

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Διάδοση

Πέτρος Μπίθας

Αν. Καθηγητής Παν. Αθηνών

pbithas@dind.uoa.gr

Δημοσθένης Βουγιούκας

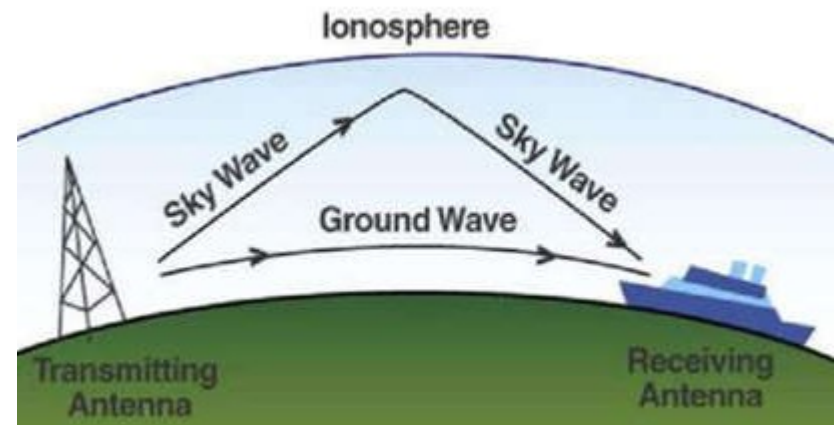
Αν. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

dvougiou@unipi.gr

Ασύρματο κανάλι

2

- Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπέμπεται στο μέσο με κεραία
- Για αποδοτική ακτινοβολία απαιτείται κεραία μακρύτερη από το $1/10$ του μήκους κύματος
- Τύποι διάδοσης (propagation)
 1. Διάδοση κύματος εδάφους (ground wave propagation)
 - στις VLF η γη δρα ως κυματοδηγός
 - τα σήματα διαδίδονται γύρω από την γη
 - το διαθέσιμο εύρος φάσματος μικρό
 - εκπομπή με χρήση AM ή FM μέχρι 100 μίλια
 2. Διάδοση κύματος χώρου (sky wave) με ανάκλαση από την ιονόσφαιρα
 - Απορρόφηση συχνοτήτων κάτω των 2 MHz
 - Τη νύχτα τα σήματα AM μπορούν να ταξιδέψουν μεγάλες αποστάσεις διότι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων πέφτει
 - Πάνω από τα 30 MHz διαπερνά την ιονόσφαιρα

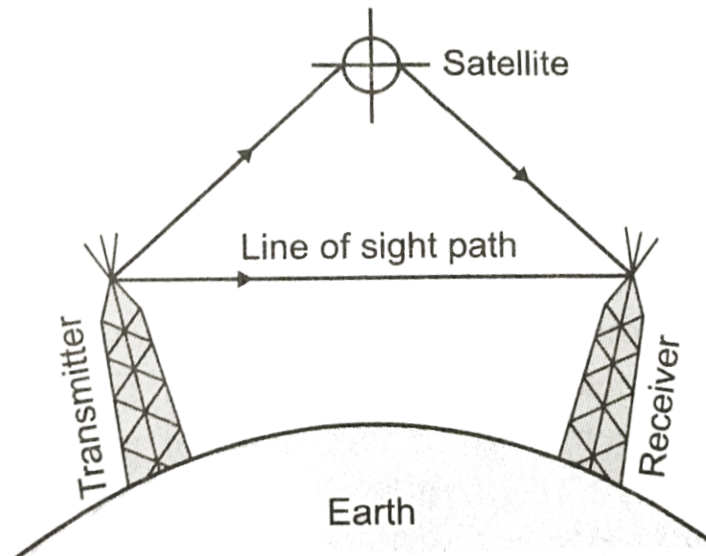


Ασύρματο κανάλι

3

3. Οπτικής Επαφής (*LOS: Line Of Sight*)

- Άνω των 30 MHz – Δορυφορικές επικοινωνίες / TV κλπ
- Περιορισμοί από την καμπυλότητα της γης
- Στα 2.4 GHz συντονίζεται το μόριο του νερού
- Πάνω από τα 10GHz οι ατμοσφαιρικές συνθήκες ασκούν επιρροές



Ασύρματη Διάδοση

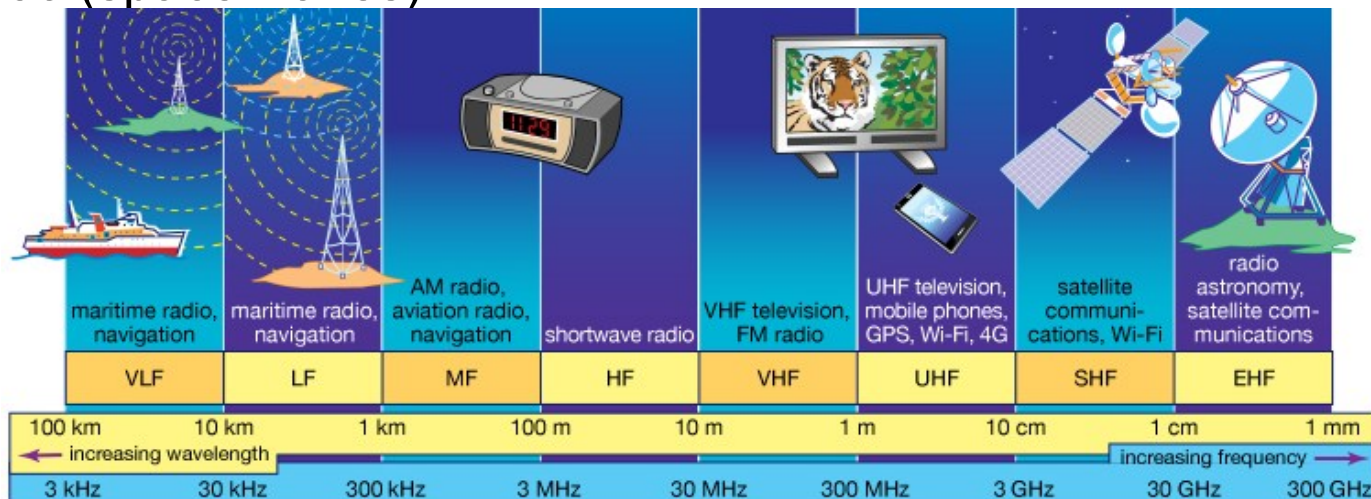
4

- Βασικά Προβλήματα Ασύρματης Διάδοσης
 - ▣ Θόρυβος
 - ▣ Παρεμβολές (ομοδιαυλικές και γειτονικών διαύλων)
 - ▣ Παρεμπόδιση και εξασθένηση από ανθρώπινες και φυσικές κατασκευές
 - ▣ Πολυδιαδρομική Διάδοση (multipaths)
- Τα παραπάνω θέτουν όρια
 - ▣ Στην έκταση της κάλυψης
 - ▣ Στον ρυθμό μετάδοσης
 - ▣ Στην αξιοπιστία και ποιότητα επικοινωνίας

Ασύρματη Διάδοση

5

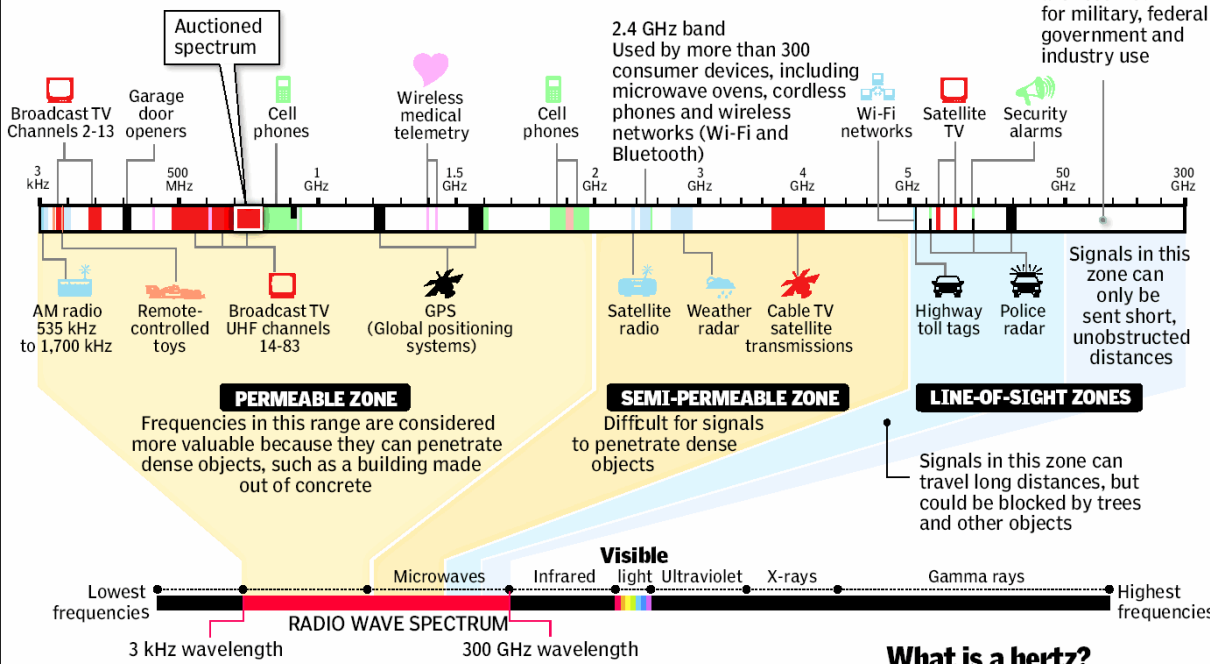
- Η ατμόσφαιρα είναι το μέσο μετάδοσης
- Διάδοση Η/Μ κυμάτων και μεταφορά σήματος πληροφορίας
- Στα ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως οι ζώνες VHF (30MHz-300MHz), UHF(300MHz-3GHz) και SHF (3GHz-30GHz)
- Υπάρχουν διάφοροι τύποι ραδιοκυμάτων ανάλογα με τους μηχανισμούς που συμμετέχουν στη ραδιοδιάδοση
- Στα ασύρματα συστήματα κυρίως χρησιμοποιούνται τα κύματα χώρου (space waves)



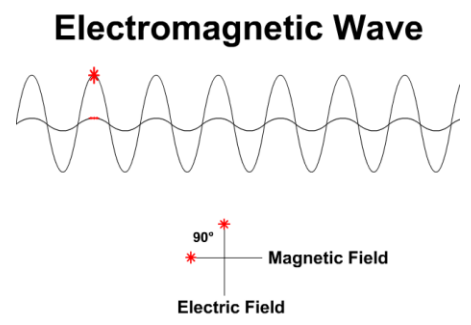
Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Διαμοιρασμός Φάσματος

Almost every wireless technology – from cell phones to garage door openers – uses radio waves to communicate. Some services, such as TV and radio broadcasts, have exclusive use of their frequency within a geographic area. But many devices share frequencies, which can cause interference. Examples of radio waves used by everyday devices are reserved for military, federal government and industry use.



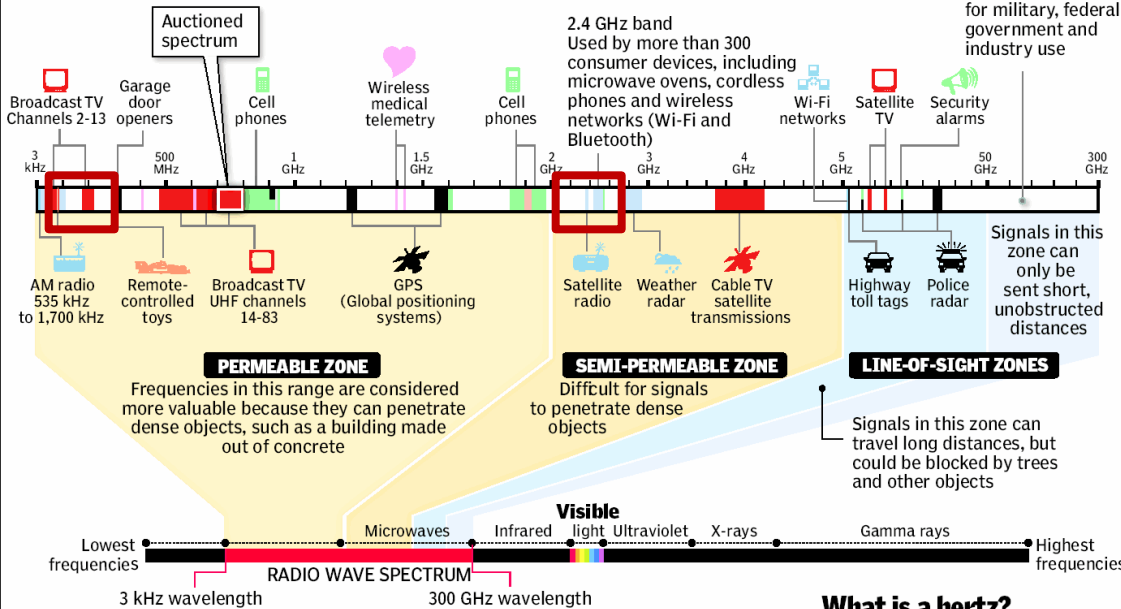
Ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι η ταυτόχρονη διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός.



Μήκος Κύματος λ (m): Η απόσταση που μεταδίδεται το σήμα σε χρόνο T

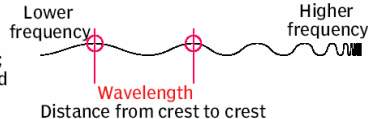
Διαμοίρασμός Φάσματος

Almost every wireless technology – from cell phones to garage door openers – uses radio waves to communicate. Some services, such as TV and radio broadcasts, have exclusive use of their frequency within a geographic area. But many devices share frequencies, which can cause interference. Examples of radio waves used by everyday devices are reserved for military, federal government and industry use



The electromagnetic spectrum

Radio waves occupy part of the electromagnetic spectrum, a range of electric and magnetic waves of different lengths that travel at the speed of light; other parts of the spectrum include visible light and x-rays; the shortest wavelengths have the highest frequency, measured in hertz



What is a hertz?

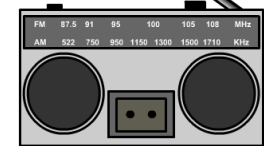
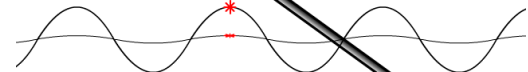
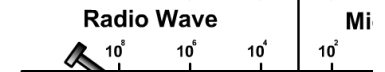
One hertz is one cycle per second. For radio waves, a cycle is the distance from wave crest to crest

- 1 kilohertz (kHz) = 1,000 hertz
- 1 megahertz (MHz) = 1 million hertz
- 1 gigahertz (GHz) = 1 billion hertz

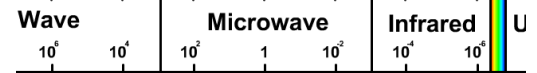
3-300m

500 10³ -100 10⁶Hz

Wavelength (nm)

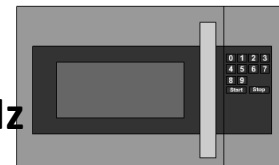


(nm)



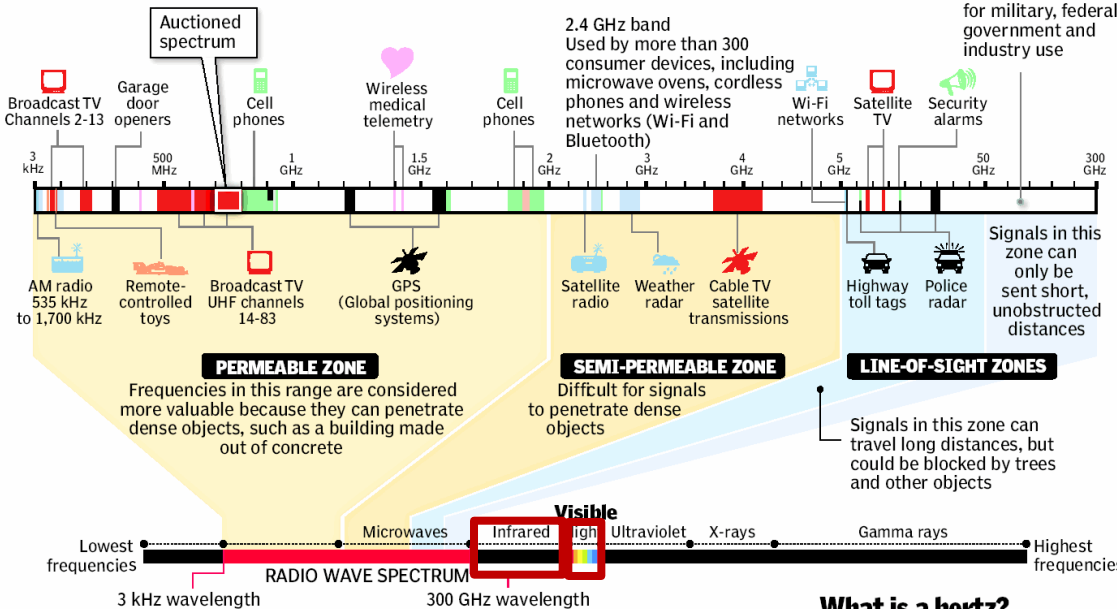
1nm

2.4 10⁹Hz



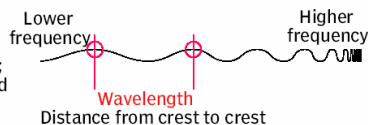
Διαμοίρασμός Φάσματος

Almost every wireless technology – from cell phones to garage door openers – uses radio waves to communicate. Some services, such as TV and radio broadcasts, have exclusive use of their frequency within a geographic area. But many devices share frequencies, which can cause interference. Examples of radio waves used by everyday devices are reserved for military, federal government and industry use.



The electromagnetic spectrum

Radio waves occupy part of the electromagnetic spectrum, a range of electric and magnetic waves of different lengths that travel at the speed of light; other parts of the spectrum include visible light and x-rays; the shortest wavelengths have the highest frequency, measured in hertz



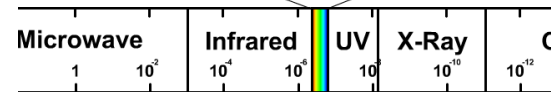
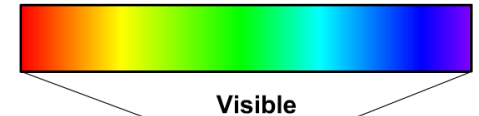
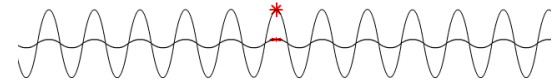
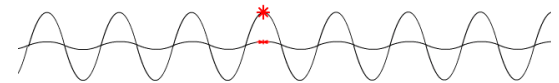
What is a hertz?

One hertz is one cycle per second. For radio waves, a cycle is the distance from wave crest to crest

1 kilohertz (kHz) = 1,000 hertz
1 megahertz (MHz) = 1 million hertz
1 gigahertz (GHz) = 1 billion hertz

10^{-4} nm

300 10^9 - 430 10^{12} Hz

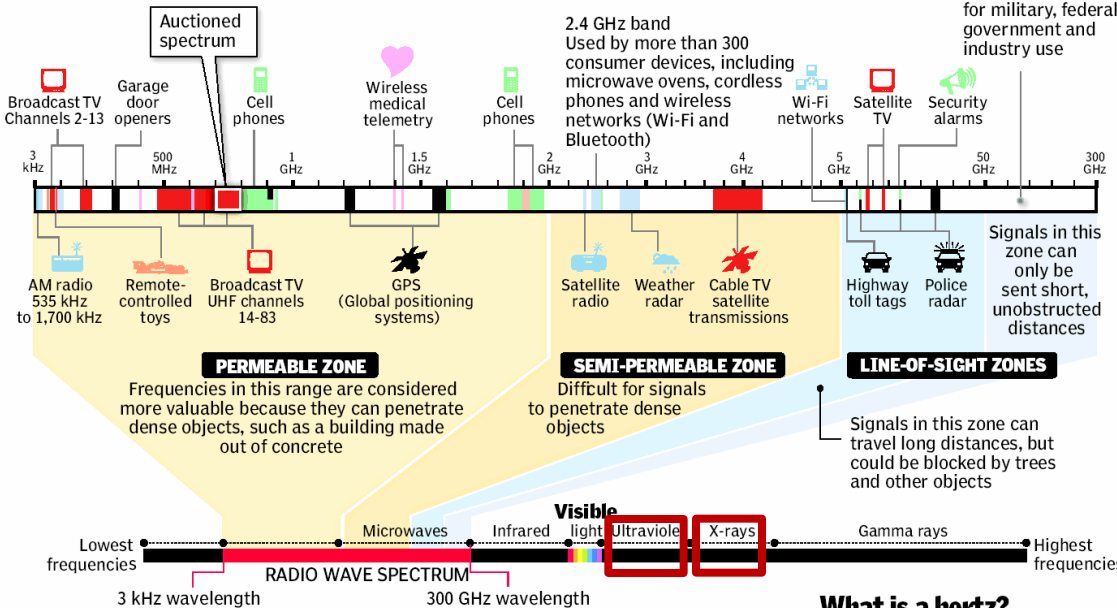


10^{-6} nm

400 10^{12} - 790 10^{12} Hz

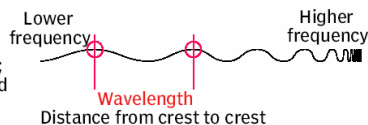
Διαμοιρασμός Φάσματος

Almost every wireless technology – from cell phones to garage door openers – uses radio waves to communicate. Some services, such as TV and radio broadcasts, have exclusive use of their frequency within a geographic area. But many devices share frequencies, which can cause interference. Examples of radio waves used by everyday devices are reserved for military, federal government and industry use



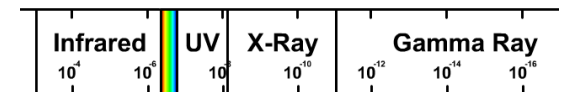
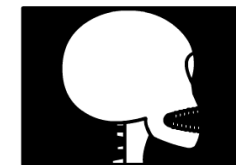
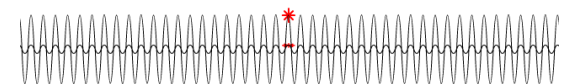
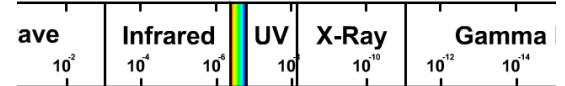
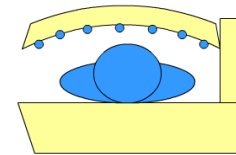
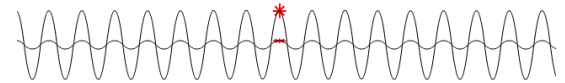
The electromagnetic spectrum

Radio waves occupy part of the electromagnetic spectrum, a range of electric and magnetic waves of different lengths that travel at the speed of light; other parts of the spectrum include visible light and x-rays; the shortest wavelengths have the highest frequency, measured in hertz



10^{-8} nm

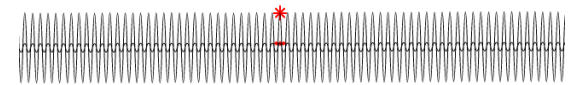
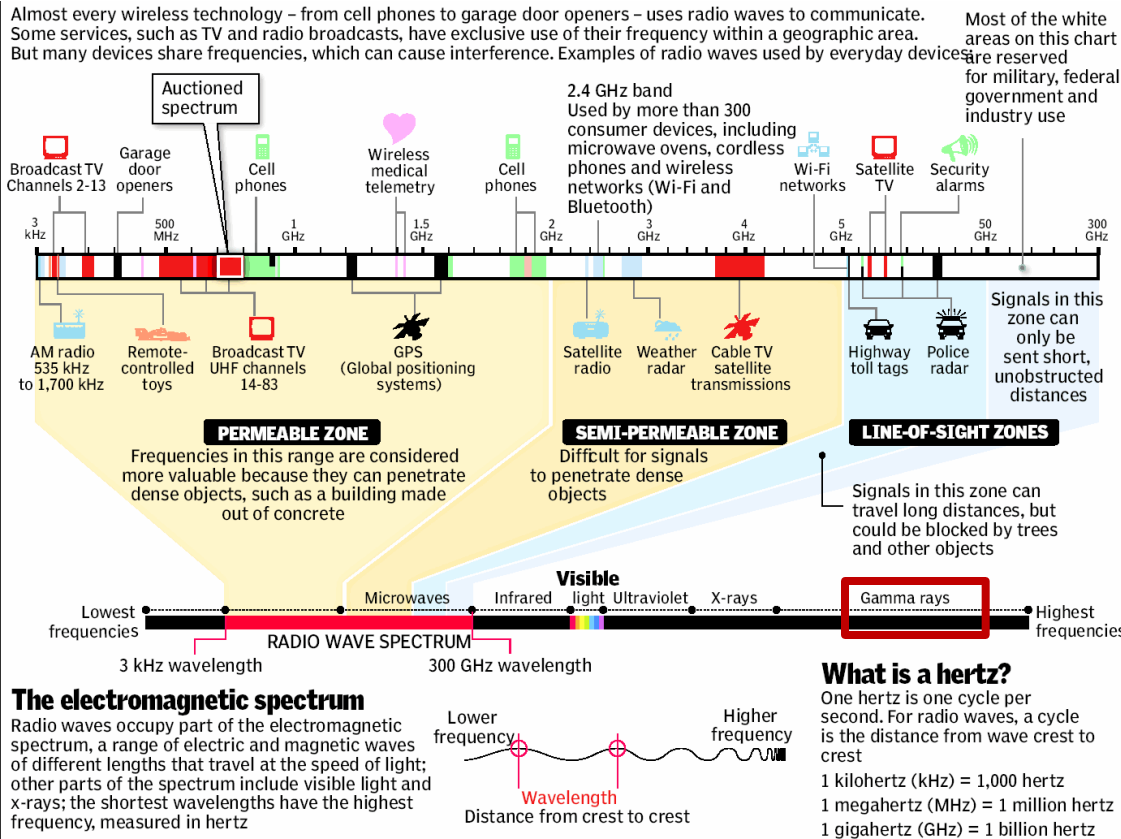
$750 \cdot 10^{12} - 30 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$



10^{-10} nm

$30 \cdot 10^{15} - 30 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$

Διαμοίρασμός Φάσματος



JV	X-Ray	Gamma Ray	
10^8	10^{10}	10^{12}	10^{16}

10^{-14} nm
 $300 \cdot 10^{18}$ Hz

Ασύρματη Διάδοση

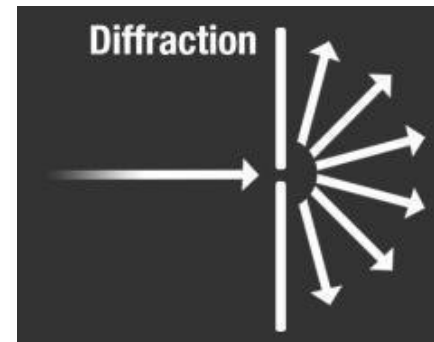
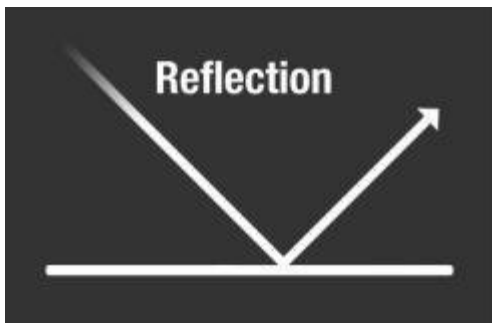
11

- Γιατί VHF και UHF???
- ▣ Αμελητέα ιονοσφαιρική διάδοση λόγω υψηλής συχνότητας
- ▣ Μικρό μέγεθος κεραιών και τοποθέτησή τους αρκετά μήκη κύματος πάνω από το έδαφος σε ιστούς
- ▣ Δεν απαιτείται κατ' ανάγκη οπτική επαφή
- ▣ Μικρό κόστος εξοπλισμού
- ▣ Επιθυμητές οι απώλειες διάδοσης για λειτουργία κυψελωτών συστημάτων

Μηχανισμοί Διάδοσης

12

- **Απευθείας συνιστώσα**
- **Ανάκλαση (Reflection)**
 - Η/Μ κύματα προσκρούουν σε λείες επιφάνειες με πολύ μεγάλες διαστάσεις ως προς το μήκος κύματος του RF σήματος
- **Περίθλαση (Diffraction)**
 - Καμπύλωση ραδιοκυμάτων γύρω από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, λόγω εμφάνισης δευτερευόντων κυμάτων σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Πολλές φορές καλείται και σκίαση

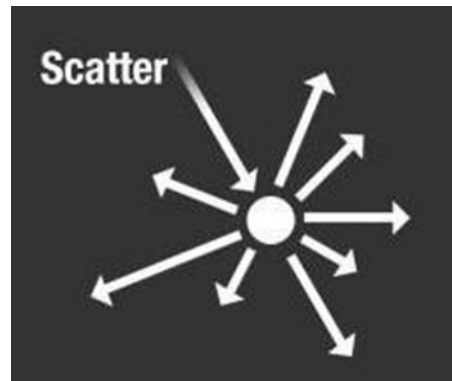


Μηχανισμοί Διάδοσης

13

□ Σκέδαση (Scattering)

- ▣ Πρόσκρουση Η/Μ κυμάτων σε μεγάλη τραχιά επιφάνεια ή σε επιφάνεια με διαστάσεις συγκρίσιμες του μήκους κύματος και διασκορπισμός της ενέργειας σε όλες τις κατευθύνσεις



Μηχανισμοί Διάδοσης

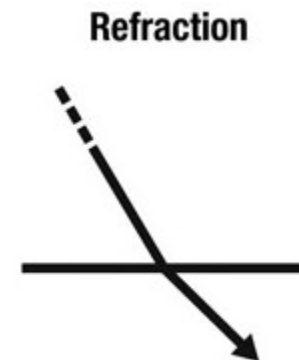
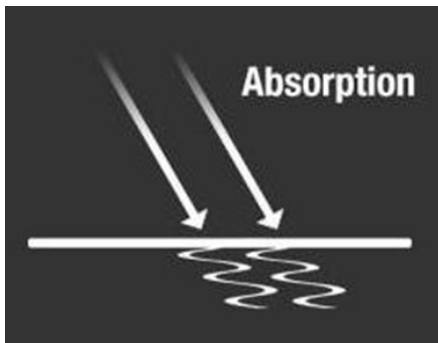
14

□ Απορρόφηση (Absorption)

- Μείωση του πλάτους (έντασης πεδίου) ενός ραδιοκύματος λόγω αμετάκλητης μεταφοράς μέρους της ενέργειας του κύματος στο μέσο διάδοσης

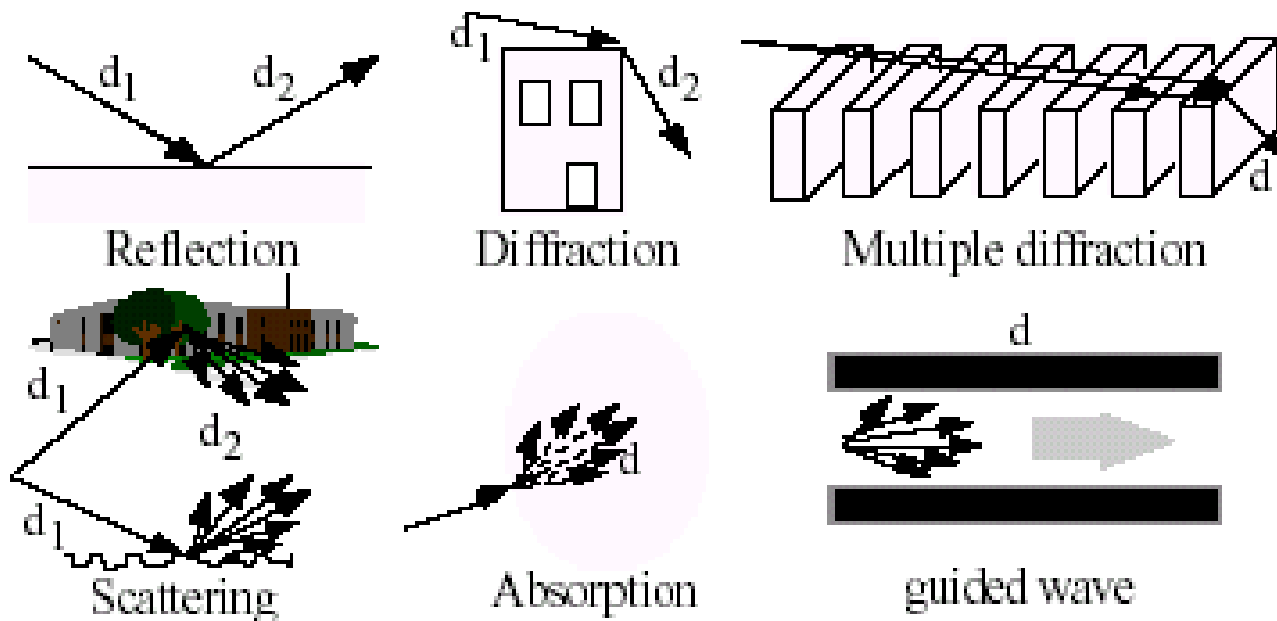
□ Διάθλαση (Refraction)

- Αλλαγή στην κατεύθυνση διάδοσης ενός ραδιοκύματος, λόγω της χωρικής μεταβολής του δείκτη διάθλασης του μέσου διάδοσης



Μηχανισμοί Διάδοσης

15



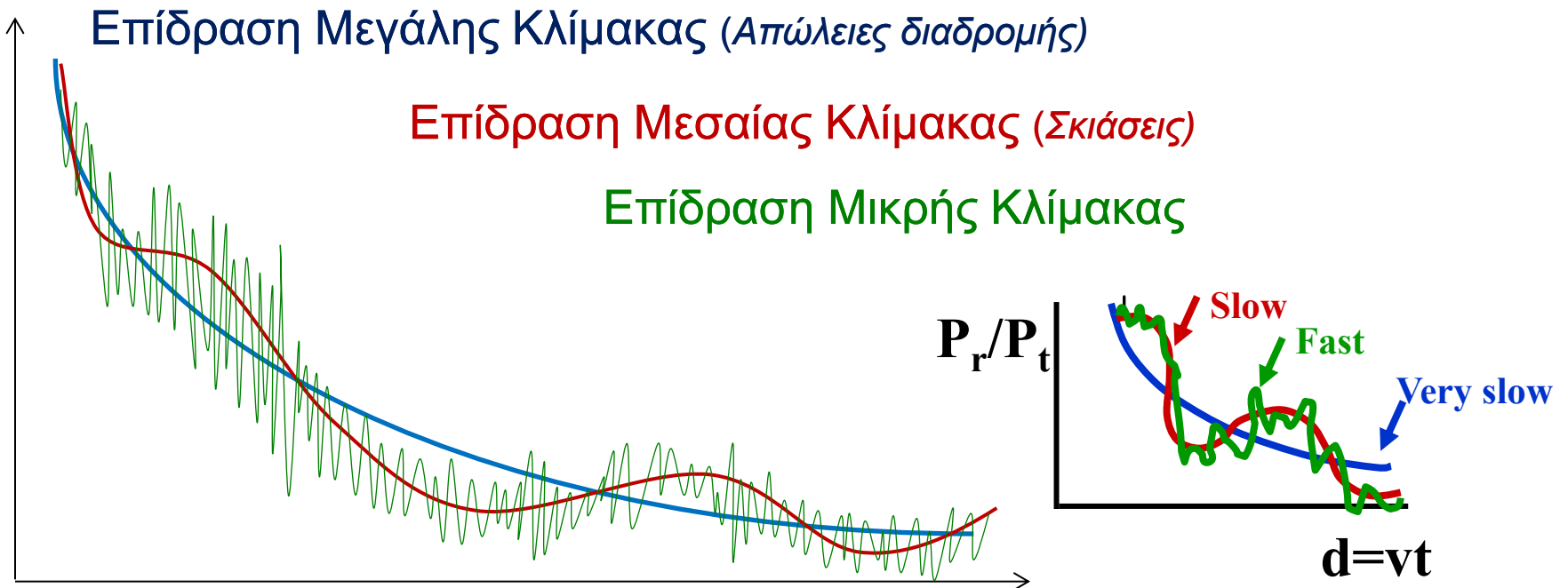
Φαινόμενα Διάδοσης για το Ραδιοδίαυλο

16

- **Εξασθένιση πλάτους του σήματος (path loss)**
 - ▣ Χαρακτηρίζει την εξάρτηση της μείωσης της μέσης λαμβανόμενης ισχύος από την απόσταση πομπού-δέκτη.
- **Σκίαση (shadowing)**
 - ▣ Χαρακτηρίζει τη στατιστική κατανομή της μέσης τιμής της λαμβανόμενης ισχύος, δηλαδή τη συμπεριφορά συναρτήσεως του περιβάλλοντος.
- **Πολυδιαδρομική διάδοση (multipath)**
 - ▣ Χαρακτηρίζει τις διαλείψεις του πλάτους του σήματος λόγω αθροιστικής και αφαιρετικής συμβολής
- **Παρεμβολές (interference)**
 - ▣ Ομοδιαυλικές και γειτονικών διαύλων
- **Διασπορά Συχνότητας (Frequency Dispersion)**
 - ▣ Αλλαγή στη συχνότητα και τη φάση των συνιστωσών που απαρτίζουν ένα σήμα ευρείας ζώνης λόγω διασκορπιστικού μέσου (εξάρτηση των συντακτικών παραμέτρων από τη συχνότητα)

Είδη Διαλείψεων

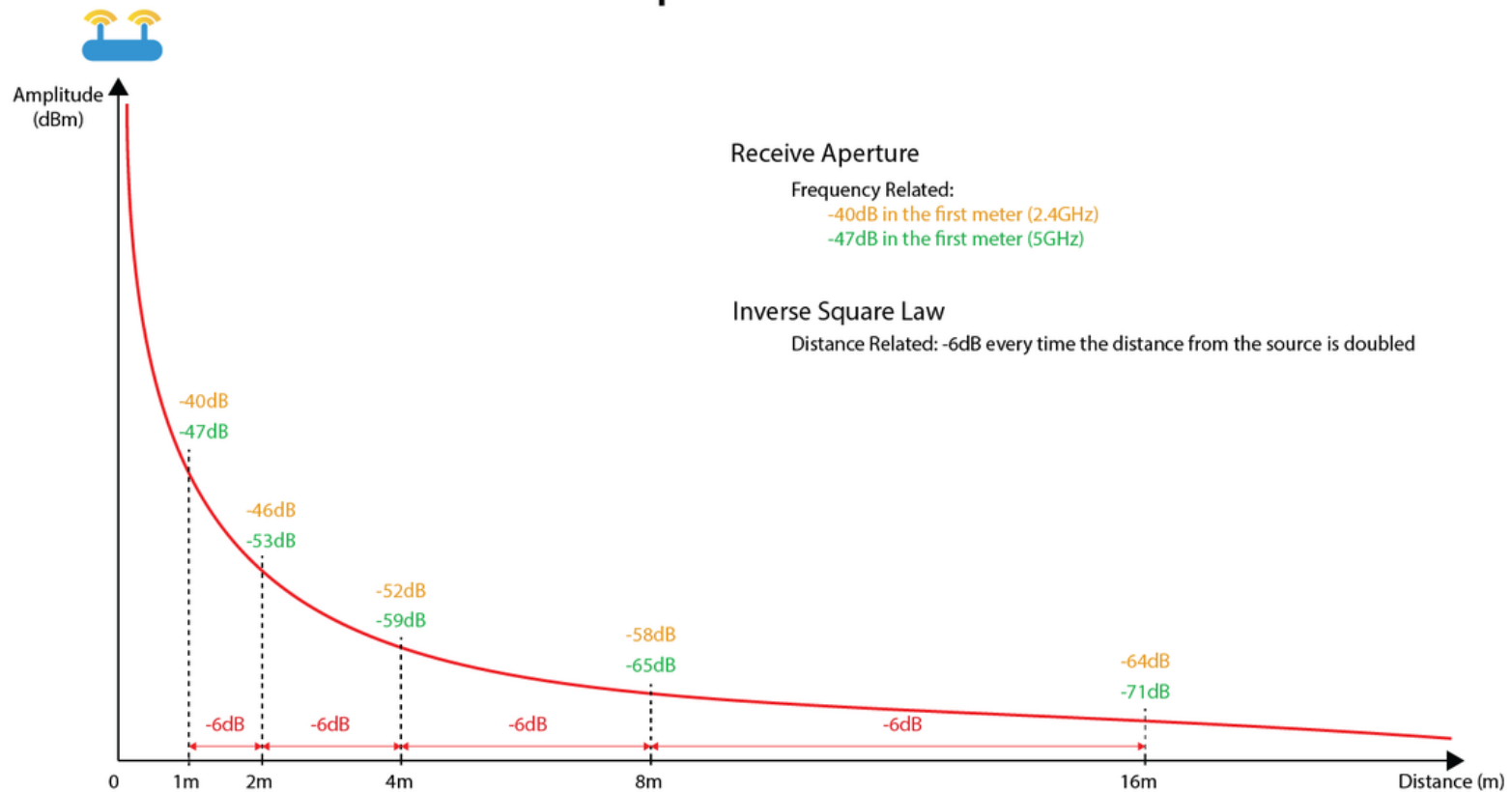
17



Είδη Διαλείψεων

18

Free Space Path Loss



Είδη Διαλείψεων

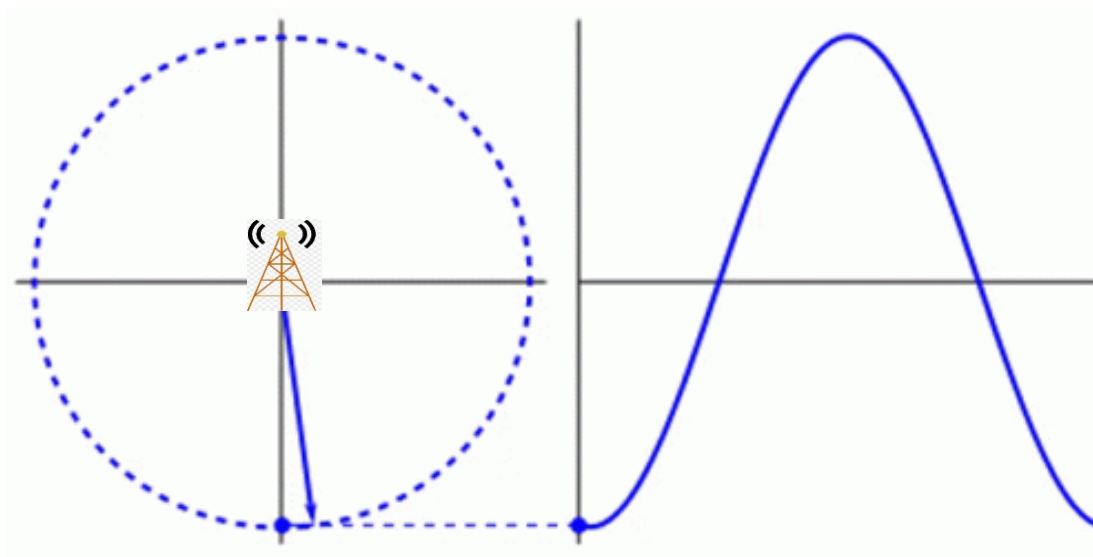
19

- **Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας (Large Scale/Long Term Fading):** Εμπεριέχουν τις απώλειες διάδοσης και τη σκίαση.
 - ▣ Εκφράζουν τη μέση εξασθένηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος λόγω μεγάλων μετατοπίσεων (πολλές εκατοντάδες ή και χιλιάδες μήκη κύματος)
 - ▣ Αφορά όλα εκείνα τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά μέσο όρο σε έναν δακτύλιο γύρω από ένα σταθμό βάσης (base station)
 - ▣ Με βάση αυτή την εξασθένηση καθορίζονται το μέγεθος της περιοχής κάλυψης και άρα το μέγεθος των κυψελών (cells), καθώς και το SNR του λαμβανόμενου σήματος στην περιοχή αυτή
 - ▣ Για τη μελέτη της εξασθένησης μεγάλης κλίμακας έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα (π.χ. ελευθέρου χώρου, αντίστροφης n-οστής δύναμης, κλπ.)

Είδη Διαλείψεων

20

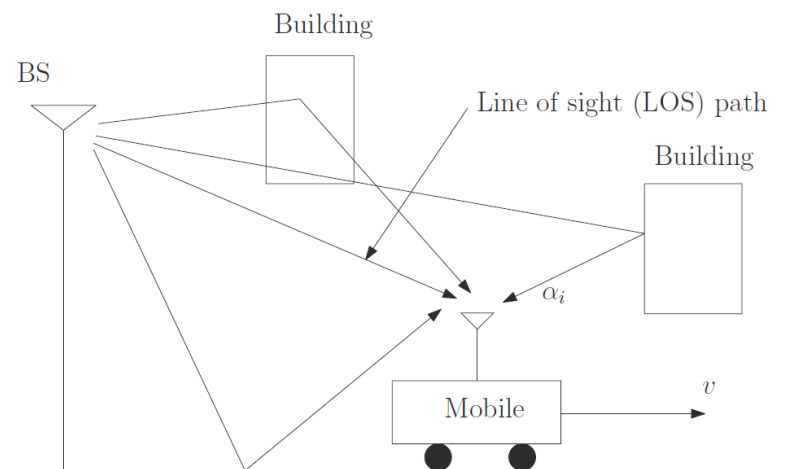
Large Scale Fading



Ασύρματη Διάδοση

21

- **Πολυδιαδρομική διάδοση (multipaths)**: η ενέργεια καταφθάνει στο δέκτη από **διαφορετικά μονοπάτια**, δηλαδή άφιξη πολλαπλών εκδόσεων του εκπεμπόμενου σήματος στο δέκτη
- Κάθε αφικνούμενο ραδιοκύμα καταφθάνει
 - ▣ Από διαφορετική κατεύθυνση
 - ▣ Με διαφορετική χρονική καθυστέρηση
 - ▣ Διαφορετικό πλάτος



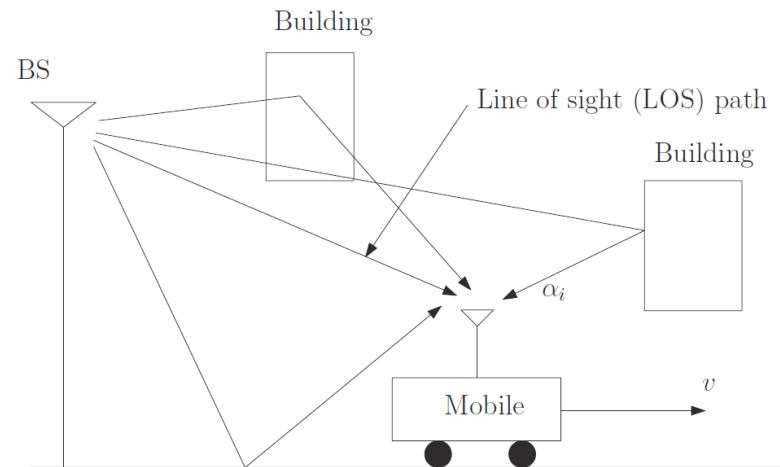
Ασύρματη Διάδοση

22

- Διανυσματική άθροιση στην κεραία του δέκτη και άρα αθροιστική ή αφαιρετική συμβολή ανάλογα με τις φάσεις των επιμέρους κυμάτων

$$y(t) = h(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \rho_n e^{j\phi_n} \delta(t - \tau_n)$$

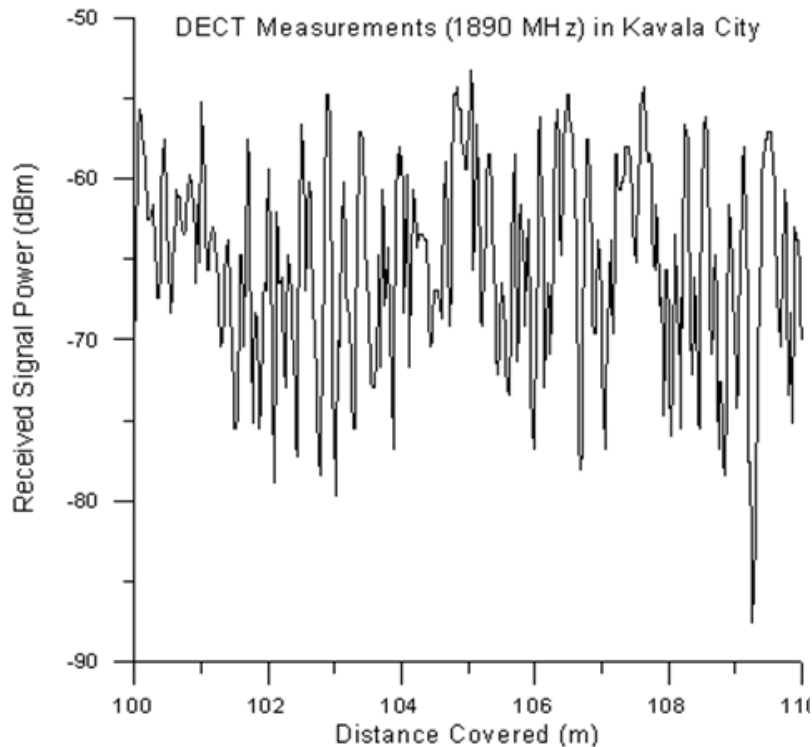
ρ_n : Amplitude of the nth path
 τ_n : time delay of the nth path
 ϕ_n : phase of the nth path



Φαινόμενα Διάδοσης για το Ραδιοδίαυλο

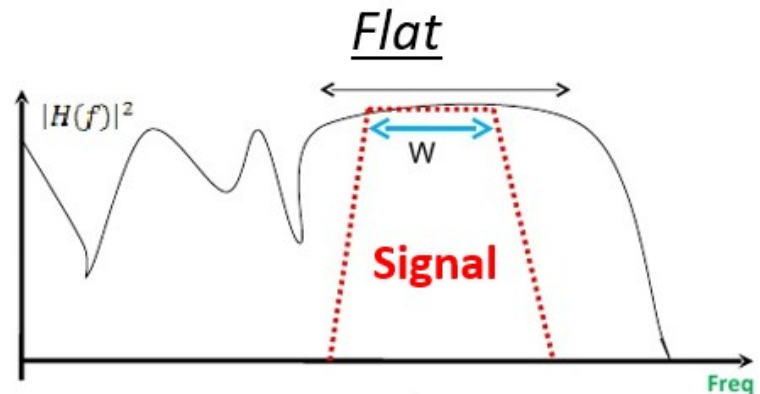
23

- **Διαλείψεις (fading)**: η μεταβολή του πλάτους ή της ισχύος και της φάσης του λαμβανόμενου σήματος.



Οι Διαλείψεις διαχωρίζονται σε:

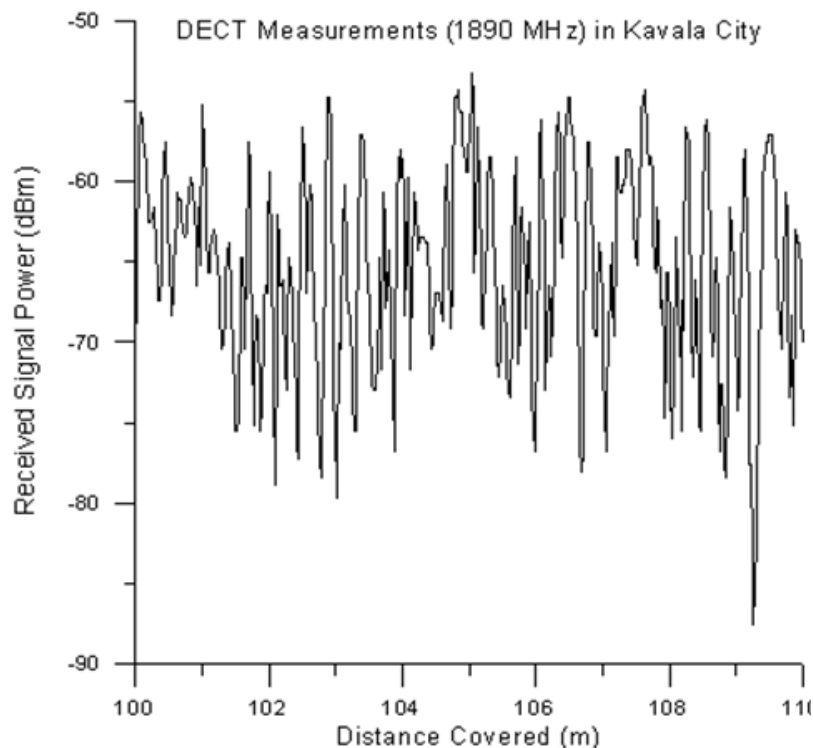
- **επίπεδες (flat fading)**: τυχαίες μεταβολές στο πλάτος



Φαινόμενα Διάδοσης για το Ραδιοδίαυλο

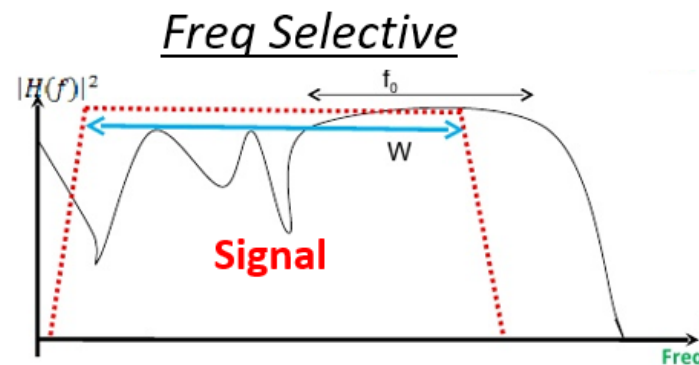
24

- **Διαλείψεις (fading)** : η μεταβολή του πλάτους ή της ισχύος και της φάσης του λαμβανόμενου σήματος.



Οι Διαλείψεις διαχωρίζονται σε:

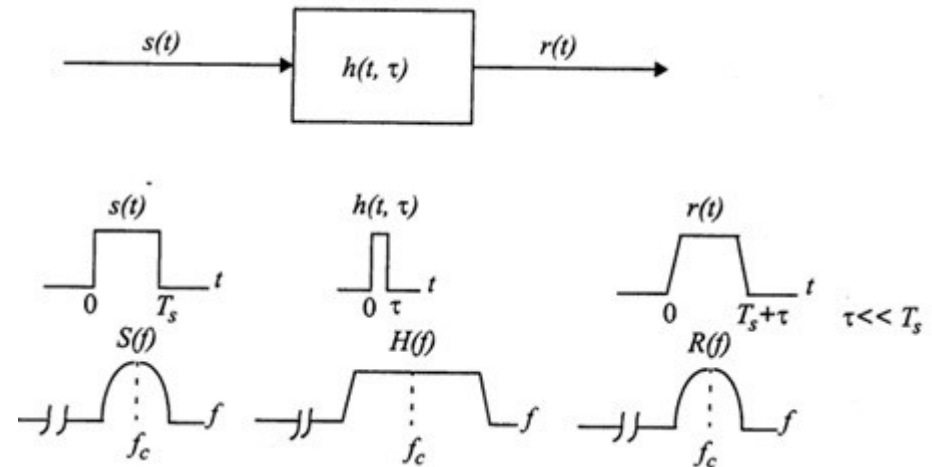
- επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (*frequency selective fading*): διασυμβολική παρεμβολή (ISI)



Μοντελοποίηση Ραδιοδιαύλου

25

- Ο διάυλος είναι γενικά ένα Φίλτρο
- Θεωρούμε ότι είναι Γραμμικό Φίλτρο
- Είναι Χρονικά Μεταβαλλόμενο, τόσο λόγω της κίνησης ενός δέκτη σε περιβάλλον σκεδαστών, αλλά και λόγω της μεταβολής των χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος (π.χ. κίνηση τοπικών σκεδαστών)
- Είναι **τυχαία χρονικά μεταβαλλόμενο γραμμικό φίλτρο**, γεγονός που επιβαρύνει τη ραδιοδιάδοση
- Υπάρχουν συναρτήσεις μεταφοράς και κρουστικές αποκρίσεις που το περιγράφουν ικανοποιητικά



Γραμμικότητα

26

Γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα

- Ένα σύστημα λέγεται **γραμμικό** αν ικανοποιεί δυο ιδιότητες
 - Την ιδιότητα της **ομογένειας** (homogeneity)
 - Την ιδιότητα της **αθροιστικότητας** (additivity)

Η ιδιότητα της **ομογένειας** μας λέει ότι αν

$$T[x(t)] = y(t)$$

ένα ζεύγος εισόδου-εξόδου, τότε

$$T[\alpha x(t)] = \alpha y(t)$$

Η ιδιότητα της **αθροιστικότητας** μας λέει ότι αν

$$T[x_1(t)] = y_1(t),$$

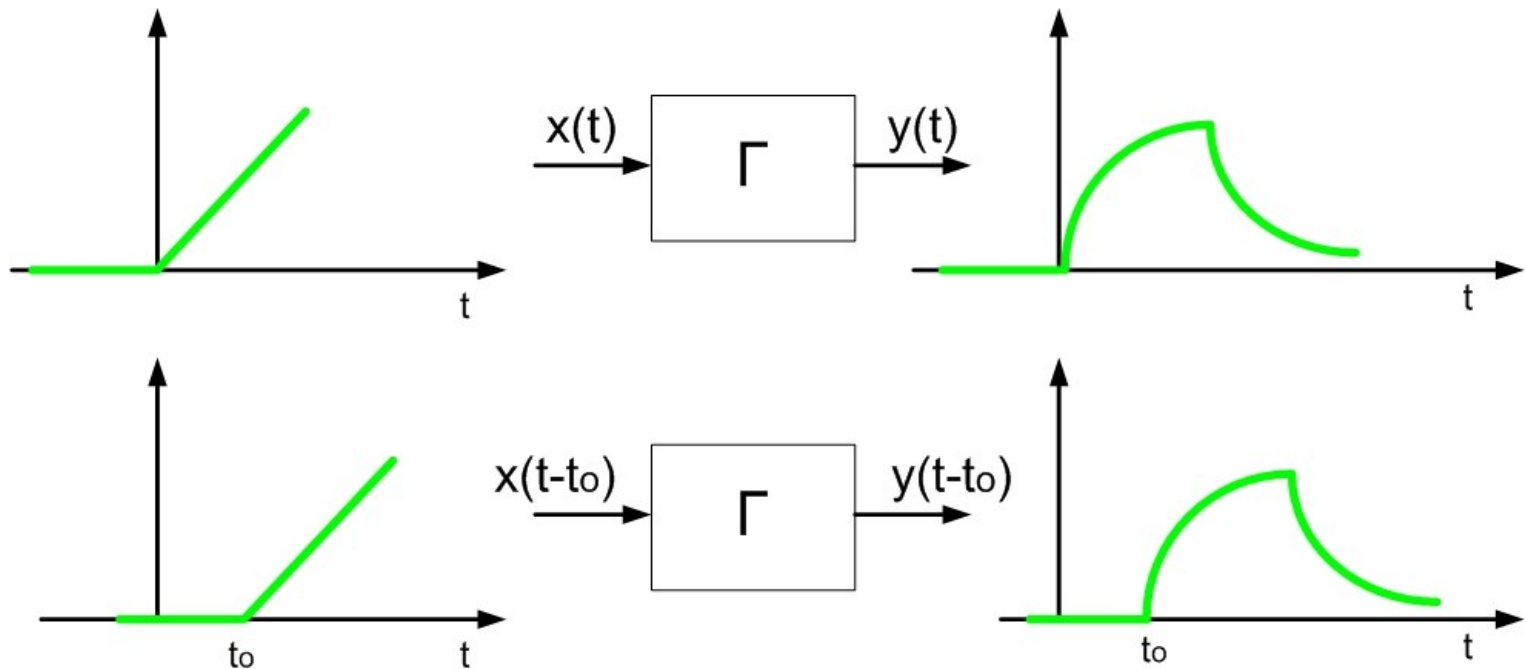
$$T[x_2(t)] = y_2(t)$$

δυο ζεύγη εισόδου-εξόδου, τότε

$$T[x_1(t) + x_2(t)] = y_1(t) + y_2(t)$$

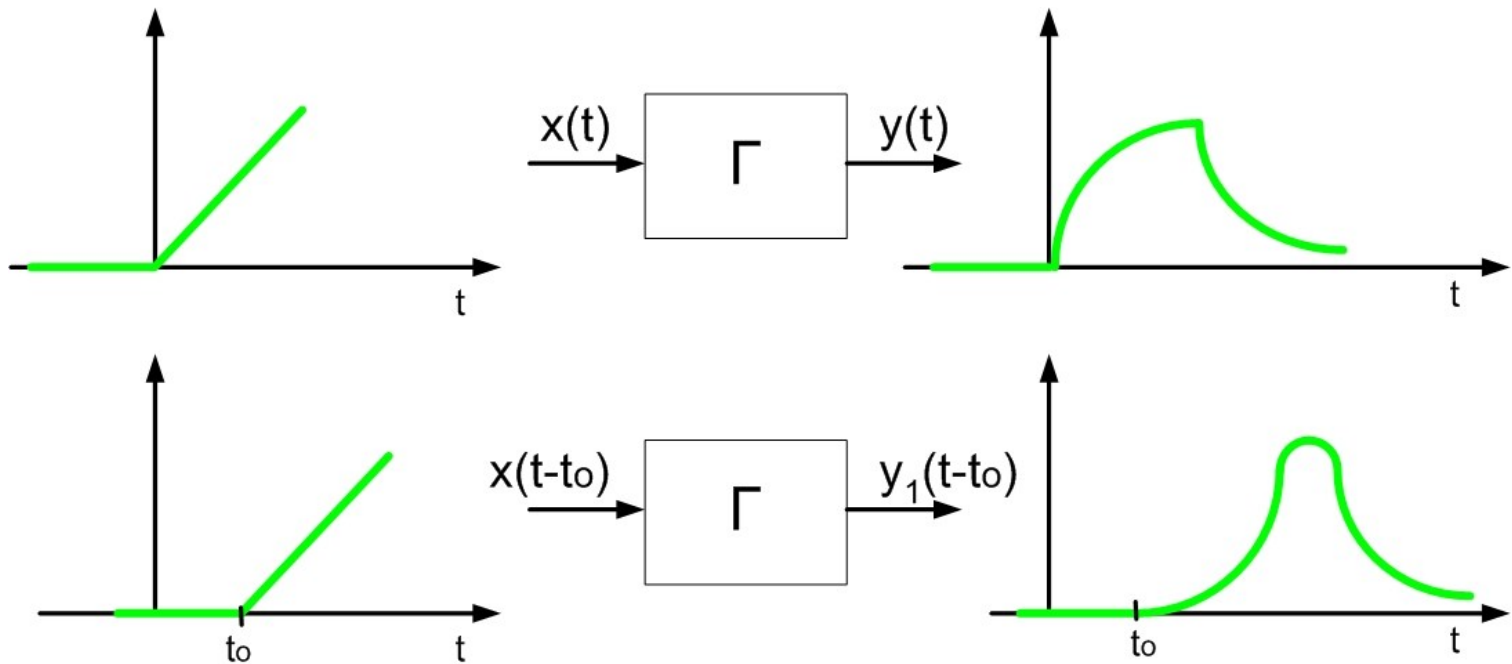
Παράδειγμα Χρονικά Αμετάβλητου Συστήματος

27



Παράδειγμα Χρονικά Μεταβαλλόμενου Συστήματος

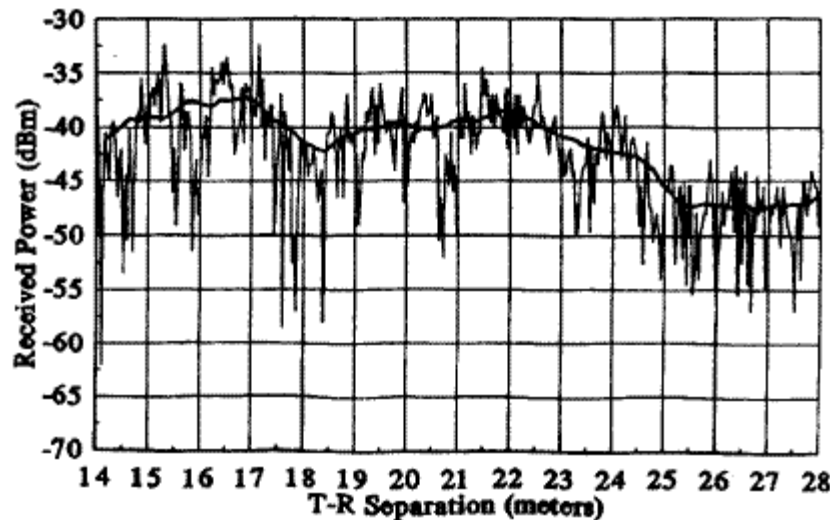
28



Είδη Διαλείψεων

29

- **Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας (Small Scale/Short Term Fading):** Εμπεριέχουν τις απώλειες διάδοσης.
 - Περιγράφουν τη μεταβολή πλάτους και φάσης για μετατοπίσεις της τάξης του $\lambda/2$.
 - Εξετάζεται η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε μικρότερη κλίμακα όπου εμφανίζονται σημαντικές αποκλίσεις στην ισχύ του, σε περιοχές συγκρίσιμες με κλάσματα του μήκους κύματός
 - Έχουμε μεταβολές στην ισχύ και φάση που να φθάσει το 10% του σήματος
 - Οι διαλείψεις είναι πολυδιακριτές διαύλου, που συμπεριφέρονται ως σκεδαστές



ήματος σε πλάτος
μού, που μπορούν

ά του σήματος
εταβολή του
τι των σκεδαστών

Είδη Διαλείψεων

- Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας (Small Scale/Short Term Fading):
 - Συνήθως επειδή χρησιμοποιούμε ένα περιθώριο ισχύος (margin) στο link budget της τάξης των 10-20dB, όταν η διάλειψη το υπερβεί, αναφερόμαστε σε ισχυρή διάλειψη.
 - Αποτέλεσμα είναι η δραματική επιδείνωση του BER κατά τη διάρκεια ισχυρών διαλείψεων.
 - Έχουμε ριπές σφαλμάτων (διαδοχικά bits εσφαλμένα).
 - Αντιμετώπιση: κωδικοποίηση-διεμπλοκή, διαφορική λήψη, προσαρμοστικές τεχνικές διαμόρφωσης.

Χρονική Διασπορά και ISI

31

- Θεωρούμε 2 μόνο συνιστώσες στον δέκτη

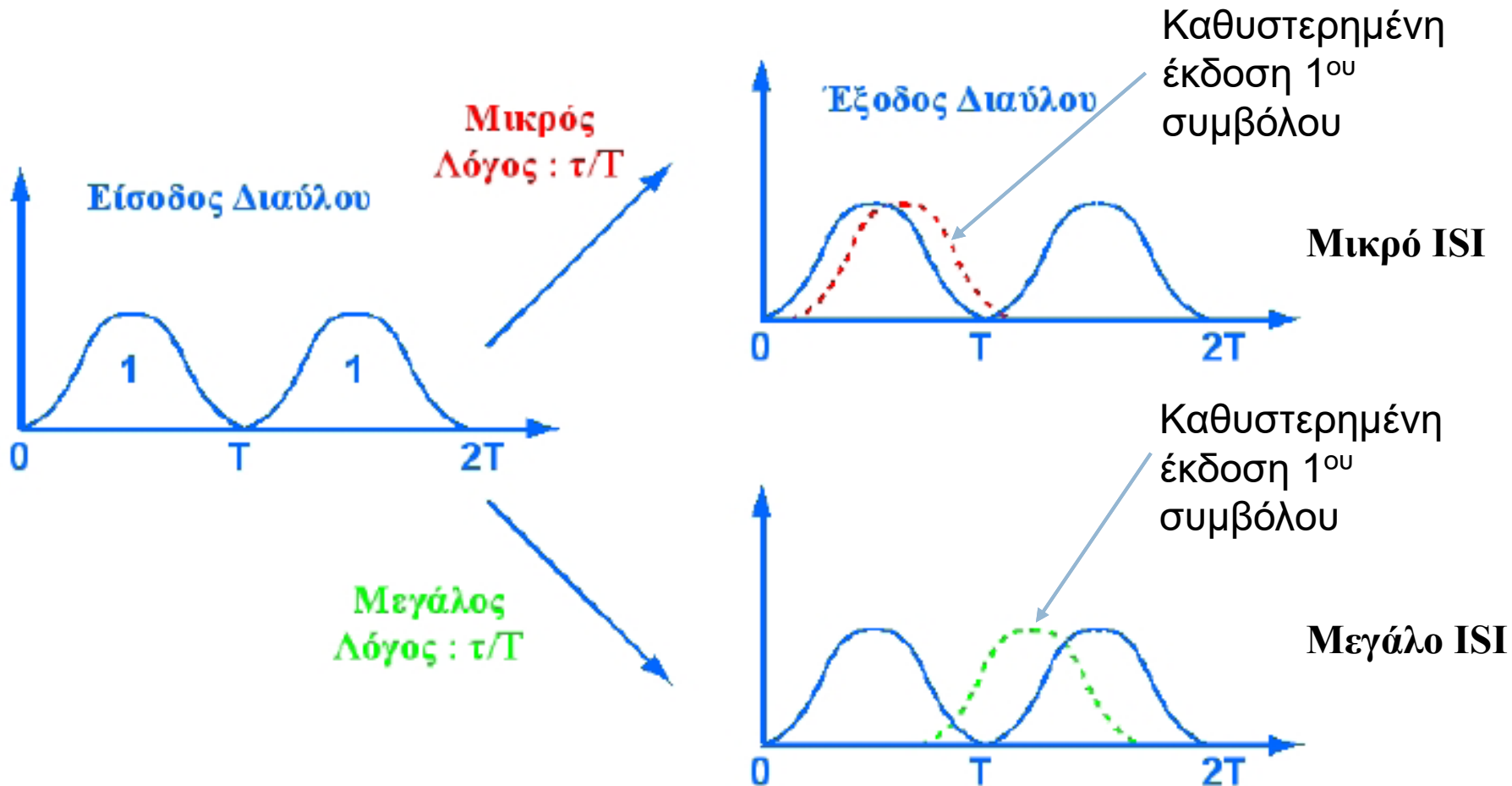
$$h(t) = A_0 \delta(t - \tau_0) + A_1 \delta(t - \tau_1)$$

- Σημαντική παράμετρος είναι η διαφορά των καθυστερήσεων $T = \tau_1 - \tau_0$, που καθορίζει το μέγεθος της χρονικής διασποράς (**delay spread**)
- Αυξανόμενη της διαφοράς αυξάνεται η διασυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference-**ISI**)

$$h(t) = \sum_i A_i \delta(t - \tau_i(t))$$

Χρονική Διασπορά και ISI

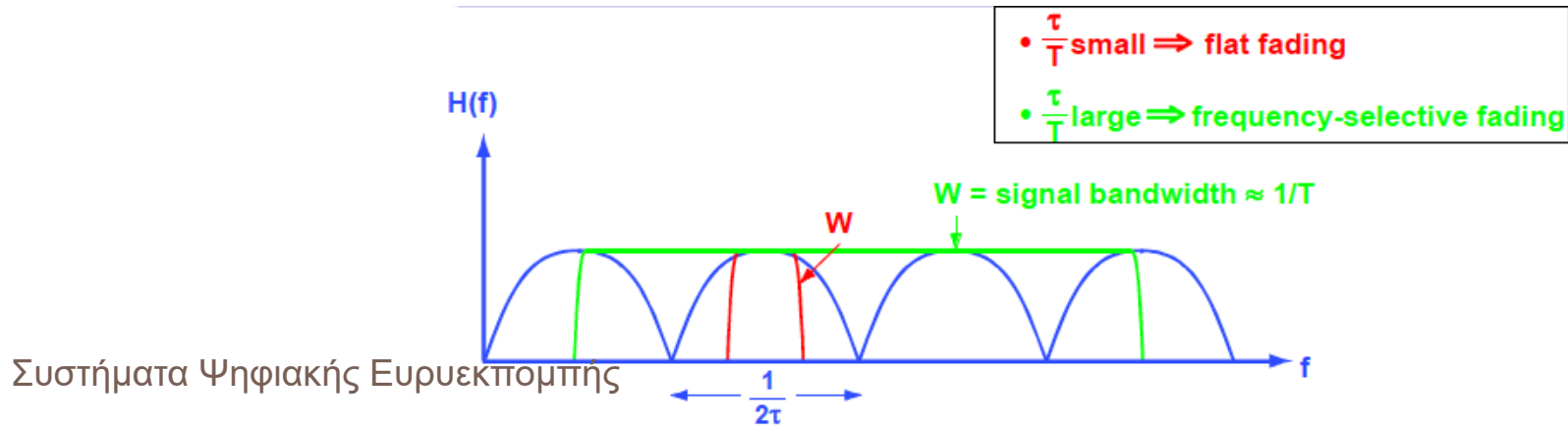
32



Χρονική Διασπορά και ISI

33

- **Επίπεδες Διαλείψεις:** Ολίσθηση του BW του σήματος ως προς τη συνάρτηση μεταφοράς και άρα η εξασθένηση θα μεταβάλλεται
- **Διαλείψεις Επιλεκτικές ως προς τη Συχνότητα:** Για μεγάλο BW, δύο συχνότητες που απέχουν αρκετά στο εύρος ζώνης, θα υφίστανται διαφορετική εξασθένηση
- Σημαντική η σχέση εύρους ζώνης και χρονικής διασποράς
- Ακόμη και μεγάλο τ , αν ο λόγος των πλατών είναι μικρός, τότε δεν υπάρχει σημαντικό πρόβλημα διαλείψεων



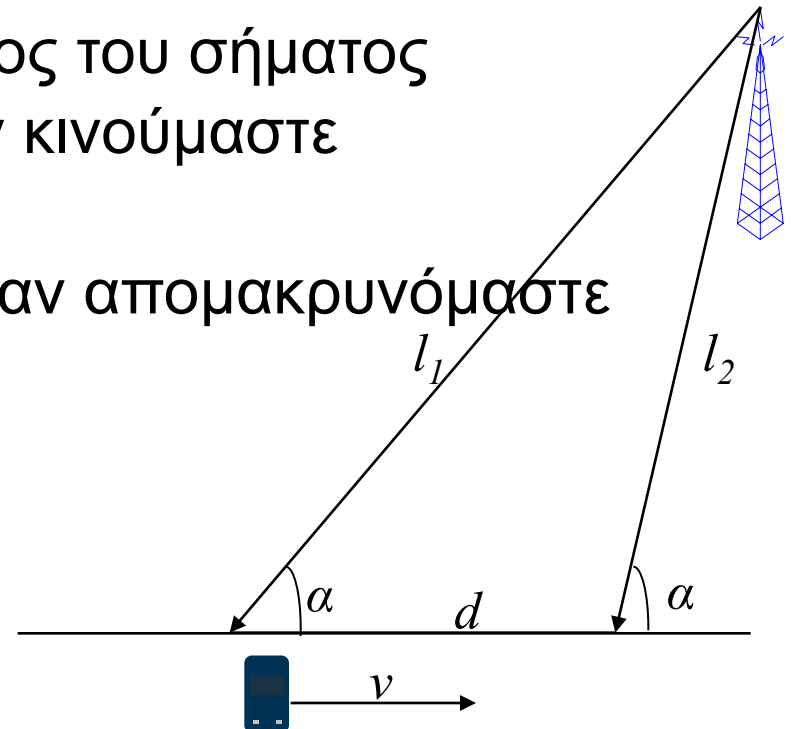
Ολίσθηση Doppler

34

- Η **ολίσθηση Doppler** είναι η ολίσθηση της συχνότητας που παρατηρείται στο λαμβανόμενο σήμα, όταν υπάρχει σχετική κίνηση του δέκτη ως προς τον πομπό.

Αποτέλεσμα:

- Αύξηση του εύρους φάσματος του σήματος
- Η συχνότητα αυξάνεται όταν κινούμαστε προς τον πομπό
- Η συχνότητα ελαττώνεται όταν απομακρυνόμαστε από τον πομπό.



Ολίσθηση Doppler

35

- Κινητό με ταχύτητα v (ή u) διανύει απόσταση d
- Διαφορά διαδρομής Δl σε χρόνο Δt

$$\Delta l = d \cos a = u \Delta t \cos a$$

- Μεταβολή φάσης

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi u \Delta t}{\lambda} \cos a$$

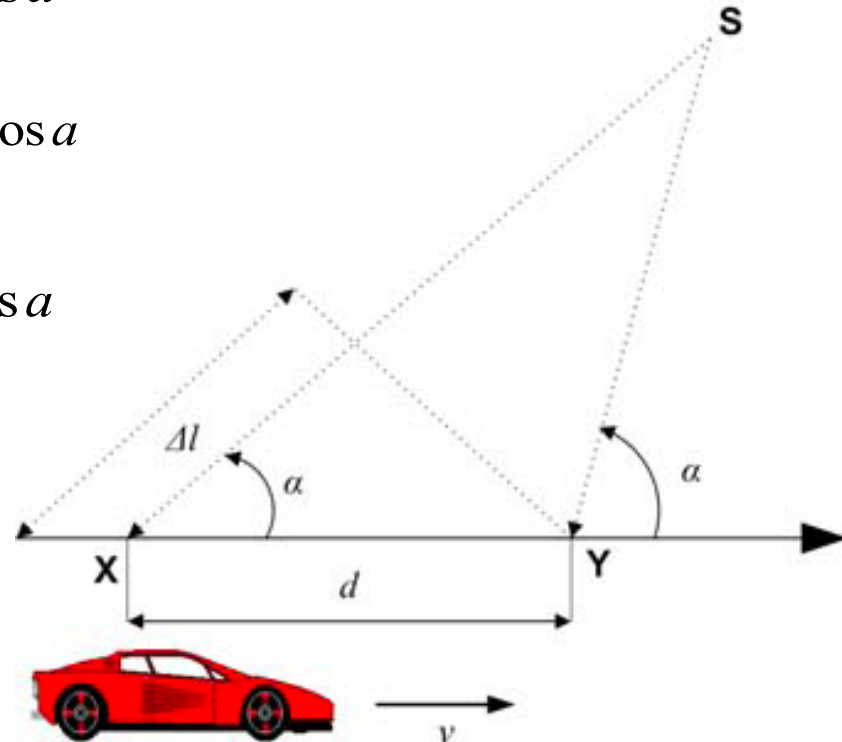
- Ολίσθηση Doppler

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{u}{\lambda} \cos a$$

- Ενδεικτικά: για $f_c = 1850 \text{ MHz}$ είναι $\lambda = 0.162 \text{ m}$. Έστω $\alpha = 0^\circ$ $v = 90 \text{ Km/h}$

$$f_d = \frac{90 \times 10^3 \text{ m} / 3600 \text{ s}}{0.162 \text{ m}} = 154.32 \text{ Hz}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής



Απώλειες Διάδοσης

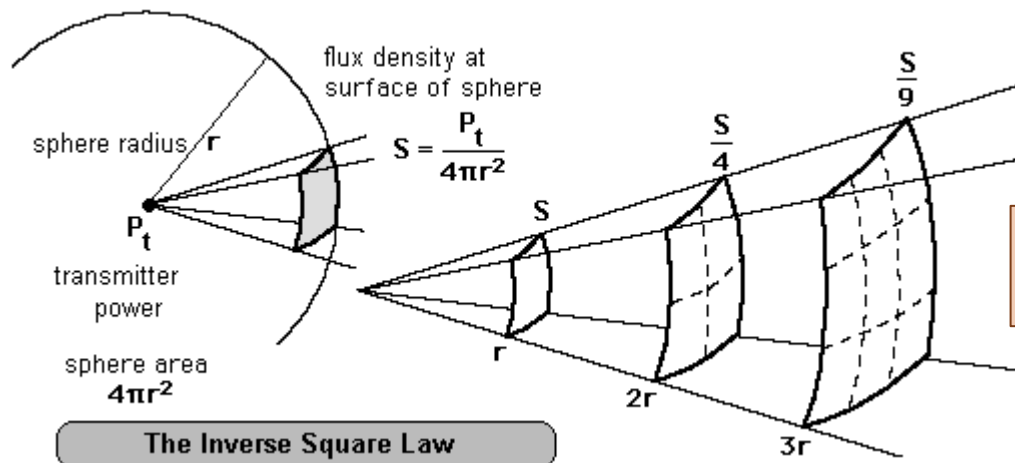
36

- **Απώλειες Διάδοσης (Path Loss):** Ο λόγος της εκπεμπόμενης προς τη λαμβανόμενη ισχύ, για δεδομένο περιβάλλον διάδοσης.
- Είναι συνάρτηση κυρίως της απόστασης.
- Υπάρχουν πολλά μοντέλα υπολογισμού των μέσων απωλειών, ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης και την εφαρμογή.
- Υπάρχουν 3 βασικές κατηγορίες μοντέλων και οι αντίστοιχες υβριδικές υλοποιήσεις.
 - **Εμπειρικά** (προσαρμογές σε δεδομένα μετρήσεων)
 - **Αναλυτικά** (χρήση γνωστών μεθόδων H/M διάδοσης, π.χ. GTD, PO, UTD, κλπ.)
 - **Στατιστικά-φυσικά** (κατανομές και αναλυτικές μέθοδοι)

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

37

- Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαχέεται καθώς διαδίδεται
- Η ένταση της είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή
 - ▣ Σε απόσταση r , η δέσμη περνάει από μία περιοχή A
 - ▣ Σε απόσταση $2r$, η δέσμη περνάει από μία περιοχή $4A$
 - ▣ Σε απόσταση $3r$, η δέσμη περνάει από μία περιοχή $9A$
- Η περιοχή αυξάνεται με το τετράγωνο της απόστασης

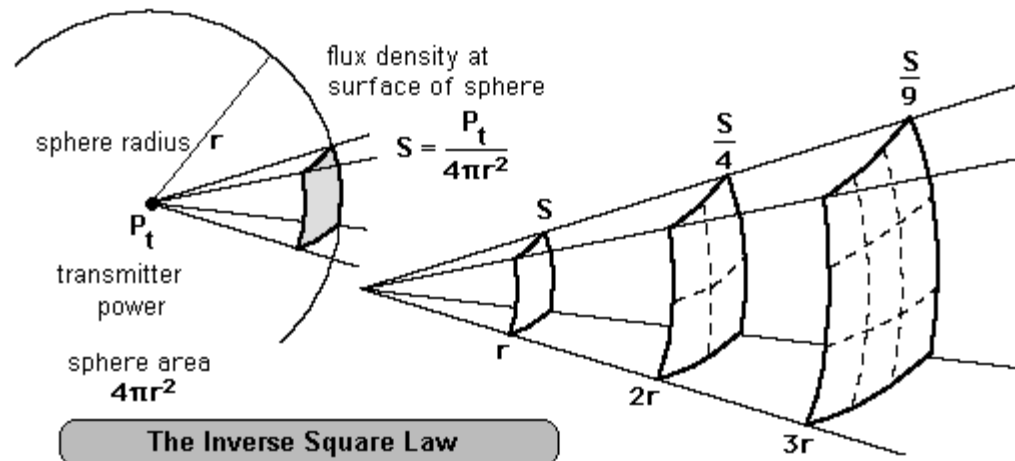


$$I = \frac{\text{Energy}}{\text{Area} \times \text{time}} = \frac{\text{Power}}{\text{Area}}$$

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

38

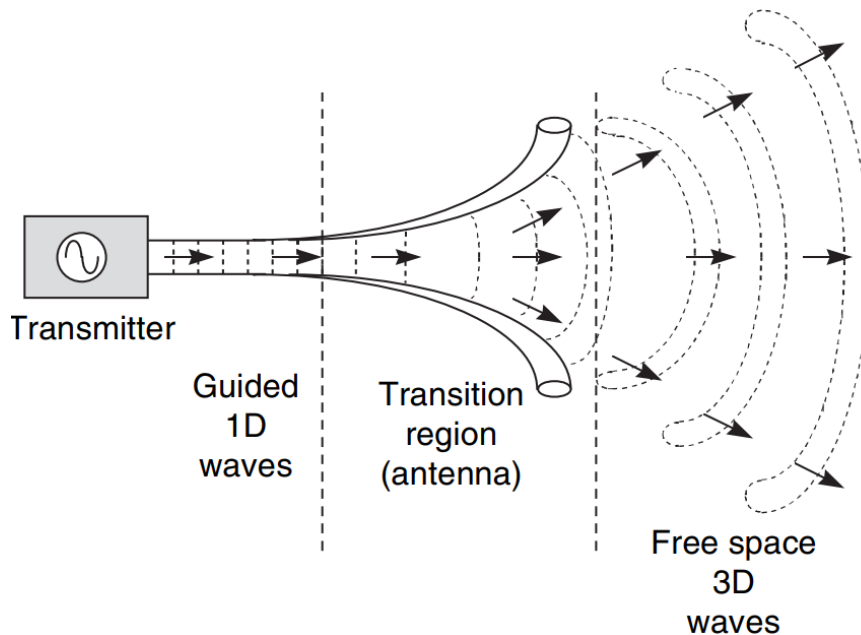
- Εάν δεν υπάρχει απορρόφηση της ενέργειας της δέσμης, η ίδια ισχύς περνάει από κάθε επιφάνεια
- Άρα σε απόσταση $2r$, υπάρχει μόνο το $\frac{1}{4}$ της ισχύος της δέσμης
- Άρα η πυκνότητα ροής ισχύος (**power flux density**), δηλ η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας, είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης



Βασικές Αρχές Κεραιών

39

- Τι είναι κεραία;
 - ▣ Είναι ένας τρόπος μετατροπής των καθοδηγούμενων κυμάτων που υπάρχουν σε κάποιο καλώδιο τροφοδοσίας σε ακτινοβολούμενα κύματα που ταξιδεύουν

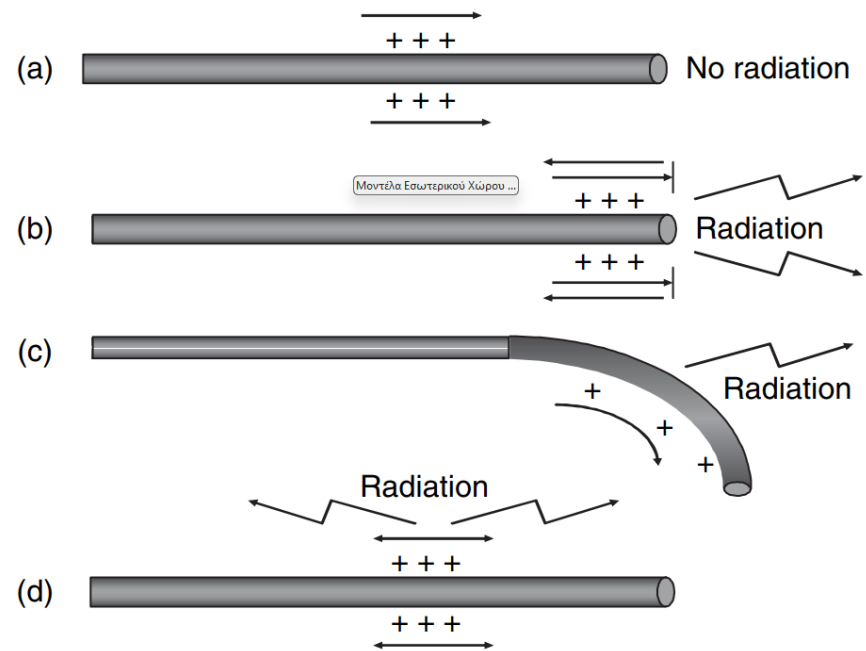


Η «τέχνη» στο σχεδιασμό της κεραίας έγκειται στο να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητα αυτής της μετατροπής, ιδίως προς την κατεύθυνση του προοριζόμενου δέκτη

Βασικές Αρχές Κεραιών

40

- Απαραίτητες συνθήκες για ακτινοβολία
 - Μία ομάδα φορτίσεων με ομοιόμορφη κίνηση (στατικές φορτίσεις) δεν παράγουν ακτινοβολία
 - Οι φορτίσεις φτάνουν στο τέλος του αγωγού και αναστρέφουν την κατεύθυνση τους
 - Η ταχύτητα παραμένει σταθερή, αλλάζει η κατεύθυνση τους
 - Οι φορτίσεις ταλαντώνονται σε περιοδική κίνηση



Η περιοδική κίνηση διεγείρεται από έναν ημιτονοειδή πομπό

Βασικές Αρχές Κεραιών

41

- Απαραίτητες συνθήκες για ακτινοβολία

Οι κεραίες μπορούν να θεωρηθούν συσκευές που προκαλούν επιτάχυνση των φορτίσεων με τρόπους που παράγουν ακτινοβολία με επιθυμητά χαρακτηριστικά

Γρήγορες αλλαγές στην κατεύθυνση των δομών που έχουν σχεδιαστεί για να καθοδηγούν τα κύματα μπορεί να παράγουν ανεπιθύμητη ακτινοβολία

Βασικές Αρχές Κεραιών

42

- **Περιοχές Κοντινού Πεδίου**
 - Κοντά σε μία κεραία τα διαγράμματα του πεδίου αλλάζουν πολύ γρήγορα με την απόσταση
 - Περιλαμβάνουν τόσο την ακτινοβολούσα ενέργεια όσο και την αντιδραστική ενέργεια (**reactive**)
 - Είναι μία ενέργεια που ταλαντώνεται προς και μακριά από την κεραία, δεν εκπέμπεται και επιστρέφει στο κεραιοσύστημα
 - Πιο μακριά τα αντιδραστικά πεδία είναι αμελητέα και μόνο η ακτινοβολούσα ενέργεια είναι παρούσα

Βασικές Αρχές Κεραιών

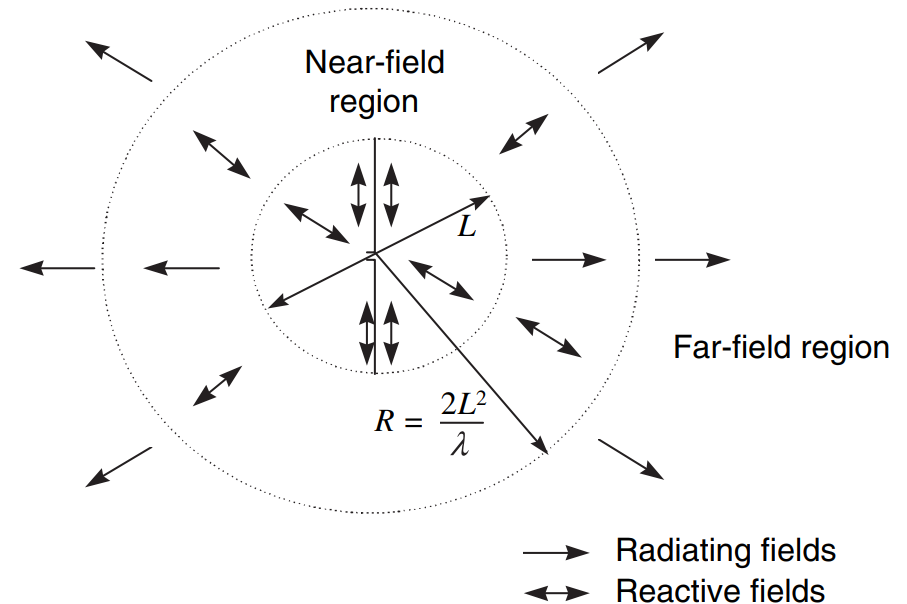
43

- Περιοχές Κοντινού και Μακρινού Πεδίου
 - ▣ Οι περιοχές αυτές διαιρούνται από μία ακτίνα R

$$R = \frac{2L^2}{\lambda}$$

L : Είναι η διάμετρος της κεραίας (ή της μικρότερης σφαίρας που καλύπτει πλήρως την κεραία)

λ : Είναι το μήκος κύματος

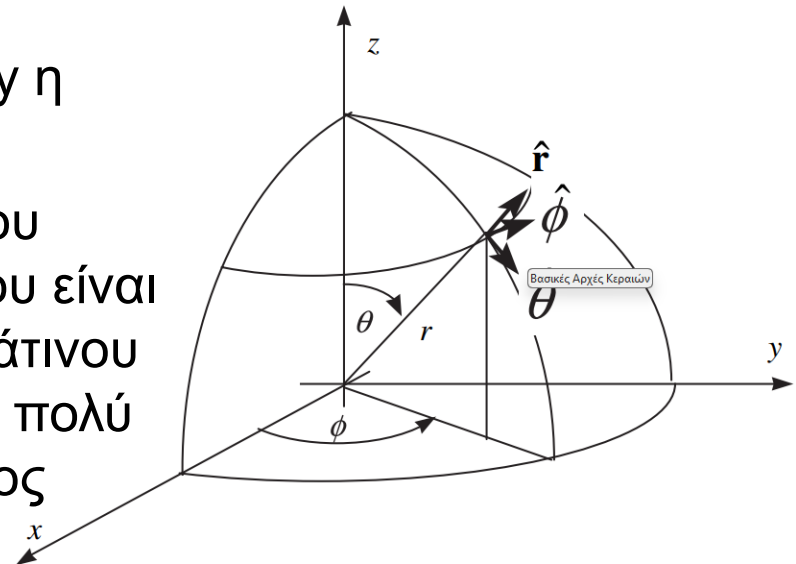


Εντός της ακτίνας βρίσκεται το κοντινό πεδίο (**περιοχή Fresnel**) και εκτός το μακρινό πεδίο (**περιοχή Fraunhofer**)

Βασικές Αρχές Κεραιών

44

- Ακτινοβολία Μακρινού Πεδίου από Συρμάτινους Αγωγούς
 - ▣ Είναι περισσότερο βολικό να δουλεύουμε σε σφαιρικές συντεταγμένες (r, θ, ϕ)
 - ▣ Ο άξονας z θεωρείται ότι είναι η κατακόρυφη διεύθυνση και το x - y η οριζόντια
 - ▣ Η απλούστερη κεραία συρμάτινου αγωγού είναι το δίπολο Hertz που είναι ένα κομμάτι ευθύγραμμου συρμάτινου αγωγού με μήκος L και διάμετρο πολύ μικρότερη από ένα μήκος κύματος



Βασικές Αρχές Κεραιών

45

- Διάγραμμα Ακτινοβολίας
 - ▣ Το **διάγραμμα ακτινοβολίας (radiation pattern)** μίας κεραίας είναι μία γραφική απεικόνιση της ακτινοβολίας του μακρινού πεδίου από την κεραία
 - ▣ Πρόκειται για απεικόνιση της ισχύος που ακτινοβολείται από μία κεραία ανά μονάδα στερεάς γωνίας
 - ▣ Η ένταση ακτινοβολίας δίνεται από

$$U = r^2 S$$

S: πυκνότητα ισχύος

r: απόσταση εντός του μακρινού πεδίου

Βασικές Αρχές Κεραιών

46

□ Διάγραμμα Ακτινοβολίας

- Το απλούστερο παράδειγμα είναι μία εξιδανικευμένη κεραία που ακτινοβολεί εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις, **ισοτροπική (isotropic)**
- Εάν η συνολική ισχύς που ακτινοβολείται από την κεραία είναι P , τότε η ισχύς κατανέμεται σε μία σφαίρα ακτίνας r
- Σε αυτή την περίπτωση η πυκνότητα ισχύς σε αυτήν την απόσταση και προς κάθε κατεύθυνση είναι

$$S = \frac{P}{\text{επιφάνεια}} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

- Η ένταση της ακτινοβολίας δίνεται από

$$U = r^2 S = \frac{P}{4\pi}$$

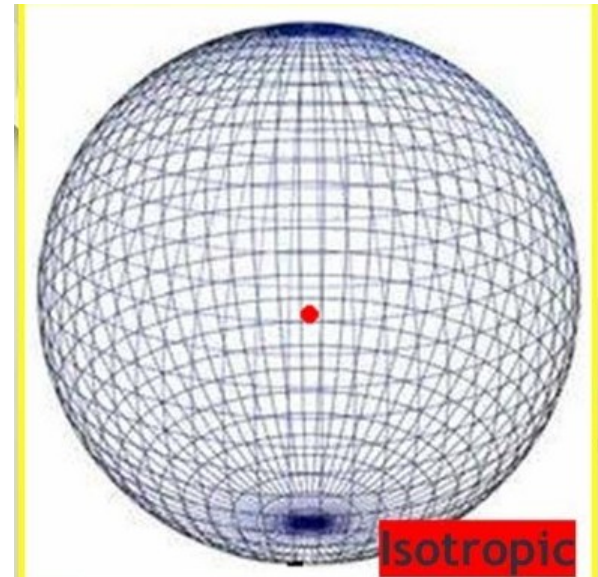
Βασικές Αρχές Κεραιών

47

□ Διάγραμμα Ακτινοβολίας

- Το απλούστερο παράδειγμα είναι μία εξιδανικευμένη κεραία που ακτινοβολεί εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις, **ισοτροπική (isotropic)**

Υποθετική κεραία που ακτινοβολεί την ίδια ισχύ προς όλες τις κατευθύνσεις (θεωρητικό ενδιαφέρον)

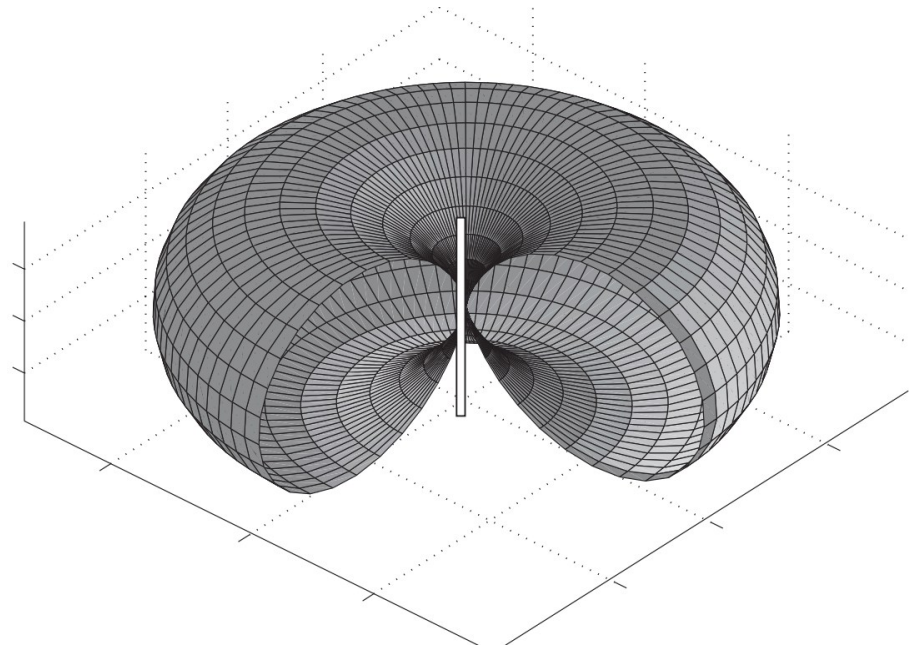


Βασικές Αρχές Κεραιών

48

- Διάγραμμα Ακτινοβολίας
 - ▣ Στοιχειώδες **Δίπολο-ομοιοκατευθυντική κεραία (omnidirection)**
 - ▣ Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στη γωνία $\theta = \pi/2$

Το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι σταθερό ως προς το οριζόντιο επίπεδο αλλά μπορεί να διαφέρει στο κάθετο

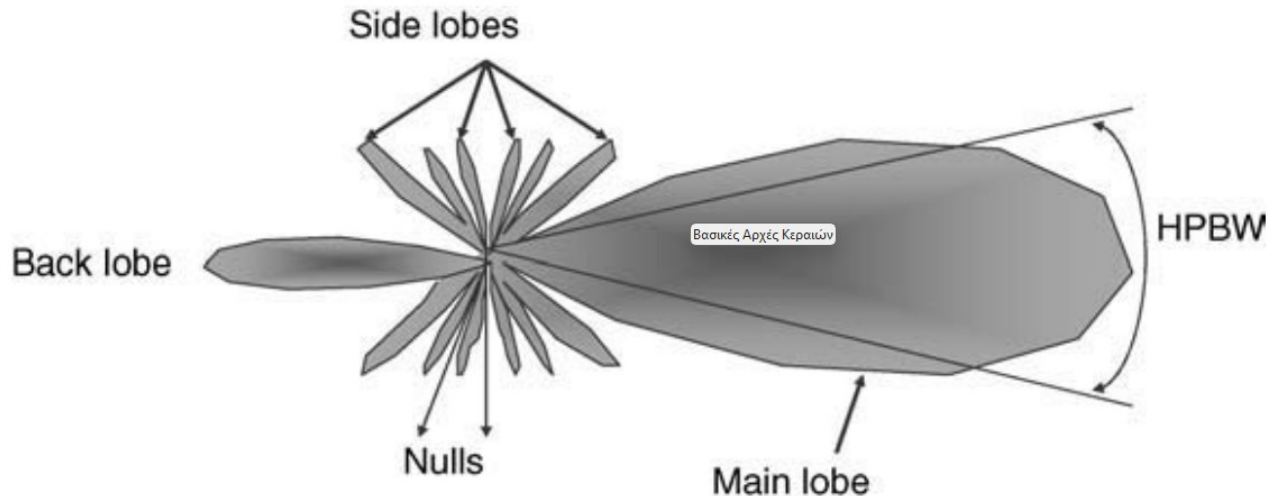


Βασικές Αρχές Κεραιών

49

□ Διάγραμμα Ακτινοβολίας

- ▣ Τυπικής κεραίας
- ▣ Κύριος Λοβός
 - Περιλαμβάνει την κατεύθυνση μέγιστη ακτινοβολίας
 - Οπίσθιο λοβό (διαμετρικά αντίθετο από τον κύριο)
 - Πλευρικούς λοβούς, που χωρίζονται μεταξύ τους από μηδενισμούς



Βασικές Αρχές Κεραιών

50

- Σύγκριση Διαγραμμάτων
 - **Εύρος ζώνης ημισείας ισχύος (half power beamwidth-HPBW)** είναι η γωνία που σχηματίζεται από τα σημεία ισχύος του κύριου λοβού
 - Το διάγραμμα διπόλου Hertz μειώνεται κατά το ήμισυ στις γωνίας $\theta = \pi/4$ και $\theta = 3\pi/4 \rightarrow \text{HPBW} = \pi/2$
 - **Λόγος front-back** είναι ο λόγος μεταξύ του μέγιστου πλάτους του κύριου και του μέγιστου πλάτους του οπίσθιου λοβού (σε dB)
 - **Στάθμη πλευρικών λοβών (sidelobe level)** είναι το πλάτος του μεγαλύτερου πλευρικού λοβού σε σχέση με τη μέγιστη τιμή του κυρίως

Βασικές Αρχές Κεραιών

51

- Κατευθυντικότητα
 - Η **κατευθυντικότητα (directivity)** μίας κεραίας συναρτήσσει της κατεύθυνσης ορίζεται

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\text{Ένταση ακτινοβολίας της κεραίας στην κατεύθυνση } (\theta, \varphi)}{\text{Μέση ένταση ακτινοβολίας σε όλες τις κατευθύνσεις}}$$
$$= \frac{\text{Ένταση ακτινοβολίας της κεραίας στην κατεύθυνση } (\theta, \varphi)}{\text{Ένταση ακτινοβολίας ισοτροπικής κεραίας που ακτινοβολεί την ίδια ισχύ}}$$

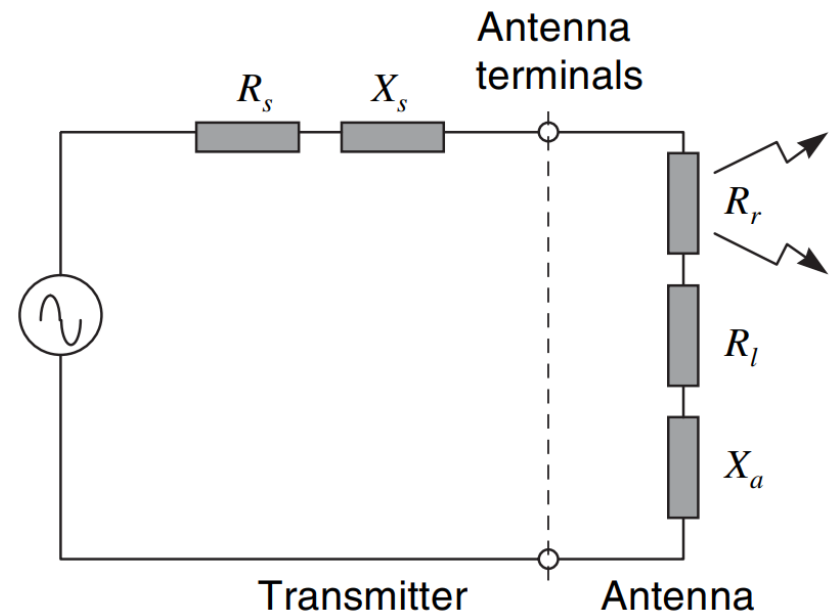
- Στην περίπτωση του διπόλου Hertz η κατευθυντικότητα δίνεται από

$$D = \frac{3}{2} \cong 1.8dBi$$

Βασικές Αρχές Κεραιών

52

- Ισοδύναμο κύκλωμα
 - Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πομπού και μίας συνδεδεμένης κεραιάς είναι
 - Η ωμική αντίσταση χωρίζεται σε
 - Αντίσταση ακτινοβολίας R_r
 - Αντίσταση απωλειών R_l
 - Η ισχύς που καταναλώνεται στην αντίσταση ακτινοβολίας είναι η ισχύς που τελικά ακτινοβολείται



Βασικές Αρχές Κεραιών

53

- Ισοδύναμο κύκλωμα
 - ▣ Αν και μόνο ακτινοβολούμενη ισχύς χρησιμεύει για την εξυπηρέτηση ενός σκοπού, είναι χρήσιμο να καθοριστεί ο συντελεστής απόδοσής

$$e = \frac{\text{Ακτινοβολούσα ισχύς}}{\text{Λαμβανόμενη ισχύς από την κεραία}} = \frac{R_r}{R_r + R_l}$$

Βασικές Αρχές Κεραιών

54

- Κέρδος ισχύος
 - Το **κέρδος ισχύος (power gain)** G μία κεραίας είναι ο λόγος της έντασης της ακτινοβολίας της προς εκείνη μιας ισοτροπικής κεραίας που ακτινοβολεί την ίδια ισχύ
 - Όταν οι κατασκευαστές κεραιών προσδιορίζουν το κέρδος συνήθως αναφέρονται στη μέγιστη τιμή του
 - Η κατευθυντικότητα και το κέρδος σχετίζονται ως

$$G(\theta, \varphi) = eD(\theta, \varphi)$$

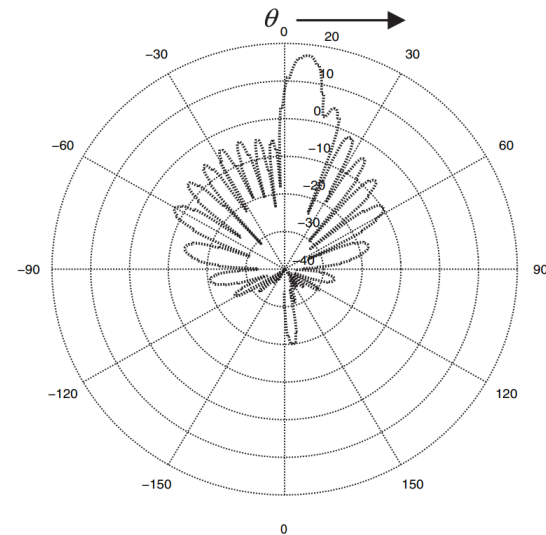
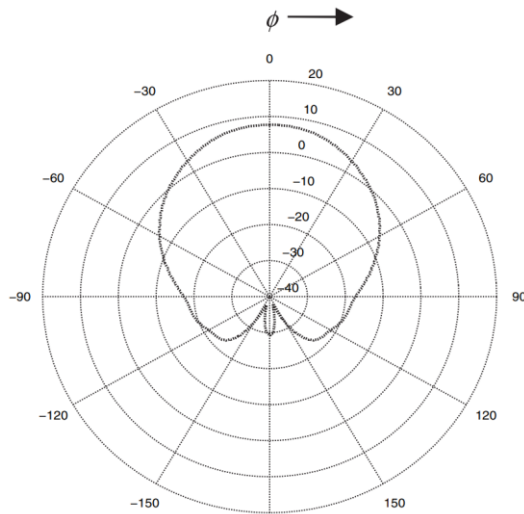
- Πολλές φορές το κέρδος δίνεται συναρτήσει 2 κάθετων πεδίων

Βασικές Αρχές Κεραιών

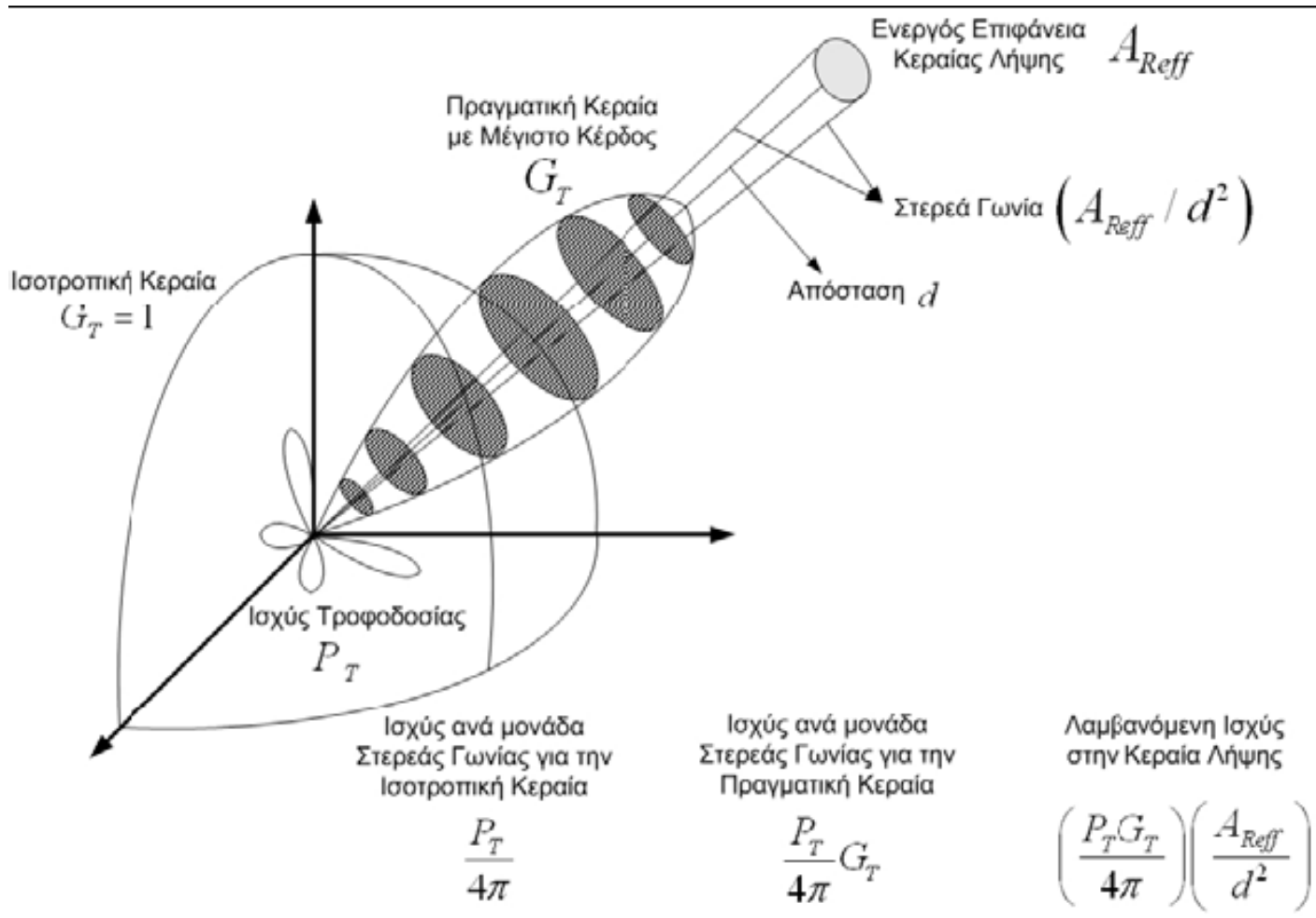
55

- Κέρδος ισχύος
 - ▣ Έστω ότι το διάγραμμα μπορεί να διαχωριστεί ως το γινόμενο των συναρτήσεων G_θ και G_φ , οι οποίες είναι μόνο συναρτήσεις των θ και φ , αντίστοιχα

$$G(\theta, \varphi) \cong G_\theta(\theta)G_\varphi(\varphi)$$



Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο



Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

60

$$P_r(d) = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi} \right) \left(\frac{A_{Reff}}{d^2} \right) \text{ Watts}$$

Πυκνότητα Ροής Ισχύος: $\Phi(d) = |\vec{P}_{av}(d)| = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} (\text{Watt} / \text{m}^2)$

Εξίσωση Η. Friis:
$$P_r(d) = \Phi(d) A_{Reff} = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \right) \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right)$$
$$= P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

61

- Η λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη είναι

$$\text{Received Power} = \frac{\text{Trasmitted Power} \cdot \text{Transmitter Antenna Gain} \cdot \text{Receiver Gain}}{\text{Path Losses}} \text{ (Watt)}$$

- Ή σε λογαριθμικές μονάδες

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{FS} = \text{EIRP} + G_r - L_{FS} \text{ (dBW)}$$

Equivalent isotropic radiated power
Ισοδύναμη, ισότροπα ακτινοβολούμενη ισχύς

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

62

$$dB \doteq 10 \log_{10}(x)$$

$$x = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$P(dBW) \doteq 10 \log_{10}\left(\frac{P}{1W}\right)$$

$$P=100W \rightarrow P(dBW)=20dBW$$
$$P=10mW \rightarrow P(dBW)=-20dBW$$

$$P(dBm) \doteq 10 \log_{10}\left(\frac{P}{1mW}\right)$$

$$P=100W \rightarrow P(dBm)=50dBm$$
$$P=1mW \rightarrow P(dBm)=0dBm$$

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

63

$$x = 10^{\frac{dB}{10}}$$

$$P(\text{dB})=20\text{dB} \rightarrow P=100\text{W}$$

$$P(\text{dB})=0\text{dB} \rightarrow P=1\text{W}$$

$$x = 10^{\frac{dBW}{10}}$$

$$P(\text{dBW})=20\text{dBW} \rightarrow P=100\text{W}$$

$$P(\text{dBW})=-20\text{dBW} \rightarrow P=10\text{mW}$$

$$x = 10^{\frac{dBm-30}{10}}$$

$$P(\text{dBm})=40\text{dBm} \rightarrow P=10\text{W}$$

$$P(\text{dBm})=10\text{dBm} \rightarrow P=10\text{mW}$$

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

$$L_{FS}(d) = \frac{P_t}{P_r(d)} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

$$\begin{aligned} PL(dB) &= 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r(d)} \right) = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \\ &= -10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = -20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \\ &= -20 \log(\lambda) + 20 \log(4\pi) + 20 \log(d) \\ &= 22 - 20 \log(\lambda) + 20 \log(d) \end{aligned}$$

Κανόνας: 20 dB/decade

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

65

- Για κάθε δεκαπλασιασμό της απόστασης, οι απώλειες αυξάνονται κατά 20dB, δηλαδή ο κανόνας που προκύπτει είναι απώλειες **20dB/decade**
- Για κάθε διπλασιασμό της απόστασης οι απώλειες διάδοσης αυξάνονται κατά περίπου 6dB. Επίσης για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας έχουμε αύξηση των απωλειών διάδοσης κατά 6dB

Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

66

$$\begin{aligned} PL(dB) &= 22 - 20 \log(\lambda) + 20 \log(d) \\ &= 22 - 20 \log\left(\frac{300}{f_{MHz}}\right) + 20 \log(d_{km} \cdot 1000) \\ &= 20 \log(f_{MHz}) + 20 \log(d_{km}) + 32.45 \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Στη βιβλιογραφία θα βρείτε και άλλες εκφράσεις ανάλογα με τις μονάδες των μεγεθών συχνότητας και απόστασης.

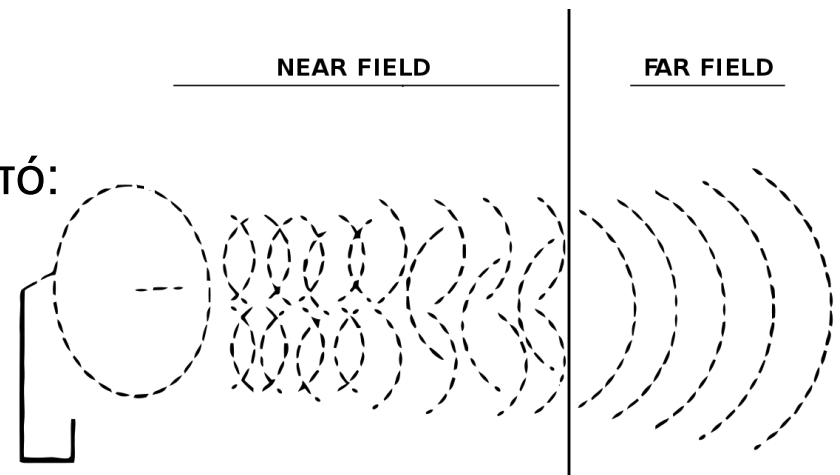
Απώλειες Διάδοσης

67

- Συνήθως εκφράζουμε τη λαμβανόμενη ισχύ ή τις απώλειες διάδοσης σε απόσταση d , συναρτήσει των αντίστοιχων μεγεθών σε μια απόσταση αναφοράς d_0 .
- Η ισχύς στην απόσταση αυτή μπορεί να προκύψει είτε από μετρήσεις είτε από την εξίσωση του Friis.
- Πρέπει η απόσταση αυτή να είναι στο μακρινό πεδίο, αλλά ταυτόχρονα αρκετά μικρή σε σχέση με πιθανές αποστάσεις λειτουργίας του συστήματος και υπολογισμού των απωλειών.
- Το μακρινό πεδίο μιας κεραίας, η περιοχή που το μέτωπο του κύματος μπορεί να θεωρείται επίπεδο, είναι η περιοχή πέρα από:

$$d > \frac{2D^2}{\lambda}$$

όπου D είναι η μέγιστη γραμμική διάσταση της κεραίας.



Απώλειες Διάδοσης

68

- Παρατηρούμε πως αν γνωρίζουμε (μόνο) την ισχύ σε απόσταση d_o , τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ σε απόσταση d απλά:

$$P_r(d) = P_r(d_o) \cdot \left(\frac{d_o}{d}\right)^2$$

$$\begin{aligned} P_r(d)(dBm) &= P_r(d_o)(dBm) + 10\log\left(\frac{d_o}{d}\right)^2 = \\ &= P_r(d_o)(dBm) - 10\log\left(\frac{d}{d_o}\right)^2 \end{aligned}$$

$$PL(d)(dB) = PL(d_o)(dB) + 10\log\left(\frac{d}{d_o}\right)^2$$

Μοντέλο Απλής Κλίσης

69

- Σε πραγματικές συνθήκες το μοντέλο ελεύθερου χώρου δεν είναι ικανοποιητικό.
- Ένα απλό εμπειρικό μοντέλο για τη λαμβανόμενη ισχύ και τις απώλειες διάδοσης είναι το εξής

$$P_r(d) = P_r(d_o) - 10n \log\left(\frac{d}{d_o}\right)$$

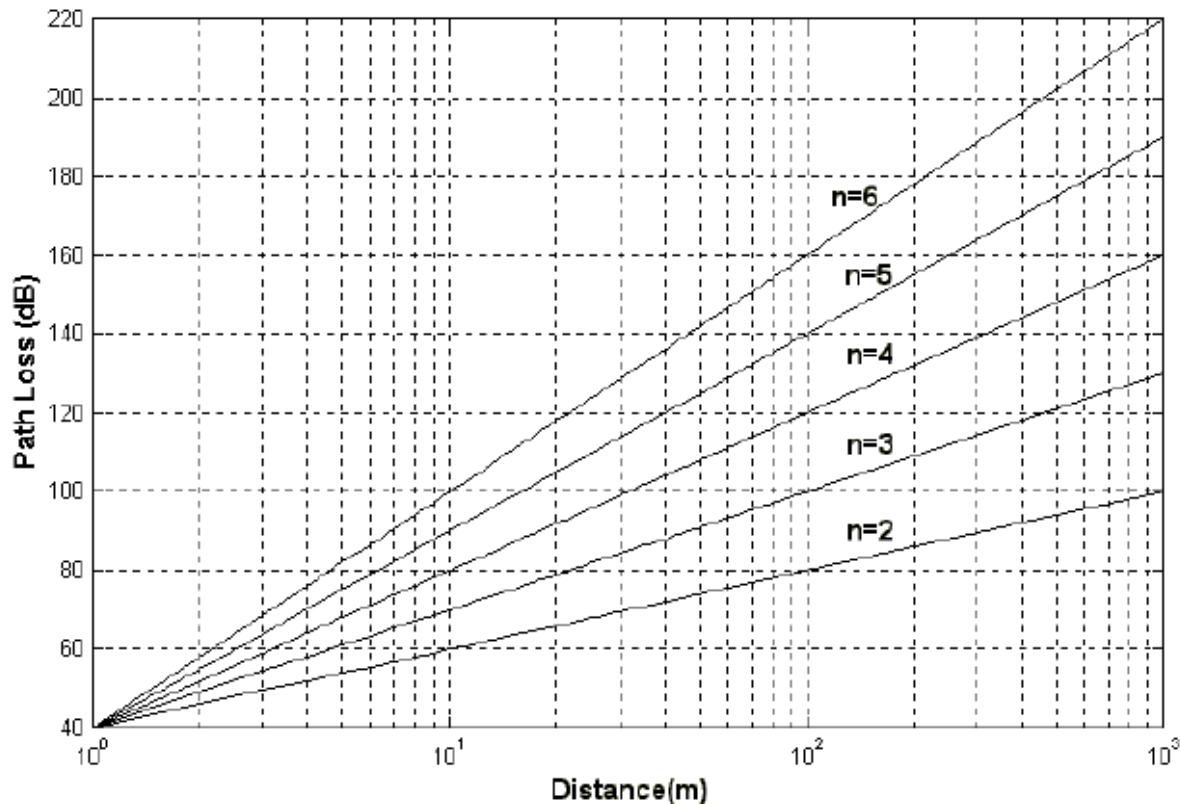
$$PL(d)(dB) = PL(d_o)(dB) + 10n \log\left(\frac{d}{d_o}\right)$$

- όπου n ο συντελεστής απωλειών διάδοσης (path loss factor), ο οποίος για FSL είναι $n=2$.

Μοντέλο Απλής Κλίσης

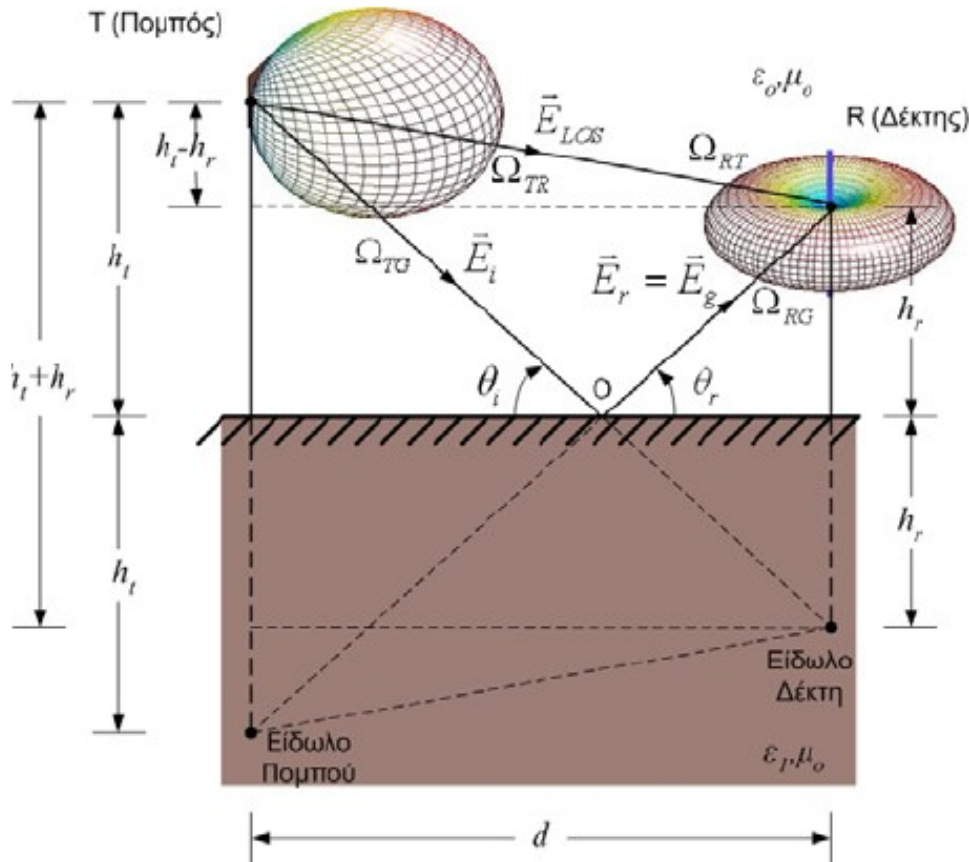
70

- Συνήθως κυμαίνεται από 2 ως 4 για τυπικές αστικές περιοχές με μακροκυψέλες και από 1.6 ως 8 για μικροκυψελωτό περιβάλλον.



Μοντέλο Επίπεδης Γης

71



- Το κυριότερο πραγματικό πρόβλημα που εισάγεται στο μοντέλο των δύο ακτινών είναι η διαφορά φάσης των δύο ακτινών.
- Για να γίνει αυτό πρέπει να μελετηθεί το H/M πεδίο ως προς την ένταση και όχι προς την ισχύ του.
- Αυτό γιατί η ένταση του καθορίζει τάση κατά μέτρο και φάση στην κεραία λήψης.

Γεωμετρική οπτική

Μοντέλο Επίπεδης Γης

72

$$P_r(d) = P_t \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot G_r(\theta_r, \varphi_r) \frac{(h_t h_r)^2}{d^4}$$

προσεγγιστική
σχέση

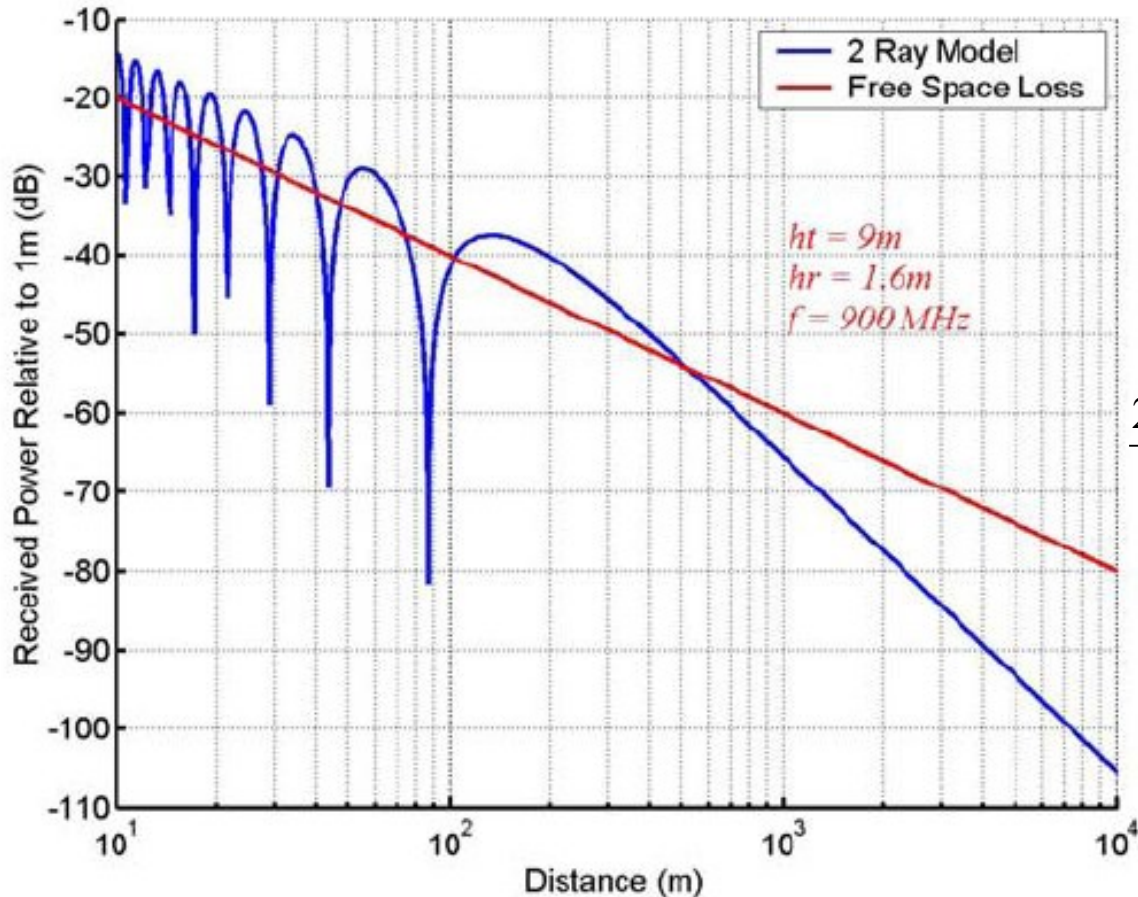
$$PL(dB) = 40 \log(d) - 10 \log G_t(\theta_t, \varphi_t) - 10 \log G_r(\theta_r, \varphi_r) - 20 \log h_t - 20 \log h_r$$

$$P_r(d) = P_t \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot G_r(\theta_r, \varphi_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot 4 \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right)$$

χωρίς
προσέγγιση

Μοντέλο Επίπεδης Γης

73



Breakpoint

$$d = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \leftrightarrow k\Delta = \pi$$

$$\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} = \frac{k\pi}{2} = \begin{cases} k = 2\nu + 1, \nu = 1, 2, 3, \dots, \max \\ k = 2\nu, \nu = 1, 2, 3, \dots, \min \end{cases}$$

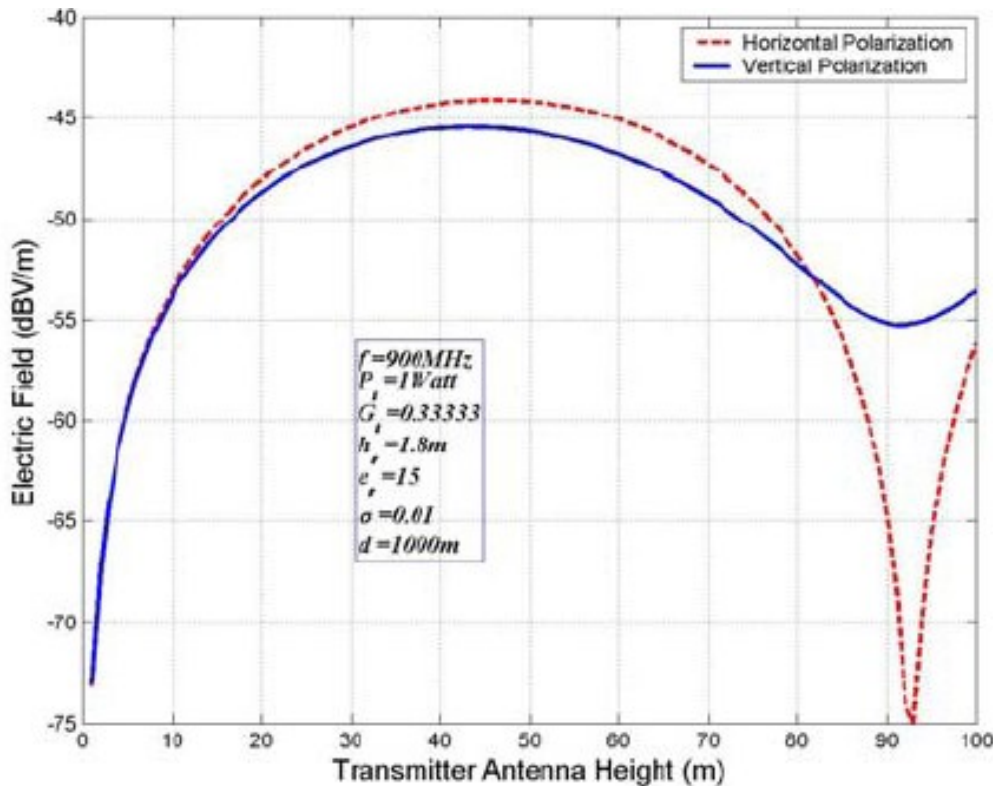
$$P_r(d) = P_t \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot G_r(\theta_r, \varphi_r)$$

$$\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot 4 \sin^2\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right)$$

Μοντέλο Επίπεδης Γης

74

□ Κέρδος Ύψους Κεραίας



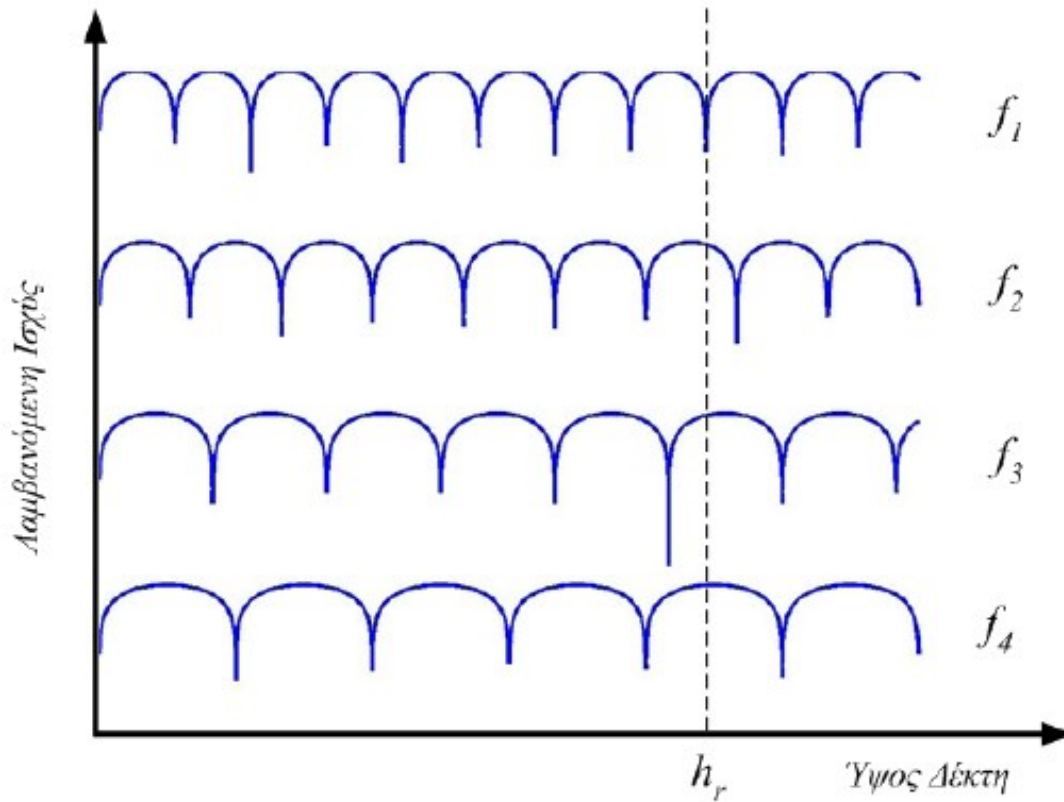
Κέρδος περίπου 6dB για κάθε διπλασιασμό του ύψους της κεραίας πομπού ή δέκτη

$$P_r(d) = P_t \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot G_r(\theta_r, \varphi_r)$$

$$\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot 4 \sin^2\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right)$$

Μοντέλο Επίπεδης Γης

75

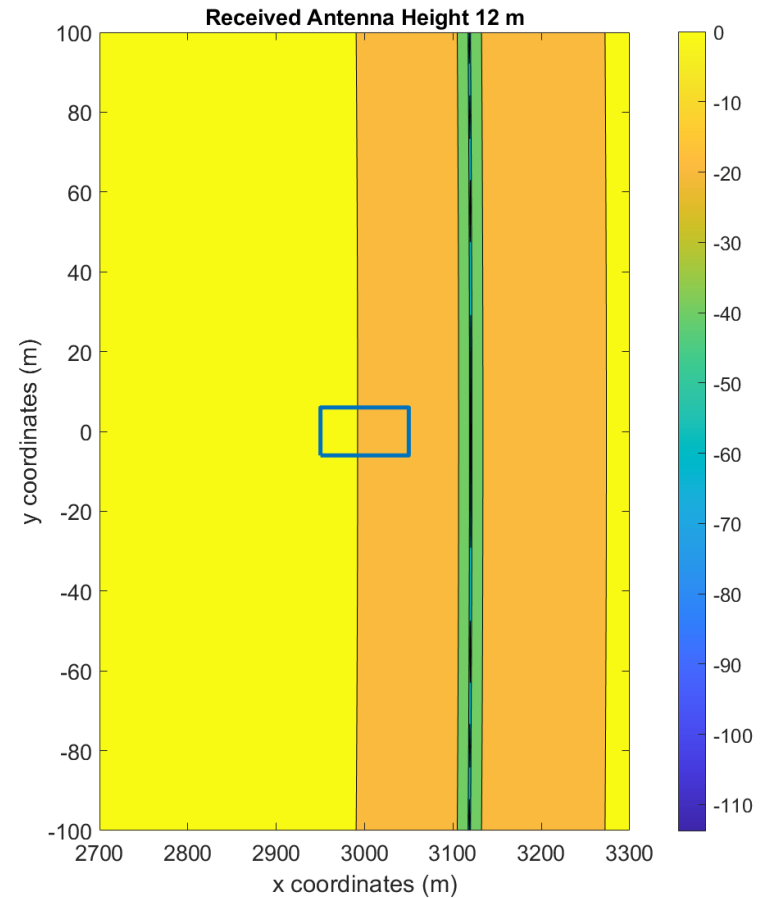
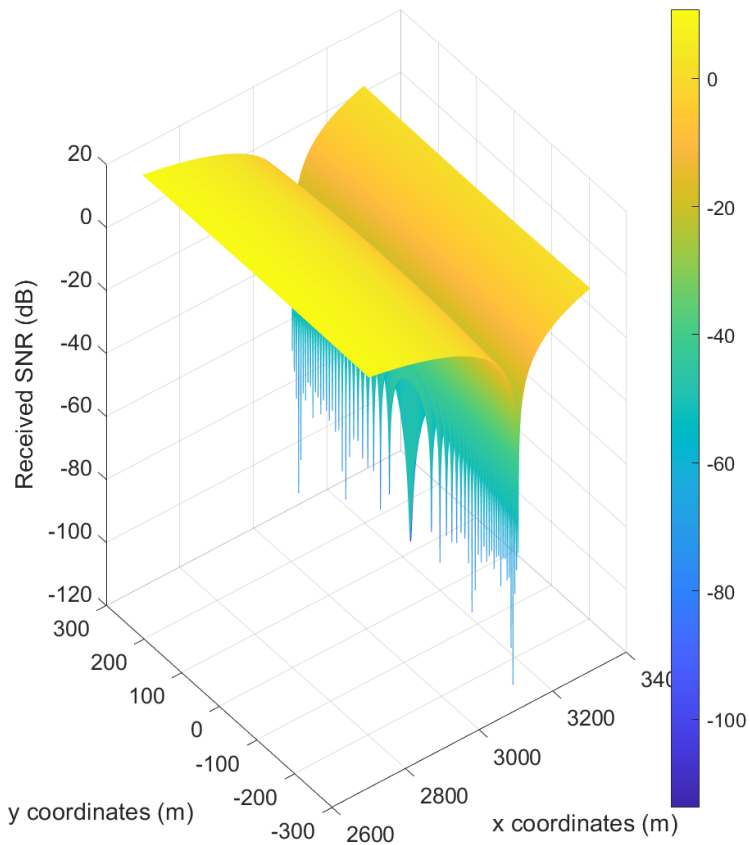


$$P_r(d) = P_t \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot G_r(\theta_r, \varphi_r)$$

$$\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot 4 \sin^2\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right)$$

Μοντέλο Επίπεδης Γης

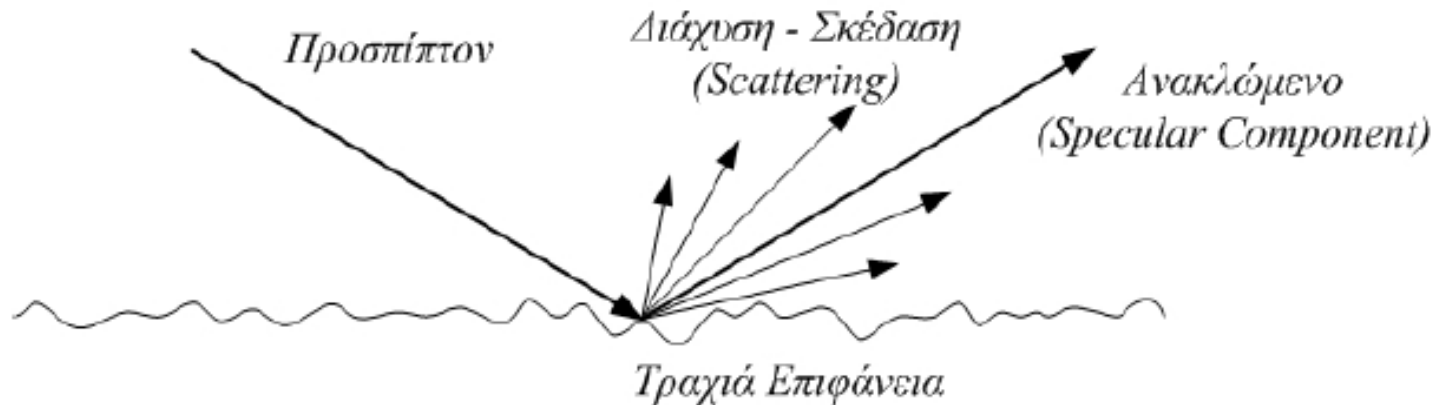
76



Ανάκλαση και Σκέδαση από Τραχιά Επιφάνεια

78

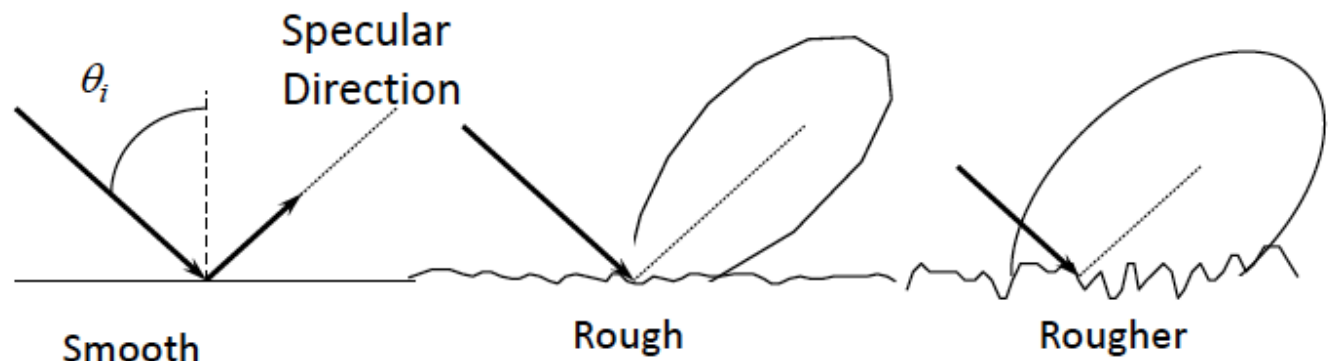
- Αποτέλεσμα της τραχύτητας της επιφάνειας είναι η διάχυση της ανάκλασης σε πολλές κατευθύνσεις ή όπως αποκαλείται **σκέδαση**



Ανάκλαση και Σκέδαση από Τραχιά Επιφάνεια

79

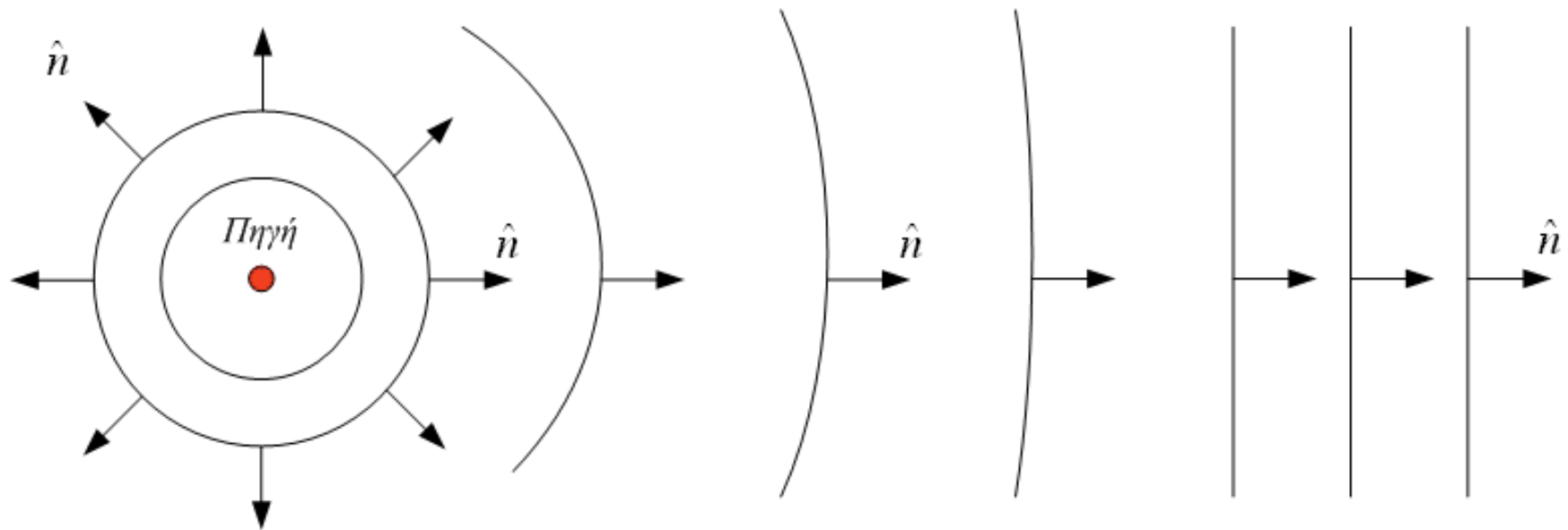
- Όταν η επιφάνεια είναι τραχύτερη, το κύμα ανακλάται (σκεδάζεται) από ένα μεγάλο αριθμό σημείων επί της επιφάνειας, διευρύνοντας έτσι την κατεύθυνση στην οποία μεταδίδεται/σκεδάζεται η ενέργεια
- Αυτή η διαδικασία μειώνει την ενέργεια της κατοπτρικής ανάκλασης / κατεύθυνσης
- Ο βαθμός σκέδασης εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης και την τραχύτητα της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος.



Κυματικά Μέτωπα

80

Ισοφασικές Επιφάνειες = Κυματικά Μέτωπα

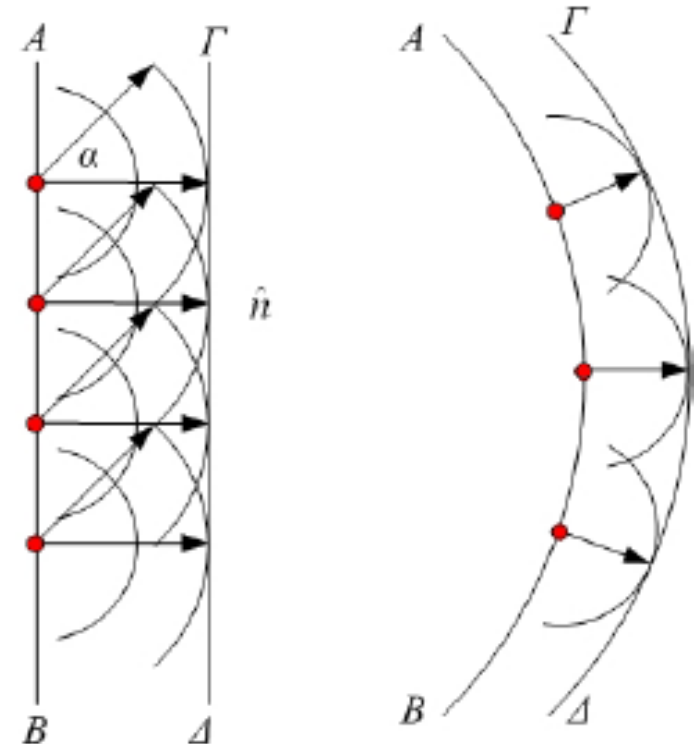
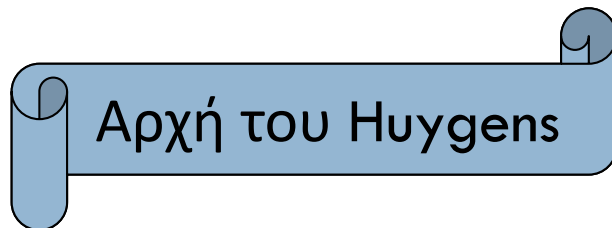


- Σε μεγάλες αποστάσεις από τη σημειακή πηγή το σφαιρικό κυματικό μέτωπο τείνει να γίνει επίπεδο

Αρχή του Huygens

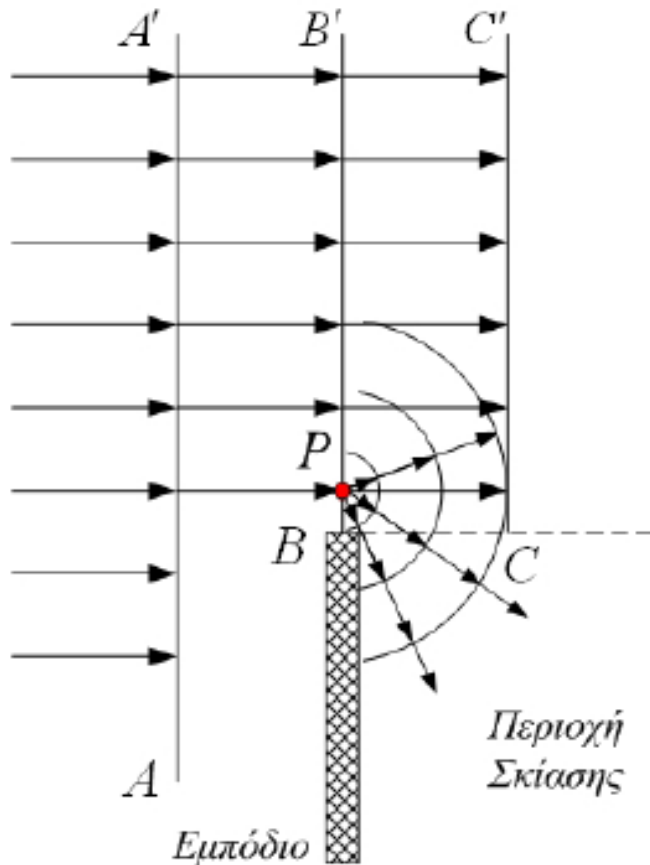
81

- Κάθε σημείο σε ένα πρωτεύον κυματικό μέτωπο αποτελεί πηγή δευτερευόντων σφαιρικών κυματικών μετώπων και αυτά τα δευτερεύοντα κυματικά μέτωπα συνδυάζονται και παράγουν ένα νέο επίπεδο κυματικό μέτωπο στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.



Περίθλαση σε Αιχμή

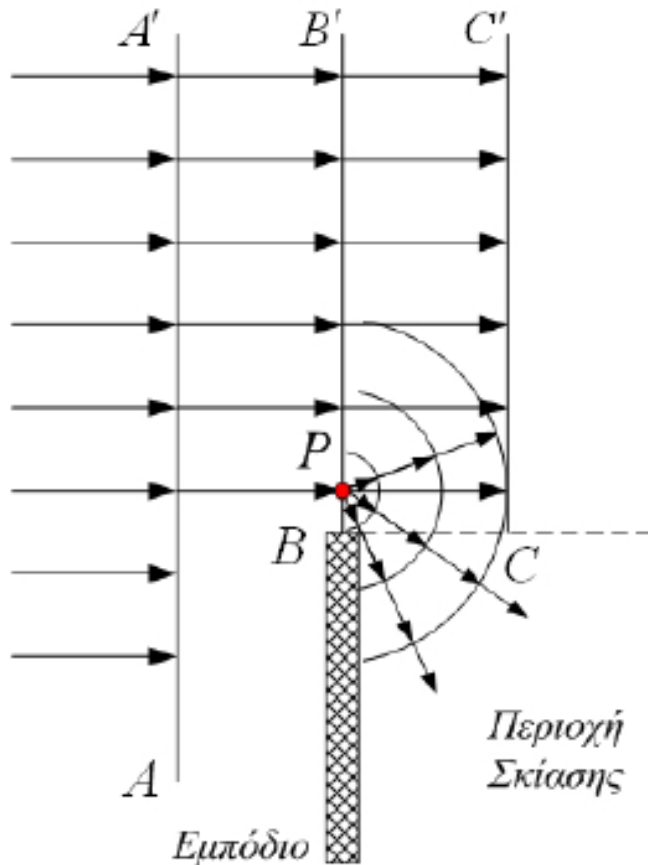
82



- Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μία εκπομπή στην οποία ένα εμπόδιο τελείως απορροφητικό εισέρχεται στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.
- Με βάση τη γεωμετρική οπτική, η οποία λαμβάνει υπόψη της μόνο την απευθείας συνιστώσα καθώς και τις ανακλώμενες ή διαθλώμενες ακτίνες, υποδεικνύει ότι στη σκιασμένη περιοχή δεν υπάρχει Η/Μ πεδίο

Περίθλαση σε Αιχμή

83



Τα κυλινδρικά κύματα που εκπέμπονται από τις δευτερεύουσες πηγές του κυματικού μετώπου BB' , θα εισέλθουν στη σκιασμένη περιοχή και το πεδίο σε κάθε σημείο αυτής της περιοχής θα προκύψει ως υπέρθεση των κυλινδρικών αυτών κυμάτων. Η **καμπύλωση** των ραδιοκυμάτων γύρω από την αιχμή του εμποδίου καλείται **περίθλαση**.

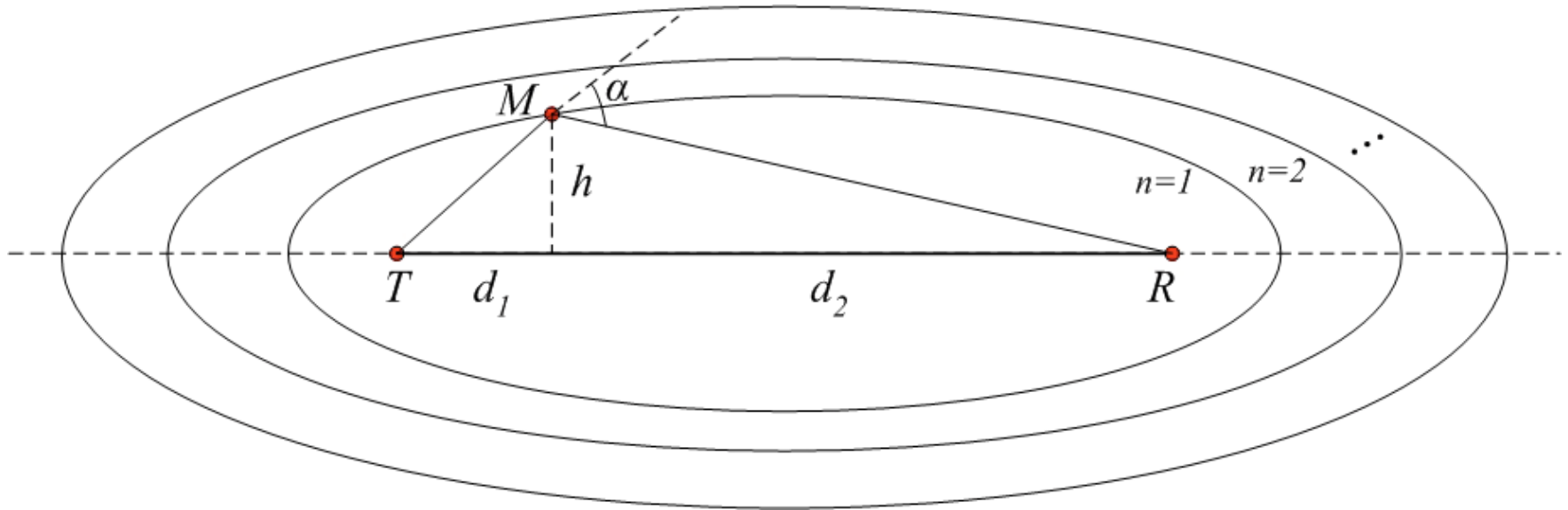
Περίθλαση σε Αιχμή

84

- Σε υψηλές συχνότητες το φαινόμενο της περίθλασης όπως και εκείνα της ανάκλασης και της διάθλασης, είναι **τοπικά** και εξαρτώνται από:
 - τη γεωμετρία του αντικειμένου στο σημείο της περίθλασης (π.χ. σφήνα, ακμή, καμπύλη επιφάνεια, κλπ.)
 - το πλάτος, τη φάση και την πόλωση του προσπίπτοντος πεδίου στο σημείο της περίθλασης.

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel

85



- Ελλειψοειδή εκ περιστροφής γύρω από την ευθεία που συνδέει πομπό και δέκτη.
- Θεωρούμε ότι:

$$TM + MR = TR + n \frac{\lambda}{2}$$

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel

86

$$TR = d_1 + d_2$$

$$TM = \sqrt{d_1^2 + h^2} = d_1 \sqrt{1 + \frac{h^2}{d_1^2}} \approx d_1 + \frac{h^2}{2d_1} \quad (h \ll d_1)$$

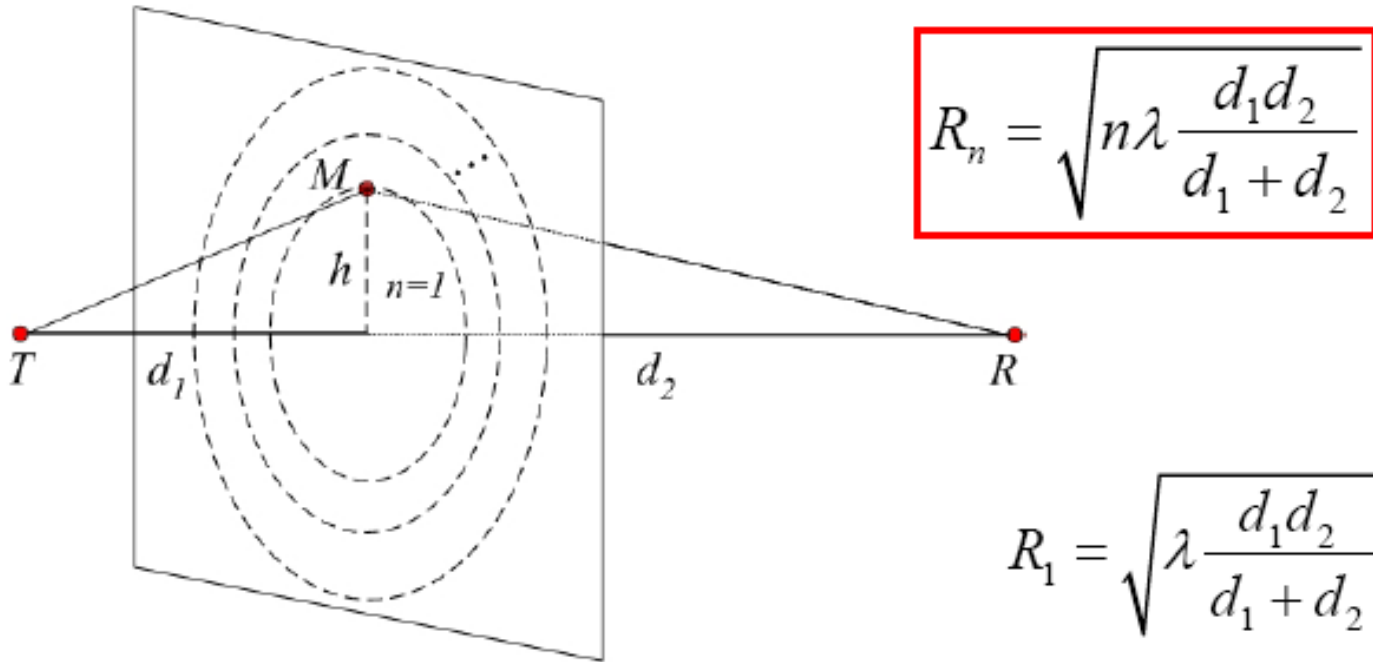
$$MR = \sqrt{d_2^2 + h^2} = d_2 \sqrt{1 + \frac{h^2}{d_2^2}} \approx d_2 + \frac{h^2}{2d_2} \quad (h \ll d_2)$$

Διαφορά δρόμων $\Delta = n \frac{\lambda}{2}$

Διαφορά φάσης $\phi = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} n \frac{\lambda}{2} = n\pi$

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel

87



$$R_1 = \sqrt{\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

Συντελεστής Περίθλασης Fresnel-Kirchoff:

$$u = \sqrt{2} \frac{h}{R_1}$$

Ελλειψοειδή και Ζώνες Fresnel

88

- Γενικεύοντας τη θεώρηση της τομής των ελλειψοειδών Fresnel με οποιοδήποτε επίπεδο, προκύπτουν οι ζώνες Fresnel, οι οποίες ορίζονται ως η περιοχή μεταξύ δύο διαδοχικών καμπυλών που προκύπτουν από την τομή.
- Όταν $d_1=d_2$

$$R_{n\max} = \sqrt{n\lambda \frac{d_1^2}{2d_1}} = \sqrt{\frac{n\lambda}{2} d_1} = \sqrt{\frac{n\lambda}{4} d}$$

$$d = 1\text{Km} \quad f = 900\text{MHz} \quad 2R_{1\max} = 18.3\text{m}$$

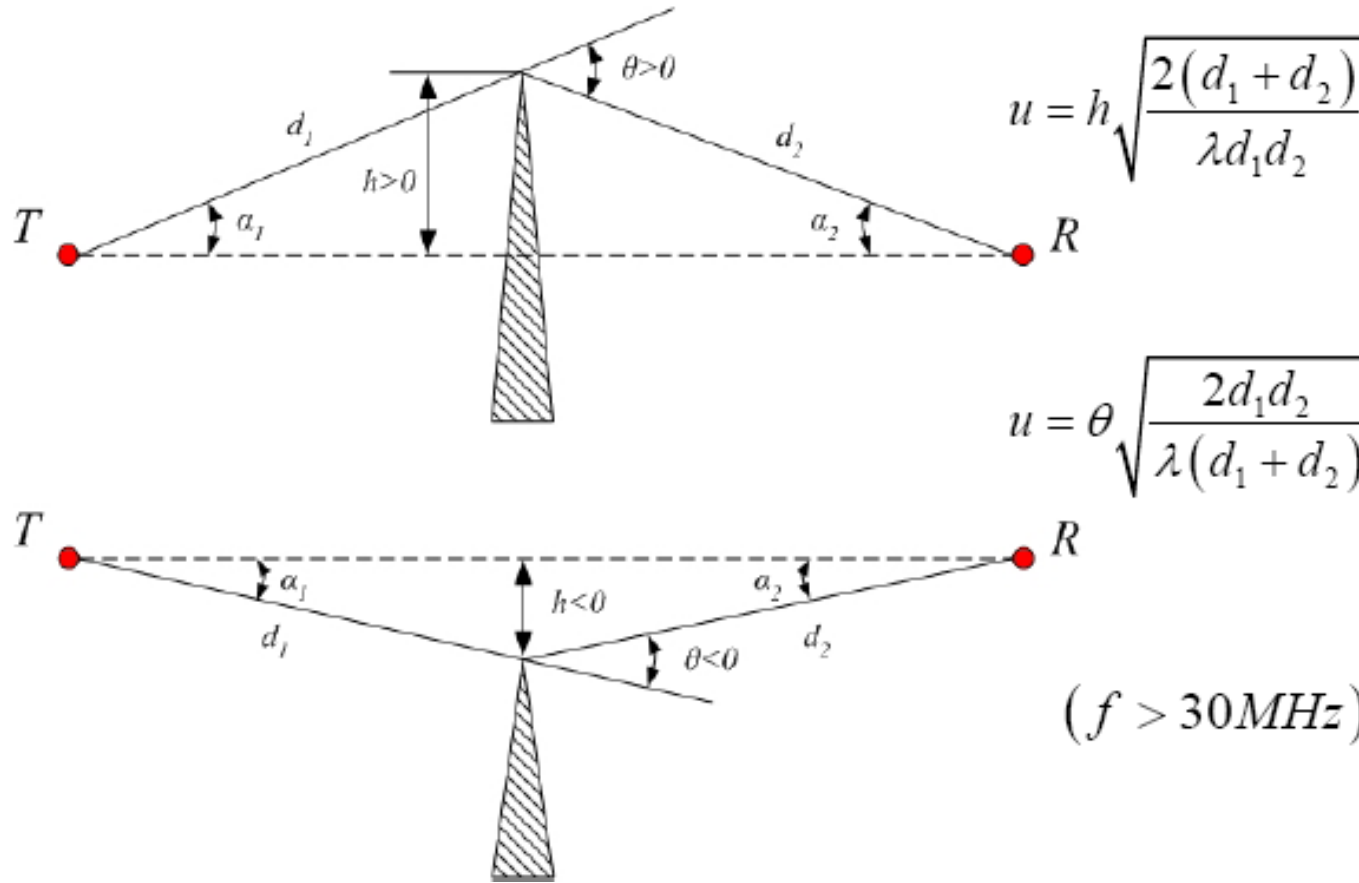
$$f = 1800\text{MHz} \quad 2R_{1\max} = 12.9\text{m}$$

$$f = 5700\text{MHz} \quad 2R_{1\max} = 7.25\text{m}$$

Εάν υπάρχει εμπόδιο μέσα στην πρώτη ζώνη Fresnel μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη υποβάθμιση της ποιότητας επικοινωνίας, ακόμα και εάν δεν εμποδίζει την διάδοση οπτική επαφής

Knife-Edge Diffraction

89



Παράμετρος
περίθλασης

Knife-Edge Diffraction

90

- Το περιθλώμενο από την ευθεία ακμή κύμα είναι κυλινδρικό.
- Το λαμβανόμενο μιγαδικό πεδίο στον δέκτη εκφρασμένο ως προς την τιμή του ελεύθερου χώρου, δηλαδή του λαμβανόμενου αν το εμπόδιο ήταν πολύ μακριά από την ευθεία οπτικής επαφής, δίνεται από τη σχέση

$$\frac{E}{E_o} = \frac{(1+j)}{2} \int_u^{\infty} \exp\left(-j\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$$

Knife-Edge Diffraction

91

- Μιγαδικό ολοκλήρωμα Fresnel

$$\int_u^{\infty} \exp\left(-j\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \int_u^{\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt - j \int_u^{\infty} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$$

$$\int_u^{\infty} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - \int_0^u \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - C(u)$$

$$\int_u^{\infty} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - \int_0^u \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = \frac{1}{2} - S(u)$$

$$F(u) = \int_0^u \exp\left(-j\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = C(u) - jS(u)$$

Knife-Edge Diffraction

92

$$\begin{aligned}\frac{E}{E_o} &= \frac{(1+j)}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(u) \right] - j \left[\frac{1}{2} - S(u) \right] \right\} \\ &= \frac{(1+j)}{2} \left[\frac{1}{2}(1-j) - C(u) - jS(u) \right] \\ &= \frac{1}{2} [1 - (1+j)F(u)]\end{aligned}$$

$$L_{k.e.} = \left| \frac{E_o}{E} \right|^2 = \frac{4}{|1 - (1+j)F(u)|} = \frac{4}{\left| 1 - (1+j)F\left(\sqrt{2} \frac{h}{R_1}\right) \right|}$$

Knife-Edge Diffraction

93

Για $(u \geq -0.7)$ σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R P.526

$$L_{k.e.} (dB) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(u - 0.1)^2 + 1} + u - 0.1 \right)$$

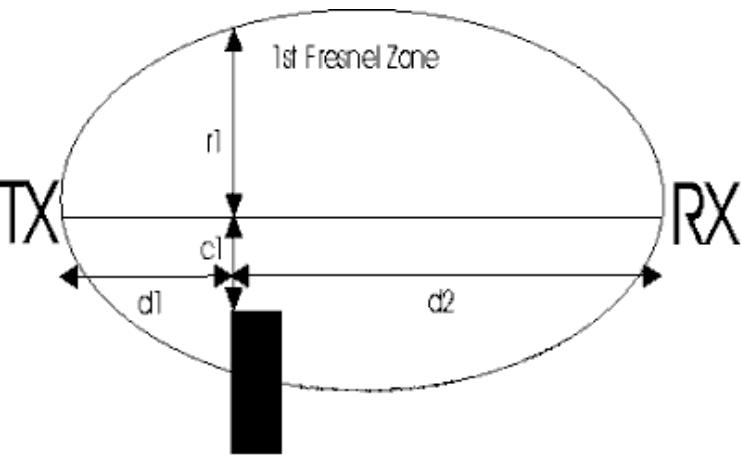
Για $(u = 0)$ ή $(h = R_1)$

$$F(0) = 0 \quad E = \frac{E_o}{2} \quad \text{Απώλειες 6dB}$$

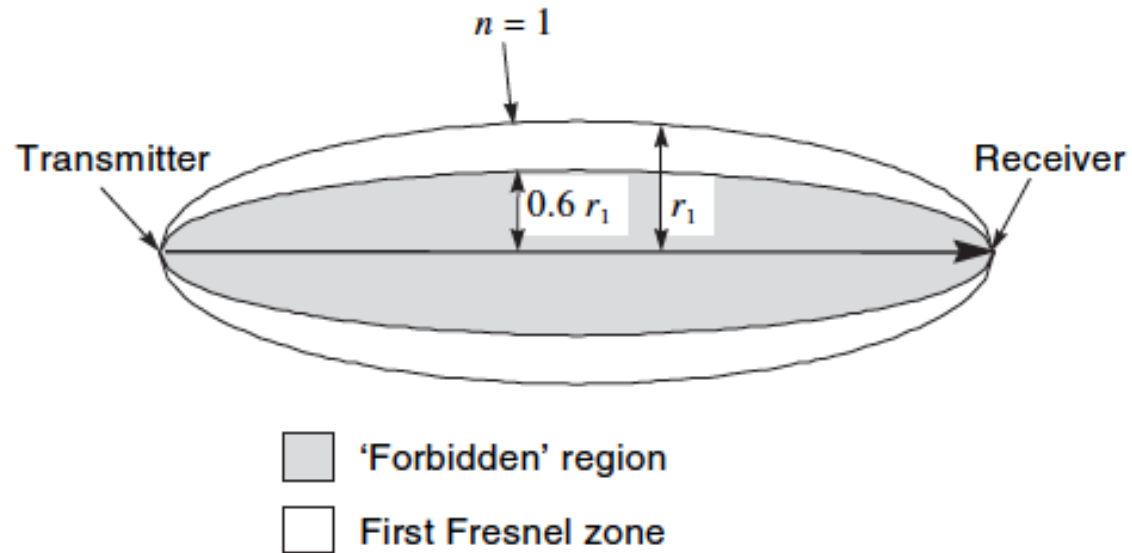
Πρακτικός Κανόνας: Για μηδενικές απώλειες λόγω περίθλασης κράτα «καθαρό» χωρίς εμπόδια το 56% της 1ης Ζώνης Fresnel ($u \approx -0.8$)

Knife-Edge Diffraction

94



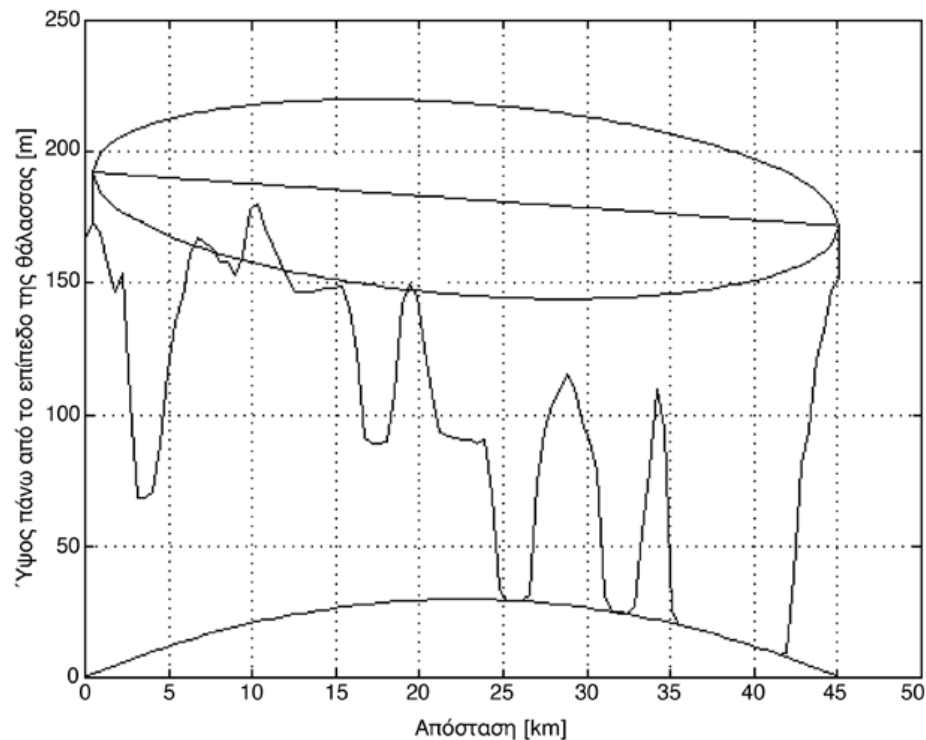
Nasty obstacle must be more than 60% from the center line of TX to RX ($c_1 \Rightarrow r_1 \times 0.6$)



Πρακτικός Κανόνας: Για μηδενικές απώλειες λόγω περίθλασης κρατά «καθαρό» χωρίς εμπόδια το 56% της 1ης Ζώνης Fresnel ($u \approx -0.8$)

Knife-Edge Diffraction

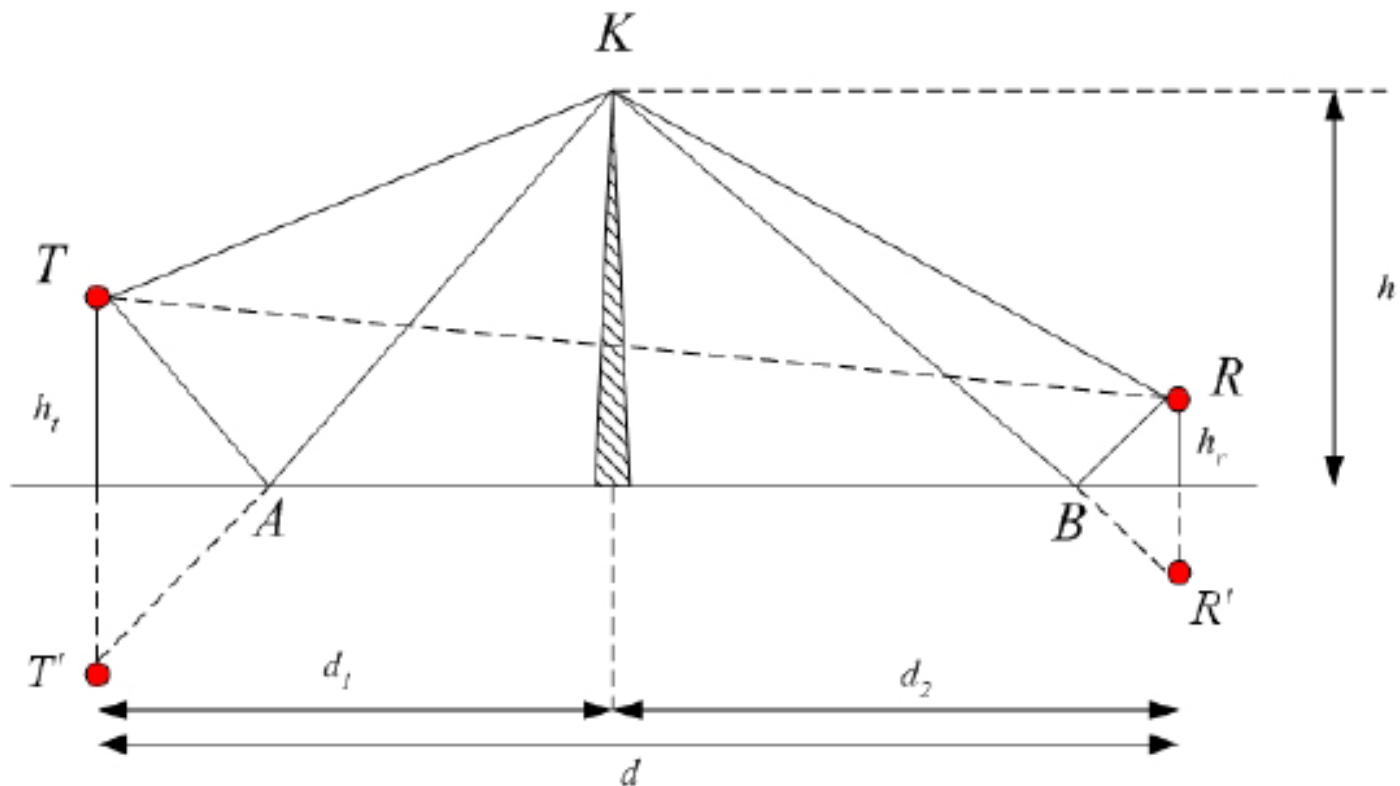
95



Πρακτικός Κανόνας: Για μηδενικές απώλειες λόγω περίθλασης κρατά «καθαρό» χωρίς εμπόδια το 56% της 1ης Ζώνης Fresnel ($u \approx -0.8$)

Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

96



Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

97

$$E_{total} = \sum_{n=1}^4 E_{on} F_n$$

E_{o1}	το πεδίο για το μονοπάτι	TR
E_{o2}	το πεδίο για το μονοπάτι	$T'R$
E_{o3}	το πεδίο για το μονοπάτι	TR'
E_{o4}	το πεδίο για το μονοπάτι	$T'R'$

$$E_{on} \sim \frac{e^{-jk r_n}}{r_n} \quad n = 1, \dots, 4$$

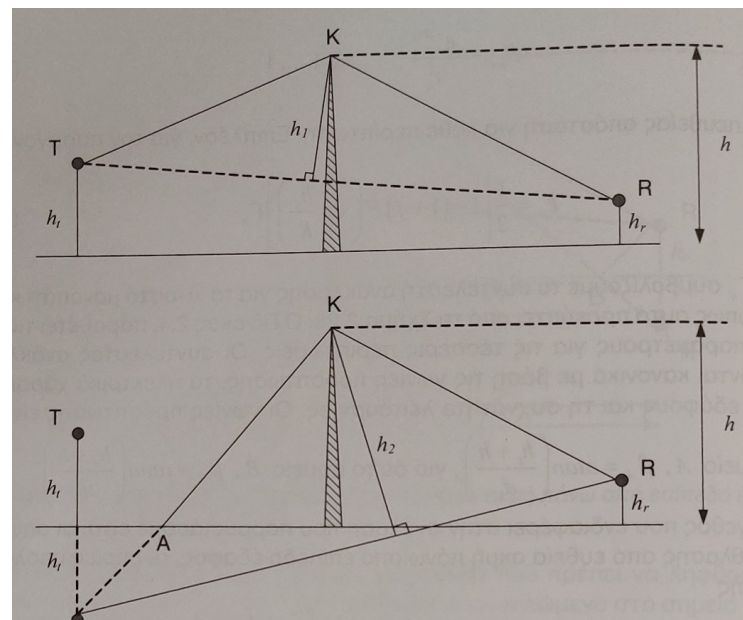
$$\begin{aligned} E_{total} &= E_{o1} F_1 + E_{o2} F_2 + E_{o3} F_3 + E_{o4} F_4 \\ &= E_{o1} \frac{E_{d1}}{E_{o1}} + E_{o2} \frac{E_{d2}}{E_{o2}} + E_{o3} \frac{E_{d3}}{E_{o3}} + E_{o4} \frac{E_{d4}}{E_{o4}} \end{aligned}$$

Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

98

$$L_{k.e.f.e.} (dB) = 20 \log \left| \frac{E_{o1}}{E_{total}} \right| = -20 \log \left| \frac{E_{total}}{E_{o1}} \right|$$

$$F_n = \frac{1}{2} \left[1 - (1 + j) F \left(\sqrt{2} \frac{h_n}{R_1} \right) \right] \Gamma_n$$



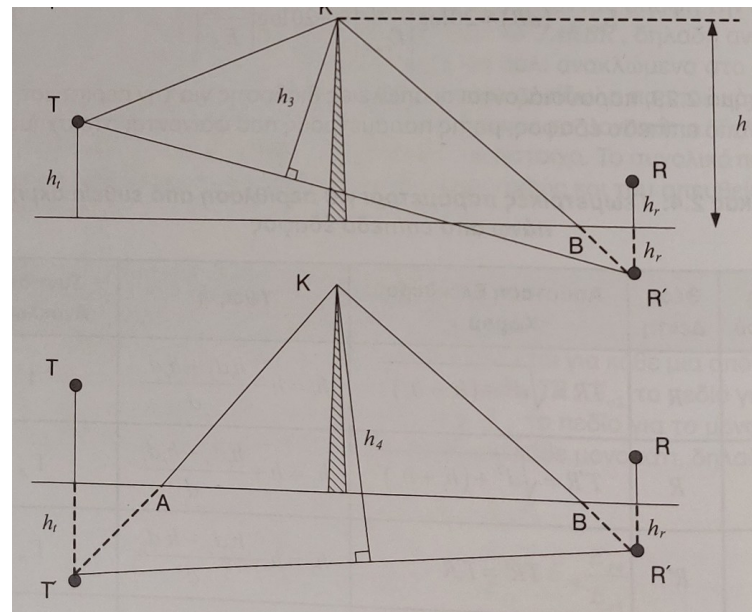
Περίπτωση	Θέση Πομπού	Θέση Δέκτη	Απόσταση Ελεύθερου Χώρου, r_n	Ύψος h_n	Συντελεστής Ανάκλασης
1	T	R	$TR = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2}$	$h_1 = h - \frac{h_t d_2 + h_r d_1}{d}$	1
2	T'	R	$T'R = \sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2}$	$h_2 = h + \frac{h_t d_2 - h_r d_1}{d}$	Γ_A

Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

99

$$L_{k.e.f.e.} (dB) = 20 \log \left| \frac{E_{o1}}{E_{total}} \right| = -20 \log \left| \frac{E_{total}}{E_{o1}} \right|$$

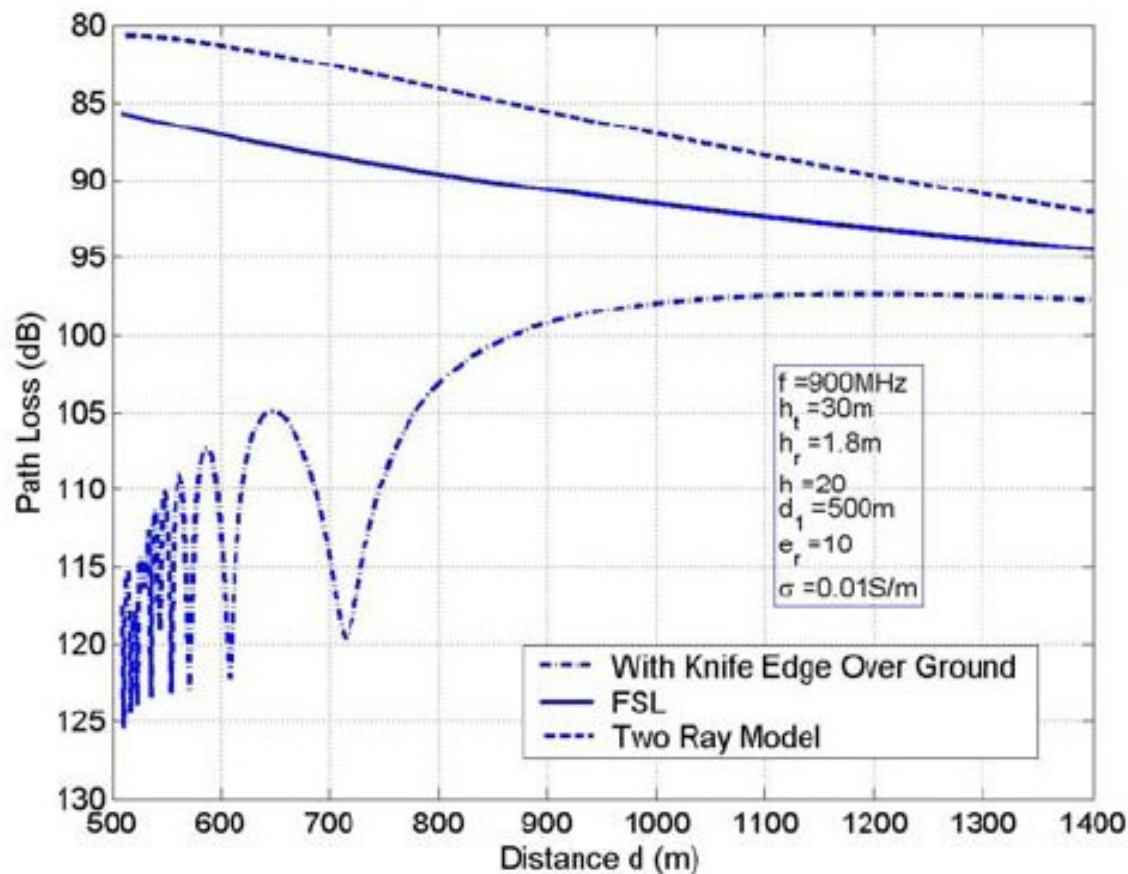
$$F_n = \frac{1}{2} \left[1 - (1 + j) F \left(\sqrt{2} \frac{h_n}{R_1} \right) \right] \Gamma_n$$



3	T	R'	$TR' = T'R$	$h_3 = h - \frac{h_t d_2 - h_r d_1}{d}$	Γ_B
4	T'	R'	$T'R' = TR$	$h_4 = h + \frac{h_t d_2 + h_r d_1}{d}$	$\Gamma_A \Gamma_B$

Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

100



Περίθλαση από Ευθεία Ακμή Πάνω από Επίπεδο Έδαφος

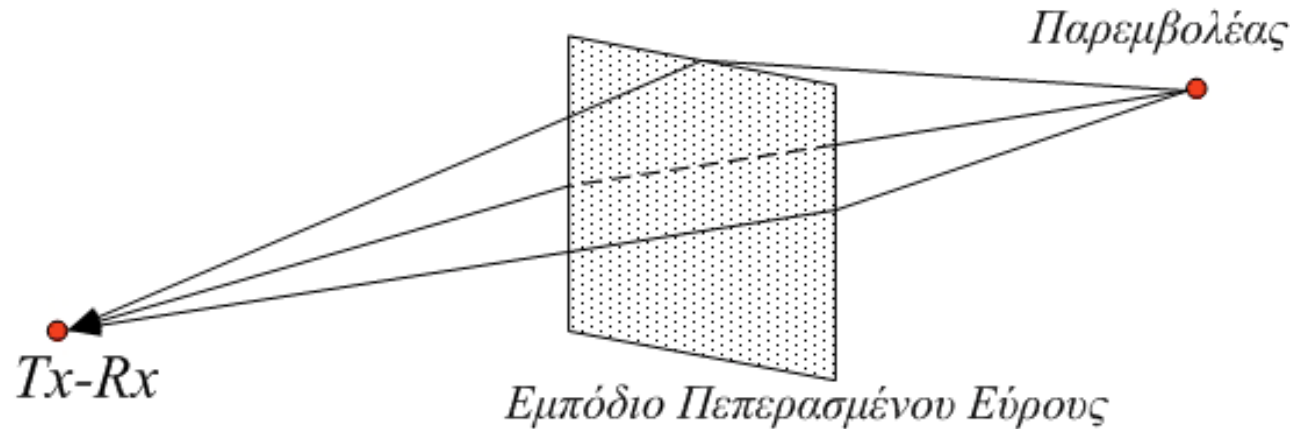
101

- Προσέγγιση του Lee:

$$L(v) \text{ (dB)} = \begin{cases} -20 \log(0.5 - 0.62v) & -0.8 < v < 0 \\ -20 \log[0.5 \exp(-0.95v)] & 0 < v < 1 \\ -20 \log[0.4 - \{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2\}^{1/2}] & 1 < v < 2.4 \\ -20 \log(0.225/v) & v > 2.4 \end{cases}$$

Περίθλαση σε Εμπόδιο Πεπερασμένου Εύρους

102



- **Βήμα 1^ο**: Υπολογισμός της γεωμετρικής παραμέτρου περίθλασης για κάθε μια από τις τρεις ακμές.
- **Βήμα 2^ο**: Υπολογισμός του παράγοντα απωλειών, με βάση την προσεγγιστική σχέση για την περίθλαση από ευθεία γραμμή

$$L_{k.e.} (dB) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(u - 0.1)^2 + 1} + u - 0.1 \right)$$

Περίθλαση σε Εμπόδιο Πεπερασμένου Εύρους

103

$$l_{k.e.}(u_i) = 10^{L_{k.e.}(u_i)/20}$$

- **Βήμα 3^ο**: Υπολογισμός της ελάχιστης τιμής

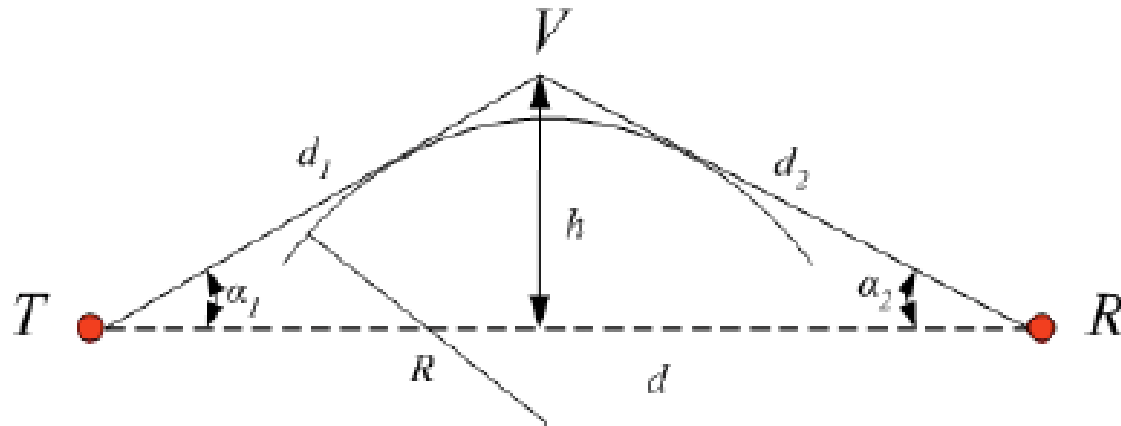
$$L_{\min}(dB) = -20 \log \left[\frac{1}{l_{k.e.}(u_1)} + \frac{1}{l_{k.e.}(u_2)} + \frac{1}{l_{k.e.}(u_3)} \right]$$

- **Βήμα 4^ο**: Υπολογισμός της μέσης τιμής

$$L_{av.}(dB) = -10 \log \left[\frac{1}{l_{k.e.}^2(u_1)} + \frac{1}{l_{k.e.}^2(u_2)} + \frac{1}{l_{k.e.}^2(u_3)} \right]$$

Περίθλαση από Στρογγυλεμένο Εμπόδιο

104



$$L_{r.o.} (dB) = L_{k.e.} (dB) + T(m,n) (dB)$$

$$L_{k.e.} (dB) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(u-0.1)^2 + 1} + u - 0.1 \right) \quad u = \sqrt{2} \frac{h}{R_1}$$

$T(m, n)$: Επιπλέον εξασθένιση

Περίθλαση από Στρογγυλεμένο Εμπόδιο

105

$$T(m, n) = km^b = (8.2 + 12n)m^{0.73 + 0.27[1 - \exp(-1.43n)]}$$

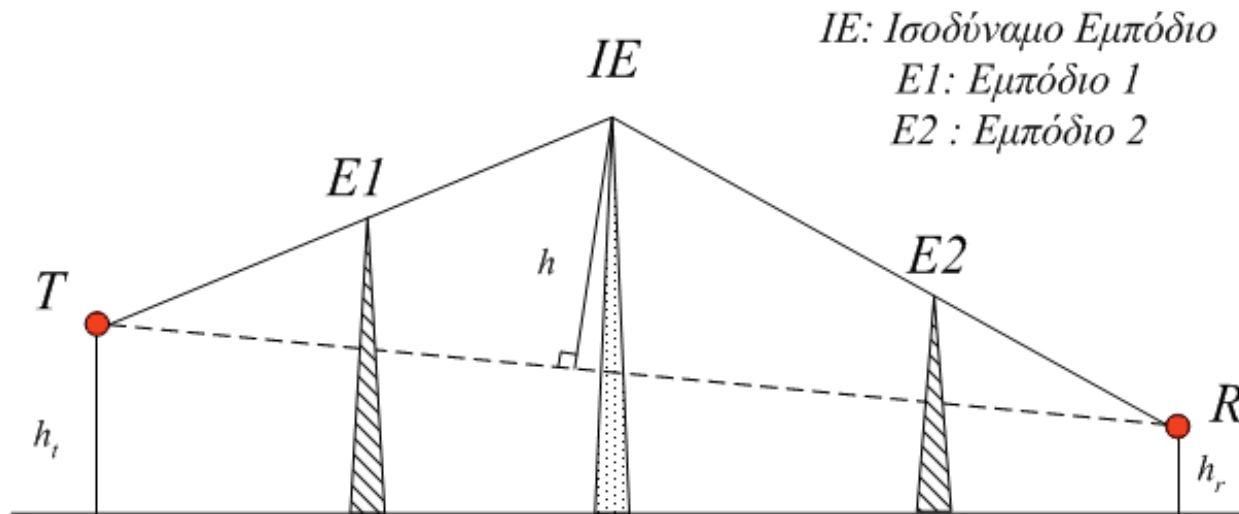
$$m = R \frac{\left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right)}{\left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{1/3}}$$

$$n = h \frac{\left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{2/3}}{R}$$

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

106

□ Προσέγγιση Bullington



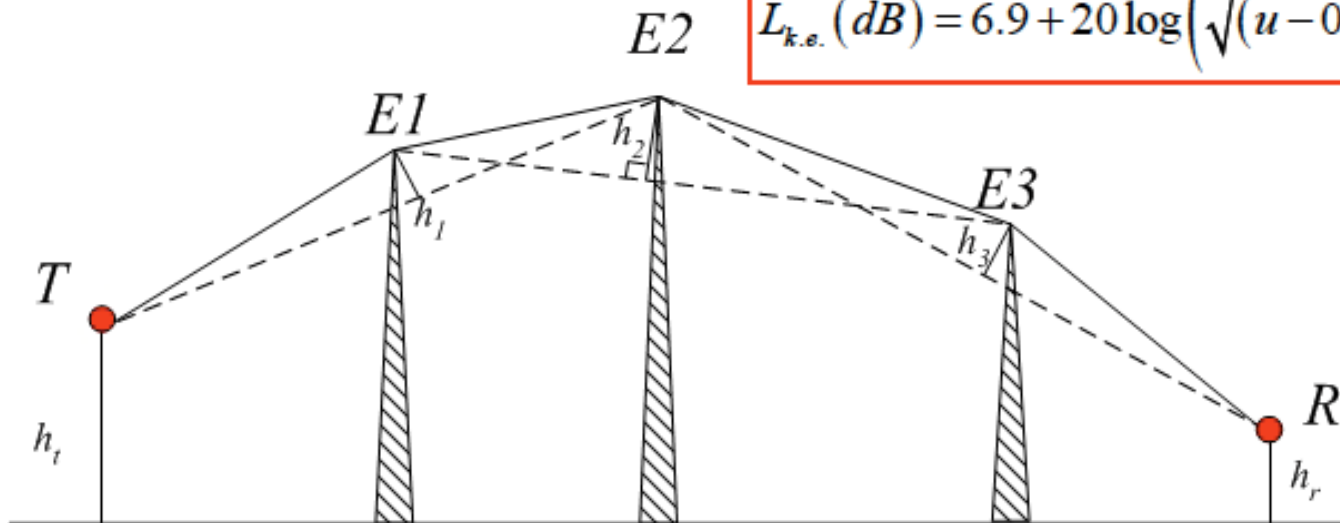
- Αν προσδιοριστεί το ισοδύναμο εμπόδιο, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των απωλειών περίθλασης οι τύποι του μοντέλου περίθλασης από ευθεία ακμή.

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

107

□ Προσέγγιση Epstein-Peterson

$$L_{k.e.} (dB) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(u-0.1)^2 + 1} + u - 0.1 \right)$$

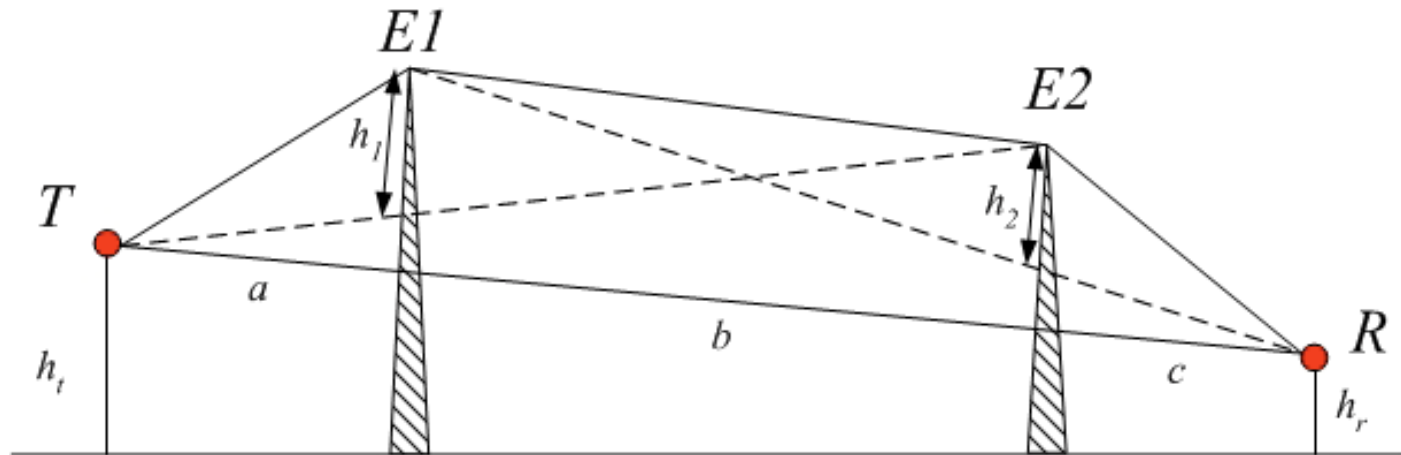


- Υπολογίζουμε τις απώλειες περίθλασης για κάθε εμπόδιο χωριστά χρησιμοποιώντας την εξίσωση για μοντέλο περίθλασης από ευθεία ακμή και στο τέλος αθροίζουμε όλες τις απώλειες.

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

108

□ Διόρθωση Millington

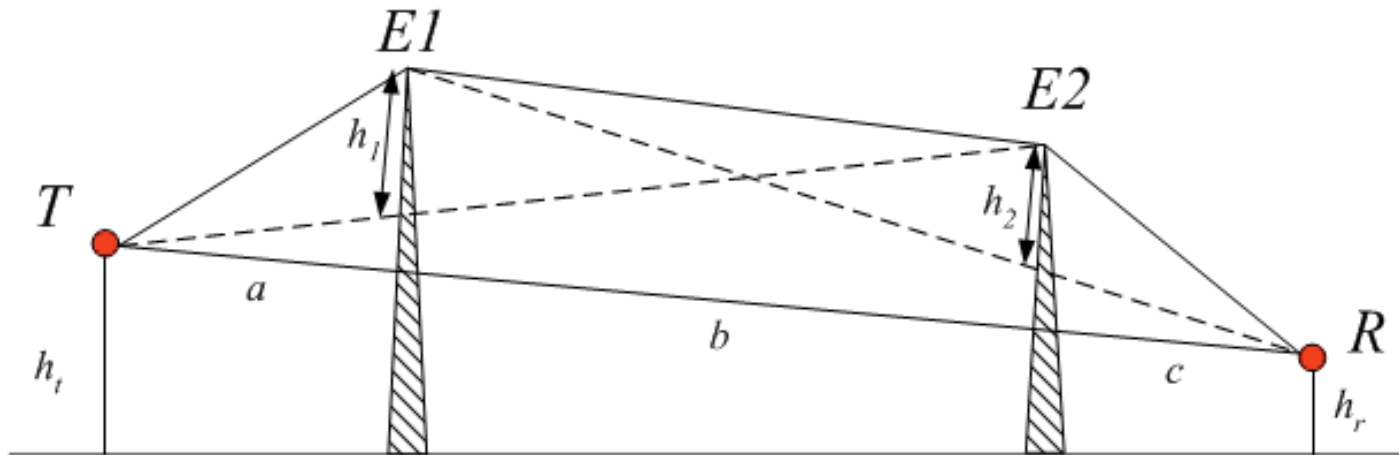


- Στην περίπτωση που τα εμπόδια είναι δύο, έχει αποδειχθεί από τον Millington ότι η προσέγγιση των Epstein-Peterson δεν είναι ικανοποιητική, αν τα δύο εμπόδια βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

109

□ Διόρθωση Millington



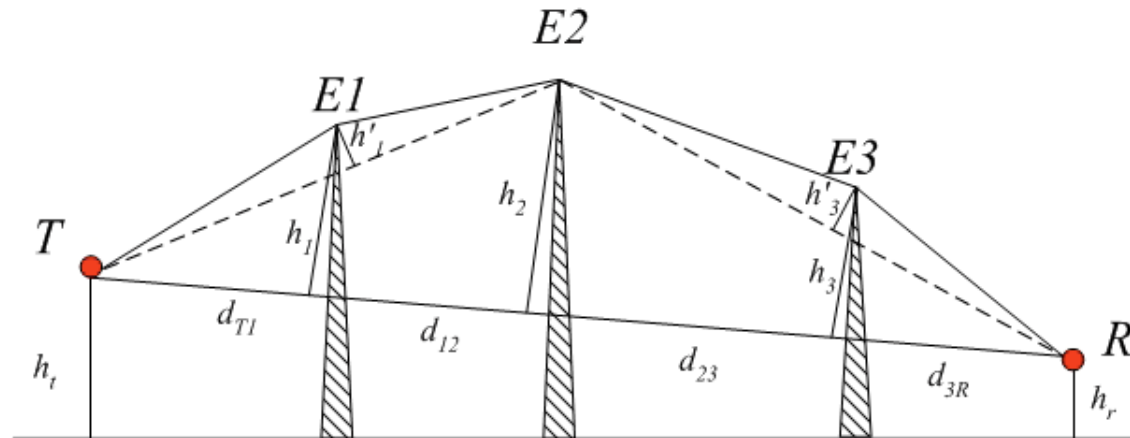
$$L_c(dB) = 10 \log \left[\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right]$$

$$L(dB) = L_{k.e.1}(dB) + L_{k.e.2}(dB) + L_c(dB)$$

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

110

- Προσέγγιση του Deygout ή Μέθοδος Κύριας Ακμής



- Βρίσκουμε την ακμή με τη μέγιστη παράμετρο u

$$u_n = h_n \sqrt{\frac{2(d_{n-1,n} + d_{n,n+1})}{\lambda d_{n-1,n} d_{n,n+1}}}$$

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

111

- Υπολογίζουμε τις απώλειες περίθλασης λόγω της κύριας ακμής (η E2 στο σχήμα)

$$L_{k.e.2}(d_{T1} + d_{12}, d_{23} + d_{3R}, h_2)$$

- Σε αυτές προσθέτουμε τις απώλειες που προκύπτουν από τις υπόλοιπες ακμές ως εξής

$$L_{k.e.1}(d_{T1}, d_{12}, h'_1) \quad L_{k.e.3}(d_{23}, d_{3R}, h'_3)$$

- Δηλαδή για όλες τις ακμές που προηγούνται της κύριας θέτουμε ως πομπό την προηγούμενη ακμή ή τον πομπό αν πρόκειται για την πρώτη ακμή και ως δέκτη θέτουμε την κύρια ακμή.

Περίθλαση από Πολλαπλές Ευθείες Ακμές

112

- Για όλες τις ακμές που έπονται της κύριας θεωρούμε ως πομπό πάλι την προηγούμενη ακμή και ως δέκτη τον πραγματικό δέκτη.
- Πολλές φορές χρησιμοποιούμε τα ύψη.

