



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

# Κινητές και Δορυφορικές Επικοινωνίες

Περιβάλλον Διάδοσης στα Συστήματα Κινητών  
Επικοινωνιών

Δημοσθένης Βουγιούκας (dnougiou@aegean.gr)

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών & Επικοινωνιακών Συστημάτων



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

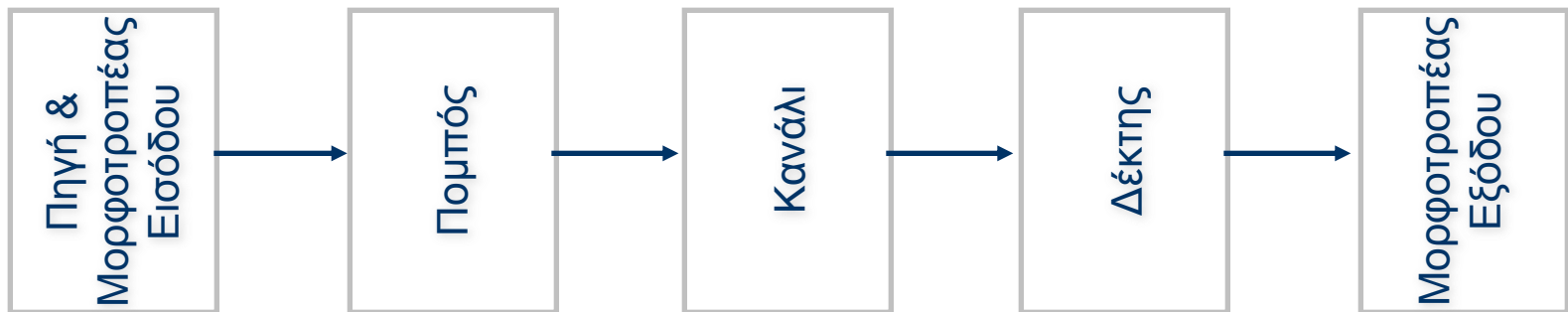


# Δομή της Διάλεξης

- ◆ Εισαγωγή στα προβλήματα ασύρματης διάδοσης
- ◆ Μηχανισμοί διάδοσης
- ◆ Φαινόμενα διάδοσης
- ◆ Διαλείψεις – Ένα χωρικό φαινόμενο
- ◆ Είδη Διαλείψεων
- ◆ Χρονική Διασπορά και ISI
- ◆ Μοντελοποίηση Ραδιοδιαύλου
- ◆ Απώλειες Διάδοσης

# Βασικό Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα

- ◆ Τα ηλεκτρικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα σχεδιάζονται για να αποστέλλουν μηνύματα από μία πηγή σε έναν ή περισσότερους παραλήπτες
- ◆ Η έξοδος της πηγής δεν είναι ντετερμινιστική.
  - *αν ήταν δεν θα υπήρχε λόγος αποστολής του μηνύματος...*



# Βασικό Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα

- ◆ Πηγή πληροφορίας: φωνή, κείμενο, εικόνες, video, data.
- ◆ Μορφοτροπέας (Transducer): μικρόφωνο, κάμερα, ηχείο, οθόνη
  - μετατροπέας πληροφορίας σε ηλεκτρικό σήμα & αντίθετα
- ◆ Πομπός: μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε κάποια μορφή κατάλληλη για επικοινωνία.
  - Τοποθετεί τις συχνότητες του σήματος στην κατάλληλη ζώνη
  - Διαμορφώνει: εκμεταλλεύεται την πληροφορία του σήματος για να τροποποιήσει τις ιδιότητες ενός φέροντος
    - Η διαμόρφωση επιτρέπει την χρήση του καναλιού από πολλούς χρήστες
  - Φιλτράρει και ενισχύει
  - Παρέχει την ακτινοβολία για ασύρματες μεταδόσεις

# Βασικό Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα

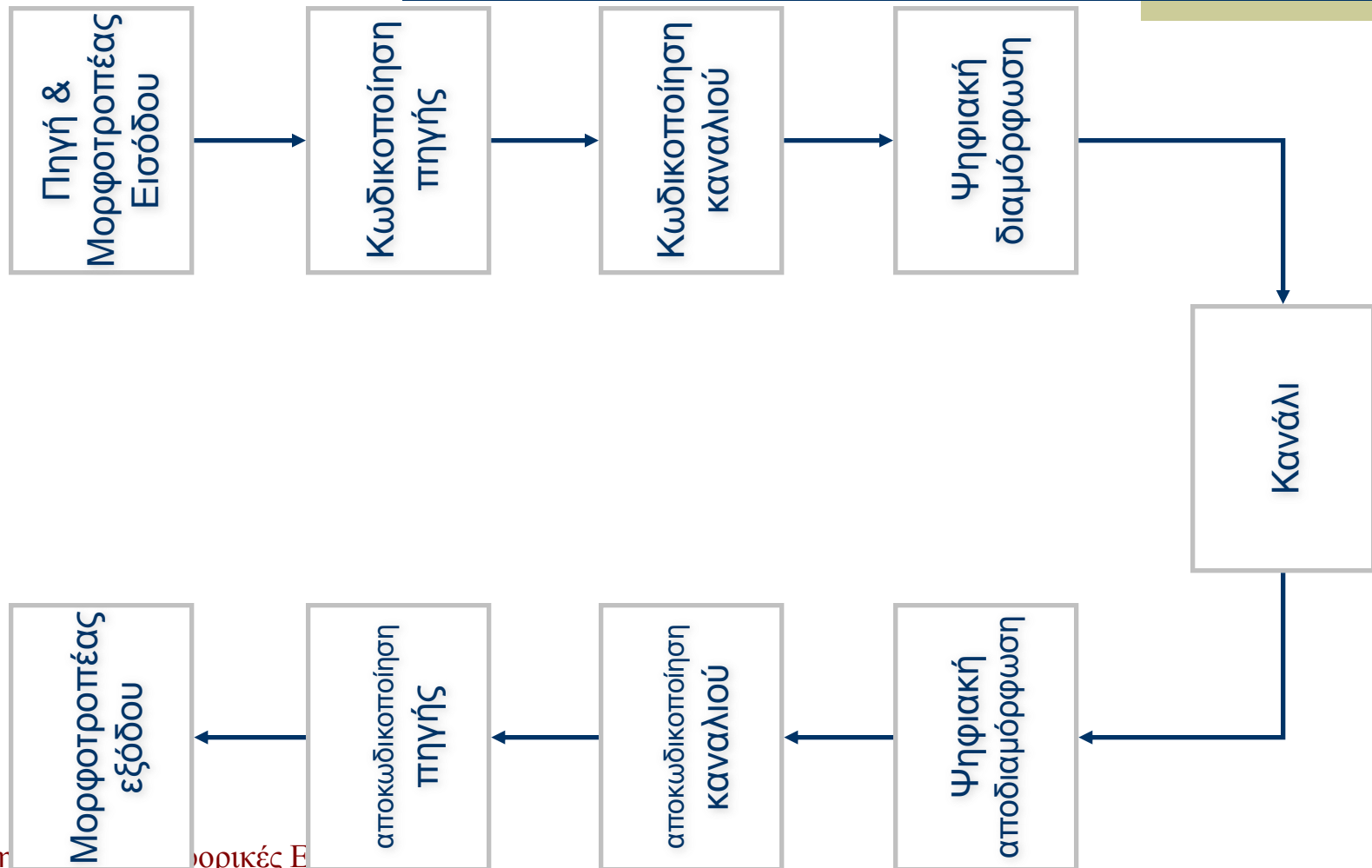
- ◆ Κανάλι: Το φυσικό μέσο μετάδοσης προκαλεί διάφορες παραμορφώσεις στο σήμα.
  - Προσθετικός θόρυβος / θερμικός θόρυβος
  - Απώλειες λόγω πολλαπλής διαδρομής (multipath) εξασθενούν και παραμορφώνουν το σήμα
- ◆ Δέκτης : Πραγματοποιεί την ανάκτηση του μηνύματος, συγκεκριμένα:
  - Αποδιαμορφώνει το φέρον
  - Φιλτράρει το σήμα
  - Καταστέλλει το θόρυβο
  - Ανίχνευση των σύμβολων του εκπεμφθέντος μηνύματος

# Σύστημα ψηφιακής μετάδοσης

- ◆ Σήματα συνεχούς χρόνου: Αναλογικά σήματα – αναλογικό σύστημα αναλογικές πηγές. Η πιστότητα του σήματος όμως ελέγχεται καλύτερα με ψηφιακή μετάδοση.
- ◆ Ψηφιακές Επικοινωνίες – Σήματα διακριτού χρόνου
  - Το προηγούμενο σχήμα πρέπει να επεκταθεί για να περιλάβει μία βαθμίδα ψηφιοποίησης στον πομπό και μία ανασύνθεσης στον δέκτη.
  - Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η πηγή παράγει *ψηφία πληροφορίας*
  - Ανάγκη για κωδικοποίηση πηγής:
    - Αναπαράσταση μηνύματος της πηγής με κατά το δυνατό λιγότερα *ψηφία*.
    - Μετασχηματισμός της εξόδου της πηγής σε μια αποδοτικότερη παράσταση.

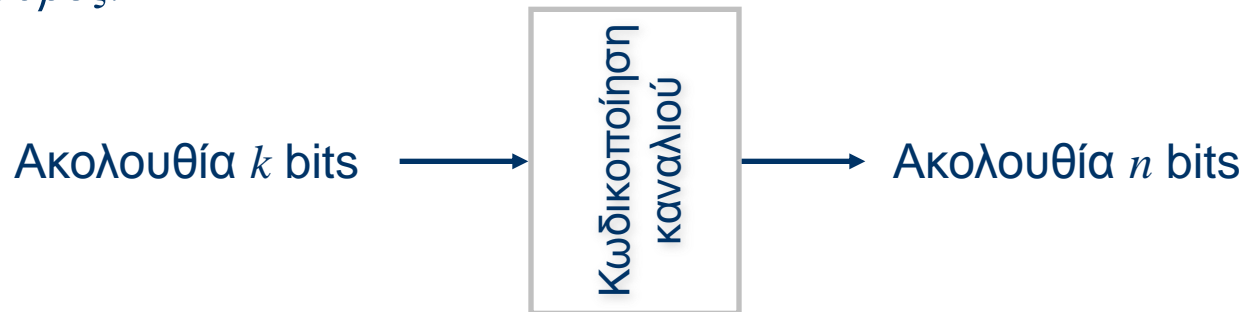


# Σχηματικό διάγραμμα Ψηφιακού Τηλεπικοινωνιακού Συστήματος



# Κωδικοποίηση Καναλιού

- ◆ Κωδικοποίηση Καναλιού: εισάγει ελεγχόμενη πλεονάζουσα πληροφορία με σκοπό να αντιμετωπίσει τον θόρυβο και τις παρεμβολές στο κανάλι  
-Απλούστερη μορφή κωδικοποιητή καναλιού: επανάληψη κάθε  $bit$   $m$  φορές.



Πλεονασμός κώδικα:  $k/n$

Ρυθμός κώδικα:  $n/k$

# Ψηφιακή Διαμόρφωση

- ◆ Αντιστοιχεί τα ψηφία της πληροφορίας σε ηλεκτρικά σήματα
- ◆ Π.χ.
  - $0 \rightarrow S_0(t)$
  - $1 \rightarrow S_1(t)$
- ◆ Γενικά για την κωδικοποίηση των  $b$  ψηφίων πληροφορίας χρειάζονται  $M=2^b$  κυματομορφές (ηλ. σήματα).
- ◆ Ο αποδιαμορφωτής επεξεργάζεται το λαμβανόμενο σήμα – που έχει παραμορφωθεί από το κανάλι και αποφασίζει για την τιμή του εκπεμφθέντος συμβόλου.

# Ασύρματο κανάλι

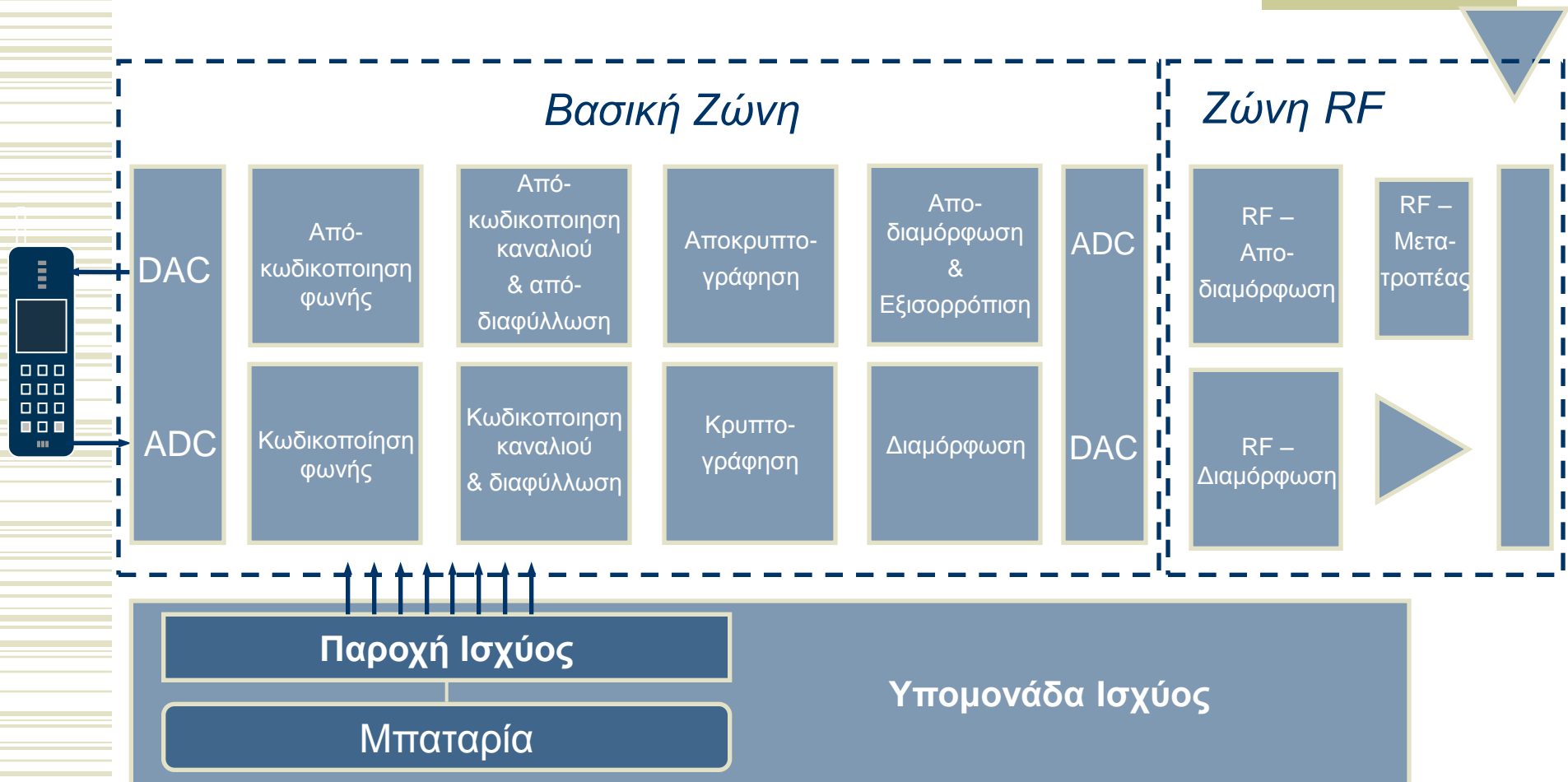
- ◆ Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπέμπεται στο μέσο με κεραία
- ◆ Για αποδοτική ακτινοβολία απαιτείται κεραία μακρύτερη από το  $1/10$  του μήκους κύματος.
- ◆ Τύποι διάδοσης (*propagation*)
  1. Διάδοση κύματος εδάφους (*ground wave propagation*)
    - στις VLF η γη δρα ως κυματοδηγός
    - τα σήματα 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. 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

# Διάγραμμα Λειτουργίας Ενός Πομποδέκτη



# Ασύρματη Διάδοση

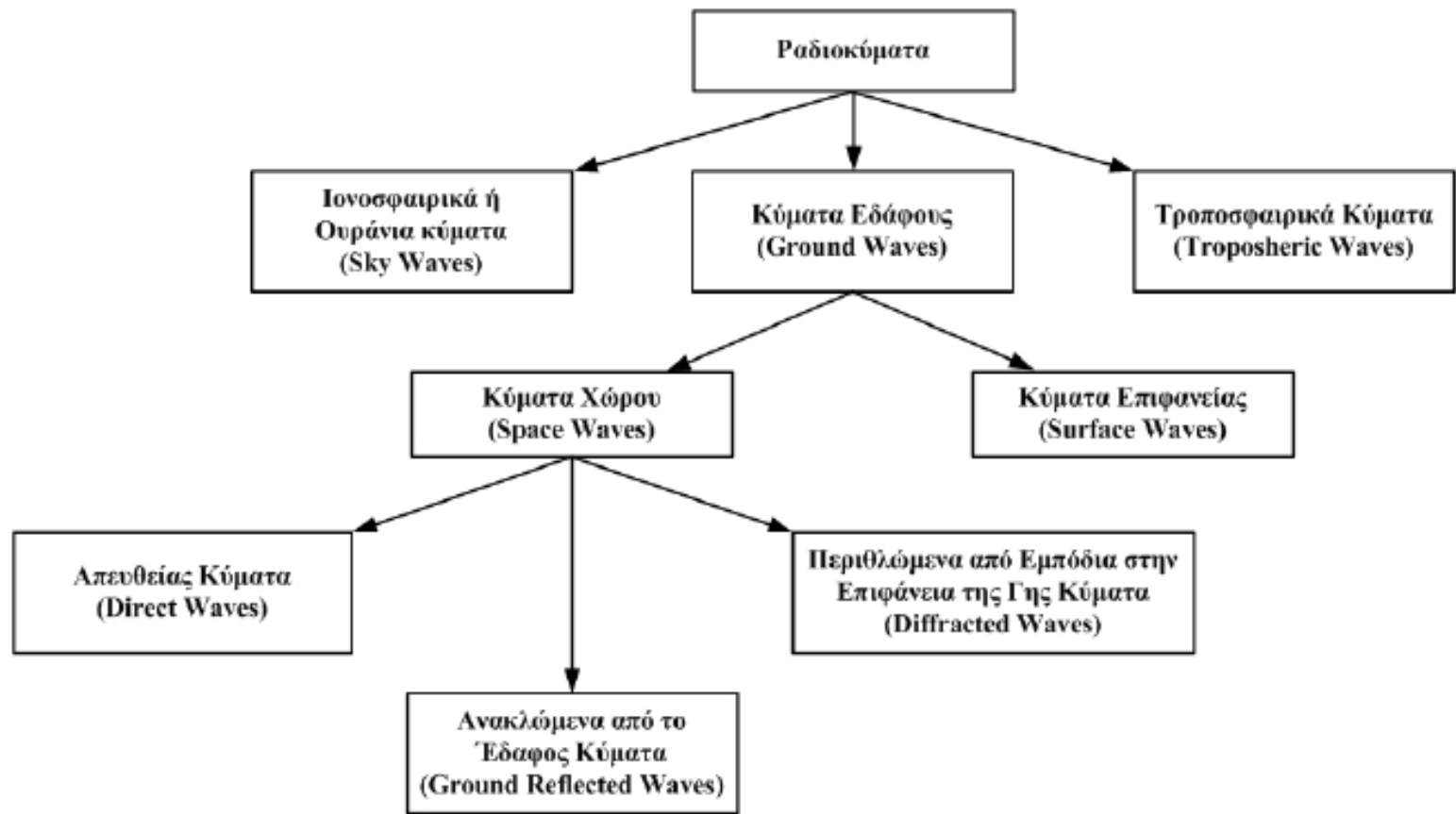
- ◆ Βασικά Προβλήματα Ασύρματης Διάδοσης
  - Θόρυβος
  - Παρεμβολές (ομοδιαυλικές και γειτονικών διαύλων)
  - Παρεμπόδιση και εξασθένηση από ανθρώπινες και φυσικές κατασκευές
  - Πολυδιαδρομική Διάδοση (multipaths)
- ◆ Τα παραπάνω θέτουν όρια
  - Στην έκταση της κάλυψης
  - Το ρυθμό μετάδοσης
  - Αξιοπιστία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

# Ασύρματη Διάδοση

- ◆ Η ατμόσφαιρα είναι το μέσο μετάδοσης.
- ◆ Διάδοση Η/Μ κυμάτων και μεταφορά σήματος πληροφορίας.
- ◆ Στα ΣΚΕ, 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 ΣΚΕ κυρίως χρησιμοποιούνται τα κύματα χώρου (space waves).



# Ασύρματη Διάδοση



# Ασύρματη Διάδοση

- ◆ 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.

# Ασύρματη Διάδοση

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

# Επίδραση Θορύβου

- ◆ Οι επιδόσεις ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος καθορίζονται από τη σηματοθορυβική σχέση (*Signal-to-Noise Ratio: SNR*)
- ◆ Εμφανίζεται και ως λόγος Φέροντος-προς-Θόρυβο (*Carrier-to-Noise Ratio: CNR*)
- ◆ Για την επίτευξη του επιθυμητού SNR στο δέκτη πρέπει:
  - Να υπολογίσουμε την ισχύ του θορύβου
  - Να υπολογίσουμε τις απώλειες διάδοσης
  - Να εκπέμπουμε με κατάλληλη ισχύ από τον πομπό.

# Επίδραση Θορύβου

- ◆ Ο SNR εκφράζεται σε deciBel (dB)

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{N}$$

- ◆ Συνήθεις τιμές για το SNR:
  - Ήχος τηλεφωνικής ποιότητας: 26 dB (= 400 φορές)
  - Ήχος hi-fi: 60 dB (=  $10^6$  φορές)
  - Τερματικό κινητής τηλεφωνίας: 14 - 18 dB (= 25 ως 63 φορές)
- ◆ Όλα τα ηλεκτρικά κυκλώματα παράγουν θόρυβο:



Ο παράγοντας του θορύβου (noise figure)  $F$  ορίζεται ως:

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$

και είναι πάντα  $F > 1$

# Ισχύς θορύβου στον δέκτη

- ♦ Η ενέργεια του θορύβου στον δέκτη είναι:

$$N_o = k \cdot T \cdot F \quad (\text{Joule})$$

$k = 1.38 \times 10^{-23}$  Joule/K (Η σταθερά του Boltzmann)

$T$  η θερμοκρασία του χώρου σε βαθμούς K

$F$  ο παράγοντας του θορύβου, τυπικά είναι 6-10dB (4 με 10 φορές).

- ♦ Η ισχύς του θορύβου σε Watt ( $1 \text{ Watt} = 1 \text{ Joule} \times 1 \text{ Hz}$ ) είναι:

$$N = B \cdot N_o = B \cdot k \cdot T \cdot F \quad (\text{Watt})$$

$B$  το εύρος φάσματος του δέκτη

$P$  watt σε dB μετατρέπονται ως:

$10 \cdot \log_{10}(P)$  dBW (ισχύς αναφοράς το 1W) ή:  $30 + 10 \cdot \log_{10}(P)$  dBm (ισχύς αναφοράς το 1mW)

# Όρια Χωρητικότητας για Ραδιοδιαύλους

- ◆ Θεώρημα του **Claude Shannon**
  - Αντιμετώπισε το πρόβλημα της αξιόπιστης μετάδοσης της πληροφορίας με στατιστικούς όρους.
  - Χρησιμοποίησε πιθανοτικά μοντέλα για τις πηγές πληροφορίας και τους τηλεπικοινωνιακούς διαύλους.
  - Υιοθέτησε ένα λογαριθμικό μέτρο για το πληροφοριακό περιεχόμενο της πηγής.

# Όρια Χωρητικότητας για Ραδιοδιαύλους

- ◆ Θεώρημα του **Claude Shannon**
  - Έδειξε ότι οι επιπτώσεις της περιορισμένης ισχύος ενός πομπού, του περιορισμένου εύρους ζώνης και του λευκού θορύβου μπορούν να συσχετιστούν με το διάυλο.
    - Δημιουργία της χωρητικότητας διαύλου.
  - Καθόρισε τη μέγιστη χωρητικότητα ενός διαύλου ιδανικού χωρίς σκιάσεις, διαλείψεις ή διασυμβολική παρεμβολή, υπό συνθήκες λευκού Gaussian θορύβου.



# Όρια Χωρητικότητας για Ραδιοδιαύλους

- ♦ Θεώρημα του **Claude Shannon**

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{BN_o} \right) = B \log_2 (1 + SNR)$$
$$= B \frac{\log_{10} (1 + SNR)}{\log_{10} 2} = 3.32B \log_{10} (1 + SNR)$$

όπου

- ♦  $C$ : χωρητικότητα διαύλου (*bits/sec*)
- ♦  $B$ : εύρος ζώνης (*Hz*)
- ♦  $S$ : μέση εκπεμπόμενη ισχύς
- ♦  $N_o/2$ : φασματική πυκνότητα ισχύος προσθετικού θορύβου
- ♦  $SNR$ : σηματοθορυβικός λόγος

# Όρια Χωρητικότητας για Ραδιοδιαύλους

- ♦ Παράδειγμα: Θέλουμε να αποστείλουμε δεδομένα με ρυθμό  $R=9\text{kbps}$  και έχουμε εύρος διαύλου  $B=3\text{kHz}$

$$R < C = B \log_2 (1 + SNR) \Rightarrow \frac{R}{B} < \log_2 (1 + SNR) \Rightarrow$$

$$2^{R/B} < (1 + SNR) \Rightarrow SNR > 2^{R/B} - 1 \approx 7$$

$$E_b = S \cdot T = S \cdot \frac{1}{R_b} \Rightarrow S = E_b \cdot R_b$$

όπου

- ♦  $E_b$ : η ενέργεια ανά bit

# Όρια Χωρητικότητας για Ραδιοδιαύλους

- ♦ Αντικαθιστώντας:

$$R < B \log_2 \left( 1 + \frac{E_b R_b}{N_o B} \right)$$

Για να πετύχουμε ρυθμό  $R_b$  kbps θα πρέπει:

$$\frac{E_b}{N_o} > \frac{2^{R_b/B} - 1}{\frac{R_b}{B}} = \frac{B}{R_b} (2^{R_b/B} - 1) \quad \text{ή}$$

$$\frac{E_b}{N_o} > 10 \log_{10} \left[ \frac{B}{R_b} (2^{R_b/B} - 1) \right] \quad (\text{dB})$$

Το θεωρητικό όριο της χωρητικότητας του Shannon δεν επιτυγχάνεται στην πράξη αλλά είναι δυνατό να το πλησιάσουμε

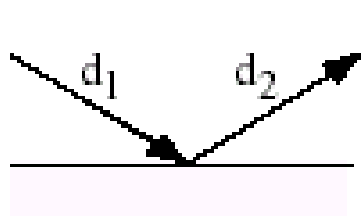
# Μηχανισμοί Διάδοσης

- ◆ **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.
- ◆ **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.

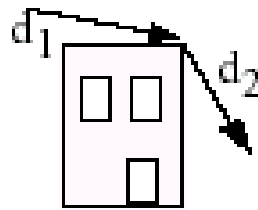
# Μηχανισμοί Διάδοσης

- ◆ **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.

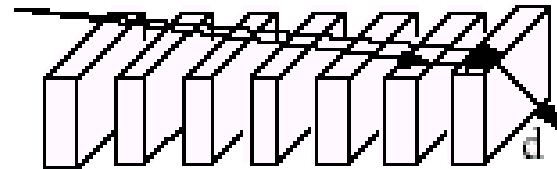
# Μηχανισμοί Διάδοσης



Reflection



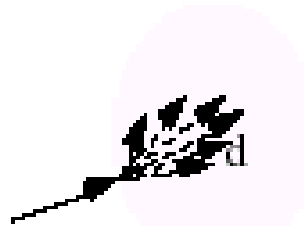
Diffraction



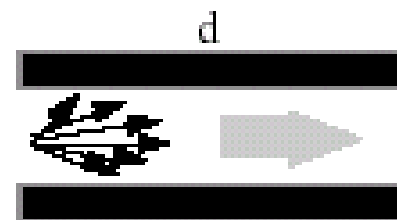
Multiple diffraction



Scattering

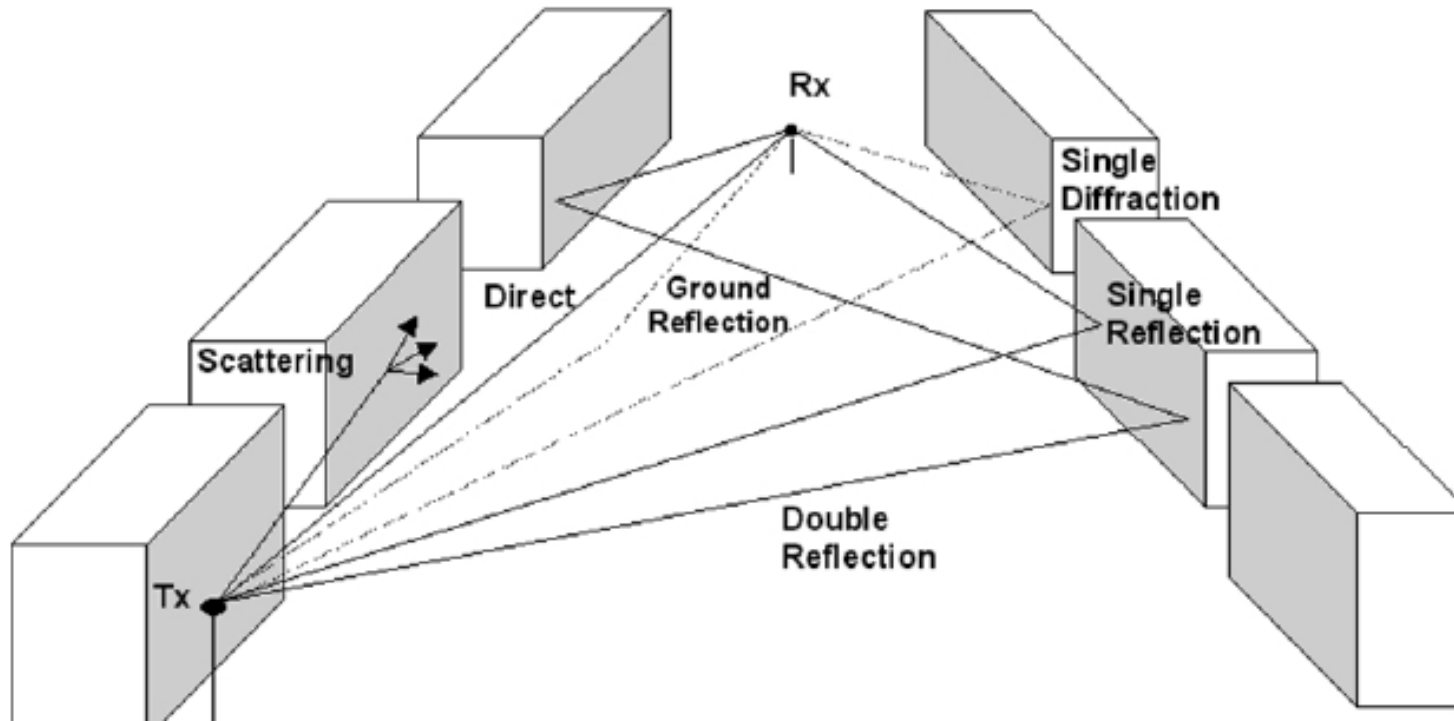


Absorption



guided wave

# Μηχανισμοί Διάδοσης



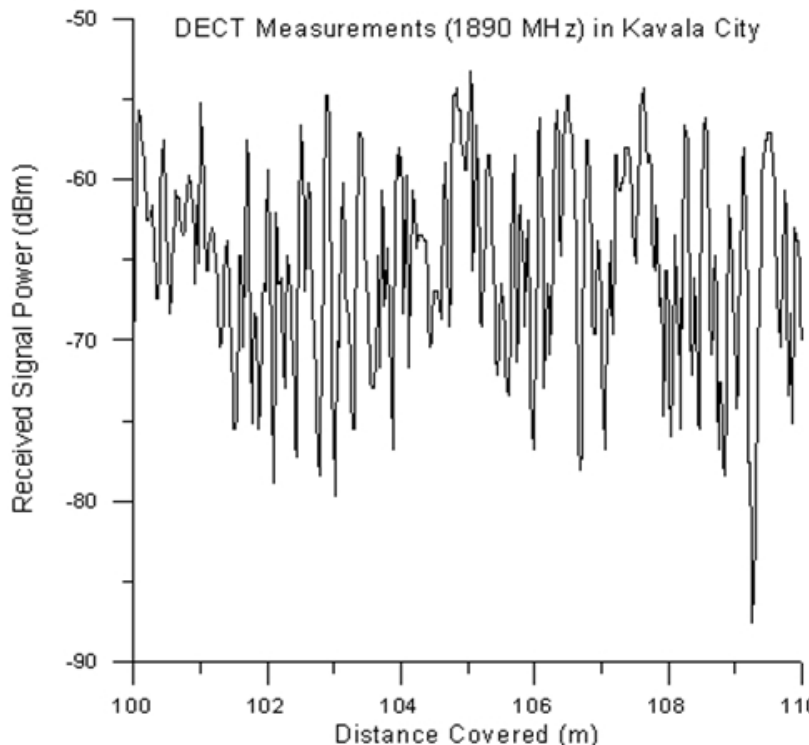
# Φαινόμενα Διάδοσης για το Ραδιοδίαυλο

- ◆ **Εξασθένιση πλάτους του σήματος (path loss)**
  - Χαρακτηρίζει την εξάρτηση της μείωσης της μέσης λαμβανόμενης ισχύος από την απόσταση πομπού-δέκτη.
- ◆ **Σκίαση (shadowing)**
  - Χαρακτηρίζει την στατιστική κατανομή της μέσης τιμής της λαμβανόμενης ισχύος, δηλαδή τη συμπεριφορά συναρτήσεως του περιβάλλοντος.
- ◆ **Πολυδιαδρομική διάδοση (multipath)**
  - Χαρακτηρίζει τις διαλείψεις 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)



# Φαινόμενα Διάδοσης για το Ραδιοδίαυλο

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



Οι Διαλείψεις διαχωρίζονται σε:

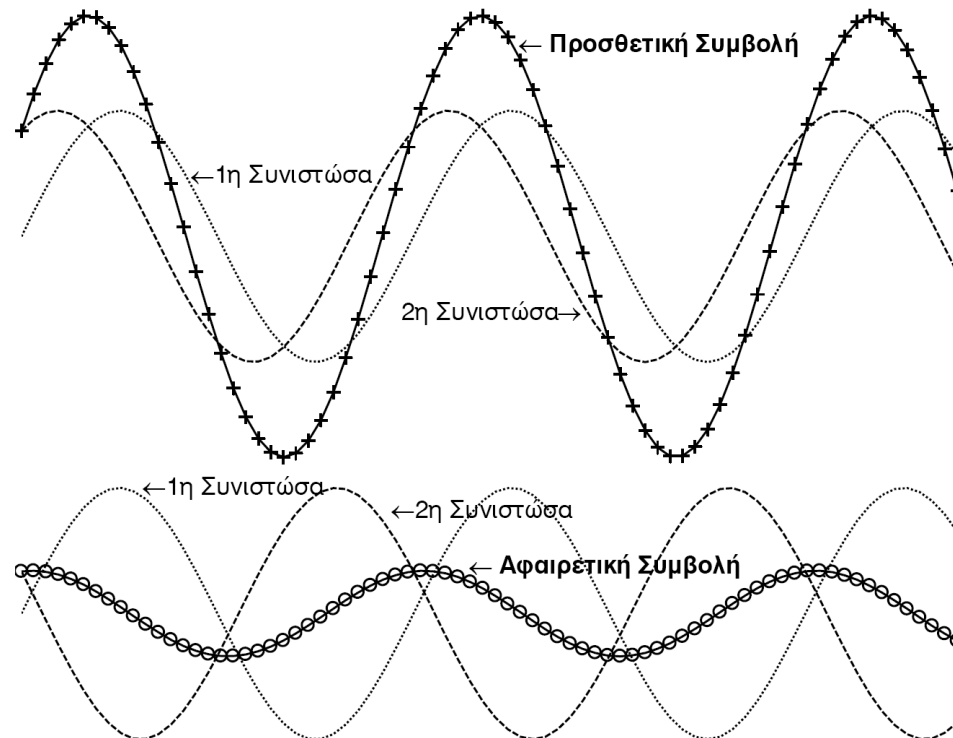
- **επίπεδες (flat fading)**: τυχαίες μεταβολές στο πλάτος
- **επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (frequency selective fading)**: διασυμβολική παρεμβολή (ISI)

# Μοντελοποίηση Ραδιοδιαύλου

- ◆ 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.

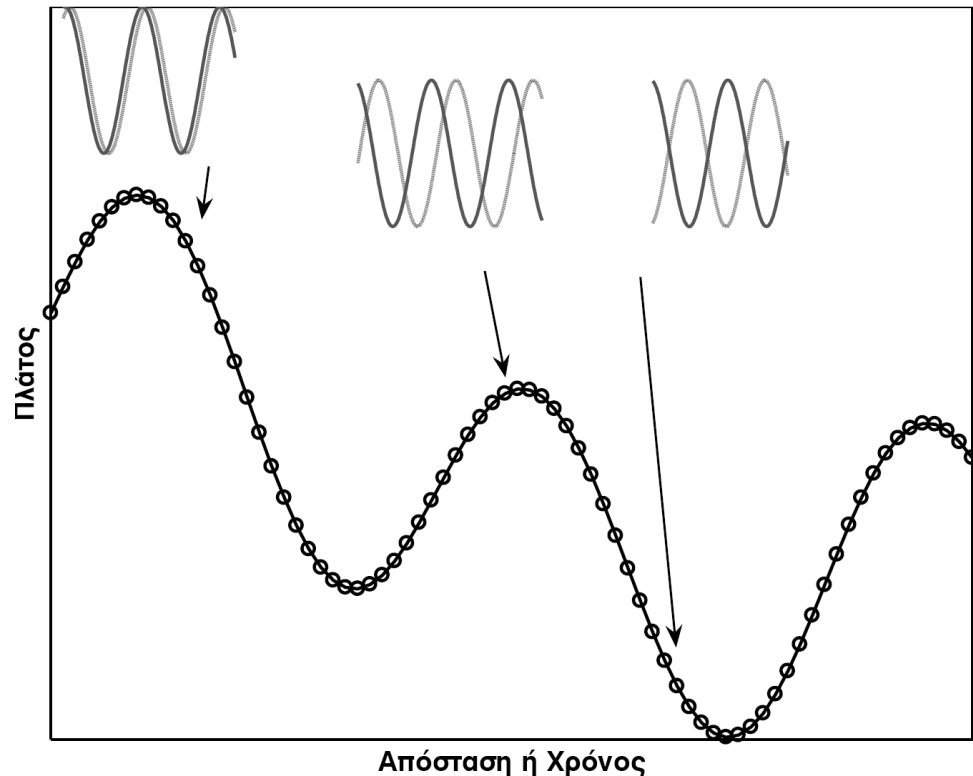
# Διαλείψεις – Χωρικό Φαινόμενο

- ◆ Στατικός Δέκτης (συμβολή συνιστωσών με διαφορετική ολίσθηση φάσης)



# Διαλείψεις – Χωρικό Φαινόμενο

- ◆ **Κινούμενος Δέκτης** (οι σχετικές ολισθήσεις φάσης μεταβάλλονται συναρτήσει της χωρικής θέσης του δέκτη)



# Διαλείψεις – Χωρικό Φαινόμενο

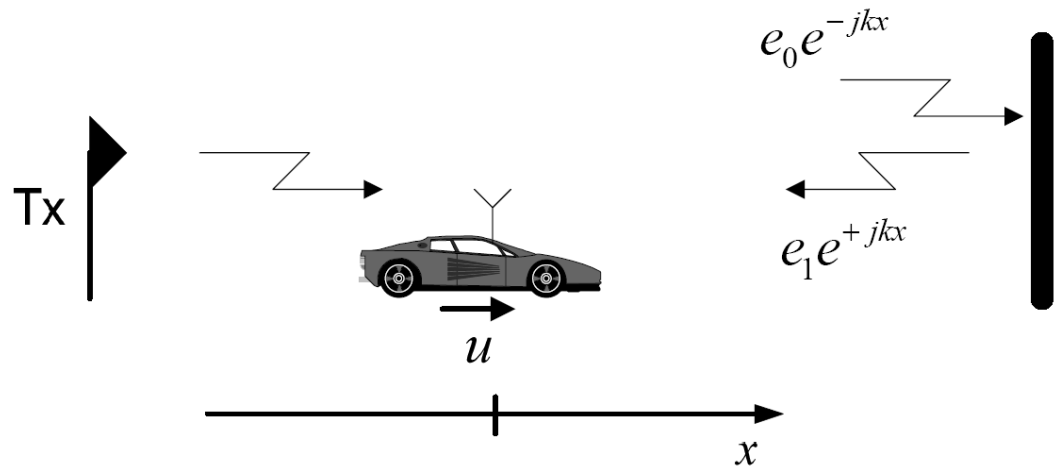
- ◆ Στην πράξη αφικνούνται πολύ περισσότερες συνιστώσες.
- ◆ Η συμβολή των συνιστωσών παράγει μια μορφή στάσιμου κύματος σαν συνάρτηση της απόστασης.
- ◆ Η εξάρτηση από την απόσταση (χωρική μετατόπιση του δέκτη) μεταφράζεται σε εξάρτηση από το χρόνο, με τη βοήθεια της ταχύτητας.
- ◆ Ο δέκτης όμως παραμένει ένας σηματολήπτης στο χώρο των διαλείψεων.

# Διαλείψεις – Χωρικό Φαινόμενο

- ♦ Μορφή Στάσιμου κύματος

$$e_o = E_o e^{j(\omega t - kx + \delta)}$$

$$e_1 = E_1 e^{j(\omega t + kx)}$$



- ♦ Θεωρούμε

$$\delta = 0$$

$$x = ut \quad k = 2\pi / \lambda$$

# Διαλείψεις – Χωρικό Φαινόμενο

$$e = e_0 + e_1 = e^{j\omega} \left( E_o e^{-jkx} + E_1 e^{jkx} \right)$$
$$= e^{j\omega} \left[ E_o \cos(kx) - jE_o \sin(kx) + E_1 \cos(kx) + jE_1 \sin(kx) \right]$$

$$R = \sqrt{(E_o + E_1)^2 \cos^2(kx) + (E_o - E_1)^2 \sin^2(kx)}$$

Για  $\rho = E_1/E_o = 1$

$$SWR = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} = \frac{E_o + E_1}{E_o - E_1} \rightarrow \infty$$

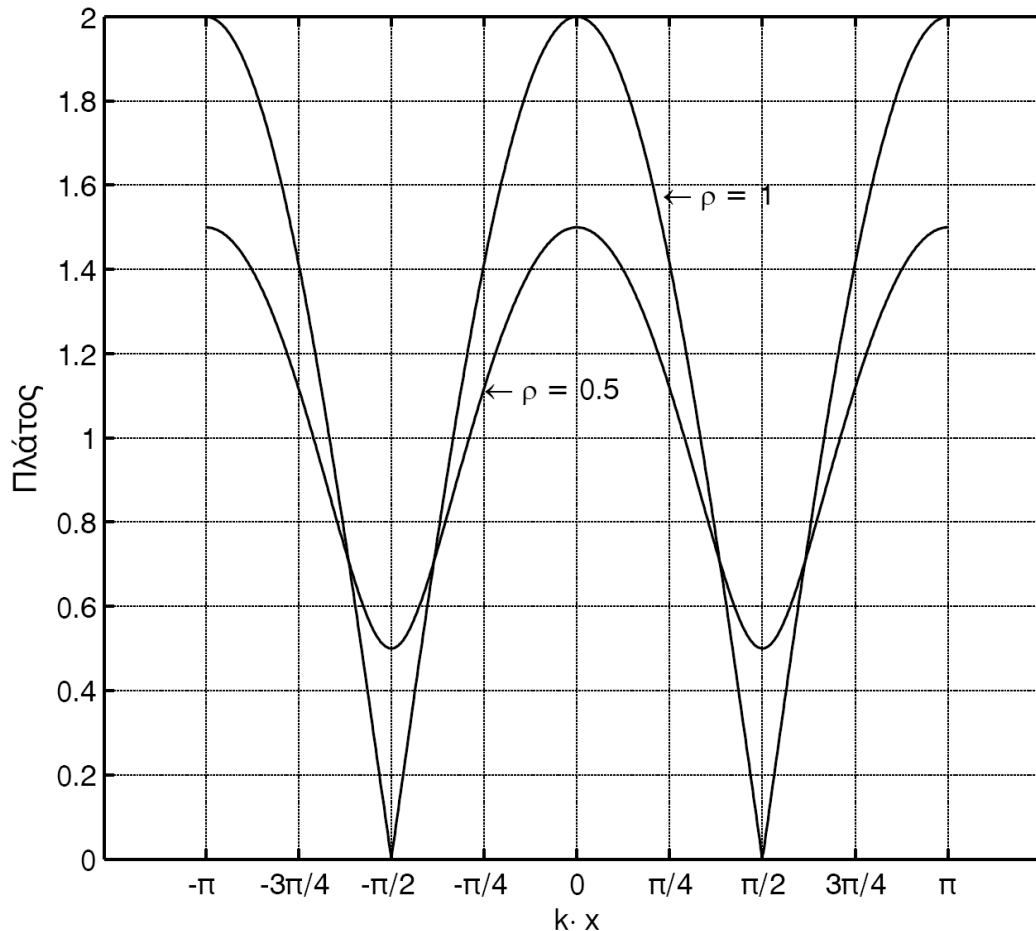
$$R = 2 |\cos(kx)|$$

Ενώ για  $\rho = 0.5$

$$SWR = 3$$

$$R = \sqrt{(1.5)^2 \cos^2(kx) + (0.5)^2 \sin^2(kx)}$$

# Διαλείψεις – Χωρικό Φαινόμενο



Είναι προφανής η εμφάνιση διαλείψεων κάθε  $\lambda/2$

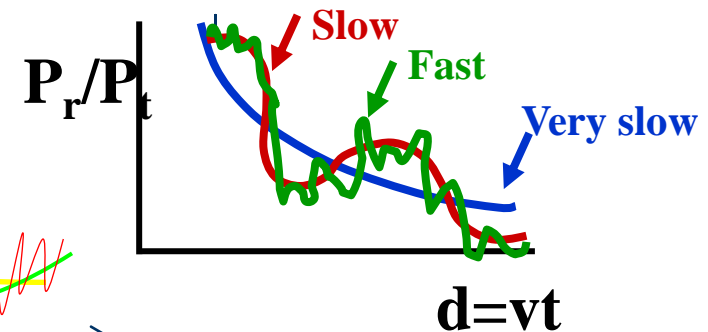


# Είδη Διαλείψεων

Επίδραση Μεγάλης Κλίμακας (Απώλειες διαδρομής)

Επίδραση Μεσαίας Κλίμακας (Σκιάσεις)

Επίδραση Μικρής Κλίμακας



# Είδη Διαλείψεων

- ◆ **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

- ◆ **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 του.
  - Έχουμε μεταβολή των χαρακτηριστικών του σήματος σε πλάτος και φάση λόγω μετατόπισης του κινητού σταθμού, που μπορούν να φθάσουν και τα 20-30dB.
  - Οι διαλείψεις οφείλονται στη χρονική διασπορά του σήματος πολυδιαδρομικής διάδοσης και στη χρονική μεταβολή του διαύλου λόγω μετατόπισης του δέκτη, αλλά και των σκεδαστών που συμμετέχουν στη διάδοση.

# 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.

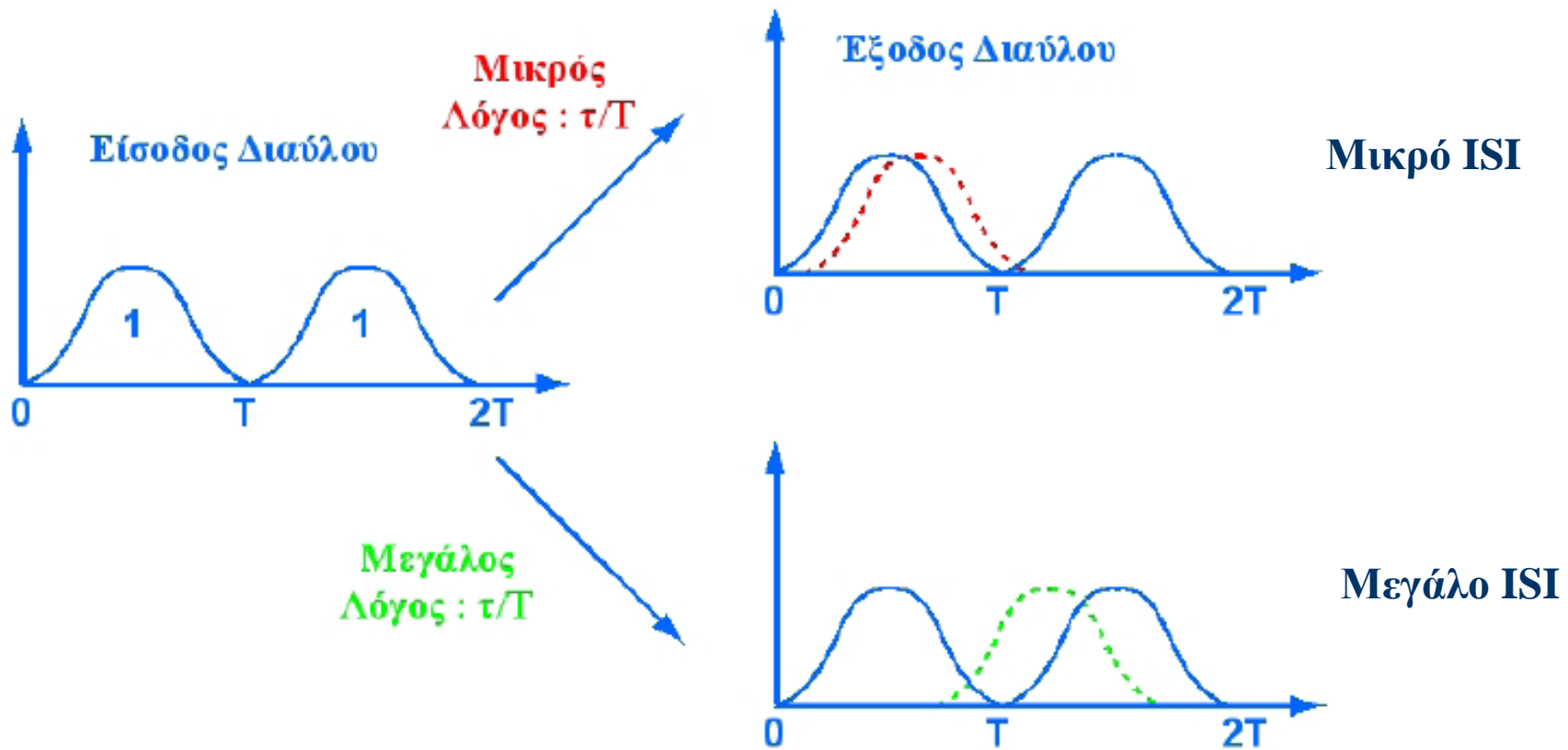
# Χρονική Διασπορά και ISI

- ◆ Θεωρούμε 2 μόνο συνιστώσες στο δέκτη

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

- ◆ Σημαντική παράμετρος είναι η διαφορά των καθυστερήσεων  $\tau = \tau_1 - \tau_0$ , που καθορίζει το μέγεθος της χρονικής διασποράς (delay spread).
- ◆ Αυξανομένης της διαφοράς αυξάνεται η διασυμβολική παρεμβολή (ISI).

# Χρονική Διασπορά και ISI



# Χρονική Διασπορά και ISI

- ♦ Η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

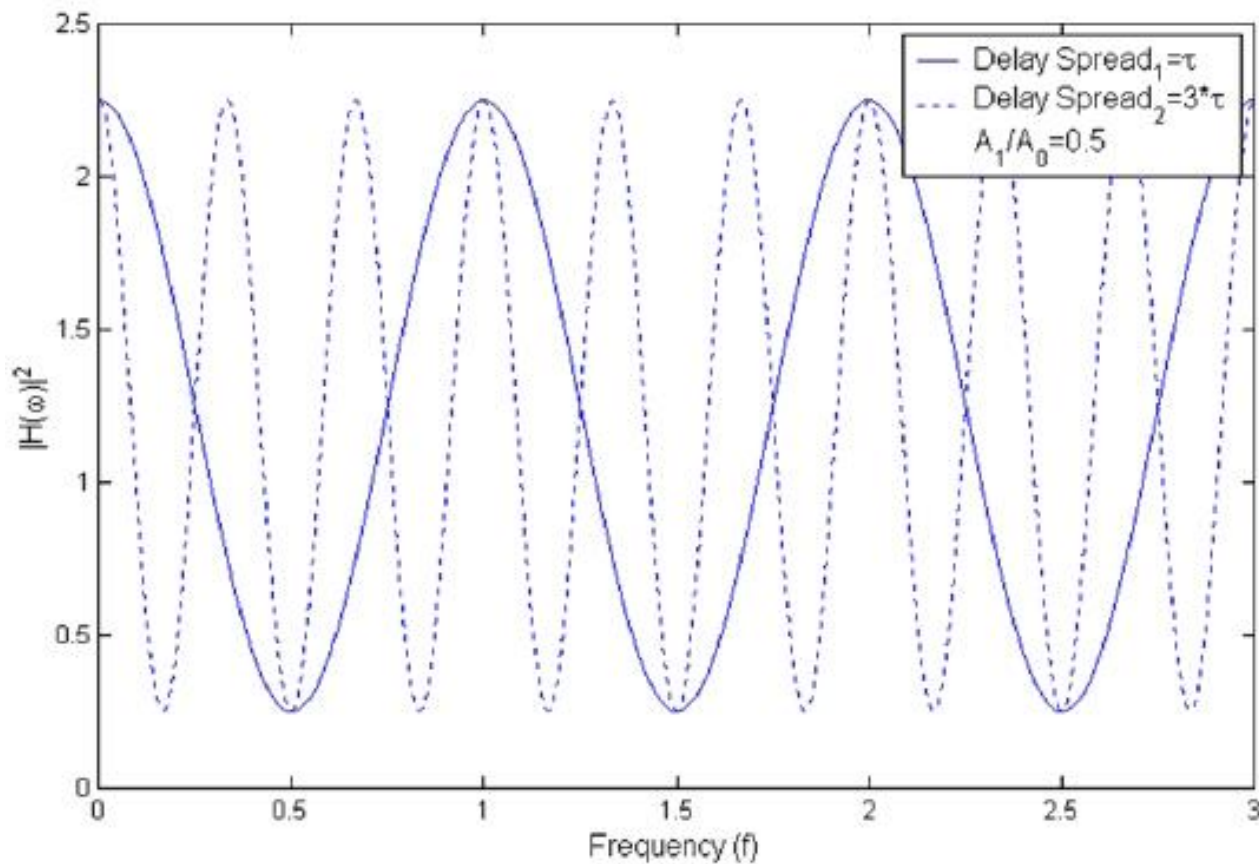
$$\begin{aligned} H(\omega) &= A_o e^{-j\omega\tau_o} + A_1 e^{-j\omega(\tau_o+\tau)} \\ &= A_o e^{-j\omega\tau_o} (1 + S e^{-j\omega\tau}) \quad (S = A_1 / A_o) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |H(\omega)| &= \left| A_o e^{-j\omega\tau_o} (1 + S e^{-j\omega\tau}) \right| \\ &= \left| A_o + A_1 \cos(\omega\tau) - jA_1 \sin(\omega\tau) \right| \\ &= \sqrt{[A_o + A_1 \cos(\omega\tau)]^2 + [A_1 \sin(\omega\tau)]^2} \end{aligned}$$

$$|H(\omega)|^2 = A_o^2 [1 + S^2 + 2S \cos(\omega\tau)]$$

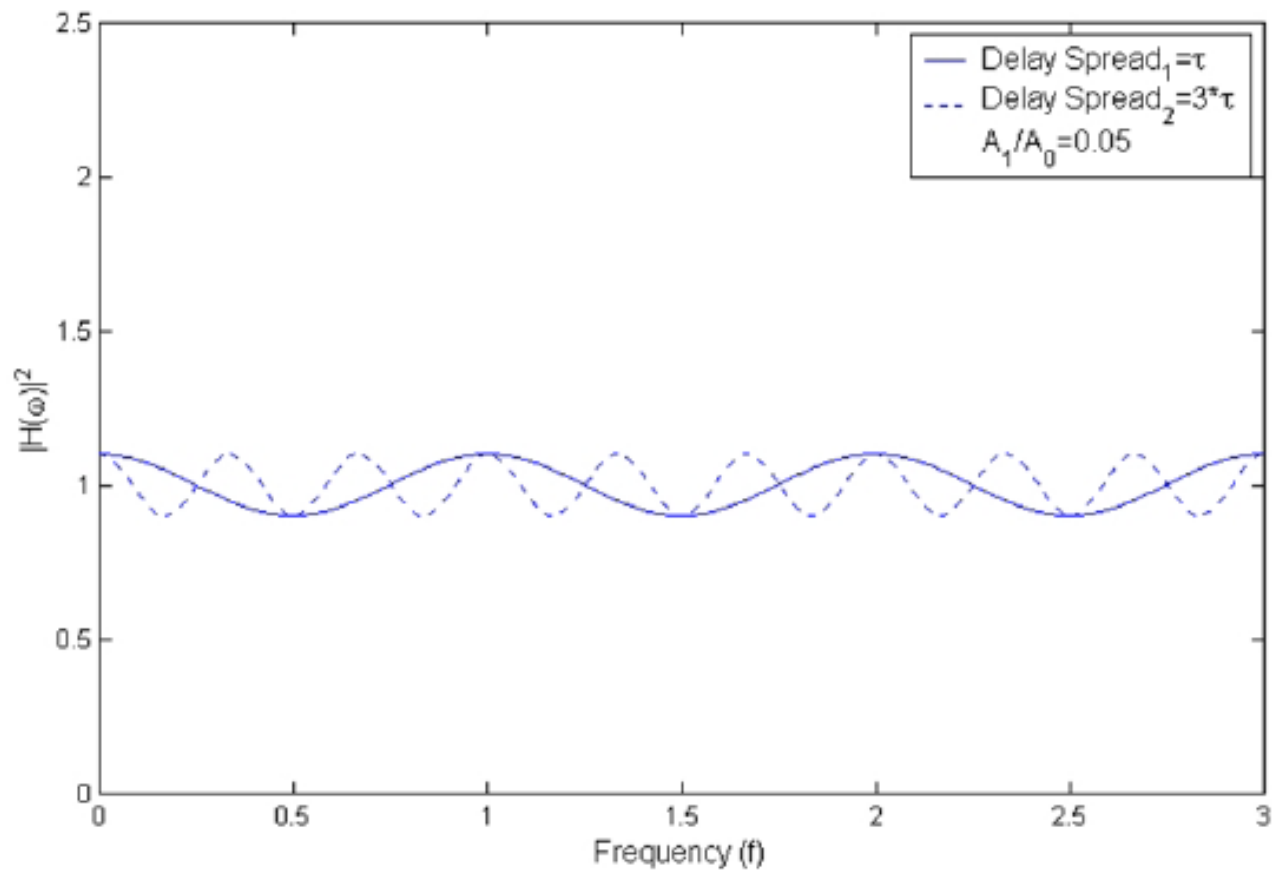
Περιοδική  
μεταβολή με  
περίοδο  $\tau$

# Χρονική Διασπορά και ISI

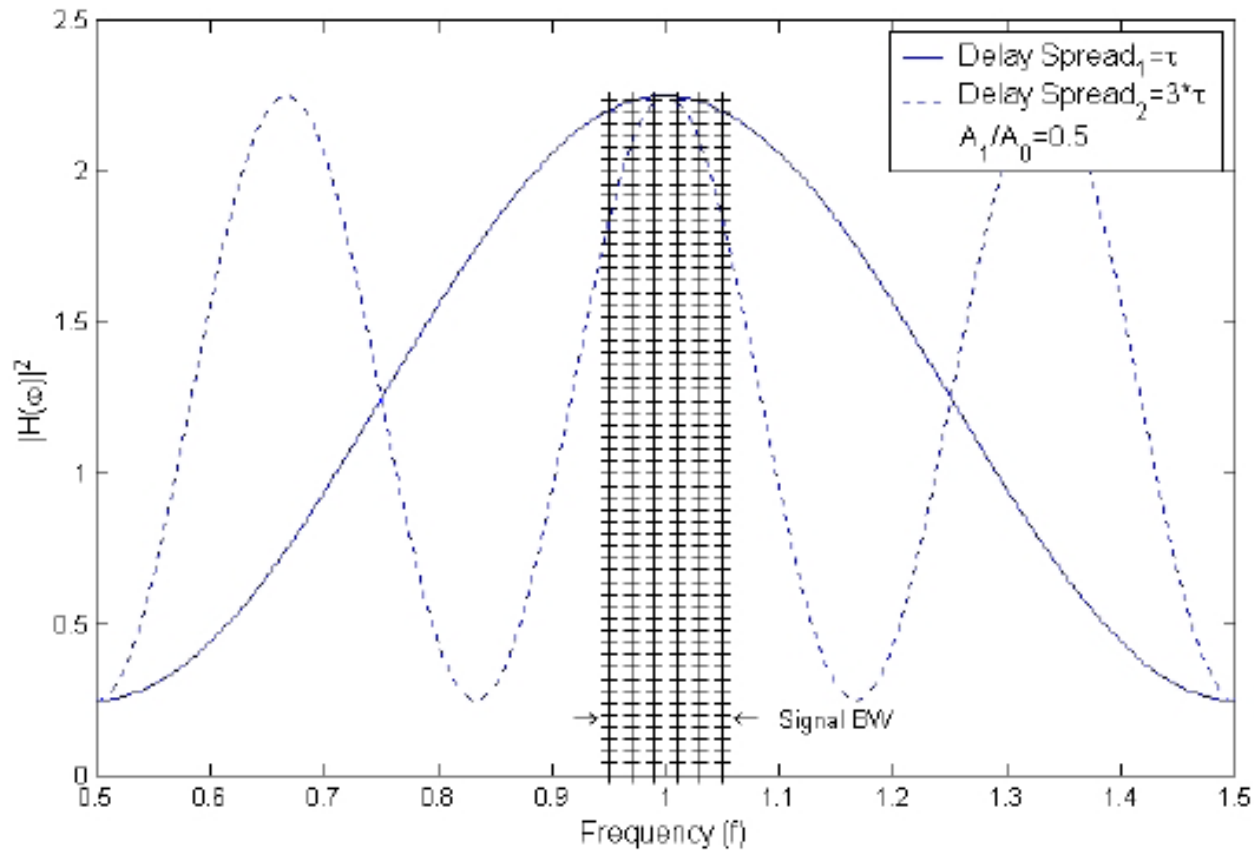




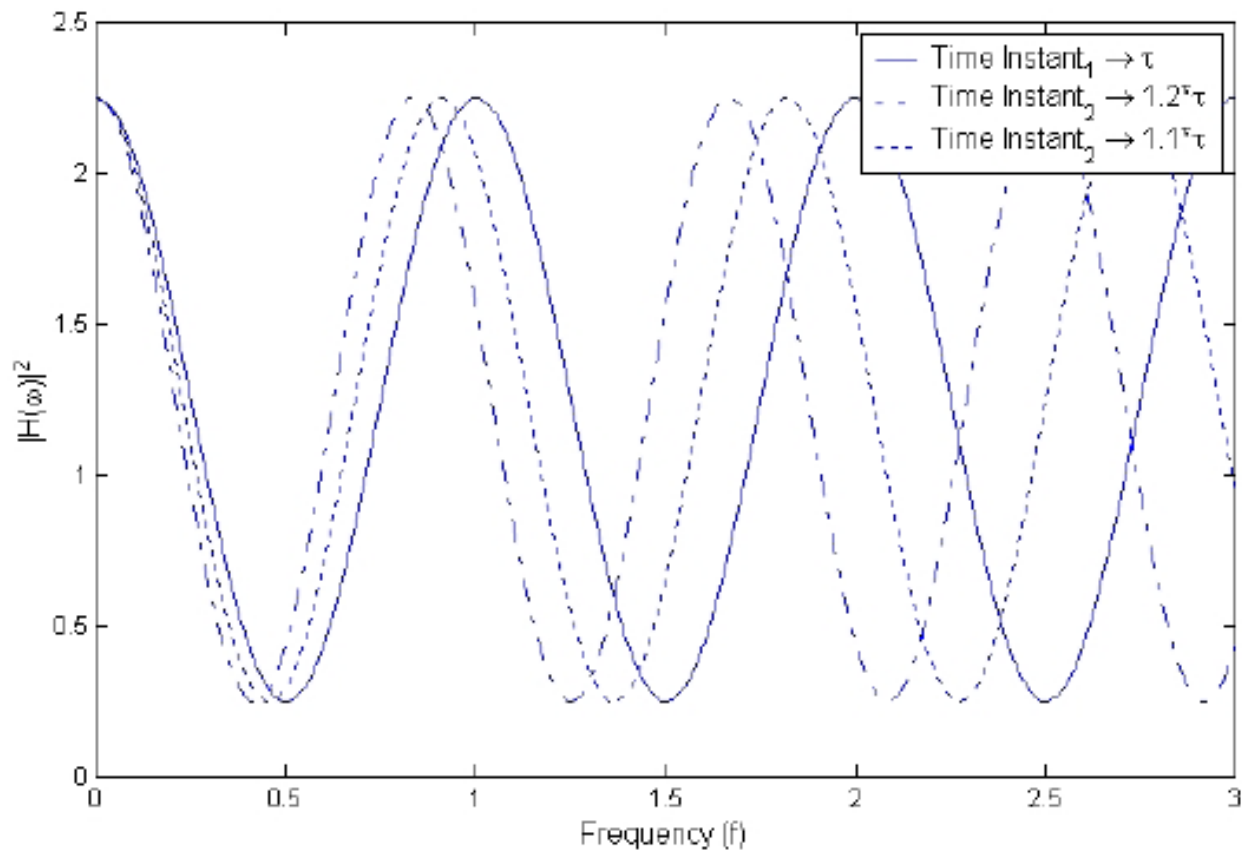
# Χρονική Διασπορά και ISI



# Χρονική Διασπορά και ISI

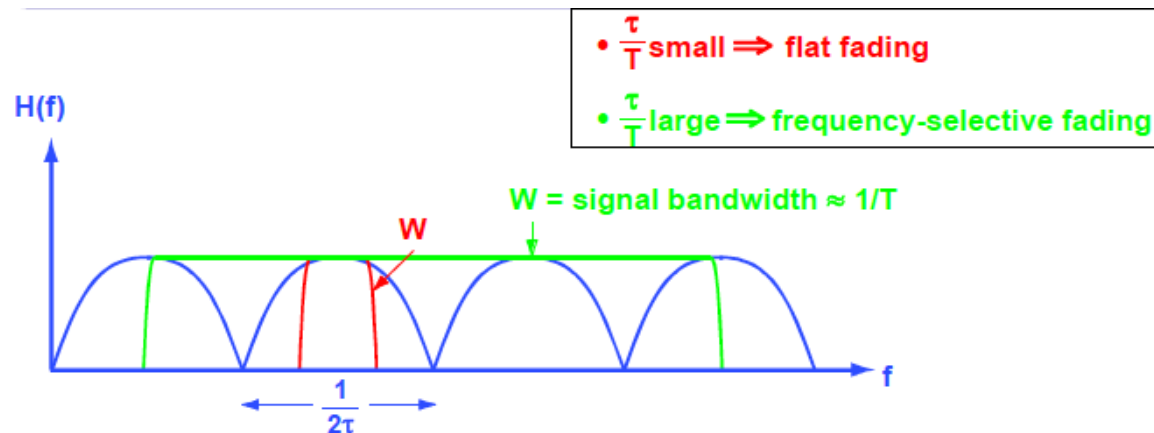


# Χρονική Διασπορά και ISI



# Χρονική Διασπορά και ISI

- ◆ **Επίπεδες Διαλείψεις** στα προηγούμενα : 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  $\tau$ , αν το  $S$  είναι μικρό, τότε δεν υπάρχει σημαντικό πρόβλημα διαλείψεων.

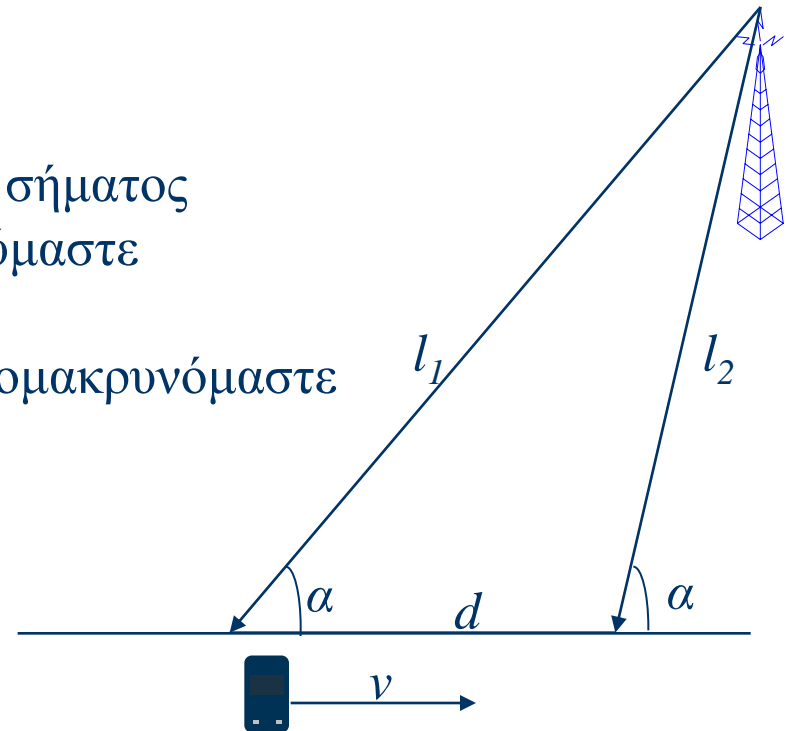


# Ολίσθηση Doppler

- ◆ 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

- ◆ Κινητό με ταχύτητα  $v$  διανύει απόσταση  $d$
- ◆ Διαφορά διαδρομής  $\Delta l$  σε χρόνο  $\Delta t$

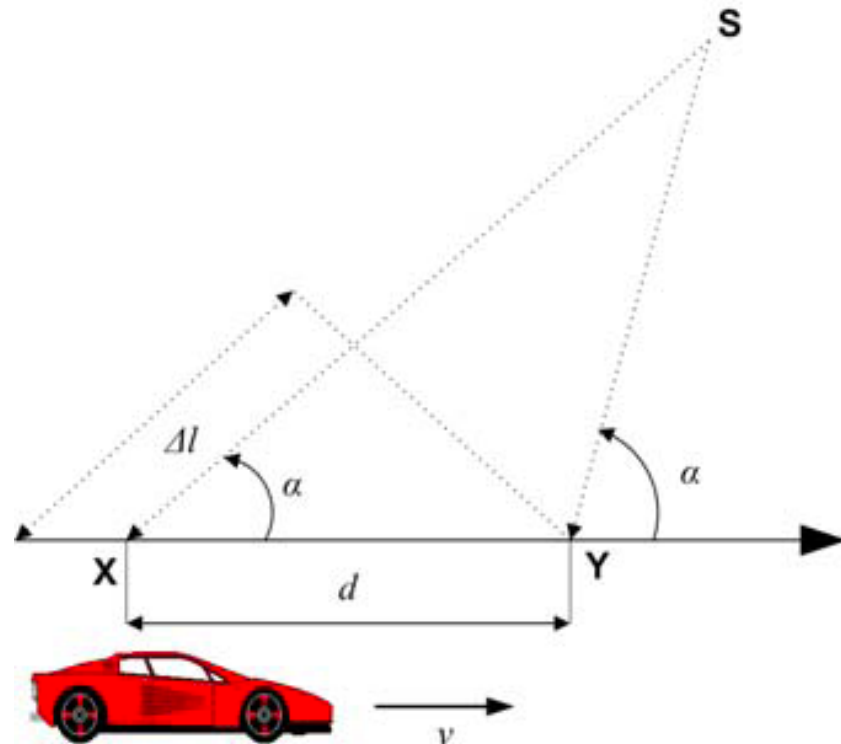
$$\Delta l = d \cos a = u \Delta t \cos a$$

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

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

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

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

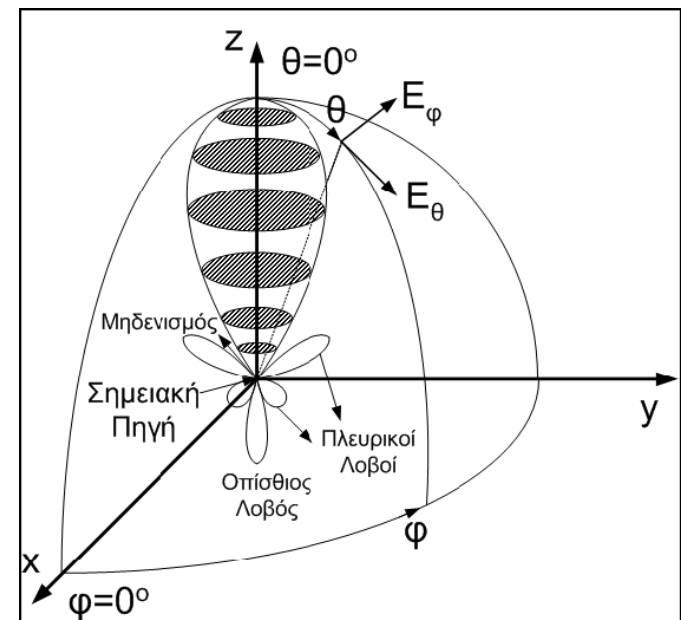
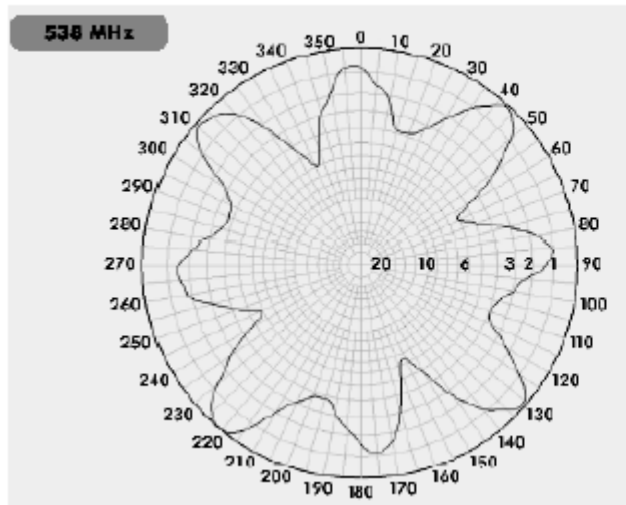


# Κεραίες

- ◆ Η κεραία αποτελείται από σύστημα αγωγών κατάλληλου σχήματος, το οποίο τροφοδοτούμενο (διεγερόμενο) κατάλληλα από ρεύματα υψηλής συχνότητας, δημιουργεί ισχυρά Η/Μ πεδία ή κύματα στον περιβάλλοντα χώρο, τα οποία είναι της ίδιας συχνότητας και μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η μετάδοση της Η/Μ ενέργειας.
- ◆ Το Η/Μ πεδίο εξαρτάται από την πυκνότητα ρεύματος που επάγεται στην επιφάνεια της κεραίας.
- ◆ Το σχήμα, ο τρόπος διέγερσης, και η συχνότητα προσδιορίζουν τις βασικές ιδιότητες λειτουργίας της κεραίας.

# Διάγραμμα Πεδίου Κεραίας

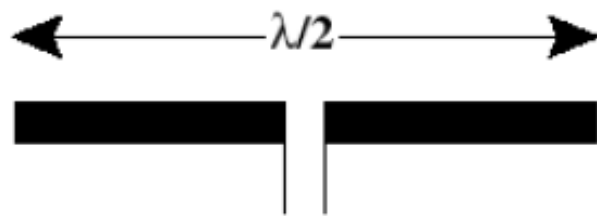
- ◆ **Διάγραμμα ακτινοβολίας** (*Radiation pattern*): Γραφική απεικόνιση των ιδιοτήτων ακτινοβολίας σε γράφημα δύο διαστάσεων.
- ◆ **Εύρος λοβού** (*Beam width*): Μέτρηση της κατευθυντικότητας της κεραίας.
- ◆ **Διάγραμμα λήψης** (*Reception pattern*): Ισοδύναμο της κεραίας λήψης του διαγράμματος ακτινοβολίας.



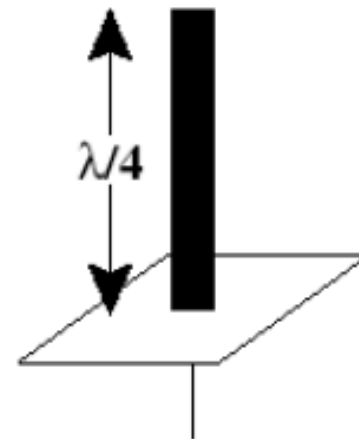


# Είδη Κεραιών

- ◆ Ισοτροπική κεραία (ιδανική)
  - Ακτινοβολεί την ισχύ ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις
- ◆ Κεραίες Δίπολα
  - Ημίσεως κύματος δίπολο κεραία (Half-wave dipole antenna ή κεραία Hertz)
  - Τέταρτο του κύματος κάθετη κεραία (Quarter-wave vertical antenna - ή κεραία Marconi)
- ◆ Παραβολική ανακλαστική κεραία (Parabolic Reflective Antenna)



(a) Half-wave dipole



(b) Quarter-wave antenna

# Κέρδος Κεραίας

- ◆ Κέρδος κεραίας,  $G$ : Ισχύς εξόδου προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση συγκρινόμενη με την αντίστοιχη ισχύ που παράγεται σε οποιαδήποτε κατεύθυνση από μία τέλεια ομοκατευθυντική κεραία.

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi f^2 A_e}{c^2}$$

- ◆  $G$ : κέρδος κεραίας (antenna gain)
- ◆  $A_e$ : ενεργός επιφάνεια (effective area)
- ◆  $f$ : συχνότητα φέροντος (carrier frequency)
- ◆  $c$ : ταχύτητα φωτός ( $3 \times 10^8 \text{m/s}$ )
- ◆  $\lambda$ : μήκος κύματος

# EIRP & ERP

- ◆ Ισοδύναμη Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενη Ισχύς (*Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP*)

$$EIRP(\theta, \varphi) = \Omega_A G_g(\theta, \varphi)$$

$$EIRP = \Omega_A G_{\max}$$

- ◆ Ενεργός Ακτινοβολούμενη Ισχύς (*Effective Radiated Power, ERP*)

$$ERP(\theta, \varphi) = \Omega_A G_{gdipole}(\theta, \varphi)$$

$$ERP = \Omega_A G_{\max dipole}$$

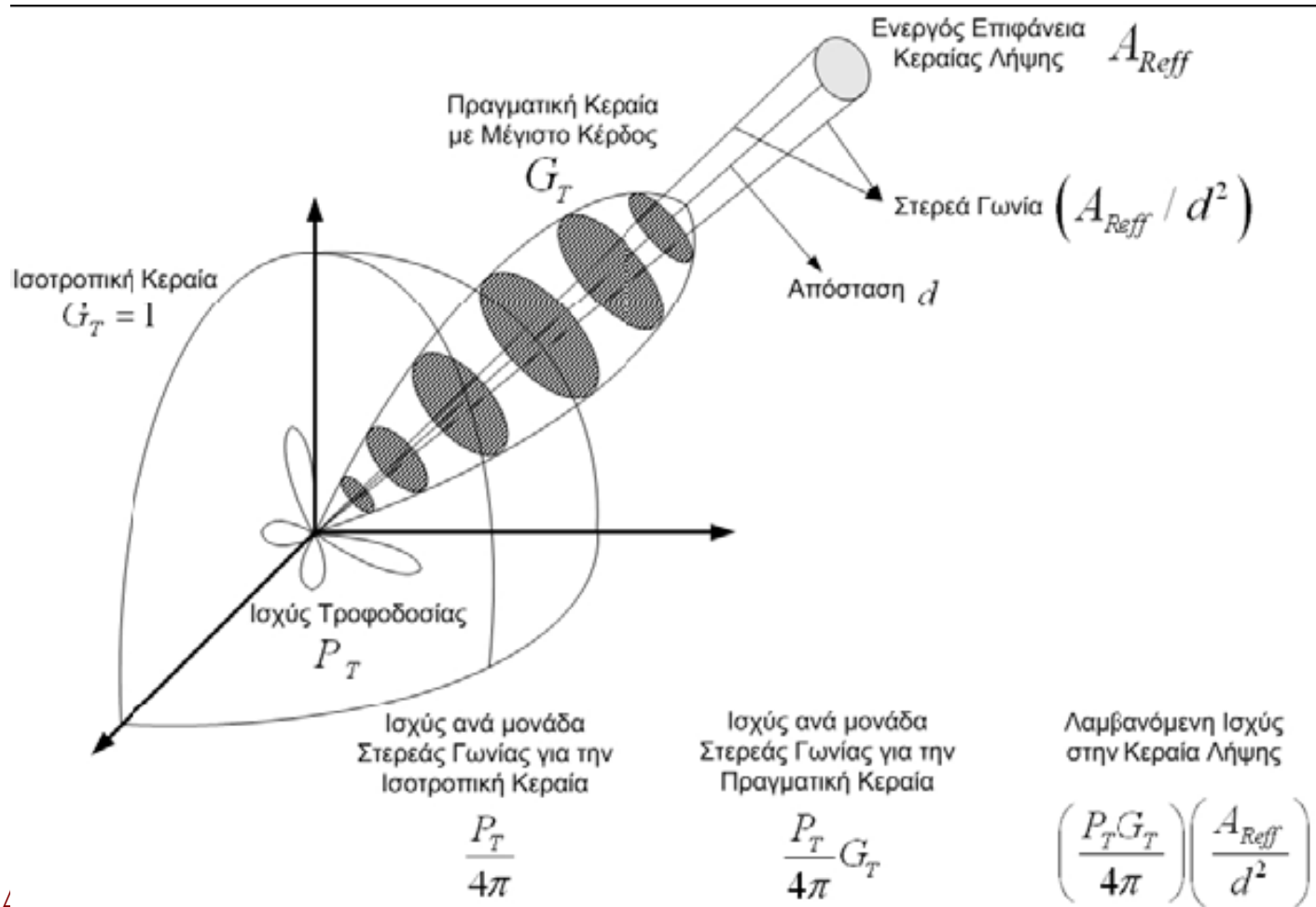
$$G_g(\theta, \varphi) \text{ (dBi)} = G_{gdipole}(\theta, \varphi) \text{ (dBd)} + 2.15 \text{ (dBi)}$$

$$EIRP \text{ (dBW)} = ERP \text{ (dBW)} + 2.15$$

# Απώλειες Διάδοσης

- ◆ **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



# Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

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

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

Εξίσωση H. Friis:

$$\begin{aligned} \Omega(d) &= \Phi(d) A_{Reff} = \left( \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \right) \left( \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right) \\ &= P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \end{aligned}$$

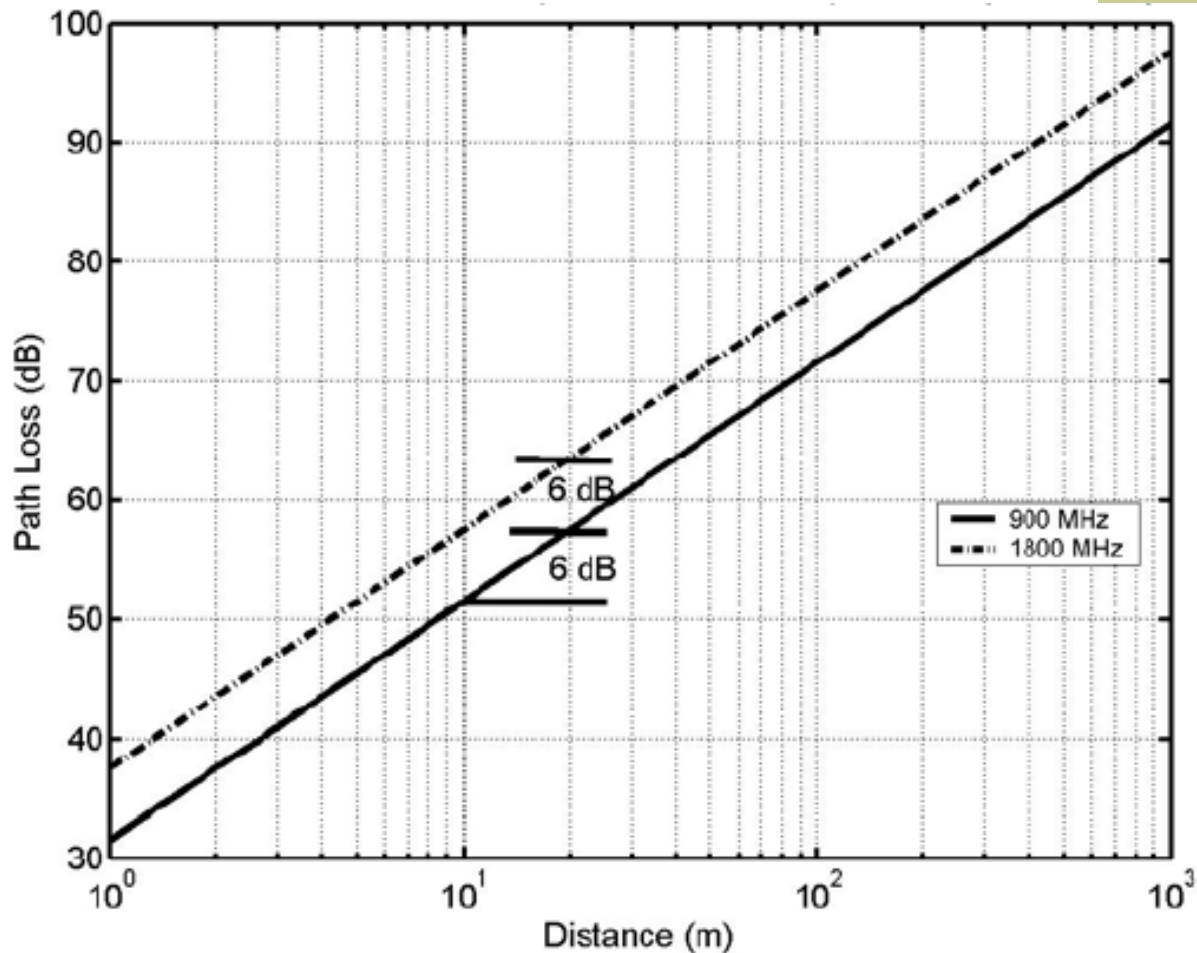
# Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

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

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

**Κανόνας : 20 dB/decade**

# Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο



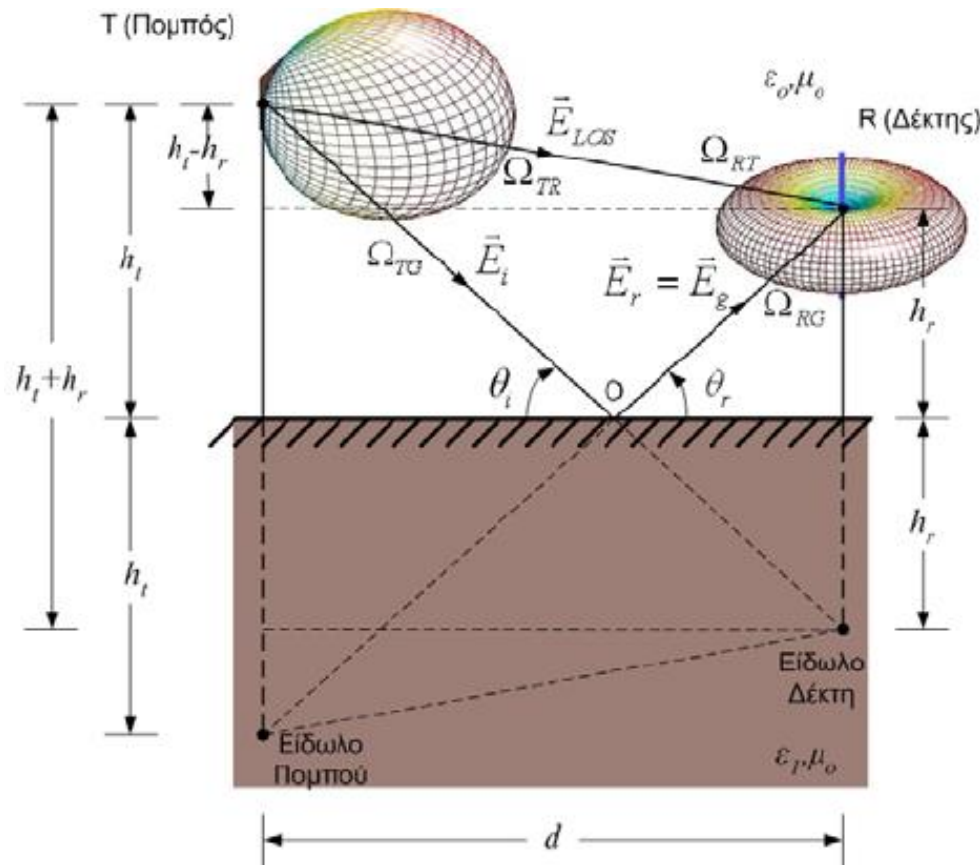


# Απώλειες στον Ελεύθερο Χώρο

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

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

# Μοντέλο Επίπεδης Γης



• 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.

# Μοντέλο Επίπεδης Γης

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

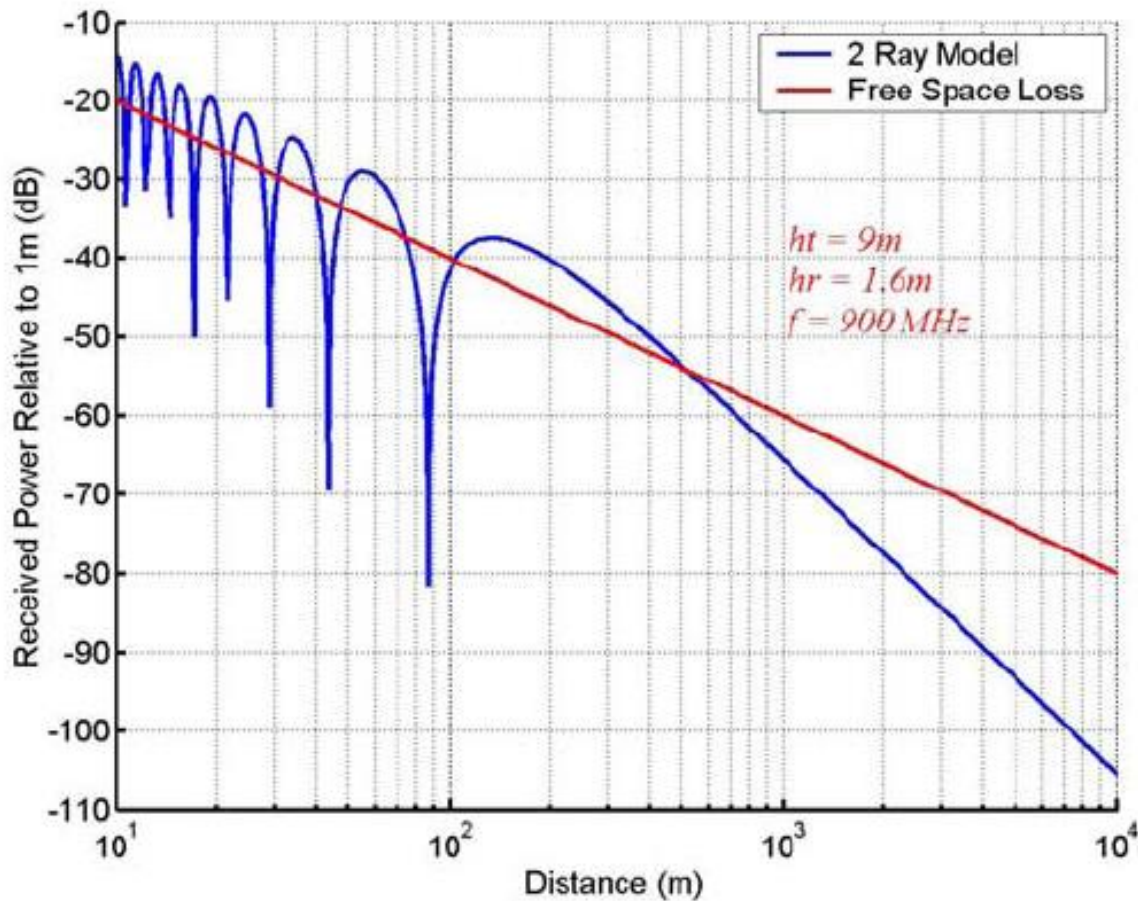
προσεγγιστική  
σχέση

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

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

χωρίς  
προσέγγιση

# Μοντέλο Επίπεδης Γης



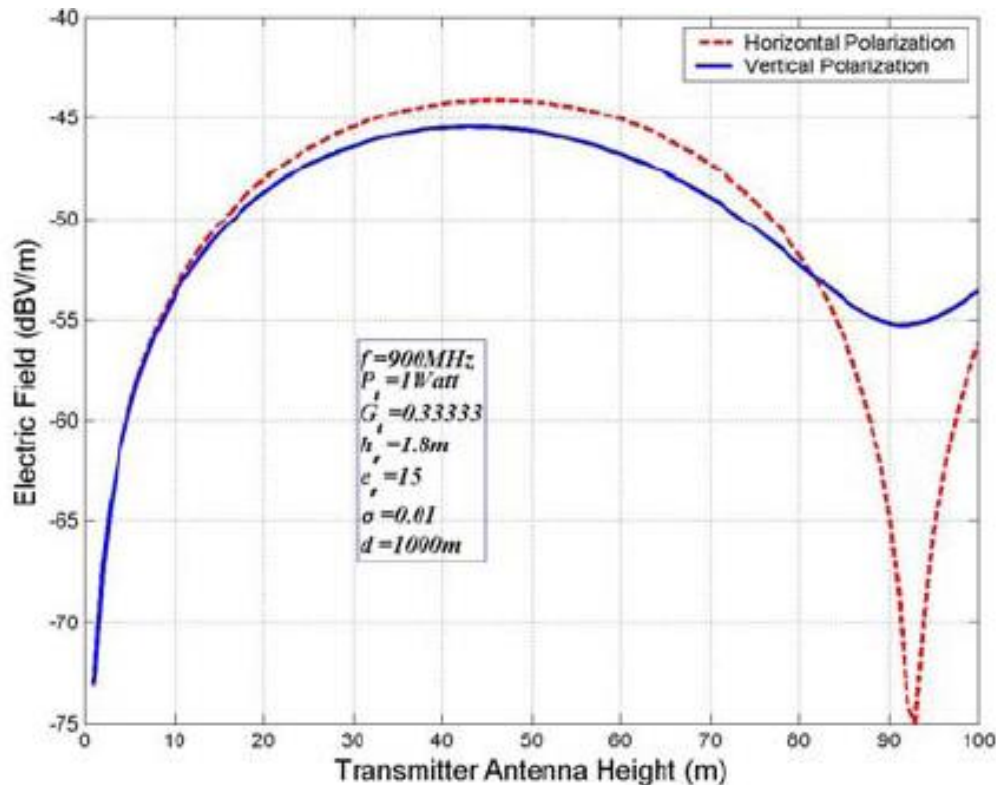
Breakpoint

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

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

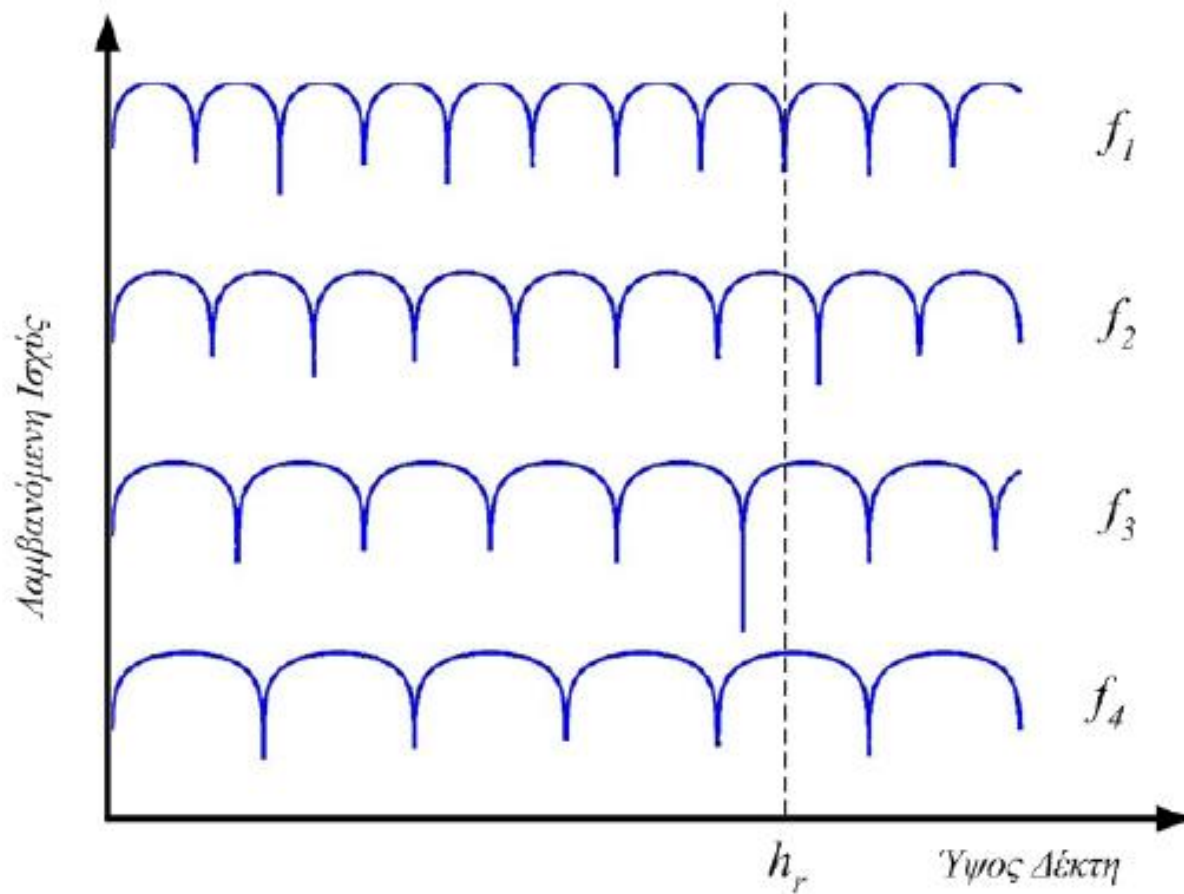
# Μοντέλο Επίπεδης Γης

## ◆ Κέρδος Ύψους Κεραίας



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

# Μοντέλο Επίπεδης Γης



# Απώλειες Διάδοσης

- ◆ 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, δηλαδή για την περιοχή που το μέτωπο του κύματος μπορεί να θεωρείται επίπεδο, είναι η περιοχή πέρα από την απόσταση:

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

όπου  $D$  είναι η μέγιστη γραμμική διάσταση της κεραίας.

# Απώλειες Διάδοσης

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

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

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

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



# Μοντέλο Απλής Κλίσης

- ◆ 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

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

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

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

# Μοντέλο Απλής Κλίσης

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

