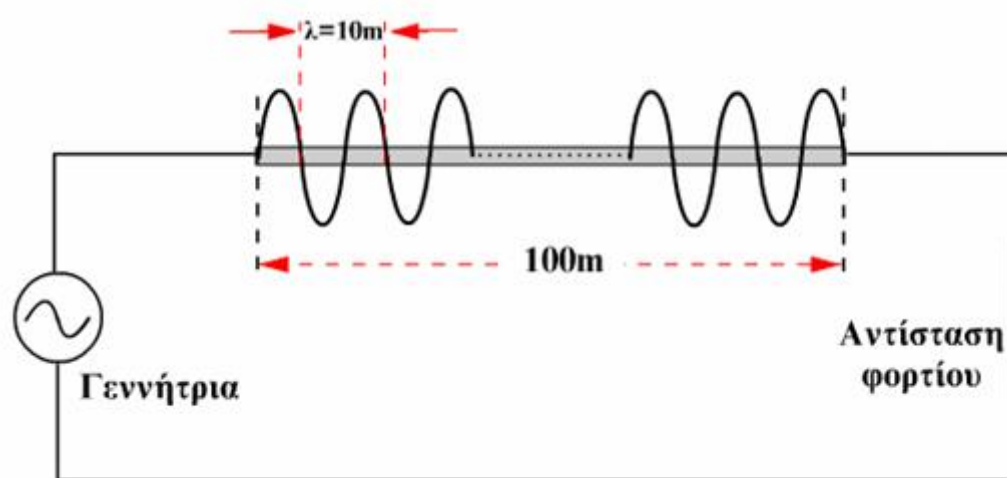
Υπάρχουν πολλοί παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στην μελέτη των γραμμών μεταφοράς και δεν χρησιμοποιείται ο ίδιος τύπος καλωδίου σε όλες τις εφαρμογές.

Για διευκόλυνση πρέπει να γίνουν κάποιες επισημάνσεις. Όταν χρησιμοποιούμε στον ηλεκτρισμό ένα οποιοδήποτε καλώδιο και το τροφοδοτούμε με συνεχή ή εναλλασσόμενη ημιτονική τάση χαμηλής συχνότητας, π.χ 50 Hz, το μήκος κύματος του σήματος είναι:

$$\lambda = (3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}) / 50 \text{ Hz} = 6 \cdot 10^7 \text{ m} = 6000 \text{ km}.$$

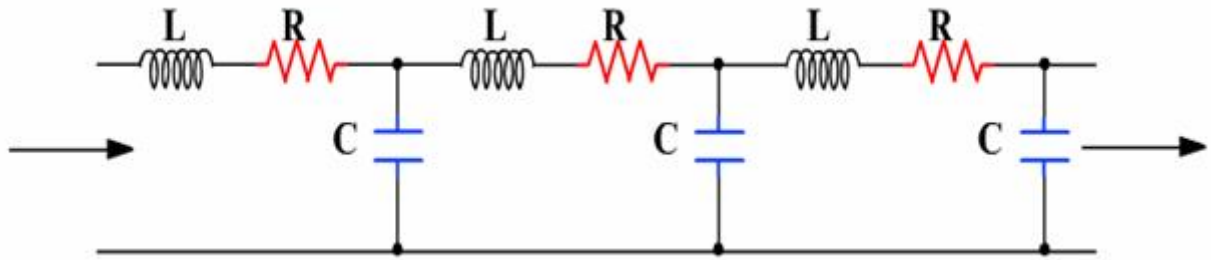
Για τον υπολογισμό του ρεύματος σ' ένα τμήμα καλωδίου, του οποίου το μήκος είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος του σήματος που διέρχεται από το καλώδιο, θεωρούμε ότι το ρεύμα σ' όλο το μήκος του καλωδίου έχει την ίδια τιμή, που υπολογίζεται από το νόμο του Ωμ. Δηλαδή, το καλώδιο χαρακτηρίζεται από την Ωμική του αντίσταση R ή την ειδική του αντίσταση ανά μονάδα μήκους. Οι υπολογισμοί τάσης και ρεύματος είναι απλοί.

Αντίθετα, για σήματα (ρεύματα) υψηλών συχνοτήτων, τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά. Ας πάρουμε ένα ακόμα παράδειγμα με συχνότητα σήματος $f = 30 \text{ MHz}$. Στην περίπτωση αυτή το μήκος κύματος είναι μόλις 10 m. Αν το καλώδιο που διαθέτουμε για να τροφοδοτήσουμε την αντίσταση φόρτου R_L του σχήματος 4.5.1 είναι 100 m, το ρεύμα ή η τάση που θα μετρήσουμε σε διαφορετικά σημεία του καλωδίου δεν έχουν την ίδια τιμή, αλλά αυτή εξαρτάται από το σημείο στο οποίο θα γίνει η μέτρηση.



Σχήμα 4.5.1 : Ρεύμα υψηλών συχνοτήτων σε γραμμή μεταφοράς

Φαίνεται λοιπόν ότι στην περίπτωση αυτή η συμπεριφορά του καλωδίου δεν περιγράφεται πλέον μόνο από το νόμο του Ωμ. Σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες έχουμε την εμφάνιση και άλλων φαινομένων (για παράδειγμα, το επιδερμικό φαινόμενο όπου το ρεύμα δεν διατρέχει ομοιόμορφα όλη τη διατομή του αγωγού, αλλά μόνο την εξωτερική επιφάνειά του) και το πρόβλημα της μεταφοράς της ενέργειας εμφανίζεται ακόμα πιο πολύπλοκο. Με άλλα λόγια, το καλώδιο στις υψηλές συχνότητες δε χαρακτηρίζεται μόνο από την Ωμική του αντίσταση.



Αποδεικνύεται ότι η συμπεριφορά μιας γραμμής μεταφοράς περιγράφεται καλύτερα, αν θεωρήσουμε ότι η γραμμή αποτελείται από μία αλληλουχία πηνίων, αντιστάσεων και πυκνωτών, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.2.

Σχήμα 4.5.2 : Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένα στοιχεία

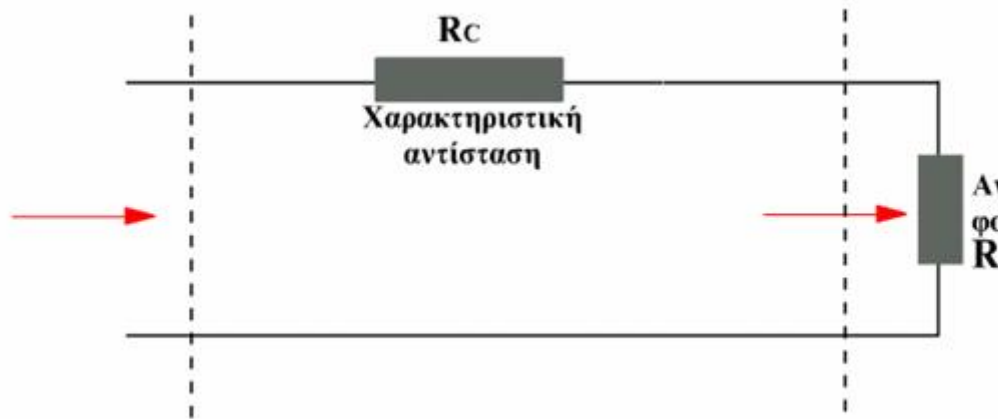
Οι τιμές των στοιχείων R , L και C , που δίνονται ανά μονάδα μήκους και όχι για το σύνολο της γραμμής (γι' αυτό λέγονται και **κατανεμημένα στοιχεία**), εξαρτώνται από τον τρόπο κατασκευής και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καλωδίου.

Οι αντιστάσεις R είναι υπεύθυνες για το γεγονός (που διαπιστώνεται πειραματικά) ότι το σήμα, καθώς διαδίδεται δια μέσου της γραμμής, εξασθενίζει αφού μέρος της ενέργειάς του μετατρέπεται σε θερμότητα. **Η εξασθένηση (α) του σήματος** μετριέται σε dB/km.

Ο συνδυασμός του πηνίου με τον πυκνωτή σχηματίζει ένα χαμηλοδιαβατό φίλτρο. Έτσι η γραμμή μεταφοράς συμπεριφέρεται ως μια αλληλουχία από χαμηλοδιαβατά φίλτρα που, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, περιορίζουν τη **ζώνη διέλευσης** (το εύρος ζώνης, Bandwith) της γραμμής μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι, ανάλογα με τις συχνότητες στις οποίες θέλουμε να εργαστούμε, πρέπει να επιλέξουμε την κατάλληλη γραμμή μεταφοράς.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό μιας γραμμής μεταφοράς είναι αυτό που ονομάζουμε **‘χαρακτηριστική αντίσταση’**. Η τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης δίνεται από τη σχέση

$$R_c = L / C$$



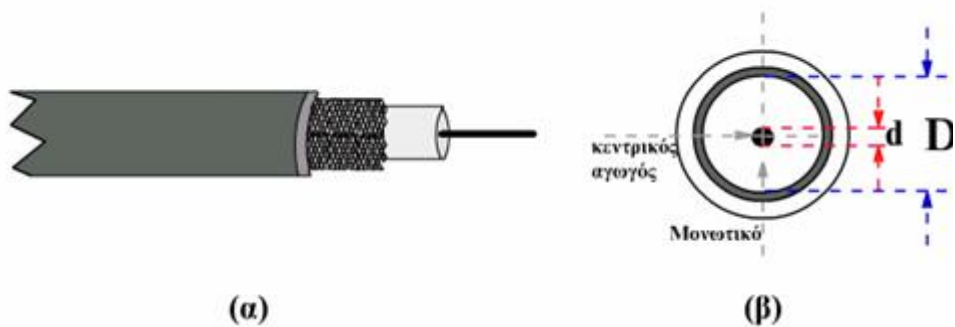
και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γραμμής μεταφοράς. Η φυσική σημασία της χαρακτηριστικής αντίστασης είναι πολύ σημαντική. Για να έχουμε τη μέγιστη μεταφορά ισχύος από τον ενισχυτή εξόδου του πομπού προς το φόρτο, δηλαδή την κεραία, πρέπει η ισοδύναμη αντίσταση της κεραίας να ισούται με την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς, δηλαδή πρέπει:

$$R_L = R_c .$$

Σχήμα 4.5.3 : Η γραμμή μεταφοράς χαρακτηρίζεται από το μέγεθος R_c . Ιδανική συνθήκη μεταφοράς ενέργειας: $R_L = R_c$

Στις συχνότητες έως και 1 GHz χρησιμοποιούνται συνήθως δύο είδη γραμμών μεταφοράς, το ομοαξονικό καλώδιο και η συμμετρική γραμμή δύο αγωγών.

- Το ομοαξονικό καλώδιο



Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη γραμμή μεταφοράς είναι το ομοαξονικό καλώδιο. Η κυλινδρική μορφή του και η διατομή του φαίνονται στο σχήμα 4.5.4.

Σχήμα 4.5.4 : Μορφή (α) και διατομή (β) ομοαξονικού καλωδίου

Αποτελείται από κεντρικό αγωγό διαμέτρου d , ο οποίος περιβάλλεται από ένα στρώμα μονωτικού (πολυαιθυλένιο ή τεφλόν), ενώ ο δεύτερος

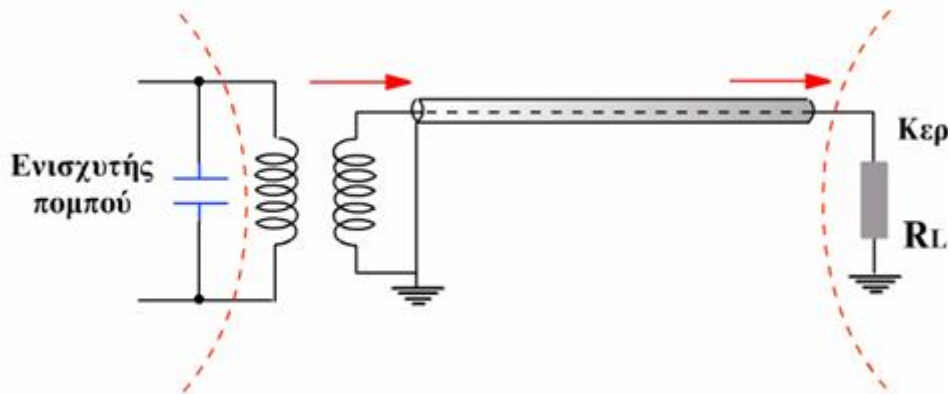
αγωγός κυλινδρικής μορφής περιβάλλει το σύνολο. Εξωτερικά υπάρχει για προφύλαξη νέο στρώμα ανθεκτικού πλαστικού.

Αν η εσωτερική διάμετρος του εξωτερικού αγωγού είναι D , αποδεικνύεται ότι η χαρακτηριστική αντίσταση του ομοαξονικού καλωδίου δίνεται από τη σχέση

$$R_c = (138/\sqrt{\epsilon}) \log(D/d), \quad (6)$$

όπου ϵ η σχετική διηλεκτρική σταθερά του μονωτή. Είναι περίπου 0,66 για μονωτή από πολυαιθυλένιο και 0.70 για μονωτή από τεφλόν.

Το ομοαξονικό καλώδιο ονομάζεται και ασύμμετρη γραμμή μεταφοράς, διότι τροφοδοτείται από τον ενισχυτή εξόδου με ασύμμετρο μετασχηματιστή (ένας ακροδέκτης στη γείωση), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.5.



Σχήμα 4.5.5 : Μεταφορά ενέργειας προς την κεραία με ομοαξονικό καλώδιο

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνεται ενδεικτικά ο τύπος καλωδίου με το αντίστοιχο εύρος ζώνης που προσφέρει, την τιμή της χαρακτηριστικής του αντίστασης και τις βασικές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται.

Πίνακας ομοαξονικών καλωδίων

Τύπος	Z_c	Συχνότητα	Απόσβεση	Εφαρμογές
RG-59/U	73Ω	100 MHz 400 MHz	10,0db/100m 21,0db/100m	TV,HF
RG-11/U	75Ω	100 MHz 400 MHz	7,5 db/100m 16,0db/100m	VHF
RG-214/U50Ω		100 MHz 400 MHz 900 MHz	6,0db/100m 14,0db/100m 23,5db/100m	Sat TV,UHF
RG-58/U53,5Ω		100 MHz	16,0 db/100m	HF,CB

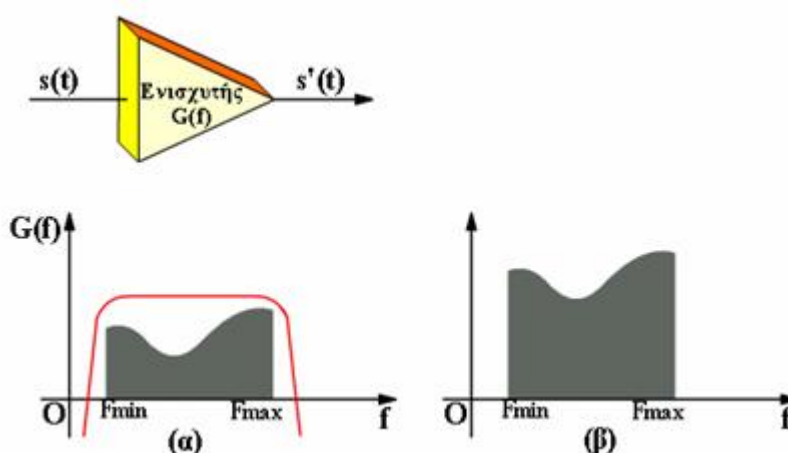
Να αναφέρουμε τέλος ότι η ταχύτητα του κύματος στο ομοαξονικό καλώδιο δίνεται από τη σχέση

$$c' = c / \sqrt{\epsilon} , \quad (7)$$

όπου c η ταχύτητα του κύματος στο κενό ($c=3 \cdot 10^8$ m/sec).

Εύρος ζώνης λειτουργίας. Φίλτρα

Ας θεωρήσουμε ένα σήμα $s(t)$, που έχει φασματική ζώνη από F_{\min} , F_{\max} .



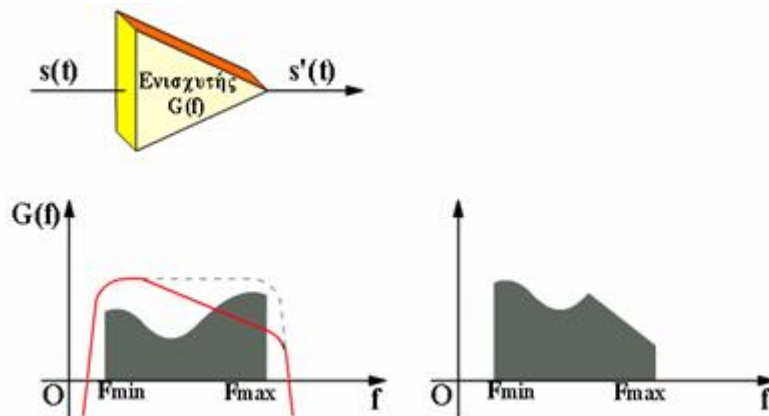
Αν αυτό το σήμα θέλουμε να το επεξεργαστούμε, για παράδειγμα να το ενισχύσουμε χωρίς να αλλοιώσουμε το φασματικό του περιεχόμενο (την ζώνη συχνοτήτων του), πρέπει ο ενισχυτής που θα χρησιμοποιήσουμε να ενισχύσει με τον ίδιο τρόπο όλες τις φασματικές ακτίνες του. Με απλούστερα λόγια, πρέπει ο ενισχυτής να σεβαστεί όλο το φάσμα του σήματος. Έμμεσα, δηλαδή, ορίζουμε τη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του ενισχυτή, που πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή οριακά ίση με τη φασματική ζώνη του σήματος (σχήμα 3.5.1).

Σχήμα 3.5.1 : Το εύρος λειτουργίας του ενισχυτή (σημειώνεται με κόκκινο) απαιτείται να είναι μεγαλύτερο από την φασματική ζώνη του σήματος. (α) (β)

Τα φάσματα στην είσοδο και στην έξοδο του ενισχυτή, αντίστοιχα

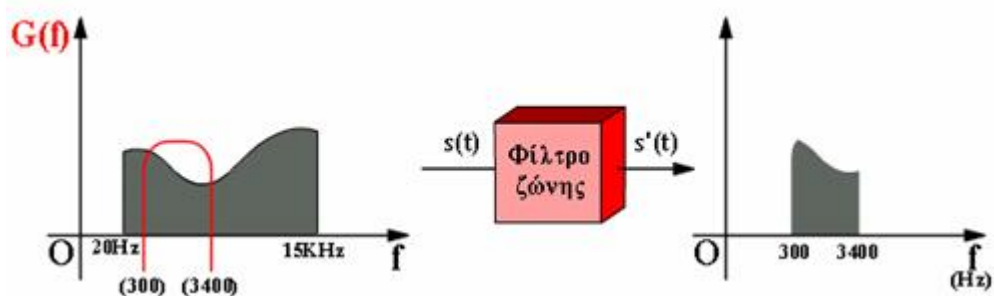
Τη ζώνη λειτουργίας την ονομάζουμε συχνά και ‘**εύρος ζώνης**’ (**Bandwith** – μπάντγουιθ, στην αγγλική γλώσσα).

Στην περίπτωση που ο ενισχυτής δεν μπορεί να εργαστεί σε όλες τις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν, το σήμα στην έξοδο θα είναι φτωχότερο και αλλοιωμένο (σχήμα 3.5.2).



Σχήμα 3.5.2: Αν ο ενισχυτής δε «σέβεται» όλη τη φασματική ζώνη του σήματος, στην έξοδο, το σήμα είναι αλλοιωμένο, έχει παραμόρφωση.

Υπάρχουν περιπτώσεις που θέλουμε να αλλοιώσουμε ή να αλλάξουμε την αρχική φασματική ζώνη ενός σήματος; Βεβαίως υπάρχουν. Υπάρχουν όμως και τα κατάλληλα κυκλώματα που μπορούμε να κατασκευάσουμε και να χρησιμοποιήσουμε, για να πετύχουμε αυτόν το στόχο. Είναι τα **‘φίλτρα’**, γνωστά από άλλο μάθημα, τα οποία χρησιμοποιούνται πάρα πολύ στις τηλεπικοινωνίες. Εδώ με κάποια παραδείγματα θα εστιάσουμε στην λειτουργική συμπεριφορά τους.

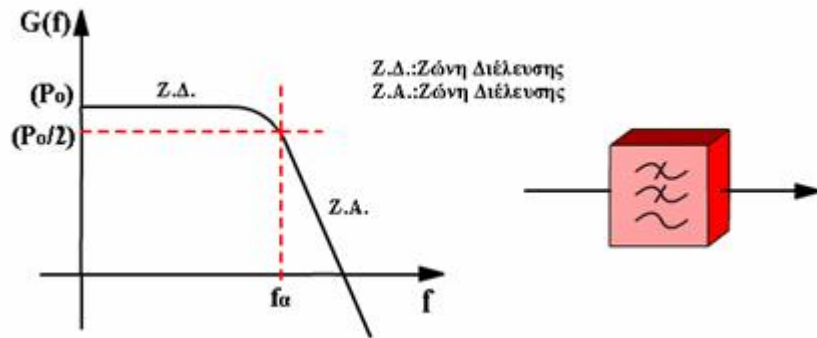


Στο σχήμα 3.5.3 που ακολουθεί χρησιμοποιούμε ένα φίλτρο, για να περιορίσουμε τη ζώνη του φάσματος της ομιλίας και να δημιουργήσουμε το τηλεφωνικό σήμα.

Σχήμα 3.5.3: Δημιουργία του τηλεφωνικού σήματος με κατάλληλο φίλτρο

Το φίλτρο σχεδιάστηκε, ώστε να επιτρέπει επιλεκτικά τη διέλευση ενός μόνο (μεσαίου) τμήματος της ζώνης του αρχικού σήματος. Από αυτή την άποψη είναι φίλτρο διέλευσης ζώνης. Βέβαια το σήμα στην έξοδο είναι διαφορετικό από αυτό της εισόδου.

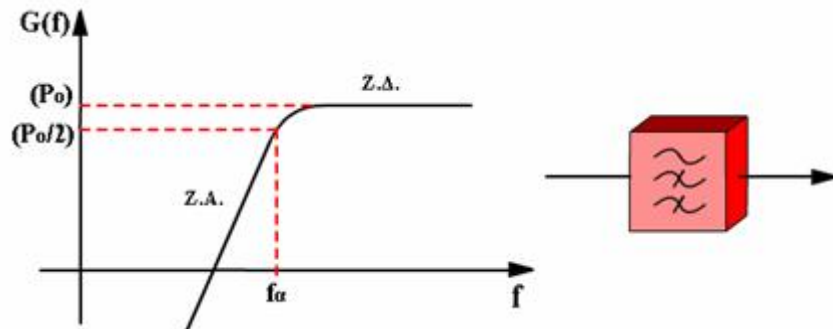
Γενικά, ανάλογα με το τμήμα του φάσματος που επιλέγει ένα φίλτρο, τα διακρίνουμε σε:



Χαμηλοδιαβατό ή χαμηλοπερατό φίλτρο. Είναι αυτό που επιλεκτικά αφήνει να διέλθει το χαμηλό τμήμα συχνοτήτων. Η λειτουργία του και το σύμβολό του φαίνονται στο σχήμα 3.5.4. του.

Σχήμα 3.5.4: Ζώνη διέλευσης και σύμβολο του χαμηλοπερατού φίλτρου

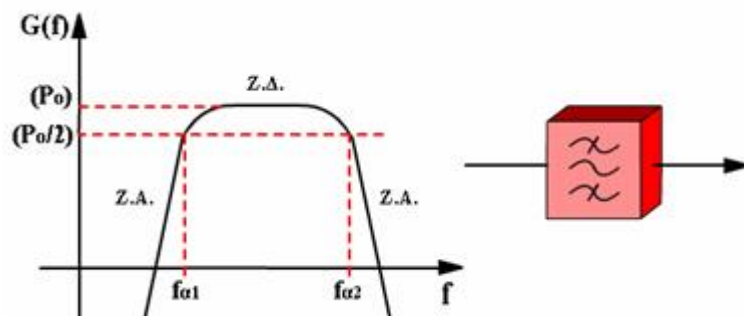
•



Υψηλοδιαβατό ή υψηλοπερατό φίλτρο. Είναι αυτό που επιλεκτικά αφήνει τη διέλευση του υψηλού τμήματος των συχνοτήτων. Η λειτουργία και το σύμβολό του φαίνονται στο σχήμα 3.5.5.

Σχήμα 3.5.5: Ζώνη διέλευσης και σύμβολο υψηλοπερατού φίλτρου

•

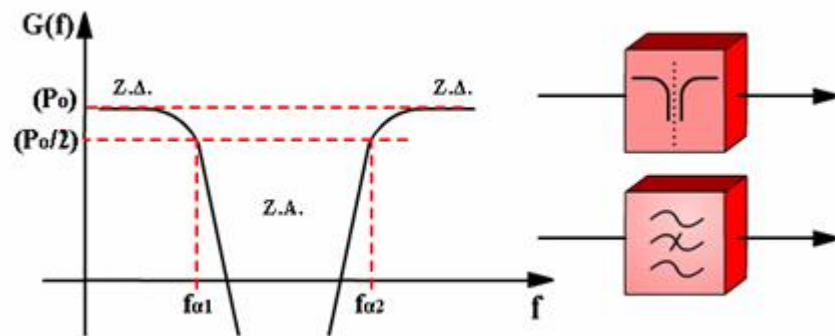


Φίλτρο διέλευσης ζώνης. Είναι αυτό που επιτρέπει τη διέλευση συγκεκριμένου μεσαίου τμήματος του φάσματος.

Σχήμα 3.5.6: Λειτουργία και σύμβολο φίλτρου διέλευσης ζώνης

Η λειτουργία και το σύμβολό του φαίνονται στο σχήμα 3.5.6.

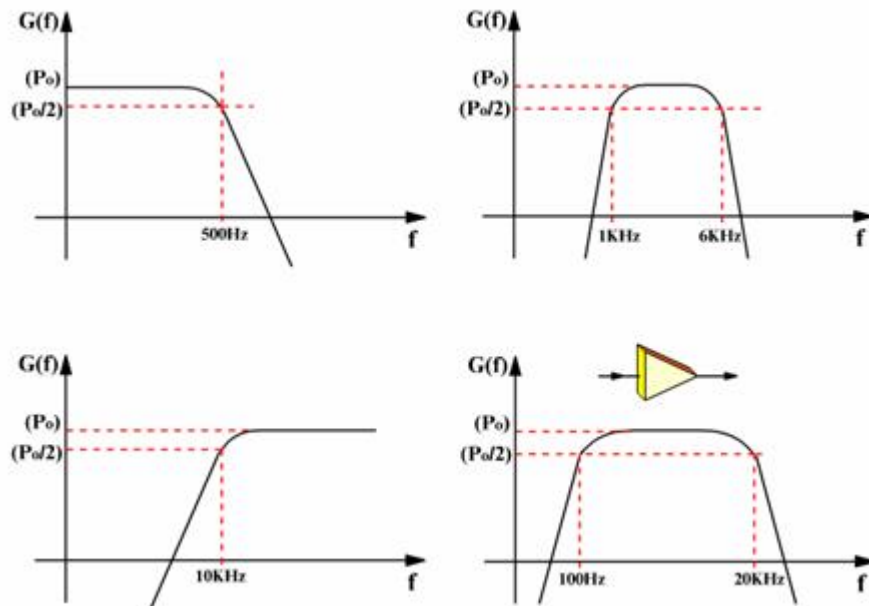
•



Φίλτρο απόρριψης ζώνης. Είναι αυτό που δεν αφήνει να διέλθει συγκεκριμένο μεσαίο τμήμα του φάσματος ενός σήματος. Η λειτουργία και το σύμβολό του φαίνονται στο σχήμα

Σχήμα 3.5.7: Λειτουργία και σύμβολα φίλτρου απόρριψης ζώνης

3.5.7.



Για να μπορούμε να εκτιμήσουμε το εύρος ζώνης λειτουργίας ενός φίλτρου, ενός ενισχυτή και γενικότερα ενός συστήματος έχουμε όλοι αποδεχτεί ότι τα όρια της ζώνης είναι οι συχνότητες στις οποίες η ισχύς του σήματος στην έξοδο υποβιβάζεται κατά 3 dB, δηλαδή διαιρείται δια δύο, σε σχέση με την ισχύ που έχει το σήμα στις συχνότητες λειτουργίας. Αυτά τα όρια ονομάζονται **‘συχνότητες αποκοπής’** (σχήμα 3.5.8).

Σχήμα 3.5.8: Διάφορα φίλτρα. Ορισμός των συχνοτήτων αποκοπής

Εφαρμογή: Στα παραδείγματα του σχήματος 3.5.8 οι συχνότητες αποκοπής είναι:

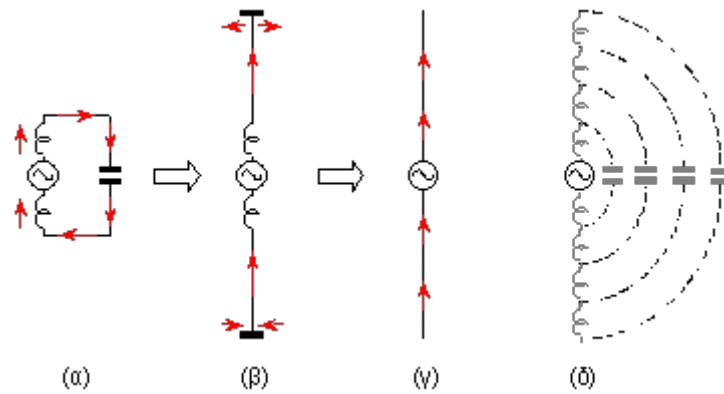
- Για το χαμηλοπερατό φίλτρο $f_a = 500 \text{ Hz}$.
- Για το φίλτρο ζώνης $f_{a1} = 1000 \text{ Hz}$, $f_{a2} = 6000 \text{ Hz}$.
- Για το υψηλοδιαβατό $f_a = 10 \text{ kHz}$.
- Τα όρια της ζώνης λειτουργίας του ενισχυτή είναι $f_1 = 100 \text{ Hz}$, $f_2 = 20 \text{ kHz}$.

Στις τηλεπικοινωνίες η έννοια του εύρους ζώνης λειτουργίας αφορά όλα τα συστήματα και υποσυστήματα τόσο του πομπού , όσο και του δέκτη. Αφορά επίσης και το μέσο διάδοσης είτε αυτό είναι καλώδιο είτε οπτική ίνα είτε το κενό. Για παράδειγμα, ένα καλώδιο, λόγω των παρασιτικών χωρητικοτήτων (πυκνωτών) και των παρασιτικών πηνίων που το συνοδεύουν, συμπεριφέρεται ως φίλτρο και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά οποιουδήποτε σήματος. Το τηλεφωνικό δισύρματο καλώδιο αποδεικνύεται στην πράξη καλό για το τηλεφωνικό σήμα, που η φασματική του ζώνη είναι μικρή. Δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ίδιο καλώδιο για το σήμα της τηλεόρασης, που έχει πολύ ευρύτερο φάσμα. Στο σπίτι μας διαπιστώνουμε ότι το καλώδιο της τηλεόρασης είναι διαφορετικό. Είναι κυλινδρικό, με κεντρικό αγωγό και θωράκιση και πολύ ακριβότερο από το προηγούμενο. Το καλώδιο αυτό είναι ειδικής κατασκευής και προσφέρει μεγαλύτερο εύρος ζώνης λειτουργίας (bandwidth)

Η έννοια της κεραίας

Στην εισαγωγή του κεφαλαίου είδαμε ότι οι κεραίες είναι διατάξεις αποτελούμενες από συστήματα αγωγών, που εκπέμπουν ή συλλαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Για την εκπομπή οι κεραίες συνδέονται στην έξοδο ενός πομπού, ενώ για τη λήψη συνδέονται στην είσοδο ενός δέκτη. Μια κεραία εκπομπής μπορεί εξίσου καλά να εργαστεί και ως κεραία λήψης, και αντίστροφα. Μάλιστα αυτή η κεραία θα διατηρεί τις ίδιες ιδιότητες (π.χ. προτίμηση προς ορισμένη κατεύθυνση εκπομπής – λήψης) και στους δύο ρόλους. Για το λόγο αυτό, όταν εξετάζουμε κεραίες, συνήθως περιοριζόμαστε στις κεραίες εκπομπής, αφού η μελέτη τους καλύπτει και τις κεραίες λήψης. Στην πράξη όμως οι κεραίες εκπομπής έχουν συνήθως διαφορετική μορφή από τις κεραίες λήψης, γιατί σχεδιάζονται για να ικανοποιούν διαφορετικές απαιτήσεις.

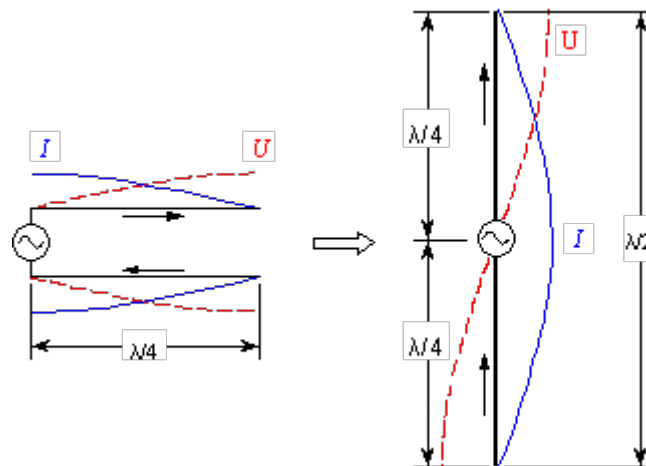
Μια κεραία σε λειτουργία μπορεί να θεωρηθεί κύκλωμα συντονισμού με πηνίο – πυκνωτή σε σειρά, όπως αυτό του σχήματος 6-10(α). Επειδή ένα τέτοιο κύκλωμα έχει μικρές διαστάσεις, δεν είναι δυνατό να ακτινοβολήσει ικανοποιητικά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα ρεύματα που κυκλοφορούν στις πλευρές του βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους και έχουν αντίθετες κατευθύνσεις, έτσι ώστε οι επιδράσεις τους αλληλοεξουδετερώνονται.



Σχήμα 6-10. Σχέση μεταξύ κεραίας και κυκλώματος συντονισμού

Απομακρύνοντας τις πλάκες του πυκνωτή, τα ρεύματα απομακρύνονται μεταξύ τους και αρχίζουν να ρέουν προς την ίδια κατεύθυνση. Ένα τέτοιο κύκλωμα, όπως του σχήματος 6-10(β), ακτινοβολεί, αλλά και πάλι όχι ικανοποιητικά, αφού τα ρεύματα στις πλάκες του πυκνωτή εξακολουθούν να έχουν αντίθετες κατευθύνσεις. Αν όμως καταργήσουμε τις πλάκες και αντικαταστήσουμε το πηνίο με ευθύγραμμο αγωγό, όπως στο 6-10(γ), τα ρεύματα γίνονται παντού ομόρροπα και το κύκλωμα μετατρέπεται σε κεραία που εκπέμπει κανονικά. Η αρχική χωρητικότητα και αυτεπαγωγή εξακολουθούν να υπάρχουν κατανεμημένες κατά μήκος της κεραίας (σχήμα 6-10(δ)).

Στο σημείο αυτό πρέπει να λάβουμε υπ' όψη ότι οι κεραίες συνδέονται στις εξόδους των πομπών με τη βοήθεια γραμμών μεταφοράς και να θυμηθούμε ότι ένα κομμάτι γραμμής μεταφοράς με μήκος $\lambda/4$ και ανοιχτό στο τέρμα του, συμπεριφέρεται σαν ένα συντονιζόμενο κύκλωμα σειράς, όπως αυτό του σχήματος 6-10(α). Αν λοιπόν πάρουμε μια γραμμή μεταφοράς και σε μήκος $\lambda/4$ από το άκρο της απομακρύνουμε τους αγωγούς μεταξύ τους, θα έχουμε μια κανονική κεραία.



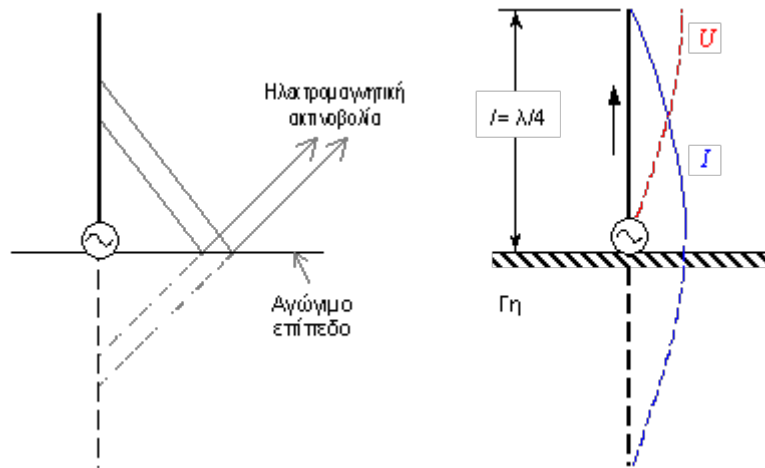
Σχήμα 6-11. Κεραία $\lambda/2$ και η προέλευσή της

Η κεραία του σχήματος 6-11 είναι μια κεραία $\lambda/2$ που ονομάζεται και δίπολο. Οι κατανομές της τάσης και του ρεύματος κατά μήκος αυτής της κεραίας θυμίζουν τη γραμμή $\lambda/4$ με ανοιχτό τέρμα. Στο μέσο της κεραίας όπου συνδέεται η πηγή τροφοδοσίας, εμφανίζεται κοιλία ρεύματος, ενώ στα άκρα της κεραίας εμφανίζονται κοιλίες τάσης. Τα ρεύματα και οι τάσεις δημιουργούν γύρω από την κεραία ένα

ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Πολύ κοντά στην κεραία το πεδίο είναι στενά συνδεδεμένο μαζί της και το μεγαλύτερο μέρος του απλώς πηγαινοέρχεται μεταξύ της κεραίας και του γύρω χώρου, χωρίς να ακτινοβολείται μακρύτερα. Το κοντινό αυτό πεδίο ονομάζεται **πεδίο επαγωγής** και έχει το χαρακτηριστικό ότι εξασθενεί γρήγορα με την απόσταση, έτσι ώστε σε μερικά μήκη κύματος μακρύτερα από την κεραία, πρακτικά εξαφανίζεται. Ένα μέρος όμως από την ενέργεια του κοντινού πεδίου αποσπάται από την κεραία και δεν επιστρέφει πίσω σ' αυτή. Αυτό το μέρος ενέργειας απομακρύνεται με την ταχύτητα του φωτός και διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Σε περιοχές λοιπόν μακριά από την κεραία υπάρχει μόνο αυτό το πεδίο, που ονομάζεται **πεδίο ακτινοβολίας** και έχει το χαρακτηριστικό ότι δεν εξασθενεί σημαντικά με την απόσταση. Οι ασύρματες συνδέσεις μεταξύ των κεραιών εκπομπής και των μακρινών κεραιών λήψης γίνονται με τη βοήθεια του πεδίου ακτινοβολίας.

Τύποι κεραιών εκπομπής

Οι κεραίες μπορούν να χωριστούν σε **συντονισμένες** και **ασυντόνιστες**. Οι συντονισμένες κεραίες έχουν μήκος που είναι προσαρμοσμένο στη συχνότητα του ρεύματος της πηγής και δεν μπορούν να λειτουργήσουν ικανοποιητικά σε διαφορετικές απ' αυτή συχνότητες. Αντίθετα, οι ασυντόνιστες κεραίες μπορούν να λειτουργήσουν εξίσου καλά σε πολύ διαφορετικές μεταξύ τους συχνότητες. Οι κεραίες όμως αυτές έχουν συνήθως μεγάλο μήκος και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους δεν είναι απολύτως σταθερά, γιατί μεταβάλλονται εύκολα από τις επιδράσεις του γύρω χώρου. Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιούνται σχετικά σπάνια. Οι συντονισμένες κεραίες χρησιμοποιούνται πολύ συχνά. Και αυτές με τη σειρά τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις **συμμετρικές** και τις **ασύμμετρες**. Οι συμμετρικές κεραίες προέρχονται από άνοιγμα γραμμών $\lambda/4$, έχουν, δηλαδή, γεωμετρικό μήκος $l=\lambda/2$. Αυτές, όπως είδαμε, ονομάζονται **δίπολα** ή κεραίες **Χερτζ**. Μια τέτοια συμμετρική κεραία είναι αυτή του σχήματος 6-14. Αντίθετα οι ασύμμετρες κεραίες έχουν το μισό μήκος από τις συμμετρικές, γιατί τους λείπει το ένα από τα δύο τμήματα $\lambda/4$, που απαρτίζουν το δίπολο. Οι κεραίες αυτές βασίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο του ηλεκτρικού ειδώλου. Το ηλεκτρικό είδωλο σχηματίζεται με τη βοήθεια ενός αγωγίμου επιπέδου, το οποίο τοποθετείται κάθετα στον άξονα της κεραίας κοντά στη θέση του σημείου τροφοδοσίας της. Το επίπεδο αυτό λειτουργεί σαν καθρέφτης για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και έτσι το πεδίο της ασύμμετρης κεραίας παραμένει ίδιο με αυτό της συμμετρικής. Οι κεραίες αυτού του τύπου ονομάζονται κεραίες $\lambda/4$ ή κεραίες **Μαρκόνι**. Το ρόλο του αγωγίμου επιπέδου μπορεί να τον παίζει το έδαφος ή μια κατάλληλη μεταλλική κατασκευή (σχήμα 6-12).



Σχήμα 6-12. Κεραία $\lambda/4$

Ο συντονισμός των παραπάνω κεραιών στη συχνότητα εκπομπής f γίνεται με ρύθμιση του μήκους τους, βάσει της σχέσης (6.1). Έτσι έχουμε :

Κεραία Χερτζ : $l = \frac{\lambda}{2} = \frac{u}{2f}$ (6.3). Κεραία Μαρκόνι : $l = \frac{\lambda}{4} = \frac{u}{4f}$ (6.4)

Όταν χρησιμοποιούμε αυτούς τους τύπους, θα πρέπει να θυμόμαστε ότι η ταχύτητα u αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του ρεύματος στην κεραία, που είναι μικρότερη κατά 5 ως 10% από την ταχύτητα του φωτός. Στην πράξη παίρνουμε **$u = 285.000.000$ μέτρα το δευτερόλεπτο** και βγάζουμε το μήκος της κεραίας σε μέτρα.

Χαρακτηριστικά κεραιών

Για κάθε κεραία υπάρχουν μια σειρά από μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία της και την καταλληλότητά της για κάθε περίπτωση χρήσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα εξής :

1. Η ιδιοσυχνότητα f_o .

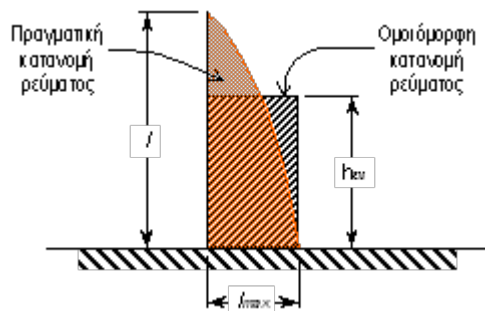
Η ιδιοσυχνότητα είναι η συχνότητα στην οποία συντονίζεται μια κεραία με δοσμένο μήκος. Όπως είδαμε, μια κεραία συμπεριφέρεται σαν συντονισμένο κύκλωμα LC και η συχνότητα συντονισμού της μπορεί να υπολογιστεί βάσει των τιμών της κατανεμημένης χωρητικότητας και αυτεπαγωγής της. Επειδή όμως αυτά τα μεγέθη δεν είναι γνωστά, καταφεύγουμε στις σχέσεις (6.3) και (6.4), που τις λύνουμε ως προς f και υπολογίζουμε την ιδιοσυχνότητα, βάσει του μήκους l . Έτσι έχουμε :

Κεραία Χερτζ : $f_o = \frac{u}{2l}$ (6.5). Κεραία Μαρκόνι : $f_o = \frac{u}{4l}$ (6.6)

2. Το ενεργό ύψος h_{ev} .

Οι κεραίες δεν ακτινοβολούν εξίσου ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά κύματα απ' όλα τα σημεία τους. Κοντά στο σημείο τροφοδοσίας η ένταση του ρεύματος είναι μεγάλη και απ' αυτό εκπέμπονται και τα πιο ισχυρά κύματα. Στα άκρα όπου το ρεύμα μηδενίζεται η εκπομπή είναι μηδενική. Αν η κατανομή του ρεύματος κατά μήκος της κεραίας ήταν ομοιόμορφη, τότε θα είχαμε το ίδιο

ισχυρή εκπομπή με μικρότερο ύψος κεραίας. Αυτό το μικρότερο ύψος ονομάζεται ενεργό ή ηλεκτρικό ύψος και είναι περίπου το 60% του γεωμετρικού ύψους l .



Σχήμα 6-13. Γεωμετρικό (l) και ενεργό (h) ύψος κεραίας

3. Οι αντιστάσεις εισόδου και ακτινοβολίας.

Η κεραία αντιπροσωπεύει μια αντίσταση φορτίου για την πηγή που την τροφοδοτεί. Εφόσον η κεραία ακτινοβολεί, αφαιρεί κάποιο ποσό ενέργειας από την πηγή. Αυτό το ποσό ενέργειας θεωρείται ότι καταναλώνεται πάνω σε μια ισοδύναμη ωμική αντίσταση, που ονομάζεται **αντίσταση ακτινοβολίας** (R_r). Εκτός από την ενέργεια που ακτινοβολείται, κάποιο επιπλέον ποσό ενέργειας καταναλώνεται στην κεραία χωρίς να ακτινοβοληθεί. Το ποσό αυτό μετατρέπεται σε θερμότητα στις διάφορες αντιστάσεις των αγωγών ή χάνεται σε διαρροές λόγω των κακών μονώσεων. Αυτό το ποσό ενέργειας λέμε ότι καταναλώνεται πάνω στην **αντίσταση απωλειών** (R_a). Το άθροισμα αυτών των δύο αντιστάσεων ονομάζεται **αντίσταση εισόδου** (R_{in}) της κεραίας. Μια κεραία $\lambda/2$ έχει αντίσταση ακτινοβολίας περίπου 73Ω και αντίσταση απωλειών περίπου 7Ω . Έτσι η αντίσταση εισόδου της είναι $73+7=80 \Omega$. Μια κεραία $\lambda/4$ έχει ακριβώς τις μισές τιμές αυτών των αντιστάσεων. Έτσι:

$$\begin{aligned} R_{in} &= R_r + R_a = 73 + 7 = 80 \Omega && (\text{για κεραία } \lambda/2) \\ R_{in} &= R_r + R_a = 36,5 + 3,5 = 40 \Omega && (\text{για κεραία } \lambda/4) \end{aligned}$$

4. Ο βαθμός απόδοσης.

Εφόσον από την ισχύ που έρχεται στην κεραία ένα μέρος χάνεται στην αντίσταση απωλειών, καταλαβαίνουμε ότι η ισχύς P_r που ακτινοβολεί η κεραία είναι μικρότερη από την ισχύ P_{in} που δίνει η πηγή στην κεραία. Ονομάζουμε βαθμό απόδοσης η της κεραίας το πηλίκο :

$$\eta = \frac{P_r}{P_{in}} = \frac{R_r}{R_r + R_a}$$

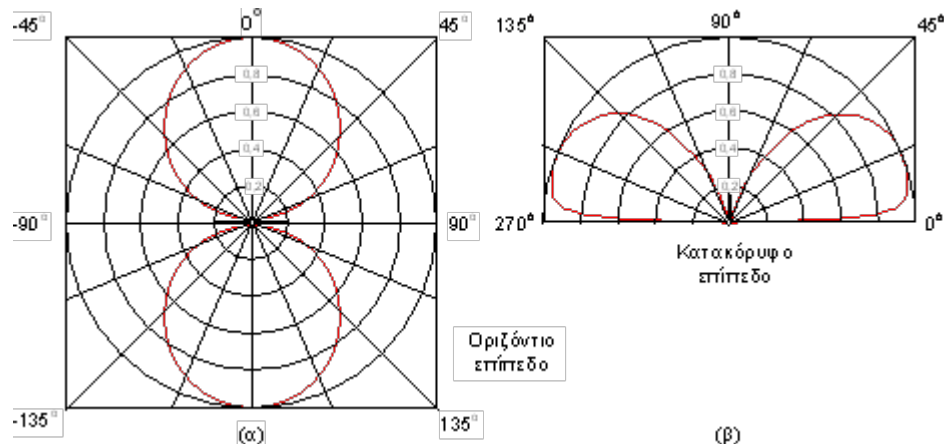
Βλέπουμε ότι ο βαθμός απόδοσης βελτιώνεται όσο μικρότερη γίνεται η αντίσταση απωλειών R_a της κεραίας. Η αντίσταση αυτή μπορεί να μειωθεί κάνοντας καλύτερες τις μονώσεις της κεραίας και φροντίζοντας να είναι καλή η αγωγιμότητα του (φυσικού ή τεχνητού) εδάφους στην περίπτωση των ασύμμετρων κεραίων.

5. Η κατευθυντικότητα και το κέρδος.

Καμιά πραγματική κεραία δεν εκπέμπει τα ηλεκτρομαγνητικά της κύματα ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου. Η ένταση της

ακτινοβολίας προς ορισμένες κατευθύνσεις είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με άλλες. Αυτό δε θεωρείται μειονέκτημα, αλλά μάλλον πλεονέκτημα. Δε θέλουμε, για παράδειγμα, η κεραία ενός ραδιοσταθμού να ακτινοβολεί προς τα επάνω, γιατί προς αυτή την κατεύθυνση δεν υπάρχουν ακροατές του σταθμού. Οι κατευθυντικές ιδιότητες των κεραιών περιγράφονται από το διάγραμμα κατευθυντικότητας, το συντελεστή κατευθυντικότητας και το κέρδος.

Το διάγραμμα κατευθυντικότητας είναι μια γραφική παράσταση που μας δίνει την ένταση της ακτινοβολίας της κεραίας προς διάφορες κατευθύνσεις πάνω σε ένα επίπεδο και για σημεία που απέχουν εξίσου από την κεραία. Υπάρχουν διαγράμματα για το οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο. Αυτά τα διαγράμματα μπορούν να χαραχθούν μετά από αναλυτικούς υπολογισμούς ή να προκύψουν από μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου γύρω από την κεραία. Στο σχήμα 6-14 φαίνονται τα διαγράμματα κατευθυντικότητας μιας οριζόντιας κεραίας $\lambda/2$ στο οριζόντιο επίπεδο και μιας κατακόρυφης κεραίας $\lambda/4$ στο κατακόρυφο επίπεδο. Λόγω του τρόπου κατανομής της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, η κεραία $\lambda/2$ ονομάζεται διπλοκατευθυντική, ενώ η $\lambda/4$ πανκατευθυντική.



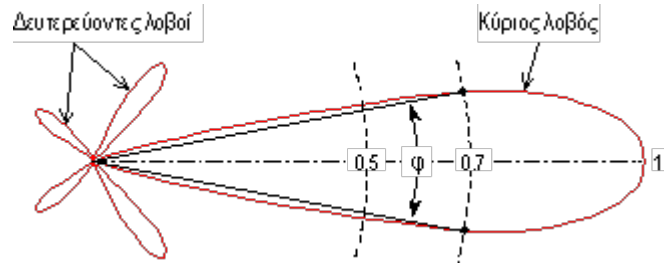
Σχήμα 6-14.

Διάγραμμα κατευθυντικότητας κεραίας $\lambda/2$ (α) και κεραίας $\lambda/4$ (β)

Η κεραία θεωρείται ότι είναι τοποθετημένη στο κέντρο του διαγράμματος. Στα διαγράμματα διακρίνονται κλειστές καμπύλες – περιοχές, που ονομάζονται λοβοί. Οι λοβοί μπορούν να μας δώσουν μια εικόνα για το πώς κατανέμεται η ακτινοβολία της κεραίας σ' ένα επίπεδο. Για να φανταστούμε την κατανομή της ακτινοβολίας στο χώρο, πρέπει να θεωρήσουμε ότι το διάγραμμα περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της κεραίας.

Σε κάθε κεραία υπάρχει μια κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Ο λοβός που αντιστοιχεί σ' αυτή ονομάζεται κύριος λοβός. Η ένταση της ακτινοβολίας προς την κατεύθυνση του μέγιστου παίρνει στο διάγραμμα τιμή ίση με 1 και όλες οι υπόλοιπες εντάσεις αντιστοιχούν σε αναλόγως μικρότερα νούμερα. Υπάρχουν κεραίες που εκπέμπουν το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος του πομπού προς μια κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό μεγαλώνουμε την ένταση του πεδίου στο σημείο που μας ενδιαφέρει να γίνεται η λήψη, χωρίς να χρειαστεί να αυξηθεί η ισχύς του πομπού. Οι κεραίες αυτές ονομάζονται *υψηλής κατευθυντικότητας*. Τέτοιες κεραίες χρησιμοποιεί, για παράδειγμα, η EPT, όταν κάνει εκπομπές

στα βραχέα κύματα για τους ξενιτεμένους Έλληνες. Αυτές οι κεραίες εκπέμπουν άλλες ώρες της ημέρας προς την Αμερική, άλλες προς την Αυστραλία κλπ. Το διάγραμμα κατευθυντικότητας μιας τέτοιας κεραίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το άνοιγμα του κύριου λοβού βρίσκεται από τη γωνία φ , της οποίας οι πλευρές περνούν από τα σημεία όπου η ένταση του πεδίου είναι ίση με το 0,7 του μέγιστου (σχήμα 6-15).



Σχήμα 6-15. Διάγραμμα κατευθυντικότητας κεραίας

Ο συντελεστής κατευθυντικότητας **D** μας δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη ισχύ, απ' όση ισχύ δίνουμε στην κεραία που μελετούμε, θα έπρεπε να δώσουμε σε μια κεραία που εκπέμπει ομοιόμορφα στο γύρω χώρο, ώστε με την πρώτη κεραία να έχουμε προς την κατεύθυνση του κύριου λοβού της δεύτερης την ίδια ένταση πεδίου. Ο συντελεστής **D** είναι καθαρός αριθμός (χωρίς μονάδες) και όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο υψηλότερης κατευθυντικότητας είναι η κεραία.

Τέλος το κέρδος **G** της κεραίας δείχνει ό,τι και ο συντελεστής κατευθυντικότητας, αλλά αφού λάβουμε υπόψη και το βαθμό απόδοσης **n** της κεραίας. Είναι $G = D \cdot n$.

Το κέρδος συνήθως το εκφράζουμε σε ντεσιμπέλ, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται : $G = 10 \log(D \cdot n) \text{ db}$. Υπάρχουν κεραίες που έχουν κέρδος 20, 30 ή και 60 db, δηλαδή εκπέμπουν προς ορισμένη κατεύθυνση 100, 1.000 ή και 1.000.000 φορές εντονότερα, απ' όσο θα εξέπεμπε, αν τροφοδοτούνταν με την ίδια ισχύ, μια υποθετική κεραία χωρίς κέρδος.

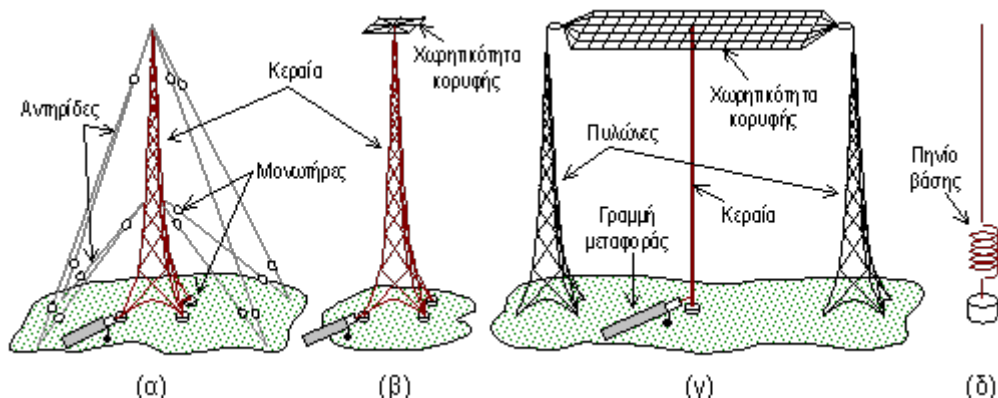
Τύποι κεραιών εκπομπής

Υπάρχουν διάφορες μορφές κεραιών εκπομπής, ανάλογα με τη συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, την ισχύ του πομπού και την επιθυμητή κατευθυντικότητα. Αρκετά συχνά χρησιμοποιούνται κεραίες Μαρκόνι ($\lambda/4$) σε διάφορες μορφές, λόγω των εξής πλεονεκτημάτων που διαθέτουν :

- Για ορισμένη συχνότητα εκπομπής έχουν το μισό μήκος από τις κεραίες δίπολα (Χερτζ). Αυτό τις κάνει κατάλληλες για χρήση στα μεσαία κύματα όπου το μήκος κύματος είναι μεγάλο. Για παράδειγμα, μια κεραία $\lambda/4$ που εκπέμπει στα 900 kHz έχει ύψος περίπου 80 μέτρα.
- Οι κεραίες $\lambda/4$ εκπέμπουν ομοιόμορφα γύρω τους κατά το οριζόντιο επίπεδο και δεν εκπέμπουν καθόλου προς τα επάνω. Αυτό τις κάνει κατάλληλες για χρήση, στις περιπτώσεις που οι δέκτες βρίσκονται ολόγυρα και στο ίδιο επίπεδο με τον

πομπό όπως επίσης και στις περιπτώσεις που έχουμε κινητές μονάδες εκπομπής – λήψης (π.χ. πυροσβεστικά οχήματα).

Στις χαμηλότερες συχνότητες εκπομπής (π.χ. στα μεσαία ή στα μακρά κύματα) οι κεραίες $\lambda/4$, λόγω του μεγάλου μήκους τους, έχουν τη μορφή ιστού με κατάλληλη δομή και υποστήριξη από αντηρίδες, ώστε να αντέχουν στη δύναμη του ανέμου. Συχνά τοποθετείται στην κορυφή της κεραίας ένα σύστημα από αγωγούς με μορφή σχάρας. Αυτό ενεργεί σαν οπλισμός πυκνωτή και αναγκάζει το ρεύμα να συσσωρεύεται στην κορυφή της κεραίας. Έτσι προκαλείται αύξηση του ηλεκτρικού σε σχέση με το πραγματικό μήκος της κεραίας και μπορούμε να μειώσουμε το ύψος της. Το ίδιο μπορούμε να πετύχουμε τοποθετώντας ένα πηνίο στη βάση της κεραίας. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνά σε μικρού μεγέθους κινητές κεραίες $\lambda/4$ (σχήμα 6-16).

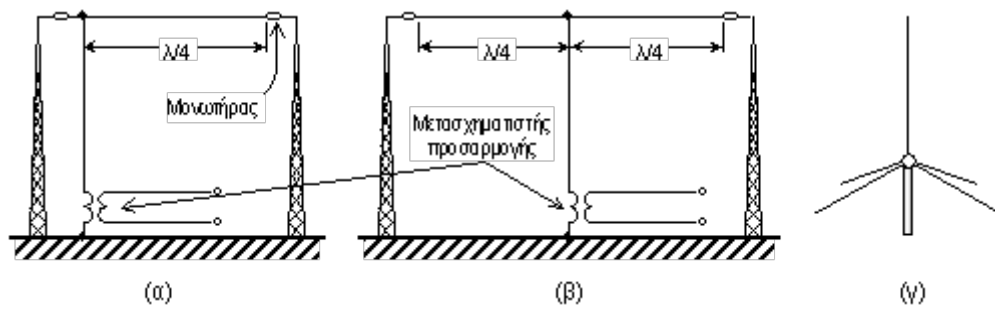


Σχήμα 6-16. Μορφές κεραιών $\lambda/4$

Για την καλή λειτουργία μιας κεραίας $\lambda/4$, θα πρέπει το έδαφος πάνω στο οποίο στηρίζεται να έχει πολύ καλή αγωγιμότητα. Συνήθως τέτοιες κεραίες τοποθετούνται σε παραθαλάσσιες περιοχές ή εκτάσεις με υγρό έδαφος. Σε περίπτωση που το έδαφος είναι ξηρό ή πετρώδες, ενισχύεται η αγωγιμότητά του με την παράχωση σε μικρό βάθος χάλκινων αγωγών μήκους τουλάχιστον $\lambda/4$, οι οποίοι ξεκινούν ακτινωτά από το σημείο γείωσης της γραμμής μεταφοράς, κάτω από την κεραία.

Στα βραχεία ή υπερβραχεία κύματα οι κεραίες $\lambda/4$ έχουν μικρότερο μήκος και αρκετά απλούστερη μορφή. Πολύ συχνά χρησιμοποιείται ο τύπος του σχήματος 6-16(δ), κυρίως σε οχήματα. Στην περίπτωση αυτή η οροφή του οχήματος παίζει το ρόλο του αγωγίμου επιπέδου. Αρκετά συχνά χρησιμοποιούνται επίσης και οι κεραίες τύπου T και Γ όπως επίσης και η κεραία Ground Plane (γκράουντ πλέιν). Οι κεραίες T και Γ είναι απλοποιημένες μορφές της κεραίας του σχήματος 6-16(γ), ενώ η κεραία Ground Plane προέρχεται από τον τύπο 6-16(α).

Στις κεραίες T και Γ το οριζόντιο τμήμα λειτουργεί ως χωρητικότητα κορυφής και εκπομπή γίνεται μόνο από το κατακόρυφο τμήμα. Στην κεραία Ground Plane το φυσικό έδαφος έχει αντικατασταθεί από τρεις ή τέσσερις ακτινωτούς αγωγούς μήκους $\lambda/4$, μονωμένους από το κατακόρυφο τμήμα, που ονομάζονται τεχνητό έδαφος. Η κλίση αυτών των αγωγών προς τα κάτω καθορίζει και την αντίσταση εισόδου της κεραίας, που σχεδόν πάντα είναι 50 Ω . Η κεραία Ground Plane τοποθετείται εύκολα σε υπερυψωμένες θέσεις και η απολαβή της είναι περίπου 1,5 db (σχήμα 6-17).



Σχήμα 6-17. Κεραίες τύπου Γ (α), T (β), και $Ground Plane$

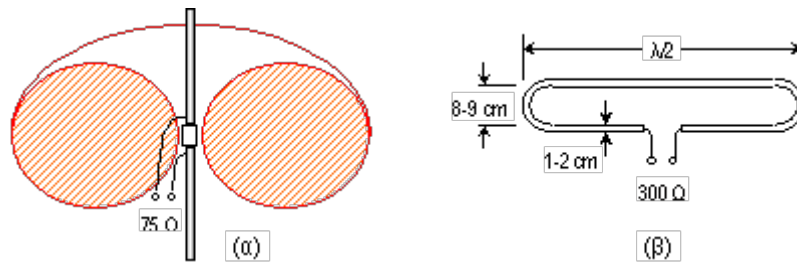
Στα βραχέα κύματα πολύ συχνά χρησιμοποιούνται επίσης και οι οριζόντιες κεραίες δίπολα ($\lambda/2$). Λόγω του διαγράμματος κατευθυντικότητάς τους, αυτές οι κεραίες τοποθετούνται κάθετα προς την επιθυμητή διεύθυνση εκπομπής. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργούν προέρχεται από το συνδυασμό δύο κυμάτων, αυτού που εκπέμπεται άμεσα από την κεραία και αυτού που αντανακλάται στο έδαφος κάτω από αυτή. Έτσι το ύψος του δίπολου πάνω από τη γη έχει μεγάλη σημασία. Συνήθως αυτές οι κεραίες τοποθετούνται σε ύψος μεταξύ $\lambda/2$ και $\lambda/4$ πάνω από το έδαφος.



Σχήμα 6-17. Οριζόντια κεραία δίπολο

Η κεραία του σχήματος 6-17 κατασκευάζεται εύκολα από απλά υλικά και γι' αυτό χρησιμοποιείται πολύ από τους ραδιοερασιτέχνες. Η αντίσταση εισόδου της είναι 75Ω και έτσι τροφοδοτείται με ομοαξονική γραμμή της ίδιας χαρακτηριστικής αντίστασης. Η απολαβή της είναι περίπου 1,2 db.

Αν οι οριζόντιοι αγωγοί αποτελούνται από σχετικά λεπτό σύρμα, η κεραία συντονίζεται σε μια μόνο συχνότητα, η οποία προκύπτει από τη σχέση (6.3). Όσο όμως αυξάνουμε το πάχος των αγωγών τόσο περισσότερο ικανή γίνεται η κεραία να εκπέμπει και σε άλλες γειτονικές συχνότητες. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται το εύρος ζώνης της, κάτι που σε πολλές περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα επιθυμητό. Έτσι, στα υπερβραχέα κύματα, όπου το μήκος του δίπολου είναι μικρό, οι οριζόντιοι αγωγοί κατασκευάζονται από σωλήνα αλουμινίου και δεν απαιτείται στήριγμα στα άκρα τους. Τέτοιες κεραίες τοποθετούνται συνήθως κατακόρυφα, για καλύτερη εκμετάλλευση του διαγράμματος κατευθυντικότητάς τους (σχήμα 6-18).

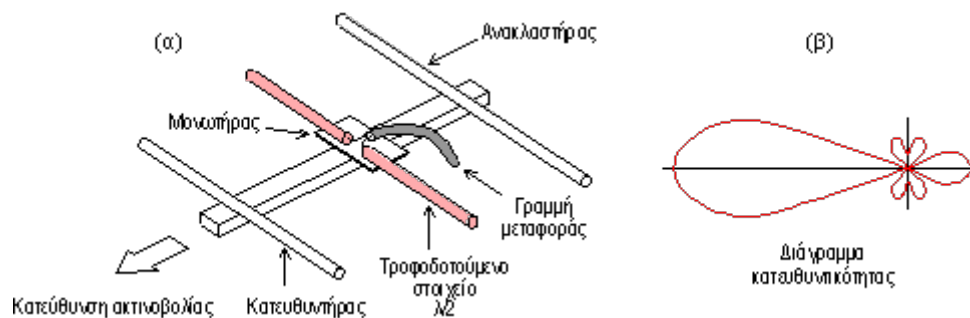


Σχήμα 6-18. (α) Κατακόρυφη κεραία – δίπολο με διάγραμμα κατευθυντικότητας και (β) αναδιπλωμένο δίπολο

Το μικρό μήκος της κεραίας που χρησιμοποιείται σ' αυτές τις υψηλές συχνότητες επιτρέπει την κατασκευή ενός άλλου τύπου δίπολου, που ονομάζεται αναδιπλωμένο δίπολο και φαίνεται στο σχήμα 6-18(β). Το αναδιπλωμένο δίπολο έχει όμοια χαρακτηριστικά εκπομπής με το απλό δίπολο, αλλά διαφέρει στην αντίσταση εισόδου, η οποία είναι 240 ως 300 Ω. Το αναδιπλωμένο δίπολο συχνά χρησιμοποιείται σαν κεραία λήψης στην τηλεόραση.

Το μικρό μήκος κύματος λ στα υπερβραχέα κύματα επιτρέπει να κατασκευαστούν πολύπλοκες κεραίες αποτελούμενες από συστοιχίες πολλών τμημάτων, που ονομάζονται **στοιχειοκεραίες**. Αυτές οι κεραίες παρουσιάζουν υψηλό κέρδος και κατευθυντικότητα. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων στοιχειοκεραιών, οι **παρασιτικές συστοιχίες** και οι **τροφοδοτούμενες συστοιχίες**.

Μια παρασιτική συστοιχία αποτελείται από μια βασική κεραία συνδεδεμένη στη γραμμή μεταφοράς, που ονομάζεται τροφοδοτούμενο στοιχείο, και έναν ή περισσότερους αγωγούς που δεν συνδέονται στη γραμμή μεταφοράς και ονομάζονται παρασιτικά στοιχεία. Τα παρασιτικά στοιχεία έχουν ελαφρά διαφορετικό μήκος από το τροφοδοτούμενο στοιχείο. Τυπικό παράδειγμα μιας παρασιτικής συστοιχίας αποτελεί η κεραία Γιάγκι (Yagi), που ονομάζεται έτσι προς τιμή του Ιάπωνα ερευνητή που την επινόησε (σχήμα 6-19).



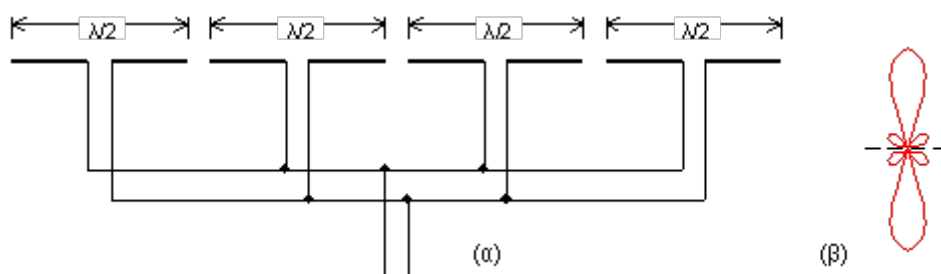
Σχήμα 6-19. Κεραία Yagi (α) και διάγραμμα κατευθυντικότητας (β) της κεραίας

Στην κεραία Yagi το ένα παρασιτικό στοιχείο είναι περίπου 5% μακρύτερο από το βασικό δίπολο και ονομάζεται ανακλαστήρας. Το άλλο παρασιτικό στοιχείο είναι περίπου 5% κοντύτερο από το δίπολο και ονομάζεται κατευθυντήρας. Ο ανακλαστήρας απέχει από το δίπολο απόσταση $0,15 - 0,25\lambda$, ενώ ο κατευθυντήρας απόσταση $0,1 - 0,2\lambda$. Μέρος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που εκπέμπεται από το δίπολο αντανακλάται από τα παρασιτικά στοιχεία και συνδυάζεται με το αρχικό κύμα, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλη ενίσχυση της ακτινοβολίας προς την πλευρά

του κατευθυντήρα και μεγάλη εξασθένηση προς την πλευρά του ανακλαστήρα. Έτσι η κεραία Yagi είναι μια κεραία μονοκατευθυντική. Με τη μορφή του σχήματος 6-19(α) έχει απολαβή περίπου 8 db. Μπορούν να προστεθούν μέχρι και 20 κατευθυντήρες στην κεραία, οπότε η απολαβή της μπορεί να φτάσει και τα 17 db.

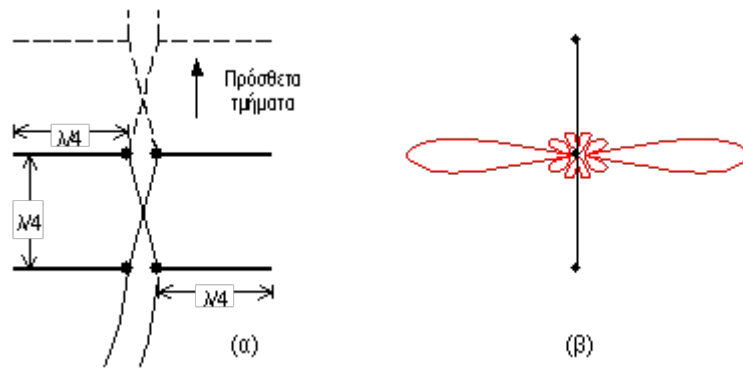
Ο άλλος τύπος στοιχειοκεραίας είναι η *τροφοδοτούμενη συστοιχία*. Αυτή είναι μια κεραία που έχει δύο ή περισσότερα δίπολα, τα οποία είναι όλα συνδεδεμένα με τη γραμμή τροφοδοσίας και διευθετούνται έτσι, ώστε να παρέχουν κατευθυντικότητα και κέρδος. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι τροφοδοτούμενων συστοιχιών, η *συγγραμική*, η *μετωπική* και η *ακροπυροδοτική*.

Η συγγραμική κεραία αποτελείται από δύο ή περισσότερα δίπολα, τοποθετημένα, όπως στο σχήμα 6-20. Τα μήκη των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τα δίπολα είναι υπολογισμένα έτσι, ώστε η ενέργεια του πομπού να φτάνει σε όλα τους με την ίδια φάση. Έτσι τα κύματα που παράγονται από κάθε δίπολο προστίθενται σε αυτά των άλλων και παράγουν μια εστιασμένη δέσμη. Η συγγραμική κεραία εξακολουθεί να είναι διπλοκατευθυντική, αλλά το διάγραμμα ακτινοβολίας της είναι πολύ πιο στενό από το διάγραμμα του απλού δίπολου, παρέχοντας μεγαλύτερη κατευθυντικότητα και κέρδος. Συνήθως τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση, για να μπορεί να εκπέμπει ολόγυρα στο οριζόντιο επίπεδο σαν μια παγκατευθυντική κεραία με κέρδος.



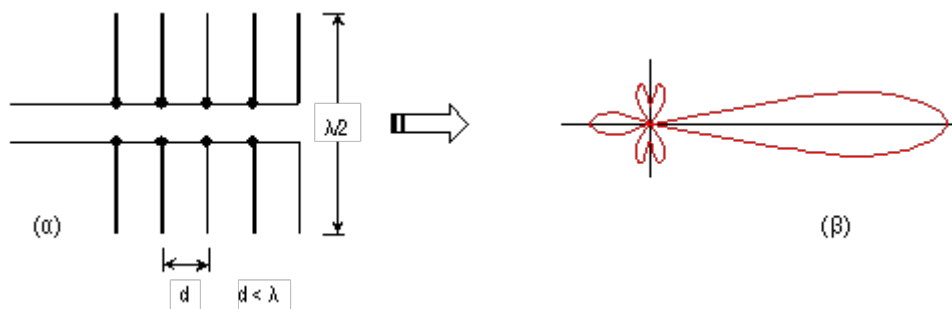
Σχήμα 6-20. Συγγραμική κεραία (α) και διάγραμμα κατευθυντικότητας (β)

Η μετωπική κεραία αποτελείται από δίπολα $\lambda/2$ συνδεδεμένα όπως στο σχήμα 6-21. Μπορούν να συνδυαστούν δύο ή περισσότερα στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους και με τη γραμμή μεταφοράς. Η γραμμή διασταυρώνεται από δίπολο σε δίπολο, για να μπορεί να τροφοδοτεί τα στοιχεία με σήμα σωστής φάσης για τη λειτουργία της κεραίας. Η μετωπική κεραία δεν ακτινοβολεί κατά μήκος του άξονα των στοιχείων, όπως μια κεραία Yagi, αλλά μετωπικά, δηλαδή κάθετα στο επίπεδο της συστοιχίας. Είναι μια κεραία διπλοκατευθυντική με υψηλό κέρδος και κατευθυντικότητα. Συχνά συνδυάζεται με μια μεταλλική ανακλαστική επιφάνεια παράλληλη και σε απόσταση $\lambda/4$ από το επίπεδό της. Με τον τρόπο αυτό μετατρέπεται σε μονοκατευθυντική κεραία.



Σχήμα 6-21. Μετωπική κεραία (α) και διάγραμμα κατευθυντικότητας (β)

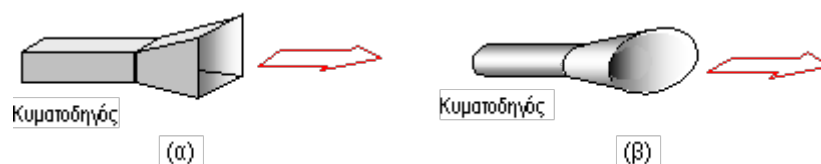
Η ακροπυροδοτική κεραία αποτελείται από ένα σύνολο δίπολων $\lambda/2$ συνδεδεμένων μεταξύ τους όπως στο σχήμα 6-22. Η απόσταση d μεταξύ των στοιχείων είναι μικρό κλάσμα του μήκους κύματος λ . Με κατάλληλη εκλογή του αριθμού των στοιχείων και της απόστασης d προκύπτει μια μονοκατευθυντική κεραία υψηλής κατευθυντικότητας και απολαβής, που ακτινοβολεί όπως μια κεραία Yagi.



Σχήμα 6-22. Ακροπυροδοτική κεραία (α) και διάγραμμα κατευθυντικότητας (β)

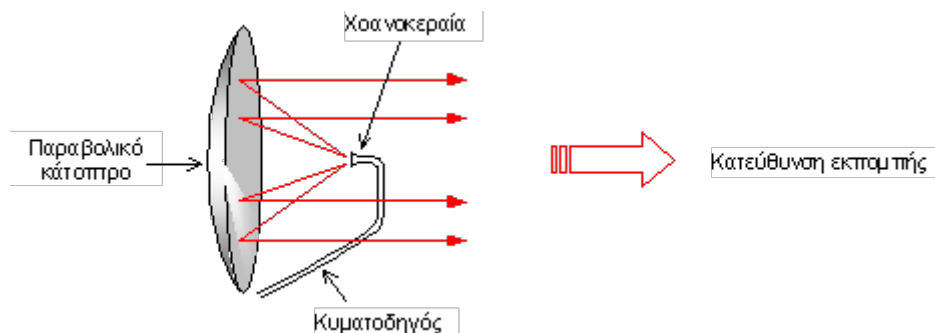
Σε ακόμη υψηλότερες συχνότητες, της περιοχής των μικροκυμάτων, το μήκος κύματος γίνεται τόσο μικρό, ώστε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αρχίζουν να συμπεριφέρονται σαν ακτίνες φωτός. Έτσι, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ανάκλαση των κυμάτων πάνω σε σχετικά μικρές μεταλλικές επιφάνειες, για να πετύχουμε με απλά μέσα εξαιρετικά μεγάλη κατευθυντικότητα και απολαβή από τις κεραίες.

Ο πιο συνηθισμένος τύπος βασικής κεραίας μικροκυμάτων είναι η χοανοκεραία. Αυτή δεν είναι τίποτε άλλο παρά μια διεύρυνση της άκρης του κυματοδηγού που χρησιμοποιείται αντί της ομοαξονικής γραμμής μεταφοράς σ' αυτές τις συχνότητες (σχήμα 6-23).



Σχήμα 6-23. Παραλληλόγραμμη (α) και κωνική (β) χοανοκεραία

Οι χοανοκεραίες συνδυάζονται σχεδόν πάντα με κοίλες μεταλλικές παραβολικές επιφάνειες, που ονομάζονται παραβολικά κάτοπτρα. Οι κεραίες που προκύπτουν συχνά ονομάζονται και παραβολικές κεραίες. Οι χοανοκεραίες τοποθετούνται μπροστά από το κέντρο των κατόπτρων έτσι, ώστε η κωνική δέσμη ακτινοβολίας που εκπέμπουν να μετατρέπεται μετά την ανάκλασή της σε παράλληλη. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται πολύ υψηλό κέρδος (30 – 60 db) και εξαιρετικά στενή δέσμη εκπομπής, όπως η δέσμη του φωτός ενός προβολέα (σχήμα 6-24).



Σχήμα 6-24. Παραβολική κεραία μικροκυμάτων

Ακτινοβολούμενη ισχύς και ένταση πεδίου

Όπως είδαμε όταν εξετάσαμε τα χαρακτηριστικά των κεραιών, από το σύνολο της ισχύος που προσφέρει ο πομπός ένα μόνο μέρος εκπέμπεται, γιατί το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα από την αντίσταση απωλειών της κεραίας. Το ποσό της ισχύος P_r που θα εκπεμφθεί καθορίζεται από την ισχύ εξόδου του πομπού και το συντελεστή απόδοσης της κεραίας. Η ισχύς αυτή εκφράζεται σε Watt και μπορεί να υπολογιστεί εύκολα, αν μετρήσουμε την ενεργό τιμή I_m της έντασης του ρεύματος στο σημείο τροφοδοσίας της κεραίας όπου, ως γνωστόν, υπάρχει κοιλία ρεύματος. Είναι :

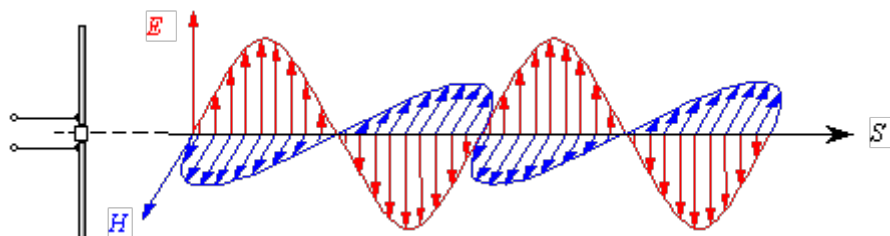
$$P_r = 73 \cdot I_m^2 \quad \text{για κεραία } \lambda/2 \text{ και}$$

$$P_r = 36 \cdot I_m^2 \quad \text{για κεραία } \lambda/4$$

Είδαμε επίσης ότι οι περισσότερες κεραίες έχουν κάποιας μορφής κατευθυντικότητα και παρουσιάζουν κέρδος. Αυτό τις επιτρέπει να εκπέμπουν προς την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας, σαν να ήταν κεραίες που τροφοδοτούνται με μεγαλύτερη ισχύ. Για να χαρακτηρίσουμε αυτή την ιδιότητα, χρησιμοποιούμε το γινόμενο της ακτινοβολούμενης ισχύος επί το κέρδος της κεραίας, που ονομάζεται **Ενεργός Ακτινοβολούμενη Ισχύς** (ERP – Effective Radiated Power).

Η ισχύς που ακτινοβολεί η κεραία εκπέμπεται, ως γνωστόν, με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι ηλεκτρικές και μαγνητικές διαταραχές στο χώρο γύρω από την κεραία. Αυτό σημαίνει ότι, εξαιτίας μιας κεραίας που εκπέμπει, εξασκούνται δυνάμεις στα ηλεκτρόνια των αγωγών που υπάρχουν εκεί γύρω. Από το μέγεθος και την κατεύθυνση αυτών των

δυνάμεων προκύπτει η έννοια της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου της κεραίας, η οποία έχει μέτρο ανάλογο προς τις δυνάμεις που αναπτύσσει στα ηλεκτρόνια και κατεύθυνση ίδια με τις δυνάμεις. Η κατεύθυνση αυτή είναι παράλληλη προς τους αγωγούς $\lambda/4$ που αποτελούν την κεραία και καθορίζει την πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η πόλωση του κύματος είναι ίδια με την πόλωση της κεραίας. Για παράδειγμα, η κεραία και το κύμα στο σχήμα 6-25 έχουν κατακόρυφη πόλωση.



Σχήμα 6-25.

Ένταση ηλεκτρικού (E) και μαγνητικού (H) πεδίου σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αλλάζει διαρκώς φορά, γιατί είναι εναλλασσόμενο πεδίο. Μαζί με το ηλεκτρικό πεδίο υπάρχει και μαγνητικό, του οποίου η ένταση H είναι πάντα κάθετη προς την ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου. Για να χαρακτηρίσουμε όμως το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, χρησιμοποιούμε σχεδόν πάντα την ένταση E , επειδή αυτό το μέγεθος μπορούμε να το μετρήσουμε ευκολότερα. Το E μετράται σε Volt ανά μέτρο και το H σε Ampere ανά μέτρο.

Λήψη επίγειου και δορυφορικού σήματος

Στις ασύρματες επικοινωνίες ισχύει μια γενική αρχή: Για καλύτερα αποτελέσματα η κεραία λήψης πρέπει να είναι ίδια με την κεραία εκπομπής. Η αρχή αυτή εφαρμόζεται σταθερά, όταν οι συνδέσεις είναι "ένα προς ένα", όπως, για παράδειγμα, μεταξύ δύο πομποδεκτών CB, αλλά δεν είναι εφαρμόσιμη ούτε απαραίτητη, στην περίπτωση λήψης προγραμμάτων που εκπέμπονται από ισχυρούς πομπούς για πολλούς δέκτες. Οι κεραίες λήψης σ' αυτές τις περιπτώσεις μπορεί, ανάλογα με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα, να είναι από εξαιρετικά απλές, έως αρκετά σύνθετες, αλλά σε καμιά περίπτωση δε συγκρίνονται με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα των κεραιών εκπομπής. Όσο για τους δέκτες που χρειάζονται για να πραγματοποιηθεί η λήψη, η λεπτομερής εξέτασή τους θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια. Στους δέκτες ραδιοφώνου για λήψη μακρών, μεσαίων ή βραχέων κυμάτων χρησιμοποιείται πολύ συχνά η **μαγνητική κεραία**.



Σχήμα 6-26. Μαγνητική κεραία

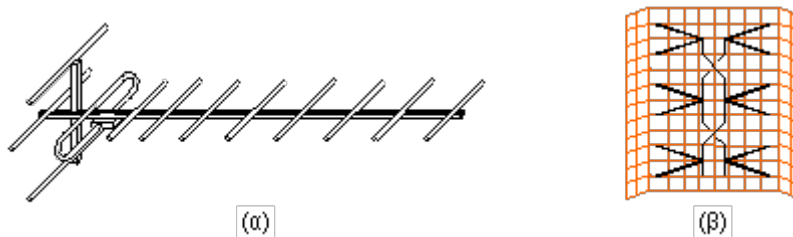
Η μαγνητική κεραία αποτελείται από ένα πηνίο τυλιγμένο γύρω από μια ράβδο φερρίτη με μήκος 10 – 30 cm και διάμετρο περίπου 1 cm. Ο φερρίτης είναι ένα κεραμικό υλικό που έχει πολύ μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Μπορεί έτσι να συγκεντρώνει από το γύρω χώρο και να διοχετεύει μέσα από το πηνίο τις μαγνητικές

γραμμές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και να παράγει στα άκρα των σπειρών του ένα σχετικά ισχυρό σήμα λήψης. Η μαγνητική κεραία είναι κατευθυντική και λειτουργεί καλύτερα, όταν προσανατολίζεται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Λόγω του μικρού της μεγέθους συνήθως τοποθετείται στο εσωτερικό των δεκτών.

Στους φορητούς ραδιοφωνικούς δέκτες AM και FM επίσης συχνά χρησιμοποιείται και η τηλεσκοπική κεραία. Αυτή στην ουσία δεν είναι τίποτε άλλο από ένα απλό κομμάτι αγωγού, που λειτουργεί σαν ασυντόνιστη κεραία τυχαίου μήκους. Η ικανοποιητική λειτουργία της οφείλεται μόνο στο ότι η ένταση του πεδίου στο χώρο που λειτουργούν οι περισσότεροι δέκτες είναι πολύ μεγάλη.

Για τη λήψη των υπερβραχέων κυμάτων, ιδιαίτερα αν αυτή γίνεται από ποιοτικούς δέκτες FM ή δέκτες τηλεόρασης, χρειάζεται συνήθως κάτι καλύτερο από τις απλές κεραίες, που είδαμε παραπάνω. Έτσι, οι επιτραπέζιοι δέκτες FM διαθέτουν ειδική είσοδο όπου συνδέεται η γραμμή μεταφοράς που οδηγεί σε εξωτερική κεραία. Αυτή είναι είτε μια κεραία Ground Plane είτε μια κεραία δίπολο τοποθετημένη κάθετα πάνω σε ιστό. Ανάλογες κεραίες χρησιμοποιούμε και για υψηλών απαιτήσεων λήψη βραχέων κυμάτων.

Από τις κεραίες τηλεόρασης απαιτούμε επιπλέον και κάποια κατευθυντικότητα. Ο λόγος είναι ότι, αν η τηλεόραση, εκτός από το σήμα του πομπού, συλλαμβάνει και αντανakλάσεις του ίδιου σήματος από διάφορα φυσικά εμπόδια, εμφανίζει στην οθόνη της πολλαπλές εικόνες ("είδωλα"). Αυτό συμβαίνει, διότι τα ανακλώμενα κύματα έχουν διανύσει περισσότερο δρόμο και φτάνουν στην κεραία λίγο αργότερα από τα απ' ευθείας κύματα, δίνοντας εικόνες ελαφρά μετατοπισμένες ως προς την αρχική. Για την εξασφάλιση κατευθυντικότητας χρησιμοποιείται συνήθως η κεραία Yagi με αναδιπλωμένο δίπολο και πολλούς κατευθυντήρες, έτσι ώστε το κέρδος της να είναι 13 – 17 db. Επειδή όμως αυτή η κεραία έχει σχετικά περιορισμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων και δε λαμβάνει ικανοποιητικά όλα τα τηλεοπτικά κανάλια, χρησιμοποιείται πολλές φορές στη θέση της μια παραλλαγή της μετωπικής κεραίας με συρμάτινο πλέγμα για ανακλαστήρα. Τα δίπολα αυτής της κεραίας έχουν διχαλωτή μορφή για αύξηση του εύρους ζώνης των συχνοτήτων λειτουργίας της (σχήμα 6-27).

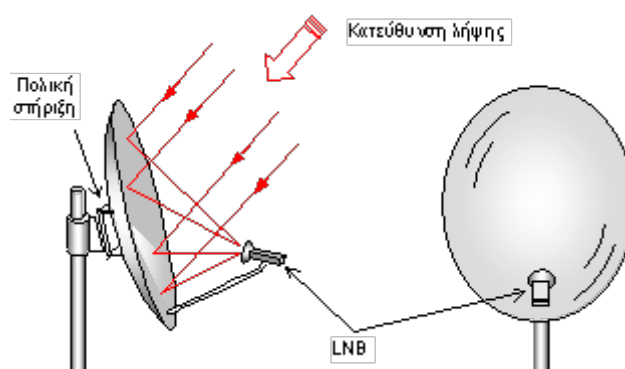


Σχήμα 6-27. Κεραίες τηλεόρασης: (α) Yagi και (β) μετωπική

Τέλος για τη λήψη του δορυφορικού σήματος έχουμε πολύ υψηλές απαιτήσεις τόσο από την κεραία όσο και από τις υπόλοιπες συσκευές του δορυφορικού δέκτη. Κατ' αρχάς το σήμα που δεχόμαστε από το δορυφόρο είναι εξαιρετικά ασθενές. Οι δορυφόροι **DBS** (Direct Broadcasting Satellites), των οποίων το σήμα λαμβάνουμε με οικιακούς δορυφορικούς δέκτες, έχουν πομπούς, των οποίων η ισχύς ακτινοβολίας δεν ξεπερνά τα 50 Watt και εκπέμπουν από απόσταση 36.000 χιλιομέτρων. Για να λάβουμε τέτοια σήματα, χρειαζόμαστε κεραίες εξαιρετικά υψηλού κέρδους, οι οποίες αναγκαστικά έχουν πολύ στενή δέσμη λήψης. Αυτό μας υποχρεώνει να "σκοπεύουμε" το δορυφόρο πολύ προσεκτικά, πράγμα που είναι δυνατό, γιατί οι δορυφόροι DBS περιστρέφονται γύρω από τη γη με την ίδια γωνιακή ταχύτητα που η γη

περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό της και έτσι εμφανίζονται ακίνητοι στο ίδιο πάντα σημείο του ουρανού.

Για να ικανοποιηθούν όλες αυτές οι ανάγκες, χρησιμοποιούμε τις γνωστές μας παραβολικές κεραίες με κάποιες μικρές τροποποιήσεις. Κατ' αρχάς η χοανοκεραία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν τοποθετείται στο κέντρο του κάτοπτρου, αλλά έκκεντρα. Εξαιτίας αυτού, το κάτοπτρο παίρνει ελλειψοειδές αντί για κυκλικό σχήμα και το βάθος της κοιλότητάς του μικραίνει. Έτσι, μπορεί να τοποθετείται περισσότερο κάθετα προς την επιφάνεια της γης, για να μην επιτρέπει στο χιόνι και το νερό της βροχής να συσσωρεύονται μέσα του και να επιδεινώνουν τη λήψη. Έπειτα, δε χρησιμοποιείται κυματοδηγός, αλλά το πρώτο στάδιο του δορυφορικού δέκτη είναι τοποθετημένο κατευθείαν μετά τη χοανοκεραία μέσα σε μια μονάδα που ονομάζεται **LNB** (Low Noise Block-down converter), δηλαδή **Μετατροπέας Χαμηλού Θορύβου**. Τέλος, υπάρχει ένα σύστημα περιστροφής της κεραίας που μας επιτρέπει να στοχεύσουμε οποιονδήποτε δορυφόρο στο επίπεδο του ισημερινού, γιατί εκεί βρίσκονται όλοι οι δορυφόροι DBS. Το σύστημα αυτό ονομάζεται **πολική στήριξη**, γιατί ο άξονάς του είναι παράλληλος με τον άξονα της γης (σχήμα 6-27).



Σχήμα 6-27. Κεραία δορυφορικής λήψης

Μέσα στη μονάδα LNB υπάρχει μια διάταξη επιλογής της πόλωσης του λαμβανόμενου κύματος, ένας ενισχυτής κατασκευασμένος με ειδικά τρανζίστορ πολύ χαμηλού θορύβου και ένας μετατροπέας συχνότητας. Ο μετατροπέας αυτός υποβιβάζει τη συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος από τα 11 GHz, που εκπέμπει ο δορυφόρος, σε 1 GHz. Το σήμα του 1 GHz οδηγείται με ομοαξονικό καλώδιο σε μια συσκευή που ονομάζεται **IDU** (In-Door Unit), δηλαδή εσωτερική μονάδα. Στη συσκευή αυτή γίνεται επιπλέον ενίσχυση του σήματος όπως επίσης και η επιλογή του επιθυμητού δορυφορικού προγράμματος. Η εσωτερική μονάδα συνδέεται με ένα κοινό τηλεοπτικό δέκτη, προκειμένου να παρακολουθήσουμε τηλεοπτικό δορυφορικό πρόγραμμα ή με ένα ειδικό ψηφιακό ραδιοφωνικό δέκτη, προκειμένου να κάνουμε ακρόαση δορυφορικού ραδιοφωνικού προγράμματος.

Η μονάδα IDU συχνά συμπληρώνεται και με μια μονάδα τηλεχειρισμού της δορυφορικής κεραίας. Πίσω από το κάτοπτρο, στη θέση της πολικής στήριξης, τοποθετείται ένας μηχανισμός που ονομάζεται **ενεργοποιητής** (actuator). Ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει τη μετακίνηση της κεραίας, ώστε να μπορεί να στοχεύσει οποιονδήποτε δορυφόρο. Οι διάφορες θέσεις της κεραίας αποθηκεύονται στη μνήμη του τηλεχειρισμού, έτσι ώστε, όταν επιλέγουμε κάποιο πρόγραμμα που το εκπέμπει διαφορετικός δορυφόρος απ' αυτόν που προηγουμένως παρακολουθούσαμε, η κεραία να περιστρέφεται αυτόματα προς τη θέση του νέου δορυφόρου.

Το μέγεθος του απαιτούμενου παραβολικού κατόπτρου εξαρτάται από την ένταση του δορυφορικού σήματος στο σημείο λήψης και από τη στάθμη του ηλεκτρονικού

θορύβου που εισάγει στο σήμα το LNB. Στη χώρα μας παραβολικά κάτοπτρα με διάμετρο μεταξύ 0,8 και 1,2 μέτρα προσφέρουν ικανοποιητική λήψη στις περισσότερες περιπτώσεις.

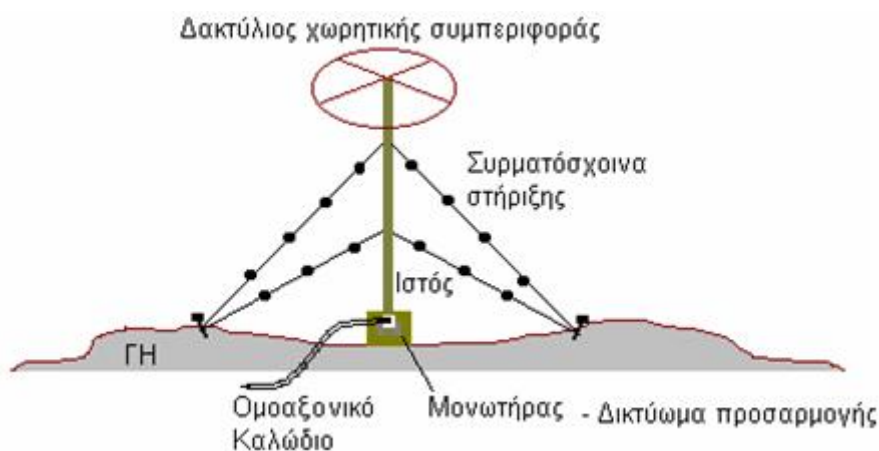
Χαρακτηριστικά των κεραιών

1. **Πόλωση :** Ονομάζεται η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου της κεραίας . Αυτή υλοποιείται βασικά από την κατεύθυνση της κεραίας , με αποτέλεσμα οι οριζόντιες κεραίες να θεωρούνται οριζόντιας πόλωσης και οι κατακόρυφες κατακόρυφης πόλωσης.
2. **Κατευθυντικότητα :** Είναι ο λόγος της ισχύος που απαιτείται για την παραγωγή δεδομένης έντασης ακτινοβολίας σε ορισμένη κατεύθυνση θ (σφαιρικές συντεταγμένες) από ισοτροπικό ακτινοβολητή προς την ισχύ που ακτινοβολείται για τον ίδιο σκοπό από την εξεταζόμενη κεραία . Συνεπώς , η κατευθυντικότητα είναι συνάρτηση της γωνίας θ . Συχνά όμως ενδιαφέρει η μέγιστη τιμή της η οποία αναφέρεται στην μέγιστη τιμή της ισχύος.
3. **Κέρδος ή απολαβή :** Ονομάζεται ο λόγος της μέγιστης πυκνότητας ακτινοβολίας προς τη μέγιστη πυκνότητα ακτινοβολίας μιας πρότυπης κεραίας που τροφοδοτείται με την ίδια ισχύ. Συνήθως σαν πρότυπη κεραία λαμβάνεται η κεραία μισού μήκους κύματος. Το κέρδος αναφοράς είναι 0db.
4. **Μήκος κεραίας :** Οι διαστάσεις μιας κεραίας παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση της. Σε μια κεραία θεωρούμε δύο μήκη, το φυσικό και το ηλεκτρικό μήκος.
5. **Ενεργό ύψος :** Ονομάζουμε το ύψος του ισοδύναμου διπόλου που χαρακτηρίζεται από την ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο. Για οποιαδήποτε κεραία ονομάζουμε ενεργό ύψος , το ύψος κατακόρυφης υποθετικής κεραίας που διατηρεί σ' όλο το ύψος της την ίδια ένταση που θα παρουσίαζε στο βύθισμα της έντασης η πραγματική κεραία.
6. **Αντίσταση εισόδου :** Εάν V και I η τάση και το ρεύμα στην είσοδο της κεραίας τότε $Z = V / I$, είναι η αντίσταση εισόδου.
7. **Ισοδύναμη αντίσταση :** $Z = V / I$, είναι εκείνη η αντίσταση που αν τοποθετηθεί στο τέλος της γραμμής , γίνεται το ίδιο αγωγή κατά μέτρο ρεύματος και φάση.
8. **Διάγραμμα λήψης - ακτινοβολίας :** Τα διαγράμματα λήψης και ακτινοβολίας μιας κεραίας είναι τα ίδια που σημαίνει ότι η ίδια κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για εκπομπή όσο και για την λήψη.
9. **Συντονισμένη κεραία (ευθύγραμμος) :** Ονομάζεται κάθε κεραία που το μήκος της είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του $\lambda/2$.
10. **Ασυντονιστή κεραία (ευθύγραμμος) :** Ονομάζεται κάθε κεραία που τερματίζει στη χαρακτηριστική της αντίσταση . Εδώ δεν έχουμε δημιουργία στάσιμων κυμάτων.

Κεραίες εκπομπής επιγείων μεταδόσεων.

Είναι γνωστό ότι στην περιοχή των μεσαίων κυμάτων, η διάδοση πραγματοποιείται με το κύμα εδάφους. Ως, εκ τούτου, κατά τη χρησιμοποίηση αυτών των κυμάτων μελημά μας είναι η εκπομπή να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ισχύ κατά μήκος της επιφάνειας της γης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με κατακόρυφο δίπολο $\lambda/2$. Η κατασκευή, όμως, ενός τέτοιου διπόλου είναι οικονομικά ασύμφορος.

Σε αρκετά αγώγιμο έδαφος είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί δίπολος κεραία $\lambda/2$, της οποίας, όμως, το αληθινό ύψος πάνω από το έδαφος είναι $\lambda/4$.

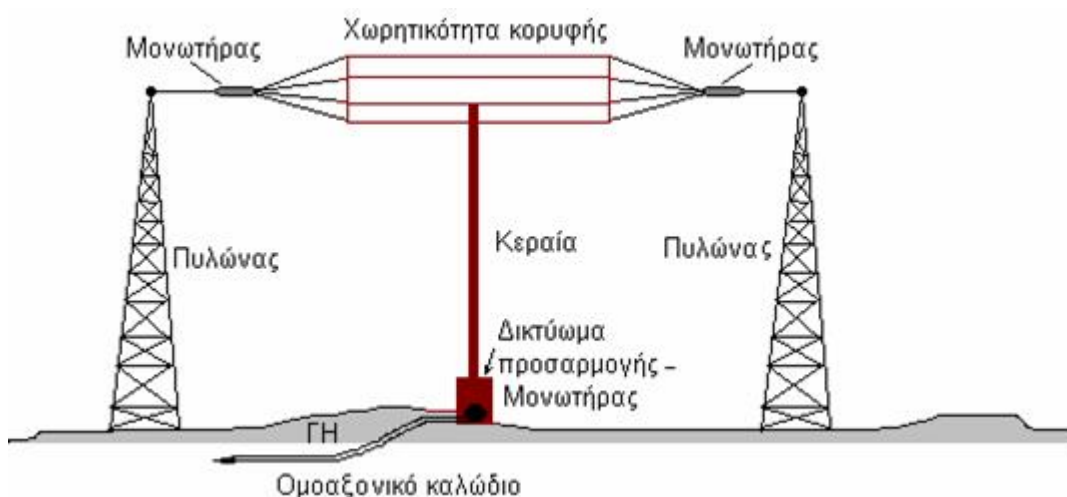


Σχ. 5.8. Κεραία ιστός.

Μεγαλύτερη μείωση του πραγματικού ύψους της κεραίας πετυχαίνεται με την τοποθέτηση αντεπαγωγής στη βάση της ή χωρητικότητα στην κορυφή της.

Πολλές φορές η ακτινοβολία γίνεται από κατακόρυφο πολύκλωνο αγωγό που στηρίζεται σε δύο πυλώνες με τη βοήθεια οριζόντιου αγωγού.

Γύρω από τον οριζόντιο αυτό αγωγό υπάρχουν και άλλοι παράλληλοι για να σχηματισθεί η χωρητικότητα κορυφής. Οι κεραίες αυτές, συνήθως, ονομάζονται κεραίες «ιστός». Κεραίες με πυλώνες διαθέτει ο πομπός μεσαίων κυμάτων των Νέων Λιοσίων στην Αθήνα και κεραία «ιστό» διαθέτει ο πομπός του Αγίου Στεφάνου (το Μπογιάτη). Η ΕΡΤ στον πομπό των Ν.Λιοσίων (ΙΛΙΟΝ) λειτουργεί με δύο πομπούς (666KHz και 1386KHz αντίστοιχα) στο ίδιο σύστημα κεραίας.



Σχ. 5. 9. Κεραία $\lambda/4$, κατακόρυφη με χωρητικότητα κορυφής στηριγμένη σε πυλώνες.

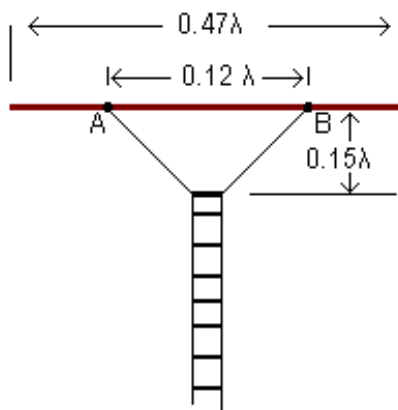
Κεραία Δέλτα.

Η κεραία αυτή χρησιμοποιείται, συνήθως, στην περιοχή των βραχέων κυμάτων και αποτελείται από ένα συνεχές σύρμα. Η προσαρμογή της κεραίας Δέλτα εξαρτάται από το σημείο τροφοδοτήσεως.

Η αντίσταση που παρουσιάζεται μεταξύ του κέντρου της κεραίας και των δύο σημείων είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο τα σημεία αυτά είναι απομακρυσμένα.

Την ιδιότητα αυτή εκμεταλλευόμαστε για να πετύχουμε προσαρμογή. Έτσι, μεταξύ της κεραίας και της γραμμής μεσολαβεί ένα μεταβατικό τμήμα το οποίο έχει μορφή ανεστραμμένου Δ .

Οι διαστάσεις του Δ εξαρτώνται από την χαρακτηριστική αντίσταση και από τη συχνότητα.



Σχ. 5. 10. Τροφοδότηση κεραίας με διπολική συμμετρική γραμμή.

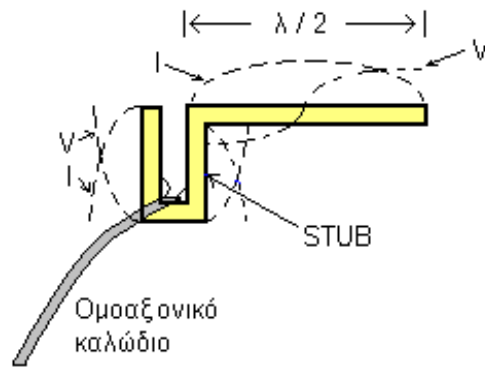
Κεραία j

Η κεραία αυτή είναι δίπολος κεραία της οποίας η τροφοδότηση πραγματοποιείται στο ένα από τα δύο άκρα της, μέσω ενός βραχυκυκλωμένου στελέχους $\lambda/4$ (stub).

Η τροφοδότηση αυτή υπαγορεύεται από το γεγονός ότι η αντίσταση εισόδου στο άκρο της κεραίας είναι θεωρητικά άπειρος (πρακτικά της τάξης των $10K\Omega$). Έτσι θα πρέπει και η γραμμή τροφοδοτήσεως να παρουσιάζει στα σημεία συνθέσεως μεγάλη αντίσταση. Την ιδιότητα αυτή έχει, όμως, στην είσοδό του το βραχυκυκλωμένο στέλεχος $\lambda/4$.

Έτσι, δημιουργείται η κεραία j, όπου το στέλεχος $\lambda/4$ τροφοδοτεί τη δίπολο κεραία στο άκρο της.

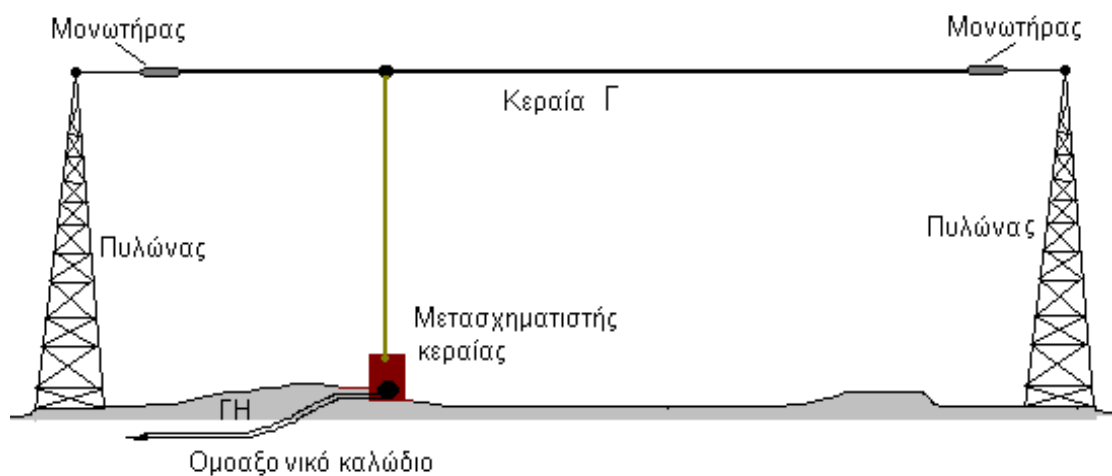
Το stub διεγείρεται με ομοαξονικό καλώδιο ή διπλή γραμμή, σε κατάλληλα σημεία εξαρτημένο από την χαρακτηριστική αντίσταση του καλωδίου ή της γραμμής, προκειμένου να πετύχουμε την προσαρμογή.



Σχ. 5. 11. Κεραία τύπου «J» με τροφοδότηση από το άκρο.

Κεραίες τύπου Γ και Τ

Είναι από τους πλέον συνηθισμένους τύπους κεραιών εκπομπής στην περιοχή των βραχέων κυμάτων.



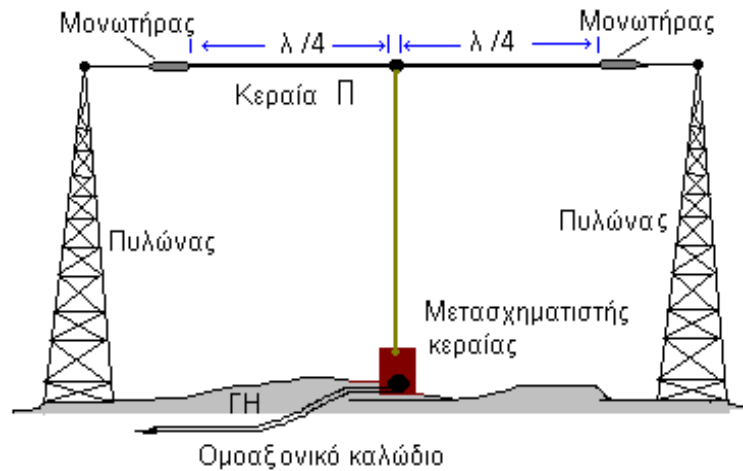
Σχ.5. 12. Κεραία τύπου Γ.

Η κεραία αυτή αποτελείται από ένα οριζόντιο αγωγό αναρτημένο μεταξύ δύο μονωτήρων.

Το μήκος του ριζόντιου αγωγού για τη λήψη στην περιοχή των μεσαίων κυμάτων αυξάνεται από 15m - 25m και για λήψη στα βραχέα κύματα από 6m - 12m.

Είναι ασύμμετρες κεραιές, στις οποίες τα οριζόντια τμήματα δεν συμμετέχουν στην ακτινοβολία.

Ο Μ/Τ προσαρμόζει την αντίσταση εισόδου της κεραίας με την αντίσταση εξόδου του πομπού.

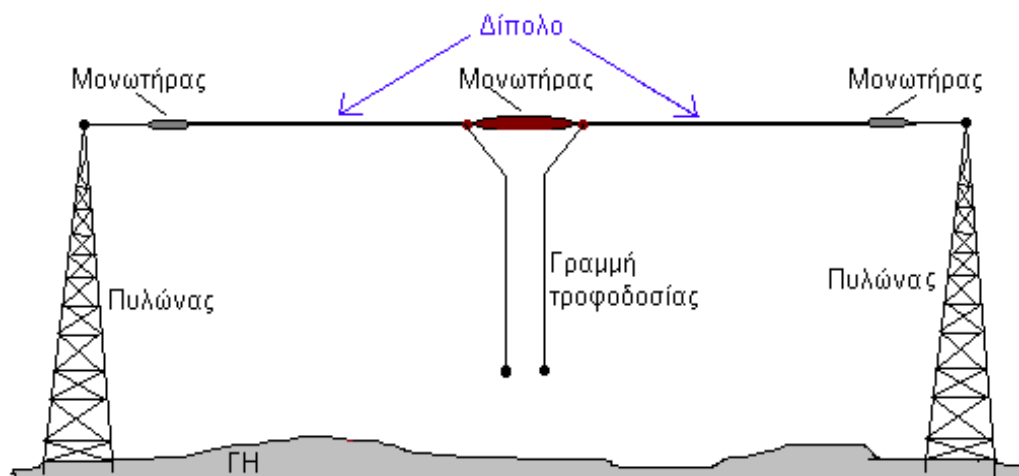


Σχ.5.13. Κεραία τύπου T.

Οριζόντια διπολική κεραία.

Έχει μεγάλη εφαρμογή στην περιοχή των βραχέων κυμάτων. Στην διπολική κεραία το δίπολο τοποθετείται κάθετα προς την κατεύθυνση εκπομπής ή λήψης. Επίδραση στο διάγραμμα κατευθυντικότητας στο κατακόρυφο επίπεδο έχει το ύψος της κεραίας πάνω από τη γη και το μήκος του διπόλου.

Η ένταση του πεδίου που δημιουργεί το δίπολο σε σημείο του χώρου, είναι αποτέλεσμα της συμβολής του κύματος που ακτινοβολείται από το δίπολο και του κύματος που ανακλάται από το έδαφος.

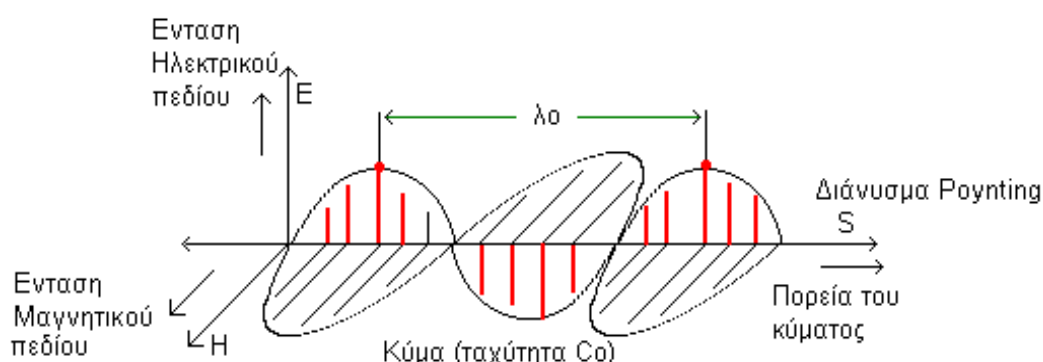


Σχ. 5.14. Οριζόντια διπολική κεραία.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα της κεραίας.

Βασικό χαρακτηριστικό της κεραίας εκπομπής είναι η ικανότητά της να ακτινοβολεί ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στο χώρο. Το ρεύμα υψηλής συχνότητας που διαρρέει την κεραία δημιουργεί γύρω της μεταβαλλόμενα μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο σε διάφορα σημεία του χώρου. Το τελευταίο πεδίο δημιουργεί σε μακρινά σημεία άλλο πεδίο και η αλληλοδημιουργία πεδίων συνεχίζεται, έτσι ώστε να μπορούμε να μιλάμε πλέον για ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με δύο συνιστώσες.

Έτσι, η κεραία που διαρρέεται από μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα υψηλής συχνότητας είναι πηγή ραδιοκυμάτων.



Σχ.5.15. Ηλεκτρομαγνητικό κύμα στον ελεύθερο χώρο.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα χαρακτηρίζεται από δύο μεγέθη: την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E και την ένταση του μαγνητικού πεδίου H .

Τα διανύσματα των εντάσεων ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διαδόσεως του κύματος.

Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια κύματα σε αντίθεση με τα διαμήκη, κύματα των οποίων οι ταλαντώσεις δημιουργούνται κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης τους.

Η ταχύτητα διάδοσης και η φάση του κύματος γύρω από την πηγή είναι ίδια.

Ουσιαστικό ρόλο στη διάδοση των ραδιοκυμάτων παίζει η πόλωση τους.

Ένα κύμα χαρακτηρίζεται πολωμένο όταν αναπτύσσει τα δύο συνιστώσες πεδία δηλαδή το ηλεκτρικό και μαγνητικό πάνω σε σταθερό ορισμένο και αμετάβλητο επίπεδο.

Η πόλωση του H/M κύματος καθορίζεται από τη διεύθυνση του ηλεκτρομαγνητικού του πεδίου.

Το επίπεδο που ορίζεται από την κατεύθυνση διαδόσεως του κύματος και από το διάνυσμα E ονομάζεται επίπεδο πολώσεως.

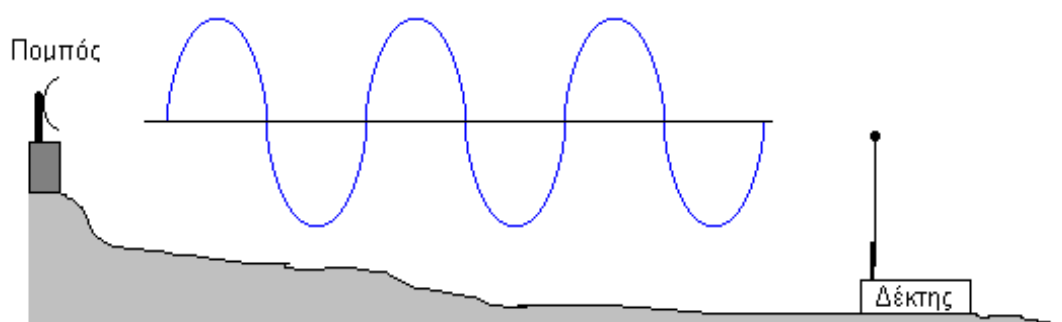
Αν το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο προς τη γη, το κύμα χαρακτηρίζεται σαν κατακόρυφο πολωμένο. Αν όμως το ηλεκτρικό πεδίο είναι παράλληλο προς τη γη, το κύμα χαρακτηρίζεται σαν οριζόντια πολωμένο.

Πέρα από αυτές τις δύο πολώσεις που ονομάζονται γραμμικές, υπάρχει και η ελλειπτική πόλωση.

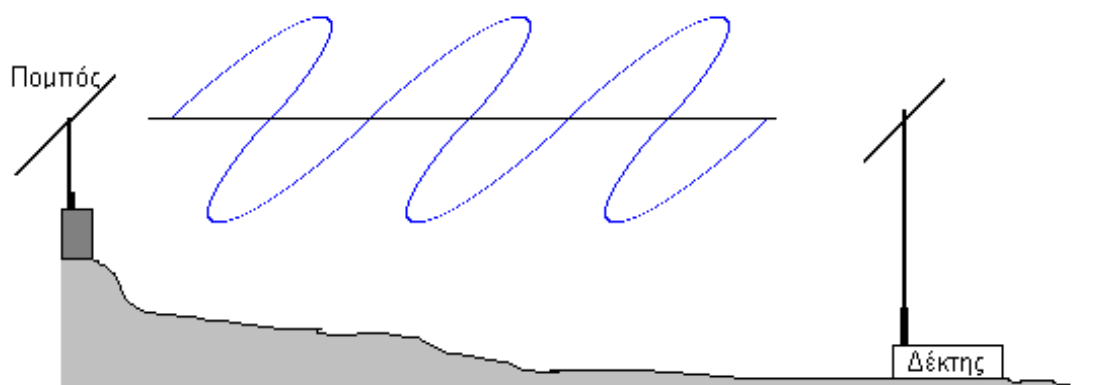
Σε αυτή, το άνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου περιστρέφεται γύρω από τον άξονα διάδοσης.

Διακρίνουμε δεξιόστροφη και αριστερόστροφη ελλειπτική πόλωση ανάλογα με τη φορά περιστροφής. Η κυκλική πόλωση είναι ειδική περίπτωση της ελλειπτικής πόλωσης.

Στην περιοχή μέσων και χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιείται η κατακόρυφη πόλωση, δεδομένου ότι η διάδοση επιτυγχάνεται με το επιφανειακό κύμα. Στις περιοχές VHF και UHF μπορεί να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε πόλωση.



Σχ.5.16. Κύμα με κατακόρυφη πόλωση.



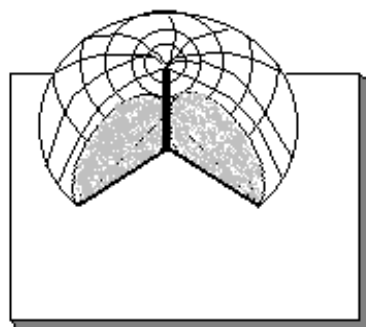
Σχ.5.17. Κύμα με οριζόντια πόλωση.

Διάγραμμα ακτινοβολίας ή λήψης δίπολου.

Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που γεννιέται από μία κεραία, διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός. Στη διαδικασία αυτή κάθε μικρό τμήμα της κεραίας ακτινοβολεί ορισμένο ποσό ενέργειας. Το ποσό αυτό ενέργειας είναι ανάλογο με το μήκος του τμήματος της κεραίας και με την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το τμήμα αυτό.

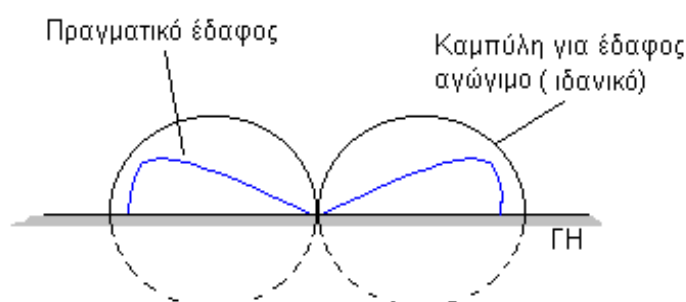
Η μορφή της δέσμης που σχηματίζει η ακτινοβολία εξαρτάται πρώτα από την κατανομή του ρεύματος πάνω στην κεραία και έπειτα από το σχήμα της κεραίας και από άλλα τυχόν γειτονικά αντικείμενα που παραμορφώνουν ή ανακλούν το πεδίο.

Τα διαγράμματα τα χωρίζουμε σε κατακόρυφα που μας δίνουν το περίγραμμα της κατακόρυφης κατανομής του πεδίου και σε οριζόντια διαγράμματα που μας δίνουν την κατανομή του πεδίου στο οριζόντιο επίπεδο.



Σχ. 5.18. Διάγραμμα κατευθυντικότητας κεραίας $\lambda/4$ στο χώρο.

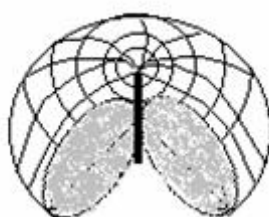
Η κεραία $\lambda/4$ Marconi παρουσιάζει την κατακόρυφη ακτινοβολία της με μορφή ημικυκλίων, ενώ η οριζόντια ακτινοβολία της δίνεται με κύκλο, συνεπώς η κεραία ακτινοβολεί οριζόντια και κάθετα προς τον άξονα της προς όλες τις κατευθύνσεις ομοιόμορφα.



Σχ.5.19. Διάγραμμα ακτινοβολίας (κατακόρυφο επίπεδο) κεραίας Marconi.

Η κατακόρυφη ακτινοβολία κατά την προέκταση του άξονα της είναι μηδενική.

Το δίπολο $\lambda/2$, όταν βρίσκεται στον ελεύθερο χώρο και είναι κατακόρυφο, παρουσιάζει στο επίπεδο κυκλικό διάγραμμα ακτινοβολίας, ενώ στο κατακόρυφο επίπεδο διάγραμμα ενός οκταριού.



Σχ.5.20. Διάγραμμα κατευθυντικότητας διπόλου στο χώρο.

Αν το δίπολο είναι οριζόντιο η οριζόντια ακτινοβολία του έχει την μορφή αριθμού 8 , ενώ η κατακόρυφη ακτινοβολία του δίνει κυκλικό διάγραμμα

Η κεραία λ αποτελείται από δύο τμήματα $\lambda/2$ και παρουσιάζει, αν είναι κατακόρυφη, για την κατακόρυφη ακτινοβολία δύο οκτάρια που με αλληλεπίδρασή τους, παρουσιάζονται σαν τέσσερις λοβοί.

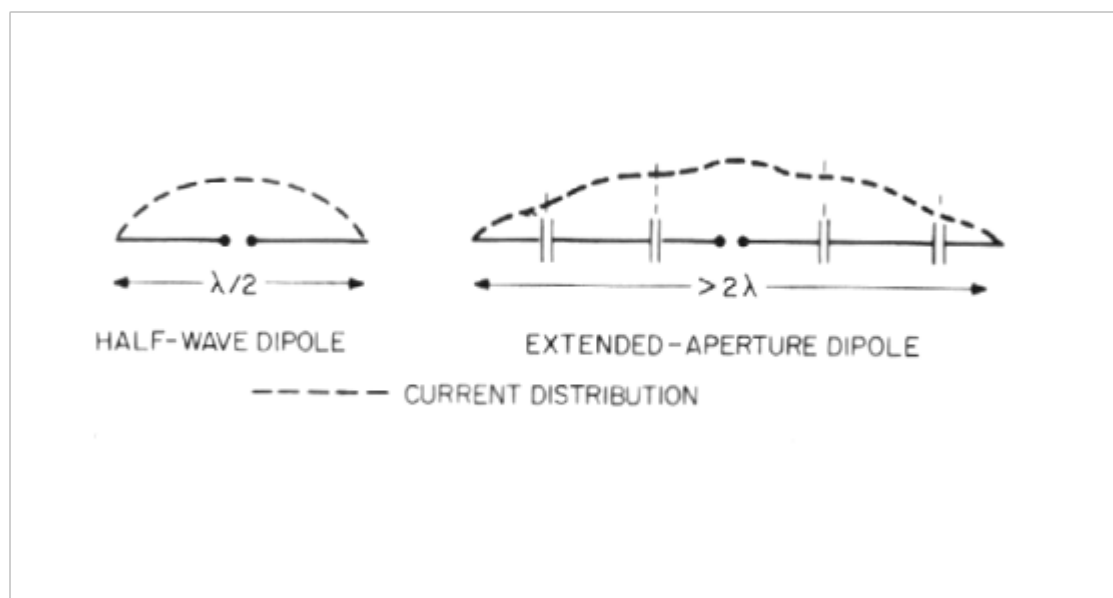
Σύμφωνα με το θεώρημα της ακτινοβολίας του Carson, τα διαγράμματα λήψεως ενός διπόλου είναι ίδια με τα διαγράμματα εκπομπής του ίδιου διπόλου.

Αν μια κεραία εκπομπής παρουσιάζει κατευθυνόμενη εκπομπή, και χρησιμοποιηθεί η ίδια για λήψη, θα παρουσιάσει τις ίδιες κατευθυντικές ιδιότητες.

Λογαριθμική – Περιοδική κεραία εκτεταμένου – Ανοίγματος.

Το κύριο πλεονέκτημα μίας κατακόρυφα πολωμένης LPA είναι ότι έχει πολύ μεγάλη αξιμουθιακή γωνία δέσμης αλλά υψηλή κατευθυντικότητα. Η απολαβή της μπορεί να αυξηθεί χωρίς να μειωθεί το αξιμουθιακό εύρος δέσμης της αν το κατακόρυφο άνοιγμα εκταθεί επιμηκύνοντας τα δίπολα (ακτινοβολητές). Ωστόσο, αν τα μήκη των ακτινοβολητών γίνουν μεγαλύτερα από $\lambda/2$, θα υπάρχουν μηδενισμοί στην κατανομή του ρεύματος κατά μήκος των ενεργών ακτινοβολητών, που θα παράγουν ανεπιθύμητους μηδενισμούς στο διάγραμμα ακτινοβολίας και όχι αποδεκτές μεταβολές στην αντίσταση της κεραίας.

Το αυξανόμενο κατακόρυφο άνοιγμα είναι ενεργό μόνο αν γίνονται βήματα για να διατηρηθούν τα χαρακτηριστικά της κατανομής ρεύματος ενός διπόλου $\lambda/2$ (ή μονοπόλου $\lambda/4$), καθώς το μήκος του ακτινοβολητή αυξάνεται.



Half - wave dipole = Δίπολο $\lambda/2$, Extended - aperture dipole= Δίπολο εκτεταμένου ανοίγματος , Current distribution = κατανομή ρεύματος.

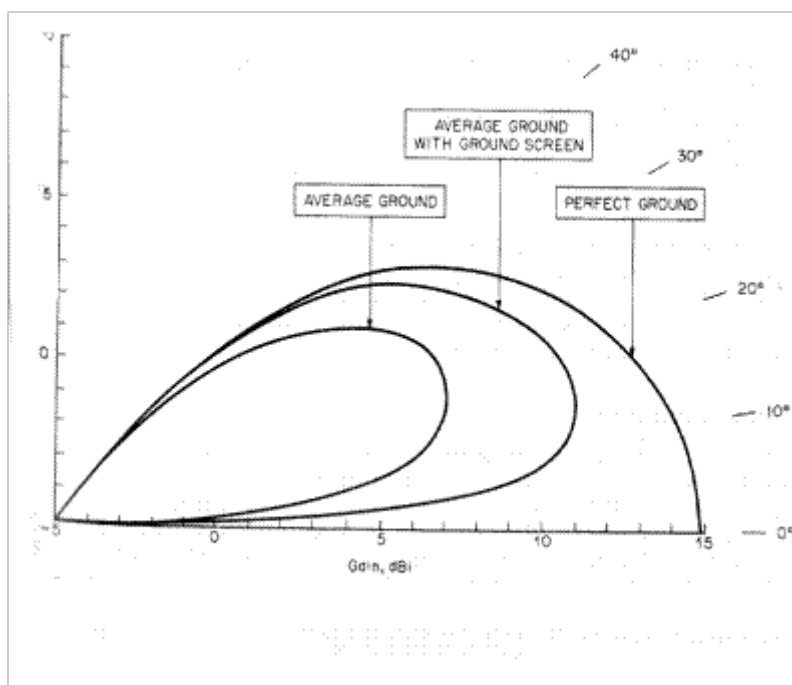
Σχ.5.37. Τεχνική εκτεταμένου ανοίγματος για την απαλοιφή μηδενισμών στην κατανομή του ρεύματος σε δίπολα μεγαλύτερα από $\lambda/2$.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας την **τεχνική εκτεταμένου ανοίγματος**, που φαίνεται στο Σχ. 5.37. για την περίπτωση ενός απλού διπόλου. Οι πυκνωτές εισάγονται σε σειρά με την προέκταση του διπόλου ώστε η κατανομή ρεύματος να μην μηδενίζεται ποτέ εκτός από τις άκρες του διπόλου. Μία κεραία LPA εκτεταμένου ανοίγματος που χρησιμοποιεί δίπολα πλήρους μήκους κύματος έχει περίπου 2-3dB μεγαλύτερη απολαβή απ' ό τι μια κεραία LPA με δίπολα $\lambda/2$.

Ακτινοβολία των δικτυωτών πλεγμάτων Εδάφους

Η απολαβή μιας κατακόρυφα πολωμένης κεραίας HF μειώνεται και ο ΤΟΑ της αυξάνεται από την πεπερασμένη αγωγιμότητα του εδάφους. Για να πετύχουμε μέγιστη απολαβή και το χαμηλότερο δυνατό ΤΟΑ είναι απαραίτητο ένα πλέγμα εδάφους δικτυωτό που ακτινοβολεί και εκτείνεται αρκετά μήκη κύματος μπροστά από την κεραία. Η λειτουργία μιας κατακόρυφα πολωμένης κεραίας εξαρτάται από τις γραμμικές διαστάσεις του δικτυώματος εδάφους και από την αγωγιμότητα του εδάφους. Πρακτικά δικτυώματα εδάφους κατασκευάζονται τοποθετώντας σε ίσες αποστάσεις σύρματα στην γη.

Τα σύρματα ενός πλέγματος εδάφους πρέπει να είναι αρκετά πυκνά έτσι ώστε το πλέγμα να παρουσιάζει εμπέδηση επιφάνειας πολύ χαμηλή (χαμηλή ωμική και χαμηλή φαινομένη αντίσταση). Αν παρουσιάζεται φαινομένη εμπέδηση το διάγραμμα ακτινοβολίας παραμορφώνεται, διότι μπορεί να διεγερθεί ένα κύμα παγιδευμένο κατά μήκος του πλέγματος.



Average ground = Μέσο έδαφος , Perfect ground = Τέλειο έδαφος.

Σχ. 5 . 38. Διάγραμμα ανύψωσης μιας κατακόρυφα πολωμένης κεραίας LPA εκτεταμένου ανοίγματος στα 10MHz.

Ένα δικτύωμα εδάφους δεν θα πρέπει ποτέ να είναι θαμμένο περισσότερο από μερικά cm μέσα στη γη και δεν θα πρέπει ποτέ να καλύπτεται από χιόνι. Το θαμμένο ή το καλυμμένο με χιόνι δίκτυωμα μετριάξει κατά πολύ την ενεργητικότητα του εδάφους και σε μερικές περιπτώσεις εισάγει απώλειες στην γη. Δεν υπάρχουν απλοί τύποι για να καθορίσουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας μίας κατακόρυφης κεραίας με ένα πλέγμα εδάφους. Ωστόσο, πάρα πολλά προγράμματα υπολογιστών, με ανάλυση συρμάτινων κεραίων, είναι διαθέσιμα και μπορούν να υπολογίσουν διαγράμματα ακτινοβολίας για κεραίες με απώλειες στην γη με και χωρίς πολυγωνικό πλέγμα εδάφους αυθαίρετου μεγέθους. Το σχήμα 5.38. δείχνει το διάγραμμα ανύψωσης, υπολογισμένο με computer, μιας κατακόρυφα πολωμένης LPA εκτεταμένου – ανοίγματος πάνω από τελείως αγώγιμο έδαφος και πάνω από έδαφος μέσης αγωγιμότητας, με και χωρίς μεγάλο ιδανικό πλέγμα εδάφους. Ακόμη και με μεγάλο ιδανικό πλέγμα εδάφους υπάρχουν σημαντικές απώλειες απολαβής (gain) λόγω απωλειών του εδάφους. Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται για όλες τις κατακόρυφα πολωμένες κεραίες.

Συντονισμένες κεραίες FM λ/4.

Οι κεραίες εκπομπής και λήψεως είναι αναστρέψιμα συστήματα, δηλαδή η κεραία εκπομπής μπορεί να εργασθεί και σαν κεραία λήψεως και αντίστροφα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που δημιουργεί ένας πομπός με την κεραία στο χώρο, αν συναντήσουν στον δρόμο τους αγωγό ορισμένου μήκους δημιουργούν σ' αυτόν μια ορισμένη ηλεκτρεγερτική δύναμη. Κάθε αγωγός, παρουσιάζει μια ορισμένη αυτεπαγωγή L και μια ορισμένη χωρητικότητα C , μοιρασμένες ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του.

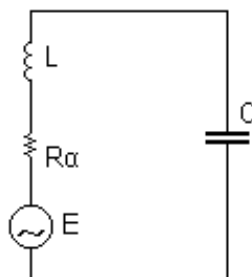
Χάρη σ' αυτή την αυτεπαγωγή και τη χωρητικότητα, ο αγωγός έχει μια δική του συχνότητα:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ή το δικό του μήκος κύματος $\lambda = c/f$

Μπορούμε λοιπόν να παραστήσουμε τον αγωγό με ένα συντονισμένο κύκλωμα σειράς που η αυτεπαγωγή του (αυτεπαγωγή) L και η χωρητικότητα C και η αντίσταση R_a είναι ίσα με τα ίδια στοιχεία του αγωγού.

Την ηλεκτρεγερτική δύναμη E που επάγεται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στον αγωγό, τη θεωρούμε ότι προέρχεται από μία υψίσυχνη πηγή E .



Σχ.5.39. Ισοδύναμο κύκλωμα αγωγού με ένα συντονισμένο κύκλωμα σειράς.

Πρέπει να γνωρίζουμε ότι η αντίσταση R_a του κυκλώματος αποτελείται από δύο αντιστάσεις.

A) από την αντίσταση απωλειών R_{ap}

B) από την αντίσταση ακτινοβολίας R_{akt} .

Ισχύει, δηλαδή, $R_a = R_{ap} + R_{akt}$.

Η αντίσταση απωλειών R_{ap} είναι η πραγματική (ωμική) αντίσταση στις υψηλές συχνότητες, που μετατρέπει ένα ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας του κυκλώματος σε θερμότητα. Η αντίσταση ακτινοβολίας R_{akt} είναι μία υποθετική αντίσταση, που αν την θεωρούσαμε πραγματική, θα ξόδευε το υπόλοιπο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας ακτινοβολώντας το στο γύρω χώρο με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Έτσι, λοιπόν, η ολική ισχύς της κεραίας είναι: $P = I^2 (R_{ap} + R_{akt})$.

Αν R_{akt} είναι η ακτινοβολούμενη ισχύς και I η ενεργός τιμή της εντάσεως του ρεύματος που διαρρέει στο κύκλωμα, η αντίσταση ακτινοβολίας θα δίνεται από τον τύπο $R_{akt} = P_{akt} / I^2$.

Το I είναι η ενεργός τιμή της έντασης του ρεύματος.

Η ένταση όμως του ρεύματος διαφέρει από σημείο σε σημείο της κεραίας, με αποτέλεσμα και η R_{akt} να μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Έτσι η αντίσταση ακτινοβολίας R_{akt} καθορίζεται από το ρεύμα στην κοιλία εντάσεως, δηλαδή από το ρεύμα εισόδου της κεραίας.

Για ένα απ' το δίπολο με $l = \lambda/2$ $R_{akt} = 80\pi^2 (h/\lambda)^2$, όπου h είναι το ενεργό ύψος της κεραίας.

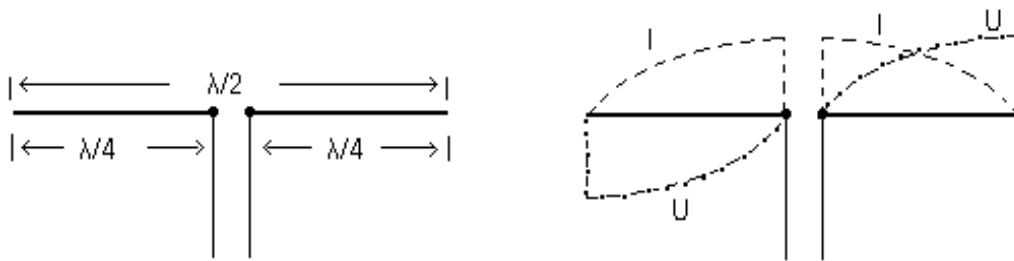
Αν το δίπολο είναι συντονισμένο, οι συνιστώσες X_L και X_C εξουδετερώνονται και η σύνθετη αντίσταση του περιορίζεται στην πραγματική συνιστώσα.

$R_a = R_{ap} + R_{akt}$. Η αντίσταση R_a ονομάζεται αντίσταση εισόδου. Θεωρώντας την αντίσταση απωλειών αμελητέα παίρνουμε: $R_a = R_{akt}$.

Λέγοντας, λοιπόν, αντίσταση εισόδου του διπόλου θα εννοούμε την αντίσταση ακτινοβολίας.

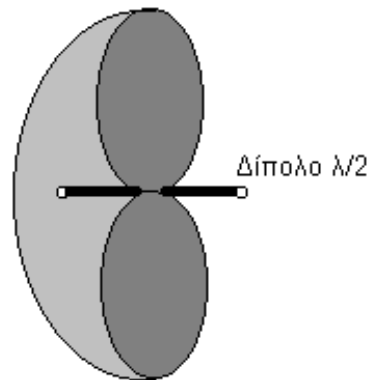
Απλό δίπολο $\lambda/2$ ή κεραία Hertz.

Μια από τις πιο συνηθισμένες μορφές κεραιών είναι το δίπολο $\lambda/2$ που φαίνεται στο Σχ. 5.40. και είναι ένα κομμάτι σύρματος ή σωλήνα μήκους $\lambda/2$ στη συχνότητα λειτουργίας.



Σχ.5.40. Δίπολο $\lambda/2$ με την κατανομή ρεύματος και τάσης.

Η κεραία στην πραγματικότητα αποτελείται από δύο μεταλλικά στελέχη με μήκος $\lambda/4$ τοποθετημένα κοντά, το ένα στην προέκταση του άλλου, $\lambda/4 + \lambda/4 = \lambda/2$, και με τρόπο, ώστε η κατανομή του ρεύματος και της τάσης να γίνεται όπως στο σχ.5.40



Σχ. 5.41. Διάγραμμα ακτινοβολίας διπόλου $\lambda/2$.

Τα δύο στελέχη $\lambda/4$ συνδέονται με μία διπολική γραμμή με την είσοδο του δέκτη.

Η γραμμή μεταφοράς συνδέεται στο κέντρο του διπόλου. Η αντίσταση του διπόλου είναι 75Ω .

Το μήκος του διπόλου $\lambda/2$ υπολογίζεται από τον τύπο:

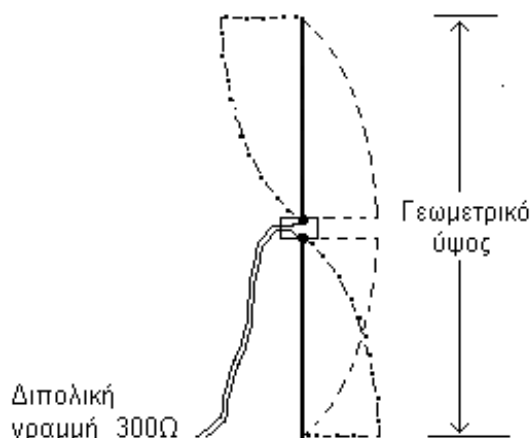
$$L = 142,5/f \quad \text{όπου } f \text{ σε MHz και } L \text{ σε m.}$$

Στο Σχ. 5.41. φαίνεται το διάγραμμα ακτινοβολίας ενός διπόλου.

Το ενεργό ύψος h ενός διπόλου $\lambda/2$ θα ήταν ίσο με το γεωμετρικό του ύψος, εάν η κατανομή του ρεύματος επάνω στο δίπολο ήταν ομοιόμορφη. Επειδή όμως παρουσιάζει κοιλία ρεύματος στο μέσο του και δεσμούς στα άκρα του, το μήκος του είναι μικρότερο από το γεωμετρικό του ύψος. Το ενεργό ύψος του διπόλου δίδεται από τον τύπο:

$$h = 2/\pi \cdot \lambda/2 = \lambda/\pi$$

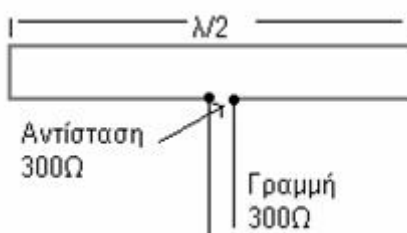
Από τον τύπο παρατηρούμε ότι το ενεργό ύψος h του διπόλου είναι ανάλογο με το μήκος κύματος λ που θα πάρουμε.



Σχ. 5.42. Κατακόρυφο δίπολο.

Το αναδιπλωμένο δίπολο $\lambda/2$ ή κεραία FOLDED.

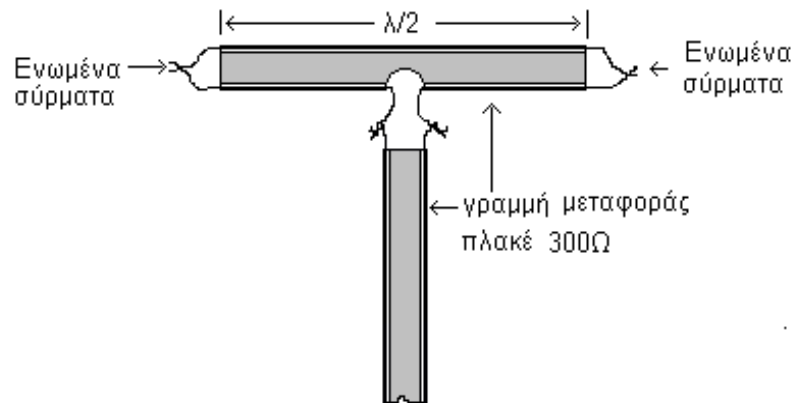
Μια παραλλαγή του διπόλου $\lambda/2$, που χρησιμοποιείται ευρύτατα σήμερα είναι το αναδιπλωμένο δίπολο.



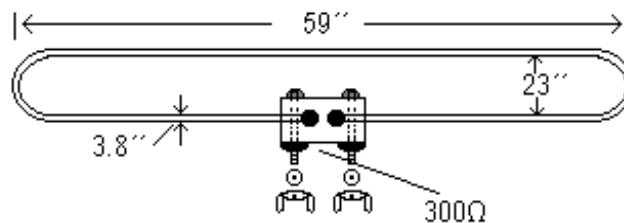
Σχ.5.43. Απλό δίπολο.

Το αναδιπλωμένο δίπολο το προτιμούμε επειδή παρουσιάζει αντίσταση εισόδου της τάξης των 300Ω και συνεπώς κάνει εξαιρετική προσαρμογή με τη διπολική παράλληλη γραμμή των 300Ω .

Η κεραία αυτή κατασκευάζεται από ένα αναδιπλωμένο μεταλλικό σωλήνα. Στην πράξη κατασκευάζεται πολύ εύκολα με τη χρησιμοποίηση επίπεδης ταινίας 300Ω . Κόβοντας ένα κομμάτι επίπεδης γραμμής μεταφοράς για λειτουργία σε $\lambda/2$, (Σχ.5.44.) βραχυκυκλώνουμε τους δύο αγωγούς στα άκρα και ανοίγουμε, τον ένα από τους αγωγούς στο μέσον, όπου και συνδέεται η γραμμή τροφοδοτήσεως, που και αυτή είναι επίπεδη γραμμή μεταφοράς των 300Ω .



Σχ.5.44.



Σχ. 5.45. Κατασκευή αναδιπλωμένου διπόλου.

Στο σχήμα 5.45. παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να κατασκευάσουμε μια κεραία folded από μεταλλικό αναδιπλωμένο σωλήνα.

Το ενεργό ύψος του αναδιπλωμένου διπόλου είναι $h=2\lambda/\pi$.

Επομένως, και η ηλεκτρεγερτική δύναμη που δημιουργείται σ' αυτό από ένα πεδίο f είναι:

$$E=f \cdot h=f \cdot 2\lambda/\pi, \text{ διπλάσια, δηλαδή, από αυτή στο απλό δίπολο όπου } E=f \cdot \lambda/\pi.$$

Το αναδιπλωμένο δίπολο είναι φθηνό και εύκολο στην κατασκευή του και χρησιμοποιείται ευρέως για τηλεοπτικές και ραδιοφωνικές λήψεις στην μπάντα των FM.

Κατευθυντικές πολυστοιχειακές κεραίες Κεραία YAGI.

Οι κεραίες που έχουν εκτός από το απαραίτητο δίπολο, έναν ανακλαστήρα και έναν ή περισσότερους κατευθυντήρες, ονομάζονται κεραίες Yagi προς τιμή του Ιάπωνα Yagi, εφευρέτη της κεραίας το 1926. Τότε ο Yagi χρησιμοποίησε ένα δίπολο λήψεως με ένα κατευθυντήρα, σε απόσταση $\lambda/3$, από το δίπολο.

Στις κεραίες Yagi η απολαβή μεγαλώνει με αυξανόμενο τον αριθμό των παρασιτικών στοιχείων.

Σήμερα έχουμε κεραίες Yagi με πλήθος στοιχείων, ανάλογα με τις απαιτήσεις που έχουμε.

Οι απαιτήσεις αυτές είναι:

- 1) Η υψηλή απολαβή
- 2) Η προσαρμογή με την κάθοδο
- 3) Το εύρος ζώνης συχνοτήτων.

Τα στοιχεία που βρίσκονται μπροστά από το ενεργό δίπολο (σύμφωνα με την κατεύθυνση εκπομπής και λήψης) ονομάζονται κατευθυντήρες, ενώ εκείνο που βρίσκεται πίσω από αυτό ονομάζεται ανακλαστήρας.

Ο ανακλαστήρας αποτελείται από στοιχεία, τοποθετημένα έτσι, ώστε να σχηματίζουν ανακλαστική επιφάνεια, στην οποία η κατεύθυνση της κεραίας είναι κάθετη.

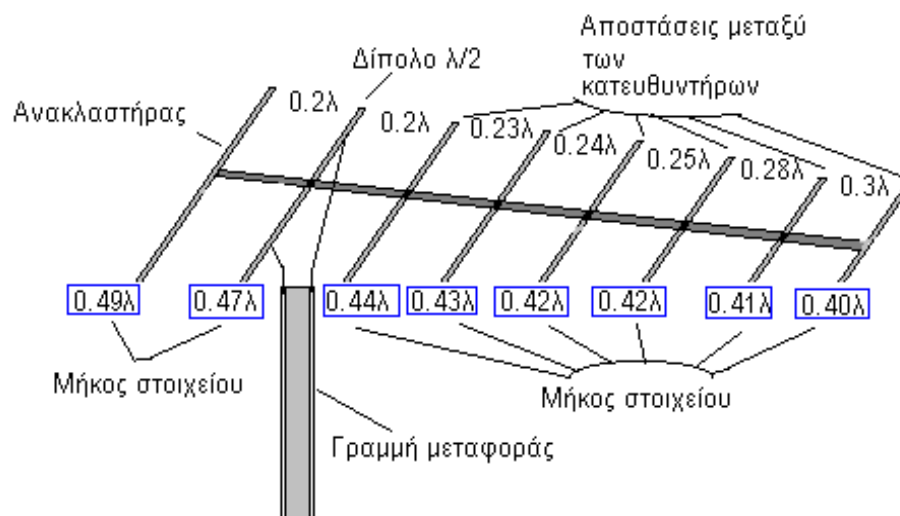
Από τις αποστάσεις και τα μήκη αυτών των στοιχείων καθορίζονται η αντίσταση εισόδου, η κατευθυντικότητα και η απολαβή.

Όσο αυξάνει ο αριθμός των κατευθυντηρίων, τόσο στενεύει η διερχόμενη από την κεραία ζώνη συχνοτήτων. Επομένως, κεραίες Yagi με πολλούς κατευθυντήρες είναι κατάλληλες για την λήψη μικρής περιοχής συχνοτήτων. Η αύξηση όμως αυτή μεγαλώνει την απολαβή και μικραίνει την αντίσταση εισόδου της κεραίας.

Επίσης, για τον ίδιο λόγο το διάγραμμα κατευθυντικότητας γίνεται οξύτερο.

Η κεραία Yagi καλείται και κεραία δέσμης, επειδή έχει υψηλό κέρδος και είναι πολύ κατευθυντική.

Στο σχήμα 5.44. φαίνεται η διάταξη των στοιχείων μιας κεραίας Yagi και στο σχήμα 5.45. φαίνεται το διάγραμμα κατευθυντικότητας.



Σχήμα 5.44. Κεραία Yagi.

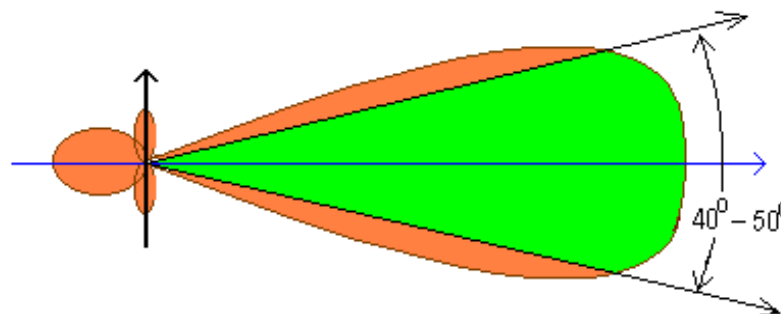
Για να έχουμε τη μέγιστη απολαβή, πρέπει η απόσταση διπόλου – ανακλαστήρα να είναι περίπου 0,1λ. Επειδή, όμως, η αντίσταση εισόδου σε μία τέτοια κεραία με τρία στοιχεία πέφτει στα 15% περίπου της αρχικής τιμής, δηλαδή στο απλό δίπολο στα 10Ω και στο αναδιπλωμένο στα 40Ω περίπου, η απόσταση του ανακλαστήρα από το δίπολο γίνεται συνήθως 0,2 – 0,25λ και του κατευθυντήρα 0,15λ. Οι αποστάσεις αυτές σε κεραία με αναδιπλωμένο δίπολο, ανακλαστήρα και κατευθυντήρα, δίνουν αντίσταση εισόδου 60Ω περίπου.

Έτσι η κεραία μπορεί να συνδεθεί με ομοαξονικό καλώδιο 60Ω χωρίς κύκλωμα προσαρμογής.

Οι κεραίες Yagi χρησιμοποιούνται ευρέως, λόγω της κατευθυντικότητάς τους και του κέρδους τους.

Βασικά χαρακτηριστικά των κεραιών Yagi :

- α. Χρησιμοποιούνται τόσο στην εκπομπή όσο και στην λήψη.
- β. Είναι συναφής (η κατηγορία) με τις λογαριθμικές κεραίες (Log- periodic).
- γ. Τα χαρακτηριστικά τους μεταβάλλονται από συχνότητα σε συχνότητα (μειονέκτημα).



Σχ.5.45. Διάγραμμα (οριζόντιας) κατευθυντικότητας - λήψης, κεραίας Yagi.

5.14. Μεταφορά του σήματος από την κεραία στον δέκτη.

Δυο γενικά τρόποι χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του σήματος από την κεραία στον δέκτη.

Ο διαχωρισμός έχει άμεση σχέση με την ισχύ του μεταφερόμενου σήματος.

Σε δέκτες μικρής ισχύος (φορητούς δέκτες) η κεραία είναι ενσωματωμένη στο δέκτη, συνήθως πτυσσόμενη ή σύρματος για τα FM και φερική για τα AM.

Σε δέκτες μεγάλης ισχύος η μεταφορά του σήματος γίνεται είτε με βισματούμενες κεραίες απ' ευθείας στον δέκτη, είτε μέσω γραμμών μεταφοράς από κεραία σε δέκτη.

Για τις γραμμές μεταφοράς έχουμε αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο.

5.15. Κεραίες φορητών συσκευών.

Υπάρχουν ορισμένες ειδικές κεραίες που χρησιμοποιούνται μόνο για την λήψη, όπως οι κεραίες πλαίσια, οι ραβδοειδείς και οι φεριτικές κεραίες.

5.16. Τρόποι βελτίωσης λήψης - διαφορική λήψη.

Κατά τη διάδοση των κυμάτων σε όλους τους μηχανισμούς διάδοσης σε κάθε περιοχή συχνοτήτων παρατηρείται το φαινόμενο των διαλείψεων.

Στις συχνότητες των μακρών – μεσαίων και βραχέων κυμάτων τις διαλείψεις δημιουργεί η συμβολή του κύματος εδάφους και των ιονοσφαιρικών κυμάτων.

Στα μικροκύματα διαλείψεις δημιουργεί η συμβολή του κατ' ευθείαν κύματος και εκείνου που ανακλάται στην επιφάνεια της γης.

Διάλειψη (Fading) λέγεται κάθε πτώση της στάθμης του πεδίου λήψης μιας ραδιοηλεκτρικής ζεύξης κάτω από τη στάθμη ελεύθερου χώρου.

Για την ελάττωση των φαινομένων που προκαλούν στη λήψη οι διαλείψεις χρησιμοποιούνται τα συστήματα διαφορικής λήψης.

Αν χρησιμοποιηθούν δύο κεραίες στον πομπό και δύο στο δέκτη δημιουργούνται συστήματα διαφορικής λήψης.

Τα συστήματα αυτά δίνουν μεγάλη προστασία στην ζεύξη απέναντι σε μεγάλες διαλείψεις.

Οι ζεύξεις οπτικής επαφής που έχουν διαφορική λήψη συχνότητας χρησιμοποιούν δύο φέρουσες συχνότητες.

Έτσι, πρέπει να έχουν δύο πομπούς και δύο δέκτες σε κάθε κατεύθυνση, αλλά μία κεραία.

Η διαφορική λήψη έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει στην ζεύξη να λειτουργεί ακόμη και όταν παρουσιασθεί βλάβη στον πομπό ή στον δέκτη.

Με συνδυασμούς διαφορικής λήψης χώρου και συχνότητας ή συχνότητας και πόλωσης δημιουργούνται συστήματα πολλαπλής διαφορικής λήψης για αυξημένη προστασία της ζεύξης απέναντι στις διαλείψεις.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει σύνθεση των σημάτων που φέρνουν οι διάφοροι κλάδοι της διαφορικής λήψης στο δέκτη.

Σκοπός μας είναι να αναδεικνύεται πάντοτε στην έξοδο η μέγιστη δυνατή τιμή του λόγου «σήμα προς θόρυβο» S/N με μία απλή διάταξη.

Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιούνται οι επόμενοι μέθοδοι.

α) Να οδηγείται στην έξοδο, κάθε στιγμή το ισχυρότερο σήμα. Συνεπώς σε κάποια βαθμίδα των δεκτών της διαφορικής λήψης, το ασθενέστερο σήμα απορρίπτεται.

β) Να οδηγείται στην έξοδο ένα σήμα που προέρχεται από τη σύνθεση των στιγμιαίων σημάτων που δίνουν όλοι οι κλάδοι της διαφορικής λήψης. Και σε αυτή την περίπτωση η σύνθεση πρέπει να γίνει σε κάποια ενδιάμεση βαθμίδα δεκτών.

Η επιλογή του ισχυρότερου σήματος ή η σύνθεση των επί μέρους σημάτων μπορεί να γίνει:

α) Στο στάδιο της ραδιοσυχνότητας των δεκτών.

β) Στο στάδιο της μέσης συχνότητας.

Ένα εύχρηστο σύστημα διαφορικής λήψης είναι αυτό της διαφορικής πόλωσης. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει δύο κεραίες, μία κατακόρυφη και μία οριζόντια. Οι κατακόρυφες και οριζόντιες συνιστώσες του πεδίου ενός κύματος δεν εμφανίζουν διαλείψεις στον ίδιο χρόνο. Συνεπώς, η μία κεραία ανταποκρίνεται στα κύματα κατακόρυφης πόλωσης και η άλλη στα κύματα οριζόντιας πόλωσης, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται η λήψη με κοινό δέκτη χωρίς διαλείψεις.

Λήψη με διάθλαση :

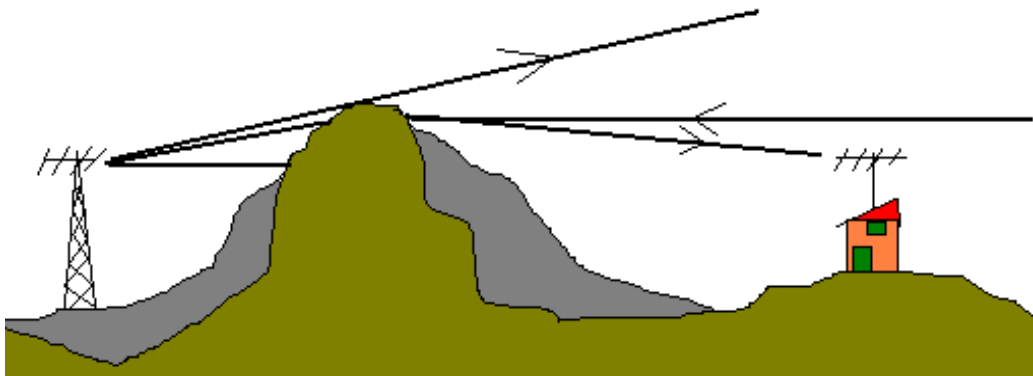
Το φαινόμενο της κάθετης διάθλασης συναντιέται και σε οριζόντια διεύθυνση . Στην περίπτωση που εμποδίζεται η άμεση λήψη λόγω κάποιας γήινης ανωμαλίας, σχ.5.46. μπορούμε να κατευθύνουμε την κεραία λήψης προς το σημείο που γίνεται η διάθλαση.



Σχ.5.46. Λήψη με διάθλαση.

Λήψη με ανάκλαση:

Όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συναντούν φυσικά εμπόδια ανακλώνται σ' άλλες διευθύνσεις, όπως ακριβώς συμβαίνει με μια δέσμη φωτός που πέφτει πάνω σ' ένα κάτοπτρο.



Σχ.5.47. Λήψη με ανάκλαση.

Το φαινόμενο αυτό είναι περισσότερο συχνό στις πόλεις, όπου τα διάφορα ψηλά κτίρια αποτελούν σημεία ανάκλασης του σήματος.

Απαιτούμενες στάθμες στη λήψη.

Οι απαιτούμενες στάθμες στη λήψη για μια εγκατάσταση προς αποφυγή παρεμβολών ή υπερκορεσμών είναι:

- α) **AM** ελάχιστο 55μν, μέγιστο 300mV ($Z=240-300\Omega$)
- β) **FM (VHF)** ελάχιστο 100μν, μέγιστο 100mV ($Z=240-300\Omega$)
- γ) **I-III (VHF)** ελάχιστο 1 mV, μέγιστο 50mV ($Z=60-75\Omega$)
- δ) **IV-V (UHF)** ελάχιστο 1,5mV, μέγιστο 50mV ($Z=60-75\Omega$)

Μονάδα μέτρησης για τον υπολογισμό της ενίσχυσης είναι το db.

Κάθε 6db η τάση διπλασιάζεται ή υποδιπλασιάζεται. Το db αντιστοιχισμένο σε πίνακες με το πλάτος του σήματος σε volts, μας απαλλάσσει από μεγάλους υπολογισμούς και μπορούμε να υπολογίσουμε τον κατάλληλο ενισχυτή με λίγες προσθέσεις και αφαιρέσεις.

Οι εξωτερικές κεραίες διακρίνονται σε

- α.) κατευθυντικές και
- β.) ομοιοκατευθυντικές κεραίες.

Οι ομοιοκατευθυντικές κεραίες έχουν σχεδιασθεί να έχουν την ίδια ευαισθησία στα σήματα που έρχονται από όλες τις γωνίες. Οι κεραίες αυτές δεν μπορούν να πιάνουν σταθμούς μακρινούς τόσο καλά, όσο οι κεραίες μιας κατεύθυνσης. Οι ομοιοκατευθυντικές κεραίες είναι περισσότερο αποτελεσματικές, όταν ο σταθμός δεν είναι πάνω από 60km περίπου.

Πεδιομέτρηση και επιλογή θέσης για την εγκατάσταση κεραίας λήψης.

Σκοπός της κεραίας λήψης είναι να απορροφά από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ισχύ και να την οδηγεί με μορφή ωφέλιμης τάσης στο δέκτη.

Η εγκατάσταση θα πρέπει:

Να αντλεί από το πεδίο και να φέρνει στην είσοδο του δέκτη ισχύ που να εξασφαλίζει καθαρή λήψη.

Να καταπνίγει όλες τις παρενοχλήσεις που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη λήψη.

Να αποκλείει, όταν είναι συλλογική, τις αμοιβαίες παρενοχλήσεις.

Η απόδοση μιας κεραίας εξαρτάται, όπως γνωρίζουμε, από το ενεργό ύψος της h , γιατί η ηλεκτρεγερτική δύναμη E που δημιουργείται σ' αυτή από την ένταση F του πεδίου είναι $E=h.F$.

Η ένταση του πεδίου στον ελεύθερο χώρο αυξάνει με την απόσταση της κεραίας από το έδαφος, εφόσον η διάδοση του πεδίου δεν παρενοχλείτε. Πλησίον στις στέγες των σπιτιών δημιουργείται πύκνωση των δυναμικών γραμμών του πεδίου.

Για το λόγο αυτό η εγκατάσταση της κεραίας πρέπει να γίνεται στο υψηλότερο του κτιρίου.

Πολλές φορές τα παράσιτα δεν ακτινοβολούνται κατ' ευθείαν από την πηγή τους, αλλά έρχονται στην κεραία από διάφορες συνδέσεις, όπως από τις γραμμές του ηλεκτρικού δικτύου.

Οι παρενοχλήσεις αυτές προέρχονται κυρίως από αγωγούς που είναι οριζόντια πολωμένοι.

Όλοι σχεδόν οι ραδιοφωνικοί πομποί έχουν κατακόρυφη πόλωση, έτσι μια κατακόρυφα πολωμένη κεραία βελτιώνει τη λήψη.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν είναι η απώλεια σήματος. Η κεραία πρέπει να τοποθετείται μακριά από μεταλλικά αντικείμενα, γιατί απορροφούν τις ραδιοκυμάνσεις και ελαττώνουν την ένταση του σήματος.

Η απόκριση στις συχνότητες λήψεως εξαρτάται από το μήκος της κεραίας. Σε μια ορισμένη συχνότητα η κεραία απορροφά το μέγιστο σήμα, όταν το μήκος της είναι ίσο με $\lambda/2$ ή $\lambda/4$ του μήκους κύματος. Μπορούμε να αυξήσουμε το ηλεκτρικό μήκος της κεραίας προσθέτοντας αυτεπαγωγή σε σειρά ή να το ελαττώσουμε προσθέτοντας χωρητικότητα.

Τέλος η κατευθυντικότητα είναι ακόμη ένας παράγοντας που επηρεάζει τη λήψη μιας κεραίας.

Έλεγχος της εγκατάσταση

Η κεραία τύπου Γ ευνοεί τη λήψη σημάτων που στη διάδοση τους κόβουν τον αγωγό της κεραίας με ορθή γωνία.

Για καλύτερη λήψη ενός πομπού πρέπει ο οριζόντιος αγωγός να σχηματίζει γωνία 90° με την ευθεία που δίνει την κατεύθυνση του πομπού. Αφού τελειώσει η εγκατάσταση, θα πρέπει να ελέγξουμε για τυχόν σφάλματα.

α) Έλεγχος του RF σήματος:

Για τον έλεγχο της υψηλής συχνότητας θα χρειαστούμε ένα πεδιόμετρο για να μετρήσουμε το σήμα στην αρχή της γραμμής μεταφοράς ή στην έξοδο του ενισχυτή, καθώς και στην είσοδο του δέκτη.

β) Έλεγχος με συνεχές ρεύμα:

Για τη μέτρηση των αντιστάσεων που διαρρέονται με συνεχές ρεύμα θα χρειαστούμε μια γέφυρα μέτρησης αντιστάσεων.

γ) Έλεγχος της γραμμής μεταφοράς του δέκτη:

Σε αυτόν τον έλεγχο δεν θα πρέπει οι ρευματολήπτες να είναι ενωμένοι με την κεραία, γιατί θα βγάλουμε λανθασμένα συμπεράσματα.

Κατά τη δοκιμή αποσυνδέουμε τη γραμμή μεταφοράς από την έξοδο του ενισχυτή. Συνδέουμε, μεταξύ της γραμμής και του πλεντάζ, μετρητή μόνωσης και μετράμε την αντίσταση μόνωσης. Αν αυτή είναι πάνω από $100K\Omega$, η γραμμή είναι καλή.

δ) Γείωση των κεραιών:

Για να αποφύγουμε τις ατμοσφαιρικές εκκενώσεις θα πρέπει να γειώνουμε την εγκατάσταση της κεραίας.

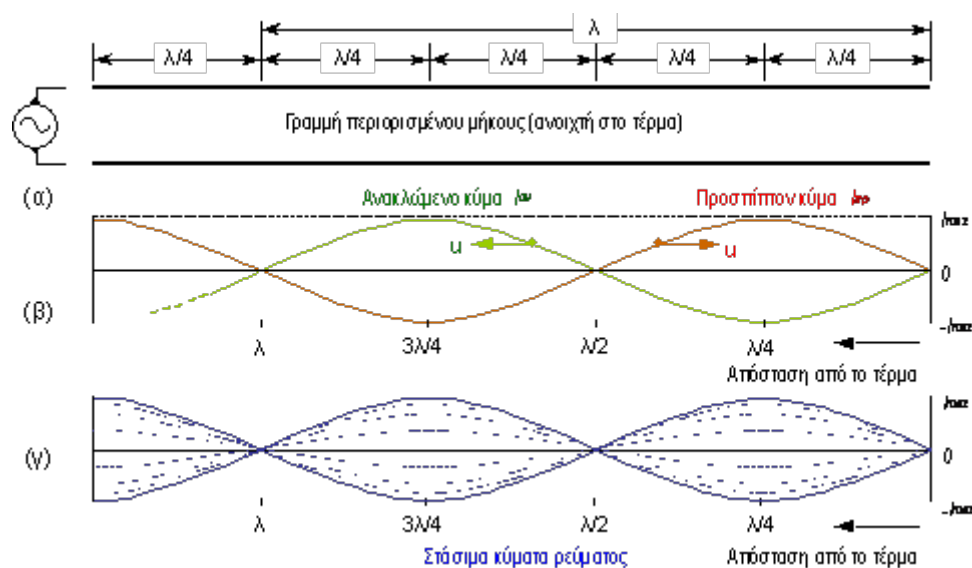
Σαν γραμμές γείωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταλλικά τμήματα, όπως οι μεταλλικοί σωλήνες νερού και του καλοριφέρ

Στάσιμα κύματα

Ας υποθέσουμε τώρα ότι έχουμε μια γραμμή μεταφοράς που δεν έχει άπειρο μήκος και στο τέρμα της δε συνδέεται αντίσταση φορτίου. Όταν μια τέτοια γραμμή συνδεθεί σε μια πηγή που παράγει εναλλασσόμενη τάση με πλάτος V , κατά τη στιγμή της σύνδεσης η πηγή "αισθάνεται" στα άκρα της μια αντίσταση ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση R_c της γραμμής. Αρχίζει λοιπόν να κινεί ένα ρεύμα με πλάτος $I_{\pi\rho}$, που υπολογίζεται από τη σχέση: $I_{\pi\rho} = V/R_c$.

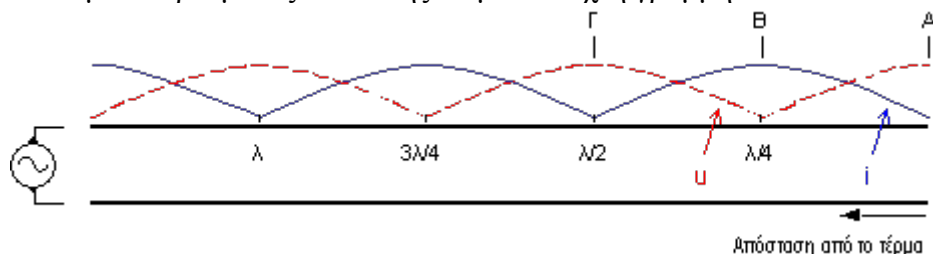
Το ρεύμα αυτό προχωρεί σαν κύμα προς το τέρμα της γραμμής με ταχύτητα διάδοσης u , χωρίς αρχικά να "γνωρίζει" τι φορτίο θα συναντήσει εκεί. Το κύμα αυτό ονομάζεται **προσπίπτον κύμα ρεύματος** και, παρ' όλο που η ταχύτητα u είναι πολύ μεγάλη, το κύμα φτάνει στο φορτίο μετά από κάποιο μικρό χρονικό διάστημα, που ονομάζεται χρόνος καθυστέρησης. Ο χρόνος καθυστέρησης προκαλεί αλλαγή στη φάση του ρεύματος. Τα ίδια συμβαίνουν και στο κύμα τάσης, που διαδίδεται ταυτόχρονα με το ρεύμα. Όταν το προσπίπτον κύμα ρεύματος φτάσει στο τέρμα της γραμμής, συναντά μια άπειρη αντίσταση, αφού εκεί δεν υπάρχει συνδεδεμένο κανένα φορτίο. Μέσα από άπειρη αντίσταση δεν μπορεί να κυκλοφορήσει ρεύμα. Στο τέρμα της γραμμής λοιπόν η τιμή του ρεύματος είναι μηδέν και το προσπίπτον κύμα αναγκάζεται να επιστρέψει πίσω στην πηγή. Το κύμα που επιστρέφει ονομάζεται **ανακλώμενο κύμα** και έχει πλάτος I_{av} ίσο με το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος. Τα δύο κύματα συνδυάζονται, με αποτέλεσμα να έχουμε σε άλλα σημεία αύξηση και σε άλλα σημεία εξασθένηση του συνολικού πλάτους.

Όταν το ανακλώμενο κύμα φτάσει στην πηγή, η κατάσταση αυτή παγιώνεται. Τότε έχουμε ταυτόχρονη μεταβολή του ρεύματος (και της τάσης) με διάφορα πλάτη στα διάφορα σημεία της γραμμής, όπως φαίνεται στο σχήμα 6-2(γ), αλλά καμιά κίνηση κύματος δεν παρατηρείται. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται στάσιμο κύμα. Τα σημεία όπου το πλάτος της κύμανσης είναι μέγιστο ονομάζονται **κοιλίες**, ενώ τα σημεία όπου το πλάτος είναι μηδενικό ονομάζονται **δεσμοί**. Οι κατανομές πλάτους επαναλαμβάνονται κατά διαστήματα ίσα με $\lambda/2$. Αυτό αποτελεί γενική ιδιότητα των γραμμών μεταφοράς.

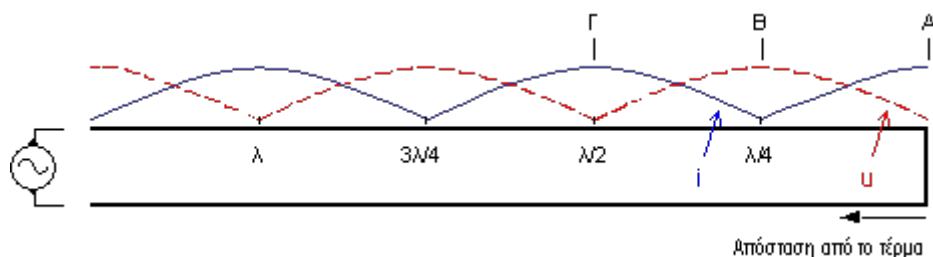


Σχήμα 6-2. Ανάκλαση και στάσιμα κύματα ρεύματος σε ανοιχτή γραμμή

Όπως υπάρχουν στάσιμα κύματα ρεύματος, έτσι υπάρχουν και στάσιμα κύματα τάσης. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι στο ανοιχτό τέρμα της γραμμής εκδηλώνεται πάντοτε κοιλία τάσης. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού είναι γνωστό ότι σε οποιοδήποτε ανοιχτό κύκλωμα η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση στους πόλους της πηγής. Έτσι, υπάρχει διαφορά φάσης ίση με $\lambda/4$ ή 90° μεταξύ των στάσιμων κυμάτων ρεύματος και τάσης σε μια ανοιχτή γραμμή.



Σχήμα 6-3. Πλάτη στάσιμων κυμάτων τάσης και ρεύματος σε ανοιχτή γραμμή
 Στο σχήμα 6-3 φαίνονται τα πλάτη (και όχι οι στιγμιαίες τιμές) των στάσιμων κυμάτων ρεύματος και τάσης κατά μήκος μιας ανοιχτής γραμμής. Συγκρίνετε αυτό το σχήμα με το σχήμα 6-2(γ), για να κατανοήσετε τη διαφορά στην απεικόνιση. Ανάλογα φαινόμενα ισχύουν και όταν η γραμμή δεν είναι ανοιχτή στο τέρμα της, αλλά βραχυκυκλωμένη. Λόγω του βραχυκυκλώματος, στο τέρμα της γραμμής η τάση είναι πάντα μηδέν και το ρεύμα μέγιστο. Με μηδενική τάση όμως η ενέργεια που δίνει η πηγή στη γραμμή δεν μπορεί να καταναλωθεί και έτσι πρέπει να επιστρέψει πίσω. Αναπτύσσονται λοιπόν και πάλι στάσιμα κύματα ρεύματος και τάσης κατά μήκος της γραμμής, που όμως εμφανίζουν κοιλία ρεύματος και δεσμό τάσης στο τέρμα. Η μορφή αυτών των στάσιμων κυμάτων φαίνεται στο σχήμα 6-4. Παρατηρήστε ότι υπάρχει και πάλι η διαφορά φάσης των 90° μεταξύ της τάσης και του ρεύματος.



Σχήμα 6-4.

Πλάτη στάσιμων κυμάτων τάσης και ρεύματος σε βραχυκυκλωμένη γραμμή

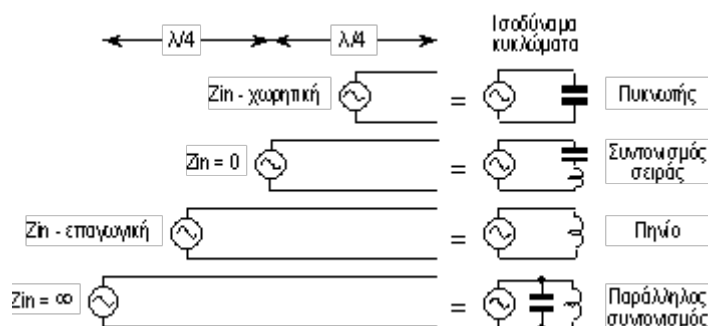
Συντονισμένες γραμμές

Ας παρατηρήσουμε και πάλι το σχήμα 6-3. Στη θέση Β, που απέχει απόσταση $\lambda/4$ από το ανοιχτό τέρμα της γραμμής, το πλάτος της τάσης (διακεκομμένη γραμμή) είναι μηδέν, ενώ το πλάτος του ρεύματος (συνεχής γραμμή) είναι μέγιστο. Η αντίσταση σ' αυτό το σημείο, που ως γνωστόν προκύπτει από τη σχέση $R=U/I$, είναι μηδέν. Αν η πηγή ήταν συνδεδεμένη στη θέση Β, θα αντιμετώπιζε βραχυκύκλωμα στα άκρα της, άσχετα με το γεγονός ότι η γραμμή είναι ανοιχτή. Αυτό βέβαια συμβαίνει σε μια ιδανική γραμμή, που δεν έχει απώλειες. Σε πραγματική γραμμή η αντίσταση στη θέση Β είναι πολύ μικρή, αλλά όχι μηδενική. Αντίθετα στο σημείο Γ, που απέχει απόσταση

$\lambda/2$ από το τέρμα της γραμμής, το πλάτος της τάσης είναι μέγιστο, ενώ το πλάτος του ρεύματος είναι μηδέν. Η αντίσταση σ' αυτό το σημείο προκύπτει ότι είναι άπειρη (ή πάρα πολύ μεγάλη, αν η γραμμή είναι πραγματική).

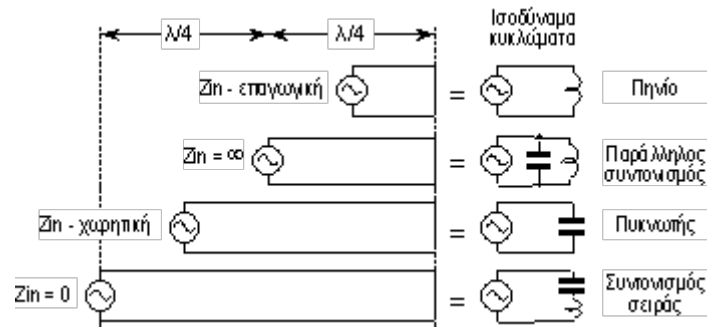
Μεταξύ του σημείου Β και του Α η αντίσταση αυξάνει όσο η απόσταση από το τέρμα μικραίνει. Επειδή στο τμήμα αυτό το ρεύμα προηγείται της τάσης κατά 90° , η γραμμή συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής, με χωρητικότητα που μικραίνει όσο το μήκος της μικραίνει. Μεταξύ του σημείου Β και του Γ η αντίσταση και πάλι αυξάνει όσο η απόσταση από το τέρμα μεγαλώνει. Επειδή όμως στο τμήμα αυτό η τάση προηγείται του ρεύματος κατά 90° , η γραμμή συμπεριφέρεται σαν πηνίο, με αυτεπαγωγή που μεγαλώνει όσο το μήκος της μεγαλώνει.

Όλα αυτά θυμίζουν το φαινόμενο του συντονισμού σε κυκλώματα με πηνίο και πυκνωτή. Σε ανοιχτή γραμμή, όταν το μήκος είναι $\lambda/4$ (ή περιττό, δηλαδή μονό πολλαπλάσιο του $\lambda/4$), η αντίσταση είναι ελάχιστη και η γραμμή συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα LC σειράς σε συντονισμό. Όταν το μήκος είναι $\lambda/2$ (ή πολλαπλάσιο του $\lambda/2$), η αντίσταση είναι μέγιστη και η γραμμή συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα LC παραλληλίας σε συντονισμό. Με μήκος μεταξύ $\lambda/4$ και 0, η ανοιχτή γραμμή συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής, ενώ με μήκος μεταξύ $\lambda/4$ και $\lambda/2$, συμπεριφέρεται σαν πηνίο (σχήμα 6-5). Αυτό μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα κομμάτι τέτοιας γραμμής σε ρόλο ενός πυκνωτή ή ενός πηνίου, του οποίου η χωρητικότητα ή η αυτεπαγωγή ρυθμίζονται, μεταβάλλοντας κατάλληλα το μήκος της γραμμής. Αυτό το κάνουμε συχνά στις πολύ υψηλές συχνότητες όπου οι συνηθισμένοι πυκνωτές και τα πηνία δε λειτουργούν ικανοποιητικά.



Σχήμα 6-5. Ανοιχτές γραμμές και τα ισοδύναμα κυκλώματά τους

Ανάλογα φαινόμενα ισχύουν και για την περίπτωση που η γραμμή είναι βραχυκυκλωμένη στο τέρμα της. Μόνο που τώρα τα πράγματα είναι αντίθετα απ' ό,τι προηγουμένως, επειδή, όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 6-4, στο τέρμα της γραμμής η τάση είναι μηδέν και το ρεύμα μέγιστο. Έτσι, μια βραχυκυκλωμένη γραμμή με μήκος $\lambda/4$ ή περιττό πολλαπλάσιο του $\lambda/4$ παρουσιάζει άπειρη (πάρα πολύ μεγάλη) αντίσταση εισόδου και συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα LC παραλληλίας σε συντονισμό. Όταν το μήκος της είναι $\lambda/2$ ή πολλαπλάσιο του $\lambda/2$ τότε η αντίσταση εισόδου της είναι μηδενική (πολύ μικρή) και η γραμμή συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα LC σειράς σε συντονισμό. Όταν έχει μήκος μικρότερο του $\lambda/4$, η βραχυκυκλωμένη γραμμή συμπεριφέρεται σαν πηνίο με αυτεπαγωγή, που μικραίνει όσο μικραίνει το μήκος της, ενώ, όταν έχει μήκος μεταξύ $\lambda/4$ και $\lambda/2$, συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής, του οποίου η χωρητικότητα μεγαλώνει όσο μεγαλώνει το μήκος (σχήμα 6-6).



Σχήμα 6-6. Βραχυκυκλωμένες γραμμές και τα ισοδύναμα κυκλώματά τους

Όλα τα παραπάνω μπορούν να συμβούν είτε όταν κρατάμε σταθερή τη συχνότητα της πηγής και μεταβάλλουμε το μήκος της γραμμής είτε όταν κρατάμε σταθερό το μήκος της γραμμής και μεταβάλλουμε τη συχνότητα. Πράγματι, όπως είδαμε στην αρχή (σχέση 6.1), το μήκος κύματος λ εξαρτάται από τη συχνότητα f της πηγής.

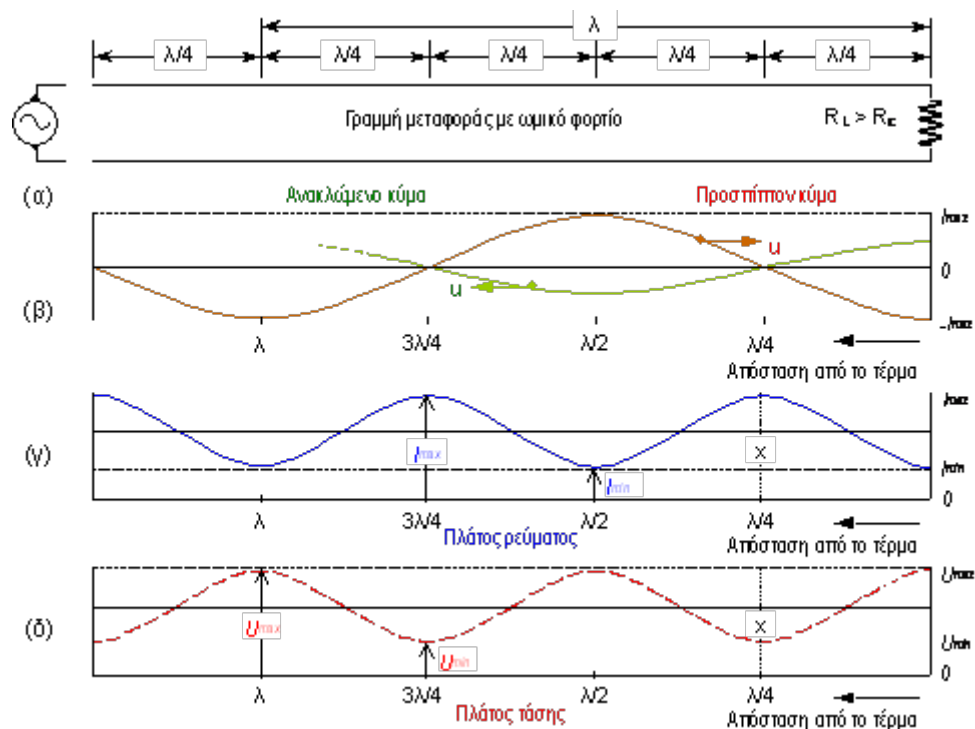
Μεταβάλλοντας τη συχνότητα, ένα δοσμένο μήκος γραμμής μπορεί να αντιστοιχεί σε τμήμα $\lambda/4$ ή $\lambda/2$ ή οποιοδήποτε άλλο κλάσμα ή και πολλαπλάσιο του λ . Με τη μεταβολή της συχνότητας η αντίσταση εισόδου της γραμμής αλλάζει και, όταν η συχνότητα γίνει τέτοια, ώστε το κομμάτι της γραμμής να αντιστοιχεί ακριβώς σε τμήμα $\lambda/4$, έχουμε συντονισμό.

Ανοικτά ή βραχυκυκλωμένα τμήματα γραμμών με μήκος $\lambda/4$ χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σαν συντονισμένα κυκλώματα στις πολύ υψηλές συχνότητες. Η συμπεριφορά τους είναι πολύ καλύτερη από τη συμπεριφορά των συνηθισμένων κυκλωμάτων LC και συχνά αποτελούν το μόνο τρόπο να κατασκευαστεί κύκλωμα συντονισμού, γιατί, όπως είπαμε, στις πολύ υψηλές συχνότητες δεν είναι εύκολη η κατασκευή κατάλληλων πηνίων και πυκνωτών.

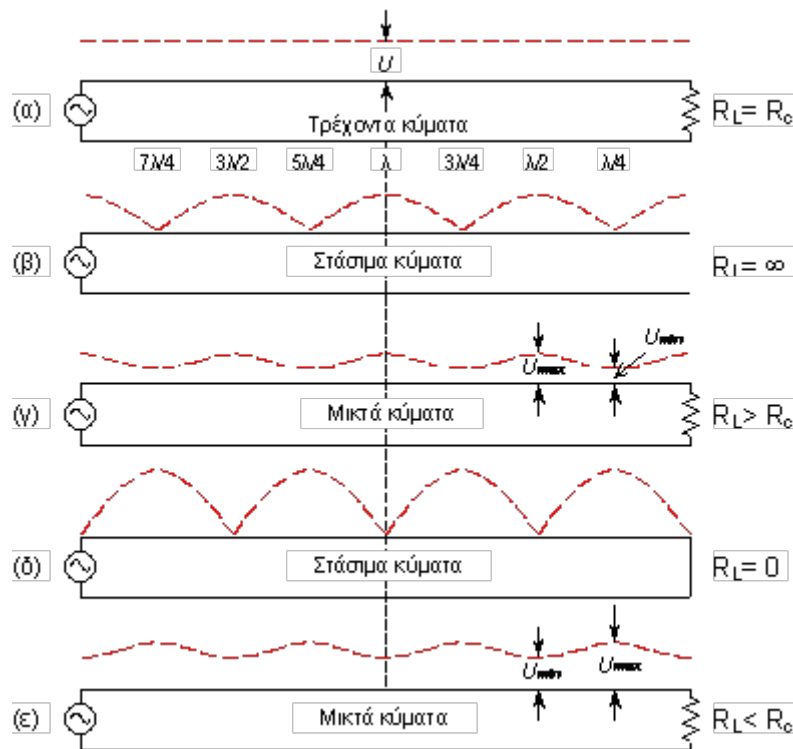
Γραμμές με ωμικό φορτίο

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση μιας γραμμής, στο τέρμα της οποίας είναι συνδεδεμένο ένα ωμικό φορτίο. Όπως είπαμε, όταν το φορτίο έχει τιμή ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, η γραμμή συμπεριφέρεται σαν να είχε άπειρο μήκος και από μέσα της περνούν μόνο τρέχοντα κύματα.

Όταν το ωμικό φορτίο δεν έχει τιμή ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, τότε δεν μπορεί να απορροφήσει όλη την ενέργεια που έρχεται από την πηγή και ένα μέρος της το αντανακλά πίσω. Υπάρχουν λοιπόν προσπίπτοντα και ανακλώμενα κύματα πάνω στη γραμμή, που συνδυάζονται και προκαλούν αλλού ενισχύσεις και αλλού εξασθενήσεις της τάσης και του ρεύματος, όπως είδαμε να γίνεται και στο σχήμα 6-2. Εδώ όμως υπάρχει μια διαφορά. Επειδή μόνο ένα μέρος του κύματος ανακλάται, το ανακλώμενο κύμα έχει μικρότερο πλάτος από το προσπίπτον. Έτσι, όταν τα δύο κύματα συνδυάζονται, στα σημεία εξασθένησης δεν έχουμε μηδενισμό του πλάτους, αλλά απλώς μια ελάχιστη τιμή (σχήμα 6-7). Κατά μήκος της γραμμής υπάρχει ένας συνδυασμός από στάσιμα και τρέχοντα κύματα, που ονομάζονται **μικτά κύματα**.



Σχήμα 6-7. Κατανομή πλατών ρεύματος και τάσης σε γραμμή με ωμικό φορτίο
 Αν η αντίσταση φορτίου R_L είναι μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική αντίσταση R_c της γραμμής, τότε στο τέρμα της γραμμής εμφανίζεται μέγιστο τάσης και ελάχιστο ρεύματος, όπως στο σχήμα 6-7. Αν η αντίσταση φορτίου είναι μικρότερη από τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, τότε στο τέρμα της γραμμής εμφανίζεται μέγιστο ρεύματος και ελάχιστο τάσης. Τέλος, αν η αντίσταση φορτίου είναι ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, τότε δεν υπάρχουν στη γραμμή μέγιστα και ελάχιστα, αλλά σε όλα τα σημεία της τα τρέχοντα κύματα έχουν σταθερό πλάτος. Μια συνοπτική απεικόνιση των κατανομών τάσης για διάφορες τιμές φορτίου φαίνεται στο σχήμα 6-8. Οι κατανομές ρεύματος είναι παρόμοιες, αλλά μετατοπισμένες κατά $\lambda/4$.



Σχήμα 6-8.

Κατανομές τάσης κατά μήκος γραμμής με διάφορες αντιστάσεις φορτίου

Αν η αντίσταση φορτίου, εκτός από καθαρά ωμικό έχει και χωρητικό ή επαγωγικό μέρος, τότε οπωσδήποτε ένα μέρος της ενέργειας του κύματος επιστρέφει στην πηγή και έτσι εμφανίζονται μικτά κύματα στη γραμμή μεταφοράς. Αν πάλι η αντίσταση φορτίου είναι καθαρά επαγωγική ή χωρητική, επειδή αυτές οι αντιστάσεις δεν καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια, όλη η ενέργεια της πηγής επιστρέφει πίσω. Σ' αυτή την περίπτωση έχουμε πάντοτε δημιουργία στάσιμων κυμάτων στη γραμμή. Η εμφάνιση στάσιμων ή μικτών κυμάτων πάνω σε μια γραμμή μεταφοράς είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη κατάσταση, γιατί σημαίνει ότι ένα μέρος ή και όλη η ισχύς της πηγής δεν αποδίδεται στο φορτίο, αλλά επιστρέφει πίσω. Μπορούμε να διορθώσουμε αυτή την κατάσταση λαμβάνοντας μέτρα, που θα εξετάσουμε στην επόμενη παράγραφο. Προηγουμένως όμως θα πρέπει να διαπιστώσουμε την ύπαρξη του προβλήματος και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε κάποιο μέγεθος, που ονομάζεται **λόγος στάσιμων κυμάτων** (standing wave ratio ή SWR). Ο λόγος στάσιμων κυμάτων ορίζεται από τη σχέση:

$$SWR = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}, \quad (6.2)$$

όπου U_{\max} , U_{\min} , I_{\max} και I_{\min} είναι οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές τάσης και ρεύματος, όπως φαίνονται στο σχήμα 6-10.

Για τη μέτρηση του SWR υπάρχουν ειδικά όργανα, που ονομάζονται **γέφυρες στάσιμων κυμάτων**. Οι γέφυρες στάσιμων κυμάτων συνδέονται μεταξύ της πηγής και της γραμμής μεταφοράς και απεικονίζουν το λόγο στάσιμων κυμάτων απ' ευθείας πάνω σε μια κλίμακα μέτρησης. Η ιδανική και μικρότερη τιμή του SWR είναι ίση με 1. Η τιμή αυτή εμφανίζεται σε γραμμές όπου δεν υπάρχει ανακλώμενο κύμα, όπως στο σχήμα 6-11(α), οπότε τα μέγιστα και τα ελάχιστα έχουν το ίδιο πλάτος. Η

μεγαλύτερη τιμή του SWR είναι ίση με άπειρο και εμφανίζεται στις ανοιχτές και τις βραχυκυκλωμένες γραμμές όπου τα ελάχιστα του πλάτους είναι ίσα με το μηδέν (σχήμα 6-8(β) και 6-8(δ)). Όταν $SWR = 1.5$, η ανακλώμενη ισχύς είναι περίπου το 4% της προσπίπτουσας. Για $SWR < 2$, το ποσοστό αυτό είναι λιγότερο από 10%. Για μεγαλύτερες τιμές του SWR, το ποσοστό της ανακλώμενης ισχύος αυξάνεται δραματικά. Στην πράξη τιμές του SWR μεταξύ 1.5 και 1.2 θεωρούνται πολύ καλές έως άριστες.

Προσαρμογή

Προσαρμογή ονομάζεται η εξασφάλιση των συνθηκών που επιτρέπουν τη μεταφορά της μέγιστης δυνατής ισχύος από μια πηγή σ' ένα φορτίο. Στην περίπτωση των γραμμών μεταφοράς η τέλεια προσαρμογή επιτυγχάνεται μόνο, όταν ταυτόχρονα η αντίσταση εξόδου της πηγής είναι ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής και η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής είναι ίση με την αντίσταση φορτίου. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας προσαρμογής είναι τα εξής:

- Το φορτίο τροφοδοτείται με τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει η πηγή.
- Η μεταφορά της μέγιστης δυνατής ισχύος επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από το μήκος της γραμμής και από τη συχνότητα.
- Οι απώλειες ισχύος και ο κίνδυνος καταστροφής του μονωτικού της γραμμής από τοπικές ανυψώσεις της τάσης μειώνονται στο ελάχιστο δυνατό.

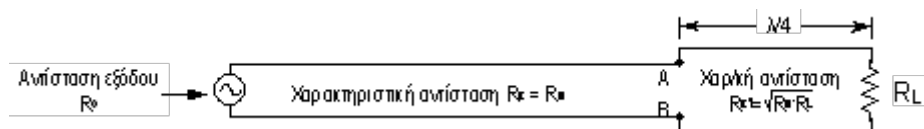
Η τέλεια όμως προσαρμογή δεν είναι πάντοτε δυνατή. Πολλές φορές είμαστε υποχρεωμένοι να χρησιμοποιήσουμε μια πηγή με αντίσταση εξόδου διαφορετική από την αντίσταση φορτίου και τότε οι δύο αυτές αντιστάσεις δεν μπορούν να είναι ταυτόχρονα ίσες με τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Το μόνο που μπορούμε να κάνουμε σ' αυτή την περίπτωση είναι να εφαρμόσουμε μια μέση λύση, που ονομάζεται μερική προσαρμογή.

Στηρίζομαστε σε μια ιδιότητα των γραμμών μεταφοράς, που μπορούμε να τη δούμε στο σχήμα 6-8. Στο τέρμα της γραμμής το ρεύμα είναι μικρό και η τάση μεγάλη. Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση εκεί είναι μεγάλη. Αντίθετα, στο σημείο χ που απέχει $\lambda/4$ από το τέρμα, το ρεύμα είναι μεγάλο και η τάση μικρή, δηλαδή η αντίσταση εκεί είναι μικρή. Αυτό σημαίνει ότι ένα τμήμα γραμμής μεταφοράς με μικτά κύματα κατά μήκος της μπορεί να λειτουργήσει σαν μετασχηματιστής και να μετασχηματίσει μια τιμή αντίστασης σε μια άλλη.

Αν θέλουμε να προσαρμόσουμε μια πηγή με αντίσταση εξόδου R_o σε φορτίο με αντίσταση R_L διαφορετική της R_o , συνδέουμε στα άκρα του φορτίου ένα κομμάτι γραμμής μεταφοράς με μήκος $\lambda/4$ και χαρακτηριστική αντίσταση:

$$R_{c1} = \sqrt{R_o \cdot R_L}$$

Την υπόλοιπη απόσταση μέχρι την πηγή την καλύπτουμε με γραμμή μεταφοράς, που έχει χαρακτηριστική αντίσταση ίδια με την αντίσταση εξόδου της πηγής (σχήμα 6-9).



Σχήμα 6-9. Μερική προσαρμογή με τμήμα γραμμής $\lambda/4$

Το τμήμα $\lambda/4$ μετασχηματίζει την αντίσταση R_L και την εμφανίζει στα σημεία A, B ίση με την R_0 . Έτσι, σε όλο το μήκος της γραμμής από την πηγή μέχρι τα A, B η προσαρμογή είναι τέλεια και δεν υπάρχουν στάσιμα κύματα. Μεταξύ των A, B και του φορτίου δεν υπάρχει προσαρμογή και εμφανίζονται μικτά κύματα. Αυτό όμως δεν μπορούμε να το αποφύγουμε και επιπλέον δεν μας ενοχλεί πολύ, γιατί το κομμάτι αυτό έχει συνήθως μικρό μήκος.

Επίδραση της συχνότητας στη διάδοση

Γενικά

Αναφέρθηκε ήδη ότι ο τρόπος διάδοσης των ραδιοκυμάτων εξαρτάται σημαντικά από τη συχνότητα (f). Αυτό δικαιολογεί περαιτέρω διερεύνηση και λεπτομερέστερο σχολιασμό της συμπεριφοράς τους ανά ζώνη συχνοτήτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Διάδοση των υπερμακρών (VLF) κυμάτων

Για τα υπερμακρά κύματα με συχνότητες από 10 kHz έως 30kHz (δηλαδή με μήκη κύματος από 30 km έως 10 km) το μήκος των χρησιμοποιούμενων κεραιών είναι πολύ μεγάλο. Η χρήση και η αξιοποίηση αυτών των συχνοτήτων στη ραδιοεπικοινωνία περιορίζεται σε ειδικές εφαρμογές ραδιοτηλεγραφίας μικρής ταχύτητας.

Το κύμα εδάφους σ' αυτές τις συχνότητες έχει μικρές απώλειες και διαδιδόμενο φτάνει σε αποστάσεις έως και 1000 km. Οι επιδόσεις του είναι καλύτερες πάνω από τη θάλασσα και παρουσιάζει κάποια διεισδυτικότητα στο νερό. Για τούτο αξιοποιείται σε επικοινωνία με υποβρύχια. Σε αποστάσεις μεγαλύτερες έχουμε κάλυψη μέσω του ιονοσφαιρικού κύματος που ανακλάται στα κατώτερα στρώματα της ιονόσφαιρας και γι' αυτό δεν έχει μεγάλη απόσβεση.

Διάδοση των μακρών (LF) κυμάτων

Έχουν συχνότητες 30 kHz έως 300 kHz και μήκη κύματος από 10 km έως 1 km. Η συμπεριφορά τους στη διάδοση είναι κατώτερη των προηγούμενων. Ο τερματικός εξοπλισμός (πηνία, κεραίες) όμως είναι μικρότερος, βολικότερος και φτηνότερος. Το κύμα εδάφους εξασθενεί συντομότερα όσο αυξάνεται η συχνότητα, παρά το γεγονός ότι παρουσιάζει προσαρμοστικότητα στη μορφολογία του εδάφους. Το ιονοσφαιρικό κύμα έχει απώλειες και παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές μεταξύ ημέρας και νύχτας. Ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της ημέρας οι ραδιοζεύξεις μεγάλων αποστάσεων δεν είναι αξιόπιστες.

Οι χρησιμοποιούμενες συνήθως κεραίες σ' αυτές τις συχνότητες έχουν οριζόντια κατευθυντικότητα. Αυτή η ζώνη συχνοτήτων αξιοποιείται περισσότερο σε στρατιωτικές εφαρμογές για επικοινωνία με πλοία.

Διάδοση των Μεσαίων κυμάτων (MF)

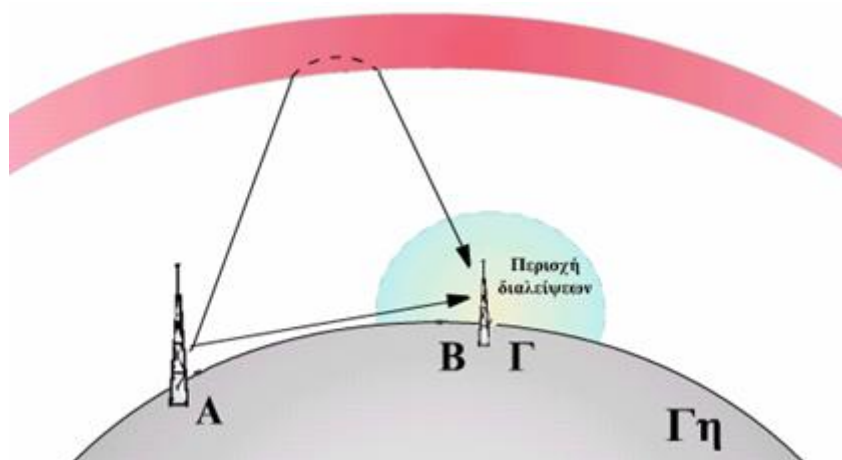
Πρόκειται για τη ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 300 kHz έως 3000 kHz, με αντίστοιχα μήκη κύματος από 1 km έως 100m.

Στη ζώνη αυτή περιλαμβάνεται το τμήμα του φάσματος που χρησιμοποιείται στην κλασική ραδιοφωνία με διαμόρφωση πλάτους (AM) 531 kHz έως 1602kHz (πολλοί αποκαλούν μόνο αυτό το τμήμα της ραδιοφωνίας μεσαία κύματα). Περιλαμβάνεται επίσης η ζώνη 1700 kHz έως 3000kHz, που χρησιμοποιείται για ραδιοεπικοινωνίες με διαμόρφωση πλάτους απλής ζώνης SSB για στρατιωτικές εφαρμογές.

Το κύμα εδάφους σ' αυτές τις συχνότητες φτάνει έως μερικές εκατοντάδες km. Αποσβήνεται περισσότερο όσο η συχνότητά του είναι μεγαλύτερη και η αγωγιμότητα του εδάφους μικραίνει. Η ζώνη που καλύπτεται από το κύμα εδάφους ονομάζεται **πρώτη ζώνη κάλυψης**.

Το κύμα χώρου την ημέρα δεν υπάρχει καθόλου λόγω πλήρους ουσιαστικά εξασθένησής του στα κατώτερα στρώματα της ιονόσφαιρας (ζώνη D). Τη νύχτα, καθώς η επίδραση της ζώνης D ελαττώνεται, εμφανίζεται το κύμα χώρου που διευρύνει την κάλυψη σχηματίζοντας τη **δεύτερη ζώνη κάλυψης** σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Γι' αυτό τον λόγο, την νύχτα ο δέκτης του ραδιοφώνου μας στη ζώνη των μεσαίων AM λαμβάνει ένα μεγάλο πλήθος εκπομπών που δεν λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Αξίζει να επισημανθεί ένα ακόμη ιδιαίτερο φαινόμενο που εμφανίζεται στις συχνότητες αυτές. Η οριακή απόσταση του κύματος χώρου (υπενθυμίζεται ότι πρόκειται για την απόσταση από την οποία αρχίζει η κάλυψη από το ιονοσφαιρικό κύμα) είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την απόσταση κάλυψης του κύματος εδάφους (σχήμα 4.3.1). Ιδιαίτερα τις απογευματινές και πρώτες βραδινές ώρες, πριν το ιονοσφαιρικό κύμα γίνει πολύ ισχυρό, οι δύο ζώνες κάλυψης εφάπτονται και η συμβολή των κυμάτων, που ακολούθησαν διαφορετικούς δρόμους, δημιουργεί έντονες διακυμάνσεις του πεδίου, με αποτέλεσμα να έχουμε διαλείψεις (fading) ή παραμορφώσεις του σήματος στα όρια.



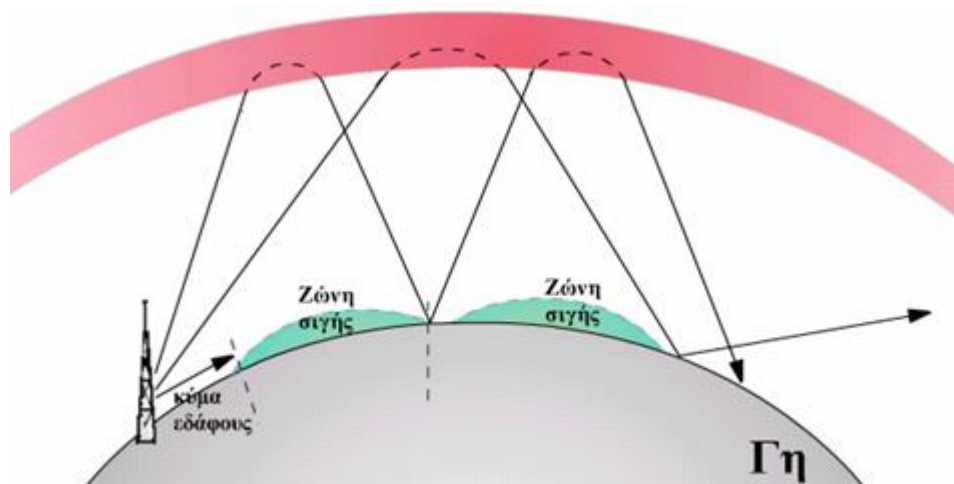
Σχήμα 4.3.1: Συμβολή κυμάτων, φαινόμενο διάλειψης

Έντονα προβλήματα διαλείψεων στις μεσαίες συχνότητες εμφανίζονται και στις μεγάλες αποστάσεις όπου επικρατεί πλήρως το ιονοσφαιρικό κύμα. Οι διαλείψεις αυτές οφείλονται στη συμβολή κυματικών ακτίνων, που ακολούθησαν διαφορετικές πορείες.

Διάδοση των Βραχέων κυμάτων (HF)

Πρόκειται για τα κύματα με συχνότητες, οι οποίες καλύπτουν τη ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 3 MHz έως 30 MHz . Τα αντίστοιχα μήκη κύματος είναι από 100 m έως 10 m . Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως βραχέα κύματα ή δεκαμετρικά κύματα, λόγω ακριβώς της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος.

Τα βραχέα κύματα απορροφούνται έντονα από το έδαφος. Γι' αυτό το κύμα εδάφους αποσβήνεται γρήγορα και δεν έχει μεγάλη κάλυψη. Φτάνει με τις καλύτερες συνθήκες μόνο σε μερικές δεκάδες χιλιόμετρα, ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί μεγάλη ισχύς εκπομπής. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει στην περίπτωση των βραχέων το κύμα χώρου, που επιτρέπει καλύψεις σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, χιλιάδων χιλιομέτρων. Αυτός είναι ο λόγος που τα βραχέα επικράτησαν για ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων.



Σχήμα 4.3.2: Πολλαπλές ανακλάσεις βραχέων κυμάτων

Στο σχήμα 4.3.2 φαίνεται η ιονοσφαιρική διάδοση των κυμάτων αυτών, τα οποία υπόκεινται άνετα σε διαδοχικές ανακλάσεις στο έδαφος και την ιονόσφαιρα αυξάνοντας την ακτίνα κάλυψης. Η ιονοσφαιρική διάδοση σ' αυτή την ζώνη συχνοτήτων μελετήθηκε λεπτομερώς από τους επιστήμονες. Όλες οι παρατηρήσεις που έγιναν στην παράγραφο 4.2.3 προέρχονται από πειράματα που έγιναν στην περιοχή των βραχέων κυμάτων και οδήγησαν στους ορισμούς της μέγιστης και ελάχιστης χρησιμοποιήσιμης συχνότητας (MUF και LUF) για να έχουμε επιτυχή ραδιοζεύξη.

Οι παρατηρήσεις που έγιναν σε σχέση με τα σχήματα 4.2.5 και 4.2.6 ότι δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο μεγαλύτερη πυκνότητα της ιονόσφαιρας απαιτείται για να έχουμε ραδιοκάλυψη από ιονοσφαιρικό κύμα, δικαιολογεί κατά τη διάρκεια της ημέρας τη χρήση ραδιοκυμάτων με

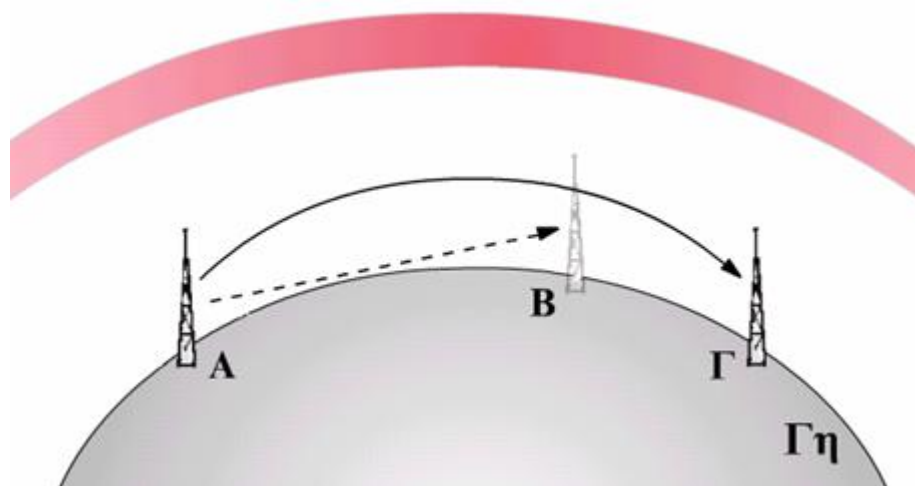
μικρότερο μήκος κύματος από ό,τι τη νύχτα. Αυτή η διαπίστωση οδήγησε τους ραδιοηλεκτρολόγους να ονομάζουν **τα μήκη κύματος από 100m έως 50m κύματα νύχτας** και **τα μήκη κύματος από 50m έως 10m κύματα ημέρας**. Ένα απλό πείραμα, που μπορεί να κάνει ο καθένας εύκολα σαρώνοντας με τη βελόνα του ραδιοφώνου του τη ζώνη των βραχέων κυμάτων την ημέρα ή τις βραδινές ώρες, αποδεικνύει την αλήθεια όλων των παραπάνω παρατηρήσεων.

Οι πολλαπλές ανακλάσεις των βραχέων κυμάτων δημιουργούν, όπως διαπιστώνεται και στο σχήμα 4.3.2, πολλαπλές ζώνες σιγής.

Τα βραχέα κύματα χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται ευρύτατα για ραδιοεπικοινωνία σε μακρινές αποστάσεις. Αξιοποιήθηκαν και αξιοποιούνται και σε εμπορικές και σε στρατιωτικές εφαρμογές. Κάποιες ζώνες παραχωρήθηκαν στο πλατύ κοινό για ραδιοτηλεφωνία (Citizen Band, που καθιερώθηκε με το όνομα CB - γύρω στους 27 MHz). Χρησιμοποιούνται είτε με διαμόρφωση πλάτους AM, είτε απλής ζώνης SSBsc, είτε με διαμόρφωση FM ή ΦΜ. Σήμερα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τις ραδιοεπικοινωνίες στα βραχέα κύματα τις συναγωνίζονται οι ραδιοεπικοινωνίες σε μεγαλύτερες συχνότητες.

Διάδοση υπερβραχέων κυμάτων

Αναφέρονται στη φασματική ζώνη 30 MHz έως 300MHz με αντίστοιχα μήκη κύματος λ από 10m έως 1m, από όπου αντλούν και την ονομασία τους μετρικά κύματα. Οι πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ότι οι συχνότητες πάνω από τα 30 MHz σπάνια και σε ιδιαίτερες περιπτώσεις ανακλώνται από την ιονόσφαιρα. Η ραδιοκάλυψη εξασφαλίζεται μόνο από το κύμα εδάφους και περιορίζεται ουσιαστικά σε αποστάσεις που υπάρχει οπτική επαφή των κεραιών ή λίγο μεγαλύτερη. Διευκολύνεται από τις διαθλάσεις στις οποίες υπόκεινται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αυτών των συχνοτήτων στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, την τροπόσφαιρα. Οι διαθλάσεις αυτές δημιουργούν ελαφρά κύρτωση στην ακτίνα διάδοσης του κύματος και επιτρέπουν στο κύμα να φτάσει σε απόσταση μεγαλύτερη από αυτή του οπτικού ορίζοντα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.3.



Σχήμα 4.3.3: Ορισμός του ραδιοηλεκτρικού ορίζοντα

Η μέγιστη απόσταση κάλυψης, που ονομάζεται **ραδιοηλεκτρικός ορίζοντας του κύματος**, εμπειρικά, αλλά με ικανοποιητική ακρίβεια, υπολογίζεται σε μέτρα από τη σχέση:

$$D = 4120 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) , \quad (5)$$

όπου h_1 και h_2 τα ύψη των κεραιών σε μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας.

Οι μεταβολές στην τροπόσφαιρα από τις κλιματολογικές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα τη διάδοση των υπερβραχέων κυμάτων.

Η ζώνη αυτή χρησιμοποιείται σήμερα πάρα πολύ και σ' αυτή έχουμε τη ραδιοφωνία FM (88 MHz έως 108 MHz), εκπομπές τηλεόρασης και πολλές εφαρμογές ραδιοτηλεφωνίας. Κάποιες άλλες ιδιαίτερες ζώνες δίνονται στους ραδιοερασιτέχνες για πειραματισμούς και ιδιωτική επικοινωνία (παράδειγμα 142 – 144 MHz).

Πηγή υλικού: <http://www.sz7xan.gr/radiotheory.htm>